

ارتباط بین ریخت‌شناسی و جریان‌سنجی در آمیزه‌های امتزاج ناپذیر بسپاری

آرمین حاجی‌بابا، محمود معصومی*

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی، گروه پلیمر

پیام‌نگار: mmasoomi@cc.iut.ac.ir

چکیده

از آنجاییکه اکثر آمیزه‌های بسپاری از نظر ترمودینامیکی امتزاج‌ناپذیر هستند، این مقاله سعی بر گردآوری اطلاعات و ارتباط بین ریخت‌شناسی و جریان‌سنجی این زوج‌بسپارها دارد. از این‌رو در این تحقیق، نظریه‌ها و مدل‌های مهم ریخت‌شناسی و جریان‌سنجی آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر بسپاری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج مطالعات ریخت‌شناسی نشان می‌دهند که ساختار نهایی یک آمیزه بسپاری به دو پارامتر، نسبت گرانروی فازها و عدد کاپیلاری، ارتباط پیدا می‌کند. همچنین عدد کاپیلاری به گرانروی فاز ماتریس، نرخ کرنش و تنش بین سطحی وابسته است. از موارد دیگری که روی شکست قطرات فاز پراکنده و ریخت‌شناسی نهایی آمیزه بسپاری تأثیر می‌گذارد نوع جریان است. نتیجه تحقیقات نشان می‌دهد که شکست قطرات فاز پراکنده در میدان‌های کششی راحت‌تر از میدان‌های برشی اتفاق می‌افتد. مدل‌های پالیرن، کوران، جاززبسکی و (دویی-اوهتا) از معروفترین مدل‌هایی هستند که ارتباط بین جریان‌سنجی و ریخت‌شناسی در آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر بسپاری را به خوبی نشان می‌دهند. در مدل (دویی-اوهتا) مشخص است که افزایش اختلاف تنش‌های نرمال نوع اول که بیانگر افزایش ماهیت نظریه ویسکوالاستیک آمیزه بسپاری می‌باشد، سبب ریزش قطرات فاز پراکنده می‌گردد. همچنین در مدل پالیرن مدول کمپلکس آمیزه امتزاج‌ناپذیر بسپاری به قطر قطرات فاز پراکنده و تنش بین سطحی دو بسپار ارتباط داده می‌شود.

کلمات کلیدی: ریخت‌شناسی، جریان‌شناسی، آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر بسپاری، ویسکوالاستیک، تنش بین‌سطحی

۱- مقدمه

آمیزه‌های بسپاری در دماهای بالا و تحت برش یا کشش، توسط محققین زیادی به اثبات رسیده است [۴-۲]. در بحث جریان‌سنجی آمیزه‌های بسپاری، سه نوع جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد: جریان برشی ساده، جریان برشی دینامیکی و جریان کششی [۵]. در میان این جریان‌ها، جریان برشی ساده و جریان کششی شدیداً روی ریخت‌شناسی آمیزه بسپاری تأثیر می‌گذارند در حالی که این تأثیر برای جریان دینامیکی چندان زیاد نیست. اگر آمیزه‌های بسپاری را به دو گروه امتزاج‌پذیر و غیر امتزاج‌پذیر تقسیم کنیم می‌توان

در سال‌های اخیر به دلیل هزینه‌های بالای سنتز مواد جدید و مشکلات آن، سرعت تولید بسپارهای نو کاهش یافته و توجهات به سمت آمیزه‌سازی بسپارهای موجود، جلب شده است [۱]. در میان این آمیزه‌ها، ترموپلاستیک الاستومرها به علت ویژگی لاستیک‌ها در کاربرد و شرایط فرایندی ترموپلاستیک‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است [۱]. اهمیت مطالعات جریان‌سنجی در پیش‌بینی رفتار جریان

1. Reology

در مورد زوج بسپارهای غیرقابل امتزاج بحثی تحت عنوان سازگاری وجود دارد، به طوری که باید گفت حالت بهینه ریخت‌شناسی آمیزه‌های بسپاری وقتی حاصل می‌شود که قطرات فاز پراکنده در ماتریس به صورت کاملاً ریز درآمده باشند. به دلیل وجود نیروهای ترمودینامیکی که باعث انعقاد قطرات می‌شود، رسیدن به چنین ریخت‌شناسی آسان نیست. افزودن سازگارکننده‌های هم‌بسپار دسته‌ای در فصل مشترک دو فاز از جمله راهکارهای متداول در ایجاد پایداری ریخت‌شناسی در سازگارسازی زوج بسپارها می‌باشد [۹]. سازگارکننده‌ها موادی هستند که به آمیزه‌های غیرقابل امتزاج اضافه شده، سبب ایجاد فعالیت بین‌سطحی می‌شوند. زنجیر هم‌بسپاری سازگارکننده‌ها معمولاً ساختار دسته‌ای دارند، به این ترتیب که یک قسمت زنجیر در بسپار اول و قسمت دیگر زنجیر در بسپار دوم جذب می‌شود. سازگارسازی از طریق دو مکانیزم کاهش تنش بین‌سطحی و کاهش ائتلاف^۷ قطرات سبب ریزشیدن اندازه قطرات فاز پراکنده می‌شود. در مکانیزم اول، ها^۸ و همکارانش (شکل (۱) - الف)) نشان دادند که با خروج سیال ماتریس از فاصله بین دو قطره، سازگارکننده‌ها از این ناحیه خارج می‌شوند، این موضوع سبب ایجاد گرادیان غلظتی از سازگارکننده در فاصله بین دو قطره و ایجاد تنش‌های مماسی^۹ می‌گردد. این تنش‌ها سبب جلوگیری از ائتلاف قطرات می‌شوند. در مکانیزم ۲ که سوندراجا و ماکوسکو [۱۰] آن را مطرح کردند هم‌بسپارهای بلاک مانع برخورد دو قطره به یکدیگر شده و راه برخورد آنها را سد می‌کند (شکل (۱) - ب)). در حال حاضر مکانیزم ۲ در بین دانشمندان، از ارزش و اعتبار بیشتری برخوردار است.

ماکوسکو^{۱۰} و همکارانش [۱۲] در سیستم بسپاری (پلی‌استایرن / پلی‌متیل متاکریلات))، استفاده از هم‌بسپار بلاک (پلی‌استایرن - پلی‌متیل متاکریلات)) را دلیل ایجاد ریخت‌شناسی بهتر و یکنواخت‌تر با اندازه قطرات ریزتر دانستند. مالیک‌انیدریدها، اپوکسی‌ها، اکسازولین، کربن ایمیدها و ایزوسیانات‌ها از جمله مهمترین عواملی هستند که روی بسپارها قرار می‌گیرند تا یک سیستم سازگارسازی فعال درجا را به وجود آورند. این عوامل شیمیایی فعال به صورت دستی یا ذاتی روی زنجیر بسپارها قرار

مدلهایی را برای پیش‌بینی رفتار جریان‌سنجی هر کدام از آنها بیان کرد. در مورد آمیزه‌های بسپاری غیرقابل امتزاج که در این مقاله درباره آنها بحث صورت خواهد گرفت و در این راستا مدل‌های سوسپانسونی^۱ (تعلیقی)، امولسیون^۲، کوبسپارهای دسته‌ای^۳، و کوران^۴ توضیح داده خواهد شد [۵].

آمیزه‌سازی بسپارهای متفاوت باعث ایجاد ریخت‌شناسی‌های گوناگون می‌شود، ساختارهایی چون حالت قطره‌ای، لیفی و به هم پیوسته^۶ [۶] از رایج‌ترین ساختارهایی هستند که گزارش شده‌اند. کنترل ریخت‌شناسی اهمیت فراوانی در خواص نهایی آمیزه‌های بسپاری دارد. هر کدام از این ریخت‌شناسی‌ها به عوامل زیادی چون ترکیب درصد اجزای شرایط فرایندی (دما، زمان و سرعت کرنش)، خواص جریان‌سنجی، نسبت گرانیوی اجزاء و خواص بین سطحی نمونه‌ها وابسته هستند [۷].

به دلیل اهمیت ارتباط بین جریان‌سنجی و ریخت‌شناسی در تعیین خواص نهایی آمیزه‌های بسپاری، این مقاله سعی دارد با بررسی مدل‌های جریان‌سنجی و ریخت‌شناسی، چشم‌انداز روشن‌تری را برای محققین این عرصه فراهم آورد.

۲- نظریه‌های ریخت‌شناسی

۲-۱ تعاریف اولیه

همان‌طور که ذکر شد آمیزه‌های بسپاری به دو گروه امتزاج‌پذیر و امتزاج‌ناپذیر تقسیم می‌شوند. به دلیل آنتروپی اختلاط پایین، اکثر زوج بسپارها از نظر ترمودینامیکی غیر قابل امتزاج هستند. در سال ۱۹۸۹ با توجه به معادله گیبس^۱ [۸]، معادله (۱) برای امتزاج‌پذیری سامانه (بسپار/ بسپار) مطرح شد. در این معادله ΔG_m ، ΔH_m و ΔS_m و θ_i به ترتیب انرژی آزاد اختلاط، آنتالپی اختلاط، آنتروپی اختلاط و کسر حجمی هر کدام از اجزا می‌باشند. بخش اول معادله (۱) امتزاج‌پذیری و بخش دوم پایداری فازی را بیان می‌کند.

$$\Delta G_m = \Delta H_m + T\Delta S_m < 0 \quad (1)$$

$$[\partial^2 G_m / \partial \theta_i^2]_{T, P} >$$

1. Suspension
2. Emulsion
3. Block Copolymer
4. Coran
5. Co-Continuous
6. Gibbs

7. Coalescence
8. Ha
9. Marangoni Stress
10. Macosko

دارند و یک سیستم واکنشی را در فصل مشترک به وجود می آورند. در واقع همبسیارهای دسته‌ای به صورت درجا و آبی به واسطه وجود عوامل شیمیایی فعال بر روی زنجیرهای دو بسپار در فصل مشترک ایجاد می شوند و باعث سازگاری زوج بسپارها می شوند. آمیزه‌هایی که به روش فوق سازگار می شوند به آمیزه‌های واکنشی^۱ معروف هستند. بدیهی است که راندمان سازگاری با این روش بیشتر از روش اضافه کردن مستقیم همبسیار به آمیزه است، زیرا وقتی سازگارکننده به صورت جداگانه وارد محفظه واکنش می شود تنها بخشی از آن مفید واقع می شود که در فصل مشترک دو فاز قرار می گیرد [۱۳].

وارد از طرف میدان جریان و کشش بین سطحی قطره دانست و آن را با دو کمیت بی بعد زیر توصیف کرد:

$$Ca = \eta_m \dot{\gamma} d / \gamma \quad (2)$$

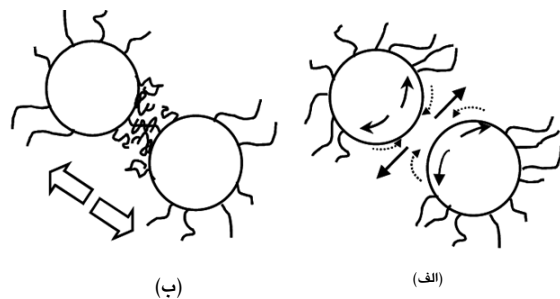
$$p = \eta_d / \eta_m \quad (3)$$

در معادلات (۲) و (۳)، Ca عدد کاپیلاری و p نسبت گرانیوی‌ها، η_d و η_m به ترتیب گرانیوی فاز پراکنده و ماتریس، d و $\dot{\gamma}$ قطر اولیه قطره و تنش بین سطحی^۲ و $\dot{\gamma}$ نرخ کرنش از طرف میدان می باشد. همچنین تغییر شکل قطره نیز با کمیت بی بعد D تعریف می شود، به طوری که $D = (L-B) / (L+B)$ است. در این تعریف L و B به ترتیب بیانگر قطر بزرگ و کوچک قطره بیضی شکل می باشند. واضح است هر عاملی که باعث افزایش پارامتر D شود، شکست قطره را محتمل تر می نماید. تیلور مقدار بحرانی برای پارامتر D را مقدار 0.5 بدست آورد که در مقادیر بیشتر از 0.5 شکست قطره رخ می دهد. تیلور رابطه بین D و عدد کاپیلاری را طبق معادله (۴) تعریف کرد. همچنین کاکس در سال ۱۹۶۹ رابطه بین D و عدد کاپیلاری را در میدان‌های برشی طبق معادله (۵) معرفی کرد.

$$D = \left[\frac{19p+16}{16p+16} \right] Ca \quad (4)$$

$$D = \frac{5(19p+16)}{4(p+1)\sqrt{(19p)^2 + \left(\frac{20}{Ca}\right)^2}} \quad (5)$$

برای عدد کاپیلاری نیز یک مقدار بحرانی وجود دارد. در این مقدار سرعت برش کمترین مقدار خود را برای شکست^۳ قطره داراست، بطوریکه از این مقدار به بعد قطره نمی تواند در برابر سرعت برشی (یا کشش) مقاومت کند و می شکند. این مقدار بحرانی عدد کاپیلاری شدیدا به نسبت گرانیوی‌های فازها وابسته است. شکل (۲) این ارتباط را در یک میدان برشی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در نواحی بالای منحنی، شکست قطره اتفاق می افتد و کمترین مقدار عدد کاپیلاری که محتمل ترین حالت شکست قطره می باشد در نسبت گرانیوی‌های برابر با ۱ حاصل شده



شکل ۱- مکانیزم سازگاری توسط همبسیارهای دسته‌ای:
(الف) مکانیزم ۱ و (ب) مکانیزم ۲ [۱۱]

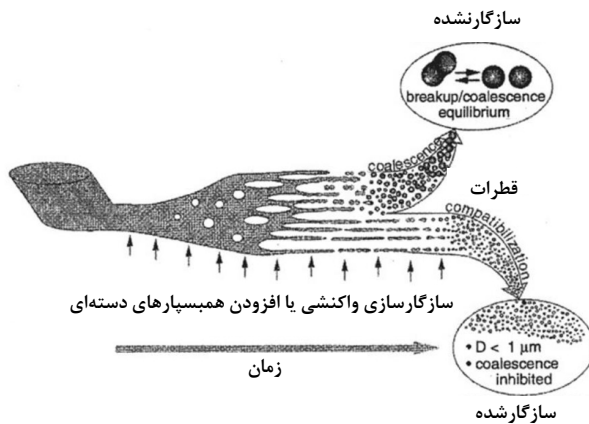
۲-۲ تئوری بهبود ریخت‌شناسی در مایعات نیوتونی امتزاج ناپذیر

تشکیل یا شکسته شدن قطرات یک سیال در سیال دیگر از موضوعات پراهمیت در تعیین ریخت‌شناسی آمیزه‌های بسپاری غیرقابل امتزاج به حساب می آید. تعداد قطرات، اندازه و شکل آنها از پارامترهای تعیین کننده در رفتار بین سطحی و خواص نهایی آمیزه‌های بسپاری به شمار می رود. از نخستین کارهای انجام گرفته در این حوزه می توان به مطالعات تیلور [۱۴] در سال‌های ۱۹۳۲ و ۱۹۳۴ اشاره کرد. وقتی یک جریان برشی پایا و یکنواخت به سیستم قطره گرانیوی در ماتریس گرانیوی اعمال می شود، شکل ذرات از حالت کروی به بیضی تغییر می کند. تنش اعمالی به ماتریس با کشش بین سطحی در رقابت قرار می گیرد و باعث تشکیل این حالت بیضوی می شود. تیلور تغییر شکل قطره را حاصل رقابت بین دو نیروی تنشی

2. Interfacial Tension
3. Break-Up

1. Reactive

نتیجتاً سبب شکل‌گیری قطرات درشت‌تری درون آمیزه می‌شود. بنابراین برای سیستم‌های سازگار نشده رقابتی بین شکست قطرات و پدیده ائتلاف ذرات شکل می‌گیرد. از سوی دیگر در سیستم سازگار شده به دلیل توقف پدیده ائتلاف (با توجه به مکانیزم مطرح‌شده در شکل (۱))، ذرات ریزتر باقی می‌مانند. همان‌طور که در شکل (۳) هم دیده می‌شود قطر ذرات در حالت سازگار شده به کمتر از ۱ میکرون هم می‌رسد.



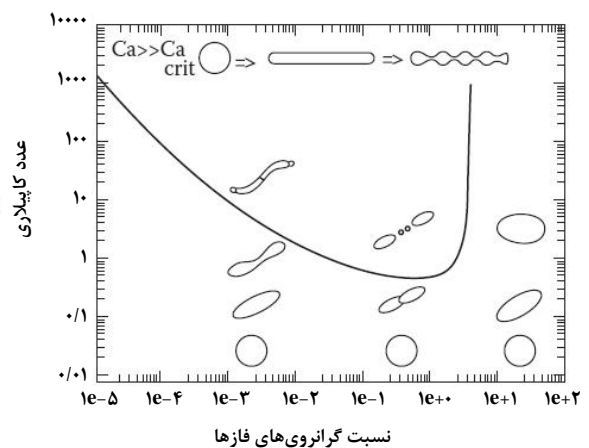
شکل ۳- طرح اجمالی پیشرفت ریخت‌شناسی در طول اختلاط مذاب برای یک آمیزه امتزاج‌ناپذیر بسیاری [۱۵]

محاسبات عددی نشان می‌دهد که وقتی مقدار فاز پراکنده در یک آمیزه بسیاری بین ۰ تا ۳۰٪ باشد، مقدار بحرانی عدد کاپیلاری تا ۲۰٪ کاهش پیدا می‌کند [۷]. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است و از معادلات (۴) و (۵) نتیجه می‌شود بهترین حالت برای شکست قطرات در نسبت گرانروی فازها برابر با یک حاصل می‌شود [۱۶]. همچنین هرچه قدر گرانروی فاز ماتریس بیشتر باشد انتقال تنش از روتور دستگاه به فاز پراکنده بیشتر می‌شود و شکست قطرات راحت‌تر اتفاق می‌افتد. از پارامترهای تأثیرگذار بر روی ریخت‌شناسی آمیزه‌های بسیاری تنش بین‌سطحی دو فاز می‌باشد. به این ترتیب که هر اندازه این تنش بین‌سطحی بیشتر باشد تمایل به شکست قطره کمتر و اندازه ذرات درشت‌تر است.

۲-۳ مدل‌های پیشرفت ریخت‌شناسی در آمیزه‌های بسیاری امتزاج‌ناپذیر

همان‌طور که ذکر شد نظریه تیلور مربوط به قطره گرانرو در ماتریس

است. از سوی دیگر، همان‌گونه که در شکل (۲) نمایان است چنانچه نسبت گرانروی فازها از مقدار ۳ یا ۴ بیشتر شود شکست قطره در میدان برشی غیرممکن می‌شود. یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند شکست قطره نوع میدان جریان می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در میدان‌های کششی، شکست قطرات تقریباً به نسبت گرانروی‌ها مربوط نیست و پدیده شکست در هر نسبت گرانروی می‌تواند حاصل شود. از آنجایی که که گرانروی کششی بیشتر از گرانروی برشی می‌باشد (تقریباً ۳ برابر)، احتمال شکست قطرات در میدان‌های کششی بسیار بیشتر از میدان‌های برشی است.



شکل ۲- ارتباط بین عدد کاپیلاری و نسبت گرانروی‌ها در میدان برشی [۱۵]

شکل (۳) بهبود ریخت‌شناسی در طول اختلاط مذاب برای یک آمیزه امتزاج‌ناپذیر بسیاری را نشان می‌دهد. در طول فرایند اختلاط مذاب در یک مخلوط‌کن بعد از نرم شدن فاز پراکنده این فاز به صورت فیلم‌های کشیده شده در می‌آید. با پیشرفت زمان، ابتدا حفره‌هایی درون این فیلم‌ها شکل می‌گیرد و سپس فاز پراکنده به شکل لیف‌ها و نهایتاً بصورت قطرات درون فاز ماتریس، پراکنده می‌شوند. پس از این مرحله دو پدیده شکست و ائتلاف قطرات درون آمیزه امتزاج‌ناپذیر در رقابت با یکدیگر قرار می‌گیرند. در شرایطی که غلظت فاز پراکنده کمتر از ۱٪ باشد احتمال برخورد قطرات و وقوع پدیده ائتلاف کم شده و اندازه قطرات فاز پراکنده درون ماتریس کاهش می‌یابد. اما در شرایطی که ترکیب درصد فاز پراکنده بیشتر از ۱٪ باشد برخورد قطرات و وقوع پدیده ائتلاف درون آمیزه افزایش پیدا کرده و بصورت یک پدیده رقابتی با شکست قطرات درمی‌آید و

ترکیب درصد وارونگی فازی، اوترکی [۱۸] معادله (۷) را ارائه کرد:

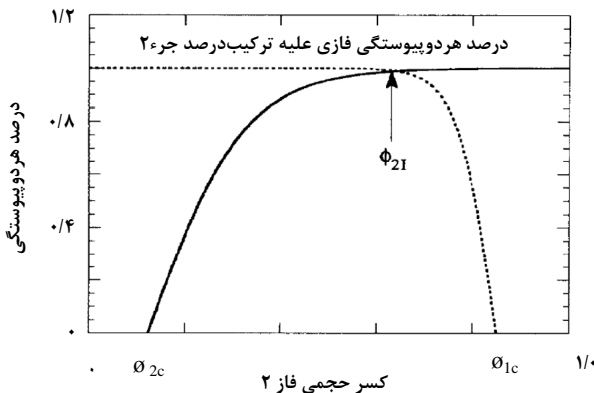
$$\theta_{11} / \theta_{21} = \eta_1 / \eta_2 = p; \quad \text{or } \theta_{21} = 1 / (1+p) \quad (۷)$$

$$d = 1 / (1 + p.F(p))$$

در این معادله θ_1 ترکیب درصد وارونگی فازی برای هر فاز، η گرانیوزی فازها و p نسبت گرانیوزی فاز پراکنده به ماتریس می‌باشد. در این معادله مشخص است که وقتی نسبت گرانیوزی فازها برابر با یک باشد، ترکیب درصد وارونگی فازی برای هر فاز برابر با ۰/۵ به دست می‌آید. به عبارت دیگر در حالت p برابر با یک، ریخت‌شناسی به هم پیوسته در ترکیب درصد ۵۰/۵۰ حاصل می‌شود. در معادله (۷) تابعی تحت عنوان $F(p)$ به چشم می‌خورد که توسط معادله تجربی (۸) بیان می‌شود:

$$F(p) = 1 + 2.25 \log p + 1.81 (\log p)^2 \quad (۸)$$

نمودار درصد ساختار به هم پیوسته تحت تابعی از ترکیب درصد فازها برای سیستم (پلی اتیلن با چگالی بالا/ پلی استایرن) در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل θ_c معرف ترکیب درصدی است که فازها شروع به ایجاد ساختار به هم پیوسته می‌کنند. همان طور که مشاهده می‌شود بیشینه مقدار ریخت‌شناسی به هم پیوسته در نقطه وارونگی فازی اتفاق می‌افتد.



شکل ۴- درصد ساختار به هم پیوسته علیه ترکیب درصد فاز پراکنده برای سیستم (HDPE/PS) [۱۷]

گرانرو می‌باشد. در سال ۱۹۸۷ وو^۱ [۱۷] مطالعات تیلور را گسترش داد و معادله جدیدی برای تخمین اندازه ذرات فاز پراکنده در ماتریس بسپاری ارائه داد. او در مطالعات خود از پلی‌آمید ۶۶ و پلی (اتیلن ترفتالات) به عنوان ماتریس و ۴ نوع لاستیک اتیلن پروپیلن با وزن مولکولی‌های متفاوت (گرانروی‌های مختلف)، به عنوان فاز پراکنده استفاده کرد. نتیجه تحقیق این دانشمند در معادله (۶) آورده شده است، به طوری که می‌توان از این معادله برای تخمین اندازه ذرات فاز پراکنده بسپاری در ماتریس بسپاری استفاده کرد.

$$d = \frac{\gamma}{\eta \gamma^0} \left(\frac{\eta'}{\eta} \right)^{0.84} \quad \text{for } \eta < \eta'$$

$$d = \frac{\gamma}{\eta \gamma^0} \left(\frac{\eta'}{\eta} \right)^{-0.84} \quad \text{for } \eta > \eta'$$

در این معادله d قطر ذرات فاز پراکنده، γ تنش بین سطحی، η' نرخ کرنش برشی، η گرانیوزی فاز ماتریس و η' گرانیوزی فاز پراکنده می‌باشد. در این معادله کمترین مقدار اندازه ذرات فاز پراکنده هنگامی حاصل می‌شود که نسبت گرانیوزی فاز پراکنده به ماتریس برابر با یک باشد. همان گونه که در معادله (۶) مشخص است کاهش تنش بین سطحی، افزایش نرخ کرنش برشی و افزایش گرانیوزی فاز ماتریس سبب کوچک شدن اندازه قطرات فاز پراکنده و ساختار یکنواخت‌تر می‌گردد.

در آمیزه‌های بسپاری با افزودن فاز پراکنده به فاز ماتریس ابتدا ریزساختار (قطره- ماتریس) شکل می‌گیرد، اما رفته رفته با افزایش درصد فاز پراکنده، سیستم به سمت ساختار به هم پیوسته می‌رسد تا جایی که در ترکیب درصد خاصی (θ_i) پدیده وارونگی فازی اتفاق می‌افتد و هر دو فاز هم حالت ماتریس و هم حالت پراکنده را پیدا می‌کنند. در بسیاری از موارد آمیزه‌های بسپاری با این ساختار، ویژگی‌های منحصر به فردی از خود بروز می‌دهند، اما با توجه به این نکته که ساختار به هم پیوسته به شدت ناپایدار می‌باشد، در مواردی که تمایل به ایجاد این ساختار در آمیزه بسپاری امتزاج‌ناپذیر است باید برای آن آمیزه بسپاری ترکیب درصدی را که در آن، بیشینه حالت به هم پیوستگی برای دو فاز مشاهده می‌گردد پیش‌بینی کرد و ریخت‌شناسی آمیزه را در آن حالت پایدار کرد. برای پیش‌بینی

1. Wu
2. Phase Inversion

مقادیر تنسور فصل‌مشتک در جهت‌های x و y را بیان می‌کنند. همان‌گونه که در معادله (۹) مشخص است Q در ارتباط مستقیم با اختلاف تنش‌های نرمال نوع اول است. با فرض تشکیل ذرات بیضوی در طول جریان مقدار Q طبق معادله (۱۰) بازنویسی خواهد شد.

(۱۰)

$$Q = \frac{\text{سطح بیضی‌ها}}{\text{حجم بیضی‌ها}} = \frac{\phi \sum n_i (2\pi b_i^2 + \frac{2\pi a_i b_i}{\varepsilon_i} \arcsin \varepsilon_i)}{\sum n_i \frac{4\pi}{3} a_i b_i^2}$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{\left(\frac{a_i}{b_i}\right)^2 - 1}}{\frac{a_i}{b_i}}$$

در معادله (۱۰) n_i معرف تعداد بیضی‌های از نوع i در واحد حجم، a_i قطر بزرگ بیضی‌های نوع i و b_i قطر کوچک بیضی‌های از نوع i می‌باشد. برای ساده‌تر شدن کار، می‌توان بیضی‌ها را معادل کره‌هایی با سطح ویژه معادل در نظر گرفت و از کره‌هایی با قطر معادل d_{sv} (سطح به حجم) استفاده کرد.

$$Q = 6\phi / d_{sv} \quad (11)$$

اگر معادله (۱۱) را در معادله (۹) جایگذاری کنیم معادله جدیدی حاصل می‌شود که ارتباط بین جریان‌سنجی و ریخت‌شناسی در آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر را به‌خوبی نشان می‌دهد.

$$d_{sv} = \frac{12\mu}{\mu+1} \cdot \frac{\alpha\phi}{N_{1,excess}} \quad (12)$$

در معادله (۱۲) مشخص است که افزایش اختلاف تنش‌های نرمال نوع اول که بیانگر افزایش ماهیت ویسکوالاستیک آمیزه بسیاری می‌باشد، سبب ریزتر شدن اندازه قطرات فاز پراکنده و ریخت‌شناسی یکنواخت‌تر می‌گردد. شکل (۵) ارتباط بین نسبت گرانروی فازها و d_{sv} (قطر معادل فاز پراکنده) برای سیستم (PDMS/PIB) با ۱۰٪ و ۳۰٪ وزنی از فاز پراکنده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین مقدار قطر معادل در نسبت گرانروی‌ها برابر ۱

به‌غیر از نسبت گرانروی‌ها، پارامترهای دیگری در رسیدن به نقطه وارونگی فازی نقش بازی می‌کنند. برای مثال هرچه تنش بین‌سطحی فازها بیشتر باشد ناحیه به‌هم‌پیوستگی باریک‌تر و هرچه گرانروی فاز ماتریس بیشتر باشد ناحیه ساختار به‌هم‌پیوسته پهن‌تر خواهد شد [۱۹].

۳- مدل‌های جریان‌سنجی آمیزه‌های بسیاری امتزاج‌ناپذیر

مبحث جریان‌سنجی آمیزه‌های بسیاری بحث بسیار مهمی است که به دو قسمت جریان‌سنجی خطی و جریان‌سنجی ناخطی تقسیم می‌شود. برای تعیین نواحی ویسکوالاستیک خطی و ناخطی آمیزه‌های بسیاری، یک روش بسیار متداول وجود دارد، به‌طوری که توسط دستگاه رئومتر نمودار مدول ذخیره بر حسب دامنه کرنش رسم می‌گردد، ناحیه پایای ابتدایی که معمولاً در دامنه کرنش‌های پایین اتفاق می‌افتد ناحیه ویسکوالاستیک خطی و ناحیه‌ای که نمودار شیب منفی پیدا می‌کند ناحیه ویسکوالاستیک ناخطی می‌باشد. معمولاً اکثر مطالعات جریان‌سنجی آمیزه‌های بسیاری در ناحیه ویسکوالاستیک خطی انجام می‌گیرد. پالین نشان داد که رفتار ویسکوالاستیک خطی آمیزه‌های بسیاری به رفتار ویسکوالاستیک خطی هر فاز، توزیع اندازه ذرات فاز پراکنده و تنش بین سطحی فازها ربط پیدا خواهد کرد. معمولاً اندازه‌گیری‌های مدول ذخیره و اختلاف تنش‌های نرمال دیدگاه خوبی را در بررسی ریخت‌شناسی آمیزه‌های بسیاری ایجاد می‌کنند. بهینه‌کردن ساختار نهایی یک آمیزه بسیاری غیرقابل‌امتزاج به‌شدت به ارتباط بین جریان‌سنجی و ریخت‌شناسی این آمیزه برمی‌گردد. دویی^۱ و اوها^۲ [۲۰] مدلی را برای پیش‌بینی ارتباط بین جریان‌سنجی و ریخت‌شناسی زوج‌های بسیاری طبق معادله (۹) بیان کردند:

$$N_{1,excess} = -\alpha(q_{11}-q_{22}) = (2\alpha\mu/\mu+1).Q \quad (9)$$

در معادله بالا q_{ij} اجزای تنسور فصل‌مشتک (q) ، Q مساحت بین‌سطحی در واحد حجم آمیزه، α تنش بین سطحی و μ پارامتر شکلی^۳ (وابسته به ترکیب درصد اجزا) می‌باشد. مقادیر q_{11} و q_{22}

1. Doi
2. Ohta
3. Phenomenological

حاصل شده است که نشان از ایجاد ذرات ریز و ریخت‌شناسی بهینه در این نسبت می‌باشد.

است. پیش‌بینی این مدل برای تعیین مدول کمپلکس آمیزه‌های بسپاری طبق معادله (۱۴) به صورت زیر است:

$$G^* = G_m^*[1+3\theta H] / [1-2\theta H] \quad (14)$$

$$\left(\frac{4}{R'}\right)(2G^*m + 5G^*d) + (G^*d - G^*m)(16G^*m + 19G^*d) \\ \left(\frac{40}{R'}\right)(G^*m + G^*d) + (2G^*d - 3G^*m)(16G^*m + 19G^*d)$$

$$G_i^* = G_i^*(\omega); R_i' = R_i'/\gamma_{12}$$

در معادله (۱۴)، γ_{12} ضریب تنش بین سطحی، R شعاع قطرات، $G_i^*(\omega)$ مدول کمپلکس و اندیس‌های m و n به ترتیب مربوط به فاز ماتریس و فاز پراکنده می‌باشند. مدل اولدروید در سال ۱۹۹۰ توسط پالیرن [۲۲] بسط داده شد و یک مدل تجربی دیگر بیان گردید. در مدل اولدروید قطرات یک مایع نیوتونی در مایع دیگر در نظر گرفته می‌شوند، اما مدل پالیرن قطرات یک مایع ویسکوالاستیک را در یک مایع ویسکوالاستیک دیگر در نظر می‌گیرد [۵]. در مدل پالیرن (معادله (۱۵)) فرض بر این است که قطرات به صورت کروی بوده و تحت تغییرشکل‌های کوچک قرار می‌گیرند.

$$G^* = G_m^*[1+3\sum\theta_i H_i] / [1-2\sum\theta_i H_i] \quad (15)$$

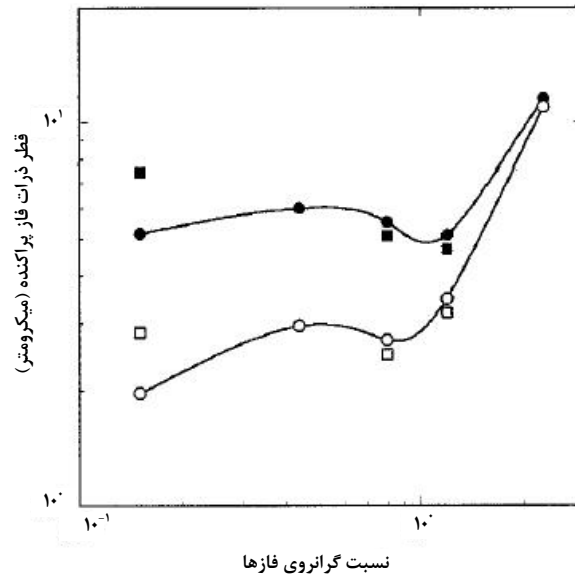
$$\left(\frac{4}{R_i'}\right)(2G^*m + 5G^*d) + (G^*d - G^*m)(16G^*m + 19G^*d) \\ \left(\frac{40}{R_i'}\right)(G^*m + G^*d) + (2G^*d - 3G^*m)(16G^*m + 19G^*d)$$

$$G_i^* = G_i^*(\omega); R_i' = R_i'/\gamma_{12}$$

در این معادله نیز θ_i و R_i به ترتیب کسر حجمی و شعاع قطرات فاز پراکنده می‌باشند و همانند مدل اولدروید در کرنش‌های پایین معتبر است. در مدل پالیرن وقتی H به سمت $0/5$ می‌رود ($H=1/2$) این مدل تقریباً شبیه به مدل اینشتین می‌شود که در آن سوسپانسیون رقیق از ذرات کروی در نظر گرفته شده است (معادله (۱۶)) [۲۳].

$$(16)$$

$$G_{susp}^* = G_m^*[1+3\theta H] / [1-2\theta H] \approx G_m^*(1+2/5\theta), H=1/2$$



شکل ۵- ارتباط بین نسبت گرانروی فازها و d_{sv} (قطر معادل فاز پراکنده) برای سیستم (PDMS/PIB) با ۱۰٪ (دایره‌های توخالی) و ۳۰٪ وزنی (دایره‌های توپر) از فاز پراکنده، مربع‌ها مربوط به حالتی است که تنش بین‌سطحی در کمترین مقدار خود باشد [۲۱]

از جمله مدل‌های دیگری که ارتباط بین جریان‌سنجی و ریخت‌شناسی در آمیزه‌های بسپاری را نشان می‌دهند، مدل‌های امولسیون هستند. مدل‌های امولسیونی برای آمیزه‌هایی کاربرد دارند که در آنها گرانروی دو فاز تقریباً با هم برابرند. تیلور [۱۳] در سال‌های ۱۹۳۲ و ۱۹۳۴ معادله (۱۳) را برای پیش‌بینی گرانروی نسبی (η_r) و گرانروی ویژه ($[\eta]_e$) امولسیون‌ها ارائه کرد. در این مدل، p نسبت گرانروی فاز پراکنده به گرانروی ماتریس می‌باشد.

$$\eta_r = 1 + (5/2)\sigma[p+2.5]/[p+1] \quad (13)$$

$$[\eta]_e = (5/2)[p+2.5]/[p+1]$$

در سال‌های ۱۹۵۳ و ۱۹۵۵ اولدروید^۱ یک مدل تجربی برای مدول کمپلکس آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر بسپاری ارائه کرد که برای تغییرشکل‌های پایین و کسر حجمی‌های کم از فاز پراکنده معتبر

1. Oldroyd

$$G_{coran}^* = f.G_{par}^* + (1-f).G_{ser}^* \quad (19)$$

$$G_{ser}^* = [(\phi_1/G_{1}^*) + (\phi_2/G_{2}^*)]^{-1}$$

$$G_{par}^* = \phi_1.G_{1}^* + \phi_2.G_{2}^*$$

در این معادله زیروندهای ۱ و ۲ معرف فازهای اول و دوم بوده و فاکتور f درجه کاربردی مدل موازی را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده میزان پیوستگی فاز با مدول بیشتر در سیستم است. همچنین زیروندهای par و ser به ترتیب مربوط به مدل‌های سری و موازی هستند. به عبارت دیگر اگر ساختار به هم پیوسته در آمیزه تشکیل شود، این ضریب برابر ۱ می‌شود و مدول ماده برابر مدول مدل موازی می‌گردد [۲۹ و ۲۸].

۴- ارتباط بین جریان‌سنجی و ریخت‌شناسی در نانوکامپوزیت آمیزه‌های بسیاری

در سال‌های اخیر دسته جدیدی از مواد غیرآلی تحت عنوان نانومواد در حوزه آمیزه‌های بسیاری به کار برده شدند که به دلیل وجود گروه‌های عاملی روی آنها، نقش سازگاری را بین زوج بسپارهای غیرقابل امتزاج ایفا می‌کنند. نانوسیلیکا، نانولوله‌های کربنی، گرافن، نانوگرافیت و دیگر نانومواد از مهمترین این مواد به شمار می‌آیند. دانشمندان زیادی روی تأثیر این نانومواد بر ریخت‌شناسی و جریان‌سنجی آمیزه‌های بسیاری تحقیق و مطالعه به عمل آورده‌اند برای مثال ژانگ^۴ و همکارانش [۳۰] نشان دادند که افزودن نانوسیلیکا به آمیزه (پلی‌پروپیلن/پلی‌استایرن) سبب بهبود چسبندگی دو فاز می‌شود. وانگ^۵ و همکارانش [۳۱] نیز در مورد آمیزه (PTT/EPDM) نشان دادند که استفاده از نانو خاک‌کرس اصلاح‌شده سبب ریزتر شدن اندازه قطرات فاز پراکنده و ریخت‌شناسی یکنواخت‌تر در این آمیزه می‌گردد، حاجی‌بابا و همکارانش [۱۶] نیز تأثیر مشابهی از نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با گروه کربوکسیلیک اسید بر روی ریخت‌شناسی آمیزه (آکریلونیتریل بوتادین/پلی‌وینیل کلراید) مشاهده کردند. عامل مهمی که روی ریخت‌شناسی و جریان‌سنجی نانوکامپوزیت‌های بسیاری تأثیر می‌گذارد محل قرارگیری این نانومواد در آمیزه بسیاری است. در صورتی که این مواد در فصل مشترک دو فاز قرار گیرند، می‌توانند نقش سازگارکننده را بازی کرده و سبب ایجاد

نازک‌دست و همکارانش [۲۴] نشان دادند که مدل پالیرن پیش‌بینی جریان‌سنجی خوبی برای آمیزه (EPDM/PP) مخصوصاً در فرکانس‌های بالا دارد. آنها همچنین نشان دادند که رفتار جریان‌سنجی ترموپلاستیک الاستومرهای دینامیکی پخت شده مطابقت خوبی با مدل جارزبسکی^۱ [۲۵] دارد. این مدل در معادله (۱۷) نشان داده شده است.

$$\eta_{susp} = \frac{\tau_y}{\gamma^0} + \frac{9}{8}k \left(\frac{\phi/\phi_m}{1 - (\phi/\phi_m)^{1/3}} \right)^{n, \phi_m-1} \quad (17)$$

در این معادله θ جزء حجمی فاز پراکنده و θ_m ماکزیمم جزء پرشوندگی^۲ است که تقریباً برابر با ۰/۶۴ تخمین زده می‌شود [۲۶]. همچنین τ_y تنش تسلیم و n و k پارامترهای جریان‌سنجی ماتریس هستند. از آنجاییکه مدل پالیرن برای امولسیون‌های رقیق کاربرد دارد، در نتیجه در مورد ترموپلاستیک الاستومرهای پخت شده به روش دینامیکی چندان پیش‌بینی درستی نخواهد داشت و مدل جارزبسکی پیش‌بینی دقیق‌تری در رابطه با این دسته از مواد خواهد داشت. در سال ۲۰۰۵ نازک‌دست و همکارانش یک معادله تجربی برای سوسپانسیون‌های بسیاری و ترموپلاستیک‌الاستومرهای پخت شده به روش دینامیکی ارائه دادند که در معادله (۱۸) مشخص است. در این معادله a_1 و a_2 پارامترهای ثابتی هستند که توسط اعمال و خوراندن^۳ معادله به دست می‌آیند.

(18)

$$G^*_{susp} = a_1 \left(\frac{\phi}{\phi_m} \right) + a_2 \left(\frac{\phi}{\phi_m} \right)^2 + G^*_{m} \frac{1+3\phi H}{1-2\phi H}, \quad H = 1/2$$

یکی دیگر از مدل‌های میکرومکانیکی موجود مدل معروف کوران است [۲۷] که بر پایه قانون مخلوط‌ها بنا شده است. این مدل، مدول دینامیکی امولسیون‌ها را ترکیبی از مدل‌های موازی و سری می‌داند. از این روش به منظور توصیف ارتباط بین رفتار ویسکوالاستیک خطی و ریخت‌شناسی استفاده می‌شود [۲۸]. معادله (۱۹) این مدل را بهتر نشان می‌دهد.

1. Jarzebski
2. Packing
3. Fitting

4. Zhang
5. Wang

ریخت‌شناسی بهینه و خواص مطلوب گردند. در معادله (۲۰) پارامتری تعریف می‌شود که محل قرارگیری نانومواد در آمیزه‌های بسپاری غیرقابل امتزاج را به خوبی پیش‌بینی می‌کند.

$$W = \frac{\gamma_{1,N} - \gamma_{2,N}}{\gamma_{1,2}} \quad (20)$$

در معادله بالا $\gamma_{1,N}$ و $\gamma_{2,N}$ به ترتیب تنش بین‌سطحی بسپار ۱ با نانومواد و بسپار ۲ با نانومواد است. همچنین $\gamma_{1,2}$ تنش بین‌سطحی بسپار ۱ و ۲ می‌باشد. در معادله (۲۰) اگر پارامتر W بیشتر از ۱ باشد نانومواد در بسپار ۲ قرار می‌گیرند، اگر کمتر از ۱- باشد در جزء ۱ قرار می‌گیرند و اگر بین ۱ و ۱- باشد در فصل مشترک دو فاز قرار می‌گیرند. برای مثال وانگ و همکارانش [۳۱] در سیستم (پلی پروپیلن/پلی استایرن) توسط معادله (۲۰) پیش‌بینی کردند که نانو سیلیکات‌های آب‌دوست تمایل به قرارگیری در فاز پلی‌استایرن را داشته و نانو سیلیکای آب‌گریز در فصل مشترک و فاز پلی پروپیلن قرار می‌گیرد. آنها این پیش‌بینی را با تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مقایسه کردند و صحت رابطه فوق را به خوبی نشان دادند. خنکدار و همکارانش [۳۲] نشان دادند که نانو خاک‌رس نوع Cloisite 30B در آمیزه (پلی پروپیلن/پلی (تری متیلن ترفتالات)) با قرارگیری در فصل مشترک دو فاز، نقش سازگارکننده را ایفا می‌کند و سبب ریزش قطرات فاز پراکنده و ریخت‌شناسی بهتر می‌گردد. آنها همچنین با تحقیق بر روی تأثیر نانو خاک‌رس روی رفتار جریان سنجی آمیزه (پلی پروپیلن/پلی (تری متیلن ترفتالات)) نشان دادند که افزودن نانو خاک‌رس سبب بهبود مدول ذخیره و افزایش سفتی و مقاومت آلیاژ بسپاری می‌گردد. این رفتار که توسط دانشمندان دیگری در آمیزه‌های بسپاری مختلف مشاهده شده است [۳۳] ناشی از ایجاد شبکه‌های فیزیکی درون مولکولی توسط نانو خاک‌رس اصلاح شده می‌باشد. تشکیل این شبکه فیزیکی مستقیماً به ساختار جایگذاری شده^۱ و ورقه‌ورقه‌شده^۲ نانو سیلیکات‌های اصلاح شده برمی‌گردد. از جمله تأثیرات دیگر این نانومواد، به خصوص نانو سیلیکات‌های اصلاح شده بر روی ریخت‌شناسی آمیزه‌های بسپاری می‌توان به نکات دیگری نیز اشاره

کرد از جمله این که افزودن نانوفیلرها سبب افزایش گرانشی آلیاژ بسپاری شده و به افزایش عدد کاپیلاری و ایجاد ریخت‌شناسی یکنواخت‌تر کمک شایانی می‌کنند. همچنین وجود این نانو ذرات باعث می‌شوند که ناحیه برخورد مدول ذخیره و مدول اتلاف به فرکانس‌های پایین‌تری شیف‌ت پیدا کند که نشان از افزایش زمان آسودگی آمیزه بسپاری می‌باشد [۳۳]. در آخر نیز باید گفت که اضافه کردن نانو ذرات به آمیزه‌های بسپاری باعث کاهش شدت پیک اتلاف در آنالیز (دینامیکی - مکانیکی) می‌شود که ناشی از ایجاد برهم‌کنش‌های قوی بین این نانومواد و ماتریس بسپار یا بین دو فاز بسپار در حضور این نانوفیلرها می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

به دلیل اهمیت ارتباط بین جریان سنجی و ریخت‌شناسی در تعیین خواص نهایی آمیزه‌های بسپاری، در این تحقیق به بررسی عوامل تأثیرگذار بر روی ساختار نهایی آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر بسپاری و معرفی مدل‌های معروف (جریان سنجی - ریخت‌شناسی) پرداخته شد. تحقیقات انجام گرفته در زمینه ریخت‌شناسی آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر بسپاری نشان دادند که افزایش گرانشی فاز ماتریس، افزایش شدت برش و کاهش تنش بین سطحی دو بسپار سبب ریزش قطرات فاز پراکنده و ایجاد ریخت‌شناسی بهینه می‌گردد. مطالعات محققین نشان داد که استفاده از سازگارکننده‌ها و نانومواد اصلاح‌شده در آلیاژهای امتزاج‌ناپذیر بسپاری سبب کاهش تنش بین سطحی و تشکیل ریخت‌شناسی یکنواخت‌تر می‌گردد. همچنین نانو ذرات مانند نانو سیلیکات‌ها و نانولوله‌های کربنی از طریق ارتقای گرانشی سیستم و افزایش ماهیت ویسکوالاستیک آمیزه‌های بسپاری سبب ایجاد قطرات ریزتر فاز پراکنده می‌شوند. از مباحث مهم دیگر در تعیین ریخت‌شناسی زوج‌های بسپاری نسبت گرانشی فازها و نوع میدان جریان است. در این قسمت محققین نشان دادند که بهترین حالت برای شکست ذرات فاز پراکنده در میدان‌های برشی در نسبت گرانشی فازها نزدیک به ۱ حاصل می‌شود. همچنین مشخص شد که شکست قطرات در میدان‌های کششی راحت‌تر از میدان‌های برشی اتفاق می‌افتد و در میدان‌های کششی چندان به نسبت گرانشی فازها مرتبط نمی‌باشد. پژوهشگران برای ارتباط بین جریان سنجی و ریخت‌شناسی در آمیزه‌های امتزاج‌ناپذیر بسپاری از

1. Intercalated
2. Exfoliated

- blends”, *Curr. Opinion in Coll. & Interf. Sci.*, 6, 457-463, (2001).
- [10] Sundararaj, U., Macosko, C. W., “Drop breakup and coalescence in polymer blends – the effects of concentration and compatibilization”, *Macromolecules*, 28, 2647-2657, (1995).
- [11] Van Puyvelde, P., Velankar, S., Moldenaers, P., “Effect of Marangoni stresses on the deformation and coalescence in compatibilised immiscible polymer blends”, *Polym. Eng. Sci.*, 42, 1956–1964, (2002).
- [12] Jeon, H. K., Macosko, C. W., “Visualization of block copolymer distribution on a sheared drop”, *Polymer*, 44, 5381-5386, (2003).
- [13] Shokri, A., Bakhshandeh, G. R., Darestani Farahani, T., “An Investigation of Mechanical and Rheological Properties of NBR/PVC Blends: Influence of Anhydride Additives, Mixing Procedure and NBR Form”, *Iranian Polymer Journal*, 15, 227-237, (2006).
- [14] Taylor, G. I., “The viscosity of a fluid containing small of another fluid”, *Proc. R. Soc.*, 138, 41-48, (1932).
- [15] Grace, H. P., “Dispersion in high viscosity immiscible fluid system and application of static mixers as dispersion devices in such systems”, *Chem. Eng. Commun.*, 14, 225-277, (1982).
- [16] Hajibaba, A., Naderi, G., Ghoreishy, M. H. R., Bakhshandeh, G. R., Razavi-Nouri, M., “Effect of Single Walled Carbon nanotube on Morphology and Mechanical Properties of NBR/PVC blends”, *Iranian Polymer Journal*, 21, 505-511, (2012).
- [17] Wu, S. H., “Formation of dispersed phase in incompatible polymer blends: Interfacial and rheological effects”, *Polym. Eng. Sci.*, 27, 335- 343, (1987).
- [18] Utracki, L. A., “On the viscosity-concentration dependence of immiscible polymer blends”, *Jornal of Rheology*, 35, 1615- 1637, (1991).
- [19] Willemsse, R. C., Posthuma de Boer, A., Van Dam, J., Gotsis, A. D., “Co-continuous morphologies in polymer blends: the influence of the interfacial tension”, *Polymer*, 40, 827-834, (1999).
- [20] Doi, M., Ohta, T., “Dynamics and rheology of complex interfaces. I,” *J. Chem. Phys.* 95, 1242–1248, (1991).
- [21] Vinckier, I., Moldenaers, P., Mewis, J., “Relationship between rheology and morphology of model blends in steady shear flow”, *Journal of Rheology*, 40, 613-619, (1996).
- [22] Palieme, J. F., “Linear rheology of viscoelastic emulsions with interfacial tension”, *Rheol. Acta*, 29, 204-214, (1990).
- [23] Graebing, D., R. Muller, “Rheological behavior of polydimethylsiloxane / polyoxyethylene blends in the melt. Emulsion model of two viscoelastic liquids”, *J. Rheol.*, 34, 193, (1990).
- [24] Goharpey, F., Nazockdast, H., Katbab, A. A., “Relationship between the rheology and morphology of dynamically vulcanized thermoplastic elastomer based on EPDM/PP”, *Polymer Engineering and Science*, 45, 84-94, (2005).
- [25] Jarzebski, G. J., “On the effective viscosity of pseudoplastic suspensions”, *Rheol. Acta.*, 20, 280-287, (1981).
- [26] Nielsen, L. E., Landel, R. E., “Mechanical properties of polymers and composites”, 2nd ed, Marcel Dekker, New York, (1994).
- مدل‌های مختلفی چون (دویی- اوهتا)، پالیرن، جاززیسکی و کوران کمک گرفته‌اند. در مدل (دویی- اوهتا) نشان داده شد که افزایش اختلاف تنش‌های نرمال نوع اول در یک آمیزه بسیاری سبب کاهش اندازه ذرات فاز پراکنده می‌شود. همچنین به‌دلیل برتری پدیده انعقاد در ترکیب‌درصدهای بالا از فاز پراکنده، اندازه ذرات این فاز افزایش می‌یابد. در مدل پالیرن ارتباط بین مدول کمپلکس نمونه با پارامترهای ریخت‌شناسی مثل شعاع قطرات فاز پراکنده و تنش بین سطحی دو بسپار، توسط پارامتر H بیان می‌شود. این مدل معمولاً در ترکیب درصد‌های پایین از فاز پراکنده (امولسیون‌های رقیق) جواب قابل قبولی می‌دهد. از مدل‌های معروف دیگر که ارتباط بین گرانروی آمیزه بسیاری و ترکیب‌درصد فاز پراکنده را بیان می‌کند می‌توان به مدل جاززیسکی اشاره کرد. این مدل در مورد ترموپلاستیک الاستومرهای پخت‌شده به روش دینامیکی پیش‌بینی خوبی از خود نشان می‌دهد. مدل کوران نیز به‌دلیل ماهیت میکرومکانیکی، پاسخ مناسبی در دامنه وسیع‌تری از ترکیب درصد فاز پراکنده برای آمیزه‌های بسیاری مختلف دارد.

مراجع

- [1] George, J., Ramamurthy, K., Varughese, K. T., Thomas, S., “Melt Rheology and Morphology of Thermoplastic Elastomers from Polyethylene/Nitrile-Rubber Blends: The Effect of Blend Ratio, Reactive Compatibilization, and Dynamic Vulcanization”, *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 38, 1104–1122, (2000).
- [2] Brydson, J. A., “Flow Properties of Polymer Melts”, 2nd edition, George, Godwin: London, (1981).
- [3] White, J. L., “Elastomer Rheology and Processing”, *Rubber. Chem. Technol.*, 42, 257-338, (1969).
- [4] White, J. L., “Process ability of Rubber and Rheological Behavior”, *Rubber. Chem. Technol.*, 50, 163-185, (1977).
- [5] Utracki, L. A., “Polymer blends handbook”, Kluwer Academic Pub, 1442 pages, (2002).
- [6] Iza, M., Bousmina, M., “Nonlinear rheology of immiscible polymer blends: step strain experiments”, *J. Rheol.*, 44, 1363-1384, (2000).
- [7] Van Puyvelde, P. V., Moldenaers, P., “Rheology and Morphology Development in Immiscible Polymer Blends”, *Rheology Reviews*, 101- 145, (2005).
- [8] Gibbs, J. W., “A Method of Geometrical Representation of the Thermodynamic Properties of Substances by Means of Surfaces,” *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* 2, 382-404,(1873).
- [9] Van Puyvelde, P., Velankar, S., Moldenaers, P., “Rheology and morphology of compatibilized polymer

- [27] Coran A. Y., Patel R. J., "Predicting Elastic Moduli of Heterogeneous Polymer Compositions", J. Appl. Polym. Sci., 20, 3005- 3016, (1976).
- [28] Jafari, S. H., Khonakdar, H. A., Ehsani, M., Asadinezhad, A., "Assessment of Melt Rheological Behavior of PTT/PE and PTT/PA 12 Blends by Emulsion and Micromechanical Models" Iranian Journal of Polymer Science and Technology, 22, 399-407, (2009).
- [29] Jafari, S. H., Yavari, A., Asadinezhad, A., Khonakdar, H. A., Bohme, F., "Correlation of morphology and rheological response of interfacially modified PTT/m-LLDPE blends with varying extent of modification", Polymer, 46, 5082-5093, (2005).
- [30] Zhang, Q., Yang, H., Fu, Q., "Kinetics-controlled compatibilization of immiscible polypropylene/polystyrene blends using nano-SiO₂ particles", Polymer, 45, 1913- 1922, (2004).
- [31] Wang, K., Chen, Y., Zhang, Y., "Effects of organoclay platelets on morphology and mechanical properties in PTT/EPDM-g-MA/organoclay ternary nanocomposites", Polymer, 49, 3301-3309, (2008).
- [32] Khonakdar, H. A., Saen, P., Nodehi, A., Jafari, S. H., Asadinezhad, A., Wagenknecht, U., Heinrich, G., "On Rheology-Morphology Correlation of Polypropylene/Poly(trimethylene terephthalate) Blend Nanocomposites", Journal of Applied Polymer Science, 127, 1056-1060, (2013).
- [33] Nazockdast, E., Nazockdast, H., Goharpey, F., "Linear and nonlinear melt-state viscoelastic properties of Polypropylene/Organoclay nanocomposites", Polymer Engineering and Science, 1240-1249, (2008).