

دانش آزمایشگاهی ایران

سال نهم ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰ ■ شماره پیاپی ۳۵

ISSN 2538-3450



انواع مواد فعال در سطح (تانسیواکتیو): سورفکتانت ویژگی‌ها و شناسایی

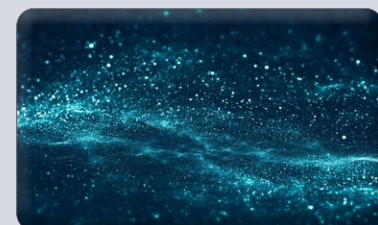
آزمایشگاه‌ها از چگونگی رشد شاخص‌ها می‌گویند



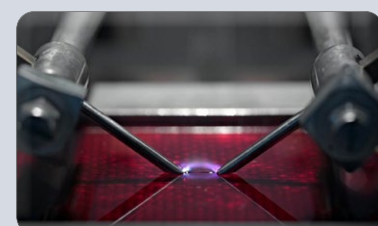
کاربرد دستگاه ردیاب چشمی در علوم شناختی



معرفی سیستم‌های اندازه‌گیری رنومتر



روش‌ها، عوامل و کاربردهای تعیین اندازه ذرات

مدیر کیفیت و نقش آن در آزمایشگاه انجام
آزمون با توجه به استاندارد ISO/IEC 17025انجام آزمون ترکینگ با سه روش متفاوت روی
عایق‌های الکتریکی پلیمری

نویسندگان

شیرین جبلی معین^{*۱}ملیحه پیشوایی^۲

*Jebeli-sh@icrc.ac.ir



واژه‌های کلیدی

رنولوژی، ویسکوالاستیک، گشتاور، ویسکوزیته، مویینه.

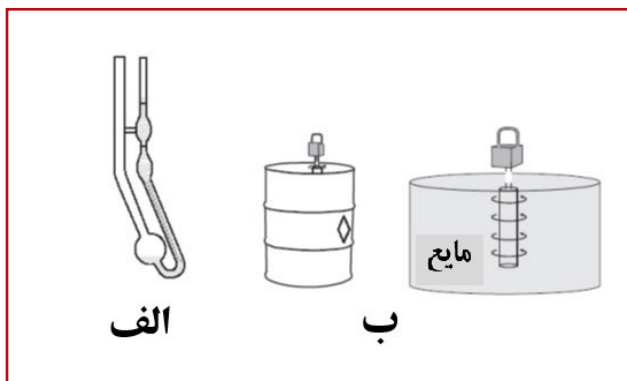
معرفی سیستم‌های
اندازه‌گیری رئومتر

چکیده

رنولوژی، علم اندازه‌گیری ویسکوزیته، تعیین خواص ویسکوالاستیک و تعیین توابع مرتبط رنولوژی است و رئومتری تجهیزاتی است که قابلیت اندازه‌گیری میزان گشتاور حاصل از یک تغییر شکل کنترل شده و تغییر فرم حاصل از یک گشتاور مشخص کنترل شده در دو حالت پایا یا تناوبی را فراهم می‌سازد. در نتیجه، امکان بررسی خواص سیال، تعیین ارتباط خواص سیال با ساختار، شبیه‌سازی رفتار جریان در شرایط فرآوری وجود دارد. به دلیل اهمیت رفتار رنولوژیکی مواد در زمینه‌های مختلف از فرمولاسیون تا کاربرد شناخت مفاهیم اولیه و آشنایی با تجهیزاتی که قابلیت شبیه‌سازی و شناسایی رفتار مواد را در معرض تنش یا برشی اعمالی در هر مرحله از فرآیند ساخت تا مصرف دارند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ویسکومترهای کوئت^۱ و مویینه^۲ ابتدایی‌ترین تجهیزات مورد استفاده برای مطالعه رنولوژی است اما در حال حاضر به‌طور گسترده‌ای رئومترهای برشی با قابلیت‌های بسیار به‌منظور کنترل کیفیت و ارزیابی خواص محصول در دسترس هستند. هدف از این مقاله، مروری اجمالی بر مفاهیم اولیه رنولوژی، معرفی سیستم‌های اندازه‌گیری و کاربردهای آن در صنایع مختلف است.

رئولوژی، مطالعه تغییر شکل و جاری شدن مواد در معرض تنش است. واژه رئولوژی از یک لغت یونانی قدیمی مشتق شده و به معنای علم جریان است. رئو^۵ به معنای جریان یافتن و لوژی^۶ به معنی علم است. اصطلاح رئولوژی توسط راینر^۷ ابداع شده بود و تعریف فوق توسط گروهی از دانشمندان برجسته پذیرفته شد. اصطلاح $\pi\alpha\nu\tau\alpha\ rei$ از نظر آوایی panta rei تلفظ و به عنوان «همه چیز جریان دارد» ترجمه می‌شود. این موضوع منسوب به هراکلیتوس^۸ (قرن ششم پیش از میلاد) است که بعدها بینگهام^۹ پیشنهاد کرد که به عنوان شعار انجمن در سال ۱۹۲۹ تصویب شود. رابرت هوک^{۱۰} کار خود را روی یک فنر کشسان در سال ۱۶۷۸ و ۹ سال بعد اسحاق نیوتن^{۱۱} فرضیه‌ای که مقاومت در برابر حرکت با تغییر شکل مایعات را توصیف می‌کند، فرموله کرد. در قرن نوزدهم، یانگ^{۱۲} نیز مدول الاستیک را پیشنهاد داد و ناوییر^{۱۳} رفتار مایعات نیوتنی را توصیف کرد که سرانجام به معادلات ناوییر استوکس^{۱۴} تبدیل شد. بولتزمن^{۱۵} ویسکومتر مویینگی را ساخت و کووت^{۱۶} اولین سیستم محفظه‌ای هم محور را به منظور تعیین ویسکوزیته ساخت. در اوایل قرن بیستم تروتن^{۱۷} ارتباط بین ویسکوزیته‌های برشی و کششی را پیشنهاد داد و اینشتین معادله‌ای برای ویسکوزیته سوسپانسیون‌های رقیق را بیان نمود. بینگهام مایعات را با تنش تسلیم توصیف و دی ولر و استوالد^{۱۸} نیز توانی را برای ارزیابی رفتار سیالات غیر نیوتنی پیشنهاد داد. چند سال بعد در سال ۱۹۲۹، بینگهام انجمن رئولوژی را تاسیس کرد و در همان سال رابینوویچ^{۱۹} یک عامل تصحیح برای سرعت برشی سیالات غیر نیوتنی در ویسکومترهای مویینگی را بیان نمود [۱].

داده شده است. تجهیزات مناسبی برای سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی وجود دارد اما بدون درک اثرات غیر نیوتنی محاسبات کمی پیچیده است [۳].



شکل (۱): (الف): ویسکومترهای کنون- فنسک که ویسکوزیته سیالات نیوتنی را با استفاده از جاذبه به عنوان نیروی محرکه اندازه‌گیری می‌کند. ویسکوزیته مربوط به مدت زمانی که سیال از یک نقطه روی لوله به سمت دیگر عبور می‌کند. (ب): ویسکومتر بروکفیلد از نوع ساده که یک سنبه به منظور چرخش در یک ظرف استوانه‌ای شکل ساخته شده است؛ ویسکوزیته سیال مربوط به گشتاور مورد نیاز برای چرخاندن سنبه است [۳].

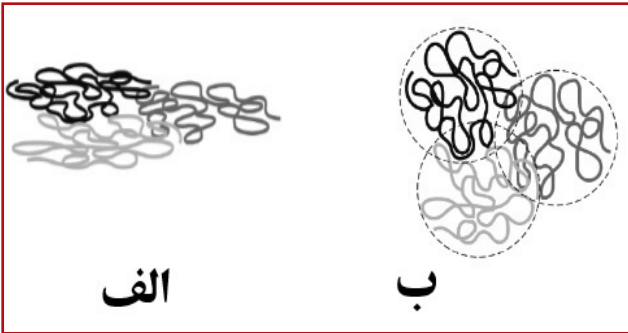
لازم به ذکر است، تعیین ویسکوزیته برای مخلوط مایع صرفی در فرآیند پوشش‌دهی الزامی است. این اطلاعات برای طراحی تجهیز فرآیند استفاده خواهد شد. به صورت عمومی برای بیان مفاهیم رئولوژی از گرانروی بهره می‌گیرند، لذا بهتر است در ابتدا به تعریفی از آن اشاره شود. این تعریف با مفهوم اصطکاک داخلی مترادف و مقیاسی از مقاومت در برابر جریان‌یابی است. ساده‌ترین مدل تعریف رئولوژی، بهره‌مندی از مدل دو صفحه موازی است که نمایی از آن در شکل (۲) نشان داده شده است. در این مدل، دو صفحه موازی فرض می‌شود که

رئولوژی به عنوان علم مطالعه جریان‌یابی و تغییر شکل ماده است که در تمامی جنبه‌های زندگی اتفاق می‌افتد. به عبارتی دیگر می‌توان گفت علم رئولوژی در هر مرحله از فرآیندهای صنعتی تولید شامل فرمول‌بندی، کاربری و در نهایت بر خواص محصول تأثیر می‌گذارد. به اختصار می‌توان گفت در صورت پمپاژ، اسپری، اکستروژن، قالب‌گیری، روکش دهی، اختلاط، جویدن، بلعیدن، اعمال، حمل، نگهداری و انبارش، گرم شدن و سرد شدن رئولوژی مواد مهم است [۲].

برای مثال، این اتفاقی نیست که با اعمال کمی فشار بر لوله خمیر دندان، مقدار لازم خمیر دندان را روی مسواک قرار می‌دهد. در واقع، تحلیل‌ها و آزمایش‌های زیادی انجام شده‌اند تا این موضوع اتفاق بیفتد. مثال‌های بیشتر دیگری نیز در زمینه‌های مختلف صنایع غذایی، نفت، مواد آرایشی و بهداشتی، رنگ و پوشش، مصالح ساختمانی و غیره وجود دارند که مبحث رئولوژی در آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رئولوژی اولین بار توسط پرفسور بینگهام به عنوان بررسی، مطالعه تغییر شکل و جریان‌یابی (سیلان) ماده تعریف شد. با گذشت زمان و پیدایش نوآوری‌های جدید، اهمیت این موضوع در صنایع دیگری نظیر رئولوژی زیستی، رئولوژی پلیمرها و سوسپانسیون‌ها اهمیت این مبحث بیش از پیش آشکار و محققین بیشتری را در این زمینه به خود علاقمند ساخته است، به گونه‌ای که به مرور زمان بر تعداد انجمن‌های علمی رئولوژی افزوده شد.

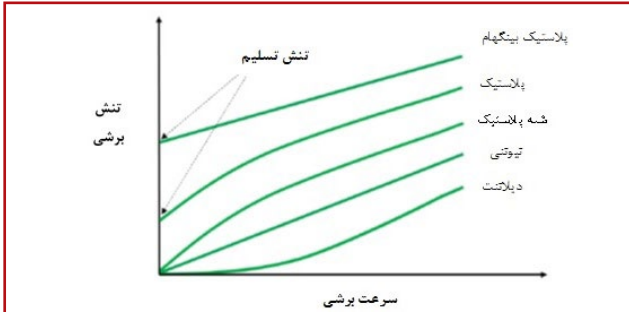
از متداول‌ترین کمیت‌های رئولوژی، ویسکوزیته است. تجهیزات مختلفی به منظور تعیین ویسکوزیته به کار گرفته می‌شود که به صورت منحصراً به سیالات نیوتنی محدود می‌شوند. به عنوان مثال، ویسکومترهای کنون- فنسک^{۲۰} و برخی از انواع ویسکومترهای بروکفیلد^{۲۱} که در شکل (۱) نشان

و نیوتنی است و با افزایش سرعت برشی افزایش یافته و بالای حد بحرانی، سرعت برشی گرانیوی کاهش می‌یابد. چسب‌ها، محلول‌ها یا مذاب‌های پلیمری نمونه‌ای از این مواد هستند. شکل (۳) ساختارهای پلیمرهایی که رفتار برش روانی دارند را نشان می‌دهد و منحنی جریان انواع مختلف سیالات مستقل از زمان نیز در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.



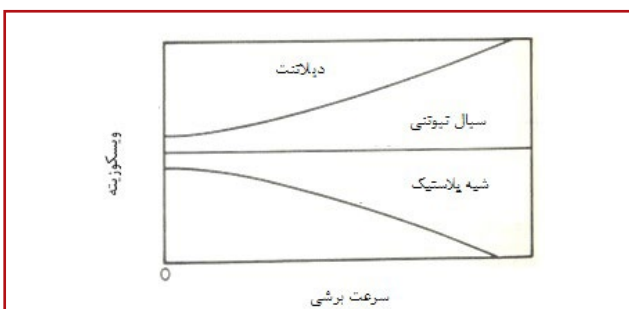
شکل (۳): (الف): زنجیر پیچ خورده و درهم درشت مولکول‌ها در حال استراحت و بدون اعمال تنش (ب): اعمال تنش برشی و جهت‌گیری زنجیرهای درشت مولکول‌ها [۷].

دایلاتانت^{۲۳}: برخلاف سیالات شبه پلاستیک گرانیوی با افزایش سرعت برشی افزایش می‌یابد. نشاسته و صمغ نمونه‌ای از این مواد هستند [۶].



شکل (۴): منحنی جریان انواع مختلف سیالات مستقل از زمان [۶].

تغییرات گرانیوی با سرعت برشی در سیالات مستقل از زمان نیز مطابق شکل (۵) است.

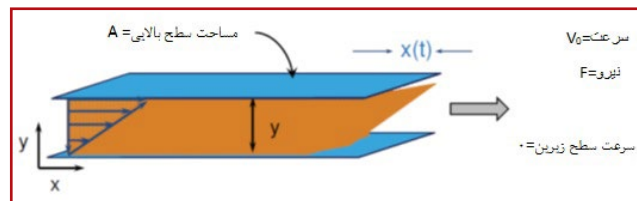


شکل (۵): تغییرات گرانیوی با سرعت برشی در سیالات مستقل از زمان [۶].

■ سیالات غیرنیوتنی تابع زمان

در این مواد گرانیوی علاوه بر وابستگی به سرعت برشی

سیالی به ضخامت y در میان آن وجود دارد. صفحه بالایی به مساحت A (m²) با سرعت v (m/s) در اثر اعمال نیروی برشی F برحسب $(N/Kgm/s^2)$ ، موازی با سطح پایین حرکت و سیال در حد فاصل بین این دو صفحه آرام و بدون تلاطم جاری است. نسبت نیروی اعمالی به مساحت A را در اصطلاح تنش برشی $(\tau = F/A)$ برحسب Pa و نسبت سرعت حرکت صفحه به فاصله بین دو صفحه سرعت برشی $(\dot{\gamma} = v/y)$ گفته می‌شود. در نهایت نسبت $(\tau / \dot{\gamma})$ ضریب گرانیوی نامیده می‌شود که اولین بار توسط اسحاق نیوتن و به نام او ثبت شد. البته این قانون در مورد دسته کوچکی از مواد به نام سیالات نیوتنی که آب و گلیسرین نمونه‌ای از این مواد هستند، صادق است. بسته به نوع سیستم اندازه‌گیری، نوع نمونه، چگونگی توزیع سرعت برشی، گرادیان سرعت غیر ثابت، رفتار غیر خطی و در اصطلاح غیر نیوتنی است که در ادامه بدان پرداخته می‌شود [۴-۶].



شکل (۲): نمایش دو صفحه موازی هر یک به مساحت A در دو حالت $y = d$ و $y = 0$ (فضای خالی بین دو صفحه با مایعی پر شده است) [۴].

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، رئولوژی، علم تغییر شکل مواد است؛ از این رو، سیالات در پاسخ به برش اعمالی از خود رفتارهای متفاوتی نشان خواهند داد که در ذیل بدان می‌پردازیم.

■ انواع سیالات

به‌طور کلی، بیشتر مواد نظیر امولسیون‌ها، سوسپانسیون‌های جامد، محلول‌ها و مذاب‌های پلیمری جزء سیالات غیرنیوتنی به شمار آمده و گرانیوی آنها با اعمال برش متغیر و روند ثابتی را دنبال نمی‌کند. براین اساس، مواد به سه گروه تقسیم می‌شوند:

■ سیالات مستقل از زمان

در گروه اول به‌صورت مشخص، گرانیوی تابع سرعت برشی است و خود به دو دسته تقسیم می‌شود:

■ دارای تنش تسلیم: در سیالات دارای تنش تسلیم قبل از اعمال مقدار مشخصی از تنش (تنش تسلیم) جاری نشده و در مقادیر بالاتر به‌صورت سیال عمل می‌نمایند که علت این پدیده به ساختمان داخلی ماده مربوط می‌شود.

■ فاقد تنش تسلیم: سیالات فاقد تنش تسلیم به دو دسته تقسیم می‌شوند:

سودوپلاستیک^{۲۲}: افزایش تنش برشی موجب افزایش سرعت برشی و با افزایش گرادیان سرعت گرانیوی کاهش می‌یابد. از این رو، در سرعت‌های برشی پایین گرانیوی ثابت

تابع زمان نیز است:

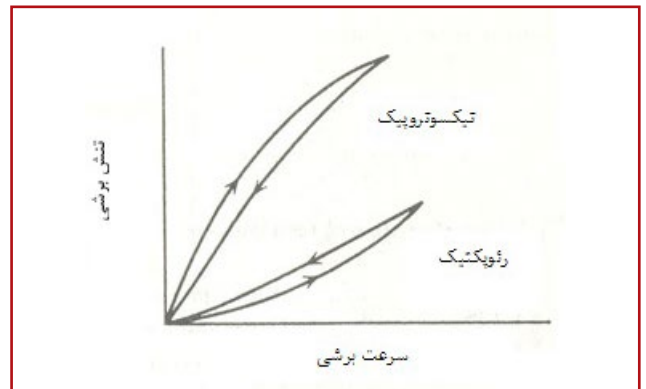
$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, t) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که این مواد نیز به دو گروه تقسیم می‌شود:

■ **تیکسوتروپ^{۲۴}**: سیال‌های وابسته به زمان، سیال تیکسوتروپیک هستند که خواصی عکس خواص سیال‌های رئوپکتیک دارند. یعنی با اعمال نیرو در طول زمان، گرانیوی آنها کاهش می‌یابد. پس می‌توان دریافت که برای ثابت نگه داشتن نرخ کرنش در طول زمان برای این نوع سیالات، به علت کاهش گرانیوی با گذشت زمان، باید تنش برشی نیز کاهش یابد. گریس و مرکب چاپ دو نمونه از این مواد هستند.

■ **رئوپکتیک^{۲۵}**: این سیالات در تنش برشی ثابت و در شرایط دمایی یکسان، افزایش برگشت‌پذیری را در تنش برشی نسبت به زمان دارند. دو مورد از این سیالات سوسپانسیون‌های رسی و خمیر گچ است [۶].

در شکل (۶) مقایسه منحنی جریان سیالات تیکسوتروپیک و رئوپکتیک نشان داده شده است.



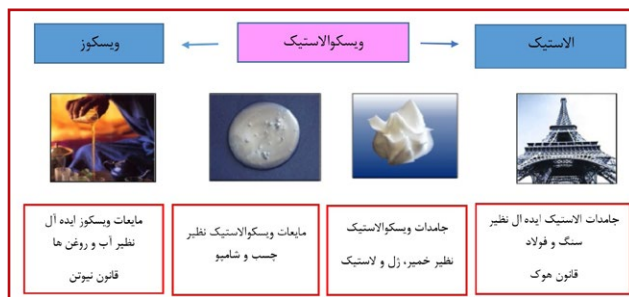
شکل (۶): منحنی جریان برای سیالات تیکسوتروپیک و رئوپکتیک [۶].

■ سیالات ویسکوالاستیک^{۲۶}

برای معرفی سیالات ویسکوالاستیک ابتدا بهتر است مواد ویسکوز و الاستیک جداگانه تعریف شوند. فنر، نمونه یک جامد الاستیک ایده‌آل است که از قانون هوک پیروی می‌کند و تنش اعمال شده متناسب با کرنش حاصل تا حد الاستیک است و از آن تجاوز نمی‌کند و با حذف تنش به شکل اولیه خود باز می‌گردد و اگر از تنش اعمالی از حد ارتجاعی فراتر رود، فنر از بین خواهد رفت و ماده ویسکوز که از قانون نیوتن پیروی می‌کند را می‌توان با استفاده از یک داشپات مدل‌سازی کرد. داشپات وسیله‌ای مکانیکی است که از یک پیستون در حال حرکت حاوی یک ماده ویسکوز تشکیل شده است. هنگامی که یک فشار (یا نیرو) به یک داشپات وارد می‌شود، داشپات بلافاصله تا زمان اعمال تنش با سرعت ثابت (نرخ کرنش) تغییر شکل می‌دهد تا زمانی که تنش کاملاً حذف شده باشد. انرژی مورد نیاز برای تغییر شکل یا جابجایی در داخل سیال به‌طور

معمول به‌صورت گرما تلف می‌شود و کرنش دائمی است. در بیشتر مواقع، مواد رفتاری از خود نشان می‌دهند که آنها را در یک منطقه‌ای بین مایع و جامد طبقه‌بندی می‌کنند؛ بنابراین، به‌عنوان مواد ویسکوالاستیک طبقه‌بندی می‌شوند [۷ و ۸].

در حالت ویسکوالاستیک ایده‌آل، تنش لازم برای حفظ یک کرنش ثابت به مرور زمان کاهش یافته و برخلاف سیالات مستقل از زمان، پس از قطع تنش که موجب جریان یافتن شده است، بخشی از تغییر شکل بتدریج باز خواهد گشت. یعنی با حذف نیرو، بخشی از انرژی وارد شده آزاد و بخشی ذخیره می‌شود و مشابه با نیرو، یک تغییر فرم مربوط به کرنش الاستیک γ_e است که برمی‌گردد و یک تغییر شکل مربوط به بخش ویسکوز γ_v است که دائمی خواهد بود. نمونه‌ای از این مواد قیر، خمیر نان و مذاب‌های پلیمری است [۶ و ۹]. در شکل (۷) طبقه‌بندی مواد ویسکوالاستیک و نمونه‌ای از هر کدام آورده شده است.



شکل (۷): طبقه‌بندی مواد ویسکوالاستیک [۱۰].

تا قبل از سال ۱۹۸۲، تنها روش اندازه‌گیری خواص رئولوژی، استفاده از روش چرخشی بود ولی از آن به بعد با ابداع روش نوسانی^{۲۷} قابلیت تعیین خواص رئولوژی افزایش چشمگیری یافت [۷]. مد نوسانی برای بررسی خواص رئولوژی به ویژه برای تعیین خواص ویسکوالاستیک سیال‌ها بسیار مناسب است. در این روش، تنش برشی و کرنش به‌صورت توابع سینوسی از زمان در نظر گرفته شده و بر این اساس تعاریف زیر ارائه می‌شود [۷ و ۱۱]:

مدول برشی مختلط^{۲۸} (G^*): عبارت است از نسبت تنش برشی نوسانی به کرنش برشی نوسانی یعنی:

$$G^* = \tau(t) / \gamma(t) \quad \text{رابطه (۲)}$$

مدول ذخیره^{۲۹} (G'): مقیاسی از انرژی است که در طی فرآیند برشی پس از حذف بار، به‌عنوان نیروی محرکی برای بازگرداندن بخش تغییر شکل یافته به حالت اولیه عمل کند. مدول اتلاف^{۳۰} (G''): مقیاسی از انرژی است که در طی فرآیند برشی صرف تغییر شکل اجزای سیال شده یا در اطراف نمونه به‌صورت گرما به هدر رفته باشد.

عامل اتلاف^{۳۱} ($\tan \delta$): به نسبت مدول اتلاف به مدول

ذخیره گفته می‌شود:

$$\text{رابطه (۳)} \quad (\tan \delta = G''/G')$$

به عبارت دیگر می‌توان آن را نسبت خاصیت ویسکوز به الاستیک دانست.

گرانروی مرکب (η^*): عبارتست از نسبت تنش برشی نوسانی به نرخ برشی نوسانی (وابسته به زمان) که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\text{رابطه (۴)} \quad \eta^* = \tau(t) / \dot{\gamma}(t)$$

در سیال‌های غیر نیوتونی، رابطه بین تنش و نرخ برشی با استفاده از مدل توانی تشریح می‌شود [۱۲ و ۱۳]:

$$\text{رابطه (۵)} \quad \sigma = k\dot{\gamma}^n$$

که در آن:

(K) ثابت جریان معروف بوده و (n) ضریب سیالیت است که میزان انحراف از رفتار نیوتونی را نشان می‌دهد. در رفتار نیوتونی $n=1$ ، در رفتار برش روانی $n < 1$ و در رفتار برش ناروانی $n > 1$ است. با استفاده از رئومتر با دقت بسیار بالا، امکان انجام آزمون در سرعت برشی بی‌نهایت پایین نظیر 10^{-6} 1/s و برخلاف ویسکومترها که تا محدوده تقریبی 10^{-1} 1/s قادر به اندازه‌گیری هستند، فراهم می‌شود. بنابراین، رئومترها قادر به اندازه‌گیری بیشینه مقدار سرعت برش و در نتیجه شبیه‌سازی کاربرد به‌منظور پردازش یا یافتن اطلاعات ریزساختاری مواد هستند. لذا نظر به محدودیت‌های موجود در ویسکومترها تمرکز اصلی بر این تجهیزات خواهد بود؛ در شکل (۸) تفاوت محدوده کاری در ویسکومترها و رئومترها نشان داده شده‌است.

که بسیار حساس و دقیق هستند و نیاز به مهارت خاص برای بکارگیری دارند، بیشتر برای تحقیقات استفاده می‌شوند.

روش‌ها و فنون ساده‌تری مانند ویسکومترهای حبابی، ویسکومترهای موئینه، کاپ‌های ریزشی در صنعت کاربرد زیادی دارند ولی این تجهیزات ساده در اندازه‌گیری مواد با رفتار نیوتنی مفید بوده و در موارد دیگر دقت و صحت لازم را ندارند.

رئومترهای مورد استفاده در مورد مواد غیر نیوتنی رئومترهای چرخشی^{۳۲} بوده که در اندازه‌گیری جریان برشی استفاده می‌شوند. رئومتر کششی^{۳۳} نیز در اندازه‌گیری جریان کششی استفاده می‌شود.

رئومترهای چرخشی مهمترین تجهیزات رپولوژیکی بوده و قادر به استفاده از هندسه‌های مختلف مانند دو صفحه موازی، دو استوانه هم محور و مخروط صفحه و کار در حالت‌های چرخشی پیوسته^{۳۴} و نوسانی^{۳۵} هستند. این موضوع باعث انجام آزمون‌های مختلف و تولید اطلاعات رپولوژیکی بسیار زیادی می‌شود.

در ذیل به معرفی برخی از سیستم‌های اندازه‌گیری رئومتر پرداخته می‌شود.

■ سیستم اندازه‌گیری استوانه‌های هم محور

رئومتر چرخشی با سیستم استوانه‌های هم‌محور شناخته شده‌ترین نوع رئومترهای چرخشی است. این هندسه از دو بخش تشکیل شده‌است، استوانه داخلی (باب^{۳۶}) و استوانه خارجی (کاپ^{۳۷}) که سیال مورد مطالعه در فضای بین این دو استوانه قرار می‌گیرد (شکل (۹)). منظور از استوانه‌های متحدالمرکز این است که هر دو جزء استوانه‌ای شکل، به ترتیب در صورتی که در موقعیت کاری نصب شوند محور تقارن یا چرخش یکسانی را نشان می‌دهند [۷].



شکل (۹): سیستم اندازه‌گیری استوانه‌های هم محور موازی [۷].

اگر استوانه داخلی بچرخد و دیگری ثابت باشد آن را رئومتر کوئت و اگر استوانه خارجی بچرخد رئومتر را سرلی^{۳۸} می‌نامند. سرعت چرخش در رئومترهای چرخشی با Ω نشان داده می‌شود و فرض می‌شود که هیچگونه اثر انتهایی^{۳۹} یا جریان ثانویه^{۴۰} وجود ندارد. از استوانه متحدالمرکز برای اندازه‌گیری رئولوژیکی



شکل (۸): مقایسه محدوده سرعت‌های برشی رئومتر و ویسکومتر [۱۴].

امروزه دستگاه‌های رئومتری بسیار متنوعی در دسترس بوده و محدوده سرعت‌های برشی قابل دسترس و زمان لازم برای تغییر سرعت‌های برشی در آنها متغیر است. بعضی از انواع آنها

استفاده کنید. ممکن است از زوایای بزرگتر نیز استفاده شود، اما ISO در اینجا $\theta_0 > 4^\circ$ درجه را بیان می‌کند. بنابراین، این سیستم اندازه‌گیری گاهی اوقات «هندسه CP زاویه کوچک» نیز نامیده می‌شود.

برای مایعات با ویسکوزیته پایین ترجیح داده می‌شود از سیستم مخروط صفحه بزرگ، یعنی با قطر بزرگ و در نتیجه منطقه برشی بزرگ استفاده کنید. به همین ترتیب، برای نمونه‌های بسیار چسبناک بهتر است قطر کوچکتر انتخاب شود. توجه: تنظیم دقیق شکاف ضروری است و ابعاد شکاف مورد نیاز باید در تمام طول آزمون به شدت روی این مقدار نگه داشته شود. به‌طور معمول برای هر سیستم مخروط صفحه جداگانه، ابعاد شکاف به ترتیب توسط سازنده در برهه‌های داده مربوطه و در نرم‌افزار تجزیه و تحلیل مشخص می‌شود. تنظیم شکاف در هر بعد دیگر منجر به نتایج اندازه‌گیری اشتباه می‌شود. مخروط‌ها به دلایل زیر کوتاه می‌شوند:

(۱) هیچ گونه سایش روی سطوح مخروط دوار و صفحه پایینی ثابت ایجاد نمی‌شود. در غیر این صورت، ابعاد شکاف برشی، و بنابراین شرایط هندسی، با استفاده تدریجی تغییر می‌کند.

(۲) هیچ اصطکاک مستقیمی بین مخروط دوار و صفحه پایینی ثابت وجود ندارد. بدون برش مخروطی، اندازه‌گیری مقدار گشتاور نه تنها از گشتاوری که توسط نمونه چسبناک برشی ایجاد می‌شود، بلکه از گشتاور ناشی از اصطکاک استاتیک و جنبشی بین مخروط و صفحه شرکای تماسی تشکیل می‌شود. البته، این نوع نیروها به‌طور قابل توجهی بر نتیجه آزمایش تأثیر می‌گذارند.

(۳) یک عارضه جانبی مثبت این است که حتی موادی که دارای ذرات تا اندازه معین هستند معمولاً بدون هیچ مشکلی قابل اندازه‌گیری هستند. به‌عنوان مثال، هنگامی که فاصله در $a = 50 \mu\text{m}$ تنظیم می‌شود، ممکن است ذرات با نمایش ابعاد حداکثر ۵ (یا حتی ۱۰) میکرومتر تحمل شوند [۷].

هنگام استفاده از مخروط صفحه، آنها باید فقط برای نمونه‌هایی که دارای اجزای جامد مانند ذرات تا حداکثر اندازه ذرات محدود هستند، گرفته شوند. در غیر این صورت، هنگام حرکت بین ذرات فضای آزاد کافی وجود نخواهد داشت که البته بر تغییر شکل و رفتار جریان تأثیر می‌گذارد. در این مورد علاوه بر این، تعداد زیادی از ذرات به‌طور مستقیم سطوح سیستم اندازه‌گیری را لمس می‌کنند؛ در نتیجه، نیروهای اصطکاک رخ داده، نتیجه آزمایش را جعل می‌کنند. زاویه مخروطی کوچک نرخ برش همگن را در سراسر نمونه ایجاد می‌کند. با این حال، به دلیل شکاف کوچک در نزدیکی محور، اندازه‌گیری نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های بزرگ مشکل‌ساز است. اندازه شکاف باید چندین برابر بزرگتر از طول ذرات میله مانند، مانند الیاف باشد. توصیه می‌شود در سوسپانسیون‌ها و نمونه‌های حاوی ذرات (اندازه ذرات) $a > 10 \times \text{dagg}$ باشد [۷]. سیستم‌های اندازه‌گیری، مخروط صفحه به‌منظور بررسی رفتار انواع سیالات مناسب هستند. از مزایای این سیستم‌ها

خواص محلول‌های پلیمری، امولسیون‌ها، سوسپانسیون‌های غلیظ و مایعات با ویسکوزیته پایین استفاده می‌شود [۱].

سیستم‌های اندازه‌گیری دوجداره، نوعی دیگری از سیستم استوانه‌ای هم مرکز است که برای آزمایش روی مایعات با ویسکوزیته پایین طراحی شده است. موری^{۴۱} و داویس^{۴۲} اولین کسانی بودند که در سال ۱۹۵۶ از این روش استفاده کردند. قبل از اینکه رنومترهای مجهز به بلبرینگ در دسترس باشند، بدست آوردن نتایج دقیق اندازه‌گیری روی مایعات با ویسکوزیته پایین با نرخ برشی کمتر از $\gamma = 10^{-1} \text{s}^{-1}$ آسان نبود. بنابراین، سیستم‌های اندازه‌گیری دوجداره ویژه‌ای که سطح برشی وسیعی را از خود نشان می‌دهند طراحی شد تا امکان دستیابی به مقادیر بالای گشتاور در حد امکان در این محدوده نرخ برشی وجود داشته باشد [۷]. در شکل (۱۰) سیستم اندازه‌گیری دو جداره نشان داده شده است.

در اینجا، یک استوانه داخلی اضافی در مرکز فنجان نصب شده است؛ بنابراین، سطح مقطع فنجان شکاف حلقوی را نشان می‌دهد. از آنجا که این ناحیه با نمونه تماس دارد در نتیجه، افزایش ناحیه برشی در دسترس است [۷].

مطابق استاندارد ISO/WD 3219-2، سیستم‌های دو جداره^{۴۳} به دلیل هندسه ویژه، سطح تماس وسیعی بین نمونه و سطح استوانه دوجداره ایجاد می‌کند. با استفاده از این سیستم امکان انجام آزمون به ویژه در مورد مایعات با ویسکوزیته بسیار کم نظیر آب با قابلیت تعیین گشتاور با دقت بالا وجود دارد. از مزایای این سیستم می‌توان به سطح تماس وسیع و پایداری حرارتی مناسب اشاره نمود.



شکل (۱۰): استوانه‌های هم محور موازی [۷].

■ سیستم‌های اندازه‌گیری مخروط صفحه‌ای

هندسه مخروط و صفحه از یک مخروط دایره‌ای به نسبت مسطح چرخان و یک صفحه تخت تشکیل شده است. معمولاً مخروط به‌عنوان روتور قسمت فوقانی هندسه اندازه‌گیری و صفحه پایینی قسمت ساکن است که بر پایه رنومتر نصب شده است. ابعاد هندسه مخروط با شعاع مخروط R و زاویه مخروط θ_0 و زاویه کوچک بین مخروط و صفحه تعیین می‌شود که مقادیر آن از 0.5 تا 4 درجه متغیر است (شکل (۱۱)) [۷]. در استاندارد ISO توصیه می‌شود از زاویه $\theta_0 = 1$ درجه

مقایسه شده است [۱۰].

جدول (۱): مقایسه دو سیستم اندازه‌گیری مخروط صفحه و دو صفحه موازی [۱۰].

صفحات موازی	مخروط صفحه
<ul style="list-style-type: none"> مناسب به منظور نمونه‌های با ویسکوزیته بسیار بالا؛ محدوده وسیع سرعت برشی؛ حجم کم نمونه؛ تمیزکاری سریع؛ تنظیم سریع دما؛ قابلیت تنظیم فاصله بین دو صفحه در صورت نیاز. 	<ul style="list-style-type: none"> سرعت برشی ثابت در فاصله اندازه‌گیری؛ حجم کم نمونه؛ سهولت تمیزکاری؛ تنظیم سریع دما.
<ul style="list-style-type: none"> مزایا 	<ul style="list-style-type: none"> معایب
<ul style="list-style-type: none"> خالی شدن فاصله در سرعت‌های برشی زیاد؛ سرعت‌های برشی زیاد؛ مناسب برای اندازه ذرات محدود؛ متاثر از خشک شدن. 	<ul style="list-style-type: none"> خالی شدن فاصله در سرعت‌های برشی زیاد؛ سرعت‌های برشی زیاد؛ مناسب برای اندازه ذرات محدود؛ متاثر از خشک شدن.

جدول (۲): مقایسه دو سیستم اندازه‌گیری استوانه [۱۰].

سیستم دو جداره	سیستم استوانه‌ای هم محور
<ul style="list-style-type: none"> مناسب برای مایعات با ویسکوزیته کمتر از ۱۰۰؛ پایداری مناسب دما؛ فاصله باریک. 	<ul style="list-style-type: none"> عدم تاثیر ناشی از خشک؛ تنظیم مناسب دما؛ عدم خالی شدن فاصله.
<ul style="list-style-type: none"> مزایا 	<ul style="list-style-type: none"> معایب
<ul style="list-style-type: none"> عوارض ناشی از خشک شدن؛ تنظیم آهسته دما؛ مشکلات تمیزکاری؛ آشفتگی در سرعت‌های برشی بالا. 	<ul style="list-style-type: none"> حجم زیاد نمونه مورد نیاز؛ مشکلات تمیزکاری؛ متاثر از حباب‌های هوا در نمونه‌های خمیری؛ آشفتگی در سرعت‌های برشی بالا؛ تنظیم آرام دما.

اما در نهایت، انتخاب هندسه بهینه یکی از پیش نیازها برای اندازه‌گیری‌های رئولوژیکی معنی‌دار است و هر هندسه محدودیت‌های خاص خود را دارد.

انتخاب هندسه اندازه‌گیری نیز به حداکثر اندازه ذرات در نمونه بستگی دارد. فاصله اندازه‌گیری باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا اطمینان حاصل شود که ذرات مانع یکدیگر نمی‌شوند. بنابراین، فاصله اندازه‌گیری باید حداقل پنج برابر (یا حتی بهتر ۱۰ برابر) بزرگتر از بزرگترین ذره باشد. این امر به ویژه در مورد هندسه‌های صفحه مخروطی بسیار مهم است.

هندسه مخروط و صفحه برای بیشتر نمونه‌ها مناسب است. با این حال، به دلیل شکاف بسیار باریک در مرکز مخروط، باید خواص رئولوژیکی سوسپانسیون ذرات بزرگ بیش از حد پیش‌بینی شود. به‌عنوان یک قانون سرانگشتی، فاصله اندازه‌گیری a ۱۰ برابر بزرگتر از اندازه ذرات است. هندسه‌های

به حجم بسیار کم نمونه مورد نیاز می‌توان اشاره نمود. هر چند قابلیت کارآیی برای دیسپرسیون‌ها تا یک اندازه ذرات معین کمتر از ۱۰ میکرومتر محدود می‌شود. این سیستم‌های اندازه‌گیری می‌توانند شرایط برشی پایدار را ایجاد و به راحتی تمیز می‌شوند. به دلیل تنظیم سریع دما به سرعت می‌توانند به تعادل دمایی برسند. ملزومات ویژه نظیر درپوش ویژه و درپوش جلوگیری از تبخیر حلال را می‌توان به‌منظور جلوگیری از تبخیر حلال استفاده نمود.



شکل (۱۱): سیستم مخروط صفحه‌ای ۱ و ۱۰.

■ سیستم اندازه‌گیری صفحات موازی

سیستم اندازه‌گیری دو صفحه موازی یا صفحه-صفحه در شکل (۱۲) نشان داده شده است از دو دیسک متحدالمرکز با شعاع R و فاصله شکاف بین صفحات برابر h تشکیل شده است. برخلاف سیستم مخروط صفحه فاصله بین دو صفحه موازی قابل تنظیم بوده و امکان اندازه‌گیری نمونه با اندازه ذرات بزرگتر و آگلومره را فراهم می‌سازد. با این حال، برای اطمینان از ایجاد برش در کل فاصله بین صفحات در حالی که یکی از صفحات ثابت است و دیگری می‌چرخد یا نوسان می‌کند، استاندارد ISO 6721-10 توصیه می‌کند $h < 3R$ و $h >> R$ باشد.

در این هندسه، نرخ برش به‌صورت خطی از $\dot{\gamma} = 0$ در $r = 0$ مرکز صفحه تا $\dot{\gamma} R$ در لبه $r = R$ افزایش می‌یابد. این یک نقطه ضعف در مقایسه با سیستم مخروط و صفحه و کوئت بوده و اندازه‌گیری براساس بیشینه مقدار نرخ برش در لبه است [۱].

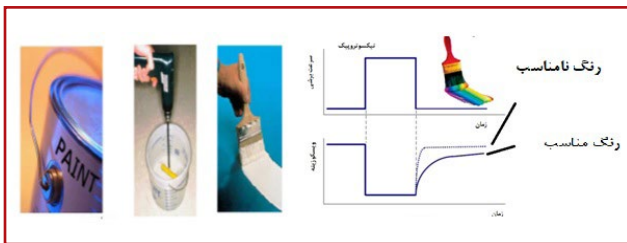


شکل (۱۲): صفحات موازی ۱ و ۱۰.

در هندسه صفحه موازی بارگیری و تخلیه نمونه‌ها در مقایسه با مخروط و صفحه، به خصوص در مورد مواد جامد نرم، مانند غذاها و مایعات چسبناک آسانتر است [۱]. در جداول (۱) و (۲) مزایای و معایب سیستم‌های اندازه‌گیری نظیر استوانه‌های هم محور، مخروط صفحه و صفحه - صفحه

کاربرد رئومتر در صنایع رنگ و پوشش

ویسکوزیته نه تنها وابسته به سرعت برشی بلکه وابسته به زمان نیز است؛ به عنوان مثال، زمانی که یک رنگ برای مدت طولانی در یک قوطی نگهداری می‌شود ویسکوزیته می‌تواند افزایش و در حین هم‌زدن کاهش یابد. از این رو نمی‌تواند به محض توقف هم‌زدن دوباره بازیابی شده و لذا تیکسوتروپ است. در شکل (۱۴) دو نمونه رنگ با دو ویژگی تیکسوتروپی متفاوت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود رنگ مناسب پس از اعمال، سطح یکنواختی ایجاد نموده و به آرامی بازسازی می‌شود و زمان کافی برای صاف شدن برآمدگی‌ها وجود دارد. اما رنگ نامناسب آثار قلمو را برجا می‌گذارد و بیش از حد ضخیم می‌شود [۹].



شکل (۱۴): مقایسه دو نمونه با دو خاصیت تیکسوتروپی متفاوت [۹].

بررسی قابلیت پخش شدن در محصولات آرایشی

رفتار جریان کرم‌ها را می‌توان با استفاده از اندازه‌گیری ویسکوزیته ارزیابی کرد. بنابراین فرض می‌شود که نمونه را در یک مقدار ویسکوزیته پایین می‌توان راحت‌تر پخش کرد [۱۵ و ۱۶].

کرم‌ها و لوسیون‌های آرایشی عموماً رفتار نازک کننده برشی از خود نشان می‌دهند. این بدان معنی است که ویسکوزیته یک مقدار ثابت نیست، بلکه به شدت برش بستگی دارد. این همبستگی با استفاده از نرخ برش توصیف شده‌است. میزان برش در حین پخش، بستگی به نمونه و کاربرد دارد. برای مثال، یک کرم ضد آفتاب سریعتر و با قدرت بیشتری نسبت به پماد استفاده شده روی زخم‌ها استفاده می‌شود و به این ترتیب کرم ضد آفتاب در معرض نرخ برش بسیار بالاتری قرار می‌گیرد.

شکل (۱۵) منحنی ویسکوزیته نمونه‌های فوق را نشان می‌دهد. هر دو نمونه در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شدند تا رفتار آنها روی پوست شبیه‌سازی شود. مقادیر ویسکوزیته کرم پوست در تمام مراحل اندازه‌گیری بیشتر است. در ابتدا، در نرخ‌های برش کمتر، تفاوت کاملاً واضح است اما با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که تفاوت در پخش‌پذیری کرم و لوسیون با افزایش تنش برشی کاهش می‌یابد [۱۷].

مخروطی و صفحه‌ای و صفحه موازی برای تعیین مقادیر ویسکوزیته مایعاتی مانند روغن با مقادیر ویسکوزیته و کشش سطحی کم، به دلیل تمایل این مایعات به نشت از شکاف محدودیت دارند. بنابراین، استوانه‌های هم محور کوئت بهترین هندسه برای اینگونه سیالات و همچنین آنهایی که به سرعت خشک می‌شوند، مناسب‌تر هستند [۱].

شکل (۱۳) یک نمای کلی و طبقه‌بندی تقریبی مواد مختلف، از مایعات کم ویسکوزیته تا مواد جامد را نشان می‌دهد. هر ستون رایج‌ترین انواع تست و هندسه اندازه‌گیری توصیه شده از سوی یکی از معروفترین شرکت‌های سازنده رئومتر (آنتن پار^۴) را فهرست می‌کند. هر چه ویسکوزیته نمونه کمتر باشد، سطح باب اندازه‌گیری باید بزرگتر باشد. نمونه‌های با ویسکوزیته کم بیشتر در هندسه‌های اندازه‌گیری سیلندر اندازه‌گیری می‌شوند. در نرخ‌های برشی بالا، نیروهای گریز از مرکز منجر به تلاطم در شکاف اندازه‌گیری می‌شود (گرداب‌های تیلور). این امر منجر به افزایش آشکار ویسکوزیته می‌شود. بنابراین، نباید از حد بحرانی نرخ برش تجاوز کرد. هر چه ماده چسبناک‌تر باشد، احتمال استفاده از صفحه مخروطی یا موازی برای اندازه‌گیری هندسه بیشتر است [۱۰].

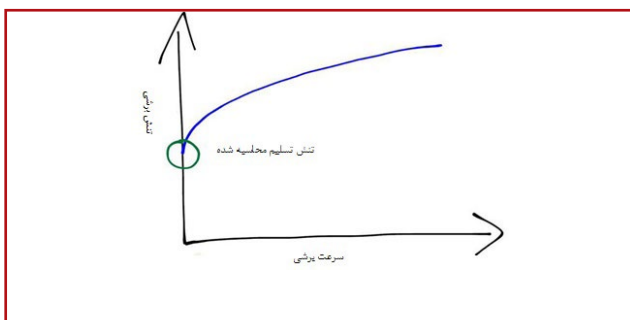
نوع ماده	سیستم‌های اندازه‌گیری مناسب	نوع ماده	سیستم‌های اندازه‌گیری مناسب	نوع ماده	سیستم‌های اندازه‌گیری مناسب	نوع ماده	سیستم‌های اندازه‌گیری مناسب	نوع ماده	سیستم‌های اندازه‌گیری مناسب
مایعات با ویسکوزیته کم	CP & PP (50-25) CP25-3 & PP25	مایعات با ویسکوزیته متوسط	CP & PP (25-50) CP25-3 & PP25	مایعات با ویسکوزیته بالا	CP & PP (25-50) CP25-3 & PP25	مواد نیمه جامد	CP & PP (25-50) CP25-3 & PP25	مواد جامد نرم	CP & PP (25-50) CP25-3 & PP25
مواد چسبناک	CP & PP (50-25) CP25-3 & PP25	مواد چسبناک	CP & PP (50-25) CP25-3 & PP25	مواد چسبناک	CP & PP (50-25) CP25-3 & PP25	مواد چسبناک	CP & PP (50-25) CP25-3 & PP25	مواد چسبناک	CP & PP (50-25) CP25-3 & PP25

شکل (۱۳): سیستم‌های اندازه‌گیری مناسب برای مواد مختلف [۱۴].

کاربردها

همان‌طور که پیش از این ذکر شد، رئولوژی به منظور توصیف و ارزیابی تغییر شکل و رفتار جریان مواد استفاده می‌شود که در تمامی جنبه‌های زندگی رخ می‌دهد. به عبارتی دیگر، در نمونه‌های بارزی از اهمیت رئولوژی را می‌توان از محیط اطراف گرفته تا محصولات با فناوری بالا در نظر گرفت که علم رئولوژی و ارزیابی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روغن، عسل، شامپو، کرم دست، خمیر دندان، ژله شیرین، مواد پلاستیکی، رنگ و پوشش، مرکب چاپ، دوغاب‌های سرامیکی و غیره از جمله مواردی هستند که بررسی و ارزیابی خواص رئولوژی در آنها خالی از لطف نیست. در ذیل به برخی از آزمون‌های قابل انجام با دستگاه رئومتر به منظور بهینه‌سازی و ارزیابی بیان می‌شود.

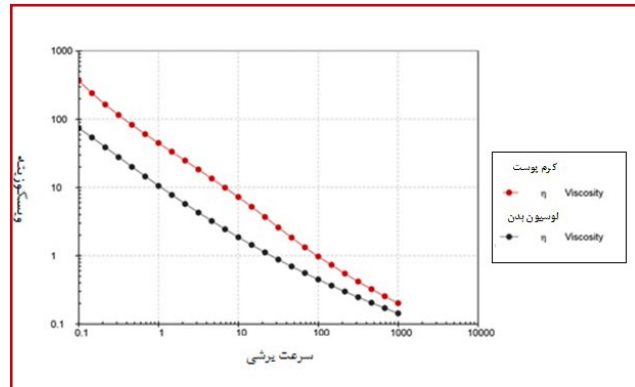
بر شبکه نیروهای ساختار داخلی باید از آن فراتر رفت، با نقطه تسلیم توصیف می‌شود؛ به‌عنوان مثال، هنگام پمپاژ دوغاب اندازه‌گیری نقطه تسلیم و تابع ویسکوزیته اطلاعات مهمی برای درک بهتر رفتار جریان دوغاب در لوله‌ها به‌دست می‌دهد. همچنین به حل مشکلات دوغاب‌هایی که پمپاژ آنها دشوار است کمک می‌کند. خواص رئولوژیکی دوغاب‌های سرامیکی را می‌توان با تغییر ترکیب دوغاب تحت تأثیر قرار داد؛ به‌عنوان مثال، غلظت حجمی (مقدار آب)، مواد افزودنی (جامدات، پلیمرها، مایعات) و اندازه ذرات و شرایط فرآیند مانند دمای پمپاژ یا سرعت جریان [۱۹]. شکل (۱۷) تغییرات تنش برشی برحسب سرعت برشی جهت تعیین تنش تسلیم را نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): تغییرات تنش برشی برحسب سرعت برشی (تعیین تنش تسلیم) [۱۹].

نتیجه‌گیری

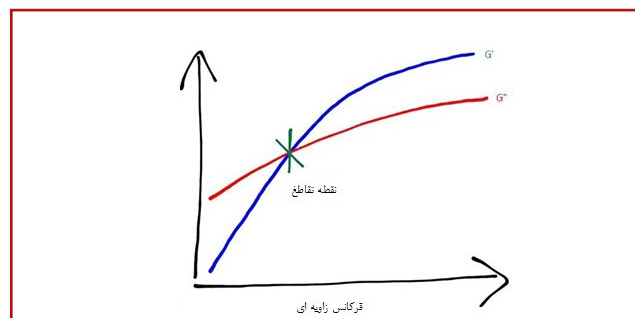
رئولوژی امکان ارزیابی رفتار محصولات در بسیاری از صنایع را فراهم می‌کند. بهترین انتخاب برای این بررسی‌ها یک رئومتر است که اندازه‌گیری‌های چرخشی و نوسانی را ارائه می‌دهد. با این نوع دستگاه‌های اندازه‌گیری، نمونه‌ها هم برای کنترل کیفیت و هم برای تحقیق می‌توانند در مدت زمان کوتاهی آزمایش و ارزیابی شوند. این امکان با توجه به قابلیت‌های محدود تجهیزات قدیمی فراهم نبوده است. طراحی مناسب رئولوژیکی انتخاب سیستم اندازه‌گیری مناسب و متناسب با نمونه می‌تواند موجب ایجاد یک محصول با قابلیت تجدیدپذیری بهتر شود. تولید محصول با کیفیت نیز موجب کاهش بسیاری از هزینه‌های گزاف و بیهوده در مقیاس پایلوت می‌شود و می‌توان به‌طور واقعی فرمولاسیون مناسبی را در هزینه حداقلی ارائه داد؛ و این موضوع جز با شناخت و انتخاب درست تجهیز و ملزومات اندازه‌گیری مناسب اتفاق نمی‌افتد. علاوه بر این، مفاهیم رئولوژی به‌منظور طراحی آزمایش‌ها و تجهیزات مرتبط، استانداردسازی روش‌های آزمایشگاهی، به کار گرفته شود.



شکل (۱۵): منحنی‌های ویسکوزیته وابسته به سرعت برشی گرم پوست و لوسیون بدن در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد [۱۷].

ارزیابی خواص رئولوژی پلیمرها

به‌منظور بررسی رفتار کوتاه مدت و بلند مدت مذاب پلی استایرن، می‌توان با استفاده از یک رئومتر نوسانی، یک جاروب فرکانس انجام داد. جاروب فرکانس آزمایش نوسانی است که در دامنه ثابت و فرکانس‌های متغیر انجام می‌شود. نمونه پلیمری قرار داده شده در سلول اندازه‌گیری می‌تواند به‌صورت گرانول، پودر یا صفحه از پیش ساخته شده باشد. تجزیه و تحلیل نقطه تقاطع بین منحنی‌های مدول ذخیره و مدول اتلاف، به‌دست آوردن تصویری کیفی از میانگین جرم مولی نمونه پلیمری را ممکن می‌سازد. با روش‌های پیشتر تجزیه و تحلیل، توزیع جرم مولی^{۴۵} را می‌توان تعیین کرد. برخلاف روش‌های دیگر مانند آنالیز کروماتوگرافی نفوذ ژل^{۴۶}، این روش آزمایشی نیازی به حلال نداشته و هیچ محدودیتی برای تعیین MMD وجود ندارد [۱۸]. شکل (۱۶) تغییرات مدول ذخیره و اتلاف با فرکانس را نشان می‌دهد.



شکل (۱۶): تغییرات مدول ذخیره و اتلاف با فرکانس [۱۸].

ارزیابی رئولوژی دوغاب‌های سرامیکی

خواص فرآوری و جابجایی دوغاب‌ها به شدت به خواص رئولوژیکی آنها بستگی دارد. بنابراین، آگاهی از عوامل رئولوژیکی (مانند نقطه تسلیم و ویسکوزیته) ضروری است، به ویژه هنگام حمل مقدار زیادی از دوغاب. با یک رئومتر چرخشی می‌توان منحنی‌های جریان و ویسکوزیته را اندازه‌گیری و نقطه تسلیم را نیز محاسبه کرد. در رئولوژی از حد نیرویی که برای غلبه

پی‌نوشت

۱. کارشناسی ارشد مهندسی مواد، پژوهشگاه رنگ، آزمایشگاه مرکزی
۲. دکتری مهندسی پلیمر - شیمی پلیمر، پژوهشگاه رنگ، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری‌های نوین، گروه رزین و افزودنی‌ها
3. Couette
4. Capillary
5. rheo ($\rho\epsilon\omega$)
6. logos ($\lambda\sigma\sigma$)
7. Reiner
8. Heraclitus
9. Bingham
10. Robert Hooke
11. Isaac Newton
12. Young
13. Navier
14. Navier-Stokes
15. Boltzmann
16. Couette
17. Trouton
18. De Waele and Ostwald
19. Rabinowitsch
20. Cannon-Fenske
21. Brookfeild
22. Pseudoplastic
23. Dilatant
24. Thixotropic
25. Rhepectic
26. Viscoelastic
27. Osilation
28. Complex modulus
29. Storage modulus
30. Loss modulus
31. Loss factor
32. Rotational rheometer
33. Extensional rheometer
34. Steady
35. Oscillatory
36. Bob
37. Cup
38. Searle
39. edge effect
40. secondary flow
41. F. Moore
42. L.J. Davies
43. Double Gap
44. Anton Paar
45. Molar mass distribution (MMD)
46. Gel permeation chromatography (GPC)

مراجع

- [1] R1.[1] GHANBARI, Abbas, et al. Experimental methods in chemical engineering: Rheometry. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2020, 98.7: 1456-1470
- [2] Seminar Modh Sudipkumar industrial Aspect of Rheology PA /2010 /11
- [3] MORRISON, Faith A., et al. Understanding rheology. New York: Oxford university press, 2001, p13
- [4] BARNES, Howard A.; HUTTON, John Fletcher; WALTERS, Kenneth. An introduction to rheology. Elsevier, 1989
- [5] HAN, Chang Dae. Rheology and processing of polymeric materials: Volume 1: Polymer Rheology. Oxford University Press on Demand, 2007
- [6] مجید شیخی نارانی، رئولوژی - بررسی خواص، جریان، انتقال حرارات و انتقالات سیالات غیرنیوتنی، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، سال ۱۳۷۱ صفحات ۴۹-۳۵.
- [7] MEZGER, Thomas. The rheology handbook. Vincentz Network, 2020. page 41,242-245
- [8] www.malvern.com
- [9] Roland G. Larson, The structure and rheology of complex fluids, Oxford, New york, 1999.
- [10] HACKLEY, Vincent A.; FERRARIS, Chiara F. Guide to Rheological Nomenclature: Measurement in Ceramic Particulate Systems. 2001.
- [11] BATCHELOR, Cx K.; BATCHELOR, G. K. An introduction to fluid dynamics. Cambridge university press, 2000
- [12] Robert J. Hunter, Foundations of colloid science. Oxford University Press Inc. NewYork, 2001.
- [13] MRSC, P. Rolfe CCHEM. The practical use of today's rheometers in industry. 2000
- [14] www.anton-paar.com
- [15] Yao, M.L. and J.C. Patel, 2001, Rheological characterization of body lotions, Appl. Rheol. 11, 83-88.
- [16] Min-Sun Kwak, Hye-Jin Ahn and Ki-Won Song, Rheological investigation of body cream and body lotion in actual application conditions, Korea-Australia Rheology Journal, 27(3), 241-251 (August 2015)
- [17] <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/rheology-in-use/>
- [18] <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/rheological-investigation-of-polymers/>
- [19] <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/rheological-investigation-of-building-materials>

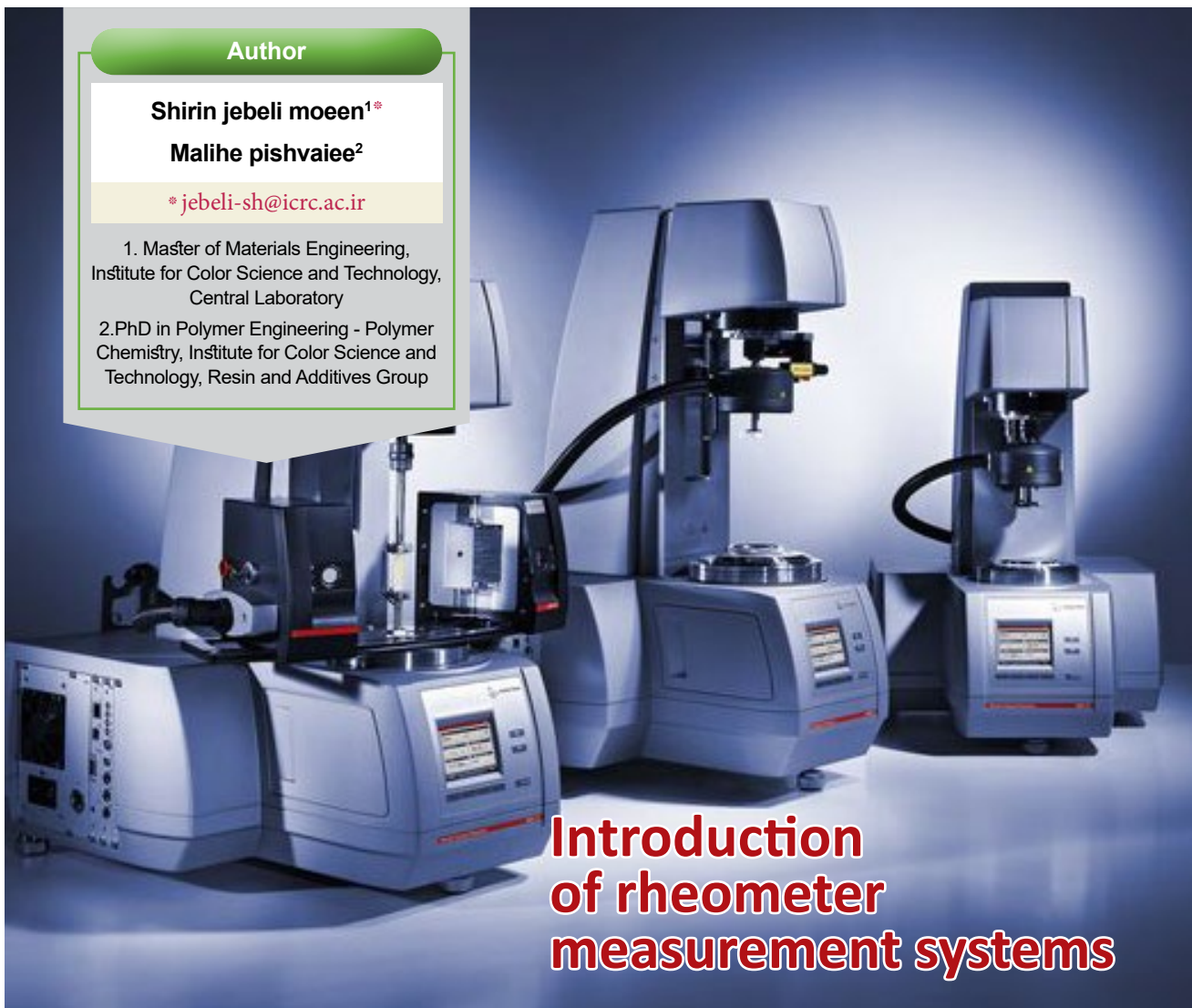
Author

Shirin jebeli moeen^{1*}Malihe pishvaiee²

* jebeli-sh@icrc.ac.ir

1. Master of Materials Engineering,
Institute for Color Science and Technology,
Central Laboratory

2. PhD in Polymer Engineering - Polymer
Chemistry, Institute for Color Science and
Technology, Resin and Additives Group



Introduction of rheometer measurement systems

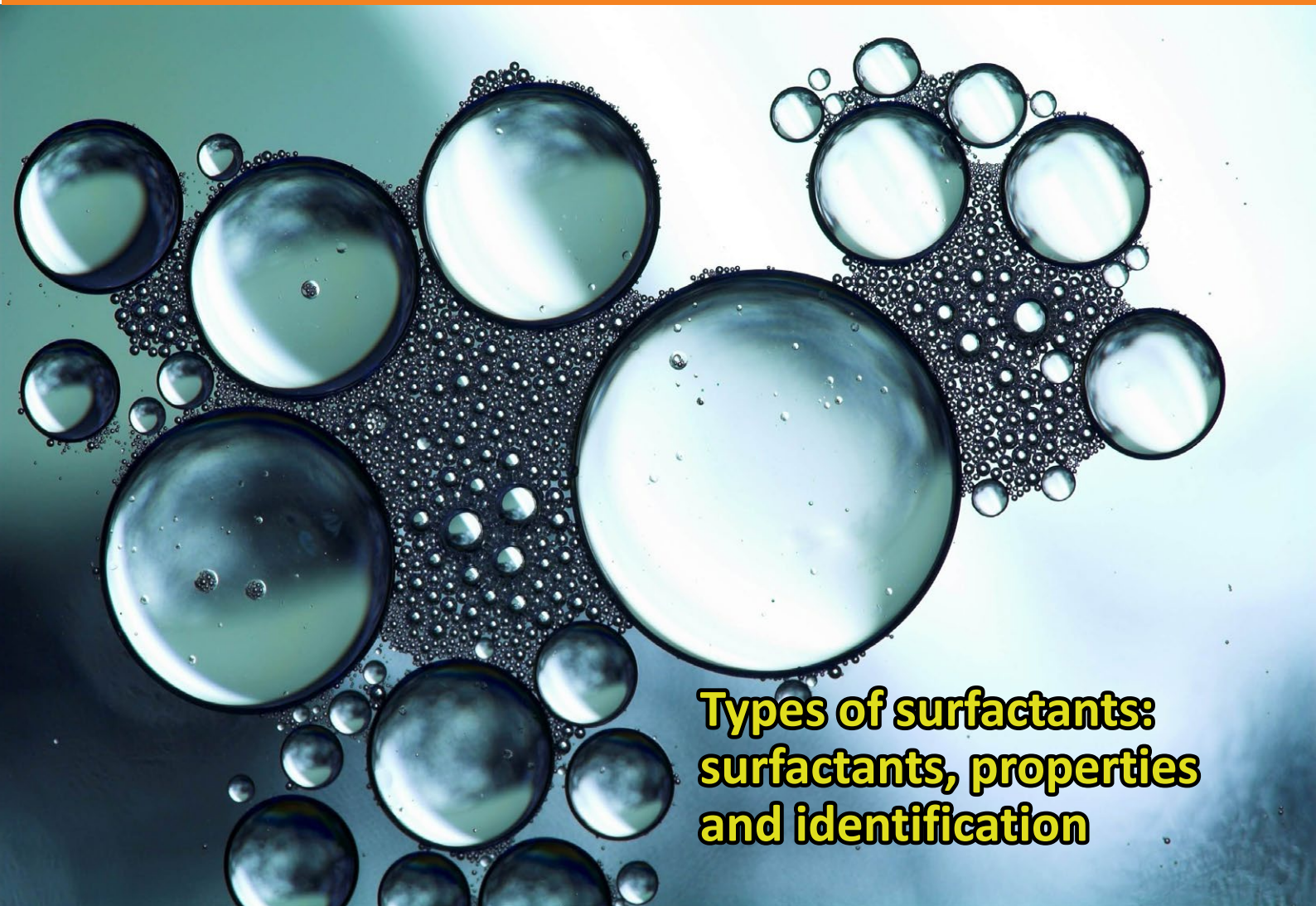
Abstract

Rheology is the science of measuring viscosity, determining the viscoelastic properties, and determining the related functions of rheology and rheometer is an instrument which provides the ability to measure the amount of torque resulting from a controlled deformation and the deformation resulting from a specific controlled torque in steady or periodic states. As a result, it is possible to study fluid properties, determine the relationship between fluid properties and structure and simulate flow behavior under processing conditions. Due to the importance of rheological behavior of materials in various fields from formulation to the application of understanding the basic concepts and familiarity with equipment that can simulate and identify the behavior of materials subject to stress or shear applied at any stage of the manufacturing process is of particular importance.

Quette and capillary viscometers are the most basic equipment used to study rheology, but currently shear rheometers with very wide capabilities are available for quality control and evaluation of product properties. The purpose of this article is to provide an overview of the basic concepts of rheology, to introduce measurement systems and their applications in various industries.

Keywords

Rheology, Viscoelastic, Torque,
Viscosity, Capillary.



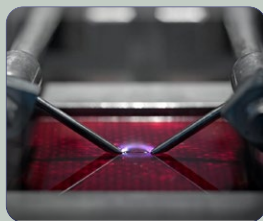
Types of surfactants: surfactants, properties and identification



Introduction of rheometer measurement systems



Application of eye-tracker in cognitive sciences



Performing Tracking Test with Three Different Methods on Polymeric Electrical Insulations



Quality management and its role in test performance laboratory according ISO/IEC 17025



Particle size techniques, factors and applications