

# رئومتر موین: اساس نظری و کاربردها

## Capillary Rheometer: Theory and Applications

سلوی فرهنگزاده

تهران، پژوهشگاه پلیمر ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

دریافت: ۱۳۸۲/۲/۱۵، پذیرش: ۱۳۸۲/۱۲/۲۸

### چکیده

با توجه به نقش رئولوژی پلیمرها در طراحی و ساخت تجهیزات فراورشی و قالبگیری و همچنین، اثر رفتار رئولوژیکی مواد پلیمری بر خواص مکانیکی محصول نهایی، اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی این مواد اهمیت بسزایی دارد. در این میان رئومترهای موین به عنوان دستگاههای حالت پایا از متداولترین وسایل مطالعه رفتار رئولوژیکی پلیمرهای مذاب بشمار می‌روند. مطالعات نشان می‌دهد که رئومترهای موین برای مطالعه خواص رئولوژیکی بسیاری از گرمانرمها، گرمانرمهای مهندسی و آلیاژهای آنها و نیز برخی الاستومرها کاربرد دارند. این خواص شامل گرانروی، روان‌کنشانی مذاب، تورم پس از حدیده و شکست مذاب در سرعتهای برش زیاد و در محدوده دماهای مختلف است. همچنین، با تغییر شکل هندسی حدیده مانند ابعاد، ورودی حدیده و غیره می‌توان از این رئومترها برای بررسی خواصی چون گرانروی کششی تک‌جهتی و خواص اصطکاکی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: رئومتر موین، مذاب پلیمر، گرانروی، تنش برشی، سرعت برش

**Key Words:** capillary rheometer, polymer melt, viscosity, shear stress, shear rate

### مقدمه

خواص رئولوژیکی به سرعت برش، وزن مولکولی و ساختار پلیمر، غلظت مواد افزودنیهای مختلف و دما بستگی دارند [۸].

از آنجا که فراورشی و تولید قطعات مستلزم جریان یافتن پلیمرهاست، رئولوژی پلیمرها از اهمیت خاصی برخوردار است. رفتار جریان در قالبگیریهای تزریقی، دمشی و تراکمی، ورقه‌سازی به کمک غلتک؛ شکل‌دهی سرد و ریستنگی الباف اثر بسزایی دارد. رئولوژی پودرهای پلیمری، پیش از ذوب آنها در نخستین بخش اکسترودر ماشینهای قالبگیری تزریقی بسیار مهم است. رفتار رئولوژیکی مواد، روی خواص مکانیکی محصول نهایی اثر می‌گذارد. مثلاً، جهتگیری مولکولی اثر زیادی بر خواص مکانیکی محصولات تزریقی، فیلمها و الباف دارد. نوع و درجه جهتگیری را تا حد زیادی می‌توان با بررسی رفتار رئولوژیکی پلیمر و ماهیت جریان آن طی فرایند ساخت بدست

رئولوژی علم مطالعه جریان و تغییر شکل مواد است [۷-۱]. رئولوژی نوین بسیار گسترده‌تر از مفهومی است که از این واژه برداشت می‌شود. این علم تقریباً با تمام جنبه‌های تغییر شکل اجسام حقیقی در اثر تنشهای خارجی سروکار دارد [۱]. برای بسیاری از سیالات ساده، مطالعه رئولوژی روی اندازه‌گیری گرانروی متمرکز می‌شود. برای این‌گونه سیالات، گرانروی به دما و فشار هیدروستاتیک بستگی دارد. از آنجا که سیالهای پلیمری (محلولهای پلیمری و مذاب پلیمرها) رفتار غیر ایده‌آل از خود نشان می‌دهند، رئولوژی آنها پیچیده‌تر است. سیالهای پلیمری علاوه بر گرانروی برشی مرکب، دارای خواص کشسانی، پدیده تنشهای عمودی و گرانروی کششی‌اند. همه این

آورد. پدیده روان کشسانی از ویژگیهای پلیمرهای با جرم مولکولی زیاد بشمار می‌رود. این پدیده نقش خود را با مدول برشی کشسان، اثر تشوای عمودی و تورم پس از حدیده در فرایندهای ریسندگی و اکستروژن نشان می‌دهد. دلیل اصلی خواص کشسانی به چگونگی آرایش قطعات مولکولی به هنگام جریان یافتن ماده بازمی‌گردد. جرم مولکولی و نحوه توزیع آن از عوامل موثر در رئولوژی پلیمرهای مذاب است [۲].

دستگاههای مختلفی برای اندازه‌گیری گرانروی و دیگر خواص رئولوژیکی پلیمرهای مایع، محلول و مذاب بکار می‌روند. اغلب این دستگاهها خواص رئولوژیکی را به صورت تابعی از دما و شدت برش اندازه‌گیری می‌کنند. رئومترها به سه دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول، دستگاههای حالت پایا که شامل گرانروی سنجهای برشی ساده با استوانه‌های هم‌محور، صفحه و مخروط و دو صفحه موازی و رئومترهای موین است.

دسته دوم، دستگاههای اندازه‌گیری گرانروی کمپلکس‌اند. رئومترهای دینامیک اورتوگونال و رئوگونومترها متعلق به این دسته‌اند که در سالهای اخیر بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

دسته سوم، شامل دستگاههای اندازه‌گیری گرانروی کششی که در این، مقاله اساس نظری و کاربردهای رئومتر موین بحث می‌شود.

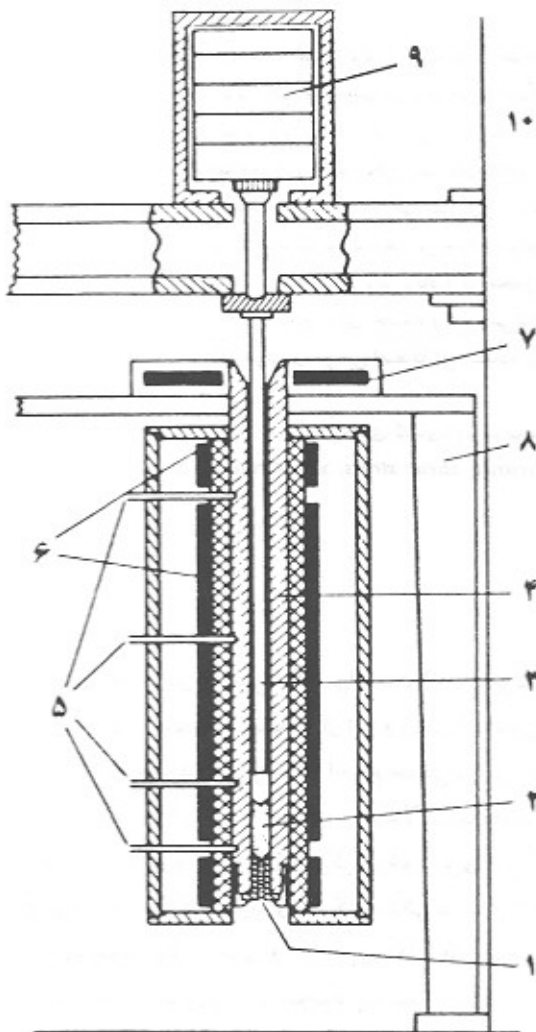
اساس نظری مواد مایع و مذاب پلیمری در بسیاری از فرایندهای صنعتی بکار می‌روند و رفتار جریانی بسیار متفاوتی دارند. بهترین کارایی متضمن داشتن دانش و اطلاعاتی درباره خواص جریان مواد طی فرآورش است. معمولترین خاصیت رئولوژیکی قابل اندازه‌گیری گرانروی است که رفتار مواد را در جریان برشی پایا مشخص می‌کند [۴].

رئومتر موین یکی از متداولترین دستگاههای مطالعه رفتار رئولوژیکی پلیمرهای مذاب است. بنابراین، برای کسانی که با این دستگاه سروکار دارند، دانستن محدودیتها و کاربردهای مناسب آن مهم است. رئومتر موین شامل یک لوله موین کوچک است که مذاب پلیمر به وسیله یک پیستون یا اعمال فشار با سرعت ثابت از میان آن به بیرون رانده می‌شود [۸]. طی عبور مذاب از این لوله، لایه‌ای از آن که با دیواره لوله تماس دارد، دارای سرعت صفر است و با گذر از دیواره به سمت خط مرکزی، سرعت لایه‌ها بیشتر می‌شود تا به بیشترین مقدار خود در خط مرکزی می‌رسد. در عمل برای اندازه‌گیری گرانروی، میزان تنش برشی اعمال‌شده روی لایه‌های مایع و نیز سرعت برش لازم است [۷].

رئومتر موین یکی از متداولترین دستگاههای مطالعه رفتار رئولوژیکی پلیمرهای مذاب است. بنابراین، برای کسانی که با این دستگاه سروکار دارند، دانستن محدودیتها و کاربردهای مناسب آن مهم است. رئومتر موین شامل یک لوله موین کوچک است که مذاب پلیمر به وسیله یک پیستون یا اعمال فشار با سرعت ثابت از میان آن به بیرون رانده می‌شود [۸]. طی عبور مذاب از این لوله، لایه‌ای از آن که با دیواره لوله تماس دارد، دارای سرعت صفر است و با گذر از دیواره به سمت خط مرکزی، سرعت لایه‌ها بیشتر می‌شود تا به بیشترین مقدار خود در خط مرکزی می‌رسد. در عمل برای اندازه‌گیری گرانروی، میزان تنش برشی اعمال‌شده روی لایه‌های مایع و نیز سرعت برش لازم است [۷].

دستگاه اصلی

امروزه برای انجام آزمایش از رئومترهای موین با سرعت رانش ثابت و



شکل ۱ - طرح کلی مجموعه اندازه‌گیری رئومتر موین [۴].

روی ڀستون اعمال می شود که مقدار این نیرو برابر است با:

$$F = A_p \Delta P \quad (3)$$

در این معادله  $A_p$  سطح مقطع ڀستون است. با جایگزینی معادله ۳ در معادله ۲ تنش برشی روی دیواره به دست می آید:

$$\tau_w = \frac{F}{4A_p(l_c/d_c)} \quad (4)$$

سرعت برش روی دیواره

برای مایعات نیوتونی نیم رخ سرعت سهمی است، بنابراین  $\gamma$  روی دیواره عبارت است از:

$$\gamma_w = \frac{\Delta V}{d_c} \quad (5)$$

$V$  سرعت متوسط عبور جریان مایع از لوله موین است. سرعت متوسط مطابق معادله ۶ از سرعت ڀستون ( $V_{xH}$ ) و نسبت قطر محفظه نمونه ( $d_b$ ) به قطر لوله موین ( $d_c$ ) بدست می آید:

$$V = \frac{V_{xH} (d_b/d_c)^2}{1.5} \quad (6)$$

که در آن سرعت ڀستون بر حسب  $cm/min$  یا  $in/min$  و قطرھا بر حسب  $cm$  یا  $in$  بیان می شود. با قرار دادن مقدار  $V$  در معادله قبلی، سرعت برش بر حسب معکوس ثانیه به دست می آید:

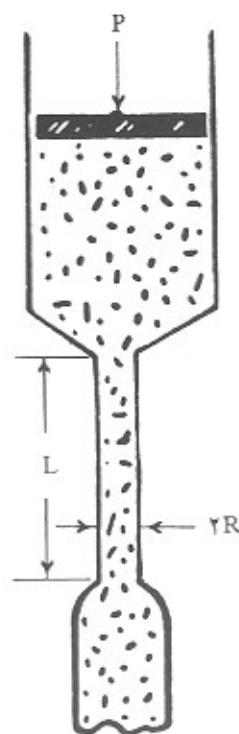
$$\gamma_w = \frac{2}{1.5} V_{xH} (d_b^2 / d_c^2) \quad (7)$$

این معادله سرعت برش سیالات نیوتونی را نشان می دهد. با توجه به معادله های ۴ و ۷ که قبلا بیان شد، می توان گرانروی ظاهری  $\mu_a$  را از معادله زیر محاسبه کرد:

$$\mu_a = \frac{\tau_w}{\gamma_w} \quad (8)$$

تورم پس از حدیده

معمولا هنگامی که یک سیال غیر نیوتونی از لوله موین عبور می کند، محصول اکستروژن نسبت به قطر سوراخی که از آن عبور می کند، دارای قطر بزرگتری است. نسبت قطر محصول اکستروژن به قطر سوراخ لوله موین (حدیده) را تورم پس از حدیده گویند. با توجه به این واقعیت که تورم پس از حدیده تابعی از تنشهای عمودی بوجود آمده در لوله



شکل ۲ - خروج مذاب پلیمر از لوله موین در اثر فشار ناشی از ڀستون [۷].

میزان افت فشار از اندازه گیری مقدار نیروی وارد شده به ڀستون بدست می آید [۷]. ڀستون با سرعت ثابت به داخل محفظه حاوی نمونه رانده می شود و نمونه ذوب شده از لوله موین عبور کرده بیرون می رود (شکل ۲).

اندازه گیری گرانروی ظاهری

تنش برشی روی دیواره

محاسبه نشان می دهد که تنش برشی ( $\tau$ )، با فاصله از خط مرکزی لوله موین ( $r$ )، به صورت خطی افزایش می یابد و از معادله زیر قابل احتساب است:

$$\tau = \frac{\Delta P}{4l_c} r \quad (1)$$

که در آن  $\Delta P$  افت فشار در طول لوله موین ( $l_c$ ) است. بنابراین، تنش برشی روی دیواره عبارت خواهد بود از:

$$\tau_w = \frac{\Delta P}{4} \frac{d_c}{l_c} \quad (2)$$

در این معادله  $d_c$  قطر لوله موین است. نیروی  $F$  به وسیله مذاب پلیمر

هنگامی که تغییر شکل محصول اکستروژن یا لغزش جریان مشاهده می‌شود، داده‌های جریان موین را نمی‌توان برای محاسبه مقادیر واقعی خواص رئولوژیکی بکار برد. معمولاً شرایطی که در آن تغییر شکل اتفاق می‌افتد ثبت می‌شود، زیرا این اطلاعات از اهمیت خاصی برخوردار است.

#### تصحیح رابینوویچ

در صورتی که سیال غیر نیوتونی باشد، نیم‌رخ سرعت بسته به میزان رفتار غیر نیوتونی مایع از حالت سهمی خود منحرف می‌شود. این بدان معنی است که سرعت برش روی دیواره برای این گونه سیالات با آنچه که قبلاً بیان شد، متفاوت است. مقدار  $\Delta V/d_c$  اغلب سرعت برش ظاهری نامیده می‌شود. مقدار واقعی آن با انجام تصحیح رابینوویچ (Rabinowich) به صورت زیر درمی‌آید:

$$\gamma_w = \frac{3n+1}{4n} \frac{\Delta V}{d_c} \quad (9)$$

که در آن:

$$n = \frac{d \ln \tau_w}{d \ln (\Delta V/d_c)} \quad (10)$$

مقدار  $n$ ، شیب منحنی نمودار  $\ln \tau_w$  بر حسب  $\ln (\Delta V/d_c)$  است. بنابراین، شدت برش روی دیواره برای سیال غیر نیوتونی به صورت زیر خواهد بود:

$$\gamma_w = \frac{2}{15} \left( \frac{3n+1}{4n} \right) V_{xH} (db^2/d_c^3) \quad (11)$$

گرانروی ظاهری سیال  $\tau_w$  از همان معادله قبلی و با  $\gamma_w$  تصحیح شده محاسبه می‌گردد [۱۰].

#### تصحیح بگلی

این تصحیح به علت غیرایده‌آل بودن ناشی از آثار روان کشسانی سیال در ورودی لوله موین روی تنش برشی صورت می‌گیرد. طول موثر لوله موین از طول حقیقی آن بیشتر است. تنش برشی روی دیواره با توجه به شکل ۳ عبارت خواهد بود از [۷]:

$$\tau_w = \frac{F}{2Ap(l_0/r_c + e)} = \frac{\Delta P}{2(l_0/r_c + e)} = \frac{P-P_0}{2l_0/r_c} \quad (12)$$

#### کاربردها

اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی بویژه گرانروی گرم‌مانرها برای شبیه‌سازی و طراحی سیستم بسیار حائز اهمیت است. پژوهشگران

موین است، فنون مختلفی برای محاسبه تنشهای عمودی و در نتیجه میزان روان کشسانی با استفاده از تورم پس از حدیده ارائه شده‌اند. فنون اندازه‌گیری تورم پس از حدیده به صورت زیر است [۱]:

- استفاده از میکروسکوپ با حرکت عمودی،
- عکاسی و اندازه‌گیری قطر رشته در تصویر بزرگ شده،
- استفاده از سایه نگار (shadowgraph) و

- بکار گرفتن دوربین ویدئویی متصل به سیستم نوری که دارای نرم‌افزار لازم برای خواندن قطر رشته‌ها بطور مستقیم است. فن اخیر، بویژه هنگامی که نمونه‌های بسیاری باید آزمایش شوند یا دقت زیادی مورد نیاز است، روش مناسبی بشمار می‌رود.

#### شکست مذاب

رئومترهای موین تنها دستگاههایی هستند که می‌توان بوسیله آنها اطلاعاتی درباره پدیده شکست بدست آورد. تعریف این پدیده در (British Standard) BS به صورت تغییر شکل نامنظم محصول اکستروژن پلیمر به هنگام عبور از حدیده آمده است. این تعریف، شکست مذاب را در زمره پدیده‌های مذابهای پلیمری قرار می‌دهد. امروزه، این اصطلاح به تغییر شکل نامنظم هر نوع سیال به هنگام عبور از حدیده اطلاق می‌شود. واژه سیال نه تنها به پلیمر مذاب بلکه به ژلها، خمیرها، تعلیقه‌ها و محلولهای پلیمری نیز گفته می‌شود [۱].

#### ناپایداریهای جریان

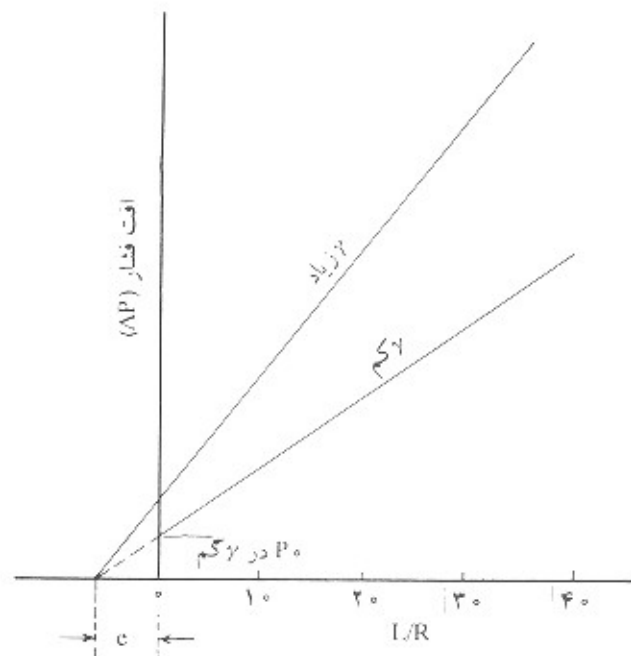
معادله‌های ارائه شده برای محاسبه سرعت برش و گرانروی در رئومتر موین بر مبنای مجموعه‌ای از فرضهاست. مثلاً، فرض می‌شود که جریان سیال پایا بوده و سرعت آن به صورت تابعی از شعاع لوله موین است که روی دیواره به صفر می‌رسد، به عبارتی شرایط لغزش در نظر گرفته نمی‌شود. در شرایط معین، جریان مذاب در لوله موین ناپایا می‌شود. این پدیده در تنشهای برشی زیاد اتفاق می‌افتد و اثر افزایش سرعت پیستون یا به عبارتی سرعت برش یا کاهش دما، روی ظاهر پلیمر خروجی از لوله موین کاملاً مشهود است. این پدیده گاهی شکست مذاب نامیده می‌شود. شکست مذاب نه تنها در استفاده از لوله موین بلکه در فرایندهای اکستروژن صنعتی نیز ایجاد محدودیت می‌کند.

پدیده دیگری که گاهی در جریان موین پلیمرهای مذاب مشاهده می‌شود، بویژه در پلی‌اتیلن سنگین، افزایش ناگهانی سرعت جریان به هنگام رسیدن فشار رانش تا حدی معین است. این موضوع توسط رودین و جانگ مطالعه شده است [۹]. بنظر می‌رسد که افزایش ناگهانی سرعت جریان به لغزش پلیمر در نزدیکی یا روی دیواره بستگی دارد که در نتیجه افت چسبندگی میان پلیمر و دیواره یا افت همجسی در امتداد سطح استوانه‌ای پلیمر است، که بسیار نزدیک به دیواره است.

است [۱۴].

بررسیهای انجام شده روی مذاب کopolymerهای اتفاقی پلی (بوتیلن ایزوفتالات) / ترفتالات به کمک رئومتر موبین در محدوده دمایی C ۲۴۰-۲۰۰ و رسم نمودارهای جریان نشان می‌دهد که در یک دمای ثابت در نمونه‌های دارای متوسط وزن مولکولی یکسان ولی با ترکیب درصد های مختلف، با افزایش واحدهای کومونومر PBT، گرانروی نیوتونی افزایش می‌یابد. همچنین، انرژی فعالسازی جریان مذاب که با استفاده از معادله آرنیوس بدست آمده است کاملاً تحت تاثیر ترکیب درصد اجزای سازنده قرار دارد [۱۵]. این مطالعه برای کامپوزیت های پلی پروپیلن پر شده یا پودر نقره نیز انجام شده است [۱۶].

بررسی خواص جریان موبین گرماتر مهای مهندسی برای کاربردهای صنعتی نیز از اهمیت ویژه ای برخوردار است. برخی از پژوهشگران خواص جریان موبین یک گرماتر مهندسی جدید مانند فنول فتالین پلی اتراکتون را به کمک رئومتر موبین بررسی کرده اند. آنها بستگی گرانروی را به سرعت برش روی دیواره و دما بررسی و اثر ورودی را محاسبه نموده‌اند و به دنبال آن رفتار کششی را نیز برآورد کرده اند [۱۷].



شکل ۳- تصحیح بگلی.

در برخی موارد استفاده از داده‌های رئومتر موبین برای آلیاژهای پلیمری در درصد های مختلف اجزای تشکیل دهنده آنها و مطابقت این داده‌ها با نتایج بدست آمده از دیگر دستگاهها در تجزیه و تحلیل رفتار این مواد بسیار موثر است. این بررسی برای آلیاژهای پلی پروپیلن و پلی پروپیلن مالئات دار در مرجع ۱۸ گزارش شده است.

پژوهشگران بکار گیری رئومتر موبین را برای اندازه گیری گرانروی کششی تک جهتی گزارش کرده اند. این نوع اندازه گیری با تعویض حدیده موبین استاندارد با نوعی حدیده متقارن محوری امکان پذیر شده است. گرانروی کششی تک جهتی برای دو نوع پلی پروپیلن تجاری، نایلون ۶۶ ساخت دوپان، پلی استیرن هم آرایش و انواع تجاری پلی اتیلن در مرجع ۱۹ گزارش شده است.

رئومتر موبین برای بررسی خواص اصطکاکی پلی اولفینهای

گرانروی را در سرعت های برش زیاد به عنوان تابعی از سرعت برش و دما به کمک رئومتر موبین اندازه گیری و اثر سرعت برش، تنش برشی و دما را بر گرانروی ظاهری بررسی کرده اند.

نتایج حاصل از رئومتر موبین برای پلی پروپیلن نیمه بلوری در سه دمای ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۳۰ C در سرعت برشهای زیاد (تا  $10^3 s^{-1}$ ) به همراه اطلاعات بدست آمده از گرماسنج پوشی تفاضلی و رئومتر نوع صفحه و مخروط برای ارائه نوعی مدل سینتیکی تبلور القا شده با برش (shear-induced crystallization) بکار گرفته شده است [۱۱].

همچنین، با استفاده از داده‌های رئومتر موبین رفتار رئولوژیکی پلی (فنیلن سولفید) از نوع ریتون مطالعه شده و علاوه بر بدست آوردن گرانرویهای ظاهری این پلیمر در دماهای مختلف شاخص غیر نیوتونی (non-Newtonian index) و انرژی فعالسازی جریان گرانروی نیز محاسبه شده است [۱۲].

جدول ۱ - مشخصات تجاری پلی پروپیلن و پلی اتیلن سبک خطی مورد استفاده.

پلیمر	نشانه تجاری	شاخص گرانروی مذاب لف ( $g/10 \text{ min}$ )	سازنده
PP	PRO-FAX۱۸۲۳	۵ / ۰	همونت
PP	PRO-FAX۱۶۲۳	۷ / ۱	همونت
LLDPE		۵ / ۰	اکسون
LLDPE		۰ / ۱	اکسون

الف- دمای آزمایش برای PP، ۲۳۰ و برای LLDPE، ۱۹۰ است.

با مطالعه پدیده تورم پس از حدیده و محاسبه گرانروی ظاهری مذاب به کمک رئومتر موبین برای آلیاژهای پلی اتیلن سبک و دو نوع پلی اتیلن سبک خطی، سازگاری این پلیمرها و انرژی فعالسازی آنها بررسی شده است [۱۳].

همچنین، رفتار رئولوژیکی آلیاژهای پلیمر بلور مایع گرماگرا (LCP) و پلی کریبات (PC) بررسی و در مقایسه با خواص رئولوژیکی PC نتیجه گیری شده است که رفتار رئولوژیکی این دو با یکدیگر بسیار متفاوت است. این مقایسه به کمک رئومتر موبین با لوله‌های موبین دارای L/D های مختلف و در محدوده دمایی C ۲۳۰-۲۰۰ انجام شده

که در آن  $F-F_0$  اختلاف نیروها،  $A_x$  سطح مقطع محفظه نمونه،  $P$  فشار روی سطح بالایی و  $P_0$  فشار بر سطح انتهایی پیستون آلومینیومی است. بنابراین، نیروی اصطکاک پلیمر روی دیواره فلزی عبارت است از:

$$F_f = \mu N = \mu \left( \frac{P + P_0}{2} \right) A_w \quad (14)$$

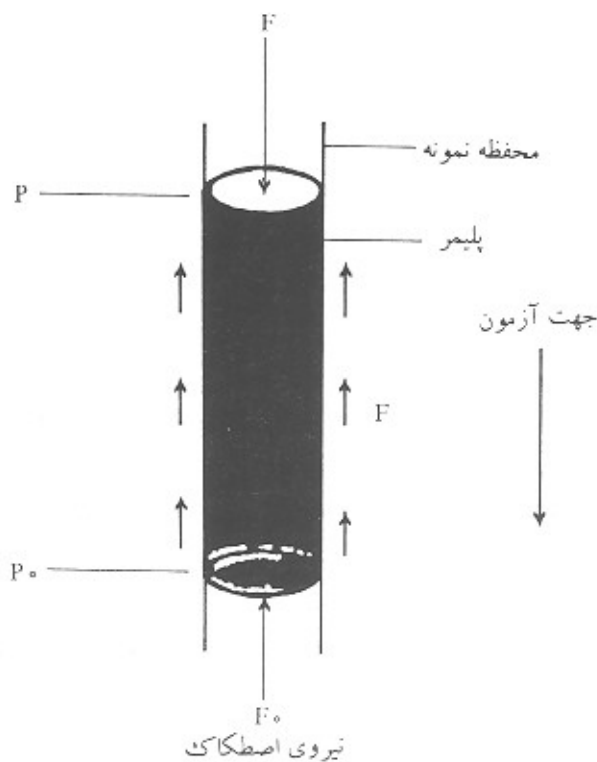
و  $A_w$  مساحتی از محفظه نمونه است که در تماس با پلیمر قرار دارد، بنابراین در نهایت می توان ضریب اصطکاک را از معادله زیر بدست آورد:

$$\mu_f = \frac{F - F_0}{2(F + F_0)} \frac{D}{L} \quad (15)$$

در این معادله  $\mu_f$  ضریب اصطکاک،  $F$  نیروی اندازه گیری شده و  $F_0$  نیروی اندازه گیری شده بدون نمونه پلیمر است که اصطلاحاً به آن فشار برگشتی (back pressure) می گویند.  $D$  و  $L$  نیز به ترتیب قطر و طول محفظه نمونه است. مقادیر اندازه گیری شده نیروی اصطکاک در جدول ۲ و شکل ۵ آمده است [۲۰].

بکارگیری رئومتر موین در مطالعه رفتار رئولوژیکی گرمانرمها معمول است، اما کاربرد آن برای لاستیک محدودیتهایی را دربر دارد. اثر خرد کردن و دما روی خواص رئولوژیکی لاستیک طبیعی به کمک رئومتر موین مطالعه شده است. جریان لاستیک در محفظه نمونه به وسیله شرایط آزمون مختلف مانند شکل هندسی جدید، سرعت پیستون و دمای آزمون و با استفاده از لایه های آمیزه های لاستیک رنگدانه دار بررسی شده است. مطالعه الگوی جریان در محفظه نمونه رئومتر بسیار پیچیده بوده و تابعی از جابه جایی پیستون است. نیم رخ سرعت در نزدیک ورودی جدید برای جابه جاییهای مختلف پیستون بدست آمده است.

نتایج نشان می دهد که نیم رخ سرعت در نزدیکی ورودی جدید سهمی بوده و ظاهراً سرعت در دیواره جدید صفر نخواهد بود.



شکل ۴- تحلیل نیروها برای اندازه گیری ضریب اصطکاک.

عمل آوری شده با کمک فراورشهای از نوع الاستومر فلوئوردار نیز بکار می رود. در مرجع ۲۰ این بررسی به کمک یک رئومتر ساخت اینسترون مدل ۱۱۲۵ صورت گرفته است. جدید بکار رفته دارای قطری معادل ۰/۷۲۹ mm و نسبت  $L/D$  برابر ۳۹/۰ است. در این پژوهش تصحیح راینووچ و اثر انتهایی اعمال نشده است. مشخصات پلی پرویلنها و پلی اتیلنها سبک خطی بکار رفته در این بررسی در جدول ۱ آمده است. برای اندازه گیری ضریب اصطکاک با توجه به شکل ۴ و انجام محاسبات مربوط در حالت پایا از معادله زیر استفاده شده است:

$$F - F_0 = (P - P_0) A_x \quad (13)$$

جدول ۲- نیروی اصطکاک بدون نمونه پلیمر ( $F_0$ ) و با پلیمر ( $F$ ) الف برای پلی پرویلن ( $MI = 0/5$ ).

طول محفظه نمونه، L (cm)						سرعت پیستون (in/min)
۱۰/۸	۷/۷۱	۵/۴۰	۳/۰۸	۱/۵۴	۰/۰۰	
F (lbf)					F <sub>0</sub> (lbf)	
۱۹/۵	۱۷/۶	۱۷/۰	۱۴/۸	۱۴/۸	۱۴/۵	۱/۰
۲۴/۰	۲۱/۰	۲۰/۵	۱۶/۵	۱۵/۰	۱۴/۶	۲/۰
۳۴/۰	۲۷/۵	۲۴/۵	۱۸/۵	۱۶/۷	۱۴/۸	۵/۰
۴۵/۰	۳۳/۵	۲۹/۵	۲۱/۳	۱۸/۳	۱۵/۰	۱۰/۰

الف- فشار برگشتی ۹/۹۴ lbf (۹۰ psi) و دما ۲۱۰ C است.

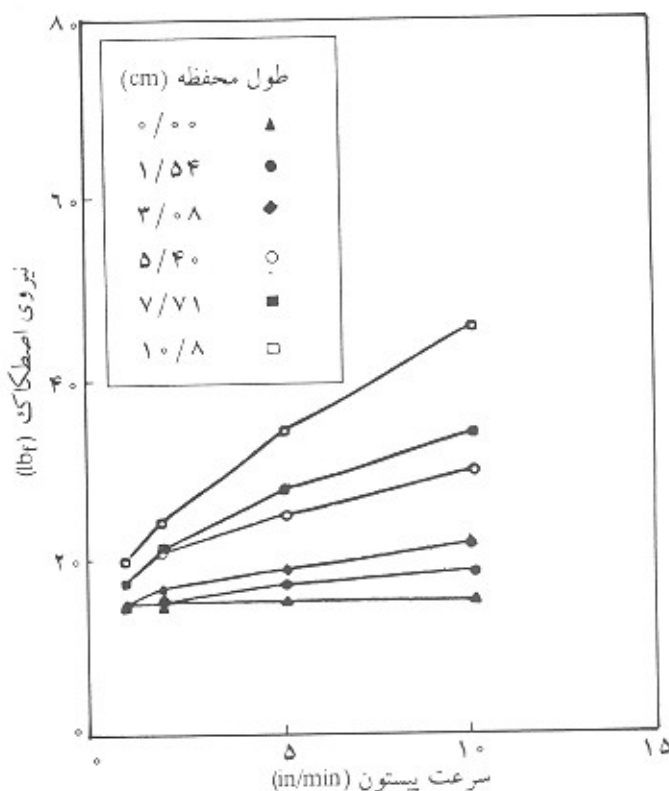
تزریقی شباهت دارد. تورم پس از حدیده و شکست مذاب دو پدیده بسیار مهم در پژوهشهای رئولوژیکی اند که تنها با رئومتر موین می توان آنها را مطالعه کرد. همچنین، جریان در این دستگاه شبیه به جریان آرام در لوله است. فن رئومتری موین ساده است، ولی مسائلی چون اثر ورودی دقت خاصی را می طلبد. مثلاً، باید از توسعه کامل جریان پویسه (Poiseuille flow) در لوله موین اطمینان حاصل شود. دستگاه رئومتر موین بیشترین کاربرد را برای پلاستیکهای مذاب دارد [۱].

### نتیجه گیری

رئومترهای موین اغلب برای مطالعه خواص رئولوژیکی گرماتریمهای مهندسی بکار می روند، اما استفاده از آنها برای الاستومرها نیز گزارش شده است. از این رئومترها برای اندازه گیری گرانیوی، روان کشسانی مذاب، تورم پس از حدیده و شکست مذاب در سرعتهای برش زیاد و محدوده دماهای مختلف بکار می رود. با تغییر شکل شناسی حدیده مانند ابعاد، ورودی حدیده و غیره می توان از رئومترهای موین برای بررسی برخی خواص مانند ضریب اصطکاک و گرانیوی کششی تک جهتی نیز استفاده کرد.

### مراجع

1. Ferguson J. and Kemblowski Z.; *Applied Fluid Rheology*; Elsevier Applied Science, London, 1991.
2. Walters K.; *Rheometry*; Chapman and Hall, London, 1987.
3. Schramm G.; *Introduction to Practical Viscometry*; Gebruder Haake GmbH, Germany, 1989.
4. Dealy J.M.; *Rheometers for Molten Plastics*; Van Nostrand, 1982.
5. Collyer A.A. and Clegg D.W.; *Rheological Measurements*; Elsevier Applied Science, London, 1988.
6. *Rheology and Its Role in Plastics Processing*; Rapra Reviews, 1996.
7. Lawrence E.N.; *Polymer Rheology*; Marcel Dekker, 1997.
8. Dealy J.M. and Wissbrun K.F.; *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing*; Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
9. Bagley E. B. and Schreiber H. P.; *Rheology*; 5, Academic,



شکل ۵ - تغییر مقدار نیروهای اصطکاک با سرعت پیستون.

همچنین، شکست مذاب رخ می دهد که این پدیده با ظهور اغتشاش در جریان در طول حدیده قابل مشاهده است [۲۱، ۲۲].  
بررسی آثار جهتگیری برای سیس - ۴،۱ - پلی بوتادی، مطالعه و اندازه گیری همگرایی جریان مذابهای پلی اتیلن در خارج از خط تولید، بررسی گرانیوی کششی در حالت پایا برای آمیزه های لاستیک با استفاده از نوعی حدیده با دهانه زنگی شکل و قالب پذیری الاستومرهای گرماترم یورتان ارائه شده است به ترتیب در مراجع ۲۳ - ۲۶ ارائه شده است.

بررسی تورم پس از حدیده نیز با استفاده از رئومترهای موین صورت می گیرد. این بررسی برای پلی اتیلن و آلبازهای آنها [۲۷]، کوپلیمرهای پروپیلن و اتیلن بی آرایش و تک آرایش [۲۸] و یاف آکرلیک به منظور مطالعه گرهای مولکولی [۲۹] انجام شده است.

مزایا

رئومتری موین برای اندازه گیری خواص رئولوژیکی فنی جالب بشمار می رود. دستگاه اصلی رئومتر نسبتاً ارزان، براحتی قابل ساخت و کار با آن آسان است. در رئومترهای موین به سرعتهای برش بیشتری نسبت به رئومترهای چرخان می توان دست یافت. کنترل دما آسان است و فرایند جریان موین به فرایندهای صنعتی بسیاری مانند اکستروژن و قالبگیری



21. Gang T. G. et al.; Frictional Properties of Polyolefines Treated with Fluoroclastomer Processing Aids; *J. Appl. Polym. Sci.*; **55**, 1465-76, 1995.
22. Sombatsompop N., Tan M. C. and Wood A. K.; Flow Analysis of Natural Rubber in a Capillary Rheometer. 1: Rheological Behavior and Flow Visualization in the Barrel; *Polym. Eng. Sci.*; **37**, 2, 270-80, 1997.
23. Ibid, 281-90.
24. Chirico A. and Sorta E.; Orientation Effects on a high Cis-1,4-Polybutadiene Induced by Shear rate in a Capillary Rheometer; *Polymer*; **18**, 1, 1997.
25. Groves D. J., Martyn M. T. and Coates P. D.; Off-line and In-process Converging Flow Measurements for Polyethylene Melts; *Plast. Rubber Comp.*; **26**, 1, 1997.
26. Clarke J. and Petera J.; Determination of Steady - State Elongational Viscosity for Rubber Compounds Using Bell-Mouthed Dies; *J. Appl. Polym. Sci.*; **66**, 6, 1997.
27. Hoodbhoy A. I.; New Dimensions in Automotive Use of Thermoplastic Urethane Elastomers; *J. Elastomers Plast.*; **6**, 4, 269-75, 1974.
28. Xanthos M., Tan V. and Ponnusaw AA., Polyethylenes and Their Blends: A Comparison of Experimental Techniques; *Polym. Eng. Sci.*; **37**, 6, 11-2-12, 1997.
29. Tang Y. et al., Rheological Properties of Isotactic and Atactic Propylene-Ethylene Copolymers; *J. Elastomers Plast.*; **20**, 4, 327-45, 1988.
30. Qian B. et al., Macromolecular Entanglement. IV. Modulus of Swelling Acrylic Fibers as a Means of Studing Macromolecular Entanglements; *J. Appl. Polym. Sci.*; **53**, 10, 1261-75, 1994.
10. The Manual of Instron Capillary Rheometer, Model 3211.
11. Isauev A. I. et al.; Injection Molding of Semicrystalline Polymers. I. Material Characterization; *J. Appl. Polym. Sci.*; **55**, 807-19, 1995.
12. Hou C. et al.; A Study on Rheologic Behavior of Polyphenylene Sulfide; *J. Appl. Polym. Sci.*; **56**, 581-90, 1995.
13. Abraham D. et al.; Flow Behavior of LDPE and Its Blends with LLDPE I and II: A Comparative Study; *J. Appl. Polym. Sci.*; **62**, 59-65, 1996.
14. Chang J. H. et al.; The Effect of Composition on Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of Thermotropic Liquid Crystalline Polyester with Alkyl Side-Group and PC Blends; *Polym. Eng. Sci.*; **37**, 9, 1564-71, 1997.
15. Bandiera M., Munarti A. and Pezzin G.; Rheological Characterization of Random Poly(Butylene Isophthalate/Terephthalate) Copolymers; *Eur. Polym. J.*; **33**, 4, 497-500, 1997.
16. Ghosh K. and Maiti S. N.; Melt Rheological Properties of Silver-Powder-Filled Polypropylene Composites; *Polym. Plast. Tech.*; **36**, 5, 703-22, 1997.
17. DI Y. et al.; Capillary Flow Properties of Phenolphthalein Poly(ether ether ketone); *Polym. J.*; **29**, 1, 7-11, 1997.
18. Shucai L. I. et al.; A Comparison Between Apparent Viscosity and Dynamic Complex Viscosity for Polypropylene/Maleated Polypropylene Blends; *Polym. Eng. Sci.*; **37**, 1, 18-23, 1997.
20. Pendse A. V. and Collir J. R.; Elongationla Viscosity of Polymer Melts: A Lubricated Skin Core Flow Approach; *J. Appl. Polym. Sci.*; **59**, 1305-14, 1996.