

تأثیر نانورس بر روی خواص مکانیکی و پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های PVC انعطاف‌پذیر به منظور استفاده در روکش لوله‌های نفت و گاز

مهدی کیانی، ولی پروانه*، محمد عباسی و علی دادرسی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴

چکیده

در این مقاله، استحکام مکانیکی و پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های پی وی سی/نانورس به منظور استفاده در روکش‌های لوله‌های پلیمری نفت و گاز مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از سه نوع نانورس مختلف کلوزیت ۱۰، کلوزیت Na^+ و کلوزیت ۲۰ تا حداکثر سطح بارگذاری ۵ phr استفاده شده است. فرآیند اختلاط توسط دو روش میکسر مکانیکی و همگن‌سازی با سرعت بالا با دو فرمولاسیون مختلف برای تولید دو نوع نانوکامپوزیت پی وی سی سفید و شفاف بصورت جداگانه انجام شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از پراش اشعه ایکس با زاویه دید گسترده WAXD و همچنین میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM برای مشخصه‌یابی ساختار استفاده شده است. پایداری حرارتی نمونه‌های نانوکامپوزیت پی وی سی با استفاده از یک آون Metrastat PLC مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. با افزایش بارگذاری نانورس تا ۵ phr مقدار دمای انتقال شیشه‌ای برای نمونه‌های سفید و شفاف به ترتیب ۵۸٪ و ۳۵٪ افزایش یافته و مقاومت نمونه‌های نانوکامپوزیتی نسبت به تغییر رنگ بیشتر شده است. در ادامه خواص مکانیکی نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولیدی توسط آزمایش‌های استاندارد تحت تست کشش قرار گرفته و مقادیر مدول یانگ و درصد کشیدگی تا نقطه شکست بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش همگن‌سازی با سرعت بالا در حدود ۹۰۰۰ rpm در فرآیند اختلاط بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های نانوکامپوزیتی بخصوص از بارگذاری نانورس ۱ phr به بالا بسیار تأثیرگذار است بطوریکه در بهترین حالت با افزودن ۵ phr نانورس کلوزیت ۱۰ به زمینه پی وی سی مقدار مدول یانگ برای نمونه‌های سفید و شفاف به ترتیب ۲۲٪ و ۱۲٪ افزایش داشته است.

واژه‌های کلیدی: پی وی سی، نانوکامپوزیت، نانورس، خواص مکانیکی، پایداری حرارتی.

۱- مقدمه

گاز و نفت استفاده می‌شوند. اما هزینه بالای نگهداری این لوله‌ها در مقابل خوردگی و نیاز به تعویض آن‌ها به مرور زمان، از معایب لوله‌های فولادی به شمار می‌رود. در تلاش‌های بسیاری برای استفاده از لوله‌های پلیمری و

لوله‌های فولادی به علت استحکام مکانیکی و حرارتی بالا و همچنین قیمت پایین در ساخت، سال‌هاست که برای انتقال

* عهده‌دار مکاتبات: ولی پروانه

نشانی: گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود

تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۲۸۴، دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۵۳۸، پست الکترونیکی: vali.parvaneh@gmail.com

اتلاف در بارگذاری‌های بالاتر نرم کننده بیشتر است زیرا ماتریس پلیمر بیشتر مستعد به فرار از سطح می‌باشد. در صنعت بطور مداوم از دو دسته نرم کننده، به اصطلاح مونومری و پلیمری استفاده می‌شود. علاوه بر سازگاری پی وی سی با نرم کننده، وزن و ساختار مولکولی نرم کننده نقش اساسی در پیوند نرم کننده دارد. نرم کننده‌های مونومری دارای وزن مولکولی کم و کم هزینه هستند. نرم کننده‌های مونومری صنعتی معمول دارای وزن مولکولی در محدوده ۵۰۰-۳۰۰ هستند [۵]. نرم کننده‌های فتالات دی ایزوپتیل فتالات (DIHP)، دی آمونیل فتالات (DINP) و دیوکتیل فتالات (DOP) برخی از مواردی هستند که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. نرم کننده‌های پلیمری دارای وزن مولکولی در محدوده ۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰ هستند که اتلاف کمتری را در ترکیب با سایر پلیمرها از خود نشان می‌دهند [۱۰]. همچنین نتیجه محققان نشان می‌دهد که نرم کننده‌های با ساختارهای منشعب و پیچیده‌تر، ماندگاری بهتری نسبت به ساختارهای خطی دارند.

در سال‌های اخیر، تلاش‌های تحقیقاتی بیشتری بر روی نانورس MMT به دلیل داشتن نسبت سطح به حجم بالا، پایداری شیمیایی و حرارتی مناسب، هزینه کم و سهولت در ترکیب شدن با پلیمرها، متمرکز شده است [۱۱-۱۳]. محققان اظهار داشتند که به دلیل ماهیت آب دوست MMT طبیعی نمی‌تواند به درستی در پلیمرهای آبرگریز پخش شود [۱۱]. به منظور حل این مسئله، رس‌های OMMT تولید شدند، بطوریکه MMT با آلکیل آمونیوم چهار واحدی یا سایر کاتیون‌های آلی اصلاح می‌شوند [۱۴]. یون‌های آمونیوم چهار واحدی به علت آبرگریزی به نانورس اجازه می‌دهند تا با حلال‌های آلی و پلیمرهای آبرگریز سازگار شوند [۱۵]. محققان انواع مختلف MMT و OMMT و تأثیر آنها بر روی پایداری حرارتی پلیمرها را مطالعه کردند [۱۱]. پایداری حرارتی برای ساخت ترکیبات پی وی سی اهمیت فراوانی دارد [۱۶]. هنگام انتخاب نانورس مناسب برای حفظ پایداری گرمایی، باید تأثیر آن بر شرایط فرآیند در نظر گرفته شود

کامپوزیتی به عنوان جایگزین برای لوله‌های فولادی صورت گرفته است اما مشکل اساسی این لوله‌ها مقاومت مکانیکی و حرارتی آنهاست. در سال‌های اخیر، جامعه کامپوزیت بطور گسترده‌ای نانورس اصلاح شده ارگانیک مانند مونتموریلونیت (MMT) را با تقویت آن در پلیمرها مورد بررسی قرار داده است [۴-۱]. توانایی خلق ویژگی‌های مختلف با ترکیب پرکننده‌های مختلف، دامنه کاربرد نانو کامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد و برهمکنش مولکولی قوی بین رزین پلیمری و نانو پرکننده باعث بهبود خواص حرارتی، مکانیکی و فیزیکی نانو کامپوزیت‌ها می‌شود. نانو کامپوزیت‌های پلیمری کاربرد خود را در بخش‌های مختلف پیدا کرده‌اند و نانو کامپوزیت‌های حاوی نانورس بطور خاص در کاربردهای مقاومت در برابر آتش استفاده می‌شوند [۵]. طیف گسترده‌ای از نانو کامپوزیت‌های پلیمر/نانورس توسط محققان مختلف تاکنون مورد مطالعه قرار گرفته است. لسزاینسکاو و همکاران اثر افزودن نانورس MMT به چندین پلیمر ترموپلاستیک و ترموست مختلف از جمله پلی آلفین، پلی آمید، پلی استر، اپوکسی، پلی متیل متاکریلات و پی وی سی را مطالعه کردند [۶،۷]. بطور کلی این محققان گزارش داده‌اند که نوع نانورس به دلیل برهمکنش‌های متفاوت، باید با دقت برای هر پلیمر انتخاب شود. آن‌ها همچنین اظهار داشتند که میزان بهبود عملکرد نانو کامپوزیت بسیار تحت تأثیر میزان پراکندگی نانورس است. ری و او کاموتو نیز پلیمرهای مختلفی را که برای تهیه نانو کامپوزیت‌های پلیمر/نانورس استفاده می‌شوند را بررسی کردند [۸]. تاکنون محققان به این نتیجه رسیده‌اند که نرم کننده‌ها تمایل به واکنش با پی وی سی انعطاف‌پذیر را ندارند. ویلکس و همکاران تعاملات میان پی وی سی و نرم کننده را شرح دادند و نشان دادند که نرم کننده و پی وی سی سازگار هستند اما نرم کننده قادر به اتصال شیمیایی به مولکول پی وی سی نیست [۹]. استارک و همکاران نشان دادند که میزان اتلاف نرم کننده در پی وی سی تابعی از بارگذاری اولیه نرم کننده در پی وی سی است [۱۰]. میزان

آن‌ها نشان می‌دهد که با افزودن مقادیر نانوذرات CuO (۰/۳ درصد وزنی) و MMT (۴/۷٪) می‌تواند ثبات حرارتی نانوکامپوزیت‌ها را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. ایزدپناه و همکاران نانوکامپوزیت‌های بر پایه PVC حاوی نانورس‌های C30B و C15A را با استفاده از روش ترکیب محلول و پیوند متقاطع توسط غوطه‌ورسازی در آب گرم تهیه کردند [۱۹]. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوکامپوزیت حاوی C30B به دلیل پراکندگی خوب نسبت به C15A و قابلیت واکنش گروه‌های اصلاح کننده CH₂CH₂OH، در بین همه نمونه‌ها کمترین میزان مصرف را داشته است. افزایش خواص مکانیکی NBR/PVC با استفاده از عمل‌آوری گوگرد و پرتو الکترونی در حضور نانورس کلوزیت 30B توسط راد و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [۲۰]. آن‌ها نشان دادند که با افزودن نانورس کلوزیت 30B در محدوده وزنی ۳ تا ۸ درصد به نانوکامپوزیت NBR/PVC هیچ تاثیری بر حداقل و حداکثر گشتاورها در منحنی رثومتر ندارد. مطالعات آن‌ها نشان داد که زمان سوزاندن و زمان پخت مطلوب با افزودن ۵٪ نانورس به نانوکامپوزیت NBR/PVC به دلیل اثر شتاب نانورس افزایش می‌یابد. همچنین در ترکیباتی با ۸٪ وزنی نانورس، به دلیل جذب دی سولفید مرکاپتو بنزوتیازول توسط نانورس زمان سوزاندن و پخت بهینه افزایش می‌یابد و نرخ پخت کاهش می‌یابد. برقامدی و همکاران اثرات دو نانوذره (نانورس MMT و نانوپلاکت گرافن) را بر روی رفتار پخت و خواص رئولوژیکی و همچنین خواص مکانیکی ترکیب NBR/PVC با دو سطح از گروه‌های آکریلونیتریل در فاز لاستیکی مورد بررسی قرار دادند [۲۱]. آن‌ها توانستند استحکام کششی نهایی، مدول یانگ و سختی نانوکامپوزیت را با استفاده از مقدار یکسان ۱/۵ phr از هر دو نانوذره گرافن و نانورس به ترتیب ۳۳/۵، ۳۷/۴ و ۶/۶٪ افزایش دهند. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که با افزودن نانوپلاکت گرافن در ترکیب، زمان پخت بهینه افزایش می‌یابد، در حالی که افزودن نانوذرات رس نتیجه معکوس را نشان می‌دهد.

[۱۷]. برخی از فرآیندهای اختلاط باعث ایجاد درجه حرارت و نیروهای برشی بالا شوند که می‌تواند منجر به تخریب نابهنگام پلیمر پی وی سی شود. پاگاج و پیلچوفسکی ساختار شیمیایی نانوذرات متداول OMMT را که در تحقیقات مختلف استفاده شده بود را بررسی کردند [۱۱]. آن‌ها نمک‌های مختلفی از آنیوم را که برای اصلاح نانورس استفاده می‌شود و طرز تهیه آن‌ها را شرح دادند. بندرلی و همکاران ترکیب مذاب نانورس‌های هکتوریت و بنتونیت را در پی وی سی مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. برای انجام فرآیند، آن‌ها اثر نانورس ترکیب شده با نرم کننده را بر روی پراکندگی نهایی در نانوکامپوزیت بررسی کردند. آن‌ها همچنین خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و خواص مقاومت در مقابل آتش را بدست آوردند. نرم کننده مورد استفاده در تحقیق آن‌ها دی ایزودسیل فتالات (DIDP) بود و نانورس‌های بنتونیت و هکتوریت با استفاده از تری اتانول آمونیم به صورت آلی اصلاح شده بودند. آن‌ها ادعا کردند که این اصلاح کننده آلی جدید ثبات حرارتی بهتری را در پی وی سی نسبت به سایر اصلاح کننده‌هایی که قبلاً مطالعه شده بودند، فراهم می‌کند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پیش پراکندگی نانورس در نرم کننده، درجه بالاتری از پراکندگی در ماتریس پی وی سی را فراهم می‌کند که منجر به عملکرد بهتر نانوکامپوزیت می‌شود. همچنین نشان داده شد که نانورس هکتوریت عملکرد بهتری برای پایداری حرارتی نسبت به نانورس بنتونیت دارد. هر دو نوع نانورس بکار گرفته توسط آن‌ها باعث بهبود مقاومت در برابر آتش، مقاومت مکانیکی و خواص حفاظتی شدند. رانی و همکاران از نانوذرات MMT و نانوذرات اکسید مس برای تهیه فیلم‌های نانوکامپوزیت قابل انعطاف بر پایه PVC به روش ریخته‌گری حلال استفاده کردند [۱۸]. مطالعات آن‌ها نشان داد که با افزودن نانو پرکننده‌های دو گانه در ماتریس پلیمری، برخی تغییرات و اصلاحات ساختاری به دلیل پراکندگی همگن نانوذرات در ماتریس PVC رخ می‌دهد. نتایج TGA توسط

وی سی سفید و شفاف بکار گرفته شده است و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از پراش اشعه ایکس با زاویه دید گسترده WAXD و همچنین میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM برای مشخصه‌یابی ساختار استفاده شده است. پایداری حرارتی نمونه‌های نانو کامپوزیت پی وی سی با استفاده از یک آون Metrastat PLC مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. در نهایت خواص مکانیکی نمونه‌های آماده شده توسط دستگاه تست کشش و مطابق با استانداردهای ASTM بدست آمده است.

۲- فعالیت‌های تجربی

فیلم PVC سفید با استفاده از یک رزین هموپلیمر K-75 ساخته شده است. مقدار K یک معیار اندازه‌گیری ویسکوزیته است که مربوط به وزن مولکولی رزین می‌باشد [۲۵]. مقدار بالاتر K نشان دهنده وزن مولکولی بالاتر است. سازندگان PVC با استفاده از یک فرآیند پلیمریزاسیون امولسیون، رزین‌های با گرید پراکندگی را تولید می‌کنند که باعث تولید PVC در اندازه ذرات بسیار ریز می‌شود. این نوع رزین‌ها معمولاً به دلیل اندازه ذرات نسبتاً کوچک، که در محدوده $0.2-4 \mu\text{m}$ متغیر است، برای کاربردهای فیلم نازک استفاده می‌شوند [۹]. نرم کننده مورد استفاده از نوع پلیمری و بر پایه اسید آدیپیک با وزن مولکولی حدود 8500 g/mol بود. دو تثبیت کننده برای محافظت در برابر اشعه ماورا بنفش و پایداری حرارتی اضافه شده است. تثبیت کننده اشعه ماورا بنفش از نوع بنزوفنون بوده و تثبیت کننده حرارتی بر پایه کلسیم-روی است. برای ایجاد رنگ و کدری، رنگدانه دی اکسید تیتانیوم اضافه شده است. دی اکسید تیتانیوم به صورت خمیر مایع از قبل در نرم کننده و حلال پراکنده شده است. از یک حلال هیدروکربن معطر متشکل از مولکول‌های C8-C10 و نقطه جوش 150°C برای پراکندگی PVC و کاهش ویسکوزیته استفاده شده است تا فیلم بتواند به درستی ریخته‌گری شود. سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت: کلوزیت ۱۰، کلوزیت Na^+ و کلوزیت ۲۰. کلوزیت ۱۰ و

اکثر تحقیقات گذشته به دلیل سادگی و اثربخشی آن‌ها بر روی روش‌های ترکیب مذاب متمرکز بوده است. محققان روش‌های مختلف ترکیب مذاب و تأثیر آن بر روی ساختارهای نانو کامپوزیت را مطالعه کردند [۲۲، ۲۳]. کالندووا و همکاران از رزین پی وی سی سوسپانسیون به همراه کلوزیت Na^+ و کلوزیت 30B استفاده کردند [۲۲]. آن‌ها همچنین اثر وزن مولکولی نرم کننده را بر روی پراکندگی نانورس ارزیابی کردند. آن‌ها تشخیص دادند که وزن مولکولی عامل مهمی در میزان زنجیره‌سازی پلیمر در میان لایه‌های رس است. آن‌ها همچنین دریافتند که سرعت کمتر ماردون در اکسترودر باعث پراکندگی بهتر نانورس می‌شود. محققان دیگر نیز اثر روش‌های اختلاط و پراکندگی نانورس در نرم کننده در هنگام تولید نانو کامپوزیت‌های پی وی سی را ارزیابی کردند [۲۴]. آن‌ها همچنین اثر نرم کننده‌های مختلف را بر پراکندگی نانورس مطالعه کردند و دو روش اختلاط التراسونیک و اختلاط مکانیکی را پیشنهاد دادند. آن‌ها دریافتند که پراکندگی نانورس در نرم کننده باعث عملکرد بهتر محصول کامپوزیت نهایی می‌شود. نتایج پیشین وانگ و همکاران نیز با این نتایج مطابقت دارد [۱۷]. آن‌ها با استفاده از XRD و TEM نشان دادند که نرم کننده DOP به تنهایی می‌تواند در نانورس اینترکالیشن کند. آن‌ها همچنین شواهدی بر قابلیت برگشت پذیری اینترکالیشن DOP بدست آوردند.

در این مقاله تاثیر سه نوع نانورس مختلف کلوزیت ۱۰، کلوزیت Na^+ و کلوزیت ۲۰ بر روی تقویت خواص مکانیکی و حرارتی پلیمر پی وی سی انعطاف پذیر مورد مطالعه قرار گرفته شده است. همچنین تاثیر بارگذارهای مختلف نانورس (0.5 ، 1 ، 3 و 5 phr) در زمینه پی وی سی مورد بررسی قرار گرفته است. فرآیند تولید نانو کامپوزیت می‌تواند به مقدار زیادی خواص نهایی آن را تحت تاثیر قرار دهد، بنابراین برای این منظور دو نوع روش اختلاط مکانیکی و همگن سازی با سرعت بالا برای ترکیب نانوذرات رس در ماتریس پی وی سی با دو نوع مختلف فرمولاسیون برای پی

رزین پی وی سی، نرم کننده و حلال مورد استفاده برای فرمولاسیون‌های شفاف مشابه موارد ذکر شده در جدول ۱ می‌باشد که برای فرمولاسیون فیلم‌های سفید است. به دلیل عدم وجود دی اکسید تیتانیوم در نمونه‌های شفاف، برای فرمولاسیون‌های شفاف سطح بالاتری از تثبیت کننده مورد نیاز است. برای تثبیت حرارتی، معمولاً از تثبیت کننده‌های فلزی ترکیبی در کاربردهای پی وی سی انعطاف پذیر استفاده می‌شود. این تثبیت کننده‌ها در ترکیب با سایر تثبیت کننده‌ها برای بهبود ثبات کلی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فرمول فیلم شفاف پی وی سی از یک تثبیت کننده باریم-روی در ترکیب با اپوکسی استر و تثبیت کننده‌های فسفیت استفاده شده است. اطلاعات مربوط به فیلم شفاف در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به فیلم پی وی سی شفاف.

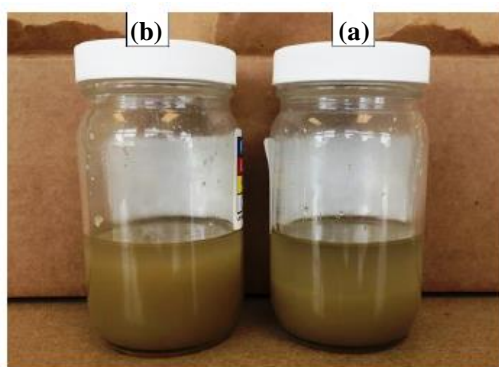
مواد بر حسب phr	مجموعه اول				مجموعه دوم			
	رزین پی وی سی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
نرم کننده	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
حلال	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
تثبیت کننده فسفیت	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
تثبیت کننده اپوکسید	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
تثبیت کننده باریم-روی	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
کلوزیت ۱۰	۰/۵	۱	۳	۵	۰/۵	۱	۳	۵
کلوزیت Na ⁺	۰/۵	۱	۳	۵	*	*	*	*
کلوزیت ۲۰	۰/۵	۱	۳	۵	*	*	*	*

کلوزیت ۲۰ به صورت ارگانیک توسط ترکیبات آمونیوم چهار واحدی اصلاح شده‌اند. کلوزیت ۱۰ با نمک دی متیل بنزیل (پیه آلکیل هیدروژنه) و کلوزیت ۲۰ با نمک دی متیل بیس (پیه آلکیل هیدروژنه) اصلاح شد. همچنین، کلوزیت Na⁺ نانوذرات سدیم بدون اصلاح استفاده شدند. مواد در مجموعه اول فرمولاسیون با استفاده از یک میکسر مکانیکی مخلوط شدند. برای هر ۳ نوع نانورس، مقادیر بصورت ۱، ۳، ۵ و ۱۰ phr بارگذاری شدند. معمولاً مهندسان طراح ترکیبات PVC از phr به عنوان واحدی برای بیان غلظت اجزای مختلف فرمول استفاده می‌کنند. phr مقدار افزودنی‌ها را در هر ۱۰۰ واحد پلیمر پایه بیان می‌کند. در این مقاله نیز معیار مصرف برحسب ۱۰۰ واحد PVC یعنی phr تنظیم شده است. مجموعه دوم فرمولاسیون با استفاده از یک فرآیند اختلاط ۲ مرحله‌ای آماده شد که به آن یک مرحله همگن‌سازی با سرعت بالا نیز علاوه بر مجموعه اول اضافه شده بود. برای مجموعه دوم فقط از کلوزیت ۱۰ با سطح بارگذاری ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ phr استفاده شده است. اطلاعات مربوط به مقادیر و مواد اولیه در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به فیلم پی وی سی سفید.

مواد بر حسب phr	مجموعه اول			مجموعه دوم		
	رزین پی وی سی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
نرم کننده	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
حلال	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵
TiO ₂	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵
تثبیت کننده حرارتی	۱	۱	۱	۱	۱	۱
کلوزیت ۱۰	۱	۳	۵	۱	۳	۵
کلوزیت Na ⁺	۱	۳	۵	*	*	*
کلوزیت ۲۰	۱	۳	۵	*	*	*

ریخته شدند. ضخامت با استفاده از یک میکرومتر در هر دو انتها تنظیم شد تا ضخامت نهایی فیلم خشک $50 \mu\text{m}$ باشد. نمونه‌های پوشش داده شده تقریباً دارای 300 mm میلی‌متر عرض و 250 mm طول بودند. سپس ورق‌های نمونه برش داده شده و در یک خشک کن در دمای 180°C به مدت ۲ دقیقه خشک شدند. این دما برای از بین بردن حلال و ذوب پی وی سی انتخاب شد. بعد از آن نمونه‌ها در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند.



شکل ۱: تصویر مخلوط نانورس کلوزیت ۱۰ با استفاده از (a) همزن مکانیکی (b) همزن مکانیکی و هموژنایزر.

۳- نتایج و بحث

ساختار نانوکامپوزیت پی وی سی/نانورس در ابتدا با استفاده از WAXD مورد مطالعه قرار گرفت. پودر نانورس کلوزیت ۲۰ ابتدا در محدوده $2\theta = 0-30^\circ$ درجه اسکن شد. در ادامه، پودر نانورس برای دستیابی به وضوح بهتری از پیک اولیه در محدوده $2\theta = 0-10^\circ$ درجه اسکن شد. نقطه اوج اولیه در $2\theta = 2/17^\circ$ رخ داد که مربوط به فاصله d معادل $3/17 \text{ nm}$ است.

XRD با ارزیابی میزان گسترش ناشی از ورود پلیمر به فضای لایه‌ای نانورس، محاسبه فاصله d میان ساختارهای درهم تنیده را امکان‌پذیر می‌سازد. سه حالت ممکن است ایجاد شود: یا هیچ تغییری در فاصله d ایجاد نمی‌شود و قله $d001$ نانورس حفظ می‌شود که نشان دهنده عدم پراکندگی یا ساختار میکروکامپوزیت است و یا قله مشاهده می‌شود اما به مقادیر

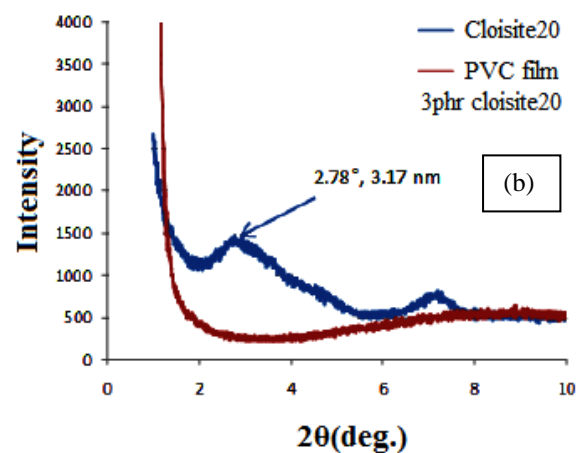
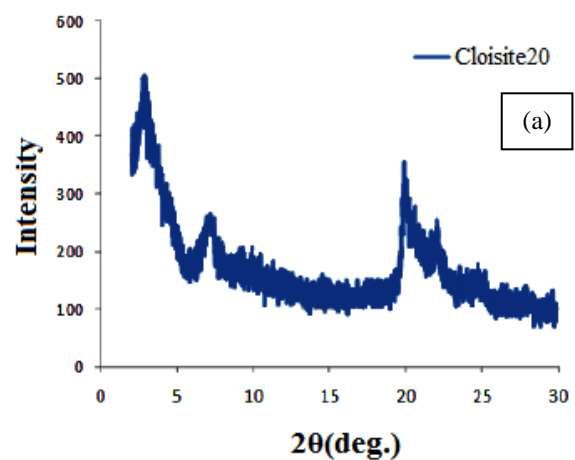
نانورس قبل از اختلاط به مدت ۲ ساعت در دمای 45°C خشک شد تا رطوبت قبل از مخلوط شدن از بین برود. نرم کننده از قبل با حلال‌ها مخلوط شده تا ویسکوزیته را کاهش دهد. پیش‌بینی می‌شد که ویسکوزیته پایین باعث پراکندگی بهتر نانورس شود. اختلاط اولیه با استفاده از یک همزن مکانیکی با پروانه‌های گاوی شکل با قطر $1/5 \text{ in}$ با سرعت 350 rpm دور در دقیقه انجام شد. برخی از ترکیبات نانورس در طول اختلاط اولیه مشاهده شد. این نشان می‌دهد که نانورس به درستی در مواد پراکنده نشده است. میکسر اولتراسونیک و هموژنایزر با سرعت بالا هر دو پس از اختلاط اولیه به عنوان گزینه‌هایی برای بهبود پراکندگی نانوذرات مورد ارزیابی قرار گرفتند. هموژنایزر به دلیل کارایی بهتر در پراکندگی در مدت زمان کوتاه‌تر انتخاب شد. میکسر اولتراسونیک به دلیل ویسکوزیته نسبتاً زیاد مخلوط قادر به تجزیه ترکیبات نانورس در مدت زمان معقولی نبود. بنابراین استفاده از هموژنایزر با سرعت بالا حدود 9000 rpm در مرحله دوم فرآیند اختلاط اضافه شد.

شکل ۱ مقایسه مخلوط‌های بدست آمده توسط دو روش مختلف اختلاط را نشان می‌دهد. این مخلوط حاوی نرم کننده، حلال و نانوذرات می‌باشد. نمونه نشان داده شده در شکل ۱b فقط با همزن مکانیکی مخلوط شده است، در حالی که نمونه نشان داده شده در شکل ۱a علاوه بر همزن مکانیکی توسط هموژنایزر نیز مخلوط شده است. نمونه‌ای که با استفاده از هموژنایزر مخلوط شده بود با گذشت زمان رسوب کمتری را نشان داد. پس از اتمام اختلاط، تمام نمونه‌ها از یک فیلتر مخروطی شکل متوسط عبور داده شدند. از فیلتر برای غربال کردن توده‌های بزرگ پی وی سی که در کناره‌های ظرف مخلوط گرفته شده و از هم جدا نشده بودند، استفاده شد. تمام آماده‌سازی نمونه‌ها در دمای اتاق انجام شد. برای از بین بردن هرگونه حباب هوا که می‌تواند باعث نقص در ریخته‌گری شود، نمونه‌ها در یک ظرف خلاء هواگیری شدند. فرآیند ریخته‌گری ظرف ۲۴ ساعت پس از اختلاط به پایان رسید. نمونه‌ها سپس بر روی یک لایه پی وی سی

نانوکامپوزیت لایه لایه شده و یا یک میکروکامپوزیت نامنظم باشد. اما نقطه اوج فیلم پی وی سی با نشان دادن تغییر مکان فاصله d به زاویه‌های پایین تر تغییر مکان داده که نشان دهنده ایجاد ساختارهای درهم تنیده پلیمر میان لایه‌های نانورس و پراکندگی مناسب است.

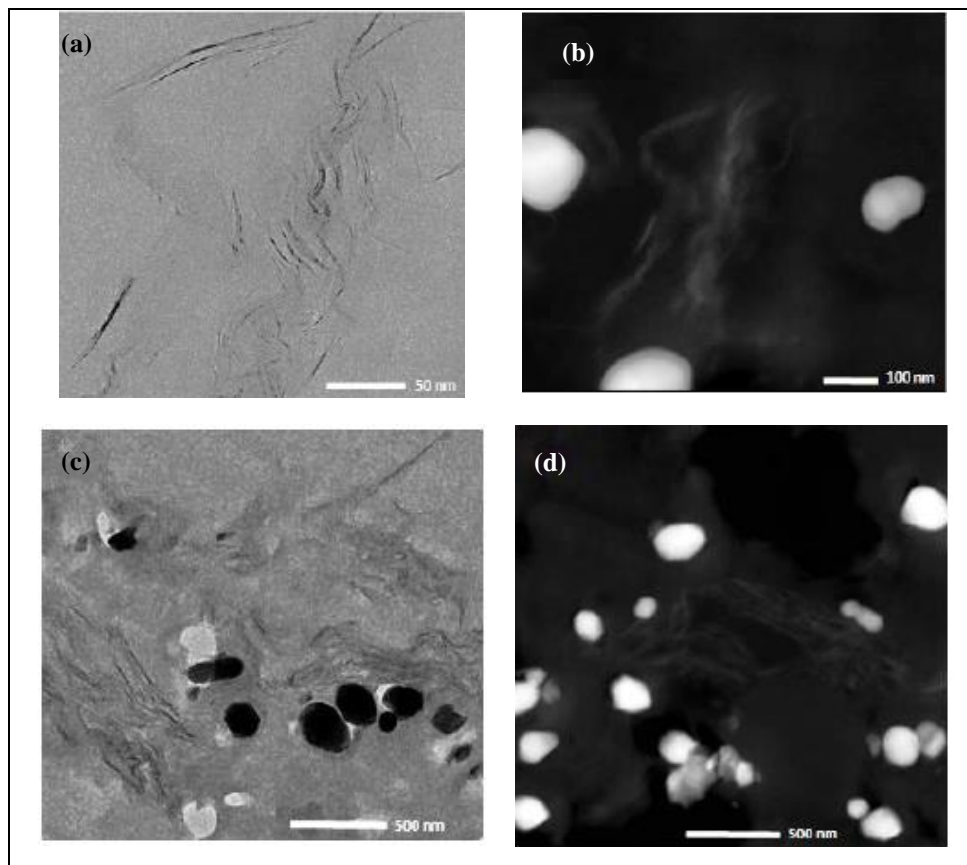
از TEM برای توصیف ساختار و مقیاس پراکندگی نانورس در پی وی سی استفاده شده است. علیرغم مناطق کوچک نمونه برداری شده، که ممکن است نمایانگر کل ساختار نباشند، تصویربرداری دقیق در بزرگمایی کم و زیاد، از جمله مشاهده نمونه‌ها و نقاط مختلف، می‌تواند ارزیابی خوبی از مورفولوژی و نوع کامپوزیت ارائه دهد. هر دو فیلم سفید و شفاف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مقادیر بارگذاری نانورس ۵ phr و ۰/۵ phr بوده‌اند. این نمونه‌ها در حالت کمترین و بیشترین مقادیر نانورس در پی وی سی انتخاب شده‌اند. نانورس کلوزیت ۲۰ و ضخامت فیلم ۵۰ μm بوده است. در حالت میدان روشن، لایه‌های نانورس متراکم تر و کریستالی هستند و بنابراین در تصویر تیره تر ظاهر می‌شوند (شکل ۳a,c). همانگونه که مشاهده می‌شود لایه‌های نانورس در زمینه پی وی سی پراکنده شده و دارای جهت گیری خاصی نیستند. لایه‌های نانورس با از دست دادن حالت موازی خود، بصورت نامنظم پراکنده شده‌اند که در توافق خوبی با نتایج XRD می‌باشد. شکل ۳ نشان می‌دهد که نانورس در داخل پی وی سی یک ساختار درهم تنیده ایجاد کرده است که در نهایت باعث بهبود در خواص مکانیکی و پایداری حرارتی می‌گردد. همچنین با افزایش مقدار نانورس میل به کلوخه شدن نانورس بیشتر شده است بطوریکه در نمونه‌های حاوی ۵ phr اندکی انباشتگی به اندازه‌های ۱۰۰ nm تا ۳۰۰ nm مشاهده می‌شود. در حالت میدان تاریک، لایه‌های نانورس کریستالی روشن تر به نظر می‌رسند (شکل ۳b,d). ذرات سفید TiO_2 هستند. فیلم‌های شفاف فقط در حالت میدان تاریک اسکن شده‌اند زیرا در حالت میدان روشن تشخیص زیادی از ساختار وجود نداشت. تصاویر فیلم شفاف با بارگذاری نانورس ۵ phr و ۰/۵ phr در شکل ۴ نشان داده شده است.

کمتر ۲۰ تغییر مکان می‌دهد که نشان دهنده ساختارهای درهم تنیده می‌باشد. حالت سوم می‌تواند هیچ قله $d001$ و یا قله وسیعی وجود نداشته باشد که یک شاخص بی‌نظمی (از دست رفتن چیدمان صفحات موازی نانورس) است. در دو مورد آخر که پراکندگی رخ می‌دهد، به دلیل آنکه دسته‌های نامنظم پراکنده و لایه‌های جدا شده توسط XRD قابل تشخیص نیست، بنابراین نمی‌توان نتیجه قاطعی از نوع پراکندگی گرفت.



شکل ۲: طیف WAXD از (a) پودر نانورس کلوزیت ۲۰ و (b) فیلم پی وی سی سفید با ۳ phr کلوزیت ۲۰.

نمودارهای XRD در شکل ۲ آورده شده‌اند. فیلم پی وی سی سفید با ۳ کلوزیت ۲۰ در همان محدوده $2\theta = 0-10^\circ$ اسکن شد و هیچ قله‌ای مشاهده نشد. این نشان می‌دهد که بی‌نظمی رخ داده است و ممکن است نشان دهنده یک

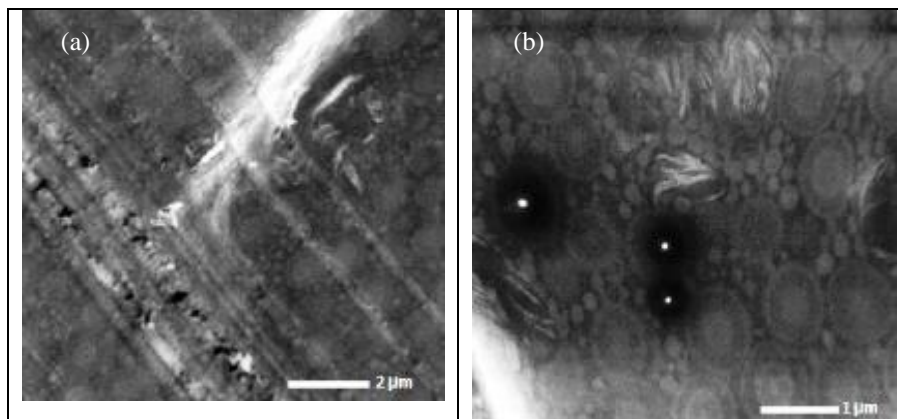


شکل ۳: تصویر TEM از پی وی سی سفید، (a) حالت میدان روشن ۰/۵ phr، (b) حالت میدان تاریک ۰/۵ phr، (c) حالت میدان روشن ۵ phr و (d) حالت میدان تاریک ۵ phr.

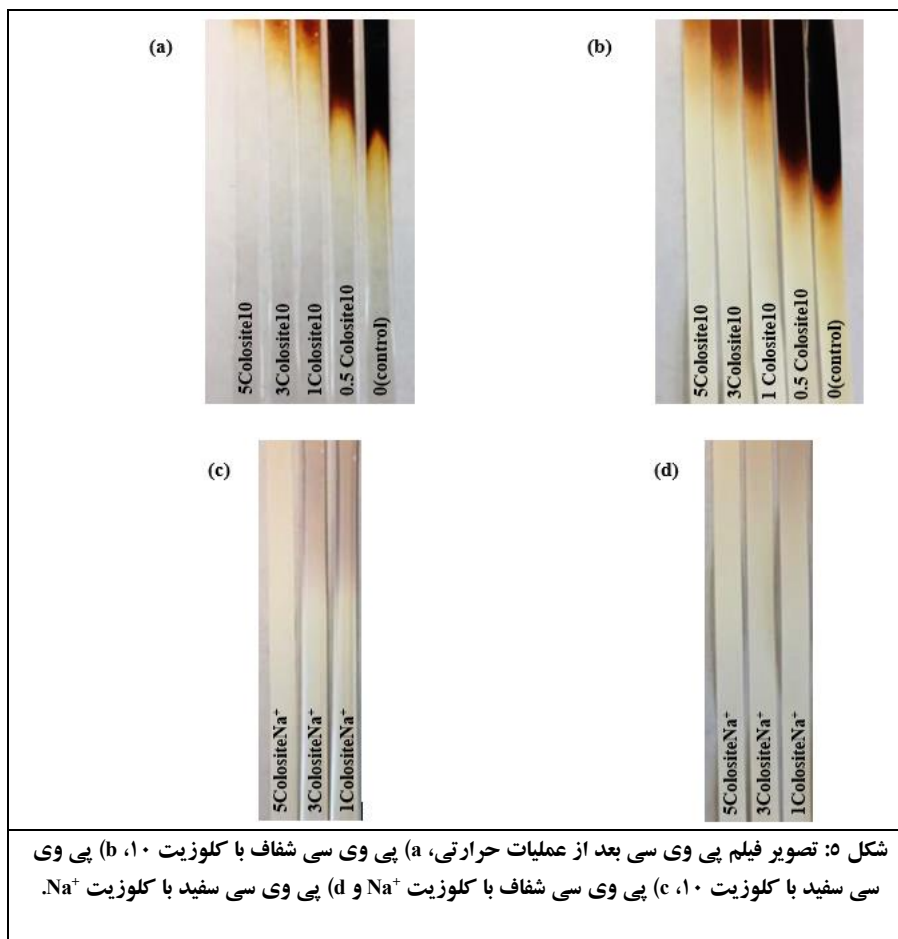
شکل ۴b لایه‌های نانورس نمونه ۵ phr را نشان می‌دهد. انتظار می‌رود جهت‌گیری لایه‌های رس در داخل ساختار فیلم برای خواص موثر حفاظتی مهم باشد. بر اساس نتایج TEM، به نظر نمی‌رسد که نانورس در هر دو حالت نمونه‌های سفید و شفاف در جهت خاصی در ساختار فیلم پی وی سی قرار گرفته باشد.

پایداری حرارتی با استفاده از یک آون Metrastat PLC ارزیابی شد. نمونه‌های فیلم بصورت نوارهای ۱۲/۵ mm در ۲۵۰ mm برش داده شده و در سینی‌های کوره قرار گرفتند. کوره به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۸۰ °C برنامه‌ریزی شده است. در طی ۴ ساعت، سینی نمونه به تدریج از آون خارج شد. پس از پایان آزمایش، نوارها از سینی جدا شده و از آن‌ها عکس گرفته شده است.

این تصاویر برخی از ساختارهای کروی را نشان می‌دهد که انتظار نمی‌رفت. این ساختارها متراکم‌تر و بلورین‌تر از ماتریس پی وی سی هستند. ساختارها ممکن است تثبیت کننده‌ای باشند که کاملاً پراکنده نشده باشند. همانگونه که مشاهده می‌شود لایه‌های نانورس در نمونه‌های شفاف مشابه با نمونه‌های سفید ساختارهای درهم تنیده ایجاد کرده‌اند اما به نظر می‌رسد توزیع نانورس در نمونه‌های سفید که شامل TiO_2 بودند، بهتر صورت گرفته است. همچنین در نمونه‌های شفاف در مقادیر پایین نانورس نیز انباشتگی مشاهده می‌شود که برخلاف نمونه‌های مشابه سفید است. به نظر می‌رسد که در نمونه‌های سفید با پوسته کردن لایه‌های موازی نانورس، به پراکندگی بهتر و جلوگیری از کلوخه شدن آن کمک می‌کند.



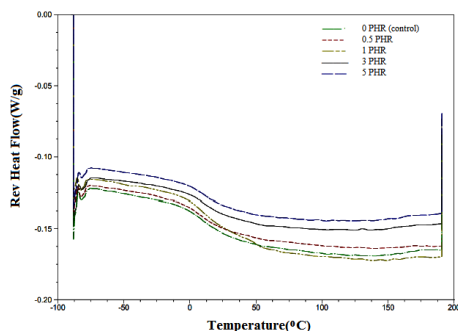
شکل ۴: تصویر TEM از پی وی سی شفاف، (a) حالت میدان تاریک ۰/۵phr و (b) حالت میدان تاریک ۵ phr.



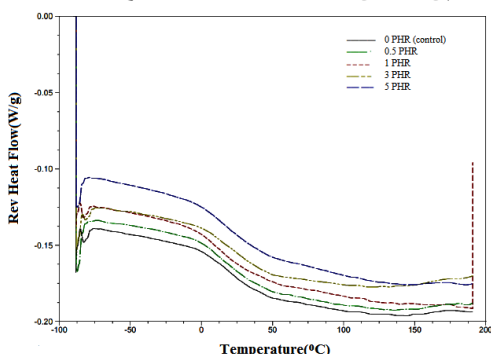
شکل ۵: تصویر فیلم پی وی سی بعد از عملیات حرارتی، (a) پی وی سی شفاف با کلوزیت ۱۰، (b) پی وی سی سفید با کلوزیت ۱۰، (c) پی وی سی شفاف با کلوزیت Na^+ و (d) پی وی سی سفید با کلوزیت Na^+ .

پس از طی چرخه حرارتی در آون، نمونه‌ها برداشته و از آن‌ها عکس گرفته شده است. تصاویر در شکل ۵ تفاوت پایداری حرارتی را با بارگذاری کلوزیت ۱۰ در فیلم‌های پی وی سی نشان می‌دهد. شکل ۵a فیلم شفاف و شکل ۵b فیلم

پایداری حرارتی نمونه‌ها بر اساس تفاوت دید در رنگ مقایسه شده‌اند. با افزایش زمان قرار گرفتن در معرض گرما، نمونه‌ها از سفید به زرد و سرانجام قهوه‌ای تیره و سیاه تبدیل شدند.



شکل ۶: ترموگرام DSC برای فیلم نانوکامپوزیت پی وی سی سفید با ۰ phr تا ۵ phr کلوزیت ۱۰.



شکل ۷: ترموگرام DSC برای فیلم نانوکامپوزیت پی وی سی شفاف با ۰ phr تا ۵ phr کلوزیت ۱۰.

محققان قبلی [۲۶، ۲۷] نیز افزایش T_g را با بارگذاری نانورس نشان داده‌اند. گونگ و همکاران [۲۶] با استفاده از پلیمریزاسیون درجا نانوکامپوزیت PVC/نانورس را تهیه کردند و نشان داد که T_g از $85/3^\circ\text{C}$ برای PVC خالص به $87/6^\circ\text{C}$ با ۵٪ بارگذاری MMT افزایش یافته است. به نظر می‌رسد که وقتی زنجیره‌های پلیمری بین لایه‌های نانورس قرار می‌گیرند، تحرک کمتر شده و باعث افزایش T_g می‌شود. اثر متفاوتی برای مواد مرکب مذاب توسط پاک‌چ و پلیچوفسکی [۲۷] گزارش شده است. بطوری که آن‌ها کاهش جزئی در T_g را در نمونه‌های کامپوزیتی پی وی سی با MMT و OMMT مشاهده کردند. نتیجه‌گیری آن‌ها این بود که هنگامی که زنجیره‌های PVC درون لایه‌های نانورس نفوذ می‌کنند، نانورس به عنوان نرم کننده عمل می‌کند.

سفید را نشان می‌دهد. با افزایش بارگذاری نانورس، فیلم سفید و شفاف تغییر رنگ کمتری به رنگ بنفش تیره را نشان می‌دهد. با افزایش بارگذاری نانورس، فیلم‌های پی وی سی در هر دو حالت سفید و شفاف تغییر قابل توجه‌تری در رنگ را نشان می‌دهند. تغییر رنگ برای نمونه‌های شفاف نسبت به نمونه‌های سفید دیرتر آغاز شده و در بارگذاری ۵ phr نانورس، کمترین تغییر رنگ سیاه را نشان می‌دهد. شکل ۵c,d فیلم‌های سفید و شفاف شامل کلوزیت Na^+ را نشان می‌دهد. سه فیلم کلوزیت Na^+ با بارگذاری‌های مختلف همگی تغییر رنگ بسیار کمی را نسبت به نمونه‌های شامل کلوزیت ۱۰ نشان می‌دهند.

نمودارهای گرمایی DSC برای فیلم‌های سفید و شفاف در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است و اندازه‌گیری‌های دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) در جدول ۳ آورده شده است. T_g فیلم شفاف و سفید بدون نانورس به ترتیب $8/2^\circ\text{C}$ و $11/5^\circ\text{C}$ می‌باشد. این اختلاف می‌تواند به علت مقادیر بیشتر نرم کننده در نمونه‌های پی وی سی شفاف نسبت به نمونه‌های سفید باشد. برای فیلم شفاف، T_g از $8/2^\circ\text{C}$ تا $11/1^\circ\text{C}$ با بارگذاری نانورس به ترتیب از ۰ phr تا ۵ phr کمی افزایش یافته است. T_g فیلم سفید نیز با افزایش بارگذاری نانوذرات کمی افزایش یافته است. مقدار این افزایش برای فیلم سفید از $11/5^\circ\text{C}$ تا $18/2^\circ\text{C}$ با بارگذاری نانورس به ترتیب از ۰ phr تا ۵ phr بوده است.

جدول ۳: دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) بدست آمده از آزمایش DSC برای فیلم‌های پی وی سی.

نمونه	فیلم شفاف	فیلم سفید
نمونه کنترل (0phr)	8.2	11.5
Cloisite 10A (0.5phr)	8.8	12.4
Cloisite 10A (1phr)	9.2	16.6
Cloisite 10A (3phr)	9.7	16.8
Cloisite 10A (5phr)	11.1	18.2

جدول ۴: مقادیر مدول یانگ و درصد کشیدگی فیلم های پی وی سی با بارگذاری نانورس های مختلف برای نمونه های ترکیب شده با میکسر مکانیکی.

نمونه	مدول یانگ (MPa)		مقدار کشیدگی (%)	
	فیلم سفید	فیلم شفاف	فیلم سفید	فیلم شفاف
نمونه کنترل (0phr)	475±5.5	746±6.3	120±4.5	166±4.7
Cloisite 10A (0.5phr)	527±4.9	794±5.6	114±3.8	167±3.5
Cloisite 10A (1phr)	485±2.5	740±6.7	110±2.6	137±3.3
Cloisite 10A (3phr)	462±4.3	715±6.5	109±5.1	125±4.2
Cloisite 10A (5phr)	442±3.5	685±7.1	95±4.7	98±3.5
Cloisite 20A (0.5phr)	512±4.4	772±2.5	108±1.4	155±3.7
Cloisite 20A (1phr)	470±7.5	740±5.4	97±3.5	142±2.6
Cloisite 20A (3phr)	435±6.5	705±7.1	86±2.1	122±4.3
Cloisite 20A (5phr)	357±5.5	623±4.2	79±3.5	95±3.1
Cloisite Na ⁺ (1phr)	425±3.5	726±5.3	102±1.5	124±2.5
Cloisite Na ⁺ (3phr)	427±7.5	720±8.4	104±2.7	112±5.3
Cloisite Na ⁺ (5phr)	415±4.5	704±3.5	92±2.5	91±5.5

جدول ۵: مقادیر مدول یانگ و درصد کشیدگی فیلم های پی وی سی با بارگذاری نانورس های مختلف برای نمونه های ترکیب شده با روش اختلاط همگن سازی با سرعت بالا.

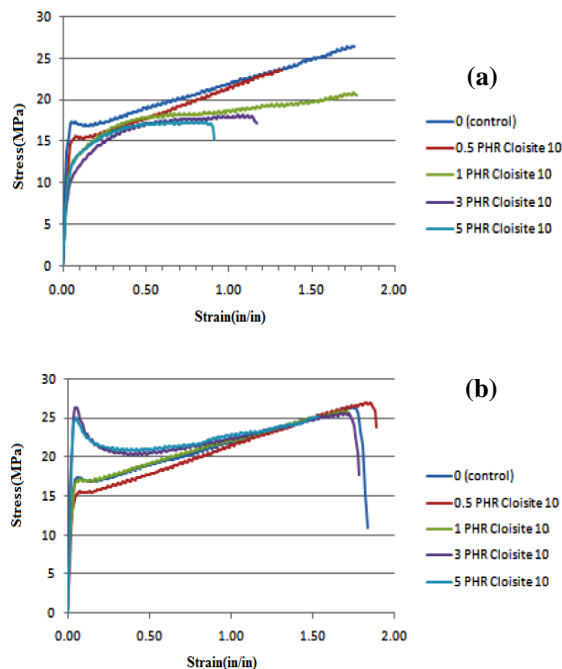
نمونه	مدول یانگ (MPa)		مقدار کشیدگی (%)	
	فیلم سفید	فیلم شفاف	فیلم سفید	فیلم شفاف
نمونه کنترل (0phr)	475±5.5	746±6.3	120±4.5	166±4.7
Cloisite 10A (0.5phr)	549±5.3	798±6.6	111±4.8	162±6.5
Cloisite 10A (1phr)	562±3.1	813±5.5	102±3.4	135±3.8
Cloisite 10A (3phr)	587±4.6	825±4.1	94±1.1	115±5.2
Cloisite 10A (5phr)	601±2.8	845±7.8	82±2.4	95±2.5
Cloisite 20A (0.5phr)	548±6.2	791±3.5	109±2.1	151±3.2
Cloisite 20A (1phr)	557±7.1	815±8.4	95±2.4	148±1.6
Cloisite 20A (3phr)	582±5.6	820±7.1	81±4.5	129±3.7
Cloisite 20A (5phr)	586±4.5	836±4.7	77±2.2	101±3.4
Cloisite Na ⁺ (1phr)	495±5.8	761±2.3	104±1.8	119±2.2
Cloisite Na ⁺ (3phr)	512±6.3	772±5.9	93±3.5	108±3.6
Cloisite Na ⁺ (5phr)	515±4.2	781±6.7	78±3.4	86±4.9

مواردی که پراکندگی TiO_2 به خوبی انجام شده است، بهبود خواص مشاهده شده است [۲۹].

خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده توسط دستگاه SANTAM400 و مطابق با استانداردهای ASTM مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج برای مدول یانگ و مقدار کشیدگی تا نقطه شکست در جدول ۴ نشان داده شده است.

همانگونه که انتظار می‌رفت با افزودن نانورس، طول کشیدگی در هنگام شکست کاهش می‌یابد. نانورس به دلیل کاهش تحرک در میان زنجیره‌های پی وی سی، باعث سفت شدن فیلم می‌شود. فیلم سفید کاهش مقدار کشیدگی تا نقطه شکست ۲۱٪، ۱۰٪ و ۲۷٪ در بارگذاری ۵ phr را به ترتیب برای کلوزیت ۱۰، کلوزیت Na^+ و کلوزیت ۲۰ نشان داد. فیلم شفاف نیز کاهش مقدار کشیدگی تا نقطه شکست ۴۱٪، ۲۶٪ و ۶۳٪ در بارگذاری ۵ phr را به ترتیب برای کلوزیت ۱۰، کلوزیت Na^+ و کلوزیت ۲۰ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند با افزایش بارگذاری نانورس برای کلوزیت ۱۰ و کلوزیت ۲۰ تا ۵ phr مقدار مدول یانگ به ترتیب ۱۰٪ و ۷٪ برای فیلم سفید و به ترتیب ۶٪ و ۴٪ برای فیلم شفاف افزایش می‌یابد. داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد که مدول یانگ فیلم سفید و شفاف با بارگذاری نانورس برای سه مقدار مختلف نانورس بطور قابل توجهی تغییر نمی‌کند و حتی برای مقادیر ۱ phr به بالا شاهد کاهش در مقدار مدول یانگ هستیم. این کاهش را می‌توان به حفره‌های ایجاد شده در نانو کامپوزیت به علت انباشتگی نانورس نسبت داد که تصاویر TEM نیز آن را تصدیق می‌کند. در ضمن مدول یانگ در نمونه‌های شامل کلوزیت Na^+ همگی به صورت کاهشی بوده است که نشان دهنده عدم اختلاط و پراکندگی مناسب نانورس در زمینه پی وی سی است.

فیلم سفید افزایش مدول و کشیدگی را برای همه نمونه‌ها برای روش اختلاط هموزنایزر نشان می‌دهد، که بیانگر این است که نانورس بطور موثرتری در پی وی سی پراکنده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با استفاده از روش همگن سازی با سرعت بالا، مقادیر مدول یانگ در



شکل ۸: نمودار تنش-کرنش (a) فیلم پی وی سی سفید و (b) فیلم پی وی سی شفاف برای نمونه‌های ترکیب شده با روش اختلاط همگن سازی با سرعت بالا.

با الحاق ذرات TiO_2 به ساختار ماتریس کامپوزیت، دمای ذوب تغییر می‌یابد. دمای ذوب به کامل بودن ساختار بخش‌های بلوری مربوط است و هر چه ساختار دارای تکامل بهتری باشد دمای ذوب بالاتر خواهد بود. نانوذرات می‌توانند با تاثیر در نوع بلورهای تشکیل یافته در نواحی آمورف قابل بلوری شدن، موجب افزایش یا کاهش دمای ذوب شوند. نکته قابل توجه حاصل از نتایج بدست آمده، مشاهده عدم تاثیر چشمگیر و تفاوت اثر افزودن TiO_2 بر دمای ذوب فیلم‌های PVC-3%MMT در مقایسه با فیلم‌های PVC-1% MMT می‌باشد.

علیرغم نتایج بدست آمده در این مقاله و سایر مطالعات انجام شده توسط سایر محققان مبنی بر اثر قابل توجه افزودن نانوذرات TiO_2 بر خواص گرمایی فیلم‌های پلیمری، نتایج برخی پژوهشگران نشان می‌دهد که افزایش نانوذرات TiO_2 موجب تغییر قابل توجهی در دمای ذوب نواحی بلوری و انتقال شیشه‌ای نمی‌شود [۲۸]. البته فرآیند ساخت فیلم‌های نانو کامپوزیتی تاثیر بسیاری بر روی نتایج حاصل دارند و در

بارگذاری از نانورس تا ۵ phr دست یافت. در بهترین حالت، مقدار مدول یانگ نمونه سفید با ۵ phr نانورس کلوزیت ۱۰، کلوزیت Na^+ و کلوزیت ۲۰، به ترتیب ۲۲٪، ۸٪ و ۱۹٪ افزایش یافته و مقدار کشیدگی در بیشترین تغییر برای کلوزیت ۱۰ تا ۳۶٪ کاهش یافته است. فیلم‌های شفاف افزایش کمتری را در مقدار مدول یانگ (حداکثر تا ۱۲٪) نسبت به فیلم‌های سفید نشان دادند. بیشترین کاهش در مقدار کشیدگی تا زمان شکست ۴۸٪ و کمترین افزایش در مقدار مدول یانگ نیز برای کلوزیت Na^+ نسبت به سایر نانورس‌ها بدست آمد.

بارگذاری‌های بیشتر نانورس نیز برخلاف روش میکسر مکانیکی، روند افزایشی دارد. در بهترین حالت، مقدار مدول یانگ نمونه سفید با ۵ phr نانورس کلوزیت ۱۰، کلوزیت Na^+ و کلوزیت ۲۰، به ترتیب ۲۲٪، ۸٪ و ۱۹٪ افزایش یافته و مقدار کشیدگی در بیشترین تغییر برای کلوزیت ۱۰ تا ۳۶٪ کاهش یافته است. اما فیلم شفاف افزایش مدول یانگ ۱۲٪، ۵٪ و ۱۱٪ را به ترتیب برای نانورس کلوزیت ۱۰، کلوزیت Na^+ و کلوزیت ۲۰ با بارگذاری ۵ phr نشان می‌دهد. بیشترین کاهش در مقدار کشیدگی تا زمان شکست نیز ۴۸٪ برای کلوزیت Na^+ بدست آمده است.

۴- نتیجه گیری

پلیمر پی وی سی انعطاف پذیر با دو فرمولاسیون مختلف برای تولید فیلم‌های نانو کامپوزیتی پی وی سی/نانورس به منظور کاربرد در روکش لوله‌های پلیمری نفت و گاز تقویت شده و خواص مکانیکی و پایداری حرارتی آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. برای اختلاط نمونه‌ها از دو روش میکسر مکانیکی و همگن سازی با سرعت بالا استفاده شد. نتایج برای سه نانورس مختلف کلوزیت ۱۰، کلوزیت Na^+ و کلوزیت ۲۰ تا حداکثر سطح بارگذاری ۵ phr بدست آمد. نتایج نشان داد که نانورس می‌تواند پایداری حرارتی پی وی سی را افزایش دهد بطوریکه با افزایش بارگذاری نانورس تا ۵ phr مقاومت نمونه‌های نانو کامپوزیتی نسبت به تغییر رنگ بسیار بیشتر شده است. البته تاثیر نانورس بر روی پایداری حرارتی نمونه‌های شامل کلوزیت Na^+ بیشتر از سایر نانورس‌ها بود. در ادامه مقادیر مدول یانگ و درصد کشیدگی تا نقطه شکست برای نمونه‌های نانو کامپوزیتی تولیدی توسط تست کشش بدست آمد. نتایج نشان دادند که استفاده از روش همگن سازی با سرعت بالا در فرآیند اختلاط تاثیر زیادی بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های نانو کامپوزیتی دارد. با استفاده از روش میکسر مکانیکی به تنهایی فقط می‌توان تا ۵/۵ phr نانورس را بارگذاری کرد در صورتی که با استفاده از روش همگن سازی با سرعت بالا می‌توان به مقادیر بالاتری از

مراجع

- [1] A.S. Rahman, V. Mathur, R. Asmatulu, *Composite Structures*, **187**, 2018, 481.
- [2] M. Hassani Niaki, A. Fereidoon, M. Ghorbanzadeh Ahangari, *Composite Structures*, **191**, 2018, 231.
- [3] N.H. Othman, M.C. Ismail, M. Mustapha, N. Sallih, K.E. Kee, R.A. Jaal, *Progress in Organic Coatings*, **135**, 2019, 82.
- [4] M. Nawaz, N. Yusuf, S. Habib, R.A. Shakoore, F. Ubaid, Z. Ahmad, R. Kahraman, S. Mansour, W. Gao, *Polymers*, **11**, 2019, 852.
- [5] M. Yasir, F. Ahmad, P.S. Yusoff, S. Ullah, M. Jimenez, *Surface Engineering*, **36**, 2020, 334.
- [6] A. Leszczynska, J. Njuguna, K. Pielichowski, J.R. Banerjee, *Thermochimica Acta*, **453**, 2007, 75.
- [7] A. Leszczynska, J. Njuguna, K. Pielichowski, J.R. Banerjee, *Thermochimica Acta*, **454**, 2007, 1.
- [8] S.S. Ray, M. Okamoto, *Progress in Polymer Science*, **28**, 2003, 1539.
- [9] C.E. Wilkes, J.W. Summers, C. Daniels, "PVC Handbook", Cincinnati, MU: Hanser Publications, 2005.
- [10] B.T.D. Stark, H. Choi, P.W. Diebel, *Geotechnical Special Publications*, **23**, 2005, 28.
- [11] J. Pagacz, K. Pielichowski, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, **15**, 2009, 61.
- [12] M.S. Nazir, M.H.M. Kassim, L. Mohapatra, M.A. Gilani, M.R. Raza, K. Majeed, *Nanoclay Reinforced Polymer Composites*, **11**, 2016, 35.
- [13] F. Uddin, *Current Topics in the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications*, **1**, 2018, 3.
- [14] J. Ren, Y. Huang, Y. Liu, X. Tang, *Polymer Testing*, **24**, 2005, 316.
- [15] D. Benderly, F. Osorio, W. Ijdo, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, **14**, 2008, 155.
- [16] R.F. Grossman, "Handbook of Vinyl Formulating", Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008.
- [17] D. Wang, D. Parlow, Q. Yao, C.A. Wilkie, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, **7**, 2001, 203.
- [18] P. Rani, M.B. Ahamed, K. Deshmukh, *Polymer Testing*, **91**, 2020, 106744.
- [19] R. Izadpanah, M. Rezaei, S. Talebi, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **45**, 2019, 1.
- [20] A.S. Rad, E. Aali, S. Hallajian, D. Zangeneh, M. Tavakoli, K. Ayub, M. Peyravi, *Journal of Macromolecular Science Part A: Pure and Applied Chemistry*, **57**, 2020, 123.

- [25] P. Kroushl, "Resin Selection for PVC Applications in Handbook of Vinyl Formulating", NJ: John Wiley & Sons, 2008.
- [26] F. Gong, M. Feng, C. Zhao, S. Zhang, M. Yang, *Polymer Degradation and Stability*, **84**, 2004, 289.
- [27] J. Pagacz, K. Pielichowski, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **111**, 2013, 1571.
- [28] Y. Zhu, G.G. Bounocore, M. Lavorgna, L. Ambrosio, *Polymer Composites*, **32**, 2011, 519.
- [29] M. Kaseem, Z.U. Rehman, *Materials*, **12**, 2019, 3659.
- [21] M. Barghamadi, M. Karrabi, M.H. Ghoreishy, S. Mohammadian Gezaz, *Journal of Applied Polymer Science*, **136**, 2018, 47550.
- [22] A. Kalendova, J. Zykova, L. Kovarova, M. Slouf, J.F. Gerard, *AIP Conference Proceedings*, **1255**, 2010, 181.
- [23] L.M. Matuana, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, **15**, 2009, 77.
- [24] S. Bohn, P.S. Balzer, D. Becker, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, **24**, 2018, 172.