

الحمد لله
الذي هدانا لهذا
الذي كنا لنهتدي لولا
أن هدانا الله





دانشکده‌ی مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

مطالعه‌ی ارتعاشات آزاد نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره‌ی حامل سیال

مؤلف:

فرزانه صمدی

ارائه شده جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

استاد راهنما:

دکتر انوشیروان فرشیدیان‌فر

تیر ۱۳۹۱

تصویب نامه ی گروه مکانیک

پایان نامه ی حاضر تحت عنوان:

مطالعه ی ارتعاشات آزاد نانولوله های کربنی تک دیواره ی حامل سیال

که توسط فرزانه صمدی تهیه و به هیأت داوران ارائه گردیده است، مورد تأیید کمیته ی تحصیلات تکمیلی گروه می باشد.

درجه ی ارزشیابی:

نمره:

تاریخ دفاع:

اعضای هیأت داوران:

نام و نام خانوادگی	هیأت داوران	مرتبه ی علمی	امضا
دکتر انوشیروان فرشیدیان فر	استاد راهنما	استاد	
دکتر جلیل رضایی پژند	عضو دفاع	استاد	
دکتر حمید اختراعی طوسی	عضو دفاع	دانشیار	
دکتر مجید معاونیان	نماینده ی تحصیلات تکمیلی	دانشیار	

تأییدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه‌ی علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه‌ی کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

تاریخ:

امضای دانشجو:

تاریخ:

امضای استاد راهنما:

تشکر و قدردانی

سپاس از پروردگار متعال که در همه وقت و در تمام مراحل زندگی، مرا مورد لطف و عنایت خاص خویش قرار داده است.

از کلیه اساتید گروه مکانیک که در طول این دوره‌ی تحصیلی از محضر ایشان بهره‌مند شده‌ام کمال تشکر را دارم. از زحمات استاد ارجمند، جناب آقای دکتر انوشیروان فرشیدیان‌فر، که این پژوهش علمی با راهنمایی‌های ارزشمند ایشان به انجام رسید، بسیار سپاسگزارم. همچنین، لازم می‌دانم از آقای دکتر جلیل رضایی پژند و آقای دکتر حمید اختراعی طوسی که به عنوان اساتید ممتحن جهت ارزیابی این پایان‌نامه قبول زحمت کرده‌اند و همچنین آقای دکتر مجید معاونیان، نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی، صمیمانه تشکر کنم.

فرزانه صمدی

۱۳۹۱/۴/۲۵

تقدیم به پدر و مادر عزیز و مهربانم
که همواره همراه، مشوق و پشتیبان من بوده و همهی آنهایی که در فراز و نشیب این
راه مرا در رسیدن به موفقیت امیدوار کردند.

فهرست مطالب

VII.....	فهرست جداول.....
VIII	فهرست علائم.....
XII	فهرست اشکال.....
XV	چکیده.....
۱.....	فصل ۱: مقدمه.....
۱.....	۱-۱ - مقدمه.....
۲.....	۲-۱ - ساختار نانولوله‌ی کربنی تک‌دیواره.....
۴.....	۳-۱ - روش‌های مدل‌سازی نانولوله‌های کربنی.....
۸.....	۴-۱ - ضرورت مطالعه‌ی ارتعاشات آزاد نانولوله‌های کربنی حامل سیال.....
۹.....	۵-۱ - اهداف و فصل‌بندی پایان‌نامه.....
۱۲.....	فصل ۲: مروری بر کارهای گذشته.....
۱۲.....	۱-۲ - مقدمه.....
۱۲.....	۲-۲ - تئوری کلاسیک.....
۱۴.....	۳-۲ - تئوری الاستیسیته‌ی غیر محلی جزئی.....
۱۵.....	۴-۲ - تئوری الاستیسیته‌ی غیر محلی دقیق (تحلیلی).....
۱۷.....	۵-۲ - تئوری تنش کوپل.....

- ۱۹-۲-۶- تئوری گرادیان کرنش.....
- ۲۰-۲-۷- اثر پارامترهای مختلف.....
- فصل ۳: معادلات حرکت حاکم بر اساس تئوری‌های پیوسته‌ی مختلف..... ۲۳
- ۱-۳-۱- مقدمه..... ۲۳
- ۲-۳-۲- تئوری کلاسیک..... ۲۳
- ۳-۳-۳- تئوری الاستیسیته‌ی غیر محلی جزئی..... ۲۸
- ۴-۳-۴- تئوری الاستیسیته‌ی غیر محلی دقیق (تحلیلی)..... ۳۲
- ۵-۳-۵- تئوری تنش کوپل اصلاح شده..... ۳۹
- ۶-۳-۶- تئوری گرادیان کرنش..... ۴۲
- ۷-۳-۷- اثر نسبت پواسون..... ۴۷
- ۸-۳-۸- مدل غیر محلی انرژی..... ۴۸
- ۹-۳-۹- اثر پارامترهای مختلف..... ۵۰
- فصل ۴: حل معادلات حرکت حاکم با استفاده از روش عددی DQ..... ۵۵
- ۱-۴-۱- مقدمه..... ۵۵
- ۲-۴-۲- روش عددی DQ..... ۵۷
- ۳-۴-۳- روش عددی GDQ..... ۵۹
- ۴-۴-۴- اعمال شرایط مرزی..... ۶۱
- ۵-۴-۵- جداسازی عددی معادلات حرکت حاکم و شرایط مرزی متناظر..... ۶۳

۷۰	۶-۴- محاسبه‌ی فرکانس‌های طبیعی نانولوله‌ی حامل سیال.....
۷۱	فصل ۵: ارائه‌ی نتایج و بحث.....
۷۱	۱-۵- مقدمه.....
۷۱	۲-۵- تئوری‌های غیر محلی انتگرالی.....
۷۵	۳-۵- تئوری‌های غیر محلی گرادیانی.....
۸۲	۴-۵- اثر پارامترهای مختلف.....
۹۴	فصل ۶: جمع‌بندی کلی و ارائه‌ی پیشنهادات.....
۹۴	۱-۶- مقدمه.....
۹۴	۲-۶- نتیجه‌گیری.....
۹۶	۳-۶- پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده.....
۹۸	مراجع.....
۱۰۴	مقالات ارائه شده توسط مولف.....

فهرست جداول

جدول (۱-۱): مقایسه‌ی ویژگی‌های نانولوله‌های کربنی با برخی مواد [۲].

جدول (۲-۱): انواع نانولوله‌های کربنی [۴].

فهرست علائم

a	طول مشخصه‌ی داخلی
A	مساحت سطح مقطع عرضی
b	پهنای تیر
c	ضریب میرایی بستر ویسکوالاستیک
C	تانسور الاستیسیته‌ی مرتبه‌ی چهار
\mathbf{C}	ماتریس میرایی
\vec{C}_h	بردار کایرال
$C_{ij}^{(n)}$	ضرایب وزنی مشتق مرتبه‌ی n ام در نقطه‌ی x_i در روش عددی DQ
d_i	قطر داخلی
d_o	قطر خارجی
e_{jpq}	تانسور متناوب
$e_0 a$	پارامتر غیر محلی
E	مدول یانگ
$E_{ik}^{(r)}$	ضریب وزنی مشتق مرتبه‌ی r ام در نقطه‌ی x_i در روش عددی GDQ
E_s	مدول یانگ هر دو لایه‌ی سطحی داخلی و خارجی
g	ضریب میرایی ساختاری ویسکوالاستیک
G	مدول برشی
h	ضخامت
h	سختی خمشی اضافی ناشی از لایه‌های سطحی داخلی و خارجی
$h_{jl}(x) (l = 0, \dots, n_j - 1)$	توابع شکل میان‌یاب هرمیت برای نقطه‌ی x_j
I	گشتاور دوم سطح در واحد طول
J	ممان اینرسی جرمی در واحد طول
k_G	مدول پاسترناک بستر ویسکوالاستیک
k_w	مدول وینکلر بستر ویسکوالاستیک
K	تابع کرنل

K	ماتریس سفتی
Kn	عدد نودسن
K_s	ضریب تصحیح برشی
l	طول مشخصه‌ی خارجی
l	پارامتر مقیاس طولی ماده مرتبط با گرادیان چرخش
l_c	پارامتر مقیاس طولی مرزی المان حجم نمایشگر
$l_j(x_i)$	تابع میان‌یاب لاگرانژ
l_0, l_1, l_2	پارامترهای مقیاس طولی ماده، به ترتیب، مرتبط با گرادبان انبساط، گرادبان کشش انحرافی و گرادبان چرخش
L	طول
m	جرم واحد طول
m و n	اندیس‌های کایرال
m_{ij}	تانسور تنش کوپل
\tilde{m}_{ij}	تانسور تنش کوپل محلی
M	گشتاور خمشی
M	تعداد کل متغیرهای مستقل
M	ماتریس جرم
$n_i (i = 1, 2, \dots, N)$	تعداد معادلات در نقطه‌ی x_i
N	تعداد نقاط شبکه
N	نیروی فشاری محوری
N_T	نیروی محوری ناشی از تغییر دما
p_w	نیروی گسترده‌ی عرضی در واحد طول
p_ψ	گشتاور گسترده در واحد طول
Q	نیروی برشی
t	زمان
t_{lkij}	تانسور تنش مرتبه‌ی چهارم
t_0	ضخامت هر دو لایه‌ی سطحی داخلی و خارجی
T	پریود زمانی
T	انرژی جنبشی
T	تغییر دما

x

u_s	چگالی انرژی کرنشی برشی
u_n	چگالی انرژی کرنشی نرمال
U	انرژی کرنشی کل
v	سرعت متوسط جریان سیال داخلی
$v_{avg,(no-slip)}$	سرعت جریان متوسط بدون شرایط مرزی لغزشی
$v_{avg,slip}$	سرعت جریان متوسط با شرایط مرزی لغزشی
v_{cr}	سرعت جریان بحرانی کلاسیک
v_{ncr}	سرعت جریان بحرانی غیر محلی
V	حجم
VCF	ضریب تصحیح سرعت متوسط
V_c	حجم المان مکعبی نمایشگر
w	تغییر مکان عرضی
\mathbf{x}	مختصات عمومی
x, y, z	مختصات در راستای طول، ضخامت (ارتفاع) و عرض تیر
$x_i (i = 1, 2, \dots, N)$	نقاط شبکه
α_x	ضریب انبساط حرارتی در جهت محور x
β	نسبت جرمی
γ	کرنش برشی
γ_i	بردار گرادیان انبساط
δ_{ij}	تابع کرانیکر دلتا
ε_{ij}	تانسور کرنش
ε_{xx}	کرنش عمودی
ε_{xz}	کرنش برشی
$\tilde{\varepsilon}_{ij}$	تانسور کرنش محلی
$\eta_{ijk}^{(1)}$	تانسور گرادیان کشش انحرافی
η_1, η_2, η_3	تغییر مکانها در امتداد مختصاتهای (x, y, z)
θ	زاویه‌ی کایرال
θ_i	بردار چرخش
κ	کرنش خمشی
λ	مدول بالک

μ	ویسکوزیته‌ی سیال
ν	نسبت پواسون
ξ	مختصات محلی
ρ	چگالی جرمی
σ	تانسور تنش غیر محلی
σ_{ij}	تانسور تنش
σ_ν	ضریب اعمال گشتاور مماسی
σ_{xx}	تنش عمودی
σ_{xz}	تنش برشی
$\tilde{\sigma}_{ij}$	تانسور تنش محلی
τ	پارامتر غیر محلی بی‌بعد
τ_{ijk}	تانسور تنش مرتبه‌ی سوم
τ_0	تنش باقیمانده‌ی سطح
χ_{ij}	تانسور گرادیان چرخش
$\tilde{\chi}_{ij}$	تانسور گرادیان چرخش محلی
ψ	زاویه‌ی چرخش سطح مقطع
ω	فرکانس طبیعی ویژه
ω	چگالی انرژی کرنشی عمومی
$\tilde{\omega}$	چگالی انرژی کرنشی محلی
Ω	منطقه‌ی اشغال شده توسط جسم
\mathcal{L}	لاگرانژین سیستم بسته

پایین نویس‌ها

b	مرز
c	نانولوله
d	غیر مرز
f	سیال

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): انواع کربن.
- شکل (۲-۱): بردار کایرال در ساختار اتمی نانولوله‌ی کربنی [۳].
- شکل (۳-۱): نانولوله‌های صندلی راحتی، زیگزاگ و کایرال [۳].
- شکل (۴-۱): اثرهای متقابل بین اتم‌ها در مکانیک مولکولی [۶].
- شکل (۵-۱): هم‌ارزی مکانیک مولکولی و ساختاری. الف) مکانیک مولکولی، ب) مکانیک ساختاری [۴].
- شکل (۱-۳): شرایط تعادل یک المان نانوتیر غیر محلی: الف) روش جایگزین کردن مستقیم مقادیر تنش و گشتاور و ب) روش تغییرات.
- شکل (۲-۳): المان حجم نمایشگر [۷۷].
- شکل (۳-۳): الف) یک نانولوله‌ی حامل سیال با لایه‌های سطحی داخلی و خارجی. ب) نمای سطح مقطع یک نانولوله [۶۷].
- شکل (۴-۳): نمودار طرح کلی نانولوله‌ی کربنی حامل سیال قرار گرفته بر روی بستر ویسکوالاستیک وینکلر-پاسترناک.
- شکل (۱-۴): نمایش نقاط δ برای یک مسئله‌ی تیر.
- شکل (۱-۵): فرکانس اصلی بی‌بعد به صورت تابعی از سرعت جریان بی‌بعد بر اساس سه تئوری کلاسیک، غیر محلی جزئی و غیر محلی تحلیلی طبق مدل تیر تیموشنکو به ازای نسبت پواسون $\nu = 0$ برای یک نانولوله‌ی دو سر مفصل.
- شکل (۲-۵): نسبت سرعت جریان بحرانی غیر محلی به سرعت جریان بحرانی کلاسیک به صورت تابعی از پارامتر غیر محلی، پیش‌بینی شده بر اساس تئوری غیر محلی جزئی و غیر محلی تحلیلی طبق مدل تیر اولر-برنولی و تیر تیموشنکو به ازای نسبت پواسون $\nu = 0$ برای یک نانولوله‌ی دو سر مفصل.
- شکل (۳-۵): اثر نسبت پواسون بر روی نسبت سرعت جریان بحرانی غیر محلی به سرعت جریان بحرانی کلاسیک پیش‌بینی شده بر اساس سه تئوری کلاسیک، غیر محلی جزئی و غیر محلی تحلیلی طبق مدل تیر تیموشنکو برای یک نانولوله‌ی دو سر مفصل.

شکل (۴-۵): مقایسه‌ی فرکانس‌های اصلی بر اساس سه تئوری مختلف بر حسب سرعت جریان سیال طبق مدل تیر تیموشنکو با نتایج بدست آمده توسط یین و همکاران [۵۳] طبق مدل تیر اولر-برنولی به ازای μm $d_o = 100$ برای میکرولوله‌ی دو سر مفصل.

شکل (۵-۵): فرکانس‌های اصلی بی‌بعد بر اساس سه تئوری مختلف به صورت تابعی از سرعت جریان سیال بی‌بعد طبق مدل تیر اولر-برنولی و تیر تیموشنکو به ازای $l/h = 1$ برای نانولوله‌ی دو سر مفصل.

شکل (۶-۵): فرکانس‌های اصلی بی‌بعد بر اساس سه تئوری مختلف به صورت تابعی از سرعت جریان سیال بی‌بعد طبق مدل تیر تیموشنکو به ازای $l/h = 0.4$ برای نانولوله‌ی دو سر مفصل.

شکل (۷-۵): فرکانس‌های اصلی بی‌بعد بر اساس سه تئوری مختلف به صورت تابعی از سرعت جریان سیال بی‌بعد طبق مدل تیر تیموشنکو به ازای $l/h = 0.2$ برای نانولوله‌ی دو سر مفصل.

شکل (۸-۵): فرکانس‌های اصلی بی‌بعد بر اساس سه تئوری مختلف به صورت تابعی از سرعت جریان سیال بی‌بعد طبق مدل تیر تیموشنکو به ازای $l/h = 0.1$ برای نانولوله‌ی دو سر مفصل.

شکل (۹-۵): سرعت جریان بحرانی بی‌بعد بر حسب l/h بر اساس سه تئوری مختلف طبق مدل تیر تیموشنکو به ازای 0.2 و $v = 0$.

شکل (۱۰-۵): اثر نسبت پواسون بر روی سرعت جریان بحرانی نانولوله‌ی حامل سیال بر اساس سه تئوری مختلف طبق مدل تیر تیموشنکو به ازای 1 و $l/h = 0.4$.

شکل (۱۱-۵): اثر اندازه‌ی جریان نانوسیال بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل استون.

شکل (۱۲-۵): اثر اندازه‌ی جریان نانوسیال بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل هوا.

شکل (۱۳-۵): اثر لایه‌های سطحی بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال.

شکل (۱۴-۵): اثر مدول الاستیک وینکلر ماده‌ی ویسکوالاستیک بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال.

شکل (۱۵-۵): اثر مدول برشی پاسترناک ماده‌ی ویسکوالاستیک بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال.

شکل (۱۶-۵): اثر ضریب میرایی ماده‌ی ویسکوالاستیک بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال.

شکل (۱۷-۵): اثر ضریب میرایی ساختاری ویسکوالاستیک نانولوله بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال به ازای $\bar{c} = 15$.

شکل (۵-۱۸): اثر ضریب میرایی ساختاری ویسکوالاستیک نانولوله بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال به ازای $\bar{c} = 30$.

شکل (۵-۱۹): اثر تغییر دما بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال در دمای پایین یا دمای اتاق.

شکل (۵-۲۰): اثر تغییر دما بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال در دمای بالا.

شکل (۵-۲۱): اثر تغییر دما بر روی سرعت جریان بحرانی سیال درون نانولوله در دو حالت دمای پایین یا دمای اتاق و دمای بالا.

شکل (۵-۲۲): اثر ویسکوزیته‌ی سیال داخلی بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال.

شکل (۵-۲۳): اثر اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال.

شکل (۵-۲۴): اثر اینرسی دورانی بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال.

شکل (۵-۲۵): اثر شرایط مرزی مختلف بر روی فرکانس‌های اصلی نانولوله‌ی حامل سیال.



فرم چکیده‌ی پایان‌نامه‌ی تحصیلی دوره‌ی تحصیلات تکمیلی	دفتر مدیریت تحصیلات تکمیلی
نام خانوادگی دانشجو: صمدی	نام: فرزانه
استاد راهنما: دکتر انوشیروان فرشیدیان‌فر	
دانشکده: مهندسی	رشته: مکانیک
گرایش: طراحی کاربردی	
مقطع: کارشناسی ارشد	
تاریخ دفاع: ۱۳۹۱/۴/۲۵	تعداد صفحات: ۱۱۰
عنوان پایان‌نامه: مطالعه‌ی ارتعاشات آزاد نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره حامل سیال	
کلید واژه‌ها: نانولوله‌های کربنی حامل سیال، تئوری‌های پیوسته‌ی مرتبه‌ی بالاتر، ارتعاشات، پایداری	

چکیده

از زمان کشف نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ تاکنون تحقیقات بسیاری در مورد نانولوله‌های کربنی انجام شده است. نانولوله‌های کربنی به دلیل خواص مکانیکی، الکتریکی، الکترومکانیکی و حرارتی استثنایی خود کاربرد وسیعی در سیستم‌ها و دستگاه‌های نانوسیالی به عنوان مخازن سیال، سنسورها و تحریک‌کننده‌ها، دستگاه‌های تزریق دارو، دستگاه‌های تصفیه‌ی سیال، نانوپمپ‌ها و غیره دارند. پیشگیری از وقوع هر گونه ارتعاشات و ناپایداری نانولوله‌های کربنی ناشی از جریان سیال، یک نیاز کلیدی برای عملکرد موفق آنها در سیستم‌ها و دستگاه‌های نانوسیالی است. بنابراین، مطالعه‌ی ارتعاشات آزاد نانولوله‌های کربنی حامل سیال از اهمیت بسیاری برخوردار است.

دو دسته‌ی عمده برای شبیه‌سازی نانولوله‌های کربنی مرتعش وجود دارد: شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و مکانیک پیوسته. باید توجه کرد که شبیه‌سازی دینامیک مولکولی بسیار پرهزینه، پیچیده و زمانبر است. اخیراً تئوری‌های پیوسته‌ی متعددی به طور گسترده برای مطالعه‌ی نانولوله‌های کربنی به کار رفته است. تئوری پیوسته‌ی کلاسیک برای مطالعه‌ی نانولوله‌های کربنی مناسب نیست و لذا استفاده از تئوری‌های پیوسته‌ی مرتبه‌ی بالاتر شامل پارامتر مقیاس طولی داخلی که بیانگر اثر اندازه‌ی وابسته به مقیاس نانو است، اجتناب‌ناپذیر است. این تئوری‌ها به دو دسته تئوری‌های غیر محلی انتگرالی مانند تئوری غیر محلی جزئی و تئوری غیر محلی دقیق، و تئوری‌های غیر محلی گرادانی مانند تئوری تنش کوپل اصلاح شده و تئوری گرادیان کرنش تقسیم‌بندی می‌شوند.

در این پایان‌نامه، ارتعاشات آزاد و پایداری نانولوله‌های کربنی حامل سیال با استفاده از تئوری‌های پیوسته‌ی ذکر شده در بالا بر اساس مدل‌های تیر اولر-برنولی و تیر تیموشنکو با در نظر گرفتن اثر نسبت پواسون مطالعه می‌شود. بعلاوه، تاثیر پارامترهای مختلف مانند اثر اندازه در جریان نانوسیال، لایه‌های سطحی، بستر ویسکوالاستیک اطراف نانولوله، میرایی ساختاری نانولوله‌های کربنی، تغییر دما، سرعت و ویسکوزیته‌ی سیال داخلی، اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی و شرایط مرزی مختلف بر روی مشخصات ارتعاشی و پایداری نانولوله‌های کربنی حامل سیال بررسی می‌شود.

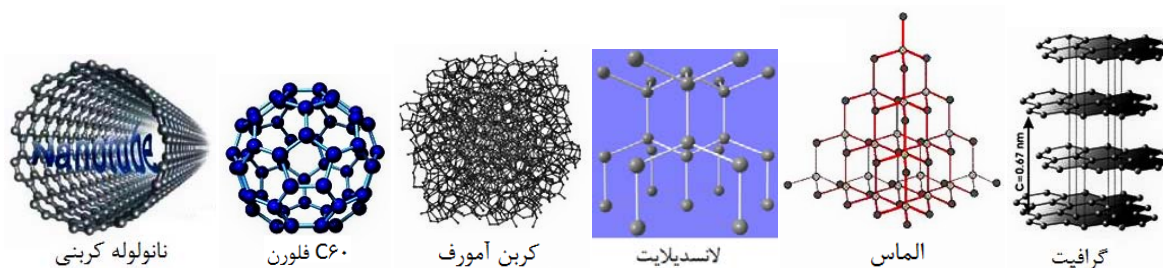
نشان داده می‌شود که در نظر گرفتن پارامتر مقیاس طولی ماده در تئوری‌های پیوسته‌ی مرتبه‌ی بالاتر، به جز تئوری غیر محلی جزئی، منجر به افزایش فرکانس‌های اصلی و پایداری نانولوله‌های کربنی حامل سیال در مقیاسه با تئوری پیوسته‌ی کلاسیک می‌شود. همچنین، اثر نسبت پواسون بر روی سرعت جریان بحرانی سیال بر اساس تئوری‌های غیر محلی گرادانی پدیده‌ی نقطه‌ی اکسترمم حداقل را نشان می‌دهد که با نتایج پیش‌بینی شده توسط تئوری کلاسیک و تئوری‌های غیر محلی انتگرالی کاملاً متفاوت است.

امضای استاد راهنما

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ - مقدمه

عصر حاضر را شاید بتوان عصر کربن نام نهاد زیرا این ماده کاربرد وسیعی در صنایع مختلف پیدا کرده است. تا سال ۱۹۸۰ تنها چهار نوع کربن شناخته شده بود: گرافیت، الماس، لانسیدیلایت^۱ و کربن بدون شکل یا آمورف^۲. در سال ۱۹۸۵، کروتو^۳ و اسمالی^۴ در حین اسپکتروسکوپی^۵ نمونه‌های بخار کربن به نتایج جالبی دست یافتند. در اینجا بود که فلورن^۶ها کشف شدند و پایداری آنها در فاز گازی نیز به صورت عملی اثبات گشت. پس از آن در سال ۱۹۹۱ کشف نانولوله‌های کربنی^۷ (CNT) توسط یک متخصص ژاپنی میکروسکوپ‌های انتقال الکترونی^۸ (TEM) به نام سومیو ایجیما^۹ [۱]، در حالی که مشغول مطالعه‌ی نشست مواد بر روی کاتد به هنگام ساخت فلورن‌ها به روش تبخیر یا قوس الکتریکی بود، صورت گرفت.



شکل (۱-۱): انواع کربن.

¹ Lonsdaleite² Amorphous³ Kroto⁴ Smalley⁵ Spectroscopy⁶ Fullerene⁷ Carbon NanoTube⁸ Transmission Electron Microscope⁹ Sumio Iijima

از زمان کشف نانولوله‌های کربنی تعداد مقاله‌های منتشر شده در این زمینه به سرعت رشد کرده است. نانولوله‌های کربنی به دلیل اندازه، شکل، خواص فیزیکی، الکتریکی، الکترومکانیکی و حرارتی قابل توجهشان توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده اند. بخش بزرگی از تحقیقات در سال‌های اخیر به فهم این حوزه از علم و تکنولوژی اختصاص یافته است. نانولوله‌های کربنی مدول یانگ بسیار بزرگی در جهت محوری خود دارند. مدول یانگ نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره حدود ۱ TPa است. در جدول (۱-۱) مدول یانگ، استحکام کششی و چگالی نانولوله‌های کربنی با برخی از مواد مقایسه شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مدول یانگ نانولوله‌های تک‌دیواره تقریباً ۵ برابر مدول یانگ فولاد است. استحکام کششی نانولوله‌ها حدود ۱۵۰ GPa و تقریباً ۴۰۰ برابر استحکام کششی فولاد است.

جدول (۱-۱): مقایسه‌ی ویژگی‌های نانولوله‌های کربنی با برخی مواد [۲].

ماده	چگالی (g/cm^3)	استحکام کششی (GPa)	مدول یانگ (GPa)
نانولوله‌ی تک‌دیواره	۱/۳-۱/۴	۱۵۰	۱۰۵۴
نانولوله‌ی چنددیواره	۲/۶	۱۵۰	۱۲۰۰
فولاد	۷/۸	۰/۴	۲۰۸
پلیمر اپوکسی ^۱	۱/۲۵	۰/۰۰۵	۳/۵
چوب	۰/۶	۰/۰۰۸	۱۶

نانولوله‌های کربنی تا دمای 2800°C پایدار هستند و هدایت گرمایی آنها تقریباً دو برابر الماس است. همچنین، هدایت الکتریکی آنها ۱۰۰۰ برابر بیشتر از سیم‌های مسی است [۳].

۲-۱- ساختار نانولوله‌ی کربنی تک‌دیواره

نانولوله‌ی کربنی در واقع یک صفحه گرافیت است که به شکل لوله درآمده است. این لوله به علت آن که دارای قطر چند نانومتری است نانولوله نام گرفته است، یعنی با اتصال دو نقطه یک صفحه گرافیت به هم، لوله‌ای حاصل می‌شود که قطر داخلی آن چند نانومتر است.

ساختار اتمی نانولوله‌ی کربنی تک‌دیواره توسط بردار کایرال^۲ \vec{C}_h و زاویه‌ی کایرال θ تعیین می‌شود. طبق شکل (۱-۱) صفحه‌ی گرافیت در طول خطوط نقطه‌چین بریده شده و به شکل یک لوله پیچیده شده

^۱ Epoxy polymer

^۲ Chiral