

بررسی تجربی تأثیر گرافن و نانوذرات خاک رس بر استحکام ضربه‌ای نانوکامپوزیت بر پایه پلی‌پروپیلن / نانو صفحات گرافن / نانورس

غلامحسن پایگانه¹، اسماعیل قاسمی^{2*}، اعظم کاظم نژاد³

¹دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ایران

²استاد، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، ایران

³کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ایران

دریافت: 94/3/16 پذیرش: 94/5/21

چکیده

در این تحقیق اثر افزودن هم‌زمان گرافن و نانوخاک رس و تغییرات درصد وزنی آن‌ها بر روی استحکام ضربه‌ای پلی‌پروپیلن بررسی شد. همچنین از سازگارکننده «پلی‌پروپیلن پیوند داده شده با انیدرید مالئیک» (PP-g-MA) استفاده شد. ساخت نانوکامپوزیت‌ها، بر اساس روش اختلاط مذاب انجام گرفت. تمامی ترکیب‌ها و حالت‌های خالص مواد در یک اکسترودر دوپیچه همسوگرد مخلوط شدند و سپس به کمک دستگاه قالب‌ریزی تزریقی به صورت نمونه‌های استاندارد آزمون ضربه درآمدند. استحکام ضربه آیزود فاق‌دار تمام نمونه‌ها به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. ریخت‌شناسی ترکیب‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. ریزنگارها نشان دادند که پراکندگی ذرات در درصدهای پایین‌تر بهتر است. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که استحکام ضربه تمامی نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی و چهارتایی نسبت به پلی‌پروپیلن خالص کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: استحکام ضربه‌ای، پلی‌پروپیلن، گرافن، نانورس، تحلیل تجربی

مقدمه

پلی‌پروپیلن تنها ماده گرمانرم¹ پرمصرف در کاربردهای فنی است که می‌تواند توسط هر چهار روش ساخت: قالب‌گیری، اکستروژن، تولید فیلم و الیاف ساخته شود. به دلیل فرآیندپذیری خوب، خواص مکانیکی مناسب، بازیافت عالی، در دسترس بودن و قیمت پایین، پلی‌پروپیلن کاربردهای وسیعی در لوازم خانگی، صنایع بسته‌بندی و خودرو پیدا کرده است. اختلاط آسان مقدارهای بالای پرکننده‌ها و عوامل تقویت‌کننده و توانایی تولید ترکیب‌های با پلیمرهای دیگر، پلی‌پروپیلن را تطبیق‌پذیر کرده است. پلی‌پروپیلن از نظر خواص مکانیکی یک پلاستیک مهندسی نیست. این ماده نسبت به سایر ترموپلاستیک‌ها استحکام ضربه نسبتاً کمی دارد [1-3]. البته می‌توان با آمیزه‌کاری آن بهبود خواص حرارتی و مکانیکی را یکجا به‌دست آورد. برای

* i.ghasemi@ippi.ac.ir

¹Thermoplastic

بهبود ویژگی‌های پلی‌پروپیلن کارهای زیادی انجام می‌شود. با کنترل وزن مولکولی، استفاده از مواد افزودنی (پایدارکننده‌ها، تقویت‌کننده‌ها و غیره) و مخلوط کردن، امکان تشدید و بهبود بسیاری از ویژگی‌های پلی‌پروپیلن وجود دارد [4].

یکی از مزایای نانو پرکننده‌ها به عنوان مواد افزودنی پلیمرها در مقایسه با مواد افزودنی سنتی در مقیاس میکرو (مانند شیشه و الیاف کربن)، مقادیر بسیار کم بارگذاری (کمتر از 5 درصد وزنی) است. متداول‌ترین پرکننده‌های نانو در پلیمرها، نانو سیلیکات‌های لایه‌ای هستند [5-7]. به علت مصرف کمتر فاز معدنی، نانوکامپوزیت‌های سیلیکاتی از کامپوزیت‌های عادی سبک‌تر و به همین دلیل از لحاظ عملکردی جایگزینی مناسب برای سایر مواد با کاربردهای ویژه هستند. علاوه بر این، ترکیب بی‌نظیر خواص کلیدی نانوکامپوزیت‌ها و هزینه‌های پایین تولید، کاربرد آنها را بسیار گسترش داده است [8 و 9].

کشف گرافن¹ در سال 2004 [10]، با توسعه روش‌های جدید برای تولید مقادیر عمده‌ای از ورق گرافن اصلاح شده دنبال شد. این مساله با ترکیبی از خواص فیزیکی فوق‌العاده‌ای از گرافن و توانایی پراکندگی در زمینه‌های پلیمری مختلف باعث ظهور یک زمینه جدید از نانوکامپوزیت‌های پلیمری شده است. گرافن بالاترین سفتی و استحکام را نسبت به هر ماده شناخته شده‌ای برای بشر از خود نشان می‌دهد و خصوصیات منحصر به فردی دارد که هم برای مطالعات اولیه و هم برنامه‌های کاربردی آینده بسیار جالب توجه است [11].

با تحقیق در منابع علمی و مقالات ارائه شده، به نظر می‌رسد افزودن گرافن به نانو کامپوزیت پلی‌پروپیلن / نانو خاک رس که تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته زمینه جالبی برای تحقیق است، از این رو در این تحقیق اثر افزودن هم‌زمان گرافن و نانو خاک رس و تغییرات درصد وزنی آنها بر روی استحکام ضربه‌ای زمینه پلی‌پروپیلن بررسی شده است. همچنین از «پلی‌پروپیلن پیوند داده شده با انیدرید مالئیک» (PP-g-MA) به منظور افزایش سازگاری تقویت‌کننده و زمینه پلی‌پروپیلن استفاده شده است.

دو روش حلال و اختلاط مذاب متداول‌ترین روش‌ها در تهیه نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلی‌پروپیلن هستند. 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 اگزولین بوده و همچنین دماهای بالایی در این روش مورد نیاز است، که نه کاربردی و نه ایمن است. در روش اختلاط مذاب، 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 آنکه به دلیل استفاده نکردن از حلال‌های شیمیایی از نظر زیست محیطی بی‌خطر است و دوم اینکه با فرآیندهای ساخت صنعتی نظیر اکسترودر یا تزریق پلاستیک سازگارتر می‌باشد [12 و 13]. از این رو در این تحقیق برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها از روش اختلاط مذاب و اکسترودر دوپیچه و قالب تزریقی استفاده شده است.

¹Graphene
FARAYANDNO

مطالعات آزمایشگاهی

مواد اولیه

در این تحقیق از کوپلیمر پلی پروپیلن ایزوتاکتیک با نام تجاری Topilene و نوع J740 محصول شرکت هیوسانگ¹ کره، با نرخ جریان مذاب 25 g/10min استفاده شد. همچنین در این تحقیق از نانوذرات گرافن با نام تجاری xGNP نوع C تولید شرکت XG Sciences کشور آمریکا استفاده شد. طبق اعلام شرکت تولید کننده، قطر صفحات کمتر از 2 میکرون و ضخامت متوسط آنها چند نانومتر است. نانو خاک رس استفاده شده در این تحقیق از نوع مونت موریلونیت اصلاح شده و با نام تجاری Cloisite 15A محصول شرکت Southern Clay کشور آمریکا است. PP-g-MA مورد استفاده در این تحقیق، با نرخ جریان مذاب 64 g/10min و نام تجاری Periox 20070 از شرکت Solvay کشور بلژیک خریداری شد.

دستگاهها

برای ساخت نانوکامپوزیتها از دستگاه اکسترودر دوپیچه همسوگرد، ساخت شرکت Brabender کشور آلمان با مشخصات فنی $L/D = 40$ و $D = 20 \text{ mm}$ و $L = 800 \text{ mm}$ استفاده شد. به منظور قالبریزی تزریقی، از دستگاه تزریق 125 گرمی ساخت شرکت ایمن ماشین کشور ایران، استفاده شد. جهت بررسی ریزساختار نانوکامپوزیتها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت شرکت Tescan کشور چک با ولتاژ کاری 20KV استفاده شد. نمونهها قبل از قرار گرفتن در میکروسکوپ، به مدت 3-4 دقیقه در نیتروژن مایع قرار داده شده و سپس شکسته شدند. به منظور جلوگیری از تجمع الکترونی و افزایش هدایت الکترونی و برای جلوگیری از پالسهای زائد، سطح شکست نمونهها توسط طلا به ضخامت حدود 15 نانومتر روکشدهی شد. برای روکشدهی سطح شکست نمونهها، از دستگاه ساخت شرکت Emitech کشور انگلستان در محیط گازی آرگون به مدت 4 دقیقه استفاده شد. آزمون ضربه به روش آیزود فاقدار توسط دستگاه Zwick ساخت کشور آلمان با وزنه 2 ژول و در دمای اتاق انجام شد.

روش ساخت و ترکیب درصد وزنی نمونهها

پلی پروپیلن، نانورس، پلی پروپیلن پیوند داده شده با انیدرید مالئیک و گرافن بلافاصله پس از تهیه مورد استفاده قرار گرفتند. نانورس قبل از استفاده، در دستگاه آون² با درجه حرارت 90 درجه سانتیگراد به مدت 4 ساعت خشک شد. تمام ترکیبهای سه تایی و چهارتایی، با شرایط ساخت یکسان آماده شدند. مواد تشکیل دهنده نانوکامپوزیتها در هر حالت بر اساس درصد وزنی ابتدا به صورت دستی مخلوط و سپس به روش اختلاط مذاب درون دستگاه اکسترودر، مخلوط شدند. توزیع دمایی اکسترودر (شامل شش منطقه حرارتی) با توجه به دمای ذوب پلی پروپیلن، به ترتیب از قسمت ورود مواد 160-165-170-175-180-

¹ Hyosung

² Oven

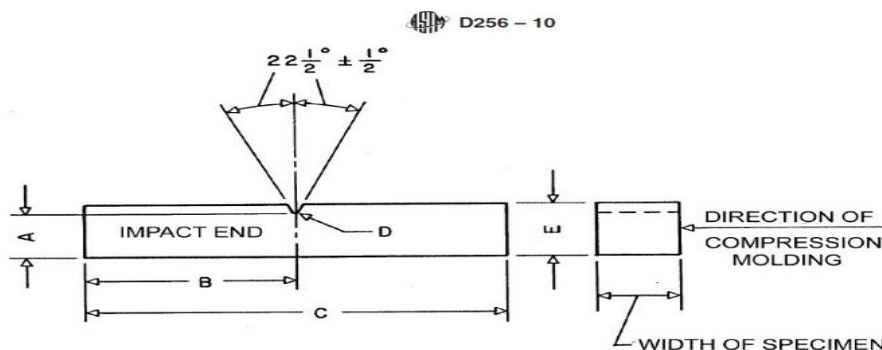
180 درجه سانتی‌گراد و سرعت حرکت پیچه‌ها 60 دور در دقیقه تنظیم گردید. سپس گرانول‌های تولید شده به مدت 4 ساعت در دستگاه آون با درجه حرارت 80 درجه سانتی‌گراد خشک شدند. گرانول‌های خشک شده به منظور انجام آزمون‌های مکانیکی، در دستگاه قالب‌ریزی تزریقی به شکل نمونه‌های استاندارد درآمدند. توزیع دمایی این دستگاه در حین قالب‌ریزی 160-180 درجه سانتی‌گراد، سرعت بارگیری 45 دور در دقیقه، فشار تزریق 90 بار و زمان سرمایش 65 ثانیه تنظیم شد. نمونه‌های آزمون ضربه آیزود فاق‌دار طبق استاندارد ASTM D256 با ابعاد $63/5 \times 12/7 \times 6/35 \text{ mm}^3$ تهیه گردیدند. دست کم پنج نمونه استاندارد آزمون ضربه از دستگاه قالب‌ریزی تزریقی آماده شد.

علائم اختصاری نمونه‌های تهیه شده در جدول 1 خلاصه شده است. در این جدول، پلی‌پروپیلن، نانورس، گرافن و پلی‌پروپیلن پیوند داده شده با انیدرید مالئیک به ترتیب با علائم اختصاری PP، C، G و MA-PP نمایش داده شده‌اند. اعداد قبل از علائم اختصاری، نشان‌دهنده درصد وزنی آن ماده است. درصد وزنی ترکیبات با توجه به اهداف تحقیق و بر اساس یافته‌های مقالات تعیین شده‌اند [5-7]. ردیف 1 مربوط به PP خالص است که به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده است.

جدول 1. علائم اختصاری ترکیب‌ها

ردیف	علامت اختصاری ترکیب	ردیف	علامت اختصاری ترکیب
1	PP	5	95PP/1G/2C/2MA-PP
2	97PP/3C	6	91PP/1.66G/3.33C/4MA-PP
3	95PP/0.33G/0.66C/4MA-PP	7	93PP/2.5G/2.5C/2MA-PP
4	97PP/0.5G/0.5C/2MA-PP		-----

شکل 1 نمونه آزمون ضربه بر طبق استاندارد ASTM D256 و جدول 2 ابعاد آن را نشان می‌دهد [14].

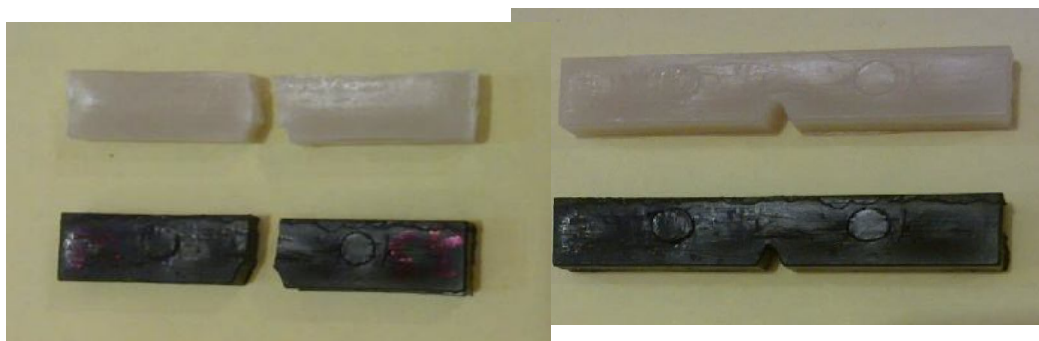


شکل 1. نمونه آزمون ضربه بر طبق استاندارد ASTM D256 [14]

جدول 2. ابعاد نمونه آزمون ضربه بر طبق استاندارد ASTM D256 [14]

	mm
A	10/16 ± 0/05
B	31/8 ± 1/0
C	63/5 ± 2/0
D	0/25 ± 0/05
E	12/70 ± 0/20
Width	3/0 – 12/7

تصویر نمونه‌های آزمون ضربه ساخته شده از پلی پروپیلن خالص و نانوکامپوزیت‌های پلی پروپیلن قبل و بعد از انجام آزمون در شکل 2 نشان داده شده اند.



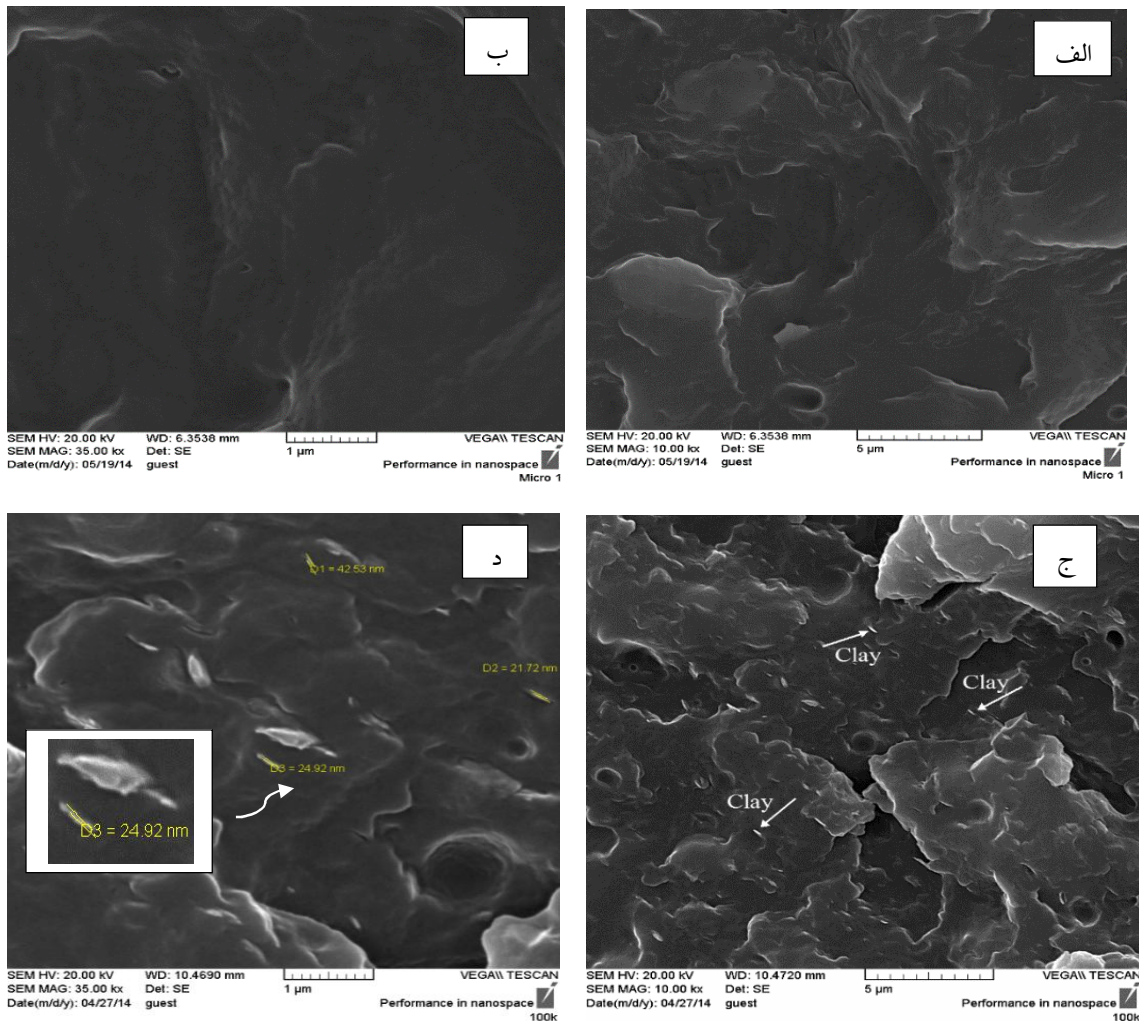
شکل 2. نمونه آزمون ضربه قبل و بعد از انجام آزمون

بررسی و تحلیل نتایج

ریخت شناسی

در شکل 3 ریزنگارهای SEM گرفته شده از PP خالص و نمونه 97PP/3C با بزرگنمایی 10000 و 35000 برابر نشان داده شده است..

همانطور که در ریزنگارهای شکل 3 هم مشخص است، پلی پروپیلن خالص زمینه‌ای صاف و یکنواخت دارد در حالیکه ریزنگارهای مربوط به نمونه پر شده با 3 درصد وزنی نانورس (97PP/3C) شامل لکه‌های سفید رنگی هستند که مربوط به ذرات نانورس است. گزارش مشابهی توسط دیگر محققین ارائه شده است که این موضوع را تأیید می کند [13]. اندازه ذرات پخش شده در زمینه در مقیاس نانو می باشد که اندازه‌ی بعضی از آن‌ها بر روی شکل مشخص شده است.



شکل 3. ریزنگارهای SEM گرفته شده از PP خالص و نمونه پر شده با 3 درصد وزنی نانورس با بزرگنمایی 10000 و 35000 برابر. (الف) و (ب) PP خالص. (ج) و (د) 97PP/3C.

در شکل 4 ریزنگارهای SEM گرفته شده همراه با EDX مربوط به نمونه‌های پلی‌پروپیلن پر شده با گرافن و نانورس دیده می‌شوند. این نمونه‌ها شامل این ترکیبات هستند:

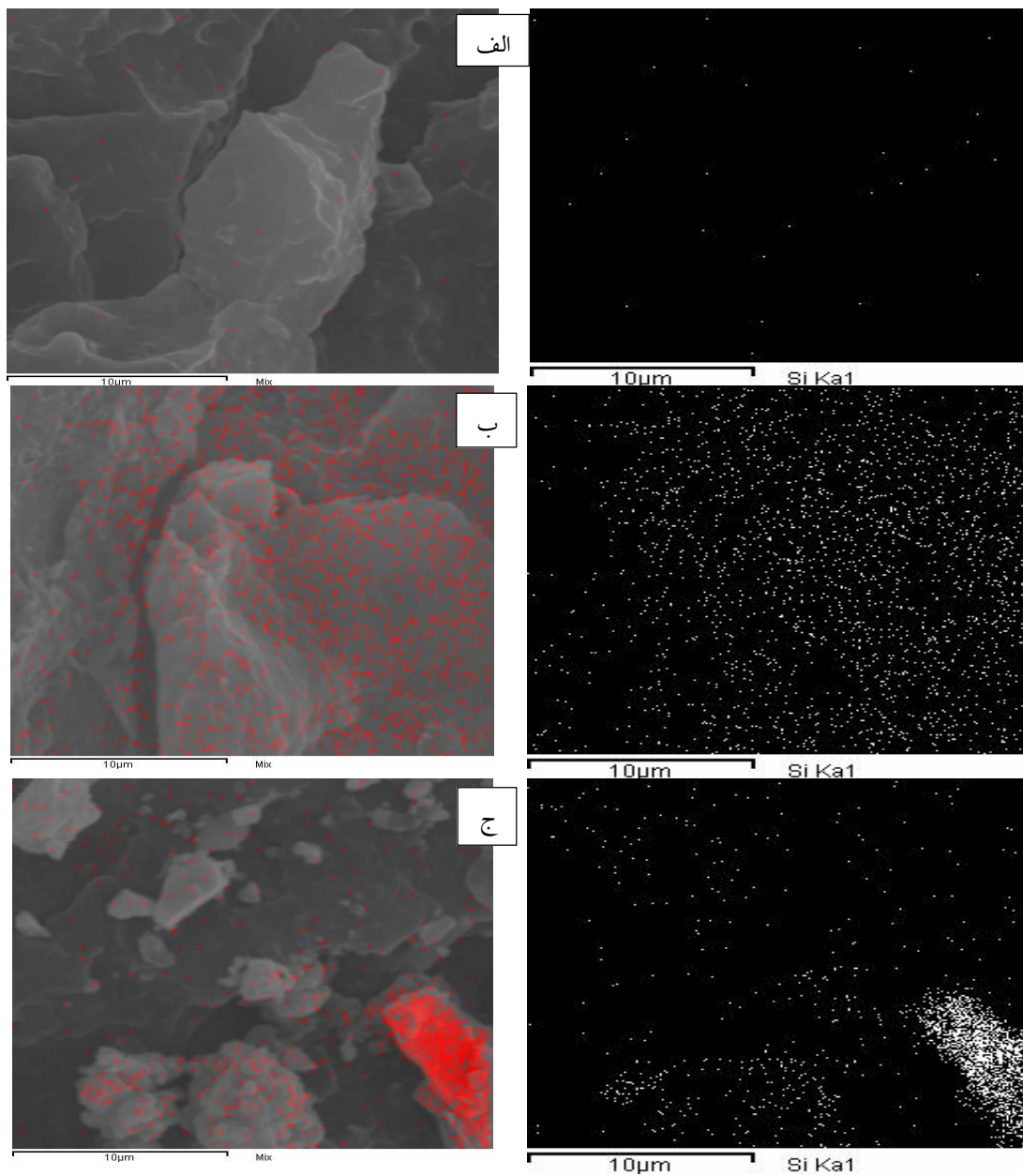
الف: 97 PP/0.5 G/0.5 C/2 MA-PP

ب: 95 PP/1 G/2 C/2 MA-PP

ج: 93 PP/2.5 G/2.5 C/2 MA-PP

همان‌طور که در شکل 4 دیده می‌شود، با افزایش درصد نانورس تا حدود 2 درصد وزنی، پراکندگی ذرات خوب است اما با افزایش بیشتر درصد وزنی نانورس کلوخه شدن و تجمع ذرات رس بیشتر می‌شود، به طوری که در نمونه با 2/5 درصد وزنی گرافن و 2/5 درصد وزنی نانورس، تجمع ذرات نانورس به حداکثر خود

رسیده و تشکیل کلوخه‌های بزرگتر دیده می‌شود. همانطور که قبلاً توضیح داده شد، این مسأله رامی‌توان به کم شدن فاصله ذرات از یکدیگر و تأثیر نیروهای واندروالسی ذاتی موجود در بین ذرات نانورس نسبت داد.



شکل 4. ریزنگارهای SEM گرفته شده همراه با EDX از ترکیبات پلی‌پروپیلن پر شده با گرافن و نانورس: (الف) 97PP/0.5G/0.5C/2MA-PP (ب) 95PP/1G/2C/2MA-PP (ج) 93PP/2.5G/2.5C/2MA-PP.

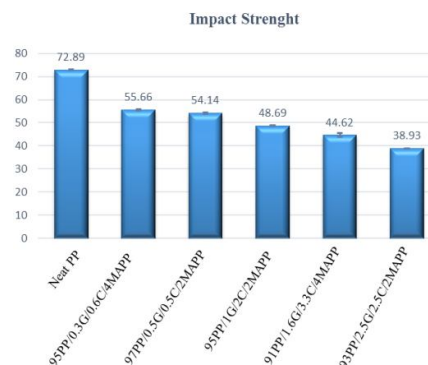
تأثیر حضور هم‌زمان نانو ذرات خاک رس، گرافن و PP-g-MA بر استحکام ضربه‌ای نانوکامپوزیت -

های پلی پروپیلن / گرافن / نانورس / PP-g-MA

در شکل 5 استحکام ضربه ترکیبات PP/ Graphene/ Nanoclay/ MA-PP نشان داده شده است. استحکام ضربه PP با افزودن گرافن و نانورس و PP-g-MA به عنوان سازگار کننده، به شدت کاهش می‌یابد و با بیشتر شدن درصد نانوذرات این روند نزولی ادامه پیدا می‌کند. استحکام ضربه با افزودن 1 درصد وزنی نانوذرات و 4 درصد وزنی سازگار کننده، حدود 23% کاهش می‌یابد. همچنین با افزودن 5 درصد وزنی نانوذرات این کاهش به حدود 46% می‌رسد. 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 آمیزه اعمال می‌کند که اجازه فعال شدن سازوکارهای تغییر شکل و جذب انرژی را به ماده نمی‌دهد. ضمن اینکه لایه‌های پراکنده گرافن، هیچ سازوکار چقرمگی دیگری را نیز در ماده فعال نمی‌کنند. همچنین علت این امر را می‌توان در ترد شدن بیش از حد نمونه‌ها در درصد‌های وزنی بالای گرافن دانست [12].

نکته قابل توجه این است که در درصد‌های وزنی ثابت از نانوذرات، افزایش درصد گرافن موجب کاهش بیشتر استحکام ضربه می‌شود، به طوریکه کاهش استحکام ضربه در ترکیب 95PP/0.3G/0.6C/4MA-PP در حدود 23% است در حالی که در ترکیب 97PP/0.5G/0.5C/2MA-PP این کاهش در حدود 25% است، همچنین کاهش استحکام ضربه در ترکیب 91PP/1.6G/3.3C/4MA-PP در حدود 38% است ولی در ترکیب 93PP/2.5G/2.5C/2MA-PP کاهش استحکام ضربه در حدود 46% است.

دلیل این امر را می‌توان به نسبت منظر بالای ذرات گرافن نسبت داد. این نانوذرات به علت داشتن نسبت منظر بالاتر نسبت به نانوذرات رس، تعامل سطحی بین زمینه و تقویت کننده را افزایش داده و مانع قویتری در برابر حرکت زنجیرهای پلیمری ایجاد می‌کنند، به همین دلیل ماده ماهیت تردتری یافته و استحکام ضربه‌ای آن کاهش می‌یابد [13].



شکل 5. استحکام ضربه‌ای ترکیبات PP/Graphene/Nanoclay/MA-PP

نتایج

در این تحقیق اثر افزودن نانوذرات گرافن و خاک رس بر استحکام ضربه پلی پروپیلن و همچنین ریخت-شناسی ترکیبات مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

ریزننگارهای SEM نشان داد که توزیع و پراکندگی ذرات در درصدهای بالای وزنی کاهش یافته و برهم کنش بین ذرات و زمینه ضعیف است.

با افزایش درصد گرافن، میزان کلوخه شدن افزایش یافته است. این مسأله نشان می دهد که رسیدن به پراکنش یکنواخت ذرات در درصدهای بالاتر مشکل است.

ریزننگارهای SEM گرفته شده همراه با EDX نشان داد که با افزایش درصد نانورس تا حدود 2 درصد وزنی، پراکندگی ذرات خوب است اما با افزایش بیشتر درصد وزنی نانورس کلوخه شدن و تجمع ذرات رس بیشتر می شود، به طوری که در نمونه با 2/5 درصد وزنی گرافن و 2/5 درصد وزنی نانورس، تجمع ذرات گرافن و نانورس به حداکثر خود رسیده و منجر به تشکیل کلوخه های بزرگتر می شود.

نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در تمامی ترکیبات چهارتایی نانوخاک رس / گرافن / PP-g-MA / پلی پروپیلن، استحکام ضربه نانوکامپوزیتها نسبت به PP خالص کاهش می یابد و با بیشتر شدن درصد نانوذرات این روند نزولی ادامه پیدا می کند. استحکام ضربه با افزودن 1 درصد وزنی نانوذرات و 4 درصد وزنی سازگارکننده، حدود 23% کاهش می یابد. همچنین با افزودن 5 درصد وزنی نانوذرات این کاهش به حدود 46% می رسد.

در درصدهای وزنی ثابت از نانوذرات، افزایش درصد گرافن موجب کاهش بیشتر استحکام ضربه می شود، به طوری که کاهش استحکام ضربه در ترکیب 95PP/0.3G/0.6C/4MAPP در حدود 23% است در حالی که در ترکیب 97PP/0.5G/0.5C/2MAPP این کاهش در حدود 25% است، همچنین کاهش استحکام ضربه در ترکیب 91PP/1.6G/3.3C/4MAPP در حدود 38% است ولی در ترکیب 93PP/2.5G/2.5C/2MAPP کاهش استحکام ضربه در حدود 46% است.

منابع

- [1] فرامرزی آشنای قاسمی و محمود اسلامی فارسانی، تأثیر نانوذرات کربنات کلسیم بر خواص دینامیکی پلی پروپیلن، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره 13، شماره 6، 1392، ص.ص. 1-10.
- [2] مهدی رحمانی، فرامرزی آشنای قاسمی، غلامحسن پایگانه و محمدرضا کلانی، تأثیر سازگارکننده PP-g-MA و نانوذرات کربنات کلسیم بر خواص کششی نانوکامپوزیت های PP-g-MA / CaCO₃ / PP، ششمین همایش مشترک انجمن مهندسیین متالوژی و انجمن علمی ریخته گری ایران، 1391.
- [3] Sedigheh Bagheri-Kazemabad, Daniel Fox, Yanhui Chen, Luke M. Geever, Alireza Khavandi, Reza Bagheri, Clement L. Higginbotham, Hongzhou Zhang and Biqiong Chen, Morphology, rheology and mechanical properties of polypropylene/ ethylene-octane copolymer/ clay nanocomposites: Effects of the compatibilizer, Composites Science and Technology, VOL. 72, 2012, p.p. 1697-1704.

- [4] س.س. شوارتز و س.ه. گودمن، پلاستیک‌های گرمانرم، ترجمه علی عباسیان، سام منوچهری و حسین نازکدست، تهران: انتشارات بهروزان، 1377.
- [5] Josiane da R.Silvano, Sabrina A. Rodrigues, Juliano Marini, Rosario E. S. Bretas, Sebastião V. Canevarolo, Benjamim de M. Carvalho and Luís A. Pinheiro. Effect of reprocessing and clay concentration on the degradation of polypropylene/ montmorillonite nanocomposites during twin screw extrusion, *Polymer Degradation and Stability*, VOL. 98, 2013. p.p. 801-808.
- [6] Stoyko Fakirov, Nano- and Micro fibrillar Single-Polymer Composites: A Review, *Macromolecular Materials and Engineering*, VOL. 298, 2013, p.p. 9-32.
- [7] Gudrun Schmidt and Matthew M. Malwitz, Properties of polymer- nanoparticle composites, *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, VOL. 8, 2003, p.p. 103-108.
- [8] وحید حدادی اصل و وحید کریم‌خانی، مقدمه‌ای بر کاربرد نانوفناوری در پلیمرها، تهران: پژوهشگاه صنعت نفت، 1389.
- [9] رامین رحمانی اهرنجانی، علی قربان‌پور آرانی و مریم شکروی، مقدمه‌ای بر نانوفناوری، تهران: نشرکتب دانشگاهی، 1388.
- [10] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva and A. A. Firsov, Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *SCIENCE*, VOL.306, 2004, p.p. 666-669.
- [11] Ahmed A. Abdala, Polymer Graphene Nanocomposites, The Sixth Jordan International Chemical Engineering Conference, 12-14 March 2012, Amman, Jordan.
- [12] محمود مهرداد شکریه و وهاب احمدی جنیدی، ساخت و مشخصه‌سازی آزمایشی نانوکامپوزیت گرافن/ پلی‌پروپیلن، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره 13، شماره 11، 1392، ص.ص. 55-63.
- [13] Achmad Chafidz, Mohammad Al-haj Ali and Rabeh Elleithy, Morphological, thermal, rheological and mechanical properties of polypropylene- nanoclay composites prepared from masterbatch in a twin screw extruder, *J Mater Sci*, VOL. 46, 2011, p.p. 6075-6086.
- [14] ASTM International, Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. Designation: D256 – 10, 2010.