دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده علوم - گروه فیزیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک حالت جامد

عنوان:

# بررسی نظری تاثیر دما و فشار بر رشد نانولوله های کربنی تک دیواره به روش رسوب شیمیایی فاز بخار

استاد راهنما:

دکتر مجید واعظ زاده

استاد مشاور:

مهندس محمد رضا سعیدی

دانشجو:

جلیل شهرادی ورچشمه

تابستان ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

با سپاس ازسه وجود مقدس :

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم

موهایشان سپید شد تا ماروسفید شویم

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند

**پدرانمان**

**مادرانمان**

**استادانمان**

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق » بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه **جناب آقای دکتر مجید واعظ زاده** که با کرامتی چون خورشید ، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم ودانش را با راهنمایی های کار ساز و سازنده بارور ساختند ، تقدیر و تشکر نمایم.

در اینجا بر خود لازم می دانم که از زحمات جناب **آقای مهندس محمد رضا سعیدی** که در اتمام و اکمال این پایان نامه از هیچ تلاشی دریغ نکردند ، نهایت سپاس و تشکر را داشته باشم.

همچنین از پدر و مادر عزیز ، دلسوز و مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت های همه جانبه در محیطی مطلوب ، این مقطع تحصیلی را به نحو احسن به اتمام برسانم ، سپاسگزاری نمایم.

## چکیده

هدف از انجام این پایان نامه مطالعه ی نظری تاثیر فشار و دما بر رشد نانولوله های کربنی تک دیواره در روش رسوب شیمیایی فاز بخار ، به منظور درک صحیح فیزیک مکانیسم رشد و پیش بینی فرآیند رشد می باشد. به همین منظور با شبیه سازی مکانیسم رشد نانولوله به کمک سیستم ساده جرم – فنر و در نظر گرفتن نوسانات طولی نانولوله بر روی پایه کاتالیستی و احتمال پیوند اتم های کربن با نانولوله و هم چنین محاسبه فرکانس ارتعاشات و جرم نانولوله ، طول نانولوله را براساس پارامتر های رشد مانند زمان ، دمای واکنش ، نوع کاتالیست ، قطر نانولوله ، فشار جزئی و فاکتور میرایی سیستم پیش بینی کرده ، در پایان تاثیر فشار جزئی و دما در رشد بهینه ی نانولوله های کربنی را بررسی می کنیم.

نتایج حاصل از تئوری نشان می دهند رشد بهینه ی نانولوله های کربنی به روش رسوب شیمیایی فاز بخار در یک دمای معین اتفاق می افتد؛ که دمای بهینه ی رشد است و به نوع کاتالیست بستگی دارد. هم چنین با افزایش فشار جزئی ، نرخ شار فرودی بر روی کاتالیست و به تبع آن احتمال پیوند اتم های کربن با نانولوله افزایش یافته و در نتیجه با افزایش فشار جزئی طول نانولوله ی کربنی افزایش می یابد. نتایج تئوری در توافق خوبی با نتایج تجربی می باشند.



**کلمات کلیدی :** رشد نانولوله کربنی ، دمای بهینه ، فشار جزئی ، رسوب شیمیایی فاز بخار

# فهرست مطالب

**مقدمه** ..... ۱

**فصل اول : خواص و کاربرد های نانولوله های کربنی**

**۱-۱ انواع ساختارهای کربن** ..... ۵

۱-۱-۱ کربن آمورف ..... ۶

۱-۱-۲ الماس ..... ۶

۱-۱-۳ گرافیت ..... ۶

۱-۱-۴ گرافن ..... ۷

۱-۱-۵ فولرن ها و نانولوله های کربنی ..... ۹

**۱-۲ انواع نانولوله های کربنی** ..... ۱۰

۱-۲-۱ روش نام گذاری نانولوله های کربنی تک دیواره ..... ۱۱

۱-۲-۲ انواع نانولوله های کربنی تک دیواره ..... ۱۲

**۱-۳ خواص و ویژگی‌های نانولوله های کربنی** ..... ۱۵

۱-۳-۱ اندازه بسیار کوچک (قطر کوچکتر از ۰/۴ نانومتر) ..... ۱۵

۱-۳-۲ حالت رسانا و نیمه‌رسانایی آن ها بر حسب شکل هندسی‌شان ..... ۱۵

۱-۳-۳ برخورداری از خاصیت منحصر به فرد ترابری پرتابه‌ای..... ۱۶

۱-۳-۴ قدرت رسانایی گرمایی خیلی بالا..... ۱۶

۱-۳-۵ سطح جداره صاف یا قدرت تفکیک بالا..... ۱۶

۱-۳-۶ بروز خواص الکتریکی و مکانیکی منحصر به فرد در طول آن ها..... ۱۶

۱-۳-۷ مدول یانگ بالا..... ۱۶

۱-۳-۸ حساس به تغییرات کوچک نیروهای اعمال شده..... ۱۶

۱-۳-۹ گسیل و جذب نور..... ۱۷

۱-۳-۱۰ ضریب تحرک الکتریسیته بسیار بالا..... ۱۷

۱-۳-۱۱ خاصیت مغناطیسی، ممان مغناطیسی بسیار بزرگ..... ۱۷

۱-۳-۱۲ چگالی سطحی بسیار بالا..... ۱۸

۱-۳-۱۳ قابلیت ذخیره سازی..... ۱۸

۱-۳-۱۴ داشتن خاصیت ابررسانایی..... ۱۹

۱-۳-۱۵ تولید ولتاژ..... ۱۹

۱-۳-۱۶ استحکام و مقاومت کششی بالا..... ۲۰

**۱-۴ کاربردهای نانولوله‌های کربنی**..... ۲۰

۱-۴-۱ استفاده از نانولوله های تک دیواره در صنعت الکترونیک..... ۲۱

۱-۴-۲ کاربرد نانولوله های کربنی درحسگرها..... ۲۲

۱-۴-۳ نمایشگرهای گسیل میدانی..... ۲۳

۱-۴-۴ حافظه‌های نانولوله‌ای..... ۲۴

۱-۴-۵ استحکام‌دهی کامپوزیت‌ها..... ۲۵

۱-۴-۵ ساختار تو خالی نانولوله و کاربرد به عنوان ذخیره کننده هیدروژنو پیل سوختی..... ۲۶

۱-۴-۶ ساخت نانوماشین ها با استفاده از نانولوله های کربنی..... ۲۷

**۱- ۵ چالش های فراوری نانولوله های کربنی**..... ۲۷

۱-۵-۱ تولید انبوه با قیمت مناسب..... ۲۷

۱-۵-۲ خالص‌سازی نانولوله‌ها..... ۲۸

۱-۵-۳ اتصال نانولوله‌ها و ایجاد رشته‌ها..... ۲۹

۱-۵-۴ جلوگیری از توده‌ای شدن نانولوله‌ها..... ۲۹

۱-۵-۵ حفظ نانولوله‌ها بعد از فراوری..... ۳۰

۱-۵-۶ کنترل رشد نانولوله‌ها..... ۳۱

## فصل دوم : مکانیسم رشد و روش های تولید نانولوله های کربنی

**۲-۱ روش های تولید نانولوله های کربنی** ۳۴

۲-۱- ۱ روش تخلیه قوس الکتریکی ۳۵

۲-۱- ۲ روش تبخیر لیزر ۳۸

۲-۱- ۳ رسوب بخار شیمیایی (CVD) ۴۰

۲-۱-۳-۱ تولید نانولوله‌های کربنی به روش CVD ۴۲

۲-۱- ۴ تولید نانولوله های کربنی به روش الکترولیز ۴۵

۲-۱- ۵ تولید نانوتیوب کربنی با استفاده از انرژی خورشید ۴۶

**۲-۲ مکانیسم رشد نانولوله های کربنی** ۴۷

**فصل سوم : تاثیر دما و فشار بر رشد نانولوله های کربنی**

**۳-۱ شبیه سازی رشد نانولوله های کربنی با استفاده از سیستم جرم – فنر** ۵۴

**۳-۲ معادله رشد بر حسب پارامترهای مختلف** ۵۷

۳-۲-۱ رشد نانولوله های کربنی با قطرهای مختلف ۶۰

۳-۲-۲ رشد نانولوله های کربنی در دمای بهینه ۶۱

۳-۲-۳ وابستگی دمای بهینه رشد به نوع کاتالیست ۶۲

**۳-۳ مدل رشد پایه ای نانولوله های کربنی** ۶۳

۳-۳-۱ محاسبه فرکانس ارتعاشات نانولوله برروی کاتالیست ..... ۶۶

۳-۳-۲ تاثیر قطر بر رشد نانولوله های کربنی ..... ۶۸

۳-۳-۳ تاثیر دما بر رشد نانولوله های کربنی ..... ۶۹

۳-۳-۴ تاثیر فشار جزئی هیدرو کربن بر رشد نانولوله های کربنی ..... ۷۰

**۳-۴ بحث و نتایج** ..... ۷۱

**۳-۵ پیشنهادات** ..... ۷۲

**فهرست واژگان انگلیسی – فارسی** ..... ۷۳

**فهرست مراجع** ..... ۷۵

# فهرست اشکال

شکل (۱-۱) (الف) ساختار گرافیت (ب) ساختار الماس (ج)نانولوله کربنی تک دیواره (د) فولرن..... ۵

شکل (۱-۲) پیوند اتمی در (الف) الماس (ب)گرافیت..... ۷

شکل (۱-۳) شبکه دوبعدی لانه زنبوری گرافن..... ۹

شکل (۱-۴) نانولوله کربنی (الف) تک دیواره (ب)چند دیواره..... ۱۰

شکل (۱-۵). ، بردارهای پایه سلول واحد شبکهٔ مستقیم شبکه دو بعدی گرافن..... ۱۲

شکل (۱-۶) نانولوله کربنی تک دیواره (الف) زیگزاگ (ب)آرمچیر (ج) کایرال..... ۱۴

شکل (۱-۷) ذخیره هیدروژن در نانولوله های کربنی..... ۱۹

شکل (۱-۸) کاربرد نانولوله کربنی به عنوان پایانه های سورس و درین در ترانزیستور..... ۲۲

شکل(۲-۱) شماتیک دستگاه تولید ناولوله کربنی به روش تخلیه قوس الکتریکی..... ۳۷

شکل(۲-۲) شماتیک دستگاه تولید ناولوله کربنی به روش تخلیه قوس الکتریکیر..... ۳۹

شکل(۲-۳) الف: مکانی برای بلوری شدن در امتداد محور رسوب‌گذاری ب: ساختار واقعی نانولوله های کربن..... ۴۲

شکل(۲-۴) شماتیک دستگاه تولید نانولوله های کربنی به روش رسوب شیمیایی بخار..... ۴۴

شکل(۲-۵) نمایش ساز و کار رشد نانولوله های کربنی..... ۴۹

شکل(۲-۶) شماتیک مکانیسم پیشنهادی توسط هاییتی برای رشد نانولوله های کربنی..... ۵۱

شکل (۳-۱ ) شبیه سازی مکانیسم رشد نانولوله های کربنی و پیوند اتم های کربن مهاجر با نانولوله..... ۵۵

شکل (۳-۲ ) شماتیکی از دو حلقه مجاور از اتم های کربن و فرم معادل آن ها..... ۵۷

شکل (۳-۳) شبیه سازی بر هم کنش نانولوله و کاتالیست توسط سیستم جرم – فنر..... ۵۸

شکل(۳-۴) رشد نانولوله کربنی با قطرهای مختلف در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد..... ۶۱

شکل(۳-۵) وابستگی رشد به دما برای قطرهای مختلف..... ۶۲

شکل(۳-۶) وابستگی انرژی پیوند وان دروالس به رشد نانولوله در دماهای مختلف..... ۶۳

شکل(۳-۷) نمودار فرکانس ارتعاشات نانولوله بر روی کاتالیست در فشار های مختلف هیدروکربن..... ۶۷

شکل(۳-۸) شماتیک افزایش فرکانس ارتعاشات با افزایش فشار جزئی..... ۶۷

شکل(۳-۹)نمودار رشد نانولوله کربنی با قطر های مختلف در فشار ۵ تور و دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد..... ۶۸

شکل(۳-۱۰) نمودارشد نانولوله کربنی با قطر های مختلف در فشار ۵ تور و دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد..... ۶۹

شکل(۳-۱۱) نمودارشد نانولوله کربنی در فشار های جزئی مختلف..... ۷۰

پس از کشف نانولوله ها ی کربنی[1] و با توجه به پتانسیل کاربردی و گسترده ی آن ها در علوم مختلف مانند : فیزیک ، شیمی ، مکانیک ، برق ، علوم زیستی ، بهداشت و پزشکی و نیز صنایع از قبیل : خودرو سازی ، کشتی سازی ، هواپیما سازی و هوا فضا ، کشاورزی ، و صنایع برق ، الکترونیک و کامپیوتر ، این نانوساختار های یک بعدی کربن در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته اند.

خواص منحصر به فرد مکانیکی ، الکتریکی، گرمایی ، مغناطیسی و کاربرد گسترده ی نانولوله های کربنی در نانوالکترونیک ، نانوحسگرها ، نمایشگر های گسیل میدانی ، حافظه های نانولوله ای و استحکام دهی کامپوزیت ها یکی از دستاوردهای بزرگ فناوری نانو به شمار می آید.

نانولوله های کربنی که از صفحات کربن به ضخامت یک اتم و به شکل استوانه‌ای توخالی ساخته شده است در سال ۱۹۹۱ توسط سامیو ایجیما[2] (از شرکت NEC ژاپن) کشف شد. پس از آن دانشمندان بر روی روش‌های سنتز ، مکانیسم رشد ، ساختار اتمی و ساختار های الکترونی نانولوله های کربنی فعالیت های گسترده ی نظری و عملی زیادی انجام داده و توانستند به نتایج قابل توجهی دست یابند.

۱. Carbon Nanotubes

۲. Sumio Iijima

امروزه سنتز نانولوله‌های کربنی یک مسأله کاملا حل شده است لذا پژوهشگران کمتر به دنبال سنتز نانولوله های کربنی با روش‌های خاص می‌باشند. از میان روش های تولید نانولوله های کربنی سه روش تخلیه ی قوس الکتریکی ، سایش لیزری و رسوب شیمیایی فاز بخار نسبت به سایر روش ها از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. نانولوله های تولید شده به روش سایش لیزری و تخلیه ی قوس الکتریکی از لحاظ ساختاری دارای عیوب کمتری بوده و مقیاس تولید آن ها در حد آزمایشگاهی است. در مقابل می توان با استفاده از روش رسوب شیمیایی فاز بخار نانولوله هایی با عیوب ساختاری بیشتر و در مقیاس انبوه تولید کرد.با توجه به چالش های پیش رو در تولید نانولوله های کربنی با ویژگی های دلخواه و در مقیاس انبوه بایستی پارامترهای دخیل در فرایند رشد مانند زمان واکنش ، دمای واکنش ، نوع کاتالیست ، قطر نانولوله ، نرخ شار برخورد و فشار جزئی[۱] بایستی به راحتی قابل کنترل بوده و پارامترهای بهینه رشد شناسایی شود.

بعد از گذر از مرحله سنتز به مرحله تجاری سازی و استفاده ی کاربردی از پتانسیل بالقوه ی نانولوله های کربنی می رسیم ، مرحله‌ای که در آینده می‌تواند توان رقابتی بالای شرکت‌ها را نمایان سازد. شرکت‌هایی از سراسر جهان ادعای ریسک و سرمایه‌گذاری بر روی نانولوله‌های کربنی را دارند. لذا تولید کنندگان در حال سرمایه‌گذاری جهت پیشبرد این بخش و کاهش قیمت‌های این محصول هستند. اما در واقع بقای این شرکت‌ها وابسته به کیفیت نانولوله‌هایی است که ارائه می دهند. علی رغم اینکه هنوز سوددهی اقتصادی نانولوله‌ها کاملا روشن نیست ، اما دانشمندان معتقدند ماده ای که از فولاد سخت‌تر، از آلومینیوم سبک‌تر و از مس ضریب

۱. Partial Pressure

هدایت بیشتری داشته و نیز نیمه‌هادی خوبی باشد ، به راحتی می‌تواند جای خود را در بازار باز کند. لذا در آینده نه چندان دور شرکت‌هایی که از نانولوله های کربنی جهت بهتر کردن کیفیت محصولات خود استفاده می‌کنند بازار آینده را در اختیار خواهند گرفت.

از آنجا که تولید نانولوله های کربنی با ویژگی های دلخواه در مقیاس انبوه ، مستلزم درک صحیح فیزیک مکانیسم رشد و هم چنین شناسایی و کنترل پارامترهای دخیل در فرآیند رشد مانند زمان واکنش ، دمای واکنش ، نوع کاتالیست ، قطر نانولوله ، نرخ شار برخورد و فشار جزئی می باشد ، در این پروژه به منظور پیش بینی فرآیند رشد تاثیر فشار و دما بر رشد نانولوله های کربنی تک دیواره[۱] در روش رسوب شیمیایی فاز بخار را به صورت نظری مطالعه می کنیم.

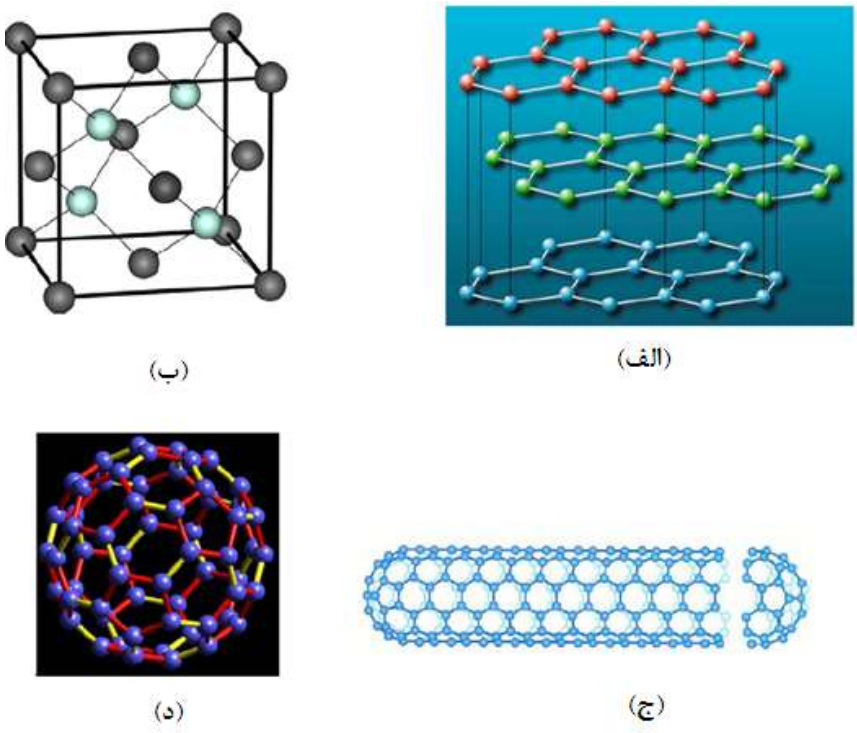
۱. Single Wall Carbon Nanotubes

# فصل اول :

## خواص و کاربردهای نانولوله های کربنی

## ۱- ۱ انواع ساختارهای کربن

کربن عنصری غیرفلزی است که به دلایل زیادی قابل توجه است. ساختارهای مختلف آن شامل گرافیت[۱] یکی از نرم‌ترین و الماس یکی از سخت‌ترین مواد شناخته شده در طبیعت می‌باشند. علاوه بر این ، کربن میل زیادی به پیوند با اتم های کوچک دیگر از جمله اتم های دیگر کربن داشته و اندازه بسیار کوچک آن امکان پیوندهای متعدد را ممکن می سازد. تا سال ۱۹۸۰ ، سه آلوتروپ کربن به نام های الماس، گرافیت و کربن بی شکل (آمورف) شناخته شده بودند، اما امروزه می دانیم که خانواده کاملی از سایر اشکال کربن نیز وجود دارند.




شکل (۱-۱) (الف) ساختار گرافیت (ب) ساختار الماس (ج)نانولوله کربنی تک دیواره (د) فولرن

۱. Graphite

### ۱-۱-۱ کربن آمورف

از سوختن ناقص بسیاری از هیدروکربن ها و یا مواد آلی (مثل چوب یا پلاستیک) ماده سیاه رنگی به جا می ماند که کربن بی شکل یا آمورف نام دارد. این ماده که پس مانده ی سوخت ناقص مواد آلی است از دیر باز جهت تولید انرژی بشر قرار می گرفت. ذغال چوب و ذغال سنگ از انواع مواد کربن بی شکل هستند که انسان با سوزاندن آن ها انرژی زیادی را بدست می آورد.

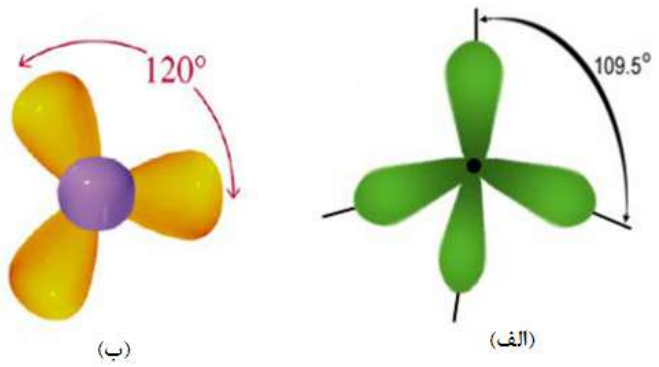
### ۱-۱-۲ الماس

الماس گونه ی شناخته شده دیگری از کربن می باشد که دارای ساختار بلوری منظمی است. در این ساختار هر اتم کربن با چهار اتم کربن دیگر پیوند برقرار می کند. اتم های الماس در یک شبکه fcc با ثابت شبکه a=۰/۳۵۶ nm قرار دارند. طول پیوند کربن-کربن در این ساختار برابر ۰/۱۵ nm گزارش شده است[۱]. این ماده به دلیل سختی بالا تمام عناصر موجود در طبیعت را می خراشد و از این رو در تراش فلزات سخت، سرامیک ها و شیشه از آن استفاده می کنند. این ماده به دلیل درخشش بالایی که دارد از دیرباز در جواهر آلات نیز مورد استفاده قرار می گرفته است.

### ۱-۱-۳ گرافیت

گرافیت آلوتروپ سه بعدی کربن است که از دوران باستان شناخته شده بود. گرافیت ساختاری لایه ای دارد و هر لایه آن گرافن خوانده می شود که شامل شش ضلعی هایی از اتم های کربن

است. این اتم ها بوسیلهٔ پیوندهای هیبریدی $sp^2$ به یکدیگر متصل شدها ند و با یکدیگر زاویهٔ $120^\circ$ می سازند[۲]. در این ساختار هر اتم کربن در حالت مسطح دارای سه همسایهٔ اول می باشد. ورقه های شش ضلعی به واسطهٔ نیروهای واندروالس ضعیف در کنار یکدیگر قرار گرفته اند، که باعث می شود لایه های گرافن به راحتی روی هم بلغزند. گرافیت دارای دو نوع پیوند می باشد. سه پیوند $\sigma$ که در صفحهٔ تخت واقع شده اند و یک پیوند $\pi$ در راستای عمود بر صفحهٔ تخت ساختار گرافیت که توسط اربیتال $P_Z$ به وجود می آید. فاصلهٔ صفحات گرافیت در حدود $3/35\ \text{Å}$ است در حالی که فاصلهٔ نزدیکترین همسایه در صفحه در حدود $1/42\ \text{Å}$ است.




شکل (۱-۲) پیوند اتمی در (الف) الماس (ب)گرافیت

### ۱-۱-۴ گرافن[۱]

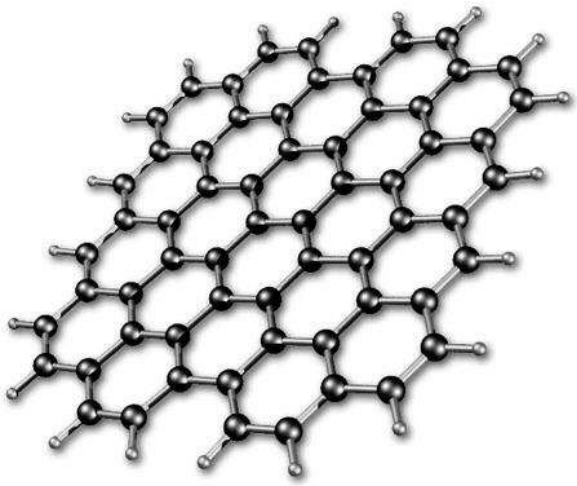
گرافن از اتمهای کربن که در ساختار شش وجهی قرار گرفته اند تشکیل شده است. شبکه شش ضلعی براوه نیست ولی می توان آن را به صورت دو زیر شبکه ی مثلثی براوه در نظر

۱. Graphene

گرفت.تا سالیان دراز آلوترپ دو بعدی کربن به حالت آزاد غایب بود. در سال ۲۰۰۴ برای نخستین بار محققان دانشگاه منچستر انگلیس موفق شدند گرافن را به صورت منزوی و آزاد در آزمایشگاه از گرافیت جدا و شناسایی کنند[۳]. از آن زمان تاکنون دانشمندان سراسر دنیا هر روز به نتایج شگفت انگیزی در کاربردهای این ماده دست می یابند.

دلیل این همه تاخیر در کشف گرافن به دو مسئله بر می گشت. نخست آن که از دید مطالعات نظری مکانیک آماری و نظریه های گذار فاز وجود گرافن به صورت آزادانه و پایدار از نظر ترمودینامیکی بسیار بعید به نظر می رسید . دوم آن که در صورت وجود گرافن ابزار تجربی مناسبی برای شناسایی و آشکار کردن آن وجود نداشت، با این حال در نهایت وجود گرافن با استفاده از این اثر اپتیکی، که وقتی روی زیر لایه $SiO_2$ قرار بگیرد امکان مشاهده آن با میکروسکوپ های نوری به وجود می آید ، با دقت بالا آشکار سازی شد.

در فیزیک ماده چگال عموما معادله شرودینگر در توصیف خواص الکترونی مواد موفق می باشد ، اما گرافن یک استثناء می باشد. حامل های بار آن از معادلات ذرات نسبیتی بدون جرم تبعیت می کند. هر چند که هیچ مشخصه ی نسبیتی برای الکترون و حرکت آن در حوالی اتم کربن وجود ندارد. برهمکنش آن ها در حضور شبکه لانه زنبوری گرافن، شبه ذرات جدیدی(فرمیون های بدون جرم دیراک) را که در حد انرژی های کم با دقت خوبی از معادله دیراک پیروی می کنند ارائه می دهد.



شکل (۱-۳) شبکه دوبعدی لانه زنبوری گرافن

### ۱-۱-۵ فولرن ها و نانولوله های کربنی

در سال ۱۹۸۵ ریچارد اسمالی[۱] ساختاری جدید از کربن را کشف کرد که فولرن نامگذاری شد[۴]. $C_{60}$ اولین فولرنی بود که کشف شد. این مولکول همانند یک توپ فوتبال کروی است و شامل ۶۰ اتم کربن می باشد که در گوشه های شش ضلعی های منتظم و تعدادی مشخص پنج ضلعی قرار دارد. سطح یک کره را نمی توان تنها با شش ضلعی های منتظم پوشش داد بنا بر این اتم های کربن جهت قرار گیری بر روی یک سطح کروی ناچار هستند در بعضی از مکان ها تشکیل پنج ضلعی بدهند. مولکول $C_{60}$ متشکل از ساختاری با ۲۰ شش ضلعی و ۱۲ پنج ضلعی است.

بعد از گزارش کشف مولکول $C_{60}$ دانشمندان زیادی شروع به انجام آزمایش های جدید جهت ساخت مولکول های جدید از کربن کردند. سرانجام در سال ۱۹۹۱ ایجیما موفق به کشف

۱. Richard Smalley