چگو نگی استفاده از جریان در کانالهای همگرا برای مطالعه رفتار الاستیک محلولهای پلیمری

کیوان صادقی

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۸/۱/۲۲ ، تاریخ تصویب ۷۸/۹/۱۳)

چکیده

در این مقاله روشی ساده، بر مبنای استفاده از کانالهای همگرا، برای مطالعه رفتار الاستیک محلولهای پلیمری ارائه میگردد. در روش مزبور کافی است سیال مورد نظر از داخل کانالی مخروطی - شکل عبور داده شود و همزمان افت فشار و دبی حجمی اندازه گیری شود. سپس با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده افت فشار و دبی، منحنی Cp - Re (عدد رینولدز - ضریب افت فشار) برای سیال مورد نظر ترسیم می گردد. منحنی ایکه به این ترتیب بدست می آید در مراحل بعد با منحنی Cp - Re مربوط به سیالات نیوتنی مقایسه می گردد. نتایج بدست آمده از کانال همگرای فوق بخوبی نشان می دهد که در مورد سیالات نیوتنی، مطابق انتظار، منحنیهای Cp - Re بر یکدیگر منطبق اند. برای این دسته از سیالات همچنین مشاهده میشود که در رینولدزهای کم Cp متناسب با عکس Re است بنحویکه حاصلضرب این دو عدد بدون بعد (که خود با عدد بدون بعد P^* نشان داده میشود) بصورت مقداری ثابت ظاهر می گردد. این مقدار ثابت با P^*_{in} نشان داده شد و از آن بعنوان معیاری برای تشخیص غیر الاستیک بودن یک سیال استفاده بعمل آمد. با تکرار آزمایش برای دو سیال ویسکوالاستیک (محلول پلیمری) مشاهده شد که برای این دسته از سیالات، مقدار P^* با یکدیگر و نیز با P^*_{in} اختلاف دارد بنحویکه P^* همواره از P^*_{in} بزرگتر است. اختلاف بین P^* و P^*_{in} به رفتار الاستیک یک سیال غیر نیوتنی و به تعبیری دیگر به مقاومت ذرات سیال در مقابل تغییر شکلهای کششی نسبت داده میشود. با توجه به اینکه هر چقدر سیالی الاستیکتر باشد میزان انحراف P^* از P^*_{in} بیشتر میگردد، در نتیجه میتوان با استفاده از این روش ساده براحتی محلولهای پلیمری را بر حسب خواص الاستیک آنها طبقه بندی نمود.

واژه های کلیدی: سیال غیر نیوتنی، سیال ویسکوالاستیک، ویسکوزیته کششی، جریان همگرا، کانال مخروطی

مقدمه

در دنیای امروز، استفاده از مواد افزودنی پلیمری برای تغییر و یا اصلاح خواص سیالات دیگر، دارای جایگاه ویژه ای در صنعت است. بعنوان مثال، روغنهای "چهار فصل" ویسکوزیته (تقریبا) ثابت خود را در فصول مختلف سال مدیون مقادیر بسیار اندکی از برخی از افزودنیهای پلیمری می باشند. صنعت نفت نیز از جمله صنایع مهمی است که در آن از مواد افزودنی پلیمری بطور وسیع استفاده میشود. در این صنعت، از مواد افزودنی پلیمری در ساختار گل حفاری [1] و سیال تزریقی به چاه [2] استفاده میشود. علاوه بر آن، در این صنعت، از مواد پلیمری برای کاهش افت فشار در خطوط انتقال نفت خام به پالایشگاهها و یا پایانه ها نیز استفاده موثری بعمل می آید. صنایع غذایی، آرایشی – بهداشتی و نیز صنایع رنگسازی از دیگر صنایع مهمی هستند که بطور فزاینده از مواد افزودنی پلیمری برای کنترل خواص محصولات تولیدی خود استفاده می نمایند [۱].

در اغلب کاربردهای فوق، سیال پایه (یا حلال) سیالی نیوتنی است، بدین معنی که ویسکوزیته (برشی) آن ثابت است و سیال فاقد هر گونه خواص الاستیک در جریان برشی می باشد. علاوه بر آن، ویسکوزیته کششی سیالات نیوتنی نیز ثابت و از نظر مقدار دقیقا سه برابر ویسکوزیته برشی آن است. با حل نمودن مقادیر اندکی (در حد چند ppm) از برخی از پلیمرها (معمولا پلیمرهای خطی، قابل انعطاف و با جرم مولکولی بالا) در یک حلال نیوتنی، رفتار محلول حاصله معمولا شدیدا غیر نیوتنی میگردد. بعنوان مثال، ویسکوزیته برشی و کششی محلول

1 – Drilling Muds 2 – Pusher Fluids

دیگر ثابت نبوده و تابعی از گرادیـان سـرعت خواهنـد بـود [۱]. نسبت بین این دو ویسـکوزیته نـیز بمراتـب از مقـدار ثابت سه بالاتر می گردد بنحویکه در برخی از موارد ممکن است حتی تا ده هـزار نـیز برسـد. از طـرف دیـگر، هـم در جریان برشی و هم کششی، تنش نرمال در جهت جریان از دو جهت دیـگر بـزرگتـر میـگردد. بعبـارت دیـگر، محلـول حاصله از خود خواص الاستیک نشان میدهد.

از آنچه که در بالا گفته شد میتوان نتیجـه گرفـت کـه مـواد افزودنـی پلیمـری، عـلاوه بـر تغییـر در خـواص ویسکوز سـیال پایـه، ممکـن اسـت موجـب القـای خـواص الاستیک در آن نیز گردنـد. ایـن الاستیسـیته در برخـی از موارد بعنوان یک خاصیت مثبت و در برخی دیگر از مـوارد بعنوان خاصیتی منفی شناخته میشود. بعنوان مثال، پدیده سودمند کاهش افت فشار در لوله ها (که در جریان درهـم مشاهده میشـود) اساسـا بـه تغییـر در سـاختار گردابـه هـا (بخصوص در مجاورت دیواره لوله) در اثر خواص الاستیک سیال نسبت داده میشود. از طرف دیگر، در رنگها نـه تنـها خواص الاستیک موجب کاهش در کیفیـت روکـش رنـگی می گردد بلکه در حین کار با وسـایل رنـگ زنـی (بـرس و غلطک) باعث تلف شدن مقداری از رنگ نـیز خواهـد شـد. بنابر این در مواقعیکـه اسـتفاده از مـواد افزودنـی پلیمـری برای اصلاح خواص ویسکوز سـیالی دیـگر تجویـز میشـود، لازم است حتی الامکان از پلیمری استفاده شود که اثر آن بر روی خواص الاستیک حلال نـیز از نظـر مصـرف کننـده مطلوب باشد. در این رابطه، بوضـوح وجـود معیـاری بـرای طبقه بندی سیالات غیر نیوتنی بر حسب خواص الاستیک آنها الزامی بنظر می رسد.

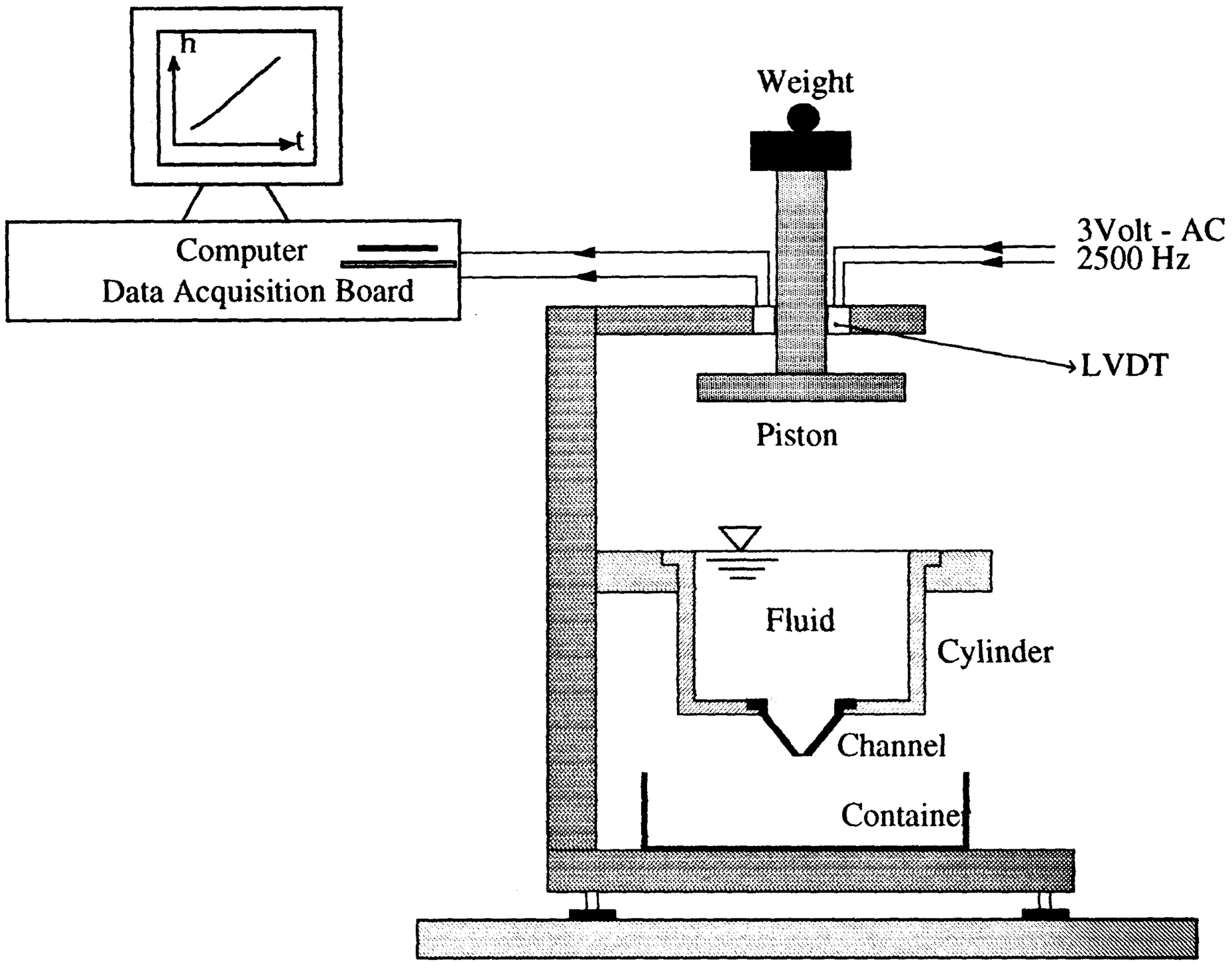
در جریان برشـی مناسـبترین معیـار بـرای تعییـن میزان الاستیسیته یک سیال، مقایسه خاصیتی از سیال به نـام N_1 بـا تنـش برشـی اسـت [۲]. خـاصیت مزبـور، کـه بصورت اختلاف بین تنش نرمال در جهت جریان با مقـدار آن در جهت عمود بر جریان (یـا جـهت گرادیـان سـرعت) تعریف میشود بـرای سـیالات نیوتنـی (و بطـور کلـی تمـام سیالات غیر الاستیک) صفر اسـت. در مواردیکـه جریـان از نوع کششی است، معمولا از ویسکوزیته کششی کـه نشـان دهنده میزان مقاومت ذرات سیال در مقابل تغییر شکلهای کششی است بعنوان مناسبترین معیار استفاده میشـود. بـا توجه به اهمیت جریانهای کششی و ایـن واقعیـت کـه در بسیاری از پروسه هـای صنعتـی (بعنـوان مثـال، روشـهای مختلف روکش دهی[1]) ذرات سیال دچـار تغییـر شـکلهای بزرگ طولـی میگردنـد، از ایـن رو در ایـن کـار تحقیقـاتی سعی میشود روش سـاده ای بـرای انـدازه گیـری مقـاومت کششی سیالات ویسکوالاستیک ارائه گردد.

شرح تکنیک

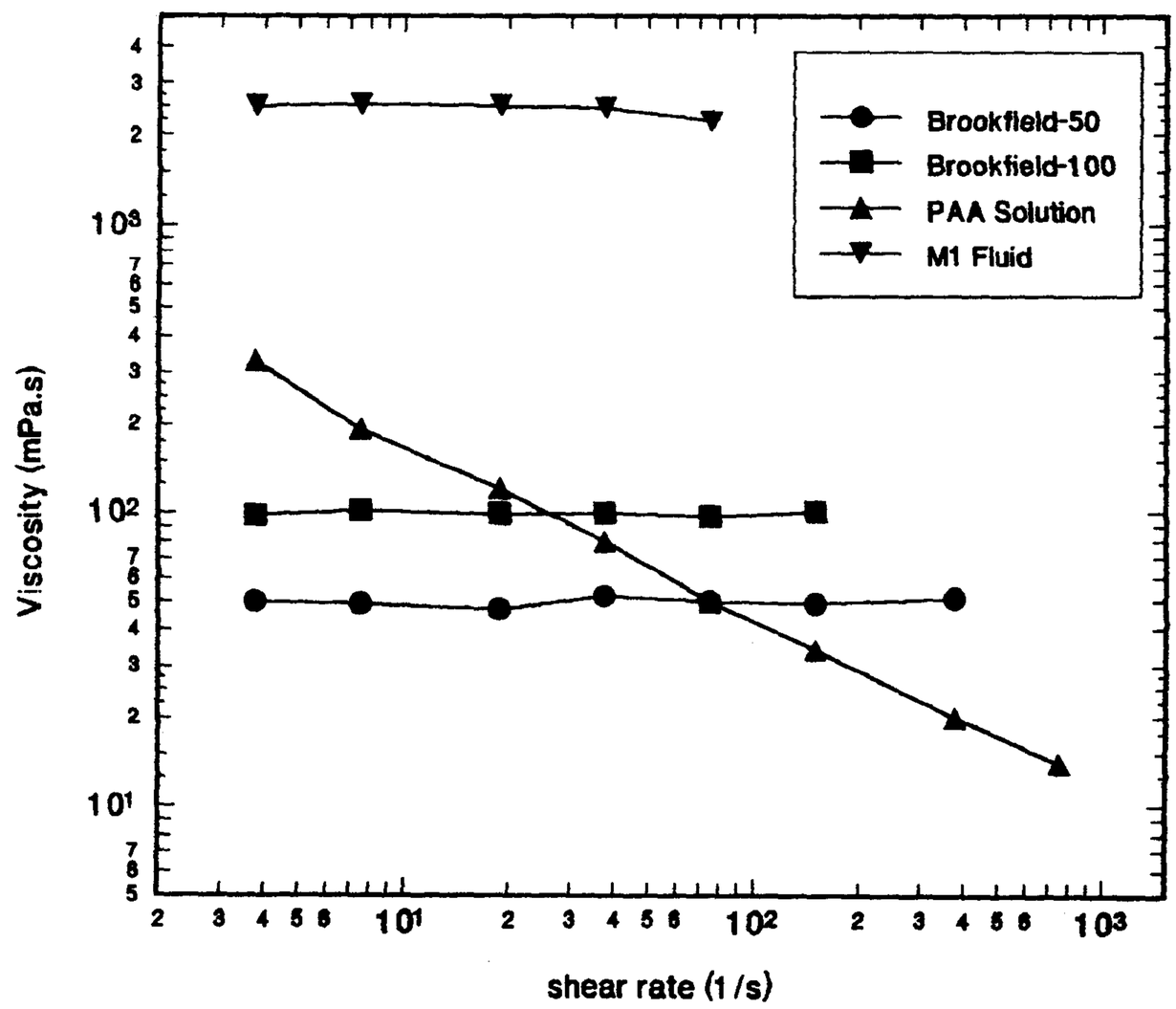
در بسیاری از پروسه های مـهم صنعتـی همچـون اکسـتروژن، از کانالـهای همـگرا بعنـوان یکـی از اجـزای اصلـی سیسـتم اسـتفاده میشـود [۱۰-۳] در میـان انـواع مختلـف کانالـهای همـگرا، هزینـه سـاخت کانـال مخروطـی از بقیـه کمـتر اسـت و در نتیجـه بـرای مقـاصد تحقیقـاتی مناسـبتر مـی باشـد. اشـکال عمـده کانالـهای مخروطی شکل در این است که نرخ کشش در طول کانال ثابت نیست، در نتیجه نمیتـوان از آن بـرای انـدازه گیـری ویسکوزیته کششی واقعی (یا مطلق) سیال اسـتفاده نمـود. بـا اینوصـف، کانالـهای مخروطـی - شـکل بـرای مقایسـه مقاومت کششـی سـیالات غـیر نیوتنـی بـا یکدیـگر بسـیار مناسب است. از آنجاییکه هدف از این کار تحقیقـاتی ارائـه تکنیکی ساده برای طبقه بندی سیالات مختلف بر حسـب میزان الاستیسیته آنها است، از این رو برای تحمیل تغییـر شکل طولی به ذرات سیال از این نوع کانال استفاده بعمـل آمده است.

کانال مخروطی شکلی که در ایـن کـار تحقیقـاتی مورد استفاده قرار گرفته است دارای زاویه راس ۶۰ درجه، ارتفاع ۱/۵ سانتیمتر و قطر دهانه خروجـی ۰/۶۵ میلیمـتر می باشد. کانال مزبور در انتهای مخزنی اسـتوانه ای شـکل بـه قطـر ۳ سـانتیمتر و ارتفـاع ۳ سـانتیمتر نصـب گردید (شکل ۱). قبل از هر آزمایش، داخل ایـن مخـزن از سیال مورد نظر پـر شـده و سـپس پیسـتون سـبکی بـوزن ۳۸/۶ گرم در بالای سطح مایع قرار داده میشود. بـرای بـه جریان انداختـن سـیال، از وزنـه هـایی فـولادی بـا اوزانـی بیـن ۱۰/۸ تـا ۵۷۱/۴ گرم اسـتفاده بعمـل آمـد. بـا بـاز کـردن دهانـه خروجـی کانـال، فشـار ناشـی از وزنـه هـا (فشـار رانـش) موجـب تخلیـه سـیال میـگردد. بـا اسـتفاده از یـک سنسـور از نـوع LVDT و بـا بکـار بـردن نـرم افـزار Labtech Notebook Pro دسـتگاه طوری-تنظیم میشود بنحویکه به محض رسـیدن پیستون

1 – Coating Processes



شکل ۱: کانال همگرا و ملزومات آن بطور شماتیک.



شکل ۲ : ویسکوزیته سیالات مورد آزمایش بصورت تابعی از نرخ برش.

به نقطه خاصی از کورس خود، تایمر برد جمع آوری اطلاعات (Data Acquisition Board) با فرکانس ۱۰۰ هرتز شروع به ثبت زمان کند و این کار را تا زمانی که پیستون به اندازه معینی در حدود چند میلیمتر سقوط کند ادامه دهد. با معلوم بودن مسافت طی شده توسط پیستون و زمان سقوط آن، سرعت پیستون محاسبه میگردد. پس از تعیین سرعت سقوط پیستون، دبی حجمی نیز براحتی با معلوم بودن قطر سیلندر قابل محاسبه خواهد بود.

تئوری

افت فشار مورد نیاز برای عبور یک سیال از میان یک کانال همگرا از سه بخش اصلی زیر تشکیل میگردد:

$$\Delta P = \Delta P_{inlet} + \Delta P_{cone} + \Delta P_{exit} \quad (1)$$

در عبارت فوق، ترم اول در اثر شتاب گرفتن سیال در هنگام ورود به کانال همگرا ایجاد میشود. ترم دوم در معادله فوق در حالت کلی هم بعلت تنش برشی در دیواره کانال و هم بعلت مقاومت کششی سیال (در مورد سیالات ویسکوالاستیک) بوجود می آید. ترم سوم در رابطه (۱) در هنگام خروج سیال از کانال و بعلت تغییر در پروفیل سرعت رخ میدهد (این ترم بسیار کوچکتر از ترمهای دیگر بوده و در اغلب موارد قابل صرف نظر کردن است).

برای سیالات غیرنیوتنی، دبی خروجی از یک کانال همگرای مخروطی – شکل، بصورت تابعی از فشار رانش، خواص سیال (ویسکوزیته و دانسیته) و مشخصات هندسی کانال (شکل کانال، زاویه راس، قطر کانال در مقطع خروجی) ظاهر میشود. برای چنین سیالاتی، با استفاده از آنالیز ابعادی، میتوان براحتی نشان داد که ضریب افت فشار Cp تنها تابعی از عدد رینولدز Re است بنحویکه برای کلیه سیالات نیوتنی منحنی Re- Cp منحنی منحصر بفردی است.آنالیز ابعادی همچنین نشان میدهد که منحنی ایکه به این ترتیب بدست می آید نه تنها برای سیالات نیوتنی صادق است بلکه برای تمامی سیالات غیر الاستیک (اصطلاحا سیالات نیوتنی تعمیم یافته[1]) نیز قابل استفاده است مشروط بر اینکه به جای عدد رینولدز معمولی از عدد رینولدز تعمیم یافته[2] (که با Re_n نشان داده میشود) استفاده شود [۴]:

$$Re = \frac{\rho V_0^{2-n} D_0^n}{m} \quad \frac{8}{[2(3+1/n)]^n} \quad (2)$$

در رابطه فوق، V_0 سرعت در مقطع خروجی کانال و D_0 قطر دهانه خروجی کانال می باشند. پارامترهای m و n نیز پارامترهای مربوط به یک سیال غیرنیوتنی از نوع نمایی[3] می باشند که براحتی با پردازش مقادیر اندازه گیری شده ویسکوزیته به معادله رئولوژیک زیر بدست می آیند [۲]:

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

حال اگر حاصلضرب دو عدد بدون بعد Cp و Re_n را با عدد بدون بعد P* نشان دهیم خواهیم داشت:

$$P^* = \frac{M}{mU} \frac{D_0^{3n}}{D_p^{2+2}} \frac{8}{[2+(3+1/n)]^n} \quad (4)$$

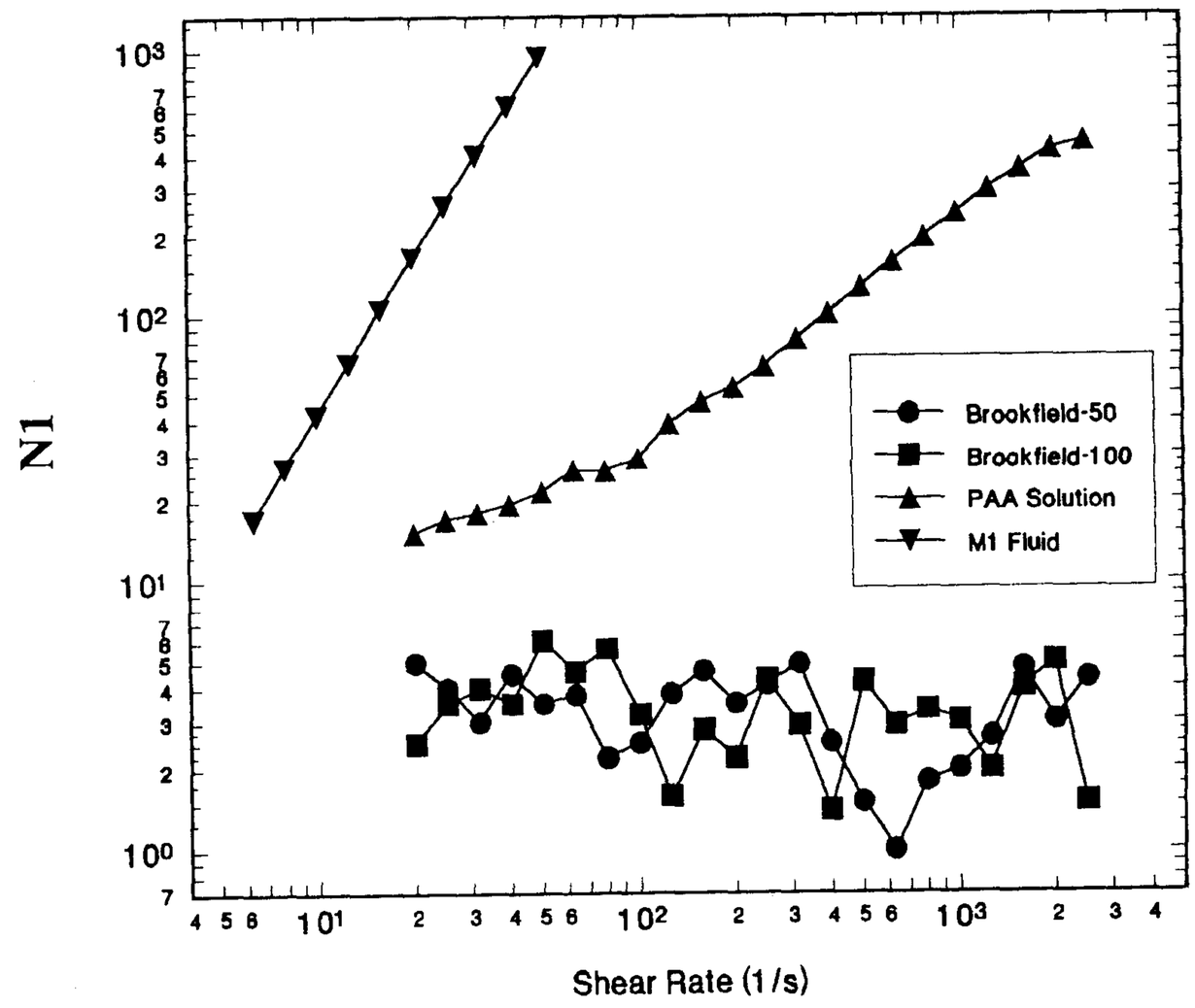
در رابطه فوق، M جرم پیستون و وزنه ها، D_p قطرپیستون و U سرعت پیستون است.

با توجه به اینکه برای یک سیال غیر الاستیک در اعداد رینولدز بسیار کوچک، Cp متناسب با عکس Re_n است در نتیجه برای این دسته از سیالات P* مقداری ثابت خواهد بود که با P^*_{in} نشان داده میشود. چنانکه سیالی دارای خواص الاستیک باشد، در اینصورت تحت شرایط یکسان از نظر دبی حجمی، افت فشار لازم برای به جریان در آوردن سیال نسبت به حالت غیر الاستیک بالاتر میگردد که این امر را میتوان به تنشهای کششی ایجاد شده در سیال ارتباط داد. بعبارت دیگر، برای سیالات الاستیک انتظار میرود که P* بزرگتر از P^*_{in} باشد.

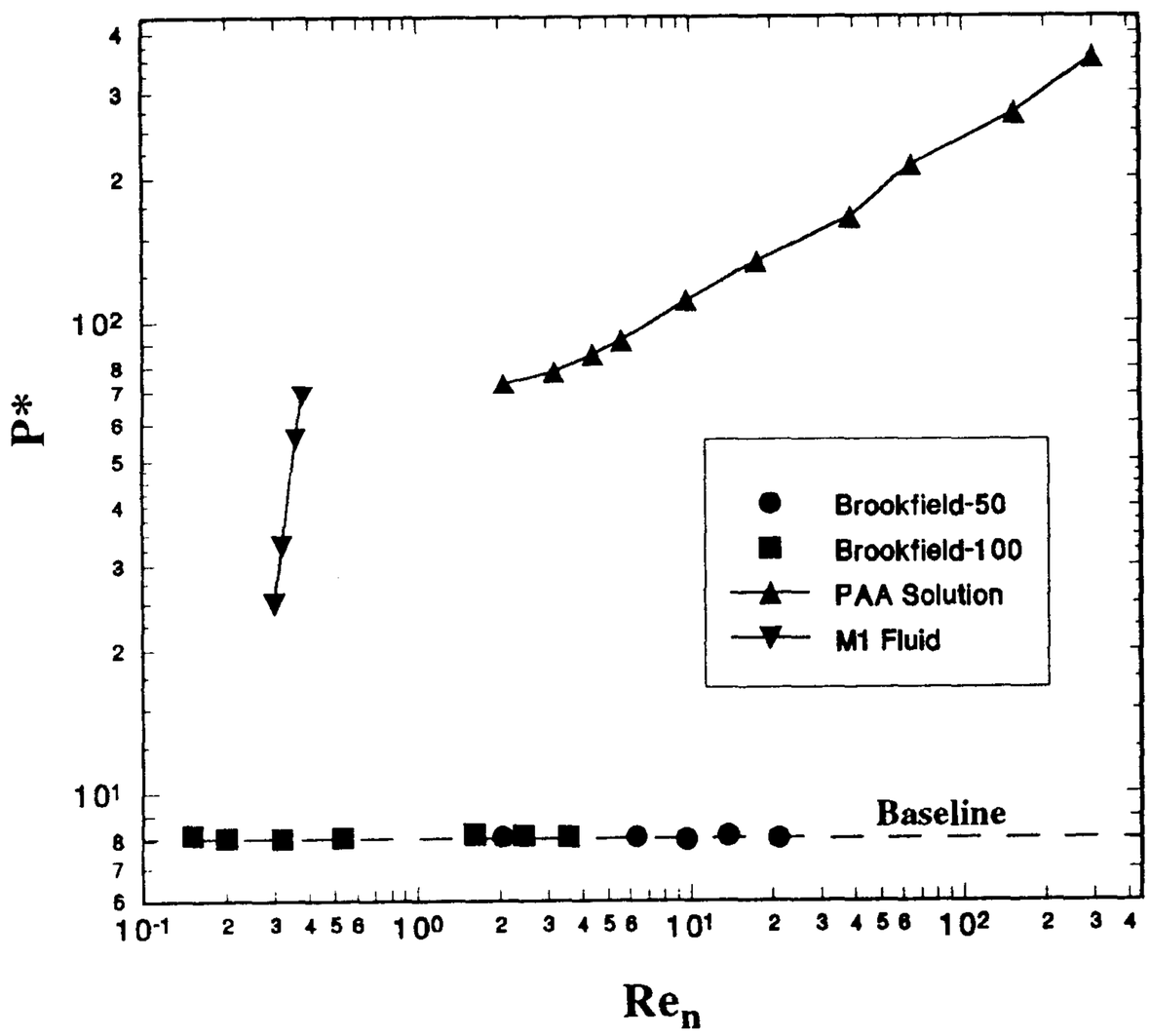
سیالات مورد آزمایش

در این کار تحقیقاتی از سه سیال نیوتنی استاندارد و دو سیال غیر نیوتنی شناخته شده استفاده بعمل آمده است. سیالهای نیوتنی با نامهای تجاری Brookfield - 50, Brookfield -100 و Brookfield -500

1 – Generalized Newtonian Fluids 2 – Generalized Reynolds Number 3 – Power – Low Fluids



شکل ۳: اختلاف تنش نرمال اصلی (N_1) بصورت تابعی از نرخ برش.



شکل ۴: پارامتر الاستیسیته (P^*) برای سیالات مورد آزمایش برحسب عدد رینولدز تعمیم یافته Re_n.

در بازار یافت میشوند و هر سه از نوع روغنهای سیلیکونی بشمار میروند. سیال غیر نیوتنی شماره یک با حل نمودن ۰/۲ درصد پودر پلیمر خطی و قابل انعطاف پلی آکری لامید (Polyacrylamide) در آب مقطر بدست می آید. اهمیت این پلیمر در این است که از آن بطور روز افزون بعنوان اصلاحگر خواص سیالات نیوتنی استفاده میشود. بعنوان سیال غیرنیوتنی شماره دو از سیال معروف M1 استفاده شد. این سیال با حل نمودن ۰/۲۴۴ در صد از پلیمر خطی و قابل انعطاف پلی ایزوبوتیلن (Polyisobutylene) در حلالی مرکب از ۹۳٪ پلی بوتین (Polybutyne) و ۷٪ نفت سفید (Kerosene) بدست می آید. این سیال، جزو معدود سیالاتی است که با وجود الاستیک بودن، همانند سیالات نیوتنی دارای ویسکوزیته برشی (نسبتا) ثابتی است (چنین سیالاتی اصطلاحا Boger Fluid نامیده میشوند).

قبل از انجام تست کشش در کانال همگرا، در ابتدا خواص ویسکوالاستیک سیالات فوق در جریان برشی با استفاده از دستگاه رئومتر مدل RFR از شرکت Rheometrics و در مود مخروط - صفحه بدست آمد. شکل (۲) پروفیل ویسکوزیته را برای سیالات فوق نشان میدهد. چنانکه در این شکل مشاهده میشود، ویسکوزیته سیالات استاندارد سری Brookfield حقیقتا ثابت است. از طرف دیگر، در مورد محلول پلی آکری لامید، کاهش قابل ملاحظه ای در ویسکوزیته مشاهده میشود که حاکی از رفتار غیر نیوتنی این سیال است. برای این سیال غیر نیوتنی، پارامترهای m و n به ترتیب برابر با $m = 0.616$ $Pa.s^n$ و $n = 0.396$ می باشند. شکل (۲) نشان میدهد که بر خلاف محلول پلی آکری لامید، ویسکوزیته سیال M1 تقریبا ثابت است. برای این سیال غیر نیوتنی، پارامترهای m و n به ترتیب برابر با $m = 2000$ $Pa.s^n$ و $n = 0.960$ میباشند.

شکل (۳) اختلاف تنش نرمال اصلی (N_1) را برای سیالات فوق نشان میدهد. برای سیالات استاندارد سری Brookfield مقدار N_1 را با توجه به اغتشاش در سیگنال خروجی از ترانسدیوسر میتوان معادل صفر در نظر گرفت. با توجه به این شکل، در مورد محلول پلی آکری لامید N_1 مثبت و از نظر مقدار هم مرتبه با تنش برشی است بنابراین میتوان نتیجه گرفت که این محلول در جریان برشی دارای رفتار الاستیک است. بطور مشابه، سیال M1 نیز الاستیک است ولی از آنجاییکه برای این محلول حتی در نرخهای برش کم نیز N_1 غیر صفر است از این رو میتوان آن را الاستیکتر از محلول پلی آکری لامید دانست.

نتایج و جمع بندی

شکل (۴) نتایج بدست آمده از کانال مخروطی را برای سیالات مورد نظر نشان میدهد. در این شکل، عدد بدون بعد P^* بر حسب Re_n ترسیم گردیده است. لازم بذکر است که کلیه نتایج گزارش شده در این شکل مربوط به حالتی است که در طی آن دهانه خروجی کانال به اندازه چند میلیمتر در داخل ظرف جمع آوری کننده (شکل ۱) فرو برده شده است. علت غوطه ور کردن دهانه خروجی کانال این است که در هنگام استفاده از وزنه های سبک برای رانش سیال مشاهده شد که خروج سیال از کانال بصورت جت نبوده بلکه بشکل قطره - قطره صورت می پذیرد در نتیجه برای از بین بردن اثرات کشش سطحی لازم است که دهانه خروجی غوطه ور باشد. با این تمهیدات، همانطوریکه در شکل (۴) مشاهده میشود، مقدار P^* برای این سه سیال نیوتنی تقریبا ثابت و روی خطی افقی (خط مبنا) قرار دارد. با توجه به پایین بودن عدد رینولدز در این آزمایشات، ثابت بودن P^* برای این گونه از سیالات با آنالیز ابعادی کاملا مطابقت دارد. در این کار تحقیقاتی از این مقدار ثابت تحت عنوان P^*_{in} یاد شده است و از آن بعنوان معیاری برای تشخیص غیر الاستیک بودن یک سیال استفاده بعمل آمده است. مقایسه مقدار P^* برای محلول پلی آکری لامید با مقدار آن از این خط مبنا بخوبی نشان میدهد که افزودن مقدار کمی از پلی آکری لامید به آب، مقاومت کششی آب را تا ۳۰ برابر افزایش داده است. در مورد سیال M1 رفتار مشابه ای مشاهده میشود با این تفاوت که افزایش P^* دارای شیب تندتری است و در رینولدزهای بسیار پایینتری صورت میگیرد. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که در جریان کششی نیز همچون جریان برشی سیال M1 از محلول پلی آکری لامید الاستیکتر است.

بطور کلی نتایج حاصله از آزمایشات فوق بخوبی ثابت میکند که با استفاده از کانالهای همگرا میتوان براحتی به الاستیسیته سیالات مختلف در جریان کششی

پی برد. بعبارت دیگر، میتوان با استفاده از این روش ساده، پلیمرهای مختلف را بر حسب میزان الاستیسیته ایکه در یک حلال نیوتنی القا میکنند طبقه بندی نمود و در هر مورد خاصی، مناسبترین ماده افزودنی پلیمری را انتخاب نمود.

تشکر و قدردانی

انجام این کار تحقیقاتی در قالب طرح تحقیقاتی مصوب شورای پژوهشی دانشگاه تهران صورت پذیرفته است که بدینوسیله صمیمانه از امکانات و بودجه ایکه در اختیار اینجانب قرار داده شده است تشکر می شود.

مراجع

1 – Schulz, P. R. and Glass, J. E. (1991). "Polymers as rheology modifiers", *ACS Symposium Series 462*, Washington DC.

2 - Bird, R. B., Armstrong, R. C. and Hassager, O. (1987). *Dynamics of polymeric liquids*.Vol. 1, 2nd Edition, John Wiley & Sons.

3 – Black, J. E. and Morton, M. M. (1976). "Converging flow of a viscoelastic liquid." *J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics,* Vol. 1, P. 83.

4 - Cogswell, F. N. (1972). "Converging flow of polymer melts in extrusion dies." *Polymer Engineering and Science,* Vol. 12, P.64.

5 - Enverage, A. E. (1974). "A mechanism for polymer melt or solution fracture." *J. of Applied Polymer Science,* Vol. 18, P. 9333.

6 - Forsyth, T. H. (1976). "Converging flow of polymers." *Polymer-Plastics Technology Engineering,* Vol. 6, No. 1, P. 101.

7 – James, D. F. and Saringer, J. H. (1980). "Extensional flow of dilute polymer solutions." *J. of Fluid Mechanics,* Vol. 97, Part 4, P. 655.

8 – James, D. F. and Saringer, J. H. (1982). "Flow of dilute polymer solutions through converging channels." *J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics,* Vol. 11, P. 317.

9 - Ryskin, G. (1987). "Calculation of the effect of polymer additive in a converging channel flow." *J. of Fluid Mechanics,* Vol. 178, P. 423.

10 - Suterby, J. L. (1965). "Laminar converging flow of dilute polymer solutions in conical sections." *Transactions of the Society of Rheology, 9:2,* P. 227.

واژه نامه :

1 – Drilling Muds	ساختار گل حفاری
2 – Pusher Fluids	سیال تزریقی به چاه
3 – Coating Processes	روشهای مختلف روکش دهی
4 – Generalized Newtonian Fluids	سیالات نیوتنی تعمیم یافته
5 – Generalized Reynolds Number	عدد رینولدز تعمیم یافته
6 – Power – Low Fluids	سیال غیرنیوتنی از نوع نمایی