

# طراحی و ساخت رئومتر استوانه سقوط کننده (Falling Cylinder Rheometer) برای تعیین خواص رئولوژیکی سیالات غیرنیوتی

\*سید غلامرضا اعتماد، روح‌ا... باقری و سعید زینالی هریس  
دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی شیمی - فاکس ۸۹۱۲۶۷۷  
پست الکترونیکی etemad@cc.iut.ac.ir

## چکیده:

در این مقاله نحوه طراحی و ساخت رئومتر استوانه سقوط کننده (F.C.R.) و مشخصات این دستگاه توضیح داده شده است. از این وسیله میتوان برای اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی سیالات مدل پاورلا و بینگهام پلاستیک استفاده نمود. در طراحی این دستگاه سعی شده است عواملی که موجب پیدایش خطای میگردد شامل: خروج استوانه از مرکز، اثرات ابتدایی و انتها، اثرات ورودی و خروجی و اثرات ترم اینرسی حذف شده یا به حداقل ممکن برسد. با استفاده از رئومتر ساخته شده خواص رئولوژیکی محلول پلی‌وینیل الكل در آب در غلظتها م مختلف اندازه‌گیری شده است. نتایج بیانگر آن است که این محلول از نظر رئولوژیکی از مدل سودوپلاستیک تبعیت میکند. با افزایش غلظت محلول، توان مدل پاورلا کاهش و ثابت مدل یاورلا افزایش میابد.

**کلمات کلیدی:** رئومتر استوانه سقوط کننده - سیالات غیرنیوتی - خواص رئولوژیکی

## مقدمه:

رئومتر (F.C.R.) شامل یک محفظه استوانه‌ای بلند است که با سیال پر شده و در آن یک استوانه میتواند جهت تعیین ویسکوزیته تحت تأثیر نیروی جاذبه به راحتی سقوط کند. همانطوریکه استوانه در داخل لوله پائین میرود سیال از حد فاصل بین استوانه و دیواره لوله بالا می‌آید. ظاهرًا اولین تحلیل در مورد رئومتر (F.C.R.) را لاوازیه ۱۹۱۹ [۱] ارائه کرده است که در آن حد فاصل بین لوله و استوانه را همانند دو صفحه مسطح فرض کرده است. مطالعه بعدی توسط لورنتس و همکارانش [۲و۳] انجام گرفت که این ویسکومتر را برای سیالات نیوتی بکار بردن و فرمولی نیز ارائه گردید. اشار [۴] با تقریبها زیادی این رئومتر را برای سیالات مدل پاورلا بکار برده است که بدلیل همین تقریبها برای کار عملی دارای خطای زیادی میباشد. برد و فردرکسون [۵] معادله‌ای برای جریان خطی سیالات مدل پاورلا در لوله‌های هم محور استخراج و حل کرده‌اند که ترکیب کار آنها با کار لورنتس [۳]

فرمول پیچیده‌ای برای کار با رئومتر استوانه سقوط کننده ارائه می‌کند. مطالعات بعدی توسط پارک و اروین [۶۷ و ۶۸] طی سالهای مختلف انجام گرفته است که آخرین آنها سال ۱۹۹۷ می‌باشد که به صورت تجربی بوده و بهبود سیستم F.C.R را برای سیالات نیوتانی پیشنهاد می‌کند.

با وجود این که رئومترهای کره سقوط کننده و استوانه سقوط کننده شباهتهای بسیاری دارند، استفاده از ویسکومترهای استوانه سقوط کننده مزایایی دارد که آنها را ممتاز می‌سازد. بطور مثال ساخت استوانه با دانسیته مشخص راحت‌تر است و بدلیل سادگی هندسی نسبت به کره در سیال غیرنیوتانی تحلیل ساده‌تری دارند. همچنین بدلیل عدم حرکت چرخشی، سقوط استوانه در مرکز لوله دارای پایداری بیشتری است. به علاوه نیازمند فرض نامحدود بودن سیال آزمایشی طبق معادله استوکس [۱۰] نیست و وجود دیواره با بکار بردن شرایط مرزی مدنظر قرار می‌گیرد. ویسکومتر استوانه سقوط کننده که طراحی و ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته است بدلاًیل زیر دستگاه مناسبی می‌باشد:

۱- تأثیرات حرارتی را کاهش میدهد.

۲- برای کشف تنفس تسلیم مقدار متوسط مثبتی ارائه می‌کند [۶].

۳- به راحتی تحت کنترل دمایی قرار می‌گیرد.

۴- با هزینه قابل قبول ساخته می‌شود.

۵- به راحتی با سیال استاندارد کالیبره می‌شود.

۶- برای سیالات بیولوژیکی که نیاز به دوری از هوا دارند کاربرد دارد [۴].

## الف - کاربرد برای سیالات نیوتانی

ویسکومتر استوانه سقوط کننده به طور موقیت آمیزی برای اندازه‌گیری ویسکوزیته سیالات نیوتانی بکار می‌رود. برای سیالات نیوتانی مشابه رئومتر کره سقوط کننده یک رابطه ساده ویسکوزیته دینامیک سیال را به سرعت حد سقوط  $\eta_0$  و اختلاف دانسیته سیال و استوانه  $(\rho_s - \rho_t)$  مشخصات هندسی سیستم ارتباط میدهد [۶].

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

چون این معادله بر اساس طول بی‌نهایت استوانه سقوط کننده نوشته شده است و همچنین مسئله لغزش در دیواره و اثرات ابتدایی و انتهایی، ورود و خروج استوانه مدنظر قرار نگرفته است بنابراین باید سرعت حد اندازه‌گیری شده  $\eta_0$  در عمل جهت استفاده در معادله (۱) مورد تصحیح قرار گیرد و این تصحیح به شکل زیر می‌باشد.

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

که در آن  $R_c$  شعاع استوانه و  $R_t$  شعاع لوله میباشد). این معادله یک رابطه تجربی بوده و به ضریب تصحیح فاکسن [6] معروف است. ما در طراحی و ساخت دستگاه تغییراتی نسبت به نمونه‌های اولیه انجام داده‌ایم تا خطای ایجاد شده به حداقل برسد و تحلیل ساده‌تر شود و نیاز به ضرایب تصحیح از بین برود.

### ب - سیالات مدل پاورلا

هدف از این مطالعه طراحی و ساخت دستگاهی است که توانایی اندازه‌گیری خواص سیالاتی را داشته باشد که خواص رئولوژیکی آنها از مدل پاورلا تبعیت نمیکند. با حل تحلیلی معادلات مربوط به سیال مدل پاورلا با داشتن پارامترهای معلوم  $V_t$  (سرعت حد سقوط برای سیال مدل پاورلا) و  $(\rho_s - \rho_l)$  و همچنین پارامترهای هندسی دستگاه، تعیین پارامترهای رئولوژیکی سیال امکان‌یافته خواهد بود.

### حل تئوری:

روابطی که  $V_t = F[m, n, K, R_c, g, (\rho_s - \rho_l)]$  را به هم مربوط میکنند معادلاتی هستند که در مرجع [11] مورد بررسی قرار گرفته‌اند و شامل ۳ معادله اساسی زیر میباشند.

$$\int_k^x \left( \frac{X^2}{\varepsilon} - \varepsilon \right)^{1/n} \varepsilon^2 d\varepsilon - \int_x^1 \left( \varepsilon - \frac{X^2}{\varepsilon} \right)^{1/n} \varepsilon^2 d\varepsilon = 0 \quad (3)$$

$$U_t = \int_k^x \left( \frac{X^2}{\varepsilon} - \varepsilon \right)^{1/n} d\varepsilon - \int_x^1 \left( \varepsilon - \frac{X^2}{\varepsilon} \right)^{1/n} d\varepsilon = 0 \quad (4)$$

$$V_t = U_t R_c \left[ \left( \frac{K}{X} \right)^2 g (\rho_s - \rho_l) R_c / 2m \right]^{1/n} \quad (5)$$

که در آن معادلات  $(\rho_s - \rho_l)$ : اختلاف دانسیته بین استوانه و سیال مورد آزمایش  $m$ : پارامترهای رئولوژیکی سیال مدل پاورلا

$X$ : طول بدون بعد

$V_t$ : سرعت حد سقوط استوانه

$$K = \frac{R_c}{R_t}$$

$\rho_s - \rho_l$ : سرعت حد بدون بعد میباشد.

### نحوه تعیین معادلات رئولوژیکی:

با داشتن داده‌های سرعت سقوط بر حسب داده‌های اختلاف دانسیته برای استوانه سقوط کننده به خصوص 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 معلوم می‌شود.

$$\ln V_t = \frac{1}{n} \ln (\rho_s - \rho_l) + \ln \left\{ U_t R_c \left[ \frac{(K)}{X}^2 g R_c / 2m \right]^{1/n} \right\} \quad (6)$$

- (۱) با تعیین شیب منحنی لگاریتمی مقدار  $n$  مشخص می‌شود و برای این منظور از آنالیز رگرسیون خطی استفاده می‌گردد.
- (۲) با داشتن مقدار  $n$  و  $K$  (نسبت شعاع استوانه به شعاع لوله) از روی معادله (۳) مقدار  $X$  و از روی معادله (۴) مقدار  $U_t$  مشخص می‌شود.
- (۳) مقدار  $m$  از روی معادله (۵) با داشتن هر جفت از مقادیر  $V_t$  و  $\ln(\rho_s - \rho_l)$  روی خط رگرسیون محاسبه می‌گردد.

### طراحی و ساخت رئومتر F.C.V.:

به منظور بررسی صحت محاسبات بر مبنای مدل تئوریک، اندازه‌گیریها با تعداد زیادی از استوانه‌ها با ابعاد و دانسیته‌های مختلف انجام می‌گیرد. همانطوریکه در شکل (۱) نشان داده شده است. دستگاه آزمایشی شامل یک لوله مرکزی با تعدادی استوانه پائین رونده و مقداری وسائل جانبی می‌باشد که با دمای سیستم را ثابت نگه میدارند یا زمان سقوط را اندازه می‌گیرند.

نگهداری رئومتر F.C.V. در دمای ثابت بسیار مهم می‌باشد. زیرا اختلاف دمایی به اندازه ۱ درجه سانتیگراد باعث تغییر ۱-۱۰٪ ویسکوزیته مواد روغنی می‌شود [۷]. به همین دلیل یک همزن جهت کنترل دمایی آب کار می‌برود. همزن همراه با حمام آب دمای سیال تحت آزمایش را طی مراحل اندازه‌گیری ویسکوزیته یکنواخت و ثابت نگه میدارد.

استوانه‌ها از لوله‌های توخالی که یک درپوش نیم کروی تلفونی آنها را آب بندی می‌کنند درست شده‌اند و براده‌های آلومینیوم در داخل آنها جهت پائین بردن مرکز ثقل تعییه شده است. با این کار سقوط استوانه پایدار شده و از نوسانات که باعث خروج استوانه از مرکز لوله می‌شود جلوگیری می‌گردد. تازمانی که مرکز نیروهای شناوری در استوانه‌ها بالاتر از مرکز ثقل باشد استوانه سقوط کننده کاملاً پایدار بوده و در مرکز لوله به صورت عمودی از داخل سیال عبور می‌کند. همچنین با افزودن براده الومینیوم دانسیته مؤثر استوانه افزایش می‌یابد و باعث می‌شود محدوده ویسکوزیته و شدت برشی افزایش یابد.

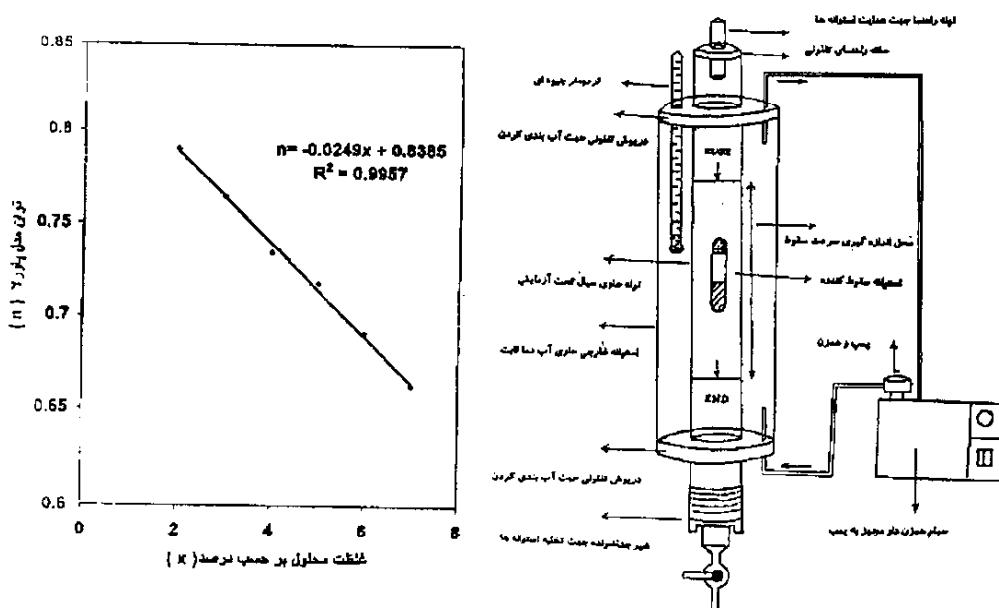
جهت قرار دادن استوانه‌ها در مرکز لوله یک قطعه حلقوی از جنس تفلون در بالای لوله تعییه شده که حلقه راهنمای نام دارد و شروع حرکت استوانه را در لوله راحت‌تر می‌کند. انتهای استوانه‌ها به شکل نیم‌کره ساخته شده است تا خطوط جریان را در ابتدا و انتهای استوانه منظم کند و اجازه توزیع مناسب افت فشار را در طول استوانه بدهد. بعلاوه با بکارگیری این روش اثرات ابتدایی و انتهایی، ورودی و خروجی که در مدل‌های قدیمی رئومتر F.C.R. باعث خطا می‌شود از بین می‌رود.

همچنین فرض طول بین نهایت استوانه سقوط‌کننده که در موارد عادی نیاز به ضریب تصحیح پیدا می‌کند با طراحی مناسب دستگاه قابل قبول می‌شود. بدین شکل که طراحی دستگاه به گونه‌ای است که نسبت  $\frac{L}{R_c} > 12$  می‌باشد ( $L$  طول استوانه و  $R_c$  شعاع استوانه می‌باشد) و در نتیجه با طراحی خاص استوانه‌ها (طول بلند و انتهای نیم‌کره‌ای) تأثیرات مختلف قابل صرف نظر کردن می‌شود.

لوله یا بدن اصلی دستگاه از جنس شیشه می‌باشد تا مسیر حرکت استوانه در داخل سیال قابل تعقیب باشد. طول این لوله ۱۳۰ سانتی‌متر و قطر آن ۲۲ میلی‌متر بوده و حجم داخلی لونه ۴۰۰ سی سی می‌باشد. این لوله داخل حمام آب قرار دارد که دمای این حمام توسط ترمومتر جیوه‌ای کنترل می‌شود و مجهز به همزن می‌باشد. در بالای لوله، حلقه‌های راهنمای مختلفی، مناسب با اندازه استوانه قرار داده می‌شود تا استوانه قبل از شروع به حرکت در مرکز لوله قرار گیرد.

در انتهای لوله شیری جهت تخلیه سیال قرار دارد. جهت خروج استوانه‌های سقوط‌کننده از داخل دستگاه با یک طرح ابتکاری کل شیر از دستگاه مجزا می‌شود و بعد از تخلیه سیال و خروج استوانه‌ها دوباره به دستگاه نصب می‌گردد. دستگاه باید دقیقاً به صورت عمودی نصب گردد تا محورهای طولی استوانه و لوله موازی با جهت ستاب جاذبه بوده و استوانه‌ها تحت تأثیر ستاب جاذبه به صورت عمودی در مرکز لوله سقوط کنند.

در اعداد رینولدز پائین که بتوان از اثرات اینرسی صرف نظر کرد استوانه‌ها در فاصله‌ای کمتر از قطر لوله به سرعت حد میرسند که این مسئله از روی اندازه‌گیری سرعت سقوط استوانه در دو قسمت مجزا از لوله مشخص می‌شود بطوریکه سرعت‌های اندازه‌گیری شده در دوناحیه یکی هستند. تعیین سرعت توسط کرونومتر بوسیله اندازه‌گیری زمان لازم برای عبور استوانه از بین دو علامت در روی بدن لوله انجام می‌گیرد. طول قسمت اندازه‌گیری سرعت ۵۰ سانتی‌متر بوده و سرعت حد از تقسیم فاصله بین دو علامت به زمان عبور استوانه بدست می‌آید. چون تعیین خواص رئولوژیکی رابطه مستقیمی با سرعت حد دارد لازم است این اندازه‌گیری با دقت زیاد صورت گیرد، که برای اینکار از زمان سنج با دقت ۰/۰۱ ثانیه استفاده شده است و در بالا و پائین ناحیه اندازه‌گیری سرعت مسافت کافی برای حذف اثرات ورودی و خروجی منظور شده است و بدینوسیله عوامل مؤثر در خطا به حداقل خود میرسند.



شکل ۲- منحنی تغییرات توان مدل پاورلا (n)  
بر حسب شافت محلول بر حسب درصد (%)

شکل ۱- طرح کلی رکومنتر استوانه سقوط کننده (F.C.V.)

### آزمایش‌های تجربی:

با توجه به محدوده وسیع قطر و دانسیته استوانه‌های سقوط کننده تعیین خواص رئولوژیکی سیالات در دامنه وسیعی از شدت‌های برشی امکان پذیر است. البته باید توجه داشت که سقوط استوانه‌ها باید با سرعت پائین و با عدد رینولدز کم انجام بگیرد تا ترم اینرسی در معادلات دخالت نکند [۱۱]. بنابراین برای سیالات کاملاً ویسکوز باید از قطرهای کم استوانه استفاده گردد و برای سیالات با ویسکوزیته پائین، استوانه با قطرهای زیاد بکار برود تا علاوه بر اینکه ترم اینرسی در معادلات کاشی [۶] ناچیز شود اندازه گیری سرعت هم با دقت بیشتری انجام بگیرد. همچنین با وجود اینکه طبیعی است فکر کنیم دانسیته استوانه باید اندکی بیشتر از دانسیته سیال انتخاب شود تا استوانه به آرامی سقوط کند ولی این کار باعث خطا می‌شود. زیرا دانسیته سیال و استوانه به صورت اختلاف دانسیته در معادلات وارد می‌شوند و این خصوصیت مهم باید در انتخاب دانسیته استوانه‌ها مدنظر قرار گیرد و برای اینکار دانسیته استوانه‌ها در محدوده  $g/cm^3$   $0.05-1/35$  انتخاب شده است که حداقل  $0.05\%$  از دانسیته آب مقطر در  $25^\circ C$  سانتی‌گراد بیشتر است.

در مطالعات عملی محلول پلی وینیل الکل در آب با غلظتها مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. پلی وینیل الکل مورد استفاده دارای درصد هیدرولیز  $4/98\%$  می‌باشد که هیدرولیز کامل در آن صورت

گرفته و وزن مولکولی پلیمر ۷۲۰۰ میباشد. آزمایشها در محدوده غلظتی ۲-۷٪ انجام گرفته و برای تغییرات خواص رئولوژیکی با غلظت محلول پلیمری روابطی مشخص گردیده است. با توجه به اینکه همراه با تغییرات غلظت، ویسکوزیته و دانسیته محلول همزمان تغییر میکند لذا جهت انجام آزمایشها دانسیته‌های مختلف استوانه مورد استفاده قرار گرفته است. جهت اطمینان از صحت اندازه‌گیریها از روش تکرار آزمایش استفاده گردیده است و متوسط سرعت برای ثبت نتایج و کاربرد در معادلات مورد استفاده قرار گرفته است که در بخش نتایج گزارش میگردد.

## نتایج

جدول (۱)، نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی با رئومتر استوانه سقوط کتنده را نشان میدهد.

**جدول ۱- نتایج حاصل از اندازه‌گیریهای تجربی خواص رئولوژیکی محلول PVA**

غلظت محلول پلیمری %	پارامتر هندسی $K = \frac{R_c}{R_t}$	T °C	دانسیته سیال $\rho_1 (\text{gr/cm}^3)$	ثابت مدل پاورلا m	توان مدل پاورلا n	معادله رئولوژیکی مدل پاورلا
% ۲	۰/۸۸۶	۲۵	۱/۰۱۰	۴/۹۴۰ × ۱۰⁻۴	۰/۷۹۰	$\tau = ۴/۹۴۰ \times ۱۰^{-۴} \gamma^{۰.۰}/۷۹$
% ۳	۰/۸۸۶	۲۵	۱/۰۱۵	۹/۲۵ × ۱۰⁻۴	۰/۷۶۴	$\tau = ۹/۲۶۵ \times ۱۰^{-۴} \gamma^{۰.۰}/۷۶۴$
% ۴	۰/۶۱۲	۲۵	۱/۰۲۰	۱/۵۵۷ × ۱۰⁻۴	۰/۷۳۴	$\tau = ۱/۵۵۷ \times ۱۰^{-۴} \gamma^{۰.۰}/۷۳۴$
% ۵	۰/۵۶۸	۲۵	۱/۰۲۴	۲/۱۷۰ × ۱۰⁻۴	۰/۷۱۸	$\tau = ۲/۱۷۰ \times ۱۰^{-۴} \gamma^{۰.۰}/۷۱۸$
% ۶	۰/۴۶۰	۲۵	۱/۰۳۰	۲/۶۱۶ × ۱۰⁻۴	۰/۶۹۱	$\tau = ۲/۶۱۶ \times ۱۰^{-۴} \gamma^{۰.۰}/۶۹۱$
% ۷	۰/۴۶۰	۲۵	۱/۰۳۵	۳/۰۳۳ × ۱۰⁻۴	۰/۶۶۳	$\tau = ۳/۰۳۳ \times ۱۰^{-۴} \gamma^{۰.۰}/۶۶۳$

از نتایج حاصل از جدول میتوان رابطه بین غلظت محلول پلیمری و توان مدل پاورلا و همچنین ارتباط میان ثابت مدل پاورلا و غلظت محلول پلیمری را استنتاج نمود.

همانطوریکه از شکل (۲) نتیجه میشود با افزایش غلظت محلول PVA توان مدل پاورلا به صورت خطی کاهش میابد و رابطه خطی حاصل به شکل معادله (۷) میباشد.

$$n = -0.0249x + 0.8385 \quad (7)$$

که در آن  $n$  توان مدل پاورلا و  $x$  غلظت محلول پلیمری میباشد) شکل (۳) تغییرات ثابت مدل پاورلا و درصد محلول پلیمری PVA را نشان میدهد. نتایج نشان دهنده

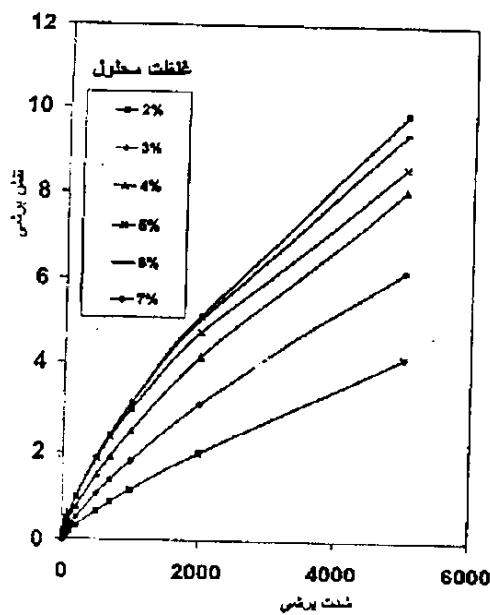
افزایش ثابت مدل با افزایش غلظت محلول PVA میباشد و رابطه خطی حاصل به شکل معادله (۸) میباشد.

$$m = 0.0053x - 0.0056 \quad (8)$$

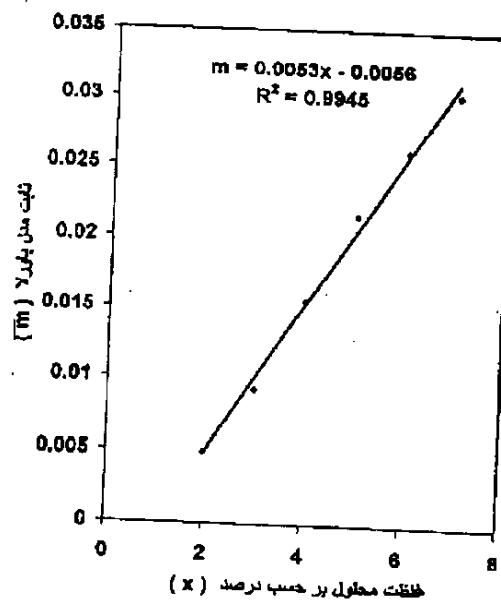
در این معادله  $m$  ثابت مدل رئولوژیکی پاورلا میباشد) شکل‌های (۴ و (۵) منحنی‌های جریان محلول PVA در آب را در غلظتهای مختلف نشان میدهدن شکل (۴) منحنی تغییرات تنفس بررشی بر حسب شدت بررشی در غلظتهای ۲-۷ درصد میباشد که نشان میدهد به تدریج که غلظت زیاد میشود تأثیرات غلظت در خواص رئولوژیکی کمتر میگردد. در شکل (۵) تغییرات تنفس بررشی بر حسب شدت بررشی در محورهای لگاریتمی رسم گردیده است و به علت خطی بودن منحنی‌های جریان تعیت آنها از مدل پاورلا بوضوح مشاهده میشود. شکل (۶) منحنی تغییرات ویسکوزیته ظاهری بر حسب شدت بررشی میباشد. از منحنی‌ها چنین مشخص میشود که در شدتهای بررشی بالا ویسکوزیته ظاهری کاهش می‌یابد.

### نتیجه گیری:

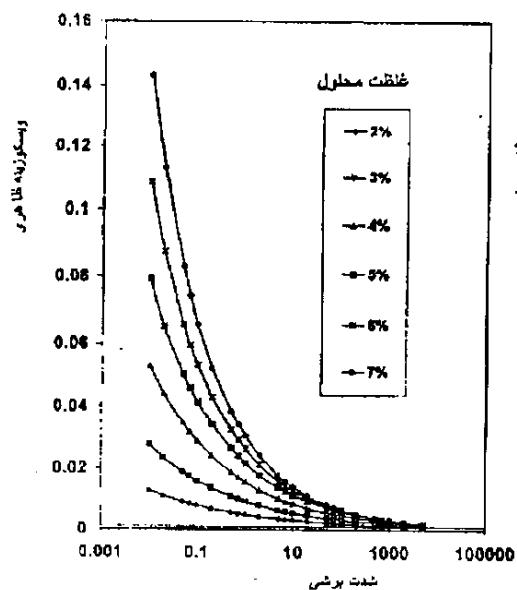
تفسیر نمودارهای حاصل از آزمایشهای تجربی نشان میدهد رئومتر استوانه سقوط‌کننده یک وسیله مفید جهت تعیین خواص رئولوژیکی سیالات نیوتونی و غیرنیوتونی میباشد. این دستگاه به دلیل کاهش تأثیرات حرارتی توانایی اندازه گیری ویسکوزیته محلولهای غلیظ پلیمری را دارد بررسی منحنی‌های حاصل نشان میدهد که با افزایش غلظت محلول پلیمری توان مدل پاورلا (۶) کاهش می‌یابد و مقدار ثابت مدل پاورلا ( $m$ ) افزایش می‌یابد و این افزایش و کاهش به صورت خطی میباشد. همچنین منحنی‌های جریان برای محلول PVA نشان میدهد در غلظتهای بالا منحنی‌های جریان به هم نزدیک میشوند و خواص رئولوژیکی تقریباً مشابهی در محلولهای پلیمری غلیظ میتوان مشاهده کرد. نمودارهای ویسکوزیته ظاهری بر حسب شدت بررشی مشخص می‌سازد که با افزایش شدت بررشی ویسکوزیته ظاهری کاهش می‌یابد و به یک مقدار حدی میرسد که محلولهای با غلظتهای مختلف به این حد میل میکنند و در واقع در این بخش سیال به صورت نیوتونی عمل میکند. تمام بررسیها در محدوده غلظتی ۷-۲٪ انجام گرفته و تمام نتایج حاصل از جمله فرض سیال مدل پاورلا در این محدوده قابل قبول است و برای غلظتهای دیگر باید بررسی بیشتری انجام شود. همچنین طراحی خاص دستگاه و نحوه استنتاج معادلات، خطاهای را به حداقل ممکن رسانیده است و بنابراین این دستگاه برای تعیین خواص رئولوژیکی سیالات ویسکوز که از مدل پاورلا تعیت میکنند پیشنهاد میشود.



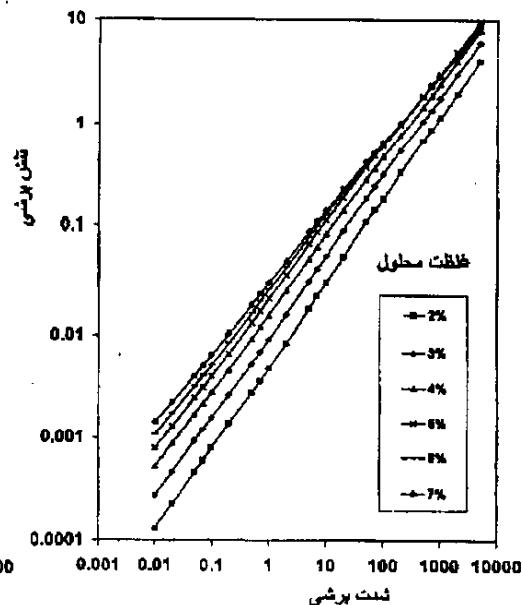
شکل ۴- منحنی تغییرات تنفس برشی بر حسب  
شدت برشی برای غلظت‌های مختلف محلول PVA



شکل ۵- منحنی تغییرات ثابت مدل  
پاورلا (m) بر حسب غلظت محلول PVA



شکل ۶- منحنی تغییرات تنفس برشی بر حسب  
شدت برشی برای غلظت‌های مختلف محلول PVA



۱۰۷

## فهرست منابع

- [1] Lawaczeck, Z., Des Vereines Deutsh Ingenieuve, (1919), v. 63, p. 677.
- [2] Lohrenz, J., Swift, G.W. and kurata, F., An experimentally verified theoretical study of the falling cylinder viscometer, A.I.Ch.E., (1968), v. 8 # 2, p. 190.
- [3] Lohrenz, J. and kurata, F., Design and Evaluation of a New Body for Falling Cylinder Viscometer, A.I.Ch.E., (1968), v. 8 # 2, p. 190.
- [4] Ashare, E. and Bird, B., Falling Cylinder Viscometer for Non-Newtonian Fluids, A.I.Ch.E., (1965), v.11 # 5, p. 910.
- [5] Fredrickson, A.G. and Bird, B., Analytical and Numerical Solutions for Laminar Flow of the Non-Newtonian Ellis Fluid", A.I.Ch.E., (1965), v. 11 # 4, p.588.
- [6] Park, N.A. and Irvine, T.F., Measurment of Rheological Fluid Properties with the Falling Needle Viscometer, Rev. Sci. Instrum., (1988), v. 59 # 9, p. 2051.
- [7] Irvine, T.F. and Fulling, G., Theoretical and Experimental Study of Falling Cylinder Viscometer, Int.J. Heat Mass Transfer, (1994), v.47 # 1, p. 41.
- [8] Park, N.A., and Irvine, T.F., Experimental Study of the Velocity Field Around a Falling Needle Viscometer, Rev. Sci. Instrum., (1994), v.65 # 1, p. 224.
- [9] Park, N.A., The Improvment on the Falling Needle Viscometer, Rev.Sci. Instrum., (1997), v.68 # 4, p. 1809.
- [10] Streeter, V.I., Fluid Dynamic, (1988), Mc Graw-Hill, NewYork.
- [۱۱] سید غلام رضا اعتماد، روح ا... باقری و سعید زینالی هریس، استخراج معادلات کاربردی رئومتر استوانه سقوط کننده برای سیالات غیر نیوتونی، ششمین کنفرانس دینامیک شاره ها، (اسفند ۱۳۷۸)، جلد دوم، صفحه ۲۳۳.