

### استخراج معادلات کاربردی رئومتر استوانه سقوط کننده (F.C.V.) برای سیالات غیر نیوتنی

سعيد زینالی هریس	روح ا... باقری	سیدغلامرضا اعتماد
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی	دانشیار دانشکده مهندسی شیمی	استادیار دانشکده مهندسی شیمی
	دانشگاه صنعتی اصفهان	دانشگاه صنعتی اصفهان
	اصفهان - کده پستی ۸۴۱۵۵	

**چکیده** دستگاه رئومتر استوانه سقوط کننده (Falling Cylinder Viscometer) یک وسیله مفید و عملی برای اندازه گیری ویسکوزیته سیالات نیوتنی میباشد و مطالعات بسیاری جهت استفاده از این نوع رئومتر برای تعیین خواص رئولوژیکی سیالات غیرنیوتنی انجام گرفته است. در این مقاله معادلات کاربردی این وسیله جهت تعیین خواص رئولوژیکی سیالات مدل پاورلا و بینگهام پلاستیک به صورت تحلیلی استخراج گردیده بطوریکه از نتایج حاصل میتوان در طراحی رئومتر استفاده کرد. برای بدست آوردن معادلات احکام بر رئومتر F.C.V. در مورد سیالات غیرنیوتنی از معادلات حرکت و پیوستگی برای سیال مورد نظر با فرضیات موجود و ترکیب موازنه نیرو روی استوانه و موازنه جرم برای سیال جابجا شونده در حد فاصل استوانه و لوله یا مدل رئولوژیکی مناسب استفاده شده است. با داشتن داده‌های سرعت سقوط آزاد میتوان از روی پارامترهای هندسی سیستم، پارامترهای مدل رئولوژیکی را تعیین کرد.

**واژه‌های کلیدی** - رئومتر استوانه سقوط کننده، پاورلا، بینگهام پلاستیک، خواص رئولوژیکی

#### ۱- مقدمه

یک رئومتر F.C.V شامل یک محفظه استوانه‌ای بلند است که با سیال پر شده و در آن یک استوانه میتواند جهت تعیین خواص رئولوژیکی تحت تأثیر نیروی جاذبه به راحتی سقوط کند. همانطوریکه استوانه در داخل لوله پایین می‌رود سیال از حد فاصل استوانه و دیواره بالا می‌آید.

ظاهراً اولین تحلیل در مورد رئومتر F.C.V. را لاوز به ارائه کرده است [۱] که در آن پروفیل سرعت در حد فاصل بین لوله و استوانه را همانند دو صفحه مسطح فرض کرده است. مطالعه بعدی توسط لورتنس و همکارانش [۲ و ۳] انجام گرفت که این دستگاه را برای سیالات نیوتنی بکار بردند و همچنین تأثیرات درجه حرارت و فشار را روی سیالات نیوتنی بررسی کرده و فرمولی نیز ارائه کردند. اشار [۴] با فرضهای زیادی این رئومتر را برای سیالات مدل پاورلا بکار برده است که بدلیل همین فرضها برای کار عملی کارآئی ندارد. بررسی‌هایی توسط کوکس [۵] روی حرکت اجسام استوانه‌ای بلند در داخل سیالات ویسکوز به صورت تحلیلی انجام گرفته و بعد از موازنه نیرو فرمول پیچیده‌ای جهت ارتباط دادن ویسکوزیته به سرعت حرکت استوانه ارائه گردیده است. مطالعات تئوری و تجربی انجام گرفته توسط زینک [۶] روی سیالات ویسکوالاستیک نشان از موفقیت رئومتر F.C.V. در اندازه گیری خواص رئولوژیکی سیالات غیرنیوتنی میدهد. البته مطالعات در محدوده خاصی از ابعاد دستگاه انجام گرفته است. مطالعات بعدی توسط پارک و اروین [۷ و ۸ و ۹ و ۱۰] طی سالهای مختلفی انجام گرفته است که آخرین آنها سال ۱۹۹۷ میباشد که به صورت تجربی بهبود سیستم رئومتر را برای سیالات نیوتنی پیشنهاد میکنند.

با وجود این که رئومترهای کره سقوط کننده و استوانه سقوط کننده شباهتهای بسیاری دارند استفاده از رئومترهای استوانه سقوط کننده مزایایی دارد که آنها را ممتاز میسازد، زیرا ساخت استوانه با دانسیته مشخص راحتتر است و همچنین بدلیل عدم

حرکت چرخشی، سقوط استوانه در مرکز لوله دارای پایداری بیشتری است. بعلاوه نیازمند فرض نامحدود بودن سیال آزمایش طبق معادله استوکس [۱۱] نیست و وجود دیواره با بکار بردن شرایط مرزی مدنظر قرار میگیرد. رثومتر استوانه سقوط کننده بدلیل کاهش دادن اتلاف حرارتی، توانائی اندازه گیری تنش تسلیم [۷]، کنترل دمائی ساده، هزینه اندک ساخت و توانائی کالیبراسیون با سیال استاندارد دستگاه مناسبی میباشد.

## ۲- متن اصلی

### الف - کاربرد برای سیالات نیوتنی

ویسکومتر استوانه سقوط کننده به طور موفقیت آمیزی برای اندازه گیری ویسکوزیته سیالات نیوتنی بکار میرود. برای سیالات نیوتنی مشابه ویسکومتر کره سقوط کننده یک رابطه ساده و قابل ملاحظه ویسکوزیته دینامیک سیال را به سرعت حد سقوط  $V_f$  و دانسیته سیال و استوانه ( $\rho_s, \rho_f$ ) و مشخصات هندسی سیستم ارتباط میدهد [۷].

$$\mu = \frac{gd^2}{8V_f} (\rho_s - \rho_f) \quad (1)$$

چون این معادله بر اساس طول بی نهایت استوانه سقوط کننده نوشته شده و همچنین مسئله لغزش در دیواره و اثرات ابتدایی و انتهایی و ورود و خروج استوانه مدنظر قرار نگرفته است، بنابراین سرعت حد اندازه گیری شده  $V_f$  جهت استفاده در معادله باید تصحیح گردد و این تصحیح به شکل زیر است [۸]:

$$C_f = 1 - 2.04K + 2.093K^3 - 0.95K^5 \quad (2)$$

که در آن  $K = \frac{R_c}{R_f}$  شعاع استوانه و  $R_c$  شعاع لوله میباشد این معادله یک رابطه تجربی بوده و بر اساس انطباق داده های تجربی با نتایج معادلات بدست آمده است و بنام ضریب تصحیح فاکسن [۷] معروف است.

### ب - سیالات مدل پاورلا

هدف از این مطالعه توسعه و حل دقیق معادلات کاربردی رثومتر F.C.V. برای سیالاتی است که خواص رئولوژیکی آنها از مدل پاورلا یا بینگهام پلاستیک تبعیت میکنند. جهت حل از مختصات استوانه ای و فرضهای ساده کننده معمولی نظیر: فرض جریان خطی سیال، صفر بودن اجزاء شعاعی و زاویه ای بردار سرعت، شرایط جریان پایدار، فرض سیال تراکم ناپذیر و جریان دما ثابت استفاده گردیده است. در حل معادلات از ترم اینرسی صرف نظر شده است که این مسئله نیازمند حرکت بسیار آرام استوانه سقوط کننده و عدد رینولدز پائین میباشد که باید در طراحی دستگاه مدنظر قرار گیرد. پارک [۹] طی مطالعات تجربی با استفاده از عکس برداری پیشنهاد گرادیان سرعت مثل شکل (۱) را برای استوانه سقوط کننده در داخل لوله در جریان آرام نموده است.

با توجه به شکل (۱) روابط زیر حاصل میشود:

$$R_0 = \frac{r}{R} \quad (\text{پارامتر بدون بعد شعاع میباشد})$$

رابطه مدل پاورلا به صورت زیر است [۱۲]

$$\tau_{rz} = -m \left( \frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^n \quad K \leq R_0 \leq X \quad (3)$$

$$\tau_{rz} = m \left( \frac{-\partial V_z}{\partial r} \right)^n \quad X \leq R_o \leq 1 \quad (4)$$

با ساده سازی معادله حرکت در جهت Z با توجه به ناچیز بودن ترم اینرسی و فرضیات مسئله نتیجه زیر حاصل میشود.

$$\left( \frac{\Delta p}{L} = \frac{-dp}{dz} + \rho g \right)$$

$$\frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} = \frac{r\Delta p}{L} \quad (5)$$

انتگرال گیری از معادله (5) با شرط مرزی ( $\tau_{rz}=0$  at  $r=XR$ ) نتیجه میدهد.

$$\tau_{rz} = R \Delta p \left( R_o - \frac{X^2}{R_o} \right) / 2L \quad (6)$$

از ترکیب معادلات 3 و 4 و 6 نتیجه میشود:

$$V_i = U_i \left[ \left( \frac{K}{X} \right)^2 g (\rho_s - \rho_l) R / 2m \right]^{1/n} \frac{\partial V_z}{\partial r} = \left( \frac{R \Delta p}{2mL} \right)^{1/n} \left( \frac{X^2}{R_o} - R_o \right)^{1/n} \quad K \leq R_o \leq X \quad (7)$$

$$\frac{-\partial V_z}{\partial r} = \left( \frac{R \Delta p}{2mL} \right)^{1/n} \left( R_o - \frac{X^2}{R_o} \right)^{1/n} \quad X \leq R_o \leq 1 \quad (8)$$

سرعت بدون بعد  $U_z$  به شکل زیر تعریف میشود:

$$U_z = \frac{V_z}{\left[ R(R \Delta p / 2mL)^{1/n} \right]} \quad (9)$$

بنابراین معادلات 7 و 8 به شکل زیر نوشته میشوند.

$$\frac{\partial U_z}{\partial R_o} = \left( \frac{X^2}{R_o} - R_o \right)^{1/n} \quad K \leq R_o \leq X \quad (10)$$

$$\frac{\partial U_z}{\partial R_o} = - \left( R_o - \frac{X^2}{R_o} \right)^{1/n} \quad X \leq R_o \leq 1 \quad (11)$$

از موازنه نیرو روی استوانه نتیجه میشود:

$$\pi K^2 R^2 \Delta p + \pi K^2 R^2 g \rho_l L + 2 \pi K R L (-\tau_w) = \pi K^2 R^2 g \rho_s L \quad (12)$$

ترکیب معادلات 6 و 12 روی بدنه استوانه ( $R_o = K$ ) نتیجه میدهد:

$$\frac{\Delta p}{L} = \left( \frac{K}{X} \right)^2 g (\rho_s - \rho_l) \quad (13)$$



موازنه جرم که سیال جابجا شده بوسیله حرکت استوانه را به جریان سیال از حد فاصل استوانه و لوله مربوط میکند به صورت زیر در می آید:

$$2\pi KR^2 \int_k^X V_z R_o dR_o = \pi K^2 R^2 V_t \quad (14)$$

که با توجه به تعریف سرعت بدون بعد خواهیم داشت:

$$\frac{KU_t}{2} = \int_k^X U_z R_o dR_o \quad (15)$$

و انتگرال گیری جز به جز از این معادله به رابطه زیر میرسد:

$$\int_k^X \left( \frac{\partial U_z}{\partial R_o} \right) R_o^2 dR_o = 0 \quad (16)$$

ترکیب معادلات ۱۶ و ۱۵ و ۱۱ نتیجه میدهد:

$$\int_k^X \left( \frac{X^2}{R_o} - R_o \right)^{1/n} R_o^2 dR_o - \int_X^1 \left( R_o - \frac{X^2}{R_o} \right) R_o^2 dR_o = 0 \quad (17)$$

بنابراین اگر مقادیر  $n$  و  $K$  مشخص باشند مقدار  $X$  از معادله ۱۷ محاسبه میگردد. انتگرال گیری از معادلات ۱۵ و ۱۱ با شرایط مرزی زیر نتیجه میدهد.

$$\begin{aligned} U_z &= -U_t & \text{at } R_o &= k \\ U_z &= 0 & \text{at } R_o &= 1 \end{aligned} \quad (18)$$

$$U_z + U_t = \int_k^{R_o} \left( \frac{X^2}{R_o} - R_o \right)^{1/n} dR_o \quad K \leq R_o \leq X \quad (19)$$

$$-U_z = \int_{R_o}^1 \left( R_o - \frac{X^2}{R_o} \right)^{1/n} dR_o \quad X \leq R_o \leq 1 \quad (20)$$

در  $R_o = X$  باید مقادیر معادلات ۱۹ و ۲۰ مساوی میباشند بنابراین:

$$U_t = \int_K^X \left( \frac{X^2}{R_o} - R_o \right)^{1/n} dR_o - \int_X^1 \left( R_o - \frac{X^2}{R_o} \right) dR_o \quad (21)$$

که نشان میدهد مقدار  $U_t$  تابعی از  $n$  و  $k$  میباشد.

ترکیب معادلات ۹ و ۱۳ روی بدنه استوانه که در آن  $(U_z = -U_t)$  و  $V_z = -V_t$  است نتیجه میدهد:

$$V_t = U_t R \left[ \left( \frac{K}{X} \right)^2 g(\rho_s - \rho_l) R / 2m \right]^{1/n} \quad (22)$$

معادله فوق معادله نهایی میباشد و ارتباط سرعت سقوط استوانه را به اختلاف دانسیته سیال و استوانه از طریق مدل رثولوزیک پاورلا ارائه میدهد.

نحوه تعیین پارامترهای مدل رئولوژیکی

با داشتن داده‌های سرعت سقوط بر حسب داده‌های اختلاف دانسیته برای استوانه‌های سقوط کننده بخصوص به صورت نمودار  $\ln V_t$  بر حسب  $\ln(\rho_s - \rho_l)$  پارامترهای رئولوژیکی  $m$  و  $n$  و مدل رئولوژیکی پاورلا به طریقه زیر از رابطه ۲۳ مشخص میشوند.

$$\ln V_t = \frac{1}{n} \ln(\rho_s - \rho_l) - \ln \left\{ U_t R \left[ \left( \frac{K}{X} \right)^2 g R / 2m \right]^{1/n} \right\} \quad (23)$$

- ۱- تعیین شیب منحنی لگاریتمی که از این طریق مقدار  $n$  مشخص میشود
- ۲- با داشتن مقادیر  $n$  و  $K$  (نسبت شعاع استوانه به شعاع لوله) از روی معادله ۱۸ مقدار  $X$  و از روی معادله ۲۱ مقدار  $U_t$  تعیین میشود.
- ۳- مقدار  $m$  را از روی معادله ۲۲ با داشتن هر جفت از مقادیر  $V_t$  و  $(\rho_s - \rho_l)$  محاسبه میکنیم.

ج - سیال بینگهام پلاستیک

در مورد سیالات بینگهام پلاستیک تا زمانی که  $|\tau_{rz}| < \tau_y$  باشد حرکتی صورت نمی‌گیرد. زمانی که  $|\tau_{rz}| = \tau_y$  باشد یک جریان پلاگ خواهیم داشت و زمانی که  $|\tau_{rz}| > \tau_y$  باشد استوانه در داخل لوله پائین میرود و پروفیل سرعت و تنش مشابه شکل (۲) خواهد بود. با توجه به شکل (۲) روابط مدل بینگهام پلاستیک به شکل زیر است [۱۲]:

$$\tau_{rz} = \tau_y + \mu \frac{\partial V_z}{\partial r} \quad K \leq R_o \leq X_1 \quad (24)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial r} = 0 \quad X_1 \leq R_o \leq X_2 \quad (25)$$

$$\tau_{rz} = \tau_y + \mu \frac{\partial V_z}{\partial r} \quad X_2 \leq R_o \leq 1 \quad (26)$$

که در آن  $\tau_y$  تنش تسلیم میباشد. از معادله حرکت در جهت  $Z$  با توجه به ناچیز بودن ترم اینرسی و شرط مرزی  $(\tau_{rz} = 0 \text{ at } r = XR)$  رابطه زیر حاصل میشود:

$$\tau_{rz} = R \Delta p \left( R_o - \frac{X^2}{R_o} \right) / 2L \quad (27)$$

پارامترهای بدون بعد زیر را برای سرعت و تنش تعریف میکنیم:

$$T = \frac{2\tau_{rz}L}{R\Delta p} \quad (28)$$

$$T_y = \frac{2\tau_yL}{R\Delta p} \quad (29)$$

$$U_{zl} = \frac{2\mu V_z L}{R^2 \Delta p} \quad (30)$$

$$U_{il} = \frac{2\mu V_l L}{R^2 \Delta p} \quad (31)$$

ترکیب معادلات ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ با متغیرهای بدون بعد نتیجه میدهد.

$$\frac{dU_{zl}}{dR_o} = \left(-T_y + R_o - \frac{X^2}{R_o}\right) \quad K \leq R_o \leq X_1 \quad (32)$$

$$\frac{dU_{zl}}{dR_o} = 0 \quad X_1 \leq R_o \leq X_2 \quad (33)$$

$$\frac{dU_{zl}}{dR_o} = \left(T_y - R_o + \frac{X^2}{R_o}\right) \quad X_2 \leq R_o \leq 1 \quad (34)$$

موازنه نیرو روی استوانه نتیجه میدهد:

$$\pi K^2 R^2 \Delta p + \pi K^2 R^2 L g \rho_l + 2\pi k R l (-\tau_w) = \pi K^2 R^2 g \rho_s L \quad (35)$$

نتیجه ترکیب این معادله با رابطه ۲۷ بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\Delta p}{L} = \left(\frac{K}{X}\right)^2 g (\rho_s - \rho_l) \quad (36)$$

موازنه جرم برای سیال جابجا شونده در اثر حرکت استوانه:

$$2\pi R^2 \int_k V_z R_o dR_o = \pi K^2 R^2 V_l$$

و با در نظر گرفتن سرعتهای بدون بعد

$$\frac{K^2 U_{il}}{2} = \int_k V_{zL} R_o dR_o \quad (37)$$

و با انتگرال گیری جز به جز خواهیم داشت:

$$\int_k \left(\frac{dU_{zl}}{dR_o}\right) R_o^2 dR_o = 0 \quad (38)$$

موازنه نیرو در ناحیه پلاگ بصورت زیر خواهد بود:

$$\pi (X_2^2 R^2 - X_1^2 R^2) \Delta p - 2\pi X_2 R L \tau_y - 2\pi X_1 R L \tau_y = 0 \quad (39)$$

که با در نظر گرفتن پارامترهای بدون بعد خواهیم داشت:



$$X_1 = X_2 - T_y \quad (40)$$

معادله ۲۷ را با متغیرهای بدون بعد نوشته و از شرط  $(T = T_y \text{ at } R_o = X_2)$  استفاده میکنیم.

$$X^2 = X_2(X_2 - T_y) \quad (41)$$

نتیجه ترکیب معادلات ۳۶ و ۴۱ بصورت زیر میباشد:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(\frac{K}{X^2}\right)^2 g(\rho_s - \rho_l) + \frac{2T_y}{RX_2} \quad (42)$$

اگر معادله ۳۸ را با معادلات ۳۲ و ۳۴ ترکیب کنیم داریم:

$$\int_K^{X_1} \left(-T_y + R_o - \frac{X^2}{R_o}\right) R_o^2 dR_o + \int_{X_2}^1 \left(T_y - R_o + \frac{X^2}{R_o}\right) R_o^2 dR_o = 0 \quad (43)$$

اگر معادلات ۴۰ و ۴۱ را در معادله ۴۳ قرار دهیم خواهیم داشت:

$$\int_K^{(X_2 - T_y)} \left(-T_y + R_o - \frac{X_2(X_2 - T_y)}{R_o}\right) R_o^2 dR_o + \int_{X_2}^1 \left[T_y - R_o + \frac{X_2(X_2 - T_y)}{R_o}\right] R_o^2 dR_o = 0 \quad (44)$$

که نشان میدهد:

اگر از معادلات ۳۲ و ۳۴ با توجه به شرایط مرزی زیر انتگرالگیری شود نتیجه زیر حاصل میگردد.

$$U_{zL} = -U_{tL} \quad \text{at } R_o = K$$

$$U_{tL} = 0 \quad \text{at } R_o = 1$$

$$U_{zL} |_{X_1} + U_{tL} = \int_K^{X_1} \left(-T_y + R_o - \frac{X^2}{R_o}\right) dR_o \quad (45)$$

$$U_{zL} |_{X_2} + U_{tL} = \int_{X_2}^1 \left(T_y - R_o + \frac{X^2}{R_o}\right) dR_o \quad (46)$$

در محدوده جریان پلاگ  $U_{zL} |_{X_1} = U_{zL} |_{X_2}$  در نتیجه معادلات ۴۵ و ۴۶ به صورت زیر ساده میگردد:

$$U_{tL} = \int_K^{X_2 - T_y} \left(-T_y + R_o - \frac{X_2(X_2 - T_y)}{R_o}\right) dR_o - \int_{X_2}^1 \left(T_y - R_o - \frac{X_2(X_2 - T_y)}{R_o}\right) dR_o \quad (47)$$

بنابراین

$$U_{tL} = f(T_y, K, X_2) = f(K, X_2) \quad (48)$$

ترکیب معادلات ۴۲ و ۳۱ نتیجه می‌دهد:

$$V_t = \frac{U_{tL} R^2}{2\mu} \left\{ \left( \frac{K}{X_2} \right)^2 g (\rho_s - \rho_l) + \frac{2\tau_y}{RX_2} \right\} \quad (49)$$

معادله فوق معادله نهایی است و سرعت حد سقوط را به اختلاف دانسیته از طریق مدل رئولوژیکی بینگهام پلاستیک ارتباط می‌دهد.

از ترکیب معادلات ۲۹ و ۳۲ نتیجه می‌شود:

$$\tau_y = \left\{ \left( \frac{K}{X_2} \right)^2 T_y R g (\rho_s - \rho_l) \right\} / \left[ 2 \left( 1 - \frac{T_y}{X_2} \right) \right] \quad (50)$$

زمانی که  $V_t = 0$  باشد و  $g(\rho_s - \rho_l) = g(\rho_s - \rho_l)$  و محدوده پلاگ تمام حدفاصل را شامل خواهد شد و در نتیجه  $X_1 = K$ ,  $X_2 = 1$  خواهد بود و معادله ۴۰ بصورت زیر در می‌آید:

$$T_y = 1 - K$$

و در این صورت معادله ۵۰ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\tau_y = K(1-K)gR(\rho_s - \rho_l)_0 / 2 \quad (51)$$

نحوه تعیین پارامترهای مدل رئولوژیکی بینگهام پلاستیک

براساس داده‌های سرعت سقوط تجربی بر حسب داده‌های اختلاف دانسیته برای استوانه سقوط کننده پارامترهای رئولوژیکی  $\mu$  و  $\tau_y$  به طریق زیر تعیین می‌شوند:

۱- از روی نمودار  $V_t$  بر حسب  $(\rho_s - \rho_l)$  و محل تقاطع  $(\rho_s - \rho_l)$  در  $V_t = 0$  مقدار  $(\rho_s - \rho_l)_0$  بدست می‌آید که با توجه به معادله ۵۱ مقدار عددی  $\tau_y$  محاسبه می‌شود.

۲- مقداری برای  $T_y$  انتخاب کرده و از روی معادله ۴۴ مقدار  $X_2$  و از روی معادله ۴۷ مقدار  $U_{tL}$  را حساب می‌کنیم.

۳- از روی معادله ۵۰ با توجه به اعداد بدست آمده در قسمت دوم مقدار  $(\rho_s - \rho_l)$  حساب می‌شود.

۴- از روی  $(\rho_s, \rho_l)$  بدست آمده به صورت تجربی مقدار  $V_t$  اندازه‌گیری شده و در فرمول ۴۹ قرار داده و  $\mu$  را محاسبه می‌کنیم. به این ترتیب پارامترهای رئولوژیکی مدل بینگهام پلاستیک مشخص می‌شود.

### ۳- نتایج و جمع بندی

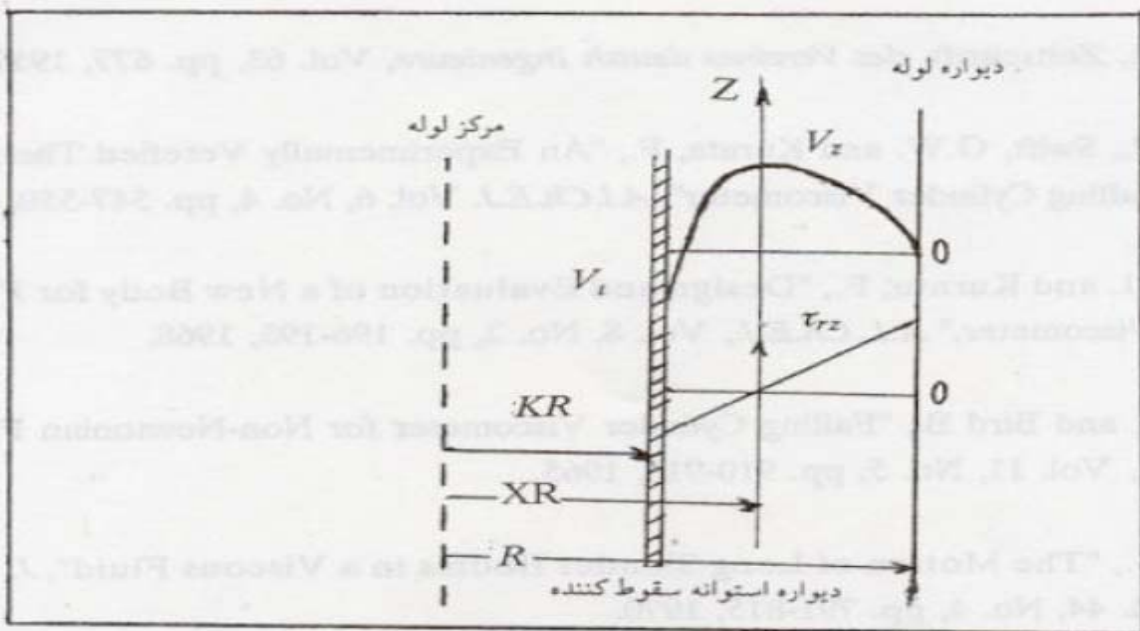
دستگاه رئومتر F.C.V. یک وسیله مفید برای تعیین خواص رئولوژیکی سیالان نیوتنی و غیرنیوتنی می‌باشد. این دستگاه چون قسمتهای متحرک ندارد بدلیل کاهش تأثیرات حرارتی توانایی اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی محلولهای غلیظ پلیمری را دارد. همچنین این وسیله برای تعیین ویسکوزیته محلولهای رقیق پلیمری و مذابهای پلیمر و نیز سیالانی که دارای تنش تسلیم هستند دستگاه ایده‌آلی می‌باشد. با توجه به دقت و صحت بالای دستگاه و توانایی کالیبراسیون دستگاه با شرایط و ماده مورد نظر این رئومتر جهت کارهای تحقیقاتی مناسب می‌باشد. همچنین هزینه پائین طراحی و ساخت رئومتر این وسیله را یک دستگاه جذاب برای تحقیقات در محیطهای دانشگاهی نموده است.

البته باید در استفاده عملی از دستگاه، جهت داشتن جریان آرام برای مواد ویسکوز از قطرهای پائین استوانه و برای مواد رقیق از قطرهای بالای استوانه استفاده شود. همچنین بدلیل طولانی بودن زمان آزمایشها بهتر است این رئومتر برای کارهای

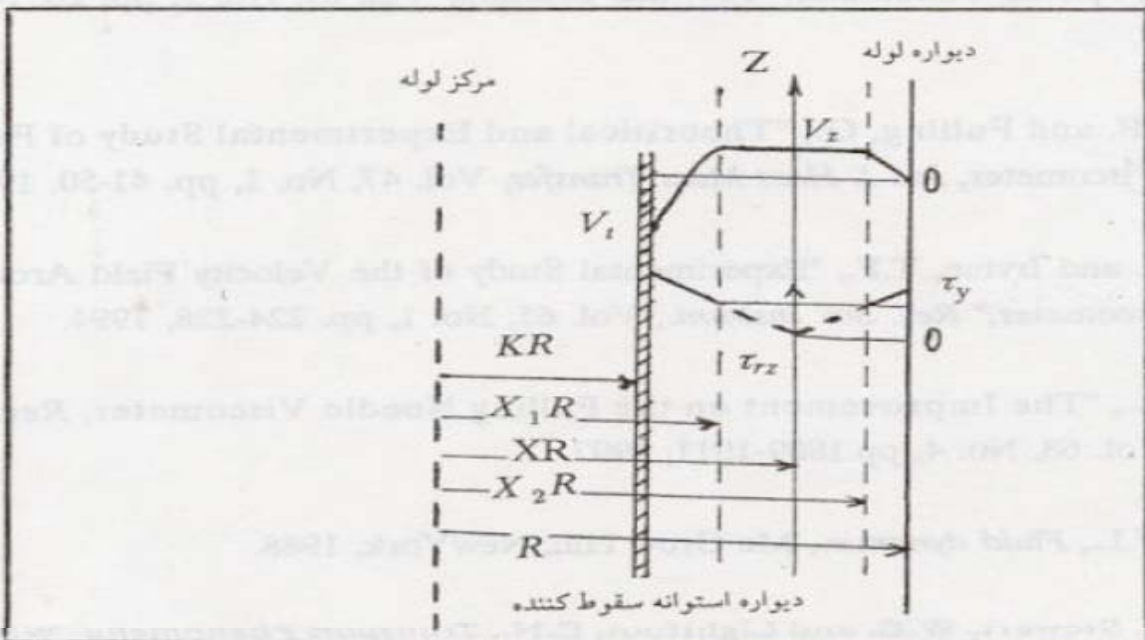


مراجع

- [1] Lawaczeck, *Zeitschrift, des Vereines deuth Ingenieure*, Vol. 63, pp. 677, 1919.
- [2] Lohrenz, J., Swift, G.W. and Kurata, F., "An Experimentally Veriefied Theoretical Study of Falling Cylinder Viscometer", *A.I.Ch.E.J.* Vol. 6, No. 4, pp. 547-550, 1960.
- [3] Lohrenz, J. and Kurata, F., "Design and Evaluation of a New Body for Falling Cylinder Viscometer," *A.L.Ch.E.J.*, Vol. 8, No. 2, pp. 196-193, 1968.
- [4] Ashare, E. and Bird B., "Falling Cylinder Viscometer for Non-Newtonian Fluids," *A.I.Ch.E.J.*, Vol. 11, No. 5, pp. 910-916, 1965.
- [5] Cox, R. G., "The Motion of Long Slender Bodies in a Viscous Fluid", *J. Fluid Mech.*, Vol. 44, No. 4, pp. 791-815, 1970.
- [6] Zheng, R. and Phan Thien, N., "Falling Needle Rheometry for General Viscoelastic Fluids", *J. fluid Eng.*, Vol. 116, pp. 619-624, 1994.
- [7] Park, N.A. and Irvine, T.F., "Measurments of Rheological Fluid Properties with the Falling Needle Viscometer," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 59, No. 9, pp. 2051-2058, 1988.
- [8] Irvine, T.F. and Fulling, G., "Theoretical and Experimental Study of Falling Cylinder Viscometer, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, No. 1, pp. 41-50, 1994.
- [9] Park, N.A. and Irvine, T.F., "Experimental Study of the Velocity Field Around a Falling Viscometer," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 65, No. 1, pp. 224-228, 1994.
- [10] Park, N.A., "The Improvement on the Falling Needle Viscometer, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 68, No. 4, pp.1809-1911, 1997.
- [11] Streeter, V.L., *Fluid dynamic.*, Mc Grow Hill, NewYork, 1988.
- [12] Bird, B.R., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., *Transport Phenomena*, Wiley & Sons, NewYork, 1960.



شکل ۱- پروفیل سرعت و تنش برشی سیال مدل پاورلا در رنومتر F.C.V.



شکل ۲- پروفیل سرعت و تنش برشی سیال بیتنگهام پلاستیک در رنومتر F.C.V.