

تحلیل تجربی خواص نانوکامپوزیت‌های هیبریدی پلی پروپیلن /پودر چوب /گرافن

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران

استاد، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، تهران، ایران

آرام عثمان نژاد

فرامرز آشنای قاسمی*

اسماعیل قاسمی

چکیده

هدف از این تحقیق ارزیابی برخی خواص فیزیکی، مکانیکی و همچنین ریخت شناسی و رفتار گرمایی نانوکامپوزیت‌های تشکیل شده از پودر چوب، پلی پروپیلن و گرافن می‌باشد. در تحقیق حاضر، از مالئیک انیدرید پیوند داده شده با پلی پروپیلن به عنوان عامل جفت کننده، جهت ازدیاد برهم کنش بین اجزا استفاده شد. نمونه‌های نانو کامپوزیت با مقادیر مختلف گرافن (۰، ۰.۵، ۱، ۱.۵، ۲ درصد وزنی) با روش اختلاط مذاب و با استفاده از مخلوطکن داخلی و سپس با روش قالبگیری فشاری تهیه شد. جذب آب، واکنشیدگی ضخامت، ریخت شناسی و خواص کششی و رفتار بلورینی نانوکامپوزیت‌ها مورد سنجش قرار گرفت. نتایج آزمون‌ها نشان داد که با افزودن گرافن به نانو کامپوزیت‌ها تا ۱ درصد وزنی، استحکام و مدول کششی آنها به ترتیب ۳۳/۴ و ۷/۹ درصد نسبت به نمونه‌ی کنترل (بدون گرافن) افزایش یافت. استحکام ضربه‌ی نانوکامپوزیت‌ها با اضافه کردن گرافن تا ۰.۵ درصد وزنی، ۵/۷ درصد نسبت به نمونه‌ی کنترل بهبود یافت. همچنین با افزایش گرافن تا ۱ درصد وزنی، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نانوکامپوزیت‌ها کاهش یافت. سطح شکست هموار و برهم کنش خوب میان اجزای نانوکامپوزیت‌ها در حضور مقادیر کم گرافن به وسیله تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داده شد. آنالیز گرمایی با استفاده از گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)، نشان داد با افزودن پودر چوب و گرافن به پلی پروپیلن خالص، دمای بلورینی و مقدار بلورینی افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت، پلی پروپیلن، چوب، گرافن، نانو.

Preparation and Characterization of PP/ wood Flour/ graphene Hybrid Nanocomposites

A. Osmannejad

F. Ashenai Ghasemi

I. Ghasemi

Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Department of Polymer Engineering, Polymer and Petrochemical Institute (IPPI), Tehran, Iran

Abstract

The aim of this research was to evaluate physical, mechanical and morphological properties and also thermal behavior of nanocomposites made from wood flour (WF), polypropylene (PP) and graphene. Here, maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP) was added as a coupling agent to increase the interaction between the components. The nanocomposites with different graphene concentrations (0, 0.5, 1, 1.5, 2 wt. %) were mixed by melt compounding in an internal mixer and then the composites manufactured by compression molding method. Water absorption, thickness swelling, morphological, tensile properties and crystallinity behavior of the prepared nanocomposites were evaluated. The results showed that the tensile strength and modulus of the nanocomposites was increased by 33.4% and 7.9 % respectively with increasing of graphene contents to 1 wt.% compared to the control sample (without graphene). Addition of graphene contents to 0.5 wt % increased the impact strength by 5.7% compared to the control sample. Also water absorption and thickness swelling of the nanocomposites decreased with increasing with amount of graphene to 1wt%. The smooth fracture surfaces and good interaction between the components of the nanocomposites with incorporation of graphene in low concentrations were shown by scanning electron microscopy (SEM) micrographs. Thermal analysis using differential scanning calorimetry (DSC) showed that addition of WF and graphene to neat PP increased crystallinity and crystallization temperature compared with neat PP.

Keywords: Composite, polypropylene, wood, graphene, nano.

۱- مقدمه

خواص نامطلوب فیزیکی (مانند جذب آب و واکنشیدگی ضخامت بالا) و مکانیکی (مانند استحکام کششی و خمشی پایین) و همچنین خواص گرمایی پایین‌تری نسبت به انواع دیگر کامپوزیت‌ها هستند [۱-۳]. با توجه به تحقیقات بسیاری که در زمینه‌ی بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک انجام گرفته است. به طور کلی دو روش عمده برای بهبود خواص این کامپوزیت‌ها وجود دارد. روش اول فراوری الیاف توسط عوامل جفت‌کننده یا تغییر در اندازه‌ی آنها، مانند استیله کردن پودر چوب [۴]، اصلاح حرارتی [۵] یا اصلاح به وسیله سدیم هیدروکسید [۶] است. از آنجایی که پلیمرهایی مانند پلی پروپیلن غیرقطبی (آب‌گریز) و ذرات چوب، قطبی (آب‌دوست) هستند ایجاد چسبندگی مناسب بین آنها مشکل است [۷]. برای بهبود چسبندگی از

کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک به دلیل مزایای متنوع خود توجهات زیادی را در ده سال اخیر به خود جلب کرده‌اند. این نوع کامپوزیت‌ها در کاربردهای مختلف خانگی و بیرونی مانند کف سالن‌ها، ریل‌ها، نرده‌ها، اسکله‌ها و در صنایع خودرو مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الیاف طبیعی دارای مزایایی مانند چگالی پایین، قابلیت بازیافت، قابلیت تجزیه‌ی بیولوژیکی، در دسترس بودن و هزینه پایین‌اند که در بسیاری از کاربردها، آنها را جایگزین الیاف پیشین کرده است. الیاف کنف، پودر چوب، سبوس برنج، الیاف به دست آمده از خمیر کاغذ و الیاف سلولزی مهمترین الیاف طبیعی هستند که به عنوان تقویت کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸]. با این حال کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک دارای

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: f.a.ghasemi@srttu.edu

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۲

مالئیک انیدرید پیوند داده شده با پلی‌پروپیلن (MAPP) به عنوان عامل جفت‌کننده استفاده می‌شود. عامل جفت‌کننده از یک طرف با ماتریس پلیمری سازگار بوده و از طرف دیگر گروه‌های انیدرید موجود در آن با گروه‌های هیدروکسیل موجود در سطح چوب واکنش نشان می‌دهد، در نتیجه ذرات پرکننده به ماتریس پلیمری اتصال پیدا می‌کنند [۸-۱۰]. روش دوم به کارگیری ذرات نانو مانند نانورس، نانو لوله‌های کربنی و نانو صفحات گرافن در نانوکامپوزیت‌ها است که یک روش موثر جهت بهبود خواص آنها می‌باشد. ذرات نانو به علت دارا بودن سطح تماس بالا، مدول یانگ بالا و چگالی پایین، یکی از بهترین تقویت‌کننده‌هایی هستند که توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این ذرات نانو اثر مثبتی روی افزایش مدول و استحکام کششی و خمشی، پایداری گرمایی و کاهش جذب آب نانو کامپوزیت‌ها دارند. در سال‌های پیش مطالعات محققین روی تاثیر نانورس بر خواص نانو کامپوزیت‌ها متمرکز بود [۱۱، ۱۲] اما در سال‌های اخیر کربن نیتريد گرافیتی، نانو لوله‌های کربنی و بویژه نانو گرافن بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۳].

گرافن یکی از آلوتروپ‌های کربن است که از یک تک لایه با ساختار دو بعدی با ضخامت یک اتم کربن تشکیل شده که به عنوان مستحکم‌ترین ماده شناخته شده است [۱۴] که از لحاظ شیمیایی شبیه نانولوله‌های کربنی و از لحاظ ساختاری شبیه نانوسیلیکات لایه‌ای است [۱۵] و دارای ویژگی‌های بسیار خوبی از قبیل پایداری گرمایی، مدول مکانیکی بالا، رسانایی گرمایی و الکتریکی بالا، نفوذ ناپذیری و مقاومت در برابر احتراق می‌باشد. نانوغرافن به‌عنوان تقویت‌کننده در نانو کامپوزیت‌ها در مقادیر کم به کار می‌رود. بنابراین بهبود خواص در غلظت کم گرافن را می‌توان تاحدی به خاصیت ذاتی گرافن نسبت داد [۱۶، ۱۷]. همچنین کیفیت پراکندگی ذرات نانو در بهبود خواص کامپوزیت تاثیر بسزایی دارد که با وجود پتانسیل بالای گرافن به عنوان نانوذره، برای دستیابی به پراکندگی یکنواخت مخصوصا برای پلیمرهای غیر قطبی مثل پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن چالش بزرگی وجود دارد [۱۵]. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بهبود خواص مکانیکی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری که در آنها از گرافن به عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است، بسیار بیشتر از آنهایی است که نانورس و یا الیاف کربنی دیگر استفاده شده است [۱۷، ۱۸].

در زمینه‌های مرتبط با موضوع این پژوهش تحقیقات متعددی صورت گرفته است. از جمله نوربخش [۱۹] اثر نانورس در چند سازه چوب-پلاستیک را بررسی نمود و نشان داد که در صورت استفاده از ۳ درصد ذرات نانورس ویژگی‌های مقاومتی سازه‌ها به حداکثر می‌رسد. کرد [۲۰] اثر مقدار ذرات نانورس بر ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت چوب-پلاستیک حاصل از پلی‌اتیلن سنگین و آرد چوب مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که مدول کششی، مقاومت کششی، مدول خمشی و مقاومت خمشی کامپوزیت چوب-پلاستیک با افزایش مقدار ذرات نانورس تا ۳ درصد افزایش و از ۳ تا ۵ درصد کاهش می‌یابد. در حالی که مقاومت به ضربه در تمامی مقادیر نانورس کاهش یافت. تسوچی و همکاران [۲۱] برخی از خواص نانوکامپوزیت‌های چوب-پلاستیک ساخته شده از ذرات کاه گندم و برنج، ذرات نانورس، پلی پروپیلن مورد ارزیابی قرارداد و گزارش دادند که مدول‌های کششی و خمشی با افزایش ۲ درصد نانورس افزایش یافته ولی در سطح ۴ درصد کاهش می‌یابند. خواص جذب آب نیز با اضافه کردن ۲ درصد نانورس

کاهش یافته و در سطح ۴ درصد نانورس افزایش قابل توجهی مشاهده شد.

آشنای قاسمی و همکاران [۲۲] اثر نانوصفحات گرافن و پلی‌ولفین الاستومر بر خواص مکانیکی و حرارتی زمینه پلی‌پروپیلن بررسی کردند و نشان دادند که افزایش درصد گرافن باعث افزایش مدول و کاهش کرنش شکست شده، اما اثر قابل توجهی بر استحکام نهایی ندارد. نتایج آنالیز گرمایی آنها نشان داد که افزایش گرافن و پلی‌ولفین الاستومر، اثر قابل توجهی بر مقدار بلورینگی پلی‌پروپیلن ندارد، اما گرافن باعث بالا رفتن دمای بلورینگی می‌شود.

چهار محالی و همکاران [۱۷] تاثیر نانوغرافن را بر خواص نانو کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن-الیاف باگاس بررسی کردند و نشان دادند که با اضافه کردن تنها ۰/۱ درصد نانوغرافن، خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسند.

کردخیلی و همکاران [۲۳] تاثیر نانولوله‌های کربنی را بر خواص فیزیکی و مکانیکی نانو کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن سبک-پودر چوب را بررسی کردند و گزارش دادند که خاصیت جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نانوکامپوزیت‌ها با افزودن از ۱ تا ۳ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی کاهش می‌یابد و استحکام ضربه‌ی نانوکامپوزیت‌ها نیز در ۲ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

ششمانی و همکاران [۳] تاثیر نانوصفحات گرافن را بر برخی از خواص نانو کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک بررسی نمودند و نشان دادند که در ۰/۸ درصد وزنی گرافن خواص کششی و خمشی و ضربه‌ای نانو کامپوزیت‌ها دارای بیشترین مقدار بوده و جذب آب و واکنشیدگی ضخامت با افزودن گرافن به ترتیب ۳۰ و ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. با این حال در تمامی مطالعات فوق درمقادیر بالای گرافن به دلیل عدم امکان پراکندگی یکنواخت نانو ذرات در زمینه، خواص نانو کامپوزیت‌ها کاهش پیدا کرد.

در این تحقیق خواص نانوکامپوزیت‌های هیبریدی چوب-پلاستیک-گرافن مطالعه شد و تاثیر نانو صفحات گرافن به‌عنوان پرکننده دوم، در بهبود ویژگی‌های کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی هدف از هیبرید کردن کامپوزیت‌ها بدست آوردن فواید دو پرکننده بطور همزمان و کاهش معایب می‌باشد، چرا که استفاده از یک نوع پرکننده در کامپوزیت‌ها عموما تمامی خواص را بهبود نمی‌بخشد. همچنین با توجه به پایین بودن قیمت و در دسترس بودن پودر چوب و جهت استفاده‌ی مفید از پسماند کارخانه‌های چوب و کاغذ سازی، در ساخت نمونه‌های نانو کامپوزیت مورد بررسی از ۳۰ درصد پودر چوب استفاده شد. سپس خواص متعدد نانوکامپوزیت‌ها از قبیل مدول و استحکام کششی، استحکام ضربه، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت و رفتار بلورینگی آنها مورد سنجش قرار گرفته و با پلی‌پروپیلن خالص مقایسه گردید.

استفاده از درصد وزنی بالای پودر چوب و درصدهای وزنی پایین گرافن در این پژوهش، در مقایسه با تحقیقاتی که تاکنون در زمینه‌ی بررسی خواص نانوکامپوزیت‌های پودر چوب-پلاستیک-گرافن انجام گرفته است، نویدبخش کاهش هزینه‌ها و مقرون به‌صرفه بودن بکارگیری این نوع نانوکامپوزیت‌ها در مصارف گوناگون است. همچنین استفاده از روش گرماسنجی روبشی تفاضلی جهت آنالیز حرارتی این نوع

نانوکامپوزیت در این بررسی بکار گرفته شده، در تحقیقات گذشته مشاهده نشده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

پلی پروپیلن^۱ (PP) با نام تجاری V30S، محصول شرکت پتروشیمی اراک با شاخص جریان مذاب ۱۸g/۱۰ min و چگالی ۰.۹۲g/cm^۳ به عنوان ماده زمینه انتخاب شد. از مالئیک انیدرید پیوند داده شده با پلی پروپیلن^۲ محصول شرکت کرانگین^۳ با شاخص جریان مذاب ۱۰g/۱۰min و میزان انیدرید ۲ درصد به عنوان عامل جفت کننده استفاده گردید. پودر چوب راش عبور داده شده از الک ۴۰ مش از پسماند کارخانه ی کاغذ و چوب مازندران تهیه شد و به عنوان پودر طبیعی مورد استفاده قرار گرفت. گرافن^۴ (xGnP-C750) دارای ضخامت متوسط ۲ nm و قطر متوسط ۰.۳μm تا ۲μm و مساحت سطح متوسط ۷۵۰m^۲/g محصول شرکت اکس جی ساینس^۵ آمریکا به عنوان نانوذرات تقویت کننده بکار گرفته شد.

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

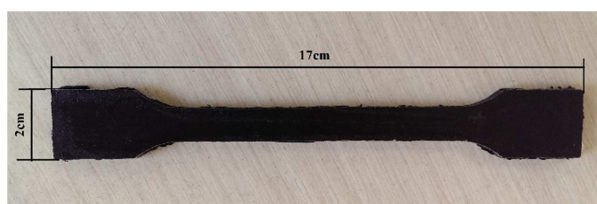
همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است پنج ترکیب مختلف از نانوکامپوزیت‌های چوب-پلاستیک-گرافن و یک نمونه از پلی پروپیلن خالص ساخته شد.

جدول ۱- کدگذاری و ترکیب نمونه‌های تهیه شده

کد	مالئیک انیدرید (% وزنی)	نانو گرافن (% وزنی)	پودر چوب (% وزنی)	پلی پروپیلن (% وزنی)
PP	۱۰۰	۰	۰	۰
نمونه B0 (کنترل)	۶۶	۳۰	۰	۴
B1	۶۵.۵	۳۰	۰.۵	۴
B2	۶۵	۳۰	۱	۴
B3	۶۴.۵	۳۰	۱.۵	۴
B4	۶۴	۳۰	۲	۴

در نانوکامپوزیت‌ها پودر چوب در ۳۰ درصد وزنی ثابت در نظر گرفته شده و گرافن از صفر تا ۲ درصد وزنی تغییر داده شد. پودر چوب جهت رطوبت‌زدایی تحت گرما در دمای ۱۰۵ °C قرار گرفت و برای استفاده‌های بعدی در بسته های پلاستیکی عایق رطوبت نگهداری شد. نمونه‌ها با روش اختلاط مذاب و با استفاده از مخلوط‌کن داخلی^۶ با

سرعت اختلاط ۶۰rpm و دمای ۱۸۰ °C ساخته شد. زمان اختلاط نیز ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. مخلوط تهیه شده از دستگاه مخلوط کن پس از سرد شدن به قالب مورد نظر انتقال داده شده و قالب بین صفحات فشاری^۷ دستگاه پرس قرار داده شد. سپس این صفحات تا دمای ۱۹۰°C داغ شده و فشار آنها به آهستگی تا ۲.۵ MPa افزایش یافت. این فشار مدت ۵ دقیقه بر روی قالب‌ها حفظ شد. سپس قالب‌ها از صفحات داغ جدا شده و زیر پرس سرد با همان فشار تا رسیدن به دمای اتاق قرار داده شد و در نهایت نمونه‌های مورد نظر از قالب‌های مربوطه جدا شد. برای هر ترکیب تعداد سه نمونه تهیه شد و نتایج ارائه شده میانگین نتایج بدست آمده برای هر سه نمونه می‌باشد. شکل ۱ تصویر نمونه‌ی استاندارد تهیه شده برای آزمون کشش را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- نمونه‌ی ساخته شده جهت آزمون کشش

۲-۳- آزمون‌ها

۲-۳-۱- آزمون‌های مکانیکی

آزمون کشش روی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ISO 527-1 با استفاده از دستگاه سویک روئل^۲ مدل z100 با سرعت فک های ۵mm/min انجام شد. آزمون ضربه‌ی ایزود تحت بارگذاری دینامیکی با نرخ کرنش بالا در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه سانتام^۳ مدل SIT-20D و بر اساس استاندارد ASTM D256 و با ابعاد mm ۶۳.۵×۱۲.۷×۳.۲ انجام شد.

۲-۳-۲- ریخت شناسی

برای بررسی سطح شکست نمونه های شکسته شده در آزمون کشش از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ مدل WEGA-II TESCAN استفاده شد. قبل از انجام آزمایش توسط دستگاه SEM، جهت جلوگیری از تجمع بار الکتریکی روی نمونه در هنگام آزمایش، از روکش طلا بر روی سطح نمونه ها با ضخامت ۱۵nm استفاده شد.

۲-۳-۳- آنالیز حرارتی

آزمایش گرماسنجی روبشی تفاضلی^۵ (DSC)، به وسیله دستگاه Netzsch DCS 200 F3 Maia در محیط نیتروژن انجام شد. این آزمون در سه مرحله انجام گرفت. در مرحله اول نمونه‌ها از دمای محیط تا دمای ۲۰۰°C با نرخ گرمایشی ۱۰ °C/min تحت حرارت قرار گرفتند و دمای آنها به مدت ۵ دقیقه در این مقدار حفظ شد تا کلیه تاریخچه حرارتی و مکانیکی آن از بین برود. سپس در دومین مرحله

^۱ Polypropylene

^۲ Maleic Anhydride Grafted Polypropylene

^۳ Karangi

^۴ Graphene

^۵ XG Science

^۶ Internal mixer

^۷ Platen

^۲ Zwick/Roell

^۳ Santam

^۴ Scanning Electron Microscope

^۵ Differential scanning calorimetry

دمای نمونه‌ها از 200°C با نرخ گرمایشی $10^{\circ}\text{C} / \text{min}$ سرد شده تا به دمای محیط برسند و مشابه مرحله قبل ۵ دقیقه دمای آنها ثابت نگه داشته شد. در مرحله سوم بار دیگر از دمای محیط تا 200°C با نرخ گرمایشی $10^{\circ}\text{C} / \text{min}$ حرارت داده شدند.

۳-۴- آزمون‌های پایداری ابعادی

آزمون‌های واکنشیدگی ضخامت و جذب آب طبق استاندارد ASTM D570 انجام شد. قبل از انجام آزمایش وزن و ضخامت نمونه‌ها اندازه گیری شد. برای اندازه‌گیری ابعاد و وزن نمونه‌ها از ریزسج با دقت 0.01 استفاده گردید. نمونه‌های آماده شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق در آب مقطر غوطه‌ور شده و طبق زمان تعیین شده از آب خارج شدند و سطح آنها به وسیله دستمال کاغذی کاملاً خشک گردید و وزن و ضخامت آنها پس از غوطه‌ور شدن مجدداً اندازه‌گیری شد. درصد جذب آب با استفاده از فرمول (۱) محاسبه شد:

$$WA(t) = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

که در آن $WA(t)$ مقدار جذب آب بصورت درصد پس از زمان t ، W_0 وزن نمونه اولیه قبل از غوطه‌ور شدن در آب و W_t وزن نمونه غوطه‌ور شده در آب پس از زمان t می‌باشد. همچنین مقدار واکنشیدگی ضخامت از رابطه‌ی (۲) محاسبه شد:

$$TS(t) = \frac{T_t - T_0}{T_0} \times 100 \quad (2)$$

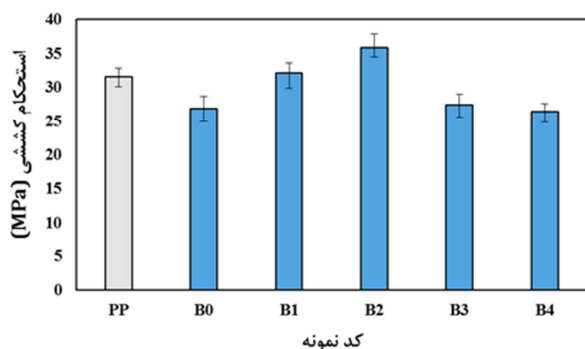
$TS(t)$ مقدار واکنشیدگی ضخامت بصورت درصد پس از زمان t ، T_0 ضخامت نمونه قبل از غوطه‌ور شدن در آب و T_t ضخامت نمونه غوطه‌ور شده در آب پس از زمان t می‌باشد. مقدار ثبت شده برای هر نمونه میانگین مقدار اندازه‌گیری شده برای ۵ نمونه می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

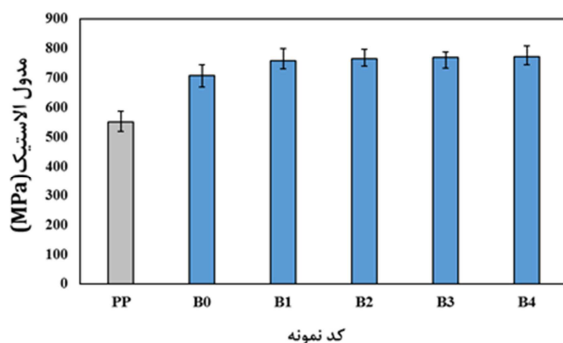
۳-۱- خواص کششی

نتایج به دست آمده از آزمون کشش روی نمونه‌ها در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نمونه‌ی کنترل (B0) حاوی ۳۰ درصد وزنی پودر چوب، ۱۵ درصد استحکام کششی کمتری نسبت به پلی‌پروپیلن خالص دارد. با اضافه نمودن گرافن استحکام کامپوزیت افزایش یافته و در ۱ درصد وزنی گرافن، استحکام به مقدار 35.83 MPa رسید و 33.4 درصد نسبت به نمونه‌ی کنترل افزایش یافت. در مقادیر ۱/۵ و ۲ درصد وزنی گرافن استحکام نانوکامپوزیت‌ها کاهش یافت. کاهش استحکام با افزودن پودر چوب به پلی‌پروپیلن قابل پیش بینی بود و مطابق مطالعات گذشته، استفاده از چوب در گرمانرم‌ها باعث کاهش استحکام می‌گردد [۳، ۸، ۲۴]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی بدست آمده از سطح شکست نمونه‌ی کنترل، وجود حفره‌های متعددی را نشان می‌دهد که در هنگام بارگذاری بر روی نمونه، به علت بیرون کشیده شدن پودر چوب از زمینه ایجاد شده است. دلیل این امر سازگاری ضعیف ذرات چوب با زمینه‌ی پلیمری است که موجب پایین آمدن خواص مکانیکی می‌شود. کامپوزیت‌های چوب پلاستیک ایجاد می‌شود و در نتیجه انتقال بار از زمینه به ذرات، خوبی انجام نمی‌گیرد [۷]. اکثر پلیمرها به‌ویژه گرمانرم‌ها ماهیت غیرقطبی هستند که با پودر چوب قطبی سازگار نبوده و بنابراین چسبندگی ضعیفی بین ذرات و ماتریس در دلیل افزایش استحکام

کششی با افزودن گرافن به نانوکامپوزیت‌ها تا ۱ درصد وزنی را می‌توان اینگونه توضیح داد که، پراکندگی همگن ذرات گرافن با نسبت ابعادی بالا، موجب تشکیل یک ناحیه‌ی بین فازی با چسبندگی قوی و در نتیجه انتقال موثر بار از زمینه به ذرات گرافن می‌شود که تصویر بدست آمده از سطح شکست هموار و بدون حفره‌ی نمونه‌ی B2 گواه بر این مدعاست. بنابراین ذرات گرافن با بهبود چسبندگی بین فازی و همچنین استحکام بسیار بالایی که دارند استحکام نانوکامپوزیت‌ها را نیز افزایش می‌دهند [۲، ۱۵]. با بالا رفتن مقدار گرافن در ۱/۵ و ۲ درصد وزنی به دلیل پراکندگی ناقص و کلوخه شدن ذرات گرافن استحکام کششی کاهش می‌یابد. Zhang و همکاران [۲۵] در مطالعه بر روی نانوکامپوزیت‌های PVA-نانو گرافن، یک مقدار بحرانی ذرات پراکنده را برای خواص



شکل ۲- تاثیر مقادیر مختلف گرافن بر استحکام کششی نمونه‌ها



شکل ۳- تاثیر مقادیر مختلف گرافن بر مدول الاستیک نمونه‌ها

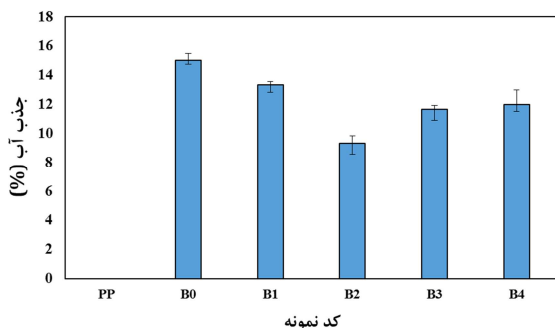
مکانیکی در نظر گرفتند به طوری که در پایین تر از این مقدار، ذرات گرافن بطور کامل در زمینه پلیمری پراکنده و لایه لایه شده و موجب تقویت خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شوند. در حالی که برای مقادیر بالاتر از این مقدار، ورقه‌های گرافن بدلیل نیروی واندروالسی بین صفحات، مجدداً به همدیگر می‌چسبند و باعث تشکیل توده‌های گرافن در زمینه می‌شوند که هنگام بارگذاری کامپوزیت، این صفحات روی هم لغزیده و باعث کاهش استحکام نانوکامپوزیت‌ها می‌شوند [۲۶]. تصویر سطح شکست نمونه‌ی B4 این موضوع را تایید می‌کند.

شکل ۳ تغییرات مدول الاستیک نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزودن پودر چوب و ذرات گرافن به پلی‌پروپیلن مدول الاستیک افزایش یافت. نمونه‌ی کنترل ۲۹ درصد افزایش در مدول الاستیک نسبت به پلی‌پروپیلن خالص را نشان داد. این افزایش را می‌توان به سفتی بالاتر چوب نسبت به پلی‌پروپیلن خالص که ماده‌ای انعطاف‌پذیر است، نسبت داد [۲]. افزودن گرافن تا ۲ درصد وزنی باعث

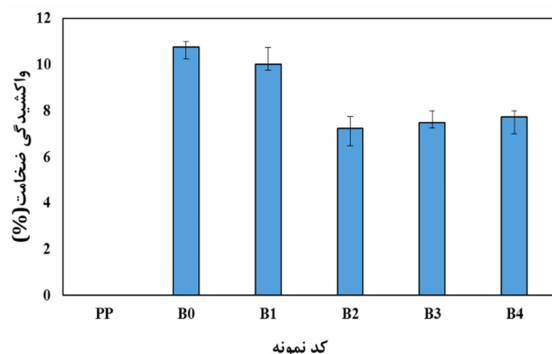
گرافن یک روند نزولی در استحکام ضربه برای نمونه‌های نانو کامپوزیت مشاهده می‌شود که نمونه B4 حاوی ۲ درصد وزنی گرافن با کاهش ۲۶/۴ درصد نسبت به پلی‌پروپیلن خالص دارای کمترین مقدار استحکام ضربه می‌باشد. دلیل کاهش استحکام با افزایش گرافن در مقادیر بالا کلوخه شدن گرافن و ایجاد نواحی تمرکز تنش می‌باشد که این نواحی مکان مناسبی برای شروع ترک می‌باشند [۱۷].

۳-۳- جذب آب و واکسیدگی ضخامت

یکی از عمده ترین معایب کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک، جذب آب و واکسیدگی ضخامت آنها در صورت قرار گرفتن در مجاورت رطوبت است که باعث کاهش استحکام آنها می‌شود. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که افزودن ذرات نانو به این کامپوزیت‌ها باعث افزایش مقاومت آنها در برابر جذب رطوبت می‌گردد. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب تغییرات جذب آب و واکسیدگی ضخامت نمونه‌ها را بر حسب مقادیر مختلف ذرات پرکننده نمایش می‌دهند.



شکل ۵- تاثیر مقادیر مختلف گرافن بر جذب آب نمونه‌ها



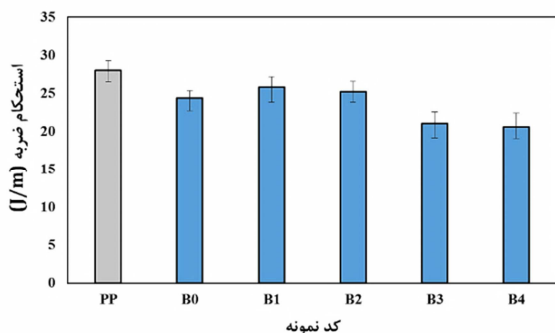
شکل ۶- تاثیر مقادیر مختلف گرافن بر واكسیدگی ضخامت نمونه‌ها

با توجه به طبیعت آبریز گرمانرم‌ها و به خصوص پلی‌پروپیلن، عدم جذب آب توسط نمونه پلی‌پروپیلن خالص قابل پیش بینی بود. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است نمونه پلی‌پروپیلن خالص رطوبتی را به خود جذب نکرده است در حالی که مقدار جذب آب توسط نمونه‌ی کنترل دارای ۳۰ درصد وزنی پودر چوب، ۱۵ درصد نسبت به همان نمونه، قبل از غوطه‌ور کردن آن در آب، افزایش یافت. بنابراین می‌توان گفت جذب آب به علت حضور پودر چوب در زمینه پلیمری می‌باشد. طبیعت آبدوست پودر طبیعی و همچنین وجود حفره‌های ریز در ناحیه‌ی بین فازی علت این افزایش است [۲۷، ۲۹]. با وجود ثابت بودن مقدار چوب در ۳۰ درصد وزنی برای نانو کامپوزیت‌ها، تغییر جذب آب

افزایش ۸/۹ درصد مدول الاستیک نانوکامپوزیت نسبت به نمونه‌ی کنترل و ۴۰/۳۶ درصد نسبت به پلی‌پروپیلن خالص شد. دلیل این افزایش در مدول کششی، حضور نانوذرات گرافن با مدول بسیار بالا در زمینه و کاهش تحرک پذیری زنجیره‌های مولکولی پلیمر توسط این ذرات می‌باشد که نتیجه آن کاهش تغییر شکل نمونه در محدوده الاستیک و افزایش مدول است [۲، ۳]. در مقادیر بالاتر گرافن (۱/۵ و ۲ درصد وزنی) تغییر چشمگیری در مدول الاستیک دیده نمی‌شود و تقریباً ثابت باقی می‌ماند که دلیل آن عدم پراکندگی کامل ذرات در زمینه و کلوخه‌ای شدن آنها می‌باشد.

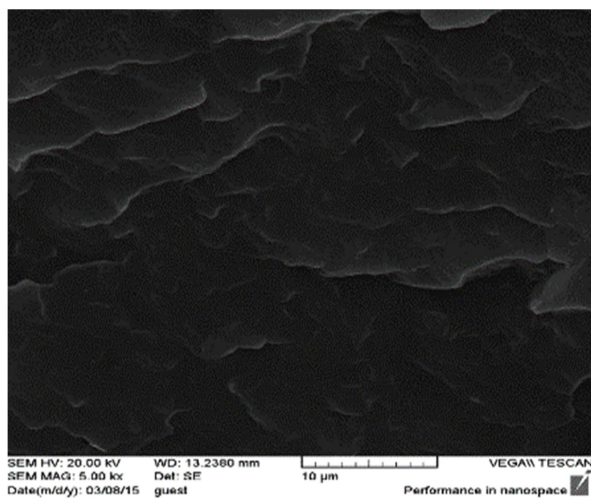
۳-۲- استحکام ضربه

استحکام ضربه، مقاومت در برابر شکست و شروع ترک در نقاط ضعیف کامپوزیت است که این نقاط اغلب محل اتصال مواد لیگنوسلولزی و زمینه پلیمری است که اندازه‌ی آن با مقدار انرژی تلف شده‌ی پاندول دستگاه آزمون ضربه هنگام شکستن نمونه مشخص می‌شود. شکل ۴ تغییرات استحکام ضربه نمونه‌ها را بر حسب مقادیر مختلف گرافن نمایش می‌دهد. با توجه به نمودار، اضافه کردن پودر چوب به پلی‌پروپیلن استحکام ضربه کاهش یافت. به طوری که نمونه‌ی کنترل، کاهش ۱۲/۸ درصد را نسبت به پلی‌پروپیلن خالص نشان می‌دهد. علت این امر، چسبندگی ضعیف در ناحیه اتصال ذرات چوب و پلیمر و به وجود آمدن نقاط تمرکز تنش در این ناحیه و در نتیجه ایجاد ترک در نانو کامپوزیت‌ها می‌باشد [۲۷].

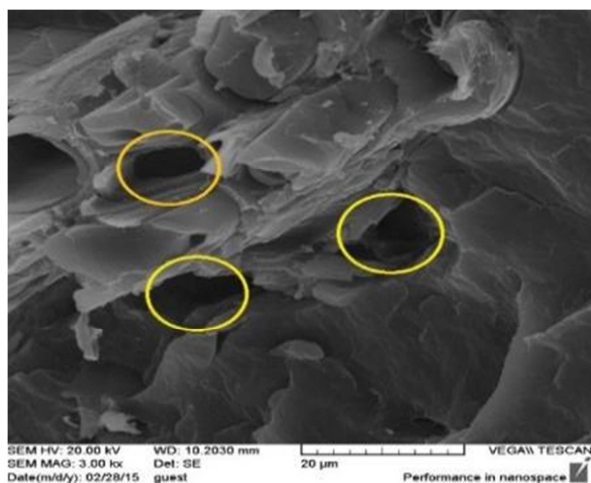


شکل ۴- تاثیر مقادیر مختلف گرافن بر استحکام ضربه‌ی نمونه‌ها

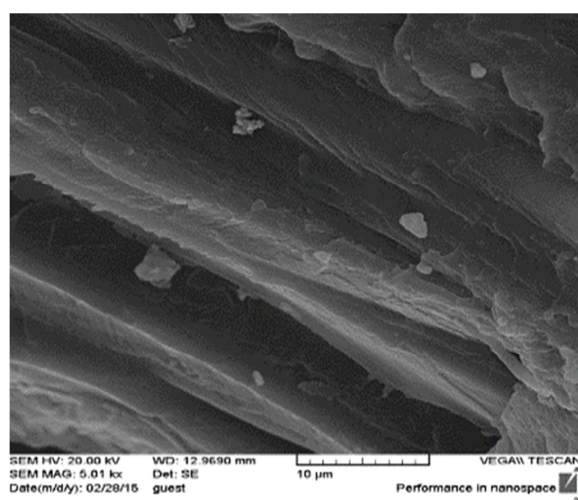
در هنگام آزمون ضربه، انتقال تنش از ماتریس به پرکننده، به خصوص در ناحیه سطح مشترک بسیار مهم می‌باشد. از آنجایی که ماهیت این دو ماده باهم متفاوت است، سطح مشترک قوی شکل نمی‌گیرد و انتقال تنش با مشکل مواجه می‌شود. لذا معمولاً در هنگام انجام این آزمون، ناحیه سطح مشترک به عنوان نقطه ضعف عمل می‌کند و نمی‌تواند تنش اعمالی را منتقل کند. از این رو باعث شکست ماده با نیروی کمتری می‌شود. نمونه‌ی B1 حاوی ۰/۵ درصد وزنی گرافن دارای ۵/۷ درصد استحکام ضربه بالاتری نسبت به نمونه‌ی کنترل است. دلیل افزایش استحکام ضربه با افزودن گرافن به نانو کامپوزیت‌ها را می‌توان این گونه توضیح داد که، ذرات گرافن در ابعاد نانو با پراکنده شدن در نانو کامپوزیت و قرار گرفتن در مسیر ترک‌ها باعث توقف ترک یا ایجاد انحراف در مسیر رشد ترک و در نتیجه اتلاف انرژی در ماده و در نهایت افزایش استحکام ضربه می‌شوند [۲۸]. در مقادیر بالاتر از ۰/۵ درصد وزنی



شکل ۷- تصویر گرفته شده بوسیله SEM از سطح شکست پلی پروپیلن خالص با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر



شکل ۸- تصویر گرفته شده بوسیله SEM از سطح شکست نمونه‌ی کنترل (B0) با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر



شکل ۹- تصویر گرفته شده بوسیله SEM از سطح شکست نمونه‌ی B2 با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر

بواسطه تغییرات مقدار ذرات گرافن می‌باشد. مشاهده می‌شود با اضافه کردن گرافن به کامپوزیت چوب-پلاستیک جذب آب ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. کمترین درصد جذب آب مربوط به نمونه‌ی B2 حاوی ۱ درصد وزنی گرافن می‌باشد. دلیل نخست برای این کاهش را می‌توان اینگونه بیان کرد که حضور گرافن موجب ایجاد موانع و پرپیچ و خم ساختن مجاری نفوذ آب شده و در نتیجه سرعت نفوذ آب در نانو کامپوزیت را کاهش می‌دهد. بر اساس مطالعات داس و همکاران [۳۰] آب ابتدا سلول‌های سطحی و مجاری موجود در پودر طبیعی را اشباع نموده و سپس حفره‌های موجود در نانوکامپوزیت را اشغال می‌کند. بنابراین دلیل دوم برای کاهش جذب آب، پر شدن حفره‌ها و مجاری موجود در پودر چوب به وسیله نانو ذرات گرافن و جلوگیری از نفوذ آب به بخش‌های عمیق کامپوزیت می‌باشد. دلیل سوم ماهیت آبگریز و دافع آب گرافن می‌باشد که به متوقف کردن رطوبت و جلوگیری از نفوذ آن به داخل نانوکامپوزیت‌ها تمایل دارد [۳، ۱۷، ۲۳، ۲۷]. برای مقادیر بیشتر از ۱ درصد وزنی گرافن، یعنی برای نمونه‌های B3 و B4، نمودار جذب آب روندی صعودی دارد. دلیل این افزایش در جذب آب، کلوخه‌ای شدن گرافن در زمینه که موجب ایجاد نواقص مختلفی در نانوکامپوزیت و عدم کارکرد مناسب ذرات گرافن در پرکردن حفره‌های ریز موجود در پودر چوب و همچنین در سطح مشترک پودر چوب و زمینه می‌شود. در نتیجه رطوبت می‌تواند در این حفره‌ها نفوذ کند. شکل ۱۰ این موضوع را نشان می‌دهد [۱۷].

شکل ۶ نمایشگر تغییرات ضخامت و اکسیدگی نانوکامپوزیت‌هاست. مشابه با نمودار جذب آب با افزایش پودر چوب به پلی پروپیلن ضخامت و اکسیدگی افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین ضخامت و اکسیدگی از میان تمامی نمونه‌ها مربوط به نمونه کنترل می‌باشد. سپس با افزودن گرافن به نانو کامپوزیت‌ها ضخامت و اکسیدگی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. نمونه دارای ۱ درصد وزنی گرافن کمترین اکسیدگی ضخامت را نشان می‌دهد. دلایل و مباحث بیان شده برای جذب آب را در مورد ضخامت و اکسیدگی نیز می‌توان ذکر کرد.

۴-۳- ریخت شناسی

تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌ها، پس آزمون کشش با مباحث مطرح شده در مورد خواص مکانیکی مطابقت دارد. شکل ۷ مربوط به پلی پروپیلن خالص بوده که دارای سطح شکست صاف و هموار و همگن می‌باشد.

شکل ۸ سطح شکست نمونه‌ی کنترل را نشان می‌دهد که حاوی ۳۰ درصد وزنی پودر چوب و بدون گرافن می‌باشد. حفره‌های متعدد موجود در سطح شکست، در اثر اعمال تنش بر نانو کامپوزیت‌ها و بیرون کشیده شدن پودر چوب از زمینه ایجاد شده است. چسبندگی ضعیف بین پلیمر و پودر چوب علت بروز این پدیده در نانوکامپوزیت می‌باشد که باعث کاهش خواص مکانیکی آن نیز می‌شود.

شکل ۹ سطح شکست نانوکامپوزیت B2 حاوی ۳۰ درصد وزنی پودر چوب و ۱ درصد وزنی گرافن را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سطح شکست نمونه هموار، یکنواخت و بدون حفره می‌باشد. وجود برهم کنش مناسب و چسبندگی خوب بین ماتریس و ذرات باعث اتصال قوی ذرات و زمینه شده و بنابراین هنگام اعمال بار جدایشی بین ذرات و زمینه به وجود نمی‌آید.

آزمون DSC روی نمونه پلی پروپیلن خالص، نمونه کنترل دارای ۳۰ درصد وزنی چوب و نمونه‌ی B1 دارای ۳۰ وزنی چوب و ۰٫۵ درصد وزنی گرافن را نمایش می‌دهد. دمای ذوب، دمای بلورینگی، آنتالپی ذوب و آنتالپی بلورینگی مستقیماً از منحنی‌های ثبت شده به وسیله دستگاه DSC استخراج شده و مقدار بلورینگی با استفاده از فرمول ۳ محاسبه شده است:

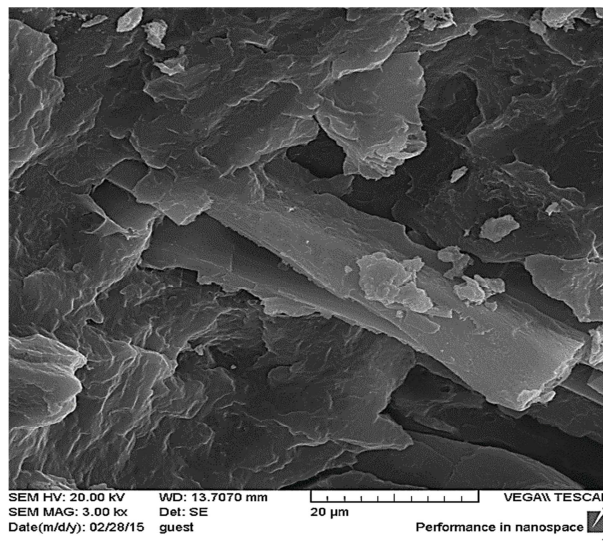
$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \times 100 \quad (3)$$

که در آن X_c مقدار بلورینگی بر حسب درصد، ΔH_0 آنتالپی ذوب برای پلی پروپیلن صد درصد بلوری که مقدار آن برابر ۲۰۹ J/g و θ کسر وزنی پلی پروپیلن در نانوکامپوزیت‌ها می‌باشد [۳۱].

با مقایسه نتایج بدست آمده و در نظر گرفتن بروز خطاهای احتمالی هنگام انجام آزمایش دیده می‌شود که با افزودن پودر چوب و گرافن به پلی پروپیلن تغییر قابل ملاحظه‌ای در دمای ذوب (T_m) نمونه‌ها ایجاد نمی‌شود. درحالی‌که دمای شروع بلورینگی (T_c) برای نمونه‌ی کنترل و نمونه‌ی B1 به ترتیب به اندازه‌ی ۳ °C و ۱۳٫۳ °C نسبت به پلی پروپیلن خالص افزایش یافت. همچنین مقدار بلورینگی (X_c) در نمونه‌ی کنترل ۱۱٫۵۴ درصد و در نمونه‌ی B1، ۱۸٫۳۴ درصد نسبت به پلی پروپیلن خالص افزایش یافت. دلیل این افزایش را می‌توان چنین بیان کرد که حضور پودر چوب و ذرات گرافن با قابلیت هسته زایی، در زمینه پلیمری به عنوان هسته‌های ناهمگون موجب تحریک تبلور زمینه می‌شوند و فرایند بلورینگی را تسریع و تسهیل می‌کنند. هرچه مقدار بلورینگی بیشتر باشد تعداد بلورهای تشکیل شده در زمینه بیشتر بوده که این بلورها همانند اتصالات عرضی عمل کرده و خواص مکانیکی نانو خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها را بهبود می‌بخشند. این موضوع با نتایج بدست آمده برای خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها که در بخش‌های قبلی مطرح شد مطابقت دارد [۳۲-۳۵].

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی برخی از خواص مکانیکی و فیزیکی و همچنین رفتار بلورینگی نانوکامپوزیت‌های چوب-پلاستیک-گرافن پرداخته شد و نتایج حاصل شده بدین شرح است:



شکل ۱۰- تصویر گرفته شده بوسیله SEM از سطح شکست نمونه‌ی B4 با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر

سطح شکست نانو کامپوزیت B4 دارای ۳۰ درصد وزنی چوب و ۲ درصد وزنی گرافن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به وضوح پدیده کلوخه‌ای شدن نانو ذرات گرافن که از خصوصیات این ماده است، مشاهده می‌شود. همان طور که دیده می‌شود، با اعمال بار بر نانوکامپوزیت، پودر چوب از زمینه بیرون کشیده شده است. این نشان می‌دهد که کلوخه‌های گرافن در زمینه، نه تنها باعث بهبود برهم کنش اجزای نانوکامپوزیت نمی‌شوند، بلکه خود همانند یک نقص عملکردی و باعث تشکیل حفره‌ها و عیوب متعدد در نانو کامپوزیت‌ها می‌شوند. این حفره‌ها و کلوخه‌ها نقش موثری در افزایش جذب آب نانوکامپوزیت‌ها و کاهش مقاومت مکانیکی آن‌ها دارند.

۳-۵- آنالیز حرارتی

خواص مکانیکی و پایداری گرمایی گرماترم‌های نیمه بلوری مانند پلی پروپیلن، بسیار به ساختار میکروسکوپی و بلورینگی آنها وابسته است. جدول ۲ نتایج بدست آمده از دومین گرمایش و اولین سرمایش چرخه

جدول ۲- نتایج به دست آمده از منحنی‌های مرحله اول سرمایش و مرحله دوم گرمایش آزمون DSC برای نمونه‌های PP، B0 و B1

کد نمونه	دمای ذوب (T_m) °C	آنتالپی ذوب (ΔH_m) J/g	دمای بلورینگی (T_c) °C	آنتالپی بلورینگی (ΔH_c) J/g	مقدار بلورینگی (X_c) (درصد)
PP	۱۶۷/۲	۹۶	۱۱۲/۶	۹۳/۵	۴۵/۹
B0	۱۶۸/۶	۷۵/۳	۱۱۵/۶	۷۷/۹۸	۵۱/۲
B1	۱۶۷/۳	۷۸/۹۱	۱۲۵/۳	۷۷/۳۳	۵۴/۳۲

- [۴] Mwaikambo L., and Ansell M., The effect of chemical treatment on the properties of hemp, sisal, jute and kapok fibres for composite reinforcement, *Die angewandte makromolekulare Chemie*, Vol. 272, No. 1, pp. 108-116, 1999 .
- [۵] Hosseinaei O., Wang S. Enayati, A. A., and Rials T. G., Effects of hemicellulose extraction on properties of wood flour and wood-plastic composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 4, pp. 686-694, 2012 .
- [۶] Ichazo M., Albano C., Gonzalez J., Perera R., and Candal M., Polypropylene/wood flour composites: treatments and properties, *Composite structures*, Vol. 54, No. 2, pp. 207-214, 2001 .
- [۷] Ashori A., Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!, *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 11, pp. 4661-4667, 2008 .
- [۸] Yeh S. K., Kim K. J., and Gupta R. K., Synergistic effect of coupling agents on polypropylene-based wood-plastic composites, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 127, No. 2, pp. 1047-1053, 2013 .
- [۹] Ghasemi I., Azizi H., and Naeimian N., Investigation of the dynamic mechanical behavior of polypropylene/(wood flour)/(kenaf fiber) hybrid composites, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, Vol. 15, No. 2, pp. 113-119, 2009 .
- [۱۰] Ghasemi I., Farsi M., Interfacial behaviour of wood plastic composite: effect of chemical treatment on wood fibres, *Iranian Polymer Journal*, Vol. 19, No. 10, pp. 811-818, 2010 .
- [۱۱] Faruk O., and Matuana L. M., Nanoclay reinforced HDPE as a matrix for wood-plastic composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2073-2077, 2008 .
- [۱۲] Ghasemi I., and Kord B., Long-term water absorption behaviour of polypropylene/wood flour/organoclay hybrid nanocomposite, *Iranian Polymer Journal*, Vol. 18, No. 9, pp. 683-691, 2009 .
- [۱۳] Ashori A., Effects of nanoparticles on the mechanical properties of rice straw/polypropylene composites, *Journal of Composite Materials*, pp. 0021998312437234, 2012 .
- [۱۴] Alzari V., Nuvoli D., Scognamiglio S., Piccinini M., Gioffredi E., Malucelli G., Marceddu S., Sechi M., Sanna V., and Mariani A., Graphene-containing thermoresponsive nanocomposite hydrogels of poly (N-isopropylacrylamide) prepared by frontal polymerization, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 21, No. 24, pp. 8727-8733, 2011 .
- [۱۵] Song P., Cao Z., Cai Y., Zhao L., Fang Z., and Fu S., Fabrication of exfoliated graphene-based polypropylene nanocomposites with enhanced mechanical and thermal properties, *Polymer*, Vol. 52, No. 18, pp. 4001-4010, 2011 .
- [۱۶] Potts J. R., Dreyer D. R., Bielawski C. W., and Ruoff R. S., "Graphene-based polymer nanocomposites, *Polymer*, Vol. 52, No. 1, pp. 5-25, 2011 .
- [۱۷] Chaharmahali M., Hamzeh Y., Ebrahimi G., Ashori A., and Ghasemi I., Effects of nano-graphene on the physico-mechanical properties of bagasse/polypropylene composites, *Polymer bulletin*, Vol. 71, No. 2, pp. 337-349, 2014 .
- [۱۸] An J. E., Jeon G. W., and Jeong Y. G., Preparation and properties of polypropylene nanocomposites reinforced with exfoliated graphene, *Fibers and Polymers*, Vol. 13, No. 4, pp. 507-514, 2012 .
- [۱۹] نوریخس امیر، مقایسه چهار ماده لیگنوسلولزی در تولید چندسازه چوب پلاستیک/ نانورس، فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، جلد ۲۷، شماره ۲، صفحه ۲۳۵-۲۵۵، ۱۳۹۱
- [۲۰] کرد بهزاد، بررسی تاثیر ذرات نانورس بر خواص مکانیکی کامپوزیت چوب پلاستیک حاصل از پلی اتیلن سنگین-آرد چوب، دوفصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، جلد ۲۵، شماره ۱، صفحه ۹۱-۱۰۱، ۱۳۹۱
- [۲۱] تسوجی محمد، نوریخس امیر، کارگر فرد ابوالفضل، حسینخانی حسین، اثر نوع ماده لیگنوسلولزی و نانورس بر خواص فیزیکی، مکانیکی و مورفولوژیکی چندسازه چوب
- افزودن گرافن به کامپوزیت چوب-پلاستیک باعث بهبود استحکام کششی آن شده و مقدار بیشینه‌ی آن در ۱ درصد وزنی مشاهده شد که به اندازه‌ی ۳۳/۴ درصد نسبت به نمونه کنترل افزایش یافت.
- بهبود مدول الاستیک نانوکامپوزیت‌ها در همه مقادیر وزنی گرافن نسبت به پلی‌پروپیلن خالص و نمونه‌ی کنترل مشاهده شد. بیشترین مقدار مدول الاستیک مربوط به نمونه‌ی دارای ۲ درصد وزنی گرافن بود که نسبت به پلی‌پروپیلن خالص ۴۰/۳۶ درصد و نسبت به نمونه‌ی کنترل ۸/۹ درصد افزایش نشان داد.
- استحکام ضربه‌ی نانوکامپوزیت‌ها نسبت به نمونه‌ی کنترل با افزودن ۰/۵ درصد وزنی گرافن، ۵/۷ درصد افزایش یافت.
- حضور ذرات گرافن در نانوکامپوزیت‌ها موجب افزایش پایداری ابعادی آنها شده و جذب آب و واکنشیدگی ضخامت نمونه‌ها با افزودن گرافن به کامپوزیت چوب-پلاستیک کاهش یافت که مقدار کمینه آنها در ۱ درصد وزنی گرافن مشاهده شد.
- تصاویر SEM نشان داد حضور گرافن در نانو کامپوزیت تا ۱ درصد وزنی باعث برهم کنش بین فازهای خوب و سطح شکست هموار و بدون حفره و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی می‌شود.
- پدیده کلوخه شدن نانوذرات گرافن در درصدهای بالاتر از ۱/۵ درصد وزنی اتفاق افتاد که موجب کاهش خواص مکانیکی و فیزیکی نانوکامپوزیت‌ها شد.
- پودر چوب به دلیل هسته‌زایی دمای بلورینگی پلی‌پروپیلن خالص را به اندازه‌ی ۳ °C و مقدار بلورینگی آن را ۵/۳ درصد افزایش داد.
- نمونه‌ی حاوی ۰/۵ درصد وزنی گرافن در مقایسه با نمونه‌ی کنترل دمای بلورینگی و مقدار بلورینگی را به ترتیب به اندازه‌ی ۹/۷ °C و ۳/۱۲ درصد و در مقایسه با پلی‌پروپیلن خالص ۱۲/۷ °C و ۸/۴۲ درصد افزایش داد.
- با توجه به بهبود قابل توجه تمامی خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌ها در درصدهای وزنی پایین گرافن، استفاده از این ماده، به ویژه هنگامی که هدف اصلی، افزایش استحکام و مدول کششی باشد، از لحاظ اقتصادی کاملاً مقرون به صرفه است.

۵- مراجع

- [۱] Tajvidi M., Static and dynamic mechanical properties of a kenaf fiber-wood flour/polypropylene hybrid composite, *Journal of applied polymer science*, Vol. 98, No. 2, pp. 665-672, 2005 .
- [۲] Lei B., Zhang Y., He Y., Xie Y., Xu B., Lin Z., Huang L., Tan S., Wang M., and Cai X., Preparation and characterization of wood-plastic composite reinforced by graphitic carbon nitride, *Materials & Design*, Vol. 66, pp. 103-109, 2015 .
- [۳] Sheshmani, S. Ashori A., and Fashapoyeh M. A., Wood plastic composite using graphene nanoplatelets, *International journal of biological macromolecules*, Vol. 58, pp. 1-6, 2013 .

- پلاستیک، فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، جلد ۲۷، شماره ۲، صفحه ۱۸۹-۲۰۱، ۱۳۹۱
- [۲۲] آشنای قاسمی فرامرز، قاسمی اسماعیل، بصیری مهدی، تحلیل تجربی خواص مکانیکی پلی پروپیلن در حضور نانو صفحات گرافن و پلی اولفین الاستومر در زمان های ساخت متفاوت، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۵، شماره ۱۱، صفحه ۲۲۵-۲۳۲، بهمن ۱۳۹۴
- [۲۳] Kordkheili H. Y., Farsi M., and Rezazadeh Z., Physical, mechanical and morphological properties of polymer composites manufactured from carbon nanotubes and wood flour, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 44, No. 1, pp. 750-755, 2013 .
- [۲۴] Oksman K., and Clemons C., Mechanical properties polypropylene-wood, *Journal of applied polymer science*, Vol. 67, pp. 1503-1513, 1998 .
- [۲۵] Zhao X., Zhang Q., Chen D., and Lu P., Enhanced mechanical properties of graphene-based poly (vinyl alcohol) composites, *Macromolecules*, Vol. 43, No. 5, pp. 2357-2363, 2010 .
- [۲۶] منبری سامان، آشنای قاسمی فرامرز، قاسمی اسماعیل، مقایسه خواص مکانیکی نانوکامپوزیت هیبریدی پلی پروپیلن/تالک/گرافن و نانو کامپوزیت دوتایی پلی پروپیلن/گرافن"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۵، شماره ۷، صفحه ۳۲۹-۳۳۵، مهر ۱۳۹۴
- [۲۷] Ashori A., Sheshmani S., and Farhani F., "Preparation and characterization of bagasse/HDPE composites using multi-walled carbon nanotubes", *Carbohydrate polymers*, Vol. 92, No. 1, pp. 865-871, 2013 .
- [۲۸] شکریه محمود، احمدی جنیدی وهاب، "ساخت و مشخصه سازی آزمایشی نانوکامپوزیت گرافن/پلی پروپیلن"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۱۱، صفحه ۵۵-۶۳، بهمن ۱۳۹۲
- [۲۹] Deka B., and Maji T., "Study on the properties of nanocomposite based on high density polyethylene, polypropylene, polyvinyl chloride and wood", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 6, pp. 686-693, 2011 .
- [۳۰] Das S., Saha A., Choudhury P., Basak R., Mitra B., Todd T., Lang S., and Rowell R., "Effect of steam pretreatment of jute fiber on dimensional stability of jute composite", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 76, No. 11, pp. 1652-1661, 2000 .
- [۳۱] Li Y., Zhu J., Wei S., Ryu J., Sun L., and Guo Z., "Poly (propylene)/graphene nanoplatelet nanocomposites: melt rheological behavior and thermal, electrical, and electronic properties", *Macromolecular Chemistry and Physics*, Vol. 212, No. 18, pp. 1951-1959, 2011 .
- [۳۲] احسانی زنوز، جواد، منتخبی کلجاهی سعید، شلش نژاد کریم، "مطالعه تجربی خواص مکانیکی، رفتار حرارتی و جذب آب در نانو کامپوزیت های پلی پروپیلن-الیاف چوب-کرینات کلسیم"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۲، صفحه ۷۰-۷۸، اردیبهشت ۱۳۹۲
- [۳۳] Lin Z., and Renneckar S., "Nanocomposite-based lignocellulosic fibers 2: layer-by-layer modification of wood fibers for reinforcement in thermoplastic composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 1, pp. 84-91, 2011 .
- [۳۴] Hristov V., and Vasileva S. , "Dynamic mechanical and thermal properties of modified poly (propylene) wood fiber composites", *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 288, No. 10, pp. 798-806, 2003 .
- [۳۵] El Achaby M., Arrakhiz F. E., Vaudreuil S., el Kacem Qaiss A., Bousmina M. , and Fassi-Fehri O., "Mechanical, thermal, and rheological properties of graphene-based polypropylene nanocomposites prepared by melt mixing", *Polymer Composites*, Vol. 33, No. 5, pp. 733-744, 2012 .