

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- فناوری نانو.....
۲	۲-۱- شگفتیهای نانولوله های کربنی.....
۱۰	۳-۱- تاریخچه.....
۱۹	۴-۱- مروری بر شبیه سازی های نانولوله های کربنی و روابط حاکم.....
۲۹	۵-۱- نگاهی به بعضی اثرات مورد بررسی.....
۲۹	۱-۵-۱- اثر میدان مغناطیسی بر نانولوله کربنی دوشاخه.....
۳۱	۲-۵-۱- اثر میدان مغناطیسی بر نانوسیال در حال جریان.....
۳۳	۳-۵-۱- اثر تنش سطحی بر ارتعاشات نانولوله کربنی دوشاخه.....
۳۵	۶-۱- اهداف تحقیق.....
۳۶	۱-۶-۱- اثر حرکت نانو سیال در ارتعاشات و ناپایداری نانولوله تک جداره Y شکل.....
۳۷	۲-۶-۱- تاثیر چند شاخه بودن نانولوله کربنی بر ناپایداری و ارتعاشات سیستم.....
۳۸	۳-۶-۱- بررسی اثر میدان مغناطیسی بر فرکانس های طبیعی و ناپایداری سیستم.....
۳۸	۴-۶-۱- حرکت سیال و تأثیر عدد نادسن بر ارتعاشات نانولوله کربنی Y شکل.....
۳۹	۵-۶-۱- بررسی اثر تنش سطحی بر ارتعاشات و ناپایداری نانولوله کربنی دو شاخه.....
۳۹	۶-۶-۱- بررسی اثر محیط ویسکوالاستیک بر پایه مدل های مختلف و بررسی نقش حرارت بر محیط الاستیک و تنشها.....
۴۰	۷-۶-۱- تأثیر ویسکوالاستیسیته نانولوله کربنی دو شاخه بر ارتعاشات و ناپایداری سیستم.....
۴۰	۸-۶-۱- تأثیر شبیه سازی های مختلف نانولوله بر ناپایداری نانولوله کربنی دو شاخه.....
۴۰	۹-۶-۱- بررسی ناپایداری نانولوله ی کربنی - جداساز Y شکل با استفاده از روش های غیر خطی.....
۴۱	۱۰-۶-۱- تأثیر پارامتر مقیاس کوچک بر ناپایداری نانولوله کربنی دو شاخه.....
۴۱	۷-۱- اهمیت و ارزش تحقیق.....
۴۲	۸-۱- فرضیات و سؤال های ویژه.....
۴۵	فصل دوم: تحلیل پایداری و ارتعاشات نانولوله ی کربنی با استفاده از مدل پوسته
۴۶	۱-۲- کمانش.....

۴۷	۱-۱-۲- مدل پوسته الاستیک غیر موضعی.....
۵۳	۲-۱-۲- تحلیل پیش کمانش نانو لوله دو جداره.....
۵۴	۳-۱-۲- کمانش نانولوله دو جداره ناشی از نیروهای شعاعی.....
۵۶	۴-۱-۲- کمانش نانولوله کربنی ناشی از نیروهای پیچشی.....
۵۸	۲-۲- ارتعاشات غیر خطی نانولوله کربنی.....
۵۸	۱-۲-۲- مدل غیر خطی پوسته الاستیک برای نانولوله کربنی دو جداره.....
۵۹	۲-۲-۲- برهمکنش سیال.....
۶۱	۳-۲-۲- معادلات حاکم.....
۶۲	۴-۲-۲- روش حل.....
۶۳	۵-۲-۲- روش گالرکین.....
۶۴	۶-۲-۲- روش معدل گیری.....

## فصل سوّم: بررسی ارتعاشات خطی و غیرخطی نانولوله کربنی حاوی جریان سیال و بهبود

### ۶۸ پایداری سیستم با در نظر گرفتن یک جداساز متقارن Y شکل در انتهای لوله

۶۹	۱-۳- شبیه سازی مسأله.....
۶۹	۱-۱-۳- فرضیات.....
۷۰	۲-۱-۳- هندسه مسأله.....
۷۱	۳-۱-۳- معادلات اساسی.....
۷۲	۲-۲- استخراج معادلات حرکت.....
۷۲	۱-۲-۳- تئوری الاستیسیته غیرموضعی بر اساس مدل کلونین- ویت.....
۷۴	۲-۲-۳- اثرات سطح.....
۷۵	۳-۲-۳- میدان مغناطیسی.....
۷۶	۴-۲-۳- جریان مایع در پائین دست تقاطع Y شکل.....
۷۷	۵-۲-۳- لغزش سیال بر دیواره نانولوله کربنی.....
۷۹	۶-۲-۳- نیروی ناشی از لزجت سیال.....
۸۱	۷-۲-۳- نیروی محیط ویسکوالاستیک.....
۸۱	۸-۲-۳- اصل هامیلتون.....
۹۳	۳-۳- حل خطی معادله حرکت.....
۹۴	۱-۳-۳- روش حل.....
۹۴	۲-۳-۳- روش گالرکین.....
۹۶	۴-۳- حل غیرخطی معادله حرکت.....
۹۶	۱-۴-۳- روش تحلیل هوموتوپی.....
۹۷	۲-۴-۳- محاسبه تابع ، فرکانس و دامنه نوسان.....

## فصل چهارم: تحلیل ارتعاشات و ناپایداری نانولوله کربنی دو شاخه نامتقارن حاوی

### جریان سیال با استفاده از تئوری تیر مرتبه بالاتر

۱۰۴

- ۱-۴-۱- تئوری تیر مرتبه بالاتر..... ۱۰۵
- ۴-۱-۲- روابط کرنش - جابه جایی..... ۱۰۶
- ۴-۲- هندسه نانولوله کربنی دوشاخه..... ۱۰۶
- ۴-۳- تئوری الاستیسیته سطح..... ۱۰۷
- ۴-۳-۱- تنش ویسکوالاستیک حجم و سطح نانولوله دو شاخه..... ۱۰۸
- ۴-۳-۲- معادلات تعادل بین حجم و لایه سطحی نانولوله..... ۱۱۰
- ۴-۴- پیاده سازی معادلات میدان مغناطیسی..... ۱۱۱
- ۴-۴-۱- اصلاح پروفیل سرعت..... ۱۱۲
- ۴-۵- محاسبه نیروهای اعمالی به سیال از طرف میدان مغناطیسی..... ۱۱۶
- ۴-۵-۱- محاسبه نیرو و ممانهای اعمالی به نانولوله از طرف میدان مغناطیسی..... ۱۱۷
- ۴-۶- محاسبه نیروی تغییر مومنتم در محل اتصال نانولوله ها..... ۱۲۰
- ۴-۷- بررسی نیروهای ناشی از محیط الاستیک..... ۱۲۲
- ۴-۷-۱- محیط ویسکوپاسترناک کلوین - ویت..... ۱۲۳
- ۴-۷-۲- محیط ویسکوپاسترناک ماکسول..... ۱۲۴
- ۴-۷-۳- محیط ویسکوپاسترناک استاندارد..... ۱۲۴
- ۴-۷-۴- محیط الاستیک سه پارامتری یا مدل رایزنر..... ۱۲۵
- ۴-۷-۵- محیط الاستیک غیرموضعی..... ۱۲۷
- ۴-۷-۶- تاثیر دما بر محیط الاستیک..... ۱۳۱
- ۴-۸- تنش حرارتی نانولوله کربنی..... ۱۳۶
- ۴-۹- پیاده سازی معادلات حرکت بر اساس تئوری تنش جفت..... ۱۳۷
- ۴-۹-۱- انرژی کرنشی..... ۱۳۷
- ۴-۹-۲- انرژی جنبشی..... ۱۳۹
- ۴-۹-۳- کار مجازی نیروهای خارجی و مرزی..... ۱۳۹
- ۴-۹-۴- انرژی ناشی از تنشهای ویسکوالاستیک نانولوله..... ۱۴۰
- ۴-۱۰- اعمال اصل هامیلتون برای استخراج معادلات حرکت نانولوله دوشاخه..... ۱۴۱
- ۴-۱۰-۱- شرایط مرزی و پیوستگی..... ۱۴۲
- ۴-۱۰-۲- بی بعدسازی معادلات حرکت و شرایط مرزی..... ۱۵۰
- ۴-۱۱- پیاده سازی معادلات بر اساس تئوری الاستیسیته غیرموضعی..... ۱۵۴
- ۴-۱۱-۱- انرژی کرنشی سطح و حجم..... ۱۵۴
- ۴-۱۱-۲- به کارگیری اصل هامیلتون و استخراج معادلات حرکت و شرایط مرزی..... ۱۵۵

۱۵۸ ..... ۱۲-۴- گسسته سازی معادلات حرکت و شرایط مرزی

### ۱۶۱ فصل پنجم: تشریح روش حل مسأله

۱۶۲ ..... ۱-۵- تحلیل شکل مود.....

۱۶۳ ..... ۲-۵- معادله فرکانس.....

۱۶۴ ..... ۱-۲-۵- تحلیل فرکانس.....

۱۶۵ ..... ۳-۵- تحلیل کمانش.....

۱۶۶ ..... ۴-۵- روش تکرار برای محاسبه فرکانس.....

۱۶۸ ..... ۱-۴-۵- محاسبه سرعت بحرانی.....

### ۱۶۹ فصل ششم: بررسی نتایج

۱۷۰ ..... ۱-۶- اعتبار سنجی.....

۱۷۸ ..... ۲-۶- تحلیل پایداری و ارتعاشات نانولوله کربنی با استفاده از مدل پوسته.....

۲۰۹ ..... ۳-۶- تحلیل ارتعاشات و ناپایداری نانولوله کربنی دوشاخه نامتقارن حاوی جریان سیال.....

### ۲۲۶ فصل هفتم: پیوست ها

۲۲۷ ..... ۱-۷- پیوست آ.....

۲۲۹ ..... ۲-۷- پیوست ب.....

۲۳۱ ..... ۳-۷- پیوست پ.....

۲۳۴ ..... ۴-۷- پیوست ت.....

۲۳۶ ..... ۵-۷- پیوست ث.....

۲۳۸ ..... ۱-۵-۷- ریاضیات معادله ناویر-استوکس.....

۲۴۳ ..... ۶-۷- پیوست ج.....

۲۴۳ ..... ۱-۶-۷- ضرایب ماتریسی معادله (۳-۶۴).....

۲۴۷ ..... ۲-۶-۷- شرایط تکیه گاهی دوسر ساده.....

۲۴۸ ..... ۳-۶-۷- شرایط مرزی یکسر آزاد - یکسر گیردار.....

۲۴۸ ..... ۴-۶-۷- شرایط مرزی دو سر گیر دار.....

۲۴۹ ..... ۷-۷- پیوست چ.....

۲۴۹ ..... ۱-۷-۷- مفهوم هوموتوپی.....

۲۵۰ ..... ۲-۷-۷- حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی به روش تحلیل هوموتوپی.....

۲۵۳ ..... ۸-۷- پیوست ح.....

۲۵۵	..... پیوست خ-۹-۷
۲۵۹	..... پیوست د-۱۰-۷
۲۵۹	..... ضرایب $a_{nk}$ ، $b_{nk}$ ، $c_{nk}$ و $d_{nk}$ -۱-۱۰-۷
۲۶۱	..... معادله حرکت جانبی برای محیط ویسکوالاستیک ماکسول -۲-۱۰-۷
۲۶۱	..... معادله حرکت جانبی برای محیط ویسکوالاستیک استاندارد -۳-۱۰-۷
۲۶۲	..... معادله حرکت جانبی برای محیط الاستیک سه پارامتری -۴-۱۰-۷
۲۶۲	..... معادله حرکت جانبی برای محیط الاستیک غیرموضعی -۵-۱۰-۷
۲۶۳	..... ضرایب $\bar{a}_{nk}$ ، $\bar{b}_{nk}$ و $\bar{c}_{nk}$ -۶-۱۰-۷
۲۶۴	..... شرایط مرزی طبیعی و مرتبه بالاتر برای تئوری الاستیسیته غیرموضعی -۷-۱۰-۷
۲۶۶	..... ضرایب $\bar{\alpha}_{nk}$ ، $\bar{\beta}_{nk}$ و $\bar{\chi}_{nk}$ -۸-۱۰-۷
۲۶۶	..... معادلات شرایط مرزی، تابع مکان -۹-۱۰-۷
۲۶۹	..... ضرایب $\bar{\xi}_{nk}$ و $\bar{\zeta}_{nk}$ -۱۰-۱۰-۷
۲۷۰	..... پیوست ذ-۱۱-۷
۲۷۰	..... مراجع
۲۸۱	..... جمع بندی نتایج
۲۸۴	..... پیشنهادها

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱-۱- نانولوله کربنی چند جداره..... ۸
- شکل ۱-۲-۱- نانولوله کربنی تک جداره..... ۸
- شکل ۱-۳- تقسیم بندی نانولوله های کربنی بر حسب آرایش اتمها [۲۳]..... ۹
- شکل ۱-۴- نانولوله کربنی دوشاخه [۲۵]..... ۱۰
- شکل ۱-۵- انواع نانولوله های کربنی که با اتصال دو یا چند نانولوله کربنی مستقیم به هم تولید شده اند. (a) نانولوله کربنی X شکل [۷۱] ، (b) نانولوله کربنی Y شکل [۷۱] و (c) نانولوله کربنی T شکل [۷۲]..... ۱۷
- شکل ۱-۶- یک نمای مفهومی از کاربرد و استفاده نانو ساختارهای کربنی در یک پلتفرم شامل: ابزار Y شکل، وسایل اتصال داخلی و نانولوله های کربنی مستقیم که هدفش ایجاد یک دستگاه نانویی با برجستگی های نوین می باشد [۷۴]..... ۱۸
- شکل ۱-۷- نمایی از جداسازی ذرات از محلول در حال حرکت با اعمال میدان مغناطیسی، توسط نانولوله دوشاخه [۷۶]..... ۱۹
- شکل ۱-۸- (a) نمای شماتیک از جداسازی یون های مثبت و منفی در سیال پایه ی آب، (b) نمای دینامیک مولکولی جداسازی که سیال پایه در آن نشان داده نشده است [۷۵]..... ۱۹
- شکل ۱-۹- (a) لوله یکسرگیردار با جرم نقطه ای انتهایی (b) قطعه انتهایی با مسیر باز مستقیم (c) قطعه انتهایی با مسیر بسته مستقیم و دارای منفذ عمود بر مسیر بسته [۷۸]..... ۲۱
- شکل ۱-۱۰- نمودار ارگند به صورت تابعی از سرعت سیال برای: (a) مسیر حرکت سیال خروجی به صورت مستقیم (b) جریان سیال خروجی با ۹۰ درجه انحراف [۷۸]..... ۲۱
- شکل ۱-۱۱- لوله مستقیم تکیه گاه ساده حاوی جریان سیال [۷۹]..... ۲۲
- شکل ۱-۱۲- لوله دایره ای دو سر گیردار حاوی جریان سیال [۷۹]..... ۲۲
- شکل ۱-۱۳- خط لوله سه بعدی حاوی جریان سیال [۷۹]..... ۲۲
- شکل ۱-۱۴- شماتیک مدل اتمی [۸۸]..... ۲۶
- شکل ۱-۱۵- نمایی از یک نانولوله کربنی واقع در محیط ویسکوالاستیک تحت میدان مغناطیسی جانبی [۹۶]..... ۳۰
- شکل ۱-۱۶- (a) - نانوسازه با سطح مقطع مستطیلی، (b) نانوسازه با سطح مقطع دایره ای [۱۰۰]..... ۳۴
- شکل ۱-۱۷- خط مرکزی تیر تغییر شکل یافته و تغییر شکل نیافته، تحت نیروی ناشی از تنش سطحی [۱۰۰]..... ۳۵

- شکل ۲-۱- نانو لوله کربنی دو جداره تحت محیط الاستیک..... ۵۲
- شکل ۳-۱- نانو لوله کربنی- جداساز  $Y$  شکل..... ۷۱
- شکل ۳-۲- حجم کنترل پایین دست جریان..... ۷۷
- شکل ۳-۳- المان تغییر شکل یافته نانو لوله کربنی حامل سیال..... ۸۰
- شکل ۴-۱ (a) - جابه جایی طولی (b) جابه جایی عرضی (c) پیچش سطح مقطع حول محور  $y$  (d) پیچش سطح مقطع حول محور  $x$ ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۲- نانو لوله کربنی دوشاخه..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳- شبیه سازی نانو لوله کربنی دوشاخه..... ۱۰۷
- شکل ۴-۴- حالت تنش صفحه ای در لایه سطحی نانو لوله کربنی..... ۱۰۹
- شکل ۴-۵- حجم کنترل سیال..... ۱۲۱
- شکل ۴-۶- نانو لوله کربنی قرار گرفته در محیط ویسکوپاسترناک کلونین-ویت..... ۱۲۳
- شکل ۴-۷- نانو لوله کربنی قرار گرفته در محیط ویسکوپاسترناک ماکسول..... ۱۲۴
- شکل ۴-۸- نانو لوله کربنی قرار گرفته در محیط ویسکوپاسترناک استاندارد..... ۱۲۵
- شکل ۴-۹- نانو لوله کربنی قرار گرفته در محیط الاستیک سه پارامتری..... ۱۲۶
- شکل ۴-۱۰- (a) نمای شماتیک از مدل محیط الاستیک غیرموضعی (b) تعادل نیروها روی یک المان از محیط الاستیک..... ۱۲۸
- شکل ۴-۱۱- شبیه سازی محیط الاستیک غیرموضعی توسط فنر..... ۱۳۰
- شکل ۴-۱۲- (a) نمای شماتیک از مدل دولایه ای محیط الاستیک شامل حجم و لایه سطحی (b) سطح مقطع محیط الاستیک..... ۱۳۳
- شکل ۴-۱۳- دیاگرام آزاد ممانهای خمشی و پیچشی نقطه اتصال..... ۱۴۶
- شکل ۶-۱- تأثیر زاویه جدایی سیال بر پایداری و ناپایداری سیستم لوله حامل جریان سیال: (a) (b)  $\varphi = 0^\circ$   $\varphi = 90^\circ$  (c)  $\varphi = 90^\circ$ ، [۷۸]..... ۱۷۲
- شکل ۶-۴- مقایسه ششمین تقریب تغییر مکان  $u(t)$  با حل عددی نانو لوله کربن - جداساز  $Y$  شکل برای  $\bar{C}_{NL} = 100, \bar{C}_L = -50$ ..... ۱۷۶
- شکل ۶-۵- مقایسه نتایج تئوریهای مختلف در مقدار فرکانس ارتعاشات سیستم برای  $\alpha = 20^\circ$ ،  $\beta = 25^\circ$  و  $L_2 = 0.6L_1, L_3 = 0.8L_1$ ..... ۱۷۷
- شکل ۶-۷- فشار کمانش نانو لوله کربنی دو جداره تحت محیط الاستیک وینکلر بر حسب مودهای طولی و محیطی..... ۱۷۹
- شکل ۶-۸- فشار کمانش نانو لوله کربنی دو جداره محاط شده در محیط الاستیک پاسترناک بر اساس تغییر اعداد موج طولی و محیطی..... ۱۸۰

- شکل ۶-۹- تغییرات فشار کمانش نانولوله کربنی دوجداره بر حسب مدول وینکلر و موده‌های طولی و محیطی مختلف..... ۱۸۰
- شکل ۶-۱۰- تغییرات فشار کمانش نانولوله کربنی دوجداره بر حسب مدول وینکلر و مدولهای مختلف برشی..... ۱۸۱
- شکل ۶-۱۱- تغییرات بار کمانش محوری بر حسب تغییر موده‌های طولی و محیطی و فرض وجود و عدم وجود نیروی واندروالسی..... ۱۸۲
- شکل ۶-۱۲- اثر موده‌های طولی و محیطی بر بار کمانش نانولوله‌ی کربنی (a) محدوده  $1 \leq m \leq 50$  (b) محدوده  $50 \leq m \leq 100$ ..... ۱۸۳
- شکل ۶-۱۳- اثر موده‌های طولی و محیطی بر بار کمانش پیچشی نانولوله کربنی دو جداره..... ۱۸۵
- شکل ۶-۱۴- اثر محیط الاستیک بر بار کمانش پیچشی..... ۱۸۶
- شکل ۶-۱۵- اثر مدول برشی محیط الاستیک و موده‌های طولی بر بار کمانش پیچشی..... ۱۸۷
- شکل ۶-۱۶- اثر دامنه ارتعاشات و موده‌های محیطی بر فرکانس سیستم نانولوله دو جداره..... ۱۸۸
- شکل ۶-۱۷- اثر دامنه ارتعاشات و موده‌های محیطی بر فرکانس سیستم نانولوله دو جداره (a) ارتعاشات آزاد (b) ارتعاشات اجباری..... ۱۸۹
- شکل ۶-۱۸- اثر دامنه ارتعاشات و موده‌های طولی بر فرکانس سیستم نانولوله کربنی دو جداره..... ۱۹۰
- شکل ۶-۱۹- اثر سفتی مدول وینکلر بر فرکانس و دامنه ارتعاشات غیرخطی سیستم نانولوله کربنی دوجداره..... ۱۹۱
- شکل ۶-۲۰- اثر زاویه جدایی و سرعت سیال بر فرکانس ارتعاشات سیستم نانولوله کربنی- جداساز Y شکل: (a) مود اول (b) مود دوم..... ۱۹۳
- شکل ۶-۲۱- تأثیر زاویه جدایی سیال بر پایداری و ناپایداری سیستم نانولوله کربنی- جداساز Y شکل؛ حامل جریان سیال: (a)  $\varphi = 0^\circ$  (b)  $\varphi = 90^\circ$ ..... ۱۹۴
- شکل ۶-۲۲- تأثیر زاویه جدایی سیال بر سرعت تشدید برای سیستم دو سر گیردار و یک سر آزاد- یک سر گیردار..... ۱۹۵
- شکل ۶-۲۳- تأثیر ویسکوالاستیک بودن نانولوله کربنی بر فرکانس ارتعاشات و ناپایداری آن: (a) شرایط تکیه گاهی دوسر گیردار (b) شرایط تکیه گاهی یک سر آزاد- یک سر گیردار..... ۱۹۷
- شکل ۶-۲۴- تأثیر تنش سطح بر فرکانس و ناپایداری سیستم: (a, b) به ترتیب فرکانس حقیقی تکیه گاه دو سر گیردار و یک سر آزاد - یک سر گیردار (c, d) فرکانس مجازی تکیه گاه دو سر گیردار و یک سر آزاد - یک سر گیردار..... ۲۰۰
- شکل ۶-۲۵- تأثیر دما بر فرکانس ارتعاشات نانولوله کربنی- جداساز Y شکل در موده‌های اول و دوم: (a) تکیه گاه دو سر گیردار (b) تکیه گاه یک سر گیردار- یک سر آزاد..... ۲۰۲
- شکل ۶-۲۶- تأثیر میدان مغناطیسی محوری بر پایداری و ناپایداری سیستم نانولوله کربنی- جداساز



- ۲۰۳ ..... شکل: (a, c) فرکانس حقیقی (b, d) فرکانس میرایی
- شکل ۶-۲۷- تأثیر لزجت سیال و عدد نادسن بر پایداری و ناپایداری نانولوله کربنی- جداساز Y شکل: (a, c) فرکانس حقیقی (b, d) فرکانس میرایی ..... ۲۰۴
- شکل ۶-۲۸- تأثیر محیط ویسکوالاستیک بر پایداری و ناپایداری نانولوله کربنی- جداساز Y شکل: (a, c) فرکانس حقیقی (b, d) فرکانس میرایی ..... ۲۰۵
- شکل ۶-۲۹- تأثیر زاویه جدایی سیال و نسبت جرم بر فرکانس ارتعاشات غیرخطی نانولوله کربنی- جداساز Y شکل ..... ۲۰۶
- شکل ۶-۳۰- تأثیر سرعت حرکت سیال و نسبت جرم بر فرکانس غیرخطی نانولوله کربنی - جداساز Y شکل ..... ۲۰۷
- شکل ۶-۳۱- تأثیر پارامتر کمکی برهمگرایی و سرعت رسیدن به مقدار دقیق: (a) دامنه ارتعاشات سیستم بر حسب درجه های مختلف تقریب (b) فرکانس ارتعاشات سیستم بر حسب درجه های مختلف تقریب ..... ۲۰۹
- شکل ۶-۳۲- تأثیر پارامتر کوچک طول و سرعت سیال بر فرکانس ارتعاشات مود اول نانولوله کربنی دو شاخه برای حالتی که در آن  $\alpha = \beta = 90^\circ$  ،  $L_2 = 0.6L_1, L_3 = 0.8L_1$  و  $q = \frac{1}{2}$  ..... ۲۱۰
- شکل ۶-۳۳- تأثیر نسبت طول نانولوله اصلی و سرعت سیال بر فرکانس ارتعاشات مود اول نانولوله کربنی دو شاخه برای  $\alpha = \beta = 90^\circ$  و  $L_2 = 0.6L_1, L_3 = 0.8L_1$  ..... ۲۱۱
- شکل ۶-۳۴- تأثیر دما بر فرکانس ارتعاشات مود اول نانولوله کربنی دو شاخه برای  $\alpha = 20^\circ$  ،  $\beta = 25^\circ$  و  $L_2 = 0.6L_1, L_3 = 0.8L_1$  : (a) فرکانس ارتعاشات (b) فرکانس میرایی ..... ۲۱۲
- شکل ۶-۳۵- تأثیر زاویه جدایی سیال بر فرکانس ارتعاشات مود اول نانولوله دوشاخه برای  $L_2 = 0.6L_1, L_3 = 0.8L_1$  ..... ۲۱۳
- شکل ۶-۳۶- تأثیر زاویه جدایی سیال بر سرعت کمانش و شروع ناپایداری ..... ۲۱۴
- شکل ۶-۳۷- تأثیر ضریب میرایی محیط ویسکوالاستیک کلوین - ویت بر پایداری و یا ناپایداری سیستم: (a, b, c) فرکانس حقیقی (d) فرکانس مجازی ..... ۲۱۶
- شکل ۶-۳۸- تأثیر ضریب میرایی محیط ویسکوالاستیک و زاویه جدایی بر نقطه دوشاخه شدن سیستم ..... ۲۱۷
- شکل ۶-۳۹- تأثیر ضریب میرایی محیط ویسکوالاستیک ماکسول بر پایداری و یا ناپایداری سیستم: (a, b, c) فرکانس حقیقی ..... ۲۱۸
- شکل ۶-۴۰- تأثیر ضریب میرایی محیط ویسکوالاستیک ماکسول و نسبت طولهای مختلف بر پایداری و یا ناپایداری سیستم: (a, b, c) فرکانس حقیقی ..... ۲۱۹
- شکل ۶-۴۱- تأثیر ضریب میرایی محیط ویسکوالاستیک ماکسول و نسبت طولهای مختلف بر نقطه

- دوشاخه شدن سیستم..... ۲۲۰
- شکل ۶-۴۲- تأثیر ضرایب فنری محیط ویسکوالاستیک استاندارد بر فرکانس ارتعاشات و پایداری سیستم: (a) تغییرات  $\bar{k}_1$  (b) تغییرات  $\bar{k}_w$  ..... ۲۲۱
- شکل ۶-۴۳- تأثیر ضریب فنری و مشخصه طول داخلی مدل محیط الاستیک غیرموضعی بر فرکانس ارتعاشات و پایداری سیستم: (a, c) فرکانس حقیقی (b, d) فرکانس میرایی..... ۲۲۲
- شکل ۶-۴۴- تأثیر پارامترهای محیط الاستیک غیرموضعی بر سرعت کمزش سیستم..... ۲۲۳
- شکل ۶-۴۵- تأثیر میدان مغناطیسی و ذرات مغناطیسی بر فرکانس ارتعاشات و پایداری و ناپایداری سیستم: (a, c, e) فرکانس حقیقی (b, d, f) فرکانس میرایی..... ۲۲۵
- شکل ث-۱- نواحی مختلف جریان بر حسب عدد نادسن [۶۰]..... ۲۳۷
- شکل ث-۲ [۶۰]..... ۲۴۱
- شکل چ-۱- تغییر شکل پیوسته  $\bar{H}(x; q)$  [۱۳۲]..... ۲۴۹
- شکل خ-۱- نمای شماتیک مقاطع تغییر شکل یافته و تغییر شکل نیافته نانولوله دوشاخه..... ۲۵۶

# فصل اوّل

مقدمه

## ۱-۱ - فناوری نانو

نقطه شروع و توسعه اولیه فناوری نانو، به طور دقیق مشخص نیست. شاید بتوان گفت که اولین نانو فناوریست‌ها، شیشه گران قرون وسطایی بوده‌اند که از قالب‌های قدیمی برای شکل دادن شیشه‌ها استفاده می‌کردند. البته این شیشه گران نمی‌دانستند که چرا با اضافه کردن طلا به شیشه رنگ آن تغییر می‌کرد. در آن زمان برای ساخت شیشه‌های کلیساهای قرون وسطایی از ذرات نانومتری طلا استفاده می‌شد و شیشه‌های رنگی بسیار جذابی به دست می‌آمد. فناوری نانو واژه‌ای است که به تمام فناوری‌های پیشرفته در عرصه کار با مقیاس نانو اطلاق می‌شود. معمولاً منظور از مقیاس نانو ابعادی در حدود یک نانومتر تا صد نانومتر می‌باشد [۱]. اولین جرقه فناوری نانو در سال ۱۹۵۹ زده شد. در این سال ریچارد فاینمن<sup>۱</sup> طی یک سخنرانی با عنوان "در پایین فضای بسیاری وجود دارد"<sup>۲</sup>، ایده فناوری نانو را مطرح ساخت. نظریه‌ی وی این بود که در آینده‌ای نزدیک می‌توان مولکول‌ها و اتم‌ها را به صورت مستقیم دستکاری کرد [۲]. طبق نظریه فاینمن فناوری نانو یعنی توانایی کار کردن در مقیاس یک تا صد نانومتر با هدف دستکاری در چگونگی قرار گرفتن اتم‌ها و مولکول‌ها و ساخت مواد جدید با خواص جدید.

## ۲-۱ - شگفتی‌های نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی یکی از پر کاربردترین نانو ساختارهای مورد بحث در فناوری نانو هستند. آن‌ها بسیار ظریف‌اند و قطری حدود ۱۰۰۰۰ بار کوچک‌تر از موی انسان دارند. این نانو ساختارها، به جهت دارا بودن خواص منحصر به فرد مکانیکی، الکترونیکی، شیمیایی و مغناطیسی بالقوه، امکان استفاده در الکترونیک، ذخیره سازی هیدروژن، ترانزیستورها، باتری‌ها، حسگرها، حافظه‌ها، مقاوم ساختن مواد، صفحات نمایشگر، کابل‌های برق و ... را دارند [۳]. خواص عالی و چند گانه نانولوله‌ها از یک طرف و طبیعت کربنی آن سبب شده تحقیقات مهمی در این حیطه شده‌است [۴] و [۵]. نانولوله‌های کربنی از اولین نانوموادهایی هستند که در سطح مولکولی با روش‌های مهندسی

<sup>1</sup> Richard feynman

<sup>2</sup> There is plenty of room at the bottom

تولید شده‌اند. برآوردها از این که دقیقاً نانولوله کربنی چه قدرتی دارد، متفاوت است. اما آزمایش‌ها نشان داده‌اند که قدرت کششی این ماده بیش از ۴۰ برابر فولاد مرغوب و درجه یک است. طبق برخی برآوردها، یک رشته نانولوله نازک‌تر از موی انسان می‌تواند وزن یک تریلی را به صورت آویزان تحمل کند [۶]. بسیاری از متخصصان فناوری نانو تصریح می‌کنند که نانولوله‌ها نه تنها قوی‌ترین موادی هستند که تاکنون ساخته شده‌اند، بلکه در زمره قوی‌ترین موادی هستند که ممکن است در آینده ساخته شوند. سال‌ها پیش سامیو آیجیما<sup>۱</sup> [۷] در حال تحقیق پشت یک میکروسکوپ الکترونی نشسته بود و رشته‌هایی نانومتری را مشاهده کرد که به شکل رسوب دوده‌ای رنگ بودند. این رشته‌ها از کربن خالص تشکیل شده و مانند بلورهای منظم دارای ساختاری متقارن و آرایش یافته بودند. این مولکول‌های بزرگ، زیبا و خیلی بلند، نانولوله نام گرفتند و تاکنون موضوع بسیاری از مطالعات علمی و مهندسی پیشرفته‌ای بوده‌اند. آیجیما می‌گوید: "درست است که ساخت نانولوله‌های کربنی برای من شگفت‌انگیز بود، اما همه‌ی ماجرا اتفاقی نبود، چون من تجربه‌های زیادی در مشاهده ابعاد کوچک نمونه‌های کربنی مثل کربن آمورف<sup>۲</sup> (بی شکل) و لایه‌های بسیار نازک گرافیتی داشتم؛ بنابراین سال‌ها با ساختارهای کربنی آشنا بودم و روی آن کار می‌کردم. کشف فولرین<sup>۳</sup> توسط ریچارد اسمالی و همکارانش مرا تشویق کرد و باعث شد که من هم به ساختارهای جدید کربنی فکر کنم". به عقیده آیجیما هزینه‌های تحقیقات روی نانولوله‌ها بسیار بالا است. اخیراً به کمک گاز نیتروژن و یک ورقه نازک فولادی به روشی به نام رشد فوق سریع، نانولوله‌های کربنی تولید شده‌اند و امید می‌رود هزینه تولید نانولوله کاهش یابد. خواص ویژه و منحصر به فرد نانولوله کربنی از جمله مدول یانگ بالا و استحکام کششی خوب از یک طرف و طبیعت کربنی نانولوله‌ها (به خاطر این که کربن ماده‌ای است کم وزن، بسیار پایدار و ساده جهت انجام فرآیندها و نسبت به فلزات تولید آن ارزان‌تر است) باعث تحقیقات مهمی در کارایی و پرباری روش‌های رشد نانولوله‌ها شده است. کوشش‌های گسترده‌ای برای بررسی خواص مکانیکی شامل مدول یانگ، استحکام کششی و ساز و کار عیوب و اثر تغییر

---

<sup>1</sup> Sumio Iijima

<sup>2</sup> Amorphous

<sup>3</sup> Fullerene

شکل نانولوله‌ها بر خواص الکتریکی صورت گرفته است [۸]–[۱۰]. می‌توان گفت این علاقه ویژه به نانولوله‌ها از ساختار و ویژگی‌های بی‌نظیر آن سرچشمه می‌گیرد. خصوصیات مافوق تصور زیادی وجود دارد که به نانولوله‌ها اختصاص دارد. در این بین، انعطاف عالی یا تغییر شکل زیاد، خم شدن و بازگشت به حالت اولیه، استحکام کششی و ثبات حرارتی ویژگی‌هایی هستند که آینده‌ای رویایی را از ساخت محصولات فناوری نانو پیش رو می‌گذارد؛ روبات‌های میکروسکوپی، بدنه‌های صاف و پولادین برای خودروها که به سفتی در تصادفات مچاله شوند، ساختمان‌هایی که در برابر زلزله بسیار مقاوم باشند و یا سیستم‌های الکترونیکی در مقیاس نانو که بتواند حجم و هزینه تجهیزات را تا هزاران برابر کاهش دهد از مواردی است که می‌توان به کمک این نانو ساختار به آن رسید [۱۱]. در ادامه برخی از ویژگی‌های منحصر به فرد نانولوله‌های کربنی ذکر شده است.

### ۱. اندازه بسیار کوچک

### ۲. حالت رسانا و نیمه‌رسانایی نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌ها بر حسب نحوه رول شدن صفحات گرافیتی سازنده‌شان به صورت رسانا یا نیمه‌رسانا در می‌آیند. به عبارت دیگر نانولوله‌ها در سطح مولکولی همچون یک سیم باریک در هم تنیده به نظر می‌رسند و اتم‌های کربن در قالب‌های شش وجهی به یکدیگر متصل شده و دیواره‌های استوانه‌ای را تشکیل می‌دهند که اندازه‌ی آن تنها چند نانومتر می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که با تغییر شعاع امکان عایق نمودن نانولوله رسانا فراهم می‌شود [۴]. پس می‌توان گفت که دو پارامتر اساسی ساختار و اندازه نانولوله‌ها، نقشی بنیادی در خواص نانولوله‌های کربنی بازی می‌کنند. بررسی‌های دیگری نشان داده‌اند که خصوصیات الکتریکی نانولوله‌ها بسته به اینکه مولکول  $C_{60}$  در کجا قرار داده شود، از یک رسانا به یک نیمه رسانا و یا یک عایق قابل تغییر است. از آنجایی که نانولوله‌های کربنی قادرند جریان الکتريسته را به وسیله انتقال بالستیک<sup>۱</sup> الکترون، بدون اصطکاک از سطح خود عبور دهند [۱۲] لذا این جریان صد برابر بیشتر از جریانی است که از سیم مسی عبور می‌کند. بنابراین می‌توان به جرأت گفت که نانولوله‌های کربنی انتخاب ایده‌آلی برای بسیاری از کاربردهای میکرو و نانو الکترونیک می‌باشند.

<sup>1</sup> Ballistic transport

### ۳. سطح جداره صاف یا قدرت تفکیک بالا

سطح جداره صاف نانولوله‌ها باعث می‌شود که میزان عبور گاز از درون آن‌ها به مراتب بیشتر از غشاهای میکرو حفره‌ای معمولی که در جداسازی گازها مورد استفاده قرار می‌گیرند باشد. لذا می‌توان گازهایی مانند هیدروژن و دی‌اکسید کربن را با هدایت در نانولوله از هم جدا کرد [۱۳]. این که آیا نانولوله‌ها واقعاً می‌توانند در خارج از آزمایشگاه نیز گازها را به طور انتخابی از خود عبور دهند یا نه باعث شده‌است که امیدهای زیادی به تولید هیدروژن و نیتروژن از هوا وجود داشته باشد.

### ۴. حساس بودن به تغییرات بسیار کوچک نیروهای اعمالی

اعمال فشار بر یک نانولوله می‌تواند ویژگی‌های الکتریکی آن را تغییر دهد که بسته به جهت نیرو و نوع نانولوله کربنی می‌توان رسانایی آن را کم یا زیاد کرد. این امر به دلیل تغییر ساختار کوانتومی الکترون‌ها صورت می‌گیرد. لذا این امکان به فیزیکدان‌ها داده می‌شود که بتوانند ترانسفورماتور یا دستگاه‌های انتقال دهنده بر پایه نانولوله‌هایی را بسازند که حساسیت زیادی به اعمال نیروهای بسیار کوچک دارند. همچنین توانایی نانولوله‌ها در احساس تغییرات بسیار کوچک فشار و همچنین تبدیل این فشار به صورت یک سیگنال الکتریکی می‌تواند در آینده امکان ساخت سوئیچ‌های نانولوله‌ای حساس به تغییرات بسیار کوچک فشار را به محققان بدهد [۱۴]، [۱۵].

### ۵. گسیل و جذب نور

نانولوله‌ها می‌توانند نور مادون قرمز را جذب و دفع کنند. همچنین تزریق همزمان الکترون از یک سر و تزریق حفره از سر دیگر نانولوله کربنی، موجب می‌شود که نوری با طول موج 1.5 میکرومتر از نانولوله منتشر شود [۱۶].

### ۶. ضریب تحریک الکتریسیته بسیار بالا

نانولوله‌ها در دمای اتاق دارای بالاترین ضریب تحریک الکتریسته نسبت به هر ماده شناخته شده دیگری هستند [۱۷].

## ۷. خاصیت مغناطیسی

با قرار دادن یک نانولوله کربنی در زیر لایه مغناطیسی یا با افزودن الکترون یا حفره به نانولوله می‌توان خاصیت مغناطیسی را در نانولوله ایجاد کرد. این خاصیت باعث می‌شود که بتوان وسایلی را ساخت که در آن‌ها اتصالات مغناطیسی و الکتریکی از هم جدا شده‌اند. اتصال مغناطیسی را می‌توان برای قطبی کردن مغناطیسی نانولوله‌ها با دستکاری در اسپین‌ها<sup>۱</sup> به کار برد و از اتصالات غیرمغناطیسی برای الکترودهای ولتاژ جریان استفاده کرد. همچنین ممان مغناطیسی آن‌ها نیز قابل اندازه‌گیری است [۱۸].

## ۸. چگالی سطحی بسیار بالا

نانولوله‌ها دارای چگالی سطحی بسیار بالایی می‌باشند که باعث استحکام بالای نانولوله می‌شود. می‌توان گفت این خاصیت در اثر کوچک بودن قابل توجه آنها پدیدار می‌شود [۶].

## ۹. قابلیت ذخیره‌سازی

در نانولوله‌ها هر سه اتم کربن قابلیت ذخیره یک یون لیتیم<sup>۲</sup> را دارند در حالی که در گرافیت هر شش اتم کربن توانایی ذخیره یک یون لیتیم را دارند. همچنین توانایی ذخیره انرژی در نانولوله‌ها چند برابر حجم الکترودهای گرافیتی است. لذا محققان امیدوارند بتوانند حجم زیادی از هیدروژن را در نانولوله‌ها برای کاربردهای انرژی و پیل‌های سوختی ذخیره کنند [۱۹].

## ۱۰. تولید ولتاژ

با عبور مایع از میان کلاف‌هایی از نانولوله‌های کربنی تک جداره، ولتاژهای الکتریکی ایجاد می‌شود. از این تکنیک برای ساخت حسگرهای جریان مایع برای تشخیص مقادیر بسیار اندک مایعات و نیز برای ایجاد ولتاژ در کاربردهای زیست پزشکی استفاده می‌شود. همچنین نشان داده شده است که مایعات با قدرت یونی بالا ولتاژ بیشتری تولید می‌کنند [۲۰].

---

<sup>1</sup> Spin

<sup>2</sup> Lithium



## ۱۱. استحکام و مقاومت کششی بالا

رفتار مکانیکی نانولوله های کربنی به عنوان یکی از بهترین فیبرهای کربنی ای که تا کنون ساخته شده اند، بسیار شگفت انگیز است. فیبرهای کربنی معمول دارای مقاومتی تا ۵۰ برابر مقاومت فولاد هستند و از طرف دیگر تقویت کننده های خوبی در برابر بار در کامپوزیت ها هستند. نانولوله ها از مقاومت کششی بسیار بالایی برخوردارند و این مزیت بسیار خوبی برای ساخت سازه هایی با مقاومت بالا در جهتی خاص است. دلیل این مقاومت بالا استحکام پیوند کربن-کربن در ساختار نانولوله کربنی و شکل شش ضلعی این ساختار است که به خوبی بار را در میان پیوند ها توزیع می کند. در نانولوله های کربنی چندلایه مقاومت واقعی بیشتر تحت تاثیر لغزیدن استوانه های گرافیتی نسبت به هم قرار دارد. شبیه سازی ها در نانولوله های تک لایه نشان می دهد که رفتار شکست و تغییرشکل های جالبی در آن ها وجود دارد. نانولوله ها در تغییر شکل های بزرگ با آزاد کردن ناگهانی انرژی به ساختار دیگری تبدیل می شوند. این ساختارها حین اعمال بار دچار کمانش و پیچش شده و به شکلی مسطح تبدیل می گردند. آن ها بدون نشانی از کوچکترین شکست و خرابی دچار کرنش های خیلی بزرگ می شوند [۸]، [۲۱].

نانولوله ها به دو دسته تک جداره<sup>۱</sup> و چند جداره<sup>۲</sup> تقسیم می شوند، نانولوله های تک جداره نیز بر حسب آرایش اتم های کربنی مقطع لوله به سه دسته مهم آرمچیر<sup>۳</sup>، کایرال<sup>۴</sup> یا نامتقارن که خاصیت فلزی دارند و زیگزاگ<sup>۵</sup> که خاصیت نیمه رسانایی دارد، تقسیم می شوند. شکل های (۱-۱) الی (۳-۱).

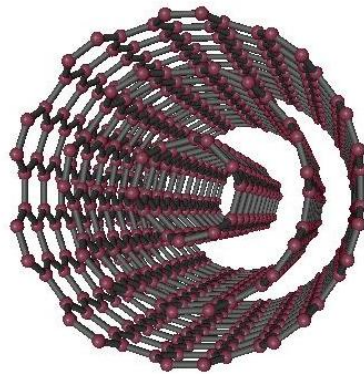
<sup>1</sup> Single walled carbon nanotube

<sup>2</sup> Multi walled carbon nanotubes

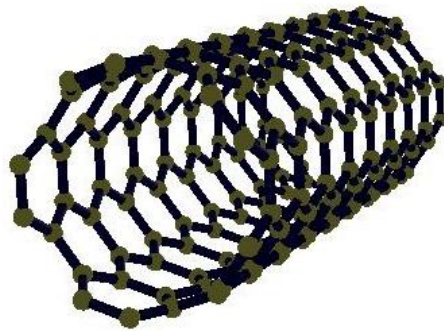
<sup>3</sup> Armchair

<sup>4</sup> Chiral

<sup>5</sup> Zigzag



شکل ۱-۱- نانولوله کربنی چند جداره

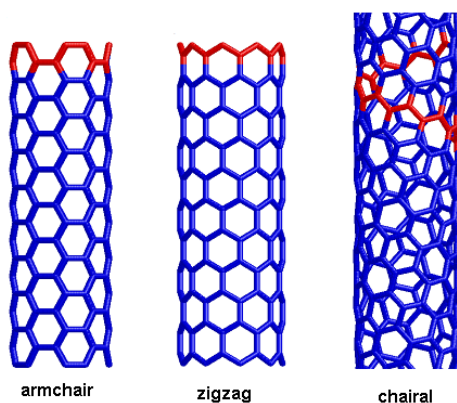


شکل ۱-۲- نانولوله کربنی تک جداره

در ساختارهای زیگزاگ و آرمچیر، ردیف‌های لانه زنبوری موجود در دیواره نانولوله، عمود بر محور نانولوله یا موازی با آن هستند. در ساختار کایرال، این ردیف‌ها زوایای متفاوتی با محور نانولوله می‌سازند. این ساختار را ساختار مارپیچ نیز می‌نامند. اولین نانولوله‌های کربنی که آجیما در سال ۱۹۹۱ مشاهده کرد [۷]، نانولوله‌های کربنی چند دیواره نامیده شدند؛ هر کدام از آنها از تعدادی استوانه، از اتم‌های کربن که به شکل آنتنی در داخل هم قرار گرفته اند، تشکیل شده‌اند. دو سال بعد، آجیما و دونالد بثن<sup>۱</sup> همزمان بدون اطلاع از کار هم نانولوله‌های کربنی تک جداره‌ای را ساختند که تنها یک لایه از اتم‌های کربن را در برداشت [۲۲]. هر دو نوع نانولوله تولید شده به

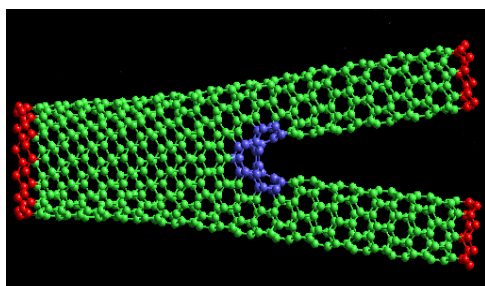
<sup>۱</sup> Donald S. Bethune

روشی مشابه ساخته شده و خیلی از خصوصیات آنها شبیه هم بود. بارزترین ویژگی آنها باریک و طویل بودنشان بود. بیشتر نانولوله های تک جداره، قطری نزدیک به یک نانومتر دارند که ممکن است طول آن، هزاران مرتبه بزرگتر از قطر لوله باشد. نانولوله های کربنی تک جداره فقط از کربن و یک ساختار ساده (ورقه ای از شش ضلعی های منظم) تشکیل شده اند. برخی پیش بینی ها حاکی از آن است که نانولوله ای تک جداره می تواند رسانا یا نیمه رسانا باشند. این هدایت الکتریکی بالا بستگی به هندسه دقیق اتمهای کربن دارد. از آغاز کار روی نانولوله های تک جداره، از آنها به عنوان یک پدیده تک بعدی نام برده می شد، تا این که این نظریه مرحله به مرحله پیشرفت کرد [۴]. علت علاقه به نانولوله های تک جداره و تلاش برای استفاده آنها در صنعت، بر اساس خصوصیات عالی مکانیکی و رسانایی الکتریکی آنها می باشد. البته تولید نانو لوله های تک جداره دارای هزینه بالایی است و تولید آنها به همراه پایدار کردن خصوصیات آن، در حین فرآوری مشکل است. یکی از معایب نانولوله های چند جداره نسبت به تک جداره، استحکام کمتر آنهاست، زیرا پیوند صفحات داخلی ضعیف می باشد، اما از آنجا که در حال حاضر کاربردهای نانولوله ها در تقویت پلیمرها بیشتر باعث بهبود خواص گرمایی و الکتریکی می شود، تا بهبود خواص مکانیکی، لذا کاربرد نانولوله های کربنی چند جداره بسیار زیاد می باشد. از طرفی تکنیک های موجود نیز برای تولید نانولوله های تک جداره به اندازه کافی بازدهی ندارد و خلوص لازم را نیز به همراه نمی آورد. تخلیص این مواد بسیار زحمت آور است و در نهایت ممکن است به ساختار نانولوله نیز صدمه بزند [۶].



شکل ۱-۳- تقسیم بندی نانولوله های کربنی برحسب آرایش اتمها [۲۳]

اخيراً دانشمندان روش اتصال نانولوله‌های کربنی به هم را که مشابه لوله‌کشی آب است، ابداع کرده‌اند. این کار برجسته به تولید گروه تازه‌ای از نانوساختارها منجر شده‌است که می‌تواند برای وسایل نانو الکترومکانیک بسیار مفید باشد. این محققان با جوش دادن نانولوله‌های کربنی با قطرهای مختلف به همدیگر، نانوساختارهایی به شکل T, L, Y و X تولید کرده‌اند. این ساختارهای چند شاخه می‌توانند در نانودیودها<sup>۱</sup>، نانوترانزیستورها<sup>۲</sup> و نیز سویچینگ‌های نانویی<sup>۳</sup> با حساسیت بسیار بالا مورد استفاده قرار گیرند [۲۴]. باید گفت که اتصالات نانولوله کربنی (شکل ۱-۴)) جذابیت زیادی در تحقیقات بنیادی و کاربردهای نانو الکترونیک دارند.



شکل ۱-۴- نانولوله کربنی دوشاخه [۲۵]

### ۳-۱- تاریخچه

نانولوله کربنی یکی از انواع دگرشکل‌های کربن است که دارای ساختاری استوانه‌ای می‌باشد. این نانولوله‌ها به دو صورت تک جداره و چند جداره وجود دارند. نانولوله‌های چند جداره برای اولین بار توسط دانشمندی ژاپنی بنام ایجیما در سال ۱۹۹۱ کشف شد [۷]. دو سال بعد ایجیما و ایچی هاشی [۲۶] و بثون [۲۲] به صورت مشترک موفق به تولید نانولوله تک جداره شدند. نانولوله‌های چند جداره شامل پوسته‌هایی گرافنی هستند که با فاصله حدوداً  $0.34\text{nm}$  همجوار بوده و نسبت طول به قطر آنها گاهی تا  $1:132000000$  هم می‌رسد [۲۷] که این نسبت برای نانولوله‌های کربنی بسیار بزرگتر از موادی می‌باشد که تا کنون شناخته شده‌اند. نکته دیگر اینکه، اکثر نانولوله‌های تک

<sup>1</sup> Nanodiode

<sup>2</sup> Nanotransistor

<sup>3</sup> Nanoswitches