

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم پایه  
گروه فیزیک حالت جامد

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته فیزیک گرایش حالت جامد

موضوع:

سنتز نانولوله های کربنی بس دیواره به روش نهشت از بخار شیمیایی مواد  
روی بستر زئولیتی با حضور کاتالیزور و مطالعه اثر کاتالیزور و بستر در  
ابعاد نانولوله های تولید شده

استاد راهنما:

دکتر علی اصغر حسینی

استاد مشاور:

دکتر محمود تاجبخش

نام دانشجو:

ملیحه پشایی کتابی

تیر ماه 1391



دانشکده علوم پایه  
گروه فیزیک حالت جامد

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته فیزیک گرایش حالت جامد

موضوع:

سنتز نانولوله های کربنی بس دیواره به روش نهشت از بخار شیمیایی مواد  
روی بستر زئولیتی با حضور کاتالیزور و مطالعه اثر کاتالیزور و بستر در

ابعاد نانولوله های تولید شده

استاد راهنما:

دکتر علی اصغر حسینی

استاد مشاور:

دکتر محمود تاجبخش

نام دانشجو:

ملیحه پشایی کتابی

تیر ماه 1391

به پاس فداکاری و حمایت بی دریغ دو گوهر گرانبهای زندگی ام،  
پدر و مادر عزیزتر از جانم که همه توان خود را صرف رشد علمی اینجانب تا این مرحله نموده اند

و برادر عزیزم، محمد جان

که انگیزه ام برای رسیدن به هدفمان را قوت بخشید،

ارزش معنوی این اثر را به محضرشان تقدیم می کنم.

## تشکر و قدردانی

در ابتدا لازم می دانم از استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر علی اصغر حسینی عضو هیئت علمی گروه فیزیک دانشگاه مازندران برای کمک های علمی، دلسوزانه در هدایت این پروژه، تهیه تمامی امکانات لازم جهت اجرای آن و راهنمایی های بی دریغ شان تشکر و سپاس فراوان داشته باشم.

همچنین از استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر محمود تاجبخش عضو هیئت علمی گروه شیمی دانشگاه مازندران برای راهنمایی هایشان در مباحث شیمی مرتبط با این پروژه در رفع ابهامات و تکمیل مباحث مذکور، کمال امتنان را دارم.

از کلیه دوستان و دانشجویان کارشناسی ارشد گروه تحقیقاتی آزمایشگاه فناوری نانو، آزمایشگاه های شیمی و همچنین جناب آقای مهندس باقرنیاء در دانشکده شیمی به دلیل کمک های فراوان شان بسیار سپاسگذارم.

## چکیده

بسیاری از محققین در سنتز نانولوله های کربنی به روش رسوب گذاری بخار شیمیایی از ماده ای متخلخل مانند زئولیت به عنوان بستر استفاده می کنند. هدف آنها پخش یکنواخت ذرات کاتالیست بر سطح ماده بستر می باشد که منجر به رشد همگن نانولوله ها روی سطح شده و از شکل گیری ساختارهای به هم چسبیده یا توده ای در فرآیند رشد نانولوله ها جلوگیری می کند. در نتیجه آن نانولوله هایی با شکل هندسی مناسب تر، توزیع قطری یکنواخت تر و همچنین میزان نظم گرافیتی بیشتر شکل خواهند گرفت.

گزارشات نشان می دهد در به کار گیری بستر کاتالیستی، پارامترهای متعددی می توانند کمیت و کیفیت نانولوله های سنتز شده را علاوه بر مورفولوژی و ابعاد آنها دست خوش تغییر قرار دهند، پارامترهایی همچون نوع ماده بستر و ساختارش، نوع) عناصر تکی، سیستم دوگانه یا حتی سه گانه کاتالیستی) و اندازه ذرات کاتالیست(که مستقیماً با درصد وزنی کاتالیست مرتبط می باشد) و روش آماده سازی بستر کاتالیستی. علاوه بر پارامتر های فوق، پارامتر های دیگری نیز در تعیین کیفیت ساختار و ابعاد نانولوله های کربنی دخیل می باشند. برخی از این پارامترها شامل زمان و دمای سنتز، نوع منبع هیدروکربنی و میزان شارش آن و فشار محفظه واکنش می باشد، آگاهی از اثرات این پارامتر ها به محققان در رشد نانولوله هایی با ابعاد و کیفیت کنترل شده یاری می رساند.

در این تحقیق سنتز نانولوله های کربنی تولید شده به روش رسوب گذاری بخار شیمیایی گاز تغذیه استیلن در حضور کاتالیست های آهن و کبالت حمایت شده با بستر زئولیتی را مورد بررسی قرار داده ایم. اثر تخلخل ماده بستر و انواع مختلف کاتالیست اعم از سیستم یگانه و دوگانه کاتالیستی و درصد وزنی کاتالیست در ماده بستر به عنوان پارامتر های کاتالیستی، بر نحوه رشد و کیفیت نانولوله های کربنی مورد مطالعه قرار گرفته اند. از طرفی اثر پارامتر های رشد همچون دما و زمان سنتز بر میانگین قطری نانولوله ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی مشخصات ساختاری، توزیع قطری، مورفولوژی و ساختار نانولوله های سنتز شده، طرح پراش اشعه ایکس (XRD)، تصاویر میکروسکوپی روبشی (SEM) و عبوری (TEM) از نمونه ها تهیه شده است.

نتایج حاصل نشان می دهد استفاده از بستر زئولیتی با ساختار تکرار شونده شامل حفره هایی با ابعاد مشخص، به رشد یکنواخت نانولوله های کربنی منجر خواهد شد. از طرفی استفاده از سیستم کاتالیستی دوگانه آهن- کبالت فراوانی بیشتر و ساختارهایی با میزان نظم گرافیتی بالاتر را در نانولوله ها نسبت به حالت تک کاتالیستی آهن یا کبالت به دنبال دارد. با افزایش درصد وزنی کاتالیست در ماده بستر ابعاد نانوذرات کاتالیستی افزایش یافته و در نتیجه آن میانگین قطری نانولوله های سنتز شده نیز افزایش می یابد. در مورد دما و زمان سنتز، افزایش دمای سنتز باعث بیشتر شدن میزان آلودگی و افزایش میانگین قطری نانولوله ها می شود، چون در دماهای بالا از هم گسیختگی ساختار حفره زئولیتی به بالا رفتن قطر نانوذرات و به طبع آن نانولوله های سنتز شده می انجامد. افزایش زمان سنتز نیز باعث بلندتر شدن طول نانولوله ها و رشد نانولوله هایی با توزیع غیر یکنواخت قطری می شود. این توزیع قطری ناهمگن می تواند ناشی از مدل رشد غالب در فرآیند شکل گیری نانولوله ها، رشد از سر، باشد.

واژه های کلیدی: نانوذرات کاتالیستی، زئولیت، رسوب گذاری بخار شیمیایی

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول - نانولوله های کربنی</b>
1-1-1	کربن
2-1-1	گره های تجمعی کربن
1-2-1-1	الماس
2-2-1-1	گرافیت
3-2-1-1	فولرین
3-1-1	نانولوله های کربنی
1-3-1-1	ساختار و نقائص نانولوله های کربنی
2-3-1-1	خواص ویژه نانولوله های کربنی
1-2-3-1-1	واکنش پذیری شیمیایی
2-2-3-1-1	رسانایی الکتریکی
3-2-3-1-1	خواص اپتیکی
4-2-3-1-1	استحکام مکانیکی
3-3-1-1	مشخصه یابی نانولوله های کربنی
4-3-1-1	کاربرد نانولوله های کربنی
1-4-3-1-1	الکترونیک
2-4-3-1-1	ذخیره سازی انرژی
3-4-3-1-1	کامپوزیت

- 21.....4-4-3-1 حسگرهای زیستی.....
- 22.....5-4-3-1 پزشکی.....
- 23.....6-4-3-1 فرآیندهای جذبی.....
- 23.....4-1 روش های سنتز نانولوله های کربنی.....
- 24.....1-4-1 تخلیه قوس الکتریکی.....
- 27.....2-4-1 تبخیر لیزری.....
- 29.....3-4-1 رسوب گذاری بخار شیمیایی.....
- 31.....4-4-1 رسوب گذاری بخار شیمیایی تقویت شده با پلاسما.....
- 32.....5-4-1 رسوب گذاری بخار شیمیایی به روش گرمایی.....
- 33.....6-4-1 رسوب گذاری بخار شیمیایی با کاتالیست های الکلی.....
- 33.....7-4-1 رشد فاز بخار.....
- 34.....5-1 مکانیزم رشد.....
- 36.....6-1 خالص سازی.....
- 37.....1-6-1 اکسیداسیون.....
- 38.....2-6-1 اسید شویی.....
- 38.....3-6-1 استفاده از ارتعاشات مافوق صوت.....
- 39.....4-6-1 تصفیه مغناطیسی.....
- 39.....5-6-1 میکروفیلتراسیون.....
- 41.....6-6-1 برش.....
- 41.....7-6-1 کروماتوگرافی.....
- 42.....8-6-1 نتیجه گیری.....



## فصل دوم - کاتالیست و بستر

- 43.....1-2-1- مقدمه
- 44.....2-2- نقش کاتالیست
- 46.....1-2-2- روش های آماده سازی نانوذرات کاتالیست
- 46.....1-1-2-2- سل - ژل
- 49.....2-1-2-2- تلقیح
- 50.....3-1-2-2- مکانیزم تبادل یونی
- 50.....3-2- عوامل مؤثر بر نرخ رشد نانولوله های کربنی
- 51.....1-3-2- غلظت و مورفولوژی کاتالیست
- 52.....2-3-2- روش تهیه نانوذرات
- 52.....3-3-2- بستر
- 53.....4-2- برهمکنش های بستر و کاتالیست
- 54.....1-4-2- اثر برهم کنش بر ساختار الکترونیکی
- 54.....2-4-2- اثر برهم کنش بر مکانیزم رشد

## فصل سوم - زئولیت

- 56.....1-3- از گذشته تا امروز
- 58.....2-3- پیدایش زئولیت ها
- 59.....3-3- خواص
- 59.....1-3-3- کانی شناسی

- 59.....2-3-3- تبادل یونی.....
- 60.....3-3-3- واکنش با فلزات قلیایی.....
- 60.....4-3-3- جذب سطحی فیزیکی.....
- 61.....5-3-3- خواص دمایی.....
- 61.....6-3-3- پایداری ژئولیت ها.....
- 62.....4-3- ساختارهای ژئولیتی.....
- 63.....1-4-3- انواع چارچوب های ژئولیتی.....
- 64.....2-4-3- مشخصه یابی نواع چارچوب های ژئولیتی.....
- 67.....1-2-4-3- سودالیت.....
- 67.....2-2-4-3- فوجاسیت.....
- 68.....3-4-3- آرایش چارچوب.....
- 69.....5-3- سنتز ژئولیت ها.....
- 70.....1-5-3- ساخت ژئولیت ها در آزمایشگاه.....
- 71.....2-5-3- فرآیند سنتز.....
- 73.....3-5-3- مکانیزم کلی فرآیند سنتز ژئولیت ها.....

### فصل چهارم - روش های تجربی

- 75.....1-4- مقدمه.....
- 76.....2-4- سنتز نانوذرات کاتالیست.....
- 77.....1-2-4- مواد اولیه مورد استفاده برای سنتز نانوذرات.....
- 77.....2-2-4- روش ساخت نانوذرات کاتالیستی.....

78.....	3-4- سستز نانولوله های کربنی.....
78 .....	1-3-4- مشخصات دستگاه CCVD.....
80.....	2-3-4- مراحل انجام آزمایش.....

## فصل پنجم - آنالیز، تحلیل و نتیجه گیری

82.....	1-5- مقدمه.....
83.....	2-5- زئولیت NaY.....
85.....	3-5- بررسی اثر نوع کاتالیست بر رشد نانولوله های کربنی.....
87.....	4-5- بررسی اثر درصد وزنی کاتالیست بر میانگین قطری نانولوله های کربنی.....
88.....	1-4-5- مرحله اول، نانوذرات با درصد های یکسان از آهن و کبالت.....
91.....	2-4-5- مرحله دوم، نانوذرات با درصد های غیر یکسان از آهن و کبالت .....
94.....	5-5- مقایسه اثر دمای واکنش.....
99.....	6-5- بررسی اثر زمان واکنش.....
104 .....	7-5- حالت بهینه در پارامترهای رشد.....
106.....	8-5- جمع بندی نتایج.....
108.....	9-5- پیشنهادات.....
109.....	منابع.....

## فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

### فصل اول - نانولوله های کربنی

- شکل 1-1- الماس با ساختار مکعبی و شش وجهی ..... 3
- شکل 1-2- ساختار گرافیت ..... 5
- شکل 1-3- نحوه شکل گیری ساختار فولرینی و فولرین  $C_{60}$  ..... 8
- شکل 1-4- بردارهای ممکن که بوسیله اعداد صحیح  $(n, m)$  برای نانولوله های کربنی تعیین می شوند از جمله نانولوله های زیگزاک، آرمچیر و کایرال ..... 13
- شکل 1-5- نانولوله های آرمچیر، زیگزاک و کایرال ..... 14
- شکل 1-6- دستگاه سنتز نانولوله های کربنی به روش قوس الکتریکی ..... 26
- شکل 1-7- نمایی از دستگاه تبخیر لیزری ..... 28
- شکل 1-8- نمایی از دستگاه رسوب گذاری بخار شیمیایی ..... 31
- شکل 1-9- طرحی از دستگاه رشد از فاز بخار ..... 33
- شکل 1-10- نمایی از دستگاه میکروفیلتراسیون ..... 40

### فصل سوم - ژئولیت

- شکل 3-1- چارچوب های رایج ژئولیتی، صفحه  $4.8^2$  ..... 65
- شکل 3-2- چارچوب سودالیت و فوجاسیت ..... 68
- شکل 3-3- مکانیزم کلی شکل گیری ژئولیت ها ..... 74

## فصل چهارم - روش های تجربی

شکل 4-1- تصویر دستگاه CCVD. .... 80

## فصل پنجم - آنالیز، تحلیل و نتیجه گیری

شکل 5-1- اندازه حفره مرکزی، تصویر SEM و طرح پراش اشعه ایکس مربوط به زئولیت NaY..... 84

شکل 5-2- تصاویر میکروسکوپی SEM از نانولوله های سنتز شده با کاتالیست های 251 ، 252 و 253..... 87

شکل 5-3- نمودار فراوانی مربوط به نانولوله های تولید شده از کاتالیست تکی و دوگانه..... 87

شکل 5-4- طرح پراش اشعه ایکس از نمونه هایی با درصد وزنی 15%، 25% و 35% (درصد یکسان از هر کاتالیست)..... 88

شکل 5-5- تصاویر میکروسکوپی SEM از نمونه های کاتالیست دوگانه با درصد های وزنی (الف) 15%، (ب) 25% و (ج) 35%.

(درصد های یکسان)..... 90

شکل 5-6- نمودارهای توزیع آماری مربوط به نمونه هایی با درصد وزنی کاتالیست (الف) 15%، (ب) 25% و (ج) 35% (درصد

های یکسان)..... 91

شکل 5-7- طرح پراش اشعه ایکس از نمونه هایی با درصد وزنی 15%، 25% و 35% (درصد های غیر یکسان از هر

کاتالیست)..... 92

شکل 5-8- تصاویر میکروسکوپی SEM از نمونه های کاتالیست دوگانه با درصد های وزنی (الف) 15%، (ب) 25% و (ج) 35%.

(درصد های غیر یکسان)..... 93

شکل 5-9- نمودارهای توزیع آماری مربوط به نمونه های با درصد کاتالیستی (الف) 15%، (ب) 25% و (ج) 35%..... 94

شکل 5-10- تصاویر میکروسکوپی SEM از نمونه های 6515، 7015، 7515 و 8015..... 96

شکل 5-11- نمودار توزیع آماری مربوط به نمونه های 6515، 7015، 7515 و 8015..... 97

شکل 5-12- تصاویر میکروسکوپی TEM از نمونه های 6515 و 8015..... 99

شکل 5-13- تصاویر میکروسکوپی SEM از نمونه های 0575، 1575 و 3075..... 101

شکل 5-14- نمودارهای توزیع آماری مربوط به نمونه های 0575، 1575 و 3075.....102

شکل 5-15- طرح واره ای از مدل رشد نانولوله های کربنی و تصویر میکروسکوپی TEM از مدل رشد از سر در نانولوله

ها.....103

شکل 5-16- تصاویر SEM و نمودار توزیع قطری مربوط به نمونه سنتز شده در دمای °C 650 و زمان 15

دقیقه.....105

## فهرست جداول

صفحه

عنوان

### فصل دوم - کاتالیست و بستر

جدول 1-2 - پیش ماده‌های مرسوم در تحقیقات سل-ژل..... 47

### فصل پنجم - آنالیز، تحلیل و نتیجه گیری

جدول 1-5 - درصد کاتالیست آهن و کبالت در سیستم دوگانه کاتالیستی با درصد غیر یکسان..... 91

جدول 2-5 - شرایط تولید نمونه های نانولوله به منظور بررسی اثر دمای سنتز..... 95

جدول 3-5 - شرایط تولید نمونه های نانولوله به منظور بررسی اثر زمان سنتز..... 100

## لیست علائم و اختصارات

CNTs	نانولوله های کربنی
CVD	رسوب گذاری بخار شیمیایی
Single-wall Carbon Nanotubes (SWCNTs)	نانولوله های کربنی تک دیواره
Multi-wall Carbon Nanotubes (MWCNTs)	نانولوله های کربنی چند دیواره
Scanning Electron Microscopy (SEM)	میکروسکوپ الکترونی روبشی
Transmission Electron Microscopy (TEM)	میکروسکوپ الکترونی عبوری
X- Ray Diffraction (XRD)	پراش اشعه ایکس



## فصل اول

### نانولوله های کربنی

#### ۱-۱- کربن

کربن انعطاف پذیرترین عنصر در جدول تناوبی است که خواصش همواره به نوع، قدرت و تعداد پیوندهایی که با عناصر مختلف می تواند داشته باشد، بستگی دارد. تنوع پیوندها و هندسه متناظر با آنها حضور ساختارهای ایزومری را امکان پذیر می سازد. کربن ششمین عنصر در جدول تناوبی و متشکل از شش الکترون می باشد؛ این الکترون ها به طور یکنواخت بین اوربیتال های  $2s, 1s$  و  $2p$  پخش شده اند.

پیوندهای کووالانسی با انتقال الکترون از اوربیتال  $2s$  به یک، دو یا سه اوربیتال  $2p$  تشکیل می شوند که به این فرایند هیبریداسیون گفته می شود. بسته به اینکه چه تعداد از اوربیتال های  $p$  درگیر هستند، هیبریداسیون می تواند در سه شکل مختلف اتفاق بیافتد [۱].

در اولین مدل از هیبریداسیون، اوربیتال  $2s$  الکترونش را با یکی از اوربیتال های  $2p$  به اشتراک می گذارد و دو اوربیتال هیبرید به شکل  $sp^1$  را در یک هندسه خطی با زاویه جدایی  $180^\circ$  تشکیل می دهد. در مدل دوم الکترون  $2s$  با دو اوربیتال  $2p$  به اشتراک گذاشته شده و سه اوربیتال هیبرید  $sp^2$  واقع در یک صفحه با زاویه

جدایی  $120^\circ$  را نتیجه می‌دهد. برای سومین حالت نیز الکترون اوربیتال  $2s$  با سه اوربیتال  $2p$  به اشتراک گذاشته می‌شود و چهار اوربیتال  $sp^3$  با زاویه جدایی  $109.5^\circ$  را ایجاد می‌کند [۲].

به طور کلی اتم‌های کربن به منظور تشکیل مولکول می‌توانند دو نوع پیوند پای<sup>۱</sup> و سیگما<sup>۲</sup> با دیگر اتم‌ها برقرار کنند. ساختار مولکولی نهایی به درجه هیبریداسیون اوربیتال های کربن بستگی دارد؛ هیبرید  $sp^1$  می‌تواند دو پیوند پای و دو پیوند سیگما برقرار کند در حالیکه هیبریدهای  $sp^2$  توانایی برقراری سه پیوند سیگما و تنها یک پیوند پای را دارند و هیبریدهای  $sp^3$  هم چهار پیوند فقط از نوع سیگما تشکیل می‌دهند. در هیبریداسیون  $sp^3$  چهار اوربیتال  $2sp^3$  به صورت چهاروجهی جهت گیری کرده و چهار پیوند سیگما یکسان از طریق همپوشانی با اوربیتال اتم‌های دیگر برقرار می‌کنند. در هیبریداسیون  $sp^2$  سه اوربیتال مشابه شکل می‌گیرد که سه پیوند سیگما را برقرار می‌کند و تک اوربیتال  $2p$  هیبرید نشده باقی مانده تک پیوند پای را نتیجه می‌دهد. برای هیبرید  $sp^1$  نیز دو اوربیتال غیر هیبریدی وجود دارد که پیوندهای پای را با اتم‌های مجاور برقرار می‌کنند و دو اوربیتال هیبریدی پیوندهای سیگما را تشکیل خواهند داد [۲]. تعداد و ماهیت این پیوندها هندسه و خواص گروه‌های تجمعی<sup>۳</sup> کربن را تعیین می‌کند.

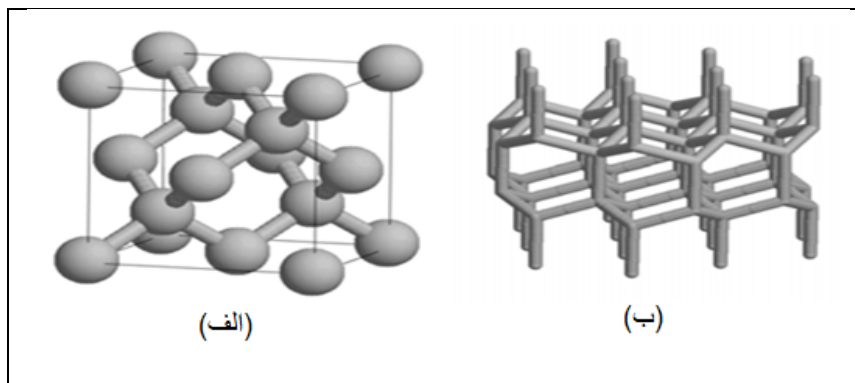
## ۱-۲- گروه‌های تجمعی کربن

تاکنون چهار شکل گوناگون از کربن شناخته شده است؛ غیر متبلور (آمورف)، الماس<sup>۴</sup>، گرافیت<sup>۵</sup> و فولرین<sup>۶</sup>. کربن در نوع غیر بلورین اساساً گرافیت است اما به صورت ساختارهای بزرگ بلورین وجود ندارد. کربن در این ساختار بیشتر به شکل پودر می‌باشد که بخش اصلی موادی مثل ذغال چوب و دوده را تشکیل می‌دهد.

<sup>1</sup> Pi( $\pi$ )  
<sup>2</sup> Sigma( $\sigma$ )  
<sup>3</sup> Allotropes  
<sup>4</sup> Diamond  
<sup>5</sup> Graphite  
<sup>6</sup> Fullerene

## ۱-۲-۱-الماس

فرآیند شکل گیری الماس تا به امروز به طور کامل شناخته نشده است اما به طور معمول تصور می شود الماس محصول تبدیل دیگر ساختارهای کربنی مانند گرافیت باشد. در عمقی بیش از ۱۵۰ متر از سطح زمین در فشاری تقریباً برابر ۴/۵ گیگا پاسکال و دمای بین ۹۰۰ تا ۱۳۰۰°C این تبدیل رخ می دهد. الماس دارای ساختاری بلوری است که در آن هر اتم کربن با اوربیتال های هیبرید  $sp^3$  با چهار اتم کربن دیگر در یک چینش چهاروجهی تشکیل پیوندهای سیگما می دهد. پیوندهای کربن-کربن در این ساختار طولی برابر  $\text{\AA}$  ۱/۵۴۴ را دارا هستند. به طور کلی دو نوع مدل ساختاری برای الماس وجود دارد: مکعبی و شش وجهی. ساختار بلوری الماس به طور طبیعی مکعبی مرکز سطحی با ثابت شبکه  $\text{\AA}$  ۳/۵۶ و شامل هشت اتم در سلول واحد می باشد. در واقع ساختار الماس از دو مکعبی مرکز سطحی به هم فشرده تشکیل شده است که در راستای محور متعامد سلول واحد درون یکدیگر وارد شده اند. از طرفی این امکان نیز وجود دارد که با اعمال فشار زیاد بر گرافیت در راستای محور Z در دمایی مشخص ساختار شش وجهی الماس بدست آید. شبکه شش وجهی الماس نیز مانند هماتیت مکعبی خود از چهاروجهی های کربن اما با چینشی متفاوت تشکیل شده است. سلول واحد شامل چهار اتم و پارامترهای شبکه در این ساختار به ترتیب برابر با  $\text{\AA}$   $a_0 = 2/52$  و  $c_0 = 4/12$  می باشند. این دو ساختار در شکل ۱-۱ نمایش داده شده اند.



شکل ۱-۱-الماس با ساختار (الف) مکعبی و (ب) شش وجهی

دسته بندی دیگری از الماس بر اساس درصد نیتروژن این ساختار وجود دارد؛ نوع اول شامل نیتروژن به عنوان اجزای کوچک با ترکیب تقریبی  $C_3N$  می‌باشد، و در نوع دوم نیتروژن در بلور به طور یکنواخت گسترده شده است [۵].

خواص فیزیکی الماس مستقیماً به ساختارش بستگی دارد. این شبکه بلوری باعث می‌شود الماس به عنوان سخت‌ترین ماده در طبیعت شناخته شود که بالاترین چگالی اتمی را نیز دارا است. وجود اوربیتال های هیبرید  $sp^3$  در این ساختار باعث می‌شود الماس خواصی از جمله شفافیت و همچنین نقطه ذوب بسیار بالا در حدود  $4500\text{ K}$  را نیز دارا باشد. از طرفی این ساختار با گاف نواری در حدود  $5/5$  الکترون ولت یک عایق الکتریکی محسوب می‌شود.

هرچند آنتالپی شکل گیری الماس تحت شرایط استاندارد مقدار  $1/9$  کیلوژول بر مول می‌باشد که از همین مقدار برای گرافیت بیشتر است، الماس به طور خود به خود به گرافیت تبدیل نمی‌شود اما تحت شرایط عادی تغییر شکل نیمه پایداری خواهد داشت.

### ۱-۲-۲- گرافیت

در گرافیت اتم‌های کربن در صفحاتی آرایش یافته‌اند که از طریق پیوندهای سیگمای هیبریدهای  $sp^2$  و پیوند پای که نیروی واندروالس ضعیف بین صفحات را تأمین می‌کند به هم متصل می‌شوند.

این ساختار بلورین ایده آل در گرافیت شامل لایه‌هایی است که در آنها اتم‌های کربن در یک شبکه لانه زنبوری شامل دو اتم در سلول واحد، آرایش یافته‌اند. چینش صفحات گرافیت به صورتی است که اتم‌های واقع در مکان‌های  $A$  و  $A'$  در لایه‌های پیاپی در زیر یکدیگر قرار می‌گیرند، اما اتم‌های  $B$  در بالای مکان‌های اشغال نشده در لایه‌های مجاور قرار دارند. این صفحات در یک آرایش  $ABAB$  که به چینش