#### Polymerization

Quarterly, 2014 Volume 4, Number 3 Pages 86-107 ISSN: 2252-0449

# Abstract

# **Graphene-Based Polymer Nanocomposites**

Hessam Ramezani, Mehdi Sharif\*, Afife Khorram Shokooh

Department of Polymer Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Received: 18 November 2013, Accepted: 29 August 2014

This paper reviews the fabrication and application of graphene-based polymer nanocomposites. Recently, graphene, a monolayer of sp2-hybridized carbon atoms arranged in a two-dimensional lattice with exceptional thermal, mechanical, and electrical properties, has attracted both academic and industrial interest because it can produce dramatic improvements in properties at very low filler content. A variety of routes are used to produce graphene-based polymeric nanocomposites which affect the dispersion state of graphene in the polymer matrices and final properties of these composites. Herein, the structure, preparation and properties of polymer/graphene nanocomposites are discussed in general along with detailed examples drawn from the scientific literature. An overview of the potential applications for these composites such as conductive transparent film in electronic devices, sensor, biosensors, gas filtering membrane, field effect transistor (FET) and current challenges in the field is provided for perspective and to potentially guide future progress on the development of these promising materials.

# Key Words

graphene, polymer nanocomposites, final properties, morphology, produce routes

> (\*) To whom correspondence should be addressed. E-mail: sharif@jaushiraz.ac.ir

علمي مقالات

> بسپارش فصلنامه علمی- ترویجی سال چهارم، شماره ۴ صفحه ۱۰۷–۸۶، ۱۳۹۳ ISSN: 2252-0449

# نانوکامپوزیتهای پلیمری برپایه گرافن

حسام رمضانی، مهدی شریف\*، عفیفه خرم شکوه شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، گروه مهندسی پلیمر

دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۷

در این مقاله، روشهای تولید و کاربرد نانوکامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با نانوذرات گرافن مرور میشود. این نانوذره به شدت مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته است. زیرا گرافن، نانوذرهای با ساختار دوبعدی از اتمهای کربن است که دارای خواص گرمایی، الکتریکی و مکانیکی بینظیری است. استفاده از آن به عنوان پرکننده در مقادیر بسیار کم، سبب تقویت قابل ملاحظه خواص نانوکامپوزیت میشود. روشهای مختلفی برای تولید نانوکامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با گرافن وجود دارد که این روشها بر مقدار پراکنش گرافن درون بستر پلیمری و خواص نانوکامپوزیت اثر میگذارند. در این مقاله در ارتباط با ساختار، روشهای تولید و خواص نانوکامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با گرافن به همراه مثالهایی از نتایج منتشر شده در مقالات، بحث میشود. برای شناخت هر چه بیشتر این گونه مواد، کاربردهای این نانوکامپوزیتها سلولهای خورشیدی، حسگرها، غشاهای جداسازی گاز و ترانزیستورهای اثر میدانی مرور شده و موانع موجود در مسیر رشد و تکامل به کارگیری این مواد که توسط پژوهشگران به آن اشاره شده، موانع موجود در مسیر رشد و تکامل به کارگیری این مواد که توسط پژوهشگران به آن اشاره شده، ارائه می شود. چکیدہ







# واژگان کلیدی

گرافن، نانو کامپوزیتهای پلیمری، خواص نہایی، شکلشناسی، روشهای تولید

\* مسئول مكاتبات، پيامنگار: sharif@iaushiraz.ac.ir

#### مقدمه

تاکنون، پژوهشهای صنعتی و دانشگاهی گستردهای در راستای ساخت و کاربرد نانوکامپوزیتهای پلیمری با هدف بهبود خواص پلیمر و افزایش قابلیت کاربرد آنها در زمینههای مختلف انجام شده است [۱]. در این راستا، نانوذرات پایه کربنی همچون نانولولههای کربن [۶-۲] و گرافن [۲۱-۷] جایگاه ویژهای را در تهیه نانوکامپوزیتهای پلیمری به خود اختصاص دادهاند. لازم به ذکر است، این نانوذرات خواص متفاوتی از قبیل استحکام مکانیکی، رسانایی الکتریکی و پایداری گرمایی در مقایسه با یکدیگر دارند [10-11].

با وجود پیشرفتهای شگرفی که در راستای استفاده از نانولولههای کربن به عنوان یک فاز تقویت کننده انجام گرفته است، مواردی همچون تمایل نانولولهها به کلوخه شدن در حین فرایند، محدودیت دسترسی به نانولولههای کربن باکیفیت در مقادیر زیاد و همچنین قیمت زیاد آنها، تولید نانوکامپوزیتهای پلیمری پرشده با نانولوله های کربن را محدود ساخته است. از این رو، نانوذرات گرافن به دلیل خواص مکانیکی و الکتریکی و همچنین فراوانی ماده اصلی تشکیل دهنده آنها یعنی گرافیت در طبیعت، جایگزین مناسبی برای نانولولههای کربنی به منظور تولید نانوکامپوزیتهای پلیمری بع فرد گرافن از جمله خواص الکتریکی، گرمایی، الکتروشیمیایی و مطح ویژه زیاد، قابلیت استفاده از این ماده را در بسیاری از کاربردها مانند حسگرها، کاتالیزورها، منابع ذخیره انرژی و انواع کامپوزیتها افزایش چشمگیری داشته است [۳۲–۱۷].

گرافن، نانوذرهای با ساختار صفحهای و دوبعدی و ضخامتی در حدود یک اتم کربن است. در این صفحات، اتمهای کربن در یک شبکه شش ضلعی با یکدیگر پیوند خوردهاند. ساختار این ماده فاقد هرگونه نقص است، از این رو گرافن دارای خواص فیزیکی مطلوبی همچون: رسانش الکتریکی، رسانندگی گرمایی و استحکام مکانیکی زیاد، شفافیتی در حدود ۸۸۶ و مساحت سطح ویژه بسیار زیاد است [۲۶–۲۴]. روشهای اصلی تهیه گرافن باکیفیت و بدون نقص عبارتند از:

 ۱- شکافت میکرومکانیکی گرافیت با استفاده از نوار چسب (روش پوست کندن) [۲۷]،
 ۲- نشست بخارهای شیمیایی [۲۸،۲۹] و

۳- رشد همبافته از روی سطح سیلیکون کاربید (شکل ۱-الف تا ز) [۲۹-۲۹].

بازده تولید گرافن از این روشها بسیار کم است. به عنوان مثال،

روش شکافت میکرومکانیکی روشی بسیار طولانی مدت است. این مسئله استفاده از این روش را با مشکل جدی مواجه می سازد. اما یک روش جایگزین بسیار مناسب و کارآمد برای تولید گرافن و همچنین گرافن اصلاح شده، با استفاده از عوامل اصلاح سطحی مناسب، توسط پژوهشگران ابداع و به شدت مورد توجه قرار گرفته است [۳۰]. این روش شامل اکسایش گرافیت طبیعی است که روش هامر شهرت گرفته است. در این روش، گروههای اکسیژنی مختلفی از جمله: اپوکسی، کربونیل، کربوکسیل و غیره روی سطح صفحات گرافن و در کناره لبههای این صفحات به وجود می آیند که می توان از آنها برای اصلاح سطح و افزایش برهم کنش فاز زمینه و گرافن استفاده کرد [۳۱].

نتایج پژوهشها حاکی از آن است که تا کنون روشهای متعددی برای لایه لایه کردن گرافیت و تبدیل آن به گرافن و گرافن اصلاح شده با عوامل شیمیایی استفاده شده است [۳۰]. این روشها با توجه به ماده اولیه، که گرافن از آن تولید شده، در دو گروه طبقهبندی می شوند:

۱– روش تولید گرافن از گرافیت طبیعی و

۲- روش تولید گرافن از گرافیت اکسید.

در این میان، استفاده از گرافیت اکسید بیشتر مورد توجه پژوهشگران بوده است. این موضوع می تواند به واسطه قابلیت زیاد آن در تولید ساختارهای لایه لایه در مقایسه با گرافیت و گرافیت بسطپذیر باشد. وجود گروههای قطبی روی سطح صفحات گرافیت اکسید سبب می شود تا بتوان آنها را به آسانی با استفاده از امواج فراصوت درون یک حلال قطبی مانند آب پراکنده کرد. گرافیت اکسید عایق جریان الکتریسیته است. بنابر این، برای دستیابی به مادهای رسانا باید آن را کاهش داد تا خواص رسانایی الکتریکی خود را بازیابد [۲۳–۲۲]. کاهش گرافیت اکسید و تولید گرافن یا گرافن اصلاح شده از هر دو روش کاهش به وسیله عوامل شیمیایی همچون هیدرازین هیدرات یا کاهش گرمایی [۲۰] قابل انجام است (شکل ۱).

این مقاله مروری بر نانوکامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با استفاده از نانوصفحات گرافن دارد. در ابتدا پیشرفتهای اخیر در تولید نانوکامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با استفاده از گرافن انجام شده و پس از آن خواص این گونه از نانوکامپوزیتها و برخی از کاربردهای آنها بیان میشود. همچنین، مثالهایی از گرافن که با استفاده از روش رسوبدهی بخارهای شیمیایی تهیه شده به طور خلاصه بیان میشود. در انتها، چشمانداز آینده و چالشهای موجود در مسیر رشد و کاربرد این نانوکامپوزیتهای پلیمری مطرح میشود [۲۲–۲۲].

مقالات والمحرى



شکل ۱– (الف) تصویر TEM گرافن تهیه شده به روش CVD روی صفحات پوشش یافته کربنی، تصاویر TEM با وضوح بیشتر از لبههای صفحات گرافن با (ب) تکلایه، (ج) ۳لایه و (د) ۴لایه و تصاویر (ه) SEM و (و) TEM گرافن انبساط یافته با گرما که صفحات چروکیده گرافن را نشان میدهد [۲۹].

تصاویر TEM با بزرگنمایی زیاد که در شکل ۱ نشان داده شده است، از وجود تکلایههای گرافن یا تولید گرافن با لایههای سهتایی حکایت دارد.

## روشهای تولید نانوکامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با گرافن

پراکنش مناسب تقویت کننده های نانوذره درون زمینه پلیمری یک پارامتر اساسی برای دستیابی به خواص ارتقا یافته در مقایسه با پلیمر خالص است. اگر گرافن درون فاز زمینه پلیمری به طور مناسب پراکنده شده و برهمکنش های قوی در سطح مشترک گرافن و پلیمر وجود داشته باشد، خواص کل ماتریس پلیمری تا حد قابل توجهی بهبود می یابد. بدین منظور، تلاش های بسیاری برای دستیابی به یک سامانه همگن با پراکنش مناسب صفحات گرافن درون فاز پلیمری انجام گرفته است که از این دست می توان به ایجاد پیوند کووالانسی یا غیر کووالانسی در سطح گرافن اشاره کرد

[۳۰]. پس از تولید گروههای عاملی مختلف از جمله گروههای عاملی اپوکسی، کربونیل و کربوکسیلیک روی سطح صفحات گرافن اکسید، میتوان این گروههای عاملی را با عوامل اصلاح سطح از جمله عوامل سیلانی که قدرت چسبندگی بسیار زیادی گرافن اکسید و همچنین گرافن عامل دار شده درون بستر پلیمری گرافن اکسید و همچنین گرافن عامل دار شده درون بستر پلیمری خواص نهایی نانوکامپوزیت حاصل را نیز ارتقا داد [۳۰،۳۵،۳۶]. میتوان به واسطه اختلاط گرافیت اکسید کاهش یافته یا کاهش نانوکامپوزیت های نانوکامپوزیت های کرافن را این تویه به سه روش نهای پلیمری تقویت شده با نانوذرات گرافن را اینوته به سه روش تهیه کرد:
۲ – اختلاط به روش فراورش محلول،
۳ – اختلاط با فراورش مذاب.

تصلنامه علمى-ترويجي، سال چهارم، شماره ۴، زمستان ۲۳۴۳

ŀĿ.

### اختلاط به روش فراورش محلول

همان طور که قبلا اشاره شد، گرافیت اکسید را می توان با استفاده از روشهایی همچون انجام عملیات گرمایی یا شیمیایی به صفحات منفرد و تکلایه تبدیل کرد. لایه لایه شدن ساختار گرافیت اکسید و ایجاد تکلایههای گرافن اکسید، ناشی از وجود گروههای عاملی اکسیژن قطبی روی صفحات گرافن است که سبب بهبود توزیع لایههای گرافن اکسید درون حلالهای قطبی مانند آب و بسیاری از حلالهای آلی دیگر میشود. پس از آن میتوان این صفحات را با استفاده از عوامل کاهش دهنده همچون هیدرازین هیدرات، دىمتيل هيدرازين، سديم بوروهيدريد و أسكوربيک اسيد كاهش داد. این کار سبب می شود تا صفحات گرافن اکسید آرایش SP2 شبکه کربن خود را بازیابند. اما کاهش لایههای گرافن اکسید به طور كامل انجام نمى شود و در صفحات گرافن اكسيد كاهش یافته در لبههای سطح این لایهها، گروههای کربوکسیلیک اسید و هیدروکسیل وجود خواهد داشت [۳۱،۳۵]. در فرایند دیگری لایه لایه شدن و کاهش گرافن اکسید و تولید لایههای گرافن با عملیات گرمایی ساده و سریع انجام میشود. در این فرایند نیز لايههاي گرافن حاوي گروههاي اكسيژني هستند كه سبب مي شوند تا گرافن به سادگی درون حلالهای قطبی پخش شود [۳۷]. از این رو طبیعی است که از این قابلیت پراکنش میتوان برای تولید نانوکامپوزیتهای تقویت شده با گرافن یا گرافن اصلاح شده با فرايند اختلاط فراورش محلول استفاده كرد. اين فرايند شامل سه مرحله است:

 ۱- پراکنده شدن گرافن درون حلالی که شاخص انحلال پذیری نزدیک به شاخص انحلال پذیری پلیمر دارد. برای رسیدن به این هدف می توان عوامل مکانیکی و هچنین امواج فراصوت استفاده کرد.

۲- انحلال پلیمر درون محلول حاوی گرافن و حلال و

ی ۳– خارج کردن حلال پس از اختلاط کامل از راه فرایندهایی نظیر لج تبخیر یا تقطیر حلال.

تاکنون نانوکامپوزیتهای بسیاری با استفاده از این روش تولید شدهاند که از این دست میتوان نانوکامپوزیتهای پلیاستیرن-یو گرافن، پلییورتان-گرافن، پلیمتیلمتاکریلات-گرافن یا پلیمر طعهای پلی(استیرن-b-ایزوپرن-b-استیرن)-گرافن را نام برد [۳۲-۴۳].

اربای و همکاران [۴۴] نانوکامپوزیت استیرن بوتادیان استیرن-گرافن را با استفاده از این روش تهیه و مشاهده کردند، در این روش در مقایسه با روش اختلاط با فراورش مذاب، پراکندگی

بهتری از لایههای گرافن درون فاز زمینه انجام گرفته است. این موضوع سبب شد تا مقدار گرافن مورد نیاز برای آستانه تراوایی در نانوکامپوزیتهای تهیه شده از روش فراورش محلول ٪۳۳ مقدار آن در روش اختلاط مذاب باشد.

کولیا و همکاران [۴۷] نیز نانوکامپوزیت پلیاتیلن تقویت شده با گرافن را به این روش تهیه کردند. نتایج پژوهشهای این پژوهشگران نشان داد، افزودن ۳ درصد وزنی گرافن اصلاح شده به پلیاتیلن سبب افزایش ٪۴۶ در مدول شده و دمای تخریب را نیز ۲۰۰۲ درجه افزایش خواهد داد.

به دلیل سادگی این روش، انتظار میرود که در آینده اکثر نانوکامپوزیتهای گرافن-پلیمر با استفاده از این روش تولید شوند. اگرچه هشدارهایی در ارتباط با خطرهای ناشی از نفوذ حلالهای آلی در منافذ گرافن اکسید که ماندگاری دائم دارند، بیان شده است [۴۶]. باروسو-بویانس و همکاران باقی ماندن حلال درون نانوکامپوزیتها را برای نانوکامپوزیتهای تهیه شده با استفاده از حلالهای قطبی و غیرقطبی بررسی کردند [۳۵]. آنها مشاهده نفوذ کرده و سبب تغییر در لایههای گرافن اکسید شدهاند. همچنین، نفوذ کرده و سبب تغییر در لایههای گرافن اکسید شدهاند. همچنین، روی ماده باقی میماند [۴۶]. این مسئله میتواند از معایب و بشد.

#### روش پلیمرشدن درجا

در این روش، گرافن اصلاح شده یا گرافن اکسید با مونومر یا پیش پلیمر با وجود یا عدم وجود حلال مخلوط می شوند. سپس، واکنش پلیمر شدن با تنظیم پارامترهایی همچون دما و زمان انجام می شود. نانو کامپوزیت حاصل برخلاف نانولوله های کربنی به عملیاتی پس از فرایند نیاز ندارند. سطح لایه های گرافن اصلاح شده با عوامل شیمیایی، حاوی مولکول های کوچکی است که می توانند در کنار برقراری پیوند کووالانسی با فاز زمینه، پیوندزنی زنجیرهای پلیمری را از راه پلیمر شدن رادیکالی نیز میسر سازد [۴۷،۴۸]. نانو کامپوزیت های پلیمری بر پایه های پلی یورتان، پلی استیرن، پلی متیل نانو کامپوزیت های تهیه شده به این روش هستند [۲۵–۴۷].

وانگ و همکاران [۵۴] نانوکامپوزیت پلیمتیل متاکریلات تقویت شده با گرافن را به روش پلیمرشدن درجای مونومر در مجاورت گرافن انجام دادند. آنها دریافتند، زنجیرهای پلیمری

وشالات فأجى

در حین پلیمرشدن روی سطح صفحات گرافن پیوند میخورند. این موضوع سبب بهبود خواص مکانیکی همچون افزایش مدول یانگ و افزایش طول تا پارگی نانوکامپوزیت حاوی ٪۵/۰ وزنی در مقایسه با پلیمر خاص میشود.

در پژوهشهای انجام گرفته در زمینه تهیه نانوکامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با گرافن با استفاده از روش پلیمر شدن درجا، تنها به تحلیل اثر نانوذرات گرافن بر فاز زمینه پلیمری و خواص نهایی آنها تأکید نشده، بلکه در آنها اثر افزودن این نانوذره سینتیک واکنش پلیمر شدن و همچنین فرایند پخت مد نظر قرار گرفته است. به عنوان مثال، در پژوهش انجام شده در این زمینه معلوم شده است که سرعت واکنش پلیمرشدن اسفنجهای پلی دی متیل سیلوکسان با افزودن گرافن لایه لایه شده کاهش یافته است. همچنین، روند پیشرفت واکنش در مقایسه با افزودن نانولولههای کربنی، متفاوت است [۵۳]. افزون بر این، تغییر در وزن مولکولی پلی یورتان گرمانرم، به دلیل وجود گرافن در محیط واکنش نیز توسط پژوهشگران گزارش شده است [۴۲].

فابری و همکاران [۵۵] نانوکامپوزیت پلیبوتیلن ترفتالات تقویت شده با گرافن را به روش پلیمرشدن درجا تهیه کردند. آنها دریافتند، با افزایش مقدار گرافن، وزن مولکولی پلیمر تهیه شده کاهش مییابد، اما تغییر چندانی در مقاومت گرمایی نانوکامپوزیت حاصل رخ نمیدهد.

پاتوله و همکاران [۵۶] نانوکامپوزیت پلیاستیرن-گرافن را با این روش تهیه و گزارش کردند که اصلاح سطح گرافن سبب افزایش خواص گرمایی نانوکامپوزیت حاصل میشود.

مزایای تولید نانوکامپوزیت به روش پلیمرشدن درجا عبارت است از:

۱- ایجاد برهم کنش های قوی بین صفحات گرافن و فاز زمینه پلیمر
 که سبب بهبود انتقال تنش بین فاز زمینه و فاز تقویت کننده شده و
 درنتیجه خواص مکانیکی را بهبود میبخشد.
 ۲- ایجاد پراکنش همگن گرافن درون بستر پلیمری که معمولا
 سبب افزایش گرانروی میشود. این کار عاملی است که سبب
 کاهش مقدار فرایندپذیری و نیز کاهش افزایش طول تا پارگی
 نانوکامپوزیت میشود [۳۰].

## روش اختلاط با فراورش مذاب

اختلاط نانوذره و فاز زمینه پلیمری به روش اختلاط مذاب از نظر تجاری بیشتر از دو روش دیگر مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار دارد. زیرا دو روش دیگر در عین سادگی، تنوع کمتری در انتخاب نوع پلیمر دارند. همچنین، مشکلات زیست-محیطی فراوانی را به دنبال دارند. در این روش، گرافن اصلاح شده با عوامل شیمیایی به پلیمر سازنده فاز زمینه در حالت مذاب با یک اکسترودر دوپیچی و پارامترهایی همچون سرعت چرخش پیچ، دما و زمان وارد می شود. پلی یورتان، پلی پروپیلن هم آرایش، پلی (استیرن-آکریلونیتریل)، پلی آمید ۶ و پلی کربنات از جمله پلیمرهای گرمانرمی بودهاند که به وفور برای تهیه نانو کامپوزیتهای پلیمری –گرافن به روش اختلاط مذاب مورد استفاده شدهاند [۲۱٬۵۷٬۵۸].

شن و همکاران [۵۹] نانوکامپوزیتهای پلیکربنات تقویت شده با گرافن اصلاح شده را با این روش تهیه کردند. این پژوهشگران نشان دادند، شرایط فرایند روی خواص نهایی نانوکامپوزیت و همچنین مقدار پیوندزنی پلیکربنات روی سطح صفحات گرافن اثر چشمگیری دارد.

مشکل اساسی در این روش، چگالی کم گرافن است که



شکل ۲- تصاویر TEM از نانوکامپوزیتهای TPU حاوی ٪۳ وزنی گرافن تهیه شده به روشهای مختلف: (الف) اختلاط محلولی، (ب) اختلاط مذاب و (ج) پلیمر شدن در جا [۴۱].

#### وقالات فأشى

خوراکدهی آن را به اکسترودر با مشکل مواجه می سازد. از سوی دیگر، پراکنش ضعیف گرافن درون بستر پلیمری (به دلیل گرانروی زیاد پلیمر) در مقایسه با روش اختلاط محلول است. شکل ۲ اثر شرایط اختلاط گرافن با بستر پلیمر را بر پراکنش گرافن درون زمینه پلیمری نشان می دهد [۴۱]. این تصاویر TEM مربوط به افزودن ۲۳ وزنی گرافن به پلیمر با روش های اختلاط با فراورش مذاب و حلال و پلیمر شدن درجاست. این تصاویر نشان می دهند، روش های اختلاط محلول و سنتز درجا نسبت به روش اختلاط مذاب دارای توزیع مناسبتری از گرافن درون فاز زمینه هستند. همچنین، مقدار کم پراکنش گرافن در روش اختلاط مذاب سبب افت خواص مکانیکی در مقایسه با روش های اختلاط به روش محلول و سنتز درجا می شود.

#### خواص نانو کامپوزیتهای پلیمر-گرافن

به دلیل پیشرفتهای اخیر در کاربرد گرافن و تولید نانو کامپوزیتهای گرافن-پلیمر، پژوهشهای گستردهای در راستای بررسی خواص این مواد انجام شده است. با توجه به رشد روز افزون کاربرد این نانو کامپوزیتها پژوهشهای گستردهتری نیز در این راستا انجام خواهد شد. مطالعات انجام شده روی خواص مکانیکی، الکتریکی، گرمایی، دینامیکی و ... از جمله پژوهشهای انجام شده در این راستاست که در ادامه به پارهای از آنها اشاره می شود.

## خواص مکانیکی نانو کامپوزیتهای پلیمر-گرافن

اکثر پژوهشهای انجام شده روی نانوکامپوزیتهای تهیه شده از نانولولههای کربن و بستر پلیمری با هدف بهره بردن از خواص مکانیکی بی نظیر نانولولههای کربن و خواص دیگری مثل رسانایی الکتریکی و پایداری گرمایی زیاد این نانوذره بوده است [۶۰]. با و جود پژوهشهای گسترده انجام شده روی نانوکامپوزیتهای تولید شده از نانولولههای کربن – پلیمر، همچنان مشکلاتی در راستای تهیه شده از نانولولههای کربن – پلیمر، همچنان مشکلاتی در راستای تهیه داد. یکی از این مشکلات عبارت از قیمت زیاد این ماده است که گرافن را گزینه مناسبی برای جایگزینی و تولید نانوکامپوزیتهای به سطح صفحات گرافن به منظور تهیه نانوکامپوزیتها با توجه به سطح ویژه زیاد صفحات گرافن، چسبندگی بین سطح مشترک فازها را افزایش داده و خواص نهایی نانوکامپوزیت را ارتقا می دهد مازها را افزایش داده و خواص نهایی نانوکامپوزیت را ارتقا می دهد مفازها را افزایش داده و خواص نهایی نانوکامپوزیت را ارتقا می دهد مفازها را افزایش داده و خواص نهایی نانوکامپوزیت را ارتقا می دهد مفازها را افزایش داده و خواص نهایی نانوکامپوزیت را ارتقا می دهد



شکل ۳- منحنی مدول یانگ برحسب چگالی نانوکامپوزیتهای گرافنی با سایر مواد [۳۰].

مدول کشسانی آنها در حدود ۲۵ TPa است [۶۱،۶۲]. در شکل ۳ مدول یانگ و چگالی گرافن کاهش یافته به روش شیمیایی با تعدادی از مواد مقایسه شده است.

بررسیهای انجام شده روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با گرافن نشان از بهبود خواص به شکل تابعی از مقدار گرافن ترکیب شده با پلیمر دارد [۶۸–۶۳، ۵۸–۴۱]. افزایش ٪۳۱ در مدول یانگ برای نانوکامپوزیتهای حاوی ٪۰/۱ وزنی گرافن لایهلایه شده به روش گرمایی، افزایش انرژی مورد نیاز شکست در حدود ٪۱۲۰ برای پلی یورتان گرمانرم حاوی ٪۱ وزنی گرافن کاهش یافته به روش شیمیایی و افزایش ٪۲۰۰ در انرژی شکست برای اسفنجهای سیلیکونی حاوی ٪۲/۵ وزنی گرافن لایه لایه شده از روش گرمایی توسط پژوهشگران گزارش شده است [۵۱،۵۲،۶۶]. پژوهشهای بیشتری در باره نانوکامپوزیتهای تهیه شده با ماتریسهای الاستومری در مقایسه با سایر پلیمرها (به دلیل کمتر بودن مدول ذاتی آنها) انجام شده است. در برخی از آنها افزایش ٪۷۵ در مدول یانگ با افزودن ٪۷/ وزنی گرافن اکسید كاهش نیافته به پلیوینیل استات مشاهده شده است [۵۱،۶۵،۶۶]. نتايج پژوهشها نشان داده است که وجود صفحات گرافن و نانوصفحههای گرافیت مانع از رشد ترک درون بستر اپوکسی شده است [۶۸،۶۹]. پژوهشهای انجام شده توسط رفیعی و همکاران [۵۱،۶۸] و استورر و همکاران [۳۰] روی نانوکامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با نانولولههای کربن و گرافن اصلاح شده نشان میدهد، بهبود خواص نانوکامپوزیتهای تقویت شده با گرافن اصلاح شده بیشتر از نانولولههای کربن است (شکل ۴)

نانومتری شود. این مسئله احتمالا باعث بهبود برهمکنش مکانیکی و چسبندگی با زنجیرهای پلیمر می شوند (شکل ۵) [۳۷]. در راستای بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیتهای تقویت شده با گرافن پژوهش های در کشور انجام گرفته است که در ادامه به آنها اشاره می شود [۸۲-۷۰].

شکریه و همکاران [۲۱] اثر افزودن دو نمونه از نانوصفحات گرافن را با ضخامتها و قطرهای متفاوت بر چقرمگی شکست رزین اپوکسی مطالعه کردند. این پژوهشگران دریافتند، آن دسته از صفحات گرافن که نازکتر بوده و قطر بیشتری دارند، اثر بیشتری بر چقرمگی شکست و استحکام کششی نانوکامپوزیت خواهند داشت. به گونهای که افزودن تنها ٪۵/۰ وزنی گرافن سبب افزایش ٪۳۹ در استحکام کششی می شود. آنها، خواص مکانیکی نانوکامپوزیتهای پلی پروپیلن-گرافن در مقادیر مختلف گرافن را مدل سازی و با نتایج تجربی مقایسه کردند. این پژوهشگران پلی پروپیلن را با نانوصفحات گرافن پوشش دادند. سپس با استفاده از روش اختلاط مذاب، نانوکامپوزیتهایی با پراکنش بسیار مناسب از گرافن درون بستر پلیمری تولید کردند. این پژوهشگران دریافتند، این روش اختلاط پلیمری تولید کردند. این پژوهشگران دریافتند، این روش اختلاط پلیمری تولید کردند. این پژوهشگران دریافتند، این روش اختلاط پلیمری تولید کردند. این پژوهشگران دریافتند، این روش اختلاط مذاب، عبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت از جمله افزایش مدول یانگ و تنش تسلیم در مقادیر بسیار کم از گرافن می شود [۲۷].



شکل ۴– مقایسه خواص مکانیکی رزینهای اپوکسی پرشده با نانولولههای کربن تکدیواره، چنددیواره و گرافن [۵۱].

[۵۱،۵۷،۶۸]. این پژوهشگران نتایج به دست آمده را به مساحت سطح تماس بیشتر و نیز نسبت زیاد طول به عرض صفحات گرافن در مقایسه با نانولولههای کربن ارتباط دادهاند.

افزون بر این، پژوهشگران یاد شده گرافن را با استفاده از روش گرمایی تهیه و گزارش کردند که وجود نقایص و چینخوردگیهای صفحات گرافن بر تقویت کنندگی مکانیکی اثر منفی نداشته است. همچنین، رامانثان و همکاران [۳۷] پیشنهاد دادند که وجود چروک خوردگیها ممکن است، منجر به زبری سطح در مقیاس



شکل۵- تصاویر SEM از سطح شکست نانوکامپوزیت: (الف) و (ب) پلیمتیل متاکریلات- گرافن انبساط یافته گرمایی (نشانگر زبری سطح گرافن)، (ج) پلیمتیلمتاکریلات- گرافیت انبساطی و (د) پلیمتیل متاکریلات- گرافن انبساط یافته گرمایی [۳۷].

از گرافن و الیاف کربن را بر رفتار خمشی نانوکامپوزیتهای پايه اپوكسى مطالعه كردند. اين پژوهشگران دريافتند، اين گونه هیبریدها سبب بهبود خواص ایستایی و دینامیکی نانوکامپوزیت می شوند. آنها گزارش کردند، هیبریدهای مزبور سبب بهبود چقرمگی نانوکامپوزیت میشوند و روی رشد ترک اثر میگذارند. در تحقیق دیگری شکریه و همکاران [۷۸] اثر نانوصفحات گرافن و گرافیت را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیتهای پایه اپوکسی، بررسی و با یکدیگر مقایسه کردند. این پژوهشگران دریافتند، الم نانوصفحات گرافن که صفحاتی نازکتر و قطورتر از گرافیت داشته و اثر بیشتری بر بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت دارند. همچنین، افزودن ٪/۱/ گرافن سبب افزایش ٪۱۵/۷ در استحکام کششی نانوکامپوزیت می شود. این در حالی است که افزودن ٪۱/۰ گرافیت سبب افزایش استحکام کششی به مقدار ٪۱۴ می شود. آنها گزارش کردند، افزایش این نانوذرات سبب افزایش مدول یانگ می شود. در این باره نیز نانوذرات گرافن اثر بیشتری نسبت به نانوذرات گرافیت دارند. همچنین، آنها مقادیر بسیار کم (کمتر از /۵٪ وزنی) از نانوذرات گرافن را با استفاده از امواج فراصوت و همزن مکانیکی درون بستر پلیمری توزیع کردند و دریافتند که سختی و مدول کشسانی نانوکامپوزیت نهایی با افزودن مقدار بسیار کمی گرافن بهبود می یابد [ ۸۰].

رفیعی تبار و همکاران [۸۱] با استفاده از مدلسازی به روش اجزای محدود اثر نانوذرات گرافن و نانولولههای کربن را بر خواص مكانيكى نانوكامپوزيت بررسى كردند. اين پژوهشگران گزارش دادند، استفاده از گرافن در مقادیر کم، اثر بیشتری بر افزایش مدول یانگ در مقایسه با نانولولههای کربنی دارد. همچنین، تفاوت اساسی بین نتایج نظری و تجربی وجود دارد که آنها را به لغزش صفحات گرافن روی هم و وجود نقایص بر آنها نسبت دادند.

در پژوهش دیگری شریف و همکاران [۸۲] اثر افزوده شدن پلیپیرول-گرافن اکسید را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیتهای پلىپروپيلن-گرافن اكسيد- پلىپيرول بررسى كردند. آنها مشاهده کردند، افزودن ٪۱ وزنی هیبرید متشکل از پلی پیرول-گرافن اکسید به پلیپروپیلن سبب افزایش ۳۰ درصدی در مدول یانگ شده و افزودن سازگارکننده موجب پراکنش بهتر فاز تقویت کننده و بهبود 💈 خواص مکانیکی نانوکامیوزیت می شود.

#### رسانايي الكتريكي

در گذشته، ماتریس های پلیمری عایق با پرکننده های رسانای جریان الكتريسيته مخلوط مىشدند تا مواد رساناي جريان الكتريسيتهاي

به دست آیند که سبک وزن بوده و حداقل مقاومت الکتریکی در مقیاس کمتر از ۱۰۵ Ω/m را دارند. این کامپوزیتها افزایش غیرخطی در مقدار رسانایی الکتریکی نشان میدهند که این افزایش تابعی از مقدار فاز تقویت کننده است [۳۰]. در یک مقدار مشخص از نانوذره، که به نام آستانه تراوایی شناخته می شود، نانوذره قابلیت تشکیل ساختار شبکهای را دارد. این موضوع سبب افزایش ناگهانی رسانایی الکتریکی نانوکامپوزیت میشود [۸۳]. رسانایی ذاتی و نسبت طول به عرض نانوذرات پرکننده بر پایه کربن، آنها را انتخابی مناسب برای رسیدن به این آستانه تراوایی در مقادیر کم از فاز پر کننده میسازد. نتایج پژوهشها نشان داده است که صفحات گرافنی بی نقص نشانه هایی از انتقال پرتابی (ballistic transport) را نشان میدهند [۸۴]. اگرچه رسانایی الکتریکی گرافن که با استفاده از روشهای شیمیایی اصلاح شده به خوبی گرافن بینقص نیست، اما هنوز برای تولید نانوکامپوزیتهای رسانای الکتریکی گزینه مناسبی است. اولین و رایجترین روش استفاده شده برای کاهش شیمیایی و لایهلایه شدن گرافن اکسید استفاده از پخش به شکل كلوئيد درون هيدرازين هيدرات است [۳۵،۴۰]. گرافن اصلاح شده شیمیایی حاصل از این روش حاوی کربونیل، اپوکسی و گروههای کربوکسیلیک اسید است. رسانایی یک نمونه پودر از آن در حدود ۲۴۰۰ S/m اندازه گیری شده که قابل مقایسه با ۲۵۰۰ S/m برای گرافن اکسید است [۴۰].

کاهش و لایهلایه شدن گرمایی گرافن اکسید از راه گرمادهی مداوم در دماهای زیاد انجام می گیرد [۳۵]. گرافن اصلاح شده شیمیایی حاصل نیز دارای گروههای کربونیل، اپوکسی و کربوکسیلیک اسید و دارای نقایص ساختاری و چروک خوردگی سطح است. با وجود این نقایص سطحی، رسانایی های توده آن در بازه S/m ۲۳۰۰-۲۳۰۰ اندازهگیری شده است.

نتایج پژوهش ها نشان داده است، نانولولههای کربن در ترکیب درصدهای کم، آستانه تراوایی الکتریکی تشکیل میدهند. همچنین، گرافن و گرافن اصلاح شده در مقادیر یکسان یا حتی کمتر از نانولولههای کربنی، قابلیت تشکیل شبکه رسانا را دارند [۵۷].

شکل ۶ اثر شرایط تهیه نانوکامپوزیت را بر آستانه تراوایی الكتريكي نشان مي دهد. همان گونه كه مشاهده مي شود، آستانه تراوایی در بازه وسیعی از ترکیب درصد تغییر میکند، از مقدار ./۰۷٪ حجمی برای پلیاتیلن با وزن مولکولی بسیار زیاد و ۰/۰۱٪ حجمی برای پلیاستیرن تا ٪۳/۸ حجمی برای پلیآمید ۶ [۶۴–۴۱،۵۷–۳۹]. این تفاوتها ناشی از نوع گروههای عاملی گرافن یا گرافن اصلاح شده و اثر آنها بر مقدار توزیع گرافن و

گرمایی، نانوکامپوزیتهایی با خواص گرمایی مطلوب عمدتا از روش پلیمر شدن در جا ساخته شدهاند [۴۹،۵۲]. فنگ و همکاران افزایش رسانایی گرمایی فیلم پلیاستیرن پر شده با ٪۲ وزنی گرافن پیوند شده با پلیاستیرن از ۷/۸۸ W/m.K به ۷/۸۳ W/۳ ۴/۱۰ را گزارش کردهاند [۴۹]. اسفنجهای سیلیکونی پر شده با گرافن لایه لایه شده با روش گرمایی تولیدی از پلیمر شدن درجا، افزایش ٪۶ در رسانایی گرمایی در ترکیب درصد ٪۲۵/۰ وزنی گرافن را نشان میدهد. دلیل آن پیوندهای کووالانسی بین گروههای هیدروکسیل گرافن و گروههای HS– پیش پلیمر بیان شده است [۵۲]. هرچند قسمتی از این افزایش به اثر غیرمستقیم گرافن بر ریزساختار متخلخل و چگالی اسفنج نسبت داده شده است.

اخیرا پارک و همکاران [۸۳] سیالاتی با رسانایی گرمایی زیاد را با استفاده از ترکیب صفحات گرافن با سیال خالصی همچون آب تهیه کردند. این پژوهشگران گزارش کردند، سیالات حاوی گرافن اکسید شده خواص گرمایی بسیار بهتری در مقایسه با سیالات حاوی گرافن داشته است.

چوی و همکاران [۸۴] نانوکامپوزیت پلیمتیل متاکریلات و گرافن تهیه شده با مقادیر بسیار کم گرافن را برای خارج کردن گرمای تولید شده در تجهیزات الکترونیکی بهکار بردند. آنها مشاهده کردند، رسانایی گرمایی این نانوکامپوزیتها ۳ برابر نمونههای خالص است. این نانوکامپوزیتها علاوه بر سبک بودن از لحاظ وزنی، شفافیت زیادی نیز دارند.

در بسیاری از پژوهشها نیز اثر گرافن اصلاح شده بر خواص گرمایی نانوکامپوزیتهای پلیمری از قبیل پایداری گرمایی، دمای انتقال شیشه ای (Tg)، دمای ذوب (Tm) و مقدار بلورینگی ارزیابی شده است [۳۰].

پلیمرها در مقایسه با سرامیک و فولاد در دماهای کمتری تخریب می شوند. این موضوع کاربرد آنها را در دماهای زیاد محدود می کند. رفتار تخریب پلیمرها معمولا بر حسب سه پارامتر ارزیابی می شود: ۱- دمای شروع یعنی دمایی که در آن پلیمر آغاز به تخریب می کند، ۲- دمای تخریب، دمایی که در آن بیشینه سرعت تخریب رخ می دهد و

نتایج پژوهشهای انجام شده حاکی از آن است که گرافن اکسید کاهش یافته شیمیایی و گرمایی، دمای تخریب گرمایی تعدادی از ماتریسهای پلیمری را افزایش داده و نوع کاهش نیافته آن پایداری گرمایی ماتریسهای پلیمری را تغییر نمیدهد (شکل۷)

دماست.



شکل ۶- آستانه تراوایی الکتریکی نانوکامپوزیتهای گرافن-پلیمر با توجه به نوع فرایند [۳۰].

گرافن اصلاح شده درون زمینه پلیمری است. کمترین مقدار آستانه تراوایی مربوط به استفاده از گرافن اکسید کاهش یافته شیمیایی، با استفاده از هیدرازین و ایزوسیانات و تهیه نانوکامپوزیت با روش اختلاط محلول است. در حالی که بیشترین مقدار آستانه تراوایی از گرافیت اکسید لایهلایه شده به روش گرمایی و نانوکامپوزیتهای تولید شده با روش اختلاط مذاب است ناری نانوکامپوزیتهای تهیه شده به روش اختلاط با حلال به برای نانوکامپوزیتهای تهیه شده به روش اختلاط با حلال به روش اختلاط حلال دارد، زیرا در این دو روش معمولا توزیع بهتری از گرافن درون فاز زمینه در مقایسه با روش اختلاط مذاب بهتری از گرافن درون فاز زمینه در مقایسه با روش اختلاط مذاب بهتری از گرافن درون فاز زمینه در مقایسه با روش اختلاط مذاب انجام می شود [۲۱]. همچنین، استفاده از گرافن اصلاح شده که با روش کاهش گرمایی تهیه شده و نقایص سطحی زیادی دارد، آستانه تراوایی را افزایش می دهد.

#### رسانایی گرمایی

برخلاف رسانایی الکتریکی، رسانایی گرمایی نانوکامپوزیتهای گرافن-پلیمر کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. دلیل آن خواص طبیعی انتقال الکترون و رسانایی گرمایی است. درحالی که عوامل انتقال بار الکتریکی جریان مییابند و میتوانند از درون موانع تونل بزنند، انرژی گرمایی از راه برهمکنش ذرات همسایه و به واسطه ترکیبی از الکترونهای آزاد و نوسان ذرات انتقال مییابد. از این رو، رسانایی گرمایی زیاد نیازمند وجود سطح مشترک قوی میان فاز پر کننده و پلیمر است. به همین دلیل، در مطالعات انجام شده روی اثر افزودن گرافن اصلاح شده بر رسانایی

صلنامه علمي-ترويجي، سال چهارم، شماره ۴، زمستان

نانوكامپوزيتهاى پليمرى برپايه گرافز



شکل ۷– رفتار درمایی اسفنجهای سیلیکوبی درافن: شامل ۱۰/۱ ۲/۲ و ۲/۳ درصد وزنی گرافن [۵۲].

[۳۷٬۵۲٬۷۷۸۵٬۶۶]. بهبود پایداری گرمایی نانوکامپوزیتهای حاوی گرافن اصلاح شده به مساحت زیاد سطح گرافن و توزیع مناسب این نانوصفحهها به برهمکنش قوی بین گرافن و پلیمر نسبت داده شده است [۳۷٬۵۲۸۵].

برخی بررسیها افزایشی در حدود ۲°۳۰ در Tg نانوکامپوزیت گرافن-پلیمتیل متاکریلات (٪۰۰۸ وزنی گرافن)، افزایش ۲°۲۰ برای نانوکامپوزیت گرافن- پلیوینیل استات (٪۱۰ وزنی) و در نانوکامپوزیت گرافیت اکسید پیوندی با پلیاستیرن-پلیاستیرن (٪۱۲ وزنی) تغییر حدود ۲°۱۵ در دمای انتقال شیشهای را نشان میدهد [۳۷،۴۹،۷۷]. این پژوهشگران بیان کردند، زنجیرهای پلیوینیل استات و پلیاستیرن به دلیل پیوندهای کووالانسی با صفحات گرافن اصلاح شده، قابلیت حرکت کمتری دارند.

کاهش قابلیت جابهجایی پلیمتیل متاکریلات را به دو سازوکار نسبت دادهاند:

۱- در همتنیدگی و چسبندگی مکانیکی به دلیل سطح چروک
 خورده گرافیت اکسید لایه لایه شده به روش گرمایی و
 ۲- پیوندهای هیدروژنی بین زنجیرهای پلیمری و گروههای

اکسیژنی موجود روی سطح صفحات گرافن اصلاح شدہ.

ی گزارش های متناقضی در باره بلورینگی نانوکامپوزیت های گرافن -پ پلیمر نیز ارائه شده است. در حالی که در نانوکامپوزیت های گرافن پ لایه لایه شده-پلی وینیل استات مقدار بلورینگی افزایش یافته، هیچ تغییری در مقدار بلورینگی برای نانوکامپوزیت های گرافیت اکسید-پلی وینیل استات مشاهده نشده است. همچنین، اثر کاملا متفاوتی در گرافیت اکسید کاهش یافته شیمیایی-پلی وینیل استات مشاهده شده است [۶۵،۷۵۸۷]. به عقیده بعضی از پژوهشگران، این موضوع

به شدت تحت تأثیر تاریخچه گرمایی، روش تولید به کار رفته و برهمکنش بین سطحی پرکننده و بستر پلیمری وابسته است.

## کاربردهای نانو کامپوزیتهای پلیمر-گرافن

تاکنون، کاربردهای متنوعی برای نانوکامپوزیتهای پلیمری پر شده با نانوذره گرافن بر پایه خواص پیش گفته آن بیان شده است. این گونه از نانوکامپوزیتها به تازگی تولید شدهاند، از این رو، قابلیت کاربرد آنها همچنان به پژوهش بیشتری نیاز دارد. در این بخش، چند نوع از کاربردهای نانوکامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با گرافن ارائه می شود که از روش نشست بخارهای شیمیایی حاصل می شوند. این کاربردها بر اساس اینکه هدف نهایی تقویت تقویت می می می ناز این نکته باید مد نظر قرار گیرد که امکان دارد، تقویت ساختار و خواص پلیمر موجب افزایش قابلیت کاربرد نانوکامپوزیت حاصل نیز بشود.

## تقويت خواص پليمر

بهبود خواص مکانیکی ماتریسهای پلیمری، استفاده از این مواد را در صنایع مرتبط با حمل و نقل میسر میسازد، بهویژه در خودروهای پیشرفته، که مقاومت مکانیکی زیاد، وزن کم و خواص زیستی مناسب برای مصرف سوخت به صرفه مورد نیاز است [۸۸]. افزون بر این، استفاده از نانوذرات پرکننده امکان تولید سامانههای بسیار حساس، که قابلیت تقویت با الیاف معمولی را ندارند، مانند فیلمهای نازک [۸۹]، الیاف و اسفنجها را فراهم میکند.

۱- کاربرد در ساخت فیلمهای نازک به عنوان غشا، بسیاری از
 کاربردها از جمله فعالیتهای مرتبط با جداسازی گازها با استفاده
 از غشا تا کاربردهایی در حوزه زیست پزشکی را فراهم می سازد.

کوئین و همکاران [۹۰] غشاهایی را برای جداسازی گازها با استفاده از گرافن تهیه کردند. آنها دریافتند، این غشاها قابلیت بسیار زیادی در جداسازی گازهای هیدروژن و متان دارند و از آنها میتوان برای رفع مشکلات زیستمحیطی کارآمد استفاده کرد. ساختار صفحهای گرافن و گرافن اصلاح شده و نیز این قابلیت صفحات گرافنی بی نقص حاصل از روش شکافت میکرومکانیکی که حتی نسبت به گاز هلیم نیز نفوذناپذیر هستند، میتواند موجب بهبود تولید غشاهایی با نفوذپذیری گزینشی شود. بررسیهای انجام شده روی فیلم گرمانرم پلی یورتان نشان داد، نفوذپذیری گرافن ویالات کی

کاهش یافته به روش گرمایی و شیمیایی کمتر از لایههای اصلاح شده آلی رس در جزء وزنیهای مشابه است [۴۱،۹۲].

لی و همکاران [۹۱] غشاهایی برای جداسازی کربن دیاکسید از مخلوطهای گازی اکسیژن- کربن دیاکسید، نیتروژن- کربن دیاکسید و متان-کربن دیاکسید تهیه کردند. آنها دریافتند، کارایی این غشاها برای جداسازی این گاز بسیار مناسب و بیشتر از توان جداسازی غشاهای ساخته شده با نانولولههای کربنی است.

۲- الیاف پلیمری تقویت شده میتوانند از راه اختلاط محلول و مذاب مانند روش ریسندگی مذاب یا ریسندگی الکتریکی به دست آیند. نانوکامپوزیتهای لیفی قابلیت استفاده در پارچههای سبک (الیاف هوشمند) و مواد بافته شده و همچنین الیاف نوری را دارا هستند [۹۵–۹۳].

پژوهشگران توانستهاند یک لیف ساخته شده از توزیع نانولوله کربن در پلیمتیل متاکریلات را به کمک دیفنیل سولفید به عنوان یک جاذب قابل اشباع در یک دستگاه لیزری استفاده کنند [۹۴]. غشای ساخته شده از الیاف پلیوینیل استات – گرافن اصلاح شده که به روش الکتروریسی تولید شده، قابلیت خود را به عنوان جاذب قابل اشباع با پهنای نوار وسیع جذب و به عنوان یک ماده نوری کارآمد برای ایجاد پالسهای فوق کوتاه در لیزرهای لیفی نشان داده شده است [۹۵].

دونگ و همکاران [۹۶] الیاف پلی ایمید تقویت شده با گرافن را با روش پلیمرشدن درجا تهیه کردند. این پژوهشگران بیان کردند، الیاف حاوی ٪۸/۰ وزنی گرافن، استحکام کششی نزدیک به ۱/۶ برابر و افزایش ۲۰۰ درصدی در مدول یانگ در مقایسه با الیاف خالص دارد.

وانگ و همکاران [۹۷] اثر افزودن گرافن به رزینهای اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه را بر خواص مکانیکی و اشتعال پذیری نانوکامپوزیت بررسی و مشاهده کردند، افزایش گرافن سبب بهبود خواص مکانیکی می شود و مقاومت این ماده را در برابر شعله نیز افزایش می دهد.

۳- اسفنجهای پلیمری مواد پرکاربردی هستند که به طور گسترده در حمل و نقل، ساختمانسازی، بستهبندی و زیست پزشکی استفاده می شوند. افزودن نانوذره گرافن به اسفنجهای پلیمری به طور همزمان خواص مکانیکی، خواص محافظتی در برابر امواج الکترومغناطیسی، عایق بندی صوتی و اشتعال پذیری را بهبود می بخشد [۲۰۲–۹۸]. این نانوذره هنگامی که در زیست پزشکی استفاده می شود، خواص اسفنجهای پلیمری پرشده یا داربستهای سلول اصلاح شده را ارتقا می دهد که به درمان های پزشکی مربوط

می شوند [۹۸،۱۰۰]. بررسی ها نشان داده است، گرافن لایه لایه شده گرمایی در اسفنج های پلیمری سبب بهبود همزمان استحکام فشاری با افزایش بیش از ۲۰۰٪ در مدول نرمال و پایداری گرمایی با افزایش حدود ۲°۶۰ در دمای تخریب، با جزء وزنی کمتر از ۲۰۲۸ وزنی است [۵۲]. مقایسهای بین گرافیت اکسید لایه لایه شده گرمایی و نانولوله کربن نشان داد، گرافن اصلاح شده افزایش بیشتری را در زمینه پایداری گرمایی اسفنج ها ایجاد میکند. این موضوع به محبوس کردن بیشتر زنجیرهای پلیمری در ساختار لایهای و برهمکنش قابل ملاحظه بین گرافن و پلیمر نسبت داده شده است [۸۵]. این نتیجه میتواند کاربرد گرافن اصلاح شده به عنوان پرکننده ضد شعله را در ذهن ایجاد کند، زیرا نانولوله به عنوان پرکننده ضد شعله را در ذهن ایجاد کند، زیرا نانولوله ساختار سلولی ایجاد میکند که موجب به وجود آمدن یک سامانه خودخاموش شونده می شود [۹۹].

لی و همکاران [۶۳] اسفنجهای سیلیکون- گرافن را با استفاده از رسوبدهی فیلم سیلیکون روی اسفنجهای گرافنی تهیه کردند و این نانوکامپوزیتهای بسیار انعطاف پذیر را به عنوان آند در ساخت باتریهای لیتیمی استفاده کردند.

#### تقويتهاي كاربردي

رسانایی زیاد و نسبت طول به عرض ذاتی گرافن، دستیابی به آستانه تراوایی الکتریکی را در کسر وزنیهای کمتر در مقایسه با دوده و نانولولههای کربنی چنددیواره ممکن ساخته است [۵۷]. این رسانایی کاربرد نانوکامپوزیتهای پلیمرهای رسانا را از حسگرها تا موادی با قابلیت تخلیه الکتروستاتیکی و مواد محافظ و مداخلهگر امواج الکترومغناطیسی و الکترودها گسترش میدهد.

#### حسگرها

حسگرها می توانند از موادی با گستره وسیعی از رسانایی تولید شوند، از کامپوزیت های پلیمری با رسانایی نزدیک به مقدار آستانه تراوایی تا نانوکامپوزیتهای پلیمری رسانای الکتریسیته که قابلیت کاربرد در تولید حسگرهای گاز، pH، فشار یا دما را دارند [۶۳،۱۰۳–۱۰۵].

نانوکامپوزیتهای رسانا معمولا رسانندگی گرمایی مثبت دارند و مقاومت گرمایی آنها با ازدیاد دما افزایش مییابد. هرچند یک پژوهش جدید، رفتاری مخالف این مطلب یعنی رسانندگی منفی را در نانوکامپوزیت های پلیوینیلیدین فلوئورید پر شده با گرافن را نشان میدهد [۶۳]. این نتیجه غیرمنتظره به دلیل زیاد بودن نسبت

نانوكامپوزيتهاى پليمرى برپايه گرافز

طول به عرض صفحات گرافنی در مقایسه با نانوذرات گرافیت است که منتج به غلبه مقاومت در برابر رسانایی میشود. چنین رسانندگی گرمایی منفی در حسگرهای گرمایی تجاری موجود، که در آنها مقاومتهای گرمایی از مواد سرامیکی ساخته میشوند، مورد نیاز است. به همین دلیل، این نانوکامپوزیتها میتوانند به عنوان یک فناوری جایگزین به جای مقاومتهای گرمایی سرامیکی استفاده شوند.

لیو و همکاران [۱۰۸] یک حسگر سهبعدی از گرافن با استفاده از فرایند لیتوگرافی تهیه کردند و قابلیت این ماده را برای تشخیص آنزیمهای حاوی فنول مطالعه کردند. آنها نشان دادند، این گونه حسگرها قابلیت بسیار زیادی در تشخیص آنزیمهای یاد شده دارند و دلیل آن را به سطح ویژه زیاد گرافن و رسانایی الکتریکی زیاد آن نسبت دادند.

هوانگ و همکاران [۱۰۷] حسگری برای تشخیص آمونیاک با استفاده از گرافن اکسید کاهش یافته به روش شیمیایی تهیه کردند. آنها مشاهده کردند، این نوع از غشاها حساسیت بسیار زیادی در تشخیص آمونیاک با غلظتهای بسیار کم دارد.

لی و همکاران [۱۰۶] گونهای جدید از حسگرهای حساس به رطوبت را با استفاده از ترکیب گرافن با پلیپیرول در مقادیر متفاوت از گرافن تهیه کردند. نتایج پژوهش های آنها نشان داد، حسگرهای حاوی ٪۱۰ وزنی گرافن نسبت به سایر حسگرها حساسیت بیشتری داشته و زمان پاسخی در حدود ۲۵ تا ۲۰ دارد.

### مواد تخليه الكتروستاتيك و محافظ امواج الكترومغناطيسي تداخلي

مشخصه مواد تخلیه الکتروستاتیک (ESD)، مقاومت سطحی بین ۱۰۱۲ و Ω ۱۰۵ است. در حالی که مواد محافظ الکترومغناطیسی تداخلی (EMI) باید مقاومتی کمتر از Ω ۱۰۵ داشته باشند. کاربرد مواد محافظ الکترومغناطیسی تداخلی و تخلیه الکتروستاتیک از پوششهای پارچهای کف و بستهبندی وسایل الکترونیکی تا آنتنهای ارتباط راه دور، قطعات تلفن همراه و پوششهای محافظ فرکانس در هواپیماها و وسایل الکترونیکی گسترده شده است. کارایی محافظت الکترومغناطیسی تداخلی قبلا در نانوکامپوزیتهای اپوکسی تقویت شده با گرافن اصلاح شده اندازه گیری شده است. این مقدار موفق به کسب درجه مناسب برای کاربردهای تجاری (در حدود BD ۲۰ در نوار X) برای جزء وزنی ٪۱۵ از گرافیت اکسید کاهش یافته با هیدرازین شد [۸۰].

سونگ و همکاران [۱۱۰] فیلمهای کامپوزیتی متشکل از اتیلن وینیل استات و گرافن تهیه کردند و قابلیت آنها را برای کاربرد در

#### الكترودها

بیشترین بررسیهای انجام شده در راستای کاربرد گرافن اصلاح شده شیمیایی و گرافن به عنوان الکترود در باتریهای لیتیمی، ابرخازنها، سلولهای خورشیدی آلی و دستگاههای نشر میدانی بوده است [۱۲۰–۱۱۱].

۱- در حال حاضر کربن فعال شده در اکثر ابرخازن های تجاری موجود یا خازن های الکتروشیمیایی دولایه به دلیل مساحت سطح زياد و رسانايي الكتريكي به عنوان الكترود به كار ميرود [۱۲۱]. یک روش برای بهبود عملکرد این الکترودها، ترکیب نانوذرات پرکننده پایه کربنی با موادی مانند پلیمرهاست. پژوهشهای انجام شده در این زمینه، ظرفیت خازن ویژه در بازه F/g ۱۲۰ برای گرافن-پروپیلن کربنات با استفاده از تترااتیلآمونیوم تترافلوئوروبورات به عنوان یک الکترولیت و ظرفیت خازن در حدود F/g ۴۰۸ برای یک نانوكامپوزيت پليآنيلين پر شده با گرافيت اكسيد كاهش يافته به روش ریزموج در مجاورت سولفوریک اسید به عنوان الکترولیت را نشان میدهد [۱۱۲،۱۱۴]. اخیرا ترکیبی از گرافیت اکسید کاهش یافته با هیدرازین و نانولولهکربن در پلیآنیلین ظرفیت ویژه برابر با ۲/۵ F/g در پتاسیم هیدروکسید به عنوان الکترولیت نشان دادهاند. افزون بر این، سامانه دوگانه نانولوله کربن-گرافن اصلاح شده شیمیایی پایداری طولانی تری را نشان داد که طی دوره ۱۰۰۰ بار شارژ و تخلیه بار، ظرفیت خازن ٪۶ از مقدار اولیه کاهش نشان داده است [۱۱۳].

یوان و همکاران [۱۲۲] روشی برای تهیه ساختارهای سهبعدی و حفرهدار از گرافن اکسید که کارایی زیادی در ساخت خازنها دارد، ابداع کردند. این پژوهشگران از گرافن اکسید برای تهیه خازن استفاده کردند، سپس با استفاده از روش کاهش شیمیایی، ساختارهای حفرهدار گرافن را تهیه کردند.

فی یو و همکاران [۱۲۳] روشی ساده برای تولید ساختارهای سهبعدی از گرافن اکسید کاهش یافته در اتیلنگلیکول که قابلیت استفاده در خازنهای لیتیمی را دارد، ابداع کردند. این پژوهشگران بیان کردند، این خازنها قابلیت خود را پس از ۳۰۰۰ چرخه از دست نمیدهند.

جیون و همکاران [۱۲۴] با استفاده از کاهش گرمایی گرافن اکسید توانستند، لایه انتقال حفره برای کاربرد در ساخت سلولهای خورشیدی تهیه کنند. این پژوهشگران نشان دادند، ترکیب گرافن با پلیاستیرنسولفونات کارایی سلولهای خورشیدی را در مقایسه

با افزودن پلیاتیلندی اکسی تیوفن به پلیاستیرنسولفونات افزایش میدهد.

۲- فیلمهای شفاف رسانا در وسایل الکترونیکی بسیاری مثل سلولهای خورشیدی، صفحات نمایشگر لمسی، نمایشگرهایی با سطوح تخت و... کاربرد دارند. بدین منظور، گرافن به دست آمده از روش تهنشینی بخارهای شیمیایی، روی بستری از فلز سنتز می شود. سپس روی سطح فیلمهای شفاف از جنس پلی دی متیل سیلو کسان یا پلی اتیلن ترفتالات منتقل می شود (شکل ۸) [۱۱۵،۱۲۰،۱۲۵،۱۲۶]. این روش باعث ایجاد صفحه فیلم با مقاومت کمتر برای مقادیر مشابه شفافیت در مقایسه با گرافن اصلاح شده شیمیایی شده و فناوریهای فعلی را از رده خارج کرده است [۱۱۵].

این فیلمها در سلولهای خورشیدی، ترانزیستورهای اثر میدانی و صفحات لمسی استفاده شدهاند [۱۱۵،۱۲۵،۱۲۶]. در این حالت، می توان فیلمهای شفاف گرافن اصلاح شده با روشهای متعددی مثل قالبگیری چرخشی، ریخته گری، لایهنشانی با ضخامت زیاد و چیدمان با روش لانگمور را به آسانی تولید کرد [۱۱۷،۱۱۸،۱۲۷،۱۲۸].

اگرچه مقاومت سطح فیلمهای گرافن اصلاح شده به دلیل وجود عاملیتهای سطحی و نقصها به طور قابل توجهی بیشتر از گرافن تولیدی از روش تهنشینی بخارهای شیمیایی است، پیش بینی می شود که شکل پذیری بهتری داشته باشند. هرچند اخیرا هنگ و همکاران با استفاده از روش غلتکرانی، مشابه روش چاپ روزنامه، برای انتقال گرافن حاصل از تهنشینی بخارهای شیمیایی به بسترهای متفاوت، موفق به ایجاد روشی مناسب برای افزایش فرایند پذیری و تولید فیلمهای گرافنی حاصل از تهنشینی بخارهای شیمیایی شیمیایی در مقیاس زیاد شدند [۱۲۶].

مقالات وأشى

## مواد واکنشگر به محرک

یک گام دیگر برای رسیدن به نانوکامپوزیتهای چندمنظوره، توسعه سامانه هایی است که به محرک های خارجی مثل دما، میدان الکتریکی، نور و pH واکنش نشان میدهند. واکنش نانوکامپوزیتهای واکنشگر در مقابله با سه محرک خارجی توسط پژوهشگران بررسی شده است. این سه محرک عبارتند از: نور، میدان الکتریکی و دما [۶۶٬۶۹]. نانوکامپوزیتهای گرمانرم پلییورتان با کسر وزنی ۱٪ گرافن سولفوندار شده عملکردی تکرارپذیر و تحریکپذیر با آغازگر زیرقرمز به نمایش گذاشتهاند. این نانوکامپوزیتها در معرض نور زیرقرمز، قابلیت انقباض و برداشتن یک بار ۲۱/۶ g به مقدار ۳/۱ cm با نیرویی برابر ۲۱ N ۰/۲۱ را دارند [۶۶]. شیائو و همکاران به جای استفاده از گرافن تکلایه، از نانوذرات گرافیت حاصل از روش تەنشىنى بخارھاى شىميايى با تودەھايى با كمتر از ۱۰ لایه استفاده کردند [۶۹]. آنها حافظه شکلی یک رزین اپوکسی را با انجام آزمون خراش در دمای معمولی و سپس افزایش دما تا بیش از دمای انتقال شیشهای بررسی کردند. خراشهای ایجاد شده روی نمونههای پر شده پس از گرم کردن به طور کامل ناپدید شدند. این پژوهشگران دلیل آن را مقاومت در برابر ایجاد ترک در نمونههای پر شده عنوان کردند.

وانگ و همکاران [۱۲۹] حسگرهای محرک نسبت به تغییرات pH و گرما را با استفاده از گرافن اکسید و مشتقات پلیمتیل-متاکریلات تهیه کردند. آنها مشاهده کردند، مقدار حساسیت این حسگرها به مقدار گرافن اکسید ترکیب شده با آنها ارتباط دارد. سوهن و همکاران [۱۳۰] ترانزیستورهای اثر میدانی تهیه شده از

سوهن و همکاران [۱۰۰] برانزیسورهای از میدانی نهیه سده از گرافن اکسید کاهش یافته با حساسیت زیاد نسبت به تغییرات pH با قابلیت حساسیت زیستی تهیه کردند. آنها مشاهده کردند، این



شکل ۸ – شرح فرایند تولید، حکاکی و انتقال فیلمهای گرافن با مساحت سطح زیاد [۱۲۵].

#### مقالات طبى





شکل ۹- تصاویر: (الف) رشد گرافن روی سطح سیلیکون ویفر پوشش یافته با نیکل، (ب) انتقال گرافن روی سطح پلیاتیلن ترفتالات، (ج) الگودهی گرافن در یک عنصر سهجزئی و (د) و (ه) لایه گرافنی چاپ شده روی سطح پلیاتیلن ترفتالات و یک لاستیک [۱۲۵].

> حسگرها قابلیت تشخیص پروتون را دارند و میتوانند به عنوان حسگرهای تشخیص آنزیمها استفاده شوند.

## نتيجه گيري

در این پژوهش، پیشرفتهای اخیر در تولید نانوکامپوزیتهای پلیمری پرشده با گرافن، خواص و کاربردهای این مواد بررسی شد. هرچند این مواد در مراحل اولیه پیشرفت قرار دارند، ارزش افزوده و قابلیت زیاد پرداختن به آنها کاملا مشهود است. اگرچه باید از انتظارات برآورده نشده نانوکامپوزیتهای نانولوله کربن-پلیمر درس گرفت و چالشها و مشکلات موجود در مسیر پیشرفت این مواد را که نیاز به حل شدن دارند، در نظر گرفت و از آنها برای توسعه نانوکامپوزیتهای پلیمری پرشده با گرافن بهره برد. اولین چالش مربوط به تولید گرافن و گرافن اصلاح شده شیمیایی است. از طرفی، آمادهسازی گرافن با کیفیت بالا با قیمت مناسب هنوز ممکن نشده است. گرچه اخیرا قدمهایی جدی در راستای این مهم برداشته شده است. در حالی که ممکن است، مقیاس تولید کنونی

گرافن اصلاح شده شیمیایی را افزایش داد، لازم است که درک بهتری از فرایند و کنترل آن نیز به دست آورد. این کنترل موجب فیزیک شکل گیری نقص شده و بازگرداندن شبکه SP2 کربن را به بیشینه مقدار خود برسانیم. همچنین، روشهای جدید سنتز باید ایجاد شود تا بتوان مصرف بیهوده اسید و حلال را کاهش داد. دومين چالش بزرگ مربوط به فرايند توليد نانوكاميوزيت است. بهرهبرداری کامل از نانوکامپوزیتهای پرشده با گرافن با مقدار توزيع گرافن و جهت گيري آن، سبب افزايش صرفه اقتصادي توليد ماده نهایی میشود. توزیع و جهتگیری گرافن برای بهینهسازی اثربخشی کارآیی ساختاری و کاربردی بسیار ضروری است. بررسی های متعدد بیانگر قابلیت عامل دارسازی به منظور ایجاد پیوندهای قوی بینسطحی بین گرافن و گرافن اصلاح شده شیمیایی با ماتریس پلیمری است. تلاش بیشتر در این زمینه، باعث بهبود چسبندگی بین گرافن و پلیمر می شود که منجر به بهبود انتقال تنش، کاهش مقاومت گرمایی و فضای آزاد بین سطحی میشود. افزون بر آن، ممانعت از جهت گیری اتفاقی نانو ذرات پرکننده منجر به تولید نانوکامپوزیتهای طراحی شده میشود که دارای شکل شناسی کنترل شده و دقیق هستند.

- Vaia R.A. and Wagner H.D., Framework for Nanocomposites, *Mater. Today*, 7, 32–37, 2004.
- Rueger D.V. and Kessler M.R., Effect of Silane Structure on the Properties of Silanized Multiwalled Carbon Nanotube-epoxy Nanocomposites, *Polymer*, 55, 1854-1865, 2014.
- Jin S.B., Son G.S., Kim Y.H., and Kim C.G., Enhanced Durability of Silanized Multi-walled Carbon Nanotube/ Epoxy Nanocomposites under Simulated Low Earth Orbit Space Environment, *Compos. Sci. Tech.*, 87, 224– 231, 2013.
- Ullah Khan S., Pothnis J.R., and Kim J.K., Effects of Carbon Nanotube Alignment on Electrical and Mechanical Properties of Epoxy Nanocomposites, *Composite: A*, 49, 26–34, 2013.
- Shadlou S., Alishahi E., and Ayatollahi M.R., Fracture Behavior of Epoxy Nanocomposites Reinforced with Different Carbon Nano-reinforcements, *Compos. Struc.*, 95, 577–581, 2013.
- Gallego M.M., Hernández M., Lorenzo V., Verdejo R., Manchado M.A., and Sangermano M., Cationic Photocured Epoxy Nanocomposites Filled with Different Carbon Fillers, *Polymer*, 53, 1831-1838, 2012.
- Lingpu J., Shengjiao Y., Yimin J., and Chunming W., Electrochemical Deposition of Diluted Magnetic Semiconductor ZnMnSe on Reduced Graphene Oxide/Polyimide Substrate and its Properties, *Alloy. Compos.*, 609, 233–238, 2014.
- Zhang X., Liu M., Mao Y., Xu Y., and Niu S., Ultrasensitive Photoelectrochemical Immunoassay of Antibody Against Tumor-associated Carbohydrate Antigen Amplified by Functionalized Graphene Derivates and Enzymatic Biocatalytic Precipitation, *Biosen. Bioelec.*, 59, 21–27, 2014.
- Dao T.D., Hong J.E., Ryu K.S., and Jeong H.M., Supertough Functionalized Graphene Paper as a High-capacity Anode for Lithium Ion Batteries, *Chem. Eng.*, 250, 257–266, 2014.
- Aoyama S., Park Y.T., and Macosko W., Melt Crystallization of Poly(ethylene terephthalate): Comparing Ad-

dition of Graphene vs. Carbon Nanotubes, *Polymer*, **55**, 2077-2085, 2014.

- Gokkurt T., Durmus A., and Sariboga V., Investigation of Thermal, Rheological, and Physical Properties of Amorphous Poly(ethylene terephthalate)/Organoclay Nanocomposite Films, *Appl. Polym. Sci.*, **129**, 2490-2501, 2013.
- Kim H., Abdala A.A., and Macosko C.W., Thermal Analysis of Epoxy-based Nanocomposites: Have Solvent Effects been Overlooked, *Macromolecules*, 43, 6515-6530, 2010.
- Zhang H., Zheng W., Yan Q., Yang Y., Wang J., and Lu Z., Electrically Conductive Polyethylene Terephthalate/Graphene Nanocomposites Prepared by Melt Compounding, *Polymer*, **51**, 1191-1196, 2010.
- Bandla S. and Hanan J.C., Microstructure and Elastic Tensile Behavior of Polyethylene Terephthalate-Exfoliated Graphene Nanocomposites, *Mater. Sci.*, 47, 76-82, 2012.
- Li M. and Jeong Y.G., Influences of Exfoliated Graphite on Structures, Thermal Stability, Mechanical Modulus, and Electrical Resistivity of Poly(butylene terephthalate), *Appl. Polym. Sci.*, **125**, 53-40, 2012.
- Kotov N.A., Materials Science: Carbon Sheet Solutions, *Nature*, 442, 254–255, 2006.
- Rao C.N.R., Biswas K., Subrahmanyam K.S., and Govindaraj A., Graphene, the New Nanocarbon, *Mater*. *Chem.*, **19**, 2457–2469, 2009.
- Rao C.N.R., Sood A.K., Subrahmanyam K.S., and Govindaraj A., Graphene: The New Two-dimensional Nanomaterial, *Angew. Chem., Int. Ed.*, 48, 7752–7777, 2009.
- Cai D. and Song M., Recent Advance in Functionalized Graphene/Polymer Nanocomposites, *Mater. Chem.*, 20, 7906–7915, 2010.
- Li X., Zhu Y., Cai W., Borysiak M., Han B., Chen D., Piner R.D., Colombo L., and Ruoff R.S., Transfer of Large-area Graphene Films for High-performance Transparent Conductive Electrodes, *Nano Lett.*, 9, 4359–4363, 2009.
- 21. Dao T.D., Lee H.I., and Jeong H.M., Alumina-coated

نانوكامپوزيتهاى پليمرى برپايه گرافز

Graphene Nanosheet and Its Composite of Acrylic Rubber, *Colloid. Int. Sci.*, **416**, 38–43, 2014.

- Seo H.M., Park J.H., Dao T.D., and Jeong H.M., Compatibility of Functionalized Graphene with Polyethylene and Its Copolymers, *Nanomaterials*, **2013**, 1-8, 2013
- Choi J.T., Dao T.D., Oh K.M., Lee H.I., Jeong H.M., and Kim B.K., Shape Memory Polyurethane Nanocomposites with Functionalized Graphene, *Smart Mater. Struct.*, **21**, 075017, 2012.
- Geim A.K. and Novoselov K.S., The Rise of Graphene, *Nat. Mater.*, 6, 183–191, 2007.
- Rao C.N.R., Biswas K., Subrahmanyam K.S., and Govindaraj A., Graphene, The New Nanocarbon, *Mater*. *Chem.*, **19**, 2457–2469, 2009.
- Soldano C., Mahmood A., and Dujardin E., Production, Properties and Potential of Graphene, *Carbon*, 48, 2127–2150, 2010.
- Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., and Grigorieva I.V., Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*, **306**, 666–669, 2004.
- Dato A., Radmilovic V., Lee Z., Phillips J., and Frenklach M., Substrate-free Gas-phase Synthesis of Graphene Sheets, *Nano Lett.*, 8, 2012–2016, 2008.
- Reina A., Jia X., Ho J., Nezich D., Son H., Bulovic V., Dresselhaus M.S., and Kong J., Large Area, Few-layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition, *Nano Lett.*, 9, 30–35, 2009.
- Verdejo R., Mar Bernal M., Romasanta L.J., and Manchado M.A., Graphene Filled Polymer Nanocomposites, *Mater. Chem.*, **21**, 3301-3310, 2011.
- Park S. and Ruoff R.S., Chemical Methods for the Production of Graphenes, *Nat. Nanotech.*, 4, 217–224, 2009.
- Chen G., Wu D., Weng W., and Wu C., Exfoliation of Graphite Flake and its Nanocomposites, *Carbon*, 41, 619–621, 2003.
- 33. Ramanathan T., Stankovich S., Dikin D.A., Liu H., Shen H., Nguyen S.T., and Brinson L.C., Graphitic Nano-fillers in PMMA Nanocomposites-An Investigation of Particle Size and Dispersion and their Influence on Nanocomposite Properties, *Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, 45, 2097–2112, 2007.

- Uhl F.M., Yao Q., and Wilkie C.A., Formation of Nanocomposites of Styrene and Its Copolymers Using Graphite as the Nanomaterial, *Polym. Adv. Technol.*, 16, 533–540, 2005.
- Dreyer D.R., Park S., Bielawski C.W., and Ruoff R.S., The Chemistry of Graphene Oxide, *Chem. Soc. Rev.*, 39, 228–240, 2010.
- Tasis D., Tagmatarchis N., Bianco A., and Prato M., Chemistry of Carbon Nanotubes, *Chem. Rev.*, 106, 1105–1136, 2006.
- Ramanathan T., Abdala A.A., Stankovich S., Dikin D.A., Alonso M., Piner R.D., Adamson D.H., Schniepp H.C., Chen X., Ruoff R.S., Nguyen S.T., and Aksay I.A., Functionalized Graphene Sheets for Polymer Nanocomposites, *Nat. Nanotech.*, 3, 327–331, 2008.
- Ansari S., Kelarakis A., Estevez L., and Giannelis E.P., Oriented Arrays of Graphene in a Polymer Matrix by In Situ Reduction of Graphite Oxide Nanosheets, *Small*, 6, 205–209, 2010.
- Tkalya E., Ghislandi M., Alekseev A., Koning C., and Loos J., Latex-based Concept for the Preparation of Graphene-based Polymer Nanocomposites, *Mater. Chem.*, **20**, 3035–3039, 2010.
- Stankovich S., Dikin D.A., Dommett G.H.B., Kohlhaas K.M., Zimney E.J., Stach E.A., Piner R.D., Nguyen S.T., and Ruoff R.S., Graphene-based Composite Materials, *Nature*, 442, 282–286, 2006.
- Kim H., Miura Y., and Macosko C.W., Graphene/polyurethane Nanocomposites for Improved Gas Barrier and Electrical Conductivity, *Chem. Mater.*, **22**, 3441–3450, 2010.
- Das B., Prasad K.E., Ramamurty U., and Rao C.N.R., Nano-indentation Studies on Polymer Matrix Composites Reinforced by Few-layer Graphene, *Nanotechnology*, **20**, 125701–125705, 2009.
- Peponi L., Tercjak A., Verdejo R., Manchado M.A., Mondragon I., and Kenny J.M., Confinement of Functionalized Graphene Sheets by Triblock Copolymers, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 17973–17978, 2009.
- Araby S., Meng Q., Zhang L., Kang H., Majewski P., and Tang Y., Electrically and Thermally Conductive Elastomer/graphene Nanocomposites by Solution Mixing, *Polymer*, 55, 201-210, 2014.



J

چ<u>ار</u>غ

، شماره

زمستان ۲۰۲

مقالات طهى

- 45. Kuila T., Bose S., Hong C.E., Uddin M.E., Khanra P., Kim N.H., and Lee J.H., Preparation of Functionalized Graphene/linear Low Density Polyethylene Composites by a Solution Mixing Method, *Carbon*, **49**, 1033–1051, 2011.
- Bujans F., Cerveny S., Verdejo R., Val J.J.d., Alberdi J.M., Alegria A., and Colmenero J., Permanent Adsorption of Organic Solvents in Graphite Oxide and its Effect on the Thermal Exfoliation, *Carbon*, 48, 1079–1087, 2010.
- Fang M., Wang K.G., Lu H.B., Yang Y.L., and Nutt S., Single-layer Graphene Nanosheets with Controlled Grafting of Polymer Chains, *Mater. Chem.*, 20, 1982– 1992, 2010.
- 48. Lee S.H., Dreyer D.R., An J.H., Velamakanni A., Piner R.D., Park S., Zhu Y.W., Kim S.O., and Bielawski C.W., Polymer Brushes via Controlled, Surface-Initiated Atom Transfer Radical Polymerization (ATRP) from Graphene Oxide, *Macromol. Rap. Commun.*, **31**, 281– 288, 2010.
- Fang M., Wang K.G., Lu H.B., Yang Y.L., and Nutt S., Single-layer Graphene Nanosheets with Controlled Grafting of Polymer Chains, *Mater. Chem.*, **19**, 7098– 7105, 2009.
- Wang S.R., Tambraparni M., Qiu J.J., Tipton J., and Dean D., Thermal Expansion of Graphene Composites, A Facile Approach to the Fabrication of Graphene/Polystyrene Nanocomposite by In Situ Microemulsion Polymerization, *Macromolecules*, 42, 5251–5255, 2009.
- Rafiee M.A., Rafiee J., Wang Z., Song H., Yu Z.Z., and Koratkar N., Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content, *ACS Nano*, 3, 3884–3890, 2009.
- Verdejo R., Bujans F., Perez M.A., and Saja J.A., Physical Properties of Silicone Foams Filled with Carbon Nanotubes and Functionalized Graphene Sheets, *Mater. Chem.*, 18, 2221–2226, 2008.
- Verdejo R., Tapiador F.J., Helfen L., Bernal M.M., and Bitinis N., Fluid Dynamics of Evolving Foams, *Chem. Phys.*, **11**, 10860–10866, 2009.
- 54. Wang J., Shi Z., Ge Y., Wang Y., Fan J., and Yin J., Solvent Exfoliated Graphene for Reinforcement of PMMA Composites Prepared by In Situ Polymerization, *Mater.*

Chem. Phys., 136, 43-50, 2012.

- Fabbri P., Bassoli E., Bon S. B., and Valentini L., Preparation and Characterization of Poly(butylene terephthalate)/graphene Composites by in-situ Polymerization of Cyclic Butylene Terephthalate, *Polymer*, 53, 897-902, 2012.
- Patole A.S., Shashikant P., Kanga H., Yoo J., Kim T.H., and Ahn J. H., *Colloid Interface Sci.*, **350**, 530–537, 2010.
- Steurer P., Wissert R., Thomann R., and Mulhaupt R., Functionalized Graphenes and Thermoplastic Nanocomposites based upon Expanded Graphite Oxide, *Macro. Rapid Commun.*, **30**, 316–327, 2009.
- Kim H. and Macosko C.W., Processing-property Relationships of Polycarbonate/graphene Composites, *Polymer*, 50, 3797–3809, 2009.
- Shen B., Tao W.Z., Lu D., and Zheng W., Enhanced Interfacial Interaction between Polycarbonate and Thermally Reduced Graphene Induced by Melt Blending, *Compos. Sci. Tech.*, 86, 109–116, 2013.
- Ajayan P.M. and Tour J.M., Materials Science: Nanotube Composites, *Nature*, 447, 1066–1068, 2007.
- Lee C., Wei X.D., Kysar J.W., and Hone J., Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene, *Science*, **321**, 385–388, 2008.
- Navarro C.G., Burghard M., and Kern K., Electronic Transport Properties of Individual Chemically Reduced Graphene Oxide Sheets, *Nano Lett.*, 8, 2045–2049, 2008.
- Ansari S. and Giannelis E.P., Functionalized Graphene Sheet-Poly(vinylidene fluoride) Conductive Nanocomposites, *Polym. Sci., Part B.*, 47, 888–897, 2009.
- 64. Jang J.Y., Kim M.S., Jeong H.M., and Shin C.M., Graphite Oxide/Poly(methyl methacrylate) Nanocomposites Prepared by a Novel Method Utilizing Macroazoinitiator, *Compos. Sci. Tech.*, **69**, 186–191, 2009.
- Liang J.J., Huang Y., Zhang L., Wang Y., Ma Y.F., Guo T.Y., and Chen Y.S., Molecular-level Dispersion of Graphene into Poly(vinyl alcohol) and Effective Reinforcement of their Nanocomposites, *Adv. Funct. Mater.*, 19, 2297–2302, 2009.
- 66. Liang J.J., Xu Y.F., Huang Y., Zhang L., Wang Y., Ma Y.F., Li F.F., Guo T.Y., and Chen Y.S., Molecular-level

فصلنامه علمي-ترويجي، سال چهارم، شماره ۴، زمستان

797

ویلات طیری

Dispersion of Graphene into Poly(vinyl alcohol) and Effective Reinforcement of their Nanocomposites, *Phys. Chem. C*, **113**, 9921–9927, 2009.

- Nguyen D.A., Lee Y.R., Raghu A.V., Jeong H.M., Shin C.M., and Kim B.K., Morphological and Physical Properties of a Thermoplastic Polyurethane Reinforced with Functionalized Graphene Sheet, *Polym. Int.*, 58, 412– 417, 2009.
- Rafiee M.A., Rafiee J., Srivastava I., Wang Z., Song H., Yu Z.Z., and Koratkar N., Fracture and Fatigue in Graphene Nanocomposites, *Small*, 6, 179–183, 2010.
- Tang L.C., Wan Y.J., Yan D., and Pei Y.B., The Effect of Graphene Dispersion on the Mechanical Properties of Graphene/Epoxy Composites, *Carbon*, 60, 16-27, 2013.
- Shokrieh M.M., Joneidi V.A., and Mosalmani R., Characterization and Simulation of Tensile Behavior of Graphene/Polypropylene Nanocomposites Using a Novel Strain-rate-dependent Micromechanics Model, *Therm. Compos. Mater.*, 29, 1-17, 2013.
- Shokrieh M.M., Ghoreishi S.M., and Esmkhani M., Effects of Graphene Nanoplatelets and Graphene Nanosheets on Fracture Toughness of Epoxy Nanocomposites, *Fati. Frac. Eng. Mater*, **37**, 1116-1123, 2014.
- Shokrieh M.M. and Joneidi V.A., Characterization and Simulation of Impact Behavior of Graphene/Polypropylene Nanocomposites using a Novel Strain-rate-dependent Micromechanics Model, *Compos. Mater.*, 25, 1-12, 2014.
- Shokrieh M.M., Esmkhani M., Taheri. F., and Haqiqatkhah A.R., Displacement Controlled Flexural Bending Fatigue Behavior of Graphene/Epoxy Nanocomposites, *Compos. Mater.*, 24, 1-10, 2013.
- Shokrieh M.M., Esmkhani M., Shokrieh Z., and Zhao Z., Stiffness Prediction of Graphene Nanoplatelet/Epoxy Nanocomposites by a Combined Molecular Dynamics-micromechanics Method, *Compos. Mater. Sci.*, 18, 444–450, 2014.
- Shokrieh M.M., Esmkhani M., Haghighatkhah A.R., and Zhao Z., Flexural Fatigue Behavior of Synthesized Graphene/Carbon-Nanofiber/Epoxy Hybrid Nanocomposites, *Mater: Des.*, 64, 401–408, 2014.
- Shokrieh M.M., Shokrieh Z., and Hashemianzadeh S.M., Modeling of Stiffness of Graphene/Epoxy Nano-

composites with Randomly Distributed Graphene using a Combined Molecular Dynamics-Micromechanics method, *Modares Mech. Eng. (In Persian)*, **209**, 25-35, 2014.

- Shokrieh M.M. and Joneidi V., Manufacturing and Experimental Characterization of Graphene/Polypropylene Nanocomposites, *Modares Mech. Eng. (In Persian)*, 19, 55-63, 2014.
- Shokrieh M.M. and Esmkhani M., Effect of Graphene Nanosheets (GNS) and Graphite Nanoplatelets (GNP) on the Mechanical Properties of Epoxy Nanocomposites, *Sci. Adv. Mater.*, 48, 260-266, 2013.
- Shokrieh M.M., Shokrieh Z., and Hashemianzadeh S.M., Effective Parameters in Modeling of Graphene Sheet Young's Modulus, *Modares Mech. Eng. (In Persian)*, 210, 47-155, 2012.
- Shokrieh M.M., Hosseinkhani M.R., and Naimi M.R., Nanoindentation and Nanoscratch Investigations on Graphene-based Nanocomposites, *Polym. Test.*, 47, 45–51, 2013.
- Montazeri A., and Rafii H., Multiscale Modeling of Graphene-and Nanotube-Based Reinforced Polymer Nanocomposites, *Phys. Lett.*, A, 44, 4034–4040, 2011.
- Zare M., Sharif M., and Kashkooli A., Study on the Effect of Polypyrrole and Polypyrrole/Graphene Oxide Nanoparticles on the Microstructure, Electrical and Tensile Properties of Polypropylenenanocomposites, *Polym. Plas. Tech. Eng.*, 53, 1392–1401, 2014.
- Park S.S. and Kim N. J., Study on Methane Hydrate formation Using Ultrasonic Waves, *Ind. Eng. Chem.*, 20, 1911–1915, 2014.
- Choi J.Y., Kim S.W., and Cho K.Y., Improved Thermal Conductivity of Graphene Encapsulated Poly(methyl methacrylate) Nanocomposite Adhesives with low Loading Amount of Graphene, *Compos. Sci. Technol.*, 94, 147–154, 2014.
- Verdejo R., Arroyo C.S., Gonzalez J., Bujans B.F., Perez M.A., and Manchado M.A., Physical Properties of Silicone Foams Filled with Carbon Nanotubes and Functionalized Graphene Sheets, *Eur. Polym.*, 44, 2790–2797, 2008.
- 86. Higginbotham A.L., Lomeda J.R., Morgan A.B., and Tour J.M., Graphite Oxide Flame-retardant Polymer

رويجي

J.

چهارم، شماره

م، زمستان

Nanocomposites, *Appl. Mater. Inter.*, **1**, 2256–2261, 2009.

- Prasad K.E., Das B., Maitra U., Ramamurty U., and Rao C.N.R., Extraordinary Synergy in the Mechanical Properties of Polymer Matrix Composites Reinforced with 2 Nanocarbons, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **106**, 13186– 13189, 2009.
- Meyyappan M., Carbon Nanotubes: Science and Applications, CRC Press, USA, 234-250, 2004
- Su P.G. and Chiou C.F., Electrical and Humidity-sensing Properties of Reduced Graphene Oxide Thin Film Fabricated by Layer-by-layer with Covalent Anchoring on Flexible Substrate, *Sens. Actu., B*, **200**, 9–18, 2014.
- Qin X., Meng Q., Feng Y., and Gao Y., Graphene with Line Defect as a Membrane for Gas Separation: Design via a First-principles Modeling, *Surface Sci.*, 607, 153– 158, 2013.
- Bunch J.S., Verbridge S.S., Alden J.S., Zande A.M.V.D., Parpia J.M., and Craighead H.G., Impermeable Atomic Membranes from Graphene Sheets, *Nano Lett.*, 8, 2458–2462, 2008.
- Lee J. and Aluru N.R., Water-solubility-driven Separation of Gases Using Graphene Membrane, *Mem. Sci.*, 428, 546–553, 2013.
- Wallace G.G., Putting Function into Fashion: Organic Conducting Polymer Fibres and Textiles, *Fib. Polym.*, 8, 135–142, 2007.
- Uchida S., Martinez A., Song Y.W., and Ishigure T., Carbon Nanotube-doped Polymer Optical Fiber, *Opt. Lett.*, 34, 3077–3079, 2009.
- Bao Q., Zhang H., Yang J.X., Wang S., Tang D.Y., Jose R., Ramakrishna S., Lim C.T., and Loh K.P., Graphene–polymer Nanofiber Membrane for Ultrafast Photonics, *Adv. Funct. Mater.*, **20**, 782–791, 2010.
- Dong J., Yin C., Zhao X., Li Y., and Zhang Q., High Strength Polyimide Fibers with Functionalized Graphene, *Polymer*, 54, 6415-6424, 2013.
- 97. Wang X., Song L., Pornwannchai W., Hua Y., and Kandola B., The Effect of Graphene Presence in Flame Retarded Epoxy Resin Matrix on the Mechanical and Flammability Properties of Glass Fiber-reinforced Composites, *Composite A*, **53**, 88–96, 2013.
- 98. Jell G., Verdejo R., Safinia L., Stevens M., Shaffer M.,

and Bismarck A., Carbon Nanotube-enhanced Polyurethane Scaffolds Fabricated by Thermally Induced Phase Separation, *Mater. Chem.*, **18**, 1865–1872, 2008.

- Verdejo R., Bujans F., Perez M.A., Saja J.A., Arroyo M.M., and Manchado A.L., Physical Properties of Silicone Foams Filled with Carbon Nanotubes and Functionalized Graphene Sheets, *Mater. Chem.*, 18, 3933– 3939, 2008.
- 100. Verdejo R., Jell G., Safinia L., Bismarck A., and Stevens M.M., Reactive Polyurethane Carbon Nanotube Foams and their Interactions with Osteoblasts, *Biomed. Mater. Res., Part A*, 88, 65–73, 2009.
- 101. Verdejo R., Stampfli R., Lainez M., Mourad S., Perez M.A.R., and Bruhwiler P., Enhanced Acoustic Damping in Flexible Polyurethane Foams Filled with Carbon Nanotubes, *Comp. Sci. Technol.*, **69**, 1564–1569, 2009.
- 102. Yang Y., Gupta M.C., Dudley K.L., and Lawrence R.W., Novel Carbon Nanotube-polystyrene Foam Composites for Electromagnetic Interference Shielding, *Nano Lett.*, 5, 2131–2134, 2005.
- 103. Chen L., Chen G., and Lu L., Piezoresistive Behavior Study on Finger-Sensing Silicone Rubber/Graphite Nanosheet Nanocomposites, *Adv. Funct. Mater.*, 18, 898–904, 2007.
- 104. An K.H., Jeong S.Y., Hwang H.R., and Lee Y.H., Enhanced Sensitivity of a Gas Sensor Incorporating Single-walled Carbon Nanotube–polypyrrole Nanocomposites, *Adv. Mater.*, 16, 1005–1009, 2004.
- 105. Liu J.Q., Tao L., Yang W.R., Li D., Boyer C., Wuhrer R., Braet F., and Davis T.P., Synthesis, Characterization, and Multilayer Assembly of pH Sensitive Graphene–Polymer Nanocomposites, *Langmuir*, 26, 10068–10075, 2010.
- 106. Li F., Yue H., Yang Z., Li X., Qin Y., and He D., Flexible Free-standing Graphene Foam Supported Silicon Films as High Capacity Anodes for Lithium Ion Batteries, *Mater. Let.*, **128**, 132–135, 2014.
- 107. Liu F., Piao Y., Choi J., and Seo T.S., Three-dimensional Graphene Micropillar Based Electrochemical Sensor for Phenol Detection, *Biosen. Bioel.*, **50**, 387–392, 2013.
- 108. Huang X., Hu N., Zhang L., Wei L., Wei H., and Zhang Y., The NH, Sensing Properties of Gas Sensors Based

۱۰۵

مقالات والمري

on Aniline Reduced Graphene Oxide, *Synth. Met.*, **185**, 25–30, 2013.

- 109.Lin W., Chang H.M., and Wu R.J., Applied Novel Sensing Material Graphene/polypyrrole for Humidity Sensor, Sen. Act. B, 181, 326–331, 2013.
- 110. Song W.L., Cao M., Lu M.M., Bi S., Wang C.Y., Liu J., Yuan J., and Fan L.Z., Flexible Graphene/Polymer Composite Films in Sandwich Structures for Effective Electromagnetic Interference Shielding, *Carbon*, 66, 67–76, 2014.
- 111. Wang G., Shen X., Yao J., and Park J., Graphene Nanosheets for Enhanced Lithium Storage in Lithium Ion Batteries, *Carbon*, 47, 2049–2053, 2009.
- 112. Murugan A.V., Muraliganth T., and Manthiram A., Rapid, Facile Microwave-solvothermal Synthesis of Graphene Nanosheets and Their Polyaniline Nanocomposites for Energy Strorage, *Chem. Mater.*, **21**, 5004– 5006, 2009.
- 113. Yan J., Wei T., Fan Z., Qian W., Zhang M., Shen X., and Wei F., Preparation of Graphene Nanosheet/Carbon Nanotube/Polyaniline Composite as Electrode Material for Supercapacitors, *Power Sources*, **195**, 3041–3045, 2010.
- 114. Zhu Y., Stoller M.D., Cai W., Velamakanni A., Piner R.D., and Chen D., Exfoliation of Graphite Oxide in Propylene Carbonate and Thermal Reduction of the Resulting Graphene Oxide Platelets, ACS Nano, 4, 1227–1233, 2010.
- 115. Arco L.G., Zhang Y., Schlenker C.W., Ryu K., and Thompson M.E., Continuous, Highly Flexible, and Transparent Graphene Films by Chemical Vapor Deposition for Organic Photovoltaics, *ACS Nano*, 4, 2865– 2873, 2010.
- 116. Li S.S., Tu K.H., Lin C.C., Chen C.W., and Chhowalla M., Solution-processable Graphene Oxide as an Efficient Hole Transport Layer in Polymer Solar Cells, *ACS Nano*, 4, 3169–3174, 2010.
- 117. Valentini L., Cardinali M., Bon S.B., Bagnis D., Verdejo R., Manchado M.A., and Kenny J.M., Morphology and Photoelectrical Properties of Solution Processable Butylamine-Modified Graphene-and Pyrene-Based Organic Semiconductor, *Mater. Chem.*, **20**, 995–1000, 2010.

- 118. Wang X., Zhi L., and Mullen K., Transparent, Conductive Graphene Electrodes for Dye-sensitized Solar Cells, *Nano Lett.*, 8, 323–327, 2007.
- 119. Eda G., Unalan H.E., Rupesinghe N., Amaratunga G.A.J., and Chhowalla M., Field Emission from Graphene Based Composite Thin Films, *Appl. Phys. Lett.*, 93, 233502–233503, 2008.
- 120. Verma V.P., Das S., Lahiri I., and Choi W., Large-area Graphene on Polymer Film for Flexible and Transparent Anode in Field Emission Device, *Appl. Phys. Lett.*, 96, 203108, 2010.
- 121. Simon P. and Gogotsi Y., Materials for Electrochemical Capacitors, *Natur. Mater.*, 7, 845–854, 2008.
- 122. Yuan C.Z., Zhou L., and Hou L.R., Facile Fabrication of Self-supported Three-dimensional Porous Reduced Graphene Oxide Film for Electrochemical Capacitors, *Mater. Lett.*, **124**, 253–255, 2014.
- 123. Tu F., Liu S., Wu T., Jin G., and Pan C., Porous Graphene as Cathode Material for Lithium Ion Capacitor with High Electrochemical Performance, *Power Technol.*, **253**, 580–583, 2014.
- 124. Jeon Y.J., Yun J.M., Kim D.Y., Naa S.I., and Kim S.S., High-performance Polymer Solar Cells with Moderately Reduced Graphene Oxide as an Efficient Hole Transporting Layer, *Solar Energy Mater. Sol. Cells*, **105**, 96–102, 2012.
- 125. Lee Y., Bae S., Jang H., Jang S., Zhu S.E., Sim S.H., Song Y.I., Hong B.H., and Ahn J.H., Wafer-scale Synthesis and Transfer of Graphene Films, *Nano Lett.*, 10, 490–493, 2010.
- 126. Bae S., Kim H., Lee Y., Xu X., Park J.S., Zheng Y., Balakrishnan J., Lei T., Kim H., Song Y.I., Kim Y.J., Kim K.S., Ozyilmaz B., Ahn J.H., Hong B.H., and Iijima S., Roll-to-roll Production of 30-inch Graphene Films for Transparent Electrodes, *Natur. Nanotech.*, **5**, 574–578, 2010.
- 127. Becerril H.A., Mao J., Liu Z., Stoltenberg R.M., Bao Z., and Chen Y., Evaluation of Solution-Processed Reduced Graphene Oxide Films as Transparent Conductors, *ACS Nano*, 2, 463–470, 2008.
- 128. Li X., Zhang G., Bai X., Sun X., Wang X., and Wang E., Highly Conducting Graphene Sheets and Langmuir–Blodgett Films, *Natur. Nano.*, **3**, 538–542, 2008.

5

چهارم، شماره

م، زمستان

مقالات علمى

- 129. Wang J., Song D., Jia S., and Shao Z., Poly(N,Ndimethylaminoethyl methacrylate)/graphene Oxide Hybrid Hydrogels: pH and Temperature Sensitivities and Cr(VI) Adsorption, *Reac. Func. Polym.*, **81**, 8–13, 2014.
- 130. Sohn I.Y., Kim D.J., Jung J.H., Yoon O., Thanh T., Quang T.T. and Lee N.E., pH Sensing Characteristics

and Biosensing Application of Solution-gated Reduced Graphene Oxide Field-effect Transistors, *Biosen. Bioel.*, **45**, 70–76, 2013.

131. Vaia R.A. and Maguire J.F., Polymer Nanocomposites with Prescribed Morphology: Going Beyond Nanoparticle-filled Polymers, *Chem. Mater.*, **19**, 2736–2751, 2007.