

مطالعه رئولوژی آمیزه‌های پلی اتیلن و پلی پروپیلن

Archive of SID

Rheological Study of Polyethylene/Polypropylene Blends

علی حق طلب، محمود همتی، جمال اعلائی

۴۰۱ دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه پلیمر، ۲- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده علوم و تکنولوژی پلیمر

دریافت: ۷۹/۴/۱۶، پذیرش: ۷۹/۱۰/۱۹

چکیده

در این مطالعه آمیزه‌هایی از رزینهای پلی اتیلن و پلی پروپیلن تهیه و خواص رئولوژیکی آنها بررسی شد. نتایج حاصل از مطالعات رئولوژیکی بیانگر آن است که اگر اختلاف گرانی هموپلیمرها زیاد باشد، منحنیهای مربوط به آمیزه‌ها بین منحنیهای مربوط به هموپلیمرها قرار می‌گیرد. ولی، اگر اختلاف گرانی رزینهای خالص کم باشد، در سرعتهای برش زیاد منحنی مربوط به جزء گرانیو منحنیهای جزء دیگر و آمیزه‌ها را قطع می‌کند و باینتر از آنها قرار می‌گیرد. آمیزه‌های تهیه شده در محدوده وسیعی از سرعت برش از معادله توانی پیروی می‌کنند. آمیزه‌های یاد شده نسبت به قانون جمع لگاریتمی انحراف منفی دارند و مقایسه نتایج آزمایشها با نتایج چند معادله تجربی موجود نشان‌دهنده آن است که معادله اصلاح شده کولریت تا غلظتهای زیاد می‌تواند نتایج مربوط به این آمیزه‌ها را با درصد خطای قابل قبولی پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: آمیزه، پلی اتیلن، پلی پروپیلن، رئولوژی، گرانیو

Key Words: blend, polyethylene, polypropylene, rheology, viscosity

مقدمه

ضربه‌ای پلی پروپیلن، بهبود خواص پلی پروپیلن در دماهای پایین، بهبود فرایندپذیری پلی پروپیلن و افزودن PP به PE باعث افزایش مقاومت پلی اتیلن در مقابل تشتهای محیطی (ESCR) و افزایش شفافیت پلی اتیلن جامد می‌گردد.

مطالعه رئولوژی مذاب آمیزه‌های PP/PE توسط والنزا و همکاران [۱۵]، فوجی یاما و همکاران [۱۷، ۱۸]، لویج و همکاران [۱۶]، هان جو و همکاران [۱۹]، پلوچوکی و همکاران [۴، ۵] و پژوهشگران دیگر [۸-۱۰] نشان می‌دهد که اگر گرانیو پلیمرهای سازنده آمیزه اختلاف زیادی با هم داشته باشند، گرانیو آمیزه بین مقادیر مربوط به اجزاء قرار می‌گیرد. همچنین، نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که برای آمیزه‌های PP/PE عملکرد انحراف منفی از جمع لگاریتمی وجود دارد [۱۷، ۱۵] هرچند در برخی منابع [۲۵] رفتاری از نوع انحراف مثبت و منفی هر دو برای این آمیزه‌ها گزارش

برای تهیه مواد پلیمری با خواص مکانیکی مناسب و برای تولید رزینهای با حجم انبوه به جای روشهای شیمیایی از روشهایی مانند آمیزه‌کاری و آلیاژسازی استفاده می‌کنند. از طرفی، تولید رزینهای جدید با خواص فیزیکی مناسب از نظر اقتصادی مشکل است یا در بعضی مواقع ممکن نیست. مشکل دیگر مسائل زیست محیطی است که ضایعات پلاستیکها بویژه پلاستیکهای PP و HDPE آنها را بوجود می‌آورند و بازیافت این گونه مواد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سالهای اخیر مطالعات گسترده‌ای در مورد آمیزه‌های پلی‌اولفینی بویژه آمیزه‌های PP/PE توسط بلوم و همکاران [۳-۱]، پلوچوکی و همکاران [۴، ۵]، گاپتا و همکاران [۶، ۷] و پژوهشگران دیگر [۲۴-۸] صورت گرفته است. براساس این مطالعات اضافه کردن PE به PP باعث افزایش مقاومت

جدول ۱ - مشخصات رزینهای پلی پروپیلن و پلی اتیلن استفاده شده در این پژوهش.

نام ماده	نام اختصاری	کد تجاری ماده	شاخص جریان مذاب* (g/10min)	چگالی* (g/cm ³)
پلی پروپیلن	PP-۱	IRAPOLA ۱۱H۳۰S	۱۶	۰/۹۱۲
	PP-۳	IRAPOLA ۱۱F۳۰S	۹	۰/۸۹۳
پلی اتیلن سنگین	HDPE-۱	IRAPOL ۲۱ GM۵۷۵۲۰	۱۸	۰/۹۴۴
	HDPE-۲	IRAPOL GM۴۴۰۰S	۰/۵۵	۰/۹۴۴
	HDPE-۳	POLIRAN HF۰۰۹۰	۰/۹	۰/۹۵۴

* شاخص جریان مذاب مواد به روش ASTM D۱۲۳۸-۸۶ و چگالی آنها به روش ASTM DV۹۲-۶۶ اندازه گیری شده است.

شده است. با توجه به عدم وجود اطلاعات مدون درباره رئولوژی مذاب آمیزه‌های PP/PE تهیه شده از محصولات پتروشیمی اراک و بندر امام، در این پژوهش آثار تغییرات گرانروی هر یک از پلیمرها برای اولین بار مطالعه شده و برای گرانروی آمیزه‌های PP/PE نتایج مدل‌های تجربی موجود با نتایج آزمایشهای انجام شده مقایسه شده است.

تجربی

مواد

در این پژوهش از رزین پلی پروپیلن (PP) و پلی اتیلن سنگین (HDPE) استفاده شده است. مواد یاد شده از محصولات پتروشیمی اراک و بندر امام بوده و مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است.

روش تهیه آمیزه‌ها

برای تهیه آمیزه‌ها از دستگاه پلاستوگراف برابندر آلمان مدل PL۲۰۰۰ استفاده شد. پره اختلاط از نوع CAM، دمای اختلاط ۱۹۰ °C، سرعت اختلاط ۳۰ rpm و زمان اختلاط ۱۵ دقیقه بود و سه نوع آمیزه با درصدهای وزنی ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ از HDPE به روش اختلاط مذاب تهیه شد. همین روش برای پلیمرهای خالص PP و HDPE نیز بکار گرفته شد.

آمیزه B۱ از پلیمرهای PP-۱ و HDPE-۱، آمیزه B۲ از پلیمرهای PP-۱ و HDPE-۲ و آمیزه B۳ از پلیمرهای PP-۳ و HDPE-۳ تشکیل شده است. روی این آمیزه‌ها آزمایشهای مختلف رئولوژیکی در دماهای ۱۹۰، ۲۱۰ و ۲۳۰ °C انجام شده است.

خواص رئولوژیکی

برای تعیین خواص رئولوژیکی از رئومتر موین مدل اینسترون ۳۲۱۱

استفاده شد. در آزمایشهای انجام شده از حدیده موین با قطر ۱/۲۶mm، طول ۵/۱cm و نسبت طول به قطر ۴۰/۴ (L/D) و سرعت پیستون ۶۰/۲، ۶۰/۶، ۶۰/۲، ۶۰/۶ و ۶۰/۲ cm/min استفاده شد. تابع گرانروی در سه دمای ۱۹۰، ۲۱۰ و ۲۳۰ °C اندازه گیری شد. نیروی اعمال شده (F) برای هر سرعت پس از رسیدن به حالت پایدار به وسیله صفحه نمایش دستگاه خوانده می‌شود. خطای دستگاه ۲N گزارش شده است. روابط بین نیرو (F)، تنش برشی و سرعت برش ظاهری (V_s) به صورت زیر است:

$$\sigma_w = \frac{F}{FA_p(L/D)} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma}_s = \frac{V}{15} VD_0^2 / D^2 \quad (2)$$

که Ap سطح مقطع پیستون برابر ۰/۷۰۶ cm²، D₀ قطر بدنه برابر ۹/۵۲۵ cm و V سرعت پیستون برحسب cm/min است. به علت زیاد بودن نسبت L/D از تصحیح بگلی برای در نظر گرفتن افت فشار در ورود سیال به لوله موین استفاده نشده است. اصلاح راینووویچ، که به غیر نیوتنی بودن سیال مربوط است، برای تمام آزمایشها درباره سرعت برش مورد استفاده قرار گرفت، سرعت برش حقیقی در دیواره از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\dot{\gamma}_w = \dot{\gamma}_s \left(\frac{3n'+1}{4n'} \right) \quad (3)$$

که n' شیب منحنی لگاریتمی تنش برحسب سرعت برش ظاهری است. پس از محاسبه مقادیر $\dot{\gamma}_w$ از رسم منحنی لگاریتمی σ_w در برابر $\dot{\gamma}_w$ مقادیر n و K مربوط به معادله توانی بدست می‌آید و تابع گرانروی نیز از معادله زیر محاسبه می‌شود:

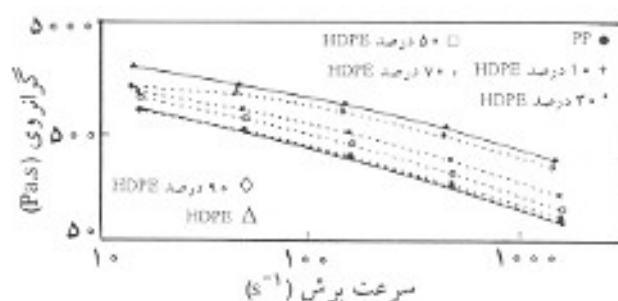
$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma_w}{\dot{\gamma}_w} \quad (4)$$

بیشتر از HDPE است، گرانروی PP افت بیشتری پیدا کرده و چون اختلاف گرانروی پلیمرهای خالص نیز کم است، در نتیجه در سرعت‌های برش زیاد منحنی گرانروی PP منحنی‌های مربوط به HDPE و آمیزه‌ها را قطع می‌کند و پایتتر از آنها قرار می‌گیرد.

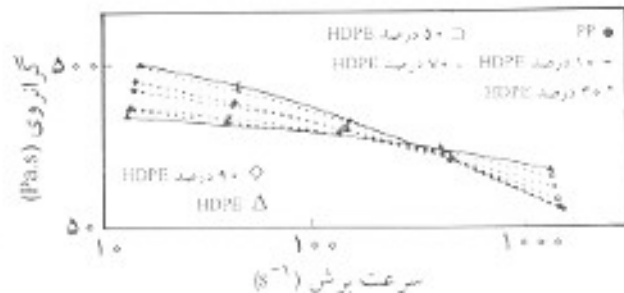
تغییرات گرانروی بر حسب سرعت برش آمیزه B2 در شکل ۲ ارائه شده است. اجرای تشکیل دهنده این آمیزه پلی‌پروپیلن با $MFI = 0.16 \text{ g/10 min}$ و دیگری پلی‌اتیلن با $MFI = 0.55 \text{ g/10 min}$ است. در این حالت چگالی گره‌های مولکولی HDPE برآب بیشتر از مقدار مربوط به PP است که با توجه به مطالب پیش گفته میزان کاهش چگالی گره‌های مولکولی آن بیشتر است و گرانروی آن افت بیشتری پیدا می‌کند. از آنجا که اختلاف گرانروی دو پلیمر خیلی زیاد است، منحنی‌های دو پلیمر همدیگر را قطع نمی‌کنند و منحنی‌های مربوط به آمیزه‌ها بین منحنی‌های مربوط به پلیمرهای خالص قرار می‌گیرند.

منحنی‌های جریان آمیزه B2 در شکل ۳ نشان داده شده است. در این حالت MFI پلی‌پروپیلن برابر ۹ و MFI پلی‌اتیلن برابر 0.9 g/10 min است و همانند آمیزه قبلی منحنی‌های مربوط به آمیزه‌ها بین منحنی‌های رزین‌های خالص قرار گرفته است. این نتایج شبیه نتایج مربوط به دماهای 190°C و 210°C است [۲۷]. مطالعات انجام شده توسط اکثر پژوهشگران نیز نشان می‌دهد که منحنی‌های جریان مذاب آمیزه PP/PE بین منحنی‌های مربوط به PP و PE قرار می‌گیرد [۸، ۱۵-۱۷، ۱۹]. هرچند که در برخی مواقع مشاهده می‌شود که منحنی‌های مربوط به آمیزه‌ها پایتتر از منحنی‌های مربوط به هوموپلیمرها واقع می‌شود [۸، ۱۰].

در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ منحنی‌های تنش برشی در برابر سرعت برش آمیزه‌های B1، B2، B3 ارائه شده است. برای هر یک از آمیزه‌ها این منحنی‌ها مشابه منحنی‌های گرانروی بر حسب سرعت برش است. با توجه به منحنی‌های تنش برشی در برابر سرعت برش و مقادیر ضریب برازش داده‌ها [۲۷] می‌توان گفت که اکثر این آمیزه‌ها از معادله توانی پیروی می‌کنند.



شکل ۲- تغییرات گرانروی بر حسب سرعت برش آمیزه B2 در دمای 230°C .

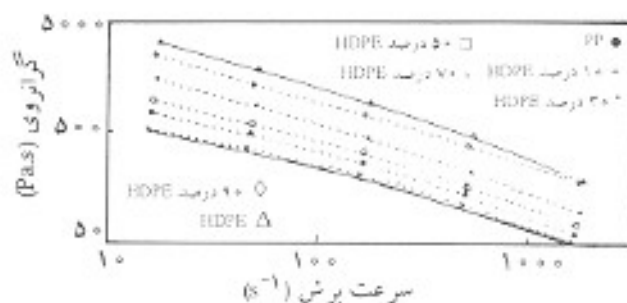


شکل ۱- تغییرات گرانروی بر حسب سرعت برش آمیزه B1 در دمای 230°C .

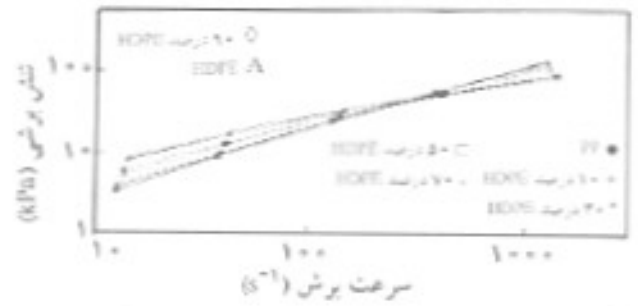
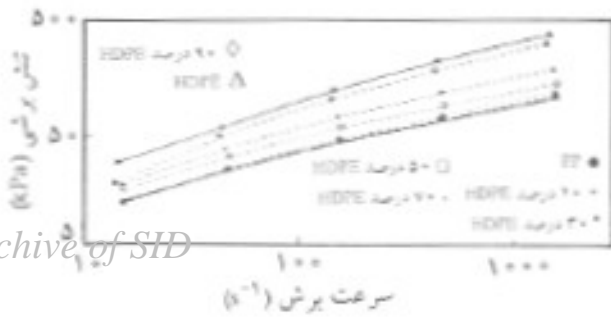
نتایج و بحث

منحنی‌های جریان رزین‌های خالص و آمیزه‌ها

در شکل ۱ تغییرات گرانروی با سرعت برش آمیزه B1 در دمای 230°C بر حسب غلظت‌های HDPE نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت برش گرانروی پلیمرهای خالص و آمیزه‌ها کاهش می‌یابد. در سرعت‌های برش کم گرانروی PP بیشتر از گرانروی HDPE است، ولی با افزایش سرعت برش گرانروی PP کمتر از گرانروی HDPE می‌شود. بطور کلی، کاهش گرانروی پلیمرهای مذاب با افزایش سرعت برش از دو عامل عمده ناشی می‌شود که یکی تغییر آرایش زنجیرها یا به عبارت دیگر تغییر فاصله انتها تا انتهای زنجیر مولکول‌های پلیمری و دیگری فرایند باز شدن و کم شدن گره‌های بین زنجیر مولکول‌های پلیمری است. نقش عامل دوم در کاهش گرانروی برآب بیشتر از عامل اول است. هرچه گرانروی صفر پلیمر مذاب بیشتر باشد و به عبارت دیگر هرچه MFI پلیمر کم باشد، چگالی گره‌های مولکولی آن پلیمر بیشتر بوده و میزان کاهش چگالی گره‌های مولکولی در اثر افزایش نرخ برش بیشتر خواهد بود و در نتیجه، گرانروی افت بیشتری پیدا خواهد کرد [۲۶]. در آمیزه مورد بحث MFI پلی‌پروپیلن برابر ۱۶ و MFI پلی‌اتیلن برابر 1.8 g/10 min است. با توجه به اینکه چگالی گره‌های مولکولی PP



شکل ۳- تغییرات گرانروی بر حسب سرعت برش آمیزه B2 در دمای 230°C .



Archive of SID

شکل ۴- تغییرات تنش برشی بر حسب سرعت برش آمیزه B1 در دمای ۲۳°C.

شکل ۶- تغییرات تنش برشی بر حسب سرعت برش آمیزه B2 در دمای ۲۳°C.

تغییرات گرارتوی آمیزه‌ها با غلظت

قازی به عنوان تابعی از غلظت اجزای سازنده آمیزه سهاله پیچیده‌ای است و هنوز توجهی قطعی که بتواند این تغییرات را به گونه‌ای به ساختار شکل‌شناسی حالت مذاب اجزای سازنده از یک طرف و قوانین ترمودینامیکی از طرف دیگر مرتبط سازد وجود ندارد. به همین دلیل، پژوهشگران زیادی سعی در ارائه مدل‌هایی برای پیش‌بینی این رفتارها داشته‌اند که به چند مورد از آنها اشاره می‌شود.

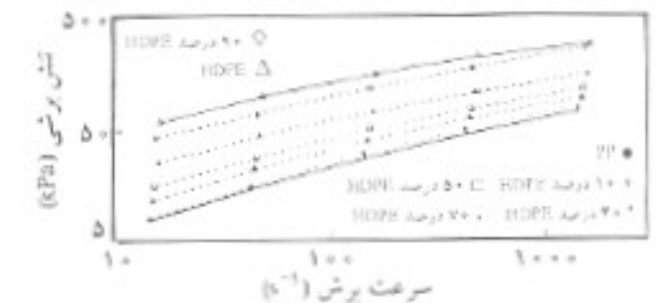
وابستگی گرارتوی مذاب آمیزه‌ها به غلظت کاملاً پیچیده است و الگوی خاصی در این مورد وجود ندارد. در تنش برشی ثابت وابستگی گرارتوی مذاب به غلظت تابعی از نسبت گرارتوی پلیمرهای خالص است. با توجه به نوع PE، PP و میزان تنش برشی ممکن است رفتار خطی، انحراف منفی، رفتار S شکل یا نوعی دیگر مشاهده شود [۴،۸،۱۵،۱۷]. در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ وابستگی گرارتوی به غلظت HDPE برای آمیزه‌های B1، B2، B3 نشان داده شده است. رفتارهای هر سه آمیزه در سرعت‌های برش مختلف شبیه هم است و نسبت به قانون جمع لگاریتمی انحراف منفی دارند (NDB). داشتن انحراف منفی نسبت به جمع لگاریتمی را می‌توان به لغزش بین لایه‌ای، که در اکثر آمیزه‌های امتراج‌ناپذیر وجود دارد، نسبت داد. اکثر پژوهشگران نیز عقیده دارند که آمیزه‌های PP/HDPE نسبت به قانون جمع لگاریتمی انحراف منفی دارند [۸،۱۵،۱۷]. البته، در برخی منابع رفتار انحراف منفی و انحراف مثبت (PNDB) هر دو برای آمیزه‌های پیش گفته گزارش شده است [۲۵].

تاکنون باگی معادله زیر را برای موافق که قطرات بک فاز در ماتریس پیوسته فاز دوم پخش شده باشد ارائه کرده است [۲۸]

برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی آمیزه‌ها از مدل‌های تجربی مختلفی استفاده شده است. موضوع تغییرات گرارتوی آمیزه‌های دو

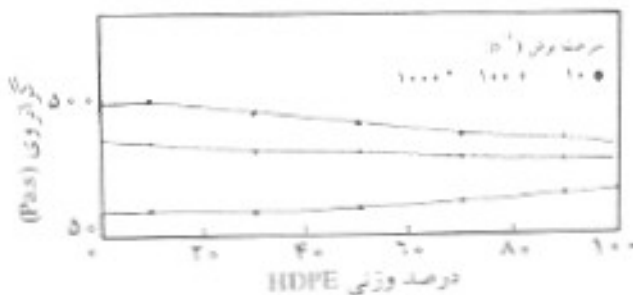
$$\eta = \eta_1 \frac{\phi_1 \eta_1 + \phi_2 \eta_2 - 2[\eta_1 \eta_2] \phi_1}{\phi_1 \eta_1 + \phi_2 \eta_2 - 2[\eta_1 \eta_2] \phi_1} \quad (V)$$

کولزنیف و کاندابیرین معادله تجربی زیر را برای آمیزه‌های ناسازگار (امتراج‌ناپذیر) پیشنهاد کرده‌اند [۲۸]



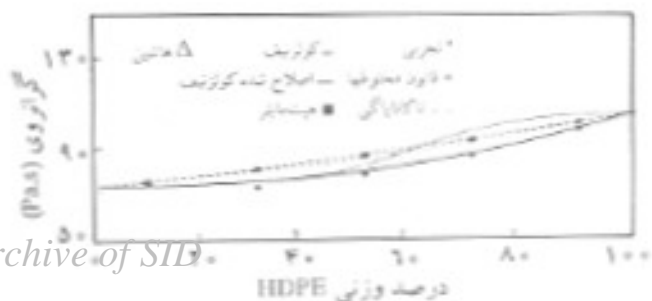
$$\log \eta = \phi_1^2 \log \eta_1 + [1 - \phi_1^2] \log \eta_2 \quad (A)$$

در معادلات یاد شده η_1 و η_2 گرارتوی اجزاء و ϕ_1 درصد حجمی فاز پراکنده است. هاشین نیز دو مدل زیر را ارائه کرده است [۲۹]



شکل ۵- تغییرات تنش برشی بر حسب سرعت برش آمیزه B2 در دمای ۲۳°C.

شکل ۷- تغییرات گرارتوی - غلظت آمیزه B1 در دمای ۲۳°C.



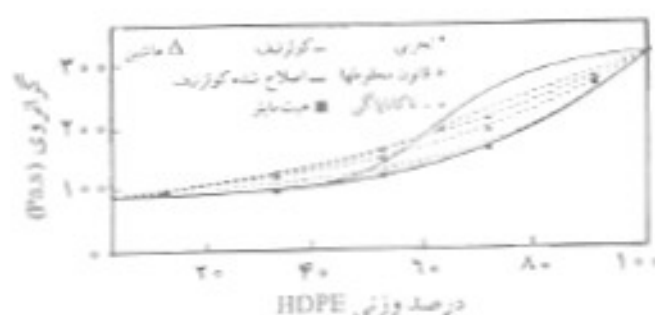
Archive of SID

شکل ۱۰- مقایسه نتایج آزمایشهای آمیزه B1 با نتایج پیش‌بینی شده از چند مدل تجربی در دمای ۲۳°C و سرعت برش ۱۰۰۰۰ s⁻¹.

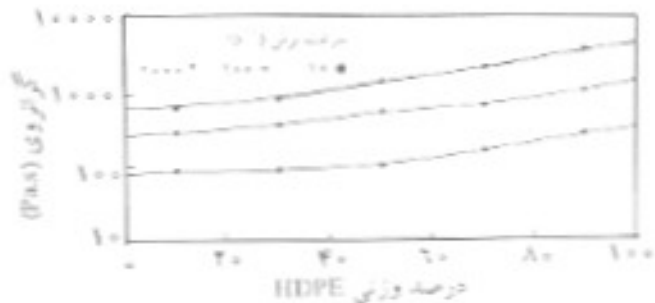
مدل اصلاح شده کوزنیف همانند مدل قدیمی آن یک مدل تجربی است و تفاوت آن با مدل قدیمی کوزنیف در تعریف Φ است (در مدل قدیمی کوزنیف Φ درصد حجمی جزء پراکنده بود). نتایج برآزش داده‌ها در شکلهای ۱۰ و ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج تجربی آزمایشها به نتایج مدل اصلاح شده کوزنیف بسیار نزدیک است.

نتیجه‌گیری

مطالعات رئولوژیکی نشان می‌دهد که اگر اختلاف گرانروی هوموپلیمرها زیاد باشد، منحنیهای مربوط به آمیزه‌ها بین منحنیهای مربوط به هوموپلیمرها قرار می‌گیرد. ولی، اگر اختلاف گرانروی رزینهای خالص کم باشد، در سرعتهای برش زیاد منحنی مربوط به جزئی که گرانروی بیشتری دارد منحنیهای جزء دیگر و آمیزه‌ها را قطع می‌کند و پایتتر از آنها قرار می‌گیرد. این آمیزه‌ها نسبت به قانون جمع لگاریتمی انحراف منفی دارند و مقایسه نتایج آزمایشها با نتایج چند معادله تجربی



شکل ۱۱- مقایسه نتایج آزمایشهای آمیزه B2 با نتایج پیش‌بینی شده از چند مدل تجربی در دمای ۲۳°C و سرعت برش ۱۰۰۰۰ s⁻¹.



شکل ۸- تغییرات گرانروی - غلظت آمیزه B2 در دمای ۲۳°C.

$$\eta_{mix} = \eta_1 + \frac{\Phi_2}{\sqrt{(\eta_1 + \eta_2) - \Phi_1 / 2\eta_1}} \quad (9) \text{ موز بالا}$$

این مدل زمانی بکار می‌رود که گرانروی جزء پراکنده بیشتر از جزء پیوسته باشد.

$$\eta_{mix} = \eta_1 + \frac{\Phi_2}{\sqrt{(\eta_1 + \eta_2) - \Phi_1 / 2\eta_1}} \quad (10) \text{ موز پایین}$$

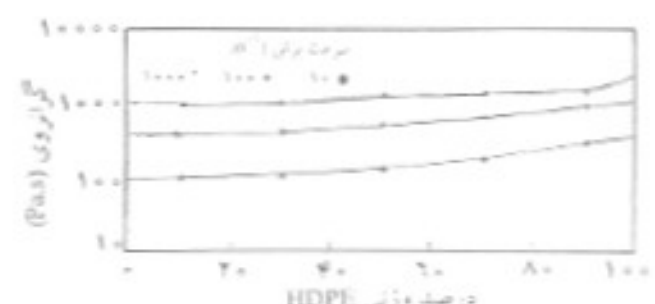
از این مدل موقعی استفاده می‌شود که گرانروی جزء پراکنده پایتتر از جزء پیوسته باشد. معادله حیت مایر نیز به صورت زیر است [۱۴]

$$\frac{1}{\eta_{mix}} = \frac{w}{\eta_1} + \frac{1-w}{\eta_2} \quad (11)$$

که در آن η_{mix} گرانروی آمیزه و w درصد وزنی جزء یک است. علاوه بر مدل‌های یاد شده در اینجا مدل دیگری به نام مدل اصلاح شده کوزنیف پیشنهاد می‌شود:

$$\log \eta = \Phi_1' \log \eta_1 + (1 - \Phi_1') \log \eta_2 \quad (12)$$

که Φ_1' درصد حجمی جزء دارای گرانروی بیشتر است.



شکل ۹- تغییرات گرانروی - غلظت آمیزه B3 در دمای ۲۳°C.

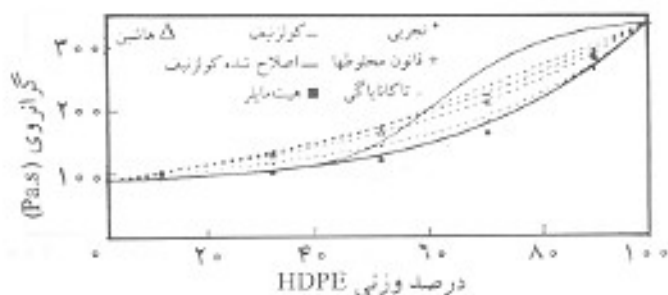
537-43, 1986.

13. Rizzo G. and Spdaro G.; *Eur. Polym. J.*; **24**, 4, 303-6, 1988.14. Robson P., Sandilands G. J. and White J. R.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **26**, 3515-21, 1981.15. Valenza A., Mantia F. P. and Acierno D.; *Eur. Polym. J.*; **20**, 7, 727-31, 1984.16. Levij M. and Maurer F. H. J.; *Polym. Eng. Sci.*; **28**, 10, 670-8, 1988.17. Fujiama M. and Kawasaki Y.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **42**, 467-80, 1991.

18. Ibid, 481-8.

19. Cho J. H., Chol K. S. and Kim S. Y.; *Inter. J. Polym. Mat.*; **21**, 19-92, 1993.20. Du O. and Wang L.; *J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed.*; **27**, 581-8, 1989.21. Vaccaro E., Dibenedetto A. T. and Huang S. J.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **63**, 275-81, 1997.22. Cheung P., Suwanda D. and Balke S. T.; *Polym. Eng. Sci.*; **30**, 17, 1063-72, 1990.23. Micic P., Bhattacharya S. N. and Field G. J.; *Inter. Polym. Proc. J.*; **2**, 12, 110-5, 1997.24. George J., Ramamuthy K. and Varughese K. T.; *J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed.*; **38**, 9, 2000.25. Utracki L. A.; *Polymer Alloys and Blends: Thermodynamics and Rheology*; Hanser, Munich, 1989.26. Dealy J. M. and Wissbrun K. F.; *Melt Rheology and its Role in Plastics Processing*; Chapman & Hall, London, 1996.

27 - اعلامی هره دشت جمال، پایان نامه کارشناسی ارشد: تعیین خواص رئولوژیکی و مورفولوژی آمیزه‌های پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن، دانشگاه تربیت مدرس، خرداد ماه ۱۳۷۷.

28. Vinogradov G. V. and Malkin A. Y.; *Rheology of Polymers: Viscoelasticity and Flow of Polymers*; Mir, Moscow, 1980.29. Paul D. R. and Newman S.; *Polymer Blends*; **2**, Academic, London, 1978.

شکل ۱۲ - مقایسه نتایج آزمایشهای آمیزه B۳ با نتایج پیشینی شده از چند مدل تجربی در دمای 23°C و سرعت برش 1000 s^{-1} .

نشان می‌دهد که معادله اصلاح شده کولزین که در این تحقیق پیشنهاد شده است تا غلظتهای زیاد می‌تواند نتایج مربوط به این آمیزه‌ها را با درصد خطای قابل قبولی پیش‌بینی کند.

مراجع

- Blom H. P., Teh J. W. and Rudin A.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **58**, 995-1006, 1995.
- Blom H. P., Teh J. W. and Rudin A.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **60**, 1405-15, 1996.
- Blom H. P., Teh J. W. and Rudin A.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **61**, 959-68, 1996.
- Plochocki A. P.; *Polym. Eng. Sci.*; **22**, 17, 1153-65, 1982.
- Plochocki A.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **16**, 987-1008, 1972.
- Gupta A. K. and Purwar S. N.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **30**, 1777-98, 1985.
- Ibid; 1799-1814.
- Teh J. W., Rudin A. and Keung J. C.; *Advances in Polymer Technology*; **113**, 1, 1-23, 1994.
- Utracki L. A.; *J. Rheol.*; **35**, 8, 1615-37, 1990.
- Noel O. F. and Carley J. F.; *Polym. Eng. Sci.*; **15**, 2, 117-26, 1975.
- Lovinger A. J. and Williams M. L.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **25**, 1703-13, 1980.
- Bartczak Z., Galeski A. and Pracella M.; *Polymer*; **27**,