

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه کردستان  
دانشکده علوم پایه  
گروه فیزیک

عنوان:

مطالعه انتقال الکترون از نانو نوارهای گرافن

پژوهشگر:

سید رضا غضنفری

استاد راهنما:

دکتر محمد رضا ستاره

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش نظری

خرداد 1389

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه کردستان است.

"تقدیم به پدر و  
مادر مهربانم"



## \*\*\* تعهد نامه \*\*\*

اینجانب سید رضا غضنفری دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش نظری دانشگاه کردستان، دانشکده علوم پایه گروه فیزیک تعهد می‌نمایم که محتوای این پایان‌نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

سید رضا غضنفری

1389/3/31

## چکیده

نانو نوار گرافن، یک نانو صفحه کربنی به ضخامت یک اتم کربن، که برای اولین بار در سال 2004 جداسازی شد، در سال‌های اخیر موقعیت‌های تازه‌ای را در زمینه پژوهشها و کاربردهای عملی مرتبط با فناوری نانو فراهم نموده است. از اینرو هدف اصلی در این پایان نامه مطالعه انتقال الکترون از نانو نوارهای گرافن می‌باشد.

در فصل اول، بعد از معرفی ساختارهای کربنی، به طور جامع به بحث در مورد ساختار الکترونیکی گرافن می‌پردازیم و معادله حاکم بر رفتار برانگیختگی‌های کم انرژی آن را به صورت معادله دو بعدی دیراک بدون جرم به دست می‌آوریم. تونل زنی ذرات در گرافن در فصل دوم بررسی شده است. در این فصل مشخص خواهد شد که برخلاف تونل زنی‌های شناخته شده تاکنون، تونل زنی در گرافن برای زاویه فرود عمود همواره با احتمال یک انجام می‌شود. در فصل سوم پس از معرفی ماتریس انتقال و خواص عمده آن، با استفاده از روش ماتریس انتقال به مطالعه عبور الکترون از سد پتانسیل الکترواستاتیکی ایجاد شده بر روی نانو نوارهای گرافن می‌پردازیم. بررسی انتقال الکترون از نانو نوارهای گرافن با حضور سدهای مغناطیسی در حالت‌های مختلف در فصل چهارم صورت گرفته است. در این فصل مشخص می‌شود که برخلاف سد پتانسیل الکترواستاتیکی، برای سد مغناطیسی احتمال عبور الکترون در برخورد عمود همواره برابر یک نخواهد شد.

سرانجام، در فصل پنجم عبور یک بعدی الکترون‌ها از یک مجموعه‌ی دلخواه از سدهای پتانسیل الکترواستاتیکی مستطیلی شکل در میان دو صفحه گرافن را بررسی می‌کنیم. در این فصل به طور تحلیلی یک ماتریس انتقال کلی را برای این سیستم دلخواه تعیین می‌نماییم. در آخر این فصل این روش ابتکاری را برای سیستمی که در فصل دوم آن را بررسی کردیم امتحان کرده و به نتیجه‌ای یکسان با نتیجه‌ی به دست آمده در فصل دوم می‌رسیم.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

1	فصل اول (معرفی ساختار های کربن) .....
1	1-1 ساختارهای کربنی .....
2	1-1-1 هیبرید $sp^1$ .....
3	2-1-1 گرافیت و هیبرید $sp^2$ .....
5	3-1-1 الماس و هیبرید $sp^3$ .....
6	4-1-1 نانولوله کربنی .....
7	5-1-1 فولرن .....
7	6-1-1 گرافن .....
9	2-1 روش های جداسازی گرافن .....
10	1-2-1 جداسازی به روش مکانیکی .....
11	2-2-1 رشد گرافن .....
11	3-1 پایداری گرافن .....
12	4-1 شبکه لانه زنبوری گرافن .....
13	5-1 تقریب تنگ بست برای الکترون های درون یک شبکه ی لانه زنبوری .....
15	1-5-1 تئوری بلوخ .....
17	2-5-1 شبکه با چند اتم به ازای هر سلول واحد .....
19	3-5-1 حل تفصیلی .....
20	4-5-1 حل مسئله برای گرافن با در نظر گرفتن اثر نزدیکترین همسایه اول و دوم .....
24	5-5-1 رابطه ی پراکندگی الکترون های $\pi$ در گرافن .....
27	6-5-1 هامیلتونی مؤثر تنگ بست .....
28	7-5-1 حد پیوسته .....



32.....	فصل دوم (تونل زنی ذرات در گرافن)
32.....	1-2 تونل زنی ذرات
35.....	2-2 کایرالیته ذرات بدون جرم در گرافن
38.....	3-2 سد پتانسیل مستطیلی در گرافن
43.....	فصل سوم (بررسی انتقال الکترون توسط ماتریس انتقال)
43.....	1-3 ماتریس انتقال
46.....	1-1-3 دترمینان ماتریس انتقال
48.....	2-1-3 دامنه موج خروجی
49.....	3-1-3 احتمال عبور
49.....	2-3 عبور انتخابی الکترون‌ها از یک تقاطع $n-p$
52.....	1-2-3 تقاطع با پتانسیل پله‌ای
54.....	2-2-3 تقاطع با پتانسیل نرم
59.....	فصل چهارم (بررسی انتقال الکترون با اعمال میدان مغناطیسی)
59.....	1-4 عبور الکترون از یک سد مغناطیسی
67.....	2-4 ساختارهایی با آرایش مختلف از اعمال میدان مغناطیسی
71.....	1-2-4 ترکیب سدهای مغناطیسی
75.....	2-2-4 ساختارهای شامل سد و چاه مغناطیسی
79.....	فصل پنجم (انتقال یک بعدی الکترون در گرافن با پتانسیل تکه ایی ثابت)
79.....	1-4 صفحات گرافن و ناحیه پتانسیل
86.....	2-4 ماتریس انتقال
88.....	3-4 ناحیه پتانسیل با پتانسیل ثابت
91.....	مراجع
94.....	پیوست 1
95.....	پیوست 2

## فصل اول

### معرفی ساختارهای کربن

#### 1-1- ساختارهای کربنی

کربن<sup>1</sup> ششمین عنصر در جدول تناوبی است و در بالای گروه چهارم قرار گرفته است. این عنصر به طرق مختلف در محیط اطراف ما حضور داشته و وجود آن در تمامی بافتهای زنده، نقش آن را در پیدایش و بقای حیات، غیر قابل انکار می کند. کربن به صورت خالص به دو گونه مختلف الماس و گرافیت<sup>2</sup> در طبیعت یافت می شود، که این دو ماده از سالها قبل برای بشر شناخته شده هستند. هرچند این دو ماده تنها در آرایش اتمهای کربن با هم اختلاف دارند، ولی هر کدام از آنها دارای خواص فیزیکی بسیار متفاوتی هستند. در سال 1985 اولین ماده کربنی خالص مصنوعی دارای ساختاری متفاوت از الماس و گرافیت، مولکول کروی شکل بنام فولرن<sup>3</sup> [1]، و در سال 1991 دومین ساختار مصنوعی کربن بنام نانولولهی کربنی<sup>4</sup> کشف شد [2]. با کشف این دو ساختار جدید، وجود گونه های مختلف کربن در تمامی ابعاد، بغیر از شکل دو بعدی آن، برای دانشمندان به اثبات رسید.

---

<sup>1</sup> واژه لاتین Carbo به معنی ذغال چوب است.

<sup>2</sup> واژه گرافیت در زبان یونانی به معنی نوشتن است.

<sup>3</sup> Fullerene

<sup>4</sup> Carbon Nanotube

اتم کربن در مجموع دارای شش الکترون می‌باشد که دوتای آنها پوسته داخلی، یعنی اربیتال  $1s$  را اشغال می‌نمایند و چهار الکترون باقی مانده تراز ظرفیت، که شامل اربیتالهای  $2s$  و  $2p$  می‌باشند را پر می‌کنند. از این رو در حالت برانگیخته، چهار حالت معادل  $\langle 2s \rangle$ ،  $\langle 2p_x \rangle$ ،  $\langle 2p_y \rangle$  و  $\langle 2p_z \rangle$  وجود خواهند داشت، به این صورت که برهمنش حالت  $\langle 2s_i \rangle$  با حالت‌های  $\langle 2p_i \rangle$ ، هیبرید  $sp^n$  نامیده می‌شود. ویژگی مهم اوربیتال‌های  $sp^n$  این است که این اوربیتال‌ها قادر به ایجاد  $n + 1$  پیوند کووالانسی در جهت‌های مختلف هستند، که به موجب آن می‌توان ساختارهای مختلفی از اتم‌های کربن را متصور شد. بنابراین برای فهم تفاوت بین ساختارهای کربنی باید به انواع مختلف اربیتال‌های پیوندی اتم‌های کربن در آن‌ها توجه کنیم، که در ادامه به توضیح انواع مختلف هیبریداسیون<sup>5</sup> اتم‌های کربن می‌پردازیم.

### 1-1-1 هیبرید $sp^1$

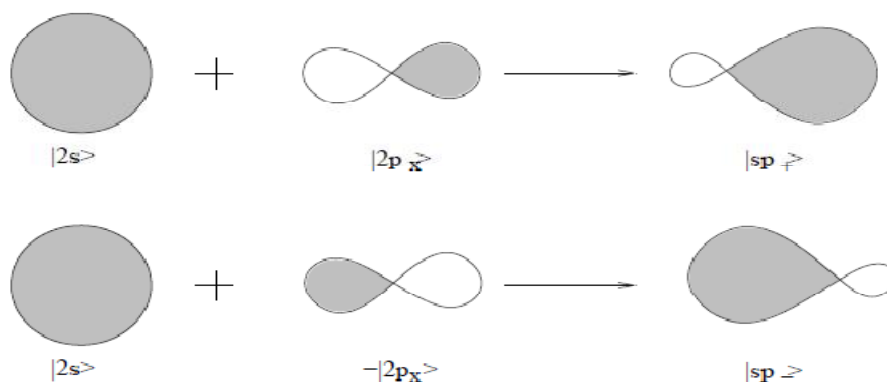
برهمنش اربیتال  $2s$  با یکی از اربیتال‌های  $2p$  به تولید اربیتال هیبریدی  $sp^1$  می‌انجامد. برای نمونه برهمنش حالت  $\langle 2s \rangle$  و  $\langle 2p_x \rangle$  به دو حالت متقارن و پادمقارن که به ترتیب با  $\langle sp_+ \rangle$  و  $\langle sp_- \rangle$  مشخص می‌شوند می‌انجامد

$$|sp_+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|2s\rangle + |2p_x\rangle) \quad |sp_-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|2s\rangle - |2p_x\rangle) \quad (1-1)$$

$|2p_x\rangle$ ،

سطح انرژی ترکیب متقارن نسبت به زمانی که اتم‌ها جدا هستند پایین‌تر است، از این رو ترکیب متقارن، حالت پیوندی نامیده می‌شود. ولی سطح انرژی ترکیب پاد متقارن نسبت به حالتی که اتم‌ها از هم فاصله زیادی دارند، بیشتر است و به آن‌ها ترازهای پاد پیوندی می‌گویند (شکل 1-1 را ببینید). توجه کنید که در این فرایند دو حالت  $\langle 2p_y \rangle$  و  $\langle 2p_z \rangle$  همچنان بدون تغییر باقی می‌مانند.

<sup>5</sup> Hybridization



**شکل 1-1**: نمایش شماتیک هیبرید  $sp^1$ . در سمت چپ چگالی ابر الکترونی اربیتالهای  $2s$  و  $2p$  نشان داده شده است در حالی که در سمت راست چگالی ابر الکترونی مربوط به پیوندهای هیبریدی مشخص است [3].

واضح است که ابر الکترونی اربیتالهای هیبریدی که دمبلی شکل می‌باشند برای حالت  $|sp_+\rangle$  ( $|sp_-\rangle$ ) از سمت  $x$  گسترده‌تر است. هر اوربیتال  $sp^1$  نه دمبلی شکل و نه کروی شکل است و چون ابرهای الکترونی این دو اوربیتال نسبت به هم دافعه دارند، در اطراف هسته اتم طوری قرار می‌گیرند که حداکثر فاصله و حداقل دافعه را نسبت به هم داشته باشند و به همین دلیل در امتداد یک خط راست قرار می‌گیرند. در واقع این نوع از هیبریداسیون به تشکیل مولکولهایی نظیر استیلن با فرمول شیمیایی  $H-C \equiv C-H$  می‌انجامد که همپوشانی اربیتالهای اتم‌های مجاور در آن، پیوندهای کووالانسی  $\sigma$  را نتیجه می‌دهد. خاطر نشان می‌شود که در هیبریداسیون  $sp^1$  دو اربیتال غیر هیبریدی  $|2p_y\rangle$  و  $|2p_z\rangle$ ، مسئول تشکیل پیوندهای موسوم به پیوند  $\pi$  می‌باشند که بسیار سست‌تر از پیوندهای کووالانسی  $\sigma$  هستند.

### 2-1-1- گرافیت و هیبرید $sp^2$

این نوع پیوند هیبریدی از برهم‌نشی اربیتال  $2s$  و دو اربیتال  $2p$  که می‌توانند هر کدام از حالت‌های  $|2p_x\rangle$  یا  $|2p_y\rangle$  باشند، تشکیل شده است. از این رو سه حالت هیبریدی مختلف  $sp^2$ ، برای

پیوند با اتم‌های 1، 2 و 3 (با فرض اینکه اتم 1 در راستای محور  $x$  است) را می‌توان با روابط زیر نشان

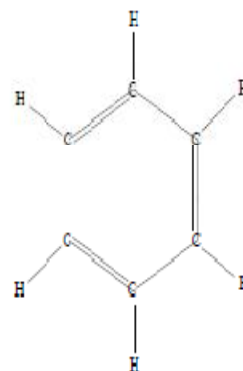
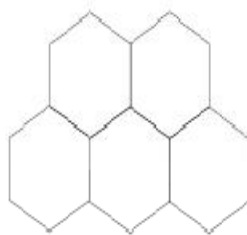
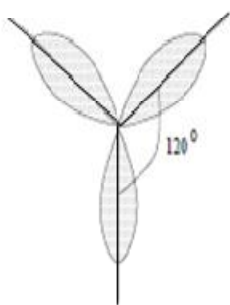
داد

$$|sp_1^2\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}|2s\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}}|2p_x\rangle \quad (2-1)$$

$$|sp_2^2\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}|2s\rangle - \sqrt{\frac{2}{3}}\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}|2p_y\rangle + \frac{1}{2}|2p_x\rangle\right) \quad (3-1)$$

$$|sp_3^2\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}|2s\rangle - \sqrt{\frac{2}{3}}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}|2p_y\rangle + \frac{1}{2}|2p_x\rangle\right) \quad (4-1)$$

سه اربیتال هیبریدی  $sp^2$  که در هریک  $\frac{2}{3}$  ابر الکترونی از نوع  $p$  و  $\frac{1}{3}$  از نوع  $s$  می‌باشد، نسبت به هم طوری قرار می‌گیرند که حداکثر فاصله را نسبت به هم داشته باشند و به همین دلیل، بر روی یک صفحه مسطح قرار می‌گیرند و زاویه بین پیوندهای آن  $120^\circ$  می‌باشد. همانگونه که از شکل (2-1) پیدا است، حالتی که توسط این نوع اربیتالها داده می‌شوند در صفحه  $(x, y)$  واقع می‌باشند و با یکدیگر زاویه  $120$  درجه می‌سازند.



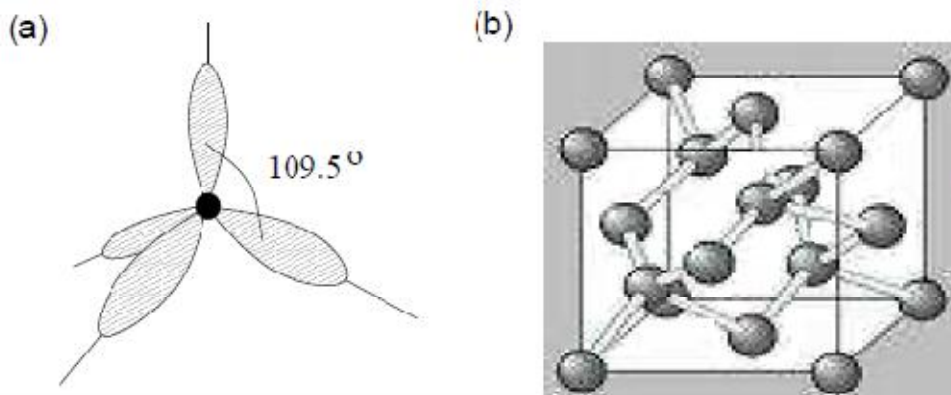
**شکل 1-2:** نمایش شماتیک هیبرید  $sp^2$  ساختار لانه زنبوری صفحات گرافیت مانند ساختار شش ضلعی مولوکول بنزن است با این تفاوت که اتمهای هیدروژن جای خود را به اتمهای کربن داده‌اند [3].

یک مثال آشنا از این نوع هیبریداسیون مولکول بنزن<sup>6</sup> است که اتمهای کربن در آن در گوشه‌های یک شش ضلعی جای گرفته‌اند. ماده دیگری که در آن هیبریداسیون  $sp^2$  اتم‌ها نقش اساسی را دارد، گرافیت است که از شمار بسیار زیادی لایه‌های مختلف که در یک شبکه لانه زنبوری آرایش یافته‌اند، تشکیل شده است. در گرافیت اربیتال باقیمانده  $2p_z$  که عمود بر صفحه  $(x, y)$  است به سبب همپوشانی پهلو به پهلو با اربیتال  $p_z$  اتمهای لایه‌های دیگر، پیوند ضعیف  $\pi$  را می‌سازد. به طوری که این لایه‌ها به سبب وجود پیوندهای سست مابین آن‌ها (پیوند  $\pi$  ناشی از اربیتال‌های  $2p_z$ )، به آسانی (البته بصورت توده‌ای) از هم جدا می‌شوند. در واقع در ادامه آشکار خواهد شد که رسانندگی الکتریکی و گرمایی مشاهده شده برای گرافیت به سبب وجود همین پیوندهای سست است.

### 1-1-3- الماس و هیبرید $sp^3$

ترکیب اربیتال‌های  $2s$  با هر سه اربیتال  $2p$  به هیبریداسیون  $sp^3$  می‌انجامد، که این هیبرید متشکل از چهار اربیتال دمبلی شکل که در گوشه‌های یک چهاروجهی هستند و با یکدیگر زاویه  $109.5$  درجه می‌سازند، خواهد بود، شکل (3-1 (a)). یک مثال آشنا برای این هیبریداسیون، الماس است که هر چهار اربیتال کربن در آن در پیوندهای کووالانسی با اتم‌های کربن شرکت می‌کنند.

<sup>6</sup> Benzene



**شکل 3-1:** شکل سمت چپ هیبرید  $sp^3$  که با ساختاری چهار وجهی که با یکدیگر زاویه  $109.5$  درجه می سازند و شکل سمت راست ساختار بلوری الماس را نشان می دهد [3].

شبکه الماس همانگونه که در شکل (3-1 (b)) نشان داده شده است، از دو شبکه مکعبی مرکز پر (fcc) با ثابت شبکه  $0.365$  نانو متر تشکیل شده است. قبل از اتمام این مبحث می توان به این نکته اشاره کرد که، علی رغم این که اساس تمامی این ساختارها عنصر کربن است، هر یک از این ساختارها از نظر فیزیکی خواص بسیار متفاوتی را از خود بروز می دهند. برای مثال می توان به برخی از تفاوت های میان گرافیت و الماس اشاره کرد. جدا از تفاوت ظاهری آشکار این دو ماده (الماس ماده ای شفاف است ولی گرافیت کدر و سیاه رنگ است)، همچنان که ذکر شد گرافیت ماده ای بسیار نرم است و این در حالی است که الماس به سبب وجود پیوندهای قوی کووالانسی میان اتم های کربن، یکی از سخت ترین مواد موجود در طبیعت به شمار می رود. الکترونهای  $p_z$  در گرافیت جایگزیده نمی باشند و از این رو موجب افزایش رسانندگی گرافیت می شوند، در حالی که به دلیل مشارکت تمامی چهار الکترون ظرفیت کربن در تشکیل پیوندهای  $\sigma$ ، الماس بر خلاف گرافیت، جزء عایقهای الکتریکی بسیار خوب محسوب می شود.

### 1-1-4- نانولوله کربنی

نانولوله های کربنی از لوله شدن یک صفحه کربنی به ضخامت یک اتم که در آن ها اتم ها در یک آرایش شش گوشه در کنار یکدیگر قرار گرفته اند و هر یک دارای هیبریداسیون  $sp^2$  هستند، به شکل

یک استوانه‌ای توخالی به وجود می‌آیند. این شکل از کربن در سال 1991 بطور اتفاقی توسط سامیو ایجیما<sup>7</sup> (در شرکت NEC ژاپن) ساخته و به عنوان یک گونه‌ی کربن یک بعدی شناخته شد. از خواص ویژه و منحصر به فرد نانو لوله‌ها می‌توان به واکنش‌پذیری شیمیایی بالای نانو لوله‌ها که نتیجه‌ی مستقیم انحنا‌ی سطح آن‌ها است (با کاهش قطر نانو لوله واکنش‌پذیری شیمیایی افزایش می‌یابد) اشاره کرد [4]. به جهت مدول یانگ بالا و استحکام کششی خوب و خواص الکتریکی 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 ارزان‌تر می‌باشد) از طرف دیگر، نانو لوله‌های کربنی توجه زیادی را در زمینه‌های فیزیک مزوسکوپیک، علم مواد و وسیله‌های الکتریکی جدید به خود جلب کرده‌اند [5].

## 1-1-5- فولرن

فولرن در سال 1985، توسط سه دانشمند به نام‌های کروتو<sup>8</sup>، هیث<sup>9</sup> و اُبراین<sup>10</sup> کشف شد. این مولکول به علت شباهتی که با ساختار توصیف شده توسط معمار معروف، باک مینستر فولر<sup>11</sup> داشت، به این اسم نامیده شد. فولرن، نخستین مولکول کربن کروی شناخته شده با کربن‌های مرتب شده، در قالب کره‌ای به شکل توپ فوتبال می‌باشد. پایه‌ی فولرین‌ها را صفحات موجود در گرافیت تشکیل می‌دهند، با این تفاوت که در ساختار اتمی فولرین‌ها بجای شش ضلعی‌های منظم موجود در این صفحات، یک سری شش ضلعی و پنج ضلعی منظم وجود دارند که به صورت یک در میان در کنار هم قرار گرفته و کره فولرن را تشکیل داده‌اند. قرارگیری این پنج ضلعی و شش ضلعی‌ها در کنار هم برای شکل دادن یک ساختار کروی ضروری است.

---

<sup>7</sup> S. Iijima

<sup>8</sup> H. W. Kroto

<sup>9</sup> J. R. Heath

<sup>10</sup> S. C. O'Brien

<sup>11</sup> Fuller Richard Buckminster



فولرن‌ها را با توجه به تعداد اتم‌های موجود در ساختمانشان شناسایی می‌کنند. برای نامگذاری فولرن‌ها از یک حرف C استفاده می‌شود که بیانگر اتم کربن موجود در ساختار آنها است، بعد از حرف C تعداد اتم‌های کربن موجود در واحد شبکه‌ی کروی فولرن ذکر می‌شود. مثلاً مولکول C<sub>60</sub> دارای 60 اتم کربن است.

### 1-1-6- گرافن

بحث در مورد وجود یا عدم وجود ساختارهای دوبعدی، از سال‌ها قبل در بین دانشمندان وجود داشت و به واسطه برخی نظریه‌ها مبنی بر این که یک بلور دو بعدی در فضای آزاد، نظم بلوری بلند بُرد خود را از دست می‌دهد (به سبب افت و خیزهای گرمایی، در دمای بسیار کم اما متناهی، ذوب می‌شود) [6-10]، وجود یک بلور دو بعدی مورد تردید بود، تا این که در سال 2004 گروهی از محققان در دانشگاه منچستر موفق به استخراج نمونه‌ای پایدار از گرافیت به ضخامت یک اتم کربن شدند [11]، و این لایه‌ی تک اتمی را گرافن<sup>12</sup> نامیدند. با کشف گرافن ساختارهای کربن در تمامی ابعاد، شناخته شدند شکل (1-4).



**شکل 1-4:** نمایش انواع ساختارهای کربنی. به ترتیب (از چپ به راست) ساختار الماس، گرافیت، گرافن، نانوله کربنی و فولرن نشان داده شده است [12].

<sup>12</sup> Graphene

گرافن یک بلور دوبعدی از اتمهای کربن است که اتمهای کربن در آن با اربیتالهای پیوندی  $sp^2$ <sup>13</sup>، یک چیدمان شش ضلعی را تشکیل داده‌اند. در سالهای اخیر پژوهشهای زیادی هم از لحاظ نظری و هم از لحاظ تجربی بر روی گرافن صورت پذیرفته است. نقطه آغاز این توجه، مشاهده اثر کوانتومی هال غیرعادی<sup>14</sup> بود که در سال 2005 توسط دو گروه مختلف گزارش شد [13-14]. دلایل زیادی برای توجه محققان به تحقیق در این زمینه وجود دارد که جهت اشاره به برخی از آنها می‌توان به کاربرد گرافن در نانو الکترونیک، قابلیت کنترل چگالی حاملهای بار در گرافن [15] و امکان انجام آزمایشهایی که در فیزیک انرژی بالا به سبب نیاز به شتاب دهنده‌های پیشرفته فراهم نیست (برای مثال یکی از مسائلی که امکان آزمایش آن به همین دلیل وجود ندارد، پارادوکس کلین<sup>15</sup> است که طبق آن، ذرات نسبیته می‌توانند از یک سد الکتروستاتیکی با ارتفاع بی‌نهایت، عبور نمایند [16])، توسط گرافن، اشاره کرد.

جهت استفاده از صفحات گرافن در قطعات نانو الکترونیک، نمونه‌های گرافن را به شکل نانو نوارهای گرافن<sup>16</sup> برش می‌دهند. به جهت شکل خاص قرارگیری اتم‌های کربن در شبکه گرافن (که در بخش (1-4) توضیح داده می‌شود) لبه‌های نانو نوارهای گرافن بریده شده به دو نوع زیگزاگ<sup>17</sup> و صندلی راحتی<sup>18</sup> تقسیم می‌شوند، شکل (1-5).

---

<sup>13</sup> Hybridization

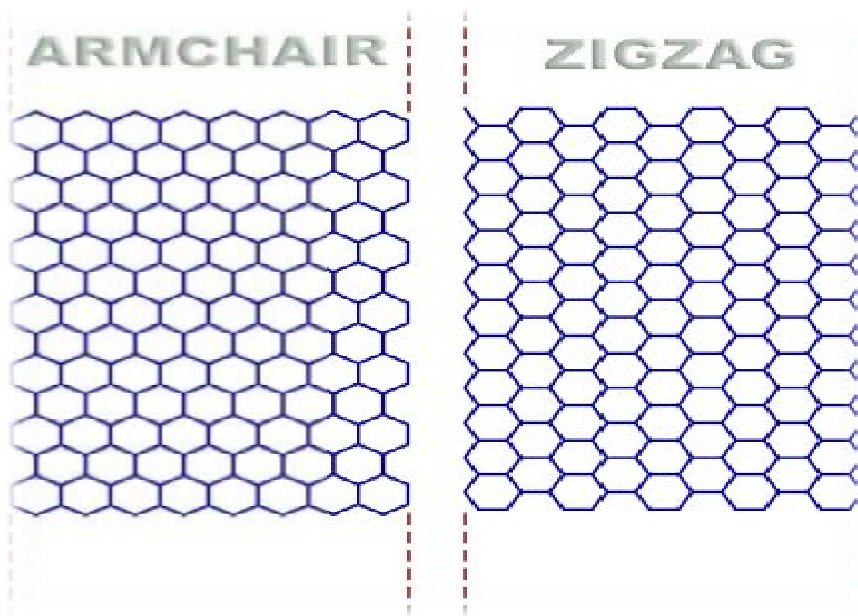
<sup>14</sup> Unconventional Quantum Hall Effect

<sup>15</sup> Klien Paradox

<sup>16</sup> Graphene Nanoribbons

<sup>17</sup> Zigzag

<sup>18</sup> Armchair



**شکل 1-5:** شکل سمت راست، نانو نوار گرافن با لبه زیگزاگ و شکل سمت چپ، نانو نوار گرافن با لبه صندلی راحتی.

که در این پایان نامه به بررسی انتقال الکترون از نانو نوارهای گرافن بدون در نظر گرفتن شکل لبه‌های آن می‌پردازیم.

## 1-2-1- روش‌های جداسازی گرافن

جدا سازی گرافن به معنی بدست آوردن یک لایه با ضخامت یک اتم از گرافیت است. روش‌های مبتنی بر سنتز شیمیایی تاکنون به لایه‌هایی با ابعادی در حدود چندین حلقه منجر شده است. در این بخش دو روش برای تولید گرافن معرفی می‌شود. روش اول که به جداسازی مکانیکی موسوم است و روش دیگر که مبتنی بر رشد گرافن بر روی کاربید سیلیکون است [17]، و به منظور القاء گاف در گرافن مورد استفاده قرار می‌گیرد، که بدین طریق گرافن را برای کاربردهای عملی مختلف مهیا می‌سازد.

### 1-2-1-1- جداسازی به روش مکانیکی

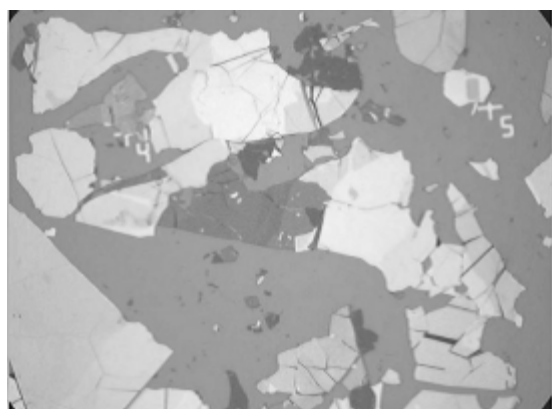
روش اولیه جداسازی یک تک لایه گرافن از گرافیت به طریقه نسبتاً ساده‌ای انجام می‌شود. بدین ترتیب که با استفاده از نوار چسب‌های معمولی ابتدا توده‌های مختلف گرافیت را از هم جدا می‌نمایند

[18]، با تکرار این فرایند جداسازی که به جداسازی مکانیکی معروف است توده‌ی بسیار نازکی از گرافیت بدست می‌آید شکل (6-1).



**شکل 6-1**: نمایش شماتیک جداسازی لایه‌های مختلف گرافیت به گونه‌ای که در نهایت یک تک لایه یعنی گرافن بدست آید.

با قرار دادن آن روی یک زیرنهشت<sup>19</sup> سیلیکونی امکان آشکار ساختن گرافن با توجه به طیف نوری ماده زیر نهشت فراهم می‌شود. به این صورت که ماده زیر نهشت تمامی رنگهای موجود در طیف رنگین کمان را منعکس می‌سازد و با توجه به تغییر آن می‌توان گرافن را آشکار ساخت. از این رو با توجه به این که تک لایه‌های گرافیت طیف نوری خاصی را در مقایسه با توده‌های چند لایه‌ای به نمایش می‌گذارند می‌توان با استفاده از میکروسکوپ نوری به جستجوی گرافن پرداخت شکل (7-1)، هرچند پیدا کردن تک لایه‌های گرافن به این شکل مانند پیدا کردن یک جزیره در اقیانوس است.



**شکل 7-1**: تصویری از وجود توده‌های گرافیت با ضخامت‌های مختلف روی زیرنهشت سیلیکونی که توسط میکروسکوپ نوری گرفته شده است [19].

<sup>19</sup> Substrate