

گرافن: پرکننده‌ای منحصر به فرد با خواص فوق العاده برای ساخت نانوکامپوزیت‌های لاستیکی

G Graphene: unique fillers with extraordinary properties for fabricating rubber nanocomposites

چکیده

گرافن یک ذره نانوکربنی دارای خواص منحصر به فرد و بسیار عالی در خواص مختلفی چون خواص مکانیکی، الکتریکی، دی-الکترونیک، سدگری، حرارتی، پزشکی و... است که به خصوص در کامپوزیت‌های لاستیکی برای طیف گسترده‌ای از کاربردها مورد استفاده قرار گرفته که توجهات دانشگاهی و صنعتی زیادی را به خود جلب کرده است. در این مقاله، در کنار معرفی هرچه بیشتر این پرکننده و خواص منحصر به فرد آن و بررسی تلاش‌های اخیر انجام شده در منابع گوناگون برای استفاده از گرافن برای تولید کامپوزیت‌های مهندسی به ویژه کامپوزیت‌های لاستیکی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به اینکه گرافن یک دهه قبل کشف و تولید شده است، بنابراین نیازمند تحقیق و بررسی بسیار زیادی در جهت بهبود کلی در خواص فوق العاده کامپوزیت‌های لاستیکی به ویژه برای کاربردهای ساختاری است.

کلمات کلیدی: گرافن، نانوکامپوزیت‌های لاستیکی، کامپوزیت‌های هوشمند

نوع مقاله: مروری

فاطمه خاکباز^۱، مهدی رزاقی کاشانی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. دانشیار و عضو هیئت علمی، گروه مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:

mehdi.razzaghi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱-۰۷-۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱-۱۰-۰۳

۱ - مقدمه:

ساختار آن در شکل ۲ قابل مشاهده است. گروه‌های اکسیژنی موجود بر سطح گرافن اکساید چسبندگی و برهمکنش قوی‌ای با مواد قطبی دارند. با این حال، در نانو کامپوزیت‌های لاستیکی شامل لاستیک و گرافن اکساید، پیوند هیدروژنی بین صفحات گرافن اکساید قوی‌تر از جاذبه بین گرافن اکساید و زنجیرهای پلیمری لاستیک‌ها است. علاوه بر این، طیف‌سنجی رامان^۶ نشان داده است که گرافن اکساید مشابه دوده برای بهبود رسانایی کامپوزیت‌های مناسب نیست. از این رو، فرایند کاهش میزان گروه‌های اکسیژنی سطح و یا به عبارت دیگر احیا^۷ سطح گرافن اکساید ضروری است. فرایند احیا، توسط حرارت‌دهی کنترل شده و همچنین عوامل کاهنده شیمیایی مانند هیدرات هیدرازین قابل انجام است [۱].

گرافن حاصل از مرحله احیای گرافن اکساید یک ورق گرافیتی دوبعدی با ضخامت یک اتم کربن در حدود ۰/۱۴۲ نانومتر است. تفاوت بصری در مقیاس میکرومتری از پودر گرافن در مقایسه با گرافیت اولیه در شکل ۳ آورده شده است. صفحات گرافنی دارای استحکام مکانیکی حدود ۱۳۰ GPa، مدول کشسانی ۱ TPa، رسانایی حرارتی تقریبی 500W/mK و هدایت الکتریکی ۶۰۰۰ S/cm هستند. هدایت الکتریکی فوق‌العاده گرافن نسبت به گرافن اکساید نشأت گرفته از افزایش نسبت اتم‌های کربن به اتم اکسیژن پس از فرایند احیا است. در راستا همچنین، در مقایسه با سایر نانو پرکننده‌ها، گرافن دارای سطح در دسترس فوق‌العاده بالا برای برهمکنش با لاستیک‌های و به دنبال آن ایجاد خواص عملکردی منحصر به فرد در نانو کامپوزیت‌های حاصل است [۱].

در ادامه موارد گفته شده در مورد گرافن با تفصیل بیشتر بیان و سپس به بررسی دقیق‌تر اثر گرافن بر خواص سامانه‌های نانو کامپوزیتی لاستیکی پرداخته خواهد شد.

در طول چند سال اخیر نانو پرکننده‌های تقویتی به دلیل اندازه کوچک و بالابودن سطح در دسترس و به دنبال آن به دلیل بهبود قابل توجه در خواص کامپوزیت‌ها حتی در مقادیر بارگذاری‌های خیلی کم، در ساخت نانو کامپوزیت‌های لاستیکی بسیار حائز اهمیت شده‌اند. در دهه گذشته نانو ساختارهای گرافیتی مانند ترکیبات گرافیت ورقه‌ای شده^۱، گرافیت منبسط شده^۲، نانو صفحات گرافیت^۳، گرافن^۴ و گرافن اکساید^۵ برای تقویت خواص مواد لاستیکی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته و خواص منحصر به فرد آن‌ها باعث شده که به عنوان پرکننده‌های نسل جدید در مواد کامپوزیتی و نانو کامپوزیتی مورد استفاده گسترده قرار گیرند [۱]. علاوه بر این، نانوذرات مشتق از گرافیت به دلیل رفتار چند منظوره قابل توجه هستند، آن‌ها می‌توانند خواص مکانیکی، تریبولوژیکی، حرارتی، جذب اشعه الکترومغناطیس، رسانایی الکتریکی و حرارتی، عملکرد دی‌الکتریک و... را به طور ویژه در سامانه‌های لاستیکی پر شده بهبود بخشند [۲].

ساختار لایه‌ای گرافیت یک نظم سه‌بعدی را ایجاد کرده که در شکل ۱ مشاهده می‌شود [۳]، گرافیت که به مقدار زیاد در طبیعت یافت می‌شود، از لایه‌های دوبعدی موازی گرافنی شامل کربن‌های قرار گرفته در ساختارهای شش‌وجهی منتظم با ساختار sp^2 تشکیل شده است. همچنین، فاصله‌ی بین صفحات گرافن در این ساختار سه‌بعدی ۰/۳۳۷ نانومتر است که به وسیله نیروی ضعیف و اندروالسی کنار هم نگه‌داشته شده‌اند [۱].

نانو صفحات منفرد گرافنی موجود در ساختار گرافیت از طریق اکسیداسیون کنترل شده گرافیت و تشکیل گرافن اکساید قابل دستیابی هستند. گرافن اکساید حاصل از اکسیداسیون گرافیت شامل گروه‌های عاملی مختلف اکسیژن دار است که

1. Graphite intercalation compounds

3. Graphite nanoplatelets

5. Graphene oxide

2. Expanded graphite

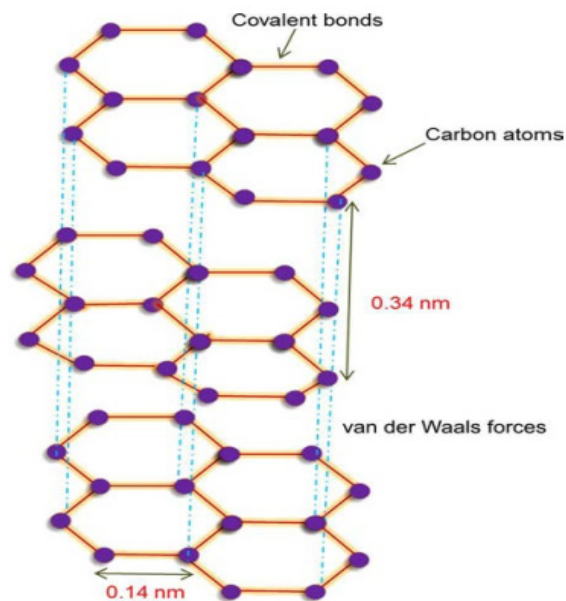
4. Graphene

6. Raman spectra

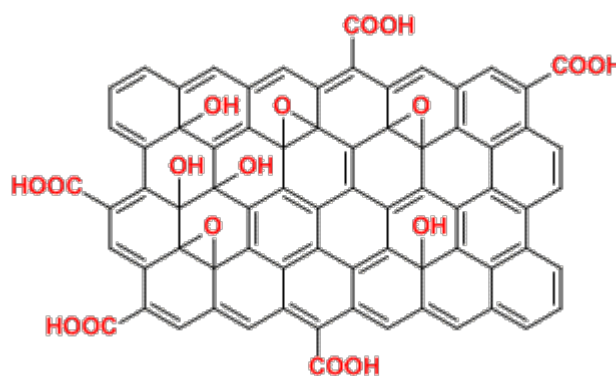
7. Reduction

سنتز گرافن اکساید

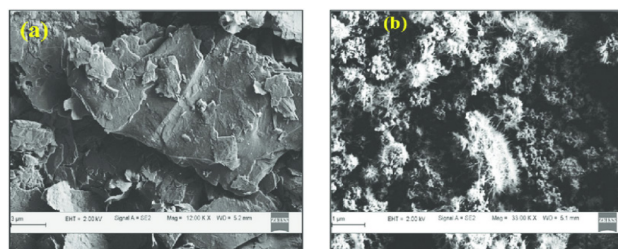
سنتز گرافن برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط آندره گیمل^۱ و کنستانتین نووسلوف^۲ [۴] گزارش شد. با این وجود، روش موثر در این زمینه برای اولین بار توسط هامر^۳ مطرح و در حال حاضر این روش با تغییراتی اندک در مراجع برای سنتز گرافن اکساید در حال پیگیری است [۵]. طرحواره کلی سنتز گرافن از گرافیت در شکل ۴ قابل مشاهده است [۱]. همچنین طرحواره گام به گام سنتز گرافن اکساید از طریق اکسیداسیون پودر گرافیت مطابق با روش هامر اصلاح شده در شکل ۵ آورده شده است. در این روش، ابتدا پودر گرافیت و اندکی نیترات سدیم (به منظور بهبود فرایند اکسایش) به اسید سولفوریک غلیظ اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه در یک حمام یخ همزده می شود، سپس به تدریج پرمنگنات پتاسیم در حین همزدن به سوسپانسیون فوق اضافه می شود. اختلاط به مدت ۲ ساعت در دمای کمتر از ۲۰ درجه سانتی گراد ادامه خواهد یافت. سپس، مخلوط در حال واکنش درون یک حمام یخ که در آن دمای کلی راکتور زیر ۱۰۰ درجه سانتی گراد نگه داشته می شود با مقداری آب یون زدوده رقیق می شود. مخلوط به مدت ۱ ساعت دیگر فرایند هم خوردن را ادامه داده و سپس دوباره با مقداری بیشتر آب یون زدوده رقیق و در نهایت به مدت ۱۲ ساعت دیگر فرایند همزدن مخلوط پیگیری خواهد شد. در طی این مراحل رنگ مخلوط در حال واکنش از سیاهی پودر گرافیت به قهوه ای تیره می گراید. در پایان برای اختتام واکنش اکسیداسیون، مقداری آب یون زدوده (۲۵ میلی لیتر) اضافه و سپس به دنبال آن پراکسید هیدروژن به مخلوط اضافه می شود. در حین فرایند اختتام رنگ محلول از قهوه ای تیره به زرد تبدیل می شود. پس از انجام واکنش اکسیداسیون از طریق جداسازی پودر جامد گرافن اکساید و شستشوی آن توسط محلول آبی اسید هیدروکلریک (به منظور حذف یون های فلزی) و در نهایت خشک کردن آن در آون با دمای



شکل ۱. ساختار گرافیت [۳].



شکل ۲. ساختار گرافن اکساید [۱].



شکل ۳. تصاویر SEM از سطح (الف) پودر گرافیت و (ب) پودر گرافن [۱۸].

1. Andre Giem

3. Hummer

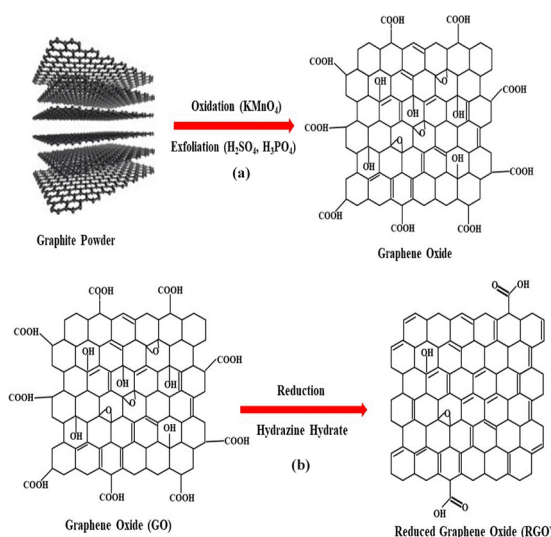
2. Konstantin Novoselov

سنتز گرافن

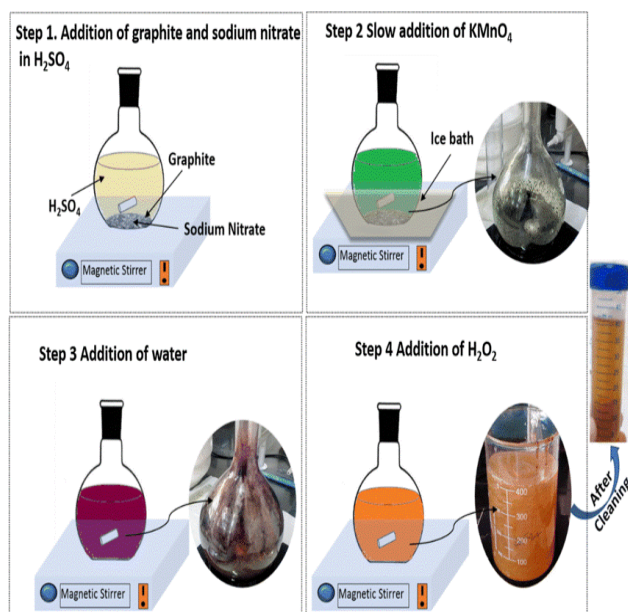
دو روش مهم برای احیا گرافن اکساید وجود دارد که شامل احیا حرارتی و احیا شیمیایی است. هرچند می‌توان از فرایند حرارتی گرافن اکساید برای احیا آن در مقادیر زیاد استفاده کرد، اما در احیا لایه نازک گرافن اکساید باید نرخ گرمادهی کند باشد تا از انبساط ساختار و ترک خوردن آن جلوگیری شود. روش دیگر احیا گرافن اکساید، روش احیا شیمیایی است که توسط هیدرازین و مشتقات آن، سدیم بروموهیدرات، اسید هیدروکلریدریک و مخلوط آن با اسیداستیک یا اسیداسکوربیک در دمای محیط یا با اعمال حرارت ملایم انجام می‌شود. در این روش، نیاز به تجهیزات و یا محیط خاصی برای احیا نیست، به همین دلیل، احیا شیمیایی روشی ارزان تر و ساده تر برای احیا حجم بیشتری از گرافن اکساید در مقایسه با روش حرارتی است [۱].

در روش شیمیایی معمول احیا، به منظور بازیابی ساختار مزدوج گرافن، گرافن اکساید آماده شده از نظر شیمیایی باید با محلول هیدرات هیدرازین واکنش داده شود. به طور معمول، گرافن اکساید در آب یون زدوده پراکنده می‌شود. سپس محلول آبی هیدرات هیدرازین به آن اضافه می‌شود و واکنش احیا تحت سامانه رفلاکس در دمای ۹۵ درجه سانتی گراد به مدت ۴ ساعت روی همزن مغناطیسی می‌ماند. در ادامه ذرات سیاه رنگ پودر گرافن حاصل پس از شستشو و خشک شدن قابل استفاده خواهد بود [۶]. به جز روش آزمایشگاهی بالا، از طرف دیگر بایستی توجه داشت هیدرازین سمی است و این موضوع مانع کاربرد وسیع آن در تولید انبوه گرافن اکساید احیا شده می‌شود. برای رفع این نقص، بسیاری عوامل احیاکننده غیرسمی دیگر همچون الکل، سدیم/پتاسیم هیدروکسید، سدیم بوروهیدرید، اسید هیدریودیک و اسید استیک امروزه در دستور کار قرار گرفته‌اند.

پایین (جهت جلوگیری از احیای حرارتی) پودر گرافن اکساید با رنگ قهوه‌ای کم‌رنگ به دست می‌آید.



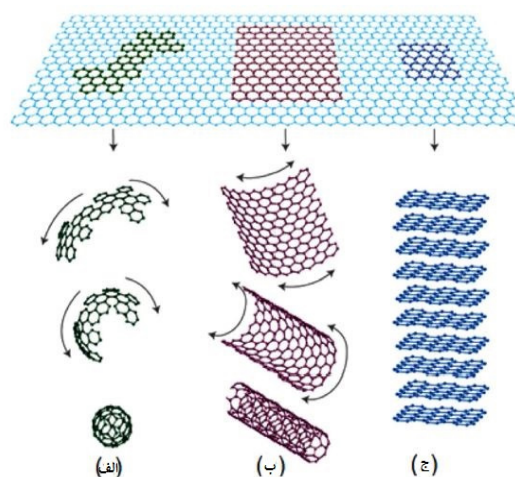
شکل ۴. طرحواره سنتز گرافن از گرافیت [۱].



شکل ۵. طرحواره سنتز گام به گام گرافن اکساید با روش هامر اصلاح شده [۱۹].

خواص فیزیکی، مکانیکی و زیستی گرافن

مشتملات گرافیتی و به خصوص کامپوزیت‌های لاستیکی پرشده با گرافن به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این راستا خواص کامپوزیت حاصل به‌شدت تحت تأثیر برهم‌کنش‌های میان پرکننده و لاستیک قرار دارد. به‌طور مثال، ذرات دیگر حاصل از بازآرایی صفحات گرافن در شکل ۶ آورده شده است. در مقایسه با نانولوله‌های کربنی^۱ و ذرات کروی با ساختار شیمیایی مشابه، گرافن به دلیل بافت سطحی چروکیده^۲ ناشی از چگالی بالای عیب‌های سطحی^۳، از استحکام بالایی برخوردار است که نسبت به دو مورد ذکر شده تماس بیشتری با زنجیرهای لاستیکی دارد [۷]. گرافن با ویژگی‌های منحصر به فرد خود تاکنون در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته است که به‌طور خلاصه می‌توان از کاربردهای گرافن در نانوکامپوزیت‌های لاستیکی، سلول‌های خورشیدی، ابرخازن‌ها، وسایل زیست پزشکی، هیدروژل‌ها و... نام برد [۸]. در ادامه به تشریح موارد اساسی از خواص گرافن مورد توجه در ساخت نانوکامپوزیت‌های لاستیکی پرداخته می‌شود.



شکل ۶. ساختار دوبعدی گرافن و ساختارهای مشتق از آن شامل: الف) ساختار صفر بعدی باکی‌بال، ب) ساختار تک‌بعدی نوردشده به نانولوله، ج) ساختار سه‌بعدی گرافن انباشته در گرافیت [۲۰]

خواص الکتریکی

افزودن گرافن به زمینه‌های لاستیکی نارسا می‌تواند منجر به ساخت نانوکامپوزیت‌های رسانای الکتریکی مطلوب حتی در بارگذاری بسیار کمتر در مقایسه با مواد مشابه نظیر CNT شود. این بهبود عمدتاً به دلیل مساحت بیشتر سطح ورق‌های گرافنی نسبت به نانولوله‌های کربنی است. صفحات گرافن دارای هدایت الکتریکی عالی در حدود 10^6 S/cm است (بیشترین هدایت الکتریکی لایه‌های گرافن اکساید احیاشده که فقط با هیدرازین احیا شده‌اند و دارای نسبت C:O حدود $12/5$ هستند، $99/6$ S/cm گزارش شده است. رسانایی بالای گرافن در کنار نسبت سطح به حجم بسیار بالای آن سبب می‌شود در بارگذاری کم از این پرکننده بتوان به شبکه‌ای از ذرات گرافن در زمینه‌های لاستیکی با مسیرهای رسانا دست یافت [۱].

خواص دی‌الکتریک

در مواجهه با میدان الکتریکی، نانو کامپوزیت‌ها تحت تأثیر سازوکار قطبی‌شدن قابلیت انباشت بار الکتریکی پیدا می‌نمایند. کامپوزیت‌های لاستیکی با ثابت دی‌الکتریک بالا برای کاربردهای مختلفی مانند مواد ذخیره انرژی، خازن‌ها، ترانزیستورها و لوازم الکترونیکی انعطاف‌پذیر مورد توجه هستند [۱]. ذرات گرافنی به دلیل هدایت الکتریکی بسیار بالا و اختلاف قابل توجه آن با لاستیک‌های هیدروکربنی نارسا علاوه بر ایجاد هدایت الکتریکی بالا به دلیل پدیده‌های قطبیدگی سطحی سبب انباشت بسیار بالای بار در ناحیه فصل مشترک ذرات و لاستیک زمینه نیز می‌شوند. قطبیدگی بین سطحی یا فضا‌بار از نوع بسیار اتلافی است و در کامپوزیت‌های متشکل از دو جزء یا بیشتر دیده می‌شود. در این کامپوزیت‌ها، اجزاء دارای ضرایب دی‌الکتریک و یا رسانایی دی‌الکتریک متفاوت هستند و حاملان بار در سطح مشترک اجزاء تجمع پیدا می‌کنند. این تجمع سبب تغییر و

1. CNT

2. Wrinkled Surface Texture

3. Surface Defects

سازوکارهای حلالیت و نفوذ کنترل می‌شود و به دلیل گرادیان فشار گاز و یا غلظت مایع درون لایه نانوکامپوزیتی رخ می‌دهد. نفوذپذیری گازها از درون یک فیلم نانوکامپوزیتی تابعی از دو مشخصه کلیدی است [۹]:

$$1 - \text{ضریب نفوذ}$$

$$2 - \text{مشخصه حلالیت}$$

ضریب نفوذ جنبه جنبشی انتقال را توصیف می‌کند و مشخصه حلالیت به میل نافذ و جنبه ترمودینامیکی انتقال مربوط می‌شود. بر اساس قانون فیک و هنری، رابطه نفوذپذیری گاز را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد:

$$Q = DSAt \left(\frac{\Delta p}{t_m} \right) \quad (1)$$

که در آن D ، Q و S به ترتیب نشان‌دهنده مقدار نشت گاز از لایه، ضریب نفوذ و مشخصه حلالیت گاز در فیلم نانوکامپوزیتی هستند. A مساحت مؤثر لایه، t زمان نفوذ گاز، t_m ضخامت مؤثر فیلم و Δp اختلاف فشار در سراسر لایه است. با توجه به مدل انتشار - محلول، تراوایی در لایه نانوکامپوزیت را می‌توان به صورت محصول نفوذ و حلالیت را طبق رابطه (۲) بیان کرد:

$$Q = DS \quad (2)$$

رابطه بالا زمانی صادق است که مقدار D مستقل از غلظت باشد و مقدار S از قانون هنری پیروی کند. در مدل تراوایی بالا، مولکول‌های نافذ ابتدا در سمت فشار بالای یک فیلم حل می‌شوند و سپس در ضخامت آن پخش می‌شوند و در نهایت در سمت فشار پایین دفع می‌شوند؛ بنابراین، تراوایی یک ماده نافذ به هر دو میزان نفوذ و حلالیت آن بستگی دارد، و این خواص را می‌توان به طور سامانمند از طریق انتخاب عاقلانه طراحی مولکولی و عوامل محیطی تغییر داد. برای ضریب حلالیت کامپوزیت‌ها رابطه (۳) ارائه شده است:

انحراف میدان الکتریکی می‌گردد که بر قطبیدگی موثر خواهد بود. هرچه میزان ناهمگنی بین اجزاء بیشتر باشد اتلاف دی‌الکتریک بیشتر خواهد بود. تجمع بارها در سطح مشترک می‌تواند رسانایی الکتریکی را نیز افزایش دهد.

خواص مکانیکی

ذرات گرافنی به دلیل سختی ذاتی بسیار بالاتر لاستیک‌ها (سازوکارهای هیدرودینامیکی)، برهمکنش مناسب با زمینه‌های لاستیکی در کنار سطح بسیار بالای آن (سازوکارهای لاستیک مقید) و همچنین به دلیل قابلیت تشکیل شبکه پرکننده در بارگذاری‌های کم (سازوکار شبکه پرکننده) توانایی بهبود اساسی در خواص مکانیکی سامانه‌های کامپوزیتی لاستیکی پر شده با آن‌ها را دارند [۱۱].

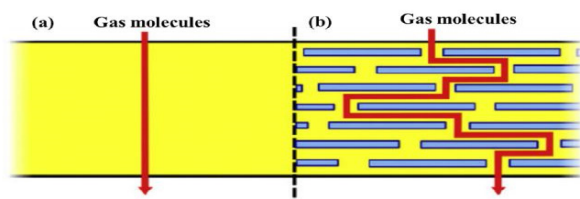
خواص حرارتی

هدایت حرارتی بالای ذرات گرافنی که ناشی از سازوکارهای ارتعاش شبکه در ساختار گرافن است در کنار برهمکنش مناسب گرافن با زمینه‌های لاستیکی و همچنین در حضور شبکه پرکننده باعث ایجاد رسانایی حرارتی قابل توجهی در کامپوزیت‌های لاستیکی حاصل می‌شود [۱۱].

سدگری در مقابل عبور گازها

یکی از مهم‌ترین کاربردهای نانوکامپوزیت‌های لاستیکی عبورناپذیری آن‌ها در برابر نشت مایعات و گازهای در تماس با آن‌ها است. از آنجاییکه مواد نرم و لاستیکی دارای حجم آزاد زیاد هستند، در نتیجه عبورناپذیری نامطلوب در برابر مایعات و گازها دارند. امروزه نانوکامپوزیت‌های لاستیکی به‌طور گسترده‌ای برای تولید مواد عبورناپذیر خوب استفاده می‌شوند. در میان انواع شکل‌های هندسی پرکننده، شکل صفحه‌ای در بهبود خواص سدگری نانوکامپوزیت‌های لاستیکی قابل‌قبول‌ترین است که نانوذرات گرافنی در این حیطة از جایگاه مطلوبی برخوردار است [۱۱].

تراوایی سیال در یک نانو کامپوزیت لاستیکی توسط



شکل ۷. طرح شماتیک نفوذ گاز از درون الف) لاستیک خالص و ب) چیدمان منظم لایه‌های گرافن به صورت افقی در یک آرایه موازی عمود بر جهت انتشار [۹].

بسیاری از عوامل بیماری‌زا ایجاد شده است. یکی از مهم‌ترین مشکلات، عفونت‌های گسترده در انسان به دلیل مقاومت چند دارویی^۱ در عوامل بیماری‌زا است. تاکنون بسیاری از عوامل ضد میکروبی، مانند نانوذرات فلزات، نانولوله‌های کربنی و نانوذرات اکسید فلزی، کشف و مورد استفاده واقع شده‌اند. در حال حاضر، گرافن نیز به عنوان یک عامل ضد میکروبی موثر و جدید با اثر مطلوب بر عوامل بیماری‌زای گیاهی، قارچ‌ها و باکتری‌ها در مراجع مطرح شده است [۱۰]. هو^۲ و همکاران کاغذهای مبتنی بر گرافن و گرافن اکساید آزاد ماکروسکوپی را سنتز کردند و مشاهده کردند که کاغذ به دست آمده با موفقیت رشد باکتری‌هایی مانند اشریشیا کلی^۳ را مهار کرد و سمیت سلولی پایینی از خود نشان داد. لایه‌های ضد میکروبی مبتنی بر گرافن را می‌توان به لایه‌های نانوکامپوزیت لاستیکی مانند تبدیل کرد تا استحکام مکانیکی و انعطاف‌پذیری بالایی را هم داشته باشد. با توجه به توانایی فوق‌العاده ضد میکروبی، انعطاف‌پذیری و ضد آب بودن، این فیلم‌ها توانایی زیادی در کاربرد بسته‌بندی‌های بهداشتی دارند. به دلیل چسبندگی و انعطاف‌پذیری قوی، پوشش‌های ضد میکروبی مبتنی بر خانواده نانو مواد گرافنی را می‌توان به طور گسترده بر روی سطح اجسام سخت استفاده کرد [۱۰]. در کنار موارد بالا، امروزه علاقه فزاینده‌ای هم به استفاده از گرافن و مشتقات آن در فرایندهای تحویل هوشمند دارو به دلیل خواص منحصر به فرد آن‌ها وجود دارد. مساحت سطح بسیار زیاد

$$S = S_0(1 - \varphi) \quad (3)$$

که در آن S_0 و φ به ترتیب نشان‌دهنده ضریب حلالیت نافذ در زمینه خالص لاستیکی خالص و کسر حجمی نانو پرکننده‌ها در زمینه لاستیکی هستند. در فیلم نانوکامپوزیتی پر شده با نانوذرات گرافن ذرات به عنوان موانع غیر قابل نفوذ عمل می‌کنند و بنابراین گاز نافذ مسیر پرپیچ‌وخمی را بایستی دنبال کنند تا در ضخامت لایه پخش شوند. این امر مسیر مؤثر انتشار گاز را افزایش می‌دهد و در نتیجه ضریب نفوذ را کاهش می‌دهد. این ضریب نفوذ مؤثر (D) نانوکامپوزیت‌ها را می‌توان با معرفی مشخصه پیچشی (τ) با رابطه (۴) بیان کرد:

$$D = \frac{D_0}{\tau} \quad (4)$$

که در آن D_0 ضریب نفوذ گاز نافذ در زمینه لاستیکی خالص است و همچنین مشخصه پیچشی (τ) به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$\tau = \frac{t_m}{t_m} \quad (5)$$

که t_m و t_m به ترتیب مسیر عبوری گاز نافذ در کوتاه‌ترین مسیر یعنی لاستیک خالص و بین مسیرهای پرپیچ‌وخم در حین عبور از ضخامت لایه نانوکامپوزیتی است. شکل ۷ یک مدل ساده کاهش نفوذپذیری گاز در اثر ایجاد مسیرهای پر پیچ و خم را برای یک آرایه مستطیلی و موازی از لایه‌های گرافن در جهت عمود بر مسیر تراوایی گاز را در مقایسه با زمینه لاستیکی خالص نشان می‌دهد [۹].

خواص بهداشتی و پزشکی

نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن امروزه به عنوان یک ماده ضد میکروبی در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها و سایر داروها مورد استفاده قرار می‌گیرد. طی چند دهه اخیر، به دلیل استفاده بیش از حد از آنتی‌بیوتیک‌ها (مانند کلرامفنیکل، فلوروکینولون‌ها، تری‌متوپریم، بتالاکتام و کارباپنم)، مقاومت به دارو در

1. MDR

3. E. coli

2. Hou

ادغام گرافن در زمینه‌های پلیمری از جمله لاستیک‌ها در کنار بهبود خواص سدگری و خواص ترمومکانیکی، تا حد زیادی خواص ضدباکتریایی را نیز می‌توانند داشته باشند. یکی از نمونه‌های موفق در این دسته کامپوزیت پلی لاکتیک‌اسید پرشده با گرافن است که می‌تواند در کاربردهای بهداشتی به‌ویژه در بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا نمونه‌های متعدد دیگری مانند فیلم‌های پلی‌وینیل الکل / گرافن‌اکساید و نانو کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن / پلی‌وینیل‌استات / گرافن نیز موجود و گزارش شده است [۱۰].

کاربردهای کامپوزیت‌های لاستیکی ساخته‌شده با گرافن

با توجه به خواص برجسته، گرافن برای طیف گسترده‌ای از کاربردها مورد بررسی قرار گرفته و توجهات دانشگاهی و صنعتی را به خود جلب کرده است [۹]. از جمله کاربردهای بالقوه گرافن می‌توان به ابرخازن‌ها، کامپوزیت‌های رسانا، کاتالیزور، نمایشگرهای صفحه تخت [۱۲]، ذخیره انرژی، مصارف پزشکی و زیست پزشکی [۴] اشاره کرد. در ادامه به بررسی هرچه بیشتر توانایی‌های گرافن و مشتقات آن در بهبود خواص نانو کامپوزیت‌های لاستیکی پرداخته خواهد شد.

کاربرد گرافن در بهبود رفتار مکانیکی و دینامیکی سامانه‌های لاستیکی

نبویان^۳ و رزاقی کاشانی^۴ [۱۳]، با تهیه آمیزه لاستیکی، لاستیک SBR حاوی ذرات هیبریدی سیلیکا - گرافن باعث بهبود فناوری تایر سبز شده‌اند، طبق شکل ۸ (الف) و (ب)، مدول ذخیره در کرنش‌های کم (G_0)، نشان دهنده شبکه پرکننده با درصد‌های مختلف است که با افزایش دامنه کرنش به دلیل شکسته شدن شبکه پرکننده و آزاد شدن لاستیک به دام افتاده، به عنوان اثر پین شناخته می‌شود که در آمیزه لاستیکی حاوی ذرات هیبریدی سیلیکا - گرافن در ۰٫۲۵ phr به طور قابل توجهی نسبت به آمیزه لاستیکی حاوی سیلیکا

(۲۶۰۰ مترمربع بر گرم)، ساختار مسطح، بیوکونژوگاسیون^۱ (هم‌یوگی زیستی) و بارگذاری مولکولی در گرافن هدف مذکور را به خوبی ممکن می‌سازد. تاکنون برای چندین کاربرد ترانوسستیک، گرافن و گرافن‌اکساید به‌عنوان یک نانو حامل جدید آزمایش شده‌اند، زیرا در کاربردهای ترانوسستیک^۲ مانند تحویل داروی معمولی، استفاده از آن‌ها می‌تواند مشکلات ناشی از هدف‌گیری غیراختصاصی و مقاومت چند دارویی را کاهش دهد. مطالعات، ثابت کرده‌اند که گرافن‌اکساید برای انتشار هدفمند داروهای ضد سرطان، آنالوگ کمپتوتسین SN-38، و دوکسوروبیسین بسیار موثر است و پتانسیل زیادی برای درمان سرطان از جمله داروهای نامحلول نشان می‌دهد. در نتیجه، توسعه چندین نانو مواد مبتنی بر گرافن عامل‌دار، کارایی دارورسانی، زیست سازگاری و حلالیت را افزایش داده است [۱۰]. اخیراً یک سامانه پیشرفته حسگر زیستی مبتنی بر نانو مواد گرافنی که آنتی‌بادی‌های COVID-19 را در عرض چند ثانیه شناسایی می‌کند ساخته شده است. این حسگر زیستی شامل الکترودهای حاوی نانوذرات گرافن بوده و از طریق تثبیت آنتی‌ژن‌های ویروس روی نانوذره‌های گرافن ساخته شده است [۱۱].

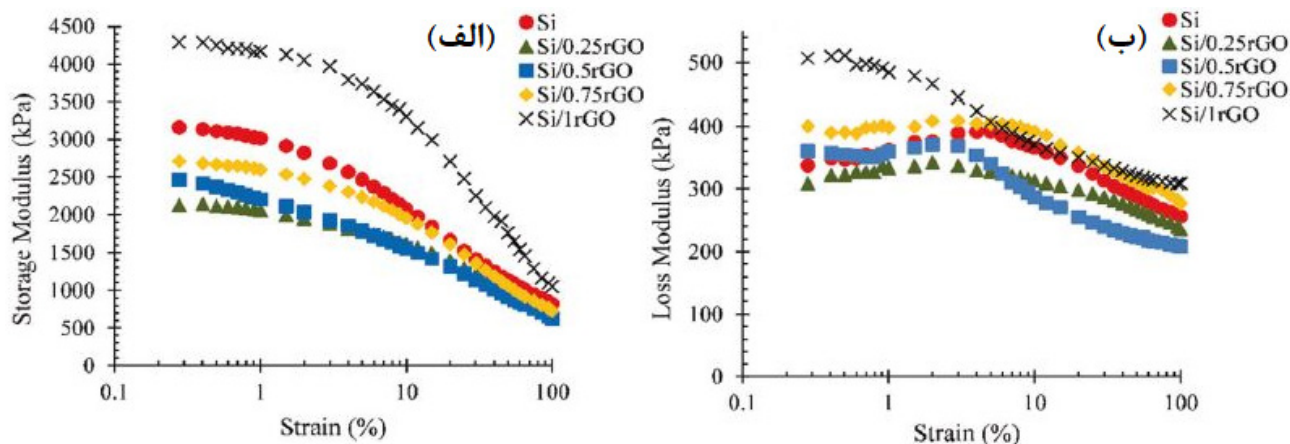
همچنین مواد مبتنی بر گرافن به دلیل خواص فیزیکی و ضدباکتریایی کاربردهای بالقوه‌ای در مدیریت بهبود زخم دارند، مانند مرطوب نگه‌داشتن محیط سطحی زخم، تسریع بسته‌شدن زخم، به حداقل رساندن عفونت‌ها و تحریک بهبود مناسب زخم بدون ایجاد اثر زخم، است. نحوه ترکیب مواد گرافن با زیر لایه‌های بانداژ باعث ایجاد یک تغییر برجسته در موفقیت نهایی کامپوزیت‌های منسوج بر پایه گرافن ضد میکروبی می‌شود. اخیراً، محققان از گرافن برای بهبود کارایی بازدارندگی باکتریایی نور-گرمایی در لکه‌های پوستی پلیمری استفاده کردند که موفقیت‌های مطلوبی را به دنبال داشت [۱۰].

1. Bio-conjugation

3. Nabavian

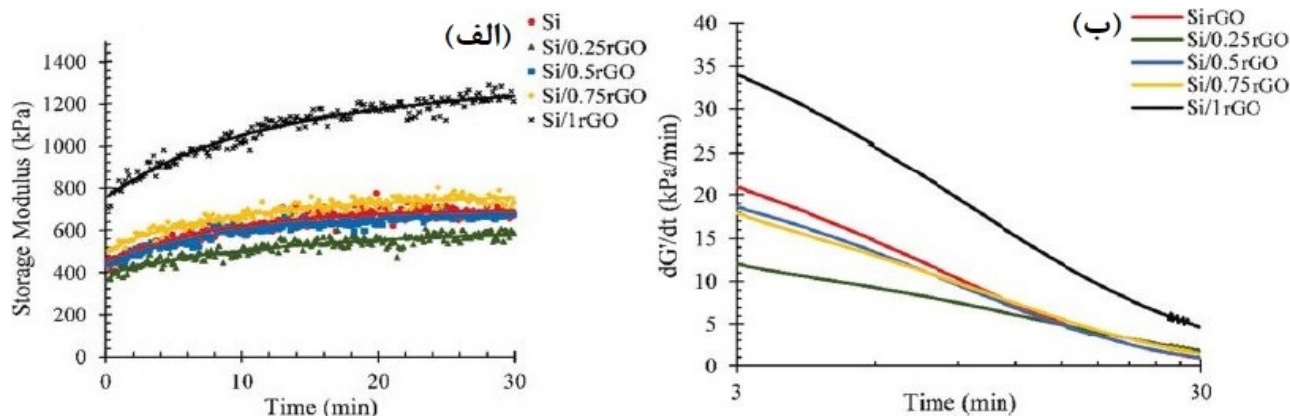
2. علم کاربرد نانوسامانه‌ها در درمان هدفمند و تصویربرداری همزمان در بیماری‌ها.

4. Razzaghi-kashani



شکل ۸. (الف) وابستگی کرنش به مدول ذخیره (ب) وابستگی کرنش به مدول اتلافی گرافن در SBR پر شده از Si/xrGO پس از

ولکانیزاسیون [۱۳].



شکل ۹. (الف) بررسی انباشتگی (ب) بررسی نرخ انباشتگی SBR پر از Si/xrGO [۱۳].

گرمای تولید شده در طول تغییر شکل دینامیکی عمدتاً ناشی از اتلاف انرژی در ترکیب است. همانطور که قبلاً ذکر شد، اثر پین در اتلاف انرژی به دلیل شکستن و اصلاح شبکه پرکننده در طول تغییر شکل دینامیکی نقش دارد. همانطور که در شکل ۱۰ (الف) نشان داده شده است، افزایش دما در طول آزمایش سبب افزایش گرمای تولیدی آمیزه لاستیکی حاوی سیلیکا، شده است این در حالی است که با ۱۱ افزودن گرافن در ۰٫۲۵، ۰٫۵ و ۰٫۷۵ phr کاهش یافته است، این نتیجه با نتایج آزمایش‌های اثر پین و مدول اتلاف نشان داده شده در شکل ۸ مطابقت دارد [۱۳].

کاهش می‌یابد؛ به‌ویژه پس از ولکانیزاسیون، نشان داده شده است که شبکه سیلیکا تحت کرنش دینامیکی به شدت ضعیف شده است.

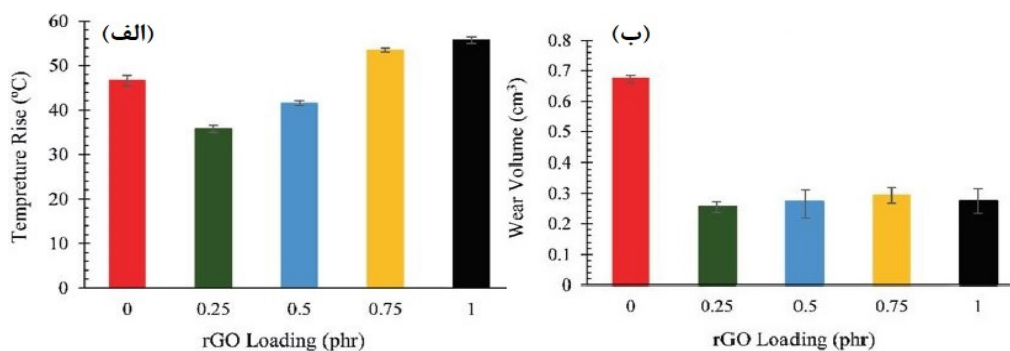
شکل ۹ (الف) و (ب) به ترتیب انباشتگی و نرخ انباشتگی آمیزه‌های لاستیکی در ترکیب درصدهای مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش ناگهانی ΔG_0 با افزودن ۱ phr گرافن به دلیل تشکیل شبکه گرافن در ترکیب پر از سیلیکا یا شبکه فشرده‌تر سیلیکا در حضور گرافن مشاهده می‌شود. همانطور که در این شکل ۹ (ب) مشاهده می‌شود، سرعت انباشتگی با افزودن ۰٫۲۵، ۰٫۵ و ۰٫۷۵ phr گرافن کاهش می‌یابد [۱۳].

غلظت کم گرافن، بهبود پراکندگی منجر به افزایش مدول یانگ شده است. با این حال، افزودن ۱ phr گرافن به ترکیب پر شده با سیلیکا، یک شبکه پرکننده قوی با مقدار زیادی لاستیک به دام افتاده در ساختار پرکننده هیبریدی تشکیل می‌دهد که مدول یانگ را افزایش می‌دهد [۱۳].

همچنین پناهی‌سرمدا^۲ و رزاقی‌کاشانی [۱۴]، با بررسی خواص مکانیکی آمیزه‌های حاوی اکسید گرافن و گرافن (احیا حرارتی در دماهای ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰) بهبود چشمگیری در مدول و استحکام کششی گرافن نسبت به اکسید گرافن مشاهده شده است.

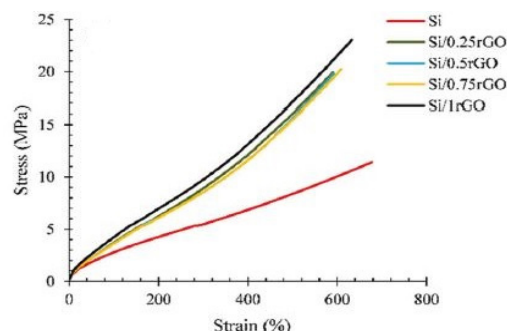
سایش لاستیک به طور مستقیم به کیفیت پراکندگی پرکننده و برهمکنش پرکننده - لاستیک بستگی دارد. همانطور که در شکل ۱۰ (ب) ارائه شده است، حجم ساییده شده ترکیب Si/0.25rGO نسبت به آمیزه لاستیکی حاوی سیلیکا کاهش یافته است که بهبود قابل توجهی در مقاومت سایشی لاستیک است، کاهش اتلاف سایشی آمیزه‌های حاوی ۰.۲۵ phr و ۰.۵ را می‌توان به بهبود پراکندگی سیلیکا و خواص مکانیکی نسبت داد [۱۳].

در نهایت شکل ۱۱ نشان می‌دهد که مدول یانگ^۱ آمیزه لاستیکی پرکننده هیبریدی نسبت به ترکیب مرجع افزایش می‌دهد. افزایش مدول در کرنش کم آمیزه لاستیکی را می‌توان به پراکندگی بهبود یافته و توزیع یکنواخت کلوخه‌ها نسبت داد، همچنین علیرغم افزایش استحکام کششی، ازدیاد طول در هنگام شکست ترکیبات با افزودن گرافن به طور قابل توجهی کاهش نمی‌یابد، که نشانه بزرگی از تقویت آمیزه لاستیکی است. لازم به ذکر است که در آمیزه لاستیکی حاوی



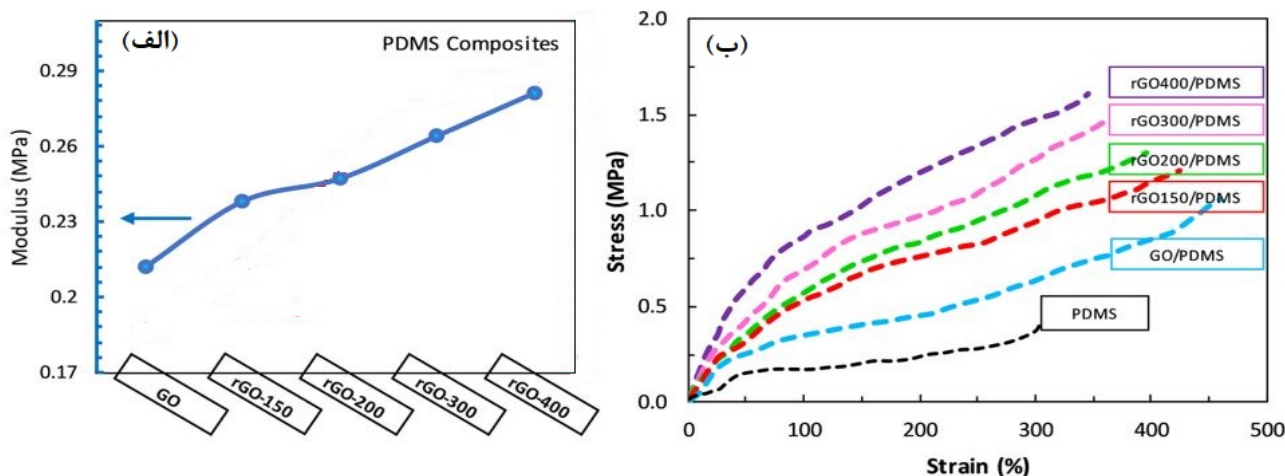
شکل ۱۰. وابستگی (الف) گرما آزاد شده، (ب) حجم اتلافی سایش، به محتوای rGO در آمیزه پر از سیلیکا [۱۳].

شکل ۱۱. بررسی رفتار مکانیکی ترکیبات پر از Si/xrGO [۱۳].



1. Young modulus

2. Panahi-sarmad



شکل ۱۲. (الف) مدول کامپوزیت‌های حاوی GO و rGO-x. (ب) پاسخ‌های تنش - کرنش کششی کامپوزیت‌های PDMS حاوی ۵، ۰.۵ حجمی GO [۱۴].

نانوکامپوزیت‌های ناتراوا

امروزه گرافن و مشتقات آن به‌عنوان مناسب‌ترین پرکننده نانومقیاس در کاربردهای سدگری در برابر گاز در فیلم‌های پلیمری در نظر گرفته شده‌اند. در طی بیست سال گذشته پلیمرها با توجه به عملکرد بالا، سبکی وزن، سهولت فراورش و کم‌هزینه بودن، در کاربردهای بسته‌بندی مورد توجه قرار گرفته‌اند. پلیمرهای متداول در بسته‌بندی مواد غذایی عبارت‌اند از: پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌استایرن، پلی‌وینیل کلراید و پلی‌اتیلن ترفتالات. با این حال، در کاربرد مواد لاستیکی در صنایع مختلف نیز سدگری بسیار حائز اهمیت است. عملکرد سدگری در مقابل گاز در نانوکامپوزیت‌ها به طور عمده با سه عامل تعیین می‌شود:

- خاصیت پرکننده (مقاومت در برابر انتشار گاز، نسبت ابعاد و کسر حجمی)
- خاصیت سدگری ذاتی ماتریس لاستیکی
- کیفیت پراکنش پرکننده
- بر همکنش پلیمر - پرکننده

در بین نانو پرکننده‌ها، ذرات خاک رس به دلیل هندسه صفحه‌ای و سازگاری با لاستیکی مختلف، برای کاربردهای

فیلم ناتراوا به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹]. با این حال، لایه‌های نانورس آب‌دوست به دلیل نیروهای واندروالسی و قطبی قوی، به راحتی کلوخه می‌شوند. در نتیجه، چنین تجمعی باعث کاهش خصوصیات سدگری می‌شود. در مقایسه با رس‌ها، گرافن نه تنها خاصیت سدگری در برابر گازها را افزایش می‌دهد بلکه مقاومت مکانیکی، رسانایی الکتریکی و خصوصیات حرارتی را نیز در صورت پراکنده شدن در زمینه‌های لاستیکی بهبود می‌بخشد. به‌تازگی کامپتون^۱ و همکاران گزارش کرده است که خواص سدگری نانوذرات گرافن ۲۵-۱۳۰ برابر بیشتر از ذرات نانو پرکننده خاک رس در غلظت‌های پایین است. ذرات گرافنی به خوبی در زمینه‌های لاستیکی پراکنده می‌شوند که در نتیجه خواص سدگری در برابر گاز را در کامپوزیت‌های لاستیکی به حداکثر می‌رسانند. نانوکامپوزیت‌های پر شده با گرافن بدون نقص حتی در برابر هلیوم، آب و پروتون، غیرقابل نفوذ هستند [۹]. یکی از چالش‌های مهم در صنعت تایر، ویژگی‌های سدگری لایه داخلی آن است که علاوه بر کنترل فشار باد داخل تایر باعث بهبود خواص دیگر تایر نظیر مقاومت در برابر چرخش لاستیک و سایش دیواره جانبی می‌شود. اخیراً، رائف^۲ و

1. compton

2. Raef

۱۳ آورده شده است.

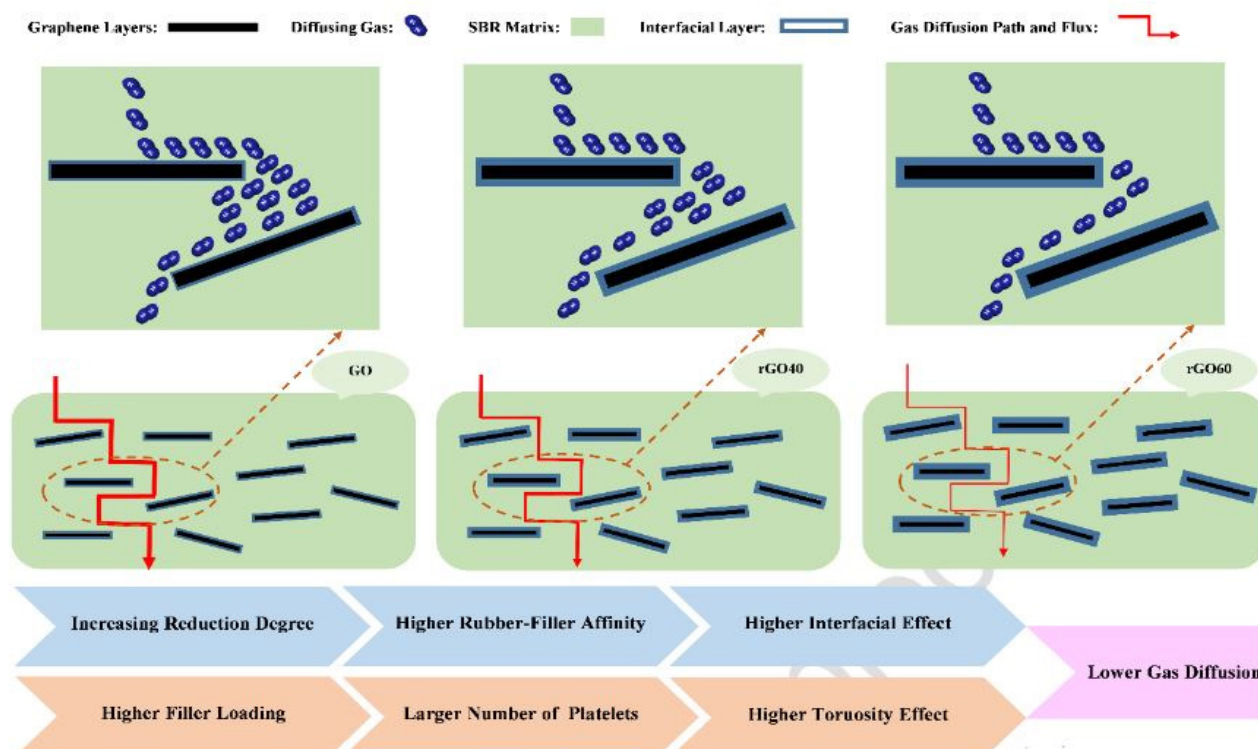
محرك‌های دی‌الکتریک

امروزه، سامانه‌های هیدرولیک، پنوماتیک و الکترومکانیکی به دلیل کاربردهایشان در محرك‌ها مورد توجه هستند [۱۶]. در این میان، محرك‌های لاستیکی دی‌الکتریکی^۱ (DEA) تحت زیر مجموعه پلیمرهای فعال الکتتریکی^۲ (EAPs) به دلیل کاربردهای بالقوه بسیار، مانند عضلات مصنوعی و ژنراتورهای لاستیکی دی‌الکتریک جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. محرك‌های لاستیکی دی‌الکتریک توانایی تبدیل انرژی الکتتریکی به انرژی مکانیکی را در قالب تغییر شکل دارند [۱۷]. محرك‌های لاستیکی دی‌الکتریک دارای خصوصیات منحصر به فردی نظیر انعطاف ذاتی بالا، وزن حجمی کم و خروجی بالای انرژی مکانیکی هستند. بنابراین، لاستیک‌های دی‌الکتریک پتانسیل زیادی برای تبدیل شدن به یک جایگزین مناسب برای محرك‌های فعلی موجود دارند. در ساده‌ترین هندسه ممکن، محرك لاستیکی دی‌الکتریک از یک لایه لاستیکی تشکیل شده است که بین دو الکترود بسیار نازک و انعطاف‌پذیر در ساختاری خازن مانند قرار گرفته است [۱۶]. یکی از عوامل تحریک در محرك‌های لاستیکی نیروی جاذبه‌ی کلمبی است. هنگامی که خازن تحت میدان الکتتریکی قرار می‌گیرد نیروی جاذبه بین بارهای ناهمنام موجود روی صفحات الکترود سبب فشردگی لایه دی‌الکتریک در جهت اعمال میدان الکتتریکی می‌شود و ضخامت نمونه را کاهش می‌دهند. چون یک لاستیک نسبت مدول توده‌ای به مدول برشی آن خیلی بزرگتر از یک است، پس یک ماده تراکم‌ناپذیر و دارای حجم ثابت است و در اثر کاهش ضخامت باید سطح آن افزایش یابد تا حجم ثابتی داشته باشد و جهت افزایش سطح عمود بر میدان اعمالی است. میزان تنش ایجاد شده در ماده را می‌توان با فرضیات ماکسولی به دست آورد. از این رو، تنش به اصطلاح ماکسولی که در اثر اعمال ولتاژ

رزاقی‌کاشانی [۱۵] نشان دادند که نانوذرات گرافن‌اکساید و گرافن به عنوان یک پرکننده تقویت‌کننده به طور موثری می‌تواند این مشکل را برطرف کند. همانطور که قبلاً هم گفته شد نانوذرات گرافن‌اکساید به دلیل هندسه صفحه‌ای و نسبت سطح منظر بالا، مسیرهای پرپیچ و خمی را در برابر حرکت مولکول‌های گاز ایجاد می‌کند و سبب طولانی‌تر شدن مسیر عبور گازها می‌شود. با این حال، محققان فوق نشان دادند وجود گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار در سطح نانوذرات گرافن‌اکساید منجر به ناسازگاری لاستیک‌های معمول هیدروکربنی غیرقطبی با نانوذرات گرافن‌اکساید می‌شود. که این مساله در سطح پراکنش یکسان از ذرات سبب تراوایی بیشتر گاز در حضور نانوذرات گرافن‌اکساید می‌شود. آن‌ها در ادامه نشان دادند با احیای سطح گرافن‌اکساید و همچنین افزایش درجه احیا، در سطح پراکنشی برابر از ذرات، تراوایی گاز به شدت پایین‌تر از کامپوزیت‌های حاوی ذرات گرافن‌اکساید می‌شود. آن‌ها علت این پدیده را افزایش چسبندگی در فصل مشترک پلیمر-پرکننده و ایجاد مقدار بالاتری از لاستیک مقید اطراف ذرات با حجم آزاد کمتر از لاستیک توده ذکر کردند. بدین ترتیب افزایش لاستیک مقید در سامانه و به دنبال آن کاهش موثر حجم آزاد سامانه تراوایی مولکول‌های گاز را به محدودیت جدی روبرو می‌نماید. علاوه بر این، مشخصه حلالیت یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار ترمودینامیکی در سازوکار نفوذ گاز است که به صورت خطی به مقدار پرکننده به‌عنوان فاز نامحلول گاز بستگی دارد. همچنین، مشخصه حلالیت ممکن است برای برخی از گازهای قطبی مانند CO₂ و O₂ با تنظیم گروه‌های اکسیژن سطحی گرافن مهندسی شود. بنابراین چسبندگی فصل مشترک، ناحیه بین فازی، حجم آزاد و همچنین کسر حجمی پرکننده و حالت پراکندگی آن را می‌توان به‌عنوان مشخصه‌های اصلی نفوذ گاز در کامپوزیت‌های لاستیکی بیان کرد [۱۵]. طرح‌واره گرافیکی فرضیه این محققان در شکل

1. Dielectric Elastomer Actuators

2. Electro-active Polymers



شکل ۱۳. سازوکار پیشنهادی برای نفوذپذیری گاز از طریق نانوکامپوزیت‌های لاستیکی پر شده با گرافن با درصد‌های مختلف احیا [۱۵].

و کارایی بیشتر نمی‌توان از نرم‌کننده‌ها استفاده کرد. هنگامی که یک خازن تحت تاثیر یک میدان الکتریکی قرار می‌گیرد بخشی از جریان را در خود تلف می‌کند و بخشی از آن را به صورت انرژی در خود ذخیره می‌کند که این انرژی ذخیره قابلیت تبدیل به انرژی مکانیکی را دارد و بخش اتلافی آن صرف سازوکارهای اتلافی می‌شود. بنابراین ایده‌آل‌ترین حالت برای محرک‌های لاستیکی بیشینه ذخیره انرژی الکتریکی و کمینه اتلاف آن است. از طرف دیگر برای اعمال ولتاژ بالاتر نیازمند استحکام دی‌الکتریک بالاتر سامانه هستیم. در این راستا بایستی توجه داشت که مدول مکانیکی پایین‌تر و اتلاف مکانیکی کمتر همچنین سبب افزایش بازده تبدیل انرژی الکتریکی به کرنش تحریک می‌شوند. لذا، طبق قانون ماکسول، راه معقول برای افزایش کرنش تحریک سامانه فوق ذکر این است که نسبت ضریب گذردهی دی‌الکتریک به

الکتریکی بر دو سطح لایه محرک اعمال می‌شود، منجر به انقباض لایه در جهت ضخامت و انبساط در جهات طولی و عرضی می‌شود. با توجه به قانون ماکسول به واسطه سه عامل می‌توان میزان کرنش محرک لاستیکی دی‌الکتریک را افزایش داد:

- افزایش ولتاژ عملیاتی: که این کار را تا حدی می‌توان انجام داد؛ چون باعث شکست الکتریکی ماده می‌شود.
- افزایش ضریب دی‌الکتریک سامانه: ولی افزایش ضریب دی‌الکتریک ماده به‌سادگی قابل انجام نیست؛ چون عواملی نظیر پخش ذرات در کامپوزیت‌ها در آن دخیل است و اکثراً باعث افزایش مدول و کاهش استحکام الکتریکی می‌شود.
- کاهش مدول سامانه: ولی در بعضی از محرک‌ها و ژنراتورها نمی‌توان این کار را انجام داد و به‌منظور افزایش عمر

لاستیکی و نانو صفحات گرافن دستکاری کرد چرا که سطح ذرات گرافن اکساید برای ساخت محرک‌های دی‌الکتريک مناسب نیستند. بنابراین، به منظور بهینه‌سازی خواص نهایی کامپوزیت‌های محرک دی‌الکتريک، باید تعادلی بین رسانایی ذاتی نانوصفات گرافن اکساید و ویژگی‌های سطحی گرافن اکساید/زمینه لاستیکی به دست آید [۱۴].

پناهی سرمد و رزاقی کاشانی [۱۶]، نشان دادند که هدایت الکتریکی گرافن به خصوص در دماهای بالای احیا بسایر بیشتر از گرافن اکساید بوده است گذردهی دی‌الکتريک برای کامپوزیت حاوی ۰.۲۵٪ پرکننده در شکل ۱۳ ب نشان داده شده است، اگرچه مستقل از فرکانس است، اما با میزان کاهش حرارتی افزایش می‌یابد. تغییر اتلاف دی‌الکتريک به فرکانس با کاهش دمای rGO به دلیل قطبیت سطحی افزایش می‌یابد که وابستگی فرکانس هدایت رسانایی، گذردهی دی‌الکتريک و اتلاف به طور جامع تأثیر الکتریکی شیمی سطح GO را بر روی سایت‌های کامپوزیت‌های لاستیک حاصل تعریف می‌کند.

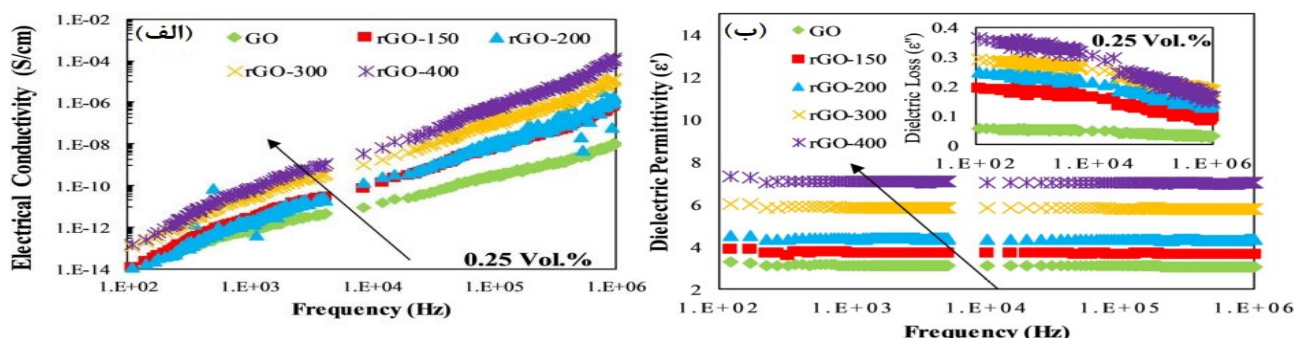
محرک‌های حافظه شکلی و ژنراتورهای لاستیکی دی‌الکتريک

در سال‌های اخیر، محرک‌های حافظه شکلی منعطف و کشش‌پذیر و ژنراتورهای الاستومری دی‌الکتريک (DEGs) با عملکرد مؤثر برای بسیاری از کاربردها مانند روباتیک، تولید برق از حرکت انسان و ماهیچه مصنوعی به طرز چشمگیری مورد توجه واقع شده‌اند. لاستیک‌های حافظه شکلی توانایی حفظ یک‌شکل به صورت موقت و بازیابی شکل دائمی خود را در حضور یک محرک خارجی مانند گرما، برق، pH، میدان مغناطیسی و نور دارند. علاوه بر این، ژنراتورهای لاستیکی دی‌الکتريک می‌توانند قادر به برداشت انرژی الکتریکی از کار مکانیکی باشند؛ بنابراین، پیدایش مواد الکترونیکی مذکور مورد استفاده برای تولید برق نیاز به مواد نرم و دارای خواص

مدول کشسانی، که به عنوان حساسیت الکترومکانیکی تعریف می‌شود افزایش یابد [۱۶]. از این رو، افزایش ثابت دی‌الکتريک و کاهش مدول کشسانی سامانه لاستیکی می‌تواند کرنش تحریک را افزایش دهد. به طور کلی، دو رویکرد اصلی برای افزایش ثابت دی‌الکتريک در کامپوزیت‌های لاستیکی تاکنون استفاده شده است [۱۷]:

- افزودن پرکننده‌های سرامیکی با ثابت دی‌الکتريک بالا
 - افزودن پرکننده‌های رسانای الکتریکی
- در حالی که رویکرد اول با چندین چالش مهم مانند نیاز به بارگذاری‌های بالا از پرکننده‌ها (برای افزایش کارآمد ثابت دی‌الکتريک)، افزایش خیلی زیاد مدول کشسانی و همچنین فراورش سخت مواجه است، روش دوم به طور چشمگیری افزایش ثابت دی‌الکتريک سامانه لاستیکی را در بارگذاری‌های پایین ممکن می‌سازد. نشان داده شده است، پرکننده‌های رسانای الکتریکی می‌توانند ثابت دی-الکتريک سامانه‌های لاستیکی را به میزان بیشتری نسبت به سرامیک‌ها، به ویژه در بارگذاری‌های نزدیک به آستانه نفوذشان، افزایش دهند. علاوه بر این، بارگذاری‌های لازم کمتر این نانو پرکننده‌ها خواص خوب دیگری مانند مدول کشسان کم، انعطاف‌پذیری مکانیکی خوب و فراورش آسان را ممکن می‌سازد که برای بهبود کرنش تحریک مطلوب است [۱۷].

اخیراً گرافن و اکسید گرافن در زمینه محرک‌های لاستیکی دی‌الکتريک مورد توجه قرار گرفته‌اند. زیرا گرافن از رسانایی برجسته، تحرک الکترون و سطح ویژه بالا بهره می‌برد. ضریب گذردهی دی‌الکتريک، مدول کشسانی و تلفات دی‌الکتريکی و مکانیکی به طور اجتناب‌ناپذیری با تعیین ویژگی‌های سطح و پراکندگی گرافن ارتباط دارند. شیمی سطح نانو صفحات گرافن را می‌توان با عامل‌دار کردن برای به حداقل رساندن اثرات اتلاف و ایجاد برهمکنش‌های قوی بین زمینه



شکل ۱۴. الف) هدایت الکتریکی و (ب) گذردهی دی الکتریک و اتلاف دی الکتریک کامپوزیت‌های حاوی ۰.۲۵٪ حجمی GO و rGOs [۱۶].

ایجاد ساختارهای پیشرفته پوسته-هسته به‌عنوان رویکردهای مفید در ساخت این کامپوزیت‌های لاستیکی معرفی شدند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مروری، توسعه سامانه‌های نانوکامپوزیتی مبتنی به گرافن مورد بحث قرار گرفته شد. نشان داده شد خواص منحصر به فرد گرافن به‌عنوان یک انقلاب بزرگ در زمینه علم مواد در دنیای امروز نسبت به دیگر مشتقات کربنی می‌تواند کاربردهای بالقوه مختلفی از جمله کامپوزیت‌های با کارایی مکانیکی و الکتریکی بالا، انواع حسگرهای پزشکی، ذخیره انرژی، بانداژ و پانسمان زخم، تحویل کنترل شده دارو و غیره را ارائه دهد. در این پژوهش روش سنتز گرافن و مهندسی سطح آن برای تغییر بر همکنش‌های پلیمر-پرکننده و پرکننده-پرکننده از طریق احیای سطح مورد بررسی قرار گرفت. سپس خواص فیزیکی، الکتریکی و مکانیکی گرافن مورد توجه قرار گرفت. در آخر کاربردهای گرافن در زمینه‌های مختلف صنعتی با در نظر گرفتن خواص آن به‌صورت هرچه بهتر تبیین شد.

سپاسگزاری IRM

منحصر به فرد مانند رفتار هایپرلاستیک، پایداری و دوام بالا دارد. از طرف دیگر، محرک‌های حافظه شکلی باید دارای توانایی عالی برای بازیابی باشند. که سامانه‌های لاستیکی در این موضوعات توانایی مطلوبی دارند. در این میان، برای بهبود عملکرد سامانه‌های لاستیکی پرکننده‌های مختلف مبتنی بر کربن، مانند دوده، نانولوله کربنی و گرافن، به‌عنوان نامزدهای مناسبی برای این منظور شناسایی شده‌اند. در بین همه پرکننده‌های مبتنی بر کربن ذکر شده، نانوذرات گرافن به دلیل ساختار خاص و خواص برجسته الکتریکی و مکانیکی ناشی از آن مورد استفاده گسترده قرار گرفته شده‌اند. با این حال، با در نظر گرفتن کاربرد نهایی، سطح بالایی از رسانایی در نانو صفحات گرافن لزوماً به‌عنوان یک مشخصه مفید در نظر گرفته نمی‌شود؛ زیرا افزایش رسانایی معمولاً منجر به افزایش شدید مشخصه‌های اتلاف و کاهش قدرت الکتریکی می‌شود. به‌عنوان مثال، در ژنراتورهای لاستیکی دی الکتریک، افزایش ضریب دی الکتریک نسبی و مقاومت الکتریکی برای افزایش توانایی در ذخیره انرژی الکتریکی مورد نیاز است. یکی دیگر از پارامترهای تعیین کننده پراکنش ذرات پرکننده، استحکام فصل مشترک پلیمر - پرکننده است، پراکنش یکنواخت ذرات بدون کلوخه‌گی و حفظ اتلاف دی الکتریک در پایین‌ترین سطح ممکن نقش اساسی در عملکرد این سامانه‌های لاستیکی هوشمند دارد. از این رو، اصلاح سطح پرکننده رسانا،

منابع

1. Bokobza, L., Mechanical and electrical properties of elastomer nanocomposites based on different carbon nanomaterials. *C*, 2017. 3(2): p. 10.
2. Sadasivuni, K.K., et al., Evolution from graphite to graphene elastomer composites. *Progress in Polymer Science*, 2014. 39(4): p. 749-780.
3. Khan, Z.U., A. Kausar, and H. Ullah, A review on composite papers of graphene oxide, carbon nanotube, polymer/GO, and polymer/CNT: Processing strategies, properties, and relevance. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2016. 55(6): p. 559-581.
4. Dasari, B.L., et al., Graphene and derivatives—Synthesis techniques, properties and their energy applications. *Energy*, 2017. 140: p. 766-778.
5. Sadroddini, M. and M. Razzaghi-Kashani, Electromechanical performance of polydimethylsiloxane containing reduced graphene oxide grafted by long-chain alkyl silane. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020. 31(21): p. 18844-18857.
6. Rout, D.R. and H.M. Jena, Removal of phenol from aqueous solution using reduced graphene oxide as adsorbent: isotherm, kinetic, and thermodynamic studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022. 29(21): p. 32105-32119.
7. Kumar, A., K. Sharma, and A.R. Dixit, A review on the mechanical properties of polymer composites reinforced by carbon nanotubes and graphene. *Carbon letters*, 2021. 31(2): p. 149-165.
8. Papageorgiou, D.G., I.A. Kinloch, and R.J. Young, Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 2017. 90: p. 75-127.
9. Cui, Y., S. Kundalwal, and S. Kumar, Gas barrier performance of graphene/polymer nanocomposites. *Carbon*, 2016. 98: p. 313-333.
10. Fatima, N., et al., Recent developments for antimicrobial applications of graphene-based polymeric composites: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2021. 100: p. 40-58.
11. Ali, M.A., et al., Sensing of COVID-19 antibodies in seconds via aerosol jet nanoprinted reduced-graphene-oxide-coated 3D electrodes. *Advanced Materials*, 2021. 33(7): p. 2006647.
12. Alazmi, A., et al., Comparative study of synthesis and reduction methods for graphene oxide. *Polyhedron*, 2016. 116: p. 153-161.
13. Kalat, M.N. and M. Razzaghi-Kashani, The role of reduced graphene oxide as a secondary filler in improving the performance of silica-filled styrene-butadiene rubber compounds. *Polymer Journal*, 2022. 54(3): p. 355-365.
14. Panahi-Sarmad, M., et al., Tuning the surface chemistry of graphene oxide for enhanced dielectric and actuated performance of silicone rubber composites. *ACS Applied Electronic Materials*, 2019. 1(2): p. 198-209.
15. Raef, M. and M. Razzaghi-Kashani, The role of interface in gas barrier properties of styrene butadiene rubber-reduced graphene oxide composites. *Polymer*, 2019. 182: p. 121816.
16. Panahi-Sarmad, M. and M. Razzaghi-Kashani, Actuation behavior of PDMS dielectric elastomer composites containing optimized graphene oxide. *Smart Materials and Structures*, 2018. 27(8): p. 085021.
17. Sadroddini, M. and M. Razzaghi-Kashani, Silica-decorated reduced graphene oxide (SiO₂@ rGO) as hybrid fillers for enhanced dielectric and actuation behavior of polydimethylsiloxane composites. *Smart Materials and Structures*, 2019. 29(1): p. 015028.
18. Bagoji, A.M. and S.T. Nandibewoor, Electrocatalytic redox behavior of graphene films towards acebutolol hydrochloride determination in real samples. *New Journal of Chemistry*, 2016. 40(4): p. 3763-3772.
19. Pareek, A., J. Shanthi Srajan, and S. Venkata Mohan, Graphene modified electrodes for bioelec-

tricity generation in mediator-less microbial fuel cell. *Journal of Materials Science*, 2019. 54(17): p. 11604-11617.

20. Rao, C., et al., Graphene, the new nanocarbon. *Journal of Materials Chemistry*, 2009. 19(17): p. 2457-2469.

IRM