

واژه‌های کلیدی:

جریان کششی
گرانروی کششی
روش‌های اندازه‌گیری

مروری بر روش‌های اندازه‌گیری گرانروی کششی در سیالات پلیمری

زهرا خوبی آرانی*

۱ تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی پلیمر

چکیده ...

جریان کششی در بسیاری از فرایندهای شکل‌دهی پلیمرها مانند دمش فیلم، ریسندگی الیاف، قالب‌گیری دمشی و جریان‌های انقباضی نقش مهمی دارد. هم‌چنین، این جریان در شناسایی ساختارهای پلیمری برای مثال شاخه‌ای شدن، از قابلیت‌های منحصربه‌فردی در مقایسه با جریان برشی برخوردار است. از این رو، اطلاع از مشخصات سیالات پلیمری در جریان‌های کششی می‌تواند هم در صنعت و هم در تحقیقات دانشگاهی ارزشمند باشد. در این مطالعه، ابتدا مفاهیم مربوط به این جریان مانند انواع جریان کششی، کرنش کششی و انواع رفتار سیالات پلیمری در میدان‌های کششی مرور می‌شود. سپس، اصول روش‌های مختلف اندازه‌گیری گرانروی کششی یک بعدی برای سیالات پلیمری مانند روش کشش همگن، رئومتر کششی میزنر، رئومترهای کشش مذاب با غلتک‌های چرخان، رئومتر کشش رشته و رئومتر کششی شکست موئینه معرفی و مزایا و معایب هر کدام بیان می‌شوند.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

khoubi@sut.ac.ir

۱ مقدمه

در برخی از فرایندهای شکل دهی پلیمرها مانند قالب گیری دمشی، ریسندگی الیاف و دمش فیلم، جریان کششی از نقشی اساسی برخوردار است. هم چنین، اگرچه جریان اصلی اعمال شده در انواعی از فرایندها، برشی است، اما کاهش سطح مقطع منجر به القای جریان کششی شده، در نتیجه تلفیقی از هر دو جریان بر سیالات پلیمری اعمال می شود. برای مثال، در انقباض های ناگهانی دریچه قالب (Gate) در قالب گیری تزریقی، گرادیان سرعت به موازات جهت جریان ایجاد می شود. در این شرایط، جریان تا حدودی از نوع کششی بوده و حتی ممکن است جریان غالب باشد [۱-۳]. از آنجایی که جریان کششی می تواند به شدت زنجیرهای پلیمری را آرایش داده، تغییرات شکل فضایی تا حدودی در محصول نهایی باقی می ماند. حضور این جریان در فرایندهای شکل دهی به صورت قابل توجهی بر خواص محصول نهایی اثرگذار است [۴]. از این رو، بهینه سازی شرایط فرایند، نیازمند اندازه گیری صحیح توابع موادی در جریان کششی است [۵]. صرف نظر از کاربردهای مستقیم و غیرمستقیم این جریان در فرایندهای شکل دهی، رفتار کششی به ساختار مولکولی برای مثال وزن مولکولی و توزیع آن، میزان شاخه ای بودن و ماهیت و استحکام فصل مشترک در آلیاژهای پلیمری بسیار حساس است. به همین دلیل، اطلاعات ارزشمند و منحصر به فردی در توصیف ساختار برخی از پلیمرها مانند پلیمرهای شاخه ای با این نوع جریان حاصل می شود که جریان های برشی در این زمینه از قابلیت بسیار کمتری برخوردارند [۶].

۱، ۳. در این مطالعه، ابتدا انواع جریان های کششی معرفی شده، پس از تعریف کرنش مربوط به جریان

کششی، رفتارهای مختلف سیالات پلیمری در میدان های کششی بررسی می شود و در پایان، روش های مختلف اندازه گیری گرانیروی کششی یک بعدی برای سیالات پلیمری از ابتدا تاکنون مرور می شوند.

۲ انواع جریان های کششی

سه نوع اصلی جریان کششی عبارتند از: یک بعدی، دوبعدی و صفحه ای [۷]. طرح واره ای از این سه میدان در شکل ۱ نشان داده شده است.

در صورتی که جریان کششی یک بعدی که جریان کششی ساده نیز نامیده می شود، به ماده ای تراکم ناپذیر در مختصات کارتزین (x, y, z) اعمال شود، نمونه در جهت x با نرخ ثابت کشیده و در هر دو جهت y و z با نرخ یکسان منقبض می شود. در این حالت، معادلات سرعت (V_x, V_y, V_z) عبارتند از:

$$V_x = \dot{\epsilon} x, V_y = -\dot{\epsilon} y/2, V_z = -\dot{\epsilon} z/2 \quad (1)$$

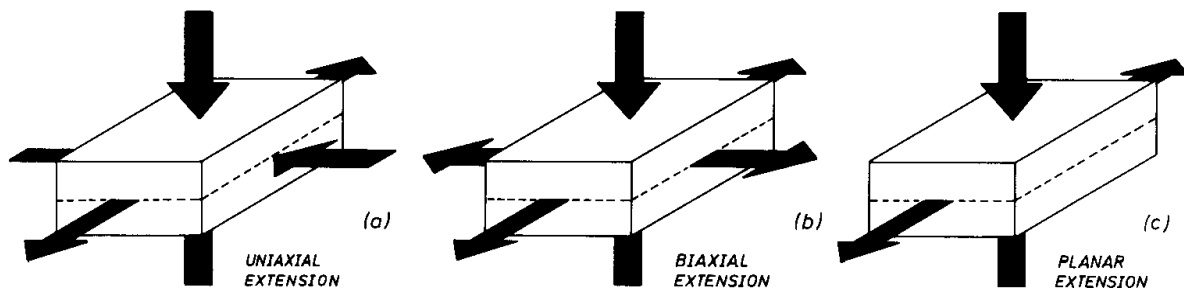
در روابط فوق، $\dot{\epsilon}$ نرخ کشش و مقدار مثبتی است که با $\partial V_x / \partial x$ برابر است. توزیع تنش نیز با معادلات زیر توصیف می شود:

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \sigma_{xx} - \sigma_{zz} = \dot{\epsilon} \eta_e (\dot{\epsilon}) \quad (2)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad (3)$$

در معادله فوق، η_e گرانیروی کششی یک بعدی و معمولاً تابع نرخ کرنش کششی $(\dot{\epsilon})$ است. این وابستگی در سیالات مختلف پلیمری متفاوت است که در بخش های بعدی بررسی می شود.

اعمال میدان کششی دوبعدی در دو جهت x و y با نرخ یکسان $\dot{\epsilon}$ به سیالی تراکم ناپذیر، منجر به تراکم در



شکل ۱ سه نوع اصلی جریان کششی به ترتیب از چپ: (a) یک بعدی، (b) دو بعدی و (c) صفحه ای [۷]

برای محاسبه تنش، نیرو باید به سطح مقطع واقعی نمونه (A) و نه مقدار اولیه آن (A_0) تقسیم شود. هم‌چنین، در این جریان، نوع متداول کرنش یعنی کرنش کوشی (Cauchy) با کرنش هنکی (Hencky) جایگزین می‌شود. کرنش کوشی ($\dot{\epsilon}$) که کرنش اسمی یا مهندسی نیز نامیده می‌شود، برای تغییر شکل‌های کوچک معتبر است و با رابطه $\epsilon = (L - L_0)/L_0$ محاسبه می‌شود که L_0 و L به ترتیب طول اولیه و طول نهایی نمونه است. اما کرنش هنکی ($\dot{\epsilon}_H$) که به عنوان کرنش طبیعی یا واقعی شناخته می‌شود، در همه کاربردها و زمینه‌های تحقیقاتی پلیمرها که تغییر شکل‌های کششی بزرگ ($\Delta L \gg L_0$) اعمال می‌شود، مانند خواص مکانیکی لاستیک‌ها استفاده می‌شود. کرنش تفاضلی هنکی ($d\dot{\epsilon}_H$) را می‌توان با تقسیم تغییر طول (dL) به طول واقعی و نه طول اولیه محاسبه کرد:

$$d\epsilon_H = dL/L \quad (9)$$

$$\epsilon_H = \int_{L_0}^L d\epsilon_H = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\lambda \quad (10)$$

در رابطه فوق، $\lambda = L/L_0$ نسبت کشش است. در تغییر شکل‌های کوچک، $A \approx A_0$ و $\epsilon_H \approx \epsilon$ و همان‌طور که انتظار می‌رود، تعاریف مربوط به هندسه ثابت نمونه در طول تغییر شکل معتبر است.

نرخ کشش هنکی ($\dot{\epsilon}_H$) با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(11)$$

$$\dot{\epsilon}_H = (d\epsilon_H)/dt = (d[\ln(L/L_0)])/dt = 1/L \cdot dL/dt = V/L$$

در رابطه فوق، V سرعت کشش است. بر اساس این رابطه، اگر نمونه در جریان کششی یک‌بعدی با نرخ ثابتی در زمان t کشیده شود، با انتگرال‌گیری می‌توان کرنش هنکی (ϵ_H) را محاسبه کرد:

$$\ln(L/L_0) = \dot{\epsilon}_H t = \epsilon_H(t) \quad (12)$$

که L طول نمونه در زمان t است. بنابراین، در جریان کششی یکنواخت پایا، لازم است طول به صورت توانی افزایش یابد تا نرخ کشش به صورت ثابت حفظ شود:

$$L = L_0 \exp(\dot{\epsilon}_H t) \quad (13)$$

اگر حجم ماده ثابت باشد ($A_0 L_0 = AL$)، می‌توان با استفاده از رابطه زیر، مساحت را در هر زمان محاسبه

جهت سوم (z) می‌شود. معادلات سرعت در این نوع جریان عبارتند از:

$$V_x = \dot{\epsilon} x, V_y = \dot{\epsilon} y, V_z = -2\dot{\epsilon} z \quad (4)$$

این نوع کشش، معادل با کشیدن صفحه‌ای نازک در دو جهت عمود بر هم به صورت هم‌زمان است که با کاهش ضخامت صفحه همراه است. میدان تنش در این جریان دوبعدی عبارت است از:

$$\sigma_{zz} - \sigma_{xx} = \sigma_{zz} - \sigma_{yy} = -\dot{\epsilon} \eta_{eb}(\dot{\epsilon}) \quad (5)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad (6)$$

در معادله فوق، η_{eb} گرانیروی کششی دوبعدی است. می‌توان نشان داد که $\eta_{eb}(\dot{\epsilon}) = 2\eta_e(-2\dot{\epsilon})$.

در نوع سوم جریان کششی یعنی صفحه‌ای، نمونه در جهت x با نرخ ثابت $\dot{\epsilon}$ به نحوی کشیده می‌شود که بدون تغییر طول در جهت y ، در بعد سوم با همان نرخ منقبض شود. این جریان معادل با کشش یک صفحه نازک مسطح فقط در یک جهت (x) است که انقباض در جهت ضخامت (جهت z) رخ داده، اما عرض صفحه (جهت y) تغییر نمی‌کند. در این جریان، معادلات سرعت و گرانیروی کششی صفحه‌ای (η_{ep}) به ترتیب عبارتند از:

$$V_x = \dot{\epsilon} x, V_y = 0, V_z = -\dot{\epsilon} z \quad (7)$$

$$\sigma_{xx} - \sigma_{zz} = \dot{\epsilon} \eta_{ep}(\dot{\epsilon}) \quad (8)$$

از لحاظ تجربی غالباً دستیابی به حالت پایدار در معادلات فوق امکان‌پذیر نیست و در این شرایط معمولاً از گرانیروی کششی گذرا $\eta(t, \dot{\epsilon})$ استفاده می‌شود. زمانی که خواص جریان کششی مذاب‌های پلیمری مورد توجه است، متداول‌ترین نوع جریان بررسی می‌شود که میدان کششی یک‌بعدی است [7-8]. در این مطالعه نیز تمرکز بر این نوع جریان کششی است.

۳ کرنش کششی

تغییر شکل‌های کششی معمولاً بسیار بزرگ هستند و تعاریف تنش، کرنش و نرخ کرنش در آن‌ها در مقایسه با ازدیاد طول‌های کوچک متفاوت است. در این موارد لازم است کرنش و تنش را با در نظر گرفتن ثابت بودن حجم ماده، به هندسه واقعی آن مرتبط کرد، برای مثال

کرد [۹-۱۰]:

$$A = A_0 \exp(-\dot{\epsilon}_H t) \quad (14)$$

۴ رفتار سیالات پلیمری در میدان های کششی

به طور کلی، سیالات پلیمری ممکن است سه نوع رفتار در میدان های کششی نشان دهند که این امر با تغییرات گرانروی کششی در برابر نرخ کشش رهگیری می شود: (۱) گرانروی کششی، مستقل از نرخ جریان کششی است. این مواد به عنوان مواد تروتونی (Troutonian) و گرانروی آن ها غالباً به عنوان گرانروی تروتونی شناخته می شود. هم چنین، نسبت گرانروی کششی به گرانروی برشی (η_p)، نسبت تروتون (T_r) نامیده می شود [۸]:

$$T_r = \eta_e(\dot{\epsilon}) / \eta_s(\dot{\gamma}) \quad (15)$$

در معادله فوق، $\dot{\gamma}$ نرخ برش است. از آن جایی که نسبت تراتون به نرخ کشش و نرخ برش (هر دو) وابسته است، انتخاب این مقادیر ممکن است با ابهام همراه باشد. با استفاده از رابطه $\dot{\gamma} = \sqrt{3}\dot{\epsilon}$ می توان به تخمینی صحیح و بدون ابهام دست یافت.

برخی از محققان بر این باورند که نسبت تراتون در سیالات غیرکشسان و همسانگرد (Isotropic)، برای همه مقادیر نرخ کشش و نرخ برش برابر با سه بوده، هرگونه انحراف از آن می تواند گرانروکشسان بودن رفتار ماده را توصیف کند [۷]. در محلول ها و مذاب های پلیمری، معمولاً نسبت تراتون در نرخ های تغییر شکل متوسط و بزرگ تر، از سه بیشتر [۸] و در نرخ های کرنش خیلی کم (کمتر از 1 s^{-1})، به ندرت با سه متفاوت است [۱۱]. البته اکثر مذاب های پلیمری برای مثال: پلی (متیل متاکریلات) (PMMA)، پلی استایرن (PS)، پلی (اتیلن ترفتالات) (PET) و پلی کربنات (PC) در میدان های کششی رفتار تروتونی نشان می دهند [۱۲].

همان طور که بیان شد، رفتار تروتونی در جریان کششی، معادل رفتار نیوتونی در جریان برشی است و به صورت مشابه، رفتار غیر تروتونی معادل با رفتار غیر نیوتونی است که خود به دو دسته زیر تقسیم می شود:

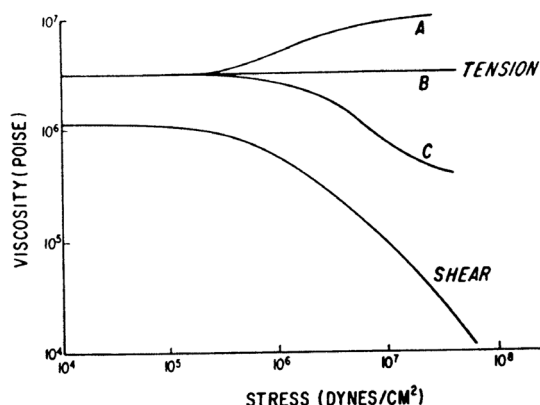
(۲) گرانروی کششی با افزایش تنش کششی یا افزایش نرخ کرنش افزایش می یابد. این رفتار به عنوان سخت شدن کششی (Tension Stiffening or Strain Hardening) یا تغلیظ شدن کششی (or Tension Thickening) شناخته شده، با تغلیظ شدن برشی (Shear Thickening) یا رفتار دیلاتانت (Dilatant)

در جریان برشی معادل است.

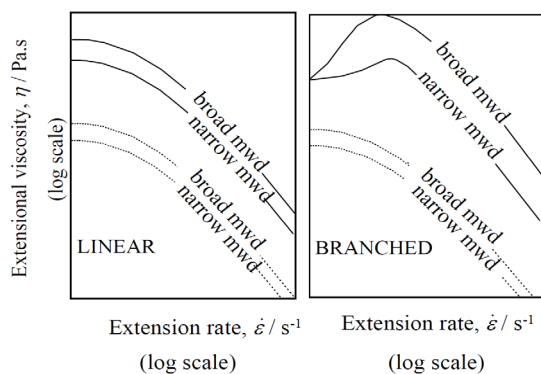
(۳) گرانروی کششی با افزایش تنش کششی یا افزایش نرخ کرنش کاهش می یابد. این رفتار به عنوان رقیق شدن کششی (Tension Thinning) شناخته شده، با رقیق شدن برشی (Shear Thinning) یا رفتار شبه پلاستیک (Pseudoplasticity) در جریان برشی معادل است.

معمولاً سیالات پلیمری با اعمال میدان های برشی در نرخ های کرنش متوسط، به صورت شبه پلاستیک رفتار می کنند. طرح واره ای از این عملکرد همراه با سه رفتار مشاهده شده در میدان های کششی در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۳].

ممکن است همیشه مشاهده و تمایز دقیق میان سه رفتار فوق، امکان پذیر نباشد. این امر به نوع پلیمر، وزن مولکولی و توزیع آن، حضور شاخه های جانبی و مقدار و شرایط تغییر شکل (برای مثال دما و نرخ کشش) بستگی دارد [۱۱]. مشاهده شده است که پلی الفین های خطی مانند پلی اتیلن با چگالی زیاد (HDPE) و پلی پروپیلن (PP)، بر خلاف پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE)، با اعمال تنش کششی زیاد یا نرخ جریان کششی زیاد رفتار رقیق شدن کششی نشان می دهند. رفتار کششی نمونه ای از LDPE در دمای 150°C در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۴]. در حالی که بالای مقدار بحرانی نرخ کشش، گرانروی برشی به صورت پیوسته کاهش می یابد (رفتار شبه پلاستیک)، اما گرانروی کششی ابتدا افزایش



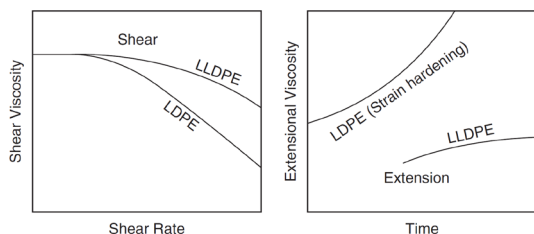
شکل ۲ انواع وابستگی گرانروی کششی سیالات پلیمری به تنش کششی: تغلیظ شدن کششی (A)، تروتونی (B) و رقیق شدن کششی (C) همراه با رفتار متداول آن ها در میدان های برشی [۱۳]



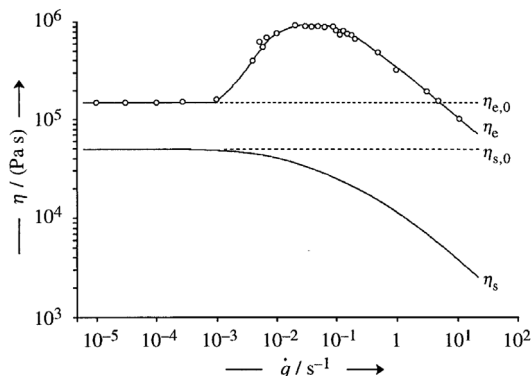
شکل ۵ مقایسه اثر شاخه‌ای شدن و توزیع وزن مولکولی بر گرانروی کششی مذاب‌های پلیمری [۱۵]

اهمیت رفتار کششی صرف‌نظر از فرایندهای شکل‌دهی، کمک به تمایز رفتار دو پلیمری است که ممکن است در جریان برشی یکسان عمل کنند [۷]. برای مثال، پلی اتیلن خطی با چگالی کم (LLDPE) در مقایسه با LDPE که شاخه‌ای است در جریان برشی سفت‌تر (Stiffer)، اما در جریان کششی نرم‌تر عمل می‌کند (شکل ۶). در کشش، زنجیرهای خطی LLDPE بدون ایجاد گره خوردگی، می‌لغزند، اما شاخه‌های بلند در زنجیرهای LDPE مقاومت بسیار بیشتری را ایجاد می‌کنند [۱۶].

همان‌طور که بیان شد، تغییر شرایط فرایند نیز ممکن است بر نوع رفتار پلیمر در جریان کششی اثرگذار باشد. برای مثال، افزایش نرخ کرنش در دمای ثابت ممکن است رفتار کششی را از رقیق‌شونده به غلیظ‌شونده تغییر دهد. این رفتار برای PS (شکل ۷) و LDPE در دمای ثابت مشاهده شده است [۱۷].

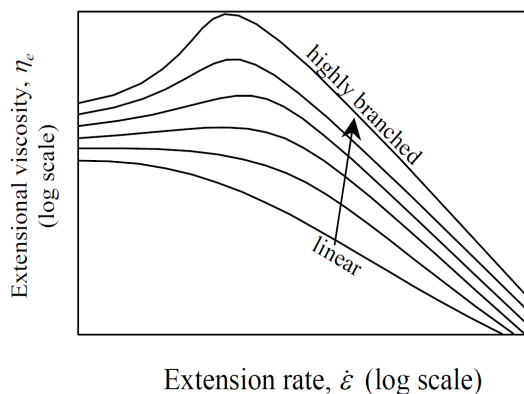


شکل ۶ طرح‌واره‌ای از رفتار LLDPE و LDPE در میدان‌های کششی (راست) و برشی (چپ) [۱۶]



شکل ۳ تابعیت گرانروی کششی یک بعدی (η_e) به نرخ کشش ($\dot{q} = \dot{\epsilon}$) و همچنین تابعیت گرانروی برشی (η_s) به نرخ برش ($\dot{q} = \dot{\gamma}$) برای LDPE در دمای 150°C گرانروی در نرخ برش صفر ($\eta_{s,0}$ و $\eta_{e,0}$) برای هر دو جریان نیز نشان داده شده است [۱۴].

یافته و با افزایش بیشتر نرخ کشش، پس از عبور از بیشینه، روند نزولی نشان می‌دهد. در واقع با افزایش کسر شاخه‌های بلند، میزان بیشینه گرانروی کششی افزایش می‌یابد، شکل ۴. این رفتار نشان‌دهنده اثر قوی گره‌خوردگی بر گرانروی کششی است و شاخه‌های بلند با ایجاد گره‌خوردگی، مانع از آرایش مجدد زنجیرها می‌شوند. نکته جالب توجه این است که مشاهده این بیشینه، مستقل از حضور شاخه‌های کوتاه بوده، زنجیرهای خطی با توزیع وزن مولکولی پهن بر خلاف زنجیرهای شاخه‌ای، رفتار رقیق شدن کششی نشان می‌دهند (شکل ۵) [۱۵-۱۴].



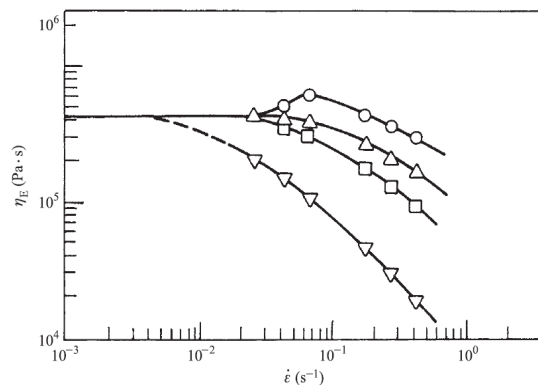
شکل ۴ اثر شاخه‌ای شدن بر گرانروی کششی مذاب‌های پلیمری [۱۵]

کافی سریع بازیابی شده، در نتیجه ماده هنوز همسانگرد بوده، رفتار پایا مشاهده می شود. اما در نرخ های کرنش بیشتر و مخصوصاً در دماهای نسبتاً کم، تغییر شکل، دیگر نمی تواند کاملاً گرانرو در نظر گرفته شود. بنابراین انتقال از رفتار گرانرو به گرانروکشسان رخ داده، ماده ظرفیت خود را برای تحمل تغییر شکل های غیرقابل برگشت از دست می دهد. در نتیجه، با تجمع مقدار قابل توجهی از تغییر شکل های برگشت پذیر و تمایل پلیمر برای منقبض شدن، مقاومت در برابر جریان، افزایش یافته، رفتار تغلیظ شدن کششی مشاهده می شود. البته ممکن است پس از این افزایش گرانروی، با افزایش بیشتر نرخ کرنش، ساختار شبکه مانند تخریب شده، مولکول ها هماهنگ با یکدیگر آرایش یافته، نتیجتاً با کاهش گرانروی کششی، رفتار رقیق شدن کششی بروز کند [۱۱].

برای پایداری برخی از فرایندهای پلیمری مانند ریسندگی الیاف مطلوب است که گرانروی کششی با نرخ کشش افزایش یابد. اگر به دلیلی نقطه وضعی در لیف ایجاد شود که منجر به کاهش سطح مقطع لیف و نازک شدن آن شود، قانون پیوستگی ایجاب می کند این بخش نسبت به بقیه لیف با سرعت بیشتری حرکت کند. در نتیجه، نرخ کرنش کششی در آن بیشتر خواهد بود. اگر رفتار پلیمر در میدان کششی از نوع رقیق شونده باشد، با کاهش مقاومت در برابر کشش و شتاب حرکت، این بخش نازک تر شده، در نهایت ممکن است بشکند. اما اگر سیال پلیمری در اثر کشش به صورت تغلیظ شونده عمل کند، با افزایش مقاومت در بخش نازک تر لیف، سرعت جریان کاهش و در نتیجه قطر لیف افزایش می یابد. در این مورد، حتی می توان انتظار داشت که قطر در محل نقص، به قطر مابقی لیف برسد. بنابراین، غلیظ شدن در اثر تنش، خاصیت پایدارکنندگی بر این فرایند دارد. از این رو در فرایندهایی که کشش بالا اعمال می شود مانند دمش فیلم، پلیمرهای شاخه ای ترجیح داده می شوند [۷].

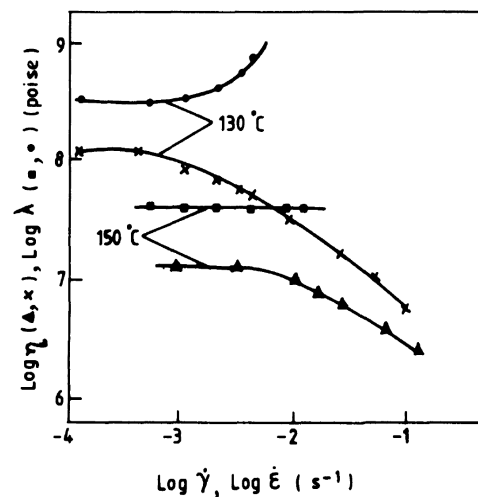
۵ اندازه گیری گرانروی کششی یک بعدی

اندازه گیری صحیح گرانروی کششی یک بعدی، با وجود دستگاه های تجربی مختلف، آزمونی چالش برانگیز است. این مشکلات غالباً در تولید جریان کششی کاملاً یک بعدی و مخصوصاً دستیابی به شرایط پایا بروز



شکل ۷ تابعیت گرانروی کششی از نرخ کشش برای PS در دمای ۱۵۵ °C در کرنش های هنکی مختلف: ۱/۵ (○)، ۰/۹ (△)، ۰/۵ (□) و ۰/۱ (▽) [۱۷]

نیز مشخصه مؤثر دیگری است. رفتار نمونه ای از PS در دو میدان برشی و کششی در دماهای ۱۳۰ °C و ۱۵۰ °C در شکل ۸ مقایسه شده است. در هر دو دما، این پلیمر در میدان برشی به شکل مورد انتظار یعنی رقیق شونده رفتار می کند، اما در جریان کششی، با کاهش دما از ۱۵۰ °C به ۱۳۰ °C، رفتار از نوع تروتونی به تغلیظ شونده تغییر می یابد [۱۸]. البته در هر دو دما، گرانروی کششی در نرخ های کشش بسیار کم به صورت تروتونی است، چون در این شرایط، ساختار شبکه مانند سیال به اندازه



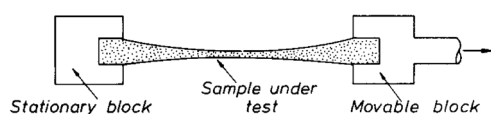
شکل ۸ تابعیت لگاریتم گرانروی کششی (● و ■) و برشی (▲ و ×) بر حسب پواز از لگاریتم نرخ کشش (γ̇) و برش (γ̇) برای PS در دماهای ۱۳۰ °C و ۱۵۰ °C [۱۸].

تقویت و منجر به تغییر شکل غیریکنواخت و شکست چقرمه می‌شود [۲۰-۱۹، ۲۰، ۲۱].

تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای روش‌های اندازه‌گیری گرانیروی کششی وجود دارد. برای مثال، می‌توان آن‌ها را بر اساس نوع طراحی به سه دسته کشش رشته با طول متغیر، کشش رشته با طول ثابت و کشش رشته با غلتک‌های چرخان تقسیم کرد [۲۱]. هم‌چنین می‌توان آن‌ها را بر اساس اعمال تنش ثابت یا نرخ کرنش ثابت متمایز کرد [۲۲].

اولین روشی که برای تعیین گرانیروی کششی استفاده شد، کشش همگن بود (شکل ۹). عیب اجتناب‌ناپذیر این روش این است که برای دستیابی به نرخ کرنش کششی ثابت، با توجه به رابطه ۱۳ باید سرعت قطعه متحرک به صورت توانی با زمان افزایش یابد. این مسئله با روش‌هایی که به صورت الکتریکی قابل کنترل هستند، امکان‌پذیر است، اما حرکت شتاب‌دار گیره، محدودیت شدیدی بر نرخ کرنش قابل دستیابی ایجاد می‌کند که مستلزم توقف حرکت برای زمانی کافی است تا تنش به مقدار پایایی برسد. به دلایل عملی، تغییر شکل کلی در این روش محدود است و در نتیجه به سامانه‌های با گرانیروی بالا محدود می‌شود [۷].

بالمن (Ballman) روشی را مشابه با کشش همگن طراحی کرد که در آن مذاب پلیمر در دو انتها چسبانده یا با گیره‌های فلزی متصل می‌شود و سپس یک انتها به نحوی حرکت می‌کند که نرخ کشش یکنواخت یا تنش کششی ثابتی ایجاد شود. همان‌طور که بیان شد، برای ایجاد نرخ کشش یکنواخت در کل نمونه، انتهای نمونه باید به نحوی تغییر شکل یابد که طول نمونه به صورت توانی با زمان افزایش یابد. هم‌چنین، نمونه باید درون روغنی با چگالی مشابه نگه داشته شود. محدودیت‌های این روش عبارتند از: (۱) در دسترس بودن چسب مناسب برای اتصال نمونه به گیره‌های فلزی، (۲) قابلیت نمونه در دسترس بودن روغن با چگالی مشابه با مذاب پلیمر



شکل ۹ طرح‌واره‌ای از روش کشش همگن [۷]

می‌کند [۲، ۷]. روش واحدی برای اندازه‌گیری گرانیروی کششی انواع سیالات وجود ندارد. برخی روش‌ها برای محلول‌ها و برخی برای مایعات بسیار گرانیرو مانند مذاب‌های پلیمری و هم‌چنین، برخی برای نرخ کرنش کششی کم و برخی برای نرخ کرنش زیاد مناسب‌تر هستند [۱۷]. داده‌های تجربی غالباً در نرخ‌های کرنش کمتر از 10^{-1} به دست می‌آیند که استفاده از آن‌ها در کاربردهای صنعتی محدود است. از این رو، برخلاف رئومترهای برشی، به دست آوردن صحیح داده‌های کششی در محدوده گسترده‌ای از نرخ‌های کرنش با استفاده از فقط یک روش، امری دشوار بوده، مستلزم تلفیق روش‌های مختلف است [۲]. به صورت کلی، اندازه‌گیری گرانیروی کششی بسیار سخت‌تر از گرانیروی برشی است. برخی از دلایل این امر عبارتند از:

(۱) سطحی از نمونه بدون تغییر شکل وجود ندارد تا به عنوان تکیه‌گاه استفاده شده، یا تنش تغییر شکل دهنده بر آن اعمال شود. بنابراین لازم است تا نمونه درون حمامی از روغن شناور یا معلق شود؛ به شرطی که دما فقط کمی بالاتر از نقطه نرمی نمونه باشد. در این موارد، باید از عدم وجود برهم‌کنش میان سیال و نمونه اطمینان حاصل کرد.

(۲) نیروی کششی که از سطح جامد خیس شده به مذاب منتقل می‌شود، برای ایجاد تنش‌های تغییر شکل دهنده کافی نیست. برای حل این مشکل، از گیره‌های چرخان و یا چسب استفاده می‌شود. در این موارد، کرنش ناهمگن در نزدیکی انتهای ثابت نمونه که غالباً به عنوان اثر انتهایی شناخته می‌شود، می‌تواند منشأ خطا شود.

(۳) مطالعه پاسخ به کرنش‌های هنگی بزرگ نیازمند افزایش زیاد در طول است. برای مثال، کرنش هنگی پنج مربوط به نسبت کشش ۱۴۸ است (معادله ۱۳). در این شرایط لازم است از حمام روغن طولانی استفاده شود. کنترل دقیق دما در سراسر طول نمونه نیز در این شرایط دشوار خواهد بود.

(۴) این آزمون معمولاً به ناهمگونی‌های احتمالی در نمونه مانند حباب و ناخالصی حساس است. بنابراین، نمونه باید کاملاً همگن بوده، دما در کل نمونه یکنواخت باشد. برای موادی که رفتار غلیظ شدن در برابر کشش نشان نمی‌دهند یا این رفتار آنها ضعیف است، هر گونه غیریکنواختی در سطح مقطع نمونه در طول کشش

۵-۱ رئومتر کششی میزنر

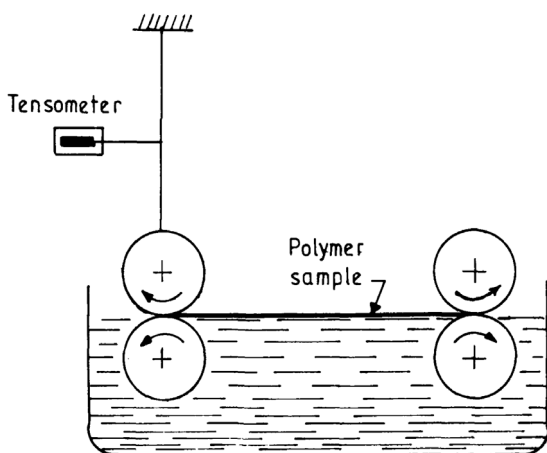
محقق پیشتاز در ارزیابی تجربی رفتار کششی برای مذاب‌های پلیمری، میزنر بود که متداول‌ترین روش را به منظور اندازه‌گیری گرانروی کششی معرفی کرد [۲۴]. در این روش، نمونه که ترجیحاً استوانه‌ای شکل است، میان دو شکاف چرخان کشیده می‌شود، شکل ۱۰. این شکاف‌ها با دو زوج چرخ دنداندار ایجاد شده که با سرعت‌های زاویه‌ای ثابتی در جهات مخالف می‌چرخند. از یک قیچی کنترل شده از دور، برای برش بخش‌های نمونه پس از کشش استفاده می‌شود. چرخ‌ها درون حمام سیالی از روغن سیلیکون که به صورت افقی برای جبران گرانش تعبیه شده است، قرار می‌گیرند.

در این دستگاه، نرخ کشش ثابت و برابر است با $\dot{\epsilon}_H = (\pi d(n_1 + n_2))/L_0$ که در آن n_1 و n_2 سرعت چرخش چرخ‌ها بر حسب دور بر ثانیه، d قطر چرخ‌های دنداندار و L_0 طول نمونه میان دو گیره است که معمولاً بین ۶۰ تا ۸۰ cm است. در صورتی که سرعت چرخش چرخ‌ها v باشد، رابطه فوق به $2v/L_0$ ساده می‌شود. با توجه به این روابط، نرخ کشش نمونه با نرخ چرخش چرخ‌ها و طول نمونه کنترل می‌شود. از آنجایی که در این روش طول نمونه ثابت است، می‌توان با ثابت نگه داشتن سرعت هر زوج چرخ که به آسانی با موتورهای هدایت‌کننده امکان‌پذیر است، به نرخ کشش ثابتی دست یافت. البته بیشترین نرخ کرنش علاوه بر سرعت چرخ‌ها، با پایداری جریان

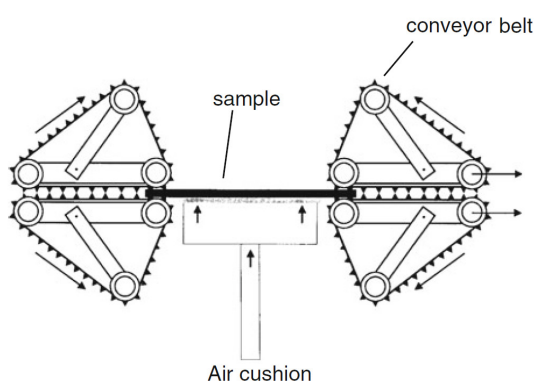
مگر این که نمونه در صفحه افقی تغییر شکل داده شود، ۴) کرنش‌های کم در حدود ۳/۹. برخلاف این محدودیت‌ها، با این روش می‌توان داده‌های ارزشمندی مخصوصاً برای پلی‌الفین‌ها به دست آورد [۲۳].

مدت آزمون در روش کشش همگن، به زمانی محدود می‌شود که انتهای متحرک نمونه طول حمام با دمای ثابت را می‌پیماید. اما در صورتی که نمونه در طول ثابت کشیده شود، فضای در دسترس حمام یا اندازه دستگاه، محدودکننده نخواهد بود. بر این اساس، میزنر (Meissner) [۲۴] روشی را معرفی کرد که به جای ثابت بودن یک انتها و حرکت انتهای دیگر، طول ثابتی از نمونه میان دو زوج چرخ دنده قرار گرفته، با چرخش آن‌ها با سرعت زاویه‌ای ثابت، کشش ثابتی به نمونه اعمال شود. بدین ترتیب محدودیت اندازه دستگاه حذف شد. جزئیات بیشتری از این روش در ادامه بیان می‌شود. هر دو روش فوق (کشش همگن و روش میزنر)، از نوع نرخ کرنش ثابت هستند.

همان‌طور که بیان شد، دستگاه‌های اندازه‌گیری گرانروی کششی ممکن است در تنش ثابت عمل کنند که در آن‌ها نیرو متناسب با مساحت سطح مقطع نمونه در حال کشش، کاهش می‌یابد. این امر با استفاده از بارگذاری برنامه‌ریزی شده به همراه وسیله‌ای مناسب برای اندازه‌گیری طول نمونه به صورت تابعی از زمان انجام می‌شود. معمولاً وسایل تنش ثابت در مقایسه با وسایل کرنش ثابت، در تغییر شکل‌های کلی کوچک‌تری به جریان کششی پایا می‌رسند. برای مثال، نشان داده شده است که مذاب LDPE در آزمایش‌های تنش ثابت با کرنش ۳/۵ به حالت تعادل می‌رسد، اما در آزمایش نرخ کرنش ثابت مشابه، به کرنش ۴/۵ نیاز است [۲]. روش تنش ثابت در ابتدا توسط Cogswell معرفی و بعداً توسط Münstedt (۱۹۷۹) [۲۵] توسعه یافت. در رئومتر کششی که به نام این محقق نامیده شد (Münstedt Tensile Rheometer, MTR)، نمونه به صورت عمودی در حمامی از روغن برای کنترل دما و حداقل کردن خمیدگی قرار می‌گیرد و در میان دو گیره‌ای که از یکدیگر دور می‌شوند، کشیده می‌شود. در ادامه، برخی از انواع رئومترهای کششی که میدان‌های کششی تک‌بعدی اعمال می‌کنند، به اختصار معرفی می‌شوند:



شکل ۱۰ طرح‌واره‌ای از رئومتر کششی میزنر [۱۱]



شکل ۱۱ طرح‌واره‌ای از دستگاه RME [۹]

Rheometrics–Meissner Extensional (RME) Rheometer نامیده شد. این دستگاه از دقت زیادی برخوردار است و نتایج آن می‌تواند به عنوان مرجعی برای دستگاه‌های کششی دیگر باشد. از آنجایی که شکم دادن نمونه با کاهش گرانیروی، تشدید می‌شود، این رنومتر برای مذاب‌های پلیمری بسیار گرانیرو بهترین بوده است، اما به دستگاهی برای کار آزمایشگاهی روزمره تبدیل نشده است [۹، ۳].

۵-۲ رنومترهای کشش مذاب با غلتک‌های چرخان

دستگاه‌های مختلفی برای کشش مذاب با غلتک‌های چرخان طراحی شده‌اند که همگی با اصول یکسانی کار می‌کنند [۲۶]. رنومتر کششی ستمانات (Sentmanat Extensional Rheometer, SER) یکی از آن‌هاست که در سال ۲۰۰۴ معرفی شد، (شکل ۱۲) [۶]. در این دستگاه، یک زوج غلتک به کار می‌رود که در جهات مختلف با نرخ ثابت می‌چرخند. در این روش، فقط یک تا دو گرم از ماده برای تهیه نمونه‌ای مستطیلی شکل (عرض mm ۱۰-۸، ضخامت mm ۱/۴-۱/۲ و طول mm ۲۰-۱۵) کافی است. نمونه پس از سوار شدن روی غلتک‌ها، به صورت مماسی کشیده شود. گیره‌های فلزی کوچکی از لغزش نمونه روی غلتک‌ها جلوگیری می‌کنند.

در اثر کشش، سطح مقطع نمونه کاهش یافته، گشتاور مورد نیاز (M) برای ایجاد کشش در سرعت چرخش از پیش تعیین شده ثبت و اندازه‌گیری می‌شود:

$$M = 2rF(t) \quad (16)$$

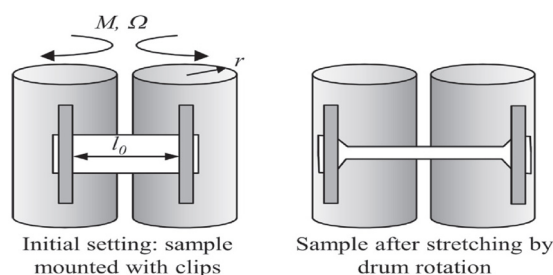
محدود می‌شود. تنش را نیز می‌توان با انحراف فنر که به زوج چرخ مربوط می‌شود، اندازه‌گیری و در نهایت گرانیروی کششی را به دست آورد.

با این دستگاه در نرخ‌های کشش ثابت مختلف، می‌توان نسبت کششی به بزرگی $\lambda=400$ ایجاد کرد که با توجه به رابطه ۱۳، با کرنش‌های حداکثر شش معادل است. در این روش به مقدار نسبتاً زیادی از نمونه همگن و بدون عیب نیاز است که باید در طول‌های مورد نیاز با هندسه یکنواخت اکستروژد شود. ممکن است میان نمونه و چرخ‌ها لغزش رخ دهد و هم‌چنین برهم‌کنش شیمیایی میان پلیمر و مایع حمام ایجاد شود. علاوه بر این، بیشینه دمای اندازه‌گیری به دلیل فقدان روغن‌های سیلیکون مناسب به حدود 200°C محدود می‌شود. البته در این روش، چون نمونه به صورت افقی قرار می‌گیرد، یکسان بودن چگالی نمونه با روغن، بحرانی نبوده، یافتن چسب مناسب هم لازم نیست [۹، ۱۹].

میزنر و همکاران [۲۱]، برای غلبه بر مشکلات فوق، رنومتر مشابه دیگری را طراحی کردند که مبنای ساخت دستگاهی تجاری شد، (شکل ۱۱). در این ماشین، چرخ‌های دندانه‌دار نوع قبلی با تسمه نقاله‌های فلزی جایگزین شدند. هم‌چنین، نمونه استوانه‌ای به مستطیلی تبدیل و طول نمونه به‌طور قابل توجهی کاهش یافت ($2 \times 7 \times 60 \text{ mm}^3$) که می‌توان با قالب‌گیری فشاری تهیه کرد. علاوه بر این، از حمام روغن استفاده نشده، نمونه روی بالشتی از گازهای خنثی که با پلیمر مورد نظر واکنش نمی‌دهند، معلق می‌شود و در نتیجه کم‌ترین گرانیروی که می‌تواند اندازه‌گیری شود، وجود دارد. در این شرایط، با استفاده از گازهای خنثی به عنوان محیط نگه‌دارنده با کاهش تخریب حرارتی نمونه و اعمال گرمای الکتریکی، دما می‌تواند به صورت قابل توجهی به بیشتر از 200°C افزایش یابد (تا 350°C). هم‌چنین، ثبات دمایی خوبی با استفاده از گرمایش الکتریکی دیواره محفظه که کل دستگاه اندازه‌گیری در آن قرار گرفته، حاصل می‌شود. نرخ کرنش اعمال شده با این دستگاه در محدوده 0.001 تا 1 s^{-1} بوده، بیشینه کرنش‌های قابل دستیابی، ۷ (معادل بیشینه نسبت کشش ۱۱۰۰) است. هم‌چنین محدوده اندازه‌گیری نیرو بین 0.001 N و ۲ است. نمونه اولیه این نوع رنومتر در سال ۱۹۹۴ ساخته و توسط Rheometric Scientific تجاری و Rheometrics Melt Extensiometer (RME) یا

دستیابی به جریان پایای واقعی در کشش گذرا چالش برانگیز است. در این روش، عامل محدودکننده غالباً گردنی شدن و پارگی نمونه است. هم‌چنین، ممکن است دستیابی به جریان پایا با بیشینه زاویه چرخش محدود شود. اگر به غلتک‌ها اجازه داده شود حول محور خود چرخش کامل 360° انجام دهند، نمونه شروع به پیچیدن روی گیره‌ها کرده، با تغییر شرایط مرزی، ممکن است قله نادرستی در نمودار گرانیرو گذرا مشاهده شود. به دلیل چنین محدودیت‌هایی، بیشینه کرنش هنکی قابل دستیابی با این دستگاه کمتر از ۴ است ($\epsilon_{\max} < 4$). البته نرخ‌های کرنش در حدود 30 s^{-1} را با این وسیله می‌توان ایجاد کرد. شکم دادن نمونه در اثر نیروی گرانش در طول گرما دادن نمونه قبل از شروع آزمون نیز مسئله دیگری است که مخصوصاً برای نمونه‌های با گرانیروی کمتر از $10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ چالش برانگیز است. البته یک تنش کوچک از پیش تعیین شده می‌تواند روی نمونه در مرحله گرما دادن اعمال شود تا از شکم دادن نمونه جلوگیری شود. در این مورد، باید اثر پیش کشش روی سطح مقطع اولیه نمونه در محاسبات در نظر گرفته شود. انبساط حرارتی نمونه در هنگام گرما دادن نیز می‌تواند چگالی آن را تغییر دهد و در نظر گرفتن این مسئله می‌تواند صحت اندازه‌گیری را بهبود بخشد. هم‌چنین، اگر طراحی دستگاه اجازه دهد، می‌توان برای جلوگیری از شکم دادن نمونه، از غوطه‌وری سامانه درون حمام استفاده کرد. در این مورد، محکم کردن نمونه به منظور جلوگیری از لغزش یا شل شدن از غلتک‌ها ضروری است [۱، ۶، ۲۶]. اخیراً دستگاه جدیدی به نام رئومتر کششی افقی (Horizontal Extensional Rheometry, HER) با تلفیق SER و RME برای جلوگیری از شکم دادن نمونه در اثر جاذبه طراحی شده است [۵].

در سال ۲۰۰۵، رئومتر کششی دیگری مشابه با دستگاه فوق معرفی شد (Extensional Viscosity Fixture, EVF). با این تفاوت که در آن یک غلتک ثابت بوده و غلتک دومی حول اولی می‌چرخد [۲۷]. هر دو نوع این رئومترها از مزیت کنترل آسان سرعت چرخش و دما برخوردارند و برای اندازه‌گیری گرانیروی سیالات بسیارگرانرو مانند مذاب‌ها و محلول‌های غلیظ پلیمری استفاده می‌شوند. هم‌چنین هر دو دستگاه معمولاً به‌عنوان قطعه جانبی روی رئومترهای چرخشی سوار می‌شوند [۱۹، ۵].



شکل ۱۲ طرح‌واره‌ای از SER: نمونه روی گیره‌ها نصب (چپ) و سپس کشیده می‌شود (راست). L_0 طول اولیه نمونه، r شعاع غلتک، M گشتاور و Ω سرعت زاویه‌ای چرخش است [۲۶].

در رابطه فوق، F نیروی کشش و r شعاع غلتک است ($5/155 \text{ mm}$). نیروی اصطکاک معمولاً کمتر از ۲٪ نیروی کشش بوده، سهم ناچیزی در گشتاور خواهد داشت. نرخ کرنش هنکی در سرعت ثابت چرخش غلتک (Ω) برابر است با:

$$\dot{\epsilon}_H = 2\Omega r / L_0 \quad (17)$$

که L_0 طول اولیه نمونه در ناحیه کشش یعنی فاصله میان گیره‌های ثابت در حالت ایستا است ($12/72 \text{ mm}$). معمولاً آزمایش‌ها در کشش ناپایای رشد تنش (Strat up) انجام می‌شود. در این شرایط، می‌توان گرانیروی کششی گذرا (η^+) را به‌عنوان تابعی از زمان با رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\eta^+_e(t) = \sigma_r / \dot{\epsilon}_H = (F(t)) / (\dot{\epsilon}_H A(t)) = M / (2r \dot{\epsilon}_H A_0(T) \exp[-\dot{\epsilon}_H t]) \quad (18)$$

زمانی که نمونه روی غلتک‌های دستگاه نصب و تا دمای آزمون گرم می‌شود، ابعاد آن به دلیل انبساط حرارتی تغییر می‌کند. اما ابعاد نمونه را فقط می‌توان در حالت جامد قبل از نصب روی دستگاه اندازه‌گیری کرد. در این شرایط، ابعاد صحیح نمونه را می‌توان با استفاده از رابطه زیر در دمای آزمون محاسبه کرد:

$$A_0(T) = A_0 (\rho_s / (\rho_M(T)))^{(2/3)} \quad (19)$$

که ρ_s چگالی نمونه در حالت جامد، $\rho_M(T)$ چگالی مذاب در دمای T و A_0 مساحت سطح مقطع اولیه نمونه است [۲۳، ۲۰-۱۹، ۲].

۳-۵ رئومتر کشش رشته

اولین رئومتر کشش رشته (Filament Stretching Rheometer, FSR) به صورت کنترل شده در سال ۱۹۹۱ معرفی شد [۲۸]. در این دستگاه، رشته‌ای استوانه‌ای بین دو صفحه موازی قرار می‌گیرد (شکل ۱۳). صفحه پایینی ثابت است و در زمان‌های $t \geq 0$ ، صفحه بالایی با سرعت توانی از صفحه پایینی دور می‌شود. در نتیجه، قطر در نقطه میانی نمونه (D) به صورت توانی با زمان کاهش می‌یابد و نرخ کرنش Hencky بر اساس رابطه زیر با زمان ثابت خواهد بود [۲۹]:

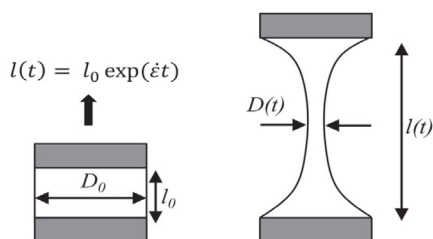
$$\dot{\epsilon}_H = -2/D(dD/dt) \quad (20)$$

در این روش ناحیه میانی رشته، کشش یک بعدی خالصی را تجربه می‌کند. این مجموعه درون گرم‌خانه با دمای کنترل شده که دارای پوشش شیشه‌ای است قرار می‌گیرد تا اندازه‌گیری قطر نمونه را با وسایل لیزر امکان پذیر سازد. در واقع، صفحه بالایی و لیزر با یک موتور حرکت می‌کنند و با استفاده از جعبه دنده مناسبی، لیزر با سرعتی نصف سرعت صفحه بالایی حرکت می‌کند تا دقیقاً در میانه دو صفحه قرار گیرد. تکامل زمانی نیروی کششی اعمال شده با یک سلول باری (Load Cell) که روی صفحه پایینی نصب شده است، ثبت می‌شود. در نهایت، با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو و قطر رشته در میانه محور، گرانیروی کششی گذرا به دست می‌آید.

در این آزمون، قطر و طول اولیه نمونه به نحوی انتخاب می‌شود که نسبت مشخصه کمی را ایجاد کنند (برای مثال به ترتیب ۱۰ mm و در محدوده ۲/۵ mm تا ۴/۵ mm). این امر برای کرنش Hencky مطلوب است، اما ممکن است در بستن و تغییر شکل یکنواخت نمونه مناسب نباشد. این رئومتر بر خلاف برخی از رئومترها که از نوع طول ثابت هستند مانند RME، از نوع حجم ثابت بوده، همه ماده دستخوش کشش قرار می‌گیرد [۱۹]. از این رئومتر برای اندازه‌گیری گرانیروی سیالات بسیارگرانرو مانند مذاب‌ها و محلول‌های غلیظ پلیمری استفاده می‌شود [۵].

۳-۴ رئومتر کششی شکست موئینه

کشش رشته در طول ثابت را می‌توان با رئومتر کششی شکست موئینه (Capillary Breakup Extensional)



شکل ۱۳ طرح‌واره‌ای از کشش نمونه در رئومتر کشش رشته [۲۶]

(Rheometer (CaBER)) نیز انجام داد. در این روش، مقدار کمی از سیال نمونه به صورت عمودی میان دو صفحه دایره‌ای موازی قرار گرفته و با اعمال تغییر شکل مرحله‌ای ناگهانی با پروفیل جدایی فزاینده توانی (رابطه ۱۳)، نمونه، کشیده شده، دچار تغییر شکل می‌شود. به عبارت دیگر، کرنش پله‌ای کششی به صورت ناگهانی به نمونه اعمال می‌شود. پس از آن، صفحات در فاصله نهایی ثابت نگه داشته می‌شود نازک شدن ناحیه میانی رشته در طول گردنی شدن و پاره شدن با میکرومتر لیزری اندازه‌گیری می‌شود. کرنش Hencky در این آزمایش برابر است با:

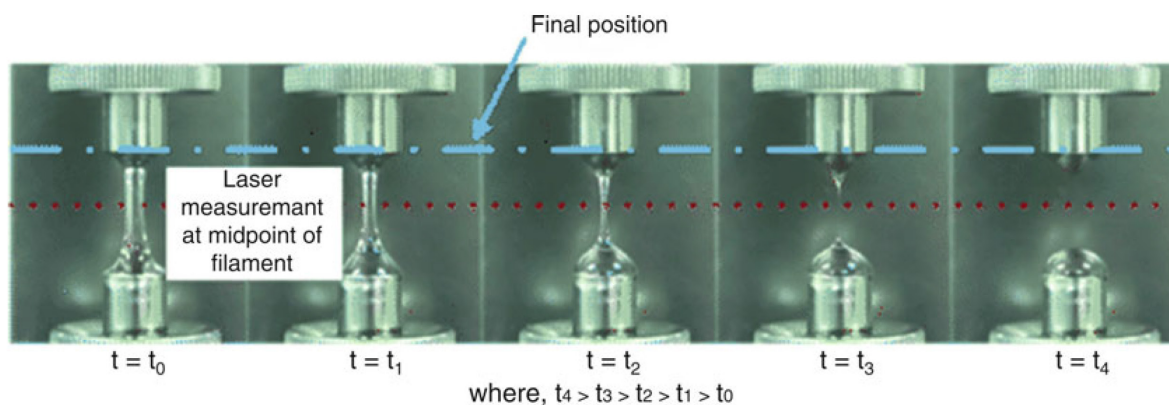
$$\epsilon_H = 2 \ln(D_0/D(t)) \quad (21)$$

در رابطه فوق D و D_0 به ترتیب قطر میانی رشته در آغاز و در زمان t است.

کشش سطحی و تنش‌های گرانیروکشسان بر تغییرات تدریجی یا تکامل رشته به صورت تابعی از زمان اثرگذارند. کشش سطحی سعی در پاره کردن رشته دارد؛ اما خواص کششی نمونه تمایل دارد با آن مقابله کند. ناحیه میانی رشته در این روش نیز مانند روش کشش رشته، کشش یک بعدی خالصی را تجربه می‌کند. توالی تصاویر لحظه‌ای از رفتار نمونه در نوع تجاری رئومتر کششی شکست موئینه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. بیشینه کرنش قابل دستیابی با این رئومتر برابر با ده یا حتی مقادیر بالاتر است. این رئومتر برای اندازه‌گیری گرانیروی کم تا متوسط طراحی شده است [۲۶، ۸، ۱].

۶ نتیجه‌گیری

سیالات پلیمری در میدان‌های کششی، علاوه بر رفتار



شکل ۱۴ توالی تصاویر لحظه‌ای از رفتار نمونه در نوع تجاری از رئومتر کششی شکست موئینه [۸]

مختلف را می‌توان بر اساس نوع طراحی به سه دسته کشش رشته با طول متغیر، کشش رشته با طول ثابت و کشش رشته با غلتک‌های چرخان تقسیم نمود. اندازه دستگاه یا فضای در دسترس آزمون، نوع اول را محدود می‌کند. در انتخاب روش اندازه‌گیری گرانروی، باید به محدوده گرانروی سیال توجه نمود که برخی از دستگاه‌ها مانند EVF، SER، RME، MTR و FSR برای اندازه‌گیری گرانروی‌های زیاد و برخی مانند CaBER برای گرانروی‌های کم تا متوسط مناسب‌تر هستند.

رقیق شدن که به صورت متداول در میدان‌های برشی نیز مشاهده می‌شود، ممکن است رفتار غلیظ شدن نشان دهند. نوع پلیمر، وزن مولکولی و توزیع آن، حضور شاخه‌های جانبی و مقدار و شرایط تغییر شکل بر نحوه این رفتار اثرگذار است. بررسی تابعیت گرانروی کششی از نرخ کشش می‌تواند نوع این رفتار را مشخص کند. روش واحدی برای اندازه‌گیری گرانروی کششی انواع سیالات وجود ندارد و می‌توان آن‌ها را بر اساس اعمال تنش ثابت (مانند MTR) و یا نرخ کرنش ثابت (مانند RME) متمایز کرد. هم‌چنین، روش‌های

مراجع

1. Andrade R., Harris P., Maia J., High Strain Extensional Rheometry of Polymer Melts: Revisiting and Improving the Meissner Design, *Journal of Rheology*, 58, 869-890, **2014**.
2. Aho J., Rolón-Garrido V. H., Syrjälä S., Wagner M. H., Extensional Viscosity in Uniaxial Extension and Contraction Flow-Comparison of Experimental Methods and Application of the Molecular Stress Function Model, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 165, 212-218, **2010**.
3. Narimissa E., Rolón-Garrido V. H., Wagner M. H. In Comparison between Extensional Rheological Properties of Low Density Polyethylene Melt in SER and RME Rheometric Systems, AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC: p 030011, **2015**.
4. Dealy J. M., Larson R. G., Read D. J., Structure and Rheology of Molten Polymers: From Structure to Flow Behavior and Back Again, 2ed ed.; Hanser, USA, **2018**.
5. Li B., Yu W., Cao X., Chen Q., Horizontal Extensional Rheometry (HER) for Low Viscosity Polymer melts, *Journal of Rheology*, 64, 177-190, **2020**.
6. Sentmanat M. L., Miniature Universal Testing Platform: from Extensional Melt Rheology to Solid-State Deformation Behavior, *Rheologica Acta*, 43, 657-669, **2004**.
7. Barnes H. A., John Fletcher Hutton K. W. H. A. B., Hutton J. F., Walters K., An Introduction to Rheology, Elsevier Science, **1989**.
8. Gan H. Y., LAM Y. C., Viscoelasticity, In Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics, Li, D., Ed. Springer US, Boston, MA, **2008**.
9. Münstedt H., Schwarzl F. R., Deformation and Flow of Polymeric Materials, Springer Berlin Heidelberg, **2014**.
10. Deely J. M., Wissbrun K., Melt Rheology and Its Role in the Plastics Processing, Chapman and Hall, **1999**.
11. Gupta V. B., Kothari V. K., Manufactured Fibre Technology, Springer Netherlands, **2012**.
12. Shear-Free or Elongational Flow and Viscosity. <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Elongational%20Flow.html>, available in 12, July 2020.
13. Gupta R. K., Polymer and Composite Rheology, 2ed Edition, Taylor & Francis, **2000**.
14. Elias H.G., Macromolecules, 3, Wiley, **2008**.
15. Barnes H. A., A Handbook of Elementary Rheology, University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, **2000**.
16. Kontopoulou M., Applied Polymer Rheology: Polymeric Fluids with Industrial Applications, Wiley, **2011**.
17. Han C. D., Rheology and Processing of Polymeric Materials, Vol. 1, Oxford University Press, USA, **2007**.
18. Vinogradov G. V., Fikhman V. D., Radushkevich B. V., Malkin A. Y., Viscoelastic and Relaxation Properties of a Polystyrene Melt in Axial Extension, *Journal of Polymer Science Part A-2: Polymer Physics*, 8, 657-678, **1970**.
19. Yu W., Rheological Measurements, In Encyclopedia of Polymer Science and Technology, John Wiley & Sons, **2013**.
20. Aho J., Rolón-Garrido V. H., Syrjälä S., Wagner M. H., Measurement Technique and Data Analysis of Extensional Viscosity for Polymer Melts by Sentmanat Extensional Rheometer (SER), *Rheologica Acta*, 49, 359-370, **2010**.
21. Meissner J., Hošettler J., A New Elongational Rheometer for Polymer Melts and Other Highly Viscoelastic Liquids, *Rheologica Acta*, 33, 1-21, **1994**.
22. Collyer A. A., Clegg D. W., Rheological Measurement, 2ed ed.; Springer Netherlands, **1998**.
23. Baird D. G., Collias D. I., Polymer Processing: Principles and Design, 2ed ed.; Wiley, USA, **2014**.
24. Raible T., Demarmels A., Meissner J., Stress and Recovery Maxima in LDPE Melt Elongation, *Polymer Bulletin*, 1, 397-402, **1979**.
25. Münstedt H., New Universal Extensional Rheometer for Polymer Melts. Measurements on a Polystyrene Sample, *Journal of Rheology*, 23, 421-436, **1979**.
26. Aho J., Boetker J. P., Baldursdottir S., Rantanen J., Rheology as a Tool for Evaluation of Melt Processability of Innovative Dosage Forms, *International Journal of Pharmaceutics*, 494, 623-642, **2015**.
27. Hodder P., Franck A., A New Tool for Measuring Extensional Viscosity, *Annu. Trans.-Nord. Rheol. Soc.*, 13, 227-232, **2005**.
28. Sridhar T., Tirtaatmadja V., Nguyen D., Gupta R., Measurement of Extensional Viscosity of Polymer Solutions, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 40, 271-280, **1991**.
29. Bach A., Rasmussen H. K., Hassager O., Extensional Viscosity for Polymer Melts Measured in the Filament Stretching Rheometer, *Journal of Rheology*, 47, 429-441, **2003**.

