

واژه‌های کلیدی:

سیالات دارای تنش تسلیم
آزمون جریان فشردگی
رئولوژی سیالات هرشل -
بالکی
مدل سروود

تعیین پارامترهای جریان یابی در سیالات دارای تنش تسلیم و لیز خوردگی در دیواره به کمک رئومتری جریان فشردگی

حسین مهدوی^۱، علی اکبر طرلانی^۱، مهدی گل ریز^{۲*}

۱ تهران، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران

۲ تهران، پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی

چکیده ...

استفاده از رئومترهای رایج به منظور بررسی خواص رئولوژیکی سیالات دارای تنش تسلیم و لیز خوردگی در دیواره، مشکلات قابل توجهی پیش رو دارد. در تجهیزاتی که عامل گشتاور مطرح است، همانند رئومترهای مخروط و صفحه یا صفحات موازی، معمولاً به دلیل لغزش یا شکست نمونه در مناطق لبه‌ها در نرخ برش‌های بالا، تعیین خواص رئولوژیکی مقدرور نیست. به علاوه به دلیل زمان آسایش بالا، تنش‌های باقی مانده همراه با بارگذاری نمونه می‌تواند به طرز مؤثری اندازه‌گیری‌های رئومترهای نوسانی را تحت تأثیر قرار دهد. اگر چه معمولاً رسیدن به نرخ برش‌های بالاتر به کمک رئومترهای موئینه مهیاست، ولی لغزش بین فصل مشترک فلز-پلیمر و شکست نمونه می‌تواند نتایج این آزمون را زیر سؤال ببرد. از این رو نیاز گسترده‌ای برای توسعه فنی در ارتباط با تعیین کمی یا حتی کیفی خواص رئولوژیکی سیالات بسیار گرانبه‌دار دارای تنش تسلیم وجود دارد. پیشرفت‌ها نشان داده است استفاده از روش رئومتری جریان فشردگی می‌تواند نتایج بهتری نسبت به دیگر روش‌های رایج داشته باشد.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

M.Golriz@isrc.ac.ir

۱ مقدمه

می‌شوند تا مقادیر مربوط به مولفه‌های گرانشی و لغزش دیواره (شکل ۱) در آن‌ها به‌طور تابعی از تنش برشی به‌دست آید [۳-۵]. عموماً، روش و رویه برای به‌دست آوردن گرانشی برشی و لغزش دیواره شامل تغییرات قاعده‌مند در نسبت سطح به حجم نمونه و پس از آن، تحلیل منحنی‌های جریان است [۳-۷].

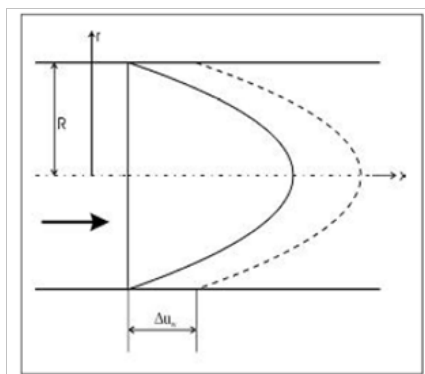
در ادامه، چندین روش برای ارزیابی خواص رئولوژیکی سیالات دارای تنش تسلیم (که لیزخوردگی از خود بر روی دیواره‌ها نشان می‌دهند) ارائه می‌شود و مزایا و معایب هر یک به‌طور جداگانه معرفی خواهد شد. در انتها مناسب‌ترین روش از نظر صحت داده‌ها و همچنین سهولت اندازه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲-۱ روش اول: رئومتر گشتاور (Torque Rheometer)

مخلوط کن داخلی یا رئومتر گشتاور برای اندازه‌گیری‌های مشخصات اولیه رئولوژیکی سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌های گشتاور بر حسب زمان در سرعت‌های مختلف تیغه گردند می‌توانند برای اندازه‌گیری گرانشی به کار روند (شکل ۲). اما نتایج بسیار تخمینی است و لغزش در دیواره در محاسبات آن‌ها وارد نمی‌شود. بنابراین این روش از تکرارپذیری کمی برخوردار است.

۲-۲ روش دوم: رئومتر موئینه (Capillary Rheometer)

هنگامی که جریان موئینی برای تولید داده‌های دبی برحسب افت فشار به کار گرفته می‌شود روش اصلی برای تعیین گرانشی برشی با لغزش دیواره تصحیح



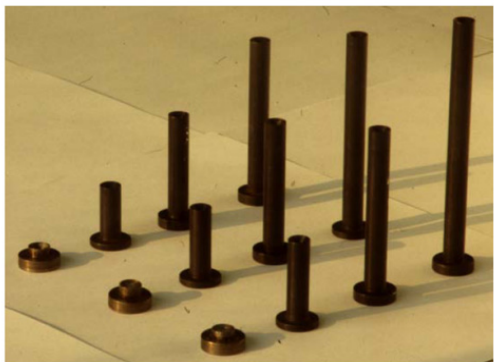
شکل ۱ پروفیل سرعت توسعه یافته در لوله با و بدون لغزش در دیواره

فرایندهای اختلاط، اکستروژن، تزریق و دیگر فرایندهای شکل‌دهی که بر روی سیالات دارای تنش تسلیم و لیزخوردگی در دیواره انجام می‌شوند، تأثیرات غیرقابل انکاری بر خواص محصول نهایی دارند. به‌وسیله مشخصه‌یابی رئولوژیکی این مواد است که امکان جلوگیری از بروز تغییرات برجسته در خواص محصول در طی مراحل تولید، فراهم می‌شود. این مسئله در حصول اطمینان از کیفیت مطلوب و مورد انتظار سیالات دارای تنش تسلیم، نیازی اساسی محسوب می‌شود. به‌علاوه کم‌تر کردن قوانین حاکم بر خواص رئولوژیکی این مواد، هم در مدل‌سازی عددی و هم در بهینه‌سازی فرایندهای تولید لازم است [۱].

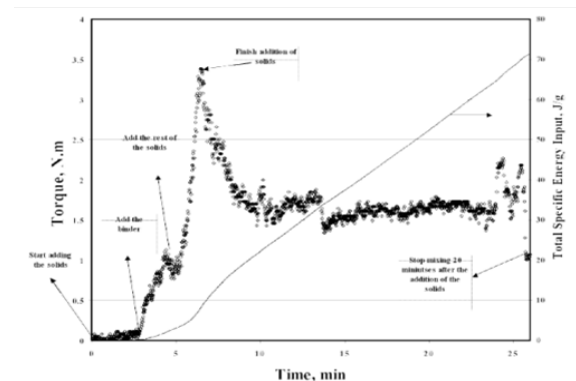
در به‌دست آوردن خواص رئولوژیکی سیالات ویسکوپلاستیک حاوی مقادیر بالای ذرات پرکننده، هنگامی که از رئومترهای رایج استفاده شود، مشکلات قابل توجهی پیش‌رو خواهد بود. در تجهیزاتی که عامل گشتاور مطرح است، همانند رئومترهای مخروط و صفحه یا صفحات موازی، معمولاً به دلیل لغزش یا شکست نمونه در مناطق لبه‌ها در نرخ برش‌های بالا امکان تعیین خواص رئولوژیکی مقدور نیست. به‌علاوه به دلیل زمان آسایش بالا، تنش‌های باقی‌مانده همراه با بارگذاری نمونه می‌تواند به طرز مؤثری اندازه‌گیری‌های رئومترهای نوسانی را تحت تأثیر قرار دهد. اگر چه معمولاً رسیدن به نرخ برش‌های بالاتر به کمک رئومترهای موئینه مهیاست، ولی لغزش بین فصل مشترک فلز-پلیمر و شکست نمونه می‌تواند نتایج این آزمون را زیر سؤال ببرد. از این رو نیاز گسترده‌ای برای توسعه‌فنی در ارتباط با تعیین کمی یا حتی کیفی خواص رئولوژیکی سیالات بسیار گرانشی دارای تنش تسلیم وجود دارد [۲].

۲ روش‌های رئومتری

همان‌گونه که گفته شد تعلیقی‌های حاوی مقادیر بالای مواد پر شده که دارای تنش تسلیم و لیزخوردگی در دیواره هستند، جزء سیالات پیچیده هستند و بررسی رفتار و جریان‌یابی این نوع سیالات با چالش‌هایی روبه‌رو است [۳-۸]. این چالش‌ها از رفتار ویسکوپلاستیک و لغزش در دیواره آن‌ها ناشی می‌شود. روش‌های خاص و ویسکومترهای چندکاره به‌طور هم‌زمان به کار گرفته



شکل ۳ چندین لوله موئین که به طور قاعده‌مند طول آن‌ها در قطر ثابت و همچنین قطر لوله موئین در طول ثابت تغییر می‌کند [۵].



شکل ۲ داده‌های گشتاور بر حسب زمان

مقدار گرانشی ظاهری از گرانشی واقعی تعلیقی کم‌تر دیده شود. برای مثال در شکل ۴ دیده می‌شود که گرانشی کمپلکس از برش ۰/۱ تا ۱، سه مرتبه افت نشان می‌دهد که این مقدار با رسیدن به برش ۱۰۰ به یک نهم مقدار اولیه می‌رسد. همه این افت گرانشی از خاصیت شبه پلاستیک بودن تعلیقی نشأت نمی‌گیرد، بلکه اثر لغزش در دیواره است که ماده را جریان‌پذیر نشان می‌دهد و این امر، نقصی در سامانه اندازه‌گیری محسوب می‌شود.

۲-۴ روش چهارم: رئومتر جریان فشردگی (Squeeze Flow Rheometry)

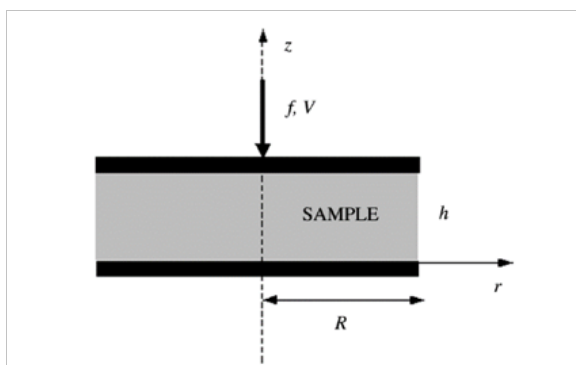
جریان فشردگی شامل فشردن بدون مرز تعلیقی‌های غلیظ است در حالت هم‌دما که در حالت کاملاً پری یا نیم‌پری میان دو صفحه موازی دایره‌ای انجام می‌شود. یک یا هر دو قرص در جهت محور با سرعت ثابت نسبت به هم حرکت می‌کند. این در حالی است که نیروی وابسته به زمان اندازه‌گیری می‌شود یا تحت تنش نرمال ثابت، سرعت وابسته به زمان صفحه اندازه‌گیری و گزارش می‌شود [۹]. در محاسبات مربوط به تبدیل داده‌های جریان فشردگی به مولفه‌های مربوط به گرانشی و جریان لغزشی در دیواره حل تخمینی انجام می‌شود. در واقع فرض می‌شود سرعت حرکت قرص آن قدر کم است که می‌توان از مشتق زمانی در معادله بقا، صرف نظر کرد و در واقع مسأله از حالت ناپایا به شبه پایا تبدیل می‌شود [۹] و [۱۰]. طرحواره جریان فشردگی در شکل ۵ نشان داده شده

شده، نیازمند استفاده از رئومتر موئینه است که به طور قاعده‌مند طول آن‌ها در قطر ثابت تغییر می‌کند و همچنین قطر لوله موئین در طول ثابت تغییر می‌کند. برای مثال تعداد دوازده لوله موئین برای مطالعه رفتار تعلیقی غلیظ توسط کالیون [۳] مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۳). از معایب این روش نیازمند بودن به تعداد آزمایش‌های زیاد و انواع حدیده با نسبت طول به قطر متفاوت است.

۲-۳ روش سوم: رئومتر چرخشی (Rotational Rheometer)

خواص رئولوژیکی تعلیقی‌های غلیظ با استفاده از رئومتر چرخشی اندازه‌گیری می‌شود. رئومترهای چرخشی با اعمال مقدار ثابتی از کرنش یا تنش برشی بر سیال و سپس اندازه‌گیری سایر مشخصات آن عمل می‌کنند. زمانی که تنش برشی و کرنش برشی برای سیال مشخص باشد محاسبه گرانشی آن ممکن می‌شود. دستگاه مستقیماً تنش و کرنش برشی را محاسبه نمی‌کند، بلکه گشتاور مورد نیاز برای چرخش هندسه دستگاه با سرعت مشخص را اندازه می‌گیرد و سپس با استفاده از ابعاد دستگاه، تنش و کرنش برشی را محاسبه می‌کند. بسیاری از دستگاه‌های رئومتر نوین این محاسبات را به صورت خودکار انجام می‌دهند.

از معایب ویسکومترها یا رئومترهای چرخشی، محدوده کم برش است که در آن می‌توانند کار کنند. در واقع برای سیالاتی نظیر تعلیقی‌های غلیظ در برش‌های بالاتر از ۱ بر ثانیه اثر لغزش در دیواره باعث می‌شود

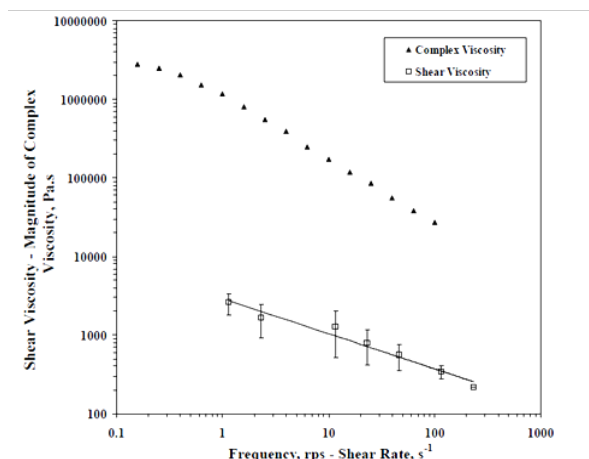


شکل ۵ طرحواره جریان فشرده

نتایج را نامعتبر سازد، ایجاد شکست و تخریب در مواد پلاستیکی، مشکلات بارگذاری در مواد بسیار گرانبه یا جامدهای نرم. به علاوه امکان انجام این آزمون در دستگاه‌های آزمون کشش و فشار بین المللی، آن را به روش جایگزین محبوبی برای تحلیل مواد با سطوح مدول مختلف بدل کرده است. در کنار تمامی این موارد، خصوصیات هندسی و جریانی که در این روش به طور پویا بر ماده حاکم است، ویژگی کلیدی در انتخاب و به کار گیری آن است، زیرا برخی از شرایط موجود در کاربردهای عملی (اکستروژن، قالب‌سازی فشاری و تزریقی - Compression and Injection Molding، ریخته‌گری نواری - Tape Casting، پمپ کردن و غیره) را برای گستره وسیعی از مواد می‌تواند شبیه‌سازی کند [۱۱].

جریان‌های فشرده‌گی به جریان‌هایی گفته می‌شود که در آن‌ها، مانند شکل ۶، ماده بین دو صفحه موازی فشرده شده و در جهت شعاعی به سمت بیرون صفحات رانده می‌شود [۱۵]. عموماً جریان فشرده‌گی ترکیبی از جریان‌های برشی و کششی تحت شرایط ناپایا است. بسته به شرایط مرزی، شکل هندسی (یعنی، نسبت فاصله بین صفحات به شعاع) و موقعیت درون میدان جریان، حالت برشی یا کششی می‌تواند به پدیده غالب جریانی در سامانه بدل شود [۲].

همان‌طور که گفته شد، جریان فشرده‌گی، شامل فشرده‌سازی بدون محدودیت ماده است که تحت شرایط دمایی ثابت انجام شده، ماده می‌تواند تمام یا بخشی از فضای بین دو دیسک را اشغال کند. یک یا هر دو قرص دایره‌ای شکل می‌توانند در جهت محور با سرعت ثابت، در حالی که نیرو، تابع زمان اندازه‌گیری می‌شود، یا با



شکل ۴ عدم تطابق گرانروی برشی و گرانروی دینامیک در سیالات غیرنیوتنی

است. قطر قرص‌ها R است و انجام آزمون می‌تواند تحت شرایط مختلفی صورت گیرد؛ برای مثال صفحه پایینی ثابت است و صفحه بالایی با سرعت ثابت V پایین می‌آید.

فاصله بین دو صفحه که وابسته به زمان است، برابر h و نیروی کلی اعمال شده بر صفحه بالایی f است. برای کاربرد در تعلیقی‌های غلیظ، رئومتر جریان فشرده‌گی باید شرایط زیر را داشته باشد.

واحد جریان فشرده‌گی باید به صورت قابل جابه‌جا شدن باشد و همچنین قابلیت نصب روی میز داشته باشد. تحلیل داده‌ها باید طوری انجام شود که میان عملگر دستگاه و هندسه خط از نظر برآورد داده‌ها مشکلی نباشد. داده‌های مربوط به گرانروی برشی و جریان لغزشی باید به سرعت به دست آیند و مشکلی در کنترل کیفیت خط حاصل نشود.

۳ روش آزمون جریان فشرده‌گی

آزمون‌های جریان فشرده‌گی به‌طور گسترده در مشخصه‌یابی‌های رئولوژیکی مواد غذایی، تعلیقی‌های با غلظت بالا، پلیمرهای مذاب، خمیرهای سرامیکی، کامپوزیت‌ها، خمیرهای پیش‌رانه و چندین نوع دیگر از مواد به کار رفته است [۱۰-۱۵]. جریان فشرده‌گی، روش مفیدی است که در آن، برخی از مشکلاتی که ممکن است در روش‌های رئومتر چرخشی رخ دهد، دیده نمی‌شود؛ همچون لغزش در فصل مشترک که می‌تواند

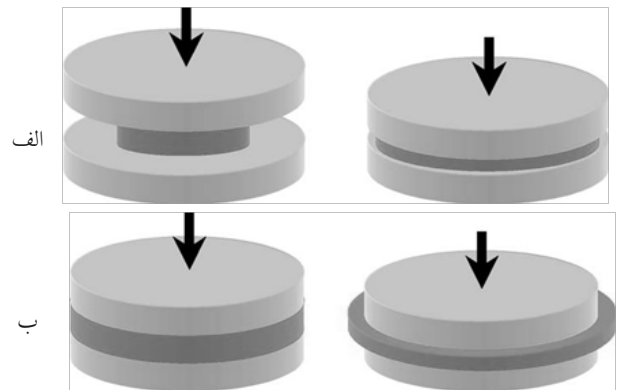
این رابطه برای سیالات هرشل-بالکی است و از قرار دادن $\tau_0=0$ یا $n=0$ معادلات مورد نظر برای سیالات پاور-لاو و بینگهام نتیجه می‌شوند. با این حال برای محدوده‌های متوسط عدد بدون بعد نرمی نیاز به روش‌های حل عددی بود.

آدامز و همکاران [۱۸]، راه حلی برای توزیع فشار در کل بازه‌های سرعت ارائه دادند که در محدوده‌های میانی نیز با خطای کوچکی، جریان فشرده‌گی را پیش‌بینی می‌کرد. مدل‌های با شرط مرزی لغزش کامل روی دیواره‌ها (جریان کشیدگی) نیز به خوبی توسعه داده شدند [۱۹]. در مدل لغزش نسبی پیشنهادشده توسط شروود و دوربان [۲۰] برای سیالات پاور-لاو و بینگهام نیز استفاده شد. شروود و دوربان پس از آن، در پژوهش دیگری مدلی برای جریان فشرده‌گی سیالات هرشل-بالکی با لغزش نسبی روی دیواره‌ها ارائه دادند [۲۱]. برای لغزش‌های اندک این رابطه به شکل معادله (۳) است.

$$F = \pi R^2 \left[\sigma_c \left(\frac{-\dot{h}}{h} \right)^n + 3^{1/2} \tau_0 \right] \left(1 + \frac{2m}{3^{3/2}} \frac{R}{h} \right)$$

که $\sigma_c = 3^{(1+n)/2} h_{HB}$ و m ثابت ضریب اصطکاک است که می‌تواند مقداری بین صفر و یک بپذیرد. برای سطوح کاملاً زیر برابر یک است و در سطوح کاملاً صاف و صیقلی مقداری برابر صفر به خود می‌گیرد. شروود و دوربان در کنار ارائه این مدل برای آزمودن مدل خود و مقایسه با روش عددی آدامز [۲۱] با انتخاب ضرایب اصطکاک مختلف به منحنی شکل ۷ دست یافتند. در این منحنی مشخص شد که این رابطه قادر به پیش‌بینی شیب اولیه ظاهر شده در داده‌های تجربی نیست.

پس از آن محققان در صدد برآمدند تا از فرضیات ساده‌کننده نظریه روانکاری فراتر رفته، عبارت‌های اینرسی موجود در معادلات مومنتوم را نیز در محاسبات خود دخیل کنند. در پژوهش‌های جریان فشرده‌گی انجام شده بر روی خمیرها، نشان داده شده که ناحیه دایره‌ای مرکزی بدون رخ دادن لغزش، توسعه می‌یابد و با لایه‌های لغزنده احاطه شده است [۲۲]. این مشاهدات بعدها توسط محققان به توسعه مدل‌های تحلیلی جدید و کامل‌تری برای سیالات بینگهام منجر شد [۲۳].



شکل ۶ جریان فشرده‌گی متقارن محوری با (الف) جرم ثابت از ماده بین صفحات و (ب) ثابت بودن سطح تماس بین ماده و صفحات [۱۵].

نیروی نرمال ثابت، در حالی که سرعت صفحه، تابع زمان، اندازه‌گیری می‌شود، حرکت کنند [۱۱].

۴ مدل‌سازی جریان فشرده‌گی برای سیالات ویسکوپلاستیک

نظریه جریان فشرده‌گی برای سیالات دارای تنش تسلیم در ابتدا توسط اسکات [۱۶] با شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره بررسی شد. با این حال او نتوانست شکل بسته‌ای از حل مسأله را ارائه دهد. اما پیک [۱۷]، به دلیل پیش‌بینی ناحیه‌ای غیربرشی در نزدیکی خط مرکزی توسط مدل اسکات با او مخالف بود که به تناقضی سینماتیکی ختم می‌شد. این مسأله پس از آن توسط کووی و استانمور [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت که در این کار بر اساس فرضیه روانکاری (Lubrication Assumption)، به مفهوم غالب بودن سرعت در جهت شعاعی و گرادیان سرعت در جهت محوری) شکل‌های مشخصی برای نیروهای جریان فشرده‌گی در سیالات هرشل-بالکلی، پاور-لاو و بینگهام و برای اعداد نرمی اصلاح‌شده (معادله ۱) بزرگ (معادله ۲) و کوچک ارائه داد.

$$S = \frac{R \dot{h} \eta_{HB}^{1/n}}{h^2 \tau_0^{1/n}} \quad (1)$$

(۲)

$$F = \frac{\pi \tau_0 R^3}{h} + \frac{2\pi \eta_{HB} (-\dot{h})^n}{h^{2n+1} (n+3)} \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n R^{n+3} \quad (\text{for Large } S)$$

می شود؛ اما تفسیر داده های مربوط به رئولوژی مانند گرادیان فشار محلی، مشکل بوده، پروفیل سرعت بین صفحات نامعلوم است. در این جا نشان داده خواهد شد که با استفاده از فرض ساده کننده روانکاری چگونه اندازه گیری نرخ برش $(\dot{\gamma}_w)$ و تنش برشی مرتبط با آن در دیواره (τ_w) ممکن می شود. شروود پیشنهاد انجام آزمون های جریان فشردگی با سرعت های مختلف را ارائه داد و از طریق مشتق گیری از معادله نیروی فشردگی بر حسب سرعت U در ارتفاع ثابت h به رابطه ۴ برای تنش برشی دیواره در شعاع بیشینه R دست یافت.

(۴)

$$\tau_{wR} = \tau_w(Q_{max}, h) = \frac{\partial(FU^3)}{\partial U} \frac{h}{2\pi R^3 U^2}$$

و برای نرخ برش نیز در h ثابت و U ثابت و $h(\tau_w)$ متغیر ثابت به ترتیب معادلات ۵ و ۶ را به دست آورد.

(۵)

$$\dot{\gamma} \tau_{wR} + \frac{2}{h\tau_{wR}} \frac{\partial \tau_{wR}^2 u_{wR}}{\partial \tau_{wR}} \Big|_h = \frac{2}{h^2 \tau_{wR}} \frac{\partial \tau_{wR}^2 Q_{max}}{\partial \tau_{wR}} \Big|_h = \frac{2RU}{h^2} + \frac{R\tau_{wR}}{h^2} \frac{\partial U}{\partial \tau_{wR}} \Big|_h$$

(۶)

$$\dot{\gamma} \tau_{wR} + \frac{2}{\tau_{wR}} \frac{\partial}{\partial \tau_{wR}} \left(\frac{\tau_{wR}^2 u_{wR}}{h} \right) \Big|_U = \frac{2Q_{max}}{\tau_{wR}} \frac{\partial}{\partial \tau_{wR}} \left(\frac{\tau_{wR}^2}{h^2} \right) \Big|_U = \frac{2UR}{h^2} - \frac{2UR\tau_{wR}}{h^3} \frac{\partial h}{\partial \tau_{wR}} \Big|_U$$

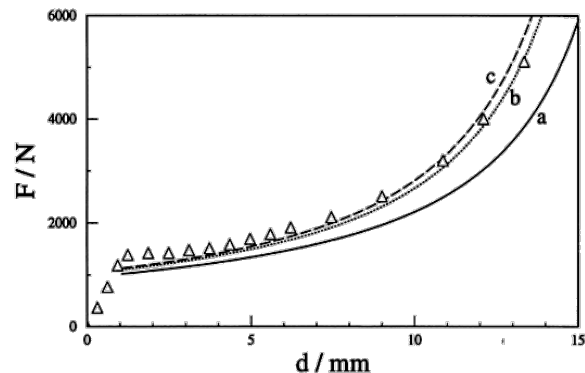
مدل لانوس- بر اساس نظریه سیال Perfect Plastic

لانوس و همکاران [۱۴] به منظور تعیین شکل پذیری سیمان توسط اکستروژن سیمان، آزمون جریان فشردگی را بررسی کردند. آنان معتقد بودند که تنها مولفه مؤثر در عملیات اکستروژن، تنش تسلیم ماده است و مادامی که این مواد در یک فاز بمانند و آب از ترکیب جدا نشود، رفتار پلاستیک کامل از خود نشان می دهند. در شرایط پلاستیک کامل نیروی فشاری از رابطه ۷ تبعیت می کند.

(۷)

$$F = -\frac{2\pi K_p R^2}{\sqrt{3}} - \frac{2\pi K_p R^3}{3h}$$

که K_p همان مقدار تسلیم پلاستیک (Plastic yield value) است. در این روش از مختصات در برابر h/R برای نتایج آزمون فشردگی بهره برده می شود؛ بدین ترتیب معادله (۷) بر اساس این مولفه ها به شکل



شکل ۷ کاربرد مدل تحلیلی شروود و دوربان (۱۹۹۸) در پیش بینی نتایج آزمایشگاهی آزمون اسکوتیز؛ (a) $m=0.1$ ؛ (b) $m=0.25$ ؛ (c) $m=0.3$.

با این حال به دست آوردن مدل های کامل تر برای سیالات پیچیده تر مانند هرشل-بالکلی به روش تحلیلی، مسلماً دارای پیچیدگی های بیشتری است که ناشی از رابطه غیرخطی این مدل است. بدین ترتیب روش های عددی بسیاری توسط محققان برای حل این مسأله استفاده شده که در غالب موارد روش اجزای محدود یا FEM به کار رفته است [۲۴ و ۲۵].

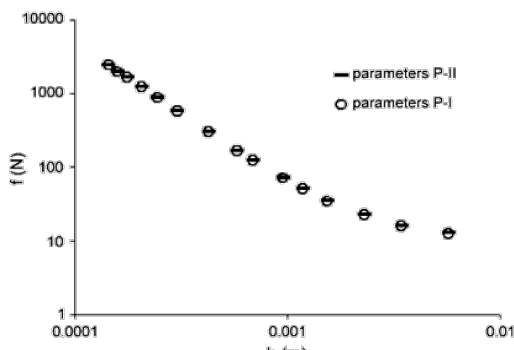
۵ استخراج مولفه های رئولوژیکی از آزمون جریان فشردگی

با مرور مقالات مختلف منتشرشده در باب رئومتری جریان فشردگی، مشخص می شود که یکی از مهم ترین مسائل در این زمینه، استخراج مولفه های مدل های رئولوژیکی از نتایج آزمون ها است. در منابع موجود، مقالات اندکی به این موضوع پرداخته اند که در ادامه به سه روش مختلف در این راستا اشاره می شود.

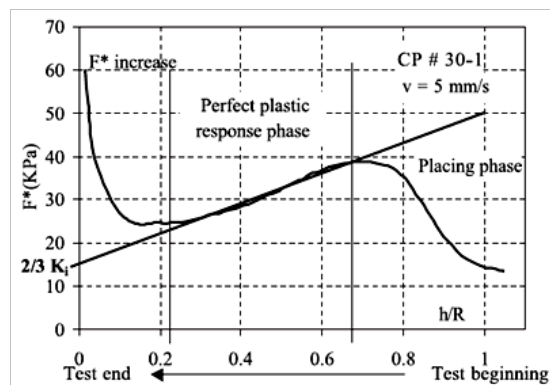
مدل شروود- بر اساس فرضیه روانکاری

شروود [۲۶] برای تعیین مولفه های رئولوژیکی، روشی پیشنهاد داد که طی آن از طریق داده های اولیه آزمون های جریان فشردگی، تنش تسلیم و نرخ برش محاسبه می شود و از طریق این دو کمیت می توان مولفه های رئولوژیکی را به دست آورد.

رئومتر، شکل جریان فشردگی سیال بین دو صفحه موازی را تغییر داده و سبب کشیدن آن می شود. نیروی کلی F اعمال شده به دو صفحه دایره ای و هم محور، اندازه گیری



شکل ۹ نمودار نیرو بر حسب ارتفاع برای هر دو مجموعه پاسخ P-I و P-II در کار کالیون و تانگ [۱۱].



شکل ۸ نمونه ماده دانه‌ای پلاستیک کامل تحت آزمون جریان فشاری. خط مستقیم نشان‌دهنده پاسخ تماماً پلاستیک نظری است. [۱۴]

معادله ۸ در خواهد آمد.

$$F^* = \frac{2K_i}{\sqrt{3}} \left(\frac{h}{R} \right) + \frac{2K_i}{3} \quad (۸)$$

یک مجموعه حدس اولیه برای چهار مولفه هدف، معادلات جریان فشردگی به روش اجزای محدود (FEM) حل شده و از روش‌های ریزکردن، حدس بعدی با توجه به مقدار نیروی به دست آمده، حاصل می‌شده است. آن‌ها مشاهده کردند که به ازای حدس‌های اولیه مختلف، به پاسخ‌های دوگانه و متفاوتی برای چهار مولفه دست می‌یابند.

به عنوان مثال در مسأله‌ای پاسخ دقیق از این قرار است: $\{m^*, n^*, t_y^*, b^*\} = \{1, 0.45, 10, 2\}$ (P-I)، که با حدس اولیه نزدیک به این مقادیر نیز به دست خواهد آمد. اما اگر حدس اولیه بسیار دور از این مقادیر انتخاب شود: $\{m^*, n^*, t_y^*, b^*\} = \{0.07, 0.73, 2.1, 3.0\}$ در این صورت پاسخ مجزایی به دور از پاسخ اصلی (P-I) حاصل می‌شود؛ $\{m^*, n^*, t_y^*, b^*\} = \{0.85, 0.34, 4.1, 4.3\}$ (P-II). جالب‌تر آن که نمودار نیرو بر حسب ارتفاع به ازای هر دو پاسخ، دقیقاً بر هم منطبق خواهند شد (شکل ۹).

راه حلی که برای این مسئله در کار کالیون پیشنهاد شده است، استفاده ترکیبی از رنومتر دیگری در کنار رنومتر جریان فشردگی است، مانند رنومتر موئینه. بدین ترتیب تعدادی از این مولفه‌ها تعیین شده و تعداد کل مولفه‌ها در مسئله جریان فشردگی به دو مورد کاهش می‌یابد. مجهول بودن حداکثر دو مولفه سبب می‌شود تا مسئله جریان فشردگی پاسخ واحدی داشته باشد. کالیون مشاهده کرد که با داشتن دو مولفه $\{m^*, n^*\} = \{1, 0.45\}$ به ازای

معادله ۸ نشانگر خط است که از طریق شیب و عرض از مبدأ آن می‌توان مقدار K_i را تعیین نمود. در شکل (۸) چگونگی روش ترسیمی و تعیین مقدار تسلیم پلاستیک آمده است. لانوس و همکاران [۱۳] این روش را در کاربردهای دیگر نیز آزمودند، اما به هر حال به کمک این روش، دست کم نمی‌توان به تمامی مولفه‌های مدل‌های متنوع رئولوژیکی دست یافت.

مدل کالیون - بر اساس روش اجزای محدود

همان‌طور که در قسمت‌های پیشین اشاره شد محققان در یافتن مولفه‌های رئولوژیکی از آزمون‌های جریان اسکوییز با مشکلاتی همراه بوده‌اند. در این میان کالیون و تانگ [۱۱] به بررسی این مسأله تحت عنوان «حل معکوس مسئله جریان فشردگی برای تعیین مولفه‌های سیالات غیرنیوتنی و لغزش روی دیواره» پرداختند. کالیون در این پژوهش با ریزکردن تابع هدف حداقل مربعات، سعی داشت سهم مولفه رئولوژیکی و ثابت لغزش را تعیین کند: $\{m, n, t_y, b\}$.

$$J(F, F^c) \equiv \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(1 - \frac{f_i}{f_i^c} \right)^2 \quad (۹)$$

روند محاسبات به این طریق بود که با در نظر گرفتن

تمامی مجموعه حدس‌های زیر؛

$$\begin{aligned}\{t_y^*, b^*\} &= \{100, 200\} \\ \{t_y^*, b^*\} &= \{0.1, 200\} \\ \{t_y^*, b^*\} &= \{100, 0.02\}\end{aligned}$$

پاسخ یکتا و دقیق و مورد نظر زیر به دست خواهد

$$\text{آمد: } \{t_y^*, b^*\} = \{10, 2\}$$

کالیون و همکارانش [۲۹] پیش‌تر نیز از این روش پیشنهادی برای تعیین مولفه‌های مدل هرشل-بالکلی به کمک استفاده ترکیبی از ویسکومترهای موئینه و جریان فشردگی بهره برده‌اند.

طبق آزمون‌های متعدد انجام پذیرفته پیشنهاد شده است که اگر تعداد مولفه‌های مجهول برابر یا بیشتر از سه مورد باشند، پاسخ منطقی تنها تحت شرایطی حاصل می‌شود که حدس‌های اولیه به طور نسبی به مقادیر صحیح نزدیک باشند. پیشنهادی که کالیون برای غلبه بر این مشکل مطرح کرده است، تقسیم فضای مولفه‌ها $\{m, n, t_y, b\}$ به تعدادی زیرمجموعه، و ریزکردن چندین حدس اولیه متعلق به هر یک از این زیرمجموعه‌ها است. در کنار این روش تابع هدف به دست آمده از هر زیرمجموعه می‌تواند با دیگر توابع، مقایسه شده و کمینه‌ای کلی حاصل شود.

۶ نتیجه‌گیری

به منظور بررسی خواص رئولوژیکی سیالات دارای تنش تسلیم از دیرباز روش‌ها بهبود یافته، معادلات رو به تغییر بوده‌اند. نتایج این بررسی نشان داد هنگامی که از رئومترهای رایج استفاده شود، مشکلات قابل توجهی پیش رو خواهد بود. در تجهیزاتی که عامل گشتاور مطرح است، همانند رئومترهای مخروط و صفحه یا صفحات موازی، معمولاً به دلیل لغزش یا شکست نمونه در مناطق لبه‌ها در نرخ برش‌های بالا امکان تعیین خواص رئولوژیکی مقدور نیست. به علاوه به دلیل زمان آسایش بالا، تنش‌های باقی‌مانده همراه با بارگذاری نمونه می‌تواند به طرز مؤثری اندازه‌گیری‌های رئومترهای نوسانی را تحت تأثیر قرار دهد. اگر چه معمولاً رسیدن به نرخ برش‌های بالاتر به کمک رئومترهای موئینه مهیاست؛ ولی لغزش بین فصل مشترک فلز-پلیمر و شکست نمونه می‌تواند نتایج این آزمون را زیر سؤال ببرد. روش‌های ریاضی محاسباتی به کمک نتایج آزمون‌های جریان فشردگی و رئومترهای موئینه بهترین روش در حال حاضر برای اندازه‌گیری مولفه‌های جریان‌یابی سیالات دارای تنش تسلیم و لیزخوردگی در دیواره است.

مراجع

- Martinez -Pastor J., Franco P., Franco-Menchon J.A., Optimization of Extrusion Process of Double-Base Propellants from Their Rheological Properties, *International Journal of Material Forming*, 1-14, **2018**.
- Chan T.W., Baird D.G., An Evaluation of a Squeeze Flow Rheometer for the Rheological Characterization of a Filled Polymer with a Yield Stress, *Rheologica Acta*, 41, 245-256, **2002**.
- Yilmazer, U., Kalyon, D.M., Slip Effects in Capillary and Parallel Disk Torsional Flows of Highly Filled Suspensions, *Journal of Rheology*, 33, 1197-1212, **1989**.
- Aral, B.K., Kalyon, D.M., Effects of Temperature and Surface Roughness on Time-Dependent Development of Wall Slip in Steady Torsional Flow of Concentrated Suspensions, *Journal of Rheology*, 38, 957-972, **1994**.
- Mooney, M., Explicit Formulas for Slip and Fluidity. *Journal of Rheology*, 2, 210-222, **1931**.
- Kalyon, D.M., Yaras, P., Aral, B., Yilmazer, U., Rheological Behavior of a Concentrated suspension: A Solid Rocket Fuel Simulant, *Journal of Rheology*, 37, 35-53, **1993**.
- Kalyon, D.M., Apparent Slip and Viscoplasticity of Concentrated Suspensions, *Journal of Rheology*, 49, 621-640, **2005**.
- Aral, B.K., Kalyon, D.M., Viscoelastic Material Functions of Noncolloidal Suspensions with Spherical Particles, *Journal of Rheology*, 41, 599-620, **1997**.
- Bird R.B., Armstrong R.C., Hassager, O., Dynamics of Polymeric Liquids, Wiley, New York, **1987**.
- Covey G.H., Stanmore B.R., Use of the Parallel-Plate Plastometer for the Characterisation of Viscous Fluids with a Yield Stress, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 8, 249-260, **1981**.
- Kalyon D.M., Tang H.S., Karuv B., Squeeze Flow Rheometry for Rheological Characterization of Energetic Formulations, *Journal of Energetic Materials*, 24, 195-212, **2006**.
- Grandes F.A., Sakano V.K., Rego A.C., Cardoso F.A., Pileggi R.G., Squeeze Flow Coupled With Dynamic Pressure Mapping for the Rheological Evaluation of Cement-Based Mortars, *Cement and Concrete Composites*, 92, 18-35, **2018**.
- Estellé P., Lanos C., Mélinge Y., Servais C., Squeezing Flow for Rheological Characterisation of Food Materials, Proc 3rd Int. Symp, Food Rheology Structure, Zürich, 115-119, **2003**.
- Toutou Z., Roussel N., Lanos C., The Squeezing Test: a Tool to Identify Firm Cement-Based Material's Rheological Behaviour and Evaluate their Extrusion Ability, *Cement and Concrete Research*, 35, 1891-1899, **2005**.
- Engmann J., Servais C., Burbidge A.S., Squeeze Flow Theory and Applications to Rheometry: a Review, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 132, 1-27, 2005.
- Scott J.R., Theory and Application of the Parallel-Plate Plastimeter. Part 2, *Rubber Chemistry and Technology*, 8, 587-596, **1935**.
- Peek Jr R.L., Parallel Plate Plastometry, *Journal of Rheology*, 3, 345-372, **1932**.
- Adams M.J., Edmondson B., Caughey D.G., Yahya R., An Experimental and Theoretical Study of the Squeeze-Film Deformation and Flow of Elastoplastic Fluids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 51, 61-78, **1994**.
- Yang F., Exact Solution for Compressive Flow of Viscoplastic Fluids under Perfect Slip Wall Boundary Conditions, *Rheologica Acta*, 37, 68-72, **1998**.
- Sherwood J.D., Durban D., Squeeze Flow of a Power-Law Viscoplastic Solid, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 62, 35-54, **1996**.
- Sherwood J.D., Durban D., Squeeze-Flow of a Herschel-Bulkley Fluid, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 77, 115-121, **1998**.
- Rabideau B.D., Lanos C., Coussot P., An Investigation of Squeeze Flow as a Viable Technique for Determining the Yield Stress, *Rheologica Acta*, 48, 517-526, **2009**.
- Muravleva L., Squeeze Flow of Bingham Plastic with Stick-Slip at the Wall, *Physics of Fluids*, 30, 030709, **2018**.
- Lawal, A., Kalyon, D.M., Compressive Squeeze Flow of Generalized Newtonian Fluids with Apparent Wall Slip, *International Polymer Processing*, 15, 63-71, **2000**.
- Karapetsas, G., Tsamopoulos, J., Transient Squeeze Flow of Viscoplastic Materials, *Journal of Non-newtonian Fluid*

- Mechanics*, 133, 35-56, **2006**.
26. Sherwood J.D., Model-Free Inversion of Squeeze-Flow Rheometer Data, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 129, 61-65, **2005**.
27. Covey G.H., Stanmore B.R., Rheological Behaviour of Victorian Brown Coal, *Fuel*, 59, 123-127, **1980**.
28. Adams M.J., Aydin I., Briscoe B.J., Sinha S.K., A Finite Element Analysis of the Squeeze Flow of an Elasto-Viscoplastic Paste Material, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 71, 41-57, **1997**.
29. Tang, H.S., Kalyon, D.M., Estimation of the Parameters of Herschel-Bulkley Fluid Under Wall Slip Using a Combination of Capillary and Squeeze Flow Viscometers, *Rheologica Acta*, 43, 80-88, **2004**.