http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

بهمن ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱۱ ص ص ۵۵-۶۳

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۲/۱/۵
تاریخ پذیرش ۹۲/۳/۲۱
ارائه در سایت ۹۲/۹/۳۰

ساخت و مشخصه‌سازی آزمایشی نانوکامپوزیت گرافن/پلی‌پروپیلن

محمود مهرداد شکریه[۱*]، وهاب احمدی جنیدی[۲]

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۲-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، shokrieh@iust.ac.ir

چکیده- نانوکامپوزیت گرافن/پلی‌پروپیلن، ماده نسبتاً جدیدی است که خواص مکانیکی آن هنوز به طور جدی مطالعه نشده است. برای رسیدن به خواص مطلوب نانوکامپوزیت گرافن/پلی‌پروپیلن، توزیع یکنواخت نانوصفحات گرافن درون پلی‌پروپیلن دارای اهمیت ویژه‌ای است. در این تحقیق برای غلبه بر مشکل توزیع نانوذرات درون زمینه پلیمری از روشی که توسط کالایتزیدو و همکارانش برای توزیع گرافیت‌های ورقه ورقه شده درمحیط پلی‌پروپیلن ابداع گردیده، ایده گرفته شده است. در این تحقیق پودر پلی‌پروپیلن توسط نانوگرافن پوشش‌دهی اولیه شده و سپس با انجام عملیات اختلاط ذوبی و تزریق پلاستیک، قطعه نانوکامپوزیت ساخته شده است. نانوکامپوزیت‌های گرافن/پلی‌پروپیلن با درصدهای وزنی ۰/۵، ۱ و ۲ گرافن، به این روش ساخته شده و خواص کششی و ضربه‌ای آنها مورد بررسی قرار گرفته است. افزایش مناسب مدول یانگ، تنش تسلیم و استحکام ضربه‌ای در درصدهای وزنی بسیار پایین گرافن بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پوشش‌دهی اولیه پلی‌پروپیلن، روش مناسبی برای ساخت نانوکامپوزیت گرافن/پلی‌پروپیلن است که توسط آن خواص زمینه پلی‌پروپیلن، افزایش مطلوبی از خود نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: نانوکامپوزیت، گرافن، پلی‌پروپیلن، خواص کششی، استحکام ضربه‌ای.

Manufacturing and experimental characterization of Graphene/Polypropylene nanocomposites

M. M. Shokrieh[1*], V. A. Joneidi[2]

1- Prof., School of Mech. Eng., Iran Univ. of Science and Tech., Tehran, Iran
2- MSc. Student, School of Mech. Eng., Iran Univ. of Science and Tech., Tehran, Iran
* P.O.B. 16846-13114 Tehran, Iran. shokrieh@iust.ac.ir

Abstract- Graphene/Polypropylene nanocomposite is a new material and limited research is performed on mechanical properties of such material. A random distribution of the nano particles in the matrix has a special importance in having proper mechanical properties for Graphene/Polypropylene nanocomposites. To have a uniform distribution of the nano graphene in the polypropylene, a method developed by Kalaitzidou et al. for distribution of exfoliated graphite in polypropylene is used in this research. In the current paper, Polypropylene is coated with graphene and then the nanocomposite specimens are made using melt-blending and injection molding. Polypropylene reinforced with 0.5, 1.0 and 2.0 wt% graphene sheets were prepared and their tensile and impact properties are investigated. Good enhancement of Young's modulus, yield stress and impact strength at very low graphene contents are achieved. The results indicate that the mentioned method is suitable for fabrication of graphene/polypropylene nanocomposites, which yields a proper enhancement of polypropylene properties.

Keywords: Nanocomposite, Graphene, Polypropylene, Tensile Properties, Impact Strength.

۱- مقدمه

ماده گرافن یک ساختار دو بعدی از یک لایه منفرد شبکه لانه زنبوری کربنی می‌باشد. گرافن به علت داشتن خواص فوق‌العاده در رسانایی الکتریکی و گرمایی، چگالی بالا و تحرک پذیری حامل‌های بار، رسانایی اپتیکی و خواص مکانیکی به ماده‌ای منحصر به فرد تبدیل شده است. وقتی مقادیر کمی از این صفحات نازک کربنی به‌طور مناسب با پلیمری ترکیب شوند، می‌توانند خواص فیزیکی پلیمر را به طرز قابل توجهی بهبود دهند. ترکیب خاص گرافن باعث شده تا خواص فیزیکی منحصر به فردی داشته باشد و لذا در ماتریس‌های پلیمری گوناگون، کلاس جدیدی از نانو کامپوزیت‌های پلیمری را ایجاد کرده است [۱-۳]. با تمام این خصوصیات بسیار عالی که حضور گرافن به زمینه پلیمری خود اضافه می‌کند، دست‌یابی به یک توزیع یکنواخت از نانوصفحات گرافن درون زمینه هنوز به عنوان یک موضوع تحقیق مطرح بوده و تلاش‌های فراوانی جهت توزیع مناسب این نانوذره درون زمینه پلیمری صورت پذیرفته است. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای حل مشکل توزیع گرافن ارائه شده است تا توسط آنها بتوان به توزیع مناسب درون زمینه پلیمری دست یافت. در میان پلاستیک‌های تجاری، پلی‌پروپیلن (PP) یکی از معروف‌ترین پلاستیک‌ها بوده وکاربردهای فراوانی در صنعت دارد. پلی‌پروپیلن یکی از سبک‌ترین ترموپلاستیک‌ها است و با توجه به استحکام به وزن (استحکام ویژه) بالایی که دارد، دارای صلبیت بیشتری نسبت به سایر پلی‌الفین‌ها می‌باشد. توانایی تحمل بارهای سبک برای مدت زمان‌های طولانی در محدوده وسیع دمایی یکی از خصوصیات با ارزش پلی‌پروپیلن در کاربردهای مهندسی می‌باشد. پلی‌پروپیلن دارای مقاومت حرارتی و مقاومت شیمیایی بالاتری نسبت به دیگر ترموپلاستیک‌های هم‌قیمت خود می‌باشد. همچنین پلی‌پروپیلن همانند دیگر پلی‌الفین‌ها دارای مقاومت بسیار بالایی در برابر آب و محلول‌های آبی است. پلی‌پروپیلن دارای مقاومت الکتریکی (در سطح و حجم) بسیار خوبی است و استحکام دی‌الکتریک آن بالاست. همچنین این پلاستیک دارای گستره وسیعی از نرخ سیلان مذاب می‌باشد و به سادگی بازیافت می‌شود. تقریباً کلیه فرایندهای تولید برای PP قابل کاربرد می‌باشند [۴]. در ارتباط با ساخت نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلی‌پروپیلن، روش‌های مختلفی وجود دارد، اما در میان این روش‌ها معمولاً از دو روش اختلاط ذوبی و روش حلال استفاده می‌شود. اساس این روش‌ها بر وارد کردن زنجیره‌های پلیمر به فضای بین لایه‌های گرافن استوار است. در روش استفاده از حلال، از یک حلال جهت حل شدن زمینه استفاده می‌شود و در مورد پلی‌پروپیلن نیازمند مقادیر زیاد حلال نظیر تولوئن یا اگزیلین بوده و همچنین دماهای بالایی در این روش مورد نیاز است، که نه کاربردی و نه ایمن است. در این روش فاصله بین لایه‌های نانوذره زیاد شده و به اصطلاح ورم می‌کند. سپس پلیمر در فضای بین لایه‌ها، جانشین مولکول‌های حلال می‌شود. پس از خارج کردن حلال، زنجیره‌های پلیمری در جای خود باقی می‌مانند و یک نانوکامپوزیت بین‌نشین ایجاد می‌شود. از این روش در ساخت نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری که نانوذرات منتج از گرافیت پرکننده آنها می‌باشد به طور گسترده استفاده شده است. از جمله این پلیمرها می‌توان به پلی‌کربنات [۵]، پلی‌آمیدها [۶]، پلی متیل متاکریلات [۷] اشاره نمود. لازم به ذکر است که در این روش ممکن است لایه‌ها دوباره روی هم بچسبند. پخش ذرات در کامپوزیت در این روش به طور قوی به چگونگی باز شدن ذرات قبل از ترکیب بستگی دارد.

در روش اختلاط ذوبی[۱]، پودر خشک پرکننده و پلیمر به صورت جامد به درون اکسترودر ریخته می‌شود. تحت شرایط برشی بالا، پلاستیک مذاب با پرکننده مخلوط شده و ذرات پرکننده درون زمینه پلیمری پخش می‌شوند. این روش برتری‌های مهمی نسبت به مورد پیشین دارد. نخست آن که به دلیل استفاده نکردن از حلال‌های شیمیایی از نظر زیست محیطی بی‌خطر است و دوم این که با فرایندهای ساخت صنعتی نظیر اکسترودر یا تزریق پلاستیک سازگارتر می‌باشد. در نهایت در این روش می‌توان از پلیمرهایی استفاده کرد که با روش پیشین امکان تولید نانوکامپوزیت از آنها وجود ندارد [۸]. اگرچه مطالعات نشان داده است که تا به امروز، پخش یکنواخت نانوذرات درون زمینه در این روش از روش حلال کمتر است [۹]. برای غلبه بر مشکل توزیع نانوذرات درون زمینه پلیمری، روشی توسط کالایتزیدو و همکارانش [۱۰] برای توزیع گرافیت‌های ورقه ورقه شده در محیط پلی‌پروپیلن ابداع شده است. در این تحقیق از این روش ساخت برای توزیع

1. Melt Mixing

نانوصفحات گرافن درون پلی‌پروپیلن استفاده شده است. بر اساس بهترین اطلاعات نگارنده این تحقیق، نانوکامپوزیت گرافن-پلی‌پروپیلن، نانوکامپوزیت جدیدی است که هنوز به‌طور جامع بررسی نشده است. بخصوص خواص ضربه‌ای این نانوکامپوزیت تاکنون گزارش نشده است. در این تحقیق از روش ارائه شده در [۱۰] برای توزیع نانوصفحات گرافن درون پلی‌پروپیلن استفاده شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مواد اولیه

در این تحقیق پودر هموپلیمر پلی‌پروپیلن ایزوتاکتیک با شاخص جریان مذاب برابر ۲۵ gr/۱۰ min خریداری شده از شرکت پتروشیمی اراک استفاده شده است. در این تحقیق از نانو صفحه گرافن برای تهیه نمونه‌های کامپوزیتی بهره گرفته شده که از مؤسسه اکس جی ساینس [1] ایالات متحده آمریکا، با ضخامت ۶-۸ میلی‌متر و چگالی ۲/۲ gr/cm^3 خریداری شده است.

۲-۲- آماده سازی گرافن پوشش‌دهی شده با گرافن

ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه توسط یک دستگاه انرژی‌دهی مافوق صوت با توان خروجی ۲۰۰ وات با دامنه موج ۵۰٪ و فرکانس ۱۲ کیلوهرتز و در حضور ایزوپروپیل الکل که یه یک الکل غیر حلال می‌باشد، لایه‌های گرافن از هم باز شده و در درون الکل پخش می‌شوند. سپس پودر پلی‌پروپیلن به مخلوط اضافه می‌شود. پس از اختلاط پودر پلی‌پروپیلن با گرافن، الکل توسط یک دستگاه تبخیرکننده چرخان جدا می‌شود. سپس مخلوط حاصل درون یک اجاق و در غیاب خلأ و تحت دمای ۱۱۰ $^\circ C$ خشک شده و در نتیجه پودر پلی‌پروپیلن پوشش‌دهی شده با گرافن حاصل می‌شود.

۲-۳- ساخت نانوکامپوزیت گرافن/ پلی‌پروپیلن

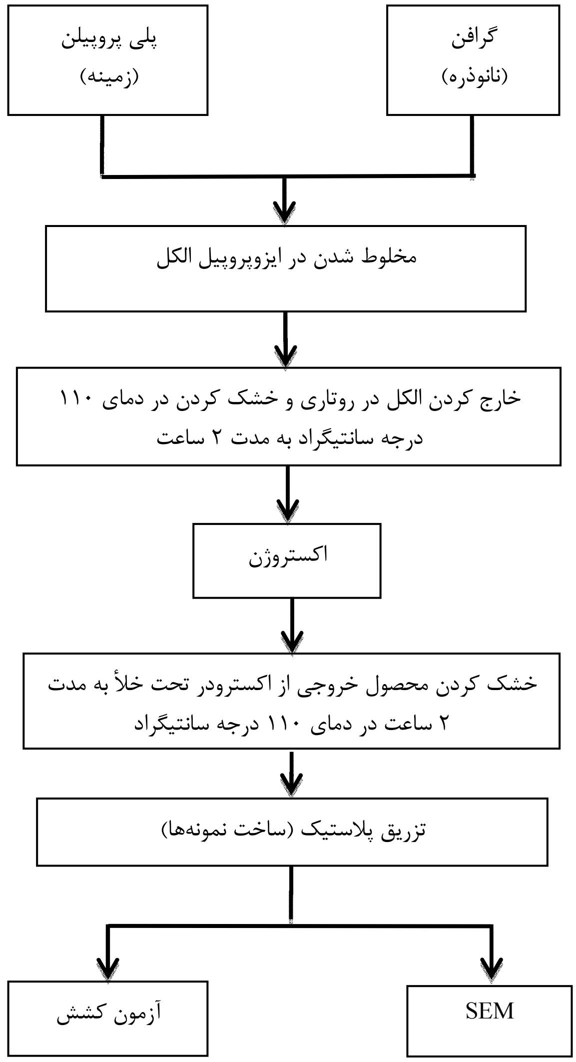
پلی‌پروپیلن پوشش‌دهی شده با گرافن را وارد یک دستگاه اکسترودر دو پیچه نموده تا تحت برش ناشی از سرعت چرخش ۲۵۰ rpm و دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، زنجیره‌های پلی‌پروپیلن در میان لایه‌های گرافن نفوذ کند. دما، زمان اقامت مواد و سرعت چرخش پیچ‌ها توسط سعی و خطا بدست آمده است. پس از خروج از اکسترودر، ماده حاصل وارد حمام آب سرد شده و سپس توسط خردکن پلاستیک، خرد گردید (شکل ۱). نانوکامپوزیت خرد شده به مدت ۲ ساعت و در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد تحت خلأ قرار گرفته و به طور کامل رطوبت‌گیری شد. سپس با استفاده از دستگاه تزریق پلاستیک نمونه‌های کشش و ضربه ساخته شد. نمونه‌ها برای سه درصد وزنی ۰/۵، ۱ و ۲ گرافن آماده شده و پس از ساخت، به مدت ۱۱ روز در دمای اتاق نگهداری شده‌اند. نمونه‌ها پس از برطرف نمودن زائده‌ها و سمباده‌زنی به ضخامت استاندارد رسیده و برای آزمایش کشش و ضربه آماده شدند. نمودار جریان آماده‌سازی نمونه نانوکامپوزیت در شکل ۲ و ترکیب درصد نمونه‌های آماده شده در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل و مشخصات هندسی نمونه‌های ضربه و کشش تولید شده در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود. همچنین تصویر نمونه‌های کشش و ضربه ساخته شده پلی‌پروپیلن و گرافن/پلی‌پروپیلن به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند.

شکل ۱ تصویر نانوکامپوزیت خرد شده

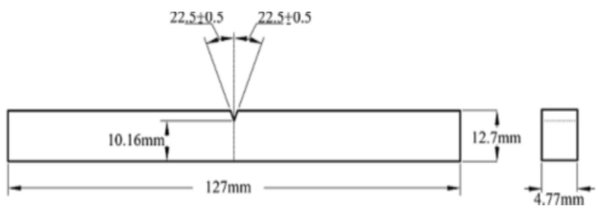
جدول ۱ ترکیب درصد نمونه‌های تهیه شده

نمونه	درصد وزنی پلی‌پروپیلن	درصد وزنی گرافن
PP	۱۰۰	۰
0.5%G/PP	۹۹/۵	۰/۵
1%G/PP	۹۹	۱
2%G/PP	۹۸	۲

1. XG Science



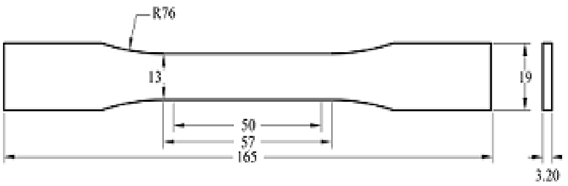
شکل ۲ نمودار جریان آماده‌سازی نمونه نانوکامپوزیت



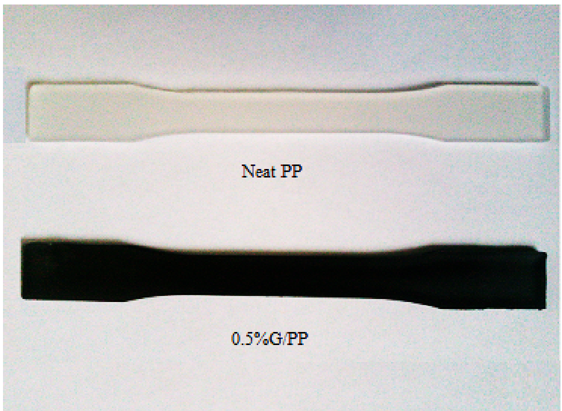
شکل ۳ ابعاد نمونه ضربه تولید شده توسط استاندارد ASTM D6110

۳- بررسی و تحلیل نتایج

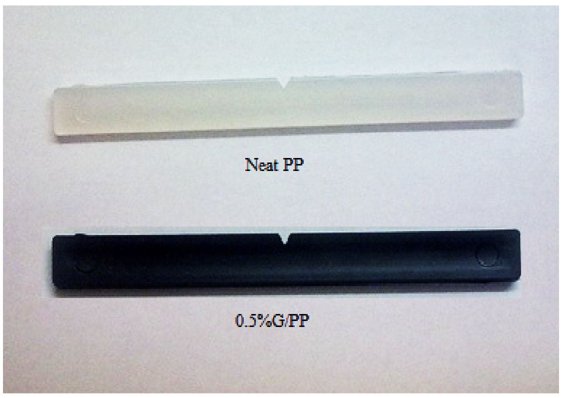
برای اندازه‌گیری سختی نانو کامپوزیت‌های تهیه شده، از دستگاه آزمایش یونیورسال سنتام-۱۵۰ استفاده گردیده است.



شکل ۴ ابعاد نمونه کشش تولید شده مطابق استاندارد ASTM D638 (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۵ تصویر نمونه کشش ساخته شده پلی‌پروپیلن خالص و نانوکامپوزیت گرافن/پلی‌پروپیلن



شکل ۶ تصویر نمونه ضربه ساخته شده پلی‌پروپیلن خالص و نانوکامپوزیت گرافن/پلی‌پروپیلن

سرعت بارگذاری نمونه‌های کشش، مطابق استاندارد ASTM D638، ۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گفته شده است. هر نتیجه گزارش شده، نتیجه انجام آزمایش بر روی پنج نمونه است. جابجایی توسط یک اکستنسومتر پنجاه میلی‌متر ساخت اینسترون[1] اندازه‌گیری شده است. آزمون ضربه چارپی مطابق با

1. INSTRON

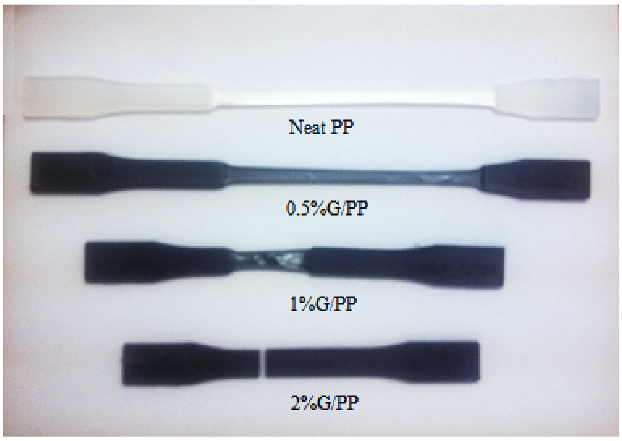
استاندارد ASTM D6110 و در دمای محیط انجام شده است.

برای بالا بردن دقت آزمایش از یک دستگاه ضربه 1J جهت انجام آزمایش ضربه استفاده شد و پنج نمونه از هر ترکیب مورد آزمایش قرار گرفته است. مطالعات انجام شده توسط محققان نشان می‌دهد که برای برخی از مواد، موقعیت قرارگیری ناچ بر روی نمونه و فاصله نقطه‌ای که مورد ضربه قرار می‌گیرد از آن، تأثیرات ملایمی روی مقاومت ضربه‌ای اندازه‌گیری شده دارد. از این رو در طراحی و ساخت نمونه‌ها باید دقت کافی به عمل آید تا از دقیق بودن اندازه‌ها و همسانی آن با شکل ۳ اطمینان حاصل شود.

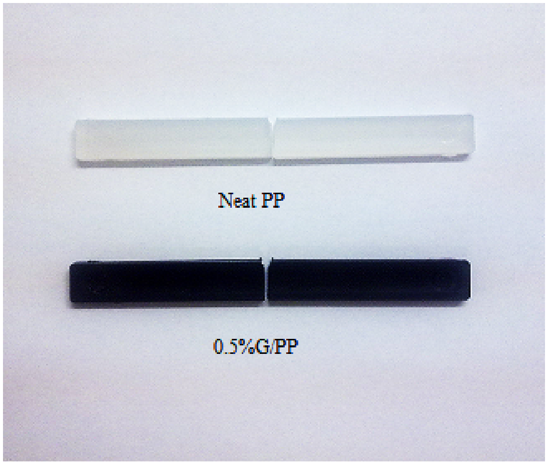
در عدد خوانده شده توسط دستگاه ضربه، باید اصلاحات مربوط به مقاومت هوا و اصطکاک لحاظ شود. به این صورت که ابتدا بدون قرار دادن نمونه در دستگاه آزمایش ضربه، آونگ را رها نموده و عدد نشان داده شده توسط دستگاه خوانده می‌شود. این عدد بیانگر مقاومت هوا و اصطکاک موجود در پین‌های آونگ می‌باشد. پس از هر آزمایش ضربه، این عدد را از عدد نشان داده شده کم نموده تا مقدار دقیق انرژی ضربه‌ای حاصل آید. برای انجام آزمایش ضربه باید از آونگ‌هایی استفاده شود که بیشتر از ۱۵ درصد انرژی تحویل داده شده به نمونه را بازیافت کنند. در غیر این صورت باید از آونگ‌های سنگین‌تری استفاده کرد. در این تحقیق از چکشی با انرژی ۱ ژول جهت انجام آزمون ضربه چارپی استفاده شده است.

تصویر نمونه‌های کشش در درصدهای وزنی مختلف پس از آزمایش کشش و ضربه به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که نمونه پلی‌پروپیلن خالص تحت شرایط بارگذاری بدلیل کشسانی بالا دچار شکست نشده و کمی پس از رسیدن به نقطه حداکثر استحکام نهایی، آزمایش متوقف شده است. نمودار تنش-کرنش پلی‌پروپیلن خالص و نانوکامپوزیت گرافن- پلی‌پروپیلن در درصدهای وزنی مختلف گرافن، در شکل ۹ نشان داده شده است.

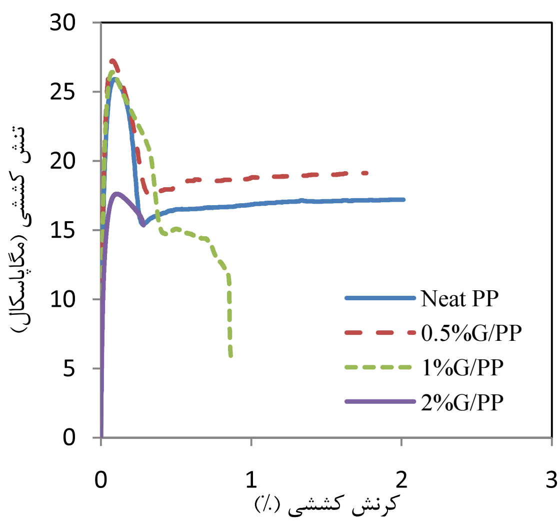
به منظور بررسی کیفیت پخش گرافن، تصاویر SEM از سطوح شکست ضربه چارپی برای نمونه‌ها با ۲ و ۰/۵ درصد وزنی گرافن ارائه شده است. این تصاویر در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. کلوخه‌های گرافن در نمونه با دو درصد وزنی گرافن به وضوح قابل مشاهده است.



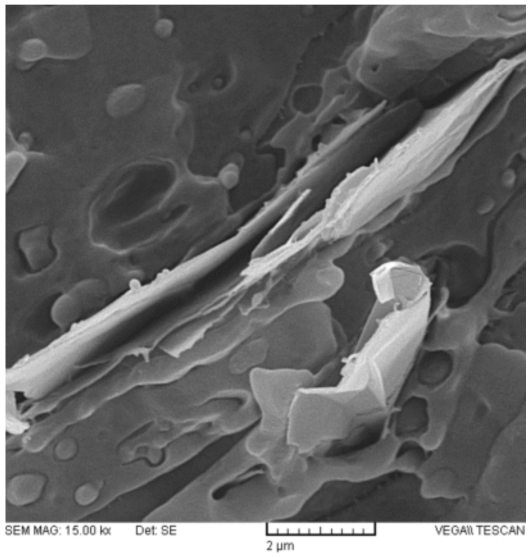
شکل ۷ تصویر نمونه‌های کشش در درصدهای وزنی مختلف پس از آزمایش کشش



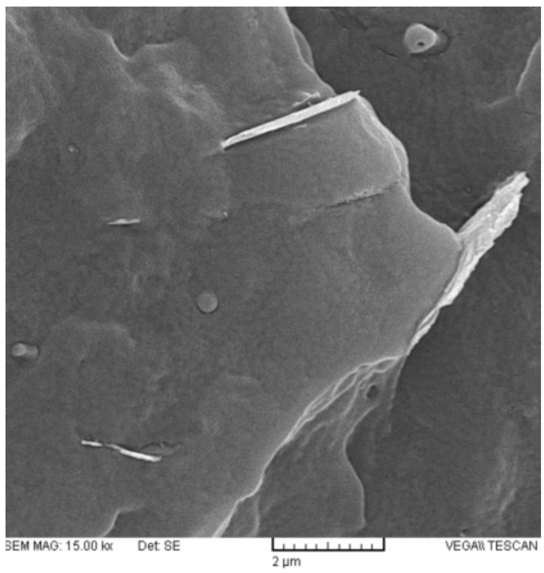
شکل ۸ تصویر نمونه‌های ضربه پلی‌پروپیلن خالص و نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی گرافن پس از آزمایش ضربه چارپی



شکل ۹ نمودار تنش-کرنش PP و G/PP در ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی گرافن



شکل ۱۰ تصویر SEM از سطح شکست ضربه چارپی برای نمونه با ۲ درصد وزنی گرافن



شکل ۱۱ تصویر SEM از سطح شکست ضربه چارپی برای نمونه با ۰/۵ درصد وزنی گرافن

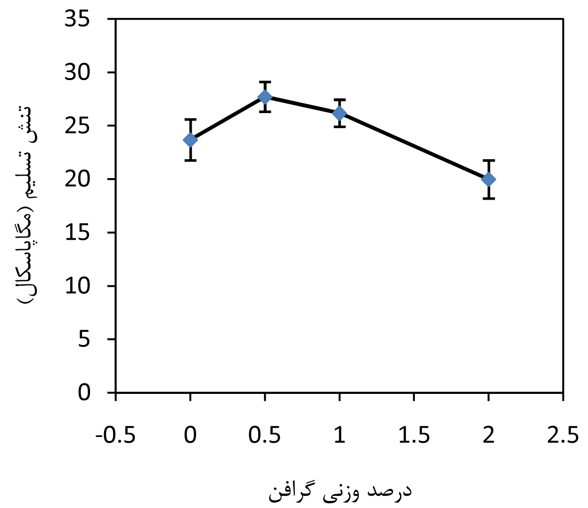
۳-۱- تنش تسلیم

همان طور که از شکل ۶ بر می‌آید، با اضافه کردن درصد وزنی گرافن به پلی‌پروپیلن، تنش تسلیم ابتدا زیاد شده و سپس کاهش می‌یابد. عامل افزایش اولیه استحکام، احتمالاً مقادیر کم گرافن‌های ورقه ورقه شده می‌باشد که بیشترین میزان افزایش در ۰/۵ درصد وزنی مشاهده شده است. علت این افزایش استحکام، اثرات تقویت‌کنندگی گرافن بوده که باعث تقویت زمینه خود شده و مسیر رشد ترک را منحرف می‌کند. در مقادیر بالای گرافن، علت کاهش استحکام را می‌توان به نواحی ضعیف در سیستم گرافن-زمینه منسوب کرد. علاوه بر آن، در مقادیر بالای گرافن، کلوخه‌های گرافن موجود می‌باشند که باعث برهم‌کنش ضعیف زمینه و گرافن می‌شوند. همچنین، در اطراف کلوخه‌ها تمرکز تنش بالایی پدید می‌آید که این امر شرایط رشد ترک را فراهم می‌کند. تمامی این دلایل، ممکن است باعث کاهش استحکام نانوکامپوزیت مذکور با بالا رفتن میزان درصد وزنی گرافن شده باشد. تأثیر درصدهای وزنی مختلف گرافن بر رفتار تسلیم پلی‌پروپیلن در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

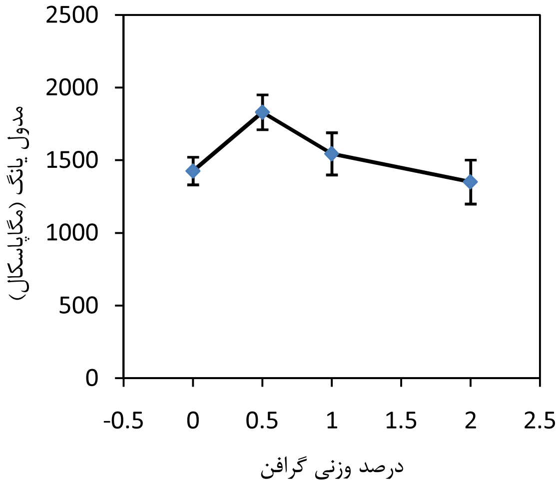
۳-۲- مدول یانگ

همان گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش گرافن تا ۰/۵ درصد وزنی، مدول یانگ پلی‌پروپیلن بالا می‌رود و با افزایش بیشتر میزان گرافن، کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در ۲ درصد وزنی گرافن، خواص نانوکامپوزیت حتی از خواص زمینه خالص نیز کمتر شده است.

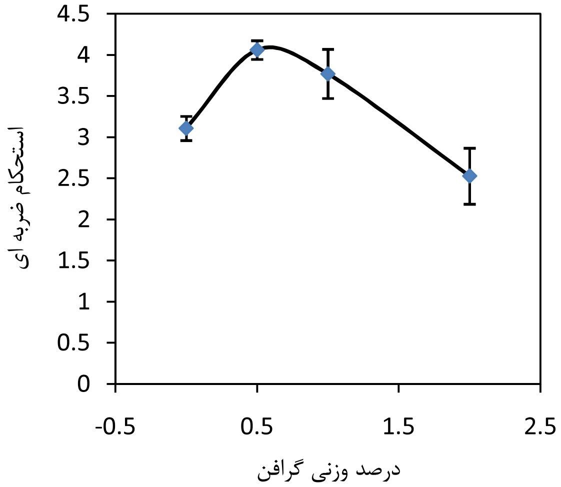
مدول مواد کامپوزیتی به نسبت مدول پرکننده به مدول زمینه وابسته است. از آنجا که گرافن، مدول بالاتری نسبت به پلی‌پروپیلن دارد، در ابتدا مدول با افزایش گرافن زیاد می‌شود. علت کاهش مدول در درصدهای بالاتر گرافن، اثرات منفی ناشی از کلوخه‌ای شدن ذرات گرافن می‌باشد.



شکل۱۲ تأثیر درصدهای وزنی مختلف گرافن بر رفتار تسلیم پلی-پروپیلن



شکل ۱۳ تأثیر درصدهای وزنی مختلف گرافن بر رفتار مدول یانگ پلی‌پروپیلن



شکل ۱۴ تأثیر درصدهای وزنی مختلف گرافن بر رفتار ضربه‌ای کامپوزیت گرافن/پلی‌پروپیلن

۳-۳ کرنش شکست

پلی‌پروپیلن خالص، تغییر طول بسیار زیادی دارد. معذلک مشاهدات آزمایشی نشان می‌دهد که با افزایش میزان گرافن، کرنش شکست کاهش می‌یابد، که علت آن‌را می‌توان ترد شوندگی ناشی از حضور ذرات سخت گرافن دانست. همچنین تمرکز تنش ناشی از حضور ذرات کلوخه‌ای گرافن عامل دیگر کاهش کرنش شکست معرفی می‌شود.

۴-۳ استحکام ضربه‌ای

نتایج استحکام ضربه‌ای پلی‌پروپیلن در درصدهای وزنی مختلف گرافن در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با اضافه کردن تنها ۰/۵ درصد وزنی گرافن به پلی‌پروپیلن، ۳۰ درصد افزایش در استحکام ضربه‌ای آن مشاهده شده است. بیشترین افزایش خواص ضربه‌ای در ۰/۵ درصد وزنی گرافن مشاهده می‌شود و با افزایش بیشتر نانوذرات گرافن، خواص ضربه‌ای افت نموده و در ۲ درصد وزنی، خواص ضربه‌ای نانوکامپوزیت حاصل از زمینه پلی‌پروپیلن نیز کمتر است. مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمون ضربه چارپی، بر واحد ژول اندازه‌گیری شده است که در نمودار ارائه شده بر واحد kJ/m^2 نشان داده شده است. به بیانی دیگر مقدار اندازه‌گیری شده توسط آزمون ضربه چارپی بر سطح زیر ناچ تقسیم شده است.

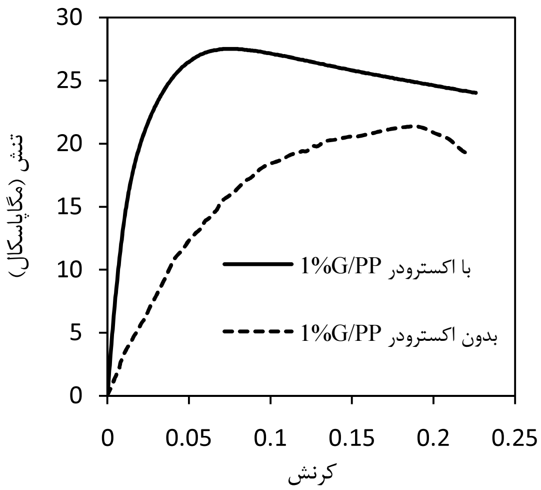
دلیل افزایش استحکام ضربه‌ای با افزایش گرافن، ریزتر شدن ریز ترک‌ها می‌باشد. علت این پدیده را می‌توان با توجه به حفره‌های ریز قابل مشاهده در سطح شکست بیان کرد (شکل های ۱۰ و ۱۱) که نشان از قابلیت گرافن در جوانه‌زنی حفرات ریز است. در حقیقت در این سیستم، تنش سه‌بعدی در فصل مشترک گرافن با زمینه، باعث جدایش فاز تقویت‌کننده از زمینه شده است. این امر سبب ایجاد حفره‌های ریزی می‌شود که خود منشأ ایجاد ریزترک‌ها هستند. در نهایت، افزایش استحکام ضربه، با اضافه کردن گرافن، در اثر افزایش تعداد ریزترک‌ها و ریزتر شدن آنها است.

دلیل دیگر بر افزایش استحکام ضربه‌ای با اضافه شدن گرافن را می‌توان به ابعاد نانومتری ذرات گرافن نسبت داد. این نانوذرات نقش متوقف کننده ترک‌ها را برعهده دارند و لذا باعث ایجاد مسیرهای زیگزاگ برای رشد ترک می‌شوند. این امر منجر به افزایش قابلیت جذب انرژی ماده می‌شود. اما همان طور که بیان شد با اضافه کردن بیشتر گرافن (تا حدود ۲ درصد وزنی)، استحکام ضربه‌ای کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان کلوخه‌ای شدن نانوذرات دانست که تمرکز تنش‌های شدیدی را به ماده تحمیل می‌کنند. به بیانی دیگر، تمرکز تنش‌های بسیار بالایی می‌تواند در نوک ترک‌ها ایجاد شود و در نتیجه منجر به توسعه ترک و کاهش استحکام ضربه‌ای ماده شوند. افزودن درصدهای وزنی زیاد گرافن، محدودیت قابل توجهی را به سیستم اعمال می‌کند که اجازه فعال شدن مکانیزم‌های تغییر

فرم و جذب انرژی را به سیستم نمی‌دهد. ضمن این که لایه‌های پراکنده گرافن، هیچ مکانیزم چقرمگی دیگری را نیز در این سیستم فعال نمی‌کنند. همچنین علت این امر را می‌توان در ترد شدن بیش از حد نمونه‌ها در درصدهای وزنی بالای گرافن دانست.

۳-۵- تأثیر فرایند تولید بر نانوساختار

نظر به جدید بودن روش پوشش‌دهی اولیه پلیمر توسط نانوذرات، در این تحقیق تأثیر استفاده و یا عدم استفاده از اکسترودر مورد بررسی قرار گرفته است، به این ترتیب که به منظور بررسی لزوم استفاده از اکسترودر، در حضور ۱ درصد وزنی گرافن، نمونه‌هایی با روش پوشش‌دهی اولیه ساخته شده، با این تفاوت که در ساخت نمونه‌های مذکور، از اکسترودر استفاده نشده و پلی‌پروپیلن پوشش‌داده شده با گرافن به طور مستقیم وارد دستگاه تزریق پلاستیک شده است. نتایج این بررسی در زیر نشان داده شده است. همان گونه که از شکل ۱۵ بر می‌آید، خواص کششی پلی‌پروپیلن افت پیدا کرده است. علت این امر آن است که اکسترودر برش بالایی به ماده درون خود وارد می‌کند که باعث توزیع نانوذرات درون زمینه پلیمری می‌شود اما بدون اکسترودر، به علت تجمع کلوخه‌های گرافنی و عمل کردن به عنوان مناطقی با تمرکز تنش بالا، خواص نانوکامپوزیت گرافن/پلی‌پروپیلن از خود افت نشان می‌دهد.



شکل ۱۵ بررسی اثر حضور اکسترودر بر منحنی تنش-کرنش نانوکامپوزیت G/PP % ۱

۴- نتایج

در این تحقیق از روش پوشش‌دهی اولیه پلی‌پروپیلن توسط نانوصفحات گرافن و سپس عملیات اختلاط ذوبی و تزریق پلاستیک جهت ساخت نانوکامپوزیت گرافن/پلی‌پروپیلن استفاده شده است. افزایش خواص مناسب حاصل در درصدهای وزنی بسیار پایین گرافن، نشان از قابلیت این روش در دست‌یابی به توزیع مناسب نانوصفحات گرافن درون زمینه پلی-پروپیلن دارد. در نتیجه نانوصفحات گرافن عامل‌های حمل بار مناسبی درون زمینه پلیمری خود شده و به طور مؤثری بار از پلی‌پروپیلن به آن‌ها انتقال یابد. علت دیگر این افزایش استحکام، اثرات تقویت‌کنندگی گرافن بوده که باعث تقویت زمینه خود شده و مسیر رشد ترک را منحرف می‌کند. همچنین در این تحقیق تأثیر فرایند تولید بر نانوساختار مورد بررسی قرار گرفته است و مشاهده شده است که علی‌رغم مزیت روش پوشش‌دهی اولیه نسبت به روش‌های پیشین ساخت نانوکامپوزیت‌ها، برش ناشی از پیچ‌های اکسترودر جهت توزیع مناسب گرافن و باز شدن لایه‌های آن الزامی است و نمی‌توان از این مرحله در ساخت صرف‌نظر کرد.

۵- مراجع

[1] Geim A.K., Novoselov K. S., “The rise of graphene”, *Nature Materials,* Vol. 6, No. 3, 2007, pp. 183-191.

[2] Kim H., Abdala A. A., Macosko C. W., “Graphene /Polymer Nanocomposites,” *Macromolecules,* Vol. 43, No. 6, 2010, pp. 6515-6530.

[3] Lee CG., Wei XD., Kysar JW., Hone J., “Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene”, *Science,* Vol. 321, No. 5887, 2008, pp. 385-388.

[4] Tripathi D., Practical Guide to Polypropylene, *UK, UK, Rapra Technology Ltd.,* 2002.

[5] Higginbotham A.L., Lomeda J.R., Morgan A.B., Tour J.M., “Graphite Oxide Flame-Retardant Polymer Nanocomposites”, *App. Mater. Interface.* Vol. 1, No. 10, 2009, pp. 2256-2261.

[6] Chen D., Zhu H., Liu T., ”In situ thermal preparation of polyimide nanocomposite films containing functionalized graphene sheets”, *Appl Mater Interfaces,* Vol. 2, No. 12, 2010, pp. 3702–3708.

[7] Das B., Prasad K.E., Ramamurthy U., Rao C.N.R., “Nanoindentation studies of polymer matrix composites reinforced by few-layer grapheme”, *Nanotechnology,* Vol. 20, No. 12, 2009, p. 125705.

[8] Paul D.R., Robeson L.M., "Polymer nanotechnology: nanocomposites", *Polymer,* Vol. 49, No. 15, 2008, pp. 3187-3204.

[9] Kim H., Miura Y., Macosko C.W., "Graphene/polyurethane nanocomposites for improved gas barrier and electrical conductivity", *Chemistry of Materials,* Vol. 22, No 11, 2010, pp. 3441-3450.

[10] Kalaitzidou K., Fukushima H., Drzal L. T., "A new compounding method for exfoliated graphite polypropylene nanocomposites with enhanced flexural properties and lower percolation threshold", *Composites Science and Technology,* Vol. 67, No. 10, 2007, pp. 2045-2051.