

# بررسی پدیده لغزش در گلهای حفاری پایه آبی

کیوان صادقی

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۰/۱۲/۱۹، تاریخ تصویب ۸۱/۸/۴)

## چکیده

در این پروژه تحقیقاتی، اعتبار شرط عدم لغزش<sup>۱</sup> در مورد گلهای حفاری پایه آبی (بنتونیتی) با استفاده از روشهای ویسکومتریک بطور تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، ویسکوزیته یک گل نمونه (غلظت بنتونیت = ۱۰ درصد) با استفاده از یک ویسکومتر دورانی از نوع استوانه های هم مرکز<sup>۲</sup> اندازه گیری شد. نتایج بدست آمده با استفاده از دو استوانه داخلی با قطرهای مختلف حاکی از آن است که برای این گل خاص ویسکوزیته سیال تابعی از فاصله بین دو استوانه است و این به معنای بروز پدیده لغزش در مورد این سیال خاص می باشد. در این مقاله، روشی ساده و کاربردی برای حذف خطای ناشی از پدیده لغزش و اصلاح منحنی جریان (رابطه بین نرخ برش و تنش برشی) به منظور دستیابی به ویسکوزیته واقعی سیال ارائه میشود. در ضمن، نشان داده میشود که چگونه میتوان با استفاده از منحنیهای اصلاح نشده جریان<sup>۳</sup> رابطه ساده ای بین سرعت لغزش و تنش برشی بدست آورد. نتایج بدست آمده نشان میدهد که برای این گل خاص، سرعت لغزش متناسب با تنش برشی است و این بدان معناست که در مقایسه با سایر سیالات غیر نیوتنی، در گلهای حفاری پدیده لغزش از شدت کمتری برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** سیال ویسکوالاستیک، سیال غیر نیوتنی، شرط عدم لغزش، گل حفاری، ویسکوزیته، بنتونیت

## مقدمه

مقالات دکتر عاطفی در این زمینه مراجعه نمایید [۶].  
ظهور سیالات غیرنیوتنی در عرصه صنعت در دهه های اخیر، مسئله اعتبار شرط عدم لغزش را در مورد این دسته از سیالات نیز بطور جدی مطرح ساخته است [۷، ۸].  
همچون سیالات نیوتنی، نتایج متعدد آزمایشگاهی حاکی از آن است که در مورد این دسته از سیالات نیز، تحت شرایط معینی از نظر میدان تنش، شرط مزبور ممکن است از درجه اعتبار ساقط شود [۷، ۸]. ظاهراً Mooney نخستین کسی است که درستی این شرط را در مورد سیالات غیرنیوتنی بطور جدی مورد بررسی قرار داده است [۹]. وی با اندازه گیری ویسکوزیته چندین سیال غیرنیوتنی با استفاده از ویسکومترهای لوله مویین و ویسکومترهای دورانی نشان داد که ویسکوزیته ای که با استفاده از این دو روش بدست می آید با یکدیگر برابر نمی باشد. در ضمن، برای هر یک از این دو روش، ویسکوزیته ای که اندازه گیری می شود تابعی از مشخصات هندسی دستگاه است (بعنوان مثال، تابعی از قطر لوله مویین و یا فاصله شعاعی بین دو استوانه) و این در حالی است که ویسکوزیته، بعنوان خاصیتی از یک سیال، باید

شرط عدم لغزش جزو معمولترین و متداولترین شرطهای مرزی<sup>۴</sup> در حل مسائل مکانیک سیالات به شمار میرود [۱]. بر مبنای این شرط، بین سیال و دیواره ای که با آن در تماس است هیچگونه حرکت نسبی وجود ندارد. اگرچه امروزه از این شرط بطور وسیع در حل مسائل مکانیک سیالات استفاده میشود اما باید اذعان داشت که در سالهای اخیر درستی این شرط مورد شک و تردید جدی قرار گرفته است. در حقیقت، در سال ۱۹۸۸، Trostel با استفاده از قانون اول و دوم ترمودینامیک، بطور تئوریک لغزش سیال در دیواره را بعنوان یک شرط مرزی مورد پذیرش قرار داد [۲]. در سال ۱۹۹۱ وی و همکارانش موفق شدند که درستی این نظریه را بطور تجربی با اندازه گیری پروفیل سرعت در یک کانال مستطیلی نشان دهند. آزمایشات متعددی که در سالهای بعد توسط Watanabe و همکارانش انجام شد همگی دال بر تایید نظریه Trostel بودند و ثابت کردند که در مورد سیالات نیوتنی شرط عدم لغزش ممکن است همواره برقرار نباشد [۳-۵]. (در مورد شرط عدم لغزش و سایر تاریخی پذیرش آن در مجامع علمی، می توانید به یکی از

واز مقدار ماکزیم خود در دیواره تا صفر در مرکز لوله تغییر میکنند. این بدان معناست که در مجاورت دیواره، ذرات فاز پراکنده دچار تغییر شکل بیشتری میشوند که در نتیجه آن ذرات مزبور در راستای میدان چرخیده و از نظم بیشتری (و عبارت دیگر، انتروپی کمتری) برخوردار میگردند. بر عکس، ذراتی که در نزدیکیهای مرکز لوله قرار دارند دچار هیچگونه تغییر شکلی نمیشوند و بعلت نیروهای براونی انتروپی آنها بیشترین مقدار خود را دارا می باشد. وجود چنین گرادیانی در میدان انتروپی موجب میشود که ذرات فاز پراکنده از مجاورت دیواره (جاییکه انتروپی کم است) به طرف مرکز لوله (جاییکه انتروپی زیاد است) مهاجرت کنند [۸,۷].

گل حفاری سیالی غیرنیوتنی است که در صنعت حفاری چاههای نفت و گاز به کار میرود [۱۲-۱۴]. گلهای حفاری معمولاً به دو دسته کلی گلهای پایه آبی و گلهای پایه روغنی تقسیم میشود که گل پایه آبی از کاربرد وسیعتری برخوردار می باشد. این گل با افزودن بنتونیت (نوعی خاک رس) به آب بدست می آید. علاوه بر بنتونیت، معمولاً مواد افزودنی دیگری نیز به گل اضافه میشود تا خواص فیزیکی/رئولوژیکی آن را اصلاح نماید. مخلوط حاصل از نظر ظاهر شبیه به ژل است و بعلت ساختار پیچیده ای که دارد بوضوح جزو سیالات غیرنیوتنی محسوب میگردد. در حقیقت، با توجه به غلظت نسبتاً بالای مواد جامد معلق در گلهای صنعتی، میتوان گلهای حفاری را جزو سوسپانسیونهای نسبتاً غلیظ قرار دارد. با توجه به آنچه که قبلاً گفته شد، ژلها و سوسپانسیونهای غلیظ جزو آن دسته از سیالات غیرنیوتنی قرار دارند که نسبت به پدیده لغزش در دیواره حساس می باشند [۱۵]. با اینوصف، بر طبق بررسیهای انجام شده، پدیده لغزش در مورد گل حفاری، مورد مطالعه قرار نگرفته است (این احتمال وجود دارد که این پدیده توسط برخی از شرکتهای بزرگ نفتی مورد مطالعه قرار گرفته باشد اما منتشر نشده باشد).

سئوالی که در اینجا مطرح میشود این است که آیا در مورد گلهای حفاری پایه آبی (بویژه گلهایی که بنتونیت آنها از معادن داخل کشور تهیه میشود) میتوان همچنان از شرط عدم لغزش استفاده نمود یا خیر؟ پاسخ به این سئوال از این نظر مهم است که ویسکوزیته گل حفاری جزو

مستقل از روشی باشد که برای اندازه گیری آن بکار میرود (لازم بذکر است که در مورد سیالات نیوتنی حقیقتاً وضعیت اینگونه است). نتیجه گیری مهمی که از تحقیقات Mooney میتوان گرفت این است که اگر در مورد سیالی، ویسکوزیته تابعی از روش اندازه گیری و یا مشخصات هندسی دستگاه گردد (با فرض اینکه اثر سایر پارامترها و خطاهای ممکنه کاملاً لحاظ شده باشند) در اینصورت میتوان نتیجه گرفت که با لغزش سیال در دیواره مواجه شده ایم [۹].

از میان انواع مختلف سیالات غیرنیوتنی، سیالاتی که نسبت به لغزش در دیواره حساسیت بیشتری از خود نشان می دهند عبارتند از: مذابها و محلولهای پلیمری، سوسپانسیونها و امولسیونهای غلیظ، فومها و ژلها. از میان این دسته از سیالات، لغزش به معنای واقعی آن (بعبارت دیگر، ناپیوستگی سرعت در دیواره) فقط در مورد برخی از مذابهای پلیمری دیده شده است و در مورد سایر سیالات غیرنیوتنی، لغزش اساساً از نوع ظاهری است [۸,۷]. بعبارت دیگر، بوجود آمدن لایه ای نازک و رقیق از فاز پیوسته (حلال) در مجاورت دیواره موجب بروز اثری شبیه به لغزش میشود و این در حالی است که در مورد خود این لایه، شرط عدم لغزش ممکن است همچنان برقرار باشد [۱۰]. تشکیل این لایه را میتوان به مهاجرت ذرات فاز پراکنده<sup>۵</sup> از مجاورت دیواره نسبت داد که در اثر آن سیال مورد نظر ناهمگن میگردد و ویسکوزیته آن کاهش می یابد [۱۱].

علت مهاجرت ذرات فاز ناپیوسته از مجاورت یک دیواره هنوز بطور کاملاً دقیق شناخته نشده است اگرچه دلایل متعددی در این رابطه پیشنهاد شده اند [۸,۷]. در این رابطه میتوان به نقش نیروهای جانبی که در ارتباط با اثر ماگنوس ایجاد میشوند<sup>۶</sup> اشاره نمود. از طرف دیگر، این واقعیت که لغزش فقط در ویسکومترهایی مشاهده شده است که در آنها میدان تنش از نوع ناهمگن است (بعنوان مثال، در ویسکومتر مخروط - صفحه، لغزش مشاهده نشده است) این ایده را تقویت می نماید که مهاجرت ذرات مزبور ممکن است در رابطه با گرادیان انتروپی رخ داده باشد. بعنوان مثال در یک لوله موئین، نرخ تغییر شکل (گرادیان سرعت) در هر مقطع از لوله غیر یکنواخت است

76.2 mm) بود. دور موتور در این ویسکومتر قابل تنظیم است و تا 600 rpm قابل افزایش می باشد (در این دور خاص، دستگاه میتواند ویسکوزیته یک سیال را در نرخ برشی برابر با  $1000(1/sec)$  اندازه گیری نماید). از طرف دیگر، ترانسدیوسر گشتاور سنج این دستگاه میتواند گشتاوری برابر با حداکثر 1200 gr-cm را اندازه گیری کند. در ضمن این دستگاه دارای این قابلیت با ارزش است که در آن میتوان فشار و دمای سیال را در محدوده نسبتاً وسیعی تغییر داد. در عمل آزمایشات در چهار فشار 100, 25, 100, 200, 300, 400 psi و چهار دمای 225 deg F انجام شد (اگر چه باید اذعان نمود که این دستگاه میتواند فشار ماکزیممی برابر با 1000psi و دمایی برابر با 400 deg F را نیز تحمل نماید). قبل از انجام هر گونه تستی روی سیالات مورد نظر، در ابتدا ویسکومتر مزبور بتوسط وزنه های معلوم کالیبره شد و کالیبراسیون آن در فواصل زمانی معین بوسیله چند سیال مختلف استاندارد نیوتنی (روغن سیلیکون از شرکت Baroid آمریکا) چک شد. لازم بذکر است که کلیه مقادیر آزمایشگاهی ارائه شده در این مقاله (چه در مورد سیالات نیوتنی و چه غیر نیوتنی) کاملاً تکرار پذیر می باشند از اینرو، در قسمتهای بعد تنها به ارائه نمونه ای از آنها اکتفا میگردد.

### چگونگی تهیه نمونه های آزمایشگاهی

سیال مورد آزمایش در این پروژه تحقیقاتی با افزودن پودر بنتونیت (تولید داخل کشور) به آب مقطر بدست آمد. غلظت بنتونیت در این سیال برابر با ۱۰ درصد (از نظر وزنی) در نظر گرفته شد که کمی بیش از مقادیری است که در عمل در گلهای صنعتی بکار برده میشود (غلظت گلهای صنعتی معمولاً بین ۶ تا ۸ درصد است). با استفاده از چنین غلظتی انتظار می رفت که گل لزجتری بدست آید بنحویکه اندازه گیری گشتاور مقاوم آن با استفاده از ترانسدیوسر گشتاوری که بر روی ویسکومتر نصب شده بود با دقت بیشتری صورت پذیرد. در ضمن لازم است اشاره شود که مخلوط حاصل به مدت نیم ساعت در دور بسیار بالای ۱۲۰۰۰ rpm هم زده شد تا کاملاً بصورت همگن در آید. سوسپانسیون بدست آمده

مهمترین خواص آن محسوب میشود و موفقیت عملیات حفاری تا حد زیادی به آن وابسته است (گل حفاری طوری طراحی میشود که در نزدیکیهای سرمرته، ویسکوزیته آن کم باشد تا گشتاور مورد نیاز برای چرخاندن سر مرته به حداقل رسد. از طرف دیگر، دور از سرمرته، گل باید دارای ویسکوزیته بالایی باشد تا از رسوب نمودن تراشه های حفاری به ته چاه ممانعت نماید). با توجه به اهمیتی که ویسکوزیته سیالات حفاری در سرعت پیشروی و بطور کلی در موفقیت آمیز بودن عملیات حفر چاههای نفت و گاز بعهده دارد تعجبی ندارد که در صنعت حفاری معمولاً از ویسکومترهای دقیق و گران قیمت برای اندازه گیری ویسکوزیته گل حفاری استفاده میشود. اما نکته ای که باید به آن توجه داشت این است که در همه ویسکومترها (صرف نظر از نوع آنها) برای تبدیل کمیتهای فیزیکی (بعنوان مثال، گشتاور و دور موتور) به کمیتهای مورد نظر (تنش برشی و نرخ برش) همواره از فرمولها و روابطی استفاده میشود که در آنها از شرط عدم لغزش بعنوان یک پیش فرض استفاده شده است. این بدان معناست که برای سیالی که نسبت به لغزش در دیواره حساس است، نتایج حاصل از این دستگاهها ممکن است با خطای قابل ملاحظه ای همراه باشد مگر آنکه اصلاحات خاصی روی نتایج آزمایشگاهی صورت پذیرد. در این کار تحقیقاتی نشان خواهیم داد که گلهای حفاری از نوع پایه آبی (بنتونیتی) به لغزش در دیواره حساس هستند. در همین رابطه نشان خواهیم داد که میتوان با دو بار اندازه گیری منحنی جریان با استفاده از ویسکومترهای دورانی، خطای ناشی از این پدیده را اصلاح نمود و ویسکوزیته سیال را با دقت بیشتری بدست آورد.

### روش آزمایشگاهی

در این پروژه تحقیقاتی، از یک دستگاه ویسکومتر دورانی از نوع استوانه های هم مرکز مدل Fann50C برای انجام آزمایشات و اندازه گیری ویسکوزیته سیالات مورد نظر استفاده بعمل آمد. ویسکومتر مزبور مجهز به یک استوانه خارجی به قطر 36.84mm و دو استوانه داخلی به قطرهای 34.49 mm و 33.47 mm (با ارتفاعی برابر با

اولین گام در استفاده از روش Kiljanski تعیین منحنی تنش برشی - نرخ برش سیال مورد نظر در دو gap مختلف است (چنین منحنیهایی باید علی الاصول بر یکدیگر منطبق باشند و در صورتیکه غیر از این باشد به معنای متاثر بودن نتایج آزمایشگاهی از لغزش در دیواره است). در مرحله بعد، نرخ برش ظاهری از رابطه زیر محاسبه میشود.

$$b = \frac{R_i R_o \ln(R_o/R_i)}{R_i + R_o} \quad (2)$$

اگر سرعت لغزش  $u_s$  (به شکل ۲ رجوع شود) معلوم باشد میتوان نرخ برش واقعی را بصورت زیر بدست آورد

$$\dot{\gamma}'_m = \frac{\Omega}{\ln(R_o/R_i)} \quad (3)$$

که در آن  $b$  یک پارامتر هندسی بصورت زیر است:

$$\dot{\gamma}_{m_1} = \dot{\gamma}'_{m_1} - \frac{u_{s_1}}{b_1} \quad (4)$$

برای بدست آوردن سرعت لغزش  $u_s$  (با این فرض اساسی که سرعت مزبور فقط تابعی از تنش برشی است) کافی است منحنی جریان سیال مورد نظر را در دو gap مختلف بدست آوریم. در اینصورت داریم:

$$\dot{\gamma}_{m_2} = \dot{\gamma}'_{m_2} - \frac{u_{s_2}}{b_2}$$

$$\dot{\gamma}_{m_1} = \dot{\gamma}'_{m_1} - \frac{u_{s_1}}{b_1} \quad (5)$$

با توجه به اینکه برای هر سیالی، رابطه بین تنش برشی و نرخ برش رابطه ای یک به یک است، بنابراین میتوان از دو رابطه فوق، مقدار سرعت لغزش را، در هر مقدار معینی از تنش برشی، بصورت زیر بدست آورد [۱۷].

$$u_s = \frac{\dot{\gamma}'_{m_1} - \dot{\gamma}'_{m_2}}{(1/b_1) - (1/b_2)} \quad (6)$$

ظاهری شبیه به ژل داشت و برای اطمینان از همگنی بیشتر آن (در مقیاس میکروسکوپی)، به مدت ۴۸ ساعت در دمای اطاق نگهداری شد تا اصطلاحاً جا بیفتد و سپس برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

## روشهای ویسکومتریک برای تشخیص پدیده لغزش

روش کلاسیک Mooney برای تشخیص پدیده لغزش در یک ویسکومتر استوانه ای، نیاز به اندازه گیری سه منحنی جریان (منحنی تنش برشی بر حسب نرخ برش) در سه gap مختلف دارد [۹]. برای این منظور، وی از دو استوانه داخلی به شعاعهای  $R_1$  و  $R_2$  و دو استوانه خارجی به شعاعهای  $R_2$  و  $R_3$  استفاده نمود تا کلاً سه نسبت  $R_1/R_2$ ,  $R_1/R_3$ ,  $R_2/R_3$  حاصل گردد. روش Yoshimura و Prud'homme [۱۶] همچون روش Mooney نیاز به چهار استوانه دارد با این تفاوت که اندازه گیری فقط دو بار و آنهم در نسبت شعاعی یکسان ( $R_1/R_2, R_2/R_3$ ) انجام میگردد. هر دو روش فوق الذکر نیاز به وجود دو استوانه خارجی با قطرهای مختلف دارند و این در حالی است که ویسکومتر بکار برده شده در این پروژه تحقیقاتی (ویسکومتر Fann مدل 50C) فقط دارای یک استوانه خارجی بود. از اینرو تصمیم گرفته شد از روش Kiljanski استفاده شود [۱۷] که همچون روش Yoshimura و Prud'homme احتیاج به دو بار اندازه گیری دارد با این مزیت بزرگ که وجود یک استوانه خارجی و دو استوانه داخلی با قطرهای مختلف برای این منظور کافی می باشد.

روش Kiljanski بر اساس این ایده کار میکند که برای هر سیال غیرنیوتنی، در فاصله خاصی از محور دوران، نرخ برش دقیقاً برابر با نرخ برش برای یک سیال نیوتنی است. برای سیالی فاقد خواص الاستیک که معادله اساسی آن از قانون توانی پیروی میکند<sup>۷</sup> این فاصله را میتوان از رابطه (۱) بدست آورد که در آن شعاع استوانه داخلی و  $R_0$  شعاع استوانه خارجی است [۱۷].

$$r = R_m = R_0 \sqrt{\frac{2 \ln(R_o/R_i)}{1 - (R_o/R_i)}} \quad (1)$$

## نتایج آزمایشگاهی و تحلیل آنها

می باشد (لازم بذکر است که در مورد سیالات استاندارد نیوتنی، آزمایشات مشابه نشان داده است که منحنیهای مزبور مستقل از فاصله بین دو استوانه می باشند). بر اساس اطلاعات موجود در شکل‌های (۱) و (۲) میتوان با استفاده از روشی که در بخش قبل توضیح داده شد، نسبت به تصحیح منحنی جریان در هر فشاری اقدام ورزید و حتی سرعت لغزش سیال را نیز تخمین زد. بعنوان مثال، شکل (۳) منحنی جریان سیال مورد نظر را در فشار 100 psi بصورت تصحیح شده نشان میدهد. در شکل (۴) نیز سرعت لغزش این سیال در فشار 100 psi بر حسب تنش برشی ارائه گردیده است. شکل مزبور بخوبی نشان میدهد که در مورد این گل حفاری، رابطه ای خطی بین سرعت لغزش و تنش برشی وجود دارد. هنگامیکه این رابطه خطی را با روابط غیر خطی در مورد برخی دیگر از سیالات غیر نیوتنی مقایسه میکنیم (بعنوان مثال با سیالاتی همچون فومها و ژلهای واقعی)، به این نتیجه گیری مهم می رسیم که ظاهراً در گلهای حفاری پدیده لغزش از شدت کمتری برخوردار است.

شکل‌های (۱) و (۲) تاثیر فشار را بر روی منحنی جریان (منحنی تنش برشی - نرخ برش) سیال مورد نظر در دو gap مختلف 1.17 mm و 1.68 mm و در دمای محیط نشان میدهند. نوساناتی که در این دو شکل در مقادیر تنش برشی مشاهده میشود، به احتمال زیاد بعلت وجود ذرات جامدی است که بطور تصادفی در تماس اصطکاکی با دیواره سلیندرها قرار گرفته و موجب بالا رفتن گشتاور مقاوم بطور لحظه ای میشوند (در مورد سیالات استاندارد نیوتنی، چنین نوساناتی مشاهده نشده است). صرف نظر از این نوسانات، شکل‌های فوق نشان میدهند که در هر gap معینی، منحنیهای جریان عملاً مستقل از فشار می باشند که با توجه به کم بودن فشار و غیر قابل تراکم بودن سیال امری قابل انتظار به شمار میرفت. مقایسه ای بین نتایج عرضه شده در این دو شکل بخوبی نشان میدهد که در فشار و دمای یکسان، منحنی جریان سیال مورد نظر تابعی از فاصله بین دو استوانه (gap) است و این به معنای لغزش سیال در دیواره

شکل ۱: منحنی جریان گل حفاری در دمای محیط و فشارهای مختلف - فاصله شعاعی = 1.17 mm .

شکل ۲: منحنی جریان گل حفاری در دمای محیط و در فشارهای مختلف (gap=1.68mm).

شکل ۳: اثر فاصله شعاعی بین دو استوانه بر منحنی جریان گل حفاری در فشار 100psi و دمای محیط.

#### شکل ۴: سرعت لغزش بر حسب تنش برشی در فشار 100psi و دمای محیط.

این امر میتواند موضوع تحقیقات آتی قرار گیرد. بعبارت دیگر، به نظر میرسد که رفتار لغزشی سیالات حفاری بمراتب پیچیده از سایر سیالات غیرنیوتنی (همچون مایعات پلیمری) باشد. در این پروژه، سعی شده است که حساسیت گلهای حفاری به لغزش در دیواره اثبات شود که بوضوح به این هدف خود نایل شده است.

#### نتیجه گیری کلی

بر اساس نتایج بدست آمده در این پروژه تحقیقاتی، واضح است که گل حفاری پایه آبی به پدیده لغزش در دیواره حساس است. این بدان معناست که اندازه گیری ویسکوزیته این سیال با استفاده از ویسکومترهای استوانه ای باید الزاماً در دو یا چند gap مختلف (بعبارت دیگر، با چندین استوانه داخلی و خارجی با قطرهای مختلف) صورت پذیرد تا بتوان با استفاده از آنها خطای ناشی از پدیده لغزش را ارزیابی نمود و ویسکوزیته سیال مورد نظر را با دقت قابل قبولتری بدست آورد. نتایج بدست آمده در دماها و فشارهای مختلف بر روی یک گل نمونه حاکی از آن است که برای گل مزبور، سرعت لغزش

شکلهای (۵) و (۶) تاثیر دما را بر روی منحنی تنش برشی - نرخ برش سیال مورد نظر در دو gap مختلف و در فشار 100 psi نشان میدهد. شکلهای مزبور نشان میدهند که مطابق انتظار، دما تاثیر زیادی بر روی رفتار ویسکوز این سیال دارد. با توجه به این دو شکل میتوان براحتی دریافت که در هر دمای معینی، منحنی جریان این سیال خاص تابعی از فاصله بین دو استوانه است. شکل (۷) وضعیت مزبور را در دمای 100 deg F نشان میدهد. در شکل (۸) اطلاعات ارائه شده در شکل (۷) به همراه منحنی جریان تصحیح شده نشان داده شده اند. شکل (۹) نیز سرعت لغزش سیال مورد نظر را بصورت تابعی از تنش برشی در فشار 100 psi و دمای 100 deg F ارائه نموده است. در اینجا نیز با رابطه ای خطی بین سرعت لغزش و تنش برشی مواجه هستیم. سرعت لغزشی که در دو شکل (۴) و (۹) گزارش شده اند بر یکدیگر منطبق (و یا در یک راستا) نمی باشند و این بدان معناست که در مورد گل حفاری، سرعت لغزش علاوه بر تنش برشی، احتمالاً تابعی از فشار و درجه حرارت (و حتی پارامترهای دیگری همچون غلظت) نیز می باشد که بررسی دقیقتر

شکل ۵: منحنی جریان گل حفاری در فشار 100psi و دماهای مختلف - فاصله شعاعی = 1.17 mm .

شکل ۶: منحنی جریان گل حفاری در فشار 100psi و دماهای مختلف - فاصله شعاعی = 1.68 mm .

شکل ۷: اثر فاصله شعاعی بین دو استوانه بر منحنی جریان گل حفاری در فشار 100psi و دمای 100F .

شکل ۸: منحنی جریان تصحیح شده در فشار 100psi و دمای 100F .

شکل ۹: سرعت لغزش بر حسب تنش برشی در فشار 100psi و دمای 100F.

### تشکر و قدردانی

انجام این پروژه در قالب یک طرح تحقیقاتی که به تصویب شورای پژوهشی دانشگاه تهران رسیده است صورت پذیرفته است. نگارنده این مقاله بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از بابت بودجه و امکاناتی که توسط این دانشگاه در اختیار وی قرار گرفته است اعلام می‌نماید. در ضمن نگارنده مایل است از همکاری صمیمانه آقایان مهندس سیروس سلیمی (در ارتباط با انجام برخی از آزمایشات) و آقای مهندس قاسم خیر اندیش، رئیس واحد حفاری پژوهشکده صنعت نفت (در رابطه با در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی) تشکر نماید.

تابعی خطی از تنش برشی است. وجود رابطه ای خطی بین سرعت لغزش و تنش برشی در مورد سیال فوق با توجه به اینکه در مورد برخی از سیالات غیرنیوتنی با روابطی غیر خطی از این نوع مواجه هستیم تلویحاً بدان معناست که حساسیت گِل حفاری به لغزش در دیواره (حداقل در غلظتهای کمتر و یا مساوی با ۱۰ درصد) از شدت کمتری برخوردار است. در ضمن خاطر نشان می‌گردد که نتیجه گیریهای فوق، مختص به گلی است که در ساخت آن از بنتونیت تولید معادن داخل کشور استفاده شده باشد. با توجه به اینکه بنتونیت تولید شده توسط شرکت‌های مختلف داخلی و خارجی از نظر سایز ذرات متشکله آنها و نیز از نظر توزیع سایز این ذرات<sup>۱</sup> الزاماً با یکدیگر برابر نمی باشند، میتوان انتظار داشت که رفتار لغزشی آنها در یک سیال حفاری با یکدیگر اختلاف داشته باشد.

## مراجع

- 1 - Schlichting, H. (1964). *Boundary layer theory*, McGraw-Hill, New York.
- 2 - Trostel, R., (1988). "Gedanken zur Konstrucktion Mechanischer Theorien." *Forscheeengsbericht*, No. 7.
- 3 - Watanabe, K. and Mizunuma, Y. H. (1999). "Drag reduction in laminar flow between two vertical coaxial cylinders." *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 121, No. 1.
- 4 - Watanabe, K. (1998). "Slip of newtonian fluids at solid boundary." *JSME Int. J. (Series B)*, Vol. 41, No. 3.
- 5 - Ogata, S. and Watanabe, K. (2001). "Drag reduction of surfactant solutions in flow past a circular cylinder." *ASME International Mech. Engrg. Congress & Exposition*, New York, Nov. 11-16.
- ۶ - عاطفی، غ. ع.، میگون پوری، م. ر. "حل عددی جریان سیال حول یک استوانه با شرط مرزی لغزش در اعداد رینولدز متوسط." کنفرانس بین المللی هوا فضا، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۹).
- 7 - Agarwal U. S., Dutta, A. and Mashelkar, R. A. (1994). "Migration of Macromolecules under flow: the physical origin and engineering implications." *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 49, PP. 1693.
- 8 - Barnes H. (1995). "A review of the slip of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its use, character and cure." *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 56, PP. 221.
- 9 - Mooney, M. (1931). "Explicit formulas for slip and fluidity." *J. Rheol.*, Vol. 2, PP. 210.
- 10 - Segre G. and Silberberg, A. (1961). "Radial particle displacements in poiseuille flow of suspensions." *Nature*, No. 4760, PP. 209.
- 11 - Muller-Mohnssen, H., Lobl, H. P. and Schauerte, W. (1987). "Direct determination of apparent slip in polymer solutions flow." *J. Rheol.*, 31, PP. 323.
- 12 - Rommetveit, R. and Bjorkevoll, K. S. (1997). "Temperature and pressure effects on drilling fluid rheology and ECD in very deep wells." *SPE 39282*, PP. 297.
- 13 - Aldermon, N.G., Gavignet, A., Guillot, D. and Maitland, G. C. (1988). "High-Temperature, High-Pressure Rheology of Water-Based Muds." *SPE 18035*, Houston.
- 14 - Gray, G. R., Darely, H. C. and Rogers, W. F. (1980). *Composition and Properties of oil well drilling Fluids, 4th Ed.*, Gulf Publishing: Houston, TX, PP. 1-36.
- 15 - Yilmazer, U. and Kalyon, D. M. (1989). "Slip effects in capillary and parallel disk torsional flows of highly filled suspensions." *J. of Rheol.*, Vol. 33, No. 8, PP. 1196.
- 16 - Yoshimura A. and Prud'homme, R. K. (1988). "Wall slip corrections for Couette and parallel disk viscometers." *J. Rheol.*, Vol. 32, No. 1, PP. 53.
- 17 - Kiljanski, T. (1989). "A method for correction of the wall slip effect in a Couette rheometer." *Rheol. Acta*, Vol. 28, PP. 61.

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- |                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| 1 - No-slip condition           | 5 - Dispersed phase   |
| 2 - Coaxial cylinder viscometer | 6 - Magnus effect     |
| 3 - Flow curve                  | 7 - Power-Law Fluid   |
| 4 - Boundary conditions         | 8 - Size distribution |