

رئومترهای چرخشی و کاربردهای آنها

Rotational Rheometers and their Applications

علی اکبر یوسفی *

تهران، پژوهشگاه پلیمر ایران، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

دریافت: ۱۳۹۴/۴/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۸۰

چکیده

در این مقاله انواع رئومترهای چرخشی و هندسه‌های اندازه‌گیری بکار رفته در آنها بررسی شده است. همچنین، معادلات لازم در محاسبه توابع رئولوژیکی در هر یک از این هندسه‌ها معرفی شده و درباره مزایا و معایب هر بک و منابع خطا و روشهای پرمیز از آنها بحث شده است. مشاهده می‌شود که هندسه استوانه‌های هم محور برای گرانرویهای کم مناسب است، ولی با استفاده از آن اندازه‌گیری نیروهای عمودی دشوار است. هندسه صفحه‌های موازی نیز از جهت سهولت کاربرد مناسب است، ولی برای محاسبه توابع رئولوژیکی تقریب زیادی در آن بکار می‌رود. در هندسه مخروط - صفحه محاسبه توابع رئولوژیکی تقریباً بدون تقریب است و تنها مشکل عدم کارایی آن در کار با مواد کامپوزیتی است. هندسه صفحه‌های نامم محور به دلیل استفاده از چرخش ساده برای تولید حرکات نوسانی مورد توجه است. کاربردهای بیشتر هندسه‌ها و حالت‌های مختلف رئومترهای چرخشی نیز گزارش شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: رئولوژی، رئومتر چرخشی، مخروط و صفحه، صفحه‌های موازی، استوانه‌های هم‌محور

Key Words: rheology, rotational rheometer, cone and plate, parallel plates, coaxial cylinders

مقدمه

در همین محدوده از سرعت برش شروع به خروج از بین گاف دستگاه می‌کند (بجز در مورد استوانه‌های هم محور) و جریان آشفته می‌شود که در این صورت توابع رئولوژیکی اندازه‌گیری شده قابل اعتماد نخواهند بود. در این شرایط استفاده از رئومترهای موین [۱] اجتناب ناپذیر می‌شود. در مقابل، رئومترهای چرخشی در حالت‌های پایا و نوسانی قادر به تولید اشکال مختلف تغییر شکل در سیال مورد مطالعه‌اند که رئومترهای موین این قابلیت را ندارند. در بسیاری شرایط مانند فرایند روزن رانی سرعت برش خیلی زیاد و در حد سرعت‌های برش اعمال شده به وسیله رئومترهای موین است (روان کشسانی غیرخطی). شرایطی نیز وجود دارد که تغییر شکلها بسیار کوچک بوده و ساختار سیال به هم ریخته نمی‌شود. ملموسترین مثال از این نوع بازگذاری لرزاندن یک ظرف زله

رئومترهای چرخشی خانواده بسیار مهمی از وسایل اندازه‌گیری توابع ماده رئولوژیکی‌اند. کار با این نوع رئومترها ساده است و در شرایط معمولی در سرعت‌های برش کم و متوسط نتایج معتبری را بدست می‌دهند. یک ضعف ذاتی این رئومترها عدم حصول نتایج دقیق در ناحیه سرعت‌های برش زیاد است که رفع آن در شرایط عادی امکان‌پذیر نیست. در سرعت‌های برش بیشتر از 1 s^{-1} نمونه مذاب پلیمر مورد آزمایش از وسط بریده شده و در نهایت در سرعت‌های برش بیشتر از میان گاف (gap) سیستم اندازه‌گیری خارج می‌شود. در مورد نمونه‌های با گرانروی کمتر، این مواد در اثر نیروی گریز از مرکز و جریانهای ثانویه

*پایانگار: a.yousefi@proxy.ipi.ac.ir

است که در آن نیروها و تغییر شکلها برای فروپاشی ساختمان ژله به اندازه کافی بزرگ نیست. در این گونه شرایط، حالت نوسانی رتومترهای چرخشی ابزار مناسبی است.

از مزایای دیگر این نوع رتومترها قابلیت استفاده از هندسه نمونه و سیستمهای اندازه گیری گوناگون است. این نوع هندسه ها دستیابی مستقیم به سطوح برش را امکان پذیر می سازد و پرکردن و تمیز کردن آنها را نسبت به رتومترهای مویین ساده تر می سازد. به عنوان معایب رتومترهای چرخشی می توان از کامپلیانس (compliance) دستگاه و اصطکاک محور بخش متحرک سیستم اندازه گیری نام برد که مورد دوم از طریق استفاده از بالشتک هوا (air-bearing) رفع می شود. همان طور که گفته شد، سیستمهای اندازه گیری مختلفی در رتومترهای چرخشی بکار می روند که در این مقاله به معرفی آنها و معادلات مربوط پرداخته خواهد شد.

اساس نظری

انواع سیستمهای اندازه گیری

بطور کلی دو نوع رتومتر چرخشی وجود دارد:

- رتومترهای هم محور (concentric rheometers) که دارای دو بخش اندازه گیری ثابت و متحرک بوده و در هر حالت محور چرخش آنها منطبق بر یکدیگر است.

- رتومترهای خارج از محور (eccentric rheometers) که در آنها دو بخش اندازه گیری هم محور بوده و چنین بنظر می آید که یکی نسبت به دیگری جابجا شده است.

رتومترهای چرخشی بسته به نحوه اعمال تغییر شکل یا نیرو نیز به دو دسته زیر تقسیم می شوند [۲]

- رتومترهای با کرنش ثابت یا کنترل شده: این نوع رتومترها به نمونه مورد آزمایش حساس نیستند. اغلب این نوع رتومترها مجهز به موتورهای از نوع جریان مستقیم با کنترل وضعیت خودکار مدار بسته اند. این نوع موتورها از نوع همزمانند و سرعت یا تغییر شکل معینی را به یکی از دو بخش اندازه گیری اعمال می کنند.

از آنجا که هیچ رابطه ای میان قدرت و میدان بخش ثابت موتور یعنی جریان و گشتاور حاصل وجود ندارد، یک ترانس دیوسر دیگر برای اندازه گیری نیروی وارد به سیستم اندازه گیری مقابل لازم است. روشهای گوناگون مانند مبدل دیفرانسیلی متغیر خطی (linear variable differential transformer, LVDT) یا ترانس دیوسر توازن محدد نیرو (force-rebalance transducer, FRT) برای اندازه گیری بکار گرفته شده اند. اگرچه پاسخ گذرای موتورهای جریان مستقیم رتومترهای

کرنش ثابت بسیار سریع است، عامل محدود کننده در اندازه گیریهای عبوری با این نوع رتومترها ترانس دیوسر است. مشکل دیگر آنکه اگر این نوع رتومترها در آزمونهایی بکار برده شوند که نیاز به اعمال تنش معین باشد، یک مدار اندازه گیری لازم است که با اختلاف زمانی همراه بوده و از این رو کسازایی آنها محدود می شود. البته با پیشرفتهای جدید در طراحی موتورهای جریان مستقیم بر این مشکل غلبه شده است [۲].

- رتومترهای با تنش ثابت یا کنترل شده: بیشتر این نوع رتومترها به موتورهایی موسوم به drag cup motor مجهزند که موتورهایی از نوع جریان متناوب اند و به موتورهای نامعزمان (asynchronous) موسومند. در این نوع موتورها بخش چرخنده (rotor) به صورت هم فاز با میدان مغناطیسی اعمال شده در بخش ساکن (stator) حرکت نمی کند. سرعت بخش چرخنده خیلی آهسته تر از فرکانس چرخش میدان بخش ساکن است. در واقع، این اختلاف سرعت است که باعث انقباض میدان مغناطیسی می شود. از طریق میدان بخش چرخنده سعی می توان موتور را کنترل کرد، زیرا جریان در بخش ساکن را به دو بخش مغناطیس کننده و تولید کننده گشتاور نمی توان تقسیم کرد. این موضوع به نارسایی این نوع موتورها و رتومترها در تنظیم گشتاور طی آزمونهایی تغییر شکل یا سرعت برش مرحله ای منجر می شود. مزیت این نوع موتورها سادگی طراحی الکترونیکی آنها و عدم نیاز به ترانس دیوسر و مدار اندازه گیری است. علت این امر موتور رتومتر است که در آن تنش اعمال شده و پاسخ ماده مورد آزمایش هر دو قابل سنجش است.

دسته اول این نوع رتومترها دقت خوبی در محدوده فرکانسهای زیاد دارد و دسته دوم در محدوده فرکانسهای کم نسبت به دیگری از دقت بیشتری برخوردار است [۲]. انواع رتومترهای تجاری در مرجع ۴ آمده است.

رتومترهای چرخشی هم محور

هندسه استوانه های هم محور

شناخته شده ترین نوع رتومترهای چرخشی استوانه های هم محور است. در این هندسه دو بخش وجود دارد: استوانه داخلی، IXO_1 ، و استوانه خارجی، cup .

سیال مورد مطالعه در فضای بین این دو استوانه قرار می گیرد. این هندسه در شکل ۱ نشان داده شده است. این هندسه در دو نوع رتومتر چرخشی بکار می رود. اگر استوانه داخلی بچرخد و دیگری ثابت باشد آن را رتومتر کوئت (Couette) و اگر استوانه خارجی بچرخد رتومتر را سرل (Searle) می نامند.

سرعت چرخش در رتومترهای چرخشی با Ω نشان داده می شود و فرض می شود که هیچ گونه اثر انتهایی (edge effect) با

$$\gamma_1 = \frac{\gamma \Omega}{1 - [R_i/R_o]^2} \quad (2)$$

در اینجا R_o شعاع استوانه خارجی است. در این شرایط گرانروی یک سیال نیوتنی از معادله زیر بدست می‌آید (معادله مارگولس):

$$\eta = \frac{r_1}{\gamma_1} = \frac{M}{4\pi L \Omega} \left[\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right] \quad (3)$$

اگر فاصله گلاف بین دو استوانه در مقایسه با شعاع آنها کوچکتر باشد، تغییرات سرعت برش در این فاصله کم است و معادله بصورت زیر ساده می‌شود:

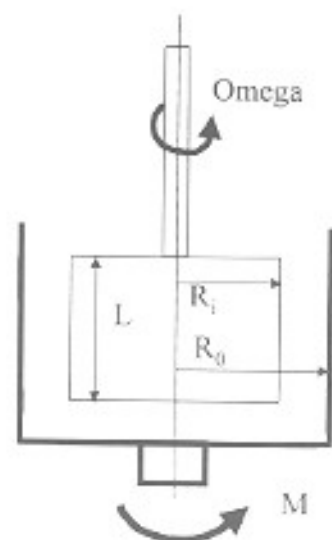
$$\eta \approx \frac{\Omega R_i}{R_o - R_i} \quad (4)$$

اگر نسبت $R_o/R_i = 0.99$ باشد، تغییرات سرعت برش در سراسر گلاف برابر ۲ درصد است. بنابراین، در شکافهای کوچک جریان ایجاد شده بسیار نزدیک به برش ساده است.

دیگر معادلات مربوط به این نوع هندسه و نحوه ارتباط کمیت‌های قابل اندازه‌گیری به توابع رئولوژیکی در کتابهای مرجع آورده شده‌اند [۴-۷].

معایب

در این نوع هندسه عواملی مانند لغزش، آثار انتهایی استوانه‌ها، اینرسی، جریان ثانویه، گرمایش برشی و تنشهای عمودی جریان را از جریان کوئت ایده‌آل منحرف می‌سازند [۵-۷]. این آثار در مراجع به تفصیل توضیح داده شده‌اند. تنها در مورد آثار انتهایی باید گفت که با استفاده از اشکال مختلف استوانه داخلی می‌توان این نوع خطا را به حداقل رساند (شکل ۲).

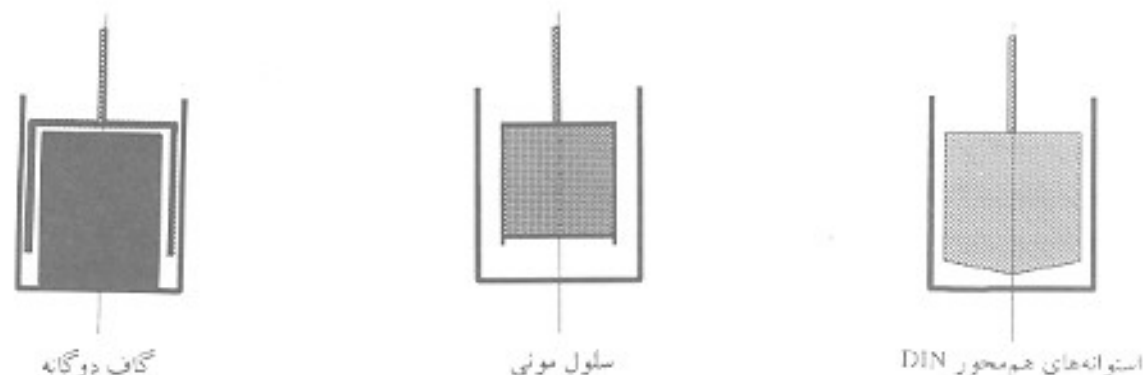


شکل ۱ - هندسه استوانه‌های هم محور.

جریان ثانویه وجود ندارد. گشتاور (M) لازم برای چرخاندن استوانه گردان یا ثابت نگه داشتن استوانه ثابت در جای خود از طریق معادله زیر به تنش برشی روی دیواره استوانه داخلی (τ_1) مربوط است:

$$M(R_i) = 2\pi R_i^2 L \tau_1 \quad (1)$$

در این معادله R_i و L بترتیب شعاع و طول استوانه داخلی است. اگرچه معادله ۱ در مورد هر سیالی صادق است، ولی بدست آوردن معادله‌ای صریح برای سرعت برش روی دیواره استوانه داخلی بدون فرض شکلی برای تابع سرعت، $\eta(\dot{\gamma})$ امکان‌پذیر نیست. در مورد یک سیال نیوتنی سرعت برش روی دیواره داخلی $\dot{\gamma}_1$ به صورت زیر است:



شکل ۲ - شکلهای کاهش دهنده آثار انتهایی.

این هندسه گشتاور و نیروی عمودی لازم برای ثابت نگه داشتن گکاف بین دو صفحه اندازه گیری می شود. وقتی یکی از صفحه ها ثابت و دیگری با سرعت Ω می چرخد، با فرض اینکه هیچ لغزشی در سطح دو صفحه وجود ندارد و آثار اینرسی قابل چشمپوشی است، سرعت برش از معادله زیر بدست می آید [۶]:

$$\gamma(r) = \frac{R\Omega}{h} \quad (5)$$

سرعت برش در مرکز صفحه ها برابر صفر و در لبه های آنها حداکثر است. گشتاور M روی صفحه ثابت برابر است با [۵]:

$$M = 2\pi \int_0^R r^2 \tau_{\gamma} r dr \quad (6)$$

از اینجا گرانروی به صورت تابعی از سرعت برش در لبه دو صفحه ($r=R$) محاسبه می شود:

$$\mu(\gamma_R) = \frac{M}{2\pi R \gamma_R} \left[3 + \frac{d \ln M}{d \ln \gamma_R} \right] \quad (7)$$

اولین اختلاف نیروهای عمودی N_1 بطور تقریبی از معادله زیر قابل محاسبه است [۷]:

$$N_1(\gamma_R) = \frac{F}{\pi R} \left[2 + \frac{d \ln F}{d \ln \gamma_R} \right] \quad (8)$$

معایب

اثر اینرسی و گرمایش برشی همانند هندسه های دیگر در این هندسه نیز ایجاد خطا می کنند. یک منبع خطای دیگر نقصان در لبه ها (edge failure) است که این مورد تنها با هندسه مخروط و صفحه مشترک است و برای پرهیز از آن باید بین دو صفحه را بطور مناسب سیال پر کرد و در اندازه گیریها از سرعتهای برش متوسط ($1 s^{-1}$) فراتر نرفت. در این هندسه کرنش برشی و سرعت برش ناهمگن است و به موقعیت محل اندازه گیری در بین دو صفحه بستگی دارد. استفاده از شکافهای کوچک تا حدی از این مشکل می کاهد. در مرجع [۶] گزارش شده است که با کاهش گکاف تا $3/2 \mu m$ سرعت برش $10^5 s^{-1}$ نیز بدون اشکال قابل دسترسی است. در گکافهای کوچک هم محور نبودن اهمیت زیادی ندارد [۶].

مزایا

تهیه نمونه و سوار کردن آنها برای مواد بسیار گرانرو و جامدات نرم بسیار ساده است. سرعت برش و کرنش برشی را بطور مستقل با سرعت

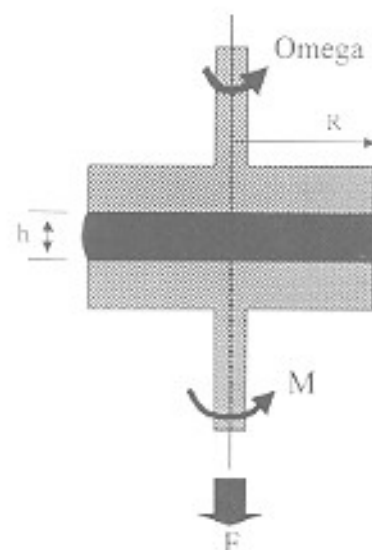
به دلیل وجود سطح اندازه گیری وسیع و حساسیت زیاد این هندسه برای اندازه گیری توابع رئولوژیکی سیالات دارای گرانروی کمتر از $100 Pa.s$ مناسب است. از آنجا که نمونه در اثر چرخش استوانه ها از گکاف دستگاه در سرعتهای برش زیاد بیرون رانده نمی شود، این نوع رئومتر برای کار در این شرایط مناسب است. در مقایسه با هندسه مخروط و صفحه نشست ذرات در تعلیقها در این هندسه اثر کمتری روی نتایج دارد.

اندازه گیری تنشهای عمودی در هندسه استوانه های هم محور دشوار است، زیرا علامت حاصل را باید از طریق محور چرخان منتقل کرد. با این وجود پدیده بالا رفتن از میله (rod climbing) را در اندازه گیری تنشهای عمودی در این نوع رئومتر می توان بکار برد.

هندسه صفحات موازی

این هندسه برای اولین بار در سال ۱۹۳۴ توسط مونی پیشنهاد شد و بطور وسیع در صنایع لاستیک مورد استفاده قرار گرفت. در ۱۹۴۶ برای اولین بار از طریق فشار (thrust) بین دو صفحه نیروهای عمودی را اندازه گیری کرد.

همان طور که دیده خواهد شد، جریان بین دو صفحه موازی از بسیاری جهات به جریان در هندسه مخروط و صفحه شباهت دارد. از این رو، اغلب رئومترها طوری ساخته می شوند که هر دو نوع صفحات موازی و مخروط و صفحه قابل سوار شدن روی آن باشند. برخلاف هندسه مخروط و صفحه، در دو صفحه موازی جریان همگن نیست. هندسه دو صفحه موازی در شکل ۳ نشان داده شده است [۶].



شکل ۳- هندسه دو صفحه موازی.

می‌شود (مثلاً $150 \mu\text{m}$ برای مخروط 4°). در این هندسه تنش برشی معادله‌ای صریح دارد و مستقل از موقعیت و به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\tau_{\varphi\theta} = \tau_{\varphi\theta} = \frac{\gamma M}{2\pi R^2} \quad (9)$$

M در اینجا گشتاور موازنه شده روی صفحه است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M = 2\pi \int_0^R \tau_{\varphi\theta} r^2 dr = \frac{\gamma}{3} \pi R^3 \tau_{\varphi\theta} \quad (10)$$

سرعت برش (γ) به صورت مستقیم با سرعت زاویه‌ای و زاویه مخروط رابطه دارد:

$$\gamma = \frac{\Omega}{\beta} \left[1 - \beta^2 + \frac{\beta^4}{3} \right] = \frac{\Omega}{\beta} \quad (11)$$

علاوه بر این، تنشهای عمودی نیز رابطه‌ای صریح با کمپتهای قابل اندازه‌گیری دارد که این هندسه را وسیله‌ای مناسب برای اندازه‌گیری اولین اختلاف تنشهای عمودی می‌سازد. این معادله صریح به صورت زیر است:

$$N_1 = \tau_{11} - \tau_{22} = \frac{\gamma F}{\pi R^2} \quad (12)$$

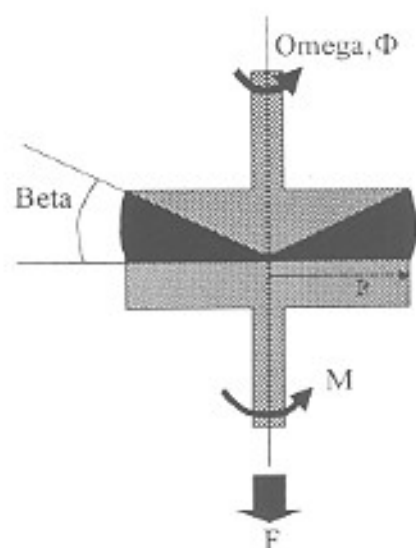
در اینجا F نیروی عمودی حاصل یا فشار کل روی صفحه و R شعاع صفحه است. از آنجا که سرعت برش و تنش برشی در سراسر گتاف ثابت است، گرانروی را بسادگی از گشتاور داده شده در معادله ۱۰ می‌توان محاسبه کرد [۷]. با جایگذاری معادلات ۱۰ و ۱۱ در بخش اول معادله ۳، گرانروی سیال قابل محاسبه است:

$$\tau_{\varphi\theta} = \tau_{11} - \tau_{22} = -\eta \gamma \quad (13)$$

$$\eta = \frac{\gamma \theta_c T}{2\pi R^2 \Omega} \quad (14)$$

با وجود معادلات صریح برای تنش برشی و کرنش و با استفاده از معادلات مربوط در یک اندازه‌گیری نوسانی می‌توان توابع رئولوژیکی سیال را محاسبه کرد.

در مورد تنشهای عمودی و اختلاف آنها کار خیلی آسانتر است و تنها مشکل در طراحی، انتخاب ترانس دیوسر مناسب برای اندازه‌گیری فشار کل روی صفحه است.



شکل ۴. هندسه مخروط و صفحه.

چرخش یا تغییر گتاف می‌توان تغییر داد. با تغییر گتاف در اندازه‌گیریها لغزش در دیواره را می‌توان تعیین کرد. نقصان در لبه‌ها را با کاهش گتاف می‌توان به تاخیر انداخت. این هندسه در تعیین توابع رئولوژیکی مواد بسیار گرانرو در کرنشهای کوچک برتری دارد. اگر داده‌های این هندسه با داده‌های فشار هندسه مخروط و صفحه همراه شوند می‌توان N_1 را اندازه‌گیری کرد.

هندسه مخروط و صفحه

در سال ۱۹۳۴ برای اولین بار مونی و ایوانت هندسه مخروط و صفحه را در اندازه‌گیری گرانروی بکار بردند. راسل در ۱۹۴۶ این هندسه را برای اندازه‌گیری تنشهای عمودی بکار برد. مطالعات وی در نهایت به پیدایش رئوگونومیتر وایزبرگ و دستگاه فرانتی شرلی منجر شد. بدون شک هندسه مخروط و صفحه که سرعت برش در همه جای آن ثابت است و مستقیماً قادر به اندازه‌گیری N_1 از طریق فشار کل است، معمولترین هندسه در مطالعه سیالات غیر نیوتنی و خواص آنهاست. نمای ساده شده این هندسه در شکل ۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، بخش مخروطی یک مخروط کامل نیست، بلکه راس آن تراشیده شده است (truncated cone). در واقع در این هندسه هیچ گتافی بین این دو بخش نباید وجود داشته باشد. در صورت کامل بودن مخروط تماس فلز-فلز باعث انتقال مستقیم گشتاور و نیرو از بخش متحرک به بخش ثابت می‌شود و پاسخ دستگاه خطای زیادی خواهد داشت. برای پرهیز از این مشکل راس مخروط تراشیده می‌شود. هرچه زاویه مخروط بزرگتر باشد ارتفاع بخش تراشیده شده بیشتر و در نهایت یک گتاف برای مجموعه تعریف

برینکام است [۶]. یک اشکال مهم این هندسه عدم کارایی آن در سنجش خواص رئولوژیکی مواد مرکب است. کوچکگی گلاف باعث قرار گرفتن ذرات جامد در بین این فاصله شده و دو بخش ثابت و متحرک از این طریق در تماس باهم قرار می‌گیرند و در نتیجه در سنجش گشتاور و نیروهای عمودی خطا ایجاد می‌شود. در محدوده گرانش‌روبهایی کم تصحیحات اینرسی، جریان ثانویه و خارج شدن نمونه از گلاف تعیین کننده‌اند.

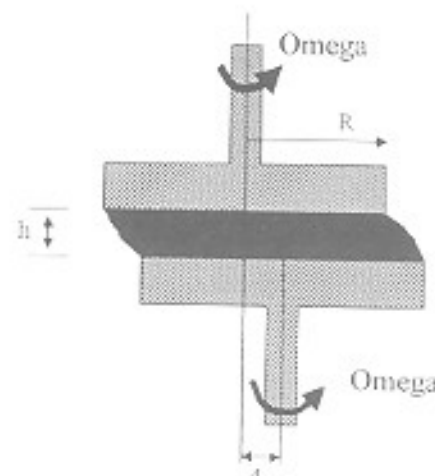
مزایا

این هندسه مناسبترین دستگاه اندازه‌گیری تنشهای عمودی است. روابط صریح و نسبت‌ساده‌ای بین کمیت‌های قابل اندازه‌گیری و توابع رئولوژیکی وجود دارد و کرنش و سرعت برش در همه جای گلاف دستگاه یکنواخت است. این هندسه در مطالعه خواص رئولوژیکی در ناحیه روان‌کشسانی غیرخطی مفید است. مواد با گرانش‌روبهایی مختلف قابل مطالعه‌اند و محدودیت در گرانش‌روی زیاد تنها وقتی شروع می‌شود که نقصان کشسان در لبه‌ها شروع می‌شود.

رئومترهای چرخشی خارج از محور

این نوع رئومتر براساس آزمون خستگی میله‌های فلزی عمل می‌کند که در آن یک انتهای میله در نگهدارنده چرخان قرار دارد و در انتهای دیگر وزنه‌ای آویزان شده است. در این شرایط محیط خارجی میله کشش و فشار دوره‌ای را تحمل می‌کند. این وسیله‌ای است که از اواخر ۱۸۰۰ تاکنون به عنوان آزمایشگر خستگی و هلر شناخته می‌شود. مزیت این دستگاه آن است که به کمک یک نیروی پایا در نمونه تغییر شکل‌های نوسانی ایجاد می‌شود [۴].

چگونگی ایجاد این نوع تغییر شکل بین دو صفحه بدین ترتیب است که ابتدا سیالی بین دو صفحه که هر دو می‌توانند آزادانه حول محورهایشان بچرخند قرار می‌گیرد. اشاره می‌شود که محورهای این دو صفحه بر یکدیگر منطبق نبوده، ولی موازی است و اختلاف فاصله بین محور صفحه‌ها برابر d است (شکل ۵). سپس، صفحه بالایی با سرعت Ω چرخانده می‌شود. محور صفحه پایینی بدون اصطکاک است و اصولاً صفحه پایینی با سرعتی خیلی نزدیک به Ω شروع به چرخش می‌کند. در این شرایط کشش سطحی سیال را در بین دو صفحه نگاه می‌دارد. حرکت این دو صفحه خارج از محور تولید نوعی حرکت برشی می‌کند که در آن اجزای سیال نسبت به یکدیگر در یک مسیر دایره‌ای حرکت می‌کنند. تغییر شکل ایجاد شده مقدار ثابتی دارد، ولی پیوسته در حال تغییر جهت است. برای درک بهتر مطلب می‌توان این موضوع را با قرار دادن کف دو دست در مقابل هم و چرخاندن یکی از آنها در مسیر دایره‌ای تحقیق کرد [۵]. این نوع رئومتر ابتدا توسط جنت در ۱۹۶۰



شکل ۵. صفحه‌های گردان خارج از محور (رئومتر مورب ماکسول).

معایب

آثار اینرسی و جریان ثانویه باعث خطا در اندازه‌گیری نیروهای عمودی و اختلاف آنها می‌شود که در این صورت باید تصحیح زیر در معادله ۱۲ انجام شود [۶].

$$N_1 = \frac{2\Omega^2 R^2}{\pi R^2} = \frac{2}{\pi} \rho \Omega^2 R^2 \quad (15)$$

مطالعات [۷] نشان می‌دهد که با توجه به گشتاور اندازه‌گیری شده (M) در این هندسه با مقدار نظری آن (M_0) تفاوت داشته و بنابراین باید تصحیحی به صورت زیر باید در آن انجام شود [۴]:

$$\frac{M}{M_0} = 1 + \frac{1}{10} \text{Re}^{-2}, \quad \text{Re} = \frac{\rho \Omega^2 R^2}{\eta} \quad (16)$$

در اینجا Re عدد رینولدز، ρ چگالی سیال و η گرانش‌روی نیوتنی سیال است. در این هندسه مشاهده شده است که زاویه مخروط (θ) اثر زیادی روی پاسخ دستگاه دارد. از این رو، برای حصول نتایج رئولوژیکی موفق زمان پاسخ دستگاه باید از زمان آسایش (t_0) ماده مورد آزمایش خیلی کوچکتر باشد. گرمایش برشی نیز باعث کاهش گرانش‌روی و در نتیجه کاهش گشتاور لازم برای حفظ حرکت مخروط می‌شود. با استفاده از معادله زیر این کاهش گشتاور تصحیح می‌شود:

$$\frac{M}{M_0} = 1 - \frac{b\Omega R}{\tau_0 n} \quad (17)$$

در این معادله b حساسیت دمایی گرانش‌روی قانون توانی است و Br ثابت

معرفی و سپس توسط ماکسول معمول شد [۶].

در این هندسه دو مولفه نیرو در جهت جابجایی k و جهت عمود بر آن به صورت تابعی از سرعت چرخش که معادل فرکانس است اندازه گیری می شوند. از این نیروها می توان G^* ، η^* و F_c و مولفه های آنها را محاسبه کرد. برای یک جسم کاملاً کشسان نیروی ثابت (F_c) ایجاد شده در امتداد k و به ازای مقدار جابجایی آن روی سطح بالایی میله ای با شعاع R و طول h از معادله زیر محاسبه می شود:

$$F_c = -G\pi R^2 \frac{d}{h} \quad (18)$$

در اینجا G مدول برشی میله کشسان است. در مورد یک سیال نیوتنی در نمونه تنها اتلاف انرژی انجام می شود. بنابراین، سرعت برش در جهت جابجایی k صفر بوده و $F_c = 0$ است و سرعت برش در جهت عمود بر آن برابر است با:

$$\gamma_d = \Omega \frac{d}{h} \quad (19)$$

پس، نیروی اعمال شده در جهت عمود (F_v) در مورد یک سیال کاملاً گرانرو به صورت زیر است:

$$F_v = -\pi R^2 \eta \Omega \frac{d}{h} \quad (20)$$

که در آن η گرانروی سیال است. این نیروها به شکل زیر با توابع رئولوژیکی بستگی دارند:

$$G' = \Omega \eta' = \frac{h F_v}{\pi R^2 d} \quad G'' = \Omega \eta'' = \frac{h F_c}{\pi R^2 d} \quad (21)$$

مثلاً در نتیجه:

$$F^*(\Omega) = F_v - F_c = -\frac{\pi R^2 d}{h} (G^*(\Omega)) \quad (22)$$

در اینجا η' و G' به ترتیب گرانروی دینامیک و مدول کشسان است، در حالی که η'' و G'' به ترتیب مولفه مجازی گرانروی مختلط (viscosity complex) و مدول اتلاف است. هندسه های خارج از محور دیگری نیز وجود دارند که در مراجع ۵ و ۶ درباره آنها بحث شده است.

معایب

در این رئومترها اگر دامنه کرنش $(\gamma = d/h)$ بزرگ باشد، معادلات ۲۱ صادق نبوده و در محاسبه توابع رئولوژیکی خطا ایجاد می شود. در

محاسبه این معادلات آثار اینرسی در نظر گرفته شده اند که در مورد سیالات با گرانروی زیاد مشکلی به وجود نمی آید. ولی سیالات با گرانروی کم حتی در سرعت های کم شروع به خروج از گلاف می کنند. در محاسبه معادلات رئولوژیکی این هندسه فرض بر آن است که دو صفحه با سرعت یکسان می چرخند. با وجود این، مشاهده شده است که بین سرعت چرخش صفحه آزاد (Ω_f) با سرعت صفحه چرخان (Ω_D) دارای شعاع R و فاصله جابجایی k معادله $[\Omega_f / \Omega_D] = 1 - 2(d/R)^2$ برقرار است. در مورد سیالات با گرانروی بیشتر از 10^5 پاس تنها 0.5% درصد کاهش سرعت وجود دارد.

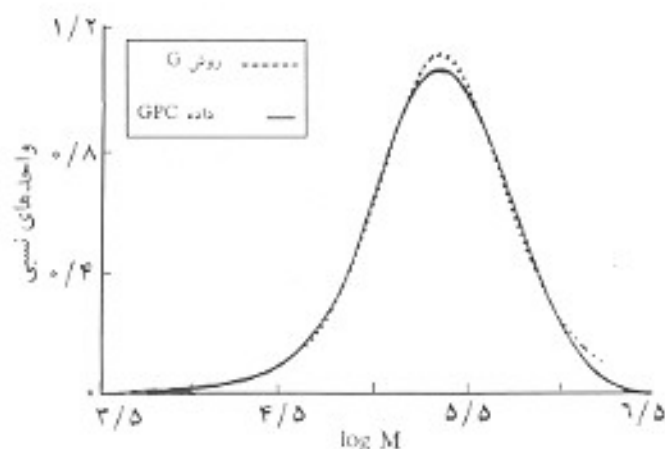
میدان جریان در نزدیکی سطح مشترک هوا و سیال در لبه صفحه ها تقریباً همگن و این باعث کاهش دقت در اندازه گیری توابع ماده می شود. در عین حال، مطالعات نشان داده است که این آثار منابع خطای خیلی مهمی نیستند. منبع خطای دیگر گرمایش گرانرو است که باعث بالا رفتن دمای سیال می شود. نیروهای عمودی نیز در یک دستگاه غیر مجهز باعث افزایش گلاف می شوند.

مزایا

مزیت عمده این رئومترها در استفاده از چرخش ساده و عدم نیاز به موتور نوسانی برای تولید نوسان است.

کاربردها

تعیین توزیع وزن مولکولی (کنترل کیفیت محصولات پلیمری)
 کیفیت مواد پلیمری مانند پلی اولفینها معمولاً به کمک آزمون شاخص جریان مذاب معین می شود. در واقع از این طریق توزیع وزن مولکولی پلیمرهای نجاری کنترل می شود. از آنجا که تعیین شاخص جریان مذاب یک آزمون رئولوژیکی ساده شده است و توابع رئولوژیکی شناخته شده ای وجود دارند که با وزن مولکولی و توزیع آن رابطه دارند، از این رو رئومترهای موین و بطور ویژه چرخشی در محاسبه و استخراج توزیع وزن مولکولی پلیمرهای خطی از داده های رئولوژیکی بکار گرفته می شوند [۲۰-۹]. این روش اکنون در حال توسعه است و شروع به رقابت با روشهای کروماتوگرافی ژل تراوایی GPC کرده است. از مشکلات GPC می توان به تخریب زنجیرهای پلیمری در اثر اعمال برش و نامخلول بودن بسیاری از پلیمرها و حساسیت پایین و نبود درجه بندی مناسب در مورد مولکولهای کوچک و الیگومرها اشاره کرد [۱۰]. در این روش، ابتدا توابع رئولوژیکی پلیمر مورد نظر از یکی از روشهای اندازه گیری بدست می آید و عملیات ریاضی برای محاسبه طیف آسایش نمونه به کمک رایانه انجام می گیرد. سپس، طیف آسایش در محاسبه مجدد توابع رئولوژیکی بکار می رود و پس از اطمینان از صحت طیف، محور زمانهای آسایش بدست آمده به وزنه های مولکولی

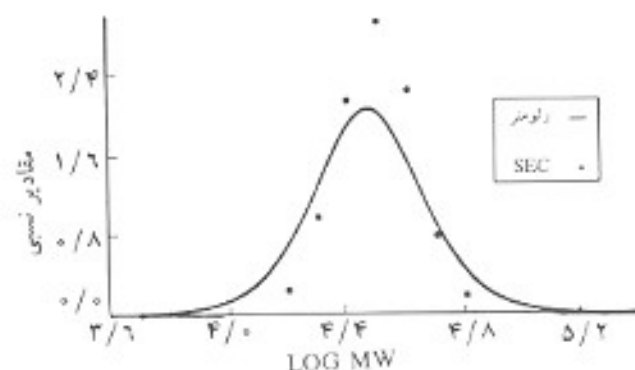


شکل ۸- توزیع وزن مولکولی بدست آمده از دو روش GPC و رثومتري در مورد يک پليمر خالص.

مثلا فراورش پليمرها و رفتار قازي و خواص سطح مشترک سيستمهاي چند قازي. نفوذ زنجيرهاي پليمری در سطح مشترک دو پليمر به عواملی مانند زمان، آمایش زمينه، دما، فشار، وزن مولکولی و توزیع آن، درصد ترکیب، انحلال پذیری و سازگاری، ساختار مولکولی و شیمیایی و شکل فضایی سطح بستگی شدید دارد. روشهای گوناگون مانند پراش نوترون، پرتو ایکس و روشهای دیگر در اندازه گیری نفوذ پليمرها بکار گرفته شدند. از عيوب این روشها عدم کار در حالت جریان ماده و نیاز به يک ماده فعال است که ممکن است روی سرعت نفوذ اثر بگذارد. همانطور که مشخص است، نفوذ پليمرها به عواملی بستگی دارد که با توابع رئولوژیکی مرتبطاند. از این رو، از این طریق می توان نفوذ زنجيرهاي پليمری را در يکديگر بدست آورد. قبلا روی این موضوع کار شده است [۲۲-۲۵]. در این نوع پژوهشها يک مجموعه ساندويچی چند لایه از پليمرهاي موردنظر در بين سيستم اندازه گیری رثومتر چرخشی (دو صفحه موازی) قرار داده شده و دمای نمونه به بالای دمای انتقال شیشه ای پليمر رسانده می شود. سپس، آزمون نوسانی به صورت فرکانس ثابت یا پويش فرکانس در زمانهای مختلف روی نمونه ها انجام می شود. از آنجا که حرکت زنجيرهاي پليمری در حال نفوذ کردن به صورت خزشی است، معادلاتی برای ضریب نفوذ خزشی در سطح مشترک همگن و ناهمگن مرتبط با توابع رئولوژیکی بدست می آید. يک نمونه از ضریب نفوذ دو جانبه در سطح مشترک ناهمگن پلی متیل متاکریلات و کوپليمر استيرن آکریلونیتریل در شکل ۹ نشان داده شده است.

مطالعه ساختارهای زل شونده

تغییرات ساختاری و شیمیایی مواد معمولا در حالت محلول به وسیله

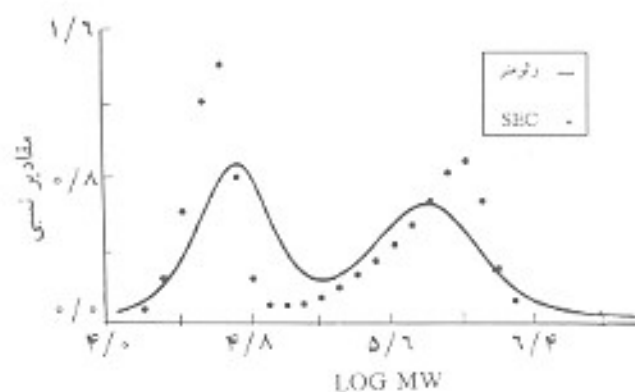


شکل ۶- مقایسه روش GPC و رثومتري در محاسبه توزیع وزن مولکولی يک پليمر خالص.

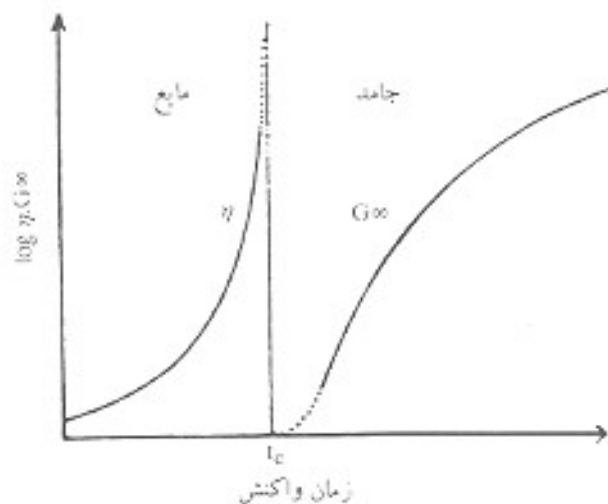
مربوط تبدیل می شوند. مقدار طیف به ازای هر زمان آمایش نیز به درصد یا توزیع نسبی آن تبدیل می شود. مفاهيم و مشکلات ریاضی این روش توسط اندرسون مرور شده است [۲۱]. دو نمونه از توزیع وزن مولکولی بدست آمده از روشهای رئولوژیکی و مقایسه آنها با نتایج بدست آمده از GPC در شکلهاي ۶ تا ۸ آورده شده اند. همان طور که مشاهده می شود، توافق نسبتا خوبی بين روش رئولوژی و روش GPC وجود دارد، در حالی که در مورد آمیزه های پليمری اختلاف نسبتا زیادی بين دو روش مشاهده می گردد که احتمالا به دلیل آثار بين سطح و عدم اختلاط کامل دو جزء سازنده است که در روش رئولوژیکی در نظر گرفته نشده است. این عدم سازگاری نتایج در مرجع ۱۸ نیز مشاهده می شود.

تعیین نفوذ در سطح مشترک پليمرها

نفوذ پليمرها در يکديگر در بسیاری از موارد مسئله بسیاری مهمی است،



شکل ۷- مقایسه روش GPC و رثومتري در تعیین توزیع وزن مولکولی يک آمیزه پليمری.



شکل ۱۰- نمودار تغییر خواص رئولوژیکی مواد ژل شونده.

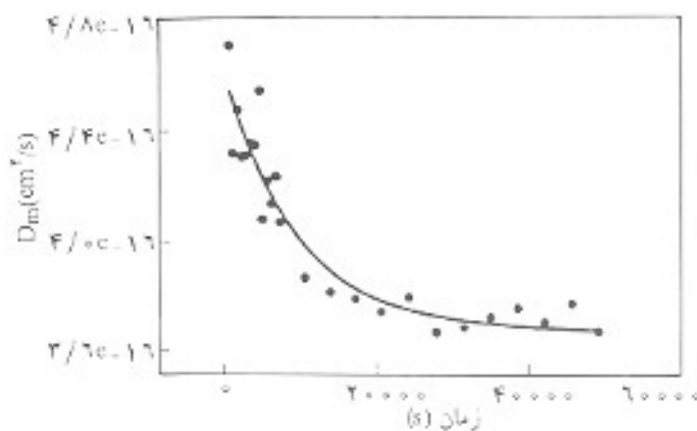
نمی‌شود رئومترهای چرخشی در این زمینه نیز بکار برده شده‌اند و توابع ماده مانند مدول مختلط به خواصی مانند کشش سطحی ارتباط یافته‌اند. [۲۹، ۳۳]

رئومترهای چرخشی حتی در حالت پناپا نیز در ارتباط دادن شکل‌شناسی آمیزه‌های پلیمری به رئولوژی آنها بکار برده شده‌اند. مراجع و مطالب بیشتری در این زمینه موجود است که ذکر آنها نیاز به یک مقاله مروری طولانی دارد [۲۳].

فبر و راهسازی

فبر در دماهای معمولی یک ماده روان کشسان است و بطور وسیعی در جاده و راهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمونهای قدیمی مانند نقطه نرمی و درجه نفوذ که هنوز هم در کشورمان معمولاً قبل از برای برآورد عملکرد فبر در مخلوطهای آسفالتی و طراحی راهها و جاده‌ها بکار برده می‌شدند. متأسفانه این روشها هیچ رابطه علمی و منطقی با شرایط واقعی اعمال بار و تنش بر فبر در جاده نداشتند. از این رو، پژوهشگران بر آن شدند تا روشهای علمی را در شبیه‌سازی، برآورد کارایی و دسته‌بندی فبرها بکار برند. از آنجا که شرایط اعمال تنش بر جاده شرایط نوسانی یا دینامیک است، پژوهشگران رئومتر چرخشی با صفحات موازی در حالت نوسانی را به عنوان یکی از این وسایل برآورد کارایی پذیرفته‌اند [۳۴-۳۵]. از این رو، نسبت مدول مختلط بر سینوس زاویه فاز بدست آمده از این رئومتر جایگزین دو آزمون قدیمی شده و کارایی فبر در دماهای بالا و متوسط و گاهی پایین به وسیله آن تعیین می‌شود.

امروزه، رئومترهای چرخشی بطور وسیعی در تحلیل خواص فبر بکار برده می‌شوند [۳۶-۳۷]



شکل ۹- ضرایب نفوذ دو طرفه به صورت تابعی از زمان جوش خوردن در مورد نمونه‌های PMMA/SAN در ۱۲۰°C.

روشهای شیمیایی کنترل می‌شود و در صورت ژل شدن نمونه، این روشها دیگر کارایی ندارند. اندازه‌گیری خواص مکانیکی نیز تنها در حالت جامد امکان‌پذیر است و حالت ژل قابل بررسی نیست. در واقع، تغییرات در نقطه ژل به صورت نشان داده شده در شکل ۱۰ است. تنها وسیله‌ای که قادر به کار روی نمونه‌ها و مواد ژل شونده قبل و بعد و حتی در هنگام ژل شدن است، دستگاه رئومتر چرخشی مجهز به هندسه اندازه‌گیری مناسب است.

معادلاتی که توابع رئولوژیکی را به شرایط نقطه ژل شدن مربوط می‌سازد در مرجع ۲۶ آمده است. از جهاتی این آزمونها را می‌توان آزمونهای غیر مخرب خواند و در مطالعه ژلهای زیست شناختی بکار برد [۲۷].

صنایع غذایی

علاوه بر استفاده از رئومترهای مووین در تعیین خواص جریان مواد خوراکی در حین عملیات آماده‌سازی و فراورش در واحدهای تولیدی، رئومترهای چرخشی در حالت نوسانی در تعیین ساختار، شدت تورم و وزن مولکولی نیز بکار برده می‌شوند. نمونه‌ای از کاربرد این نوع رئومترها استفاده از آن در تعیین وزن مولکولی بین نقاط شبکه‌ای شدن در شاسته حاصل از ذرت است [۲۸].

آبنازهای پلیمری و رئولوژی سطح مشترک

تهیه آبنازهای پلیمری روش اقتصادی بدست آوردن خواص موردنظر بدون نیاز به ستر پلیمرها و کوپلیمرهای پیچیده و گداهمی مشکل با غیر قابل ستر است. خواص این آمیزه‌های پلیمری شدت تحت تاثیر شکل‌شناسی و سطح مشترک است. از آنجا که در محدوده روان کشسانی خطی شکل‌شناسی و سطح مشترک موجود دستخوش تغییر

مقایسه رئومترهای با هندسه‌های مختلف نشان می‌دهد که هندسه دو استوانه هم محور برای اندازه‌گیری گرانرویهای کم مناسب بوده، ولی اندازه‌گیری نیروهای عمودی با آن دشوار است. هندسه دو صفحه موازی وسیله‌ای مناسب و کار با آن راحت است، ولی مناسبانه در محاسبه توابع رئولوژیکی از تقریب زیادی استفاده می‌شود و سرعت برش به موقعیت در بین دو صفحه بستگی دارد. هندسه مخروط و صفحه وسیله‌ای مناسب برای اندازه‌گیری توابع رئولوژیکی از جمله نشیهای عمودی است و تمام بخشهای نمونه در این هندسه شرایط برشی یکسانی را تحمل می‌کنند. مناسبانه این نوع هندسه در مطالعه مواد پر شده با مواد جامد مانند کامپوزیتها به دلیل برهمکنش فاز جامد با دستگاه اندازه‌گیری مناسب نیست. هندسه خارج از محور نیز در صورت در دسترس نبودن موتورهای نوسانی انتخاب مناسبی برای مطالعه خواص نوسانی ماده مورد مطالعه است. با توجه به کاربردهای وسیع رئومترهای چرخشی در زمینه‌های مختلف فنی، صنعتی و علمی مشخص است که این نوع رئومترها وسایلی بسیار کارا و برای تحقیقات در زمینه مواد پلیمری تعیین کننده‌اند.

مراجع

- P.; *Rheology of Polymeric System: Principles and Applications*; Hanser, New York, 1997.
- Fried J. R.; *Polymer Science and Technology*; Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- Tuminello W. H.; *Relating Rheology to Molecular Weight Properties of Polymers; Encyclopedia of Fluid Mechanics*; 9. CHEREMISINOFF (Ed.), 209-242, Chap. 6, Gulf, Houston, 1990.
- Nguyen T. Q., Yu G. and Kausch H. H., Some Emerging Techniques in Polymer MWD Characterization; *Macromol. Symp.*; **110**, 97, 1996.
- Shroff R. and Mavridis H., New Measures of Polydispersity From Rheological Data on Polymer Melts; *J. Appl. Polym. Sci.*; **57**, 1605, 1995.
- Tuminello W. H., Molecular Weight and Molecular Weight Distribution From Dynamic Measurements of Polymer Melts; *Polym. Eng. Sci.*; **26**, 1339, 1986.
- Carrot C. and Guillet J., From Dynamic Moduli to Molecular Weight Distribution: A Study of Various Polydisperse Linear Polymer; *J. Rheol.*; **41**, 1203, 1997.
- Mavridis H. and Shroff R., Appraisal of a Molecular Weight Distribution to Rheology Conversion Scheme for Linear Polyethylene; *J. Appl. Polym. Sci.*; **49**, 299, 1993.
- Tuminello W. H., Determining Molecular Weight Distributions From Viscosity Versus Shear Rate Flow Curves; *Polym. Eng. Sci.*; **31**, 1496, 1991.
- Carrot C. and Revenu P. and Guillet J., Rheological Behaviour of Degraded Polypropylene: From MWD to Dynamic Moduli; *J. Appl. Polym. Sci.*; **61**, 1887, 1996.
- Wasserman S. H.; Calculating the Molecular Weight Distribution from Linear Viscoelastic Response of Polymer Melts; *J. Rheol.*; **39**, 601, 1995.
- Wood-Adams P. M. and Dealy J. M.; Use of Rheological Measurements to Estimate the Molecular Weight Distribution of Linear Polyethylene; *J. Rheol.*; **40**, 761, 1996.
- Ramkumar D. H. S., Caruthers J. M., Mavridis H. and Shroff R., Computation of the Linear Relaxation Spectrum from Experimental Data; *J. Appl. Polym. Sci.*;

۱- فرهنگزاده سلوی، رئومترهای مویین و کاربردهای آنها، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال دوازدهم، شماره ۴، صفحه ۲۵۲، زمستان ۱۳۷۸.

- Lauer J. and Huck S., Real Controlled Stress and Controlled Strain Experiments with the Same Rheometer; *Proceedings of XIII International Congress on Rheology*; Cambridge, UK, 2000.
- Bafna S. S., The Precision of Dynamic Oscillatory Measurements; *Polym. Eng. Sci.*; **36**, 90, 1996.
- Dealy M. D.; *Rheometers for Molten Polymers, A Practical Guide to Testing and Property Measurement*; Van Nostrand Reinhold, New York, 1982.
- Collyer A. A. and Clegg D. W.; *Rheological Measurement*; Elsevier Applied Science, London, 1988.
- Macosko C. W.; *Rheology: Principles, Measurements and Applications*; VCH, New York, 1996.
- Carreau P. J., De Kee D. C. R. and Chhabra R.

29. Palierne J. F., Linear Rheology of Viscoelastic Emulsions with Interfacial Tension; *Rheologica Acta*; **29**, 204, 1990.
30. Gramschpacher H. and Meissner J., Interfacial Tension between Polymer Melts Measure by Shear Oscillations of their Blends; *J. Rheol.*; **36**, 1127, 1992.
31. Graebing D., Muller R. and Palierne J. F., Linear Viscoelasticity of Incompatible Polymer Blends in the Melt in Relation with Interfacial Properties; *J. Phys.*; **IV**, 3, 1525, 1993.
32. Graebing D., Muller R. and Palierne J. F., Linear Viscoelastic Behaviour of Some Incompatible Polymer Blends in the Melt. Interpretation of Data with a Model of Emulsion of Viscoelastic Liquids; *Macromolecules*; **26**, 320, 1993.
33. Vinckier L., Molenaers P. and Mewis J., Relationship between Rheology and Morphology of Model Blends in Steady Shear Flow; *J. Rheol.*; **40**, 613, 1995.
34. Bahia H. U., Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters: Background and Comparison with Conventional Properties; *Transport Research Record*; **1488**, 1995.
35. *Superpave; Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing*; Asphalt Institute, Superpave Series No. 1, 1996.
36. Yousefi A. A., Ait-Kadi A. and Roy C., Composite Asphalt Binders: Effect of Modified RPE on Asphalt; *J. Mater. Civil Eng.*; **12**, 113, 2000.
37. Zanzotto L., Stastna J. and Ho K., Characterization of Regular and Modified Bitumens via their Complex Modulus; *J. Appl. Polym. Sci.*; **59**, 1897, 1996.
20. Braun H., Eckstein A., Fuchs K. and Friedrich Chr., Rheological Methods for Determining Molecular Weight and Molecular Weight Distribution; *Applied Rheol.*; **6**, 116, 1996.
21. Anderson R. S.; The Pragmatics fo Solving Industrial (Real- World) Inverse Problems with Exemplification Based on the Molecular Weight Distribution Problem; *Inverse Problems*; **15**, Page R1, 1999.
22. Bousmina M., Qiu H., Grmela M. and Klembers-Sapieha J. E., Diffusion at Polymer/Polymer Interfaces by Rheological Tools; *Macromolecules*; **31**, 8273, 1998.
23. Qiu H. and Bousmina M., A New Technique Allowing the Qualification of Diffusion at Polymer/Polymer Interfaces Using Rheological Analysis; *J. Rheol.*; **43**, 551, 1999.
24. Qiu H. and Bousmina M.; Determination of Mutual Diffusion Coefficients at Nonsymmetric Polymer/Polymer Interfaces from Rheometry; *Macromolecules.*; **33**, 6588, 2000.
25. Winter H. H. and Chambon F., Analysis of Linear Viscoelasticity of a Crosslinking Polymer at the Gel Point; *J. Rheol.*; **30**, 367, 1986.
26. Chambon F. and Winter H. H., Linear Viscoelasticity at the Gel Point of a Crosslinking PDMS with Imbalanced Stoichiometry; *J. Rheol.*; **31**, 683, 1987.
27. Stading M., Langton M., and Hermansson A. M., Small and Large Deformation Studies of Protein Gels; *J. Rheol.*; **39**, 1445, 1995.
28. Gluck-Hirsch J. B. and Kokini J. L., Determination of the Molecular Weight between Crosslinks of Waxy Maize Starches Using the Theory of Rubber Elasticity; *J. Rheol.*; **41**, 129, 1997.