بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مکانیک جامدات

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)

عنوان:

تحلیل خمش، کمانش و ارتعاشات آزاد میکرو ورق کامپوزیتی تقویت‌شده با نانو لوله‌ی کربنی واقع در محیط‌های حرارتی- رطوبتی با استفاده از تئوری‌های تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر و گرادیان کرنشی

استاد راهنما:

دکتر مهدی محمدی مهر

توسط:

محمد سالمی

شهریورماه ۱۳۹۳

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیتان را سپاس

نتوانم بگویم.

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

رهاوردی گران‌سنگ‌تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار

خستگیتان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تشکر و قدردانی:

از استاد ارجمند، **جناب آقای دکتر مهدی محمدی مهر** که با راهنمایی‌های خویش راهگشای مشکلات و کمبودها بودند، با خلق‌وخوی دوستانه خود به من درس اخلاق دادند و با صبر و پشتیبانی بنده را در انجام این پایان‌نامه یاری رساندند، صمیمانه سپاسگزارم.

از **جناب آقای پروفسور قربان‌پور آرانی** و **جناب آقای دکتر لقمان** به‌عنوان داور، زحمت مطالعه‌ی پایان‌نامه‌ی اینجانب را برعهده گرفته و از وقت گران‌بهای خود به پایان‌نامه بنده اختصاص دادند بسیار سپاسگزارم.

در پایان از تمامی دوستان بخصوص آقای مهندس افشاری که در مراحل مختلف انجام پایان‌نامه به بنده یاری رساندند صمیمانه تشکر می‌کنم.

چکیده

در این تحقیق تحلیل خمش، کمانش و ارتعاشات آزاد نانو ورق مدرج تابعی و میکرو ورق کامپوزیتی تقویت‌شده با نانو لوله‌ی تک جداره کربنی مورد مطالعه گرفته است. ابتدا خیز، بار کمانش بحرانی و فرکانس طبیعی بدون بعد نانو ورق میندلین مدرج تابعی به روش ناویر تحلیل می‌شود. سپس با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر، تحلیل خمش، کمانش و ارتعاشات آزاد میکرو ورق کامپوزیت تقویت‌شده با نانو لوله‌ی تک جداره کربنی بر بستر الاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرند. از قانون اختلاط تعمیم‌یافته برای پیش‌بینی خواص مکانیکی، رطوبتی و حرارتی ماده استفاده می‌شود. همچنین تئوری گرادیان کرنشی برای بررسی پارامتر مقیاس طول بکار برده می‌شود. روابط کرنش- تغییر مکان با بکار بردن تئوری ردی استخراج می‌شوند، سپس معادلات تعادل با استفاده از روش انرژی و اصل همیلتون به دست می‌آیند. با استفاده از روش دیفرانسیل مربعی معادلات به دستگاه معادلات جبری خطی تبدیل شده و حل می‌گردند. در نهایت تاثیر ضریب شکل، پارامتر مقیاس طول ماده، بستر الاستیک، تغییرات دما و رطوبت به ازای شرایط مرزی مختلف بر فرکانس طبیعی، بار کمانش بحرانی و خمش ورق مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین مقایسه‌ای بین تئوری‌های کلاسیک، تنش کوپل اصلاح‌شده و الاستیسیته گرادیان کرنشی برای ورق‌های ردی و میندلین انجام می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد بار کمانش بحرانی و فرکانس طبیعی بدست آمده از تئوری الاستیسیته گرادیان کرنشی بزرگ‌تر از تئوری‌های کلاسیک و تنش کوپل اصلاح شده می‌باشد در حالی‌که این نتیجه برای خیز برعکس می‌باشد. همچنین تاثیر رطوبت بر ورق همانند حرارت است، به عبارت دیگر در نظر گرفتن اثر رطوبت باعث کاهش فرکانس طبیعی و بار کمانش بحرانی و افزایش خیز ورق می‌شود.

کلمات کلیدی: تحلیل خمش، کمانش و ارتعاشات آزاد، میکرو ورق تقویت‌شده با نانو لوله کربنی، محیط حرارتی- رطوبتی، قانون اختلاط تعمیم‌یافته، تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر، تئوری گرادیان کرنشی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه و مباحث نظری در زمینه فناوری نانو ۱

۱-۱-مقدمه‌ای بر فناوری نانو ۲

۱-۱-۱- نانو لوله‌های کربنی ۲

۱-۱-۱-۱- ویژگی نانو لوله‌های کربنی ۴

۱-۱-۱-۲- خواص فیزیکی نانو لوله‌های کربنی ۴

۱-۱-۱-۳- مقاومت نانو لوله‌ها ۵

۱-۱-۱-۴- انواع نانو لوله‌های کربنی ۷

۱-۱-۱-۵- استفاده از نانو لوله‌های کربنی ۸

۱-۱-۱-۶- کاربردهای نانو لوله‌های کربنی ۹

۱-۱-۲- کامپوزیت و نانوکامپوزیت ۱۲

۱-۱-۲-۱- علت استفاده از کامپوزیت ۱۲

۱-۱-۲-۲- اجزای یک کامپوزیت ۱۳

۱-۱-۲-۳- کاربردهای کامپوزیت‌ها ۱۴

۱-۱-۲-۴- نانوکامپوزیت‌ها ۱۴

۱-۲- پیشینه و هدف تحقیق ۱۸

فصل دوم: تحلیل خمش، کمانش و ارتعاشات آزاد نانو ورق مدرج تابعی میندلین براساس تئوری گرادیان کرنشی ۲۶

۲-۱-مقدمه ۲۷

۲-۲- تئوری الاستیسیته گرادیان کرنشی ۲۷

۲-۳-معادلات حاکم بر ورق میدلین ۲۸

۲-۴-حل تحلیلی معادلات حرکت نانو ورق مدرج تابعی میندلین ۳۲

۲-۵-نتایج عددی و بحث ۳۴

فصل سوم: تحلیل خمش، کمانش و ارتعاشات آزاد میکرو ورق کامپوزیتی ردی تقویت‌شده با نـانو لوله‌ی کربنی با استفاده از تئوری گرادیان کرنشی تحت تاثیر حرارت و رطوبت ۴۴

۳-۱-مقدمه ۴۵

۳-۲-تشریح هندسه تحقیق ۴۵

۳-۳-کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله کربنی ۴۶

۳-۳-۱-قانون اختلاط تعمیم‌یافته ۴۸

۳-۴-روابط کرنش-تغییر مکان ۴۹

۳-۵-روابط تنش-کرنش ۵۰

۳-۶-معادلات حرکت ۵۰

۳-۷-شرایط مرزی ۶۸

۳-۸-حل معادلات ۶۸

۳-۸-۱-روش مربع سازی دیفرانسیلی ۶۸

۳-۹-نتایج عددی و بحث ۷۱

۳-۹-۱-مقایسه تحقیق حاضر با کارهای پیشین ۷۲

۳-۹-۲-تحلیل خمش ورق کامپوزیتی تقویت شده با نانو لوله کربنی ۷۴

۳-۹-۳-تحلیل کمانشی ورق کامپوزیتی تقویت شده با نانو لوله کربنی ۷۹

۳-۹-۴-تحلیل ارتعاشی ورق کامپوزیتی تقویت شده با نانو لوله کربنی ۸۵

فصل چهارم: نتیجه‌گیری ۹۱

پیشنهادهایی برای ادامه کار ۹۳

منابع و مآخذ ۹۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- انواع نانو لوله‌های تک جداره برحسب آرایش اتم‌های کربنی مقطع لوله ۸

شکل ۲-۱- ورق مدرج تابعی ۳۱

شکل ۲-۲- خمش بدون بعد ورق مستطیلی با تکیه‌گاه ساده ۳۵

شکل ۲-۳- بار کمانش بحرانی بدون بعد ورق مستطیلی با تکیه‌گاه ساده ۳۵

شکل ۲-۴- تاثیر نمای قانون توانی روی فرکانس طبیعی بی‌بعد نانو ورق میندلین برای تئوری‌های CT, SGT, MCST ۳۸

شکل ۲-۵- تاثیر نمای قانون توانی روی خیز بی‌بعد نانو ورق میندلین برای تئوری‌های CT, SGT, MCST ۳۸

شکل ۲-۶- تاثیر نمای قانون توانی روی کمانش بی‌بعد نانو ورق میندلین برای تئوری‌های CT, SGT, MCST ۳۹

شکل ۲-۷- اثر تغییرات نمای قانون توانی روی فرکانس طبیعی بی‌بعد در برابر پارامتر مقیاس طول ماده برای تئوریهای CT, SGT, MCST ۴۰

شکل ۲-۸- اثر تغییرات نمای قانون توانی روی خیز بی‌بعد در برابر پارامتر مقیاس طول ماده برای تئوری‌های CT, SGT, MCST ۴۰

شکل ۲-۹- اثر تغییرات نمای قانون توانی روی کمانش بی‌بعد در برابر پارامتر مقیاس طول ماده برای تئوری‌های CT, SGT, MCST ۴۱

شکل ۲-۱۰- اثر ضریب شکل روی فرکانس طبیعی بی‌بعد به ازای نمای قانون توانی مختلف برای تئوری‌های CT, SGT, MCST ۴۲

شکل ۲-۱۱- اثر ضریب شکل روی خیز بی‌بعد به ازای نمای قانون توانی مختلف برای تئوری‌های CT, SGT, MCST ۴۲

شکل ۲-۱۲- اثر ضریب شکل روی کمانش بی‌بعد به ازای نمای قانون توانی مختلف برای تئوری‌های CT, SGT, MCST ۴۳

شکل ۳-۱- شکل شماتیک میکرو ورق ردی بر بستر الاستیک ۴۶

شکل ۳-۲- انواع توزیع نانو لوله کربنی در راستای ضخامت ورق ۴۷

شکل ۳-۳- تغییرات خیز ماکزیمم بدون بعد برحسب a / h با شرایط تکیه‌گاهی مختلف و ۱۱ درصد نانولوله کربنی برای ورق کامپوزیتی ردی با چینش UD ۷۴

شکل ۳-۴- تغییرات خیز ماکزیمم بدون بعد ورق کامپوزیتی ردی برای تئوری‌های CT ، SGT و MCST..۷۵
شکل ۳-۵- تغییرات خیز ماکزیمم بدون بعد میکرو ورق کامپوزیتی برای تئوری‌های تغییر شکل برشی مرتبه اول و سوم ۷۶
شکل ۳-۶- تاثیر چینش مختلف نانو لوله کربنی بر خیز ماکزیمم بدون بعد میکرو ورق کامپوزیتی ردی ۷۷
شکل ۳-۷- اثر بستر وینکلر بر خیز ماکزیمم بدون بعد میکرو ورق کامپوزیتی ردی ۷۷
شکل ۳-۸- اثر رطوبت بر خیز ماکزیمم بدون بعد میکرو ورق کامپوزیتی ردی ۷۸
شکل ۳-۹- اثر حرارت بر خیز بدون بعد ماکزیمم میکرو ورق کامپوزیتی ردی ۷۸
شکل ۳-۱۰- شش شکل مود اول کمانشی میکرو ورق ردی با چهار طرف تکیه‌گاه گیردار ۷۹
شکل ۳-۱۱- تاثیر درصدهای مختلف نانو لوله کربنی روی بار کمانش بحرانی برای تئوری‌های تغییر شکل برشی مرتبه اول و سوم ۸۰
شکل ۳-۱۲- اثر چینش مختلف نانو لوله کربنی بر بار کمانش بحرانی میکرو ورق کامپوزیتی ردی ۸۱
شکل ۳-۱۳- اثر حالت‌های مختلف بار محوری بر بار کمانش بحرانی میکرو ورق کامپوزیتی ردی ۸۲
شکل ۳-۱۴- تغییرات بار کمانش بحرانی میکرو ورق کامپوزیتی ردی به ازای شرایط تکیه‌گاهی مختلف ۸۲
شکل ۳-۱۵- اثر رطوبت و حرارت بر بار کمانش بحرانی میکرو ورق کامپوزیتی ردی ۸۳
شکل ۳-۱۶- اثر بستر بر بار کمانش بحرانی میکرو ورق کامپوزیتی ردی ۸۳
شکل ۳-۱۷- تغییرات بار کمانش بحرانی بدون بعد میکرو ورق کامپوزیتی ردی برای تئوری‌های CT، SGT و MCST ۸۴
شکل ۳-۱۸- شش شکل مود اول ارتعاشی میکرو ورق ردی با چهار طرف تکیه‌گاه گیردار ۸۵
شکل ۳-۱۹- اثر درصد نانو لوله کربنی بر چهار فرکانس اول بدون بعد ورق کامپوزیتی ۸۶
شکل ۳-۲۰- تغییرات فرکانس طبیعی اول بدون بعد به ازای چینش مختلف نانو لوله کربنی ۸۷
شکل ۳-۲۱-تغییرات فرکانس طبیعی اول بدون بعد برای تئوری‌های تغییر شکل برشی مرتبه اول و سوم ...۸۸
شکل ۳-۲۲- تغییرات فرکانس طبیعی بدون بعد میکرو ورق کامپوزیتی ردی برای تئوری‌های CT، SGT و MCST ۸۹
شکل ۳-۲۳-اثر بستر بر فرکانس طبیعی اول بدون بعد میکرو ورق کامپوزیتی ردی ۸۹
شکل ۳-۲۴- اثر رطوبت و حرارت بر فرکانس طبیعی اول بدون بعد میکرو ورق کامپوزیتی ردی ۹۰

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱- فرکانس بدون بعد ورق مستطیلی با تکیه‌گاه ساده ۳۶

جدول ۳-۱- مشخصات ساختاری CNT و PmPV ۷۱

جدول ۳-۲- ضرایب تاثیر نانو لوله کربنی ۷۲

جدول ۳-۳- خمش ورق مربعی با تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول به ازای بار گسترده $q = -0.1\,MPa$ و ضخامت $2\ mm$ ۷۲

جدول ۳-۴- فرکانس طبیعی بدون بعد ورق مربعی با تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و $a/h = 50$ .. ۷۳

جدول ۳-۵- کمانش بدون بعد ورق مربعی ایزوتروپیک با تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و شرط مرزی تکیه‌گاه ساده و $N_y = 0$ & $N_{cr} = N_x$ ۷۳

فهرست علائم و اختصارات

CNT, SWCNT, DWCNT	نانو لوله کربنی،تک جداره، دو جداره
CNTRC	کامپوزیت تقویت شده با نانو لوله کربنی
FG-CNTRC	کامپوزیت مدرج تابعی تقویت شده با نانو لوله کربنی
UD	توزیع یکنواخت
CT	تئوری کلاسیک
MCST	تئوری تنش کوپل اصلاح شده
SGT	تئوری الاستیسیته گرادیان کرنشی
$E_{11}^{CNT}, E_{22}^{CNT}, G_{12}^{CNT}$	مدول یانگ و برشی نانو لوله کربنی
E_m, G_m	مدول یانگ و برشی ماتریس
E_{11}, E_{22}	مدول یانگ و برشی نانو کامپوزیت
V_{CNT}, V_m	درصد کسر حجمی نانو لوله کربنی و ماتریس
η_1, η_2, η_3	ضرایب تاثیر نانو لوله کربنی
α_{CNT}, α_m	ضریب انبساط حرارتی نانو لوله کربنی و ماتریس
β_{CNT}, β_m	ضریب انبساط رطوبتی نانو لوله کربنی و ماتریس
w_{CNT}	کسر جرمی

فصل اول

مقدمه و مباحث نظری در زمینه فناوری نانو

۱–۱– مقدمه‌ای بر فناوری نانو

یک نانومتر یک میلیاردم یک متر است، بنابراین علم نانو آن بخش از علم است که ماده را در مقیاسی بسیار کوچک بررسی می‌کند؛ و فناوری نانو به تولید و ساخت در مقیاس مولکولی و اتمی می‌پردازد. یا به‌عبارت‌دیگر با اجسام و ساختارها و سیستم‌هایی سر و کار دارد که حداقل در یک بعد اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ نانومتر دارند. با پیشرفت و گسترشی که علم و فناوری نانو طی چند سال اخیر داشته است، انتظار می‌رود که به‌زودی تمامی زمینه‌های علم و فناوری را تحت تاثیر خود قرار دهد.

نانوفناوری صنایع مرتبط به مهندسی مکانیک را نیز بی‌بهره نگذاشته است و تحولات زیادی را از تولید کامپوزیت‌ها با استفاده از نانومواد تا تولید شتاب سنج‌هایی در اندازه نانو، ایجاد نموده است. در صنایع خودروسازی در قسمت‌های مختلف ماشین کاربردهای نانوفناوری مشاهده می‌شود، از شیشه‌های خود تمیز شو و بدنه‌های ضد خش گرفته تا باتری‌هایی با طول عمر بیشتر و وزن کمتر. در این میان نانو لوله‌های کربنی یکی از مواد اولیه‌ای هستند که به علت ویژگی ساختمانی، دارای کاربردهای مکانیکی مختلف و ویژه‌ای هستند[۱].

۱–۱–۱– نانو لوله‌های کربنی

عنصر کربن از لحاظ ساختمانی دارای شکل‌ها و فرم‌های گوناگون است (آلوتروپ[1]). در میان آلوتروپ های مختلف کربن می‌توان گرافیت و الماس را مثال‌های آشنایی دانست. نانو لوله کربنی[2] که به‌صورت استوانه‌ی جدار نازک بوده به آن ویژگی‌های خاصی را داده است که در شکل های ساده تر می‌تواند به‌صورت یک ورقه‌ی گرافیتی دربیاید. نانو لوله کربنی در گروه باکی -

[1] Allotropy
[2] Carbon nanotube (CNT)

بال ها[1] قرار دارد که به شکل لوله‌ی توخالی یا کره‌ای یا بیضی‌گون توخالی می‌باشند. نانو لوله های کربنی یکی از مهم‌ترین ساختارها در مقیاس نانو هستند. در واقع کشف نانو لوله‌های کربنی به اواخر سال ۱۹۵۰ بر می‌گردد؛ وقتی‌که راجر بیکن[2] در اتحادیه‌ی کاربید بر روی کربن و ویژگی‌های مختلف آن تحقیق می‌کرد، یک ساختار بسیار قوی کربنی را از استوانه‌های توخالی که از سرهم کردن لایه‌های گرافیتی به دست می‌آمد را پیدا کرد. در سال ۱۹۸۵ باکی‌بال (C60) که اتم های کربن در آن به‌صورت شکل توپ فوتبال در کنار هم قرار گرفته بودند کشف شد؛ تا سال ۱۹۸۰ سه آلوتروپ کربن (کربن غیربلوری) به نام‌های الماس و گرافیت و کربن بی‌شکل شناخته شده بودند؛ اما امروزه می‌دانید که شکل‌های مختلفی از خانواده کربن وجود دارد.

نام های دیگر باکی بال فولرن[3] نام‌گذاری شده است. فولرن‌ها موکول‌های کروی کربن هستند که به سبب شکل زیبا و خواص شگفت‌انگیز توجه بسیاری از دانشمندان را به خود معطوف کرده است. آلوتروپ بعدی کربن که در سال ۱۹۹۱ کشف شد، نانو لوله نام دارد. که اعتبار کشف نانو لوله‌های کربنی به سومیو آی‌ایجیما[4] در شرکت NEC ژاپن نسبت داده شده است. وی شکل‌گیری نانو لوله‌های کربنی را طی آزمایش تخلیه‌ی قوس الکتریکی مشاهده کرد. نانو لوله‌های کربن از صفحات کربن به ضخامت یک اتم و به شکل استوانه‌ای توخالی هستند[۲].

نانو لوله‌ها به ساختارهایی اطلاق می‌شود که قطر آن‌ها تا حدود ۱۰۰ نانومتر باشد. آرایش اتم های کربن در دیواره این ساختار استوانه‌ای دقیقا مشابه ساختار کربن در صفحات گرافیت است در گرافیت شش‌ضلعی های منتظم کربنی در کنار یکدیگر صفحات گرافیت را می‌سازند این صفحات کربنی بر روی یکدیگر انباشته می‌شوند و هر لایه از طریق پیوندهای ضعیف واندروالس به لایه زیرین متصل می‌شوند و هنگامی‌که صفحات گرافیت درهم پیچیده می‌شوند،

[1] Buckyballs
[2] Roger Bacon
[3] Fullerene
[4] Sumio Iijima

نانو لوله های کربنی را تشکیل می‌دهند در واقع نانو لوله‌های کربنی، گرافیتی است که به شکل لوله درآمده است[۳].

۱-۱-۱-۱- ویژگی نانو لوله‌های کربنی

خواص ویژه و منحصر به‌فرد نانو لوله‌های کربنی شامل مدول یانگ بالا و استحکام کششی خوب و طبیعت کربنی نانو لوله‌ها می‌باشد (به خاطر اینکه کربن ماده‌ای است کم وزن و بسیار پایدار و ساده جهت انجام فرآیندها که نسبت به فلزات برای تولید ارزان‌تر می‌باشد). یکی از خصوصیات برجسته‌ی نانو لوله های کربنی استحکام کششی بالای آن‌ها است. نانو لوله‌ها دارای مدول یانگی تقریباً شش برابر فولاد (۱TPa) و چگالی برابر $1/4\ g/cm^3$ هستند. این مواد در جهت محوری مقاومت کششی بسیار زیادی دارند و این مزیت بسیار خوبی برای ساخت سازه هایی با مقاومت بالا در جهت خاص است. دلیل این مقاومت بالا از یک طرف استحکام پیوند کربن- کربن در ساختار نانو لوله کربنی و از طرف دیگر شکل شش‌ضلعی این ساختار است که به‌خوبی بار را در میان پیوندها توزیع می‌کند. از طرف دیگر پایداری حرارتی نانو لوله‌ها نیز بسیار بالا است. این خواص منحصر به‌فرد مکانیکی در نانو لوله‌ها امکان استفاده از آن‌ها را در کاربردهای مختلف فراهم می‌کند. ازجمله این کاربردها می‌توان از الکترونیک در مقیاس نانو، استفاده در کامپوزیت‌ها و نیز به عنوان وسایل ذخیره کننده گازها نام برد[۴].

۱-۱-۱-۲- خواص فیزیکی نانو لوله‌های کربنی

شرایط و خواص نانو لوله‌های کربنی به‌اندازه‌ی قطر آن‌ها وابسته است. اگرچه طول یک نانو لوله‌ی کربنی می‌تواند تا چند میلی‌متر هم باشد اما قطر آن ده هزار برابر از قطر موی انسان کوچک‌تر است. در اصل نانو لوله‌های کربنی دارای بزرگ‌ترین نسبت طول به قطر هستند که

می‌تواند این عدد به ۱:۲۸۰۰۰۰۰۰ برسد. در ادامه در مورد خواص فیزیکی صحبت می‌شود:

۱) ویژگی منحصربه‌فرد کربن نانو لوله‌ها از پیوندهای SP2 (هر پیوند کربن در مجاورت ۳ اتم کربن دیگر قرار دارد) آن به وجود آمده است؛ که مولکول‌ها را تنها در یک ساختار ابعادی و شکل و اندازه، گرفتار می‌کند و ثابت نگه می‌دارد.

۲) برخی از خواص منحصربه‌فرد دیگر آن نیز قدرت کشسانی و ارتجاعی بالای آن و هدایت حرارتی بالای آن می‌باشد.

۳) نانو لوله‌های کربنی به دلیل ساختار توخالی که دارند در برابر تغییر شکل‌های ناگهانی بازگشت‌ناپذیر بر اثر فشارهای قوی وارد می‌شود، به‌خوبی مقاومت می‌کنند.

۴) کربن نانو لوله‌ها می‌توانند به‌جای فلزات (دارای هدایت الکتریکی بالاتر از مس) یا به‌جای فلزات نیمه‌رسانا، بستگی به تعداد لایه‌های گرافن دارد، استفاده شوند[۲].

۱-۱-۱-۳- مقاومت نانو لوله‌ها

رفتار مکانیکی نانو لوله‌های کربنی به‌عنوان یکی از بهترین فیبرهای کربنی‌ای که تاکنون ساخته شده‌اند، بسیار شگفت‌انگیز است. فیبرهای کربنی معمول دارای مقاومتی تا ۵۰ برابر مقاومت مخصوص (نسبت مقاومت به چگالی) فولاد بوده و از طرف دیگر تقویت‌کننده‌های خوبی در برابر بار در کامپوزیت‌ها هستند؛ بنابراین نانو لوله‌ها یکی از گزینه‌های ایده‌آل در کاربرد ساختمانی هستند.

در نانو لوله‌های کربنی چندلایه مقاومت حقیقی در حالات واقعی بیشتر تحت تاثیر لغزیدن استوانه‌های گرافیتی نسبت به هم قرار دارد. در واقع آزمایش‌هایی که به‌تازگی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی جهت اندازه‌گیری تنش‌های نانویی صورت گرفته است، مقاومت کششی نانو لوله‌های کربنی چندلایه مجزا را اندازه‌گیری کرده‌اند.

نانو لوله ها براثر پدیده درهم تنیدگی[1] می‌شکنند. این نوع شکست مربوط به لغزش لایه‌ها در استوانه های هم محور نانو لوله چند لایه و نیز شکست استوانه‌ها به طور مجزا است. مقاومت کششی دیده‌شده در نانو لوله‌های چند لایه حدود اکثریت آزمایش‌هایی که تاکنون صورت گرفته مقدار تئوری پیش‌بینی‌شده برای مدول یانگ نانو لوله (۱TPa) را تایید می‌کنند؛ ولی درحالی‌که پیش‌بینی مقاومت کششی در تئوری حدود ۳۰۰ GPa بوده است، بهترین مقادیر تجربی نزدیک به ۵۰ GPa می‌باشد؛ که اگرچه با تئوری فاصله دارد اما هنوز هم تا ده برابر بیشتر از فیبرهای کربنی است.

شبیه‌سازی ها در نانو لوله‌های تک‌لایه نشان می‌دهد که رفتار شکست و تغییر شکلی بسیار جالبی در آن ها وجود دارد. نانو لوله‌ها در تغییر شکل‌های بسیار بالا با آزاد کردن ناگهانی انرژی به ساختار دیگری تبدیل می‌شوند. نانو لوله‌ها تحت بار دچار کمانش و پیچش می‌شوند و به شکل مسطح تبدیل می‌گردند. آن‌ها بدون نشانی از کوچک‌ترین شکست و خرابی دچار کرنش های خیلی بزرگی (تا ٪۴۰) می‌شوند. بازگشت‌پذیری تغییر شکل‌ها، مثلا کمانش، مستقیما در نانو لوله‌های چندلایه با استفاده از میکروسکوپ عبور الکترون ثبت شده است.

به‌تازگی نظریه جالبی برای رفتار پلاستیکی نانو لوله‌ها ارائه شده است. طبق این نظر بسته‌های ۵ و ۷ تایی کربن (پنتاگون- هپتاگون) تحت کرنش زیاد دچار عیب در شبکه مولکولی می‌شوند و این ساختار ناقص در طول جسم حرکت می‌کند و این حرکت باعث کاهش قطر مقطعی خواهد شد. جدایش این نقصان‌ها گلویی شدن در نانو لوله را به همراه خواهد داشت. علاوه بر گلویی شدن مقطعی، در آن مقطع آرایش شبکه کربنی نیز تغییر خواهد کرد. این تغییرات در آرایش باعث می‌شود که میزان رسانش نانو لوله کربنی تغییر یابد، این ویژگی می‌تواند منجر به کاربردی منحصر به‌فرد از نانو لوله شود: نوع جدیدی از پروب، که با تغییرات در ویژگی‌های الکتریکی‌اش به تنش‌های مکانیکی پاسخ می‌دهد[۵].

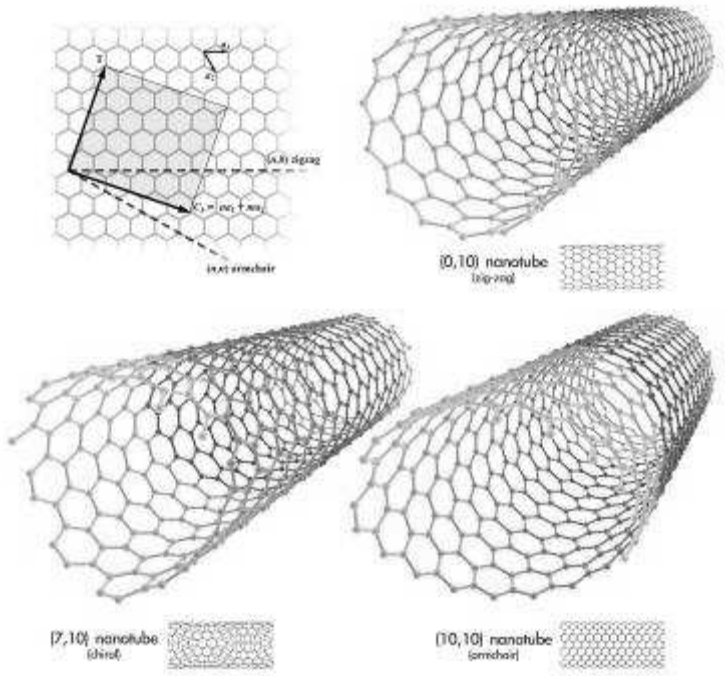
[1] sword-in-sheath

۱-۱-۱-۴-انواع نانو لوله‌های کربنی

نانو لوله ها به دو دسته‌ی تک جداره و چند جداره تقسیم می‌شوند. نانو لوله‌های تک جداره برحسب آرایش اتم‌های کربنی مقطع لوله به سه دسته مهم دسته صندلی[1] و کایرال[2] که دارای خاصیت فلزی هستند و زیگزاگ[3] که خاصیت نیم‌رسانایی دارد تقسیم می‌شوند. نانو لوله‌های کربنی تک جداره فقط از کربن و یک ساختار ساده (ورقه‌ای از شش‌ضلعی‌های منتظم) تشکیل شده‌اند. از آغاز کار روی تک‌جداره‌ها از آن‌ها به‌عنوان یک پدیده‌ی تک‌بعدی اسم برده می‌شد تا اینکه این نظریه مرحله به مرحله پیشرفت کرد. علت علاقه به این نانو لوله‌ها تک جداره و تلاش برای جایگزین کردن آن‌ها در صنعت بر اساس محاسبات نظری تاثیرات آزمایشگاهی بر خصوصیات عالی مکانیکی و رسانایی الکتریکی آن‌ها مانند فلزات می‌باشد. البته تولید نانو لوله های تک جداره دارای هزینه بالایی است و تولید به همراه پایدار کردن خصوصیات آن‌ها در حین فرآوری پلیمر نانو لوله مشکل می‌باشد. هرچند نانو لوله‌هایی که با استفاده از تکنیک لانگهوری-بلاجت که شامل حرکات افقی و عمودی می‌باشند، تولید شده‌اند. علاوه بر اینکه ثابت نگه‌داشته می‌شوند، توسط ژلاتین و تشکیل نانوژل کربنی از لحاظ نوری نیز یکدست و همگن و از لحاظ ساختاری قابل کنترل می‌باشند. برعکس در دسترس بودن و تجاری بودن نانو لوله های کربنی چند جداره باعث شده که پیشرفت‌های زیادی در این زمینه داشته باشند تا حدی که محصولاتی در آستانه تجاری شدن تولید شده است. یکی از معایب نانو لوله‌های چند جداره نسبت به تک جداره این است که استحکام دهی آن‌ها کمتر می‌باشد، زیرا پیوندهای صفحات داخلی ضعیف می‌باشند. اما از آنجا که در حال حاضر کاربردهای نانو لوله‌ها در تقویت پلیمرها باعث بهبود خواص الکتریکی و گرمایی می‌شود تا بهبود خواص مکانیکی؛ لذا کاربرد نانو لوله های کربنی چند جداره بسیار زیاد می‌باشد. از طرفی تکنیک‌های موجود نیز برای تولید نانو

[1] Armchair
[2] Chiral
[3] Zigzag

لوله های تک جداره به اندازه کافی بازدهی ندارد و خلوص لازم را نیز به همراه نمی‌آورد. تلخیص این مواد بسیار زحمت آور است و در نهایت ممکن است به ساختار نانو لوله نیز صدمه بزند[۶].



شکل ۱-۱ -انواع نانو لوله‌های تک جداره برحسب آرایش اتم‌های کربنی مقطع لوله

۱-۱-۱-۵- استفاده از نانو لوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی نقش اساسی را در نانوتکنولوژی بازی می‌کنند، مخصوصا در میکروسکوپ های اسکن الکترون و در نانو الکترونیک و نانو ماشین‌آلات یا نمایشگرهای تخت بسیار کاربرد دارند. از نانو لوله‌های کربنی به‌عنوان ماده‌ی بالقوه برای استفاده در آسانسورهای فضایی (کابل های زمین به فضا) و دیگر ابزارهای هوافضایی استفاده می‌شود. اخیرا، پیشنهاد شده است که از نانو لوله‌های کربن به‌عنوان تقویت‌کننده در زره‌های ضدگلوله استفاده شود.

به هرحال نانو لوله های کربنی سمی باشند یا نباشند هنوز در بسیاری از تکنولوژی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما برخی از دانشمندان معتقدند که نانو لوله‌های به‌اندازه‌ی آزبست

(پنبه‌ی نسوز) خطرناک است. بنا بر گفته‌های آن‌ها استنشاق نانو لوله‌های کربنی می‌تواند باعث بیماری ها و عوارض تنفسی و حتی سرطان شود. تحقیقات بسیاری هم‌اکنون در حال پیگیری است که آیا ادعاها صحیح می‌باشد یا خیر[۲].

۱-۱-۱-۶- کاربردهای نانو لوله‌های کربنی

وجود یک سری مختصات ویژه نانو لوله‌های کربنی آن‌ها را به انتخاب ایده‌آلی برای بسیاری از کاربردها تبدیل کرده است. دلیل عمده‌ی این مسئله تکامل ساختاری مورد انتظار آن‌ها، اندازه کوچک، چگالی کم، سختی بالا، استحکام بالا (استحکام کششی خارجی‌ترین جداره‌ی یک نانو لوله کربنی چند دیواره تقریبا ۱۰۰ برابر بیشتر از آلومینیوم است) و خواص عالی الکتریکی آن‌هاست.

درنتیجه نانو لوله های کربنی ممکن است به‌طور گسترده در تقویت مواد، صفحه نمایش مسطح با انتشار میدانی، حسگرهای شیمیایی، دارو رسانی و علم نانو الکترونیک کاربرد یابند. در ادامه به مواردی از کاربردهای نانو لوله‌های کربنی اشاره خواهد شد.

۱-۱-۱-۶-۱- تهیه الیاف از نانو لوله‌های کربنی

پژوهشگران موسسه نانو تک در تگزاس در زمینه تهیه الیاف از نانو لوله‌های کربنی به پیشرفت های چشمگیری دست یافته‌اند این الیاف محکم و فوق‌العاده انعطاف‌پذیر بوده و از نظر حرارتی و الکتریکی رساناست. از این الیاف برای تولید نخ‌های فلامینتی استفاده می‌کنند و می توانند جایگزین الیاف معمولی در زمینه فیلترها، جلیقه‌های نجات، لباس‌های ضد اشتعال، منسوجات الکترونیکی، ساخت ماهیچه‌های مصنوعی و ابر خازن‌ها شوند. این الیاف به علت ویژگی های نانو لوله های کربنی به عنوان موادی دوستدار محیط زیست که به مصرف بهینه‌ی انرژی نیز کمک می‌نمایند، شناخته شده‌اند.