

مروری بر تأثیر نانوصفحات رس بر خواص روانه‌شناختی پایا و پویاشناسی نانوچندسازه‌های بسپاری

سعید زینالی هریس^{۱*}، ماریا نوروزی گزکوه^۲

۱- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

پیام‌نگار: s.zeinali@tabrizu.ac.ir

چکیده

نانوچندسازه‌های بسپاری از متنوع‌ترین مواد امروزی و دارای خواص بی‌همتایی هستند، ولی با این حال مواد بسپاری نمی‌توانند به‌تنهایی، دامنه گسترده‌ای از خواص مطلوب روانه‌شناختی را از خود نشان دهند، از این رو برای توسعه کارایی بالای این نانوچندسازه‌ها، به امتزاج این چندسازه‌ها، با موادی مانند نانوصفحات رس که یکی از تجاری‌ترین و مؤثرترین نانوصفحات رایج است، نیازمندیم. بنابراین در این تحقیق، مروری بر مطالعه‌های پیشین انجام‌شده برای بررسی اثر نانو صفحات رس در نانوچندسازه پلی‌پروپیلن/ رس بر خواص روانه‌شناختی آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر بسپاری انجام شده است. براساس بررسی‌های ما، مشخص شد که برای برهمکنش‌های ضعیف چندسازه‌های بسپار/ نانو صفحات رس و در سامانه‌هایی که پخش ذرات نانو در آن‌ها پایداری کمی دارد، افزودن سیلیکات لایه‌ای کمترین تأثیر را بر رفتار روانه‌شناختی نانوچندسازه دارد. برای برهمکنش‌های قوی چندسازه‌های بسپار/صفحات رس، یک انتقال از رفتار روانه‌شناختی مایع‌گونه به رفتار جامدگونه در اندازه‌های نسبتاً کم از سیلیکات (۲-۱ درصد وزنی) دیده می‌شود. از طرفی، براساس بررسی‌های انجام‌شده، مشخص شده است که نانوصفحات رس با افزایش گرانروی و کشسانی ماتریس بسپار به گسترش ریخت‌شناسی فازی کمک می‌کند.

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۵

شماره صفحات: ۷۰ تا ۸۸

کلیدواژه‌ها: نانوچندسازه، نانوصفحات رس، پلی‌پروپیلن، خواص روانه‌شناختی، مدول کشسانی

۱. مقدمه

است؛ با این حال اما هم‌نهایت بسپارهایی با خواص مخصوص پیچیده است و مراحل بسیاری را دربر می‌گیرد و بهره‌برداری از این مواد با خصوصیات مورد نظر را دشوار می‌کند [۱]. در سال‌های گذشته، شیوه جدیدی برای سازگارسازی و بهبود خواص روانه‌شناختی نانوچندسازه‌های بسپاری با استفاده از نانوذرات

امروزه بسپارها با خواص بی‌همتای خود مورد توجه بسیاری از حوزه‌ها از جمله صنعت قرار گرفته است؛ چرا که دارای برتری‌های بی‌همتایی مانند کم‌هزینه بودن و خصوصیات روانه‌شناختی متنوعی

* تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، گروه مهندسی شیمی

یکی از مهمترین جنبه‌های یک بسیار، با توجه به اهمیت آن در تولید بسیار با خصوصیات مورد نظر، توجه به ویژگی‌های روانه‌شناختی آن است که به متغیرهای مختلفی چون زمان، دما، سرعت تغییر شکل، فشار، غلظت پرکننده، فرمولاسیون شیمیایی و غیره بستگی دارد و در مقابل تنش‌های وارد شونده به صورت کشسان (گران‌رو) تغییر شکل می‌یابد که برحسب بسامد مواد بسیاری یا مواد ترکیب‌شده، از طریق مدول کشسان و مدول گران‌رو اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین برای رسیدن به درک بهتر قابلیت مواد بسیاری و چندسازه‌ها، ارزیابی خواص روانه‌شناختی اهمیت ویژه‌ای دارد که براساس ارزیابی‌های برش پایداری و یا برش نوسانی پویاشناسی انجام می‌گیرد (۱۷و۱۸).

اندازه‌گیری خصوصیات روانه‌شناختی نانوجندسازه‌های بسیار/ رس دارای چند برتری است؛ نخست این که، روشی سریع و مطمئن برای تعیین توزیع وزن مولکولی و انشعاب زنجیره‌های طولانی ارائه می‌دهد که در ترکیب با سایر مواد، تأثیر تعیین‌کننده‌ای در خواص محصول نهایی دارند. دوم، برای این که به شکل پلاستیکی مورد نظر درآیند، بسیارها به‌طور معمول ذوب می‌شوند، در حالت مایع پردازش‌شده و سپس جامد می‌شوند. سوم این که، در مطالعه‌های روانه‌شناختی باتوجه به این که جریان‌های پیچیده را می‌توان ترکیبی از جریان‌های ساده‌تر در نظر گرفت، بنابراین پیچیدگی جریان را به مجموعه‌ای از جریان‌های ساده کاهش می‌دهد. افزون بر این، روانه‌شناسی پاسخ خطی بسیار را با در نظر گرفتن جریان‌های کند و یا تغییر شکل‌های کوچک (ساده‌تر برای تجزیه و تحلیل) بررسی می‌کند. درمجموع، اندازه‌گیری‌های روانه‌شناختی در شرایط جریان ساده و تعریف‌شده، به اصطلاح رئومتري را تشکیل می‌دهد و جریان‌های برشی و کششی را نیز شامل می‌شود، که حالت دوم در بسیاری از عملیات شکل‌دهی مانند چرخش الیاف، قالب‌گیری ضربه‌ای و غیره، قرار دارد. از این‌رو یکی از جنبه‌های مهم در مهندسی عملیات پردازش بسیار، مطالعه رفتار جریان مایعات بسیاری است [۱۸]. بنابراین هدف از انجام این تحقیق، مروری بر مطالعه‌های انجام‌شده روی اثر نانو صفحات رس در نانوجندسازه پلی‌پروپیلین/ رس بر خواص روانه‌شناختی آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر بسیاری بود.

معدنی معرفی شده که در عرصه علم و صنعت جایگاه ویژه‌ای یافته‌است. در این راهبرد، به‌جای همنهشت کردن درشت‌مولکول‌های جدید و پیچیده از بسیارها، اندازه‌های بسیار کم از چنین افزودنی‌ها و پرکننده‌هایی، با یک بسیار مخلوط می‌شوند تا مواد جدیدی با خاصیتی بی‌همتا ایجاد شوند [۲]. در میان نانوذرات معدنی مورد استفاده به‌عنوان افزودنی یا تقویت‌کننده، سیلیکات‌های لایه‌ای مانند مونتوریلونیت (MMT) توجه زیادی را به‌خود جلب کرده‌اند و معمولاً به‌عنوان تقویت‌کننده خواص بسیارها استفاده می‌شوند [۳و۴]. زیرا این نانوذرات را می‌توانند در یک بسیار ذوب و یا بسیار محلول شده، پراکنده کرد [۵و۶]. بنابراین به‌دلیل در دسترس بودن گسترده آنها و هزینه تاحدودی اندک، برای کاربردهای گوناگونی مورد مطالعه و توسعه قرار گرفته‌اند [۷].

از سوی دیگر، قرن‌هاست که به‌خوبی مشخص شده، افزودن نانوفیلرها (بیشتر ترکیبات کربن سیاه به ترکیبات لاستیکی) تأثیر بسزایی بر خواص مواد دارد [۸] ولی امروزه، نانوجندسازه‌های بسیار/ رس به‌عنوان یک کلاس جدید چندسازه‌ها توسعه‌یافته و توجه زیادی را به‌خود جلب کرده‌اند؛ زیرا می‌توانند درجه بالاتری از مقاومت و پایداری حرارتی (کاربردهای ضد حریق) را از خود نشان دهند [۹] و با رشد سریع فناوری نانو، مواد معدنی رس به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان نانومواد طبیعی در بسیاری از صنایع همچون هوافضا، خودرو و ساختمان استفاده می‌شوند [۱۰]. چرا که صفحات رس، از چندسازه‌های عادی سبک و سازگار با محیط زیست است و با هزینه کم در دسترس است و با بهبود خواص روانه‌شناختی و مکانیکی بسیارها، موجب کاهش تخریب حرارتی و محیطی این مواد می‌شود [۳و۴].

برای ساخت نانوجندسازه‌های رس از روش‌های اختلاط محلولی، اختلاط ذوبی و بسیارش درجا استفاده می‌شود. روش اختلاط محلولی، یک فرایند مبتنی بر حلال است که در آن بسیار در حلالی مانند زایلین یا تولوئن حل شده، پس از افزودن صفحات رس و تبخیر حلال، نانوجندسازه بسیار/ رس حاصل می‌شود [۱۱و۱۲]. در روش اختلاط ذوبی، مقدار مشخصی از صفحات رس را در دمای بالاتر از نقطه ذوب بسیار، مخلوط می‌کنند [۱۳و۱۴] و در روش بسیارش درجا نیز، بستر بسیاری با حضور نانوصفحات رس انجام شده، بسیار در حین رشد، صفحات رس را در برمی‌گیرد [۱۵و۱۶]. بنابراین،

۲. روش‌های بررسی خواص روانه‌شناختی نانوجندسازهای بسپاری

برای ارزیابی خواص روانه‌شناختی نانوجندسازهای بسپار/رس می‌توان از خواص روانه‌شناختی پایا و پویاشناسی بهره جست که توضیحات و نحوه اندازه‌گیری این خواص در ادامه گزارش می‌شود.

۲-۱-۱ خواص روانه‌شناختی پایا

۲-۱-۱-۱ رابطه تنش برشی-سرعت برشی

برای تعیین رابطه تنش برشی-سرعت برشی، تنش برشی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و در سرعت‌های برشی (1/s) ۱-۱۰۰۰، انجام می‌گیرد. به‌طوری‌که، متغیرهای تنش برشی به‌طور مستقیم و پیوسته در سرعت‌های برشی (1/s) ۱-۱۰۰۰، اندازه‌گیری شده، سپس مقادیر و داده‌های تنش برشی-سرعت برشی با استفاده از مدل‌های زیر مورد برازش قرار می‌گیرد. معادله یا قانون توان

$$\sigma = K(\dot{\gamma})^{n_p} \quad (1)$$

در این معادله، σ تنش برشی برحسب Pa، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی برحسب 1/s، ضریب گرانروی برحسب Pa.sⁿ، و n نشان‌دهنده رفتار جریان (بدون بعد) است [۱۹].

مدل بینگهام

$$\sigma = K_B \dot{\gamma} + \sigma_{0B} \quad (2)$$

در این معادله، σ تنش برشی برحسب Pa، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی برحسب 1/s، ضریب قوام بینگهام برحسب Pa.sⁿ، و σ_{0B} نشان‌دهنده تنش تسلیم برحسب Pa است.

مدل هرشل بالکلی

$$\sigma = K_H (\dot{\gamma})^{n_H} + \sigma_{oH} \quad (3)$$

در این معادله، σ تنش برشی برحسب Pa، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی برحسب 1/s، ضریب قوام هرشل بالکلی برحسب Pa.sⁿ، و σ_{oH} نشان‌دهنده تنش تسلیم برحسب Pa است.

مدل کاسون

$$\sigma^{0.5} = K_C (\dot{\gamma})^{0.5} + \sigma_o^{0.5} \quad (4)$$

در معادله بالا، σ تنش برشی برحسب Pa، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی برحسب 1/s، ضریب قوام کاسون برحسب Pa.sⁿ، و σ_o نشان‌دهنده تنش تسلیم برحسب Pa است.

۲-۱-۲ رابطه گرانروی - سرعت برشی

برازش داده‌های گرانروی-سرعت برشی با استفاده از مدل کارائو^۱ انجام می‌شود [۲۰].

$$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{[1 + (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_c)^2]^m} \quad (5)$$

در این معادله، η_a گرانروی برحسب Pa.s، η_0 گرانروی نیوتنی اولیه برحسب Pa.s، η_∞ گرانروی بی‌نهایت برحسب Pa.s، $\dot{\gamma}_c$ نشان‌دهنده سرعت برشی بحرانی برحسب 1/s، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی برحسب 1/s و m نشان‌دهنده درجه روان‌شدگی با برش است [۲۱].

۲-۱-۳ رابطه تنش برشی-زمان

برای ارزیابی ویژگی‌های روانه‌شناختی وابسته به‌زمان، سرعت برشی به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده، تنش برشی به‌صورت تابعی از زمان درمی‌آید. سپس خواص روانه‌شناختی وابسته به‌زمان، با استفاده از مدل‌های زیر برازش می‌شود.

مدل ولتمن

$$\sigma = A + B \ln(t) \quad (6)$$

که در این معادله، σ تنش برشی برحسب Pa، A ضریب یا ثابت تنش برشی اولیه، t زمان برحسب s و B ضریب یا ثابت شکست ساختاری سیال تیکسوتروپیک با گذشت زمان است [۲۲].

مدل تئو-بوگر

$$\sigma = \sigma + \frac{\sigma_i - \sigma_e}{1 + Kt} \quad (7)$$

1. Carraeu Model

استرس به کرنش است و برابر با شیب نمودار تنش-کرنش برای مواد بسپاری است که واحد در SI، پاسکال (Pa) است و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$E = \frac{\text{tensile stress}}{\text{tensile strain}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} = \frac{FL_0}{A_0 \Delta L} \quad (9)$$

E: مدول یانگ (مدول کشسان)؛ F: نیروی اعمال شده بر جسم تحت کشش؛ A: مساحت سطح مقطع واقعی (مساحت سطح مقطع در راستای عمود بر نیروی اعمال شده)؛ ΔL : مقدار تغییرات طول جسم (اگر جسم تحت کشش باشد، علامت تغییرات مثبت و اگر تحت فشار باشد، علامت تغییرات منفی خواهد بود) و L_0 : طول اولیه جسم.

۲-۲-۴ مدول اتلاف یا مدول گران‌رو

مدول اتلاف (G'') نشان‌دهنده انرژی اتلاف‌شده در هنگام تغییر شکل یک ماده بسپاری به صورت گرما است و جز مدول کمپلس یا مختلط است که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۴].

$$E'' \text{ or } (G'') = NL^3 \sin \delta / 2bt^3 a \quad (10)$$

E'': مدول اتلاف (مدول گران‌رو)؛ N: نیروی اعمال شده بر جسم تحت کشش؛ L: طول آزمون؛ t: ضخامت آزمون؛ b: پهنای آزمون؛ a: مقدار جابه‌جایی در راستای نیرو.

۲-۲-۵ تانژانت تتا ($\tan \delta$)

به نسبت مدول اتلافی به مدول کشسانی اطلاق می‌شود؛ از این رابطه برای ارزیابی رفتار شبه مایع یا شبه جامد نمونه‌ها استفاده می‌شود [۲۵].

۳. نتایج ارزیابی اثر صفحات رس بر خواص روانه‌شناختی

نانوچندسازه بسپاری

۳-۱ بخش اول: خواص ریخت‌شناختی و اثر آن بر

روانه‌شناسی نانوچندسازه‌های بسپار/ رس

باتوجه به این که خواص ریخت‌شناختی و ساختاری نانوچندسازه‌های

که در این رابطه، σ تنش برشی برحسب Pa، t نشان‌دهنده زمان برحسب s، σ_e تنش تعادلی در رفتار گران‌روکشسان پس از سپری شدن زمان t برحسب Pa، σ_i تنش اولیه برحسب Pa و K ثابت جنبش‌شناسی تخریب ساختاری است.

مدل فیگونی-شومارکر

$$\sigma = \sigma_e + (\sigma_i - \sigma_e) \exp(-Kt) \quad (8)$$

که در این معادله، σ تنش برشی برحسب Pa، σ_e تنش تعادلی در رفتار گران‌روکشسان جامد بعد از گذشت زمان t برحسب Pa، و t نشان‌دهنده زمان برحسب s، σ_i تنش اولیه برحسب Pa و K ثابت جنبش‌شناسی تخریب ساختاری است [۲۳].

۲-۲-۲ خواص روانه‌شناختی پویاشناسی (پویا)

برای تعیین خصوصیات گران‌روکشسان نمونه‌ها، محاسبات خواص روانه‌شناختی پویاشناسی به صورت‌های زیر انجام می‌شود.

۲-۲-۱ آزمون روبش کرنش

آزمون روبش کرنش در محدوده ۰/۰۱ تا ۱۰۰۰ و در بسامد ثابت ۱ هرتز (Hz)، برای تعیین ناحیه گران‌روکشسان خطی انجام می‌گیرد که برای تحلیل نتایج، از نرم‌افزار رئوپلاس^۱ استفاده می‌شود.

۲-۲-۲ آزمون روبش بسامد

برای انجام آزمون روبش بسامد، از سرعت برشی ثابت ۰/۱ و محدوده بسامد ۰/۰۱ تا ۱۰۰ هرتز (Hz) استفاده می‌شود و مدول‌های ذخیره (G')، مدول اتلاف (G'') و تانژانت افت (تتا) در این قسمت با استفاده از روابط زیر بررسی می‌شود [۲۴].

۲-۲-۳ مدول کشسانی (ذخیره)

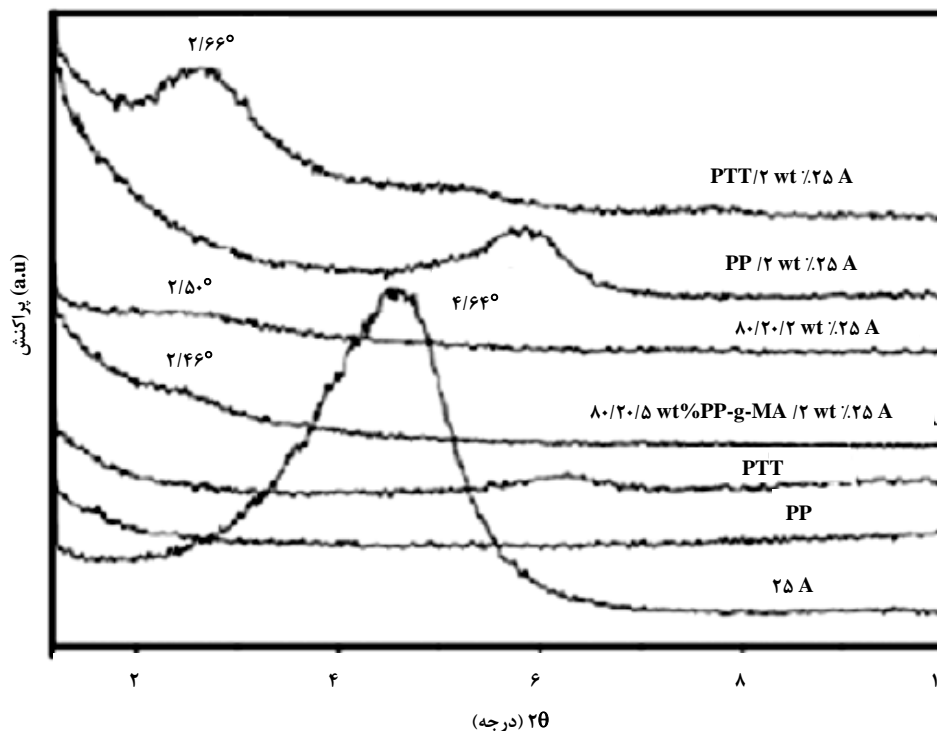
مدول کشسانی (G') یا همان مدول یانگ (E') یکی از خواص مواد بسپاری است که میزان گران‌روی آن را توصیف می‌کند به صورت نسبت تنش کششی بر کرنش کششی در حالتی که ماده در ناحیه کشسان قرار گرفته باشد؛ به بیان ساده‌تر، مدول کشسانی (G') نسبت

1. Rheoplus

در امتداد فصل مشترک قرار می‌گیرند یا در فاز پلی(تری‌متیلن ترفتالات). قرارگیری صفحات نانورس در فصل مشترک سبب توقف پدیده ائتلاف می‌شود و از راه کاهش تنش بین سطحی، نقش سازگارسازی را ایفا می‌کند. نتایج تجزیه پراکنش پرتو ایکس نشان داد که استفاده از ۵ درصد وزنی سازگارکننده پلی‌پروپیلن‌مالئیکه سبب پخش بسیار یکنواخت صفحات نانورس و ساختار ورقه‌ای شده از آنها می‌شود. این آزمون همچنین مشخص ساخت که فاصله بین لایه‌های سیلیکاتی در نانوجندسازه پلی‌پروپیلن/نانورس Cloisite 25A کاهش و در نمونه پلی(تری‌متیلن ترفتالات)/نانورس Cloisite 25A افزایش می‌یابد. این امر علاقه نانوصفحات رس Cloisite 25A به پلی(تری‌متیلن ترفتالات) در مقایسه با پلی‌پروپیلن را به اثبات رسانده، مشخص می‌کند زنجیره‌های پلی(تری‌متیلن ترفتالات) تمایل به تشکیل ساختار جایگذاری شده در فاصله بین لایه‌ای نانورس‌ها دارند. شکل (۱)، نتایج تجزیه پراکنش پرتو ایکس نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

بسیار/ رس بر خواص روانه‌شناختی این نانوجندسازه‌ها تأثیرگذار هستند، بنابراین نخست به نتایج چند تحقیق درباره اثر صفحات نانورس بر خواص ساختاری این نانوجندسازه‌ها اشاره و سپس به بررسی خواص روانه‌شناختی پایا و پویاشناسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

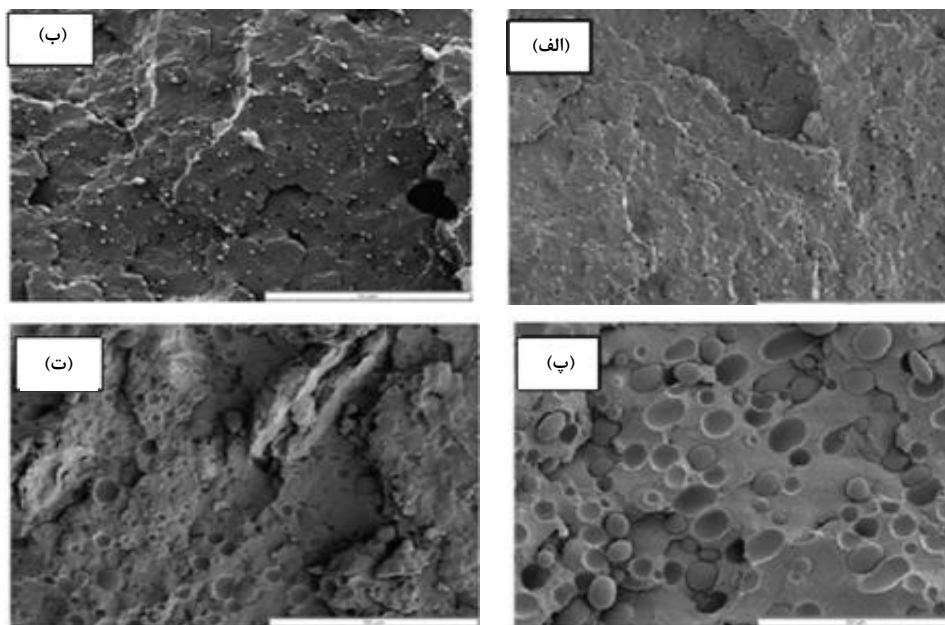
ژو و همکاران [۲۶] به بررسی ساختار فازی نانوجندسازه پلی(تری‌متیلن ترفتالات) / پلی‌پروپیلن / نانورس پرداختند. در مطالعه ریخت‌شناختی این آمیزه، تصاویر ریزبین الکترونی روبشی نشان دادند که هنگامی که پلی(تری‌متیلن ترفتالات) به‌عنوان فاز ماتریس باشد، افزودن نانورس Cloisite 25A سبب کاهش قابل توجه اندازه قطرات فاز پراکنده می‌شود، اما چنانچه پلی‌پروپیلن فاز ماتریس باشد، اندازه قطرات فاز پراکنده در حضور دو درصد وزنی از نانورس کمی بیشتر از حالت خالص آمیزه مذکور است. دلیل این امر علاقه بیشتر صفحات نانورس Cloisite 25A به پلی(تری‌متیلن ترفتالات) نسبت به پلی‌پروپیلن است. تصاویر ریزبین الکترونی عبوری مشخص کرد که صفحات نانورس Cloisite 25A یا



شکل ۱. نتایج تجزیه پراکنش پرتو ایکس نمونه‌های مختلف [۲۶].

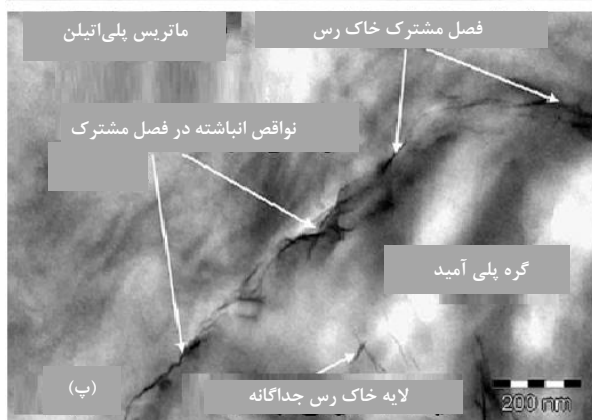
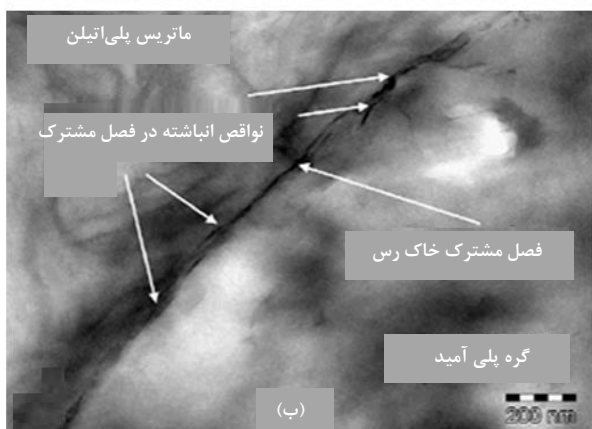
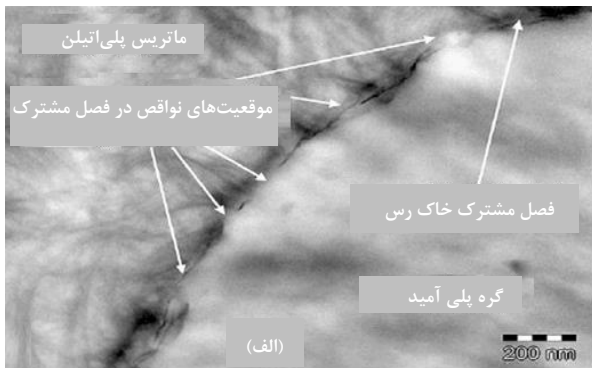
در فاز پلی(اتیلن ترفتالات) را مشخص نمودند. نتایج مطالعه‌های ریخت‌شناسی نشان می‌دهد هنگامی که پلی(اتیلن ترفتالات) به‌عنوان ماتریس انتخاب شود، ساختار یکنواخت‌تری از قطرات فاز پراکنده در آمیزه مشاهده می‌شود. چرا که تمایل بیشتر نانوصفحات رس Cloisite 30B به پلی(اتیلن ترفتالات) سبب قرارگیری آنها در این فاز و افزایش گرانروی پلی(اتیلن ترفتالات) می‌شود. افزایش گرانروی فاز ماتریس طبق تعریف عدد کاپیلاری، کمک بیشتری به انتقال تنش و شکست قطرات فاز پراکنده می‌کند. با بررسی شکل‌های ریزبین الکترونی روبشی مشخص شد که با افزایش غلظت نانورس Cloisite 30B، اندازه و توزیع اندازه صفحات قطرات فاز پراکنده کاهش می‌یابد که البته این کاهش هنگامی که پلی(اتیلن ترفتالات) فاز ماتریس را تشکیل می‌دهد، بیشتر است. شکل (۲) - الف - ت) تصاویر ریزبین الکترونی روبشی از آمیزه پلی(اتیلن ترفتالات)/پلی پروپیلن تقویت‌شده با ۵ درصد وزنی از نانوصفحات رس را نشان می‌دهد.

انتظام و همکارانش [۲۷] بر خواص روانه‌شناختی و ریخت‌شناسی آمیزه پلی(اتیلن ترفتالات)/پلی پروپیلن پرشده با نانوصفحات رس پرداختند. تجزیه پراکنش پرتو ایکس نشان داد که زنجیرهای پلی(اتیلن ترفتالات) نسبت به پلی پروپیلن تمایل بیشتری به قرارگیری در فاصله بین لایه‌های سیلیکاتی و ایجاد ساختار جایگذاری شده دارند. این موضوع ایجاد برهمکنش قوی بین پلی(اتیلن ترفتالات) و صفحات نانورس Cloisite 30B را نشان می‌دهد. این محققان به‌وسیله تصاویر ریزبین الکترونی عبوری اثبات کردند چه در حالتی که پلی پروپیلن ماتریس باشد یا پلی(اتیلن ترفتالات)، صفحات نانورس Cloisite 30B در فاز پلی(اتیلن ترفتالات) و فصل مشترک قرار می‌گیرند. قرارگیری نانورس‌ها در فصل مشترک مانند یک مانع عمل می‌کند و از برخورد قطرات فاز پراکنده به یکدیگر جلوگیری می‌کند. این عمل سبب ریزماندن قطرات فاز پراکنده می‌شود. همچنین به کمک همین تصاویر، ایجاد ساختارهای جایگذاری‌شده و ورقه‌ای شده از صفحات نانورس



شکل ۲. تصاویر ریزبین الکترونی روبشی از آمیزه پلی(اتیلن ترفتالات)/پلی پروپیلن، (الف) پلی پروپیلن/پلی(اتیلن ترفتالات) ۱۰/۹۰٪، (ب) پلی پروپیلن/پلی(اتیلن ترفتالات) نانورس ۱۰/۹۰/۵٪، (پ) پلی پروپیلن/پلی(اتیلن ترفتالات) ۱۰/۹۰٪ و (ت) پلی پروپیلن/پلی(اتیلن ترفتالات) نانورس ۱۰/۹۰/۵٪ [۲۷].

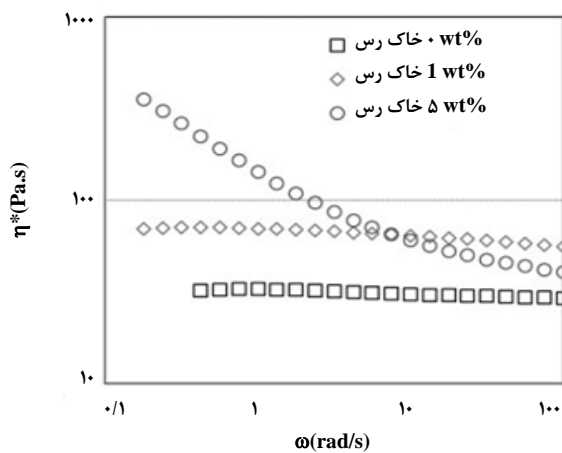
را به‌طور پیوسته پوشش می‌دهد و از راه توقف پدیده ائتلاف مانع برخورد قطرات به یکدیگر می‌شود. با توجه به علاقه صفحات نانورس Cloisite 30B به پلی‌آمید نسبت به پلی‌اتیلن، این صفحات علاوه بر فصل مشترک در فاز پلی‌آمید قرار می‌گیرند و از این راه سبب افزایش گرانروی فاز ماتریس شده، به شکست قطرات کمک بیشتری می‌کنند.



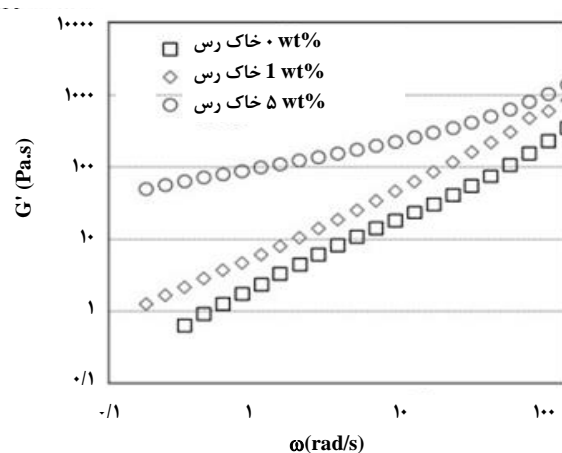
شکل ۳. تصاویر ریزبین الکترونی عبوری آمیزه پلی‌اتیلن/پلی‌آمید پر شده با (الف) ۱٪، (ب) ۲٪ و (پ) ۴٪ از نانوصفحات رس [۲۸].

ویل و همکاران [۲۸] به بررسی ساختار و روانه‌شناسی فصل مشترک آمیزه پلی‌اتیلن/پلی‌آمید/نانورس Cloisite 30B پرداختند. نتایج مطالعه‌های ریخت‌شناسی نشان داد که در آمیزه پلی‌اتیلن/پلی‌آمید خالص، ساختار غالب، ساختار قطره-ماتریس است و هنگامی که پلی‌آمید به‌عنوان فاز پراکنده باشد، اندازه قطرات ریزتر و وقتی پلی‌اتیلن فاز پراکنده باشد، اندازه قطرات درشت‌تر هستند. این موضوع بدین دلیل است که گرانروی پلی‌آمید نسبت به پلی‌اتیلن کمتر است و زیر تنش راحت‌تر شکسته می‌شود. این محققان گزارش کردند که افزودن نانورس Cloisite 30B سبب کاهش چشمگیر قطرات فاز پراکنده می‌شود. تصاویر ریزبین الکترونی عبوری نشان می‌دهد هنگامی که پلی‌اتیلن به‌عنوان فاز ماتریس باشد بیشتر صفحات نانورس Cloisite 30B در فصل مشترک قرار می‌گیرند. به‌وسیله نرم‌افزار تجزیه تصویر نشان داده شد که در نمونه حاوی ۱ درصد وزنی از نانوصفحات رس، حدود ۷۵ درصد آنها و در نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد وزنی از صفحات نانورس، تقریباً ۱۰۰ درصد نانوصفحات در امتداد فصل مشترک قرار می‌گیرند و اطراف قطرات را می‌پوشانند. بدین ترتیب از راه توقف پدیده ائتلاف، نقش سازگارکننده را ایفا و به ریزماندن قطرات کمک می‌کنند. شکل (۳-الف-پ) این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد. با توجه به تعاریف، چنانچه پوشش‌دهی فصل مشترک بالغ بر ۹۰ درصد باشد، فاز فصل مشترک را پیوسته و اگر کمتر از ۹۰ درصد باشد آن را ناپیوسته گویند. بنابراین هنگامی که پلی‌اتیلن به‌عنوان فاز ماتریس وجود دارد، فصل مشترک نمونه حاوی ۱ درصد وزنی نانورس ناپیوسته و فصل مشترک نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد وزنی نانورس پیوسته است. در حالتی که پلی‌آمید به‌عنوان ماتریس در نظر گرفته شده باشد، کاهش اندازه صفحات فاز پراکنده با افزودن نانورس Cloisite 30B بیشتر خواهد بود.

تصاویر ریزبین الکترونی عبوری مشخص می‌سازد که وقتی پلی‌آمید به‌عنوان فاز ماتریس باشد، صفحات نانورس در تمامی غلظت‌ها (از ۱ تا ۶ درصد وزنی) فصل مشترک دو فاز



(الف)



(ب)

شکل ۴. منحنی‌های گران‌روی (الف) و مدول ذخیره (ب) برحسب بسامد برای نانوجندسازۀ پلی‌اتیلن‌ترفتالات (۹۰٪/پلی‌پروپیلن (۱۰٪)/نانورس [۲۷].

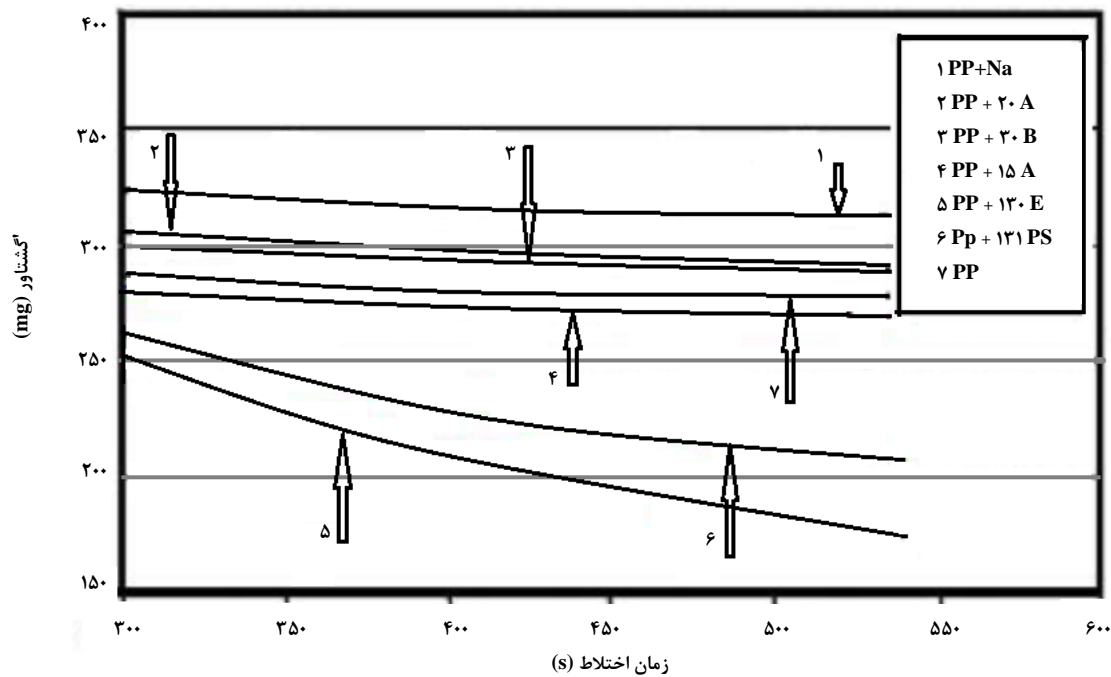
پلی‌پروپیلن (PP) و چندسازۀ‌های آن را با رس‌های متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵) مشخص می‌شود که منحنی گشتاور PP پس از ۵ دقیقه مخلوط‌شدن نسبتاً پایدار بود. حضور نانوصفحات در مخلوط تأثیر قطعی بر گشتاور دارد و تنها با یک روند نزولی اندکی همراه با زمان، نشان دهنده تغییر اندکی در گران‌روی نمونه بود. منحنی گشتاور مخلوط با خاک رس، رس A15، رس A20 و رس B30 موازی ولی بالاتر از منحنی PP است. منحنی‌های مربوط به نانوجندسازۀ‌های رس (۱۵، ۲۰ و ۳۰)، ثابت بودن گران‌روی سامانه‌ها را در هنگام مخلوط کردن نشان می‌دهد. با این حال، منحنی I30E و I31PS مخلوط به‌طور چشمگیری نسبت به منحنی

۲-۳ بخش دوم: خواص روانه‌شناختی پایا و پویاشناسی

نانوجندسازۀ‌های بسیار / رس

انتظام و همکاران [۲۷] بر خواص روانه‌شناختی و مورفولوژی آمیزه پلی (اتیلن‌ترفتالات)/ پلی‌پروپیلن پرشده با نانوصفحات رس پرداختند. مطالعه‌ها روانه‌شناختی در ناحیه ویسکوکشسان خطی آمیزه مذکور نشان می‌دهد، هنگامی که پلی‌پروپیلن فاز ماتریس باشد افزودن نانورس Cloisite 30B در غلظت‌های مختلفی تأثیری بر رفتار ویسکوکشسان آمیزه پلی (اتیلن‌ترفتالات)/ پلی‌پروپیلن نداشته و این آمیزه حتی با ۵ درصد وزنی از نانورس، رفتار گران‌روکشسان شبه‌مایع از خود نشان می‌دهد. همچنین هنگامی که پلی‌پروپیلن فاز ماتریس را تشکیل می‌دهد، افزایش درصد نانورس فقط سبب افزایش بسیار جزئی مدول ذخیره در بسامدهای پایین می‌شود و در بسامدهای بالا تأثیر چندانی ندارد. اما زمانی که پلی (اتیلن‌ترفتالات) به‌عنوان فاز ماتریس نقش ایفا می‌کند، به‌دلیل تمایل نانوصفحات Cloisite 30B به این بسیار، هم‌گران‌روی و هم مدول ذخیره در ۵ درصد وزنی از نانورس بهبود چشمگیری از خود نشان می‌دهند. این دانشمندان گزارش کردند که افزودن ۵ درصد وزنی از نانورس Cloisite 30B به آمیزه بالا، هنگامی که پلی (اتیلن‌ترفتالات) به‌عنوان ماتریس باشد، سبب ناپدید شدن ناحیه نیوتونی گران‌روی در سرعت‌های برش کم و ایجاد ناحیه پایدار در منحنی مدول ذخیره، در بسامدهای پایین می‌شود. کاهش شیب و یکنواخت شدن منحنی مدول ذخیره علیه بسامد در بسامدهای پایین ناشی از ایجاد شبکه فیزیکی سه‌بعدی از نانوصفحات رس در آمیزه بسیاری است. تشکیل این شبکه فیزیکی دلیلی بر تغییر رفتار نانوجندسازۀ حاصله از شبه‌مایع به شبه‌جامد است. شکل (۴) (الف-ب) منحنی‌های گران‌روی و مدول ذخیره برحسب بسامد برای نانوجندسازۀ پلی‌اتیلن‌ترفتالات (۹۰٪/پلی‌پروپیلن (۱۰٪)/نانورس را نشان می‌دهد.

لی و همکاران [۲۹] اثر انواع صفحات رس بر ویژگی‌های نانوجندسازۀ پلی‌پروپیلن را بررسی کردند. شکل حاضر، منحنی گشتاور



شکل ۵. منحنی گشتاور- زمان نانوجندسازۀ پلی پرولین در اندازه‌های گوناگون نانوصفحات رس [۲۹].

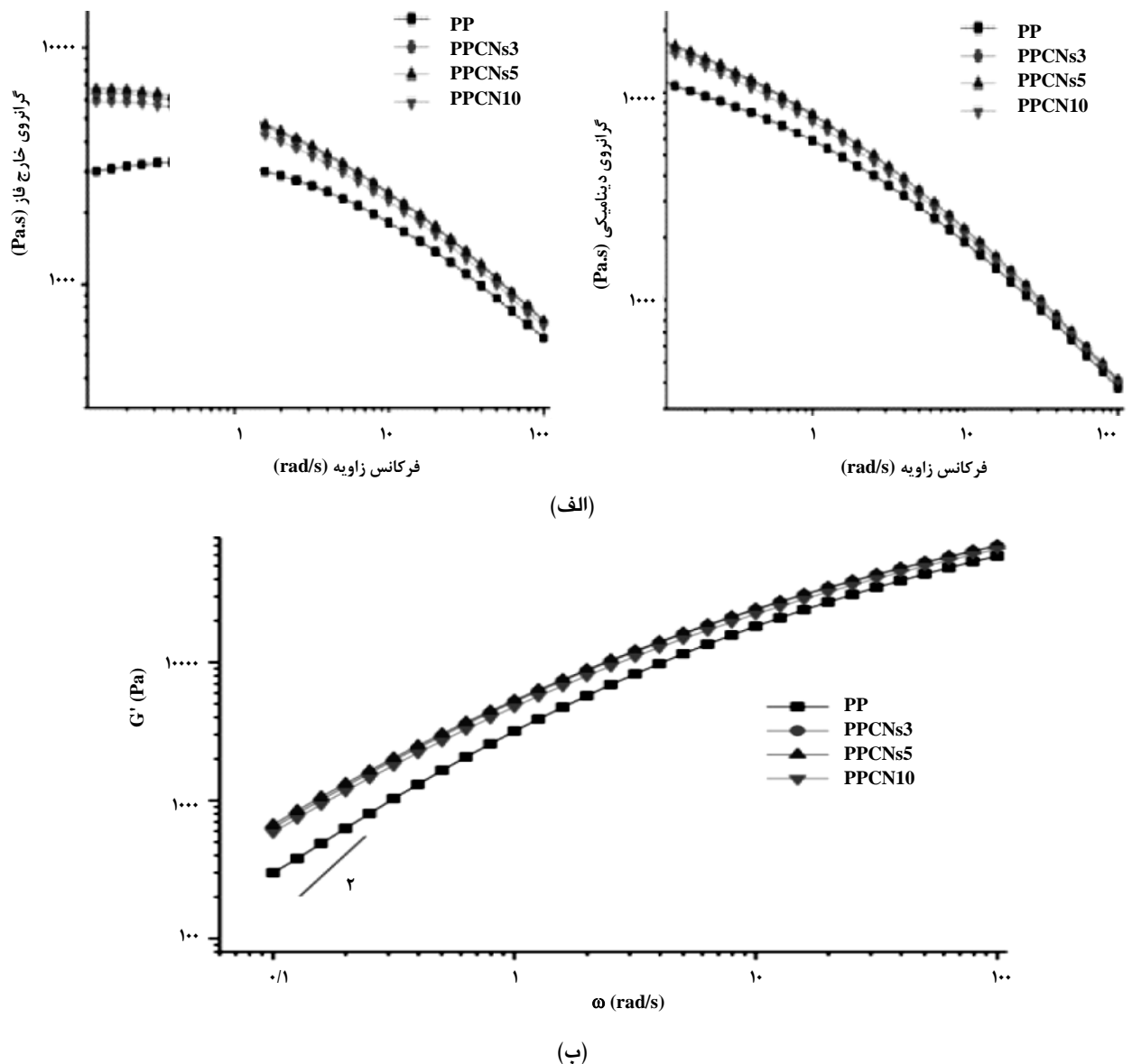
پویاشناسی (η') به ترتیب سهم کشسانی و گرانروی در ناحیۀ بسامد پایین هستند که رفتار جریان^۱ را نشان می‌دهند. با توجه به شکل، واضح است که هر دو گرانروی خارج فاز و گرانروی پویاشناسی نانوجندسازۀ رس‌ها نسبت به PP بالاتر است. این امر به وضوح ناشی از جوش خوردگی فیزیکی رس در ماتریس نانوجندسازۀهای مورد بررسی است. پیوستگی به وجود آمده در نانوجندسازۀ به وسیلۀ صفحات نانوصفحات، موجب افزایش گرانروی پویاشناسی این نانوجندسازۀها شده است. افزون بر این، صفحات نانوصفحات به عنوان گره‌های متصل به یکدیگر (گره‌های عرضی) عمل می‌کنند و بنابراین موجب افزایش گرانروی ذوب می‌شود. علاوه بر گرانروی، بهبود کشش یا کشسانی ذوب نیز با افزایش مدول ذخیره‌سازی به صورت معکوس درمی‌آید. شکل ((۶-ب))، رابطه بین مدول ذخیره‌سازی (G') مربوط به PP و نانوجندسازۀهای رس مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که هر یک از منحنی‌های نانوجندسازۀ رس (PPCNs) بالاتر از PP است. این بدان معنی است که انعطاف‌پذیری ذوب PPCN ها نسبت به PP افزایش یافته است.

PP کاهش یافت. به عبارت دیگر، گرانروی این نانوجندسازۀها در هنگام مخلوط به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد، که می‌تواند به دلیل کاهش وزن مولکولی ناشی از اکسایش و یا تخریب ماتریس باشد. علاوه بر این، در هنگام مخلوط کردن، رنگ چندسازۀها بر پایۀ I30E و I31PS قهوه‌ای شده که می‌تواند نشانه دیگری از تخریب و یا اکسایش باشد.

در مجموع در این بررسی، ترتیب گرانروی نمونه‌های نانو چندسازۀ مورد بررسی به صورت زیر است. Na رس مونت‌موریلونیت اصلاح نشده است.

$$Na > 20A \approx 30B > PP > 15A > I31PS > I30E.$$

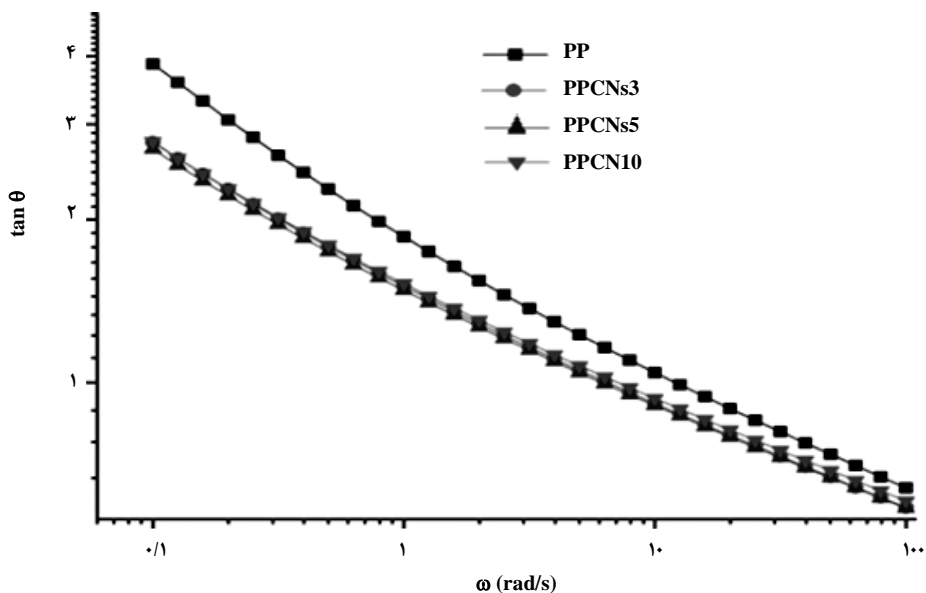
لیو و همکاران [۳۰] به بررسی ویژگی روانه‌شناختی نانوجندسازۀهای پلی‌پروپیلن / رس پرداخته‌اند. نتایج این بررسی در شکل ((۶-الف)) نشان داده شده است. این شکل، رابطه بین گرانروی خارج فاز (η'') و گرانروی پویاشناسی (η') در سه نانو چندسازۀ رس را به عنوان توابع بسامد زاویه نشان می‌دهد. گرانروی خارج فاز (η'') و گرانروی



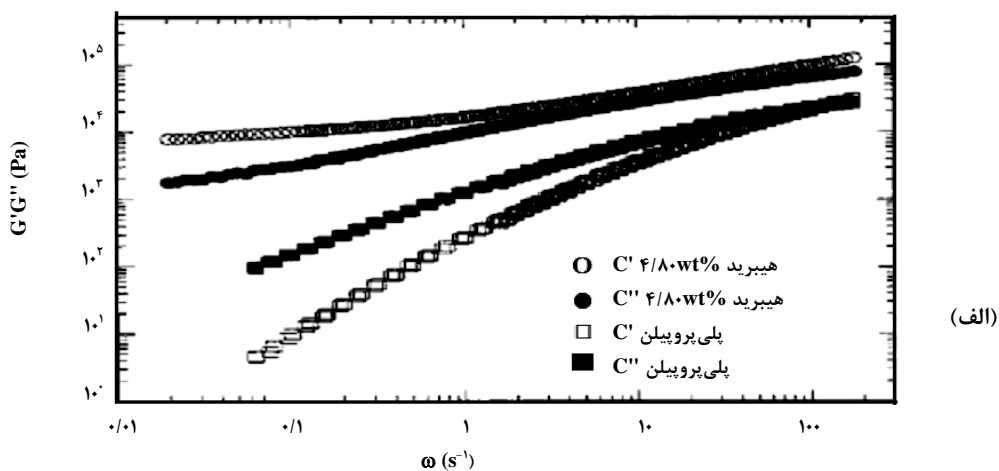
شکل ۶. الف) رابطه بین گرانروی خارج فاز (η'') و گرانروی پویاشناسی (η') در نانوجندساز پلی‌پروپیلن/رس در غلظت‌های مختلف رس، ب) مدول ذخیره‌سازی (G') پلی‌پروپیلن به صورت منفرد و پلی‌پروپیلن در ترکیب با نانوجندسازهای رس [۳۰].

نانوجندسازهای پلی‌پروپیلن/رس پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد، در حالی که ضریب اتلاف نانوجندساز پلی‌پروپیلن/رس (با افزودن رس به مقدار ۴/۸۰ درصد وزنی به پلی‌پروپیلن) نسبت به پلی‌پروپیلن خالص، کاهش پیدا می‌کند ولی مدول ذخیره و مدول اتلاف افزایش نشان می‌دهد (شکل ۸-الف). از طرفی، همان‌طور که در شکل (۸-ب) مشخص است، افزودن غلظت رس در ترکیب نانوجندساز پلی‌پروپیلن/رس، باعث افزایش شدید میزان گرانروی پایدار با کم‌ترین برش هیبرید می‌شود.

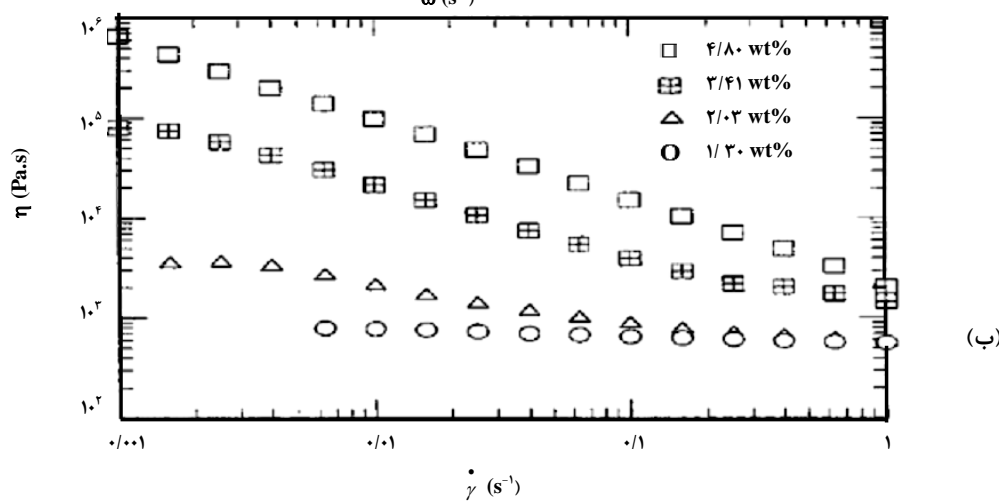
تانژانت تتا یا ضریب تلفات PP و PPCN در شکل (۷) نشان داده شده‌است. کوچک بودن تانژانت تتا یا ضریب تلفات (انتقال انرژی ما بین اجسام یا صفحات برخوردکننده تلفاتی ایجاد می‌کند که صرف تغییر شکل کشسانی می‌شود و مقداری انرژی به این صورت تلف می‌شود)، نشان‌دهنده واکنش کشسانی سریع و در نتیجه کشسانی مذاب بالا است. واضح است که میزان هرسه نانوجندساز رس (PPCNs) بسیار کوچک‌تر از PP است، که نشان می‌دهد که کشسانی ذوب نانوجندساز رس (PPCNs) نسبت به PP بالاتر است. سولومون و همکاران [۳۱] به بررسی ویژگی‌های روانه‌شناختی



شکل ۷. منحنی ناتزانیت تتا برای پلی پروپیلن و نانوجندسازهای مختلف پلی پروپیلن/رس [۳۰].



(الف)

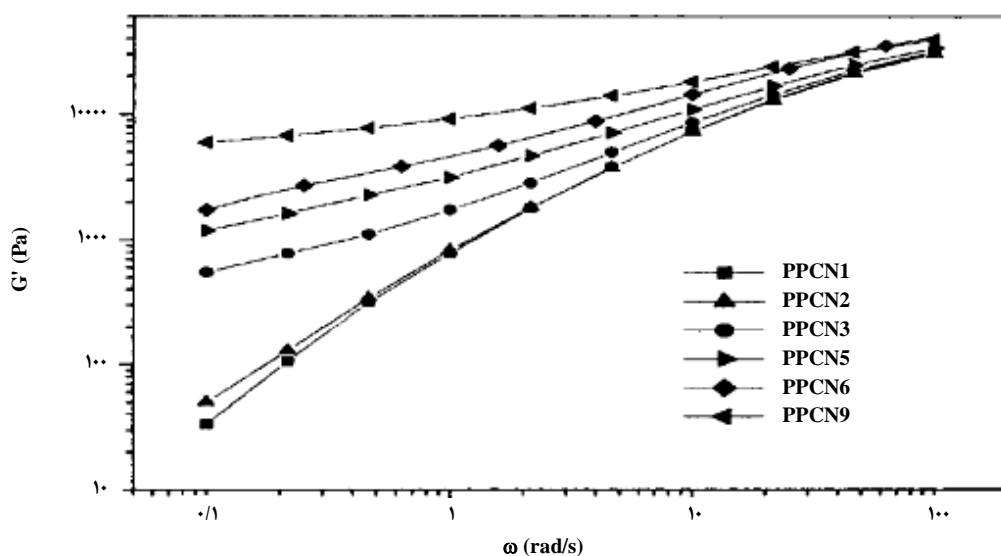


(ب)

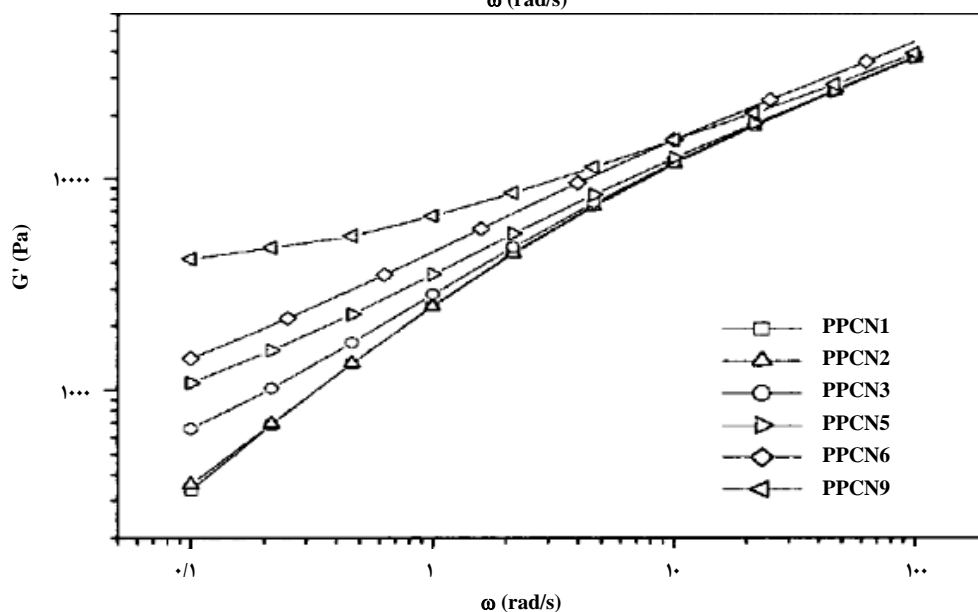
شکل ۸. (الف) مقایسهٔ مدول ذخیره و اتلاف نانوجندساز پلی پروپیلن/رس با پلی پروپیلن خالص، (ب) منحنی سرعت برش در برابر گرانروی نانوجندسازهای مختلف پلی پروپیلن/رس [۳۱].

پلی پروپیلن/ رس پرداختند. مواد به صورت پلی پروپیلن خالص و نانوجندسازة پلی پروپیلن با ۱، ۵ و ۷ درصد صفحات رس بود. نتایج نشان‌دهنده ثابت ماندن منطقه خطی گران روی نانوجندسازة پلی پروپیلن/ رس (به میزان ۵ درصد) و پلی پروپیلن خالص تا فشار 10^2 درصد بود. آن‌ها اظهار داشتند که مناطق رفتار گران‌روکشسان خطی (ارتجاعی- لزجی) پلی پروپیلن و نانوجندسازة پلی پروپیلن/ رس، بسیار گسترده و غیر حساس به حضور رس (مونت‌موریلونیت) است (شکل (۱۰) - الف).

لی و همکاران [۲۱] به مطالعه رفتار روانه‌شناختی نانوجندسازة‌های پلی پروپیلن/ رس با درصدهای وزنی از ۱، ۲، ۳، ۵، ۶ و ۹ درصد مونت‌موریلونیت پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که مدول کشسانی نانوجندسازة‌ها با افزایش مقدار رس، افزایش می‌یابد که در شکل ((۹) - الف)، به وضوح مشخص است. همچنین روند افزایش در مدول کشسانی در مدول اتلاف نیز تکرار شد و با افزایش میزان رس در نانوجندسازة پلی پروپیلن/ رس، بر مقدار مدول اتلاف افزوده شد (شکل (۹) - ب). گو و همکاران [۳۲] به بررسی رفتار روانه‌شناختی نانوجندسازة‌های



(الف)

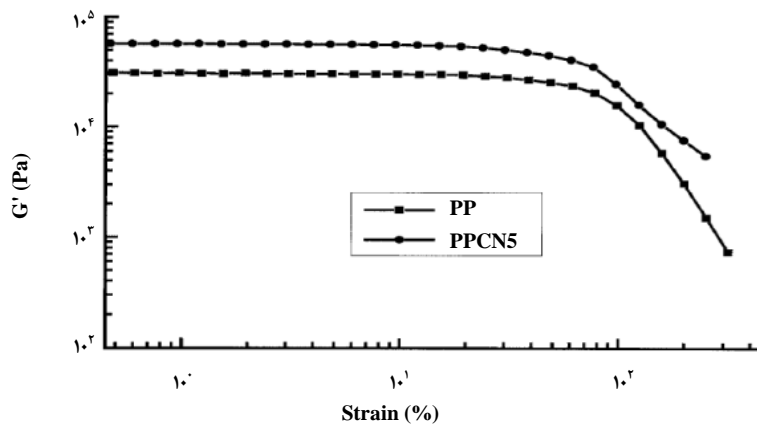


(ب)

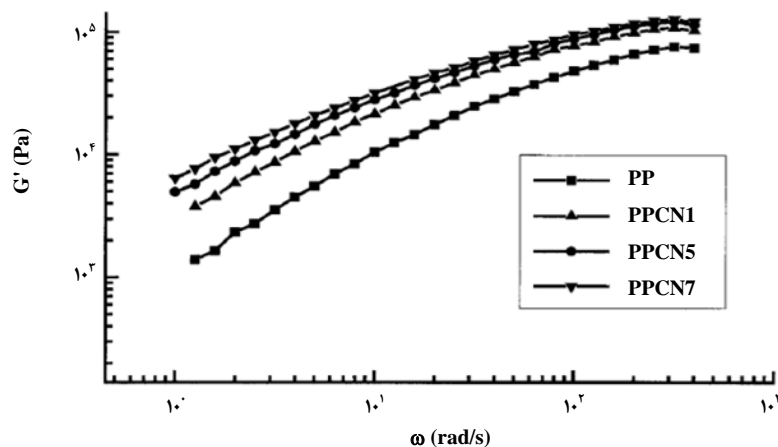
شکل ۹. الف) منحنی مدول ذخیره نانوجندسازة‌های مختلف پلی پروپیلن/ رس،
ب) منحنی مدول اتلاف نانوجندسازة‌های مختلف پلی پروپیلن/ رس [۲۱].

شده است. واضح است که دامنه‌های پایانی با افزایش درجه حرارت تمایل به افزایش را برای همه نمونه‌ها نشان می‌دهد، که ناشی از حرکت آسان‌تر زنجیره‌های مولکولی در دمای بالاتر است. با این‌حال، تمایل افزایش زمان آسودگی نانوجندساز PP/org-MMT نسبت به PP خالص کوچک‌تر است و این تمایل با افزایش محتوای MMT کاهش می‌یابد. این ممکن است به دلیل محدود شدن حرکت زنجیره مولکولی ناشی از لایه MMT پراکنده در ماتریس PP باشد. در عین حال، تعامل بین لایه‌های MMT و PP-g-MAH یک مانع پراثری برای حرکت است که منجر به افزایش چشمگیر زمان آرام شدن می‌شود که نشان می‌دهد که زمان آرامش با افزایش محتوای MMT افزایش می‌یابد. گرایش فزاینده دامنه‌های پایانی مدول کشسانی (G') و مدول اتلاف (G'') نانوجندساز نشان می‌دهد که زمان آسودگی نانوجندساز کم‌تر از PP خالص است. شیب‌های مدول آسودگی $G(t)$ با افزایش محتوای MMT کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد، زمان آسودگی با افزایش محتوای MMT افزایش می‌یابد (شکل (۱۰) - ت).

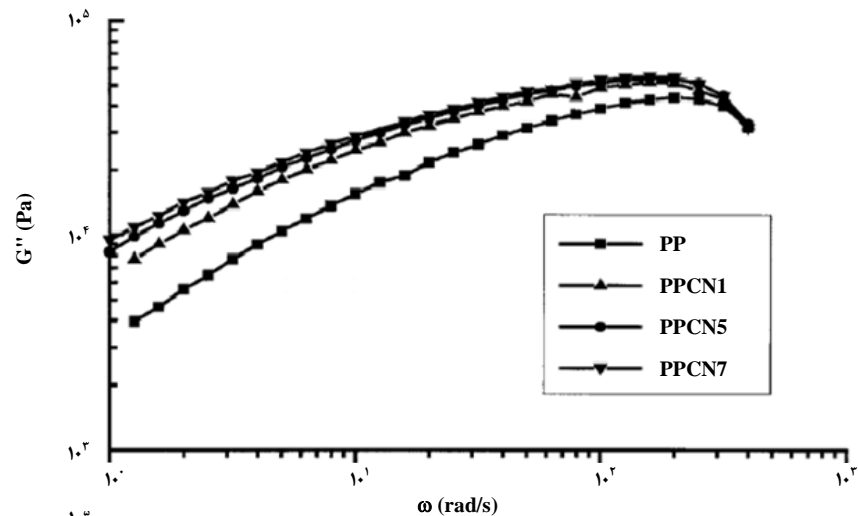
مدول کشسانی (G') و مدول اتلاف (G'') و گرانروی کمپلس (η^*) پلی‌پروپیلن (PP) و نانوجندساز پلی‌پروپیلن (PPCN) به ترتیب در شکل‌های (۱۰) - ب، (۱۰) - ج و (۱۰) - د مقایسه شده است. مقایسه واکنش خطی گرانروکشسان مواد، نشان‌دهنده اثر چشمگیر رس، به ویژه در بسامد پایین است. در بسامد پایین، صفحات نانوجندساز PP/org-MMT دارای مدول کشسانی، مدول اتلاف و گرانروی پیچیده بالایی در مقایسه با PP خالص هستند و افزایش یکنواختی با محتوای MMT (مونت‌موریلونیت) است. با این‌حال، در بسامد بالا، مدول کشسانی و مدول اتلاف و گرانروی کمپلس پلی‌پروپیلن و نانوجندساز پلی‌پروپیلن، به هم نزدیک‌تر می‌شوند. دلیل افزایش مدول کشسانی و مدول اتلاف در نانوجندساز پلی‌پروپیلن، پخش لایه‌های MMT در زنجیره‌های بسپاری PP است. همچنین گرانروی صفحات پخش شده در بسپار بیشتر از زنجیره‌های توده‌ای است. برای مقایسه دمای وابسته آسودگی^۱ این نانوجندسازها، دامنه‌های پایانی^۲ مدول کشسانی (G') و مدول اتلاف (G'') در دماهای مختلف محاسبه شده و به ترتیب در شکل (۱۰) - پ و (۱۰) - ت ترسیم



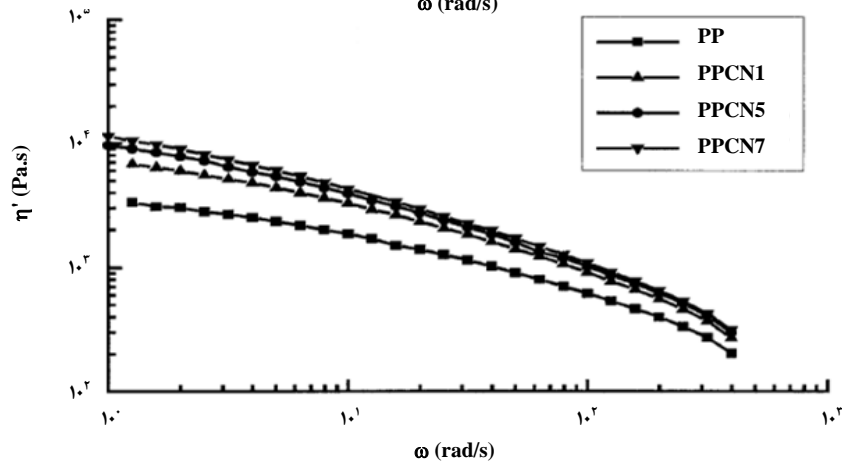
(الف)



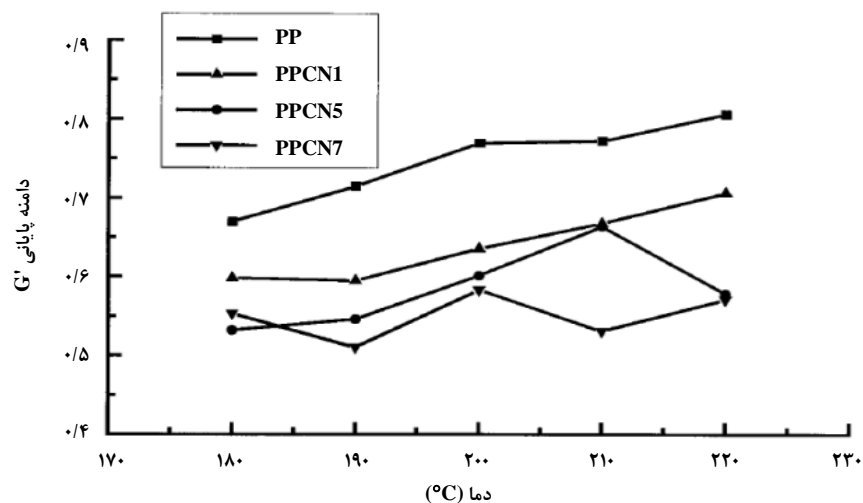
(ب ۱)



(ب ۲)

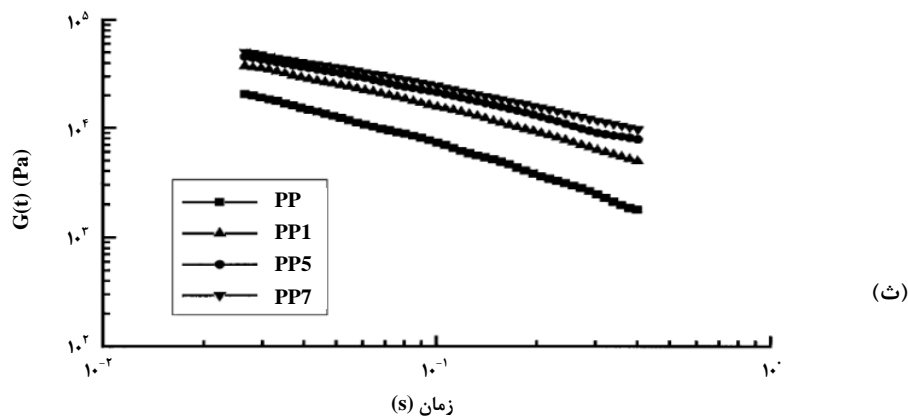
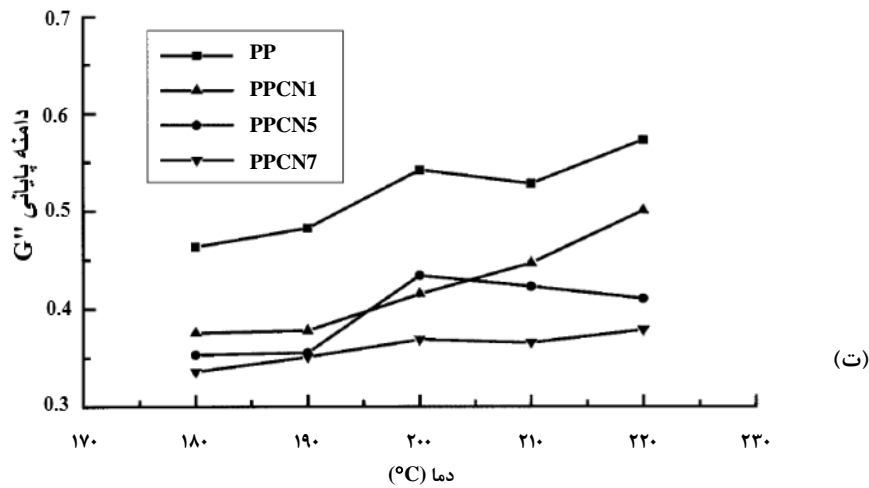


(ب ۳)



(پ ۳)

شکل ۱۰. (الف) آزمون کشش پویاشناسی پلی‌پروپیلن و نانوجندسازهای پلی‌پروپیلن/رس، (ب ۱-۳) مدول کشسانی (G')، مدول اتلاف (G'') و گران‌روی کمپلس (η^*) پلی‌پروپیلن (PP) و نانوجندساز پلی‌پروپیلن (PPCN)، (پ) دامنه‌های پایانی مدول کشسانی (G') نانوجندسازهای پلی‌پروپیلن/رس در دماهای مختلف، (ت) دامنه‌های پایانی مدول اتلاف (G'') نانوجندسازهای پلی‌پروپیلن/رس در دماهای مختلف، (ث) مدول آسودگی نانوجندسازهای پلی‌پروپیلن/رس در زمان‌های مختلف [۳۲].



(ادامه) شکل ۱۰. الف) آزمون کشش پویاشناسی پلی پروپیلن و نانوچندسازهای پلی پروپیلن/رس، (ب-۱-۳) مدول کشسانی (G'), مدول اتلاف (G'') و گرانروی کمپلس (η^*) پلی پروپیلن (PP) و نانوچندساز پلی پروپیلن (PPCN), (پ) دامنه‌های پایانی مدول کشسانی (G') نانوچندسازهای پلی پروپیلن/رس در دماهای مختلف، (ت) دامنه‌های پایانی مدول اتلاف (G'') نانوچندسازهای پلی پروپیلن/رس در دماهای مختلف، (ث) مدول آسودگی نانوچندسازهای پلی پروپیلن/رس در زمان‌های مختلف [۳۲].

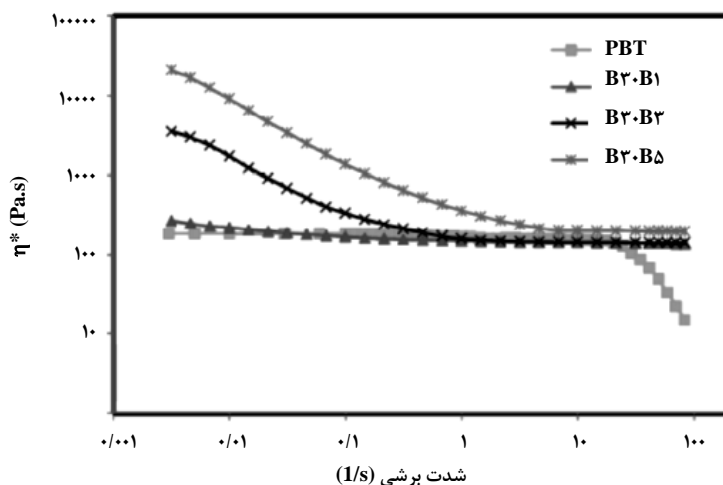
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود افزودن ۳ و ۵ درصد نانورس به بسیار پلی (بوتیلن ترفتالات)، سبب افزایش گرانروی این بسیار، به‌عنوان فاز ماتریس، شده‌است. همچنین ملاحظه می‌شود که در سرعت برش فرایندسازی نمونه‌ها، گرانروی نانوچندسازهای پلی (بوتیلن ترفتالات)/ نانورس بیشتر از پلی (بوتیلن ترفتالات) خالص است. به‌علاوه افزودن ۳ و ۵ درصد نانورس به بسیار، سبب افزایش رفتار شبه - پلاستیک و کاهش ناحیه نیوتونی شده‌است، که نشان از وجود برهمکنش بین این بسیار و نانورس دارد (شکل (۱۱) - الف).

براساس نتایج، شکل (۱۱) - ب (۲ و ۱)، تأثیر نانوصفحات رس بر مدول ذخیره و اختلاف تنش‌های نرمال نوع اول (NI) بسیار را

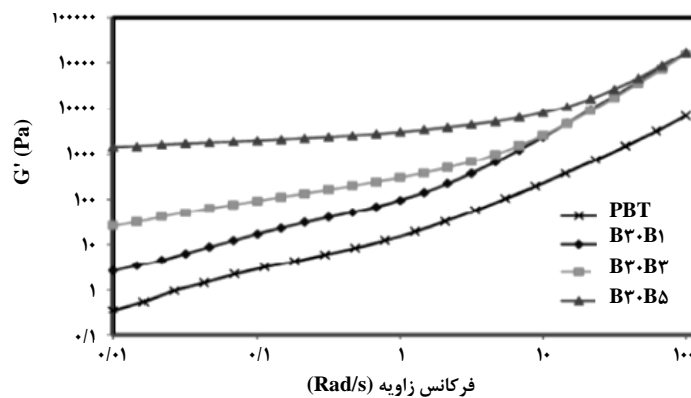
یکی از عوامل تأثیرگذار بر روانه‌شناسی آمیزه‌های بسیاری، گرانروی فاز ماتریس است. افزایش گرانروی ماتریس سبب انتقال تنش بیشتر به قطرات فاز پراکنده می‌شود و شکست قطرات را راحت‌تر می‌کند. همچنین افزایش گرانروی فاز ماتریس سبب افزایش عدد کاپیلاری می‌شود. چنانچه عدد کاپیلاری از مقدار بحرانی (Ca_{crit}) خود بیشتر شود، شکست قطرات اتفاق می‌افتد؛ حال هرچه این مقدار از مقدار بحرانی خود بیشتر باشد (در اثر افزایش گرانروی ماتریس) میزان تنش برشی بیشتری به قطرات منتقل می‌شود. سوندراجا و ماکوسکو (۲۰۱۰) اثر نانوصفحات رس را بر ویژگی‌های روانه‌شناختی پلی (بوتیلن ترفتالات) بررسی کرده‌اند. شکل زیر تأثیر نانو صفحات رس بر گرانروی نانوچندساز و بسیار را نشان می‌دهد.

میزان کشسانی را از خود نشان می‌دهد. به‌علاوه نمودار مدول ذخیره این نانوجنس‌سازه در بسامدهای پایین، مستقل از بسامد می‌باشد که نشان از تغییر رفتار ویسکوکشسان آن از حالت شبه مایع به شبه جامد و ایجاد شبکه فیزیکی از نانوصفحات است. این افزایش کشسانی می‌تواند به برهمکنش بین گروه‌های هیدروکسیل نانوصفحات رس و گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل انتهایی زنجیر پلی(بوتیلن ترفتالات) ارتباط داشته‌باشد.

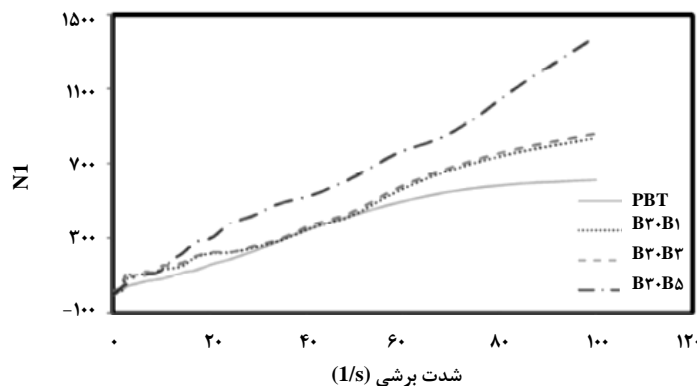
به‌عنوان معیاری از کشسانی، نشان می‌دهد. در این تصاویر مشخص است که با افزودن نانوصفحات رس به پلی (بوتیلن ترفتالات)، مدول ذخیره و اختلاف تنش‌های نرمال نوع اول پلی (بوتیلن ترفتالات)، به‌عنوان فاز ماتریس، افزایش یافته‌است. افزایش کشسانی فاز ماتریس به انتقال بهتر تنش‌های برشی، به قطرات فاز پراکنده و شکست آن‌ها کمک می‌کند. مشاهده می‌شود که نمونه شامل ۵ درصد نانوصفحات رس، بیشترین



(الف)



(ب ۱)



(ب ۲)

شکل ۱۱. (الف) نمودار گران روی برحسب سرعت برش برای نانوجنس‌سازه‌های بسیار/نانورس، (ب ۱ و ۲) تأثیر نانوصفحات رس بر مدول ذخیره (G'') و اختلاف تنش‌های نرمال نوع اول ($N1$) نانوجنس‌سازه‌های بسیار/ نانورس [۳۳].

۴. نتیجه‌گیری، چالش‌ها و چشم‌انداز

در این تحقیق، به‌مرور مطالعه‌های پیشین انجام‌شده برای اثر نانوصفحات رس در نانوچندسازه پلی‌پروپیلن/ رس که یکی از تجاری‌ترین و مؤثرترین نانوصفحات رایج است، بر خواص روانه‌شناختی آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر بسیاری پرداخته شده‌است. براساس مطالعه انجام‌شده مشخص شد که:

۱- برای برهمکنش‌های ضعیف چندسازه‌های پلیمر/ نانو صفحات رس و در سامانه‌هایی که پخش صفحات نانو در آن‌ها پایداری کمی دارد، افزودن سیلیکات لایه‌ای کمترین تأثیر را بر رفتار روانه‌شناختی نانوچندسازه دارد.

۲- برای برهمکنش‌های قوی چندسازه‌های پلیمر/ صفحات رس، یک انتقال از رفتار روانه‌شناختی مایع‌گونه به رفتار جامدگونه در اندازه‌های نسبتاً کم از سیلیکات (۲-۱ درصد وزنی) دیده می‌شود. نشانه‌های این انتقال در مدول کشسان، گرانروی هم‌تافت و وابستگی زمانی مدول آسودگی تنش، دیده می‌شود.

۳- توافق بسیار خوبی میان اندازه‌گیری‌های نوسانی پویایی‌شناسی خطی و آسودگی تنش خطی مشاهده شده‌است. در تمام این بررسی‌ها، یک افزایش در گرانروی برشی، مدول ذخیره و مدول اتلاف نانوچندسازه‌ها با افزایش مقدار صفحات نانورس دیده شد.

۴- مشخص شد که نانوصفحات رس با افزایش گرانروی و کشسانی ماتریس بسیار به گسترش ریخت‌شناسی فازی کمک می‌کنند؛ به طوری که با افزایش کشسانی فاز ماتریس آمیزه‌ها در اثر افزودن نانوصفحات رس، عدد کاپیلاری افزایش و اندازه قطرات فاز پراکنده نیز کاهش می‌یابد.

۵- همان‌طور که طی سال‌های گذشته مشاهده می‌شود، پیشرفت‌های قابل توجه و چشمگیری در همنهشت، پردازش و عملکرد نانوچندسازه‌های بسیاری و نانوصفحات رس به‌دست‌آمده است. صفحات رس، ویژگی‌های روانه‌شناختی بهتری را نسبت به نانوچندسازه‌های بدون رس دارند و از این‌رو می‌تواند برای غلبه بر محدودیت‌های بسیاری که در تولید مواد بسیاری وجود دارد، مورد استفاده قرارگیرد. با این‌وجود، کنترل کامل بر خواص ریخت‌شناسی و روانه‌شناسی این نانوچندسازه‌ها (پراکندگی نانو ساختار یا

حتی جهت‌گیری) هنوز هم برای رسیدن به خواص بهینه، جای بررسی و تحقیق دارد. از طرفی، فرایندهای مختلفی برای تهیه مواد نانوچندسازه بسیاری وجود دارد که هر کدام برتری‌ها و کاستی‌های خاص خود را در به‌دست آوردن خواص پایا و پویای روانه‌شناختی مناسب دارند. بنابراین روش‌های مناسب باید براساس برنامه و اهداف، ترکیب مورد نظر و مواد بسیاری مورد استفاده، انتخاب شود.

۶- گسترش چندسازه‌های نوآورانه بسیار/ رس، باعث شده‌است تا مواد جدیدی با خصوصیات تخصصی وجود داشته‌باشد که اغلب به نوع نانورس و بسیار استفاده شده و روش همنهشت وابسته هستند. بنابراین انتخاب ترکیب بسیار/ رس از نظر نوع و مقدار این مواد، در رسیدن به خصوصیات روانه‌شناختی و ریخت‌شناختی مورد نظر، بسیار اهمیت دارد. بنابراین با توجه به تقاضا برای مواد نانوچندسازه بسیار/ رس در طی سال‌های اخیر، به سبب سازگاری این مواد با محیط زیست، سلامت و ایمنی، بررسی خواص روانه‌شناختی و ریخت‌شناسی این مواد نوآورانه در نوع و مقادیر متفاوت برای به‌دست‌آوردن ترکیب مورد نیاز صنایع مختلف، بیش از پیش لازم و ضروری می‌نماید.

۷- از آنجا که خصوصیات روانه‌شناختی نانوچندسازه‌های بسیار/ رس به ساختار، اندازه صفحات، شکل و خصوصیات مواد استفاده‌شده حساس هستند، بنابراین به‌دست آوردن خواص بهینه برای این نانوچندسازه‌ها، معمولاً به پراکندگی مناسب نانوصفحات نیاز دارد ولی این پراکندگی مناسب، لزوماً منجر به ایجاد یک ریخت‌شناسی مطلوب از نانوچندسازه مورد نظر نشود؛ بنابراین توجه به هر دو جنبه ریخت‌شناختی و روانه‌شناختی در تهیه نانوچندسازه مورد نظر، ضروری است.

۸- تقابل نظریه‌ها و آزمایش‌های تجربی ساخت نانوچندسازه‌های بسیار/ رس با ویژگی‌های بی‌همتا، نشان از نبودن یک روند دست‌ورالعمل ثابت و کلی برای این مواد دارد. بنابراین گسترش مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، نه تنها می‌تواند کاربردهای عملی این نانوچندسازه‌ها را ترویج دهد بلکه ابزار قدرتمندی را نیز در تحقیق‌های بنیادی در رابطه با خصوصیات روانه‌شناختی آن‌ها ارائه خواهد داد.

- [1] Weder, C., "Functional polymer blends and nanocomposites", *Chimia*, 63(11): pp. 758- 763, (2009).
- [2] Calcagno, C. I. W., Mariani, C. M., Teixeira, S. R., Mauler R. S., "The role of the MMT on the morphology and mechanical properties of the PP/PET blends", *Comp Sci and Tech*, 68: pp. 2193-2200, (2008).
- [3] Utracki, L. A., "Clay-containing polymeric nanocomposites and their properties", *IEEE Electr Insul M*, 26(4): pp. 6-15, (2010).
- [4] Gahleitner, M., Kretschmar, B., Van Vliet, G., Devaux, J., Pospiech, D., Bernreitner K., Ingolic E., "Rheology/morphology interactions in polypropylene/polyamide-6 anocomposites", *Rheol Acta*, 45: pp. 322-330, (2006).
- [5] Barton, C. D., Karathanasis, A. D., "Clay minerals", In: *Encyclopedia of soil science*, Lal, R. (Ed), Taylor and Francis Press, (2016).
- [6] Majeed, K., Jawaid, M., Hassan, A., Abu Bakar, A., Abdul Khalil, H. P. S., Salema, A. A., Inuwa, I., "Potential materials for food packaging from nanoclay/natural fibres filled hybrid composites", *Mater Des*, 46: pp. 391-410, (2013).
- [7] Müller, K., Bugnicourt, E., Latorre, M., Jorda, M., Echegoyen Sanz, Y., Lagaron, J. M., Miesbauer, O., Bianchin, A., Hankin, S., Bölz, U., "Review on the processing and properties of polymer nanocomposites and nanocoatings and their applications in the packaging, automotive and solar energy fields", *Nanomaterials*, 7(74): pp. 1-47, (2017).
- [8] Potschke, P., Abdel-Goad, M., Alig, I., Dudkin, S., Lellinger, D., "Rheological and dielectrical characterization of melt mixed polycarbonate-multiwalled carbon nanotube composites", *Polymer*, 45: pp. 8863-8870, (2004).
- [9] Cassagnau, P., "Melt rheology of organoclay and fumed silica nanocomposites", *Polymer*, 49: pp. 2183-2196, (2008).
- [10] Rytwo, G. J. M., "Clay minerals as an ancient nanotechnology: Historical uses of clay organic interactions, and future possible perspectives", *Macla*, 9: pp. 15-17, (2008).
- [11] Villmow, T., Pegel, S., Potschke, P., Wagenknecht, U., "Influence of injection molding parameters on the electrical resistivity of polycarbonate filled with multi-walled carbon nanotubes", *Compos Sci Technol*, 68: pp. 777-789, (2008).
- [12] Chandra, A., Kramschuster, A. J., Hu, X., Turng, L. S., "Effect of injection molding parameters on the electrical conductivity of polycarbonate/carbon nanotube nanocomposites", In *Proceedings of the Annual Technical Conference (ANTEC)*, Cincinnati, OH, USA, 6-11 May, pp. 2171-2175, (2007).
- [13] Dennis, H. R., Hunter, D. L., Chang, D., Kim, S., White, J. L., Cho, J. W., Paul, D. R., "Effect of melt processing conditions on the extent of exfoliation in organoclay-based nanocomposites", *Polymer*, 42: pp. 9513-9522, (2001).
- [14] Ge, T., Kalathi, J. T., Halverson, J. D., Grest, G. S., Rubinstein, M., "Nanoparticle motion in entangled melts of linear and nonconcatenated ring polymers", *Macromolecules*, 50: pp. 1749-1754, (2017).
- [15] Mark, J. E., Jiang, C. Y., Tang, M. Y., "Simultaneous curing and filling of elastomers". *Macromolecules*, 17: pp. 2613-2616, (1984).
- [16] Wen, J. Y., Wilkes, G. L., "Organic/inorganic hybrid network materials by the sol-gel approach", *Chem Mater*, 8: pp. 1667-1681, (1996).
- [17] Lotti, C., Isaac, C. S., Branciforti, M. C., Alves, R. M. V., Liberman, S., Bretas, R. E. S., "Rheological, mechanical and transport properties of blown films of high density polyethylene nanocomposites". *Eur Polym J*. 44: pp. 1346-1357, (2008).
- [18] Ianniruberto, G., "Introduction on Polymer Rheology", In: *Reference module in chemistry, molecular sciences and chemical engineering*, Reedijk, J. (Eds.), Elsevier Press, (2015).
- [19] Zare, Y., Rhee, K. Y., "Prediction of loss factor ($\tan \delta$) for polymer nanocomposites as a function of yield stress, relaxation time and the width of transition region between Newtonian and power-law behaviors", *J Mech Behav Biomed Mater*, 96: pp. 136-143, (2019).
- [20] Khounvilay, K., Sittikijyothin, W., "Rheological behaviour of tamarind seed gum in aqueous solutions", *Food Hydrocoll*, 26: pp. 334 - 338, (2012).
- [21] Li, J., Zhou, C., Wang, G., Zhao, D., "Study on rheological behavior of polypropylene/clay nanocomposites", *J Appl Polym Sci*, 89(13): pp. 3609-3617, (2003).
- [22] Abu-Jdayil, B., Al Omari, S. B., Taher, H., Al-Nuaimi, L., "Rheological characterization of clay-polyester composites", *Procedia Eng*, 10: pp. 716- 721, (2011).
- [23] Mansor, M. R., Mustafa, Z., Fadzullah, A. H., Omar, G., Salim, M. A., Akop, M. Z., "Recent Advances in Polyethylene-Based Biocomposites", In: Sapuan, S. M., Ismail, H., Zainudin, E. S. (eds), *Natural Fibre Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites: Development, Characterization and Applications*, Woodhead Publishing. pp. 71-96, (2018).

- [24] Kádár, R., Abbasi, M., Figuli, R., Rigdahl, M., Wilhelm, M., "Linear and nonlinear rheology combined with dielectric spectroscopy of hybrid polymer nanocomposites for semiconductive applications", *Nanomaterials*, 7(23): pp. 1-20, (2017).
- [25] Li, Y., Han, Ch., Zhang, X., Bian, J., Han, L., "Rheology, mechanical properties, and biodegradation of poly(ϵ -caprolactone)/silica nanocomposites". *Polym Compos*, 34(10): pp. 1620-1628, (2013).
- [26] Xue, M. L., Li, P., "Phase morphology and clay distribution of poly (trimethylene terephthalate)/polypropylene/montmorillonite nanocomposites", *J Appl Polym Sci*, 113(6): pp. 3883-3890, (2009).
- [27] Entezam, M., Khonakdar, H.A., Yousefi, A. A., "Dynamic and transient shear start-up flow experiments for analyzing nanoclay localization in PP/PET blends: correlation with microstructure", *Macromol Mater Eng*, 298(1): pp. 113-126, (2012).
- [28] Ville, J., Médéric, P., Huitric, J., Aubry, T., "Structural and rheological investigation of nterphase in polyethylene/polyamide/nanoclay ternary blends", *Polymer*, 53(8): pp. 1733- 1740, (2012).
- [29] Lei, S. G., Ton-That, M. T., Hoa, S. V., "Effect of clay types on the processing and properties of polypropylene nanocomposites". *Compos Sci and Technol*, 66: pp. 1274–1279, (2006).
- [30] Liu, W., Liu, B., Wang, X., "Morphology, rheological properties, and crystallization behavior of polypropylene/clay nanocomposites", *Int J Polym Mater*, 62: pp. 164–171, (2013).
- [31] Solomon, M. J., Almusallam, A. S., Seefeldt, K. F., Somwangthanaroj, A., Varadan, P., "Rheology of Polypropylene/Clay Hybrid Materials", *Macromolecules*, 34(6): pp. 1864-1872, (2001).
- [32] Gu, S., Ren, J., Wang, Q., "Rheology of poly(propylene)/clay nanocomposites", *J Appl Polym Sci*, 91: pp. 2427–2434, (2004).
- [33] Sundararaj, U., Macosko, C.W., "Drop breakup and coalescence in polymer blends: the effects of concentration and compatibilization", *Macromolecules*, 28(8): pp. 2647-2657, (1995).