

مطالعه تجربی رفتار حرارتی و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های PA6/CaCO₃

رسول محسن‌زاده^۱، سید محمدرضا سید نورانی^{۲*} و علی نوزاد بناب^۳

- ۱- دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز
- ۲- مهندسی مکاترونیک، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز
- ۳- گروه مکانیک، آموزشکده فنی (شماره ۱) تبریز، دانشگاه فنی و حرفه‌ای

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۰۱/۱۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۰۲/۱۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۰۳/۰۱

چکیده

پژوهش‌های اخیر نشان داده است افزودن مقادیر کمی از پرکننده‌های معدنی در مقیاس نانومتری به جای ذرات میکرونی و یا بزرگتر، می‌تواند خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرها را بهبود بخشد. در این مقاله، با انتخاب پلی آمید ۶ به عنوان زمینه پلیمری، به مطالعه تجربی تاثیر نانوذرات کربنات کلسیم بر خواص مکانیکی و رفتار حرارتی نانوکامپوزیت حاصل پرداخته می‌شود. بدین منظور ۳ نمونه نانوکامپوزیتی با مقادیر ۱، ۳ و ۵ قسمت وزنی نانوذرات به همراه ۱ قسمت وزنی سازگار کننده در هر مخلوط، که هر یک به روش اکسترودر دو پیچه و قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شود، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. از این‌رو ضمن مطالعه شکل‌شناسی نمونه‌ها، آزمایش‌های گرماسنجی، شاخص جریان مذاب، کشش، خمش و ضربه برای هر یک از آنها انجام می‌شود. نتایج آزمون گرماسنجی نشان می‌دهد حضور نانوذرات کربنات کلسیم اثر هسته‌زنی داشته و درجه بلورینگی پلی آمید را افزایش می‌دهد. همچنین نانوذرات سبب افزایش شاخص جریان مذاب می‌شوند. آزمون‌های مکانیکی نیز نشان می‌دهند افزودن نانوذرات کربنات کلسیم به پلی آمید ۶، منجر به افزایش استحکام کششی و خمشی به ترتیب به میزان ۱۹ و ۲۵٪ و بهبود استحکام ضربه‌ای به میزان ۲۰٪ می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پلی آمید ۶، نانوذرات کربنات کلسیم، رفتار حرارتی، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

نانومتری به جای ذرات میکرونی و یا بزرگتر می‌تواند خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرها را بهبود بخشد. افزودن نانوذرات پرکننده در پلیمرهای نیمه بلوری سبب افزایش جوانه‌های بلوری در هنگام انجماد می‌شود و از این‌رو علاوه بر کوچکتر شدن اندازه دانه‌های بلوری، موجب افزایش درجه ساختار بلوری و بهبود یکنواختی در زمینه پلیمری خواهد شد [۱،۲]. انواع مختلفی از این پرکننده‌های

در سال‌های اخیر نانوکامپوزیت‌های پلیمری، به دلیل برخورداری از خواص بهبود یافته خود نسبت به پلیمرهای خالص، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته‌اند. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهند افزودن مقادیر کمی از پرکننده‌های معدنی در مقیاس

*عهده‌دار مکاتبات: سید محمدرضا سید نورانی

نشانی: تبریز، مهندسی فناوری‌های نوین، مهندسی مکاترونیک

تلفن: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۸۷۶-۰۴۱، دورنگار: ۰۴۱-۳۳۲۹۴۶۲۶، پست الکترونیکی: smrs.noorani@tabrizu.ac.ir

برده شده است. می‌توان انتظار داشت که اگر کربن در مقیاس نانو به پلیمر زمینه اضافه می‌شد، به سبب سطح منظر بالای نانومواد، شاخص‌های مکانیکی بهتر از نتایج به دست آمده می‌شد.

دولبا و همکارانش از انواع نانوذرات رس جهت افزایش خواص مکانیکی پلی آمید ۶ استفاده کردند. آنها دریافتند که در همه موارد نانوذرات رس سبب افزایش استحکام کششی پلی آمید می‌گردد. باید گفت که نانوذرات رس دارای آرایش صفحه‌ای هستند و خواص غیر همگنی در فضا ایجاد می‌کند. این در حالی است که نانوذرات کربنات کلسیم شکل هندسی شبه کروی دارند و به این دلیل خواص فیزیکی-مکانیکی در آنها همسانگرد است [۹].

برخی دیگر از محققین، با توجه به شکل کروی نانوذرات کربنات کلسیم، اثر حضور آن را بر خواص حرارتی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری مورد آزمایش قرار داده‌اند. نانوذرات کربنات کلسیم دارای ساختار شبه کروی هستند و احتمالاً می‌توانند باعث بهبود مقاومت زمینه پلیمری شوند. از جمله مزایای افزودن نانوذرات کربنات کلسیم در زمینه پلیمری می‌توان به مواردی چون افزایش روانکاری و بهبود خواص سایشی [۱۰-۱۲]، کمک به پخش انرژی ضربه [۱۳] و تقویت خاصیت جوانه‌زنی [۱۴، ۱۵] اشاره نمود. شایان ذکر است این موارد بطور مستقیم بر دوام مواد پلیمری اثر می‌گذارند.

برای نمونه نویسندگان مقاله حاضر در کار پژوهشی قبلی خود نشان دادند، نانوکامپوزیت‌های پلی آمیدی حاوی نانوذرات کربنات کلسیم نسبت به نمونه‌های خالص از مقاومت سایشی بالاتر و ضریب اصطکاک پایین‌تری برخوردارند و در شرایط محیطی برابر جذب آب کمتری خواهند داشت [۱۶].

سلطان‌زاده و همکارانش، اثر نانوذرات کربنات کلسیم را بر خواص مکانیکی پلی استال مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند حضور نانوذرات کربنات کلسیم، منجر به بهبود خواص ضربه‌ای، خمشی و هسته‌زنی پلیمر زمینه می‌شود [۱۷]. بطور مشابه احسانی و همکارانش اثر نانوذرات کربنات کلسیم در بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت چوب-پلی پروپیلن را مورد مطالعه قرار دادند [۱۸]. قاسمی و همکارانش نیز با افزودن نانوذرات کربنات کلسیم

نانومتری مطالعه شده‌اند که از میان آنها می‌توان به نانوالیاف‌ها مانند نانولوله‌های کربنی، سیلیکات‌های لایه‌ای مانند خاک رس و نانوذرات همسانگرد از قبیل سیلیکا یا کربنات کلسیم اشاره کرد [۳]. در ادامه به ذکر چند نمونه از پژوهش‌های انجام گرفته در بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری پرداخته می‌شود.

سریناس و همکارانش نشان دادند، افزودن نانوذرات خاک رس سبب بهبود خواص کششی پلی آمید ۶ می‌شود [۴]. از سوی دیگر افزودن نانوذرات خاک رس با سازگار کننده و بدون آن سبب کاهش شدید مقدار ازدیاد طول تا پارگی و شاخص جریان مذاب گردیده بود [۵].

علاوه بر این، مود و همکارانش نشان دادند، وجود نانوذرات خاک رس در زمینه پلی پروپیلن-پلی آمید منجر به افت قابل ملاحظه مقاومت ضربه‌ای می‌شود. وجود لایه‌های سیلیکاتی خاک رس سبب کاهش تحرک زنجیرهای پلیمر و ایجاد محدودیت در قابلیت تطبیق آنها حین تغییر شکل می‌شد که این امر به ترد شدن ماده می‌انجامید. تمرکز تنش در محل استقرار لایه‌های سیلیکاتی در پلیمر زمینه، می‌توانست عامل ترک‌زایی گردد [۶]. افزون بر این، ساختار ناهمسانگرد نانوذرات رس باعث ناهمسانگردی در خواص مکانیکی و به علاوه جمع شدگی پلیمر زمینه می‌شد.

رزین پلی آمید ۶ در سال‌های اخیر نیز مورد توجه پژوهشگران بوده است. جندره و همکارانش اثر نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیم را بر استحکام کششی کامپوزیت پلی آمید ۶ و الیاف شیشه بررسی نمودند. آنها دریافتند که افزودن ۱ درصد نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیم سبب بهبود استحکام کششی پلی آمید خواهد شد. ولی از سوی دیگر استفاده از الیاف شیشه منجر به تمرکز تنش می‌شود و خواص ناهمسانگردی ایجاد می‌کند. این پدیده باعث سایش در سیلندر ماردون می‌گردد [۷].

همچنین یان و همکارانش تاثیر فیبر کربن بر خواص مکانیکی، حرارتی و ساختار بلوری پلی آمید ۶ را مورد بررسی قرار دادند. آنها ادعا کردند که تقویت‌کننده‌های فیبر کربن، با افزایش دادن درجه بلوری پلیمر زمینه منجر به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی پلی آمید می‌شوند [۸]. در این پژوهش کربن به صورت فیبر به کار

آنیدرید، محصول شرکت کیمیا جاوید سپاهان استفاده شد. سایر مشخصات فیزیکی-مکانیکی مواد اولیه در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی-مکانیکی مواد اولیه.

سازگار کننده	نانوذرات کربنات کلسیم	پلی آمید ۶
دمای ذوب ۲۰۵ °C	چگالی ۱/۷۱g/cm ³	چگالی ۱/۱۳g/cm ³
دمای بلوری شدن ۱۸۶ °C	لزجت ۹۰-۲۵۰Pa.s	دمای ذوب ۲۲۰ °C
دمای انحراف حرارتی ۸۷ °C@۰/۴۵MPa	سطح ویژه ۱۶-۲۴m ² /g	دمای انحراف حرارتی ۶۵ °C@۱/۸ MPa
شاخص جریان مذاب ۷۰-۹۰ g/۱۰min	اندازه متوسط ۵۰nm	شاخص جریان مذاب ۱۳ g/۱۰min
---	---	مقاومت و مدول کششی ۹۰ Pa-۳/۵GPa

۲-۲- قالب‌گیری نمونه‌ها

مواد اولیه شامل پلی آمید ۶، نانوذرات کربنات کلسیم و سازگار کننده پس از رطوبت‌گیری (به مدت ۸ ساعت و در دمای ۸۰ °C)، ابتدا به صورت مکانیکی و پس از آن به روش ذوبی و با استفاده از اکسترودر دو پیچی ZSK-25، ساخت کوپرین آلمان با قطر پیچ ۲۵ mm و نسبت طول به قطر ۴۰، مخلوط شده و رشته‌های خروجی از اکسترودر توسط دستگاه آسیاب به گرانول تبدیل شدند. سرعت دورانی ماریچ‌های اکسترودر معادل ۲۵۰ rpm و دمای گرم‌کن‌ها از محل تغذیه تا قالب اکسترودر به ترتیب روی مقادیر ۲۲۰، ۲۴۰، ۲۶۰، ۲۷۰، و در آخر ۲۸۰ °C تنظیم گردید. شایان ذکر است که این ایستگاه‌های دمایی با توجه به دمای ذوب پلی آمید تنظیم شده‌اند. همچنین، نمونه‌های بکار گرفته شده در آزمون‌های کشش، خمش و ضربه به روش قالب‌گیری تزریقی با دمای مذاب ۲۲۰ °C و دمای قالب ۶۰ °C تولید شدند. در اینجا نیز قبل از قالب‌گیری نمونه‌ها، آمیخته‌ها به مدت ۶ ساعت و در دمای ۸۰ °C رطوبت‌گیری شدند. جدول ۲ فهرستی از نمونه‌های تهیه شده را، بر اساس نسبت وزنی حضور مواد مختلف در آمیزه‌ها، به همراه علائم اختصاری هر نمونه ارائه می‌دهد.

در زمینه پلی پروپیلن، موفق به افزایش استحکام ضربه و مدول کشسانی پلی پروپیلن شدند [۱۹]. آنها در پژوهشی دیگر، اثر نانوذرات کربنات کلسیم بر خواص دینامیکی مکانیکی پلی پروپیلن را بررسی کردند. آنها دریافتند با افزایش نانوذرات کربنات کلسیم، می‌توان خواص میرایی نمونه‌ها را بهبود بخشید [۲۰].

با مرور پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه تقویت رزین‌های پلی آمیدی با افزودنی‌های نانومقیاس مشاهده می‌شود، افزودن نانوذرات همسانگرد کربنات کلسیم بر پلی آمید ۶ تا کنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این مقاله با توجه به خواص حرارتی و مکانیکی مناسب پلی آمید ۶، این پلی آمید به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب می‌شود. افزودن نانوذرات کربنات کلسیم و مطالعه تاثیر آن بر افزایش شاخص‌های مقاومت مکانیکی و بهبود رفتار حرارتی هدف اصلی این مقاله می‌باشد. شایان ذکر است که افزودن ذرات معدنی کربنات کلسیم در ابعاد میکرونی، اثری جزئی بر افزایش مقاومت مکانیکی و به ویژه استحکام ضربه‌ای نانوکامپوزیت‌های پلیمری دارند، در حالی که نانوذرات کربنات کلسیم می‌توانند به عنوان تقویت کننده خواص مکانیکی در نانوکامپوزیت‌های پلیمری عمل کنند [۲۱، ۲۲].

از این‌رو، ابتدا نمونه‌هایی از آمیخته‌های پلی آمید و نانوذرات با درصدهای وزنی مختلف به روش ذوبی آماده شده و سپس تاثیر نانوذرات کربنات کلسیم بر رفتار حرارتی و خواص مکانیکی هر یک از آنها، بطور تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد

پلی آمید ۶ با نام تجاری آکولن (F223-D (Akulon) محصول شرکت DSM، ماده زمینه پلیمری را شکل می‌دهد. نانوذرات کربنات کلسیم پوشش داده شده با اسید استناریک، محصول شرکت سولوی فرانسه با نام تجاری سکال ۳۱۲ (SOCAL312)، در نقش ذرات نانو برای افزودن به زمینه پلیمری می‌باشد. همچنین از سازگار کننده پلی آمیدی پیوند خورده با مالیک آنیدرید (PA-g-MAH) با نام تجاری PA-G110، همراه با ۱/۳٪ - ۰/۸ مالئیک

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مورفولوژی

به منظور بررسی نحوه پراکندگی نانوذرات افزوده در زمینه پلیمر، تصاویر SEM از مقاطع شکست نمونه‌های آزمون ضربه تهیه شده است. در شکل ۱، نحوه توزیع نانوذرات کربنات کلسیم به ترتیب در آمیخته‌های حاوی ۱ قسمت وزنی (الف)، ۳ قسمت وزنی (ب)، و ۵ قسمت وزنی (ج) نانوذرات نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، نمونه حاوی ۱ قسمت وزنی نانوذرات کربنات کلسیم، توزیع مناسبی در پلیمر زمینه دارد. بعلاوه نمونه حاوی ۵ قسمت وزنی نانوکربنات کلسیم، اثراتی از پدیده کلوخه‌ای شدن را نشان می‌دهد. وجود سازگار کننده و روکش اسید استتاریک بر روی نانوذرات، بطور چشم‌گیری انرژی آزاد سطح پرکننده و در نتیجه برهمکنش ذره-ذره را کاهش می‌دهد، که این امر منجر به پراکندگی بهتر نانوذرات در زمینه و کاهش کلوخه شدن آنها می‌گردد [۲۳، ۲۴]. هر چند روکش‌دهی سطح، انرژی سطحی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد اما به دلیل کوچکی ذرات و بزرگی سطح ویژه و در نتیجه بالا بودن تراز انرژی آزاد سطح، باز هم احتمال به هم چسبیدن ذرات و کلوخه شدن در درصد‌های بیشتر پرکننده وجود دارد [۲۷-۲۵]. از این رو در نمونه حاوی ۵ قسمت وزنی نانوذرات کربنات کلسیم، پراکندگی ذرات کمی کاهش یافته و اندکی کلوخه شدن مشاهده می‌شود. علاوه بر این، در نمونه حاوی ۳ قسمت وزنی نانوذرات کربنات کلسیم، پراکندگی نانوذرات بهتر از نمونه حاوی ۵ قسمت وزنی و بدتر از نمونه حاوی ۱ قسمت وزنی نانوذرات کربنات کلسیم می‌باشد.

۳-۲- رفتار گرمایی

نتایج آزمون گرماسنجی هر یک از آمیخته‌ها در جدول ۳ فهرست شده است. هدف از این آزمایش بررسی تأثیر مقدار نانوذرات کربنات کلسیم افزوده بر رفتار حرارتی و کربنات کلسیم بدست آمده است. علاوه بر این نانوذرات کربنات کلسیم موجب افزایش دمای تبلور نسبت به پلی آمید خالص شده است. این پدیده نشان می‌دهد که نانوذرات عامل تقویت هسته‌زنی در پلیمر زمینه بوده‌اند.

جدول ۲: دسته‌بندی نمونه‌های آزمایش بر اساس تعداد واحد وزنی نانوذرات کربنات کلسیم و سازگار کننده افزوده به زمینه پلی آمید.

نام آمیخته	پلی آمید (wt.%)	نانوذرات (phr)	سازگار کننده (phr: part per hundred resin)
PA6	۱۰۰	۰	۰
PA6/1M/1C	۱۰۰	۱	۱
PA6/1M/3C	۱۰۰	۳	۱
PA6/1M/5C	۱۰۰	۵	۱

۳-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این پژوهش از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA/TESCAN ساخت جمهوری چک با ولتاژ کاری ۷۰ kV برای بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت‌ها، نحوه پراکندگی نانوذرات در زمینه و اندازه‌گیری ابعاد نانوذرات مورد استفاده قرار گرفت. پیش از قرار دادن نمونه‌ها در میکروسکوپ، اولاً هر کدام در نیتروژن مایع شکسته شدند و ثانیاً جهت اجتناب از تجمع الکترونی و همچنین افزایش هدایت الکترونی به منظور جلوگیری از پالس‌های زائد، سطح شکست نمونه‌ها توسط طلا روکش‌دهی شدند.

۴-۲- آزمون‌ها و شرایط آزمایشی

پنج آزمون روی هر یک از نمونه‌ها انجام گرفت که عبارتند از: آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی، آزمون شاخص جریان مذاب، آزمون کشش، آزمون خمش و آزمون ضربه.

در آزمون گرماسنجی، نمونه‌ها در محدوده وزنی ۱۲-۵ mg در داخل دستگاه گرماسنج روبشی تفاضلی با اتمسفر کنترل شده قرار داده شدند. آزمون‌ها در بازه دمایی ۵۰ تا ۲۵۰ °C با سرعت گرمادهی و خنک‌کاری ۱۰ °C/min انجام شد. آزمون شاخص جریان مذاب آمیخته‌های مختلف طبق استاندارد ASTM D1238 با وزنه ۲/۱۶ kg در دمای ۲۳۰ °C انجام شد. آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM D638 و در سرعت ۵۰ mm/min انجام شد. آزمون خمش طبق استاندارد ASTM D790 با سرعت ۳ mm/min انجام شد. آزمون ضربه نیز بر اساس استاندارد ASTM D265، به روش ایزود با انرژی تنظیمی ۱۱ J انجام شد.

بنابر قابلیت هسته‌زنی نانوذرات، تعداد گویچه‌ها و نیز درجه بلورینگی افزایش یافته است. با افزودن مقادیر بیشتری از نانوذرات کربنات کلسیم، درجه بلورینگی کاهش می‌یابد. این امر را می‌توان به تداخل نانوذرات در فرآیند بلورینگی و نیز کلوخه شدن نانوذرات نسبت داد [۲۷].

جدول ۳: نتایج آزمون گرماسنجی برای هر یک از آمیخته‌ها.

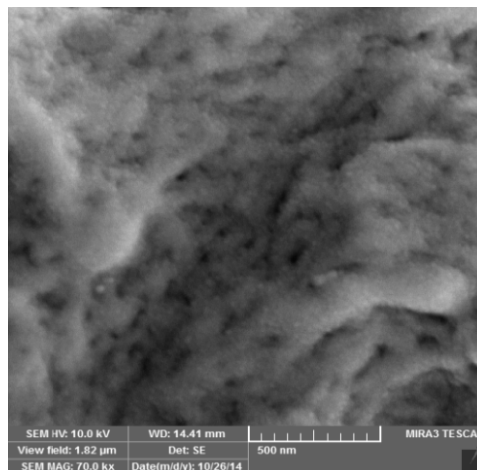
نام آمیخته	PA6	PA6/1C	PA6/3C	PA6/5C
دمای ذوب (°C)	۲۱۹/۷	۲۱۸/۵	۲۱۷/۱	۲۲۲/۲
آنتالپی ذوب (J/g)	۷۳/۳	۷۵/۶	۷۳/۷	۷۱/۱
دمای بلورینگی (°C)	۱۹۵/۵	۱۹۷/۱	۱۹۴/۰	۱۹۵/۳
آنتالپی بلورینگی (J/g)	۷۰/۱	۷۰/۱	۷۱/۶	۶۹/۰
درصد بلورینگی (%)	۳۸/۳	۳۹/۵	۳۸/۵	۳۷/۲

۳-۳- شاخص جریان مذاب

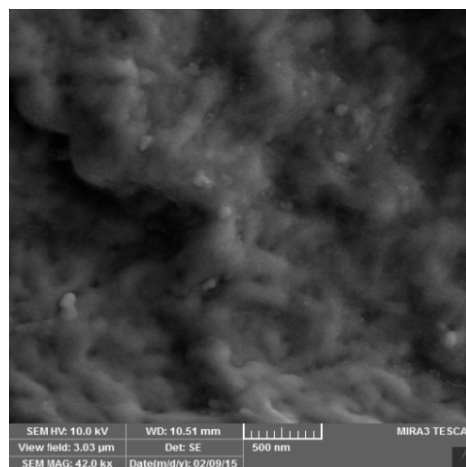
نتایج حاصل از آزمون شاخص جریان مذاب نمونه‌ها مطابق شکل ۲ می‌باشد. مشاهده می‌شود که افزودن ۱ قسمت وزنی نانوذرات کربنات کلسیم منجر به افزایش حدود ۱۵ درصدی شاخص جریان مذاب نسبت به پلی آمید خالص شده است. این افزایش به دلیل قابلیت روان‌کنندگی ناشی از شکل هندسی شبه کره‌ای نانوذرات کربنات کلسیم می‌باشد. نانوذرات کربنات کلسیم عملکردی مشابه اجزای غلتنده در قطعات مکانیکی دارند که سبب تسهیل لغزش زنجیره‌های پلیمری روی یکدیگر می‌شود [۲۸]. از سوی دیگر، افزودن مقادیر بیش از ۱ قسمت وزنی نانوذرات کربنات کلسیم، منجر به کاهش شاخص جریان مذاب می‌شود. پوشش این نانوذرات در مقادیر بیشتر، استحکام مذاب را افزایش می‌دهد [۲۹]. این عامل می‌تواند منجر به کاهش شاخص جریان مذاب شود.

۳-۴- نتایج آزمون کشش

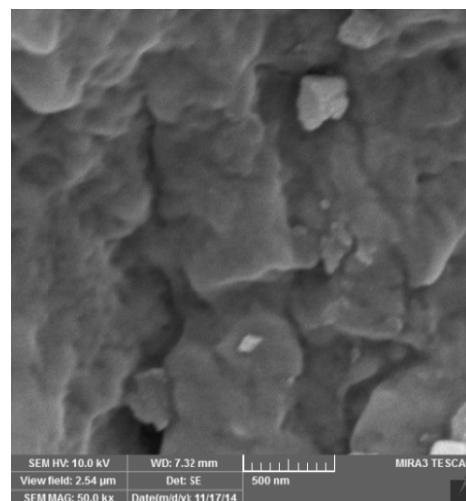
مطابق شکل ۳ افزودن نانوذرات کربنات کلسیم تا ۳ قسمت وزنی منجر به افزایش استحکام کششی نسبت به پلی آمید خالص می‌شود. نانوکامپوزیت حاوی ۱ قسمت وزنی نانوذرات کربنات کلسیم، بیشترین استحکام کششی را دارد، که این مقدار حدود ۱۹٪ بیشتر از پلی آمید خالص می‌باشد.



الف



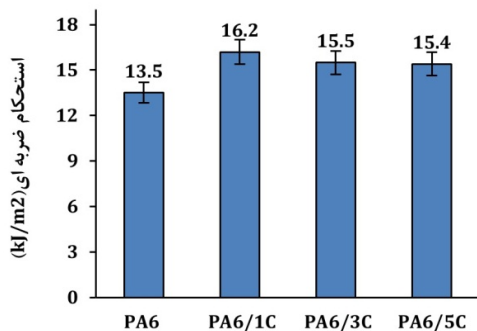
ب



ج

شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی الف (PA6/1C، ب) PA6/3C و ج) PA6/5C.

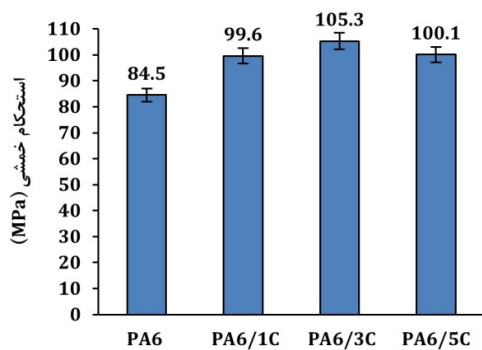
مقدار حدود ۰.۴۲٪ بیشتر از مدول کشسانی پلی آمید خالص می‌باشد. مدول کشسانی نانوکامپوزیت‌ها بر اساس نحوه پراکنش نانوذرات، مدول و ابعاد آنها و نیز اثر نانوذرات بر بلورینگی آمیخته‌ها معین می‌شود [۳۲].



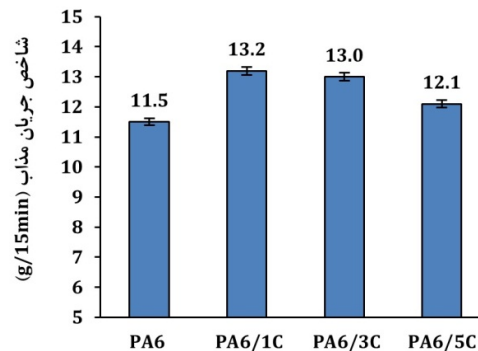
شکل ۵: مقایسه تأثیر مقدار نانوذرات کربنات کلسیم بر استحکام ضربه‌ای.

۳-۶- نتایج آزمون خمش

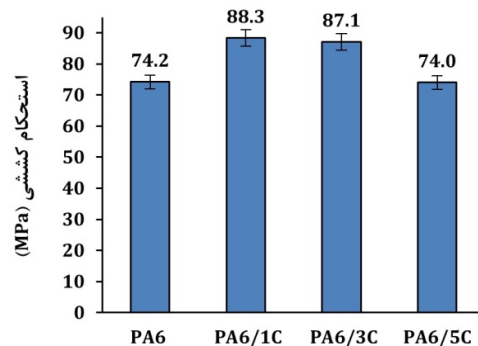
تأثیر افزودن مقادیر معین نانوذرات کربنات کلسیم افزوده به پلیمر بر روی استحکام و مدول خمشی نمونه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. حداکثر استحکام و مدول خمشی در نمونه حاوی ۳ قسمت وزنی نانوذرات کربنات کلسیم بدست آمده است. در این نمونه افزودن نانوذرات، منجر به افزایش حدود ۲۵٪ استحکام خمشی و حدود ۲۳٪ مدول خمشی، نسبت به پلی آمید خالص شده است. علت کاهش مدول و استحکام خمشی در نمونه حاوی ۵ قسمت وزنی نانوذرات کربنات کلسیم را احتمالاً می‌توان به کاهش مقدار بلورینگی پلیمر زمینه و کلوخه‌ای شدن نانوذرات نسبت داد.



شکل ۶: مقایسه تأثیر مقدار نانوذرات کربنات کلسیم بر استحکام خمشی.



شکل ۲: مقایسه تأثیر مقدار نانوذرات کربنات کلسیم بر شاخص جریان مذاب.



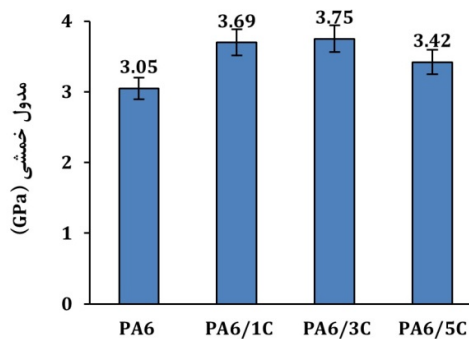
شکل ۳: مقایسه تأثیر مقدار نانوذرات کربنات کلسیم بر استحکام کششی.

افزایش استحکام کششی می‌تواند نتیجه افزایش درجه بلورینگی آمیخته‌ها باشد [۳۰]. علاوه بر این، به دلیل سطح ویژه زیاد نانوذرات کربنات کلسیم، برهمکنش پلیمر زمینه و این نانوذرات تقویت می‌شود. بنابراین، برهمکنش قوی‌تر نانوذرات کربنات کلسیم و پلیمر می‌تواند موجب انتقال تنش روان‌تر از زمینه پلیمری به نانوذرات و در نتیجه افزایش استحکام کششی شود [۳۱]. افزودن مقادیر بیشتر نانوذرات کربنات کلسیم (۵ قسمت وزنی نانوذرات)، منجر به کلوخه شدن آنها و در نتیجه افت استحکام کششی خواهد شد. وجود کلوخه‌های نانوذرات کربنات کلسیم در زمینه پلیمری، باعث تضعیف برهمکنش بین نانوذرات کربنات کلسیم و پلیمر زمینه و در نتیجه کاهش استحکام می‌شود.

شکل ۴ مقایسه مدول کشسانی نانوکامپوزیت‌ها و پلی آمید خالص را، برحسب مقدار نانوذرات کربنات کلسیم افزوده، نشان می‌دهد. نانوکامپوزیت حاوی ۳ قسمت وزنی نانوذرات بیشترین مقدار مدول کشسانی را می‌گیرد. این

پلیمری خالص می‌شود. بیشترین مقدار استحکام و مدول خمشی در نمونه حاوی ۳ قسمت وزنی نانوذرات رخ داد، که مقادیر آنها نسبت به پلیمر خالص به ترتیب با رشد حدود ۲۵ و ۲۳٪ همراه بوده است.

- نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف روی نمونه نانوکامپوزیتی حاوی ۵ قسمت وزنی نانوذرات نشان داد، به سبب عواملی چون کلوخه شدن نانوذرات و تداخل آنها در فرآیند بلورینگی و در نتیجه کاهش مقدار آن، افزودن مقدار بیش از حد نانوذرات در پلیمر زمینه، تاثیری منفی در بهبود رفتار حرارتی و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های کربنات کلسیم دارد.



شکل ۷: مقایسه تأثیر مقدار نانوذرات کربنات کلسیم بر مدول خمشی.

۴- نتیجه‌گیری

تأثیر نانوذرات کربنات کلسیم بر رفتار حرارتی و خواص مکانیکی پلی‌آمید ۶، در نمونه‌های نانوکامپوزیتی با ۱، ۳ و ۵ قسمت وزنی نانوذرات افزوده شده (با حضور سازگار کننده) در پلیمر زمینه بطور تجربی بررسی گردید، که نتایج حاصل به شرح زیر بیان می‌گردند:

- در آزمون گرماسنجی مشخص شد افزودن نانوذرات کربنات کلسیم باعث افزایش بلورینگی و دمای تبلور نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌شود. این پدیده تأثیر نانوذرات را بر تقویت هسته‌زنی در پلیمر زمینه نشان می‌دهد.

- به سبب شکل هندسی شبه‌کروی نانوذرات کربنات کلسیم و تأثیر روانکاری آن در پلیمر زمینه، شاخص جریان مذاب نمونه‌های نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه پلیمر خالص بیشتر شده است.

- افزودن نانوذرات کربنات کلسیم سبب افزایش استحکام و مدول کششی نانوکامپوزیت حاصل نسبت به نمونه پلیمر خالص می‌شود. بیشترین مقدار استحکام و مدول کششی به ترتیب در نمونه‌های حاوی ۱ و ۳ قسمت وزنی نانوذرات رخ داد، که مقادیر آنها نسبت به پلیمر خالص به ترتیب با رشد حدود ۱۹ و ۴۲٪ همراه بوده است.

- به سبب شکل‌گیری حفره‌های مکانیکی در اطراف نانوذرات افزوده به پلیمر زمینه، جذب و استهلاک انرژی ضربه افزایش می‌یابد و این امر سبب افزایش استحکام ضربه‌ای در نمونه‌های نانوکامپوزیتی در مقایسه با نمونه پلیمری خالص شده است.

- افزودن نانوذرات کربنات کلسیم سبب افزایش استحکام و مدول خمشی نانوکامپوزیت حاصل نسبت به نمونه

سپاسگزاری

نویسندگان تقدیر خود را از شرکت (سهامی خاص) کیمیا فروز جهت در اختیار گذاشتن مواد خام پلی‌آمید و سازگار کننده و نیز انتقال تجربیاتی ارزشمند که در تنظیمات مربوط به قالب‌گیری نمونه‌ها بسیار مفید واقع گشت، ابراز می‌دارند. همچنین از شرکت دانش‌بنیان پارسا پلیمر شریف جهت ارسال رایگان نانوذرات کربنات کلسیم، تشکر صمیمانه می‌نمایند.

مراجع

- [1] S. Sahebani, S.M. Zebbarjad, S.A. Sajjadi, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, **21**, 2008, 133.
- [2] S.N. Bhattacharya, M.R. Kamal, R.K. Gupta, "Polymeric Nanocomposites-Theory and Practice", Hanser Gardner Publications, 2008.
- [3] M.Y.A. Fuad, H. Hanim, R. Zarina, Z.A. Mohd-Ishak, A. Hassan, *eXPRESS Polym. Lett.*, **4**, 2010, 611.
- [4] G. Srinath, R. Nanamoorthy, *Journal of Materials Science*, **40**, 2005, 2897.
- [5] G. Srinath, R. Nanamoorthy, *Composites Science and Technology*, **67**, 2007, 399.
- [6] Z.A. Mohd-Ishak, Kusmono, W.S. Chow, T. Takeichi, *Proceedings of the Polymer Processing Society 24th Annual Meeting*, Salerno, Italy, June 2008.
- [7] L. Gendre, J. Njuguna, H. Abhyankar, V. Ermini, *Materials and Design*, **66**, 2015, 486.
- [8] X. Yan, Y. Imai, D. Shimamoto, Y. Hotta, *Polymer*, **55**, 2014, 6186.
- [9] B. Duleba, E. Spisak, *Procedia Engineering*, **96**, 2014, 75.
- [10] A. Ayman, *World Journal of Nano Science and Engineering*, **2**, 2012, 32.
- [11] D. Li, A. Chang, K. Friedrich, *Tribology International*, **43**, 2010, 2355.
- [12] L. Chang, *Composites Science and Technology*, **66**, 2006, 3188.
- [13] I. Kemal, A. Whittle, R. Burford, T. Vodenitcharova, M. Hoffman, *Polymer*, **50**, 2009, 4066.

- [24] A. Kiss, E. Fekete, B. Pukanszky, *Composites Science and Technology*, **67**, 2007, 1574.
- [25] C.M. Chan, J. Wu, J.X. Li, *Polymer*, **43**, 2002, 2981.
- [26] B.L. Lee, L.E. Nielsen, *Polymer Science*, **15**, 1977, 683.
- [27] J.G. Gwon, S.Y. Lee, S.J. Chun, G.H. Doh, J.H. Kim, *Composites, Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **41**, 2010, 1491.
- [28] X.L. Xie, Q.X. Liu, R.K.Y. Li, X.P. Zhou, Q.X. Zhang, Z.Z. Yu, Y.W. Mai, *Polymer*, **45**, 2004, 6665.
- [29] S.A. Solyay, "SBU Advanced Functional Minerals", Solvay Chemicals Sector, Bruxelles, 2013.
- [30] C. Chi-Ming, W. Jingshen, L. Jian-Xiong, C. Ying-Kit, *Polymer*, **43**, 2002, 2981.
- [31] Y. Kun, Y. Qi, L. Guangxian, S. Yajie, F. Decai, *Mater. Lett.*, **60**, 2006, 805.
- [32] S.Y. Fu, X.Q. Feng, B. Lauke, Y.W. Mai, *Composites, Part B*, **39**, 2008, 933.
- [33] C. Deshmane, Q. Yuan, R.D.K. Misra, *Mater. Sci. Eng., Part A*, **452**, 2007, 592.
- [14] S. Kirupasankar, C. Gurunathan, R. Gnanamoorthy, *Materials and design*, **39**, 2012, 338.
- [15] T.D. Lam, T.V. Hoang, D.T. Quang, J.S. Kim, *Materials Science and Engineering*, **501**, 2009, 87.
- [16] A. Nozad Bonab, R. Mohsenzadeh, M.R. Sayyed Noorani, *Modares Mechanical Engineering*, **15**, 2015, 108.
- [17] M.C. Wang, W.J. Shih, I.M. Hung, H.T. Chen, M.H. Hon, H.H. Huang, *Ceramics International*, **41**, 2015, 1223.
- [18] J. Ehsani Zonuz, S. Montakhabi Kalajahi, K. Shelesh-Nezhad, *Modares Mechanical Engineering*, **13**, 2013, 70.
- [19] F. Ashenai Ghasemi, G. Payganeh, M. Rahmani, *Modares Mechanical Engineering*, **13**, 2013, 139.
- [20] F. Ashenai Ghasemi, M. Eslami Farsani, *Modares Mechanical Engineering*, **13**, 2013, 1.
- [21] K. Yang, Q. Yang, *Materials and Design*, **60**, 2006, 805.
- [22] H. Imrek, *Tribology International*, **42**, 2009, 503.
- [23] Q.X. Zhang, Z.Z. Yu, X.L. Xie, Y.W. Mai, *Polymer*, **45**, 2004, 5985.