دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

عنوان

بررسی ارتعاش نانوتیوبهای کربنی چندلایه

استاد راهنما

جناب آقای دکتر محمد شرعیات

دانشجو

محمد حمیصی

بهمن ۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌وقفه و دلسوزانه استاد محترم راهنما، **جناب آقای دکتر شرعیات** سپاسگزاری نمایم که به حق انجام این پایان نامه بدون راهنمایی‌ها و تاییدات ایشان میسور نبود. همچنین همراهی و پشتیبانی خانواده‌ام را در این مسیر قدر نهاده و از درگاه باری تعالی برای ایشان استدعای جزای خیر دارم.

تقدیم به:

دکتر **مصطفی چمران**

اظهار نامه دانشجو

اینجانب **محمد حمیصی**، دانشجوی **کارشناسی ارشد** رشته **مهندسی مکانیک**، گرایش **سازه و بدنه خودرو** دانشکده **مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارایه شده در پایان‌نامه با عنوان:

بررسی ارتعاش نانوتیوبهای کربنی چندلایه

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای **دکتر محمد شرعیات**، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تایید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضا دانشجو:

تاریخ:

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱. حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هر گونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مکانیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد. ضمنا متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲. کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در سالهای اخیر، نانوذرات و نانوکامپوزیت‌ها، کاربرد فراوانی در سازه و تجهیزات و حتی تزیینات داخلی و خارجی و رنگ خودرو یافته‌اند. دلایل عمده استفاده از این نانو ذرات، افزایش استحکام، رسانایی، قابلیت ارتعاش با فرکانسهای بالا و امکان گسیل و دریافت بسیار سریع سیگنال‌ها می‌باشند. بررسی رفتار ارتعاشی نانولوله‌ها، با توجه به کاربردهای یاد شده مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. با این حال عمده تحقیقات انجام شده در این زمینه بر پایه استفاده از مدل تیر و به طور محدود، استفاده از شبیه‌سازی ملکولی استوار بوده‌اند. در مقابل، کارآیی روش مکانیک محیط پیوسته (مدل پوسته) و بکارگیری مدل فنر برای شبیه‌سازی نیروهای واندروالس به اثبات رسیده است. در پایان نامه کنونی تلاش شده است تا با بررسی ارتعاش آزاد چندین نمونه از نانولوله‌های کربنی چندلایه با شعاع‌های داخلی متفاوت و تعداد لایه‌های گوناگون، فرکانس‌های شعاعی و شکل مودهای مرتبط با آن و اثر فشار اولیه بر فرکانس‌های طبیعی محاسبه گردد. همچنین اثرات فشار خارجی در پاسخ استاتیکی و دینامیکی نانولوله‌های چندلایه بدست آمده است. بدین ترتیب سرعت متوسط گسترش موج شعاعی، ضریب بار دینامیکی و اثر فشار اولیه بر آن دو مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌سازی نوینی از اثر نیروهای واندروالس بصورت شبیه‌سازی پوسته‌های استوانه‌ای در فضای بین لایه‌ای نانولوله‌ها انجام پذیرفته است که جنس ماده آن معرف تاثیر نیروهای واندروالس باشد. صحه‌گذاری نتایج، از طریق مقایسه پاسخ‌های تحلیل با نتایج اجزاء محدود (بر پایه نرم‌افزار Abaqus) و همچنین با نتایج حالتهای ویژه موجود در مراجع صورت گرفته است.

کلمات کلیدی: نانولوله‌های کربنی چندلایه؛ نیروهای واندروالس؛ اثر فشار بر ارتعاشات آزاد و اجباری؛ مدل پوسته استوانه‌ای؛ سرعت گسترش موج شعاعی؛ ضریب بار دینامیکی.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و ضرورت انجام مطالعه در زمینه نانولوله‌ها	۱
۱-۱ فناوری نانو	۲
۱-۲ دسته بندی نانو مواد	۲
۱-۳ نانولوله‌های کربنی	۳
۱-۳-۱ نانولوله کربنی تک‌لایه	۴
۱-۳-۲ نانولوله کربنی چندلایه	۵
۱-۳-۳ خواص نانولوله‌های کربنی	۶
۱-۳-۴ کاربردهای نانولوله‌های کربنی	۶
۱-۳-۵ روش‌های ساخت نانولوله‌ها	۸
۱-۳-۶ شبیه‌سازی نانولوله‌های کربنی	۹
۱-۴ کاربرد فناوری نانو در خودرو	۹
۱-۵ کاربرد نانولوله در خودرو	۱۱
۱-۵-۱ استفاده از نانوحسگرها جهت هوشمندی خودرو	۱۱
۱-۵-۲ کاربرد نانوکامپوزیت‌های نانولوله کربنی در قطعات مختلف خودرو	۱۲
۱-۶ ضرورت بررسی ارتعاش نانولوله‌های کربنی	۱۳
۱-۷ معرفی کار انجام شده	۱۴
۱-۷-۱ اهداف	۱۴
۱-۷-۲ فرضیات حاکم	۱۴
۱-۷-۳ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۱۵

فصل دوم : پیشینه تحقیق و مدل‌های ارائه شده در زمینه نانولوله‌ها ۱۶
۲-۱ کارهای انجام شده در حیطه نانولوله‌ها ۱۷
۲-۲ کارهای انجام شده مرتبط با ارتعاش نانولوله کربنی ۱۸
۲-۳روش‌های تحلیل مسائل مربوط به نانولوله‌های کربنی ۲۲
۲-۴ انواع شبیه‌سازی‌ها در محیط پیوسته ۲۲
۲-۴-۱ تئوری تیر برنولی-اویلر ۲۳
۲-۴-۲ تئوری تیر تیموشنکو ۲۵
۲-۴-۳ تئوری پوسته استوانه‌ای دانل ۲۶
۲-۴-۴ تئوری پوسته الاستیک فلاگ ۲۷
فصل سوم : یافتن معادلات حاکم و حل عددی آنها به روش اجزای محدود ۲۸
۳-۱ مدل‌سازی مسئله ۲۹
۳-۲ یافتن معادلات حاکم ۲۹
۳-۳ اثرات نیروی واندروالس ۳۳
۳-۴ حل عددی ۳۴
۳-۵ فرمول‌بندی اجزای محدود ۳۵
۳-۶ پاسخ معادلات ۴۳
۳-۶-۱ پاسخ فرکانسی ۴۳
۳-۶-۲ پاسخ دینامیکی ۴۳
۳-۶-۲-۱ روش‌های انتگرالگیری زمانی عددی ۴۳
۳-۶-۲-۲ روش نیومارک ۴۴

فصل چهارم : بررسی نتایج ۴۶
۴-۱ مقدمه ۴۷
۴-۲ مدل‌سازی در ABAQUS ۴۷
۴-۲-۱ تعریف خواص نانولوله ۴۷
۴-۲-۲ تعریف خواص نواحی بین‌لایه‌ای ۴۸
۴-۲-۳ المان‌بندی اجزای محدود ۴۹
۴-۲-۴ بارگذاری و تعیین شرایط مرزی ۴۹
۴-۳ راستی آزمایی نتایج با تغییر در اندازه المان ۵۰
۴-۴ فرکانس‌های ارتعاش شعاعی و شکل مودها ۵۱
۴-۴-۱ تاثیر فشار بر فرکانس‌های ارتعاش شعاعی ۵۸
۴-۵ جابجایی شعاعی در اثر فشار خارجی ۵۹
۴-۵-۱ جابجایی شعاعی در اثر فشار خارجی استاتیکی ۵۹
۴-۵-۲ جابجایی شعاعی در اثر فشار خارجی دینامیکی ۶۰
۴-۶ سرعت گسترش موج شعاعی ۶۳
۴-۶-۱ تاثیر فشار بر سرعت گسترش موج شعاعی ۶۴
۴-۷ محاسبه ضریب بار دینامیکی ۶۹
۴-۷-۱ تاثیر فشار بر ضریب بار دینامیکی ۷۱
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارایه پیشنهادات ۷۳
۵-۱ نتیجه‌گیری ۷۴
۵-۲ پیشنهادات ۷۵

مراجع ۷۶

پیوست الف) برنامه‌های Matlab جهت یافتن ماتریس‌های سختی و جرم ۸۳

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: انواع نانولوله‌های کربنی تک‌جداره[۵] ۵

شکل ۲-۱: مدل‌سازی پیوسته نانولوله کربنی یک وچندلایه بصورت پوسته استوانه‌ای ۲۱

شکل ۳-۱: نمایی از المان‌بندی نانولوله سه لایه ۴۰

شکل ۳-۲: المان مرجع CNT ۴۱

شکل ۳-۳: المان شماره ۱ ۴۱

شکل ۳-۴: المان فنر مرجع ۴۲

شکل ۳-۵: المان شماره ۱۰ ۴۲

شکل ۴-۱: الف) نمونه‌ای از المان‌های مکعبی در Abaqus ب) مدل مش‌بندی شده یک نانولوله چندلایه ۴۹

شکل ۴-۲: نمایی از بارگذاری فشاری و شرایط مرزی MWCNT ۴۹

شکل ۴-۳: مودهای اول و دوم ارتعاشی یک نانولوله کربنی پنج لایه ۵۳

شکل ۴-۴: مودهای سوم و چهارم ارتعاشی یک نانولوله کربنی پنج لایه ۵۴

شکل ۴-۵: مودهای پنجم و ششم ارتعاشی یک نانولوله کربنی پنج لایه ۵۵

شکل ۴-۶: مودهای هفتم و هشتم ارتعاشی یک نانولوله کربنی پنج لایه ۵۶

شکل ۴-۷: مودهای نهم و دهم ارتعاشی یک نانولوله کربنی پنج لایه ۵۷

فهرست نمودارها

نمودار ۴-۱: مقایسه نتایج اولین فرکانس ارتعاشی برای یک نانولوله سه‌لایه با تغییر در اندازه المان ۵۰

نمودار ۴-۲: تغییرات پنج فرکانس‌طبیعی‌اول با افزایش فشاراولیه برای نانولوله‌پنج‌لایه با قطر۰/۳۵۶نانومتر ۵۸

نمودار ۴-۳: مقایسه جابجایی شعاعی بیرونی‌ترین لایه نانولوله سی‌لایه بر اثر فشار خارجی با مرجع [۴۵] ۵۹

نمودار ۴-۴: نمودار زمانی جابجایی شعاعی (nm) لایه‌های درونی، میانی و بیرونی مثال ۱ ۶۰

نمودار ۴-۵: نمودار زمانی جابجایی شعاعی (nm) لایه‌های درونی، میانی و بیرونی مثال ۲ ۶۱

نمودار ۴-۶: نمودار زمانی جابجایی شعاعی (nm) لایه‌های درونی، میانی و بیرونی مثال ۳ ۶۱

نمودار ۴-۷: نمودار زمانی جابجایی شعاعی (nm) لایه‌های درونی، میانی و بیرونی مثال ۴ ۶۲

نمودار ۴-۸: نمودار زمانی جابجایی شعاعی (nm) لایه‌های درونی، میانی و بیرونی مثال ۵ ۶۲

نمودار ۴-۹: تغییرات نمودار زمانی جابجایی شعاعی لایه درونی مثال ۱ در اثر فشار اولیه ۶۴

نمودار ۴-۱۰: تغییرات نمودار زمانی جابجایی شعاعی لایه درونی مثال ۲ در اثر فشار اولیه ۶۵

نمودار ۴-۱۱: تغییرات نمودار زمانی جابجایی شعاعی لایه درونی مثال ۳ در اثر فشار اولیه ۶۵

نمودار ۴-۱۲: تغییرات نمودار زمانی جابجایی شعاعی لایه درونی مثال ۴ در اثر فشار اولیه ۶۶

نمودار ۴-۱۳: تغییرات نمودار زمانی جابجایی شعاعی لایه درونی مثال ۵ در اثر فشار اولیه ۶۶

نمودار ۴-۱۴: تغییرات سرعت متوسط موج شعاعی بر حسب تغییرات فشار خارجی برای مثال ۱ ۶۸

نمودار ۴-۱۵: تغییرات ضریب بار دینامیکی برای نانولوله مثال ۱ (γ=۰/۲) ۷۰

نمودار ۴-۱۶: تغییرات ضریب بار دینامیکی برای نانولوله‌های مثال۲تا۵ (γ=۰/۲۰،۵،۱،۵) ۷۱

فهرست جداول

جدول ۳-۱: حل گام به گام با استفاده از روش انتگرالگیری نیومارک ۴۵

جدول ۴-۱: تنش متناظر با چند کرنش فرضی در ناحیه واندروالس ۴۸

جدول ۴-۲: مقایسه ده فرکانس طبیعی اول یک نانولوله پنج لایه کربنی با قطر داخلی ۱.۳۵۶nm ۵۲
از دو روش برنامه نویسی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری

جدول ۴-۳: مقایسه بیشترین فرکانس ارتعاش شعاعی هشت نانولوله کربنی پنج لایه(cm^{-1}) ۵۲

جدول ۴-۴: جابجایی شعاعی بیرونی‌ترین لایه نانولوله سی لایه بر اثر فشار خارجی ۵۹

جدول ۴-۵: مشخصات پنج نانولوله یازده لایه ۶۰

جدول ۴-۶: سرعت متوسط گسترش موج شعاعی برای ۵ نانولوله یازده لایه ۶۳

جدول ۴-۷: مقایسه سرعت گسترش موج شعاعی با وجود فشار اولیه و بدون آن ۶۷

جدول ۴-۸: ضریب بار دینامیکی برای لایه‌های پنج نانولوله کربنی یازده‌لایه ۶۹

جدول ۴-۹: مقایسه ضریب باردینامیکی ۳لایه از نانولوله‌های‌یازده‌لایه درصورت‌وجودیاعدم‌وجود فشاراولیه ۷۲

فهرست علائم اختصاصی انگلیسی

A	سطح مقطع عرضی
dA	جز سطح
b	طول المان در راستای شعاع نانولوله
C_k	ضریب تاثیر واندروالس بین لایه‌های k و ۱+k
D	سختی خمشی موثر ماده تشکیل دهنده استوانه در رابطه دانل
D_o, D_i	قطرهای داخلی و خارجی نانولوله
E	ضریب کشسانی
$\{F^{(e)}\}$	بردار نیروی المان
F_i^0	مولفه یکه پیش‌تنش در رابطه دانل
F_i	مولفه نیروی جرمی راستای i
F_D	ضریب بار دینامیکی
f_n	فرکانس مود nام بر حسب هرتز (Hz)
G	مدول برشی
h	ضخامت پوسته استوانه‌ای در رابطه دانل
I	گشتاور اینرسی مقطع عرضی عضو حول تار خنثی
K	ضریب برشی وابسته به هندسه مقطع در رابطه تیر تیموشنکو
$[K^{(e)}]$	ماتریس سختی المان
$k_n L$	مقدار ویژه nام در رابطه تیر برنولی- اویلر
$-Kw_n$	اثر محیط (بستر) الاستیک

l	طول المان در راستای محور نانولوله
L	طول تیر
$[M^{(e)}]$	ماتریس جرم المان
$[N]$	ماتریس تابع شکل
n	شماره مود و فرکانس ارتعاشی
p	بار گسترده بر واحد طول تیر تیموشنکو و فشار خارجی رابطه دانل
$P_{k(k+1)}$	تنش فشاری در اثر نیروی واندروالس بین لایه‌های k و ۱+k
R	عبارت سمت راست معادله حاکم
R_m	شعاع پوسته استوانه‌ای در رابطه دانل
r	مختصه شعاعی در مختصات استوانه‌ای
S	فاصله بین دو لایه مجاور
S_0	فاصله اولیه بین لایه‌ها
t	زمان
t_r و t_z	اثرات بار در مرزهای r و z المان
u_{ij}	جابجایی گره j ام در جهت i
u_r^k	جابجایی شعاعی لایه kام نانولوله
$\ddot{u}_i$	مشتق دوم زمانی جابجایی در راستای i
w	خیز تیر یا پوسته
x	فاصله طولی از یک‌سر تیر
z	مختصه طولی (محوری) در مختصات استوانه‌ای

فهرست علائم اختصاصی یونانی

α , β	ضریب معادله واندروالس
α_1	پارامتر روش نیومارک
δ_t	جابجایی در لحظه t
$\{\delta\}$	بردار جابجایی
$\left\{\overset{(e)}{\delta}\right\}$	بردار جابجایی نقاط گره
ρ	چگالی ماده
$\varphi(x,t)$	شیب تیر بر اثر خمش در رابطه تیر تیموشنکو
ν	نسبت پواسون
θ	مختصه محیطی در مختصات استوانه‌ای
σ_i	مولفه تنش عمودی در راستای i
τ_{ij}	مولفه تنش برشی در صفحه i در راستای j
ε_i	مولفه کرنش عمودی در راستای i
γ_{ij}	کرنش برشی در صفحه i در راستای j
γ	نسبت شعاع داخلی به ضخامت یک نانولوله چندلایه

فصل اول :

مقدمه و ضرورت انجام مطالعه در زمینه نانولوله‌ها

۱-۱ فناوری‌نانو

بشر قرنهاست که با محدودیت منابع زیستی و همزمان رشد جمعیت روبروست. دانشمندان در طول تاریخ معاصر، سعی در کاربرد اقتصادی علم در عرصه اجتماع داشته و دارند. انقلاب‌های صنعتی، فناوری زیستی[۱] و فناوری اطلاعات را می توان بترتیب از نقاط عطف این جریان دانست. اما مشکلات و کمبودها بطور کامل مرتفع نشده اند. فناوری نوینی لازم است تا با دقت و سرعت بالا و همزمان کوچکتر کردن ابعاد بهمراه حفظ تنوع در ویژگی‌ها، بتواند مواد و سپس قطعاتی تولید نماید تا از منابع محدود استفاده بهینه ای بعمل آید.

رشد ابزارهای اندازه گیری دقیق تا ابعاد مولکولی، باعث شد تا اطلاعات جدیدی از خواص مواد کشف شود و ابعاد کوانتومی نویدبخش تحولی عظیم در عرصه علم و فناوری گردد. فعالیت در ریزساختارها، مرز میکرومتر را درنوردید و به محدوده نانومتری رسید. از این رو، حیطه کاری جدیدِ دانشمندان را « فناوری‌نانو» نامیدند. این نام در دهه ۸۰ قرن بیستم میلادی توسط یک فیزیکدان به نام اریک درکسلر[۲] ترویج شد[۱]. بنابراین فناوری نانو، بررسی مواد در ابعاد اتمی یا مولکولی در مقیاس یک میلیاردم متر است.

۱-۲ دسته بندی نانو مواد

مهم ترین گروه‌های نانو مواد عبارتند از: فیلم‌های جداره نازک، نانو کامپوزیت‌ها، نانو خوشه‌ها، نانولوله‌ها، نانو ذرات. فیلم‌های لایه نازک معمولاً فلزی یا سرامیکی هستند، که خود از نانو ذرات به شکل رسوب شده به دست می‌آیند و برای محافظت و افزایش کارایی سطوح به کار می‌روند. بررسی خواص الکتریکی و حرارتی این نانو لایه‌ها از زمینه‌های مهم این مسئله است. نانوکامپوزیت‌ها (نانوپوشش‌ها) از زمینه‌های مهم عملی در نانوتکنولوژی هستند که در انواع صنایع مثل خودروسازی، رنگرزی، تولید لوازم خانگی، الکترونیکی، انرژی،محیط زیست، نظامی و... کاربرد دارند. در این عرصه، سعی بر ساختن نوعی روکش (که مادهٔ پرکنندهٔ داخلی

[۱] Bio
[۲] Eric Drexler K.

نانولوله‌هاست) برای تقویت سطوح مختلف، جلوگیری از اتلاف حرارت و مقابله در برابر تشعشع است. امروزه هم کاربردهای آن در صنایع حفاری، نفت و گاز و صنایع هوایی است.

مشاهدهٔ نانو خوشه‌ها یا نانو کریستال‌ها به دههٔ ۱۹۹۰ بر می‌گردد. دانشمندان مشاهده کردند که اتم‌های گازی به شکل خوشه‌هایی به ابعاد آنگستروم روی سطوح به هم می‌چسبند . مهم‌ترین خاصیت این مواد، اثر چسبندگی آن‌ها به یکدیگر است که در موارد ریز، اهمیت بیشتری دارد. از کاربردهای آن‌ها ساخت نانوبلورهاست که با محیط زیست سازگارند. نانو ذرات مواد ریز نانو ساختارند که از گذشته‌های دور (مثلاً استفاده در لعاب ظروف سفالی) کاربرد داشتند. امروزه می‌توان ردپای نانو ذرات را در انواع صیقل دهنده‌ها، رنگ‌ها، کاشی‌ها، صفحات خورشید و انواع چسب‌ها دید. نانولوله‌ها، که در این جا به آن‌ها می‌پردازیم، مهم ترین بخش تکنولوژی نانو را تشکیل می‌دهند. به دلیل خواص فوق العادهٔ مکانیکی، الکتریکی و حرارتی، توجه خاصی به این بخش می‌شود. از سوی دیگر نانولوله‌های کربنی در کنار فولرین‌ها[۱] و تقاطع‌های کربنی ازجمله ساختارهای مهم کربن‌های نانو ساختاری محسوب می شوند[۲].

۱-۳ نانولوله‌های کربنی[۲]

نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ توسط دکتر سومیو ایجیما[۳] [۳] و به صورت کاملا اتفاقی درهنگام مطالعه سطوح الکترودهای کربن در تخلیه قوس الکتریکی کشف شدند. در حال حاضر دو نوع متفاوت از این نانولوله‌ها وجود دارند، نوع تک جداره‌ای[۴] (SWCNT) و چندجداره‌ای[۵] (MWCNT) که به ترتیب در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۳ کشف شدند.

---

[۱] fullerene
[۲] Carbon NanoTube
[۳] S. Lijima
[۴] Single-Wall Carbon NanoTube
[۵] MultiWall Carbon NanoTube