

## فهرست

۱	فصل اول: معرفی نانو لوله های کربنی.....
۱-۱	مقدمه.....
۱-۱-۱	گرافیت:.....
۱-۱-۲	نانولوله ها.....
۲-۱	دسته بندی نانو لوله های کربنی.....
۳-۱	گرافن پایه ساختارهای مهم کربنی.....
۱-۳-۱	گرافن.....
۴-۱	خواص نانولوله ها.....
۱-۴-۱	خواص مکانیکی.....
۲-۴-۱	خواص فیزیکی.....
۵-۱	راه های بررسی خواص نانولوله های کربنی.....
۱-۵-۱	شبیه سازی.....
۲-۵-۱	دینامیک مولکولی.....
۳-۵-۱	روش المان محدود.....
۶-۱	نانو لوله های کربنی از نگاه اعداد و ارقام.....
۱-۶-۱	داده های مورد نیاز برای انجام محاسبات.....
۲-۶-۱	شعاع نانولوله های کربنی.....
۳-۶-۱	زاویه کایرال در نانولوله های کربنی.....
۷-۱	سنتز نانو لوله ها:.....
۱-۷-۱	تخلیه آرک:.....
۲-۷-۱	سایش لیزری:.....
۳-۷-۱	نشست شیمیایی بخار:.....
۸-۱	ویژگی های نانو لوله.....
۹-۱	هدایت حرارتی نانولوله های کربنی.....
۱-۹-۱	هدایت حرارتی نانولوله های کربنی از منظر تئوری:.....

۴۳	۲-۹-۱ هدایت حرارتی از منظر نتایج آزمایشگاهی
۴۴	۱۰-۱ کاربردهای نانولوله‌های کربنی
۴۹	۱۱-۱ چالش‌های فراوری
۵۴	فصل دوم: پراکنده کردن نانو لوله‌ها در محلول
۵۴	۱-۲ پراکنده کردن نانو لوله‌ها
۵۸	۲-۲ پراکنده کردن مکانیکی نانو لوله‌های کربنی
۵۸	۱-۲-۲ امواج فوق صوتی
۶۰	۳-۲ عامل دار کردن نانو لوله‌ها
۶۱	۱-۳-۲ عامل دار کردن شیمیایی نانو لوله‌های کربنی
۶۳	۲-۳-۲ عامل دار کردن فیزیکی نانو لوله‌های کربنی
۶۶	۴-۲ کامپوزیت‌های پلیمر/نانولوله کربنی
۶۷	۱-۴-۲ طراحی مفهومی و توانایی‌ها (قابلیت‌ها)
۷۰	۲-۴-۲ سازوکار شناسایی حلال
۷۲	۳-۴-۲ گزینش پذیری
۷۴	۴-۴-۲ مشخصه‌سازی پاسخ الکتریکی
۷۹	۵-۲ روش‌های ساخت نانو کامپوزیت نانو لوله کربنی/پلیمر
۸۵	۶-۲ خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های نانو لوله‌های کربنی-پلیمر
۸۵	۱-۶-۲ کامپوزیت پلی یورتان-نانو لوله‌های کربنی
۸۷	نتیجه‌گیری
۸۸	مراجع



## چکیده

نانولوله‌ی کربنی که از صفحات کربن به ضخامت یک اتم و به شکل استوانه‌ای توخالی ساخته شده است در سال ۱۹۹۱ توسط سامیو ایجیما<sup>۱</sup> کشف شد. خواص ویژه و منحصر به فرد آن از جمله مدول یانگ<sup>۲</sup> بالا و استحکام کششی خوب از یک طرف و طبیعت کربنی بودن نانولوله‌ها (به خاطر این که کربن ماده‌ای است کم وزن، بسیار پایدار و ساده جهت انجام فرایندها که نسبت به فلزات برای تولید ارزان تر می‌باشد) باعث شده که در دهه گذشته شاهد تحقیقات مهمی در کارایی و پرباری روش‌های رشد نانولوله‌ها باشیم. علاقه ویژه به نانولوله‌ها از ساختار و ویژگی‌های بی‌نظیر آن‌ها سرچشمه می‌گیرد. نانو لوله‌ها به علت رسانایی الکتریکی و حرارتی بالایی که دارند در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما مشکل اساسی در پراکنده کردن آنها در بستر پلیمری بهم چسبیدن و کلوخه شدن نانو لوله‌هاست که از پراکنگی خوب آنها در پلیمر جلوگیری میکند. به همین خاطر بسیاری از محققان در حال حاضر روی این امر کار میکنند تا با بهبود پراکنده‌گی نانو لوله‌ها در بستر پلیمری خواص کامپوزیت‌های حاصل از آنها را بهبود ببخشند. یکی از بهترین راه‌ها برای پراکنده کردن نانو لوله‌ها عامل دار کردن آنها به صورت فیزیکی و شیمیایی آنهاست. که در این سمینار به آن می‌پردازیم و در نهایت با روش‌هایی که ذکر می‌شود راه‌های تشکیل کامپوزیت‌های پلیمر/نانو لوله کربنی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

---

<sup>1</sup> Iijima

<sup>2</sup> Young's modulus

## فصل اول: معرفی نانو لوله های کربنی

### ۱-۱ مقدمه

کربن یکی از عناصر شگفت‌انگیز طبیعت است و کاربردهای متعدد آن در زندگی بشر، به خوبی این نکته را تایید می‌کند. به عنوان مثال فولاد - که یکی از مهم‌ترین آلیاژهای مهندسی است - از انحلال حدود دو درصد کربن در آهن به حاصل می‌شود؛ با تغییر درصد کربن (به میزان تنها چند صدم درصد) می‌توان انواع فولاد را به دست آورد. «شیمی آلی» نیز علمی است که به بررسی ترکیبات حاوی «کربن» و «هیدروژن» می‌پردازد و مهندسی پلیمر هم تنها براساس عنصر کربن پایه‌گذاری شده است .

کربن، به چهار صورت مختلف در طبیعت یافت می‌شود که همه این چهار فرم جامد هستند و در ساختار آنها اتم‌های کربن به صورت کاملاً منظم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. این ساختارها عبارتند از:

۱-گرافیت<sup>۱</sup>

۲-الماس<sup>۲</sup>

۳-نانولوله‌ها<sup>۳</sup>

۴-باکی‌بال‌ها<sup>۴</sup> (مانند C<sub>60</sub> در شکل زیر)

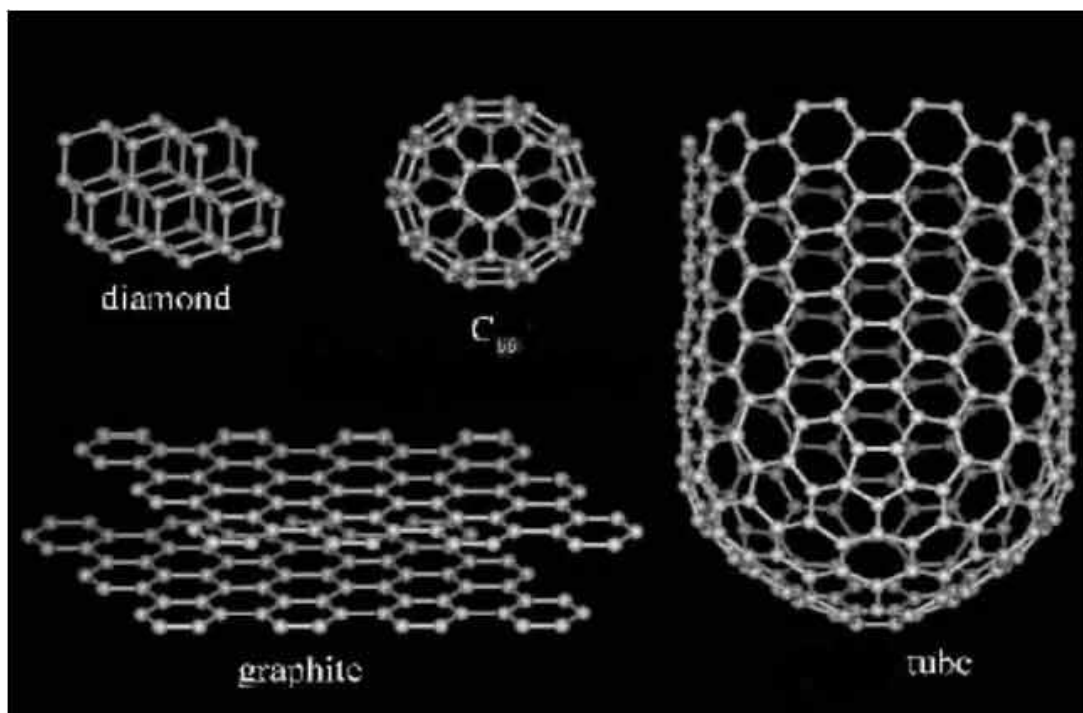
---

<sup>1</sup> graphite

<sup>2</sup> diamond

<sup>3</sup> Nano tube

<sup>4</sup> Bucky ball



شکل ۱-۱-۱ ساختارهای مختلف کربن [9]

### ۱-۱-۱-۱ گرافیت :

گرافیت یکی از مهم‌ترین ساختارهای کربن در طبیعت است و از قرارگرفتن شش اتم کربن در کنار یکدیگر به وجود آمده است. این اتم‌های کربن به گونه‌ای با یکدیگر ترکیب شده‌اند که یک شش ضلعی منتظم را پدید می‌آورند و از مجموع آنها، صفحه‌ای به دست می‌آید که به عنوان یک «لایه گرافیت» در نظر گرفته می‌شود.

اتم‌های کربن با پیوندهای کووالانسی - که پیوندی قوی و محکم است - به یکدیگر متصل شده‌اند. لازم به ذکر است که اتم‌های کربن به کار رفته در یک لایه گرافیت نمی‌توانند با کربنی خارج از این لایه پیوند کووالانسی بدهند. بنابراین یک لایه گرافیت از طریق پیوندهای واندروالس - که پیوندهایی ضعیف هستند - به لایه زیرین متصل می‌شود. این مساله باعث می‌شود که صفحه‌های گرافیت به راحتی روی یکدیگر بلغزند. به همین دلیل از

این ترکیب در «روغن کاری» و «روان کاری» استفاده می‌شود. علت نرمی سطوحی که با مداد روی آنها نوشته شده است نیز همین نکته می باشد.

### **1-1-2 نانولوله‌ها**

یک لایه گرافیت را در نظر بگیرید. اتم‌هایی را که در یک ردیف قرار گرفته‌اند با  $(n,m)$  - که نشان‌دهنده مختصات یک نقطه در صفحه است - مکان‌یابی می‌کنیم. به طوری که مختصات  $n$  مربوط به ستون اتم‌ها و مختصات  $m$  مربوط به ردیف اتم‌ها باشد.

همان‌طور که می‌دانیم برای تهیه یک لوله از یک صفحه، کافی است یک نقطه از صفحه را روی نقطه ی دیگر قرار دهیم. یک نانولوله مانند صفحه گرافیتی است که به شکل لوله درآمده باشد. بسته به اینکه چگونه دو سر صفحه گرافیتی به یکدیگر متصل شده باشند، انواع مختلفی از نانولوله‌ها را خواهیم داشت.

## آ‌نوع زیگزآگ<sup>1</sup>

برای ساختن نوع زیگزآگ نانولوله، مطابق شکل اتم‌ها را در راستای افقی (ستون به ستون) شماره { $(۱۰۰)$  ،  $(۲۰۰)$  و ... }، اتم انتهایی  $(۵۰۰)$  را با خم کردن صفحه، بر روی اتم ابتدایی  $(۰۰۰)$  انطباق می‌دهیم. برای اطمینان از درستی روش ساخت باید دقت کنیم

که در آخر کار، در راستای افقی یک خط شکسته زیگزآگ به دور نانولوله ببینیم.



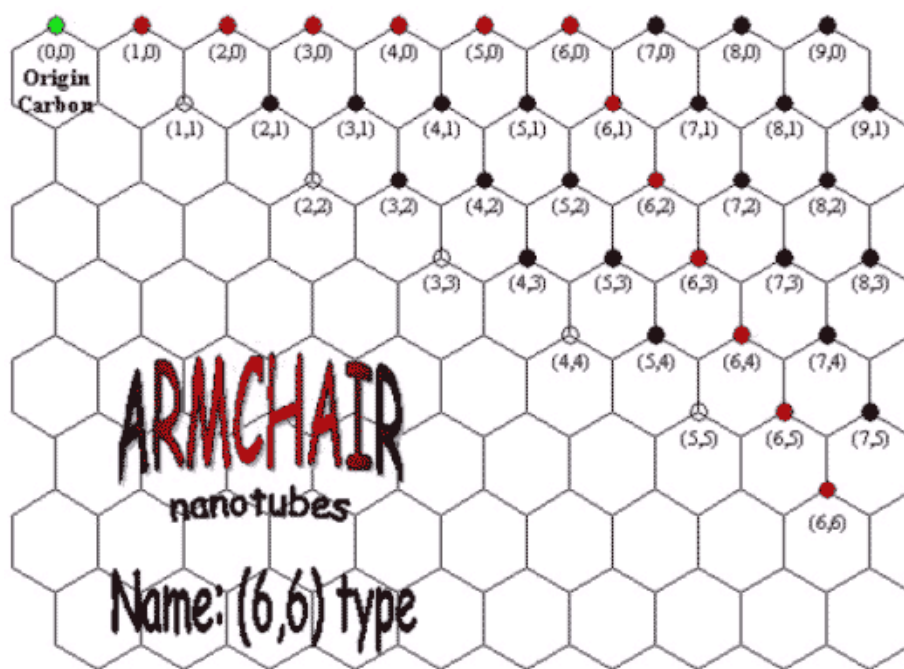
شکل 1-2 نانولوله کربنی زیگزآگ<sup>[4]</sup>

<sup>1</sup> zigzag



## ب) نوع صندلی<sup>۱</sup>

در صورتی که اتم ابتدایی و اتمی که در وضعیت ۴۵ درجه نسبت به آن قرار دارد، روی هم قرار بگیرند، نانولوله نوع صندلی به دست می آید. در این حالت می توانیم بین این دو اتم یک خط مستقیم رسم کنیم که معادله آن  $m=n$  است. یعنی شماره ستون و ردیف هر یک از آنها با یکدیگر برابر است. در این حالت با یک بار گردش به دور نانولوله تعدادی صندلی پشت سر هم خواهیم دید.



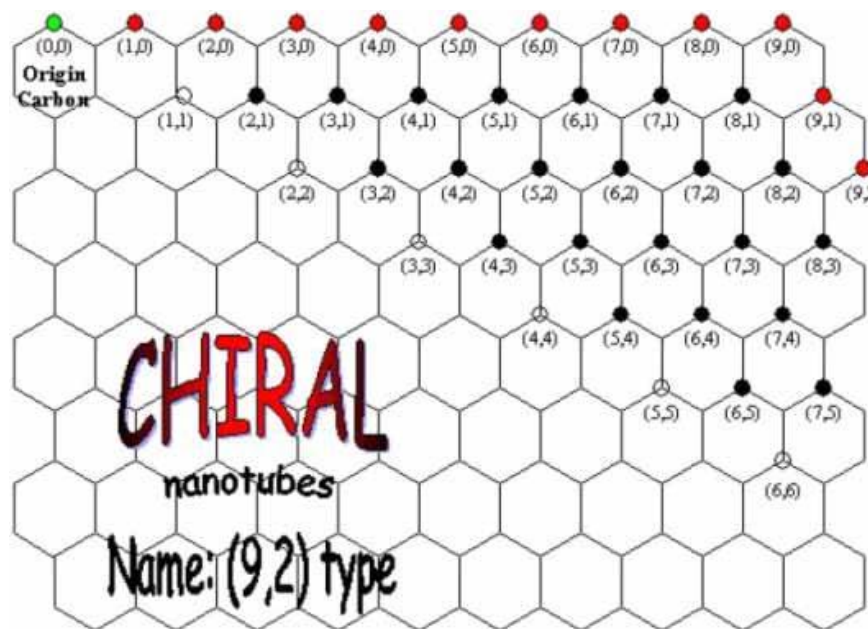
شکل 1-3 نانولوله کربنی صندلی<sup>[4]</sup>

<sup>1</sup> armchair

## پ) نوع نامتقارن<sup>1</sup>

در این حالت نیز مشابه روش صندلی عمل می‌کنیم، با این تفاوت که در مختصات اتم انتهایی،  $m \neq n$  خواهد بود. اگر یک بار افقی به دور نانولوله بچرخیم مجموعه‌ای از صندلی‌ها را می‌بینیم که نسبت به افق، به صورت مایل قرار گرفته‌اند.

برای ساختن مدلی از هر کدام از انواع نانولوله‌ها فقط کافی است مطابق شکل کاغذ را خم کرده و نقطه‌ی انتهایی را بر نقطه‌ی ابتدایی منطبق نمایید.



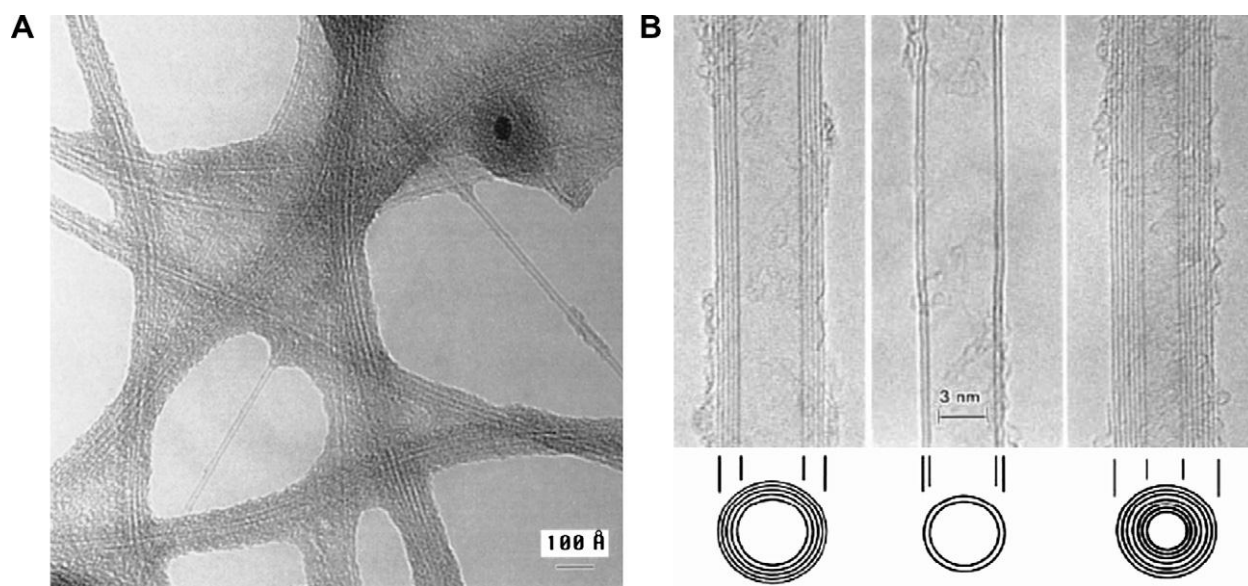
شکل 1-4 نانو لوله کربنی نامتقارن<sup>[4]</sup>

این لوله‌ها به علت آنکه دارای قطر چند نانومتری می‌باشند «نانولوله» نام گرفته‌اند. یعنی ما با اتصال دونقطه‌ی یک صفحه‌ی گرافیتی به هم، لوله‌ای را به دست آورده‌ایم که قطر فضای خالی داخلی آن چند میلیاردم یک متر است. (اگر طول یک متر را به یک میلیارد قسمت تقسیم کنیم، ضخامتی معادل یک نانومتر به دست می‌آید)

<sup>1</sup> chiral

## ۱-۲ دسته بندی نانو لوله های کربنی

بر حسب روش تولید نانو لوله ها دو نوع از نانو لوله ها وجود دارد: نانو لوله های کربنی تک دیواره<sup>۱</sup> و نانو لوله های کربنی چند دیواره<sup>۲</sup>. نانو لوله های کربنی تک دیواره از یک لایه گرافن که به صورت یک استوانه یک پارچه است تشکیل شده است در حالی که نانو لوله های کربنی چند دیواره از دو یا تعداد بیشتری لایه های استوانه ای هم مرکز که به صورت هم محور دور یک هسته خالی تشکیل شده اند که این لایه ها به وسیله نیروهای وان در والسی در کنار هم قرار گرفته اند. (شکل ۱-۵ A و B)



شکل ۱-۵: (a) نانو لوله کربنی تک دیواره (b) نانو لوله کربنی چند دیواره<sup>[2]</sup>

<sup>1</sup> swnt  
<sup>2</sup> mwnt

## ۱-۳ گرافن<sup>۱</sup> پایه ساختارهای مهم کربنی

همانطور که می‌دانید، اتم‌های کربن در ساخت ترکیبات مهم شیمیایی بسیاری شرکت دارند و پایه و اساس فناوری‌های مختلفی هستند. این اتم‌ها علاوه بر ترکیب شدن با عناصر دیگر، می‌توانند با اتم‌های کربن نیز پیوند دهند. اتم‌های کربن از نظر ترتیب پر شدن اوربیتالها، دارای ساختار الکترونی  $1s^2 2s^2 2p^2$  هستند. بنابراین چهار الکترون آزاد دارند که امکان تشکیل چهار پیوند را برای این اتم‌ها مهیا می‌سازد. پیوندهایی که این اتم‌ها تشکیل می‌دهند، در ترکیبات گوناگون به شکل‌های متفاوتی دیده می‌شود و بنابراین خواص متفاوتی نیز ایجاد می‌کند. این اتم‌ها در ساختار الماس چهار پیوند یگانه‌ی کوالانس ایجاد می‌کنند. یعنی هر اتم کربن با چهار اتم کربن دیگر پیوند می‌دهد. بنابراین از تمام ۴ ظرفیت خود برای تشکیل پیوند استفاده کرده است. در ساختار گرافیت، نانولوله و فولرن نیز پیوندهای یگانه‌ای بین اتم‌های کربن وجود دارد. با این تفاوت که هر اتم تنها با ۳ اتم دیگر پیوند می‌دهد و در نتیجه سه پیوند یگانه کوالانسی دارد. در این ساختارها اتم کربن یکی از ظرفیت‌های خود را مصرف نمی‌کند. این ظرفیت خالی که در واقع یک الکترون اضافی است، به شکل یک پیوند آزاد در خارج از صفحه‌ای که دیگر اتم‌ها در آن قرار دارند، قرار می‌گیرد. این پیوند آزاد یا معلق می‌تواند در شرایطی با گروه‌های عاملی یا دیگر اتم‌های رادیکالی موجود در محیط پیوند دهد.

در ابعاد نانومتر، چند پارامتر مهم وجود دارد که تاثیر بسیاری بر خواص مواد می‌گذارد. اندازه و شکل فیزیکی نانومواد و چگونگی پیوندهای بین اتمی آنها از قبیل این پارامترها هستند. در مورد نانولوله‌های کربنی، پارامترهایی مانند طول، قطر، نحوه‌ی چینش اتم‌ها در ساختار نانولوله، تعداد دیواره‌ها، نقص‌های ساختاری و گروه‌های عاملی موجود بر روی نانولوله از جمله خواص فیزیکی و شیمیایی هستند که در تعیین خواص نقش دارند.

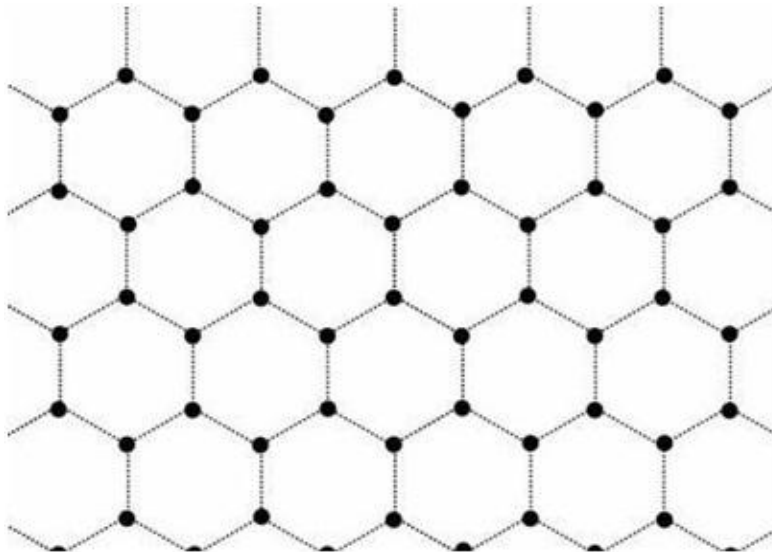
---

<sup>1</sup> graphene

یک نانولوله، همانطور که از نامش برمی‌آید، یک استوانه‌ی تو خالی با قطری در حد نانومتر است. طول هر نانولوله می‌تواند از چند نانومتر تا چند میکرومتر باشد. اگر یک نانولوله‌ی تک دیواره را در نظر بگیریم، با برش دادن دیواره‌ی آن در راستای طول نانولوله، یک صفحه از اتم‌های کربن به نام گرافن به دست می‌آید. برای بررسی شکل ظاهری نانولوله‌ها، بحث را روی صفحات گرافن متمرکز می‌کنیم.

### ۱-۳-۱ گرافن

صفحات گرافن با کنار هم قرار گرفتن اتم‌های کربن تشکیل می‌شوند. در یک صفحه گرافن، هر اتم کربن با ۳ اتم کربن دیگر پیوند داده است. این سه پیوند در یک صفحه قرار دارند و زوایای بین آن‌ها با یکدیگر مساوی و برابر با  $120^\circ$  است. در این حالت، اتم‌های کربن در وضعیتی قرار می‌گیرند که شبکه‌ای از شش ضلعی‌های منتظم را ایجاد می‌کنند (شکل 1-6). البته این ایده‌آل‌ترین حالت یک صفحه‌ی گرافن است. در برخی مواقع، شکل این صفحه به گونه‌ای تغییر می‌کند که در آن پنج‌ضلعی‌ها و هفت‌ضلعی‌هایی نیز ایجاد می‌شود.

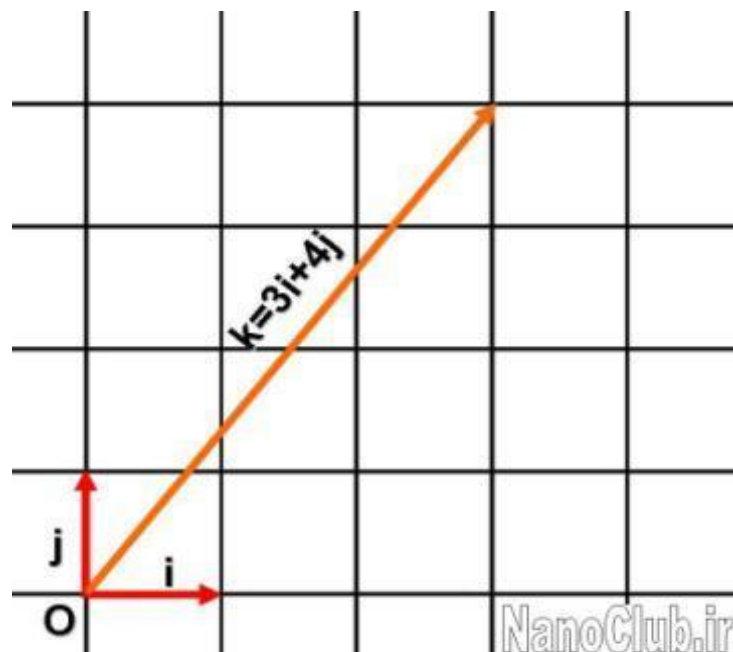


شکل 1-6- ساختار اتمی صفحه گرافن: در این شکل اتم‌های کربن با نقاط سیاه و پیوندها با نقطه چین نمایش داده شده‌اند [7]

در یک صفحه گرافن، هر اتم کربن یک پیوند آزاد در خارج از صفحه دارد. این پیوند مکان مناسبی برای قرارگیری برخی گروه‌های عاملی و هم‌چنین اتم‌های هیدروژن است. پیوند بین اتم‌های کربن در اینجا کوالانسی بوده و بسیار محکم است. بنابراین گرافن استحکام بسیار زیادی دارد و انتظار می‌رود که نانولوله‌های کربنی نیز استحکام زیادی داشته باشند. گرافیت نیز که یک ماده‌ی کربنی پر مصرف و شناخته شده است، از روی هم قرار گرفتن لایه‌های گرافن و تشکیل یک ساختار منظم تشکیل می‌شود.

آنچه لایه‌های گرافن را روی یکدیگر نگه می‌دارد، پیوندهای واندروالس بین آن‌هاست. این پیوند بسیار ضعیف است. بنابراین لایه‌های گرافن به راحتی می‌توانند روی هم بلغزند و به همین دلیل گرافیت (نوک مداد سیاه) نرم است. گرافن، به عنوان یک لایه‌ی تک اتمی، رسانای جریان الکتریسیته است. همانطور که خواهیم دید، برخی نانولوله‌های کربنی نیز رساناهای بسیار خوبی هستند. البته این خاصیت نانولوله‌های کربنی مستقیماً به شکل ظاهری آن‌ها بستگی دارد که در آینده به آن اشاره خواهیم کرد.

صفحه‌ی مختصات کارتیزین یا دکارتی معروف را می‌شناسید. این صفحه، شبکه‌ای است که از مربع‌هایی با طول و عرض واحد تشکیل شده است. در این صفحه دو بردار یکه‌ی  $i$  و  $j$  هر یک به طول یک واحد وجود دارد که توسط آن‌ها می‌توان از نقطه‌ی مبدا به هر نقطه‌ی دیگری مثل  $(m, n)$  رفت (شکل 1-7). این کار با تعریف یک بردار به شکل  $k = mi + nj$  امکان پذیر می‌گردد.

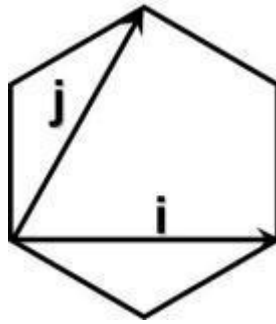


شکل ۱-۷- صفحه‌ی مختصات دکارتی؛ بردارهای یکه‌ی  $\hat{i}$  و  $\hat{j}$  هم اندازه و بر یکدیگر عمود هستند.<sup>[7]</sup>

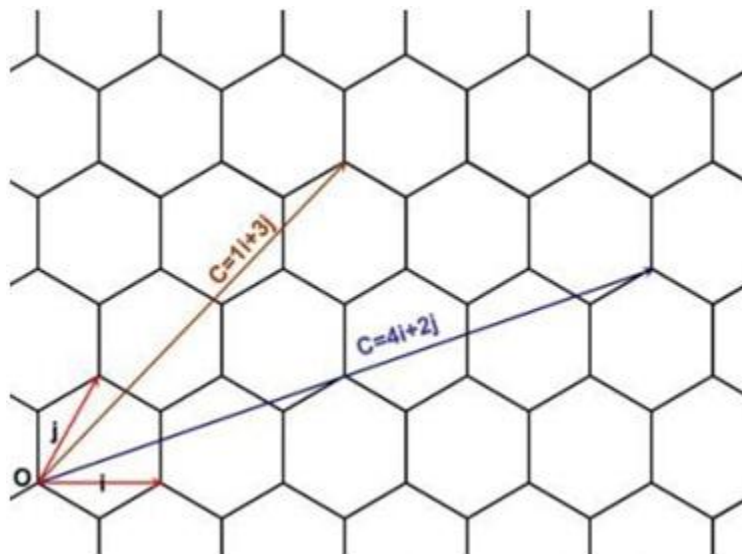
دستگاه مختصات کارتزین، یک دستگاه دو بعدی است که در آن دو بردار یکه‌ی یاد شده، هم اندازه بوده و بر یکدیگر عمود هستند. اما باید توجه داشت که تمام دستگاه‌های مختصات به این شکل نیستند. بلکه می‌توان دستگاه‌هایی را تعریف کرد که در آن اندازه‌ی بردارهای یکه نابرابر و زاویه‌ی بین آن دو مقدار دیگری باشد مانند صفحه‌ی مختصات گرافنی. برای توصیف نانولوله‌های کربنی ما به یک صفحه‌ی دو بعدی متشکل از شش‌ضلعی‌های منتظم احتیاج داریم (صفحه‌ی مختصات گرافنی). این صفحه یادآور شکل منتظم کندوی زنبورهای عسل است. این صفحه متناظر با یک صفحه از اتم‌های کربن (به ضخامت یک اتم) یا همان صفحه گرافن است.

در این صفحه‌ی مختصات دو بعدی، دو بردار یکه‌ی هم اندازه‌ی  $\hat{i}$  و  $\hat{j}$  را به طوری که در شکل 1-8 نشان داده شده است، تعریف می‌کنیم. زاویه‌ی بین این دو بردار برابر با  $60^\circ$  است. برای حرکت روی این صفحه می‌توانیم بردار  $C = m\hat{i} + n\hat{j}$  را تعریف نماییم. این بردار را بردار کایرال می‌نامیم (بعدها می‌گوییم که چگونه می‌توانیم با

استفاده از این بردار یک نانولوله درست کنیم). چند بردار دلخواه را با شروع از یک نقطه، به عنوان مبدا، در شکل ۹-۱ رسم شده است.



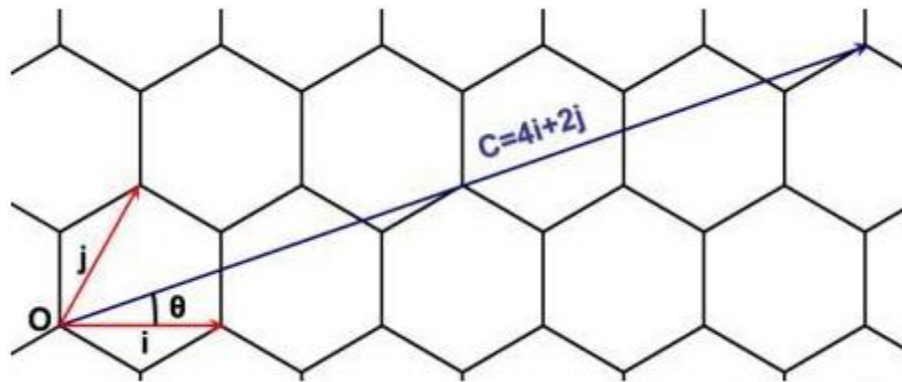
شکل ۸-۱- بردارهای یکه‌ی  $i$  و  $j$  در صفحه‌ی مختصات گرافنی [7]



شکل ۹-۱- بردارهای کایرال  $C = 4i + 2j$  و  $C = i + 3j$  در صفحه‌ی مختصات گرافنی [7]



همچنین می‌توانیم زاویه‌ی بین بردار کایرال و محور متناظر با بردار یکه‌ی  $i$  را به عنوان زاویه کایرال که مشخصه‌ی راستای بردار کایرال است در نظر بگیریم. این زاویه در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در آینده خواهیم دید، این زاویه یکی از مشخصه‌های نانولوله‌های کربنی می‌باشد.



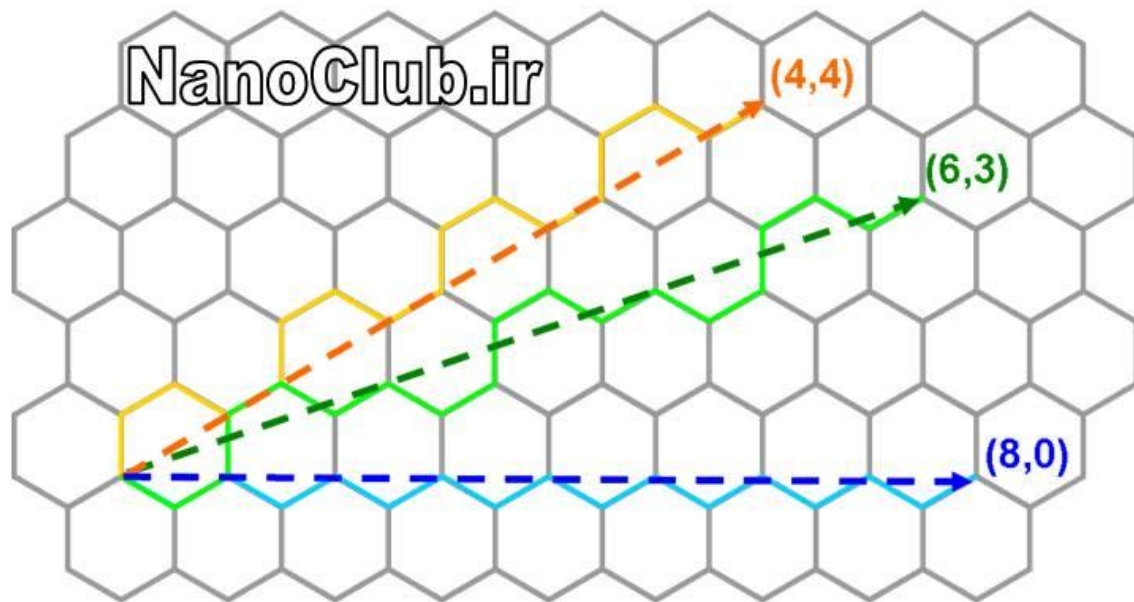
شکل 1-10- زاویه‌ی کایرال بین بردار  $c=4i+2j$  و محور مربوط به بردار یکه‌ی  $i$  [7]

اگر یک بردار کایرال با شرط  $m \geq n \geq 0$  را در نظر بگیریم، بردار انتخاب شده از راستای بردار یکه‌ی  $i$  راستای افق) می‌تواند از صفر تا  $30^\circ$  فاصله بگیرد. یعنی چنانچه  $n=0$  باشد، زاویه برابر با صفر درجه و اگر  $n=m$  باشد، زاویه برابر با  $30^\circ$  خواهد بود.

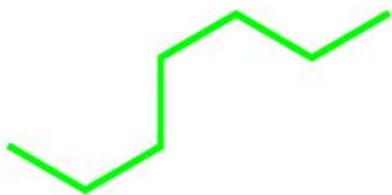
نانولوله‌های کربنی تک دیواره از لوله کردن صفحات گرافنی به دست می‌آیند. البته این گفته تنها برای درک ساختار نانولوله‌هاست و در عمل، ساخت نانولوله‌ها با روش‌های پیچیده شیمیایی انجام می‌شود. در این روش‌ها، نانولوله با قرار گرفتن تک به تک اتم‌های کربن در کنار هم ساخته می‌شود و نه از طریق لوله کردن یک صفحه‌ی گرافن واقعی! البته برعکس این موضوع وجود دارد. یعنی دانشمندان به تازگی توانسته‌اند با استفاده از واکنش‌های شیمیایی، نانولوله‌های کربنی چند دیواره را برش دهند و صفحات کوچک گرافنی را تولید کنند.

البته تولید صفحات گرافن از نظر فنی کار بسیار دشواری است و این دست‌آورد جدید دانشمندان، می‌تواند در زمینه‌ی نانوالکترونیک و نانوکامپوزیت تغییرات بسیار مهمی را ایجاد کند. این مواد با دارا بودن خواص ویژه مکانیکی و الکترونیکی، کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف دارند. انتهای نانولوله‌های کربنی ممکن است باز یا بسته باشند. انتهای بسته در واقع قسمتی از یک فولرن کربنی است. از این رو برخی دانشمندان، از نانولوله‌های کربنی به عنوان فولرن‌های کشیده شده یاد می‌کنند. در اینجا از صفحات گرافن برای توضیح نانولوله‌های کربنی استفاده می‌کنیم، بنابراین انتهای بسته‌ی آن‌ها را در نظر نمی‌گیریم.

نمونه‌ای از این فعالیت در شکل ۱-۱۱ رسم شده است. در این شکل کوتاهترین مسیر ممکن برای طی مسیری مربوط به هر بردار با رنگی شبیه به همان بردار کشیده شده است. این مسیرها از واحدهای تکرار شونده‌ای تشکیل شده‌اند که در پایین شکل ۱-۱۱ دیده می‌شوند .



شکل ۱-۱۱- کوتاهترین مسیرهای مربوط به بردارهای کایرال<sup>[7]</sup>



پ- واحد تکرار شونده



ب- واحد تکرار شونده زیگزاگ (8,0)



آ- واحد تکرار شونده آرمچیر (4,4)

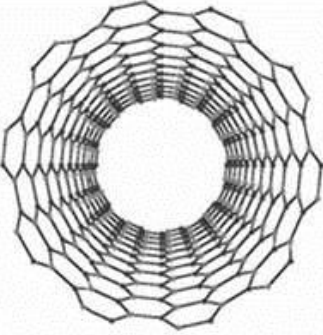
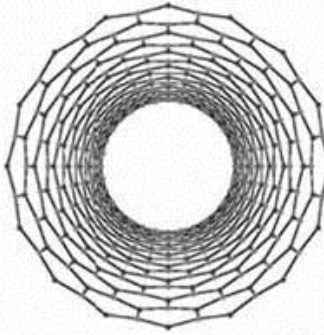
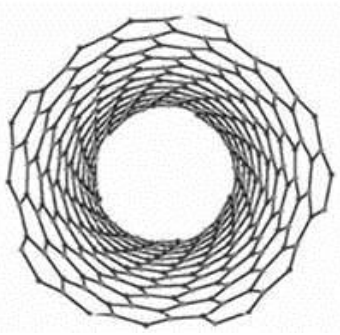
نامتقارن (6,3)

شکل ۱-۱۲- کوتاهترین مسیرهای مربوط به بردارهای کایرال و واحدهای تکرار شونده‌ی آن‌ها<sup>[7]</sup>

دقت کنید که هر بردار کایرالی که دو مولفه‌ی آن با هم برابر باشند، از واحدهای تکرار شونده‌ای مانند شکل ۱-۱۲ تشکیل می‌شود. این بردارها در دسته‌ی بردارهای آرمچیر یا صندلی قرار می‌گیرند. این نام گذاری به خاطر شکل واحد تکرار شونده است. نام انگلیسی این بردارها، armchair است. هر بردار کایرالی که یکی از مولفه‌های آن برابر با صفر باشد، مانند بردار (۸ و ۰) از واحدهای تکرار شونده‌ای مانند شکل ۱-۱۲-ب تشکیل می‌شوند. این بردارها در دسته‌ی زیگزاگ قرار می‌گیرند. این نام‌گذاری به دلیل شکل ظاهری این واحدها است. نام انگلیسی این بردارها، zigzag است. هر برداری که در دو دسته‌ی گفته شده قرار نگیرد را در دسته‌ی بردارهای نامتقارن دسته‌بندی می‌کنیم. دلیل این نام‌گذاری، عدم وجود تقارن در نانولوله‌های متناظر با این بردار است. نام انگلیسی این بردارها، chiral یا helical است. در واقع "کایرال" نامی عام برای تمام بردارهاست که به طور خاص برای بردارهای نامتقارن نیز به کار می‌رود .

اکنون می‌توانیم انواع بردارهای کایرال را بکشیم و نانولوله‌های متناظر با آنها را بسازیم. شکل ظاهری این نانولوله‌ها با هم متفاوت خواهد بود. در شکل ۱-۱۲، سه نوع نانولوله‌ی کربنی را مشاهده می‌کنید. در صورتی که به طرز قرار گرفتن ردیف‌های اتم‌های کربن در راستای محوری و راستای شعاعی این نانولوله‌ها دقت کنید،

متوجه اختلاف بین آنها می‌شوید. به یاد داشته باشید که بر اساس آنچه گفتیم، بردار کایرال شکل ظاهری نانولوله‌های کربنی را تعیین می‌کند.

نوع نانو لوله	آرمچیر	زیگزاگ	نامتقارن
تصویر از درون			
مولفه‌های کایرال	$m=n \neq 0$	$m \neq 0, n=0$	$m \neq n$
زاویه ی کایرال	$30^\circ$	$0$	$0 < \theta < 30^\circ$

شکل ۱-۱۳- دسته‌بندی نانولوله‌ها بر اساس جهت لوله شدن صفحه‌ی گرافن [7]

از آنجاییکه خواص نانولوله‌های کربنی تابع شکل ساختاری آنهاست، بردارهای کایرال نه تنها در تعیین شکل ساختاری نانولوله‌ها، بلکه در تعیین خواص مربوط به آنها نیز اهمیت فراوانی دارد. برای مثال، خواص الکترونیکی و مکانیکی نانولوله‌های کربنی متأثر از بردار کایرال آنهاست. علاوه بر این، تعداد دیواره‌ها و چگونگی وجود نقص‌ها در ساختار این مواد، در تعیین خواص آنها نقش دارند.

## ۴-۱ خواص نانولوله‌ها

هریک از سه نوع نانولوله، به خاطر آرایش اتمی خاصی خود، دارای خواصی می‌باشند که در اینجا به چند ویژگی مشترک بین آنها اشاره می‌کنیم :

### ۱-۴-۱ خواص مکانیکی

نانولوله‌ها دارای پیوندهای محکمی در بین اتم‌هایشان می‌باشند و به همین علت در برابر نیروهای کششی مقاومت و استحکام زیادی از خود نشان می‌دهند. به عنوان مثال نیروی لازم برای شکستن یک نانولوله ی کربنی چند برابر نیرویی است که برای شکستن یک قطعه فولاد - با ضخامتی معادل یک نانولوله - احتیاج داریم .

اما جالب است که بدانیم پیوندهای بین اتمی در نانولوله‌ها علاوه بر ایجاد استحکام بالا، شکل‌پذیری آسان و حتی پیچش را در آنها میسر می‌سازد! در حالی که فولاد تنها در برابر نیروهای کششی دارای مقاومت است و برای پیچش انعطاف‌پذیری لازم را ندارد .

در بررسی کاربرد نانولوله‌ها و به کارگیری خواص آنها ، می‌توانیم به استفاده از این ترکیبات به عنوان «رشته» در مواد مرکب، اشاره کنیم؛ به چنین موادی «کامپوزیت» می‌گویند. ملموس‌ترین مثال کامپوزیت «کاه‌گل» است. کاه‌گل مخلوطی از «کاه» و «گل» است که در آن، کاه به عنوان رشته‌هایی که استحکام و انعطاف‌پذیری بهتری نسبت به گل دارد، پراکنده شده است تا مانع از ترک خوردن آن شود. گل را اصطلاحاً «زمینه» می‌نامیم. نانولوله‌ها نیز چون استحکام و شکل‌پذیری خوبی دارند، در مواد مرکب با زمینه‌های فلزی، پلیمری و سرامیکی استفاده می‌شوند. اما مهم‌ترین فاکتوری که باعث برگزیدن نانولوله به عنوان رشته در مواد مرکب (کامپوزیت) شده است، وزن کم آن است ، در حالی که استحکام آن بالاست. از مهم‌ترین موارد استفاده چنین مواد مرکبی می‌توان به مواردی چون بدنه هواپیما و هلیکوپتر، زه راکت‌های تنیس و... اشاره کرد.

## 1-4-2 خواص فیزیکی

مهم‌ترین خاصیت فیزیکی نانولوله‌ها، «هدایت الکتریکی» آنهاست. هدایت الکتریکی نانولوله‌ها بسته به زاویه و نوع پیوندها، از دسته‌ای به دسته‌ی دیگر کاملاً متفاوت است؛ هر اتم در جایگاه خود در حال ارتعاش است، وقتی که یک الکترون (یا بار الکتریکی) وارد مجموعه‌ای از اتم‌ها می‌شود، ارتعاش اتم‌ها بیشتر شده و در اثر برخورد با یکدیگر بار الکتریکی وارد شده را انتقال می‌دهند. هرچه نظم اتم‌ها بیشتر باشد، هدایت الکتریکی آن دسته از نانولوله‌ها بیشتر خواهد بود. برای مثال نانولوله نوع صندلی ۱۰۰۰ بار از مس رساناتر است، در حالی که نوع زیگزاگ و نوع نامتقارن نیمه رسانا هستند. خاصیت نیمه رسانایی نانولوله‌ها بسته به نوع آنها تغییر می‌کند. خواص فوق‌العاده نانولوله‌ها و روشهای پیچیده تولید آنها باعث شده است که قیمت هر گرم از این ماده حدود چندصد دلار باشد.

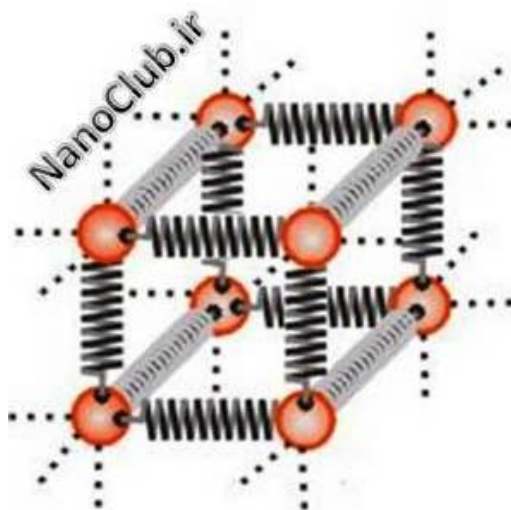
## ۱-۵ راه‌های بررسی خواص نانولوله‌های کربنی

### ۱-۵-۱) شبیه سازی

مطمئننا در زمینه‌ی شبیه‌سازی مطالبی را مطالعه نموده‌اید. یکی از راه‌های بررسی خواص نانولوله‌های کربنی، شبیه‌سازی می‌باشد. بسیاری از این شبیه‌سازی‌ها را می‌توان با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری و یا استفاده از زبان‌های برنامه نویسی اجرا نمود. برای این کار روش‌های مختلفی وجود دارد که برخی از آنها را به شکل مقدماتی بررسی می‌کنیم.

### ۱-۵-۲) دینامیک مولکولی

روش دینامیک مولکولی، روشی بسیار سودمند در مطالعه‌ی ساختار مواد و بررسی فعل و انفعالات در ابعاد مولکولی می‌باشد. در این روش، اتم‌ها را به عنوان اجسامی مجزا از یکدیگر فرض می‌کنیم. طبق اطلاعاتی که از این دنیای کوچک داریم، می‌دانیم که بین این ذرات روابطی وجود دارد و آنها بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. برای مثال می‌توان فرض کرد که بین این اجسام، فنرهایی قرار گرفته اند (شکل ۱-۱۴)

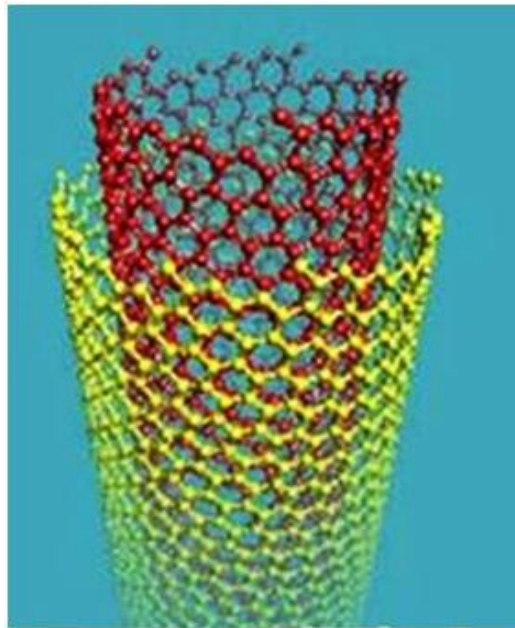


شکل ۱-۱۴- در مواد جامد، می‌توان فرض کرد که پیوند بین اتم‌ها مانند یک فنر عمل می‌کند و آنها را در یک فاصله‌ی مشخص تعادلی از یکدیگر قرار می‌دهد [9]

با نوشتن روابط فیزیکی بین این ذرات و به دست آوردن سرعت و جهت حرکت آن‌ها در هر لحظه، می‌توانیم حرکت تک تک آن‌ها را بررسی کنیم. به این ترتیب می‌توانیم با استفاده از قضایا و روابط حاکم بر فیزیک نیوتنی، تا حدودی به ویژگی‌های دنیای نانومتری پی ببریم.

### ۱-۵-۳) روش المان محدود

در این روش که بیشتر مورد توجه مهندسين مکانیک می‌باشد، می‌توانیم پیوندهای بین اتم‌های کربن را به عنوان میله‌هایی (در اصطلاح به آن «تیر» می‌گویند که معادل واژه‌ی beam در انگلیسی می‌باشد) در نظر بگیریم و اتم‌های کربن نیز نقش خود را به عنوان محل اتصال آن‌ها بازی می‌کنند. به این ترتیب ساختاری شبیه به نانولوله‌های کربنی پدید می‌آید. ابتدا باید ویژگی‌های این میله را تنظیم کنیم. مهندسين مکانیک ویژگی‌های انواع میله‌ها (با توجه به جنس، شکل و ضخامت) را به خوبی می‌شناسند و می‌توانند با بررسی‌های خود بهترین میله را انتخاب نمایند. اکنون ساختار نانولوله مانند یک سازه‌ی مهندسی، برای بررسی آماده است (شکل ۱-۱۵) و می‌توان با وارد کردن نیروهایی بر آن، خواص این نانولوله را بررسی کرد.



شکل ۱-۱۵- تصویری از یک نانولوله‌ی کربنی مدل شده برای آنالیز المان محدود<sup>[9]</sup>



## 1-6- نانو لوله های کربنی از نگاه اعداد و ارقام

محققین همواره برای یافتن پاسخ سوالات خود به بررسی پدیده‌ها می‌پردازند. البته این کار را با روش‌های مختلفی انجام می‌دهند. یک روش برای یافتن پاسخ سوالات، مشاهده‌ی پدیده‌های طبیعی و برقراری ارتباط بین دانسته‌های قبلی با مشاهدات جدید است. به این روش، روش تجربی می‌گویند. به عنوان مثال، کارهای آزمایشگاهی که برای بررسی تاثیر یک محلول بر روی یک فلز انجام می‌شود، نمونه‌ای از یک روش تجربی است. روش دیگری که در کنار روش تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش محاسباتی است. دانشمندان در این روش سعی می‌کنند بین پدیده‌ها و ویژگی‌هایی که مشاهده کرده‌اند، روابط منطقی ایجاد کنند و سپس این روابط منطقی را به شکل فرمول‌ها و معادله‌های قابل فهم بیان می‌کنند. مثلاً در مشاهده‌ی پدیده‌ی اصطکاک، می‌توان رفتار جسم متحرک را روی سطح با استفاده از چند رابطه ریاضی بیان کرد. در بیان مزایای روش‌های محاسباتی به این گفته اکتفا می‌کنیم که روش‌های محاسباتی یکی از روش‌های مناسب و بسیار کم هزینه (که بیشتر به تعدادی از سلول‌های خاکستری مغز نیاز دارند!) برای بررسی و مطالعه‌ی پدیده‌ها و پیش‌بینی رفتار و خواص مواد و سیستم‌ها هستند .

## ۱-۶-۱ داده‌های مورد نیاز برای انجام محاسبات

تاکنون مطالعات تجربی زیادی در مورد نانولوله‌های کربنی چند دیواره انجام شده است. برای این کار از میکروسکوپ‌های الکترونی کمک بسیاری گرفته‌اند. دانشمندان معتقدند که فاصله‌ی بین دیواره‌های متعدد این نوع از نانولوله‌ها ثابت نیست و مقادیر مختلفی دارد. این مقدار می‌تواند کمی بیشتر از فاصله‌ی بین لایه‌های توده گرافیت، ۳.۳۵۴ آنگستروم، تا حدود ۳.۶ آنگستروم باشد. فاصله‌ی بین اتم‌های کربن در حالت صفحه‌ای (فاصله پیوند C-C) نیز تقریباً برابر با ۱.۴۲ آنگستروم است. با توجه به زوایای پیوندهای کوالانس C-C در صفحه‌ی گرافن، می‌توان بقیه‌ی فواصل مورد نیاز برای محاسبات را به دست آورد.

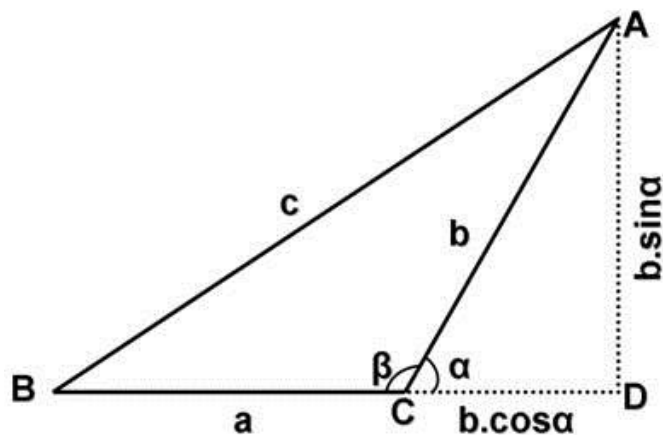
## ۱-۶-۲ شعاع نانولوله‌های کربنی

شعاع نانولوله‌های کربنی، همانطور که از نام آنها بر می‌آید، در محدوده نانومتر قرار دارد. با توجه به شکل ظاهری نانولوله‌ها می‌توان بر حسب مولفه‌های کایرال، روابطی را برای محاسبه شعاع آنها به دست آورد. بردار کایرال دقیقاً بر محیط نانولوله منطبق است، بنابراین طول بردار کایرال برابر با محیط نانولوله است. البته باید به این نکته توجه کنیم که محیط یک نانولوله دقیقاً به شکل دایره نیست، بلکه یک چند ضلعی منتظم است (زیرا نمی‌توان برای پیوندهای کوالانس انحناء قائل شد). ما در اینجا فرض می‌کنیم که محیط نانولوله دایره‌ای شکل است تا محاسبات را راحت‌تر انجام دهیم.

در هندسه‌ی مسطحه می‌توانیم طول یک ضلع از مثلث را بر حسب دو ضلع دیگر و با دانستن زاویه‌ی بین آنها محاسبه کنیم (رابطه ۱). برای تحقیق درستی (رابطه ۱)، کافیست رابطه‌ی فیثاغورث را برای مثلث ABD بنویسید.

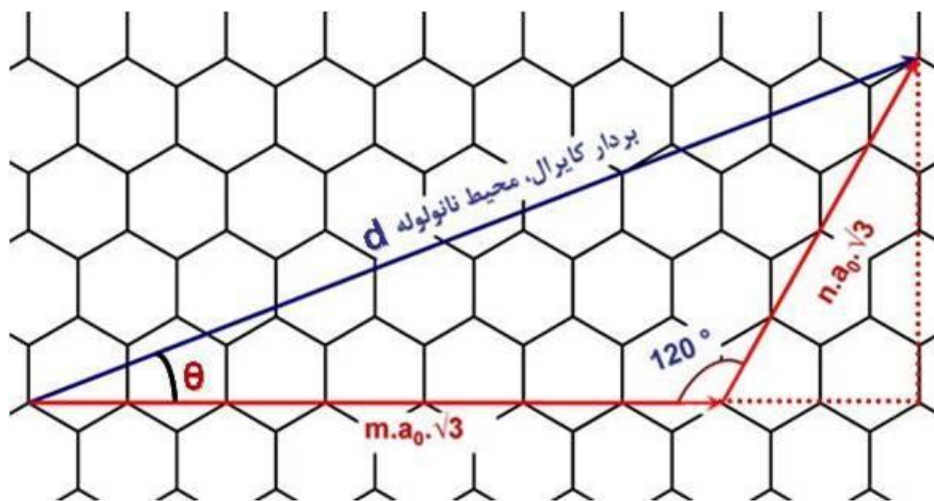
$$C^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \beta$$

رابطه ۱)



شکل 16-1 روابط میان اضلاع یک مثلث<sup>[5]</sup>

اکنون به شکل 17-1 توجه نمایید. همانطور که می‌بینید با استفاده از رابطه‌ی 1 ، می‌توانیم اندازه‌ی بردار کایرال را محاسبه کنیم (رابطه (۲)). در این رابطه A نشان‌دهنده طول محیط نانولوله و  $a_0$  برابر با طول پیوند کوالانس (C-C) معادل با مقدار ۱.۴۲ انگستروم) است.



شکل 17-1 ارتباط طول بردار کایرال با طول بردارهای  $m$  و  $n$ <sup>[5]</sup>

$$A^2 = 3 \times a_0^2 \cdot (m^2 + m \cdot n + n^2) \longrightarrow A = a_0 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{m^2 + m \cdot n + n^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$A^2 = (m \cdot a_0 \cdot \sqrt{3})^2 + (n \cdot a_0 \cdot \sqrt{3})^2 - 2 \times (m \cdot a_0 \cdot \sqrt{3}) \cdot (n \cdot a_0 \cdot \sqrt{3}) \cdot \cos(120^\circ)$$

حالا با توجه به رابطه‌ی میان محیط و شعاع دایره ( $A=2\pi r$ ) ، می‌توانیم شعاع نانولوله را محاسبه کنیم:

$$r = \frac{\sqrt{3}a_0}{2\pi} \sqrt{m^2 + mn + n^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

رابطه (۳) را می‌توان برای حالت‌های خاص ساده کرد. برای نانولوله‌ی آرمچیر که  $m=n$  است، رابطه‌ی (۴) و برای

نانولوله‌ی زیگزاگ که  $n=0$  است، رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید. واحد اندازه‌گیری شعاع در این روابط، آنگستروم

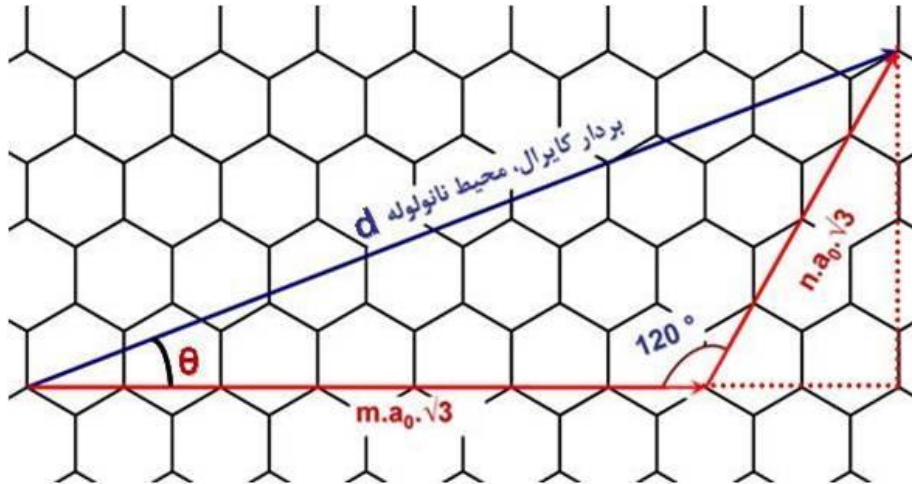
است.

$$r_a = \frac{3na_0}{2\pi} = 0.678n \quad \text{رابطه ۴}$$

$$r_z = \frac{\sqrt{3}na_0}{2\pi} = 0.397n \quad \text{رابطه ۵}$$

### ۱-۶-۳ زاویه‌ی کایرال در نانولوله‌های کربنی

در مطالعه نانولوله‌های کربنی، زاویه‌ی کایرال از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا مشخص کننده‌ی مولفه‌های کایرال نانولوله است. در ابتدا یادآوری می‌کنیم که در اینجا شرط  $m \geq n$  را در نظر می‌گیریم. برای به دست آوردن زاویه‌ی بین بردار کایرال و محور افقی ( $\theta$ )، این ضلع را روی محورهای افقی و عمودی تصویر می‌کنیم. در شکل (18-1) این محورها با نقطه چین مشخص شده‌اند.



شکل ۱-۱۸-۱- تصویر بردار کایرال روی محورهای افقی و عمودی [5]

با تصویر کردن بردار کایرال، بر خط چین عمودی خواهیم داشت:

$$d \cdot \sin \theta = n \cdot a_0 \cdot \sqrt{3} \times \sin(60^\circ) = \frac{3 \times n \cdot a_0}{2} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

با در نظر گرفتن رابطه‌ی ۲ و این نکته که  $d=2\pi r$  است، خواهیم داشت:

$$\sin \theta = \frac{n \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{m^2 + m \cdot n + n^2}} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

با کمک رابطه (7) می‌توانیم مقدار  $\theta$  را به دست بیاوریم. علاوه بر این، با تصویر کردن بردار کایرال بر خط چین افقی می‌توان نوشت:

$$d \cdot \cos \theta = \sqrt{3} \times m \cdot a_0 + \sqrt{3} \times n \cdot a_0 \cdot \cos 60^\circ = a_0 \cdot (\sqrt{3} \times m + \sqrt{3} \times n/2) \quad \text{رابطه ۸}$$

با تقسیم رابطه‌ی 6 بر رابطه‌ی 8 خواهیم داشت:

$$\tan \theta = \frac{n \cdot \sqrt{3}}{2 \times m + n} \quad \text{رابطه ۹}$$

در صورتیکه شرط  $m \geq n$  را رعایت نکنیم به جای مقدار  $\tan \theta$ ، مقدار  $\tan \theta - 60$  به دست می‌آید. می‌توانید این موضوع را با توجه به صفحه‌ی مختصات گرافنی تحقیق کنید. اگر دقت کنید، زاویه‌ی کایرال تمام نانولوله‌های زیگزاگ با هم برابر است. این موضوع در مورد نانولوله‌های آرمچیر هم صادق است. در واقع زاویه‌ی کایرال همانطور که از نامش پیداست، بدون در نظر گرفتن قطر نانولوله، تنها میزان چرخش ردیف اتم‌های کربن در راستای محور نانولوله را نشان می‌دهد.

## ۷-۱ سنتز نانو لوله ها:

### ۱-۷-۱ تخلیه آرک<sup>۱</sup>:

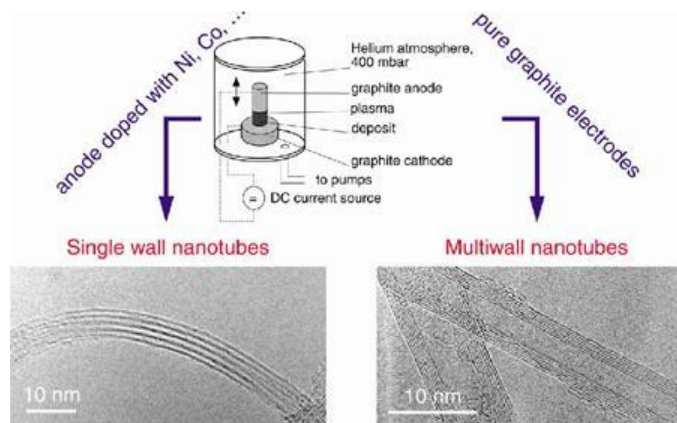
در سال ۱۹۹۱، ایجیما تهیه یک نوع جدید از ساختارهای کربنی بی انتها از لوله های سوزن مانند را گزارش کرد. لوله ها با استفاده از روش تبخیر arc مشابه سنتز فلورسانس تولید شده بودند. سوزن های کربنی قطری بین ۴ تا ۳۰ نانومتر و بالای یک میکرومتر طول داشتند. این نانو لوله ها بر روی انتهای الکتروود کربنی منفی که برای جریان مستقیم استفاده می شود رشد می کردند این عمل در حضور گاز آرگون در فشار ۱۰۰ تور انجام شد. این واکنش در شکل ۱-۱۹ مشخص شده است. ذره بین نشر الکترونی نشان داد که هر سوزن شامل لوله های هم محور از ورقه های گرافیتی بین ۲ تا حدود ۵۰ که بعدها نانو لوله های کربنی چند دیواره نامیده شده اند تشکیل شده است.

دو سال بعد در سال ۱۹۹۳، ایجیما و ایچیهایشی<sup>۲</sup> توانستند با استفاده همزمان از تخلیه arc و سنتز به کمک کاتالیزور، نانو لوله های تک دیواره را سنتز کنند. ایجیما از تخلیه arc اتاقکی از مخلوط گازهای متان با فشار ۱۰ تور و آرگون ۴۰ تور استفاده کرد. دو الکتروود باریک در مرکز اتاقک قرار گرفته بودند. بر روی الکتروود کاتد یک قطعه کوچک از آهن قرار داشت. تخلیه arc به وسیله برقرار کردن یک جریان DC با آمپراژ ۲۰۰A و ولتاژ ۲۰V بین دو الکتروود تولید می شود. استفاده از سه ترکیب آرگون و آهن و متان برای سنتز نانو لوله های کربنی تک دیواره لازم بود.

---

<sup>1</sup> Arc discharge

<sup>2</sup> Ichihashi



شکل ۱-۱۹ سنتز نانو لوله ها با روش تخلیه Arc<sup>[1]</sup>

### ۱-۷-۲ سایش لیزری<sup>۱</sup>:

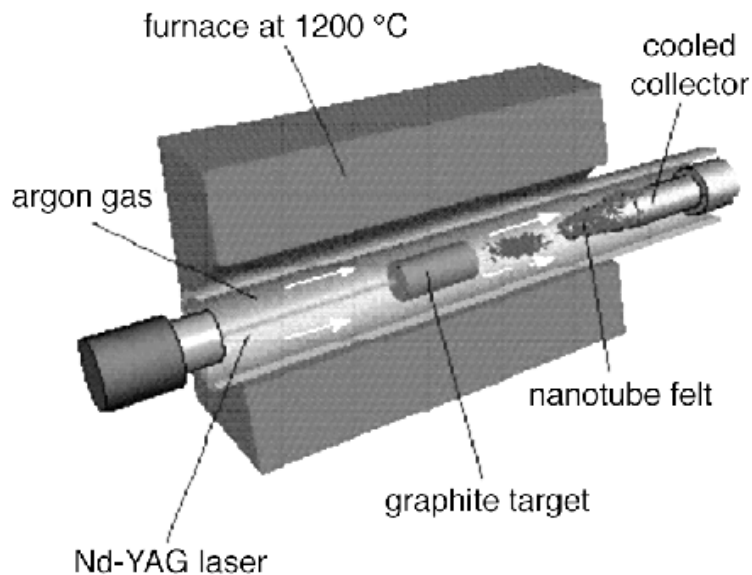
در سال ۱۹۹۶ اسمالی<sup>۲</sup> و همکارانش توانستند نانو لوله های تک دیواره با بازده بالای ۷۰ درصد تولید کنند. برای این منظور میله های گرافیتی با مقدار کمی نیکل و کبالت را در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد توسط لیزر سایش دادند. پراش پرتو X و TEM نشان داد که نانو لوله های سنتز شده به صورت طناب های با قطر ۵ تا ۲۰ نانومتر و طول ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر می رسند. رشد نانو لوله ها توسط مکانیسم اسکوتر<sup>۳</sup> در شکل نشان داده شده است. در این مکانیسم یک اتم نیکل یا کبالت در لبه نانو لوله قرار می گیرد. اتم فلزی باید به اندازه کافی الکترونگاتیو باشد تا مانع از تشکیل فلورسانس شود.

<sup>1</sup> Laser ablation

<sup>2</sup> Smalley

<sup>3</sup> Scooter





شکل ۱-۲۰ سنتز نانو لوله ها به روش سایش لیزری<sup>[1]</sup>

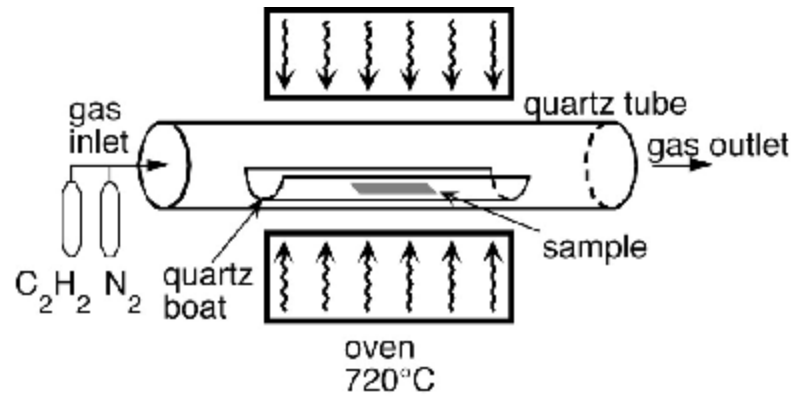
### ۱-۷-۳ نشست شیمیایی بخار:

در سال ۱۹۶۰ رشته ها و فیبرهای کربنی به وسیله تجزیه حرارتی هیدروکربن ها در حضور کاتالیزور صورت گرفت. مشابه این روش در سال ۱۹۹۳ نانو لوله های کربنی چند دیواره توسط یاکامان<sup>۲</sup> و در سال ۱۹۹۴ ایوانو<sup>۳</sup> و همکارانش توانستند نانو لوله های کربنی چند دیواره را تولید کنند. در این روش که به CVD معروف است با تجزیه هیدروکربن ها به کمک کاتالیزور نانو لوله ها را سنتز می شوند. در روش CVD معمولاً اتیلن یا استیلن را در لوله های راکتور در دمای ۵۵۰ تا ۵۷۰ درجه سانتیگراد قرار می دهند و در حضور کاتالیزور نانو لوله شکل می گیرد. بهترین نتایج با استفاده از نانو ذرات آهن و نیکل و کبالت به عنوان کاتالیزور بدست می آید.

<sup>1</sup> Chemical Vapor Deposition

<sup>2</sup> Yacaman

<sup>3</sup> Ivanov



شکل ۱-۲۱ سنتز نانو لوله ها به روش رشد کاتالیزوری [1]

## ۸-۱ ویژگی های نانو لوله

1) اندازه بسیار کوچک (قطر کوچکتر از ۰/۴ نانومتر)

۲) حالت رسانا و نیمه‌رسانایی آن ها بر حسب شکل هندسی‌شان

نانولوله‌ها بر حسب نحوه رول شدن صفحات گرافیتی سازنده‌شان به صورت رسانا یا نیمه‌رسانا در می‌آیند. به عبارت دیگر از آنجا که نانولوله‌ها در سطح مولکولی همچون یک باریکه سیمی در هم تنیده به نظر می‌رسند اتم‌های کربن در قالب شش وجهی به یکدیگر متصل می‌شوند و این الگوهای شش وجهی دیواره‌های استوانه‌ای را تشکیل می‌دهند که اندازه آن تنها چند نانومتر می‌باشد. زاویه پیچش نوعی نانولوله، که به صورت زاویه بین محور الگوی شش وجهی آن و محور لوله تعریف می‌شود، رسانا یا نارسانا بودن را تعیین می‌کند. تحقیقات دیگری نیز نشان داده‌اند که تغییر شعاع نیز امکان بستن طول باند و عایق نمودن نانولوله فلزی را فراهم می‌کند. پس می‌توان گفت دوپارامتر اساسی که در این بین نقش اساسی بازی می‌کنند، یکی ساختار نانولوله و دیگری قطر و اندازه آن است. بررسی‌های دیگری نشان داده‌اند که خصوصیات الکتریکی نانولوله‌ها بسته به اینکه مولکول  $60^{\circ}\text{C}$  در کجا قرار داده شود از یک هادی به یک نیمه‌هادی و یا یک عایق قابل تغییر می‌باشد. از آنجایی که نانولوله‌های کربنی قادرند جریان الکتریسته را به وسیله انتقال بالستیک الکترون بدون اصطکاک از سطح خود عبور دهند- این جریان صد برابر بیشتر از جریانی است که از سیم مسی عبور می‌کند- لذا نانولوله‌ها انتخاب ایده‌آلی برای بسیاری از کاربردهای میکروالکترونیک می‌باشند.

۳) برخورداری از خاصیت منحصر به فرد ترابری پرتابه‌ای

۴) قدرت رسانایی گرمایی خیلی بالا

۵) 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 میکروحفره‌ای 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. این که آیا نانولوله‌ها واقعاً می‌توانند در خارج از آزمایشگاه نیز گازها را به طور انتخابی از خود عبور دهند یا نه باعث شده که امیدهای زیادی به تولید هیدروژن و نیتروژن از هوا باشد.

۶) بروز خواص الکتریکی و مکانیکی منحصر به فرد در طول آن‌ها

۷) مدول یانگ بالا

۸) حساس به تغییرات کوچک نیروهای اعمال شده

اعمال فشار بر یک نانولوله می‌تواند ویژگی‌های الکتریکی آن را تغییر دهد که بسته به نوع کشش یک نانولوله می‌توان رسانایی آن را افزایش یا کاهش داد. این امر به دلیل تغییر ساختار کوانتومی الکترون‌ها صورت می‌گیرد. لذا این امکان به فیزیکدان‌ها داده می‌شود که ترانسفورماتور یا دستگاه‌های انتقال دهنده بر پایه نانولوله‌ها بسازند که حساسیت زیادی به اعمال نیروهای بسیار کوچک دارند. همچنین توانایی نانولوله‌ها در احساس تغییرات بسیار کوچک فشار و باز تبدیل این فشار به صورت یک علامت الکتریکی می‌تواند در آینده امکان ساخت سوئیچ‌های نانولوله‌ای حساس به تغییرات بسیار کوچک فشار را به محققان بدهد.

۹) 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.

## ۱۰) ضریب تحرک الکتریسته بسیار بالا

نانولوله‌ها در دمای اتاق دارای بالاترین ضریب تحرک الکتریسته نسبت به هر ماده شناخته شده دیگری هستند.

## ۱۱) خاصیت مغناطیسی، ممان مغناطیسی بسیار بزرگ

با قرار دادن یک نانولوله در زیر لایه مغناطیسی یا با افزودن الکترون یا حفره به نانولوله می‌توان خاصیت مغناطیسی در نانولوله ایجاد کرد. این خاصیت باعث می‌شود که بتوان ساخت وسایلی را پیش‌بینی کرد که در آن‌ها اتصالات مغناطیسی و الکتریکی از هم جدا شده‌اند. اتصال مغناطیسی را می‌توان برای قطبی کردن مغناطیسی نانولوله‌ها- دستکاری در اسپین‌ها- به کار برد و از اتصالات غیرمغناطیسی برای الکترودهای ولتاژ- جریان استفاده کرد. همچنین ممان مغناطیسی آن‌ها نیز قابل اندازه‌گیری است (۱/۰ مگنتون بور در هر اتم کربن).

## ۱۲) چگالی سطحی بسیار بالا

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

## ۱۳) قابلیت ذخیره‌سازی

در نانولوله‌ها هر سه اتم کربن قابلیت ذخیره یک یون لیتیم 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 هیدروژن زیادی را در نانولوله‌ها برای کاربردهای انرژی و پیل‌های سوختی ذخیره کنند.

#### ۱۴) داشتن خاصیت ابررسانایی

نانولوله‌ها در دمای زیر ۱۵k ابررسانا شده‌اند. شعاع این نانولوله‌های ابررسانا فقط ۰/۴ نانومتر است. این کشف در نانولوله‌های کربنی نه تنها حیرت دانشمندان را به دنبال داشته بلکه قضایایی را که حدود ۴۰ سال پیش انتقال فاز را در سیستم‌های یک یا دو بعدی ممنوع می‌دانستند، رد کرده است. همچنین دانشمندان دلایلی را ارائه کرده‌اند که می‌توان ابررسانایی دمای اتاق را در نانولوله‌های کربنی یافت. آن‌ها بیش از ۲۰ دلیل ارائه کرده‌اند که نانولوله‌های کربنی از خود خواصی را نشان می‌دهند که بیانگر ابررسانایی دمای اتاق در آن‌هاست.

#### ۱۵) تولید ولتاژ

با عبور مایع از میان کلاف‌هایی از نانولوله‌های کربنی تک جداره، ولتاژ 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.

#### ۱۶) استحکام و مقاومت کششی بالا

میزان افزایش نیروی گرمایی و مقاومت نانولوله‌ها با ریشه سوم جرم اتم‌ها و مولکول‌ها متناسب است. همچنین حرارت دادن موجب افزایش استحکام نانولوله شده و مقاومت کششی آن را شش برابر می‌کند و هدایت آن نیز افزایش می‌یابد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که در اثر برخورد اتم‌ها یا مولکول‌ها با نانولوله کربنی مقاومت الکتریکی آن تغییر می‌کند.

## ۹-۱ هدایت حرارتی نانولوله‌های کربنی

یکی از مهمترین خواصی که در مورد یک ماده بررسی می‌شود، خواص حرارتی آن ماده است. خواص حرارتی نانولوله‌های کربنی از اهمیت بسیاری در زمینه‌های مختلف فناوری برخوردار است، به ویژه به دلیل رسانایی حرارتی بالای الماس و گرافیت و مشابهت‌های بین آن‌ها، دانشمندان علاقه‌ی بسیاری برای بررسی این خصوصیات دارند. در صورت وجود این ویژگی در نانولوله‌های کربنی، می‌توان از آن به عنوان مکملی بر ویژگی‌های مکانیکی و الکتریکی بی‌نظیر نانولوله‌ها یاد کرد.

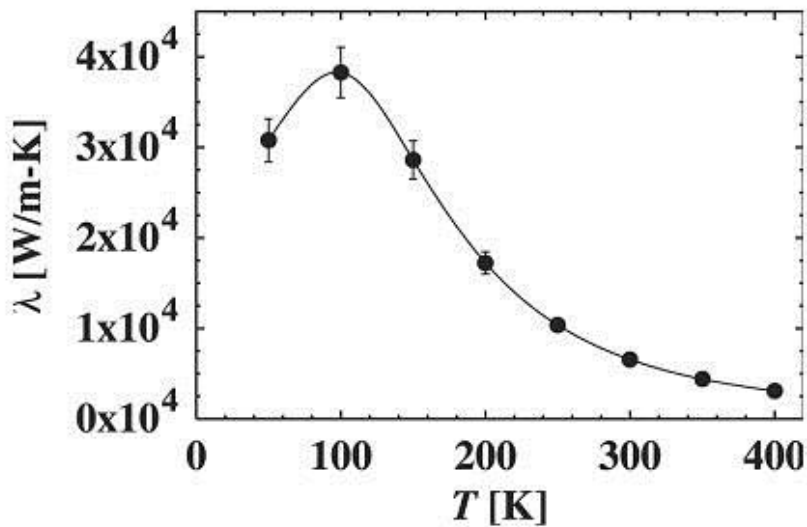
دانشمندان در بررسی‌های تجربی و آزمایش‌های خود به نتایجی در زمینه‌ی هدایت حرارتی نانولوله‌ها کربنی دست یافته‌اند. آن‌ها پیش‌بینی می‌کنند که نانولوله‌های کربنی در دمای اتاق رسانایی حرارتی بالاتری از گرافیت و الماس دارند. دانشمندان در این اندازه‌گیری‌ها، رسانایی حرارتی را برای دو دسته از نانولوله‌ها به دست آوردند. یک دسته، نانولوله‌های کربنی تک دیواره‌ای بودند که به صورت توده‌ای در کنار هم قرار گرفته بودند و مقدار رسانایی حرارتی مجموعه‌ی آنها به دست آمد. یک دسته نیز نانولوله‌های کربنی چنددیواره بودند که به صورت جدا از هم قرار گرفته بودند. رسانایی حرارتی این دسته از نانولوله‌ها به صورت جداگانه بررسی شد. این دانشمندان مقدار رسانایی حرارتی بیش از  $200 \text{ w/mk}$  را برای توده‌های نانولوله‌های کربنی تک دیواره به دست آوردند. همچنین طبق این بررسی‌ها، مقدار رسانایی حرارتی نانولوله‌های کربنی چند دیواره به صورت جداگانه بیشتر از  $300 \text{ w/mk}$  به دست آمد.

برای تلفیق خواص مواد مختلف و بهبود ویژگی‌های محصولات، می‌توان از کامپوزیت‌ها و به شکل پیشرفته تر از نانوکامپوزیت‌ها استفاده نمود. طبق بررسی‌های انجام شده، با افزودن تنها ۱٪ از نانولوله‌های کربنی به رزین اپوکسی، ممکن است رسانایی حرارتی کامپوزیت دو برابر زمینه شود. این موضوع بیانگر این است که کامپوزیت‌های نانولوله‌های کربنی می‌توانند در کاربردهای مدیریت حرارتی به کار برده شوند.

## ۱-۹-۱ هدایت حرارتی نانولوله‌های کربنی از منظر تئوری

وجود رسانایی حرارتی بالا برای تک نانولوله‌ها به شکل تئوری نشان داده شده است. نتایج حاصل از تجربیات آزمایشگاهی نیز بیانگر وجود این ویژگی در نمونه‌های توده‌ای از نانولوله‌های کربنی تک دیواره و همچنین برای تک نانولوله‌های چند دیواره می‌باشد.

گروهی از دانشمندان رسانایی حرارتی تک نانولوله‌های کربنی را با روش‌های محاسباتی اندازه‌گیری کرده‌اند. شکل 1-21 نتایج محاسبات را به ازای دما برحسب کلین برای نانولوله‌های تک دیواره نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲۲ مقادیر رسانایی حرارتی محاسبه شده برای یک نانولوله‌ی کربنی تک دیواره در دماهای مختلف [7]

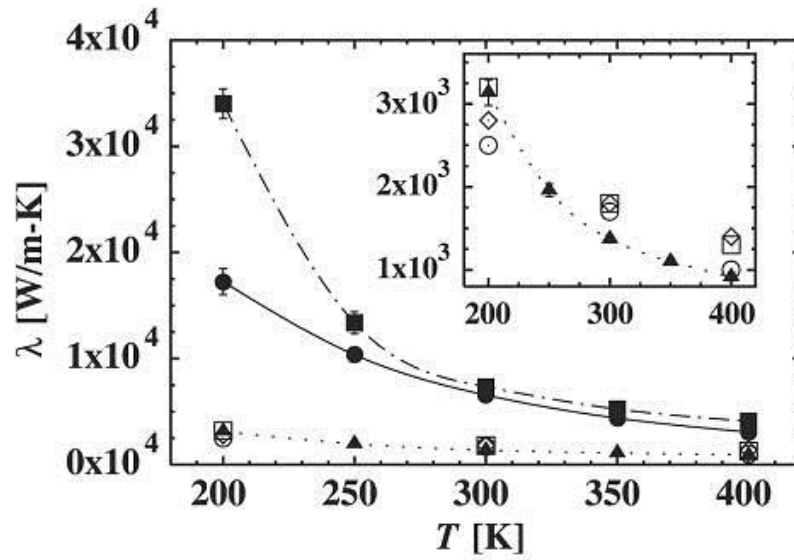
در این شکل مقدار رسانایی با  $\lambda$  نشان داده شده است. از آنجایی که این کمیت در دماهای مختلف، مقادیر مختلفی دارد، آن را به صورت تابعی از دما و به شکل  $\lambda(T)$  نشان داده‌ایم. با شروع از دماهای کم و افزایش تدریجی دما، مشاهده می‌شود که مقدار  $\lambda(T)$  در نزدیکی دمای 100k به یک مقدار بیشینه برابر با 37000 w/mk می‌رسد (این بیشینه به شکل یک قله در نمودار دیده می‌شود) و سپس با افزایش دما، کاهش می‌یابد.



بیشترین مقدار  $\lambda(T)$  که تاکنون در بررسی‌های دانشمندان مشاهده شده است، مربوط به یک نمونه‌ی الماس خاص می‌باشد که در دمای 104k اندازه‌گیری شده است. این مقدار برابر با 41000 w/mk است. بنابراین مقدار  $\lambda(T)$  نانولوله‌ی کربنی در بیشینه‌اش با بیشترین مقدار  $\lambda(T)$  که تاکنون اندازه‌گیری شده است، قابل مقایسه است. با توجه به نمودار ارائه شده، حتی در دمای اتاق نیز رسانایی حرارتی نانولوله‌ی کربنی بسیار بالا و برابر با 6600 w/mk می‌باشد، این مقدار بسیار بیشتر از مقدار گزارش شده برای همان نمونه‌ی خالص الماس در دمای اتاق است. البته باید این نکته را در نظر گرفت که این نتایج تنها از طریق محاسبات به دست آمده‌اند و ممکن است با نتایج حاصله در شرایط آزمایشگاهی یا واقعی متضاد بوده و یا ناهم‌خوانی باشد.

برای درک بهتر رفتار حرارتی نانولوله‌های کربنی می‌توانیم مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از بررسی نانولوله‌ها و دیگر مواد کربنی دارای ساختار مشابه داشته باشیم. شکل 1-22 نمایش دهنده‌ی مقایسه‌ای بین رسانایی حرارتی محاسبه شده برای نانولوله (ساختار یک بعدی)، تک صفحه‌ی گرافن (ساختار دو بعدی) و گرافیت (ساختار سه بعدی) است. همانگونه که مشاهده می‌شود، رسانایی حرارتی تک لایه‌ی گرافن بیشتر از یک نانولوله، و بیشتر از گرافیت است. گرچه مقدار رسانایی حرارتی گرافن در دماهای بالاتر از 270k بسیار نزدیک به رسانایی حرارتی نانولوله می‌باشد، این اختلاف در دماهای پایین تر از 270k بسیار بیشتر می‌شود. در هر صورت گرافیت رسانایی حرارتی کمتری از دو نمونه‌ی دیگر دارد.

همانطور که می‌دانید، گرافیت از روی هم قرار گرفتن منظم و متناوب لایه‌های گرافن ساخته می‌شود. بنابراین بین لایه‌های گرافن، برهم‌کنش‌هایی برقرار است، بنابراین در گرافیت، وجود برهم‌کنش‌های بین لایه‌ای، مقدار هدایت حرارتی را به شدت کاهش می‌دهد. به نظر می‌رسد همین اتفاق در مورد دسته‌های نانولوله‌های کربنی رخ خواهد داد و مقدار هدایت حرارتی دسته‌های نانولوله‌های کربنی از مقدار هدایت حرارتی تک نانولوله‌ها کمتر باشد.



شکل ۱-۲۳ مقادیر محاسبه شده برای هدایت حرارتی نانولوله (نمودار خط ممتد) در مقایسه با هدایت حرارتی صفحه‌ی گرافن (نمودار خط و نقطه‌ای) و گرافیت (نمودار خط چین)؛ قسمت ترسیم شده داخلی، نشان دهنده‌ی تغییرات میزان هدایت بر اساس دما برای گرافیت می‌باشد که با دقت بیشتری نسبت به نمودار اصلی رسم شده است. به تفاوت مقیاس اعداد روی محور عمودی نمودار داخلی و نمودار اصلی دقت نمایید [7]

## ۱-۹-۲ هدایت حرارتی از منظر نتایج آزمایشگاهی

گروهی از دانشمندان با استفاده از یک میدان مغناطیسی قوی، دسته‌هایی از نانولوله‌های تک‌دیواره را تولید کردند که به مقدار زیادی منظم در کنار هم قرار گرفته بودند. سپس رسانایی حرارتی این نمونه را اندازه‌گیری نمودند.

در نمونه‌هایی که قرارگیری نانولوله‌ها در کنار هم غیر منظم بود، هدایت حرارتی در دمای اتاق در حدود 35 w/mk اندازه‌گیری شد. باید دقت داشت که نانولوله‌ها در چنین نمونه‌ای به شدت در هم پیچ خورده‌اند، و مسیری که انتقال حرارت در آن رخ می‌دهد به مقدار قابل توجهی طولانی‌تر از فاصله‌ی مستقیم بین نقاط است. برای کاهش دخالت این اثر در نتایج آزمایش، می‌توان نانولوله‌ها را توسط میدان مغناطیسی قوی آرایش داد. در این دسته نمونه‌ها، هدایت حرارتی بالاتر از مقدار 200 w/mk می‌باشد که با مقدار مربوط به یک فلز خوب قابل مقایسه است. گرچه در همین دسته‌های منظم از نانولوله‌ها نیز مواردی وجود دارند که بر هدایت حرارتی نمونه تاثیر منفی می‌گذارند. برای مثال ممکن است هدایت حرارتی از طریق اتصال‌هایی که در بین نانولوله‌های مجاور یکدیگر در دسته وجود دارند، دچار محدودیت باشد. بنابراین مقدار هدایت حرارتی مربوط به تک نانولوله‌ها باید بسیار بالاتر از این مقداری باشد که در اینجا برای دسته‌های نانولوله‌ها به دست آمد.

## ۱-۱۰ کاربردهای نانولوله‌های کربنی

وجود یک سری مختصات ویژه نانولوله‌های کربنی، آن‌ها را به انتخاب ایده آلی برای بسیاری از کاربردها تبدیل کرده است. امروزه در روند تحقیق درباره نانولوله‌ها توجه و تعمق ویژه‌ای بر روی استفاده از آن‌ها در ساخت ابزارها متمرکز شده است. اکثر پژوهشگرانی که در دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی سرتاسر دنیا بر روی نانولوله‌ها کار می‌کنند با خوش‌بینی پیش‌بینی می‌کنند که در آینده‌ای نزدیک نانولوله‌ها کاربردهای صنعتی وسیعی خواهند داشت.

هم‌اکنون امکان ساخت ابزارهای بسیار جالبی وجود دارد، اما در خصوص موفقیت تجاری آن‌ها، باید در آینده قضاوت کرد. آینده کاربرد نانولوله‌ها در بخش الکترونیک روشن است؛ خواص الکتریکی و پایداری شیمیایی بی‌بدیل نانولوله‌ها به طور قاطع ما را به سمت استفاده از این خواص سوق خواهد داد. بنابراین در ادامه به شرح چند مورد از حوزه‌های مهم کاربرد نانولوله‌ها می‌پردازیم.

### (۱) ترانزیستورها

نانولوله‌ها در آستانه کاربرد در ترانزیستورهای سریع هستند، اما آن‌ها هنوز هم در اتصالات داخلی استفاده می‌شوند. بسیاری از طراحان دستگاه‌ها تمایل دارند به پیشرفت‌هایی دست یابند که آن‌ها را به افزایش تعداد اتصالات داخلی دستگاه‌ها در فضای کوچک تر، قادر نماید. ترانزیستورهای ساخته شده از نانولوله‌ها دارای آستانه می‌باشند (یعنی سیگنال باید از یک حداقل توان برخوردار باشد تا ترانزیستور بتواند آن را آشکار کند) که می‌توانند سیگنال‌های الکتریکی زیر آستانه را در شرایط اختلال الکتریکی یا نویز آشکار و ردیابی نمایند. همچنین از آنجایی که ضریب تحرک، شاخص حساسیت یک ترانزیستور برای کشف بار یا شناسایی مولکول مجاور می‌باشد، لذا ضریب تحرک مشخص می‌کند که قطعه تا چه حد می‌تواند خوب کار کند. ضریب تحرک

تعیین می‌کند که بارها در یک قطعه چقدر سریع حرکت می‌کنند و این نیز سرعت نهایی یک ترانزیستور را تعیین می‌نماید.

لذا اهمیت استفاده از نانولوله‌ها و تولید ترانزیستورهای نانولوله‌ای با داشتن ضریب تحرک برابر با ۱۰۰ هزار سانتیمتر مربع بر ولت ثانیه در مقابل سیلیکون با ضریب تحرک ۱۵۰۰ سانتیمتر مربع بر ولت ثانیه و ایندیم آنتیمونید (بالاترین رکورد بدست آمده تا به امروز) با ضریب تحرک ۷۷ هزار سانتیمتر مربع بر ولت ثانیه بیش از پیش مشخص می‌شود.

## ۲) حسگرها

حسگرها ابزارهایی هستند که تحت شرایط خاص، از خود واکنش‌های پیش‌بینی شده و مورد انتظار نشان می‌دهند. شاید دماسنج را بتوان جزء اولین حسگرهای که بشر ساخت به حساب آورد. با توجه به وجود آمدن وسایل الکترونیکی و تحولات عظیمی که در چند دهه اخیر و در خلال قرن بیستم به وقوع پیوسته است، امروزه نیاز به ساخت حسگرهای دقیق‌تر، کوچک‌تر و با قابلیت‌های بیشتر احساس می‌شود.

حسگرهایی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای حساسیت بالایی هستند به طوری که به مقادیر ناچیزی از هر گاز، گرما یا تشعشع حساسند. بالا بردن درجه حساسیت، بهره و دقت این حسگرها نیاز به کشف مواد و ابزارهای جدید دارد. با آغاز عصر نانو فناوری، حسگرها نیز تغییرات شگرفی خواهند داشت. یکی از نامزدهای ساخت حسگرها، نانولوله‌ها خواهند بود. با نانولوله‌ها می‌توان، هم حسگر شیمیایی و هم حسگر مکانیکی ساخت. به خاطر کوچک و نانومتر بودن ابعاد این حسگرها، دقت و واکنش آن‌ها بسیار زیاد خواهد بود، به گونه‌ای که حتی به چند اتم از یک گاز نیز واکنش نشان خواهند داد.

تحقیقات نشان می‌دهد که نانولوله‌ها به نوع گازی که جذب آن‌ها می‌شود حساس می‌باشند؛ همچنین میدان الکتریکی خارجی، قدرت تغییر دادن ساختارهای گروهی از نانولوله‌ها را دارد؛ و نیز معلوم شده است که نانولوله‌های کربنی به تغییر شکل مکانیکی از قبیل کشش حساس هستند. گاف انرژی نانولوله‌های کربنی به طور چشمگیری در پاسخ به این تغییر شکل‌ها می‌تواند تغییر کند. همچنین می‌توان با استفاده از مواد واسطه، مانند پلیمرها، در فاصله میان نانولوله‌های کربنی و سیستم، نانولوله‌های کربنی را برای ساخت زیست حسگرها نیز توسعه داد. تحقیق در زمینه کاربرد نانولوله‌ها در حسگرها در حال توسعه و پیشرفت است و مطمئناً در آینده‌ای نه چندان دور شاهد بکارگیری آن‌ها در انواع مختلف حسگرها (مکانیکی، شیمیایی، تشعشی، حرارتی و ..) خواهیم بود.

### ۳) نمایشگرهای گسیل میدانی

بسیاری از متخصصان بر این باورند که فناوری نمایشگرهای با صفحه تخت امروزی از نظر هزینه، کیفیت و اندازه صفحه نمایش، برای مصارف خانگی مناسب نیستند. آن‌ها معتقدند که با استفاده از نمایشگرهایی که از نانولوله‌های کربنی به عنوان منبع انتشار استفاده می‌کنند، می‌توانند این مشکلات را بر طرف کنند.

نانولوله‌های کربنی می‌توانند عنوان بهترین گسیل کننده میدانی را به خود اختصاص داده و ابزارهای الکترونی با راندمان و کارایی بالاتری تولید کنند. خصوصیات منحصر به فرد این نانولوله‌ها، تولیدکنندگان را قادر به تولید نوعی جدید از صفحه نمایش‌های تخت خواهد ساخت که ضخامت آن‌ها به اندازه چند اینچ بوده و نسبت به فناوری‌های فعلی از قیمت مناسب‌تری برخوردار باشد. به علاوه کیفیت تصویر آن‌ها هم به مراتب بهتر خواهد بود.

در پدیده گسیل میدانی، الکترون‌ها با استفاده از ولتاژ اندک از فیلم‌های ضخیم دارای نانولوله به سمت صفحه

نمایش پرتاب شده و باعث روشن شدن آن می‌شوند. هر نقطه از این فیلم، یک پرتاب کننده الکترون (تفنگ الکترونی) کوچک است که تصویر را روی صفحه نمایش ایجاد می‌کند. ولتاژ لازم برای نمایشگر گسیل میدانی از طریق صفحه نمایش صاف متکی بر نانولوله نسبت به آنچه به صورت سنتی در روش اشعه کاتدی استفاده می‌شد، کمتر می‌باشد و این نانولوله‌ها با ولتاژ کمتر، نور بیشتری تولید می‌کنند.

#### ۴) حافظه‌های نانولوله‌ای

به دلیل کوچکی بسیار زیاد نانولوله‌های کربنی (که در حد مولکولی است)، اگر هر نانولوله بتواند تنها یک بیت اطلاعات در خود جای دهد، حافظه‌هایی که از این نانولوله‌ها ساخته می‌شوند می‌توانند مقادیر بسیار زیادی اطلاعات را در خود ذخیره نمایند. با در نظر داشتن این مطلب، بسیاری از محققان در حال کار بر روی ساخت حافظه‌های نانولوله‌ای می‌باشند؛ بنابراین رؤیای ساخت رایانه‌های با سرعت بالا عملی خواهد شد.

#### ۵) استحکام‌دهی کامپوزیت‌ها

توزیع یکنواخت نانولوله‌ها در زمینه کامپوزیت و بهبود چسبندگی نانولوله با زمینه در فرآوری این نانوکامپوزیت‌ها از موضوعات بسیار مهم است.

شیوه توزیع نانولوله‌ها در زمینه پلیمری از پارامترهای مهم در استحکام‌دهی به کامپوزیت می‌باشد. آنچه از تحقیقات بر می‌آید این است که استفاده از خواص عالی نانولوله‌ها در نانوکامپوزیت‌ها وابسته به استحکام پیوند فصل مشترک نانولوله و زمینه می‌باشد. نکته دیگر آنکه خواص غیر همسانگردی نانولوله‌ها باعث می‌شود که در کسر حجمی کمی از نانولوله‌ها رفتار جالبی در این نانوکامپوزیت‌ها پیدا شود.

از کاربردهای دیگر نانو لوله ها می توان به امکان ذخیره هیدروژن در پیل های سوختی، افزایش ظرفیت باتری ها و پیل های سوختی، افزایش راندمان پیل های خورشیدی، جلیقه های ضد گلوله سبک و مستحکم، کابل های ابررسانا یا رسانای سبک، رنگ های رسانا، روکش های کامپوزیتی ضد رادار، حصار حفاظتی الکترومغناطیسی در تجهیزات الکترونیکی، پلیمرهای رسانا، فیبرهای بسیار مقاوم، پارچه های با قابلیت ذخیره انرژی الکتریکی جهت راه اندازی ادوات الکتریکی، ماهیچه های مصنوعی با قدرت تولید نیروی ۱۰۰ مرتبه بیشتر از ماهیچه های طبیعی، صنایع نساجی، افزایش کارایی سرامیک ها، مواد پلاستیکی مستحکم، تشخیص گلوکز، محلولی برای اتصال درونی تراشه های بسیار سریع، مدارهای منطقی و پردازنده های فوق سریع، کمک به درمان آسیب دیدگی مغز، دارورسانی به سلول های آسیب دیده، از بین بردن تومورهای سرطانی، تجزیه هیدروژن، ژن درمانی، تصویربرداری، SPM، FEM، محافظ EMT، حسگرهای شیمیایی، SET و LED، پیل های خورشیدی و نهایتاً LSI اشاره کرد. البته در چند مورد اخیر بیشتر از نوع تک جداره آن استفاده می شود. لذا این فناوری با این گستره کاربردها می تواند در آینده ای نه چندان دور بازار بزرگی را به خود اختصاص داده و زندگی بشر را تحت تأثیر خود قرار دهد.



## ۱-۱ چالش های فراوری

با وجود ویژگی های بالای نانولوله ها و کاربردهای فراوان آن، تولید و استفاده مستمر از این محصولات با اهداف مورد نظر مشکل می باشد، لذا محققان زیادی در جهت رفع مشکلات آن برآمده اند. در زیر چند مورد از مشکلات اساسی استفاده از نانولوله ها ذکر می گردد.

### (۱) تولید انبوه با قیمت مناسب

از آنجا که تولید انبوه نانولوله ها در مقیاس تنی با قیمت مناسب، بزرگ ترین مانع تجاری سازی اختراعات در این زمینه بوده است، لذا شرکت های مختلفی درصددند تا بتوانند این مشکل را حل نمایند. امروزه قیمت هر گرم نانولوله چند دلار می باشد. هر چند که قیمت نانولوله ها نسبت به قیمت اولیه آن کاهش زیادی یافته اما هنوز هم برای تجاری سازی و استفاده در صنایع مختلف مناسب نمی باشد، لذا دانشمندان ابراز امیدواری کرده اند که بتوانند در چند سال آینده ضمن تولید چند تنی آن، قیمت آن را به زیر یک دلار کاهش دهند.

### (۲) خالص سازی نانولوله ها

یکی از مسائل کلیدی در الکترونیک، استفاده از نانولوله های کربنی با کیفیت بالا (نانولوله های خالص) می باشد. تولید محصولات جانبی نا مطلوب در حین فرایند رشد نانولوله ها سبب کوتاه شدن مدارها می شود. بزرگ ترین چالش محققان، در خالص سازی، میزان نانولوله های تولید شده است. در فرایند استفاده شده توسط محققان برای ساخت نانولوله ها، ناخالصی ها دائماً افزایش یافته و مقدار زیادی از کربن به هدر رفته و کاتالیست ها را بلا استفاده می کند، که این عوامل در نهایت منجر به افت کیفیت نانولوله ها می شود.

برای رسیدن به نانولوله‌های کربنی خالص باید از دمای بالا استفاده نماییم اما در این روش مقداری کربن آمورف حاصل می‌شود که یک لایه رسانای نامطلوب بر روی زیرلایه ایجاد می‌نماید. لذا راهبرد جدید، استفاده از روش رشد سریع می‌باشد. این روش رسوب‌دهی، تولید نانولوله کربنی حاصل را تضمین می‌کند زیرا رشد نانولوله‌ها سریع‌تر از رشد محصولات جانبی نامطلوب است. بنابراین می‌توان گفت حذف فرایندهای هزینه‌بر، زمان‌بر و اغلب مخرب در تخلیص نانولوله‌ها به معنی دسترسی به نمونه‌هایی با درجه‌ای از خلوص کربن است که می‌توانند در زمینه‌های مختلفی از جمله زیست‌شناسی، شیمی و تحقیقات مغناطیسی و ادوات گسیل میدانی که خلوص نانولوله‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد به کار روند.

### ۳) اتصال نانولوله‌ها و ایجاد رشته‌ها

از آنجا که برای بسیاری از مقاصد، نیاز به اتصال نانولوله‌ها به صورت پشت سر هم یا به صورت عمود بر هم و تشکیل آرایه می‌باشد لذا اتصال نانولوله‌ها ضروری به نظر می‌رسد. به طوری که اگر بتوان نانولوله‌های کربنی را به هم پیوند داد به موادی کامل و تمام عیار دست می‌یابیم. اما برای ایجاد این اتصالات بین لوله‌ها باید پیوندهای کربنی بین لوله‌ای ایجاد کرد.

دو روش ایجاد رشته‌هایی از نانولوله‌ها عبارتند از معلق ساختن نانولوله‌ها در مایع و عبور جریان از آن به منظور ردیف ساختن نانولوله‌ها و دوم استفاده از جریان گاز هیدروژن برای ردیف کردن نانولوله‌ها به طوری که آن‌ها به شکل بخاری از اتم‌های کربن درآیند. دانشمندان معتقدند که امروزه استفاده از آرایه‌های منظم نانولوله‌های مجزا جای استفاده تصادفی از نانولوله‌های متراکم و توده‌ای را گرفته است.

#### ۴) جلوگیری از توده‌ای شدن نانولوله‌ها

اگر نانولوله‌ها به آسانی در محلول غوطه‌ور شوند، به آسانی می‌توانند قابلیت عظیم خود را در الکترونیک و مواد به نمایش گذارند، اما این استوانه‌های کربنی به شدت نامحلول بوده و تمایل به دسته شدن با همدیگر در رشته‌های کروی کنترل ناپذیر دارند؛ لذا مانع از دستیابی به بسیاری از این کاربردها می‌شوند.

دانشمندان روش‌هایی را برای جداسازی ارائه کرده اند، مثلاً با یک نیروی قوی (لوله‌ها با امواج مافوق صوت در فرایندی موسوم به اختلاط صوتی از هم جدا می‌شوند) یا با استفاده از گروه‌های شیمیایی آلی بزرگ که از چسبیدن نانولوله‌ها به یکدیگر جلوگیری می‌کنند. همچنین با استفاده از مواد شیمیایی شوینده‌های غیرصابونی نیز توانسته اند نانولوله‌ها را از هم جدا کنند.

از دلایلی که برای به هم چسبیدن این نانو لوله‌ها ارائه شده، وجود نیروهای واندروالس بین اتم‌های کربن می‌باشد. نانولوله‌ها به واسطه نیروی واندروالس که نیروی جاذبه الکتروستاتیک طبیعی بین اتم‌ها و مولکول‌های بدون بار است، از انتها به یکدیگر متصل می‌شوند، بارها مثبت و منفی اتم‌ها و مولکول‌ها که با هم برابر اما از یک بخش به بخش دیگر تغییر می‌کنند، منجر به نیروی جاذبه‌ای بین اتم‌ها و مولکول‌های مجاور می‌شوند.

#### ۵) چگونگی حفظ نانولوله‌ها بعد از فراوری

حفظ نانولوله‌ها بعد از فراوری بسیار مشکل است. تا به حال محیط انتخابی، محلول‌های متشکل از ماده پاک کننده و آب بوده است که حاوی کمتر از ۱ درصد حجمی نانولوله‌های پراکنده بوده و به وسیله محلول‌های پلیمری فراوری شده اند؛ چنین غلظت‌هایی برای استفاده در فرایندهای صنعتی به منظور ساخت الیاف‌های نانولوله‌ای بزرگ، بسیار پایین هستند. ضمناً دانشمندان هیچ راهی برای زدودن تمامی صابون و پلیمر و تبدیل نانولوله به شکل خالص پیدا نکرده‌اند. همچنین برای تولید مواد ماکرومقیاس از نانولوله‌ها، در فرایندهای

شیمیایی نیز باید از مایعی استفاده کرد که بتواند محلولی با غلظت بالا از نانولوله‌ها به وجود آورد. گروه پاسکوئالی در دانشگاه رایس معتقدند که سوپر اسیدها (حاوی ۱۰ درصد وزنی از نانولوله‌های خالص) می‌توانند در تهیه الیاف‌ها و ورقه‌های نانولوله‌ای ماکرومقیاس با استفاده از روش‌های کاملاً مشابه با روش‌هایی که در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد به کار گرفته شوند.

## ۶) کنترل رشد نانولوله‌ها

آن چیزی که در کنترل رشد مورد اهمیت می‌باشد این است که چگونه بتوانیم نانولوله‌هایی با شکل و ویژگی‌های دلخواه تولید کنیم. از آنجا که نانولوله‌ها هنگام تولید به صورت تک جداره یا چند جداره تشکیل می‌شوند و انتهای آن‌ها نیز بسته یا باز است، همچنین دارای طول و قطر یکنواخت نمی‌باشند و تعدادی از نانولوله‌ها رسانا و تعدادی غیررسانا هستند، لذا روشی برای کنترل دقیق نانولوله‌ها و تولید یک نوع محصول خاص از آن وجود ندارد. روش‌هایی که دانشمندان تا حالا ارائه کرده اند مربوط به جداسازی این مواد بعد از تولید (مثلاً روش‌های جداسازی نانولوله‌های رسانا از نیمه‌رسانا یا روش‌های بریدن نانولوله‌ها و هم اندازه کردن آن‌ها) بوده است، لذا تولید یک نانولوله با خواص کنترل شده را به صورت یک رویا باقی گذاشته‌اند. عمده‌ترین کاوش‌ها در کنترل رشد نانولوله‌ها را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

1) سنتز خوشه‌های کاتالیزوری مولکولی با شکل و ابعاد مشخص با دقت اتمی؛

2) رشد آرام؛

3) سنتز کاتالیزوری در دمای پایین؛

4) توسعه رشد برنامه‌ریزی شده با امکان کنترل زیاد اندازه و جهت نانولوله‌ها، سنتز پیچیده و سازماندهی شده شبکه با آرایه‌هایی از نانولوله‌ها روی مواد درشت مقیاس.

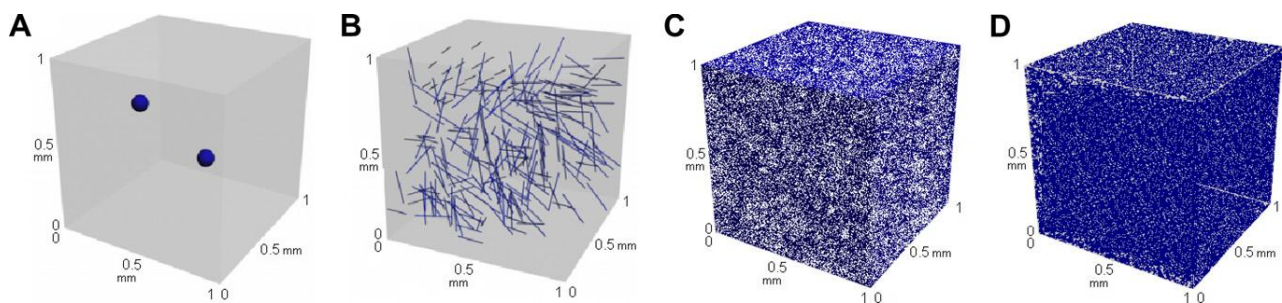
بررسی‌های نظری در کنار کارهای آزمایشگاهی مسیرهای نوینی را برای دیگر پژوهشگران به منظور ایجاد مواد و فناوری‌های جدید با نانولوله‌ها فراهم خواهد آورد لذا راهبردهای کارکردی‌سازی نانولوله‌های کربنی برای دسترسی به این کاربردها بسیار حیاتی است، به ویژه توسعه برای کارکردی‌سازی نانولوله‌ها به صورت غیرکوالان، به منظور استفاده از خواص الکترونیکی و مکانیکی آن‌ها، ضروری به نظر می‌رسد. لذا برای ساماندهی و دستکاری نانولوله‌ها در مقیاس نانو، لازم است تمامی ابزارهای موجود جهت افزایش کارایی مواد و وسایل به کار گرفته شود. یکی از ابزار، شیمی تحلیلی، خصوصاً مدل‌سازی مولکولی و شبیه‌سازی است. محدودیت‌های آزمایشگر در مقیاس نانو زمانی آشکار می‌شود که شگفتی جهان دانشمندان نظری وارد عمل شود. در اینجا هنگامی که دانشمندان قصد قرار دادن هر یک از اتمها را در محل مورد نظر دارند قوانین کوانتوم وارد صحنه می‌شود. لذا برای تسریع در عمل تولید نانولوله‌ها لازم است شیمی‌دانها نیز مانند تجربی‌کاران وارد عرصه شوند، چرا که شیمی‌دانها می‌توانند با انجام آزمایش‌ها به وسیله رایانه، احتمال فعالیت‌های غیر موثر را از بین ببرند و گستره احتمالی موفقیت‌های آزمایشگاهی را وسعت دهند، نتیجه نهایی این امر کاهش اساسی در هزینه‌های آزمایشگاهی (مانند مواد، انرژی، تجهیزات) و زمان است.

## فصل دوم: پراکنده کردن نانو لوله ها در محلول

### ۱-۲ پراکنده کردن نانو لوله ها

تحقیقات زیادی برای پراکنده کردن نانو لوله ها انجام شده هر چند بعد از یک دهه تحقیقات، پتانسیل کامل کاربرد نانو لوله های کربنی محدود است که این امر به علت مشکلات مربوط به پراکنده کردن نانو لوله ها در محلول است. پراکنده کردن نانو لوله های کربنی از پراکنده کردن فیلر های معمول مشکل تر است چون نانو لوله های کربنی قطری در مقیاس نانو و نسبت ظاهری بالا دارند و بنابراین سطح مقطع بسیار زیاد دارند.

شکل زیر تعداد ذرات متناظر در یک فیلر<sup>۱</sup> در کسر حجمی ۰.۱ در ابعادی به اندازه یک میلی متر مکعب شامل فیلر های  $Al_2O_3$ ، فیبر های کربنی، نانو صفحه های گرافیتی و نانو لوله های کربنی را مقایسه می کند. چون تفاوت زیادی در ابعاد و هندسه این چهار ماده وجود دارد تعداد فیلر های شامل یک کسر حجمی فیلر بسیار متنوع خواهد بود. برای مثال در مورد  $Al_2O_3$  فقط دو مولکول  $Al_2O_3$  در یک میلی متر مکعب وجود دارد ولی در مورد فیبر های کربنی این تعداد به دو بیست هزار عدد افزایش می یابد و در همان کسر حجمی در یک میلی متر مکعب بیش از ۴۴۲ میلیون قطعه نانو لوله کربنی وجود دارد.

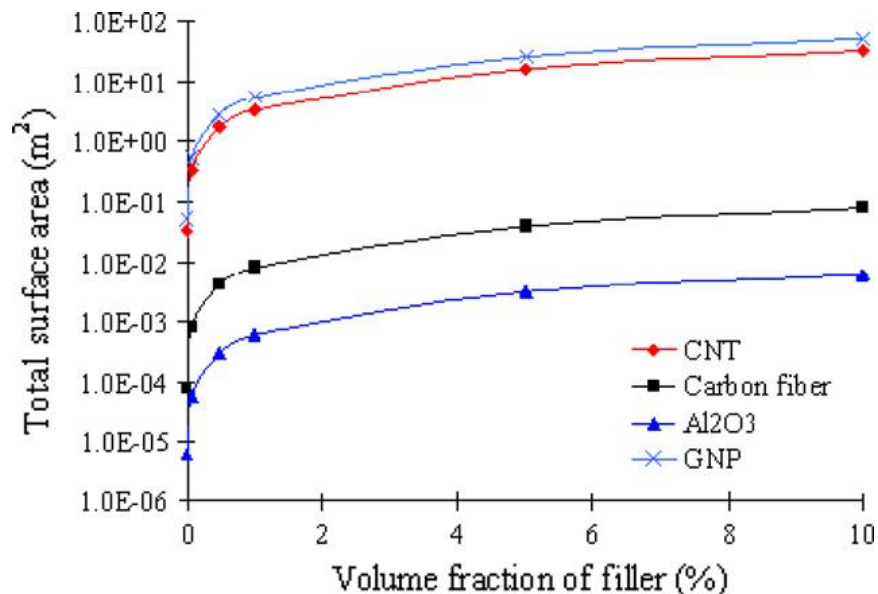


شکل ۱-۲ تعداد ذرات متناظر در فیلر های (A)  $Al_2O_3$ ، (B) فیبر های کربنی، (C) نانو صفحه های گرافیتی، (D) نانو لوله کربنی [2]

<sup>1</sup> Filler

توزیع سه بعدی این پرکننده ها در مقیاس نانو در ماتریکس پلیمری به صورت تصویری در شکل ۱-۲ نشان داده شده است که یک دیدگاه واضح در مورد رفتار های متفاوت توزیع ذرات در ماتریکس بر اساس تاثیرات اندازه و هندسه ذرات نشان می دهد. توزیع ذرات فیلر در مقیاس میکرو (شکل ۱-۲ قسمت A و B) در سراسر ماتریکس به صورت همگن پراکنده شده اند و ذرات منحصر در ماتریکس می توانند به آسانی از هم تفکیک داده شوند. اگرچه نانو لوله های کربنی و نانو صفحه های گرافیتی در ماتریکس ها با ابعاد یکسان توزیع می شوند اما پراکنده کردن ذرات به صورت یک پارچه بسیار سخت است (شکل ۱-۲ قسمت C و D). با توجه به انباشتگی ذرات و برهمکنش های الکترو استاتیک و نیرو های وان در والسی بین ذرات می توان نتیجه گرفت که توزیع ذرات فیلر در مقیاس نانو باید پیچیده تر از حالتی باشد که در زیر نشان داده می شود.

اندازه بزرگ ذرات و تاثیرات اندازه ذرات سبب می شود که ذرات در مقیاس نانو به صورت استثنایی سطحی بزرگ داشته باشند. شکل ۲-۲ به صورت تئوری سطح ذرات فیلر را به صورت تابعی از کسر حجمی ذرات فیلر باین فرض که ذرات فیلر به صورت یکپارچه در مخلوط پراکنده شده اند رسم کرده است.

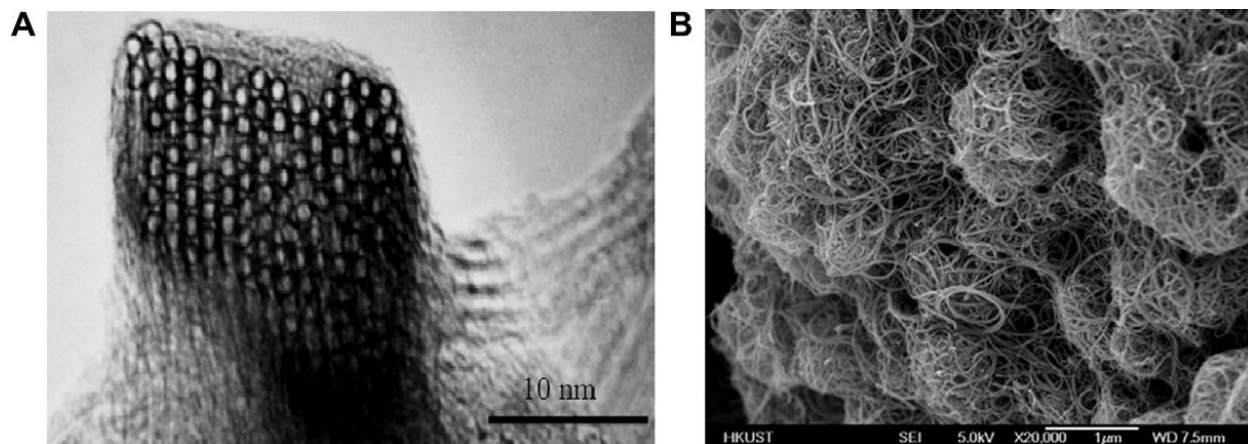


شکل ۲-۲ نسبت سطح ذرات به کسر حجمی ذرات [2]

برای فیلر های با اندازه کوچکتر از 100nm مثل نانو لوله های کربنی و نانو لوله صفحه های گرافیتی سطح به صورت موثری بیشتر از ذرات با اندازه میکرو متر مثل  $Al_2O_3$  و فیبر های کربنی می باشد. سطح ذرات نانو لوله های کربنی در حدود ۵۰۰ برابر سطح  $Al_2O_3$  است. به طور مثال کل سطح برای  $Al_2O_3$  و ذرات نانو لوله های کربنی با درصد حجمی ۰.۱٪ در مربعی به اندازه یک میلی به ترتیب  $6 \times 10^{-8}$  و  $9.8 \times 10^{-5}$  متر مربع است. سطح مقطع زیاد فیلر ها به معنی سطح تماس بزرگتر بین ذرات پر کننده و ماتریکس است. یک تعریف قدیمی از سطح تماس در ترکیب به این صورت است که مقدار سطح شکل گرفته به وسیله یک مرز مشترک بین ذرات فیلر و ماتریکس که در برخورد و نگهداری پیوند ها در بین دو قسمت برای انتقال بار الکتریکی است. در مقابل فاز مشترک به عنوان ناحیه ای که دگرگونی شیمیایی دارد مثل تغییر در تحرک زنجیر پلیمری، تغییر در متبلور شدن که به صورت منحصر به فرد مربوط به فیلر، و یا ماتریکس است تعریف می شود. ضخامت فاز مشترک در ترکیبات فیبر معمولی شامل کربن یا فیبرهای شیشه ای اندازه ای در حدود یک میکرون یا کمتر دارند. در حالی که اندازه فاز مشترک بین مخلوط ماتریکس پلیمری و نانو لوله های کربنی به بزرگی 500nm بر اساس اندازه و ابعاد فیلر گزارش شده است.

علاوه بر تاثیرات اندازه فیلر ویژگی های فیزیکی ذرات نیز نقش مهمی در پراکنده کردن آنها در ماتریکس پلیمری بازی می کند. نانو لوله های تولید شده که به صورت دسته ای یا به صورت توده ای هستند شامل ۵۰ تا کمتر از ۱۰۰ نوع نانو لوله کربنی متفاوت است که به وسیله پیوند های وان در والسی به هم متصل شده اند. شکل 2-3 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از دسته های نانو لوله های کربنی و توده های آنها را نشان می دهد.





شکل ۲-۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از دسته ها و توده های نانو لوله های کربنی [2]

پراکنده کردن نانو لوله های کربنی فقط یک مشکل هندسی نیست بلکه این مشکل در مورد طول و اندازه نانو لوله های کربنی است، اما همچنین به روشی که می تواند نانو لوله منحصر به فردی را از توده نانو لوله های کربنی جدا می کند و آن را در ماتریکس پلیمری پایدار نماید و مانع تجمع مجدد آن شود بستگی دارد.

## ۲-۲ پراکنده کردن مکانیکی نانو لوله های کربنی

همان طور که قبلا بحث شد به هم پیوستن نانو لوله های کربنی در ماتریکس پلیمری سبب می شود که مقدار بسیار زیادی از ذرات با سطح مقطع زیاد در اطراف یکدیگر تشکیل توده دهند و در نتیجه پراکنده کردن آنها به صورت یکنواخت بسیار سخت شود. برای پراکنده کردن نانو لوله ها چندین روش وجود دارد.

### ۲-۲-۱ امواج فوق صوتی

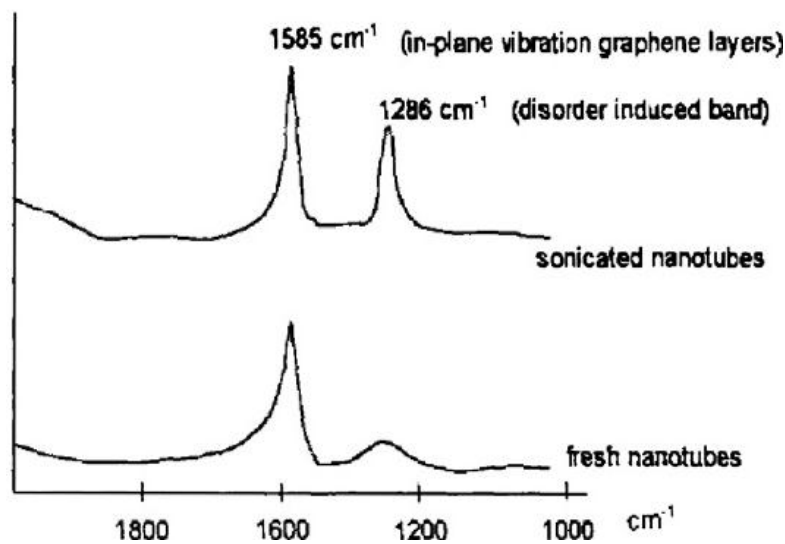
استفاده از انرژی امواج فوق صوتی برای تحریک کردن ذرات به منظور های مختلفی انجام می شود. به طور معمول در آزمایشگاه ها از حمام های امواج صوتی (شکل ۲-۴) به عنوان مولد امواج صوتی استفاده می شود. این روش یکی از پر کاربردترین روش های است که برای پراکنده کردن ذرات در مقیاس نانو استفاده می می شود. اساس این روش این است که وقتی گستره ای از امواج فوق صوتی به یک سری توده برخورد می کنند، امواج ضعیف تر برای توده های مولکولی محیطی ایجاد می کنند که با عبور از این محیط نانو ذره های موجود در قشر خارجی توده پراکنده می شوند.



شکل ۲-۴ حمام امواج فوق صوتی [3]

استفاده از امواج فوق صوتی یک روش موثر برای پراکنده کردن نانو لوله های کربنی در محلول های که ویسکوزیته پایین دارند مثل آب، استون و اتانول مناسب است. بیشتر پلیمر ها به صورت جامد بوده و یا ویسکوزیته بالایی در حالت مایع دارند به همین دلیل لازم است برای پلیمر های جامد آنها را در یک حلال حل کرد و برای پلیمر های مایع آنها را رقیق نمود تا بتوان نانو لوله های کربنی را در آنها پراکنده کرد.

به صورت استاندارد امواج فوق صوتی (در یک حمام آب گرم) در محدوده 20-23KHz با قدرتی کمتر از 100W اعمال می شوند. اگر امواج فوق صوتی با قدرت بالا و یا مدت زمان طولانی اعمال شود این امر می تواند سبب آسیب دیدن نانو لوله های کربنی شود. اسپکتروسکوپی رامان (شکل 2-5) تایید می کند که اعمال امواج فوق صوتی به نانو لوله های کربنی برای یک مدت طولانی سبب یک افزایش چشم گیر در نوار D (نشان دهنده بی نظمی کربن های  $sp^3$  در نانو لوله های کربنی) که سبب ایجاد نقص در سطح نانو لوله های کربنی می شود. در موارد بسیار شدید لایه های گرافن مربوط به نانو لوله های کربنی به طور کامل از بین رفته و نانو لوله ها به نانو فیبر های کربنی بی نظم تبدیل می شوند. آسیب های موضعی به نانو لوله های کربنی سبب از بین رفتن خواص مکانیکی و الکتریکی مخلوط نانو لوله ها و پلیمر می شود.



نمودار 2-5 طیف رامان نانو لوله ها بعد از اعمال امواج فوق صوتی [3]

## ۲-۳ عامل دار کردن نانو لوله ها

کاربرد های مخلوط نانو لوله های کربنی و پلیمر ها به نحوه پراکندگی نانو لوله های کربنی در ماتریکس و برهمکنش ها در سطح مشترک بین نانو لوله های کربنی و پلیمر بستگی دارد. اتم های کربن موجود در سطح نانو لوله ها به علت وجود پیوند های آروماتیک از نظر شیمیایی پایدارند، در نتیجه نانو لوله ها خنثی بوده و عمدتاً توسط برهمکنش های وان در والسی اطراف ماتریکس را احاطه می کنند و در نتیجه نمی توانند کارایی لازم را برای انتقال بار الکتریکی در طول سطح مشترک ماتریکس و نانو لوله کربنی را داشته باشند. بنابراین تلاش های زیادی در زمینه بهبود روش های اصلاح کردن سطح نانو لوله های کربنی انجام شده است. تا کنون بر اساس مطالعات انجام شده تغییرات و اصلاحات زیادی در سطح نانو لوله های کربنی انجام شده است و در بین این روش ها تعداد زیادی از فرآیند ها و مواد متغییر وجود دارد که بهینه شده اند. به علاوه نگرانی های مربوط به تغییر ساختار نانو لوله ها به علت عامل دار کردن شیمیایی نانو لوله ها و تاثیرات تخریبی امواج فوق صوتی و دیگر روش های پراکنده کردن و ترکیب کردن فرآیند ها هنوز وجود دارد.

## ۲-۳-۱ عامل دار کردن شیمیایی نانو لوله های کربنی

عامل دار کردن شیمیایی بر اساس پیوند های کووالانسی موجود در ساختار نانو لوله های کربنی است. این امر توسط قسمت های انتهایی لوله و یا بخش های جانبی انجام می شود. عامل دار کردن شیمیایی دیواره های نانو لوله ها همزمان با تغییر هیبریداسیون از  $sp^2$  به  $sp^3$  و همزمان با از بین رفتن سیستم مزدوج پیوند  $\pi$  بر روی لایه گرافن است. این فرآیند می تواند توسط انجام واکنش با یک مولکول با فعالیت شیمیایی زیاد مثل فلور انجام شود. نشان داده شده که فلور دار کردن نانو لوله های کربنی تک دیواره در دمای بالاتر از  $325^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد رخ می دهد و این فرآیند برگشت پذیر است و می توان با استفاده از هیدرازین بدون آب فلور را برداشت. نانو لوله های کربنی فلور دار شده یک پیوند C-F دارند که این پیوند ضعیف تر از پیوند های مشابه در آلکیل فلوراید ها بوده و بنابراین یک بخش قابل تعویض برای عامل دار کردن شیمیایی ایجاد می کند. جایگزینی اتم فلور با آمین، آلکیل و گروه های هیدروکسیل به صورت موفقیت آمیز انجام شده است. علاوه بر فلور دار کردن دیواره نانو لوله ها روش های مشابه دیگری شامل حلقه زایی مثل واکنش دیلز آلدرا، افزایش کاربن، کلر دار کردن، برم دار کردن، هیدروژن دار کردن در سال های اخیر با موفقیت انجام شده است. تمام این روش ها از دسته روش های مشتق سازی به منظور عامل دار کردن شیمیایی دیواره نانو لوله های کربنی محسوب می شوند.

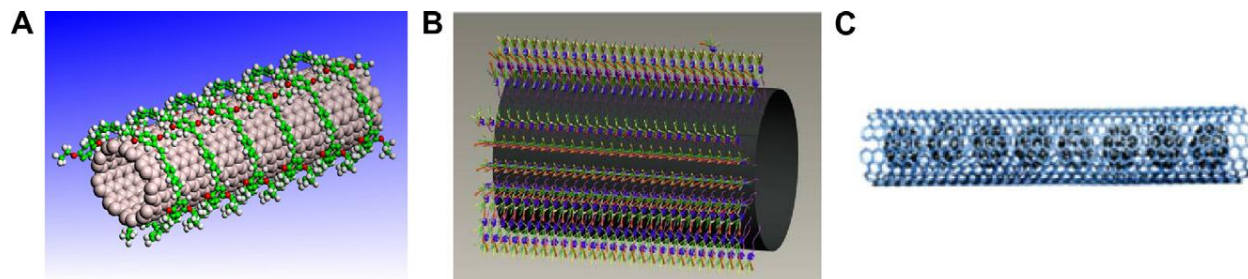
کاهش دادن گروه های عاملی روش دیگری برای عامل دار کردن کووالانسی نانو لوله های کربنی است. این فرآیند ویژگی های تغییر شیمیایی بخش های کاهش پذیر نانو لوله های کربنی را می گیرد. بخش های قابل کاهش در دیواره های پنج گوش یا هفت گوش و به صورت بی قاعده در بدنه گرافن های شش گوش می توانند به عنوان یک انتهای باز و یا حفره عمل کنند. بخش های اکسیژن دار شده نیز می توانند به عنوان بخش های قابل کاهش عمل کنند. بخش های قابل کاهش می توانند بر روی دیواره نانو لوله های کربنی به خوبی در انتهای باز نانو لوله های کربنی به وسیله فرآیند اکسیژن دار کردن به وسیله اسید های قوی مثل  $\text{HNO}_3$  و یا  $\text{H}_2\text{SO}_4$  یا

یک مخلوط از آنها یا به وسیله اکسید کنند های قوی مثل  $\text{KMnO}_4$  ، اوزون و یا پلاسمای فعال شده ایجاد شوند. بخش های قابل کاهش ایجاد شده به وسیله اکسید کننده های قوی از طریق برقراری پیوند با گروه های کربوکسیلیک یا هیدروکسیل پایدار می شوند. این گروه های عاملی از نظر شیمیایی فعال بوده و به این ترتیب نانو لوله ها می توانند در واکنش های شیمیایی بیشتری مثل گرافیت پلیمری، استری شدن، تیول دار شدن، سیلان دار شدن، آلکیلاسیون و آریلاسیون و حتی بعضی زیست مولکول ها شرکت کنند. نانو لوله های کربنی عامل دار شده از این طریق در بسیاری از حلال های آلی قطبی قابل حل می شوند چون خاصیت آب گریزی ذاتی این نانو لوله ها به علت عامل دار شدن با گروه های قطبی به خاصیت آب دوستی تبدیل می شود. نانو لوله های کربنی با گروه های عاملی شیمیایی می توانند پیوند های سطحی خیلی قوی با بیشتر پلیمر ها ایجاد کنند.

## ۲-۳-۲ عامل دار کردن فیزیکی نانو لوله های کربنی

عامل دار کردن نانو لوله های کربنی از طریق برقراری پیوند کووالانسی می تواند گروه های عاملی مفیدی را بر روی سطح نانو لوله های کربنی قرار دهد اما دو مشکل عمده دارد: اول این که در طول واکنش های عامل دار کردن به خصوص در فرآیند مخرب اعمال امواج فوق صوتی، تعداد زیادی از نقص های غیر قابل اجتناب بر روی دیواره نانو لوله های کربنی ایجاد می شود، و در بعضی موارد خاص نانو لوله ها به قطعات کوچکتری شکسته می شوند. این آسیب ها سبب کاهش خواص مکانیکی نانو لوله ها می شود و نیز سبب از بین رفتن سیستم  $\pi$  در نانو لوله ها می شوند. از بین رفتن سیستم  $\pi$  در نانو لوله سبب نقص در بخش های پراکنده کردن الکترون و فنون ها که به ترتیب مسئول هدایت گرمایی و الکتریکی نانو لوله های کربنی هستند و در نتیجه باعث کاهش خواص هدایتی گرمایی و الکتریکی نانو لوله های کربنی می شود. دوم اینکه اغلب اسید های غلیظ و یا اکسید کننده های قوی که برای عامل دار کردن شیمیایی نانو لوله ها به کار برده می شوند برای نانو لوله های کربنی از نظر محیطی قابل ترکیب نیستند. بنابراین تلاش های زیادی برای بهبود بخشیدن به روش ها به منظور کاهش هزینه ها و آسیب کمتر رساندن به ساختار نانو لوله های کربنی انجام شده است.

عامل دار کردن غیر کووالانسی یک روش پیشنهادی برای تغییر خواص سطح نانو لوله ها است سوسپانسیون نانو لوله ها در حضور پلیمر ها منجر به تولید کمپلکس های بزرگ از نانو لوله ها می شود که توسط مولکول های پلیمری احاطه شده اند. این یک مثال عمومی از عامل دار کردن نانو لوله ها به روش غیر کووالانسی است. (شکل ۲-۶ قسمت A) فرآیند پوشیده شدن توسط پلیمر ها از طریق بر همکنش های وان در والسی و پیوند  $\pi$ - $\pi$  برگشتی بین نانو لوله های کربنی و زنجیر پلیمری که شامل حلقه های آروماتیک است را نشان می دهد.



شکل ۲-۶ عامل دار کردن غیر کووالانسی نانو لوله ها<sup>[1]</sup>

در کنار پلیمرها سورفکتانتها نیز برای عامل دار کردن غیر کووالانسی نانو لوله های کربنی نیز به کار برده می شوند (شکل ۲-۶ قسمت B) جذب سطحی سورفکتانتها بر روی نانو لوله های کربنی تمایل سطح نانو لوله ها را به جذب کاهش می دهد و به طور موثری مانع تشکیل تجمعات نانو لوله های کربنی می شود. نانو لوله های کربنی که توسط سورفکتانتها احاطه شده اند به وسیله نیروهای دافعه فضا-الکترونی بر جاذبه وان در والسی بین مولکولی غلبه کنند. بازده این روش به شدت به خواص سورفکتانت، محیط شیمیایی و ماتریس پلیمری وابسته است. برای پراکنده کردن نانو لوله های کربنی در ماتریکس پلیمرهای قابل انحلال در آب مثل پلی پرو پیلن سورفکتانت های غیر یونی مناسب می باشند. سورفکتانت های غیر یونی از طریق برقراری برهمکنش های قوی از نوع آب گریز بین سطح نانو لوله و گروه های دم آب گریز سورفکتانت، نانو لوله های کربنی را احاطه می کنند.

یک روش غیر کووالانسی دیگر برای عامل دار کردن نانو لوله ها استفاده می شود روش اندو هدرال<sup>1</sup> نامیده می شود. (شکل ۲-۶ قسمت C) حدس زده می شود که در این روش اتم ها یا مولکولها توسط اثر موئینگی به حفره داخل نانو لوله های کربنی وارد می شوند. ورود از طریق بخش های باز در انتها یا بر روی دیواره صورت می گیرد. ورود نانو ذرات معدنی مثل نقره، طلا و پلاتین به داخل نانو لوله های کربنی از جمله مثال های معمول عامل دار کردن اندو هدرال است. زیست مولکول های مثل پروتئین ها و DNA، می توانند به وسیله

<sup>1</sup> Endo hedral



جذب سطحی ساده در شبکه های خالی درونی نانو لوله قرار گیرند. ترکیب کردن نانو لوله های کربنی با مولکول ها و اتم های ذکر شده برای ترکیب کردن خواص دو جز به منظور استفاده در کاتالیست ها، ذخیره انرژی، نانو تکنولوژی ها و ابزار ها در مقیاس مولکولی مفید است

## ۲-۴ کامپوزیت‌های پلیمر/نانولوله کربنی

امروزه کامپوزیت‌های پلیمر/نانولوله کربنی در حوزه‌های مختلفی مانند تجهیزات ورزشی، اتومبیل و وسایل الکترونیکی کاربرد دارند. رشد بازارهای جدید و قدیم در این حوزه به پارامترهای زیادی از قبیل افزایش اطلاعات در زمینه روش‌های تولید و کاهش هزینه‌های مربوطه بستگی دارد به‌طور مثال کاهش قابل توجه قیمت انواع گریدهای نانولوله کربنی در رشد بازارهای موردنظر بسیار موثر است. کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی بر پایه نانولوله کربنی شانس بیشتری برای به‌دست آوردن سهم بازار را دارند زیرا این کامپوزیت‌ها خواص همگنی از خود نشان می‌دهند. سنگینی ویژه (چگالی ویژه) به‌همراه خواص مکانیکی و فرآیندپذیری خوب این کامپوزیت‌ها از جمله خواص و ویژگی‌های برتر آنها به شمار می‌آید. رسانایی الکتریکی کامپوزیت‌های پلیمر/نانولوله کربنی ناشی از شبکه پیوسته افزودنی است و پارامترهای مختلفی چون تغییرات درجه حرارت، تغییر شکل‌های مکانیکی، حضور گازها و بخارها و حلال‌ها می‌توانند رسانایی الکتریکی را تحت تأثیر قرار دهند.

با توجه به توضیحات داده‌شده در بالا، به‌نظر می‌رسد که کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی بر پایه نانولوله کربنی، کاندیدای مناسبی برای طراحی کامپوزیت‌های هوشمند که برای مانیتورینگ مورد استفاده قرار می‌گیرند، باشند.

در اولین فعالیت تحقیقاتی که در حوزه کامپوزیت‌های هوشمند انجام شده است از کربن بلاک<sup>۱</sup> استفاده شده است و اهمیت این موضوع که کامپوزیت‌های پلیمری رسانا به تغییرات خارجی حساس هستند، به‌خوبی شناخته شده است. پارامترهای مختلفی از قبیل حضور مایعات و بخارها به‌شدت حساسیت الکتریکی کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی را تغییر می‌دهد. در سال ۱۹۹۰ جهت‌گیری تعداد زیادی از تحقیقات به‌سمت به‌کارگیری نانولوله‌های کربنی به‌عنوان ماده افزودنی در کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی معطوف شد.

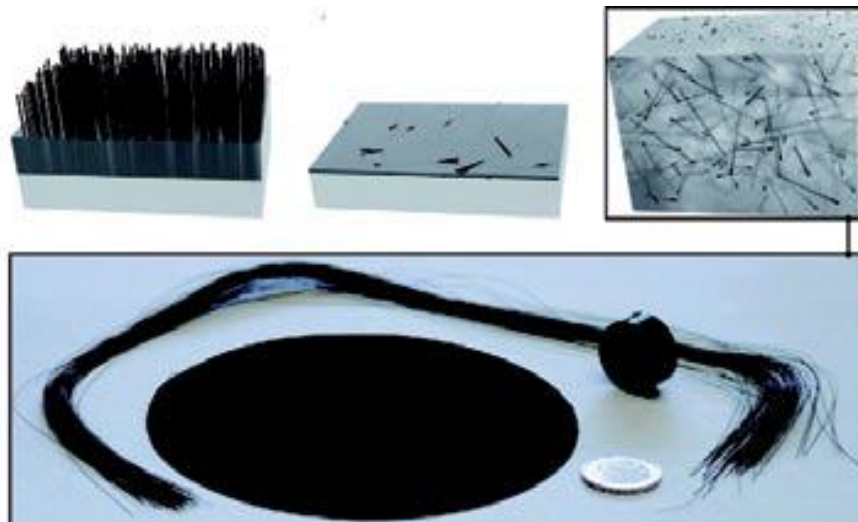
---

<sup>1</sup> CB

یکی از فواید به‌کارگیری نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت‌ها، آستانه نفوذ پایین آنها است که به نسبت بالای طول/قطر (نسبت صفحه‌ای) آن مربوط می‌شود و این نسبت تا ۱۰۰۰ نیز می‌رسد. بنابراین کامپوزیت‌های پلیمر/نانولوله کربنی، استحکام مکانیکی، سفتی بالا و رسانایی الکتریکی بالایی را در غلظت‌های کم نانولوله‌های کربنی از خود نشان می‌دهند.

#### ۲-۴-۱- طراحی مفهومی و توانایی‌ها (قابلیت‌ها)

در سال‌های قبل طراحی‌های مختلفی از کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی حاوی نانولوله‌های کربنی پیشنهاد شده است.



شکل ۲-۷ طراحی‌های مختلف کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی حساس و آرایه‌های مختلف نانولوله‌های کربنی. (آ) نانولوله‌های کربنی که به‌طور جزئی در ماتریس پلیمر تعبیه شده‌اند. (ب) سبستریت پلیمری پوشیده شده با نانولوله‌های کربنی، (پ) نانولوله‌های کربنی که به‌طور کامل در ماتریس پلیمری تعبیه شده‌اند، (ت) اشکال مختلف کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی حساس (الیاف، صفحه قالب‌گیری شده به روش قالب‌گیری فشاری، استوانه‌ای و یک سکه دو یورو برای مقایسه اندازه سائز)<sup>[12]</sup>

در شکل ۲-۷-ب، نانولوله‌های کربنی در قسمت‌های متراکم و در روی سطح پلیمر یا الیاف آرایش یافته‌است و شکل ۲-۷-پ، نانولوله‌های کربنی که به‌طور کامل در ماتریس پلیمر تعبیه شده است را نشان می‌دهد. یکی از روش‌های تولید سنسورهای فیلم نازک و یا سنسورهای مونتاژی لایه به‌لایه، قالب‌گیری محلول از پلیمر-نانولوله کربنی پراکنده شده در حلال‌های خوب است. از این قبیل روش‌ها (پراکندگی محلولی) می‌توان، برای اشباع کردن پارچه‌های نارسا و یا قسمت‌های پلاستیکی با پوشش کامپوزیت پلیمری رسانای الکتریکی حساس، استفاده کرد.

در مورد فرآیندپذیری کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی حساس در مقیاس بالا، نانولوله‌های کربنی که به‌طور کامل در ماتریس تعبیه شده‌اند، پتانسیل بالایی را نشان می‌دهند (با به‌کارگیری این مواد امکان استفاده از تکنیک‌های مقرون به‌صرفه و تکنیک‌های فرآیند ذوب نیز محقق می‌شود) که عبارتند از قالب‌گیری فشاری یا تزریق، قالب‌گیری دمشی و ریسندگی الیاف. به‌علاوه، در چندگانگی تکنیک‌های شکل‌دهی، کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی حاوی نانولوله‌های کربنی ممکن است در شکل‌ها و اندازه‌های مختلفی (که در شکل ۲-۷-ت نشان داده شده است) فرآیند شود. کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی حاوی نانولوله‌های کربنی در تولید الیاف نیز مفید و مثرتر هستند زیرا روزه فرآیند ریسندگی در این نوع کامپوزیت‌ها نسبت به سیستم‌های حاوی کربن بلاک، عریض‌تر است.

سازوکارشناسایی کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی، بر اساس واکنش پلیمر به تغییرات محیطی است که بر روی رسانایی الکتریکی شبکه نانولوله کربنی تأثیر می‌گذارند. پارامترهای خارجی مانند تغییر درجه حرارت، تغییر شکل‌های مکانیکی، حضور گازها و بخارها و حلال‌ها باعث تغییرات مقاومت در کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی می‌شود. برای مثال، در دماهای پایین‌تر از دمای گذار شیشه‌ای (Tg)، بین ضریب انبساط حرارتی نانولوله کربنی و ماتریس، رفتار نامتناسبی به‌وجود می‌آید و منجر به درجه حرارت‌های مثبت ضریب

مقاومت (PTC) و درجه حرارت‌های منفی ضریب مقاومت (NTC) می‌شود یعنی مقاومت کامپوزیت با تغییرات درجه حرارت، افزایش یا کاهش می‌یابد. تغییرات مقاومت به‌طور نامتناسب و به میزان بالایی در نزدیک دمای گذار شیشه‌ای شناسایی شده است.

پاسخ کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی به فشارهای مکانیکی را می‌توان به افزایش فاصله بین نانولوله‌های کربنی منفرد نسبت داد که در نهایت باعث افزایش فاصله تونلی تحت بارهای اعمال شده، می‌شود.

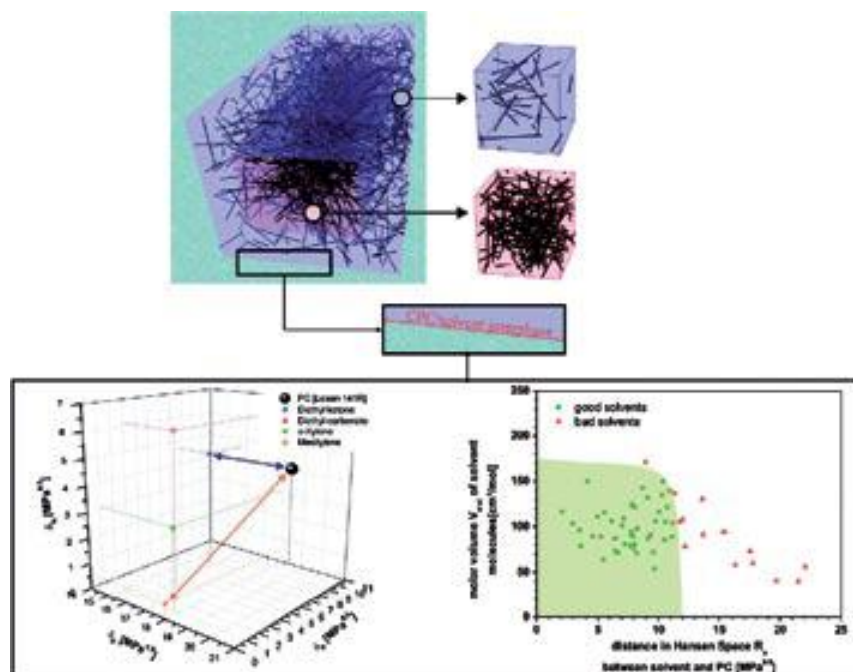
متورم شدن کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی در نتیجه تماس با بخارها آلی و یا مایعات باعث گسیختگی موضعی تماس‌های الکتریکی بین نانولوله‌های کربنی منفرد و یا نانولوله‌های کربنی به‌هم پیوسته (خوشه ای) می‌شود و باعث افزایش مقاومت الکتریکی نیز می‌گردد.

طراحی اشکال مختلف کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی و سهولت در فرآیندپذیری، باعث شده‌است تا این نوع کامپوزیت‌ها، کاربردهای مختلفی پیدا کنند.

## ۲-۴-۲. سازوکار شناسایی حلال

به کارگیری کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی به‌عنوان مواد حساس برای شناسایی حلال‌های آلی بر پایه خاصیت متورم شدن این ترکیب پلیمری استوار است. اگر حلالی بتواند به داخل ماتریس پلیمری کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی نفوذ کند، فاصله بین نانولوله-نانولوله که در مجاور هم قرار دارند، افزایش می‌یابد و باعث کاهش فاصله تونلی می‌شود. بنابراین حساسیت شبکه ماده افزودنی (فیلر) در فرآیند تورم، افزایش می‌یابد. هر چه ماتریس بیشتر متورم شود، حساسیت شبکه فیلر نیز بیشتر افزایش می‌یابد. افزایش فاصله بحرانی تونلی، که در حدود  $1/8$  نانومتر است، باعث تفکیک نانولوله‌های کربنی منفرد و همچنین نانولوله‌های خوشه‌ای از شبکه می‌شود. زمانی که بر روی تغییرات نسبی در مقاومت کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی در تماس با حلال‌های خوب بحث می‌شود، باید هر دو اثر مد نظر قرار گرفته شود.

تغییر مقاومت به جذب حجمی موضعی حلال‌ها نسبت داده می‌شود. زمانی که یک نمونه سنسور کامپوزیت پلیمری رسانای الکتریکی سه‌بعدی خشک، درون حلال قرار داده می‌شود، فرآیند تورم شروع می‌شود و در سرتاسر سطح مقطع آن، مقاومت ناهمگونی ایجاد خواهد شد. برای فیلرهای یکنواخت (هم شکل) مقاومت سنسور به شکل هندسی، نفوذ حلال و راستای فلوی (شار) جریان بستگی پیدا خواهد کرد. وابستگی زمانی در تغییر مقاومت نسبی می‌تواند با سینتیک نفوذ مولکول‌های حلال به داخل کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی مرتبط باشد.



شکل ۲-۸ سازوکار موردنظر برای تغییر نسبی مقاومت الکتریکی کامپوزیت های پلیمری رسانای الکتریکی در تماس با حلال آلی خوب، آ. پیشرفت مورفولوژی هسته-پوسته، پوسته متورم شده (آبی) و هسته خشک (قهوه ای)، به همراه خواص کامپوزیت اولیه و تغییر یافته، ب. نمودار پارامتر حلالیت هانسن، به کار گرفته شده برای توضیح برهم کنش در فضای بین سطحی کامپوزیت های پلیمری رسانای الکتریکی/حلال برای پلی کرنات با حلال های مختلف، پ. نقشه حلال که نتیجه گزینش پذیری کامپوزیت های پلیمری رسانای الکتریکی است. برای مثال: پلی کرنات [12]

مسیر نفوذ  $s(t)$ ، به طور موضعی، پوسته متورم شده را از هسته متورم شده (خشک) جدا می کند. شکل ۲-۸-آ به طور شماتیکی کامپوزیت های پلیمری رسانای الکتریکی که به طور جزئی متورم شده است را نشان می دهد. نواحی پوسته و هسته، که فاصله های شبکه نانولوله های کرنی مختلفی دارند، به وسیله ی حلال قوی از هم جدا می شوند و به وسیله ی میکروسکوپ نوری عبوری قابل رؤیت است. با متورم شدن ناحیه پوسته، ماتریس پلیمری در این موضع بسط می یابد و باعث کاهش موضعی اثر نانولوله های کرنی می گردد و در نهایت فاصله تماس نیز افزایش می یابد. رسانائی کل در نمونه به هر دو ناحیه پوسته و هسته بستگی دارد. کاهش سطح مقطع هسته در

نتیجه افزایش میزان نفوذ حلال باعث افزایش مقاومت کل در نمونه می‌شود و سرانجام با گذشت زمان مقاومت کل به حالت پایدار می‌رسد.

## ۲-۴-۳ گزینش پذیری

سازوکار پیشنهاد شده برای کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی در تماس با حلال‌های مناسب (خوب)، معتبر و قابل اطمینان است. واژه «مناسب یا خوب» برای حلال‌های خوب، به توانایی یک حلال در حل کردن یک پلیمر ویژه اطلاق می‌شود. البته این فرآیند زمان بر است و در مراحل اولیه، فرآیند متورم شدن و در مراحل بعدی فرآیند انحلال اتفاق خواهد افتاد. زمانی که حلالی نتواند ماتریس پلیمر را متورم سازد به آن حلال اصطلاح «بد» اطلاق می‌شود. واژه «خوب» به صورت اختصاصی و ویژه به سیستم پلیمر/حلال اطلاق می‌شود. به همین دلیل بیشترین اهمیت در طراحی کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی، انتخاب اجزا پلیمر برای شناسایی طیف گسترده‌ای از حلال‌های آلی قابل‌شناسایی است. تشابه در پارامترهای حلالیت مشخص می‌کند که یک کامپوزیت پلیمری رسانای الکتریکی خاص در یک حلال مشخص متورم خواهد شد که متناظر با اصل «مشابه، مشابه را حل می‌کند» است.

با استفاده از پارامترهای حلالیت هانسن<sup>۱</sup>، تشابه حلالیت پلیمر و حلال مشخص می‌شود. پارامتر حلالیت  $\delta$  (برحسب  $\text{MPa}^{0.5}$ )، که به وسیله‌ی اسکات<sup>۲</sup> و هیلدبرند<sup>۳</sup> مشخص شده است، ریشه مربع چگالی متراکم انرژی از ترکیب شیمیایی مورد نظر است. هانسن پارامتر حلالیت را بیشتر توسعه داد و با پارامترهای دیگری از قبیل پارامتر پراکندگی ( $\delta_D$ )، قطبیت ( $\delta_P$ ) و پیوند هیدروژنی ( $\delta_H$ ) فرآیند حلالیت را بسط داده و با جزئیات بیشتری توضیح می‌دهد. به‌عنوان مثال در شکل ۲-۸، یک گرید خاص از پلی‌کربنات و چهار حلال آلی را مطابق با الگوی

---

<sup>1</sup> Hansen

<sup>2</sup> Scott

<sup>3</sup> Hilderbrand



هانسن نشان داده است. نمودار سه بعدی نشان داده شده در شکل ۲-۸-ب، امکان محاسبه فاصله پارامتر حلالیت ( $R_a$ ) بین پلیمر و حلال را نشان می‌دهد که بیانگر قدرت و پیوند بر هم کنش است.

اساساً پارامتر حلالیت جزئی پلی کربنات مورد نظر در نقطه مرکز کره حلالیت با شعاع  $R_\phi$  است. حلال‌هایی که در داخل این کره قرار دارند، می‌توانند پلیمر را متورم ساخته و در نهایت آن را حل کنند. حلال‌هایی که فاصله پارامتر بحرانی بالایی دارند، قطعاً نمی‌توانند ماتریس را متورم کنند و در نتیجه تغییر مقاومت نسبی کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی در این پلیمر رخ نخواهد داد. از دیگر پارامترهایی که بر روی حلالیت پلیمرها موثر هستند می‌توان به اندازه سایز مولکول حلال و درجه حرارت اشاره داشت. مولکول‌های کوچکتر و یا با حجم مولی کمتر ( $V_{mol}$ ) با وجود اینکه فاصله در فضای هانسن زیاد است فرآیند متورم شدن را تسریع می‌بخشد. تغییر درجه حرارت بر روی حلالیت بسیار موثر است. تغییر پارامتر حلالیت هانسن پلیمرها و حلال‌ها با درجه حرارت به ضریب انبساط حرارتی بستگی دارد. پارامتر پیوند هیدروژنی از جمله پارامترهایی است که بیشتر از همه به درجه حرارت حساس است و نسبت به دیگر پارامترها با سرعت زیادی کاهش می‌یابد. در پلیمرها با افزایش درجه حرارت، شعاع کره حلالیت افزایش می‌یابد و بدین معنی است که ممکن است حلالی که نمی‌تواند پلیمر را حل کند با افزایش درجه حرارت بتواند پلیمر را حل کند و همچنین این موضوع که برای سیستم حلال/پلیمر، حلال خارج از کره حلالیت قرار دارد، صحیح است.

شکل ۲-۸-پ، نقشه گزینش‌پذیری حلال برای کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی بر پایه پلی کربنات و ۱/۵ درصد وزنی از نانولوله کربن چنددیواره را نشان می‌دهد. البته شایان ذکر است که نقشه مذکور در شرایط دمایی اتاق ترسیم شده است. گزینش‌پذیری تابعی از فاصله بین پلی کربنات و حلال در فضای سه بعدی هانسن و همچنین حجم مولی حلال است.

هر نقطه که روی نقشه ترسیم شده است، نشان‌دهنده یک حلال ویژه است. نقاط سبز مربوط به حلال‌ها است که منجر به افزایش سریع و قابل توجه مقاومت کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی می‌شود. حلال‌هایی که با

نقاط قرمز نشان داده شده‌اند منجر به تغییر مقاومت نسبی کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی نمی‌شوند. نقشه حلال‌ها، که در بالا توضیح داده شده‌است، گزینش‌پذیری کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی را مشخص و تعریف می‌کند و با مشخص کردن بعضی از نواحی بر روی نقشه می‌توان حلال‌های خوب و بد را تفکیک نمود. بنابراین پیش‌بینی تغییر مقاومت نسبی بر اساس تماس با یک حلال جدید تست‌نشده از طریق پارامتر حلالیت هانسن آن و همچنین حجم مولی امکان‌پذیر می‌شود.

پارامترهای حلالیت مربوط به پلی‌کربنات مدنظر، با استفاده از نرم افزار تجاری پارامترهای حلالیت هانسن محاسبه شده است. داده‌های این نرم افزار بر پایه داده‌های حلالیت به‌دست آمده از آزمایشات انجام شده است. در صورتی که پارامترهای حلالیت هانسن مربوط به حلال‌های آلی، از منابع علمی استفاده شده است.

## ۲-۴-۴. مشخصه‌سازی پاسخ الکتریکی

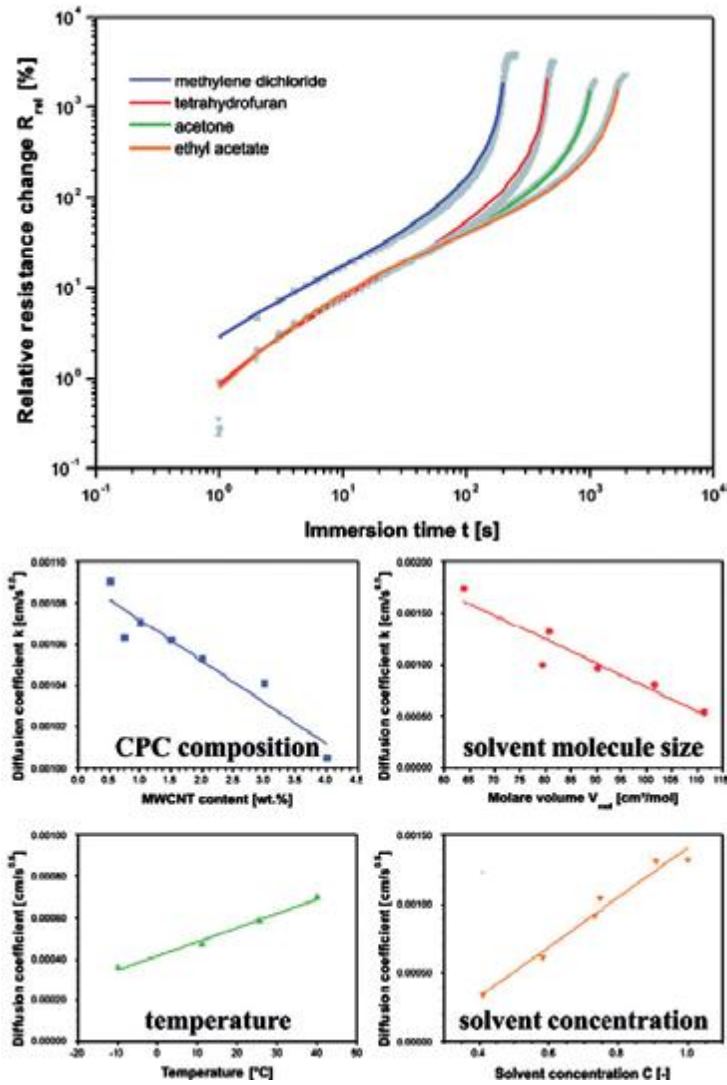
ممکن است مایعات آلی از طریق تغییر مقاومت کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی شناسایی شوند البته مایع مورد نظر باید حلال خوبی برای ماتریس پلیمر کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی باشد.

مشخصه‌سازی پاسخ الکتریکی به سنیتیک نفوذ مولکول‌های حلال مورد نظر در کامپوزیت پلیمری رسانای الکتریکی، وابسته است. شکل تغییرات مقاومت نسبی وابسته به زمان ( $R_{rel}$ ) به ضریب نفوذ ( $K$ ) مربوط می‌شود. در روش فیکیان<sup>۱</sup> در مورد انتقال مولکول حلال، پارامتر ضریب نفوذ با واحد  $\text{Cm.S}^{-0.5}$  نشان داده می‌شود. هرچه مقدار ضریب نفوذ بیشتر باشد، نفوذ حلال و همچنین سرعت تغییرات مقاومت نسبی نیز بالا است. تغییر مقاومت نسبی کامپوزیت پلی‌کربنات/نانولوله‌کربنی چنددیواره با ۱/۵ درصد وزنی نانولوله‌کربنی چنددیواره، که در حلال‌های مختلف فروروده شده، در شکل ۲-۹-آ نشان داده شده است (داده‌های آزمایشگاهی با علائم خاکستری‌رنگ نشان داده شده است).

---

<sup>1</sup> Fickian Mode

تغییرات مقاومت نسبی برای کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی مختلف نسبت به زمان غوطه‌وری، افزایش نشان می‌دهد و رفتار آنها به سه مرحله مختلف تقسیم می‌شود. مرحله اول، مرحله آغازین غوطه‌وری حلال است که به وسیله‌ی افزایش، با سرعت متوسط، تغییرات مقاومت نسبی نسبت به زمان مشخصه سازی می‌شود. این مدت زمان به نفوذ مولکول‌های حلال در داخل مواد بالک (توده ای) نسبت داده می‌شود. در مرحله دوم، افزایش ناگهانی (شارپ) تغییر مقاومت نسبی دیده می‌شود و به همگرایی حلال‌ها، که در منطقه میانی نمونه‌ها روی می‌دهد، نسبت داده می‌شود. این افزایش شارپ، بسیار زیاد است و به مقدار درصد نانولوله‌های کربنی بستگی دارد. همگرایی حلال‌ها در مرحله سوم حاصل می‌شود. در این مرحله مقدار تغییرات مقاومت نسبی به حالت پایدار می‌رسد. مدت زمانی که حالت پایدار حاصل می‌شود ( $t_p$ ) یکی از پارامترهای مهم سیستم به‌شمار می‌آید و این پارامتر در محاسبه ضریب نفوذ نیز بسیار مهم است.



شکل ۲-۹). پاسخ الکتریکی کامپوزیت های پلی کربنات/نانو لوله کربنی چند دیواره در طول غوطه ور سازی در حلال های مختلف. ب. تاثیر پارامترها بر روی ضریب نفوذ که پیشروی منحنی های تغییرات مقاومت نسبی (برای کامپوزیت های پلیمری رسانای الکتریکی شامل ۱.۵ درصد وزنی نانو لوله کربنی) را کنترل می کند. (I) تاثیر ترکیب کامپوزیت های پلیمری رسانای الکتریکی، (II) تاثیر اندازه سایز مولکول های ۶ عدد هیدروکربن هالوژنه مختلف، (III) تاثیر درجه حرارت، (IV) تاثیر غلظت حلال برای مخلوط های کلروفرمبا متانول و دی اتیل اتر [12]

پاسخ‌های الکتریکی کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی در طول زمان غوطه‌وری در حلال‌های آلی مختلف، متفاوت است. سنتیک‌های مختلفی در رابطه با سنتیک‌های مولکول‌های حلال در کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی وجود دارند. یک مدل که امکان محاسبه تغییرات مقاومت نسبی وابسته به زمان را فراهم می‌سازد، پیشنهاد شده است که در این مدل پارامترهایی از قبیل نفوذ، ویژگی‌های کامپوزیت و مقادیر هندسی مورد نظر قرار گرفته است و با پلی کربنات حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی چنددیواره نیز تطبیق داده شده است. منحنی‌های تغییرات مقاومت نسبی شبیه‌سازی شده، که با خطوط رنگی مشخص شده است، برای همان دسته از حلال‌ها در شکل 2-9 نشان داده شده است. داده‌های شبیه‌سازی شده و همچنین داده‌های آزمایشگاهی تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهند.

تغییرات مقاومت نسبی وابسته به زمان به وسیله‌ی ضریب نفوذ تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تأثیر برخی از فاکتورهای تأثیرگذار بر روی ضریب نفوذ برای کامپوزیت‌های پلی کربنات/نانولوله کربنی چنددیواره در شکل 2-9 نشان داده شده است. در شکل I-9-2 تأثیر مقدار نانولوله کربنی بر روی ضریب نفوذ برای کامپوزیت‌های پلی کربنات/نانولوله کربنی چنددیواره غوطه‌ور شده در اتیل‌استات آورده شده است. افزایش درصد نانولوله کربنی باعث کاهش ضریب نفوذ می‌گردد و شبکه‌های نانولوله کربنی به‌عنوان سدی در برابر مولکول‌های حلال عمل می‌کنند. همین روند برای اندازه سائز مولکول‌های حلال نیز صادق است و با افزایش اندازه مولکول‌های حلال، ضریب نفوذ کاهش می‌یابد. شکل II-9-2 کاهش مقدار ضریب نفوذ برای هیدروکربن‌های هالوژنه مختلف را با افزایش حجم مولی مولکول‌های حلال نشان می‌دهد. این نتایج حاکی از آن است که کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی حساس قادر هستند تا حلال‌های مختلف که در تماس با نمونه‌ها هستند را به‌وسیله‌ی پاسخ الکتریکی متفاوت از هم متمایز نمایند. قابلیت‌های کاربردی کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی حساس برای محدوده گسترده‌ای از درجه حرارت، که محدوده بالایی درجه حرارت به‌عنوان درجه حرارت کاری پلیمر است، قابل اطمینان است. محدوده پایین به‌وسیله‌ی انعطاف پذیری کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی مورد نیاز برای

کاربردهای خاص کنترل می‌شود به‌طور مثال با کاهش درجه حرارت، انعطاف‌پذیری پلیمرها کم و پلیمرها سفت‌تر می‌شوند.

همان‌طوریکه در کاربردهای صنعتی درجه حرارت تغییر می‌کند بایستی تغییر پاسخ کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی در اثر تغییر درجه حرارت مورد توجه قرار گیرد. شکل 2-9-III ضریب نفوذ وابسته به درجه حرارت را نشان می‌دهد که به‌صورت خطی با درجه حرارت افزایش می‌یابد. داده‌های مربوط به سیستم کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی/اتیل‌استات دوباره اندازه‌گیری شده است. در شکل 2-9-IV وابستگی ضریب نفوذ به غلظت حلال بررسی شده است. کاهش خطی ضریب نفوذ با کاهش غلظت حلال دیده شده است. در این منحنی، مخلوط یک حلال خوب (کلروفرم) برای پلی کربنات با حلال‌های بد متانول و دی اتیل اتر رقیق شده است. این نتایج حاکی از آن است که مایعی که به‌طور جزئی آلوده شده است قابل شناسایی است مانند آب آلوده‌شده با حلال‌های آلی.

همه نتایج ارائه‌شده بر روی پاسخ الکتریکی کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی غوطه‌ور شده در حلال‌های آلی و همچنین گستره‌ای از فاکتورهای موثر، بر پیچیدگی رفتار مواد تأکید دارند. بنابراین این پیچیدگی رفتار باعث می‌شود تا طراحی سنسورهای بر پایه کامپوزیت‌های پلیمری رسانای الکتریکی که برای شناسایی حلال‌های آلی در گستره وسیعی از درجه حرارت به‌کار برده می‌شود، با دقت بیشتری انجام شود تا سنسورهای مذکور قابلیت تفکیک حلال‌های آلی مختلف را امکان‌پذیر سازد.

## ۲-۵ روش های ساخت نانو کامپوزیت نانو لوله کربنی / پلیمر:

همان طور که قبلا ذکر شد پراکندگی نانو لوله کربنی در ماتریس پلیمری یک مسئله مهم در تهیه کامپوزیت های نانو لوله کربنی/پلیمری است. اگر از کلوخه شدن و بهم چسبیدن آنها جلوگیری شود و به خوبی پراکنده شوند اثرات بهتری از کامپوزیت های نانو لوله کربنی/پلیمری بدست می آید. در حال حاضر چندین روش برای بهبود پراکندگی نانو لوله کربنی در ماتریس پلیمری وجود دارد: محلول مخلوط<sup>۱</sup>، ذوب کردن مخلوط<sup>۲</sup>، پلیمریزاسیون در محل<sup>۳</sup>.

### (۱) محلول مخلوط

در این رویکرد یک پراکندگی از نانو لوله کربنی در حلال مناسب و پلیمر به کار می رود و کامپوزیت نانو لوله کربنی/پلیمر از طریق رسوب یا تبخیر حلال تشکیل می شود. واضح است که به درستی پخش کردن نانو لوله کربنی در حلال در هم زدن ساده، بسیار مشکل است. فرایند فراصوتی با قدرت بالا روش بسیار موثرتری برای پخش کردن نانو لوله های کربنی است. از تابش پرتوهای فراصوتی استفاده زیادی برای پراکندگی، شناورسازی، خردکردن و فعال کردن ذرات می شود. با بهره گیری از اثرات چندگانه تابش فراصوتی، کلوخه شدن و تجمعات نانو لوله های کربنی راحت تر شکسته می شود. به عنوان مثال لی اتال<sup>۴</sup> از روش ساده ای استفاده کرد، او از تکنیک رسوب دهی برای بهبود خاصیت پراکندگی نانو لوله های کربنی در محلول پلی کربنیت تحت تابش فراصوتی با فرکانس 20khz برای 10min استفاده کرد. او نشان داد که نانو لوله های کربنی به صورت یکپارچه و یکنواخت در ماتریس پلی کربنیت پخش می شوند. در این مورد تابش فراصوت نقش بسیار مهمی در تشکیل

<sup>1</sup> Solution mixing

<sup>2</sup> Melt mixing

<sup>3</sup> In situ polymerization

<sup>4</sup> Lietal

کامپوزیت با اندازه ذرات یکنواخت دارد. تاثیرات شیمیایی تابش فراصوت در مقیاس زمانی بسیار کوتاه (یک میلیونیم ثانیه) باعث فروپاشی حباب کاویتاسیون ایجاد شده در حین عبور تابش فراصوت از مایع می شود. مطالعات نشان می دهد که کاویتاسیون فراصوت میتواند دمایی در حدود 5000 K و فشاری در محدود 500 atm ایجاد کند .

صفری و همکارانش نانو لوله های چند لایه را در پلی استیرن با استفاده از تابش فراصوت در 300w و به مدت 30 min پراکنده کردند و حاصل، پراکندگی یکنواخت نانو لوله های کربنی پلی استیرن بود. اخیراً چو<sup>1</sup> و دستیارانش کامپوزیت نانو لوله کربنی/پلی یورتان با موفقیت ساختند که این عمل با پراکندگی بهتر نانو لوله های کربنی تا ۲۰٪ در پلی یورتان بدست آمد. در این روش ابتدا کسر وزنی لازم از کربوکسیلات نانو لوله تک لایه تحت تابش فراصوت در دمای اتاق و برای مدت 1hr در محلول دی متیل فرمامید پراکنده می شود، سپس پلی یورتان به این محلول اضافه می شود و برای 1hr همزده می شود ، محلول حاصل سپس دوباره برای 1 hr ساعت تحت تابش فراصوت قرار می گیرد و در نهایت توسط دستگاه SEM تصاویری از برش های پراکندگی نانو لوله تک لایه بدست می آید.

اسفاده از سورفکتانت ها روش مناسب دیگری برای پراکندگی بهتر نانو لوله هاست. ثابت شده است که استفاده از سورفکتانت های غیر یونی مانند پلی اکسی اتیلن باعث بهبود پراکندگی و فعل و انفعال قوی بین رزین های اپوکسی و نانو لوله های تک لایه می شود. باررو<sup>2</sup> و همکارانش یافتند که آملمینیک پالمیتیک اسید باعث بهبود پراکندگی نانو لوله های کربنی در ماتریس اپوکسی می شود. بخش آب گریز اسید پالمیتیک بر روی سطح نانو لوله ها جذب می شود و بخش آب دوست آن نیز نیروی دافعه الکترواستاتیک را بین نانو لوله ها القاء می کند و از تجمع و کلوخه شدن آنها جلوگیری میکند و حلال دوم نیز بر میزان پراکندگی نانو لوله ها در ماتریکس

---

<sup>1</sup> Cho

<sup>2</sup> Barrou



پلیمری تاثیرگذار است. اخیراً کامپونشی<sup>۱</sup> همکارانش از تری فلئورواستیک اسید به عنوان حلال دوم برای پراکندگی نانو لوله های تک لایه در پلیمر های مزدوج ۳-هکسیل تیوفن و پلی متیل متاکریلات در فرایند محلول استفاده کردند.

دستگاه SEM ، میکروسکوپ نوری و مطالعات در مورد عبور نور، پراکندگی بهتر نانولوله های کربنی را در ماتریکس پلیمری به هنگام استفاده از تری فلئورواستیک اسید نشان داد.

## ۲) ذوب کردن مخلوط

در روش محلول مخلوط ها، ماتریس پلیمری باید حداقل در یکی از حلال ها قابل حل باشد و این موضوع یک مشکل مهم برای بسیاری از پلیمرهاست. ذوب مخلوط یک روش ساده و متداول برای پلیمر های گرما نرم<sup>۲</sup> است. در فرایند ذوب کردن ، نانولوله های کربنی با استفاده از دما و نیروی برشی زیاد ترکیب کننده یا میکسر به صورت مکانیکی در ماتریس پلیمری پراکنده می شوند. این رویکرد ساده و سازگار با شیوه های صنعتی است و نیروی برشی همزن به شکسته شدن کلوخه های نانو لوله ها و جلوگیری از تشکیل آنها کمک می کند.

ژانگ<sup>۳</sup> و همکارانش کامپوزیت ۶-نایلون/نانو لوله تک دیواره را که شامل ۱٪ وزنی نانو لوله تک دیواره بود را با روش ذوب کردن و با استفاده از میکسر چرخشی تولید کردند و دستگاه sem پراکندگی یکنواخت نانو لوله چند دیواره را در ماتریس پلیمری نشان داد که باعث پیشرفت قابل توجهی در خواص مکانیکی آن بود. بوچینی<sup>۴</sup> و

---

<sup>1</sup> Componeshi  
<sup>2</sup> thermoplastic  
<sup>3</sup> zhang  
<sup>4</sup> bocchini

همکارانش نیز توانستند کامپوزیت پلی اتیلن با چگالی پایین/نانو لوله چند دیواره را با روش ذوب کردن و به کمک میکسر برابندر<sup>۱</sup> تولید کنند.

پخش کردن نانو لوله چند دیواره در پلی اتیلن با چگالی کم باعث تاخیر حرارتی و تخریب اکسیدیتیو آن می شود. مشاهدات میکروسکوپی و مطالعه پرتوی اشعه x تابیده شده، حاکی از توزیع و پراکندگی بسیار خوب نانو لوله چند دیواره در ماتریکس پلی اتیلن است. روش ذوب مخلوط با موفقیت برای تولید کامپوزیت های پلیمر/نانو لوله کربنی مانند پلی پروپیلن/نانو لوله کربنی، پلی اکسی متیلن/نانو لوله کربنی، پلی آمید/نانو لوله کربنی و... به کار رفت.

ایراد این روش این است که پراکندگی نانو لوله های کربنی در ماتریس پلیمری در این روش کمتر از پراکندگی آن در روش اختلاط مخلوط است.

### ۳) پلیمریزاسیون در محل

در این روش پلیمریزاسیون، نانو لوله های کربنی در منومرها پراکنده می شوند، در نتیجه درصد بیشتری از آنها در این روش پخش می شوند و تعامل قوی و خوبی با ماتریس پلیمری دارند. این روش برای تولید کامپوزیت های پلیمری که با روش محلول مخلوط و ذوب مخلوط نمی توانند تولید شوند به کار می رود مانند پلیمر های نامحلول یا ناپایدار حرارتی.

هو<sup>۲</sup> و همکارانش نانو کامپوزیت پلی ایمید/نانو لوله کربنی را با روش پلیمریزاسیون در محل و در منومرها سنتز کردند. همانطور که در شکل مشخص است در این فرآیند ابتدا نانو لوله چند لایه توسط گروه آسیلی<sup>۳</sup> عامل دار

---

<sup>1</sup> brabender

<sup>2</sup> Hu

<sup>3</sup> acyl

می شوند، سپس با ۳-۳ و ۴-۴ بی فنیل تترا کربوسیلیک واکنش داده می شوند تا پلی ایمید اسید/نانو لوله چند لایه تولید کنند. فیلم های نانو کامپوزیت نهایی نانو لوله چند لایه/پلیمر در دمای 350c و تحت فشار خلا بدست می آید. در این روش نانو لوله های کربنی به صورت یکنواخت در ماتریس پلیمر پراکنده می شوند.

اسکن میکروسکوپ الکترونی یک پراکندگی همگن از نانو لوله چند دیواره در ماتریس پلی ایمید را نشان می دهد. این فرایند به صورت گسترده برای تولید کامپوزیت های پلی متیل متاکریلات<sup>۱</sup>/نانو لوله چند دیواره به کار میرود. جیا<sup>۲</sup> و همکارانش ابتدا پلی متیل متاکریلات را با روش پلیمریزاسیون در محل سنتز کردند. آنها از آغازگرهای رادیکال آزاد ۲-۲ آزوبیسوبوتیرونیتریل<sup>۳</sup> برای باز کردن پیوند  $\pi$  در نانو لوله کربنی استفاده کردند تا یک تعامل قوی بین نانو لوله و ماتریس پلی متیل متاکریلات ایجاد کنند، محققان دیگر نیز از آغازگر های رادیکال آزاد ۲-۲ آزوبیسوبوتیرونیتریل برای تهیه کامپوزیت های پلی متیل متاکریلات/نانو لوله چند دیواره با روش پلیمریزاسیون در محل استفاده کردند.

پلیمرهای رسانا به سطح نانو لوله های کربنی متصل می شوند تا خواص نوری، مغناطیسی و الکتریکی آنها را در فرایند پلیمریزاسیون در محل بهبود بخشند. چو و همکارانش راهی ساده را برای سنتز کردن پلی پیرول/نانو لوله های کربنی چند دیواره با روش پلیمریزاسیون شیمیایی در محل ارائه کردند و آن هم استفاده از اسید فریک به عنوان عامل اکسید کننده بود.

آنها تاثیر غلظت منومر بر روی پوشش و خواص نانو لوله ها مورد بررسی قرار دادند. با تغییر دادن نسبت پیرول به نانو لوله تک دیواره، ضخامت پلی پیرول روی کامپوزیت پلی پیرول/نانو لوله تک دیواره براحتی تغییر کرد. لونگ<sup>۴</sup> و همکارانش نانو کابل های پلی پیرول/نانو لوله کربنی را با روش پلیمریزاسیون شیمیایی اکسید

---

<sup>1</sup> PMMA

<sup>2</sup> jia

<sup>3</sup> 2.2azobissobutyronitrile(AIBN)

<sup>4</sup> long

کننده در محل سنتز کردند، آنها نشان دادند که با افزایش درصد وزنی نانو لوله، رسانایی نانو کابل ها افزایش می یابد.

همچنین از روش پلیمریزاسیون در محل برای تولید نانو کامپوزیت پلی یورتان/نانو لوله کربن استفاده می شود. کامپوزیت پلی یورتان/نانو لوله کربن به روش پلیمریزاسیون در محل سنتز می شود.

در این روش مقدار مشخصی از نانو لوله چند دیواره کربوکسیلیت شده و ۱۴-بوتاندیول<sup>۱</sup> را مرحله مرحله به محصول پلی یورتان اولیه اضافه می کنند. نانو لوله های چند لایه پراکندگی نسبتا خوبی در ماتریس پلی یورتان در این روش دارد. ژیا و سونگ<sup>۲</sup> دریافتند که نانو لوله های چند لایه پراکندگی خوبی در این روش ندارند. بعدها آنها نانو کامپوزیت پلی یورتان/نانو لوله های چند لایه را با استفاده پلی یورتان و نانو لوله های چند لایه پیوند زده شده که هم پراکندگی نانو لوله های چند لایه را در ماتریس پلی یورتان بهبود می بخشید و هم تعامل بین پلی یورتان و نانو لوله های چند لایه را تقویت می کرد سنتز کردند.

یک فرایند جدید برای تولید کامپوزیت پلی یورتان/نانو لوله های چند لایه با روش پلیمریزاسیون در محل از پلیمر اولیه تولید آن در حضور نانو لوله چند دیواره کربوکسیلیت شده است. سنتز نانو کامپوزیت پلی یورتان/نانو لوله های چند لایه به صورت زیر می گیرد:

مقدار مشخصی از نانو لوله چند دیواره کربوکسیلیت شده در دمای  $110^{\circ}\text{C}$  به پلیمر اولیه اضافه می شود و محلول حاصل برای 150 min با هم واکنش می دهند تا نانو کامپوزیت پلی یورتان/نانو لوله های چند لایه نهایی بدست آید. بر اثر واکنش بین گروه های کربوکسیلیک اسید و پلی یورتان اولیه<sup>۳</sup>، زنجیرهای پلی یورتان

---

<sup>1</sup> 14- butanediol

<sup>2</sup> xia&sung

<sup>3</sup> Prepoly urethane

روی نانو لوله های چند لایه متصل می شوند. این کامپوزیت ها که پلی یورتان روی نانو لوله های چند لایه سوار شده اند هیچ گاه در حلال های پلی یورتان مانند دی متیل سولفوکساید<sup>۱</sup> و تترا هیدرو فوران<sup>۲</sup> و... حل نمی شوند.

## 2-6 خواص مکانیکی نانو کامپوزیت های نانو لوله های کربنی / پلیمر

همان طور که در بالا اشاره شد خواص فوق العاده مکانیکی و نسبت طول به قطر بسیار زیاد نانو لوله های کربنی، آنها را به گونه ای عالی برای توسعه نانو کامپوزیت های پلیمری تبدیل کرده است. در واقع طیف گسترده ای از ماتریس های پلیمری برای توسعه این نانو کامپوزیت ها استفاده می شوند، در این بخش به خواص مکانیکی نانو کامپوزیت مهم پلی یورتان\_ نانو لوله های کربنی می پردازیم.

### 2-6-1 کامپوزیت پلی یورتان / نانو لوله های کربنی

پلی یورتان یکی از چند منظوره ترین مواد در حال حاضر است که به طور گسترده در صنایع پوششی، چسب، پلیمرهای حافظ شکل، زمینه های پزشکی و کامپوزیت ها کاربرد دارند. پلی یورتان شامل ۲ بخش نرم و سخت است. بخش سخت شامل قسمت های دارای پیوند  $N=C=O$  و مولکول های توسعه دهنده زنجیر است مانند دیول یا دیامین<sup>۳</sup>، در حالی که بخش نرم از یک زنجیره طولانی و خطی تشکیل شده است، بدلیل ناسازگاری ترمودینامیکی بخش های نرم و سخت پلی یورتان، جدایی فازی در آن رخ می دهد.

حل کردن نانو لوله های کربنی در پلی یورتان به طور قابل ملاحظه ای استحکام کششی و مدول آنرا افزایش می دهد. اضافه کردن نانو لوله چند دیواره کربوکسیلیت شده<sup>۴</sup> به ماتریس پلی یورتان توسط حلال اختلاط مقاومت

<sup>1</sup> dimethyle sulfoxide

<sup>2</sup> tetrahydrofurane

<sup>3</sup> diol or diamine

<sup>4</sup> caroxilated mwnt

کششی و مدول آنرا افزایش می دهد. استحکام کششی کامپوزیت حاوی ۱۰٪ وزنی نانو لوله چند دیواره کربوکسیلیت شده در مقایسه با پلی یورتان خالص ۱۰۸٪ بیشتر است. در حالی که با اختلاط نانو لوله چند دیواره در ماتریس پلیمری استحکام کششی آن ۶۸٪ افزایش می یابد. در نهایت هنگامی که درصد وزنی نانو لوله چند دیواره عامل دار شده به ۲۰٪ در کامپوزیت برسد مقاومت کششی و مدول یانگ نانو کامپوزیت به ترتیب از 7.6 Mpa و 50 Mpa در پلی یورتان خالص به 21.3 Mpa و 420 Mpa افزایش می یابد. گروه های عامل دار شده آب دوست در نانو لوله های چند دیواره نیز به بهبود فعل و انفعال آن با گروه های اسیدی موجود در پلی یورتان کمک می کند. علاوه بر این تعامل قوی بین نانو لوله های چند دیواره عامل دار شده و ماتریس پلی یورتان باعث افزایش پراکندگی و همچنین چسبندگی می شود که در نهایت منجر به بهبود کلی عملکرد مکانیکی کامپوزیت می شود.

خواص مکانیکی کامپوزیت به درجه حرارت اسید در نانو لوله های کربنی بستگی دارد. کامپوزیت های حاوی نانو لوله چند دیواره در دمای 90c واکنش می دهد که باعث افزایش مدول آنها در مقایسه با آنهایی می شود که در 1100c واکنش می دهند. کوان<sup>۱</sup> و همکارانش آمینو نانو لوله چند دیواره عامل دار شده را در پلی یورتان ترکیب کردند، آنها دریافتند که مدول کامپوزیت حاصل از 77Mpa برای پلیمر به 131 Mpa در کامپوزیت و استحکام کششی کامپوزیت از 5.1 Mpa به 18.9 Mpa افزایش می یابد. تشکیل پیوند کووالانسی بین آمینو نانو لوله چند دیواره عامل دار شده و پلی یورتان عامل این افزایش در قدرت و استحکام کششی شده است. نانو لوله چند دیواره برای بهبود مدول کامپوزیت موثر است، در حالی که نانو لوله تک دیواره برای افزایش طول و استحکام کششی کامپوزیت موثر است. عامل این اختلاف در عملکرد نانو لوله چند دیواره و نانو لوله تک دیواره در اختلاف فاکتور شکل آنهاست.

---

<sup>1</sup> kuan

## نتیجه گیری:

- ✓ نانو لوله های کربنی یکی از مستحکم ترین و در عین حال انعطاف پذیر ترین مواد روی کره زمین هستند که اخیرا مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته اند.
- ✓ نانو لوله ها رسانای بسیار خوب الکتریسیته و حرارت هستند و بدلیل ویژگی های منحصر به فرد مکانیکی آنها امروزه کاربرد های بسیار زیادی در صنعت، پزشکی، داروسازی و... پیدا کرده اند.
- ✓ پراکنده کردن نانو لوله های کربنی به روش عامل دار کردن غیر کووالانسی مناسب تر از سایر روش هاست، زیرا ساختار فیزیکی و ویژگی های نانو لوله ها را تغییر نمی دهد.

- [1] Valentin N. Popov, *Materials Science and Engineering R* 43 (2004) 61–102
- [2] Peng-Cheng Maa, Naveed A. Siddiqui a, Gad Marom b, Jang-Kyo Kim, *Composites: Part A* 41 (2010) 1345–1367
- [3] Nanda Gopal Sahoo, Sravendra Rana, Jae Whan Cho, *Progress in Polymer Science* 35 (2010) 837–867
- [4] J. C. Grunlan, L. Liu, O. Regev, *Coll. Interface Sci.*, 317 (2008) 346–349.
- [5] P.C. Ma, N. A. Siddiqui, G. Marom, J. K. Kim, *Part A*, 41 (2010) 1345–1367.
- [6] B. Dong, Y. Su, Y. Liu, J. Yuan, J. Xu, L. Zheng, *Coll. Interface Sci.*, 357 (2011) 190–195.
- [7] <http://www.nanoclub.ir/index.php/articles/show/273>
- [8] V. N. Popov, *Mat. Sci. Eng R*, 43 (2004) 61–102.
- [9] [http://www.nano.ir/sub\\_nanoworld.php?page=nanotube/](http://www.nano.ir/sub_nanoworld.php?page=nanotube/)
- [10]. Y. Liu, L. Yu, S. Zhang, J. Yuan, L. Shi, L. Zheng, *Coll Surfaces A: phi. chem. Eng. Aspects* 359 (2010) 66–70
- [11] M. D. Clark, S. Subramanian, R. Krishnamoorti, *Coll. Interface Sci.*, 354 (2011) 144–151.
- [12] <http://www.nano.ir/papers/attach/939.pdf>
- [13] H. Wang, *Current Opinion in Coll. Interface Sci*, 14 (2009) 364–371.
- [14] H. Wang, *Current Opinion in Coll. Interface Sci*, 14 (2009) 364–371.



- [15] K. C. Etika, M. A. Cox, J. C. Grunlan, *Poly*, 51 (2010) 1761-1770.
- [16] L. Vaisman, H. D. Wagner, G. Marom, *Advances in Coll. Interface Sci*, (2006) 37–46.
- [17] M. J. Green, N, Behabtu, M. Pasquali, W. W. Adams, *Polymer*, 50 (2009) 4979–4997.
- [18] Zdenko Spitalskya,<sup>1</sup>, Dimitrios Tasisb,<sup>\*</sup>, Konstantinos Papagelisb, Costas Galiotis, *Progress in Polymer Science* 35 (2010) 357–401