به مقیاس درآوردن اختلاط لاستیک با استفاده از روش مقدار کار به ازای واحد حجم

Scale Up Of Rubber Mixing Using Unit Work Method

قاسم نادری، میرحمیدرضا قریشی
تهران، پژوهشگاه پلیمر ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵
دریافت: ۷۸/۱۲/۲۲، پذیرش: ۷۹/۴/۱۱

چکیده

روش مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم به عنوان فن دستیابی به روش تعمیم نتایج و پارامترهای گرانروی مونی و پخش شدن دوده به عنوان معیارهای سنجش پیشرفت یا کیفیت اختلاط انتخاب شده اند. هدف اصلی این پژوهش نشان دادن قابلیتهای بالقوه وبالفعل روش کار انجام شده به ازای واحد حجم به منظور به مقیاس درآوردن نتایج بین سه نوع مخلوط کن ۶۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ mL است. بر این اساس و بر مبنای فرمولبندی مشخص عمل اختلاط در سه مخلوط کن یاد شده در شرایط مختلف انجام پذیرفت و نتایج حاصل شامل منحنی تغییرات کار انجام شده به ازای واحد حجم ،مونی گرانروی و درصد پخش دوده بر حسب زمان و دمای آمیزه بدست آمده‌اند.

واژه‌های کلیدی: به مقیاس درآوردن، اختلاط لاستیک، روش مقدار کار به ازای واحد حجم، گرانروی مونی، درصد پخش دوده
Key Words: scale up, rubber mixing, unit work method, mooney viscosity, carbon black dispersion

مقدمه

بدون شک فرایند اختلاط در مخلوط‌کنهای داخلی نقشی کلیدی در صنایع بزرگ لاستیک سازی بویژه کارخانه‌های تایرسازی دارد. چنین گفته می‌شود که بخش اعظم خواص فیزیکی، مکانیکی و رئولوژیکی آمیزه‌های لاستیکی در این مرحله معین می‌گردد. بنابراین، شناخت دقیق کمی و کیفی این فرایند به منظور دستیابی به محصولی با خواص بهینه و کاهش میزان انرژی مصرفی اهمیت بسزائی دارد. با وجود سابقه بیش از صد سال بکارگیری مخلوط‌کنها در صنایع لاستیک، بخش فراوانی از مباحث نظری این فرایند همچنان ناشناخته است و طراحی و راهبری این دستگاهها بر پایه اصول تجربی مبتنی بر مشاهدات صورت می‌گیرد. از آنجا که بکارگیری روشهای آزمون و خطا مستلزم صرف هزینه و وقت زیاد است، بنابراین دستیابی به روشی که از میزان این سعی و خطاها بکاهد موجب افزایش ارزش افزوده محصول نهایی و در نتیجه کاهش هزینه‌های تولید می‌گردد. یکی از روشهای مورد توجه متخصصان صنعت لاستیک در زمینه اختلاط کائوچو با مواد افزودنی بویژه دوده، به عنوان اصلی‌ترین پرکننده، دستیابی به دانش فنی چگونگی به مقیاس تولیدی درآوردن نتایج آزمایشگاهی حاصل از فرایند اختلاط در مخلوط‌کنهای داخلی آزمایشگاهی است.

هدف این طرح تحقیقاتی استفاده از روش مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم به منظور تعمیم نتایج آزمایشگاهی حاصل از فرایند اختلاط در مخلوط‌کنهای باظرفیت کم به مخلوط‌کنهای با ظرفیت زیاد است. با استفاده از این روش شرایط عملکرد اختلاط بویژه دما، دور، زمان ونحوه افزودن مواد برای یک آمیزه مشخص با استفاده از نتایج حاصل از انجام فرایند اختلاط در مخلوط‌کنهای آزمایشگاهی معین می‌شود. این امر موجب کاهش هزینه تولید آمیزه‌های لاستیکی ونیز بهینه

جدول ۱ - مشخصات دوده N-۳۳۹.

نوع دوده	ویژگیها	عدد یدی (mg/g) D۱۵۱۰	سطح مخصوص D۳۰۳۷ (m^2/g)	درصد خاکستر D۱۵۰۶	درصد اتلاف گرما D۱۵۰۹	چگالی (g/L) D۱۵۱۳	کاربردها
N-۳۳۹ (HAF-HS)	سایش زیاد ساختار بالا	۹۰±۵	۱۲۰±۵	۰/۷۵	۱	۳۴۵	در تردتایرها برای تقویت مدول، سختی و فرایندپذیری خوب

شدن خواص آمیزه‌های موجود می‌شود، به نوعی که با صرف حداقل زمان و انرژی می‌توان به محصولی با کیفیت مطلوب دست یافت. همچنین، حفظ یکنواختی خواص فیزیکی و رئولوژیکی آمیزه خام حاصل از عمل اختلاط بین دو بچ، یعنی حفظ یکنواختی بچ به بچ از دیگر اهدافی است که با استفاده از این روش حاصل می‌شود. روشهای گوناگونی برای به مقیاس درآوردن به محققان مختلف پیشنهاد و بکار گرفته شده است. اندازه‌گیری گرانروی مهمترین و کاربردی‌ترین این روشها، یعنی استفاده از میزان کار انجام شده به ازای واحد حجم آمیزه است. در این روش با استفاده از مخلوط کنهای آزمایشگاهی ۶۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ mL که مجهز به انتگرال‌گیر توان است، شرایط لازم برای دستیابی به آمیزه‌ای با خواص یکسان معین و سپس این نتایج برای مخلوط‌کنهای با ظرفیت بیشتر به مقیاس درآمده است.

در ادامه ابتدا مواد، تجهیزات مورد استفاده و آزمونهای انجام شده شرح داده می‌شود. سپس، مباحث نظری روش کار انجام شده به ازای واحد حجم به تفصیل بررسی و به دنبال آن نتایج حاصل از فرایند اختلاط در سه مخلوط کن داخلی ۶۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ mL ارائه می‌گردد. پس از آن چگونگی استفاده از فن مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم برای به مقیاس درآوردن نتایج بطور مشروح توضیح داده شده و سرانجام نتایج حاصل از این کار پژوهشی عرضه می‌شود.

تجربی

مواد

در این کار پژوهشی اختلاط آلیاژ دو نوع کائوچوی SBR با دوده به عنوان شاخصی از آمیزه‌های مورد استفاده در تردتایرهای رادیال سواری به کمک روش اندازه‌گیری کار انجام شده به ازای واحد حجم مورد مطالعه قرار گرفته است. مواد مصرفی عبارتند از:

SBR۱۷۱۲ با ۲۳/۵ درصد پیوندهای استیرن و ۳۷/۵ درصد روغن آروماتیک و ۱۵۰۲ SBR دارای ۲۳/۵ درصد پیوند استیرن و فاقد روغن آروماتیک محصول پتروشیمی اراک و دوده از نوع N-۳۳۹. مشخصات این مواد که مطابق با ASTM اندازه‌گیری شده، در جدولهای ۱ و ۲ ارائه شده است.

همان گونه که ملاحظه می‌شود، با توجه به اینکه اختلاط کائوچو با دوده مهمترین و مشکلترین مرحله در فرایند اختلاط بشمار می‌آید، عمل اختلاط این دو ماده مدنظر قرار گرفته است. بدیهی است که روش ارائه شده در این کار براحتی می‌تواند برای اختلاط سایر اجزای آمیزه‌کاری از قبیل روغن و اجزای دیگر نیز بکار برده شود.

دستگاهها

تجهیزات مورد استفاده عبارتند از: بنبوری آزمایشگاهی ۱۵۰۰ mL ساخت کارخانه فارل ومخلوط‌کن هکه مدل RC۹۰ ساخت کشور آمریکا با ظرفیتهای ۶۰ و ۳۰۰ mL. در این مخلوط‌کنها دما و سرعت چرخنده قابل کنترل بوده و نیروی وارد شده به آمیزه لاستیکی برای اختلاط به صورت گشتاور نسبت به زمان اندازه گرفته می‌شود. این دستگاهها می‌توانند سطح زیر منحنی گشتاور نسبت به زمان را انتگرال گرفته و انرژی مصرف شده را محاسبه و نسبت به زمان رسم کنند.

روشها

سنجش میزان اختلاط به وسیله آزمونهای مختلفی انجام می‌پذیرد که تمام این روشها به دو ویژگی عمده یک آمیزه لاستیکی اشاره دارند. این ویژگیها عبارتند از: فرایند پذیری و خواص فیزیکی آمیزه خام. از میان روشهای موجود، دو روش عمده اندازه‌گیری گرانروی مونی

جدول ۲ - مشخصات دو نوع SBR.

SBR	درصد پیوند استیرن D۱۴۱۶	درصد اسیدهای آلی D۱۴۷۶	درصد خاکستر D۱۴۷۶	درصد مواد فرار D۱۴۱۶	گرانروی مونی D۱۶۴۶	درصد روغن D۱۴۷۶
۱۵۰۲	۲۳/۵	۶	۱/۵	۰/۷۵	۵۰	-
۱۷۱۲	۲۳/۵	۵	۱/۵	۰/۷۵	۴۸	۳۷/۵

مطابق با استاندارد ASTM D ۱۹۴۶ و درصد پخش دوده مطابق با استاندارد ASTM D ۲۶۶۳ در این کار تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفتند.

روش کار انجام شده در واحد حجم به عنوان یکی از بهترین روشها در زمینه به مقیاس درآوردن نتایج شناخته شده است. این روش نخستین بار در سال ۱۹۷۵ توسط ترتسکی، ون بوسکرک و گانبرگ [۶] ارائه شد. در این روش نشان داده شده است که مقدار کار یا انرژی به ازای واحد حجم مورد نیاز برای مخلوط شدن یک آمیزه مستقل از سرعت و ظرفیت مخلوط کن است، به شرط آنکه نسبت نرخ زمان-دما یکسان باشد، یعنی یک روش گرمایی اتخاذ گردد. همچنین، روش بارگذاری و ضریب پر شدگی (fill factor,ff) نیز باید یکسان باشند. براین اساس می‌توان بین نتایج حاصل از مخلوط کن آزمایشگاهی و مخلوط کن تولیدی ارتباطی منطقی برای به مقیاس درآوردن نتایج برقرار کرد. زمانی که آمیزه‌ای لاستیکی در یک مخلوط کن داخلی تحت عمل اختلاط قرار می‌گیرد، فرایندهای پیچیده‌ای روی آن رخ می‌دهد که از جمله آنها می توان به برش، پارگی، انتقال مواد از یک ناحیه به ناحیه دیگر، فشرده شدن و کشیدگی اشاره کرد. روش کار به ازای واحد حجم بر پایه دو فرض اساسی زیر قرار دارد:

الف - کل کار انجام شده یا انرژی مکانیکی اعمال شده تقریبا از نوع برشی است.

ب - کار برشی انجام شده متناسب با توان مصرفی به ازای واحد حجم مواد در مخلوط کن است.

بر این اساس مقدار کار به ازای واحد حجم در فاصله زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ را می‌توان با استفاده از معادله زیر بدست آورد:

$$W_u = \frac{W_t}{V_b} = \frac{\int P(t)dt}{V_b} \qquad (1)$$

که در آن t_1 و t_2 زمان شروع و پایان، W_t کل کار انجام شده، $P(t)$ توان مصرف شده (که تابعی از زمان است)، V_b حجم آمیزه و W_u کار انجام شده به ازای واحد حجم است. با محاسبه این انتگرال می‌توان مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم (W_u) را معین کرد. برای تعیین میزان توان مصرفی برحسب زمان عموما سیستم موتور مخلوط کن را به دستگاهی که قادر به تعیین میزان گشتاور بر حسب زمان است مجهز می‌کنند. با مشخص شدن میزان گشتاور و دردست بودن دور چرخنده براحتی می‌توان مقدار کار به ازای واحد حجم را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$W_u = \frac{W_t}{V_b} = 2\pi N \int \frac{T(t)dt}{V_b} \qquad (2)$$

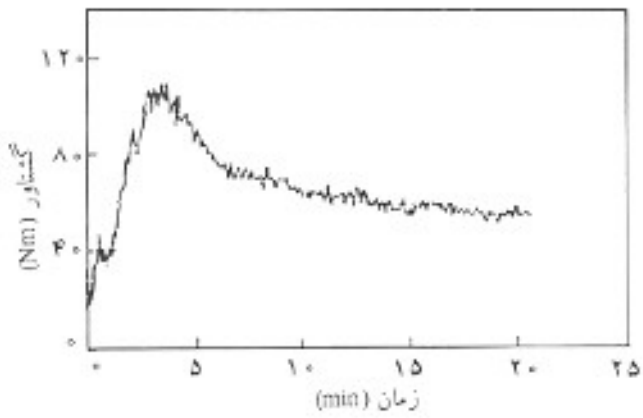
بنابراین، همانگونه که از معادله فوق مشخص می‌شود، سطح زیر منحنی گشتاور بر حسب زمان متناسب با میزان کار به ازای واحد حجم آمیزه خواهد بود. شکل ۱ نمونه‌ای از نمودار گشتاور-زمان را برای اختلاط کائوچو با دوده نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

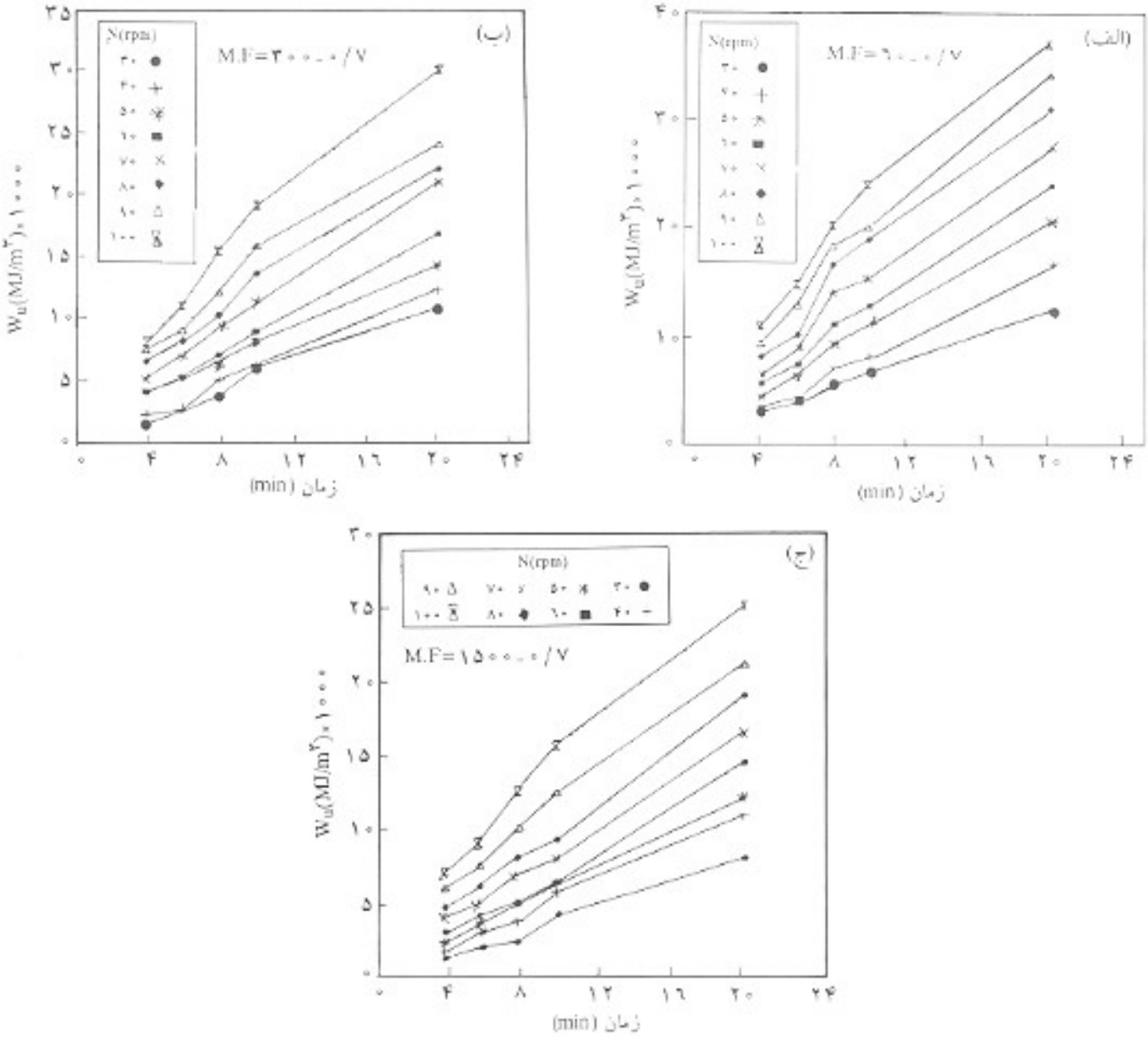
در این طرح از مخلوط کنهای بنبوری و هکه با ظرفیتهای ۶۰ و ۳۰۰ mL برای اختلاط لاستیک با دوده استفاده شد. بدین ترتیب که در ابتدا لاستیک وبعد دوده به مخلوط کن اضافه شد. در تمام مخلوط کنهای یاد شده عمل اختلاط در زمانهای ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۲۰ دقیقه انجام و دمای محفظه اختلاط برابر $50^{\circ}C$ وضریب پرشدگی برابر ۰/۷ انتخاب شده است. علت انتخاب دما و ضریب پرشدگی یاد شده این است که در صنایع بزرگ تایر سازی این مقادیر عملا بر حسب تجربه و با توجه به نتایج آزمونهای انجام شده روی محصول نهایی بدست می‌آیند. بر این اساس ما نیز مقادیر کمیتهای یاد شده را بر اساس تجربیات صنعتی انتخاب کردیم. آمیزه حاصل در هر یک از زمانهای یاد شده تخلیه شده و به دنبال آن آزمونهای گرانروی مونی و درصدپخش دوده انجام شده است. همچنین، مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم (W_u) نیز در همان زمانها محاسبه شده‌اند.

نمودارهای ۲ الف نتایج تغییرات W_u با زمان را در مخلوط کنهای باظرفیت ۶۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ mL نشان می‌دهند.

همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش دور مخلوط کن در یک زمان ثابت و نیز در یک دور ثابت با افزایش زمان، مقدار W_u افزایش می‌یابد. از سویی دیده می‌شود که در مقایسه بین دو مخلوط کن، مثلا ۶۰ با ۳۰۰ یا ۳۰۰ با ۱۵۰۰ mL، مقدار W_u برای یک دور



شکل ۱ - نمونه‌ای از تغییرات گشتاور با زمان در مخلوط کن با ظرفیت ۳۰۰ mL، ff=۰/۷ با دور ۸۰ rpm.

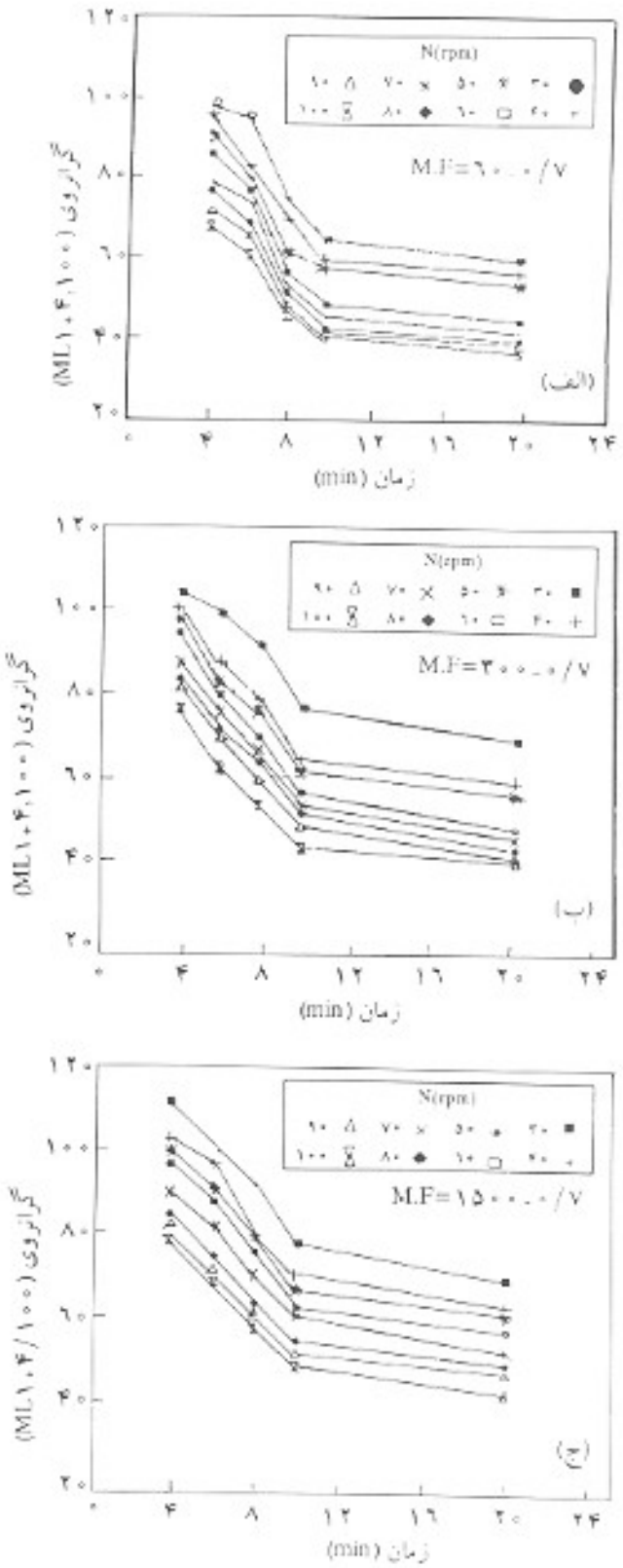


شکل ۲ - تغییرات مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم درزمانهای مختلف در مخلوط کنهای با ظرفیت: (الف) ۶۰، (ب) ۳۰۰ و (ج) ۱۵۰۰ mL.

ماهیت اختلاط و عدم توانایی روشهای خطی ساده در تعمیم نتایج این فرایند است.

نمودارهای ۳ الف تا ج تغییرات گرانروی مونی با زمان در مخلوط کنهای ۶۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ mL را نشان می دهند. در این نمودارها دیده می شود که با افزایش دور مخلوط کن گرانروی مونی کاهش می یابد که ناشی از شکست زنجیرهای پلیمر و رها شدن الاستومر محبوس شده در بین خوشه‌های دوده و نیز افزایش دماست. همچنین، با افزایش زمان در دور ثابت نیز گرانروی مونی کاهش پیدا می کند که این کاهش گرانروی در مخلوط کنهای با ظرفیت زیاد نسبت به مخلوط کنهای با ظرفیت کمتر دارای شدت بیشتری است. شکلهای ۴ الف تا ج تغییرات درصد پخش دوده با زمان در مخلوط کنهای ۶۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ mL را نشان می دهند.

در این شکلها دیده می شود که در زمانهای اولیه اختلاط در مخلوط کنهای با ظرفیت مختلف درصد پخش دوده کم است که با افزایش زمان اختلاط بهبود پیدا می کند. بدیهی است که افزایش زمان اختلاط از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. همان گونه که در مقدمه اشاره شد، هدف اصلی از انجام اختلاط در مخلوطهای مختلف و اندازه گیری کمیتهای یاد شده، ارائه روشی برای به مقیاس درآوردن



شکل ۳ ـ تغییرات گرانروی مونی آمیزه با زمان در دورهای مختلف در مخلوط‌کنهای با ظرفیت: (الف) ۶۰، (ب) ۳۰۰ و (ج) ۱۵۰۰ mL.

جدول ۳ ـ مقایسه شرایط اختلاط بدست آمده در مخلوط‌کنهای با ظرفیت ۶۰۰ و ۳۰۰mL.

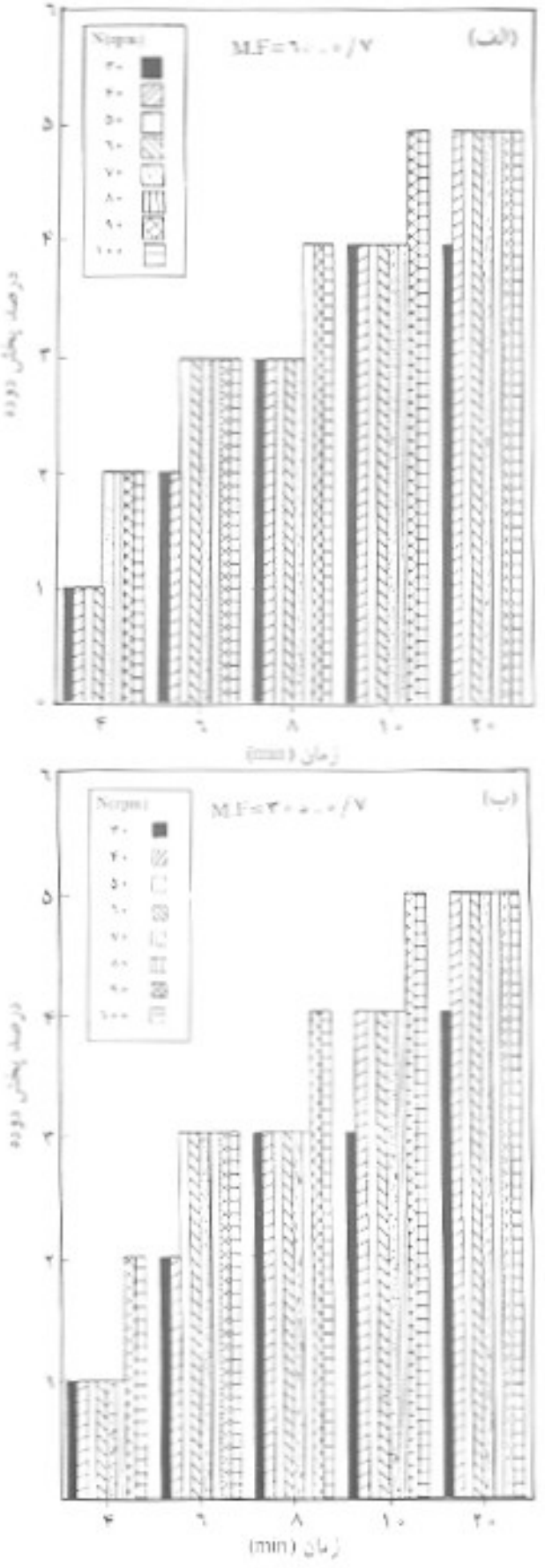
مخلوط‌کن	هکه	بنبوری آزمایشگاهی
ظرفیت (mL)	۶۰	۳۰۰
دور (rpm)	۵۰	۷۰
زمان اختلاط (min)	۸	۸
$W_u(MJm^{-3})$	۹۱۵۳	۹۱۵۰
گرانروی مونی ML(۱+۴,۱۰۰)	۶۵	۶۶
درصد پخش دوده	۳	۳

افزایش زمان اختلاط بهبود پیدا می‌کند. بدیهی است که افزایش زمان اختلاط از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، هدف اصلی از انجام اختلاط در مخلوطهای مختلف و اندازه‌گیری کمیتهای یاد شده، ارائه روشی برای به مقیاس درآوردن نتایج است. بر این اساس به عنوان نمونه سه عمل به مقیاس درآوردن نتایج برای مخلوط‌کنهای ۶۰ با ۳۰۰، ۶۰ با mL ۱۵۰۰ و ۳۰۰ mL با ۱۵۰۰ mL انجام شد که نتایج آن در ادامه ارائه می‌شود.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، پس ازگذشت ۸ دقیقه از زمان اختلاط در ۵۰ rpm و با حجم ۶۰ mL مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم با مخلوط‌کن دارای ظرفیت ۳۰۰ mL در ۷۰ rpm برابر است. مقایسه گرانروی مونی و درصد پخش دوده در دو مخلوط‌کن نشان می‌دهد که در مقادیر مساوی W_u این خواص بسیار به هم نزدیک است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عمل به مقیاس درآوردن صورت پذیرفته است. بدیهی است که چنانچه مقادیر دیگری از گرانروی مونی یا درصد پخش دوده مد نظر باشد، در آن صورت می‌توان شرایطی را معین کرد که در آنها مقادیر W_u با یکدیگر

جدول ۴ ـ مقایسه شرایط اختلاط و خواص بدست آمده در مخلوط کنهای با ظرفیت ۳۰۰ و ۱۵۰۰ mL.

مخلوط‌کن	هکه	بنبوری آزمایشگاهی
ظرفیت (mL)	۳۰۰	۱۵۰۰
دور (rpm)	۴۰	۵۰
زمان اختلاط (min)	۱۰	۱۰
$W_u(MJm^{-3})$	۶۱۳۰	۶۱۳۵
گرانروی مونی ML(۱+۴,۱۰۰)	۶۴	۵
درصد پخش دوده	۴	۴



شکل ۴ - تغییرات درصد پخش دوده با زمان در دورهای مختلف در مخلوط‌کنهای با ظرفیت: (الف) ۶۰، (ب) ۳۰۰ و (ج) ۱۵۰۰ mL.

مساوی باشد.

به منظور درآوردن نتایج بکارگیری مخلوط‌کن ۳۰۰ mL برای ۱۵۰۰ mL نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که پس از گذشت ۱۰ دقیقه از زمان اختلاط در ۴۰ rpm با حجم ۳۰۰ mL مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم با مخلوط‌کن دارای حجم ۱۵۰۰ mL در ۵۰ rpm برابر است.

به منظور درآوردن نتایج بکارگیری مخلوط‌کن ۶۰ mL برای ۱۵۰۰ mL در جدول ۵ ملاحظه می‌شود که پس از گذشت ۴ دقیقه از زمان اختلاط در ۴۰ rpm و با حجم ۶۰ mL مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم با مخلوط‌کن دارای حجم ۱۵۰۰ mL در ۷۰ rpm برابر است. مقایسه گرانروی مونی و درصد پخش دوده در دو مخلوط‌کن نشان می‌دهد که در مقادیر مساوی W_u این خواص بسیار به هم نزدیک است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عمل تعمیم صورت پذیرفته است.

جدول ۵ - مقایسه شرایط اختلاط و خواص بدست آمده در مخلوط‌کنهای با ظرفیت ۶۰ و ۱۵۰۰ mL.

مخلوط‌کن	هکه	بنبوری آزمایشگاهی
ظرفیت (mL)	۶۰	۱۵۰۰
دور (rpm)	۴۰	۷۰
زمان اختلاط (min)	۴	۴
$W_u(MJm^{-3})$	۵۰۴۰	۵۰۴۹
گرانروی مونی ML(۱+۴,۱۰۰)	۱۰۲	۱۰۳
درصد پخش دوده	۲	۲

نتیجه‌گیری

۱ - عمل اختلاط مواد در تنش برشی را می‌توان در یک مخلوط‌کن هکه آزمایشگاهی با یک بنبوری بزرگ بر اساس کار انجام شده در واحد حجم مقایسه کرد. همچنین، مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم پارامتر بسیار خوبی برای مشخص کردن اثر پلیمر، پرکننده و اجزای دیگر روی اختلاط پذیری (مخلوط شدن اجزاء با یکدیگر) است.

۲ - نتایج کار نشان می‌دهد که کار به ازای واحد حجم به اندازه و سرعت مخلوط‌کن بستگی ندارد و همچنین، بین کار به ازای واحد حجم و خواص آمیزه مانند گرانروی مونی و درصد پخش دوده یک رابطه وجود دارد.

۳ - مشاهده می‌شود که برای آمیزه‌های مورد استفاده در این طرح معمولا دامنه عملی کار به ازای واحد حجم در مرحله اول اختلاط حدود ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ MJm^{-3} و در انتهای اختلاط حدود ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ MJm^{-3} است.

۴ - نمودار کار به ازای واحد حجم نشان می‌دهد که برای رسیدن به درصد خوبی از پخش دوده میزان حداقل کار به ازای واحد حجم لازم است.

۵ - با توجه به اینکه دمای خروجی آمیزه در سه مخلوط‌کن در محدوده ۱۰۰-۱۱۰ °C و نیز دمای ورودی برابر با ۵۰ °C است، فرض یکسان‌بودن نیم‌رخ زمان - دما صحیح و استفاده از روش مقدار کار انجام شده به ازای واحد حجم امکان‌پذیر است.

مراجع

1. Pearson J.R.A.; *Rubber Chem. Tech.*; **41**, 23, 1968.
2. White J.L.; *Rubber Chem. Tech.*; **42**, 257, 1969.
3. Palmgren H. and Erubber Eur.; *Rubber Chem. Tech.*; **48**, 462, 1975.
4. Bergen J.T.; *Processing of Thermoelastic Materials*; Bernhardt E. C. (Ed.), Reionhold, New York, 405-46, 1959.
5. McKelvey J.M.; *Polymer Processing*; John Wiley and Sons, New York, Ch. 12, 1962.
6. Van Buskirk P.R., Turetzky S.B. and Gunberg P.F.; *Rubber Chem. Tech.*; **48**, 577, 1975.