

Polymerization
Quarterly, 2025
Volume 15, Number 1
Pages 3-15
ISSN: 2252-0449

A Review of Microstructure and Physical-Mechanical Properties of Polypropylene/Ethylene-Propylene Diene Monomer (PP/EPDM) Nanocomposites

Hossein Bazgir¹ and Ghasem Naderi²

1. Research and Development Center, Jam Petrochemical Company, Postal Code 75118-11368,
Assaloyeh, Bushehr, Iran

2. Department of Rubber, Faculty of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical
Institute (IPPI), P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 22 March 2024, Accepted: 29 December 2024

Abstract

In recent years, one of the advances made in the plastics and composites industry is the development and commercialization of polymer-based nanocomposites. Polymer nanocomposites based on polyolefin thermoplastics and elastomers, and mineral and non-mineral fillers have attracted attention in engineering applications, including the automotive, aerospace, construction, and medical equipment industries. PP/EPDM-based nanocomposites are of great importance as widely used blends in various manufacturing industries. Polypropylene is one of the most widely used thermoplastics due to its low density, high thermal stability, high efficiency, and processability. Low impact strength at low temperatures and high strain rate have limited the use of polypropylene. In this article, research on improving the properties of PP/EPDM blends with various nanoparticles is discussed. Although blending polypropylene with rubber improves the impact strength of the material and reduces some mechanical properties such as modulus and hardness. Adding a very small percentage of reinforcements such as clay nanoparticles can significantly improve the mechanical and thermal properties. Nanoparticles used in the production process of nanocomposites often include clay, silica compounds, and carbon and graphite compounds in order to produce nanocomposites with special applications. The most important parameters affecting the production process of PP/EPDM nanocomposites are the uniformity of dispersion, the presence of functional groups on the surface of the nanoparticles, and the production method. Research also shows that the properties of nanocomposites are improved compared to the pure blend due to changes in the interface properties and restrictions on the movement and displacement of polymer chains.

Key Words

nanocomposite,
nanoparticles,
polypropylene,
EPDM,
thermoplastic

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hossein.bazgir95@gmail.com

مروری بر میکروساختار و خواص فیزیکی مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن-اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر (PP/EPDM)

بسپارش
فصلنامه علمی
سال پانزدهم، شماره ۱،
صفحه ۱۵-۳، ۱۴۰۴
ISSN: 2252-0449

حسین بازگیر^{۱*} و قاسم نادری^۲

۱- بوشهر، عسلویه، پتروشیمی جم، واحد تحقیق و توسعه، کد پستی ۷۵۱۱۸-۱۱۳۶۸

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند پلیمر، گروه لاستیک،

صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۴۰۳/۲/۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۹

چکیده



حسین بازگیر



قاسم نادری

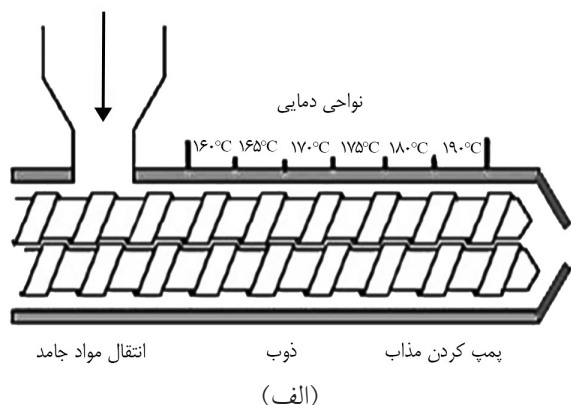
در سال‌های اخیر، یکی از پیشرفت‌های انجام‌گرفته در صنعت پلاستیک و کامپوزیت‌ها توسعه و تجاری‌سازی نانوکامپوزیت‌های پایه‌پلیمری است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری برپایه گرمانرم‌های پلی‌اولفینی، الاستومری و پرکننده‌های معدنی و غیرمعدنی در کاربردهای مهندسی از جمله صنایع خودروسازی، هوافضا، ساختمان و تجهیزات پزشکی مورد توجه قرار گرفته است. نانوکامپوزیت‌های برپایه PP/EPDM به‌عنوان آمیخته پرکاربرد در صنایع تولیدی گوناگون از اهمیت زیادی برخوردارند. پلی‌پروپیلن به‌دلیل چگالی کم، پایداری گرمایی زیاد، کارایی و فراورپذیری زیاد از کاربردی‌ترین گرمانرم‌هاست. استحکام ضربه‌ای کم در دماهای کم و سرعت کرنش زیاد، باعث محدودیت استفاده از پلی‌پروپیلن شده است. در این مقاله، پژوهش‌های انجام‌شده درباره بهبود خواص آمیخته‌های PP/EPDM با نانوذرات مختلف پرداخته شده است. اگرچه آمیخته‌سازی پلی‌پروپیلن با لاستیک باعث بهبود ضربه‌پذیری این ماده می‌شود، ولی برخی خواص مکانیکی مانند مدول و سختی را کاهش می‌دهد. افزودن درصد بسیار کمی تقویت‌کننده‌هایی چون نانوذرات رس، می‌تواند خواص مکانیکی گرمایی را به‌طور درخور توجهی بهبود دهد. نانوذرات استفاده‌شده در فرایند تولید نانوکامپوزیت‌ها اغلب شامل رس، ترکیبات سیلیکا و ترکیبات کربنی و گرافیتی به‌منظور تولید نانوکامپوزیت‌هایی با کاربرد ویژه هستند. از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر فرایند تولید نانوکامپوزیت‌های PP/EPDM، مقدار پراکنش، وجود گروه‌های عاملی در سطح نانوذرات و نیز روش تولید هستند. همچنین پژوهش‌ها نشان می‌دهد، خواص نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با آمیخته خالص به‌دلیل تغییر در ویژگی‌های فصل مشترک و ایجاد محدودیت در حرکت و جابه‌جایی زنجیرهای پلیمری، بهبود می‌یابد.

واژگان کلیدی

نانوکامپوزیت،
نانوذرات،
پلی‌پروپیلن،
EPDM،
گرمانرم

پلی پروپیلن (PP) یکی از انواع پلی اولفین هاست که در سال های اخیر به دلیل وزن کم و مقاومت شیمیایی زیاد در صنایع مختلف کاربرد زیادی پیدا کرده است. PP به دلیل استحکام کم در دمای کم دارای محدودیت کاربرد است [۱]. از این رو در چند دهه گذشته، بهبود عملکرد PP در دمای کم با اضافه کردن مواد افزودنی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲]. کامپوزیت های پلیمری آمیخته هایی از پلیمرها به همراه افزودنی های آلی و غیر آلی با هندسه معین مانند الیاف، صفحه و ذره هستند. هنگامی که الیاف، صفحه های کوچک یا ذرات به عنوان فاز پراکنشی دارای ابعادی در حد نانومتر باشند، کامپوزیت های حاصل به عنوان نانوکامپوزیت شناخته می شوند [۳]. به طور کلی، نانوکامپوزیت های پلیمری دارای استحکام زیاد، وزن کم و نیز پایداری گرمایی، رسانندگی الکتریکی و مقاومت شیمیایی زیاد هستند. با افزودن درصد کمی از نانوذرات به پلیمر خالص، استحکام کششی، استحکام تسلیم و مدول یانگ افزایش چشمگیری می یابد. به عنوان مثال، با افزودن تنها ۴ درصد حجمی میکا (نوعی سیلیکات) با ابعاد ۵۰ nm به اپوکسی، مدول یانگ این ماده ۵۸ درصد افزایش می یابد. از طرفی، پژوهش ها نشان می دهند، افزودن ذرات تقویت کننده به پلی اولفین ها باعث کاهش مقاومت ضربه ای و شکل پذیری این مواد در دماهای کم و سرعت کرنش های زیاد می شود که برای از بین بردن این عیب از ترکیب الاستومر گرمانرم استفاده می شود. آمیخته سازی PP با فاز لاستیکی، راه مؤثری برای تهیه PP بسیار چقرمه است. الاستومرهای اولیه بیشتر پلی ایزوبوتیلن و لاستیک بوتیل بودند که EPDM پس از تولید، جایگزین آن ها شد. الاستومرهای گرمانرم PP/EPDM جزء دسته الاستومرهای گرمانرم اولفینی (TPO) هستند که مصرف زیادی دارند و به صورت آمیخته تهیه می شوند.

شکل شناسی الاستومر گرمانرم PP/EPDM پیچیده است. توزیع، اندازه و شکل هر دو فاز لاستیکی و گرمانرم تعیین کننده خواص نهایی است. به طور کلی، ماده ای که درصد حجمی بیشتری داشته باشد، فاز پیوسته است. عامل مهم دیگر در تعیین شکل شناسی، گرانروی است [۴]. ماده گرانروتر عموماً فاز ناپیوسته را تشکیل می دهد. مدول خمشی این آمیخته از ۱۰۰۰ psi تا ۲۵۰۰۰۰ psi و مقاومت کششی آن از ۱۰۰۰ psi تا ۳۰۰۰ psi متغیر است. با افزایش مقدار پلی اولفین در آمیخته، سختی، مدول و مقاومت کششی آمیخته افزایش می یابد، خواص آن از خواص لاستیکی فاصله می گیرد و به سمت رفتار گرمانرم میل می کند. مطالعات نشان می دهد، شکل و اندازه ذرات لاستیکی و



(ب)

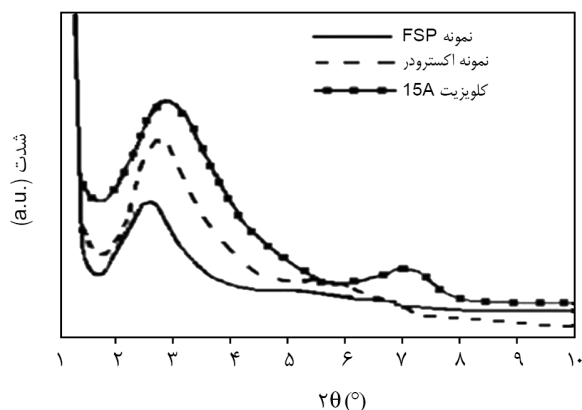
شکل ۱- (الف) دستگاه اکسترودر و (ب) مخلوط کن داخلی [۸].

میزان پراکندگی این ذرات در فاز پیوسته با خواص نهایی رابطه دارد. به طوری که با کاهش اندازه ذرات لاستیکی از ۷۱ μm به ۱ μm خواص ازدیاد طول تا پارگی و استحکام کششی افزایش می یابد. کاهش اندازه ذرات و پراکنده بودن آن ها در ماتریس به ایجاد تعداد بسیار زیادی نقاط تمرکز تنش منجر می شود که به طور مؤثرتری تنش را در ساختار پخش می کند و نیز مانع رشد ترک در هنگام کشیدگی شده و باعث بهبود خواص کششی می شود [۵].

روش های مختلف ساخت کامپوزیت و نانوکامپوزیت های

پلی اولفینی

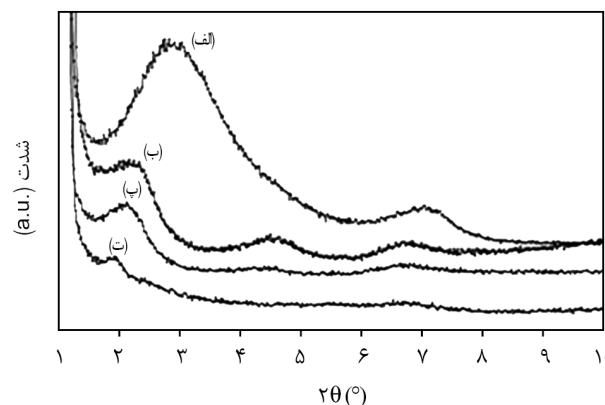
به طور کلی، سه روش برای تولید نانوکامپوزیت های ماتریس پلیمری وجود دارد. این روش ها شامل اختلاط مذاب، فراوری محلول و پلیمرشدن در جاست. استفاده از اکسترودر و مخلوط کن داخلی از روش های مرسوم بوده که دارای پارامترهای مختلف است که در شکل ۱ نشان داده شده اند. در روش مخلوط کن داخلی سه پارامتر دما، سرعت چرخش و زمان اختلاط و در اکسترودر، سرعت چرخش، سرعت تغذیه و دمای محفظه از پارامترهای مهم بوده که بر ساختارهای ایجاد شده در نانوکامپوزیت ها و پراکنش نانوذرات در ماده پایه اثرگذار است. از روش های جدید که برای ساخت نانوکامپوزیت های مختلف استفاده می شود، فراوری هم زنی



شکل ۳- طیف XRD نمونه‌های نانوکامپوزیت تهیه‌شده با روش‌های فراوری هم‌زنی اصطکاکی و اکسترودر دوماردانی و نانورس کلویزیت 15A [۱۲].

آزمایش و مدل Box-Behnken شرایط عملیاتی بهینه را برای جوش لیزری سامانه نانوکامپوزیتی EPDM/PP/رس ارائه داده‌اند. شرایط بهینه شامل قدرت لیزر ۱۱۰-۱۰۸ W، سرعت پویش ۵۶۷-۵۶۶ mm/min و نانورس در محدوده ۰/۳۵ درصد تا ۰/۸۵ درصد است (شکل ۳). خواص مکانیکی بیشینه حاصل با استفاده از شرایط بهینه، شامل استحکام کششی ۹/۳ MPa و مقاومت ضربه‌ای ۶۷/۲ J/m به‌ازای قدرت لیزر ۱۱۰ W، سرعت پویش ۵۸۶ mm/min و نانورس ۰/۶۶ درصد است. همچنین در این مطالعه مشخص شد، اثر مقدار نانوذرات نسبت به سایر پارامترها برخواص مکانیکی محصول نهایی بیشتر است [۱۱]. در سال ۲۰۱۸ نادری و همکاران، خواص نهایی نانوکامپوزیت‌های EPDM/PP/رس را با استفاده از دو روش فراوری هم‌زنی اصطکاکی و اکسترودر دوماردانی بررسی کردند. نتایج بررسی ساختار بلوری و تصاویر میکروسکوپی نمونه تهیه‌شده با فراوری هم‌زنی اصطکاکی حاکی از پراکنش مناسب‌تر نانوذرات رس در آمیخته PP/EPDM بود (شکل‌های ۳ و ۴). نتایج حاصل از آزمون TGA نشان داد، دمای کاهش وزن ۵۰ درصد نمونه آمیخته PP/EPDM برابر ۳۸۲ °C است. این دما با افزودن ۵ درصد نانورس طی فراوری هم‌زنی اصطکاکی و اکسترودر کردن دوماردانی به‌ترتیب ۴۰۶ و ۳۹۵ °C بوده که حاکی از پایداری گرمایی نمونه با استفاده از فراوری هم‌زنی اصطکاکی است (شکل ۵) [۱۲].

در سال ۲۰۱۵، Mariatti و همکاران به بررسی اثر نانوذرات مختلف از قبیل TiO_2 ، SiO_2 و ZnO بر رفتار دی‌الکتریک کابل‌های تولیدی از آمیخته PP/EPDM پرداختند. برای تهیه نانوکامپوزیت‌ها از مخلوط‌کن داخلی با ۲ درصد از هر یک از نانوذرات استفاده شد. نتایج بررسی خواص دی‌الکتریک نمونه‌ها نشان داد، افزودن



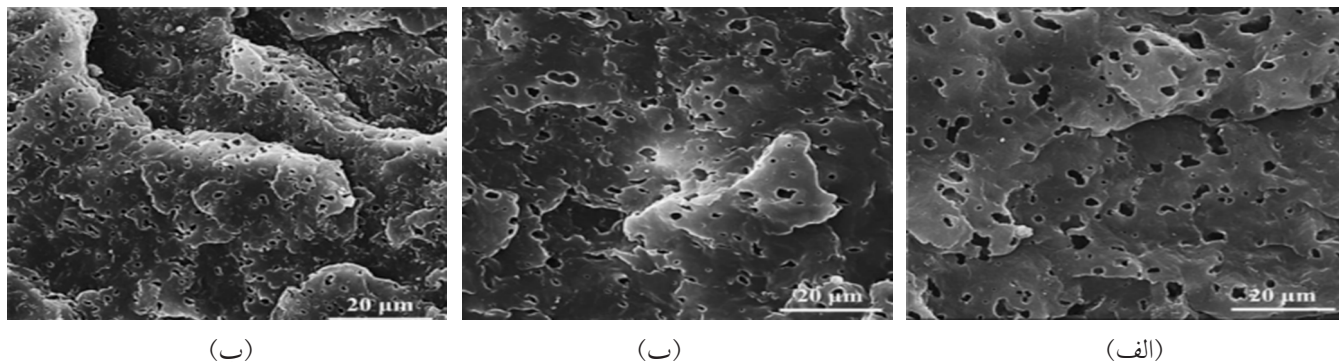
شکل ۲- الگوی پراش XRD نمونه‌های: (الف) رس و نانوکامپوزیت PP/EPDM با ۲ درصد رس (ب) بدون PP و با نسبت‌های PP به رس (پ) ۱، (ت) ۲ و (ث) ۳ [۹].

اصطکاکی (friction stir processing, FSP) است که به‌دلیل استفاده از سرعت‌های زیاد و ایجاد گرما در منطقه فرایند باعث پراکنش خوب نانوذرات در فاز پایه می‌شود [۸-۶].

مروری بر مطالعات انجام‌شده درباره نانوکامپوزیت‌های PP/EPDM

نادری و همکاران، پراکنش نانوذرات رس را در نانوکامپوزیت‌های PP/EPDM با ترکیب درصد ۶۰/۴۰ و حاوی ۵ درصد وزنی رس را در مراحل مختلف اختلاط بررسی کردند. پیک مربوط به نانوذرات رس در ۲/۹° دیده می‌شود که فاصله صفحات براساس رابطه براگ برابر با ۴۴/۳۰ Å است. درحالی‌که این پیک برای نانوکامپوزیت‌ها در مراحل انتهایی اختلاط به‌سمت زاویه ۹/۱° انتقال پیدا می‌کند که باعث افزایش فاصله صفحه‌ها به ۴/۶۶ Å می‌شود. با رسیدن مواد به مراحل پایانی اختلاط، تنش برشی اعمال‌شده بر ماتریس بیشتر شده که این باعث شکست کلوخه‌های رس و نفوذ زنجیرهای پلیمری درون صفحات رس می‌شود. درنتیجه پراکنش نانوذرات بهتر انجام می‌گیرد و زاویه مربوط به ذرات رس به مقادیر کمتر انتقال پیدا می‌کند (شکل ۲) [۹]. نادری و همکاران در مطالعه دیگری درباره ولکانش دینامیکی EPDM/PP/کلویزیت تهیه‌شده با نسبت ۵/۲۰/۷۵ با استفاده از اختلاط مذاب مستقیم در اکسترودر دوماردانی (TSE)، اثر توالی اختلاط در این اکسترودر را بر نانوکامپوزیت بررسی کردند. نتایج آزمون‌های XRD، TEM و گرانروی مذاب نشان داد، نمونه‌های به‌دست‌آمده با اختلاط مستریج PP-رس با EPDM، پراکنش بسیار بهتری نسبت به EPDM و نانوذرات در محیط PP دارند [۱۰].

در سال ۲۰۲۱، نادری و همکاران با استفاده از نرم‌افزار طراحی

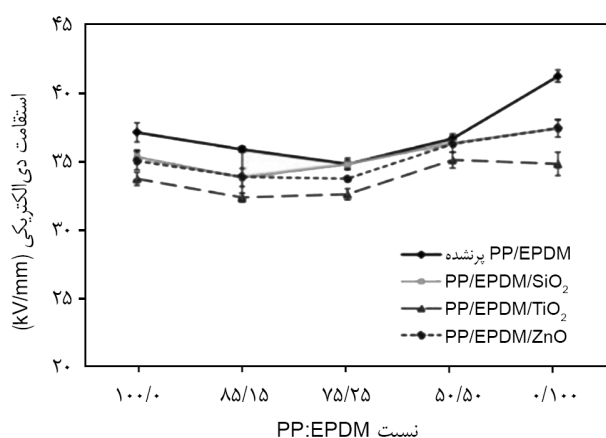


شکل ۴- تصاویر SEM نمونه‌های: (الف) آمیخته PP/EPDM و نمونه‌های تهیه‌شده با روش (ب) اکسترودر دوماردانی و (پ) فراوری هم‌زنی اصطکاکی [۱۲].

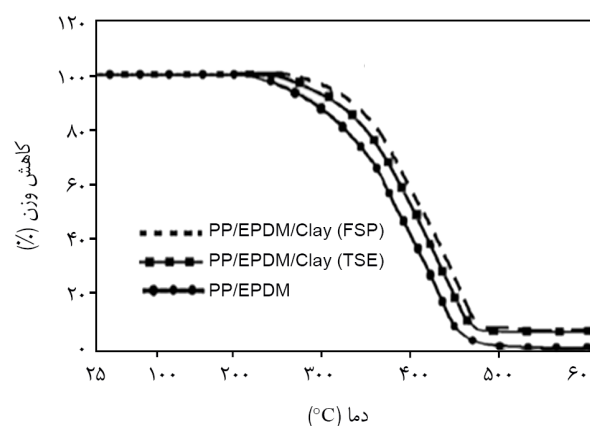
که سبب کاهش خواص مکانیکی از قبیل استحکام شکست نمونه می‌شود [۱۳].

بابازاده و همکاران در پژوهشی به مطالعه شکل‌شناسی، خواص مکانیکی، رفتار شکست و سازوکارهای مختلف تغییرشکل در سامانه‌های نانوکامپوزیت PP/EPDM/SiO₂ پرداختند. رفتار شکست و سازوکارهای مختلف تغییرشکل در نمونه‌های یادشده به کمک آزمون‌های ضربه ایزود (سرعت زیاد) و کار شکست لازم (سرعت کم) و اثر توسعه شکل‌شناسی در این آمیخته‌ها بر این خواص بررسی شد. از ترتیب خوراک‌دهی‌های متفاوت و فاز لاستیکی عامل‌دار (EPDM-g-MA) برای تغییر محل قرارگیری نانوذرات SiO₂ در سامانه‌های سه‌تایی استفاده شد. مطالعات شکل‌شناختی نشان داد، در سامانه‌های سه‌تایی تهیه‌شده با روش اختلاط یک‌مرحله‌ای، SiO₂ عمدتاً در اطراف قطر ذرات EPDM پراکنده در ماتریس یا در فصل مشترک PP/EPDM قرار دارند. افزون‌براین، بخش کمی از نانوذرات SiO₂ هم به شکل ساختارهای

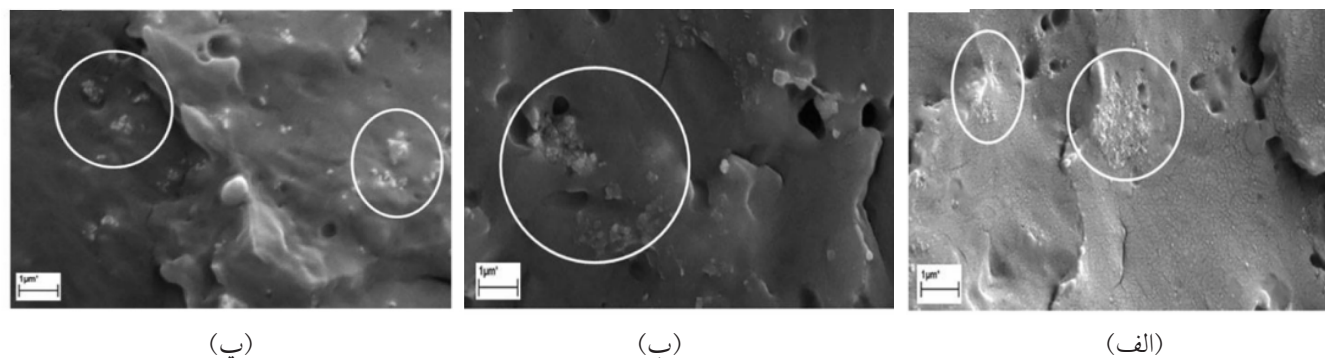
پرکننده ZnO سبب کاهش سرعت آتشگیری آمیخته PP/EPDM نسبت به SiO₂ و TiO₂ شده که به دلیل خاصیت ذاتی این ترکیب در تأخیراندازی فرایند سوختن است. EPDM به‌طور ذاتی دارای خواص دی‌الکتریکی درخور توجهی است. بنابراین انتظار می‌رود، با افزودن آن به PP سبب بهبود این خواص در آمیخته نهایی شود. اما بررسی‌ها نشان می‌دهد در مقادیر کم از EPDM (کمتر از ۵۰ درصد) اثر مثبتی بر خواص دی‌الکتریک ندارد و با افزایش مقدار از ۵۰ درصد بیشتر سبب بهبود خواص دی‌الکتریک می‌شود. همچنین، افزودن نانوپرکننده‌ها به آمیخته در مقادیر کم سبب کاهش این خواص در نانوکامپوزیت نهایی می‌شود. اما مقادیر بیش از ۱ درصد باعث بهبود خواص دی‌الکتریک نانوکامپوزیت‌های تهیه‌شده می‌شوند (شکل ۶). تصاویر میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM) حاکی از عدم پراکنش نانوذرات و نیروی اتصال مناسب میان آن‌ها و آمیخته PP/EPDM است (شکل ۷). این شرایط می‌تواند سبب تشکیل درشت‌حفره‌ها و نانوحفره‌ها در نانوکامپوزیت نهایی شده



شکل ۶- اثر پرکننده‌های مختلف بر خواص دی‌الکتریک نانوکامپوزیت برپایه PP/EPDM [۱۳].



شکل ۵- گرمانگاشت TGA نمونه‌های کامپوزیت PP/EPDM/PP کلورینت تهیه‌شده با دو روش TSE و FSP [۱۲].

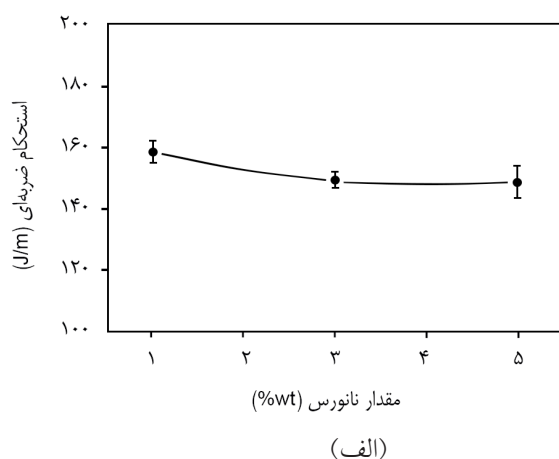
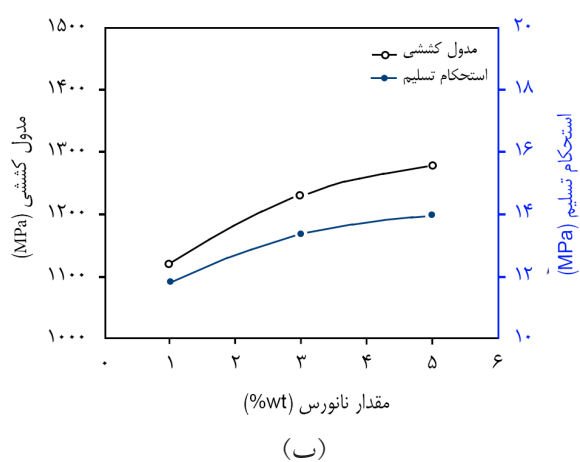


شکل ۷- تصاویر SEM نمونه‌های نانوکامپوزیت PP/EPDM تهیه‌شده با پرکننده‌های مختلف: (الف) SiO_2 ، (ب) TiO_2 و (پ) ZnO [۱۳].

ساخت نانوکامپوزیت‌های برپایه PP/EPDM با ۵ درصد رس را بر ریزساختار و خواص مکانیکی با روش اختلاط مذاب بررسی کردند. شکل ۹ نشان می‌دهد با تغییر شرایط اختلاط، فاصله صفحه‌های رس با هم تغییر می‌کند. همچنین با افزایش دمای اکستروژن کردن، مدول کششی کاهش پیدا می‌کند که برای سرعت‌های تغذیه و چرخش متفاوت ثابت است [۱۷]. این گروه خواص دینامیکی مکانیکی نانوکامپوزیت EPDM/PP رس را بررسی کردند. نتایج نشان داد، افزودن نانوذرات رس به ماده پایه PP/EPDM، باعث افزایش مدول ذخیره در تمام بازه دمایی می‌شود که به دلیل اثر نانوذرات بر کاهش تحرک زنجیرهای PP و EPDM است.

Rane و همکاران اثر درصد نانوذرات رس را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت PP/EPDM بررسی کردند. آن‌ها بدین نتیجه رسیدند، افزودن نانوذرات تا ۶ درصد باعث بهبود استحکام کششی شده و سپس کاهش آن می‌شود، درحالی‌که سختی و مدول به‌طور مداوم افزایش می‌یابند. حرکات پرشتاب مکانیکی اجزا ممکن است باعث به‌وجود آمدن ارتعاشات نامطلوب در آن‌ها شود (جدول ۲) [۱۸].

تجمع‌یافته درون ماتریس PP جایگیری کردند [۱۴]. حجازی و همکاران اثر افزودن مقادیر مختلف نانوذرات کلوزیت 15A، خواص کششی و ریزساختاری نانوکامپوزیت برپایه PP/EPDM را با درصد‌های ۸۰/۲۰ بررسی کردند. با افزایش نانوذرات از ۰ درصد تا ۵ درصد استحکام و مدول کششی زیاد می‌شود، درحالی‌که استحکام ضربه‌ای کاهش می‌یابد. میزان افزایش برای ۱ و ۳ درصد نسبت به ۵ درصد وزنی بیشتر بود. دلیل این است که نانوذرات در درصد‌های کم پراکنش بهتری در فاز ماتریس دارند و صفحات رس از هم جدا می‌شوند، ازاین‌رو اثر بیشتری بر خواص مکانیکی می‌گذارند (شکل ۸) [۱۵]. این گروه پژوهشی اثر پارامترهای سرعت چرخش، زمان اختلاط مخلوط‌کن داخلی را بر خواص مکانیکی مثل استحکام‌های کششی و ضربه‌ای نانوکامپوزیت برپایه PP/EPDM با ذرات رس بررسی کردند که نتایج در جدول ۱ درج شده است. مطابق این جدول، با افزایش سرعت چرخش، استحکام، مدول و استحکام ضربه‌ای افزایش می‌یابد [۱۶]. خسروخواهر و همکاران در پژوهشی، اثر پارامترهای فرایند



شکل ۸- اثر درصد رس بر: (الف) استحکام کششی و (ب) استحکام ضربه‌ای [۱۵].

جدول ۱- اثر پارامترهای فرایند مخلوط‌کن داخلی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت PP/EPDM با نسبت وزنی ۲۰:۲۰ دارای ۳ درصد وزنی مونت‌موریلونیت اصلاح‌شده آلی [۱۶].

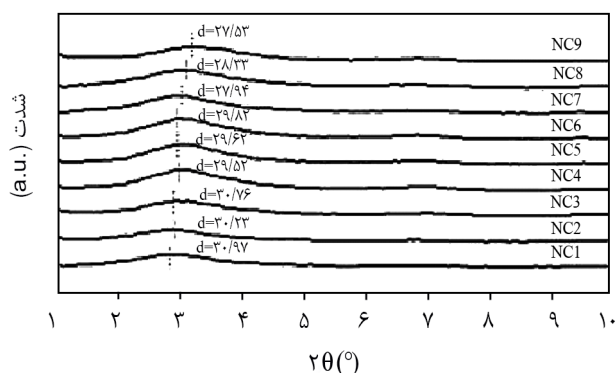
شرایط فراوری	مدول کششی (GPa)	استحکام تسلیم (GPa)	استحکام ضربه‌ای (J/m)
سرعت چرخانه ^۱ (rpm)			
۲۰	۱/۱۵	۱۱/۷	۱۴۰
۶۰	۱/۲۸	۱۲/۶	۱۸۵
۱۰۰	۱/۳	۱۲/۹	۱۶۸
زمان ^۲ (min)			
۵	۱/۲۶۵	۱۲/۶۳	۱۶۲
۱۰	۱/۲۸	۱۲/۶	۱۸۵
۲۰	۱/۲۷	۱۲/۶۱	۱۷۰

^۱ زمان ۱۰ min و ^۲ سرعت چرخانه ۶۰ rpm

پرکننده تهیه و سپس در مرحله دوم این مستریج با PP در حالت مذاب مخلوط شد. نتایج نشان داد، افزودن ذرات نانوسیلیکا (آب‌دوست و آب‌گریز) به PP خالص باعث کاهش استحکام ضربه‌ای می‌شود. در مقابل استحکام‌های کششی و خمشی و مدول خمشی با افزایش میزان نانوذرات افزایش یافت. نتایج ارائه‌شده برای آمیخته دوتایی PP/EPDM، نشانگر افزایش درخور توجه استحکام ضربه‌ای با افزایش درصد فاز لاستیکی بود (شکل ۱۰). درحالی‌که استحکام کششی، استحکام خمشی و مدول خمشی کاهش یافت. در نانوکامپوزیت‌های PP/EPDM/SiO₂ و روش اختلاط دومرحله‌ای، افزایش هم‌زمان در چقرمگی و مدول مشاهده شد. استفاده از SiO₂ آب‌گریز یا آب‌دوست طی فرایند یک‌مرحله‌ای، سبب افزایش جزئی در استحکام ضربه‌ای شد. همان‌طور که نتایج نشان داد، استفاده از ذرات آب‌دوست در فرایند

Yang و همکاران، ساختار فازی، خواص مکانیکی و سازوکارهای چقرمه‌سازی کامپوزیت‌های P/EPDM/SiO₂ را بررسی کردند. هدف آن‌ها کنترل توزیع و پراکنش EPDM و ذرات SiO₂ در ماتریس PP با استفاده از روش فراوری مناسب بود تا بهبود چقرمگی و مدول به‌طور هم‌زمان در ماتریس PP حاصل شود. بدین منظور از دو نوع نانوذرات A-SiO₂ (آب‌دوست) و B-SiO₂ (آب‌گریز) و نیز دو روش فراوری یک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای برای تهیه نانوکامپوزیت PP/EPDM/SiO₂ استفاده کردند. در روش یک‌مرحله‌ای، لاستیک پرکننده را به‌طور مستقیم با ماتریس پلی‌پروپیلن در حالت مذاب آمیخته کردند. در روش دومرحله‌ای، در ابتدا مستریج لاستیک و

شماره رانش	کد نمونه	دما (°C)	سرعت ماردان (rpm)	سرعت خوراک‌دهی (kg/h)
۱	NC1	۱۸۰	۵۰	۰/۲
۲	NC2	۱۸۰	۱۰۰	۰/۶
۳	NC3	۱۸۰	۱۵۰	۰/۶
۴	NC4	۱۹۰	۵۰	۱/۰
۵	NC5	۱۹۰	۱۰۰	۱/۰
۶	NC6	۱۹۰	۱۵۰	۰/۲
۷	NC7	۲۰۰	۵۰	۱/۰
۸	NC8	۲۰۰	۱۰۰	۰/۲
۹	NC9	۲۰۰	۱۵۰	۰/۶



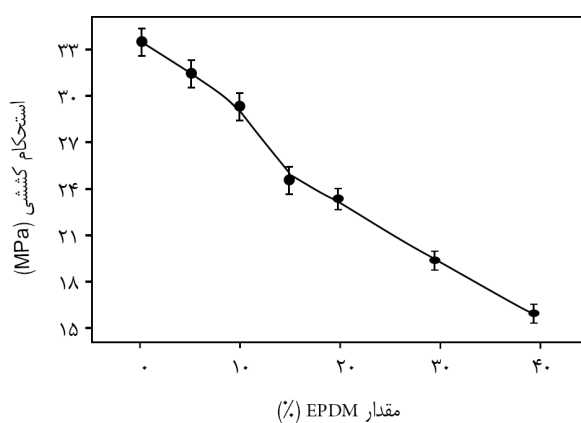
شکل ۹- اثر شرایط اختلاط روی فاصله صفحه‌های رس. تغییرات سه پارامتر سرعت خوراک ورودی، سرعت ماردان و دمای محفظه اکسترودر نمونه‌های NC1-NC9 تهیه‌شده در جدول درج شده است [۱۷].

جدول ۲- اثر مقدار نانورس بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت PP/EPDM [۱۸].

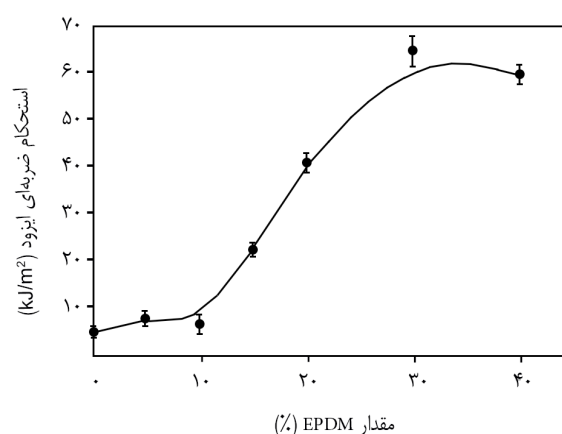
مقدار نانورس (phr)						خواص
۱۰	۸	۶	۴	۲	۰	
۴/۵	۴/۸	۵/۴	۴/۸	۴/۳	۳/۷	استحکام کششی (MPa)
۱۳۰	۱۳۵	۱۱۵	۱۲۵	۱۳۵	۱۴۵	ازدیاد طول تا پارگی (%)
۵/۲	۴/۷	۴/۴	۴/۰	۳/۶	۳/۲	مدول ۵۰٪ (MPa)
۵/۴	۵/۳	۴/۸	۴/۴	۴/۳	۳/۷	مدول ۱۰۰٪ (MPa)
۳۰	۲۹/۵	۲۵	۲۴	۲۵	۲۳	استحکام پارگی (kg/cm)
۷۰	۶۸	۶۷	۶۲	۵۶	۵۴	سختی (shore A)

کردند. برای کامپوزیت‌های PP/EPDM/A-SiO₂ تهیه‌شده با روش اختلاط یک‌مرحله‌ای یا دو مرحله‌ای شکل‌شناسی فازی هسته-پوسته (فاز لاستیکی به‌عنوان پوسته) مشاهده شد. درحالی‌که، برای کامپوزیت‌های PP/EPDM/B-SiO₂ تهیه‌شده با روش یک‌مرحله‌ای،

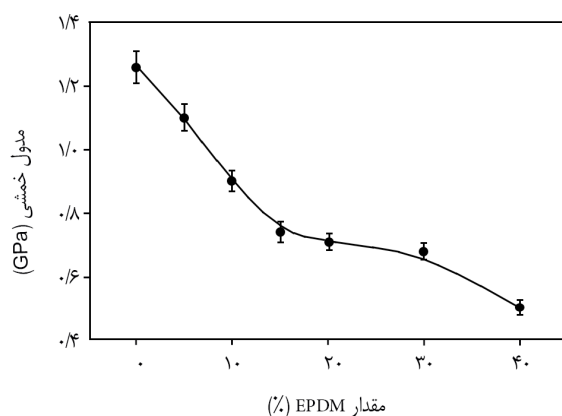
اختلاط دو مرحله‌ای با در نظر گرفتن پارامترهای ترمودینامیکی، سبب افزایش درخور توجه استحکام ضربه‌ای شد. ازاین‌رو، این پژوهشگران برای درک بهتر نقش ذرات مختلف درون ماتریس و نوع شکل‌شناسی کامپوزیت نهایی ریزساختار نمونه‌ها را بررسی



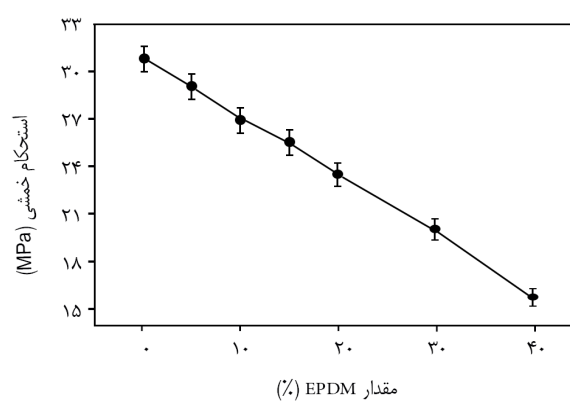
(ب)



(الف)



(ت)

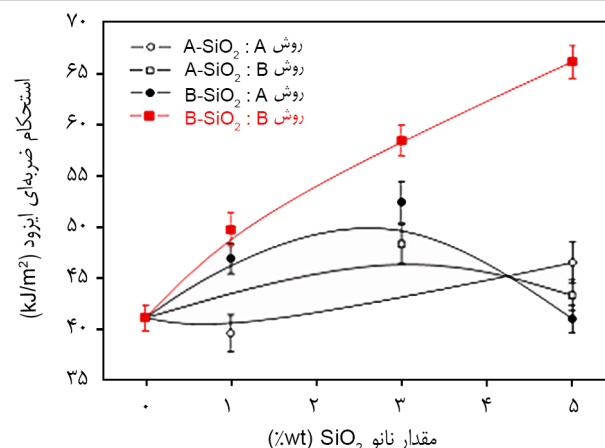


(پ)

شکل ۱۰- خواص مکانیکی آمیخته دوتایی PP/EPDM در برابر مقدار EPDM: (الف) استحکام ضربه‌ای ایزود، (ب) استحکام کششی، (پ) استحکام خمشی و (ت) مدول خمشی [۱۹].

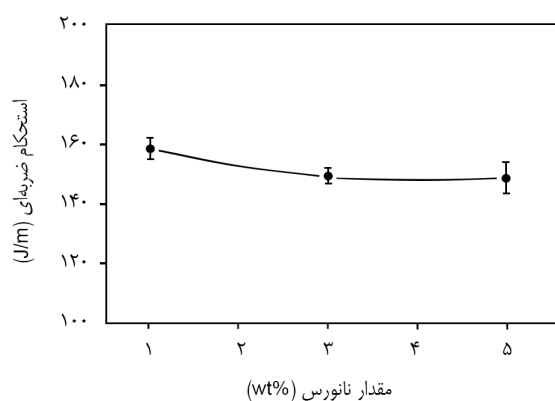
از ذرات B-SiO₂ در اطراف فاز EPDM تجمع کردند. Yang و همکاران، افزایش چشمگیر استحکام ضربه‌ای را به شکل‌گیری این شکل‌شناسی نسبت دادند (شکل ۱۱) [۱۹].

شریف و همکاران، اثر شرایط فراوری و سازگارسازی را بر رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت‌های EPDM/PP/رس بررسی کردند. نتایج نشان داد، برخلاف مدول کشسانی، افزودن نانورس به آمیخته دوتایی PP/EPDM افزایش کمی در تنش تسلیم را به همراه داشت. این رفتار به چسبندگی ضعیف در فصل مشترک پلیمر با پرکننده و نیز عدم پراکنش مناسب صفحه‌های نانورس نسبت داده شد. با افزایش مقدار نانوذرات، استحکام ضربه‌ای به مقدار اندکی کاهش نشان داد. این پژوهشگران، کاهش استحکام ضربه‌ای را با افزایش مقدار نانورس به پراکنش بهتر ذرات لاستیکی و کاهش اندازه آن‌ها تا زیر اندازه بحرانی نسبت دادند. این مسئله به کاهش هم‌پوشانی میدان‌های تنش در اطراف ذرات لاستیکی در ماتریس منجر می‌شود و در نتیجه چقرمگی نانوکامپوزیت نهایی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سازگارکننده PP-g-MA، پراکنش صفحه‌های

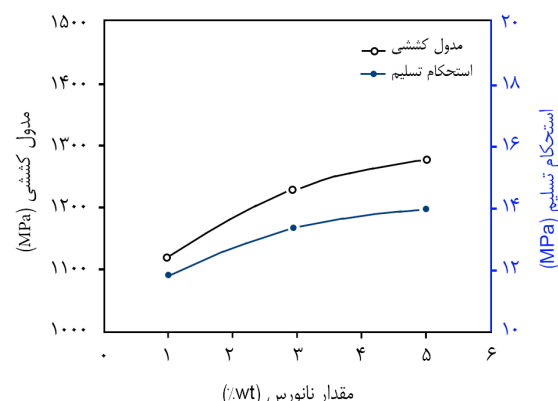


شکل ۱۱- استحکام ضربه‌ای ایزود کامپوزیت PP/EPDM/SiO₂ تهیه‌شده با دو روش یک‌مرحله‌ای (A) و دو مرحله‌ای (B) برحسب مقدار ذرات پرکننده نانوسیلیکای آب‌گریز (A-SiO₂) و آب‌دوست (B-SiO₂) با نسبت PP/EPDM ۸۰:۲۰ [۱۹].

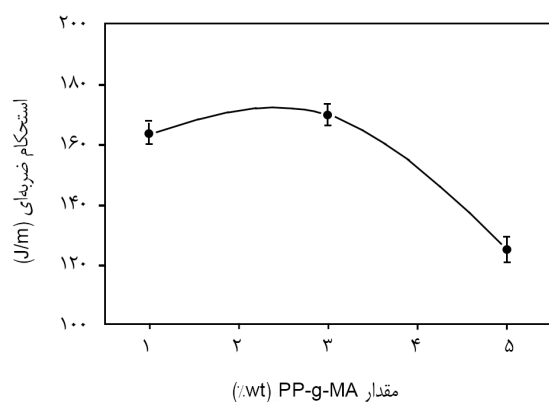
ساختار انبوهی از ذرات B-SiO₂ دیده شد. در مقابل، در کامپوزیت‌های PP تهیه‌شده با روش دو مرحله‌ای، بخش عمده‌ای



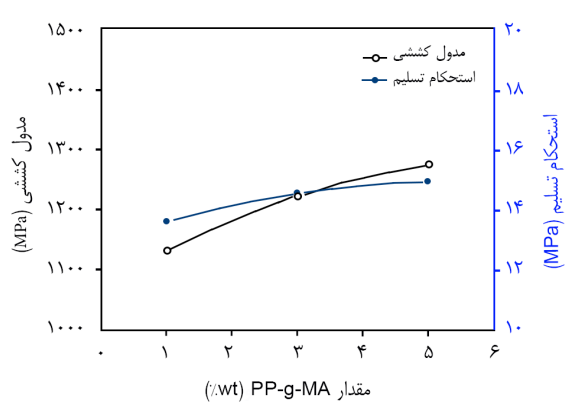
(ب)



(الف)

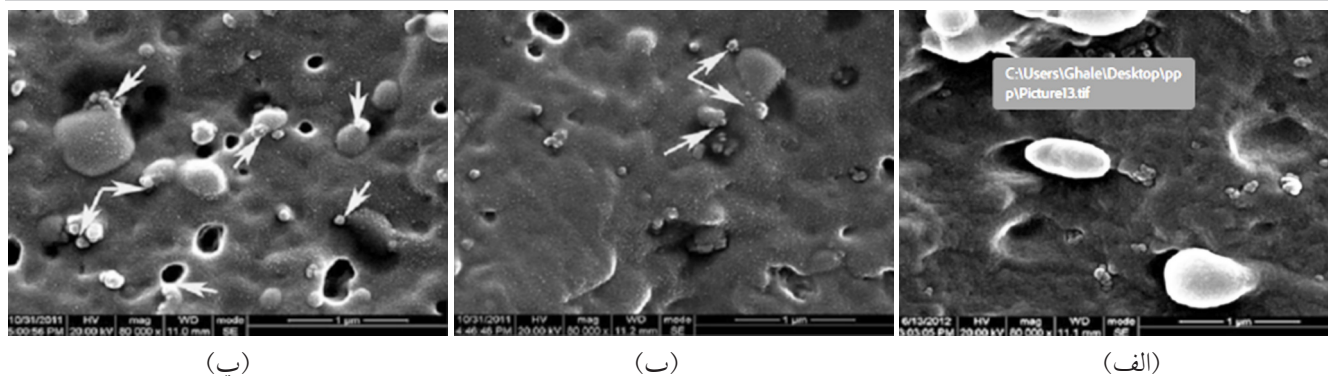


(ت)



(پ)

شکل ۱۲- اثر مقدار: نانورس بر (الف) مدول کششی و استحکام تسلیم و (ب) استحکام ضربه‌ای و سازگارکننده PP-g-MA بر (پ) مدول کششی و استحکام تسلیم و (ت) استحکام ضربه‌ای در نانوکامپوزیت PP/EPDM/رس [۲۰].



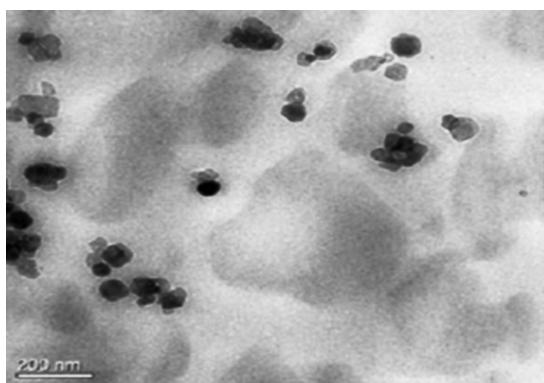
شکل ۱۳- تصاویر SEM از شرایط مختلف اختلاط در آمیخته‌سازی: (الف) حالت جامد، (ب) با مستریج و (پ) حالت مذاب [۲۱].

را برای حالت اختلاط جامد نشان داد. به‌طوری‌که هیچ ذره صلبی در فصل مشترک PP/EPDM مشاهده نشد. این پژوهشگران نشان دادند، در مقایسه با اختلاط جامد، در اختلاط دومرحله‌ای میزان کمی از ذرات صلب پراکنده در داخل ماتریس PP پراکنده هستند و تعداد بیشتر آن‌ها در فصل مشترک فازهای پلیمری قرار می‌گیرند (شکل ۱۳). همچنین، در روش اختلاط مذاب بخش عمده‌ای از ذرات پراکنده در داخل یا اطراف نواحی فازی لاستیکی قرار گرفتند که به نبود زمان کافی برای مهاجرت ذرات پراکنده از فاز لاستیکی به ماتریس PP ارتباط داده شد [۲۱].

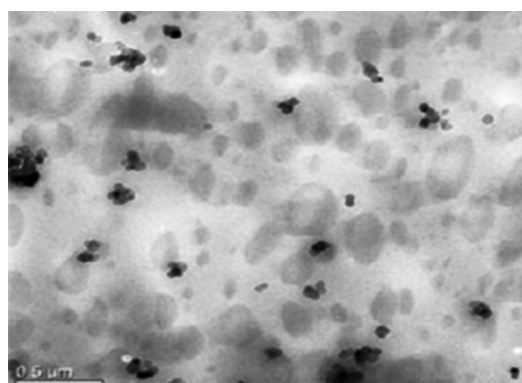
تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM نشان داد، در حالت اختلاط مذاب، نانوذرات کلسیم کربنات در فصل مشترک PP/EPDM یا در اطراف نواحی فازی لاستیکی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴). بهبود چشمگیر استحکام ضربه‌ای کامپوزیت سه‌تایی به تشکیل ریزساختار متفاوت در این حالت اختلاط نسبت داده شده است (شکل ۱۵). این پژوهشگران با بررسی خواص دینامیکی مکانیکی (ضریب اتلاف) مشاهده کردند که برای تمام نانوکامپوزیت‌های حاوی پراکنده دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) فاز

نانورس و به‌دنبال آن میزان سفتی و تنش تسلیم بهبود یافت. این پژوهشگران نتیجه‌گیری کردند، با استفاده از یک ترکیب درصد متوسط از سازگارکننده و پراکنده بهبود این خواص در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. افزون‌براین، افزایش بیشتر مقدار سازگارکننده به پراکنش بهتر صفحه‌های رس منجر می‌شود که در ادامه به کاهش هرچه بیشتر اندازه ذرات لاستیکی و در نتیجه کاهش چقرمگی نانوکامپوزیت نهایی منجر می‌شود (شکل ۱۲) [۲۰].

Gong و همکاران، در پژوهش دیگری اثر شرایط اختلاط متفاوت را بر شکل‌شناسی و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های PP/EPDM/ $CaCO_3$ بررسی کردند. این پژوهشگران، سه نوع شرایط اختلاط مختلف را در نظر گرفتند. اختلاط جامد که در آن هر سه فاز با هم به‌شکل جامد وارد اکسترودر می‌شوند. اختلاط دومرحله‌ای که در آن در ابتدا فاز نانو با فاز لاستیکی مذاب مخلوط شده و مستریج به‌دست‌آمده با ماتریس PP در اکسترودر دوماردانی مخلوط می‌شود. اختلاط مذاب که در آن مستریج به‌دست‌آمده از روش دوم از ناحیه ذوب اکسترودر دوماردانی به ماتریس PP تزریق می‌شود. مطالعات شکل‌شناختی این پژوهشگران ریزساختار ماتریس-دو فاز پراکنده



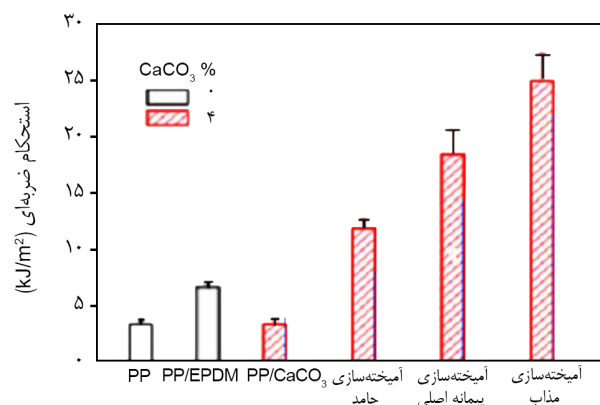
(ب)



(الف)

شکل ۱۴- تصاویر TEM با دو بزرگ‌نمایی مختلف از شکل‌شناسی کامپوزیت (۸۰/۲۰/۶) EPDM/PP/نانو $CaCO_3$ در شرایط اختلاط مذاب [۲۱].

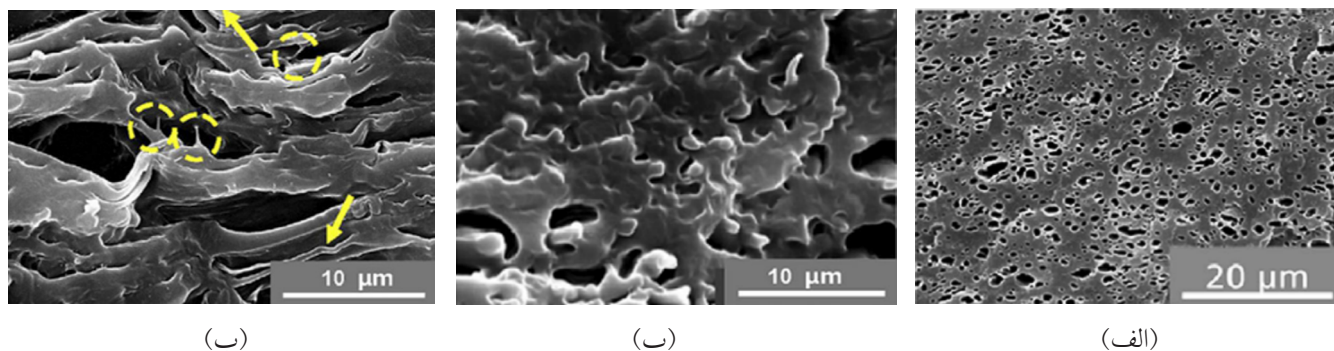
اختلاط دومرحله‌ای برای تهیه نمونه استفاده کردند. در ابتدا، دو جزء EPDM و CNT در یک اکسترودر دواردانی در سرعت ۱۴۵ rpm و میانگین دمای ۱۷۵ °C مخلوط شدند تا مسترچی حاوی ۱۰ درصد وزنی CNT تهیه شود. سپس، مسترچ به دست آمده با مقدار مشخصی ماتریس PP فراوری شد. ترکیب درصد وزنی اجزا در نمونه نهایی شامل مقدار EPDM در محدوده ۲۰ درصد تا ۴۰ درصد و مقدار CNT در محدوده ۱ درصد تا ۲ درصد بود. در نانوکامپوزیت تهیه شده با روش اختلاط دومرحله‌ای، جایگیری انتخابی فاز پراکنده سخت (CNT) درون نواحی فازی لاستیکی، نه تنها باعث افزایش حجم مؤثر فاز لاستیکی در ماتریس شده، بلکه با کاهش فاصله میان دو قطره لاستیکی درون ماتریس ضخامت لیگامان (ligament) ماتریس را نیز کاهش داده است. لیگامان میان ذرات الاستومر به لایه نازکی از ماده ماتریس اشاره دارد که آن ذرات را از هم جدا می‌کند. Yang و همکاران نشان دادند، کاهش ضخامت لیگامان ماتریس بین دو قطره لاستیکی مجاور هم، از یک سو استحکام ضربه‌ای نمونه نهایی را بهبود بخشیده است. از سوی دیگر باعث می‌شود، انتقال از حالت ترد به چقرمه در مقدار کمتری از فاز لاستیکی رخ دهد. نتایج بررسی‌های سطوح شکست نمونه‌های آزمون ضربه این پژوهشگران نشان داد، آمیخته PP/EPDM سطح شکست زبری دارد که تغییر شکل پلاستیک و موضعی در آن قابل مشاهده است. همچنین، حفره‌های نسبتاً بزرگی نیز روی سطح شکست مشاهده می‌شوند. برای نانوکامپوزیت سه‌تایی این حفره‌ها از حفره‌زایی فاز پراکنده لاستیکی ناشی می‌گیرند. در نمونه تهیه شده با روش اختلاط دومرحله‌ای، وجود یک تغییر شکل پلاستیک قوی در سرتاسر ماتریس پلیمری مشخص است. این تغییر شکل پلاستیک شدید سبب کشش و ایجاد نوعی شکل‌شناسی لیفچه‌ای درون ماتریس شده است. بنابراین، قابلیت جذب و اتلاف انرژی نانوکامپوزیت سه‌تایی در مقایسه با آمیخته دوتایی متناظر بیشتر می‌شود (شکل ۱۶) [۲۲].



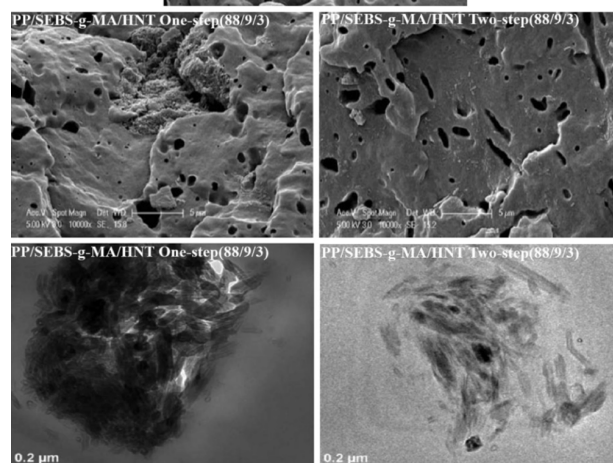
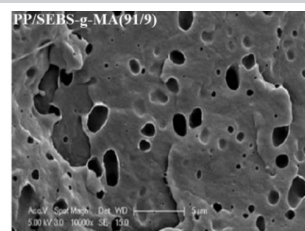
شکل ۱۵- استحکام ضربه‌ای ایزود کامپوزیت سه‌تایی نانو EPDM/PP/CaCO₃ در شرایط اختلاط اولیه مختلف [۲۱].

لاستیکی افزایش یافت. باین‌حال فاز لاستیکی نمونه تهیه شده با روش اختلاط مذاب، بیشترین T_g و نمونه حاصل از روش اختلاط جامد کمترین T_g را داشتند. این پژوهشگران نتایج به دست آمده را این‌گونه توجیه کردند، افزایش اندک دمای انتقال شیشه‌ای در اختلاط جامد نشانگر قرارگیری تعداد بسیار کمی از نانوذرات صلب در داخل فاز لاستیکی است. این در حالی است که بخش عمده‌ای از ذرات پراکنده در نمونه تهیه شده با اختلاط دومرحله‌ای درون فاز لاستیکی است. افزایش درخورد توجه T_g فاز لاستیکی برای نانوکامپوزیت حاصل از اختلاط مذاب نسبت به سایر نمونه‌ها، به دلیل جای‌گیری تقریباً تمام نانوذرات کلسیم کربنات درون فاز لاستیکی یا در فصل مشترک PP/EPDM است که مانع از تحرک زنجیرهای فاز لاستیکی شده و دمای انتقال شیشه‌ای آن را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد.

در کار دیگری Yang و همکاران، به مطالعه اثر وجود فاز سخت نانولوله‌های کربنی (CNT) بر ریزساختار و استحکام ضربه‌ای آمیخته‌های PP/EPDM پرداختند. بدین منظور، آن‌ها از روش



شکل ۱۶- تصاویر SEM از سطح شکست در آزمون ضربه نمونه کامپوزیت: (الف) PP/EPDM (۷۰/۳۰) و نمونه کامپوزیت سه‌تایی PP/EPDM/CNT با نسبت (ب) ۷۰/۳۰/۱ و (پ) ۷۰/۳۰/۲ [۲۲].



بود. آن‌ها گزارش کردند، برهم‌کنش قوی گروه‌های سیلانول (Si-OH) و آلومینول (Al-OH) پرکننده با مالیک انیدرید پیوندخورده بر فاز لاستیکی، انرژی سطح نانولوله‌ها را کاهش می‌دهد و به بهبود پراکنش آن‌ها منجر می‌شود. تصاویر SEM نشان می‌دهد، در نمونه تهیه‌شده با روش اختلاط دومرحله‌ای نواحی فازی لاستیکی به‌شکل کشیده در ماتریس مشاهده می‌شوند. به‌طوری‌که می‌توان گفت، شکل‌شناسی هم پیوسته ایجاد شده است. Kay و همکاران برهم‌کنش قوی نانولوله‌های HNT با فاز لاستیکی PP/SEBS-g-MA را عامل این رخداد دانستند و تأکید کردند، این چسبندگی قوی از تجمع مجدد نانولوله‌ها جلوگیری کرده و پراکنش همگن‌تری از فاز پرکننده را در مقایسه با نمونه حاصل از اختلاط یک‌مرحله‌ای ایجاد می‌کند. همچنین، جایگیری نانولوله‌ها درون فاز لاستیکی SEBS-g-MA یا در فصل مشترک PP/SEBS-g-MA به بهبود کیفیت فصل مشترک ماتریس و فاز لاستیکی کمک می‌کند و باعث کشیده شدن نواحی فاز لاستیکی در ماتریس می‌شود. افزایش چشمگیر استحکام ضربه‌ای نیز به تشکیل شکل‌شناسی هم پیوسته ارتباط داده شد. نتایج خواص مکانیکی نشان داد، افزودن ۳ درصد وزنی فاز پرکننده سخت نانولوله هالویسیت به ماتریس PP خواص مکانیکی و استحکام ضربه‌ای ماده را افزایش می‌دهد. نتایج نشان داد، آمیخته PP/SEBS-g-MA خواص مکانیکی کمتر، اما مقاومت ضربه‌ای بیشتری نسبت به ماتریس PP دارد. همچنین، نانوکامپوزیت سه‌تایی تهیه‌شده با روش اختلاط دومرحله‌ای بیشترین مقدار استحکام ضربه‌ای را در میان تمام نمونه‌ها دارد. باوجوداین، کاهش مدول ینگ نمونه حاصل از اختلاط دومرحله‌ای نشانگر وجود بخش کمتری از نانولوله‌های HNT در ماتریس PP است. سازوکار پیشنهادی این پژوهشگران، اثر جایگیری نانولوله‌های HNT در فصل مشترک PP/SEBS-g-MA بود که از به هم پیوستن نواحی فازی لاستیکی جلوگیری کرده و از شکست زودرس نمونه جلوگیری می‌کند (جدول ۳) [۲۳].

Zheng و همکاران با بررسی اثر سرعت ماردان اکسترودر بر ویژگی‌های نانوکامپوزیت‌های EPDM دریافتند، تقویت تنش برشی ناشی از افزایش سرعت ماردان، به دلیل چیرگی بر آستانه جنبشی ناشی از شکست کلوخه‌های مونت‌موریلونیت و انتقال صفحه‌های نانورس در مذاب پلیمری، اثر مثبتی بر نانوکامپوزیت نهایی دارد. افزایش دمای فراوری اکسترودر نیز با کاهش گرانروی پیونده و آسان‌سازی شکست کلوخه‌ها، پراکنش نانوذرات را در ماتریس EPDM بهبود می‌بخشد. این گروه کامپوزیت‌های EPDM را با استفاده از دو نوع نانورس مونت‌موریلونیت اصلاح‌شده با دو نمک

شکل ۱۷- تصاویر SEM و TEM آمیخته PP/SEBS-g-MA و نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی PP/SEBS-g-MA/HNT تهیه‌شده با روش‌های مختلف. در تصاویر SEM فاز لاستیکی به کمک حلال تتراهیدروفوران استخراج شده است [۲۳].

Kay و همکاران ارتباط شکل‌شناسی را با خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی PP/SEBS/EPDM-MMA/HNT مطالعه کردند. بدین منظور، آن‌ها از دو نوع روش اختلاط برای تهیه نمونه‌ها و EPDM-g-MA به‌طور هم‌زمان با ماتریس PP در اکسترودر دوماردانی و در دمای ۲۵۵ °C مخلوط شدند. در روش دوم یا اختلاط دومرحله‌ای، در ابتدا مستریج HNT و SEBS-g-MA با روش اختلاط محلولی تهیه شد. سپس، از نمونه حاصل برای تهیه نانوکامپوزیت نهایی استفاده کردند. نتایج مطالعه شکل‌شناسی در شکل ۱۷ نشان داد، ریزساختار آمیخته PP/SEBS-g-MA به شکل ماتریس-پراکنده است.

این پژوهشگران گزارش کردند، شکل‌شناسی فازی و نحوه پراکنش فازهای پراکنده درون ماتریس برای نمونه‌های سه‌تایی تهیه‌شده با روش اختلاط یک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای با هم تفاوت دارند. نمونه تهیه‌شده با روش اختلاط دومرحله‌ای پراکنش بهتر ذرات HNT را نشان داد و فصل مشترک بسیار بهتری را با ماتریس داشت. مطابق با تصاویر TEM، در روش اختلاط یک‌مرحله‌ای کلوخه‌های بزرگ‌تری از نانولوله‌ها درون ماتریس مشاهده شد. درحالی‌که در روش اختلاط دومرحله‌ای، پراکنش نانولوله‌ها بهتر

جدول ۳- خواص مکانیکی و استحکام ضربه چارپی PP خالص، آمیخته‌های PP/HNT و PP/SEBS-g-MA و نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی PP/SEBS-g-MA/HNT تهیه‌شده به دو روش یک و دومرحله‌ای [۲۳].

مواد	مدول یانگ، E (MPa)	استحکام تسلیم، σ_y (MPa)	استحکام ضربه‌ای (kJ/m ²)
PP	۱۳۵۶/۴۶±۳۱/۲۰	۳۹/۸۳±۰/۵۴	۲/۹۸±۰/۰۶
PP/HNT (۹۷/۳)	۱۴۳۰/۴۰±۶۹/۸۹	۳۸/۲۵±۰/۰۵	۶/۳۲±۰/۴۰
PP/SEBS-g-MA (۹۱/۹)	۱۱۱۶/۵۲±۳۲/۹۷	۳۱/۶۷±۱/۰۴	۶/۷۱±۰/۷۸
PP/SEBS-g-MA/HNT یک‌مرحله‌ای (۸۸/۹/۳)	۱۲۹۶/۵۰±۴۶/۱۰	۳۱/۹۳±۰/۳۵	۴/۳۳±۰/۶۲
PP/SEBS-g-MA/HNT دومرحله‌ای (۸۸/۹/۳)	۱۱۹۰/۴۹±۱۰/۴۷	۳۳/۱۸±۰/۸۹	۹/۲۹±۰/۱۱

از EPDM در کنار نانومواد بررسی شد. واضح است، افزایش استحکام و مدول کششی به درجه پراکنش نانوذرات در پیونده پلیمری وابسته است. هرچه درجه پراکنش بیشتر باشد، احتمال دستیابی به ساختار پراکنشی و در نتیجه به بیشترین کیفیت مطلوب نانوکامپوزیت بیشتر می‌شود. بهترین روش تهیه نانوکامپوزیت، استفاده از اکسترودر دوماردانی است، به‌طوری‌که تمام اجزا، به‌طور هم‌زمان وارد اکسترودر می‌شوند. فرایند میان‌لایه‌ای شدن و ریزساختار نهایی نانوکامپوزیت، افزون بر ماهیت کشسانی، به نوع اصلاح‌کننده، شتاب‌دهنده‌های واکنش پخت و شرایط فرایندی بستگی دارد.

اکتادسیل تری‌متیل آمونیوم و نیز دی‌استاریل دی‌متیل آمونیوم به روش فراوری مذاب تهیه کرد. آن‌ها مشاهده کردند، با افزایش طول بخش آب‌گریز این دو نوع نمک آمونیوم، میزان پراکنش نانوذرات در محیط EPDM بهبود می‌یابد [۲۴].

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه‌های انجام‌گرفته روی یکی از کارآمدترین روش‌ها برای بهبود ویژگی‌های PP، یعنی بهره‌گیری

مراجع

1. Praveen K.M., Pillin I., Kervolen A., Grohens Y., and Thomas S., Investigations on the Effect of Sol-Gel Coated Coir Fiber Reinforcement in PP/EPDM Composites, *Eur. Polym. J.*, **212**, 113081, 2024.
2. Hossain M.T., Shahid M.A., Mahmud N., Habib A., Rana M., Ahmed Khan S. et. al., Research and Application of Polypropylene: A Review, *Discov Nano.*, **19**, 1–21, 2024.
3. Sharshir S.W., El-Attar H., Basem A., El-Naggar A.A., Alaraj A.M., Attia A. et al., An Overview of the Progress in the Synthesis of Nanocomposites for Industrial Applications: Techniques Preparation, Definitions, and Characterization, *Synthetic Met.*, **307**, 117665, 2024.
4. Sharip M.R.M., Yiew L.K., Piah M.A.M., Zaidel D.N.A., Ghani A.B.A., and Ariffin N.A.N., Effect of Ethylene-Propylene-Diene Monomer Blending on the Dielectric Properties of Polypropylene for Power Cable Insulation, *J. Electr. Eng.*, **23**, 31–36, 2024.
5. Uzunbayır B., Uyulgan B., Saf O., and Pamukoğulları B., Recycled EPDM in Automotive TPVs: Evaluating Mechanical Properties for Industry Requirements, *Mühendislik, Fen ve Sağlık Bilim Ar-Ge ve İnovasyon Çalışmaları*, **29**, 2024.
6. Taher F., Afshari M., Houmani A., Samadi M.R., Bakhshi S., and Afshari H., Simultaneous Enhancement of the Impact Strength and Tensile Modulus of PP/EPDM/TiO₂ Nanocomposite Fabricated by Fused Filament Fabrication, *Colloid Polym. Sci.*, **302**, 393–407, 2024.
7. Badr M.M., Abdel-Raouf M., Abdelaziz A.I., Hasan A.M., and Abdeen Z., Preparation and Properties of Montmorillonite Incorporated Natural Rubber/Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber Blends, *Prog. Rubber, Plast. Recycl. Technol.*,

- 40, 2024.
8. Panigrahi H. and Kotnees D.K., Polypropylene-Based Thermoplastic Elastomers: Fundamental Blending Issues, *Adv. Thermoplast. Elastom.*, 177–216, 2024.
9. Naderi G., Lafleur P.G., Dubois C., Microstructure–Properties Correlations in Dynamically Vulcanized Nanocomposite Thermoplastic Elastomers Based on PP/EPDM, *Polym. Eng. Sci.*, **47**, 3, 207–217, 2007.
10. Khosroukhavar R., Naderi G., Bakhshandeh G.H.R., Ghoreyshi M.H.R., Effect of Processing Parameters on PP/EPDM/ Organoclay Nanocomposites Using Taguchi Analysis Method, *Iran. Polym. J.*, **20**, 41-53, 2011.
11. Ahmadi A., Arab N.B.M., Naderi G., Nakhaei M.R., Multi-Response Optimization of Mechanical Properties of Laser Welds of PP/EPDM/Clay Nanocomposite Using Response Surface Methodology Based on desirability Approach Analysis, *J. Elast. Plast.*, **53**, 323–346, 2021.
12. Nakhaei M.R., Mostafapour A., Dubois C., Naderi G., and Ghoreishy M.H.R., Study of Morphology and Mechanical Properties of PP/EPDM/Clay Nanocomposites Prepared Using Twin–Screw Extruder and Friction Stir Process, *Polym. Compos.*, **40**, 3306-3314, 2019.
13. Hidayah I.N., Mariatti M., Ismail H., and Kamarol M., Evaluation of PP/EPDM Nanocomposites Filled with SiO₂, TiO₂ and ZnO Nanofillers as Thermoplastic Elastomeric Insulators, *Plast. Rubber Compos.*, **44**, 259-264, 2015.
14. Hajibabazadeh S., Palahang M., and Aghjeh M.K.R., Effect of Morphology Development on Mechanical Properties and Fracture Behavior of PP/EPDM/SiO₂ Blend-Nanocomposites, *Polym. Test.*, **73**, 124-134, 2019.
15. Hejazi I., Sharif F., and Garmabi H., Effect of Material and Processing Parameters on Mechanical Properties of Polypropylene/Ethylene–Propylene–Diene–Monomer/Clay Nanocomposites, *Mater. Des.*, **32**, 3803-3809, 2011.
16. Hejazi I., Seyfi J., Sadeghi G.M.M., and Davachi S.M., Assessment of Rheological and Mechanical Properties of Nanostructured Materials Based on Thermoplastic Olefin Blend and Organoclay, *Mater. Des.*, **32**, 649–655, 2011.
17. Khosroukhavar R., Naderi G., Bakhshandeh G.H.R., Ghoreyshi M.H.R., Effect of Processing Parameters on PP/EPDM/ Organoclay Nanocomposites Using Taguchi Analysis Method, *Iran. Polym. J.*, **20**, 41-53, 2011. تکراری با 10 یکی است.
18. Rane A.V. and Abitha V.K., Study of Mechanical, Thermal and Micro Structural Properties of EPDM/Polypropylene/ Nano Clay Composites with Variable Compatibilizer Dosage, *J. Mater. Environ. Sci.*, **6**, 60-69, 2015.
19. Yang H., Zhang Q., Guo M., Wang C., Du R., and Fu Q., Study on the Phase Structures and Toughening Mechanism in PP/ EPDM/SiO₂ Ternary Composites, *Polymer*, **47**, 2106–2115, 2006.
20. Louizi M., Massardier V., Mélis F., Alcouffe P., and Cassagnau P., High Shear Processing of (PP/EPR)/Silica Nanocomposites: Improvement of Morphology and Properties, *Int. Polym. Process.*, **29**, 118-127, 2014.
21. Wang W. and Liu T., Mechanical Properties and Morphologies of Polypropylene Composites Synergistically Filled by Styrene–butadiene Rubber and Silica Nanoparticles, *J. Appl. Polym. Sci.*, **109**, 1654-1660, 2008.
22. Tekay E., Nugay N., Nugay T., and Şen S., Revolution/Rotation–Type Mixing–Assisted Masterbatch Process for Polypropylene–Based High–Impact Ternary Nanocomposites, *Polym. Compos.*, **40**, 24-36, 2019.
23. Louizi M., Massardier V., Mélis F., Alcouffe P., and Cassagnau P., High Shear Processing of (PP/EPR)/silica Nanocomposites: Improvement of Morphology and Properties, *Int. Polym. Process.*, **29**, 118-127, 2014.
20. Hejazi I., Sharif F., and Garmabi H., Effect of Material and Processing Parameters on Mechanical Properties of Polypropylene/Ethylene–Propylene–Diene–Monomer/Clay Nanocomposites, *Mater. Des.*, **32**, 3803–3809, 2011.
21. Gong L., Yin B., Li L.-P., and Yang M.-B., The Effects of Different Processing Methods on the Morphology and Properties of PP/EPDM/Nano-CaCO₃ Ternary Blend, *J. Macromol. Sci. Part B: Phys.*, **50**, 806-820, 2011.
22. Yang C., Huang T., Yang J., Zhang N., Wang Y., and Zhou Z., Carbon Nanotubes Induced Brittle-Ductile Transition Behavior of the Polypropylene/Ethylene-Propylene-Diene Terpolymer Blends, *Compos. Sci. Technol.*, **139**, 109–116, 2017.
23. Tekay E., Nugay N., Nugay T., and Şen S., Revolution/Rotation–Type Mixing–Assisted Masterbatch Process for Polypropylene–Based High–Impact Ternary Nanocomposites, *Polym. Compos.*, **40**, 24-36, 2019.
24. Zheng H., Zhang Y., Peng Z., and Zhang Y., Influence of Clay Modification on the Structure and Mechanical Properties of EPDM/Montmorillonite Nanocomposites, *Polym. Test.*, **23**, 217-223, 2004.