

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پردیس بین‌المللی خوارزمی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی طراحی کاربردی

بررسی ارتعاشات نانو تیوب‌های حاوی سیال مغروق در یک محیط سیالی ویسکوز

نگارنده:

مزدک قبادی

استاد راهنما:

دکتر امیر جلالی

بهمن ۱۳۹۵

پاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش راهنمونان شد و به هم نشینی رهروان علم و دانش
مفتخران نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیای ساخت.

تقدیم به

پدر و مادر و برادر عزیز و مهربانم که در سختی ها و دشواری های زندگی همواره یاری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم
بوده اند.

شکرو سپاس

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر امیر جلالی که در کمال سع و صدر، با حسن خلق و فروتنی، از پیچ کجی در این

عرصه بر

من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند. امیدوارم با پایان این کار موجبات رضایت ایشان را

فراهم نموده باشم.

مزدک قبادی

بهمن ۱۳۹۵

تعهد نامه

اینجانب مزدک قبادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک طراحی کاربردی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی ارتعاشات نانو تیوب های حاوی سیال مغروق در یک محیط سیالی ویسکوز تحت راهنمایی دکتر امیر جلالی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پایان نامه به بررسی ارتعاشات یک نانو تیوب کربنی دوجداره، دارای لایه پیزوالکتریک در جداره دوم و همچنین حاوی جریان سیال در جداره داخلی پرداخته شده است؛ به طوری که کل این مجموعه در یک سیال دیگر مغروق می باشد. در این تحلیل نانو تیوب به عنوان یک تیر اویلر برنولی مدل سازی گردیده و جهت بررسی تأثیر اندازه از نظریه غیرموضعی استفاده شده است. پس از نوشتن معادلات انرژی کرنشی، جنبشی و کار سیال خارجی و داخلی با استفاده از معادله همیلتون معادله حاکم بر حرکت سیستم به دست آمده است. جهت حل معادله حاکم، از روش گلرکین به کار برده شده و روش نیمه عددی مقیاس های چندگانه استفاده گردیده است. از تحلیل های انجام شده می توان دریافت که افزایش ضخامت سیال خارجی موجب افزایش پایداری می گردد و همچنین سیال خارجی دارای یک ضخامت بحرانی است که بعد از آن تأثیر افزایش ضخامت ناچیز می گردد.

کلیدواژه: نانولوله کربنی، ارتعاشات غیرخطی، تیر اویلر برنولی، تئوری الاستیسیته غیرموضعی.

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه و مروری بر کارهای انجام شده	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ تاریخچه نانو تکنولوژی و انواع مواد نانو	۲
۳-۱ نانولوله های کربنی	۴
۱-۳-۱ خواص	۵
۲-۳-۱ کاربرد	۶
۴-۱ نانو لایه ها	۸
۱-۴-۱ مواد پیزوالکتریک	۹
۵-۱ سابقه موضوعی طرح	۱۲
۶-۱ هدف طرح	۱۶
فصل دوم استخراج معادلات حاکم و تحلیل مسئله	۱۷
۱-۲ مقدمه	۱۸
۲-۲ مدل مسئله	۱۸
۳-۲ معادله حاکم بر لوله با لایه پیزوالکتریک حاوی سیال واقع در بستر سیال بدون در نظر گرفتن اثر حرارت	۱۹
۱-۳-۲ انرژی پتانسیل	۲۰
۲-۳-۲ انرژی سینتیک یا جنبشی	۲۱
۳-۳-۲ کار جریان خارجی و داخلی	۲۳
۴-۳-۲ به دست آوردن معادله حاکم	۲۴
۴-۲ حل معادله ارتعاشات	۲۷
فصل سوم تحلیل نتایج	۳۱
۱-۳ بررسی صحت مدل و روابط به دست آمده	۳۲
۲-۳ آنالیز ارتعاشات تیوب حاوی سیال مغروق در سیال دیگر به همراه لایه پیزوالکتریک	۳۷
فصل چهارم نتیجه گیری و پیشنهادات	۴۵
۱-۴ نتیجه گیری	۴۶

۴-۲ پیشنهادات جهت ادامه کار ۴۸

منابع و مأخذ ۴۹

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) شکل‌گیری نانولوله‌ها از صفحات گرافیت ۵
- شکل (۱-۲) مدل مسئله موردبررسی ۱۸
- شکل (۲-۲) دیاگرام المان سرعت جریان سیال داخلی ۲۲
- شکل (۱-۳) نمودار نسبت سرعت بحرانی به پارامتر کوچکی اندازه (غیرموضعی) ۳۴
- شکل (۲-۳) نمودار نسبت فرکانس بر حسب دامنه متغیر با سرعت بی بعد سیال داخلی .. ۳۵
- شکل (۳-۳) نسبت ضخامت پیزوالکتریک به نسبت فرکانس در مدل مسئله و مقاله
موردبررسی ۳۶
- شکل (۴-۳) نسبت ضخامت پیزوالکتریک به نسبت فرکانس در مدل مسئله ۳۶
- شکل (۵-۳) تغییرات پارامتر غیرموضعی در نمودار نسبت فرکانس به سرعت ۳۸
- شکل (۶-۳) تأثیر ولتاژ اعمالی در نمودار نسبت فرکانس به سرعت ۳۸
- شکل (۷-۳) نسبت دامنه به فرکانس ۳۹
- شکل (۸-۳) نسبت دامنه به فرکانس متغیر با پارامتر غیرموضعی ۴۰
- شکل (۹-۳) نسبت دامنه به فرکانس متغیر با ضخامت پیزوالکتریک ۴۰
- شکل (۱۰-۳) تأثیر سرعت بر نسبت دامنه به فرکانس رزونانس ۴۱
- شکل (۱۱-۳) تأثیر بر نسبت دامنه به فرکانس رزونانس ۴۲
- شکل (۱۲-۳) تأثیر η های پایین تر بر نسبت دامنه به فرکانس رزونانس ۴۲
- شکل (۱۳-۳) تأثیر η بر نمودار دامنه بر حسب دامنه ولتاژ هارمونیک ۴۳

فهرست جداول

- جدول (۱-۳) پارامترهای مسئله مقاله [۱۵] جهت صحت سنجی ۳۲
- جدول (۲-۳) سرعت بحرانی به دست آمده در مقایسه با مقالات مورد بررسی ۳۳
- جدول (۳-۳) پارامترهای مسئله مقاله [۱۵] جهت صحت سنجی ۳۴

فهرست علائم اختصاری

A	سطح مقطع	m^2
a	طول مشخصه داخلی	m
D	جابجایی دی الکتریک	C / m^2
D _x	جابجایی محوری الکتریکی	C / m^2
E	مدول یانگ	N / m^2
e ₁	ثابت دی الکتریک	N / m^2
E _x	زمینه الکتریکی در راستای محوری	V / m
e ₀	ثابت ماده‌ی نانو تیوب	
I	مومنوم سطح	m^4
L	مشخصه طول	m
M	مومنوم خمش	$N.m$
N	نیروی عمودی	N
R	شعاع	m
s	تانسور تنش	N / m^2
T	انرژی جنبشی	J
U	انرژی پتانسیل	J
u	جابجایی طولی	m
V ₀	ولتاژ ثابت	V
V ₁	ولتاژ هارمونیک	V
v	سرعت جریان سیال	m / s
W	کار مجازی	J
w	جابجایی عرضی	m
a	دامنه بی بعد ارتعاش	
α	نیروی خارجی سیال بیرونی بی بعد	
ε	تانسور کرنش	
η	نسبت شعاع نانو تیوب به سیال بیرونی	
ν_f	ویسکوزیته سینماتیکی	$Pa.s$
μ	ثابت بی بعد دمپ	
μ_0	پارامتر بی بعد غیر موضعی	
ρ	مشخصه چگالی	kg / m^3

ρ_f	چگالی سیال داخلی	kg / m^3
σ	پارامتر القا	
φ	پتانسیل الکتریکی	V
Ω	فرکانس تحریک	rad / s
ω	فرکانس طبیعی	rad / s

فصل اول

مقدمه و مروری بر کارهای انجام شده

۱-۱ مقدمه

در این فصل مختصری در مورد فناوری نانو و موارد استفاده آن، نحوه‌ی پیدایش نانولوله‌های کربنی و خواص و کاربردهای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. فناوری نانو یا نانوتکنولوژی رشته‌ای از دانش کاربردی و فناوری است که بحث‌های گسترده‌ای را پوشش می‌دهد. موضوع اصلی آن نیز مهار ماده یا دستگاه‌های در ابعاد کمتر از یک میکرومتر، معمولاً حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. درواقع نانوتکنولوژی فهم و به‌کارگیری خواص جدیدی از مواد و نظام‌هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی - عمدتاً متأثر از غلبه خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک - از خود نشان می‌دهند.

۲-۱ تاریخچه نانوتکنولوژی و انواع مواد نانو

در حدود ۴۰۰ سال پیش از میلاد مسیح، دموکریتوس فیلسوف یونانی، برای اولین بار واژه‌اتم را که در زبان یونانی به معنی تقسیم نشدنی است، برای توصیف ذرات سازنده مواد به کاربرد. ازاین‌رو شاید بتوان او را پدر فناوری و علوم نانو دانست.

فناوری نانو موج چهارم انقلاب صنعتی، پدیده‌ای عظیم است که در تمامی گرایش‌های علمی راه‌یافته است تا جایی که در یک دهه آینده برتری فرایندها، وابسته به این تحول خواهد بود. ماهیت فناوری نانو توانایی کارکرد در تراز اتمی، مولکولی و فراتر از آن در ابعاد بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، باهدف ساخت و دخل و تصرف در چگونگی آرایش اتم‌ها یا مولکول‌ها با استفاده از مواد، وسایل و دستگاه‌هایی با توانایی‌های جدید و با تغییر این ساختارها و رسیدن به بازدهی بیشتر مواد است. فناوری نانو فرایند دست‌کاری مواد در مقیاس اتمی و تولید مواد و ابزار، به‌وسیله کنترل آن‌ها در سطح اتم‌ها و مولکول‌هاست. درواقع اگر همه مواد ساختار زیربنایی خود را در مقیاس نانو ترتیب دهند؛ آنگاه تمام واکنش‌ها سریع‌تر و بهینه‌تر صورت می‌گیرد و توسعه پایدار پیش‌گرفته می‌شود. ازجمله دستاوردهای فراوان این فناوری کاربرد آن در تولید، انتقال، مصرف و ذخیره‌سازی انرژی با کارایی بالاست که تحول

شگرف را در این زمینه ایجاد می‌کند. از این‌رو محققان علوم نانو در تلاش‌اند تا با استفاده از این فناوری به آسایش و رفاه بیشتر در درون و برون ساختمان با یافتن طبقه جدیدی از مصالح ساختمانی با عملکرد بالا و صرفه‌جویی در هزینه‌ها بخصوص در مصرف منابع انرژی و در نهایت به توسعه پایدار دست یابند. فناوری نانو منجر به تغییرات شگرف در استفاده از منابع طبیعی، انرژی و آب خواهد شد و پساب و آلودگی را کاهش خواهد داد. می‌توان موردهای زیر را شاخه‌های بنیادین دانش نانو فناوری دانست.

- نانو روکش‌ها
- نانو ذره
- نانو لوله‌ها یا نانو تیوب‌ها
- نانوصفحات
- نانو کامپوزیت‌ها
- موتورهای مولکولی یا نانو ماشین‌ها
- نانو سیم‌ها
- نانو حسگرها
- نانو ترانزیستورها
- نانو سیالات

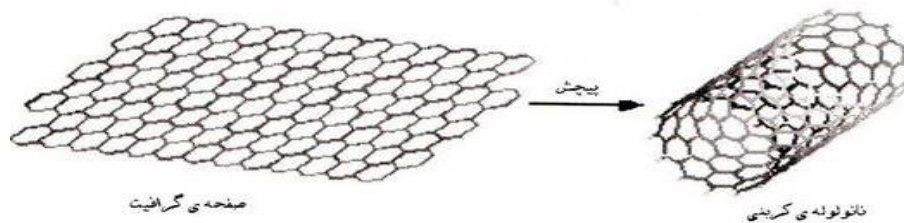
از این‌رو در ادامه دو نمونه از موارد استفاده‌شده در پایان‌نامه، نانولوله و نانو لایه، از نظر خواص و کاربردها بررسی شده و مورد معرفی قرار می‌گیرند.

۱-۳ نانولوله‌های کربنی

نانولوله^۱ لوله‌ای است که در مقیاس نانو به وسیله نانو ذرات ساخته می‌شود. قطر یک نانولوله در حدود چند نانومتر است. درحالی که طول آن می‌تواند به چندین میلی‌متر برسد. استحکام کششی ۱۰۰ برابر فولاد، رسانایی حرارتی نسبت به سایر ترکیبات به‌استثنای الماس خالص، رسانایی الکتریکی بسیار بالا، توانایی حمل جریانی بالاتر از مس، ممان مغناطیسی بسیار بزرگ و قابلیت گسیل و جذب نور از ویژگی‌های برجسته نانولوله‌ها است. یکی از مهم‌ترین انواع نانولوله‌ها، نانولوله‌های کربنی هستند. یکی از خواص نانولوله‌های کربنی نشر میدانی است. از مزایای کلیدی نانولوله‌های کربنی توانایی آن‌ها در عبور از غشاهای پلاسما است. نانولوله در مواردی همچون رسانایی الکتریکی، انعطاف و استحکام، خواص قابل‌توجهی دارد. نانولوله‌ها به‌عنوان پرکننده در نانو کامپوزیت‌ها استفاده می‌شوند. در سال ۱۹۹۱ دانشمندی به نام سومیو ایجیما به‌طور کاملاً اتفاقی، ساختار دیگری از کربن را کشف و تولید کرد که خواص منحصر به فردی دارد. وی در ابتدا این ساختار را نوعی فولرن تصور نمود که در یک‌جهت کشیده شده است؛ اما بعدها متوجه شد که این ساختار، خواص متفاوتی از فولرن‌ها دارد و به همین دلیل آن را، نانولوله‌ی کربنی نامید. در یک نانولوله‌ی کربنی، اتم‌های کربن در ساختاری استوانه‌ای آرایش یافته‌اند؛ یعنی یک لوله‌ی توخالی که جنس دیواره‌اش از اتم‌های کربن است. آرایش اتم‌های کربن در دیواره‌ی این ساختار استوانه‌ای، دقیقاً مشابه آرایش کربن در صفحات گرافیت است. در گرافیت، شش ضلعی‌های منظم کربنی در کنار یکدیگر صفحات گرافیت را می‌سازند. این صفحات کربنی بر روی یکدیگر انباشته می‌شوند و هر لایه از طریق پیوندهای ضعیف واندروالسی به لایه زیرین متصل می‌شود. هنگامی که

^۱ Nano tube

صفحات گرافیت درهم پیچیده می‌شوند، نانولوله‌های کربنی را تشکیل می‌دهند. درواقع، نانولوله‌ی کربنی، گرافیتی است که به شکل لوله (شکل ۱-۱) درآمده باشد.



شکل (۱-۱) شکل‌گیری نانولوله‌ها از صفحات گرافیت

نانولوله‌های کربنی به دودسته کلی نانولوله‌های کربنی تک دیواره و نانولوله‌های کربنی چند دیواره تقسیم می‌شوند. چنانچه نانولوله کربنی فقط شامل یک لوله از گرافیت باشد، نانولوله تک دیواره و اگر شامل تعدادی از لوله‌های متحدالمرکز باشد نانولوله چند دیواره نامیده می‌شود.

۱-۳-۱ خواص

نانولوله‌ها برحسب نحوه رول شدن صفحات گرافیتی سازندشان، به‌صورت رسانا یا نیمه‌رسانا درمی‌آیند. به عبارت دیگر از آنجاکه نانولوله‌ها در سطح مولکولی همچون یک باریکه سیمی درهم‌تنیده به نظر می‌رسند، اتم‌های کربن در قالب شش‌وجهی به یکدیگر متصل می‌شوند و این الگوهای شش‌وجهی دیواره‌های استوانه‌ای را تشکیل می‌دهند که اندازه آن تنها چند نانومتر است. زاویه پیچش نوعی نانولوله، که به‌صورت زاویه بین محور الگوی شش‌وجهی آن و محور لوله تعریف می‌شود، رسانا یا نارسانا بودن را تعیین می‌کند. تحقیقات دیگری نیز نشان داده‌اند که تغییر شعاع نیز امکان بستن طول باند و عایق نمودن نانولوله فلزی را فراهم می‌کند. پس می‌توان گفت دو پارامتر اساسی که در این بین نقش اساسی بازی می‌کنند، یکی ساختار نانولوله و دیگری قطر و اندازه آن است. بررسی‌های دیگری نشان داده‌اند که خصوصیات الکتریکی نانولوله‌ها بسته به اینکه مولکول کربن ۶۰ در کجا قرار داده شود از یک هادی به یک نیمه‌هادی و یا یک عایق قابل تغییر است. از آنجایی که نانولوله‌های کربنی قادرند جریان الکتریسیته

را به وسیله انتقال بالاستیک الکترون بدون اصطکاک از سطح خود عبور دهند- این جریان صد برابر بیشتر از جریانی است که از سیم مسی عبور می کند- لذا نانولوله ها انتخاب ایده آلی برای بسیاری از کاربردهای میکروالکترونیک می باشند.

سطح جداره صاف نانولوله ها باعث می شود که میزان عبور گاز از درون آن ها به مراتب بیشتر از غشاهای میکرو حفره ای معمولی که در جداسازی گازها مورد استفاده قرار می گیرند باشد. اعمال فشار بر یک نانولوله می تواند ویژگی های الکتریکی آن را تغییر دهد که بسته به نوع کشش یک نانولوله می توان رسانایی آن را افزایش یا کاهش داد. نانولوله ها می توانند نور مادون قرمز را جذب و دفع کنند. همچنین تزریق هم زمان الکترون از یکسر و تزریق حفره از سر دیگر نانولوله، موجب می شود که نوری با طول موج $1/5$ میکرومتر از نانولوله منتشر شود. نانولوله ها در دمای اتاق دارای بالاترین ضریب تحرک الکترونیسته نسبت به هر ماده شناخته شده دیگری هستند. نانولوله ها دارای چگالی سطحی بسیار بالایی می باشند که باعث استحکام بالای نانولوله می شود. می توان گفت این خاصیت در اثر ریز بودن قابل توجه آن ها پدیدار می شود. نانولوله ها در دمای زیر 15 درجه کلوین ابررسانا شده اند. شعاع این نانولوله های ابررسانا فقط $0/4$ نانومتر است. با عبور مایع از میان کلاف هایی از نانولوله های کربنی تک جداره، ولتاژ الکتریکی ایجاد می شود. از این فن برای ساخت حسگرهای جریان مایع برای تشخیص مقادیر بسیار اندک مایعات و نیز برای ایجاد ولتاژ در کاربردهای زیست پزشکی استفاده می شود. حرارت دادن موجب افزایش استحکام نانولوله شده و مقاومت کششی آن را شش برابر می کند و هدایت آن نیز افزایش می یابد. تحقیقات اخیر نشان می دهد که در اثر برخورد اتم ها یا مولکول ها با نانولوله کربنی مقاومت الکتریکی آن تغییر می کند. چند نمونه از کاربردهای نانولوله ها در ادامه توضیح داده می شود.

۱-۳-۲ کاربرد

- به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت ها

کامپوزیت‌های با پایه نانولوله‌ی کربنی دارای نسبت استحکام به وزن بالا هستند و مصارف گسترده‌ای را در صنعت خواهند داشت.

- استفاده در نمایشگرهای تشعشع میدانی

یکی از مشکلات دستگاه‌های نشر میدان امروزی، عدم پایداری میدان‌های تولیدی در بازه‌های زمانی طولانی است. این مشکل را می‌توان با استفاده از نانولوله کربنی حل نمود. بیش از ۷۰۰ مقاله تحقیقاتی در رابطه با کاربردهای نشر میدان نانولوله‌های کربنی منتشر شده است. این آمار بیانگر اهمیت موضوع است. برای مثال، مزایای استفاده از نمایشگرهای تولیدشده با نانولوله‌ی کربنی نسبت به نمایشگرهای بلوره مایع، سرعت واکنش بالاتر نسبت به محرک‌های الکتریکی، مصرف انرژی کمتر، درخشندگی مناسب‌تر، میدان مغناطیسی پایین در هنگام روشن کردن دستگاه و دمای کاری بالاتر است.

- استفاده از نانولوله‌های تک دیواره در صنعت الکترونیک

- ساختار توخالی نانولوله و کاربرد به‌عنوان ذخیره کننده و پیل سوختی

نانولوله‌ها، ساختارهای کربنی توخالی هستند؛ بنابراین، امکان قرار دادن مواد خارجی در داخل آن‌ها وجود دارد. به‌طور مثال، با قرار دادن فلزات درون نانولوله‌ها می‌توان خواص الکتریکی این مواد را بهبود بخشید. تحقیقات نشان داده است که نانولوله‌های باز، مثل یک نی توخالی عمل می‌کنند. این نی‌های مولکولی می‌توانند به‌وسیله عمل موئینگی و تحت شرایط خاص، برخی عناصر را به درون خود بکشند. همچنین نانولوله‌های کربنی برای ذخیره نمودن سوخت‌های الکانی و هیدروژن و ایجاد پیل‌های سوختی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ذخیره‌ی هیدروژن در داخل نانولوله‌های کربنی تک دیواره امکان‌پذیر است.

- ساخت نانو ماشین‌ها با استفاده از نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی همچنین برای استفاده در ساخت نانو ماشین‌ها پیشنهاد شده‌اند. نانولوله‌ها به‌طور مناسبی با ساختارهای مختلف جانشین شده‌اند که می‌توانند به‌عنوان محورها در نانو ماشین‌ها عمل

کنند. ممکن است، نانولوله‌های مختلف با همدیگر تشکیل چرخ‌دنده دهند تا حرکت چرخشی مختلفی را انتقال دهند. این امر از طریق ساختن دنده‌های چرخ‌دنده بر روی نانولوله‌ها می‌تواند انجام شود. [۱]

۱-۴ نانو لایه‌ها^۱

نانو لایه در واقع لایه‌ای از مواد است که ضخامت آن کسری از یک نانومتر تا چند میکرومتر قرار گرفته باشد. به‌طور کلی لایه به ماده یا موادی گفته می‌شود که به‌صورت پوششی بر یک سطح یا ماده می‌نشینند و باعث ایجاد خواص الکتریکی، فیزیکی و مکانیکی سطحی جدیدی می‌شود که خصوصیات سطحی زیر لایه را ارتقاء می‌بخشد. معمولاً در فیزیک حالت جامد، مواد را به‌صورت توده‌ای مورد بررسی قرار می‌دهند. در عموم روش‌های لایه نشانی، هنگامی که ماده از حالت توده‌ای به‌صورت اتم‌ها، مولکول‌ها یا یون‌های مجزا درآیند و روی سطح زیر لایه نشینند، پوششی ایجاد می‌شود که آن را لایه می‌نامند. در سال‌های اخیر، علم لایه‌های نازک در میان سایر علوم رشد فراوانی داشته و حجم وسیعی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. بی‌شک رشد چشمگیر ارتباطات، پردازش اطلاعات، ذخیره‌سازی، صفحه‌های نمایش، صنایع تزئینی، ابزارآلات نوری، مواد سخت و عایق‌ها نتیجه تولید لایه‌های نازک بر اساس فناوری‌های نوین است. در ساخت لایه‌های نازک نیز در سال‌های اخیر تحولات وسیعی صورت گرفته است که خود ناشی از پیشرفت در فناوری خلأ، تولید میکروسکوپ‌های الکترونی و ساخت وسایل دقیق و پیچیده‌ی شناسایی مواد است. همچنین باز شدن مباحثی نظیر میکروالکترونیک، اپتیک و نانو تکنولوژی مدیون اهمیت پوشش‌های لایه‌نازک است. از نقطه نظر تاریخی در ابتدا فناوری لایه‌نازک در صنایع مدارهای مجتمع استفاده شد. در ادامه طی ۴۰ سال اخیر، نیاز صنایع به ابزارهای کوچک‌تر و سریع‌تر، فناوری و فیزیک لایه‌های نازک را جهت رسیدن به این هدف بهبود بخشید. لایه‌های نازک

^۱ Nano layers

باضخامت زیر میکرونی، با خواصی ناشی از همان دو ویژگی اصلی آن‌ها که شامل نازک بودن و بزرگی فوق‌العاده نسبت سطح به حجم است، کاربردهای فراوانی در فناوری‌های نوین یافته‌اند. برخی خصوصياتی که در اثر نازک بودن سطح به وجود می‌آید شامل افزایش مقاومت ویژه، ایجاد پدیده تداخل نور، پدیده تونل زنی، مغناطیس شدگی سطحی، تغییر دمای بحرانی ابررساناها است. همچنین برخی خصوصياتی که از بزرگی سطح لایه‌های نازک ناشی می‌شود شامل پدیده جذب سطحی فیزیکی و پدیده جذب سطحی شیمیایی، پدیده پخش و فعال‌سازی است.

با توجه به عملکرد و خواص لایه‌های نازک، می‌توان از آن‌ها جهت بهبود فناوری‌هایی نظیر سلول‌های خورشیدی، حس‌گرها، کاربردهای نوری، مهندسی الکترونیک و فرو الکترونیک نیز استفاده نمود. امروزه کاربرد لایه نشانی در صنایع، موضوع توسعه‌یافته‌ای است. به‌گونه‌ای که بخش بزرگی از زندگی مدرن را مدیون توسعه صنعت لایه نشانی می‌دانند [۲، ۳].

۱-۴-۱ مواد پیزوالکتریک

اثر پیزوالکتریک توانایی برخی مواد برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی است. تولید پتانسیل الکتریکی در پاسخ به دما، توسط کارل لینهائوس^۱ و فرنز آپینوس^۲ مطالعه شد و با الهام از این موضوع رنه جاست هاووی^۳ و آنتونی سزار بکورل^۴ ادعا کردند بین فشار مکانیکی و بار الکتریکی رابطه‌ای وجود دارد گرچه آزمایش‌های آن‌ها نتیجه‌ی قاطعی نداد. اولین اثبات تجربی اثر پیزوالکتریک در سال ۱۸۸۰ توسط برادران پیری کیوری^۵ و جکوئیز کیوری^۶ انجام شد. آن‌ها دانششان را از پیزوالکتریک با درکشان از ساختار بلورهای اساسی ترکیب کردند که منجر

¹ Carl Linnaeus

² Franz Aepinus

³ René Just Haüy

⁴ Antoine césar becquerel

⁵ Pierre Curie

⁶ Jacques Curie

به پیش‌بینی رفتار کریستال‌ها شد و اثبات کردند کریستال‌های ترمالین، کوارتز، زبرجد هندی، نیشکر و پتاسیم سدیم تارترات (نمک راشل) خاصیت پیزوالکتریک دارند. کوارتز و نمک راشل بیش‌ترین پیزوالکتریک را در خود انباشته می‌کنند. کیوری‌ها اثر پیزوالکتریک معکوس را پیش‌بینی نکردند، اثر معکوس با روابط ریاضی توسط گابریل لیپمان در سال ۱۸۸۱ از قوانین ترمودینامیک نتیجه شد. کیوری‌ها بلافاصله وجود اثر معکوس را تأیید کردند و به تحقیقات خود ادامه دادند تا اثبات کامل تغییر شکل الکتریکی-الاستیکی-مکانیکی سرامیک‌های پیزوالکتریک را به دست آورد. در چند دهه بعد، پیزوالکتریک یک پدیده کمیاب آزمایشگاهی باقی ماند. کارهای بیش‌تری برای تعریف ساختار کریستال که پیزوالکتریک را در خود ذخیره می‌کنند انجام شد که در سال ۱۹۱۰ با انتشار کتابی با موضوع فیزیک کریستال‌ها^۱ به اوج خود رسید که ۲۰ دسته‌ی کریستال طبیعی را که قابلیت ذخیره‌ی پیزوالکتریک داشتند، شرح داد و ثابت‌های پیزوالکتریک را با دقت زیاد توسط تحلیل‌ها و آمارهای کششی به دست آورد [۴] [۵].

بنا به تحقیقی منتشرشده در آوریل و مارس سال ۲۰۰۹ میلادی در دانشگاه ام‌آی‌تی، ژونگ لینگ ونگ فکر می‌کند که سیم‌های پیزوالکتریک نانو می‌توانند به وسایل پزشکی گذاشته‌شده در بدن نیرو برسانند و به‌عنوان حسگرهای کوچک عمل کنند [۶].

نانو حسگرها به‌شدت حساس، کم‌مصرف و البته بسیار کوچک‌اند. آن‌ها می‌توانند در شناسایی علائم مولکولی بیماری در خون، مقادیر جزئی گازهای سمی در جو و آلودگی‌ها در غذا مورد استفاده قرار گیرند؛ اما منابع انرژی و مدارهای لازم برای فعال‌سازی این وسایل کوچک ساخته‌شدن آن‌ها را دشوار می‌کند. ونگ برای اولین بار در سال ۲۰۰۵ این پدیده را در مقیاس نانو باخم کردن اکسید روی توسط پایه میکروسکوپ اتمی نشان داد. هنگامی که سیم خم می‌شود و به حالت اولیه برمی‌گردد پتانسیل تولیدشده

^۱ Woldemar Voigt's Lehrbuch der Kristallphysik

توسط یون‌های اکسیژن و روی جریان الکتریکی به وجود می‌آورند. جریانی که او از نخستین آزمایش به دست آورد اندک بود. پتانسیل الکتریکی حداکثر به چند میلی‌ولت می‌رسید؛ اما ونگ مطمئن بود که با علم مهندسی و با مهار کردن لرزه‌های کوچک اطرافمان یک نانو منبع انرژی طراحی کند از جمله امواج صدا، باد و تلاطم گردش خون بر روی وسیله‌ی کار گذاشته‌شده در بدن. این حرکات کوچک موجب خم شدن نانوسیم‌ها می‌شود که به تولید جریان الکتریکی می‌انجامد.

ونگ نانوسیم اکسید روی را در یک‌لایه پلیمر جاسازی کرد. هنگامی که ورقه خم شد 50 mV اختلاف پتانسیل تولید شد. این گامی بزرگ در راستای نیرو بخشیدن به نانو حسگرهاست. او امیدوار است نهایتاً این مولدها در تاروپود لباس بافته شود. در این صورت یک پیراهن می‌تواند انرژی لازم را برای شارژ شدن باتری وسایلی مثل آی‌پاد تأمین کند.

برخلاف اجزای الکترونیکی قدیمی، نانوپیزوترونیک‌ها به منبع جریان خارجی نیاز ندارند و وقتی در معرض نیروی مکانیکی قرار می‌گیرند به خودشان نیرو وارد می‌کنند. یک سمعک نانو پیزو الکترونیک ترکیب‌شده با نانو مولد از رشته‌ای از نانوسیم‌ها استفاده می‌کند که هرکدام تنظیم‌شده است در محدوده‌ی عظیمی از صداها با فرکانس متفاوت به ارتعاش درآید. نانوسیم‌ها صداها را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل و آن‌ها را پردازش می‌کنند به همین جهت آن‌ها مستقیماً می‌توانند به نورون‌های مغز فرستاده شوند. سمعک‌ها نه فقط متراکم‌تر و حساس‌تر می‌شوند بلکه باتری‌های آن‌ها قابل تعویض خواهد بود. حسگرهای نانو پیزو الکترونیک همچنین برای تشخیص فشار مکانیکی در موتور هواپیما استفاده می‌شوند؛ فقط چند ترکیب کوچک نانوسیم فشار را بر صفحه‌نمایش می‌آورد؛ اطلاعات را پردازش می‌کند و به اتاقک خلبان منتقل می‌کند.

پیزوالکتریک‌ها قبلاً در صدا‌برها، حسگرها، ساعت‌ها و... استفاده‌شده‌اند اما تلاش برای ذخیره انرژی بیومکانیکی توسط آن‌ها بی‌نتیجه مانده است زیرا آن‌ها بیش از اندازه سفت‌اند. پلیمرهای پیزوالکتریک موجودند اما استفاده از آن‌ها به صرفه نیست.

۱-۵ سابقه موضوعی طرح

از زمانی که ایجیما^۱ در سال ۱۹۹۱ سنتز نانولوله‌های کربنی را گزارش کرد، این ماده به‌عنوان یکی از نامزدهای مناسب برای ذخیره‌سازی هیدروژن مطرح بوده است. هرچند تنها ۶ سال پیش دیلون و همکاران اولین نتایج آزمایشگاهی خود را در مورد ذخیره هیدروژن بر روی نانولوله‌ها منتشر نمودند. از آن‌پس بسیاری از گروه‌های تحقیقاتی آزمایش‌هایی را در این زمینه آغاز نمودند و در این راه به پیشرفت‌های قابل توجهی رسیدند. در اولین سری آزمایش‌ها نشان داده شد که نانولوله‌های کربنی توانایی ذخیره‌سازی مقدار فراوانی از هیدروژن را حتی در دمای اتاق نیز دارد. از آنجایی که انجام آزمایش‌ها در مقیاس نانو با مشکلات متعددی روبرو است. روش‌های تئوری به‌عنوان مناسب‌ترین راه برای بررسی خواص مکانیکی نانو ساختارها مورد اهمیت است. به‌طور کلی روش‌های تحلیل و مدل‌سازی تئوری را می‌توان به دو نوع مختلف شامل روش‌های اتمی^۲ و روش‌های مکانیک محیط پیوسته^۳ تقسیم‌بندی کرد. روش‌های اتمی شامل دینامیک مولکولی^۴، دینامیک مولکولی مقید^۵ و تئوری تابعی چگالی^۶ می‌شوند. این روش‌های اتمی معمولاً با محدودیت‌هایی که به دلیل سرعت محدود کامپیوترها وجود دارد، روبرو هستند. به همین دلیل روش‌های مکانیک محیط پیوسته به‌طور فراوانی به‌عنوان روشی مناسب برای مدل‌سازی مواد در ابعاد نانومتری شناخته شده است. همان‌طور که پنگ^۷ و همکارانش [۷] اشاره کردند، محیط پیوسته کلاسیک زمانی مناسب و قابل اطمینان است که شعاع نانولوله‌های کربنی بسیار بزرگ‌تر

¹ Iijima

² Atomistic approaches

³ Continuum mechanics

⁴ Molecular dynamics

⁵ Tight-bending molecular dynamics

⁶ Density functional theory

⁷ Peng et al.

از فاصله‌ی بین لایه‌ها باشد. وقتی اندازه نانو مواد بسیار کوچک می‌شود، فاصله‌ی شبکه بین اتم‌ها بسیار مهم می‌شوند تا حدی که ساختار مجزای ماده نمی‌تواند به‌عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته شود. نوع دیگر مدل‌های محیط پیوسته بر اساس تئوری مکانیک محیط پیوسته‌ی غیرموضعی است که توسط ارینگن^۱ [۸] [۹] مطرح شده است. اولین کاربرد تئوری تیر غیرموضعی در نانوفناوری توسط پدیسون^۲ و همکارانش [۱۰] ارائه شد که توسط خیلی از محققان دیگر دنبال شد.

ارتعاشات نانولوله‌های کربنی موضوع تحقیق بسیاری از محققین بوده است. بسیاری از این تحقیقات بر اساس مکانیک محیط پیوسته‌ی کلاسیک شامل مدل‌های تیر تیموشنکو، اویلر برنولی انجام شده‌اند. برخلاف مدل تیر اویلر برنولی، مدل تیر تیموشنکو اثرات تغییر شکل برش عرضی و اینرسی پیچشی را در نظر می‌گیرد. اختلاف بین این دو تئوری وقتی بارزتر می‌شود که با نانولوله‌هایی با نسبت طول به قطر کم داریم. این موضوع مدل تیر تیموشنکو را مناسب‌تر از تیر اویلر بیان می‌کند. تعدادی از مهم‌ترین مقالات منتشرشده در ارتباط ارتعاشات نانولوله در زیر اشاره شده‌اند.

در سال ۲۰۰۶ وانگ و همکارانش^۳ [۱۱] ارتعاشات نانولوله‌های کربنی چند دیواره را موردبررسی قرار دادند. آن‌ها از مدل تیر تیموشنکو در به دست آوردن معادلات حرکت استفاده کردند و معادلات تیموشنکو حاکم را با روش مربع دیفرانسیل برای شرایط مرزی مختلف و نسبت طول به قطر متفاوت حل کردند. همچنان با مقایسه نتایج حاصل از تئوری‌های تیر اویلر برنولی و تیموشنکو، آن‌ها نشان دادند که وقتی نسبت طول به قطر بسیار کوچک باشد، فرکانس‌ها بشدت با تئوری تیر اویلر برنولی زیاد برآورد می‌شوند مخصوصاً در مودهای ارتعاشی بالا.

¹ Eringen

² Peddieson et al.

³ Wang et al.

در سال ۲۰۰۷ ردی^۱ [۱۲] با استفاده از روابط ترکیب شده دیفرانسیل غیرموضعی ارینگن، تئوری‌های تیر مختلف موجود شامل اوپلر برنولی، تیموشنکو، ردی و لوینستون را فرمول‌بندی کرد. سپس معادلات حرکت تئوری‌های غیرموضعی را به دست آورد و عبارات تغییرات را به صورت جمله‌هایی از جابجایی‌های کلی ارائه کرد. با استفاده از تئوری‌های غیرموضعی، حل تحلیلی مربوط به کمانش، خمش و ارتعاشات را انجام داد و اثر رفتار غیرموضعی را روی تغییر شکل‌ها، بارهای کمانش و فرکانس‌های طبیعی بررسی کرد.

در سال ۲۰۰۹ انصاری [۱۳] و همکارانش کاربرد روش اغتشاشات^۲ را بر ارتعاشات غیرخطی نانولوله‌های کربنی چند دیواره واقع در بستر الاستیک را بررسی کرد. آن‌ها از مدل تیر چندگانه^۳ برای به دست آوردن معادلات حاکم بر هر لایه استفاده کردند که با نیروهای واندروالسی به هم کوپل شده بودند. همچنین اثر تغییرات ثوابت ماده بستر الاستیک روی خواص ارتعاشات نانولوله‌های چند دیواره مورد بررسی قرار گرفت.

انصاری و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۱۱ اثرات مقیاس کوچک را روی ارتعاشات با دامنه‌ی بزرگ یک نانولوله کربنی چند جداره را بررسی کردند. آن‌ها از روش بالانس هارمونیک افزایشی^۴ برای حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل غیرخطی به دست آمده از ارتعاشات نانولوله‌های توی هم رفته استفاده کردند و در نهایت اثرات پارامترهای هندسی، بستر الاستیک، افزایش دما را بررسی کردند.

¹ Reddy

² Homotopy perturbation method

³ Multiple beam model

⁴ Incremental harmonic balance method

قوانلو و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۱۱ تأثیر جریان داخلی یک نانو تیوب کربنی مغروق در یک سیال دیگر را روی ارتعاشات آزاد آن با فرض یک دیواره بودن نانو تیوب از روش گلرکین و بر پایه‌ی نظریه غیرموضعی^۱ موردبررسی قرار داده‌اند، اثرات موردبررسی بستر الاستیک و تغییرات دمایی بوده است.

در سال ۲۰۱۲ انصاری و همکارانش [۱۴] با استفاده از تئوری‌های تیر غیرموضعی مختلف ارتعاشات آزاد نانولوله‌های کربنی را بررسی کردند. به این منظور آن‌ها معادلات ارینگن الاستیسیته غیرموضعی را در تئوری‌های کلاسیک شامل تئوری تیر اویلر برنولی، تیموشنکو و ردی، ترکیب کردند تا اثر مقیاس کوچک را روی تحلیل ارتعاشات نانولوله‌های تک دیواره بررسی کنند. آن‌ها از روش مربع دیفرانسیل کلی^۲ برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم با چهار شرط مرزی متداول استفاده کردند. همچنین، آن‌ها از مدل‌سازی دینامیک مولکولی برای به دست آوردن فرکانس‌های پایه‌ی نانولوله‌ها با کایرالیته‌ی های مختلف و نسبت طول به قطر متفاوت استفاده کردند تا با نتایج حاصل از مدل‌های تیر غیرموضعی مقایسه کنند. با تطبیق این دو روش عددی متفاوت مقادیر متناسب پارامتر غیرموضعی مربوط به هر مدل تیر غیرموضعی به دست آمد.

در سال ۲۰۱۳ خدابی مراغی و همکارانش [۱۶] به تأثیر ارتعاشات غیرخطی نانو تیوب دو دیواره‌ی برون نیتريد^۳ حاوی جریان سیال و مغروق بر اساس تئوری غیرموضعی پی زو الاستیسیته و تیر اویلر برنولی پرداخته‌اند به‌طوری‌که این نانو تیوب با یک‌لایه‌ی الاستیک^۴ احاطه شده است.

¹ Nonlocal continuum beam model

² Generalized differential quadrature method

³ BNNT (Boron Nitride)

⁴ Elastic medium

در سال ۲۰۱۴ مین [۱۷] به تأثیر ارتعاشات نانو تیوب‌های خمیده حاوی جریان سیال بر اساس مدل غیرموضعی و اثر اندازه به روش تئوری تنش دوگانه^۱ موردبررسی قرار داده است، در این بررسی اصل همیلتون را مدنظر گرفته است.

در سال ۲۰۱۶ انصاری و همکاران [۱۸] با در نظر گرفتن تنش سطحی وارده به نانولوله‌های حاوی جریان سیال اثر هندسی بر ارتعاشات آزاد و پایداری را موردبررسی قرار دادند.

۱-۶ هدف طرح

با توجه به اهمیت زیاد نانولوله‌های کربنی، شناخت رفتار ارتعاشی این مواد بسیار حائز اهمیت است. این پایان‌نامه همان‌طور که اشاره گردید به بررسی ارتعاشات غیرخطی آزاد و اجباری می‌پردازد. با توجه به تاریخچه اشاره‌شده بر اساس مقاله سال ۲۰۱۱ بررسی‌ها بر مبنای نانو تیوب حاوی جریان سیال و مغروق در سیال دیگر انجام‌شده، بر این اساس هدف این پایان‌نامه تکمیل این بررسی در زمینه‌ی تغییرات پارامتر سرعت جریان داخلی و همچنین تأثیر لایه اضافه‌شده در دیواره نانو تیوب است. آنچه به‌عنوان نوآوری در طرح این مدل بیان‌شده، همگامی نانو تیوب حاوی سیال و لایه پیزوالکتریک بعلاوه سیال بیرونی در مدل مسئله است. در ادامه با محاسبات معادله حاکم دریافت می‌شود که سیال بیرونی به شکل دمپر عمل می‌نماید.

در فصل دوم به تئوری تیر اویلر برنولی، لایه پیزوالکتریک و مدل غیرموضعی پرداخته می‌شود. در ادامه مدل مورد نظر را معرفی کرده معادلات حاکم مدل را به نگارش درمی‌آید و در فصل سوم پس از بررسی ارتعاشات، نتایج حاصله مورد تحلیل، بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

^۱ Modified couple stress theory

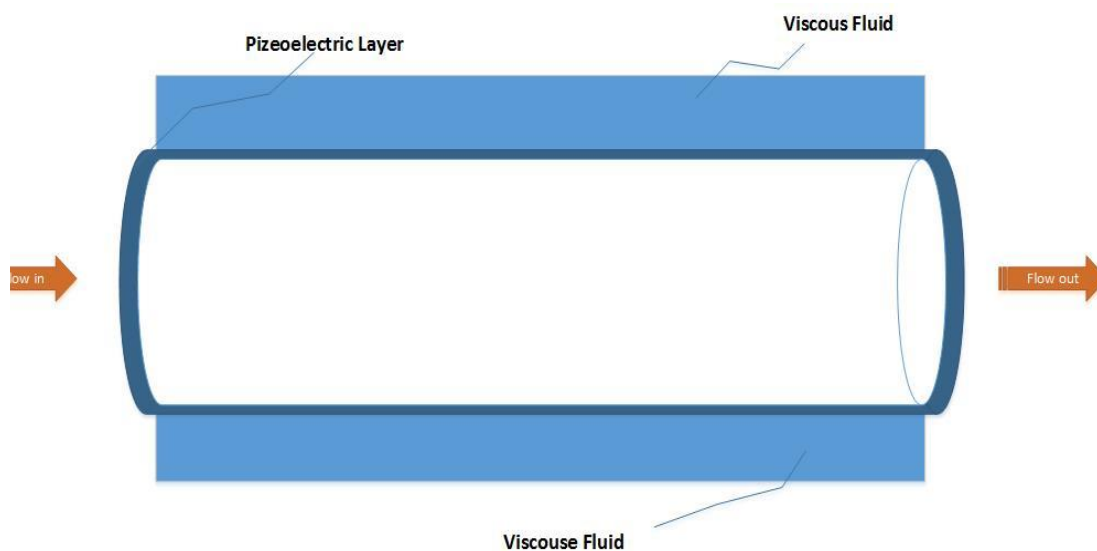
فصل دوم

استخراج معادلات حاکم و تحلیل مسئله

۱-۲ مقدمه

در این فصل ابتدا مدل مسئله توضیح داده شده در ادامه با استفاده از تئوری اویلر برنولی^۱ و با استفاده از مدل الاستیسیته ارینگن^۲، معادلات حاکم بر ارتعاشات غیرخطی نانو تیوب در حالت غیرموضعی استخراج می شوند.

۲-۲ مدل مسئله



شکل (۱-۲) مدل مسئله مورد بررسی

همان طور که از شکل مدل مسئله استنباط می شود، هدف مدل سازی نانو تیوب کربنی^۳ به علاوه یک لایه هوشمند پیزوالکتریک مغروق در سیال است.

^۱ Euler -Bernouli

^۲ Eringen

^۳ CNT

۳-۲ معادله حاکم بر لوله با لایه پیزوالکتریک حاوی سیال واقع در

بسترسیال بدون در نظر گرفتن اثر حرارت

برای به دست آوردن معادلات حاکم از روش‌های انتگرالی با استفاده از شرایط مرزی موردنظر

و با فرض دو دیواره بودن تیوب به معادلات حاکم اصلی مسئله می‌رسیم.

با استفاده از مرجع [۱۹] برای جابجایی عرضی رابطه ۱-۲ موجود است.

$$w(x, z, t) = w(x, t) \quad (۱-۲)$$

همچنین برای جابجایی طولی و کرنش از مرجع [۲۰] می‌توان نوشت:

$$u(x, z, t) = u(x, t) - z \frac{\partial w}{\partial x} \quad (۲-۲)$$

$$\varepsilon_{xx} = u_x(x, t) - zw_{xx}(x, t) + \frac{1}{2}(w_x(x, t))^2 \quad (۳-۲)$$

با استفاده از مرجع [۲۱] رابطه ۴-۲ و ۵-۲ حاصل می‌شود.

$$s_{xx} = E_1 \varepsilon_{xx} - e_1 E^x \quad (۴-۲)$$

$$D^x = e_1 \varepsilon_{xx} + k_1 E^x \quad (۵-۲)$$

با توجه به رابطه‌های ۴-۲ و ۵-۲ پارامترهای معادله به صورت s_{xx} تنش، ε_{xx} کرنش، E_1 مدول الاستیسیته

لایه پیزوالکتریک، e_1 ثابت پیزوالکتریک، k_1 ثابت دی‌الکتریک، D^x کرنش الکتریکی و E^x برابر با تابع

پتانسیل $\frac{-\partial \phi}{\partial x}$ است [۲۲، ۲۳]. کرنش هر یک از دو دیواره به صورت دو معادله ۶-۲ و ۷-۲ به صورت

پارامتری نوشته می‌شود، همچنین مومنوم خمشی و نیروی عمودی به ترتیب از معادلات ۸-۲ و ۹-۲

به دست می‌آید. در رابطه ۶-۲ و ۷-۲ زیر وند ۱ مربوط به پیزوالکتریک و زیر وند ۲ مربوط به نانو تیوب

کربنی است.

$$\varepsilon_{1,xx} = u_{1,x}(x, t) - zw_{1,xx}(x, t) + \frac{1}{2}(w_{1,x}(x, t))^2 \quad (۶-۲)$$

$$\varepsilon_{2,xx} = u_{2,x}(x, t) - zw_{2,xx}(x, t) + \frac{1}{2}(w_{2,x}(x, t))^2 \quad (۷-۲)$$

$$\overline{M}_1 = \int_{A_1} \varepsilon_{1,xx} dA_1 \quad (۸-۲)$$

$$\overline{N}_1 = \int_{A_1} \varepsilon_{1,xx} dA_1 \quad (۹-۲)$$

۲-۳-۱ انرژی پتانسیل

با استفاده از مرجع [۲۱] رابطه انرژی پتانسیل کرنشی برای تیر اویلر برنولی برای دو دیواره

به صورت زیر تعریف می گردد:

$$U = \int_0^L \int_{A_1} (s_{1,xx} \varepsilon_{1,xx} - D^x E^x) dA_1 dx + \int_0^L \int_{A_2} (s_{2,xx} \varepsilon_{2,xx}) dA_2 dx \quad (۱۰-۲)$$

$$U = \frac{1}{2} \left[\int_0^L \left[A_1 (E_1 \varepsilon_{1,xx} + e_1 \phi_x) \varepsilon_{1,xx} + (e_1 \varepsilon_{1,xx} - k_1 \phi_x) \phi_x A_1 \right] + \int_0^L A_2 (E_2 \varepsilon_{2,xx}) \varepsilon_{2,xx} \right] \quad (۱۱-۲)$$

A_1 و A_2 سطح مقطع ۲ لایه است. با اعمال روابط ۲-۱ تا ۲-۷ در رابطه ی ۲-۱۰ انرژی پتانسیل

به دست آمده:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \left[\begin{aligned} & [E_1 A_1 (u_{1,x}^2 + u_{1,x} w_{1,x}^2 + \frac{1}{4} w_{1,x}^4) \\ & + e_1 A_1 (\phi_x u_{1,x} + \frac{1}{2} \phi_x w_{1,x}^2) + E_1 I_1 w_{1,xx}^2] \\ & + [E_2 A_2 (u_{2,x}^2 + u_{2,x} w_{2,x}^2 + \frac{1}{4} w_{2,x}^4) \\ & + E_2 I_2 w_{2,xx}^2] + A_1 [2e_1 (u_{1,x} + \frac{1}{2} w_{1,x}^2) - k_1 \phi_{1,x}] \end{aligned} \right] dx \quad (۱۲-۲)$$

برای ساده سازی رابطه بالا ممان سطح را به صورت رابطه ۲-۱۳ نوشته، در نتیجه رابطه انرژی پتانسیل

به صورت ۲-۳۰ نشان داده می شود.

$$\begin{aligned}\overline{EA} &= E_1 A_1 + E_2 A_2 \\ \overline{EI} &= E_1 I_1 + E_2 I_2\end{aligned}\quad (۱۳-۲)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L [\overline{EA}(u_x^2 + u_x w_x^2 + \frac{1}{4} w_x^4) + \overline{EI} w_{xx}^2 + A_1 [2e_1(u_x + \frac{1}{2} w_x^2) \phi_x - k_1 \phi_{1,x}]] dx \quad (۱۴-۲)$$

E_2 و E_1 مدول یانگ مربوط به لایه پیزوالکتریک و نانو تیوب کربنی، A سطح مقطع و I ممان سطح است. رابطه ۲-۱۴ به صورت انتگرال ۲-۱۵ نوشته می شود.

$$\begin{aligned}\int_{t_1}^{t_2} \delta U dt &= \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} [\overline{EA}(+2u_x \delta u|_0^L - 2 \int_0^L u_{xx} \delta u dx + (w_x)^2 \delta u|_0^L \\ &- \int_0^L \frac{\partial}{\partial x} (w_x)^2 \delta u dx + 2(u_x w_x) \delta w|_0^L - 2 \int_0^L \frac{\partial}{\partial x} (u_x w_x) \delta w dx \\ &+ (w_x)^3 \delta w|_0^L - \int_0^L \frac{\partial}{\partial x} (w_x)^3 \delta w dx) + 2\overline{EI}(+w_{xx} \delta w_x|_0^L - w_{xxx} \delta w|_0^L \\ &+ \int_0^L w_{xxxx} \delta w dx) + A_1(2e_1(u_x \delta \phi|_0^L - \int_0^L u_{xx} \delta \phi dx + \phi_x \delta u|_0^L - \int_0^L \phi_{xx} \delta u dx \\ &+ (\phi_x w_x) \delta w|_0^L - \int_0^L \frac{\partial}{\partial x} (\phi_x w_x) \delta w dx + \frac{1}{2} (w_x)^2 \delta \phi|_0^L \\ &- \int_0^L \frac{\partial}{\partial x} (w_x)^2 \delta \phi dx) - 2k_1(\phi_x \delta \phi|_0^L - \int_0^L \phi_{xx} \delta \phi dx))] dt\end{aligned}\quad (۱۵-۲)$$

۲-۳-۲ انرژی سینتیک یا جنبشی

انرژی جنبشی نانو تیوب کربنی با احتساب سرعت ها به صورت معادله ۲-۱۶ نوشته می شود.

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \rho_1 A_1 (w_t^2 + u_t^2) dx + \frac{1}{2} \int_0^L \rho_2 A_2 (w_t^2 + u_t^2) dx \quad (۱۶-۲)$$

با فرض ثابت بودن سرعت سیال داخلی و باریک بودن لایه پیزوالکتریک رابطه نرخ جرمی به صورت ۲-

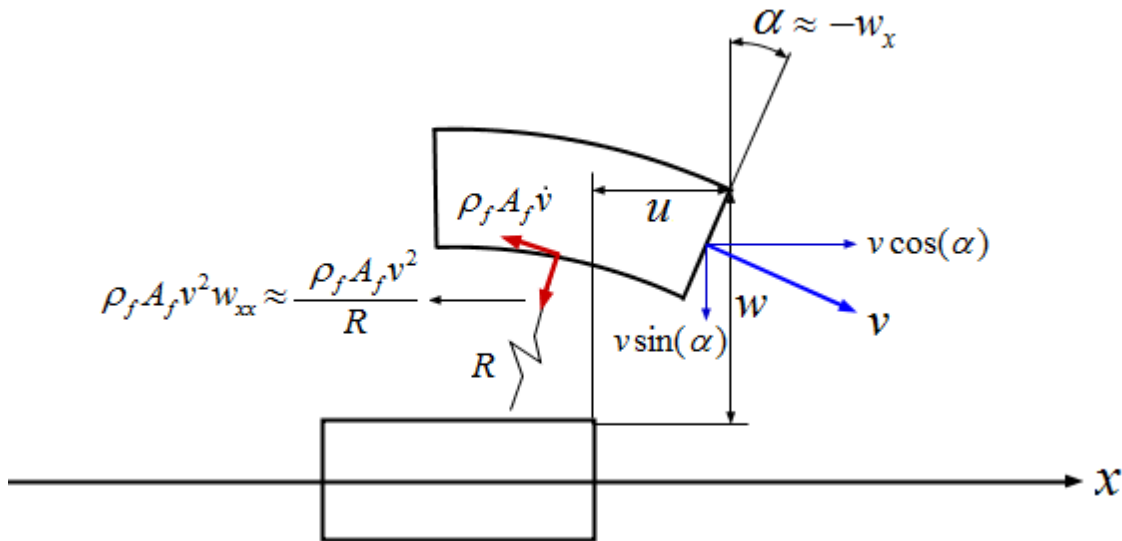
۱۷ است که ρ_1 و ρ_2 به ترتیب جرم حجمی پیزوالکتریک و CNT است.

$$\overline{\rho A} = \rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 \quad (2-17)$$

حالت کلی رابطه انرژی جنبشی با احتساب رابطه بالا در رابطه ۱۸-۲ نمایان شده است:

$$T_{\text{CNT,piezoelectric}} = \frac{1}{2} \int_0^L \overline{\rho A} (w_t^2 + u_t^2) dx \quad (2-18)$$

برای به دست آوردن سرعت سیال داخلی رابطه زیر با توجه به تحلیل شکل از منبع [۲۴] از ۱۹-۲ به دست می‌آید.



شکل (۲-۲) دیاگرام المان سرعت جریان سیال داخلی

$$\vec{V} = (v \cos(\alpha) + u_t) \vec{i} + (w_t - v \sin(\alpha)) \vec{j} \quad (2-19)$$

السرعت خطی سیال است.

$$T_f = \frac{1}{2} \int_0^L \int_{A_f} \rho_f \vec{V} \vec{V} dA_f dx \quad (2-20)$$

از جمع دو رابطه ۱۸-۲ و ۲۰-۲، انتگرال انرژی به صورت رابطه ۲۱-۲ نوشته می‌شود.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta T = \left(\int_0^L \overline{\rho A} \cdot [w_x \delta w]_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} w_{tt} \delta w dt + u_x \delta u \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} u_{tt} \delta u dt \right) dx$$

$$+ \rho_f A_f \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L [-v \sin \theta w_{xt} \delta u - v \sin \theta u_{xt} \delta w + v \cos \theta w_{xx} u_t \delta w - u_{tt} \delta u - w_{tt} \delta w - 2v \cos \theta w_{xt} \delta w - v \sin \theta w_{xx} w_t \delta w] dx$$
(۲-۲۱)

۲-۳-۳ کار جریان خارجی و داخلی

معادلات جریان ویسکوز خارجی جهت ایجاد کار وارده به نانو تیوب توسط قوانین و همکارانش

به دست آمده است [۲۵]. کشش سطحی جریان خارجی با F_v نمایش داده می شود که

$$F_v = -\alpha \frac{\partial w}{\partial t}$$
(۲-۲۲)

$$\alpha = \frac{2\nu_f \pi (\eta^2 - 1)}{(1 - \eta^2 + (\eta^2 + 1) \ln \eta)}$$
(۲-۲۳)

$$\eta = \frac{R_0}{R_1}$$

باید خاطر نشان کرد که α عددی مثبت و $(0 < \eta < 1)$ است. در این معادله R_0 شعاع خارجی بدون

احتساب سیال خارجی و R_1 فاصله ی خط مرکز با احتساب سیال خارجی است. برای به دست آوردن

تغییر شکل حاصله از نانو تیوب و سیال بیرونی باید به این صورت فرض نمود که تنش سطحی با نیروی

بر واحد سطح خارجی برابر باشد. ($q = F_v$)

از این رو برای کار حاصل از مایع ویسکوز خارجی داریم:

$$\delta W_{ext} = \int_0^L q \delta w dx$$
(۲-۲۴)

برای به دست آوردن کار ناشی از جریان سیال داخلی، با فرض ثابت بودن سرعت سیال نیروی گریز از

مرکز ناشی از سرعت سیال با استفاده از بردار جابجایی $\vec{u} \vec{i} + w \vec{j}$ ، بردار نیرو و رابطه کار به صورت ۲-

25 و 26- نوشته می شود.

$$F_c = -\rho_f A_f v^2 w_{xx} (\sin \theta \vec{i} + \cos \theta \vec{j}) \quad (2-25)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta W_f = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L [-\rho_f A_f \cdot v^2 (\sin \theta w_{xx} \delta u + \cos \theta w_{xx} \delta w)] \quad (2-26)$$

از جمع دو رابطه‌ی 24-2 و 26-2 رابطه 27-2 به دست می‌آید که رابطه کلی انتگرالی کار است.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta W = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L [-\rho_f A_f \cdot v^2 (\sin \theta w_{xx} \delta u + \cos \theta w_{xx} \delta w) + \alpha w_t \delta w] dx dt \quad (2-27)$$

۲-۳-۴ به دست آوردن معادله حاکم

طبق آنچه در فصل قبل در مورد انرژی جنبشی، پتانسیل و کار گفته شد، با جایگذاری این موارد در معادله همیلتون ۹-۲ و با حل آن با روش انرژی که در ادامه نشان داده می‌شود، به معادله حالت دست می‌یابیم.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U + W) dt = 0 \quad (2-28)$$

با حل انتگرال و جداسازی پارامترهای جنبشی، پتانسیل و کار مجازی معادله همیلتون به صورت ۲۹-۲ درمی‌آید.

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T_{CNT} + \delta T_f - \delta U + \delta W) dt = 0 \quad (2-29)$$

از روابط ۱۵-۲ و ۲۱-۲ و ۲۷-۲ و جایگذاری آن‌ها در رابطه ۲۹-۲، ضرایب δu ، δw و $\delta \varphi$ به‌قرار روابط ۳۰-۲ تا ۳۲-۲ است.

$$\begin{aligned}
\delta w : & \overline{\rho A} \frac{\partial^2}{\partial t^2} w(x, t) \\
& - \overline{EA} \left[\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial x} w(x, t) \right. \\
& \quad \left. + \left(\frac{\partial}{\partial x} u(x, t) \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) + 3/2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} w(x, t) \right)^2 \right. \\
& \quad \left. + \left(v \sin(\theta) \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} u(x, t) - v \cos(\theta) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial t} u(x, t) \right. \right. \\
& \quad \left. + \frac{\partial^2}{\partial t^2} w(x, t) + 2v \cos(\theta) \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} w(x, t) \right. \\
& \quad \left. + v \sin(\theta) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial t} w(x, t) + v^2 \cos(\theta) \frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \\
& - A_1 e_1 \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \phi(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial x} w(x, t) + \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, t) \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \\
& + \alpha \frac{\partial}{\partial t} w(x, t)
\end{aligned} \tag{۳۰-۲}$$

$$\delta u : -\rho_f A_f (u_{tt} + v \sin \theta w_{xt} + v^2 \sin \theta w_{xx}) + \overline{EA} (u_{xx} + w_{xx} w_x) + A_1 e_1 \phi_{xx} \tag{۳۱-۲}$$

$$\delta \phi : A_1 e_1 u_{xx} + A_1 e_1 \frac{\partial (w_x)^2}{2 \partial x} - k_1 \phi_{xx} \tag{۳۲-۲}$$

با محاسبه تغییرات w و u و گرفتن انتگرال جز به جزء و برابر صفر قرار دادن ضرایب δw و δu و شرایط مرزی و معادله حرکت به دست می‌آید. با توجه به شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده، δw و δu در t_1 و t_2 و در $x=0, L$ ، w_1, w_2 صفر و طول نانو تیوب است. از حل رابطه ۲-31 با توجه به مرجع [۲۶، ۲۷] $u(0, t) = u(l, t) = 0$ و $w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$ at $x = 0, l$ با توجه به باریک بودن تیوب از u_{tt} صرف نظر می‌شود با انتگرال گیری u_{xx} نسبت به x و اعمال شرایط بالا و ساده سازی رابطه جابجایی طولی به صورت رابطه ۲-33 تعریف می‌گردد.

$$u = -1/2 \int_0^x \left(\frac{\partial}{\partial x} w(x, t) \right)^2 dx + 1/2 \frac{x \int_0^L \left(\frac{\partial}{\partial x} w(x, t) \right)^2 dx}{L} \quad (۳۳-۲)$$

$$\begin{aligned} & \overline{EI} \frac{\partial^4}{\partial x^4} w(x, t) + \overline{\rho A} \frac{\partial^2}{\partial t^2} w(x, t) \\ & - \overline{EA} \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial x} w(x, t) + \left(\frac{\partial}{\partial x} u(x, t) \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) + 3/2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} w(x, t) \right)^2 \right) \\ & + \rho_f A_f \left(\begin{aligned} & v \sin(\theta) \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} u(x, t) - v \cos(\theta) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial t} u(x, t) + \frac{\partial^2}{\partial t^2} w(x, t) \\ & + 2v \cos(\theta) \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} w(x, t) + v \sin(\theta) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial t} w(x, t) + v^2 \cos(\theta) \frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \end{aligned} \right) \\ & - A_1 e_1 \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \phi(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial x} w(x, t) + \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, t) \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) + \alpha \frac{\partial}{\partial t} w(x, t) \\ & - e_0 a^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \cdot \left(\overline{\rho A} \frac{\partial^2}{\partial t^2} w(x, t) - \overline{EA} \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial x} w(x, t) \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{\partial}{\partial x} u(x, t) \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) + 3/2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} w(x, t) \right)^2 \right) \right. \\ & \left. + \rho_f A_f \left(\begin{aligned} & v \sin(\theta) \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} u(x, t) - v \cos(\theta) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial t} u(x, t) \right. \right. \\ & \left. + \frac{\partial^2}{\partial t^2} w(x, t) + 2v \cos(\theta) \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} w(x, t) \right. \\ & \left. \left. + v \sin(\theta) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial t} w(x, t) + v^2 \cos(\theta) \frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) \right) \\ & - A_1 e_1 \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \phi(x, t) \right) \frac{\partial}{\partial x} w(x, t) + \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, t) \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} w(x, t) \right) + \alpha \frac{\partial}{\partial t} w(x, t) \end{aligned} \right) \quad (۳۴-۲)$$

رابطه ۳۴-۲ از حل ضریب δw و جاگذاری رابطه ۳۳-۲ و استفاده از نظریه غیرموضعی [۸] به دست می‌آید.

۲-۴ حل معادله ارتعاشات

با استفاده از روش گلرکین و با انتخاب تابع متعامد، به حل معادله پرداخته می‌شود همچنین

$$\sin \theta = \theta = -w_x \text{ و } \cos \theta = 1 \text{ در نظر گرفته می‌شود.}$$

$$w(x, t) = \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) Y(\tau) \quad (2-35)$$

معادله دیفرانسیل غیرخطی برای پاسخ زمانی شکل مود اولیه به صورت رابطه ۲-۳۶ در نظر گرفته می‌شود.

$$\ddot{Y}(\tau) + (\omega_0^2 + \varepsilon c_1 \cos(\Omega_1 \tau)) Y(\tau) + 2\varepsilon \mu \dot{Y}(\tau) + c_2 Y^3(\tau) = 0 \quad (2-36)$$

با استفاده از رابطه ۲-۳۵ در قضیه تعامد^۱ و انتگرال گیری و بی بعد سازی بر اساس پارامترهای رابطه ۲-۳۷

هریک از پارامترهای ω_0^2 ، $c_1 \cos(\Omega_1 \tau)$ ، μ و c_2 به دست می‌آید. پارامترهای بی بعد به صورت رابطه‌های زیر نوشته می‌شود.

$$x = Ly \quad t = T \tau \quad w = LW \quad T = \sqrt{\frac{(\rho A + \rho_f A_f).L^4}{EI}} \quad (2-37)$$

$$\mu_0 = \frac{e_0 a}{L} \quad V_0 = \frac{A_1 e_1 V_0 L}{EI} \quad V_1 = \frac{A_1 e_1 V_1 L}{EI} \quad U = \frac{\rho_f A_f (vL)^2}{EI}$$

که $y, \tau, W, \mu_0, V_0, V_1, U$ پارامترهای بی بعد مسئله است. پارامترهای رابطه ۲-۳۶ به قرار زیر

تعریف می‌گردد:

^۱ Orthogonality

$$\omega_0^2 = -U \pi^2 + \pi^2 V_{10} + \frac{\pi^4}{1 + \mu^2 \pi^2} \quad (۳۸-۲)$$

$$c_1 \cos(\Omega_1 \tau) = \pi^2 V_1 \cos(\omega \tau) \quad (۳۹-۲)$$

$$\mu = \frac{L^4 \alpha}{\overline{EI} \sqrt{\frac{(\overline{\rho A} + \rho_f A_f) L^4}{\overline{EI}}}} \quad (۴۰-۲)$$

$$c_2 = \frac{1}{4} \frac{\overline{EA} \pi^4 L^2}{\overline{EI}} \quad (۴۱-۲)$$

حل رابطه ۳۶-۲ از روش مقیاس‌های چندگانه [۲۸] به صورت سری ۲-۴۲ از مرجع [۲۸] نوشته می‌شود:

$$Y(\tau) = Y_0(T_0, T_1) + \varepsilon Y_1(T_0, T_1) + \dots \quad (۴۲-۲)$$

$$T_n = \varepsilon^n t$$

در روش مقیاس‌های چندگانه تعریف مشتق مرتبه اول و دوم به صورت رابطه ۲-۴۳ نوشته می‌شود.

$$\frac{d}{dt} = \frac{dT_0}{dt} \frac{d}{dT_0} + \frac{dT_1}{dt} \frac{d}{dT_1} + \dots = D_0 + \varepsilon D_1 + \varepsilon^2 D_2 \quad (۴۳-۲)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} = D_0^2 + 2\varepsilon D_0 D_1 + \varepsilon^2 (D_1^2 + 2D_0 D_2) + \dots$$

با اعمال تعاریف بالا در معادله اصلی و جداسازی درجه‌های ε در رابطه ۲-۴۴ داریم:

$$\varepsilon^0 : D_0^2 Y_0 + \omega_0^2 Y_0 = 0 \quad (۴۴-۲)$$

$$\varepsilon^1 : D_0^2 Y_1 + \omega_0^2 Y_1 = -2D_0 D_1 Y_0 - 2\mu D_0 Y_0 - c_1 \cos(\Omega \tau) Y_0 - c_2 Y_0^3$$

جواب مسئله به صورت $Y_0 = A(T_1) e^{(i \omega_0 T_0)} + \overline{A}(T_1) e^{(-i \omega_0 T_0)}$ را در رابطه ۲-۴۴ جاگذاری کرده رابطه ۲-۴۵ به دست می‌آید.

$$- [2i \omega_0 (A' + \mu A) + 3c_2 A^2 \bar{A}] \exp(i \omega_0 T_0) - \quad (۲-۴۵)$$

$$\frac{c_1}{2} [A(T_1) \exp((\Omega + \omega_0) T_0) + \bar{A}(T_1) \exp((\Omega - \omega_0) T_0)] - c_2 A^3 \exp((3i \omega_0) T_0) + C.C \quad (۴۵)$$

از آنجایی که ۱ حالت رزونانس پارامتریک برای معادله مدل مسئله لحاظ می‌گردد، $\Omega = 2\omega_0 + \varepsilon\sigma$ که ω_0 فرکانس طبیعی و σ فرکانس رزونانس است. همچنین فرض بر این است فرکانس پارامتریک بر اثر ولتاژ به فرکانس طبیعی نزدیک است. با برابر صفر قرار دادن جملات سکولار در ۲-۴۵، ۲-۴۶ نتیجه می‌شود.

$$- [2i \omega_0 (A' + \mu A) + 3c_2 A^2 \bar{A}] + \frac{c_1}{2} [A(T_1) \exp((\sigma) T_1)] = 0 \quad (۲-۴۶)$$

با فرض $A = \frac{1}{2} a \exp(i \theta)$ و $\gamma = \sigma T_1 - 2\theta$ [۲۸] و جاگذاری آن در ۲-۴۵ و ۲-۴۶ و حل ۲ معادله ۲ مجهول به دست آمده، برای دامنه ارتعاش در حالت پایدار مورد بررسی داریم:

$$a = \left(\frac{8\omega_0}{3c_2} \left[\frac{\sigma}{2} \pm \left(\left(\frac{c_1}{4\omega_0} \right)^2 - \mu^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۲-۴۷)$$

با توجه به ۲-۴۷ شرط اولیه داشتن جواب $\mu \leq \left(\frac{c_1}{4\omega_0} \right)$ و برای σ مثبت $\frac{\sigma}{2} \leq \left(\left(\frac{c_1}{4\omega_0} \right)^2 - \mu^2 \right)^{\frac{1}{2}}$ و در

صورت منفی بودن $\left(\left(\frac{c_1}{4\omega_0} \right)^2 - \mu^2 \right)^{\frac{1}{2}} \leq \left| \frac{\sigma}{2} \right|$ است.

فصل سوم

تحليل نتائج

۳-۱ بررسی صحت مدل و روابط به دست آمده

برای تثبیت صحت مدل و محاسبات عددی انجام شده نیاز به مقایسه با مدل های مقالات موجود است. در ابتدا مقایسه ی سرعت بحرانی با فرض نبود تأثیر ضریب غیرموضعی و سیال ویسکوز خارجی با شرایط پارامتری تعریف شده در منابع ذکر شده طبق جدول ۳-۱ صورت می گیرد که در جدول ۳-۲ به صورت کامل نوشته شده است. برای مقادیر مختلف نسبت طول به قطر، نتایج با مقاله Yoon و همکاران [۲۹]، خسرویان و رفیع تبار [۳۰] و مقاله قوانلو [۱۵]، با مدل نانو تیوب حاوی سیال [۱۵] مورد مقایسه قرار گرفته است. باید خاطرنشان نمود که سرعت بحرانی سرعتی است که در شکل مود اول، فرکانس به صفر برسد.

جدول (۳-۱) پارامترهای مسئله مقاله [۱۵] جهت صحت سنجی		
شعاع خارجی نانو تیوب	۵۰	nm
ضخامت	۱۰	nm
چگالی	۲.۳	g / cm ³
مدول یانگ	۱	Tpa
چگالی آب	۱	g / cm ³

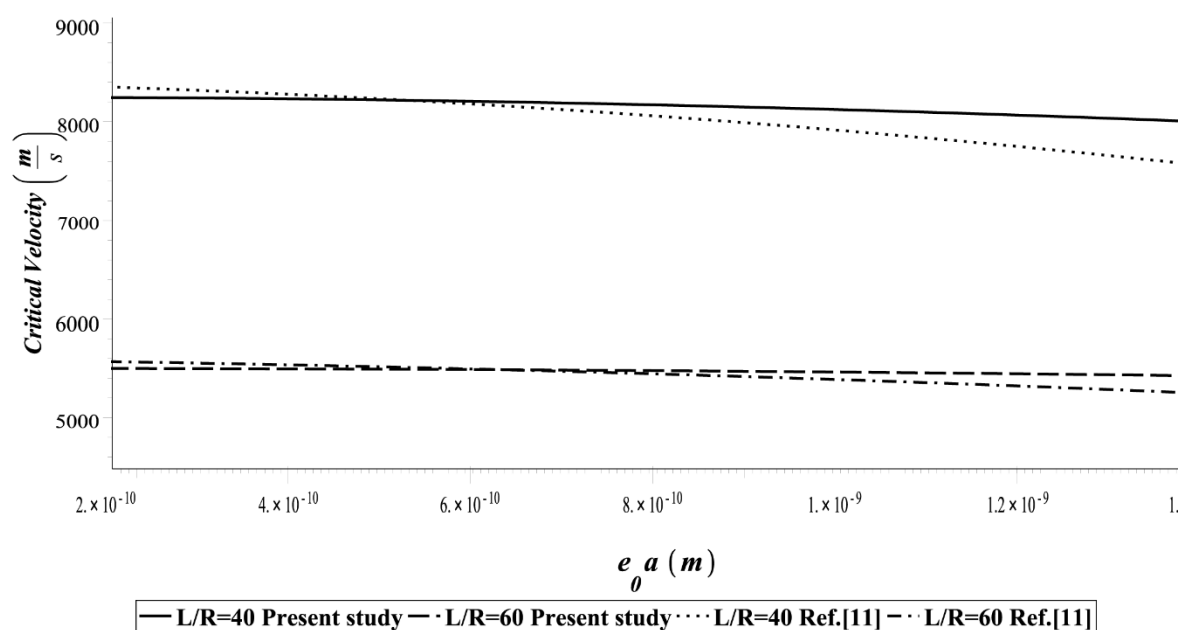
$$err = \frac{Calculated - Accepted}{Accepted} * 100 \quad (۳-۱)$$

جدول (۲-۳) سرعت بحرانی به دست آمده در مقایسه با مقالات مورد بررسی				
$L / 2R_{out}$	<i>Present study</i>	<i>Ghavanloo et al.[15]</i>	<i>Khosravian and Rafii-Tabar[30]</i>	<i>Yoon et al.[29]</i>
۱۰	۴۷۶۸	۴۷۸۰	۴۴۰۰	–
۲۰	۲۳۸۴	۲۳۹۵	۲۳۰۰	۲۳۸۰
۳۵	۱۳۶۲	۱۳۷۸	۱۳۵۰	۱۴۰۰
۵۰	۹۵۳	۹۷۰	۹۵۰	۹۸۰
۱۰۰	۴۷۶	۴۹۲	۴۷۸	۴۹۰
۵۰۰	۹۵	۱۰۴	–	۹۸

با توجه به جدول و محاسبات انجام شده با استفاده از رابطه ۳-۱، خطا با منبع [۱۵] میانگین خطا ۲,۷ درصد، مقاله [۳۰] میانگین خطا ۲,۵ درصد و با مقاله مورد بررسی [۲۹] میانگین خطا ۲,۴ درصد است؛ که عدهای خطای محاسبه شده اختلاف کم بین سرعتها دارد و به صورت قابل قبولی نشان دهنده صحت محاسبات انجام شده است و روش مناسبی برای تخمین سرعت بحرانی است.

بار دیگر با استفاده از منبع [۱۵] به تحقیق ارتباط بین سرعت بحرانی به جمله غیرموضعی پرداخته شده است به طوری که نمودار به دست آمده مقاله و مدل مفروض این بحث به صورت شکل ۳-۱ بوده و اطلاعات مقاله مورد بررسی در جدول ۳-۳ موجود است. این مقدار اختلاف ناشی از نوع محاسبه مقاله و استفاده از تئوری تیر تیموشنکو و رابطه ی کلون و ویت و با فرض ویسکو الاستیک بودن نانو تیوب است.

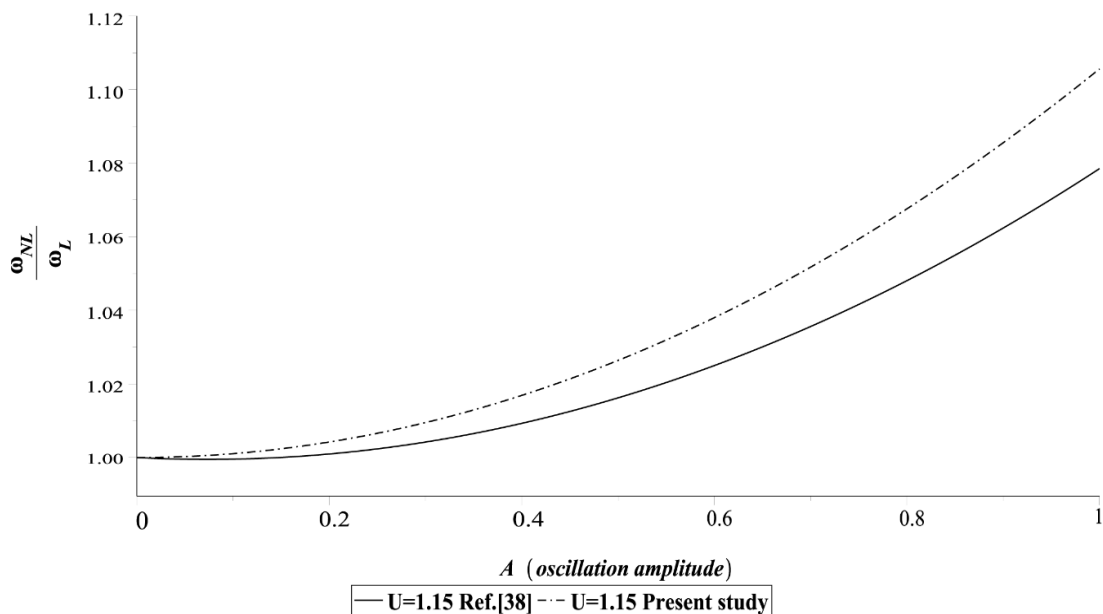
جدول (۳-۳) پارامترهای مسئله مقاله [۱۵] جهت صحت سنجی		
نسبت طول به شعاع	40	-
شعاع خارجی نانو تیوب	۵۰	nm
ضخامت	۱۰	nm
چگالی	۲.۳	g/cm^3
مدول یانگ	۱	Tpa
چگالی آب	۱	g/cm^3



شکل (۳-۱) نمودار سرعت بحرانی به پارامتر کوچکی اندازه (غیرموضعی)

با استفاده از مقاله [۲۶] با شرایط مشابه شرایط مسئله مورد بحث و بررسی بدون در نظر گرفتن لایه پیزوالکتریک و سیال بیرونی ارتباط بین ۲ پارامتر نسبت فرکانس به دامنه در سرعت بی بعد ثابت ۱،۱۵ نمودار شده و با توجه به شکل ۳-۲ به دست آورده شده در مقاله و داده‌های به دست آورده شده با

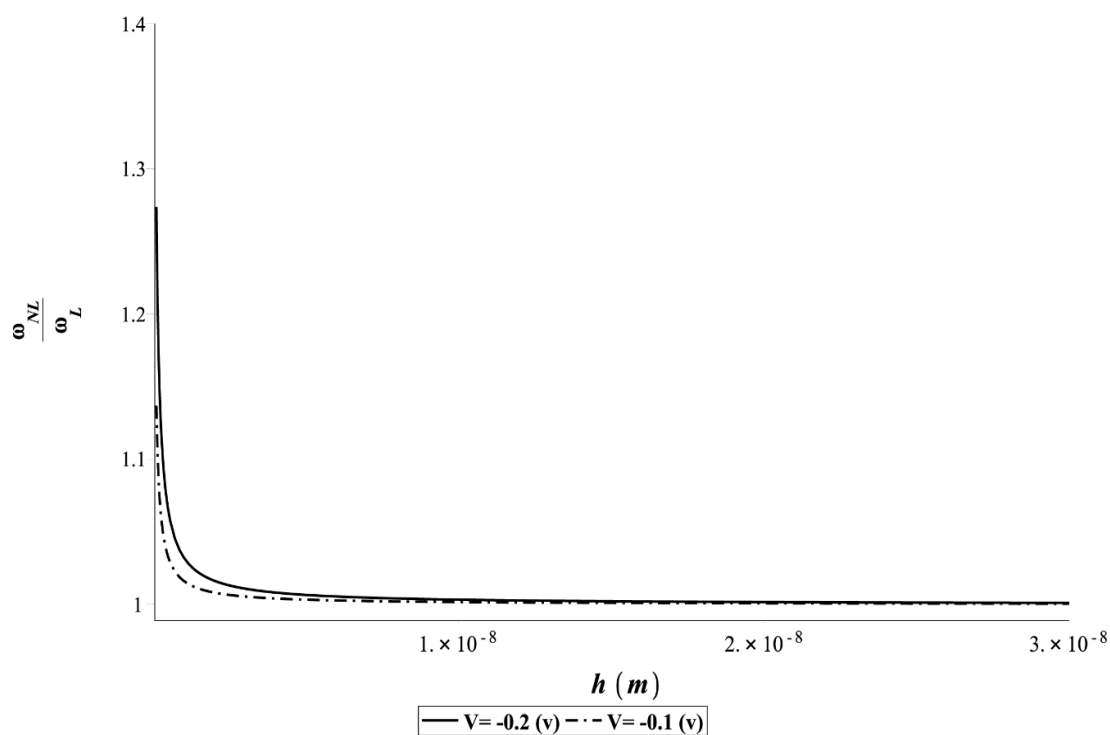
رابطه اختلاف 0.04 در ماکزیمم دامنه برای نسبت فرکانس موجود بوده که به علت داشتن جمله سختی پسترنک در مسئله مقاله قابل اغماض است. همچنین خطای به دست آمده در داده ها حدوداً 0.5% در مورد آن سرعت بی بعد معین است.



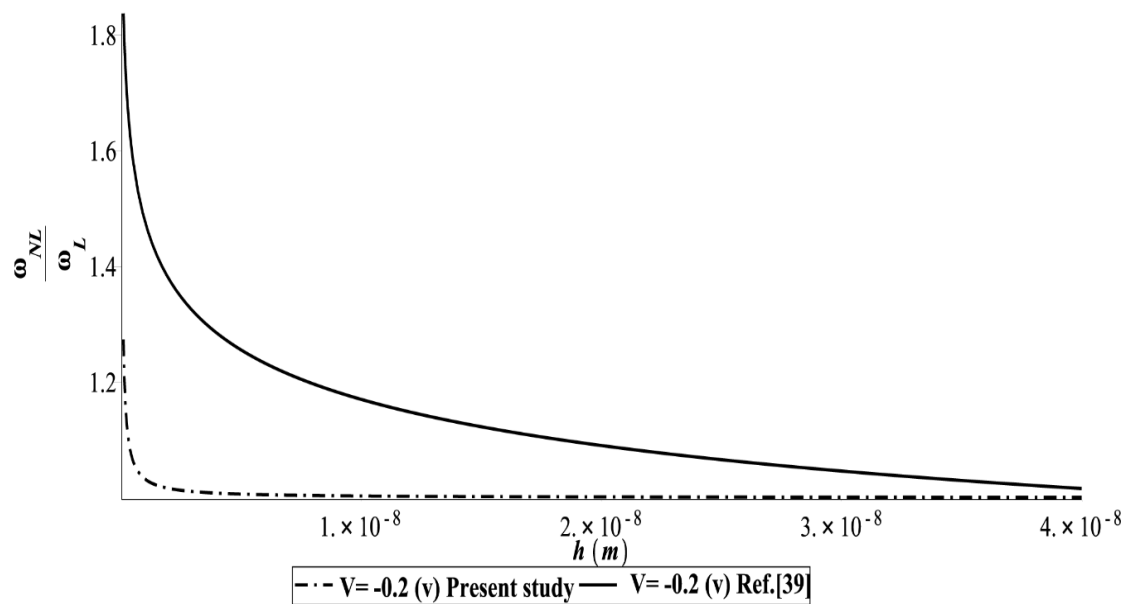
شکل (۳-۲) نمودار نسبت فرکانس بر حسب دامنه متغیر با سرعت بی بعد سیال داخلی

پس از تثبیت صحت روابط به دست آمده در شرایط گفته شده، تغییرات لایه پیزوالکتریک و صحت سنجی روابط آن مورد بررسی قرار می گیرد. در مقاله [۳۱] تیر اوپلر با ابعاد مستطیلی در قسمت مقطع بوده که با تغییر در شرایط مرزی معادلات به تیر با سطح مقطع یکسان اما دایره ای برای به دست آوردن شرایط بررسی مقاله پرداخته شد که در ۲ ولتاژ 0.2 و 0.1 ، نمودارها به صورت شکل ۳-۳ و ۳-۴ است. برای صحت سنجی و خطای مسئله در مورد ولتاژ 0.2 ، داده ها در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

اختلاف نمودارهای به دست آمده، بر اثر اختلاف محاسباتی به دست آمده مختص شرایط هندسی مسئله و تأثیر سطح محاسبه شده است. هدف نمودار نرخ تغییرات نسبت فرکانس به قطر لایه پیزوالکتریک است. شکل ۳-۳ نسبت ضخامت پیزوالکتریک به نسبت فرکانس است که در ۲ ولتاژ 0.2 و 0.1 برای مدل مسئله به دست آمده است.



شکل (۳-۳) نمودار ضخامت پیزوالکتریک به نسبت فرکانس در مدل مسئله و مقاله مورد بررسی



شکل (۴-۳) نمودار ضخامت پیزوالکتریک به نسبت فرکانس در مدل مسئله

۳-۲ آنالیز ارتعاشات تیوب حاوی سیال مغروق در سیال دیگر به همراه

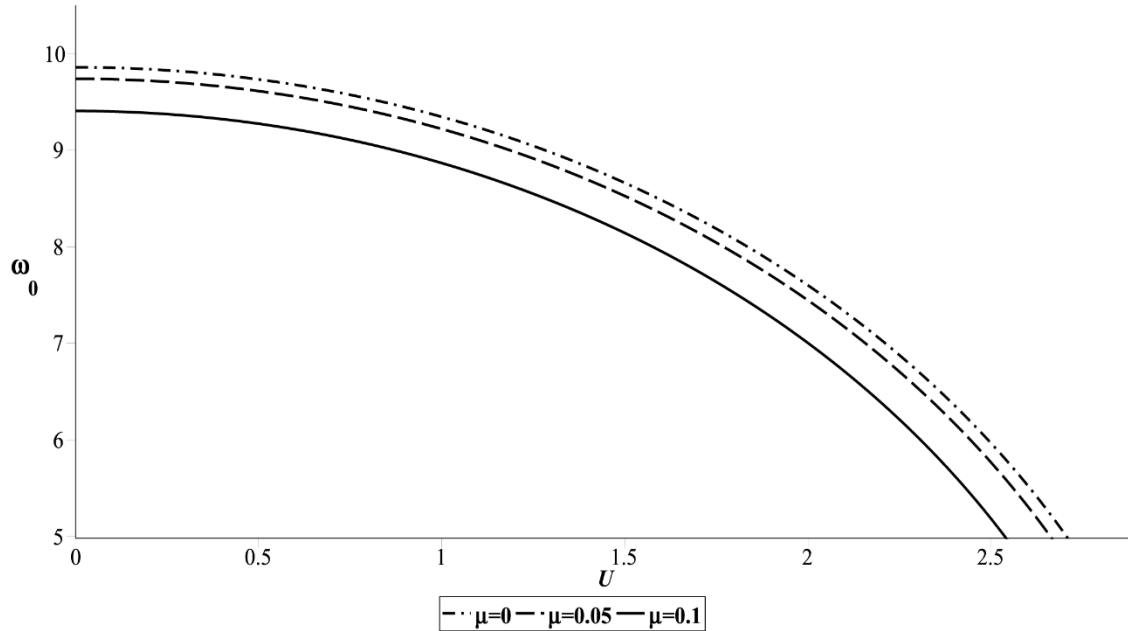
لایه پیزوالکتریک

هدف از این قسمت اجرای پارامترهای بررسی شده برای تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی در رفتار ارتعاشات است. پاسخ فرکانسی برحسب ولتاژ هارمونیک ورودی، تأثیر پیزوالکتریک، رفتار جریان مایع داخلی، پارامتر اندازه کوچک و تأثیر سیال خارجی نتیجه نمودارهای موردبررسی است. منبع مقدارهای ورودی اولیه در این قسمت از بررسی نموداری [۱۵] و جنس لایه پیزوالکتریک $PZT-5H^1$ است. ماکزیمم فرکانس زمانی که سیال داخلی ساکن است در شکل ۳-۵ مشهود است. به طوری که تغییرات پارامتر غیرموضعی نشان می‌دهد که افزایش این پارامتر موجب کاهش ماکزیمم فرکانس خطی و همچنین کاهش سرعت بحرانی می‌شود. با فرض مدل کلاسیک بدون جمله غیرموضعی مشخص می‌گردد که سرعت بالاتر موجب ایجاد خطا در محاسبه رفتار پایداری و ارتعاش می‌گردد.

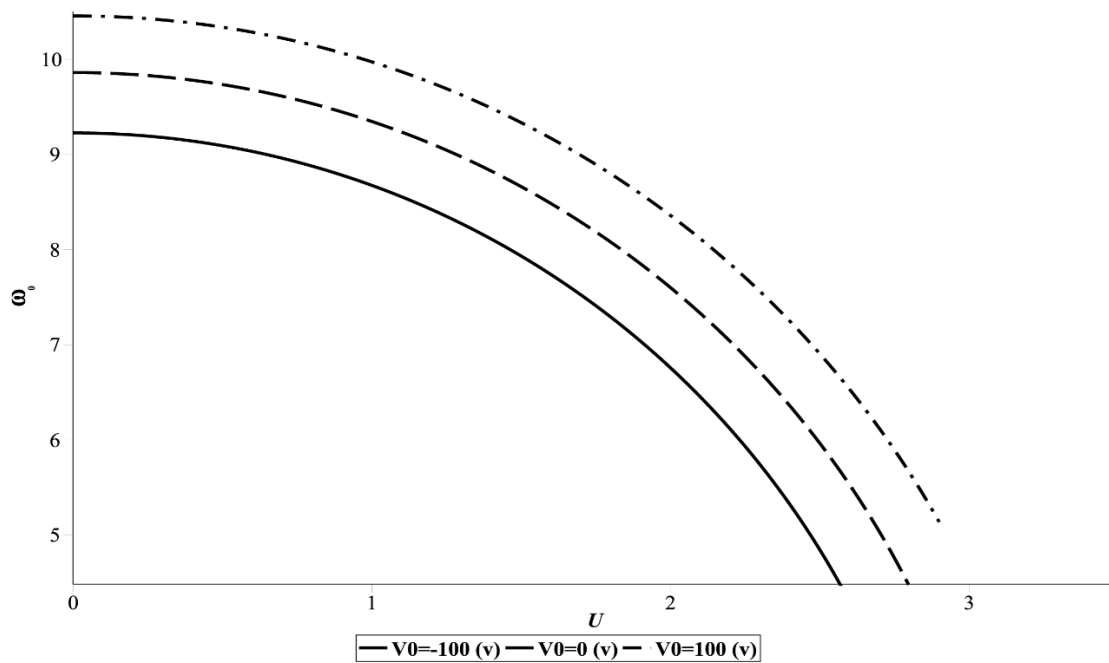
تأثیر ولتاژ اعمالی بر نسبت فرکانس به سرعت در شکل ۳-۶ حاکی از آن است که ولتاژ مثبت بالاتر موجب فرکانس بالاتر می‌گردد؛ یعنی افزایش در ولتاژ موجب افزایش بازه پایداری سیستم که ویژگی بسیار مهمی است، شده و می‌تواند به عنوان پارامتر مؤثر در طراحی سیستم به کار آید. رفتار ساختار ارتعاشی تحت رزونانس پارامتریک سیستم در شکل‌های ۳-۷ تا ۳-۱۱ نشان داده شده است. شکل ۳-۷ حالت معمولی نسبت فرکانس برحسب دامنه را بر اثر ولتاژ هارمونیک نشان می‌دهد. منحنی سمت راست جواب ناپایدار سیستم است [۲۸] که به صورت فیزیکی اتفاق نمی‌افتد در قسمت راست منحنی از دامنه صفر یا فرکانس طبیعی شروع شده و با افزایش ولتاژ و کاهش فرکانس رزونانس تغییر ناگهانی در دامنه

¹ Lead zirconate titanate material

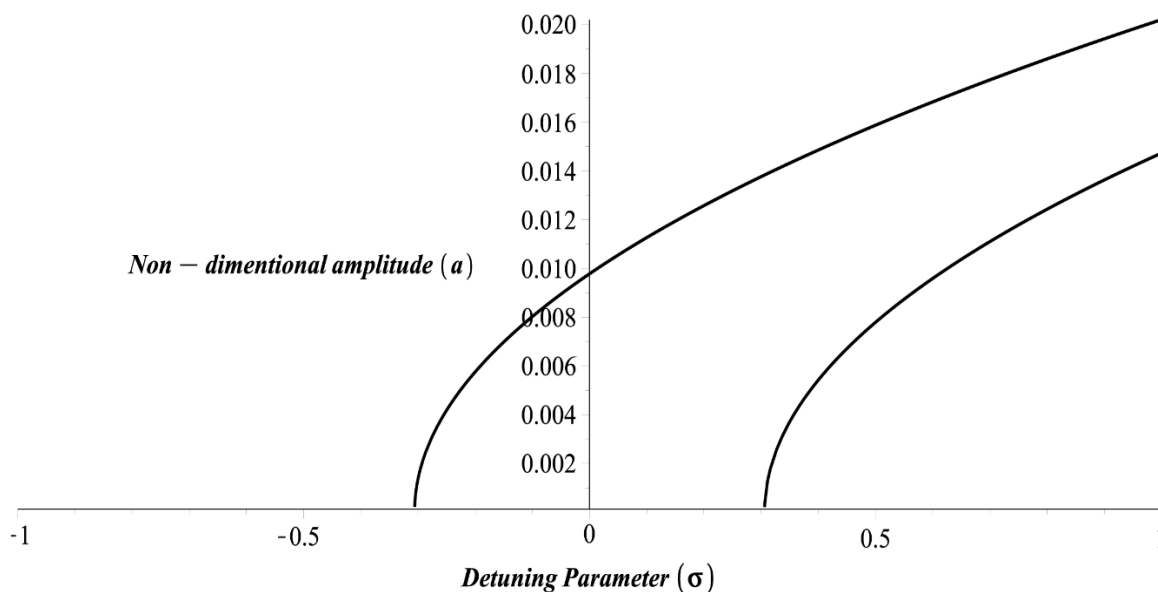
داشته به منحنی سمت چپ فرکانس رزونانس و دامنه آن می‌رسد، پس از آن فرکانس رزونانس کاهش یافته تا فرکانس طبیعی نتیجه شود.



شکل (۳-۵) نمودار نسبت فرکانس به سرعت با توجه به تغییرات پارامتر غیرموضعی

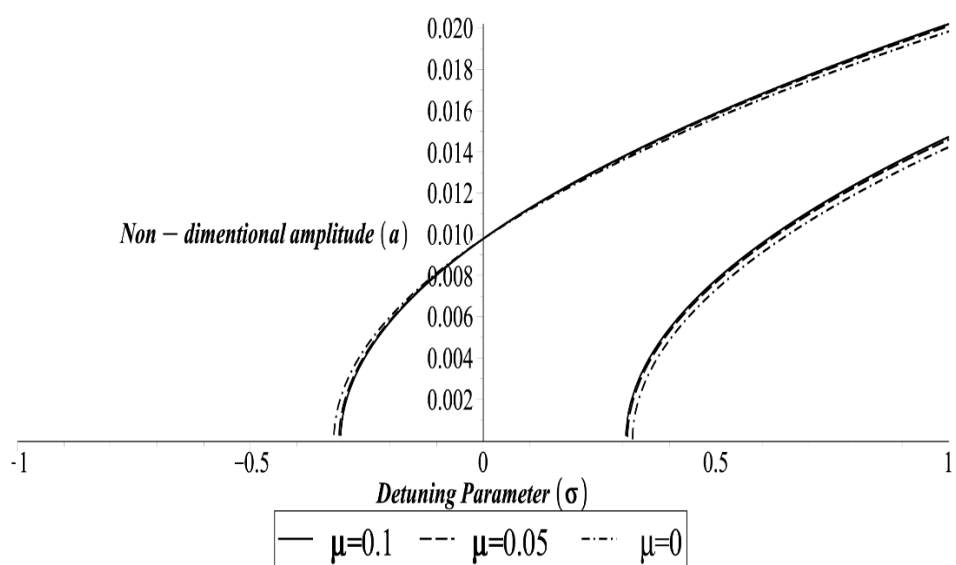


شکل (۳-۶) نمودار نسبت فرکانس به سرعت با احتساب تغییرات ولتاژ اعمالی

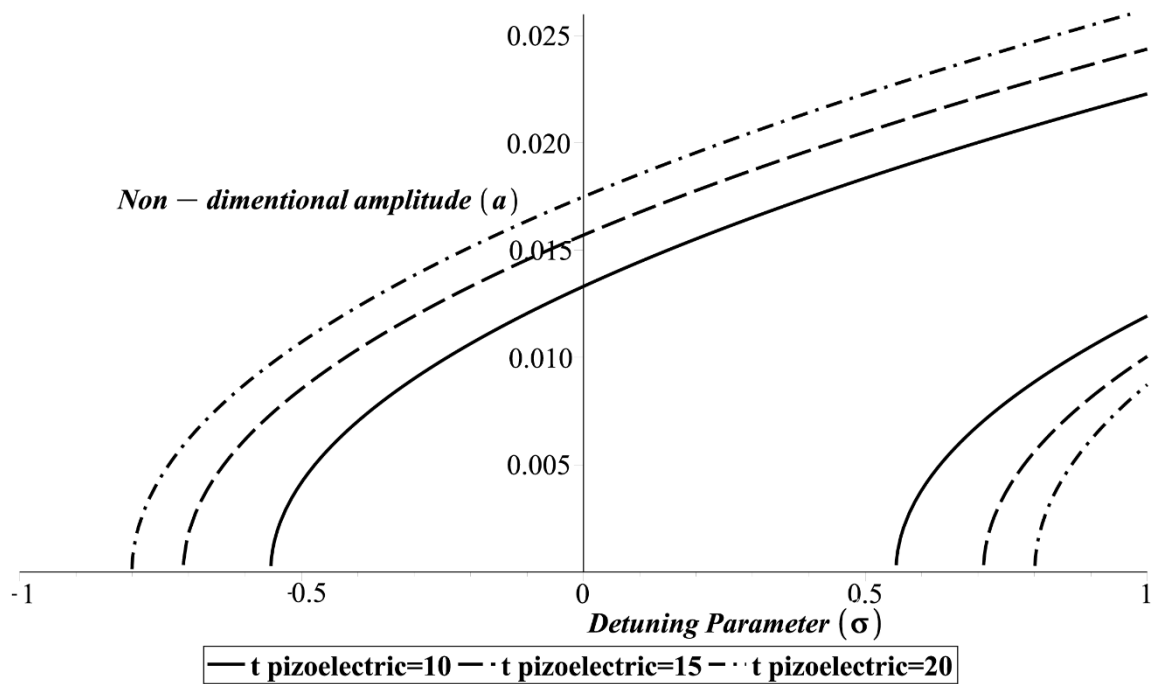


شکل (۷-۳) نمودار نسبت دامنه به فرکانس

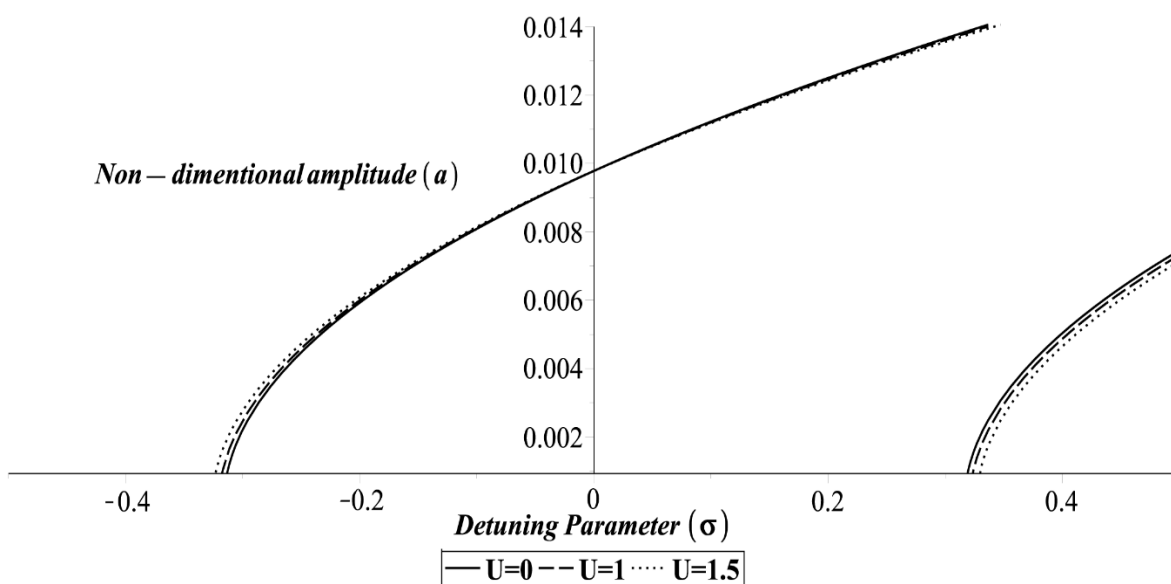
تأثیر پارامتر غیرموضعی در شکل ۸-۳ حاکی از آن است که با افزایش پارامتر غیرموضعی، سختی افزایش یافته و در دامنه مشخص فرکانس رزونانس کاهش یافته است. از شکل ۹-۳ می توان دریافت که سیستم نسبت به تغییرات ضخامت لایه پیزوالکتریک حساس تر بوده و نقطه پرش دامنه تغییر پیدا می کند و افزایش در ضخامت محدوده وسط نمودار پاسخ را افزایش می دهد. تغییر سرعت جریان سیال داخلی نانو تیوب موجب تغییراتی در رفتار سختی و محدوده داخلی نمودار پاسخ فرکانسی ایجاد می کند همان طور که در شکل ۱۰-۳ مشخص است، افزایش سرعت در دامنه مشخص با کاهش فرکانس رزونانس همراه است و موجب افزایش پایداری می گردد.



شکل (۸-۳) نمودار دامنه نسبت به فرکانس متغیر با پارامتر غیرموضعی

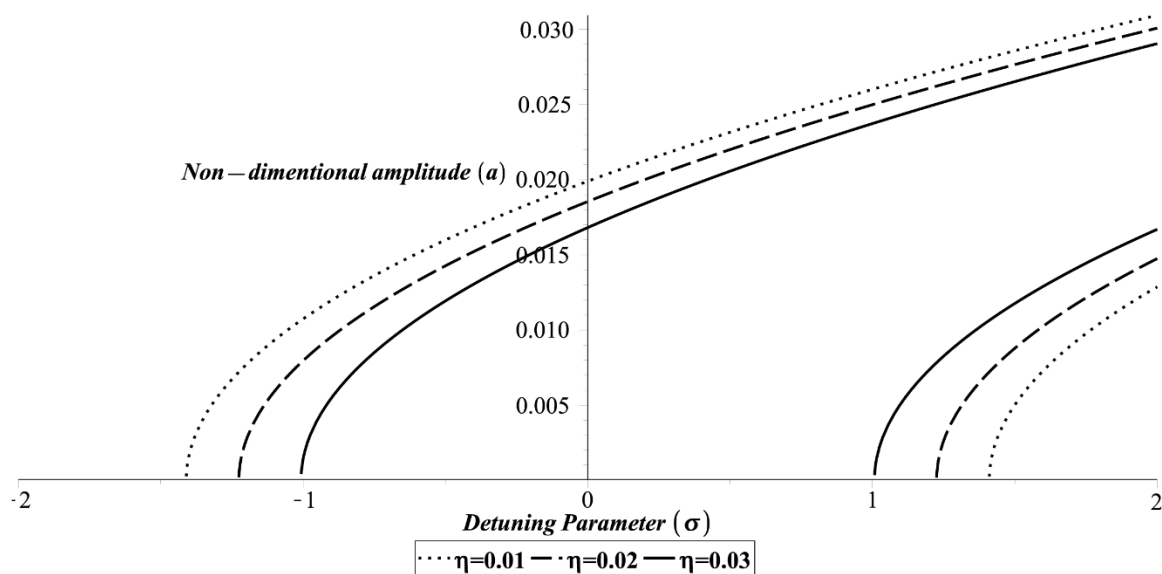


شکل (۹-۳) نمودار دامنه نسبت به فرکانس متغیر با ضخامت پیزوالکتریک

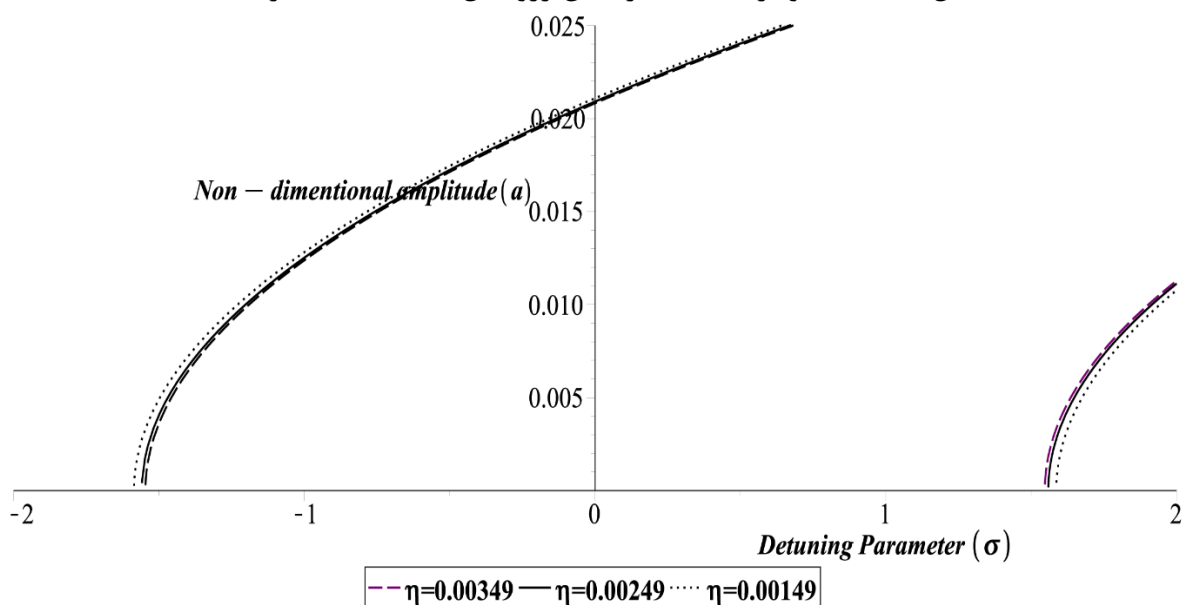


شکل (۳-۱۰) نمودار دامنه نسبت به فرکانس رزونانس با احتساب تغییرات سرعت

شکل ۳-۱۱ تأثیر پارامتر η بر نسبت دامنه به فرکانس رزونانس را نشان می‌دهد. پارامتر η نسبت شعاع تیوب تا انتهای لایه پیزوالکتریک به شعاع کلی مدل مسئله تا انتهای لایه سیال بیرونی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان فرکانس در دامنه ثابت با افزایش نسبت η کاهش می‌یابد؛ یعنی همان‌طور که در معادله اصلی سیال بیرونی به‌عنوان دمپر نمایان شده از این‌رو با افزایش ضخامت سیال یعنی کاهش η نمودار بازتر می‌گردد. همان‌طور که از نظر فیزیکی برای تأثیر سیال خارجی، بینهایت فیزیکی وجود دارد بطوریکه از آن بینهایت به بعد رفتار ارتعاشات نزدیک به هم است از این‌رو مسئله نیازمند بررسی این بینهایت است. پس از بررسی ضخامتهای مختلف و نسبت η در معادله محاسبه‌شده و رسم نمودار نیروی سیال خارجی نسبت به η و مشاهده رفتار نزدیک به صفر نیروی خارجی در مقدار مشخص، برای این مدل کاشف به‌عمل‌آمده است که با افزایش ضخامت تا ۲۹۰ برابر شعاع خارجی نانو تیوب، ضخامتهای بالاتر رفتاری نزدیک به هم دارند. همان‌طور که در شکل ۳-۱۲ مشاهده می‌شود می‌توان این تغییرات ناچیز را به ترتیب در ۲۹۰، ۴۰۰ و ۶۷۰ برابر شعاع خارجی نانو تیوب مشاهده نمود.



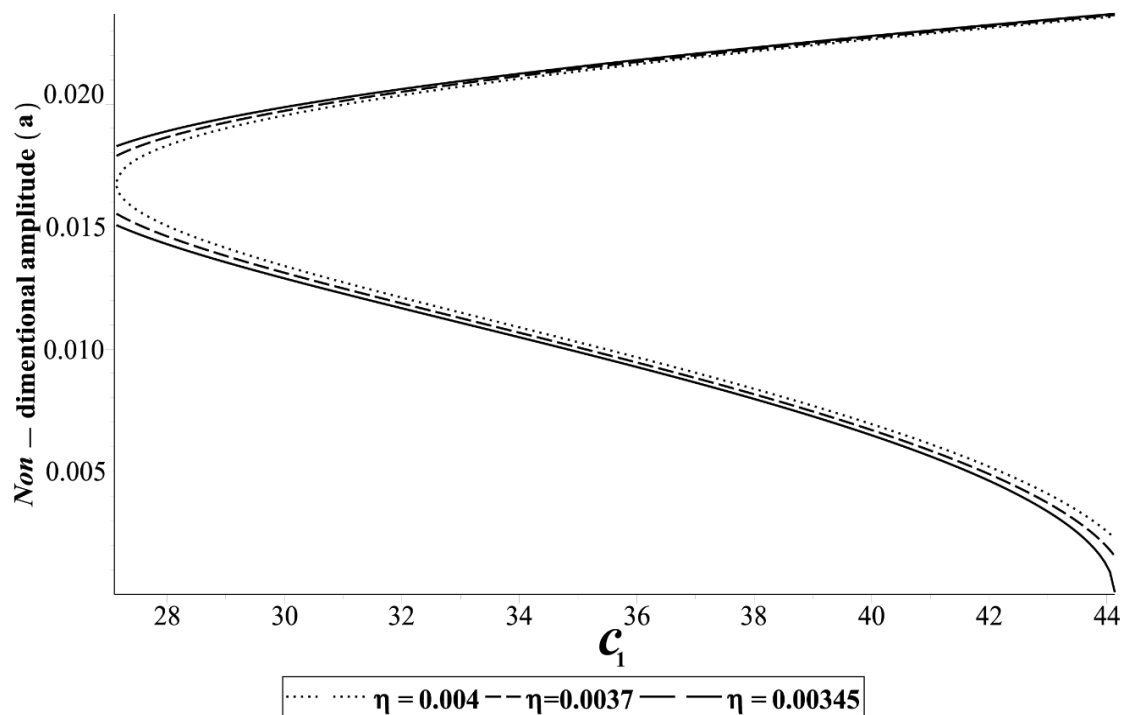
شکل (۳-۱۱) نمودار دامنه به فرکانس رزونانس با احتساب تغییرات η



شکل (۳-۱۲) نمودار نسبت دامنه به فرکانس رزونانس با احتساب تغییرات η های پایین تر

شکل ۳-۱۳ منحنی پاسخی را مشخص می نماید که تأثیر ضخامت سیال خارجی را در شعاع های ۲۵۰، ۲۷۰ و ۲۹۰ برابر شعاع کلی بدون احتساب سیال خارجی در نسبت دامنه ولتاژ هارمونیک به دامنه فرکانس نشان می دهد. لازمه ی رسم نمودار σ بزرگ تر از صفر در رابطه ۲-۶۳ است. بازه منحنی زیرین همانند نمودارهای قبلی پاسخ ناپایدار سیستم بوده و نقطه پرش نمودار بسته به کاهش و یا افزایش

دامنه تحریک در انتها و یا ابتدای منحنی بالایی است. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، افزایش دامنه ولتاژ هارمونیک، دامنه را افزایش داده و نقطه پرش را جابه‌جا می‌نماید.



شکل (۳-۱۳) نمودار دامنه بی بعد بر حسب دامنه ولتاژ هارمونیک با احتساب تغییرات η

فصل چهارم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۴-۱ نتیجه گیری

این قسمت به نتایج این رساله اختصاص داده شده است. ارتعاشات غیرخطی مدل مسئله به صورت سیستمی حاوی نانو تیوب کربنی به همراه لایه پیزوالکتریک مغروق در سیال و حاوی سیال داخلی تحت تحریک پارامتریک بررسی شده است.

در فصل دوم ابتدا توضیحی در مورد معادله اوپلر برنولی داده شده، معادله حالت ارتعاشات مسئله به دست می آید. معادله حالت، با استفاده از روش گلرکین و اعمال قضیه تعامد مود های نرمال و شرایط اولیه تکیه گاه ساده، به معادله حاکم مسئله تبدیل می گردد. حل انتهای به وسیله روش مقیاس های چندگانه است.

همان طور که در فصل سوم نمودارهای مسئله از نظر خطی و غیرخطی ارتعاشات مدل مسئله مورد تحلیل قرار گرفته، در این قسمت جمع بندی می گردد.

- با توجه به فرکانس خطی طبیعی به دست آمده و برابر صفر قرار دادن آن برای به دست آوردن سرعت بحرانی سیال داخلی نانو تیوب، مشاهده می شود که افزایش پارامتر غیرموضعی $e_0 a$ منجر به کاهش سرعت های بحرانی را در شرایط معلوم شده و این تغییرات در نسبت های $\frac{L}{R}$ کوچک تر، محسوس است.
- با تغییر ضخامت لایه پیزوالکتریک، نسبت فرکانس غیرخطی به فرکانس خطی $(\frac{\omega_{NL}}{\omega_L})$ کاهش یافته که رفتار کاهش آن بستگی به ولتاژ تحریک پیزوالکتریک دارد.
- فرکانس طبیعی سیستم به طور کلی رفتار مشخصی نسبت به سرعت بی بعد دارد به طوری که با افزایش سرعت بی بعد کاهش فرکانس مشاهده شده تا ارتعاشات به سرعت بحرانی برسد که فرکانس در آن به صفر نزدیک شده است.
- کاهش سرعت بی بعد تا مقدار صفر، عدد مشخصی برای فرکانس طبیعی به دست می دهد.
- افزایش مقدار پارامتر غیرموضعی، موجب افزایش فرکانس در سرعت صفر می گردد و مساحت نمودار سرعت نسبت به فرکانس را افزایش می دهد.
- افزایش ولتاژ اولیه V_0 موجب افزایش مساحت نمودار سرعت نسبت به فرکانس شده و رفتاری مشابه با پارامتر غیرموضعی دارد.

- با استفاده از حل ارتعاشات غیرخطی نمودار نسبت فرکانس تحریک به دامنه به دست آمده که شامل دو منحنی است که یکی از منحنی‌ها به صورت فیزیکی اتفاق نمی‌افتد. کاهش فرکانس تحریک منجر به ایجاد پرش در دامنه شده که نقطه پرش نامیده می‌شود.
- با افزایش پارامتر غیرموضعی، سختی افزایش یافته و بازه بین دو منحنی کاهش یافته و نقطه پرش با مقدار کمتری مشاهده می‌شود.
- اندازه ضخامت لایه پیزوالکتریک تغییر محسوس در نسبت فرکانس تحریک به دامنه دارد. با افزایش آن بازه بین دو منحنی بازتر شده، شیب منحنی‌ها کمتر شده و در نتیجه سختی افزایش یافته و نقطه پرش با مقدار بیشتری ایجاد می‌شود.
- منحنی نسبت فرکانس تحریک به دامنه نسبت به سرعت سیال داخلی حساسیت بسیار کمی دارد که این تغییرات ناچیز با کاهش سرعت، سختی کمتر، فاصله‌ی بین دو منحنی بیشتری را ایجاد می‌نماید.
- آنچه به عنوان نتیجه اصلی رساله مشخص می‌گردد تأثیر ضخامت سیال خارجی است. در نمودارهای تحلیلی مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت سیال خارجی بازه‌ی بین دو منحنی ذکر شده در موارد قبل، بازتر شده پایداری بیشتر و نقطه پرش بالاتری دارد.
- از ضخامت بحرانی محاسبه شده در فصل سوم به بعد تغییرات منحنی‌های نسبت فرکانس تحریک به دامنه بسیار ناچیز بوده و تغییرات محسوسی مشاهده نمی‌شود.
- در نسبت دامنه ولتاژ هارمونیک به دامنه فرکانس، افزایش ضخامت سیال خارجی بازه بین دو منحنی بالا و پایین را افزایش می‌دهد و نقطه پرش را جابجا می‌کند و موجب افزایش پایداری می‌گردد.

۲-۴ پیشنهادات جهت ادامه کار

در راستای پیشرفت مدل مفروض در مسئله مورد بررسی در این پایان نامه پیشنهادهای دیگری در زمینه ارتعاشات نانو تیوب موجود است که به صورت موردی بیان می گردد.

- استفاده از دیگر نظریه های غیر کلاسیک و بررسی تأثیر اندازه در مقایسه با نظریه غیرموضعی
- بررسی تأثیر دما در ارتعاشات
- فرض تأثیر ویسکوالاستیک بودن نانو تیوب بر پایه نظریه کلونین وویت [۳۲, ۳۳]
- فرض خمیده بودن نانو تیوب و بررسی تأثیر آن
- استفاده از لایه هوشمندی به غیر از پیزوالکتریک مانند MRE و بررسی رفتار آن

منابع و مأخذ

- .1 Baughman, R.H., A.A. Zakhidov, and W.A. de Heer, 2002. *Carbon nanotubes--the route toward applications*. science, 297(5582): p. 792-787
- .2 Chopra, K.N. and A.K. Maini, 2010, *Thin films and their applications in military and civil sectors*. Defence Research and Development Organisation, Ministry of Defence.
- .3 Maissel, L.I. and M.H. Francombe, 1973, *An Introduction to Thin Films*. CRC Press.
- .4 Harper, D. *Piezoelectric*. Online Etymology Dictionary.
- .5 Callister, W.D. and D.G. Rethwisch, 2013, *Fundamentals of materials science and engineering*. Vol. 21. Wiley New York.
- .6 Minary-Jolandan, M. and M.-F. Yu, 2009. *Nanoscale characterization of isolated individual type I collagen fibrils: polarization and piezoelectricity*. Nanotechnology, 20(8): p. 085706
- .7 Peng, J., J. Wu, K. Hwang, J. Song, and Y. Huang, 2008. *Can a single-wall carbon nanotube be modeled as a thin shell?* Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 56(6): p. 2224-2213
- .8 Eringen, A.C., 1983. *On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves*. Journal of applied physics, 54(9): p. 4710-4703
- .9 Eringen, A.C., 2002, *Nonlocal continuum field theories*. Springer Science & Business Media.
- .10 Peddieson, J., G.R. Buchanan, and R.P. McNitt, 2003. *Application of nonlocal continuum models to nanotechnology*. International Journal of Engineering Science, 41(3): p. 312-305
- .11 Wang, C., V. Tan, and Y. Zhang, 2006. *Timoshenko beam model for vibration analysis of multi-walled carbon nanotubes*. Journal of Sound and Vibration, 294(4): p. 1060-1072.
- .12 Reddy, J., 2007. *Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams*. International Journal of Engineering Science, 45(2): p. 288-307.
- .13 Ansari, R., M. Hemmatnezhad, and H. Ramezannezhad, 2010. *Application of HPM to the nonlinear vibrations of multiwalled carbon nanotubes*. Numerical methods for partial differential equations, 26(2): p. 490-500.
- .14 Ansari, R. and S. Sahmani, 2012. *Small scale effect on vibrational response of single-walled carbon nanotubes with different boundary conditions based on nonlocal beam models*. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 17(4): p. 1965-1979.
- .15 Ghavanloo, E. and S.A. Fazelzadeh, 2011. *Flow-thermoelastic vibration and instability analysis of viscoelastic carbon nanotubes embedded in viscous fluid*. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 44(1): p. 17-24.

- .16 Maraghi, Z.K., A.G. Arani, R. Kolahchi, S. Amir, and M. Bagheri, 2013. *Nonlocal vibration and instability of embedded DWBNT conveying viscose fluid*. Composites Part B: Engineering, **45**(1): p. 423-432.
- .17 Tang, M., Q. Ni, L. Wang, Y. Luo, and Y. Wang, 2014. *Nonlinear modeling and size-dependent vibration analysis of curved microtubes conveying fluid based on modified couple stress theory*. International Journal of Engineering Science, **84**: p. 1-10.
- .18 Ansari, R., A. Norouzzadeh, R. Gholami, M.F. Shojaei, and M. Darabi, 2016. *Geometrically nonlinear free vibration and instability of fluid-conveying nanoscale pipes including surface stress effects*. Microfluidics and Nanofluidics, **20**(1): p. 1-14.
- .19 Soltani, P. and A. Farshidianfar, 2012. *Periodic solution for nonlinear vibration of a fluid-conveying carbon nanotube, based on the nonlocal continuum theory by energy balance method*. Applied Mathematical Modelling, **36**(8): p. 3712-3724.
- .20 Reddy, J., 2010. *Nonlocal nonlinear formulations for bending of classical and shear deformation theories of beams and plates*. International Journal of Engineering Science, **48**(11): p. 1507-1518.
- .21 Zhang, J., R. Wang, and C. Wang, 2012. *Piezoelectric ZnO-CNT nanotubes under axial strain and electrical voltage*. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, **46**: p. 105-112.
- .22 Jalili, N., 2009, *Piezoelectric-based vibration control :from macro to micro/nano scale systems*. Springer Science & Business Media.
- .23 Brissaud, M., 2010. *Three-dimensional modeling of piezoelectric materials*. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **57**(9): p. 2051-2065.
- .24 Reddy, J. and C. Wang, 2004. *Dynamics of fluid-conveying beams*. Centre for Offshore Research and Engineering, National University of Singapore, CORE Report, **3**: p. 1-21.
- .25 Ghavanloo, E., F. Daneshmand, and M. Amabili, 2010. *Vibration analysis of a single microtubule surrounded by cytoplasm*. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, **43**(1): p. 192-198.
- .26 Rasekh, M. and S.E. Khadem, 2009. *Nonlinear vibration and stability analysis of axially loaded embedded carbon nanotubes conveying fluid*. Journal of Physics D: Applied Physics, **42**(13): p. 135112.
- .27 Luo, A.C. and R.P. Han, 1999. *Analytical predictions of chaos in a non-linear rod*. Journal of Sound and Vibration, **227**(3): p. 523-544.
- .28 Nayfeh, A.H. and D.T. Mook, 2008, *Nonlinear oscillations*. John Wiley & Sons.
- .29 Yoon, J., C. Ru, and A. Mioduchowski, 2005. *Vibration and instability of carbon nanotubes conveying fluid*. Composites Science and Technology, **65**(9): p. 1326-1336.
- .30 Khosravian, N. and H. Rafii-Tabar, 2008. *Computational modelling of a non-viscous fluid flow in a multi-walled carbon nanotube modelled as a Timoshenko beam*. Nanotechnology, **19**(27): p. 275703.
- .31 Yan, Z. and L.Y. Jiang, 2011. *The vibrational and buckling behaviors of piezoelectric nanobeams with surface effects*. Nanotechnology, **22**(24): p. 245703.

- .32 Drozdov, A.D.,1998, *Viscoelastic structures: mechanics of growth and aging*. Academic Press.
- .33 Eringen, A.C., 1980. *Mechanics of continua*. Huntington, NY, Robert E. Krieger Publishing Co., 1980. 606 p., .1

Abstract

This thesis is aimed to investigate the nonlinear vibration of a double walled carbon nanotube conveying fluid, covered by a piezoelectric layer, and embedded in a viscous fluid. In this analysis, an Euler-Bernoulli beam model is used and in order to considering of size dependent effects, nonlocal theories is implemented. The governing equations of motion are derived using Hamilton's principle and then, the Galerkin procedure and the multiple scales method is used to solve the equations and investigate the vibration behavior of the system. It is receivable from this analysis that increasing the thickness of external fluid causes to increase the stability of the system. Also additional increase in thickness beyond a critical value causes no effect on vibration behavior of the system.

Key words: carbon nanotube, nonlinear vibration, Euler-Bernoulli beam, nonlocal elasticity theory



Kharazmi International Campus

M.Sc. Thesis in Applied Mechanics Engineering

**Vibration analysis of fluid conveying nanotube
embedded in viscouse fluid**

By

MAZDAK GHOBADI

Surpervisor

Dr.Amir Jalali

**A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Master of applied Science Degree**

February 2017