بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فنی مهندسی

مدلسازی و تحلیل غیرخطی ارتعاشات نانولوله کربنی حامل جریان سیال

ارائه دهنده:
پیام سلطانی

ارائه شده به دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد برای احراز
درجه دکتری مهندسی مکانیک

استاد راهنما:
دکتر انوشیروان فرشیدیانفر

پاییز ۱۳۹۱

تقدیم

تقدیم به مادرم که هر چه دارم از اوست

و

به یاد بود پدرم که استقامت و تلاش در رسیدن به هدف را به من آموخت

تشکر و قدردانی

هم‌اکنون که این پایان نامه به یاری خداوند ارائه می‌گردد، از زحمات بی‌دریغ استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر فرشیدیانفر نهایت سپاس و تشکر را دارم که در تمام مدت انجام این کار پژوهشی با راهنمایی‌های ارزشمند، انتقادهای سازنده، پیشنهادها و تشویق‌ها، بسیار یاریم کردند. بطور قطع بدون حمایت‌ها و پشتیبانی ایشان، انجام این کار پژوهشی غیرممکن می‌نمود.

در طول انجام این تحقیق و در تمام دوران تحصیل در مقطع دکتری تخصصی، علاوه بر بهره‌گیری علمی و تخصصی از دانش استاد بزرگوارم؛ منش و شخصیت ارزشمند ایشان، درس‌هایی بسیار گرانبها از اخلاق را به من آموخته‌است که در تمام طول زندگی همواره با من خواهد ماند.

از استادان ارجمندم جناب آقای دکتر موسوی مشهدی، جناب آقای دکتر احمدپور، جناب آقای دکتر رضایی پژند، و جناب آقای دکتر اختراعی طوسی که با پیشنهادات ارزشمند خود در جلسه دفاع از پیشنهاده این رساله، راه را برای ادامه پژوهش هموار نموده و در بررسی نهایی آن قبول زحمت نموده‌اند صمیمانه سپاسگزارم.

همه دانشم را مدیون زحمات بی‌دریغ همه استادان ارجمند و بزرگوار گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، بخصوص جناب آقای دکتر رضایی پژند، جناب آقای دکتر اختراعی طوسی، جناب آقای دکتر طهانی، جناب آقای دکتر معاونیان، جناب آقای دکتر اکبرزاده، و جناب آقای دکتر سازگاران هستم. از همه بزرگواران بسیار سپاسگزارم.

در پایان، سپاس فراوان خود را تقدیم خانواده خود می‌نمایم که در طول این سال‌ها همواره مشوق من در انجام این مهم بوده‌اند.

چکیده

نانولوله‌های کربنی حامل جریان سیال، بدلیل خواص منحصر بفرد مکانیکی، الکتریکی، و شیمیایی ؛ با شکل کاملا استوانه‌ای و سازگار با بافت‌های زنده؛ کاربردهای وسیعی در حوزه‌های مختلف نانوفن‌آوری پیدا نموده‌اند. استفاده از آنها به عنوان واحدهای نانومقیاس انتقال دهنده سیال و همچنین کاربرد آنها در دارورسانی هدفمند به ناحیه سلولی مشخص در بافت موجودات زنده، باعث گردیده‌است تا محققان زیادی از حوزه‌های مختلف علوم در پیشبرد تحقیقات مرتبط به تحقیق مشغول گردند. نانولوله‌های کربنی عضو اصلی بیشتر ابزار انتقال‌دهنده و جابجا کننده ماده در مقیاس نانو در آینده شناخته می‌شوند. ارتعاشات خطی نانولوله‌های کربنی ناشی از عبور جریان سیال در تحقیقات فراوانی مورد توجه قرار گرفته‌است. در حالیکه در این تحقیق رفتار غیرخطی نانولوله حامل جریان سیال بررسی و شبیه سازی گردیده است. مدل غیرخطی ارائه شده بکمک تئوری غیرموضعی و تئوری لغزش مرزی جریان، اثر مقیاس نانو را در معادلات پیوسته حاکم بر ارتعاش نانولوله اعمال نموده‌است. جابجایی‌های بزرگ، کرنش *von Karman*، نقص هندسی اولیه نانولوله (انحراف هندسی نانولوله)، و پدیده چین‌خوردگی عواملی هستند که تاثیر آنها بطور مجزا روی رفتار ارتعاشی سیستم دیده شده‌است. در هر مرحله و برای بررسی هر عامل، مدل ریاضی سیستم ارائه گردیده و پاسخ سیستم بصورت تحلیلی تقریبی بدست آمده‌است. سپس بکمک پاسخ تحلیلی تقریبی، رفتار سیستم در برابر تغییر هریک از پارامترهای موثر، مانند جریان سیال، دامنه ارتعاش، بستر پیرامون نانولوله، و اثر مقیاس نانو تشریح گردیده است. رفتار دینامیکی نانولوله حامل جریان سیال، بررسی نقاط تکین، تعادل دینامیکی، انواع پایداری و پدیده دوشاخگی، مفاهیم دیگری هستند که بطورکامل مورد توجه قرار گرفته‌اند و عوامل موثر روی هریک توصیف گردیده‌است.

کلید واژه: نانولوله کربنی، جریان سیال، ارتعاش غیرخطی، تئوری غیرموضعی، تئوری لغزش مرزی، رفتار دینامیکی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ج
نمایه کوتاه سازی ..... و
فهرست جدول‌ها ..... ز
فهرست شکل‌ها ..... ح

فصل ۱- پیشگفتار ۱
۱-۱- اهمیت کار پژوهشی و هدف پروژه ۱
۱-۲- پژوهش های انجام شده ۳
۱-۳- نوآوری کار پژوهشی ۳
۱-۴- طرح کلی پایان نامه و ارتباط میان فصل ها ۴
۱-۵- خلاصه فصل یکم ۶

فصل ۲- نانولوله های کربنی و سیال ۷
۲-۱- پیشگفتار ۷
۲-۲- فناوری نانو و نانولوله های کربنی ۷
۲-۳- نانولوله های کربنی حامل جریان سیال ۱۴
۲-۳-۱- نانولوله کربنی حامل جریان سیال – کاربردها ۱۴
۲-۳-۲- جریان سیال درون نانولوله کربنی ۱۵
۲-۳-۳- تئوری جریان سیال در مقیاس کوچک ۱۷
۲-۳-۴- اصلاح معادلات حاکم بر جریان سیال در مقیاس نانو ۲۱
۲-۴- ارتعاشات نانولوله های کربنی حامل جریان سیال ، مروری بر تحقیقات انجام شده ۲۵
۲-۵- خلاصه فصل دوم ۳۱

فصل ۳- پایداری و ارتعاشات نانولوله های کربنی حامل جریان سیال ۳۲
۳-۱- پیشگفتار ۳۲
۳-۲- مدلسازی غیرخطی نانولوله کربنی حامل جریان سیال ۳۲
۳-۳- حل معادله غیرخطی نانولوله کربنی حامل جریان سیال ۳۸
۳-۳-۱- روش تحلیل ۳۹
۳-۳-۲- بحث و بررسی نتایج ۴۲
۳-۴- پایداری نانولوله کربنی تک دیواره حامل جریان سیال: ۵۴
۳-۴-۱- روش تحلیل ۵۴
۳-۴-۲- بحث و بررسی نتایج ۵۶

۳-۵- خلاصه فصل سوم ۶۲

فصل ۴- بررسی اثر غیرخطی نقص هندسی (انحنا اولیه) روی ارتعاش نانولوله کربنی حامل جریان سیال ۶۳

۴-۱- پیشگفتار ۶۳

۴-۲- نانولوله های کربنی و شکل هندسی آنها ۶۳

۴-۳- مدلسازی غیرخطی نانولوله کربنی حامل جریان سیال دارای نقص هندسی اولیه ۶۵

۴-۴- روش تحلیل ۷۰

۴-۵- بحث و بررسی نتایج ۷۵

۴-۶- خلاصه فصل چهارم ۸۶

فصل ۵- بررسی اثر چین خوردگی روی ارتعاش نانولوله کربنی حامل جریان سیال ۸۷

۵-۱- پیشگفتار ۸۷

۵-۲- پدیده چین خوردگی و تاثیر آن روی رفتار مکانیکی نانولوله کربنی ۸۷

۵-۳- مدلسازی نانولوله کربنی حامل جریان سیال – با اعمال اثر چین خوردگی ۹۳

۵-۴- روش تحلیل ۹۷

۵-۵- تحلیل عددی مدل نانولوله حامل جریان سیال با اثر چین خوردگی ۹۸

۵-۵-۱- اعتبار سنجی مدل ۹۸

۵-۵-۲- بررسی پارامتری رفتار غیرخطی نانولوله حامل جریان سیال با اثر پدیده چین خوردگی ۱۰۱

۵-۶- خلاصه فصل پنجم ۱۰۷

فصل ۶- بررسی رفتار آشوبناک نانولوله های کربنی حامل جریان سیال ۱۰۸

۶-۱- پیشگفتار ۱۰۸

۶-۲- پایداری دینامیکی و رفتار آشوبناک سیستمهای دینامیکی ۱۰۸

۶-۳- نانولوله حامل جریان سیال و پایداری دینامیکی ۱۰۹

۶-۳-۱- بررسی نقاط تعادل دینامیکی ۱۱۰

۶-۴- نمودار دوشاخگی و بررسی رفتار دینامیکی ۱۱۴

۶-۵- خلاصه فصل ششم ۱۲۰

فصل ۷- نتیجه گیری و پیشنهاد برای پژوهش های آینده ۱۲۱

۷-۱- رفتار غیرخطی نانولوله حامل جریان سیال ۱۲۱

۷-۲- نقص هندسی در نانولوله حامل جریان سیال ۱۲۲

۷-۳- اثر پدیده چین خوردگی روی ارتعاش نانولوله کربنی حامل جریان سیال ۱۲۲

۷-۴- رفتار دینامیکی نانولوله حامل جریان سیال ۱۲۳

۷-۵- پیشنهاد برای پژوهشهای آینده ۱۲۴

مراجع ۱۲۶

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
مدول الاستیسیته نانولوله کربنی	E
پارامتر غیرموضعی	$e_o a$
پارامتر بدون بعد غیرموضعی	e
نیروی محوری خارجی کششی	F_L
تابع همیلتون	H
ممان اینرسی	I
ضریب سختی الاستیک وینکلر	k_e
ضریب بدون بعد وینکلر	K_e
ضریب سختی برشی پسترناک	k_p
ضریب بدون بعد پسترناک	K_p
عدد بدون بعد نودسن	k_n
طول لغزش	L_s
جرم واحد طول سیال	m_f
جرم واحد طول نانولوله کربنی	m_c
نسبت جرم در واحد طول	m
ممان خمشی درونی	M
نیروی محوری درونی	N
تابع باقیمانده	R

شعاع ژیراسیون	r
تانسور تنش	$\overleftrightarrow{t}$
جابجایی محوری	u
سرعت بدون بعد جریان سیال	v
سرعت جریان سیال	V
خیز دینامیکی نانولوله	w
خیز دینامیکی بدون بعد نانولوله	W
تابع نقص هندسی نانولوله	w_o
تابع نقص هندسی بدون بعد نانولوله	W_o
کار نیروهای خارجی روی نانولوله	W^{ext}
مختصات محوری نانولوله	x
مختصات محوری بدون بعد نانولوله	X
فرکانس ارتعاش مختلط	β
زمان بدون بعد	τ
پارامتر تطبیق ممان مماسی	σ_v
پارامتر تنظیم فرکانس	σ
جرم حجمی	ρ
لزجت توده‌ای سیال	μ_o
لزجت موثر سیال	μ_e
پارامتر اغتشاش	ε

تابع انحراف هندسی بدون بعد نانولوله $\Re$

فرکانس غیرخطی بدون بعد Ω

نمایه کوتاه سازی

عنوان	علامت اختصاری
Atomic Force Microscopy	*AFM*
Complex Conjugate Term	*CCT*
Carbon Nanotube	*CNT*
Drug Delivery System	*DDS*
Differential Quadrature Method	*DQM*
Euler- Bernoulli Beam Theory	*EBM*
Finite Difference Method	*FDM*
Finite Element Method	*FEM*
Molecular Dynamics	*MD*
Multiple Scaling Method	*MMS*
Multi-Walled Carbon Nanotube	*MWCNT*
Nano Electro Mechanical System	*NEMS*
Non Secular Term	*NST*
Rotary Inertia	*RI*
Shear Deformation	*SD*
Scanning Electron Microscopy	*SEM*
Single-Walled Carbon Nanotube	*SWCNT*
Timoshenco elastic Model	*TM*
Transmission Electron Microscopy	*TEM*
Velocity Correction Factor	*VCF*

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۵-۱ فرکانس ارتعاش نانولوله کربنی تحت خمش با احتساب اثر چین خوردگی ۹۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱طرح کلی پایان نامه و ارتباط میان فصل ها. ۵
شکل ۲-۱تصاویر SEM از نانوذرات سیلیکا[۱۰]. ۹
شکل ۲-۲ نانوکپسول لیپیدی پرشده از ماده ضد سرطان سیسپلاتین.[۱۱] ۱۰
شکل ۲-۳ آلوتروپهای مختلف کربن. (الف) الماس، (ب) گرافیت (پ) لانس دالیت، (ت)فولرین $C_{۶۰}$، (ث) فولرین $C_{۵۴۰}$، (ج) فولرین $C_{۷۰}$، (چ) کربن بیشکل، (ح) نانولوله کربنی تکدیواره. ۱۱
شکل ۲-۴ پیکره بندی سازهای مدلهای کایرال، زیگزاگ و آرمچیردر نانولوله تکدیواره [۱]. ۱۳
شکل ۲-۵ نمایش بردار گرافیتی $a_۱$ و $a_۲$و بردار کایرال C_h [۱]. ۱۳
شکل ۲-۶ طرحواره نانولوله های تک دیواره، و چند دیواره. ۱۴
شکل ۲-۷ تصویر نانولوله کربنی (الف) پیش از پرشدن از آب. (ب) هنگام پرشدن از سیال تحت تاثیر فشار منفی [۳۵]. ۱۶
شکل ۲-۸ هیدرودینامیک جریان سیال تحت شرط لغزش مرزی و بدون بعد لغزش مرزی؛ معرفی پارامتر طول لغزش L_s و سرعت لغزش. ۱۹
شکل ۲-۹ سه نوع متفاوت از جریان سیال بر حسب تئوری لایه لغزشی جریان [۴۳]. در این شکل طول لغزشL_sبا پارامتر b نمایش داده شده است. ۱۹
شکل ۳-۱ طرحواره نانولوله تک دیواره حامل جریان سیال روی بستر ویسکوالاستیک تعمیم یافته. ۳۳
شکل ۳-۲ مقایسه، رفتار دینامیکی نقطه میانی نانولوله تکدیواره حامل جریان سیال، براساس نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی EBM ، تحلیل خطی، و تحلیل عددی الف) در سرعت بدون بعد جریان $V=2$ و ب) سرعت بدون بعد جریان $V=0.3$. ۴۵
شکل ۳-۳ درصد تغییرات فرکانس غیرخطی $\%\Delta\omega$ بر حسب دامنه ارتعاش؛ بررسی اثر پارامتر غیرموضعی e_oa. ۴۷
شکل ۳-۴ درصد تغییرات فرکانس غیرخطی $\%\Delta\omega$ بر حسب دامنه ارتعاش؛ بررسی اثر ضریب سختی وینکلرk_w ۴۸
شکل ۳-۵ درصد تغییرات فرکانس غیرخطی $\%\Delta\omega$ بر حسب دامنه ارتعاش؛ بررسی اثر ضریب سختی برشی پسترناک k_p ۴۸
شکل ۳-۶ درصد تغییرات فرکانس غیرخطی $\%\Delta\omega$ بر حسب دامنه ارتعاش؛ بررسی اثر نیروی محوری F ۴۹
شکل ۳-۷ درصد تغییرات فرکانس غیرخطی $\%\Delta\omega$ بر حسب سرعت بدون بعد V، بررسی اثر پارامتر غیرموضعی e_oa. ۵۱
شکل ۳-۸ درصد تغییرات فرکانس غیرخطی $\%\Delta\omega$ بر حسب سرعت بدون بعد V، بررسی اثر ضریب سختی وینکلرk_w ۵۲

شکل ۳-۹ درصد تغییرات فرکانس غیرخطی $\%\Delta\omega$ بر حسب سرعت بدون بعد V، بررسی اثر ضریب سختی برشی پسترناک k_p ۵۲
شکل ۳-۱۰ درصد تغییرات فرکانس غیرخطی $\%\Delta\omega$بر حسب سرعت بدون بعد V ، بررسی اثر نیروی محوری F_L ۵۳
شکل ۳-۱۱ تغییرات فرکانس مختلط ارتعاش βنانولوله تکدیواره حامل جریان سیال (هوا با k_n=۰/۰۴) برحسب مقادیر مختلف سرعت بدون بعد سیالV در سه مود ارتعاشی اول (الف) تغییرات بخش حقیقی فرکانس $Re[\beta]$(ب) تغییرات بخش موهومی فرکانس $Im[\beta]$. ۵۸
شکل ۳-۱۲ تغییرات فرکانس بدون بعد ارتعاش نانولوله حامل جریان سیال بر حسب سرعت بدون بعد V در سه مود ارتعاش اول، بر حسب مقادیر مختلف پارامتر بدون بعد غیرموضعی e. ۵۹
شکل ۳-۱۳ تغییرات فرکانس بدون بعد ارتعاش نانولوله حامل جریان سیال بر حسب سرعت بدون بعد V در سه مود ارتعاش اول، بر حسب مقادیر مختلف عدد بدون بعد نودسن K_n. ۶۰
شکل ۳-۱۴تغییرات سرعتهای مرتبط با انواع ناپایداریها در نانولوله حامل جریان سیال بر حسب عدد k_n. ۶۱
شکل ۴-۱تصویرمیکروسکوپ عبوری الکترونی TEM از نانولولههای کربنی در بستر پلی استیرن[۱۱۲].۶۴
شکل ۴-۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشیSEM از صفحات نانولوله کربنی[۱۱۴]..... ۶۴
شکل ۴-۳ انحنا و خمیدگی یک نانولوله کربنی و شکل موجی آن[۱۱۳]..... ۶۵
شکل ۴-۴ طرحواره یک $SWCNT$ حامل جریان سیال دارای نقص هندسی اولیه..... ۶۵
شکل ۴-۵ تغییرات پارامتر تنظیم فرکانس σ بر حسب حداکثر انحراف بدون بعد $\Re$ برای دو سرعت متفاوت از جریان سیال؛ بررسی مقایسهای بین مدل ارائه شده و نتایج مدل[۱۰۵]. ۷۷
شکل ۴-۶ پاسخ دینامیکی یک $SWCNT$ نقص دار حامل جریان سیال ، مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با حل MMS ۷۷
شکل ۴-۷ تغییرات عبارات غیرخطی مدل(α_2 و α_3) بر حسب پارامتر بدون بعد حداکثر انحراف هندسی $\Re$ در سرعتهای متفاوت جریان سیال. ۷۸
شکل ۴-۸ تغییرات عبارات غیرخطی مدل (α_2 و α_3) بر حسب پارامتر بدون بعد حداکثر انحراف هندسی $\Re$، بر اساس پارامتر بدون بعد غیرموضعی e. ۸۰
شکل ۴-۹ تغییرات عبارات غیرخطی مدل(α_2 و α_3) بر حسب عدد نودسن k_n در سرعتهای متفاوت جریان سیال. ۸۱
شکل ۴-۱۰ فرکانس غیرخطی بدون بعد Ω بر حسب پارامتر بدون بعد انحراف هندسی $\Re$،در مقادیر مختلف پارامتر غیرموضعی μ ۸۲
شکل ۴-۱۱ فرکانس غیرخطی بدون بعد Ω بر حسب پارامتر بدون بعد انحراف هندسی $\Re$،در مقادیر عدد نودسن k_n. ۸۳
شکل ۴-۱۲ فرکانس غیرخطی بدون بعد Ω بر حسب پارامتر بدون بعد انحراف هندسی $\Re$، در مقادیر مختلف سرعت بدون بعد سیال V. ۸۴

شکل ۴-۱۳ فرکانس غیرخطی بدون بعد Ω بر حسب پارامتر بدون بعد انحراف هندسی $\Re$، در مقادیر مختلف ضریب سختی الاستیک وینکلر k_w ۸۴
شکل ۴-۱۴ فرکانس غیرخطی بدون بعد Ω بر حسب پارامتر بدون بعد انحراف هندسی $\Re$، در مقادیر مختلف ضریب سختی برشی پسترناک k_p ۸۵
شکل ۴-۱۵ فرکانس غیرخطی بدون بعد Ω بر حسب پارامتر بدون بعد انحراف هندسی $\Re$و در شرایط مرزی متفاوت. ۸۶
شکل ۵-۱تصویر AFM از شکل مود ارتعاشی نانولوله کربنی الف) تحت تحریک حرارتی. (ب) تحت تحریک میدان الکترواستاتیک با فرکانس $5۳۰KH$. (پ) تحت تحریک میدان الکترواستاتیک با فرکانس $3/01MHz$.[۱۲۵] ۹۰
شکل ۵-۲ تصویر AFM از پدیده چین خوردگی در نانولوله های کربنی تحت خمش[۱۲۵] ۹۱
شکل ۵-۳ رابطه غیرخطی ممان خمشیM- انحناخمشی در طولهای متفاوت از نانولوله [۱۲۷]. ۹۱
شکل ۵-۴ مدل المان محدود نانولوله کربنی و پدیده چین خوردگی (الف) مدل قبل از خمش (ب) مدل المان محدود تحت خمش و چین خوردگی درکمان داخلی (پ) تصویر TEM از نانولوله تحت خمش و چین خوردگی در کمان داخلی[۱۳۰]. ۹۲
شکل ۵-۵ رابطه بین ممان خمشی M و انحنا نانولوله κ برای L/D=۱۰ و L/D=۲۰ .[۱۳۰]. ۹۳
شکل ۵-۶ مقایسه پاسخ زمانی نانولوله تک دیواره حامل جریان سیال با لحاظ اثر چین خوردگی و بدون اثر چین خوردگی در سرعت بدون بعد V=۱ و V=۳ و برای دو نانولوله با نسبت لاغری L/D=۵۰ و L/D=۲۰ ..... ۱۰۰
شکل ۵-۷ تغییرات پارامتر $\Delta\omega_{Ripp}\%$ برحسب سرعت بدون بعد سیال در دامنه های بدون بعد متفاوت a_o. ۱۰۲
شکل ۵-۸ تغییرات پارامتر $\Delta\omega_{Ripp}\%$ برحسب نسبت لاغری نانولوله (الف)در دامنههای بدون بعد متفاوت a_o (ب) در سرعتهای بدون بعد V. ۱۰۳
شکل ۵-۹ تغییرات پارامتر $\Delta\omega_{Ripp}\%$ برحسب دامنه بدون بعد a_o، برای دو سرعت متفاوت سیال (V=۱،۳) و دو تئوری موضعی و غیرموضعی ۱۰۴
شکل ۵-۱۰ تغییرات پارامتر انحراف فرکانس $\Delta\omega_{Ripp}\%$ بر حسب عدد بدون بعد نودسن k_n در سرعتهای متفاوت جریان سیال. ۱۰۵
شکل ۵-۱۱تغییرات اثر سختی بستر الاستیک نانولوله (الف) ضریب بدون بعد وینکلر K_w و (ب) ضریب بدون بعد پسترناک K_p روی پارامتر $\Delta\omega_{Ripp}\%$ در دامنههای بدون بعد متفاوت a_o در سرعت جریان V=۳. ..... ۱۰۶
شکل ۶-۱ تغییرات پارامتر Δ بر حسب سرعت بدون بعد سیالV. ۱۱۲
شکل ۶-۲ نمودار صفحه فاز برای نانولوله حامل جریان سیال در دو سرعت مختلف (الف) درسرعت بدون بعد جریان سیال V=۲ (ب) درسرعت بدون بعد جریان سیال V=۳. ..... ۱۱۳
شکل ۶-۳ نمودار دوشاخگی نانولوله حامل جریان سیال با پارامتر کنترل سرعت بدون بعد جریان سیال V. ۱۱۵

شکل ۶-۴ الف) نمودار صفحه فاز نانولوله تکدیواره در سه سرعت جریان سیال V=۲،۳& ۳/۵ ب.) پاسخ زمانی سیستم در V=۲، پ) پاسخ زمانی سیستم در V=۳، ت) پاسخ زمانی سیستم در V=۳/۵.....۱۱۶
شکل ۶-۵ نمودار دوشاخگی نانولوله حامل جریان سیال بر حسب پارامتر کنترل سرعت جریان سیال V برای سه جریان متفاوت سیال با سه عدد نودسن متفاوت.....۱۱۸
شکل ۶-۶ الف) نمودار صفحه فاز نانولوله تکدیواره در سرعت سیال V=۴ برای سه سیال متفاوت،(ب) پاسخ زمانی سیستم برای سیال آب (پ) پاسخ زمانی سیستم برای سیال هوا با k_n=۰/۰۱،(ت) پاسخ زمانی سیستم برای سیال هوا با k_n=۰/۰۴.....۱۱۹
شکل ۶-۷ نمودار دوشاخگی نانولوله بر حسب پارامتر کنترل سرعت جریان سیال V، در سه مقدار متفاوت انحراف هندسی نانولوله $\Re$ برای جریان سیال هوا با k_n=۰/۰۴ .....۱۲۰

فصل ۱ – پیشگفتار

۱-۱ –اهمیت کار پژوهشی و هدف پروژه

کشف نانولوله‌های کربنی(*CNTs*[۱]) در سال ۱۹۹۱ و انقلاب نانوتکنولوژی بدنبال آن، با توجه به خواص منحصر بفرد مکانیکی، الکتریکی، و شیمیایی نانولوله‌ها؛ کاربردهای فراوانی را برای این ماده متصور گردید. از آنجا که بخش بزرگی از این کاربردها مانند انواع نانوحسگرها، نانو نوسانگرها، ردیاب‌های الکترونی و نمایشگرهای گسیل میدانی؛ بر مبنای ارتعاشات نانولوله‌ها کار می‌کنند؛ مدلسازی رفتار دینامیکی و ارتعاشی نانولوله همواره مورد توجه بسیاری از محققان بوده‌است.

بطور کلی مدلسازی ارتعاشی نانولوله های کربنی، با دو هدف اصلی صورت می‌پذیرد[۱]:

۱. پیش بینی رفتار دینامیکی و ارتعاشاتی نانو- ابزار هایی که بر مبنای ارتعاشات نانولوله ها کار می-کنند .

۲. پیش بینی خواص مکانیکی نانولوله با استفاده از مدل‌های ارتعاشی.

برای بررسی رفتار ارتعاشی نانولوله‌های کربنی لازم است مدل ریاضی حاکم بر حرکت نانولوله بطور دقیق و در مقیاس نانو دردست باشد تا بکمک آن امکان پیش بینی رفتار و خواص مکانیکی نانولوله ممکن گردد. برای مدلسازی مواد در مقیاس نانو معمولا از دو روش استفاده می‌شود: روش دینامیک مولکولی[۲] *MD* و روش معادلات محیط پیوسته.

روش *MD*، اصلی‌ترین روش در محاسبات خواص مواد در مقیاس نانو و پیش بینی رفتار آنها می‌باشد. در این روش با تعیین توابع نیرو بین ذرات واتم ها در یک سیستمِ مقیاس نانو (مانند نانولوله کربنی) و محاسبه معادلات پایه آن بر اساس قانون دوم نیوتن و بر مبنای تئوری توابع میدان نیروی چند جرمی؛ بیان و توصیف نسبتا دقیقی از رفتار حرکتی ماده معرفی می‌گردد. تحقیقات زیادی رفتار مکانیکی نانولوله‌های کربنی را از این روش مورد توجه قرارداده‌اند [۲-۴]. دقت بالای این روش در پیش‌بینی رفتار مواد در مقیاس نانو مهم ترین مزیت و ویژگی آن بوده و پیچیدگی محاسبات، نیاز به زمان زیاد برای انجام محاسبه و محدودیت در حداکثر تعداد اتم های هر مدل از مهمترین نقاط ضعف این روش ذکر می گردند[۵].

---

[۱] *Carbon nanotubes*

[۲] *Molecular Dynamics*

روش دیگر در مدلسازی رفتار مکانیکی نانولوله کربنی، روش محیط پیوسته می‌باشد. کاربرد معادلات محیط پیوسته در مقیاس نانو و استفاده از معادلات حاکم بر مکانیک محیط پیوسته[۱] جهت مدلسازی رفتار مکانیکی نانومواد، رویکردی است که در چند سال اخیر بشدت مورد توجه محققان قرار گرفته‌است. تایید نتایج تئوری حاصل از این روش توسط معدود آزمایشات انجام شده و تطابق بسیار مناسب این نتایج، به همراه عدم وجود محدودیت‌های روش دینامیک مولکولی در روش محیط پیوسته؛ این روش را به ابزاری موثر و کاربردی در مدلسازی نانو- مقیاس تبدیل نموده است. توسعه کاربرد روش محیط پیوسته و استفاده از تئوری محیط پیوسته غیر موضعی[۲] در مدلسازی رفتار مکانیکی مواد، نتایج کاربرد این روش را در مقیاس اتمی بسیار بهبود بخشیده است. به همین دلیل، از روش محیط پیوسته بصورت گسترده و وسیع در مدلسازی دینامیکی و استاتیکی نانولوله های کربنی استفاده گردیده است [۱, ۶].

نانولوله‌های کربنی دارای هندسه کاملا استوانه ای، سطح داخلی کاملا متراکم با اصطکاک مولکولی بسیار کم و خواص مکانیکی و مقاومتی فوق العاده بالا می باشند. بهمین دلیل استفاده از آنها جهت انتقال سیال در مقیاس نانو کاملا ایده آل بنظر می رسند. ریزلوله‌های انتقال و ریزمخازن نگهداری سیالات در نانوماشین‌ها و سیستم‌های نانوالکترومکانیکی *NEMS*[۳] را می‌توان بر پایه استفاده از نانولوله کربنی طراحی نمود.به عنوان مثال، کاربرد این نانوسازه‌ها جهت انتقال هدفمند دارو در سیستم‌های دارورسانی *DDSs*[۴] ، به یکی از جالب‌ترین موضوعات در حوزه نانوفن‌آوری در سال‌های اخیر تبدیل شده است. از این رو مدلسازی ریاضی نانولوله‌های کربنی حامل جریان سیال و بررسی رفتاری آنها، در علم مهندسی نانو بسیار کاربردی و مورد توجه می‌باشد.

شبیه سازی رفتار نانولوله‌های حامل جریان سیال از روش دینامیک مولکولی *MD* و بررسی همزمان تاثیر متقابل اتم‌های سیال و نانولوله بسیار دشوار بوده و نیاز به ابزارهای محاسباتی قوی و پیچیده دارد. از سوی دیگر استفاده از معادلات محیط پیوسته در این زمینه ماهیت رفتاری سیستم را بسیار ساده‌تر و با دقت مناسب شبیه سازی می‌نماید. بهمین دلیل در سال‌های اخیر بطور گسترده از انواع مدل های مبتنی بر معادلات محیط پیوسته برای مدلسازی رفتار ارتعاشی، بررسی تغییر شکل، بررسی خواص انتقال حرارت و انتقال سیال در نانولوله‌های کربنی استفاده شده است. نتایج حاصل از مدلسازی بر مبنای معادلات محیط پیوسته انطباق بسیار مناسبی را با نتایج حاصل از روش *MD* نشان می‌دهند[۱] و این هم‌خوانیِ مناسب در نتایج، اعتبار معادلات محیط پیوسته در مقیاس نانو را تا حد زیادی تضمین می-نماید.

---

[۱] *Continuum Mechanics.*

[۲] *Nonlocal Continuum Mechanics.*

[۳] *Nano-Electromechanical Systems.*

[۴] *Drug Delivery systems.*

از دیگر سو، بیشتر تحقیقات روی ارتعاشات نانولوله کربنی حامل جریان سیال، با استفاده از تئوری‌های محیط پیوسته و خطی انجام گردیده‌است. حال آنکه ماهیت رفتار مکانیکی نانوسازه‌ها تا حد زیادی غیرخطی بوده و عوامل غیرخطی موثر روی آن تاکنون بطور مجزا مورد توجه قرار نگرفته‌اند.
پارامترهایی مانند جابجایی‌های بزرگ، کشیدگی محوری، نقص در نانولوله کربنی، و پدیده چین‌خوردگی عواملی هستند که در تغییر شکل نانولوله کربنی بوجود آمده و عامل غیرخطی شدن رفتار سیستم می-باشند. تاکنون تاثیر این عوامل روی ارتعاشات سیال-واداشته نانولوله‌های کربنی بررسی نشده‌است و از این منظر بررسی و مدلسازی غیرخطی این سیستم ضروری بنظر می‌رسد.
هدف اصلی این تحقیق، ارائه مدل غیرخطی پیوسته و غیرموضعی از نانولوله حامل جریان سیال می‌باشد. همچنین برای آشنایی با رفتار ارتعاشی چنین سیستم نانومقیاسی و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف روی آن، حل تحلیلی تقریبی مدل در هر مرحله، با کمک روش مناسب ارائه خواهد گردید. ارائه حل تحلیلی در این تحقیق در بخش‌های مختلف از آنجاییکه در رفتار شناسی سیستم و مطالعه پارامتری آن بسیار موثر می‌باشد، از جمله نقاط قوت این پایان نامه می‌باشد. همچنین بررسی و شناخت انواع ناپایداری‌ها، اثر پارامترهایی مانند جابجایی‌های بزرگ، اثر کشیدگی محوری، نقص هندسی اولیه، و چین‌خوردگی مورد بحث قرار خواهد گرفت که در تحقیقات پیشین مورد توجه قرار نگرفته‌است. همچنین مطالعه رفتار دینامیکی نانولوله کربنی حامل جریان سیال و پدیده‌های غیرخطی مرتبط با آن مانند دوشاخگی و نقاط تعادل سیستم از جمله مباحثی است که برای اولین بار در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته‌است.

۱ ۲ –پژوهش های انجام شده

در این تحقیق، ابتدا مروری بر تحقیقات مرتبط با ارتعاشات نانولوله کربنی و همچنین نانولوله‌های حامل جریان سیال، انجام پذیرفته‌است. سپس با بررسی انواع عوامل غیرخطی، مدل جامعی از ارتعاش عرضی غیرخطی نانولوله تک‌دیواره و حامل جریان سیال ارائه گردیده‌است. حل تحلیلی و بررسی رفتار سیستم در اثر عوامل مختلف در مرحله بعد مورد توجه قرار گرفته‌است و توصیف کاملی از ماهیت ارتعاش ناشی از جریان سیال بیان شده‌است. در ادامه، عوامل مهم دیگری همانند نقص هندسی نانولوله و پدیده چین‌خوردگی به مدل غیرخطی فوق اضافه گردیده‌است و تاثیر آن‌ها روی نتایج مطالعه شده‌است. در مرحله نهایی رفتار دینامیکی مدل غیرخطی نانولوله حامل جریان سیال مورد بررسی و بحث قرار گرفته-است.

۱ ۳ –نوآوری کار پژوهشی

همانطور که پیشتر در این فصل عنوان گردید، مدلسازی غیرخطی نانولوله حامل جریان سیال و بررسی ارتعاش عرضی ناشی از عبور جریان سیال در تحقیقات کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و بیشتر تحقیقات مرتبط، با تمرکز بر رفتار خطی نانولوله انجام پذیرفته‌است. در این پایان نامه، برای اولین بار، به بررسی عوامل مختلف موثر در مدل غیرخطی نانولوله کربنی حامل جریان سیال پرداخته‌شده‌است.

بنابراین ارائه مدل غیرخطی از ارتعاش نانولوله کربنی حامل جریان سیال، و اعمال اثر پارامترهای مختلف غیرخطی مختلف روی مدل، مهم ترین نوآوری در این تحقیق می‌باشد.

همچنین، در هر بخش، پاسخ سیستم بصورت تحلیلی تقریبی ارائه گردیده‌است. دستیابی به پاسخ تحلیلی امکان بررسی رفتار سیستم در اثر پارامترهای مختلف و تسهیل در رفتارشناسی پارامتری مدل را فراهم می‌آورد که مزیت مهمی در طراحی سیستم‌های پیچیده می‌باشد. ارائه پاسخ تحلیلی از رفتار ارتعاشی مدل غیرخطی نانولوله کربنی حامل جریان سیال نوآوری مهم دیگری است که در این پایان نامه به آن پرداخته شده‌است.

رفتار دینامیکی نانولوله کربنی حامل جریان سیال و بحث روی پدیده‌های دینامیکی مهمی مانند پایداریی دینامیکی، نقاط تعادل و دوشاخگی سیستم نیز برای اولین بار در این بررسی مورد توجه قرار گرفته‌است.

به اختصار مهم‌ترین نوآوری‌های ارائه شده در این پایان نامه عبارتند از:

- ارائه مدل غیرخطی جامع از ارتعاش نانولوله کربنی حامل جریان سیال.
- ارائه پاسخ تحلیلی تقریبی برای مدل ارائه شده و رفتارشناسی پارامتری مدل.
- بررسی اثر نقص هندسی اولیه، روی ارتعاش غیرخطی نانولوله حامل جریان سیال .
- بررسی اثر پدیده چین‌خوردگی، روی ارتعاش غیرخطی نانولوله حامل جریان سیال .
- بررسی رفتار دینامیکی نانولوله حامل جریان سیال، پایداری دینامیکی، دوشاخگی و آشوب.

۱ ۴ –طرح کلی پایان نامه و ارتباط میان فصل ها

این پایان نامه در هفت فصل تدوین شده‌است. فصل دوم، ابتدا به معرفی مختصری از نانولوله‌های کربنی، انواع و خواص آنها می‌پردازد و انواع کاربردهای این نانوسازه را معرفی می‌نماید. در ادامه، کاربرد-های نانولوله‌های کربنی حامل جریان سیال در زمینه‌های مختلف شرح داده شده و ماهیت جریان سیال در مقیاس نانو معرفی می‌گردد. در این قسمت تفاوت‌های جریان سیال در مقیاس نانو با مقیاس ماکرو بررسی شده و معادلات مرتبط معرفی می‌گردند. در ادامه نیز پیشینه تحقیقات مرتبط بررسی گردیده‌است و نقاط قوت و ضعف هر تحقیق به اختصار مورد بحث قرار گرفته‌است.

درفصل سوم، مدل غیرخطی نانولوله تک‌دیواره حامل جریان سیال با استفاده ازتئوری غیرموضعی معرفی گردیده‌است و اثر پارامتر غیرخطی کشیدگی محوری بعنوان مهم‌ترین عامل غیرخطی در معادلات دیده شده‌است. حل تحلیلی مدل غیرخطی با روش جدید توازن انرژی ارائه گردیده و رفتارشناسی پارامتری مدل مورد توجه قرار گرفته‌است. در این فصل همچنین توضیحات کاملی روی انواع ناپایداری-های سیستم ارائه گردیده‌است.