

Study of electrical properties of graphene particles fabricated by electrochemical exfoliation

R. S. Dariani¹
M. Haditale²

Received: 2015.8.29
Accepted: 2015.11.24

Abstract

In this paper, electrochemical exfoliation of graphite was used for fabrication of graphene particles. By using XRD, structure of sample was confirmed. Then, powder of particles was pressed by press equipment and converted to a tablet. By placing the tablet in an electrical circuit, I-V curve for the tablet was measured. Resistance, resistivity, and electrical conductivity were measured by four probe system. The results showed that fabricated sample has graphene particles but there are a few amount of graphite structure as well which can be increased percentage of grapheme by using a systematic method. Therefore, a simple and cheap method is introduced for fabrication of grapheme particles.

Keywords: Electrochemical exfoliation, Graphene particles, Electrical properties.

¹ Professor of Physics, Alzahra University, dariani@alzahra.ac.ir

² M. Sc. Physics Student, Alzahra University

بررسی خواص الکتریکی ذرات گرافین ساخته شده به روش لایه برداری الکتروشیمیایی

رضا ثابت داریانی^۱
مریم هادی طالع^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۷

تاریخ تصویب: ۹۴/۹/۳

چکیده

در این مقاله برای تولید ذرات گرافین از روش لایه برداری الکتروشیمیایی گرافیت استفاده شد. با استفاده از الگوی پراش پرتو X، ساختار نمونه مورد تأیید قرار گرفت. سپس پودر ذرات را توسط یک دستگاه پرس به صورت قرص در آوردیم. با قرار دادن قرص در یک مدار الکتریکی، نمودار I-V را برای قرص گرافینی اندازه گیری کردیم. مقاومت، مقاومت ویژه و رسانندگی الکتریکی قرص گرافین را با استفاده از دستگاه چهار پروب اندازه گیری

^۱ استاد فیزیک، دانشگاه الزهراء؛ dariani@alzahra.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه الزهراء

کردیم. نتایج نشان داد که نمونه ساخته شده علاوه بر ذرات گرافین ساختار گرافیت نیز در آن وجود دارد که با یک روش سیستماتیک می توان درصد گرافین را در آن افزایش داد. بدین ترتیب، یک روش ساده و ارزان برای ساخت ذرات گرافین معرفی می شود.

واژه های کلیدی: لایه برداری الکتروشیمیایی، ذرات گرافین، خواص الکتریکی.

۱. مقدمه

اصطلاح گرافین نخستین بار در سال ۱۹۶۲ توسط هنس پیتر بوئم مطرح شد [1]. گرافین اولین بلور دو بعدی واقعی از یک لایه منفرد شبکه لانه زنبوری است که دارای یک شبکه کربنی شش گوشه با آرایش sp^2 است و به خاطر کاربردهای بسیارش در تولید وسایل الکترونیکی [2]، مواد کامپوزیتی [3] و وسایل ذخیره انرژی [4] توجه زیادی را به خود جلب کرده است. به دلیل دارا بودن خواص فوق العاده در رسانندگی الکتریکی و گرمایی، چگالی بالا، تحرک پذیری حامل های بار، رسانندگی اپتیکی و خواص مکانیکی به ماده ای منحصر به فرد تبدیل شده است [5]. این سامانه جدید حالت جامد به واسطه این خواص فوق العاده به عنوان کاندیدای بسیار مناسب برای جایگزینی سیلیکان در نسل بعدی قطعات فوتونیک و الکترونیکی مطرح شده است و از این رو در تحقیقات بنیادی و کاربردی توجه کم سابقه ای بدان شده است [6]. در یک صفحه گرافین، هر اتم کربن با ۳ اتم کربن دیگر پیوند دارد. این سه پیوند در یک صفحه قرار دارند و زوایای بین آنها با یکدیگر مساوی و برابر با 120° است. در این حالت، اتم های کربن در وضعیتی قرار می گیرند که شبکه ای از شش ضلعی های منظم را ایجاد می کنند؛ البته این ایده آل ترین حالت یک صفحه گرافین است. در برخی مواقع، شکل این صفحه به گونه ای تغییر می کند که در آن پنج ضلعی ها و هفت ضلعی هایی نیز ایجاد می شود. طول پیوند کربن - کربن در گرافین در حدود ۰,۱۴۲ نانومتر است. گرافین تک لایه، ماده بنیادی در ساخت ساختارهای کربنی

می‌باشد. اگر این صفحات بر روی هم قرار بگیرند توده سه‌بعدی گرافیت را تشکیل می‌دهند که بر هم کنش بین این صفحات از نوع واندروالس با فاصله بین صفحه ای ۰٫۳۳۵ نانومتر می‌باشد. اگر تک لایه گرافنی حول محوری لوله شود نانو لوله کربنی شبه یک بعدی ایجاد می‌شود و چنانچه به صورت کروی پیچانده شود فولرن شبه صفر بعدی شکل می‌گیرد [7]. در سال ۲۰۰۴، گروه ناوسلاو موفق به ساخت گرافین شدند و خواص الکتریکی و مکانیکی آن را بررسی کردند [8]. اخیراً برای تولید ذرات گرافنی از روش لایه برداری الکتروشیمیایی گرافیت استفاده شد. در این روش، از میان انواع محلول‌های الکترولیتی نمک غیر آلی آبی مورد بررسی، نمک‌های حاوی سولفات مانند $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ بهترین بازده را برای تولید ورقه‌های گرافنی داشته‌اند. لایه برداری الکتروشیمیایی گرافیت با استفاده از دو الکتروود پلاتین^۱ به عنوان الکتروود شماره‌دهنده^۲ و فویل گرافیت به عنوان الکتروود کارکننده^۳ انجام شد. برای جدا کردن نانو صفحات گرافنی از یکدیگر و تبدیل ساختار کپه ای به نانو صفحات جدا از هم، پودر گرافین به دست آمده در حلال DMF پراکنده شد. DMF یک حلال شیمیایی قوی است. برای بررسی خواص نانو ذرات گرافین مقداری از محلول گرافین-DMF را بر سطح لامل چکانده و با قرار دادن در کوره حلال DMF تبخیر شد [9].

در این مقاله، ذرات گرافین به صورت پودر ساخته شد. سپس پودر ذرات گرافین به قرص تبدیل شد. قرص را در یک مدار الکتریکی قرار داده و منحنی جریان-ولتاژ را اندازه گیری کردیم. مقاومت، مقاومت ویژه و هدایت الکتریکی را به روش چهار پروب به دست آوردیم. الگوی پراش از نمونه‌ها نیز گرفته شد. نتایج ما نشان داد که نمونه‌های ساخته شده گرافین بوده و با نتایج کارهای دیگران همخوانی دارد. بدین ترتیب، یک روش ساده و ارزان برای ساخت ذرات گرافین معرفی می‌شود.

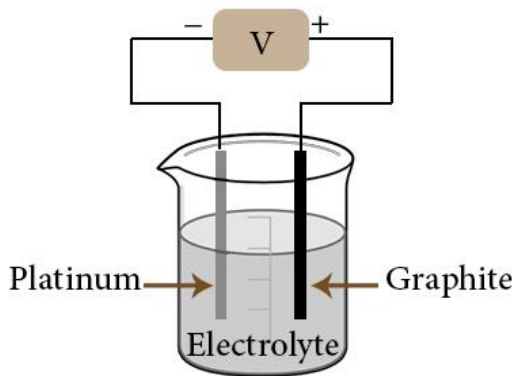
¹ platinum

² Counter

³ Working

۲. ساخت نمونه

برای ساخت گرافین روش‌های زیادی وجود دارد. یکی از روش‌های ساخت، روش لایه‌برداری الکتروشیمیایی می‌باشد. لایه‌برداری الکتروشیمیایی گرافیت در نمک‌های غیر آلی آبی مانند $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ، Na_2SO_4 و K_2SO_4 انجام شده است. صفحات گرافینی با بالاترین نسبت C/O، ۱۷،۲ و پایین‌ترین چگالی نقص، تحت pH خنثی تهیه شدند. صفحات گرافین به میزان ده گرم، با تقریباً ۸۰٪ ورقه‌های بزرگتر از ۵ میکرومتر و ۸۵٪ ورقه‌های بین ۱ تا ۳ لایه، تولید شده‌اند [9]. علاوه بر این، تک لایه گرافینی تحرک‌پذیری حفره بالایی در حدود $310 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ و مقاومت $1,96 \text{ k}\Omega/\text{sq}$ دارد که از مقاومت اکسید گرافین بالاتر است. روش لایه‌برداری الکتروشیمیایی گرافیت با استفاده از دو الکترود، پلاتین به عنوان الکترود شمارنده و فویل گرافیت به عنوان الکترود کارکننده در محلول الکترولیتی نمک‌های غیر آلی آبی انجام می‌شود. شکل ۱ نمایی از این چیدمان را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایی از مدار الکترولیتی برای لایه‌برداری الکتروشیمیایی گرافیت.

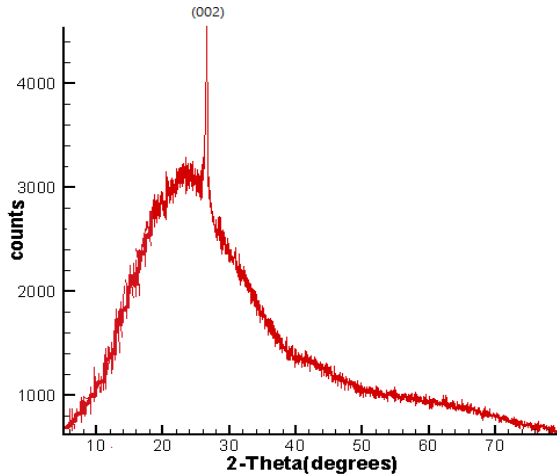
انواع محلول‌های الکترولیتی نمک غیر آلی آبی مورد بررسی قرار گرفتند، و در این میان نمک‌های حاوی سولفات مانند $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ بهترین بازده را برای ورقه‌های گرافینی داشتند [9]. برای از بین بردن نمک‌های باقی مانده، پودر به صورت مکرر با آب شسته شد

تا پودر گرافین به دست آید. پودر به دست آمده به وسیله التراسوند در DMF که یک حلال شیمیایی است پراکنده شد. پودر گرافین تولید شده در حالت معمولی یک ساختار کپه‌ای مانند است و نمی‌توان به راحتی به بررسی خواص ساختاری و الکتریکی آن پرداخت، به همین دلیل با پراکنده شدن پودر گرافین در حلال DMF ذرات گرافین از هم جدا شده یعنی بین صفحات فاصله ایجاد می‌شود و به راحتی می‌توان به بررسی آن پرداخت. جهت بررسی ذرات گرافین باید حلال DMF تبخیر شود تا ذرات باقی بمانند. برای احیای محلول، پودر گرافین را در محلول DMF با استفاده از دستگاه همزن مغناطیسی به مدت ۲ ساعت هم زدیم و یک محلول کلونیدی تهیه نمودیم. با قطره چکان قطره کوچکی از محلول کلونیدی گرافین-DMF را بر روی لامل چکانده و با تنظیم دستگاه اسپین کوت بر روی ۶۰ دور بر ثانیه، نمونه را در سطح لامل پخش کردیم، سپس لامل را در کوره با آهنگ ۴ درجه سانتی گراد بر دقیقه به دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد رسانده و به مدت ۱۰ دقیقه در این دما نگه داشتیم تا نمونه کلسینه شود. با استفاده از یک دستگاه پرس، پودر گرافین را به قرص گرافین تبدیل کردیم و برخی خواص الکتریکی آن را در زیر بررسی می‌کنیم.

۳. بحث و بررسی

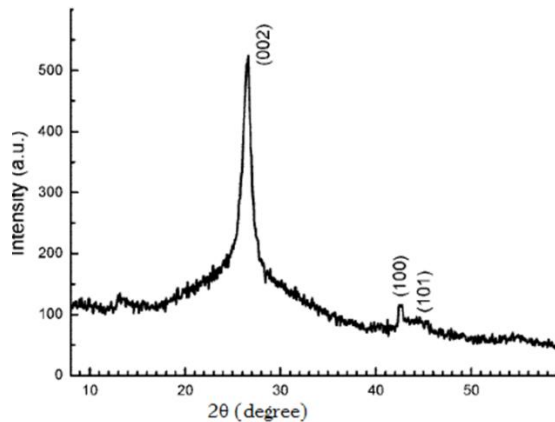
الف: بررسی پراش پرتو X بر نمونه

آنالیز نمونه توسط دستگاه پراش ایکس انجام شد، دستگاه پراش ایکس به کار رفته برای این طیف، مدل x'pert pro MPD، ساخت شرکت PANalytical می‌باشد. الگوی پراش نمونه در شکل ۲ نشان داده شده است و دو قله در آن مشاهده می‌شود: یکی در $2\theta=23^\circ$ با شدت کمتر و $d\text{-spacing}=0.373 \text{ nm}$ و دیگری در $2\theta=26.5^\circ$ با شدت بیشتر و نیز $d\text{-spacing}=0.335 \text{ nm}$. حال می‌خواهیم مشاهدات الگوی پراش نمونه خود را با سایر گروه‌ها مقایسه کنیم.



شکل ۲. پراش پرتو X از صفحات گرافین.

جی وانگ و همکارانش گرافین را به روش هامرزا^۱ و آفمن^۲ تولید کردند، این گروه نخست قله اکسید گرافیت را در زاویه $2\theta = 11.8^\circ$ مشاهده کردند و رفته رفته با تبدیل اکسید گرافیت به گرافین، برای نانو صفحات گرافین در صفحه (002) یک قله واضح و مشخص را در زاویه 26.5° به دست آوردند (شکل ۳) [10].



شکل ۳. نتایج XRD برای صفحات گرافین [10].

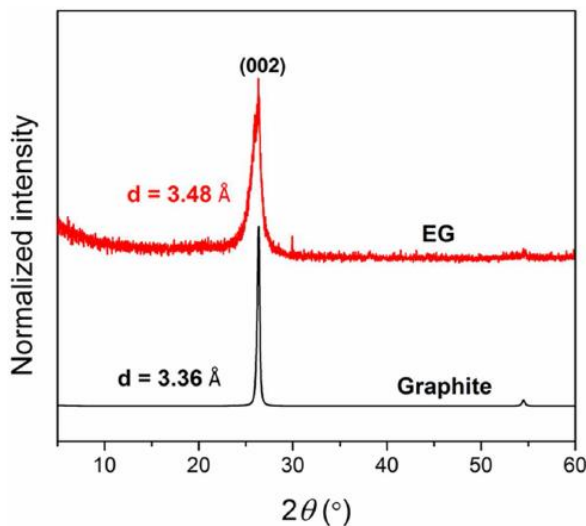
¹ Hummers

² Offeman

چن و همکارانش نیز به روش هامرز موفق به ساخت گرافین شدند. آنها برای صفحات گرافینی که در دمای اتاق خشک می شوند قله‌ای در زاویه $2\theta = 23^\circ$ مشاهده کردند که ضعیف و پهن بود و فاصله بین صفحات نیز 0.387 nm بود. چنانچه دمای باز پخت به حدود 500°C درجه سانتی گراد برسد این قله تیز تر خواهد شد و فاصله بین صفحات به حدود 0.341 nm می‌رسد [11].

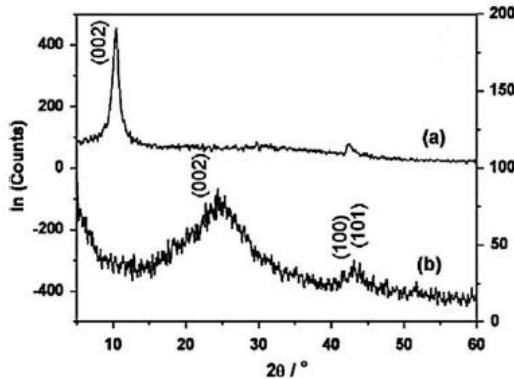
باقری و همکارانش نیز گرافین را به روش هامرز تولید کردند و برای اکسید گرافیت در صفحه (002) یک قله شاخص در زاویه $2\theta = 11.7^\circ$ و در زاویه 23° قله‌ای پهن و ضعیف را برای گرافین مشاهده کردند [12].

خالد و همکارانش با استفاده از روش لایه برداری الکتروشیمیایی از گرافیت، موفق به ساخت گرافین شدند و در زاویه 26.3° یک قله مشخص برای گرافین مشاهده کردند که فاصله بین صفحات 0.348 nm ، نانومتر و برای گرافیت قله شاخص در زاویه 26.5° و فاصله بین صفحات گرافیت 0.336 nm ، نانومتر محاسبه شدند، در شکل ۴ این زوایا برای گرافیت و گرافین نمایش داده شده‌اند [9]. این گروه مدعی هستند که زاویه پراش گرافین و گرافیت بسیار به هم نزدیک است و اختلاف به دست آمده در حدود دهم درجه است.



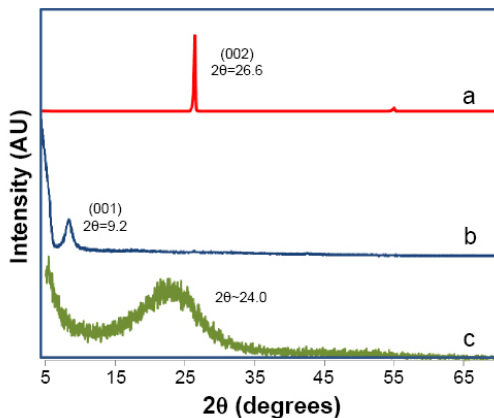
شکل ۴. XRD به دست آمده برای نمونه گرافین (EG) و گرافیت [9].

ای وانگ و همکارانش نیز در یک کار تحقیقی موفق به ساخت صفحات گرافنی با روش هامرز و آفمن شدند، آن ها در زاویه 10.4° یک قله برای اکسید گرافیت و در زاویه 24.7° یک قله برای گرافین مشاهده کردند (شکل ۵) [13].



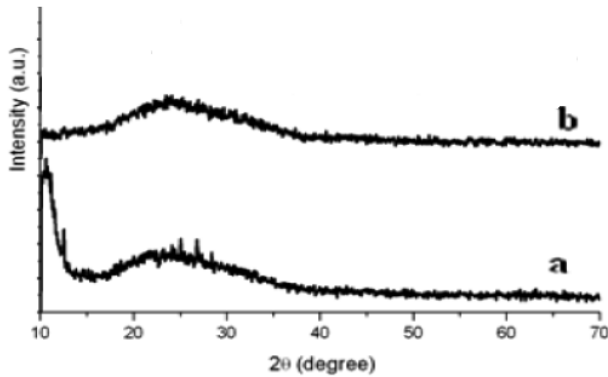
شکل ۵. پراش پرتو X برای اکسید گرافیت در منحنی a و گرافین در منحنی b [13].

موتوسامی و همکارانش گرافین را به روش هامرز ساختند و پراش پرتو ایکس آن را اندازه گیری کردند، برای گرافیت در زاویه 26.6° یک قله واضح مشاهده کردند و فاصله بین صفحات 0.33 nm به دست آمد. همچنین برای اکسید گرافیت در زاویه 9.2° و برای گرافین در زاویه 24° قله شاخص مشاهده شد (شکل ۶) [14].



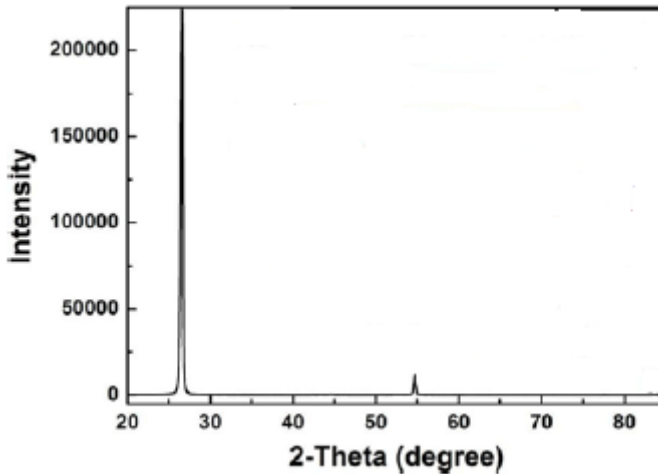
شکل ۶. پراش پرتو ایکس گرافیت (a)، اکسید گرافیت (b) و گرافین (c) [14].

در کار تحقیقی دیگری توسط اسریوستاوا و همکارانش گرافین به روش هامرز تهیه و به وسیله پراش پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفت. برای اکسید گرافیت در زاویه 10.61° یک قله واضح و برای گرافین بر آمدگی قله در بازه $24^\circ-28^\circ$ قرار داشت؛ شکل ۷ [15].



شکل ۷. پراش پرتو ایکس برای اکسید گرافیت (a) و گرافین (b) [15].

شکل ۸ نتیجه پژوهش دیگری را در تهیه گرافین به روش هامرز نشان می دهد. در این بررسی پراش پرتو ایکس گرافیت در زاویه 26.6° به دست آمد [16].



شکل ۸. پراش پرتو ایکس گرافیت [16].

تحلیل نتایج XRD

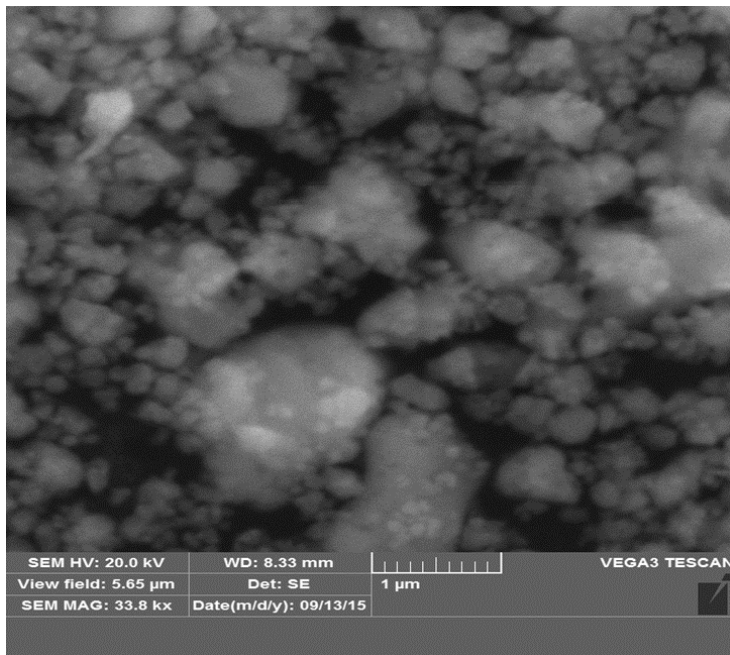
مقادیر حاصل از پراش پرتو X برای اکسید گرافیت و گرافین به اختصار در جدول ۱ آمده است. علی‌رغم این که ساخت گرافین در هر یک از پژوهش‌ها به روش متفاوت صورت گرفته است اما نتایج به دست آمده از پراش پرتو X برای همگی همخوانی خوبی دارد. در این جدول، گروه‌های تحقیقاتی مختلف دو قله برای گرافین گزارش کرده‌اند؛ یکی در 26.5° و دیگری در 23° . بررسی این نتایج نشان می‌دهد که رفتار پراش پرتو X گرافین و گرافیت در 26.5° یک قله نزدیک به هم دارند. البته در مراجع [16,14] قله پراش پرتو ایکس گرافیت در زاویه 26.6° مشاهده شد که با توجه به توضیحات خالد [9] قله گرافین در حدود 0.02° با قله گرافیت تفاوت دارد و علی‌الاصول باید آن را 26.3° دانست. به هر حال اگر این اختلاف را وارد ندانیم می‌توان گفت یک قله گرافین منطبق و یا بسیار نزدیک به قله گرافیت است و قله دیگر در 23° قرار دارد. نتایج ما هر دو قله را نشان می‌دهد، لذا می‌توان با اطمینان کامل ادعا کرد که نمونه‌های ساخته شده توسط ما گرافین هستند. از طرفی در شکل ۲ نمونه ما دو قله بر روی هم همپوشانی دارند. لذا به نظر می‌رسد قله اصلی در 26.5° می‌باشد و قله دیگر با پهن شدگی بیشتر در 23° قرار دارد.

جدول ۱. مقایسه پراش پرتو اکسید گرافیت و گرافین مراجع دیگر با کار فعلی.

مراجع	روش ساخت گرافین	XRD گرافین	اکسید گرافیت
[10]	هامرز و آفمن	26.5°	11.8°
[11]	هامرز	23°	-
[12]	هامرز	23°	11.7°
[9]	لایه برداری شیمیایی	26.3°	-
[13]	هامرز و آفمن	24.7°	10.4°
[14]	هامرز	24°	9.2°
[15]	هامرز	$24^\circ-28^\circ$	10.61°
کار فعلی	لایه برداری شیمیایی	26.5° 23.8°	-

ب: تصویر SEM پودر گرافین

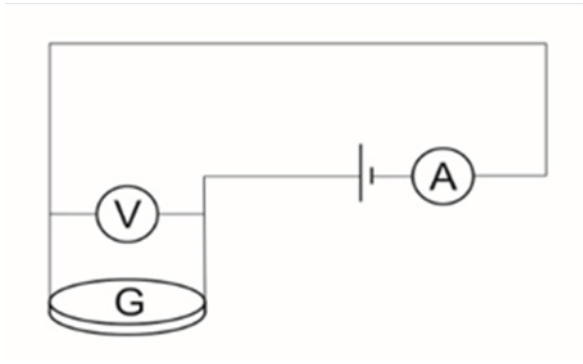
در شکل ۹ تصویر SEM ذرات گرافین ساخته شده ارائه شده است. همان طور که این تصویر نشان می دهد ذرات گرافین تولید شده به خوبی مشهود می باشند که حتی در اثر فشار دستگاه پرس برخی از ذرات به هم چسبیده و ذرات با اندازه بزرگتری را تشکیل داده اند. شکل نشان می دهد که اندازه ذرات گرافین از چند صد نانومتر تا چند میکرون می باشد.



شکل ۹. تصویر SEM پودر گرافین به صورت قرص پرس شده.

پ: اندازه گیری I-V، مقاومت و مقاومت ویژه قرص

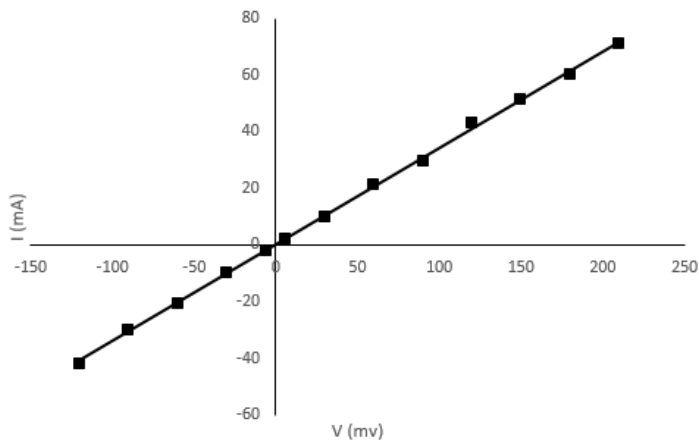
در این پژوهش از پودر گرافین که در اختیار داشتیم قرص ساختیم و سپس به اندازه گیری I-V، مقاومت و مقاومت ویژه و در نهایت رسانندگی پرداختیم. در مرحله بعد پودر گرافین را به قرصی با ضخامت ۰,۱۹۸ میلی متر و قطر ۱,۴ سانتی متر تبدیل کردیم. نمونه را در مدار شکل ۱۰ قرار دادیم و به دو سر نمونه سیم سوسماری وصل کرده تا اتصال شکل گرفته و جریان برقرار شود.



شکل ۱۰. مدار بسته شده جهت اندازه گیری جریان- ولتاژ نمونه گرافین.

* روش ساخت قرص

برای ساخت قرص از دستگاه قرص ساز استفاده کردیم. این دستگاه از جنس فولاد است و دارای حفره‌ای استوانه‌ای با قطر ۱٫۴ سانتی‌متر که پیستونی در آن قرار می‌گیرد. پودر گرافین را داخل حفره استوانه‌ای ریخته و دستگاه را داخل گیره‌های آزمایشگاهی قرار داده فشار 5 MPa را بر آن وارد می‌کنیم تا قرص ساخته شود. منحنی I-V را برای قرص گرافین در بازه 150- تا 200 میلی‌ولت اندازه‌گیری کردیم و داده‌ها را مطابق نمودار شکل ۱۱ رسم نمودیم. جریان و ولتاژ از مرتبه میلی‌آمپر و میلی‌ولت هستند.



شکل ۱۱. نمودار جریان بر حسب ولتاژ برای نمونه قرص گرافین.

این شکل یک منحنی خطی یا اهمی را نشان می دهد. علت آن نیز چنین است: زمانی که پودر گرافین را به قرص تبدیل می کنیم ذرات گرافین به هم فشرده می شوند و این فشردگی باعث نزدیک شدن ذرات به یکدیگر شده لذا نمونه به لایه های گرافیت تبدیل می شود. همان طور که می دانیم گرافیت یک رسانای الکتریکی است و منحنی جریان بر حسب ولتاژ آن نیز یک منحنی خطی می باشد.

*روش چهار پروب

متداول ترین روش اندازه گیری مقاومت ویژه روش چهار پروب نامیده می شود که در آن چهار پروب در فاصله های مساوی از یکدیگر تعبیه می شوند (a). جریان کوچکی از چشمه جریان-ثابت از دو میله خارجی عبور می کند و ولتاژ بین دو میله داخلی اندازه گیری می شود. برای نمونه نیمه رسانای نازک به ضخامت W مقاومت ویژه از رابطه زیر به دست می آید:

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot W \cdot CF \quad \Omega \cdot Cm$$

CF ضریب تصحیح است. چنانچه طول نمونه از فاصله بین پروب ها خیلی بزرگ تر باشد ضریب تصحیح برابر با $4.54 = \frac{\pi}{\ln 2}$ خواهد شد. اما اگر بر حسب فاصله بین پروب ها محاسبه شود، مقاومت ویژه چنین خواهد بود:

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad \Omega \cdot Cm$$

از دستگاه چهار پروب (شرکت یار نیکان صالح) برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی و مقاومت سطحی نمونه استفاده شد. فاصله پروب های دستگاه چهار پروب از یکدیگر ۰,۶ میلی متر می باشد که از دو پروب کناری جریان برقرار می شود و دو پروب داخلی ولتاژ را اندازه گیری می کند:

$$R = 3.970 \quad \Omega$$
$$R_s = 18.02 \quad \Omega/\square$$

نتایج به دست آمده با مقدار $3,04$ اهم در مرجع 17 برای مقاومت همخوانی خوبی دارد. در این مرجع گرافین به روش هامرز تهیه شده است. همچنین قرص ساخته شده در این مرجع دارای ابعاد $3,5 \times 4,5$ میلی متر مربع و ضخامت 1 میلی متر می باشد. می توان مقاومت ویژه نمونه را با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$R_s = \rho/t$$

$$\rho = 3.567 \times 10^{-3} \Omega.m$$

که در آن t ضخامت قرص است. از طرفی رسانندگی الکتریکی، عکس مقاومت ویژه است و مقدار آن حدود $280,27$ S/m به دست آمد، که مقدار قابل توجهی می باشد.

۴. نتیجه گیری

تحلیل داده های الگوی پراش پرتو ایکس نشان می دهد نمونه ساخته شده ما دارای دو قله در زوایای 26.5° با شدت بیشتر و 23° با شدت کمتر می باشد که با نتایج دیگران هماهنگی خوبی دارد و در نتیجه نمونه ساخته شده ساختار ذرات گرافین را نشان می دهد. همچنین قله های اکسید گرافیت در زاویه 10° و 11° می باشد که در الگوی پراش ایکس نمونه ما چنین قله هایی مشاهده نشد. تصویر SEM نشان دهنده وجود ذرات گرافین می باشد. منحنی I-V به دست آمده یک رابطه خطی را نشان می دهد که به علت وجود گرافیت در نمونه می باشد. مقادیر به دست آمده ما برای مقاومت، مقاومت ویژه و رسانندگی الکتریکی نشان می دهد که نمونه ساخته شده، خواص الکتریکی ذرات گرافین را دارا می باشد که با نتایج دیگران هماهنگی خوبی دارد. بدین وسیله یک روش ساده و ارزان برای ساخت ذرات گرافین ارائه می گردد.

۵. قدردانی

این کار توسط دانشگاه الزهرا حمایت مالی شده است.

۶. منابع

- [1] H.P. Boehm, R. Settom, and E. Stumpp; "Nomenclature and Terminology of Graphite Intercalation Compound"; *Pure and Applied Chemistry* **66** (1994) 1893-1994.
- [2] Y. Wang, X. Chen, Y. Zhong, F. Zhu, and K. P. Loh; *Appl. Phys. Lett.* **95** (2009) 063302.
- [3] D.Q. Wu, F. Zhang, H.W. Liang, and X.L. Feng; *Chem. Soc. Rev.* **41** (2012) 6160.
- [4] Z.S. Wu, K. Parvez, X. Feng, and K. Müllen; *Nat. Commun.* **4** (2013) 2487.
- [5] A.K. Geim and K.S. Novoselov; *Nat. Mater.* **6** (2007) 183.
- [6] F. Guinea and N. Miguel Peres; "Drawing Conclusions from Graphene"; *Physics World* **19** (2006) 33.
- [7] A. Almazan; "Graphene an Excellent Conductor of Electricity and Potential Component of Future Electronics"; COSMOS Cluster (2012).
- [8] Y. Iyechika; "Application of graphene to high-speed transistors: expectations and challenges"; *Science and Technology Trends - Quarterly Review* **37** (2010) 76-92.
- [9] K. Parvez, Z.S. Wu, R. Li, X. Liu, R. Graf, X. Feng, and K. Müllen; "Exfoliation of Graphite into Graphene in Aqueous Solutions of Inorganic Salt"; *Journal of the American Society* **136** (2014) 6083-6091.
- [10] G. Wang, J. Yang, J. Park, X. Gou, B. Wang, H. Liu, and J. Yao; "Facile Synthesis and Characterization of Graphene Nanosheets"; *J. Phys. Chem. C.* **112** (2008) 8192-8195.
- [11] D. Li, G.G. Wallace, H. Chen, M.B. Muller, and K.J. Gilmore; "Mechanically Strong, Electrically Conductive, and Biocompatible Graphene Paper"; *Adv. Mater.* **20** (2008) 3557-3561.
- [۱۲] دلبری، فاطمه سادات؛ باقری محقق، محمد مهدی «سنتر و مشخصه‌یابی خواص ساختاری و الکتریکی نانوذرات گرافین» کنفرانس رشد بلور، دانشگاه سمنان، اردیبهشت ۱۳۹۳.
- [13] Y. Wang, Y. Li, L. Tang, J. Lu, and J. Li; "Application of graphene-modified electrode for selective detection of dopamine"; *Electrochemistry Communications* **11** (2009) 889-892.

[14] K. Muthoosamy, R.G. Bai, I.B. Abubakar, S.M. Sudheer, H.N. Lim, H.S. Loh, N.M. Huang, C.H. Chia, S. Manickam, " Exceedingly biocompatible and thin-layered reduced graphene oxide nanosheets using an eco-friendly mushroom extract", *International Journal of Nanomedicine* **10** (2015) 1505—1519.

[15] S. Srivastava, K. Jain, V.N. Singh, S. Singh, N. Vijayan, N. Dilawar, G. Gupta and T.D. Senguttuvan, " Faster response of NO₂ sensing in graphene-WO₃ nanocomposites", *Nanotechnology* **23** (2012) 205501-205508.

[16] R. Gao, N. Hu, Z. Yang, Q. Zhu, J. Chai, Y. Su, L. Zhang and Y. Zhang, " Paper-like graphene-Ag composite films with enhanced mechanical and electrical properties", *Nanoscale Research Letters* (2013) 1-8.

[۱۷] قاسمی، ندا؛ ذوالفقاری، محمود «تهیه نانو صفحات گرافن به روش لایه برداری شیمیایی و اندازه گیری مقاومت ویژه آن» کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، شهریور ۱۳۹۳.