

الحمد لله
الرحمن الرحيم



دانشکده : مهندسی مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

مطالعه آزمایشگاهی اثرات خواص الاستیک بر ناپایداری

انگشتی لزج

دانشجو : سعید واعظی

اساتید راهنما : دکتر محمود نوروزی

دکتر علی جباری مقدم

استاد مشاور: دکتر مجتبی قطعی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۴

دانشگاه شاهرود



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سعید واعظی به شماره دانشجویی ۹۱۰۷۸۰۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان مطالعه آزمایشگاهی اثرات خواص الاستیک بر ناپایداری انگشتی لزج که در تاریخ ۹۴/۶/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ مردود	☐ دفاع مجدد	☒ قبول (با درجه: <u>بسیار خوب</u> امتیاز: <u>۱۸/۵۹</u>)
--------------------------------	------------------------------------	--

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما:	دکتر نوروزی	استادیار	
	دکتر جباری مقدم	دانشیار	
۲- استاد مشاور:	دکتر قطعی	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی:	دکتر عباس نژاد	استادیار	
۴- استاد ممتحن:	دکتر اکبرزاده	استادیار	
۵- استاد ممتحن:	دکتر سررشته داری	استادیار	

رئیس دانشکده: امضاء



تقدیم به:

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر پدرم

سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را
سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم، نسیم گونه
غبار خستگیات را بزدايد.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تشکر و قدردانی:

حمد و سپاس خدائی را که در یگانگی خود بلند مرتبه و در تنهائی و فرد بودن خود نزدیک است. در قدرت و سلطه خود، با جلالت و در ارکان خود عظیم است. علم او به همه چیز احاطه دارد در حالی که در جای خود است و همه مخلوقات را با قدرت و برهان خود تحت سیطره دارد. همیشه مورد سپاس بوده و همچنان مورد ستایش خواهد بود. صاحب عظمتی که از بین رفتنی نیست. ابتدا کننده اوست و هر کاری به سوی او باز می‌گردد.

شایسته است از تمام معلمان و اساتید دلسوزی که خشت به خشت بنیان علمیم را بنا نهادند و با کرامتی چون خورشید، سرزمین دلم را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و سازنده، بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از اساتید محترم جناب آقایان دکتر نوروزی و دکتر جباری مقدم و دکتر قطعی که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم.

در نهایت درود و سپاسی بی‌کران نثار ارواح پاک و منزه تمام بزرگ‌مردانی که با حمیت و غیرت و در کمال خلوص، جان گران‌بهای خود را فدا نمودند تا کشوری سربلند و سرافراز داشته باشیم و در سایه امنیت، بتوانیم به پیشرفت و تعالی بیندیشیم.

یادشان گرامی

دانشجو تأیید می‌نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات خودش می‌باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد.

شهریور ۱۳۹۴

تعهد نامه

اینجانب سعید واعظی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه آزمایشگاهی اثرات خواص الاستیک بر ناپایداری انگشتی لزج تحت راهنمایی دکتر نوروزی و دکتر جباری مقدم متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

چکیده:

ناپایداری انگشتی لزج یکی از شناخته شده ترین ناپایداری های هیدرودینامیکی در محیط متخلخل می باشد. این ناپایداری زمانی اتفاق می افتد که سیالی با ویسکوزیته کمتر، درون محیط متخلخلی که از سیال با ویسکوزیته بیش تر پر شده است، تزریق می شود. رشد و شکل گیری این انگشتی ها نقشی بسیار مهم در فرآیند جابجایی سیالات، به خصوص انتقال نفت از مخازن دارد. مطالعه این ناپایداری از جهتی، به دو دسته جابجایی های مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی تقسیم بندی می شود. عمده تحقیقات انجام شده در جابجایی های مخلوط شدنی، مربوط به سیالات نیوتنی بوده است. مطالعات روی سیالات غیرنیوتنی بیش تر با رویکردی عددی و استفاده از مدل های ساده غیرنیوتنی بوده که توانایی مدل کردن محلول های پلیمری و سیالات ویسکوالاستیک را به طور کامل ندارند.

در این مطالعه با رویکردی تجربی، قصد داریم به بررسی اثرات خواص الاستیک بر این ناپایداری بپردازیم. با استفاده از دسته خاصی از محلول های پلیمری رقیق به نام سیالات با گر وابستگی لزجت و الاستیسیته را از بین برده و هر عامل را به طور مستقل کنترل می نماییم. با افزایش غلظت پلیمر، بر خواص الاستیک می افزاییم و نتایج آن بر پدیده را مورد بررسی قرار می دهیم. همچنین به منظور ایجاد یک محیط متخلخل شفاف از محیطی به نام سلول هل-شاو بهره می جوئیم. با تزریق سیالات مختلف با نسبت ویسکوزیته متفاوت، اثر عوامل مختلف از جمله اختلاف ویسکوزیته، میزان دبی، افزایش و کاهش الاستیسیته و اثر حضور سورفکتانت ها را بررسی می کنیم. پیرامون اثر هر عامل بر شکل انگشتی ها و همچنین تاثیر آن ها بر پارامترهای فیزیکی مهمی از جمله بازده جاروبی نکاتی بیان خواهیم کرد.

واژه های کلیدی: ناپایداری انگشتی لزج، محیط متخلخل، سلول هل-شاو، جابجایی های مخلوط شدنی، سیال با گر، الاستیسیته سیال

فهرست مطالب

۱ فصل اول:

۱-۱ مقدمه ۲

۲-۱ تزریق آب و گاز به مخازن ۳

۳-۱ سیال باگر ۷

۴-۱ سلول هل-شاو ۹

۵-۱ مکانیزم ناپایداری انگشتی لزج ۱۱

۶-۱ تاریخچه ۱۲

۶-۱-۱ شبیه‌سازی‌های عددی پیشین ۱۲

۶-۱-۲ مطالعات آزمایشگاهی ۱۶

۷-۱ معرفی مطالعه حاضر ۲۰

۲ فصل دوم: ۲۵

۲-۱ تجهیزات آزمایشگاه ۲۶

۲-۱-۱ پمپ پرستالتیک ۲۶

۲-۱-۲ ترازو با دقت بالا ۲۷

۲۸	۳-۱-۲ دوربین با کیفیت بالا
۳۰	۴-۱-۲ همزن هات پلیت
۳۱	۵-۱-۲ ویسکومتر
۳۲	۲-۲ اجزای ستاپ آزمایشگاهی
۳۲	۱-۲-۲ سلول هل-شاو
۳۵	۲-۲-۲ شیر ورودی
۳۷	۳-۲-۲ کلکتور ورودی
۳۹	۴-۲-۲ خروجی سلول
۳۹	۵-۲-۲ ستاپ آزمایشگاهی
۴۰	۳-۲ مراحل انجام آزمایش
۴۲	۴-۲ مواد مورد استفاده آزمایش
۴۲	۱-۴-۲ محلول پلیمری
۴۴	۵-۲ سیال‌های منتخب آزمایشات
۴۸	۱-۵-۲ خاصیت الاستیک نمونه‌ها
۵۱	فصل سوم:
۵۲	۳-۱ مروری بر شرایط حاکم بر مسئله
۵۲	۳-۱ پارامترهای ارزیابی نتایج
۵۲	۱-۳-۱ طول اختلاط
۵۶	۳-۱-۲ بازده جاروبی

۵۸	 ۳-۱-۳ نسبت رشد نويز به حالت پايه
۵۹	 ۳-۲ صحت سنجی ستاپ آزمایشگاهی
۶۰	 ۳-۳ تکرارپذیری آزمایش
۶۱	 ۳-۳-۱ بازه اطمینان
۶۲	 ۳-۴ صحت سنجی نتایج نیوتنی
۶۳	 ۳-۴-۱ اثر ثابت ماندن نسبت ویسکوزیته
۶۴	 ۳-۴-۲ اثر افزایش نسبت ویسکوزیته
۶۵	 ۳-۵ دسته بندی آزمایشات
۶۵	 ۳-۶ بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاشونده
۶۶	 ۳-۶-۱ اثر تغییرات دبی
۷۱	 ۳-۶-۲ اثر الاستیسیته
۷۶	 ۳-۶-۳ اثر افزایش الاستیسیته
۷۹	 ۳-۷ بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاکننده
۸۰	 ۳-۷-۱ اثر الاستیسیته
۸۲	 ۳-۷-۲ اثر افزودن سورفکتانت
۸۵	 ۳-۸ مطالعه نسبت رشد نويز به حالت پايه
۸۹	 فصل چهارم:
۹۰	 ۴-۱ نتایج
۹۱	 ۴-۲ پیشنهادات

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: ناپایداری انگشتی لزج ۲
- شکل ۲-۱: استخراج ثانویه و ثالثیه نفت از مخازن ۴
- شکل ۳-۱: تمایل برش به کشیدن و به خط کردن شبکه‌های پلیمری ۸
- شکل ۴-۱: نمایی شماتیک از سلول هل-شاو ۹
- شکل ۵-۱: بررسی شکل و نحوه شکل‌گیری انگشتی‌ها در سلول هل-شاو ۱۰
- شکل ۶-۱ - متخلخل بودن مخازن نفتی ۲۲
- شکل ۷-۱ - سلول هل-شاو مورد استفاده در مطالعه حاضر ۲۲
- شکل ۱-۲: پمپ پرستالتیک مدل BT100-1F کمپانی Longer ۲۷
- شکل ۲-۲: ترازوی مدل PS 510/C/1 شرکت RADWAG ۲۷
- شکل ۳-۲: مراحل مختلف پردازش تصویر: (۱) فریم جدا شده از فیلم (۲) جدا کردن ناحیه رخ دادن پدیده (۳) افزودن افکت‌های مورد نیاز جهت از بین بردن سایه‌ها و متمایز شدن دو سیال از هم (۴) تصویر باینری ایجاد شده توسط کد پردازش تصویر در Matlab ۲۹
- شکل ۴-۲: همزن هات پلیت IKA RCT ۳۰
- شکل ۵-۲: ویسکومتر مدل DVE-LV کمپانی Brookfield ۳۱
- شکل ۶-۲: ابعاد سلول هل-شاو (الف) نما از بالا و پهلو (ب) نما از بالا و روبه‌رو ۳۴
- شکل ۷-۲: نحوه کنار هم گذاشتن قطعات سلول هل-شاو ۳۴

- شکل ۸-۲: مکانیسم شیر توپی به صورت شماتیک ۳۵
- شکل ۹-۲: اجزای شیر ورودی مورد استفاده (الف) محفظه جهت قرارگیری توپی (ب) توپی استوانه‌ای
شیاردار (ج) دستگیره چرخاننده توپی ۳۶
- شکل ۱۰-۲: قرارگیری و چینش اجزای شیر ورودی ۳۷
- شکل ۱۱-۲: نمایی شماتیک از کلکتور ورودی ۳۸
- شکل ۱۲-۲: نمای شماتیک خروجی سلول ۳۹
- شکل ۱۳-۲: قرارگیری و چینش تمام اجزای سلول هل-شاو ۴۰
- شکل ۱۴-۲: نحوه قرارگیری سلول و دوربین نسبت به هم ۴۰
- شکل ۱۵-۲: راهنمای اجزای سلول ۴۱
- شکل ۱۶-۲: نمایی از پیوندهای مولکولی پلی‌آکریلامید ۴۲
- شکل ۱۷-۲: حالت پودری پلیمر پلی‌آکریلامید ۴۳
- شکل ۱۸-۲: ویسکوزیته بر حسب نرخ برش نمونه پلیمری اول ۴۵
- شکل ۱۹-۲: ویسکوزیته بر حسب نرخ برش نمونه پلیمری دوم ۴۶
- شکل ۲۰-۲: ویسکوزیته بر حسب نرخ برش نمونه پلیمری سوم ۴۷
- شکل ۲۱-۲ - پدیده بالاروندگی سیال ویسکوالاستیک ۴۹
- شکل ۲۲-۲ - پدیده بالاروندگی سیالات ویسکوالاستیک منتخب - (الف) پلیمر ۵۰ (ب) پلیمر ۱۰۰
(ج) پلیمر ۱۵۰ ۵۰
- شکل ۱-۳: شماتیک تعریف طول اختلاط ۵۵
- شکل ۲-۳: بازده جاروبی ماکزیمم و در عدم رخداد انگشتی لزج برای دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه .. ۵۷
- شکل ۳-۳: شماتیک تعریف حالت پایه ۵۸
- شکل ۴-۳: صحت سنجی موازی بودن سلول در تمام نقاط - ثبت تصاویر در لحظات ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰
ثانیه ۵۹

شکل ۳-۵: تست تکرارپذیری - (a) تزریق آب در گلیسرین ۸۳,۵٪ با دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه (b)

تکرار آزمایش (الف) لحظه $t=13s$ (ب) $t=33s$ (ج) $t=47s$ ۶۰

شکل ۳-۶ - بازه اطمینان طول اختلاط برای ۵ نمونه مختلف ۶۱

شکل ۳-۷ - بازه اطمینان بازده جاروبی برای ۵ نمونه مختلف ۶۲

شکل ۳-۸ : طول اختلاط بر حسب زمان در $Pe = 8000$ و بر حسب نسبت ویسکوزیته‌های مختلف

..... ۶۲

شکل ۳-۹: بازده جاروبی بر حسب زمان در $R=3.32$ و دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه ۶۳

شکل ۳-۱۰: طول اختلاط بر حسب زمان در $R=3.32$ و دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه ۶۳

شکل ۳-۱۱: تغییرات طول اختلاط با افزایش نسبت ویسکوزیته و ثابت نگه داشتن بقیه شرایط ۶۴

شکل ۳-۱۲: تغییرات بازده جاروبی در اثر افزایش نسبت ویسکوزیته و ثابت نگه داشتن بقیه شرایط ۶۴

شکل ۳-۱۳: تاثیر افزایش دبی بر بازده جاروبی، جابجایی نیوتنی، $R=3.32$ ۶۷

شکل ۳-۱۴: تاثیر افزایش دبی بر طول اختلاط، جابجایی نیوتنی، $R=3.32$ ۶۷

شکل ۳-۱۵: تاثیر افزایش دبی بر بازده جاروبی، جابجایی پلیمری با الاستیسیته کمتر، $R=3.32$ ۶۸

شکل ۳-۱۶: تاثیر افزایش دبی بر طول اختلاط، جابجایی پلیمری با الاستیسیته کمتر، $R=3.32$ ۶۸

شکل ۳-۱۷: تاثیر افزایش دبی بر طول اختلاط، جابجایی پلیمری با الاستیسیته بیشتر، $R=3.32$ ۶۹

شکل ۳-۱۸: تاثیر افزایش دبی بر بازده جاروبی، جابجایی پلیمری با الاستیسیته بیشتر، $R=3.32$ ۶۹

شکل ۳-۱۹: تزریق گلیسرین ۳۰٪ در گلیسرین ۸۳,۵٪ با دبی (a) ۵ میلی لیتر بر دقیقه (b) ۱۲

میلی لیتر بر دقیقه (c) ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه - در لحظات (الف) ۱۴ ثانیه (ب) ۲۸ ثانیه (ج) ۴۰ ثانیه

..... ۷۰

شکل ۳-۲۰: اثر خواص الاستیک بر بازده جاروبی، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیته کمتر،

$R=3.32$ ۷۲

شکل ۳-۲۱: اثر خواص الاستیک بر طول اختلاط، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیته کمتر،

- ۷۲ R=3.32
- شکل ۳-۲۲: اثر خواص الاستیک بر طول اختلاط، دبی ۵ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیت به بیشتر،
- ۷۳ R=3.32
- شکل ۳-۲۳: اثر خواص الاستیک بر بازده جاروبی، دبی ۵ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیت به بیشتر،
- ۷۳ R=3.32
- شکل ۳-۲۴: اثر خواص الاستیک بر طول اختلاط، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیت به بیشتر،
- ۷۴ R=3.32
- شکل ۳-۲۵: اثر خواص الاستیک بر بازده جاروبی، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیت به بیشتر،
- ۷۴ R=3.32
- شکل ۳-۲۶: تزریق (a) گلیسرین ۳۰٪ در گلیسرین ۸۳٫۵٪ و (b) گلیسرین ۳۰٪ در پلیمر ۱۵۰- با دبی یکسان ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه- لحظات (الف) ۱۰ ثانیه (ب) ۲۵ ثانیه (ج) ۴۰ ثانیه ۷۵
- شکل ۳-۲۷: اثر افزایش الاستیسیت بر طول اختلاط، دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه، R=3.32 ۷۶
- شکل ۳-۲۸: اثر افزایش الاستیسیت بر بازده جاروبی، دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه، R=3.32 ۷۶
- شکل ۳-۲۹: اثر افزایش الاستیسیت بر طول اختلاط، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، R=3.32 ۷۷
- شکل ۳-۳۰: اثر افزایش الاستیسیت بر طول اختلاط، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، R=3.32 ۷۷
- شکل ۳-۳۱: تزریق (a) گلیسرین ۲۰٪ در پلیمر ۱۰۰ (b) گلیسرین ۳۰٪ در پلیمر ۱۵۰ - با دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه - در لحظات (الف) ۱۶ ثانیه (ب) ۳۲ ثانیه (ج) ۴۸ ثانیه ۷۸
- شکل ۳-۳۲: اثر الاستیسیت بر طول اختلاط، دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه، R=1.09 ۸۰
- شکل ۳-۳۳: اثر الاستیسیت بر بازده جاروبی، دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه، R=1.09 ۸۰
- شکل ۳-۳۴: تاثیر افزایش دبی- تزریق پلیمر ۱۰۰ در گلیسرین ۹۰٪- دبی (a) ۵ میلی لیتر بر دقیقه (b) ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه (c) ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه - لحظات (الف) ۲ ثانیه (ب) ۱۸ ثانیه (ج) ۳۹ ثانیه (د) ۵۰ ثانیه ۸۱

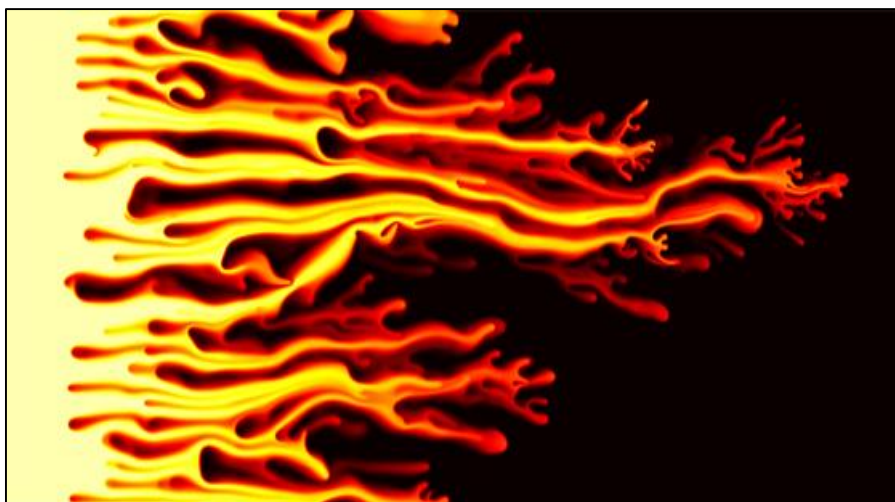
- شکل ۳-۳۵: تاثیر افزایش الاستیسیته - تزریق (a) پلیمر ۱۰۰ در گلیسیرین ۹۰٪ (b) پلیمر ۱۵۰ در گلیسیرین ۹۱٪ - دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه - لحظات (الف) ۸ ثانیه (ب) ۳۷ ثانیه (ج) ۶۳ ثانیه (د) ۸۲ ثانیه ۸۱
- شکل ۳-۳۶: ساختار دم و دنباله مانند سورفکتانت ۸۲
- شکل ۳-۳۷: تاثیر کشش سطحی - تزریق پلیمر ۱۰۰ در گلیسیرین ۹۰٪ (a) بدون سورفکتانت (b) با سورفکتانت - دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه - لحظات (الف) ۴ ثانیه (ب) ۲۹ ثانیه (ج) ۵۴ ثانیه (د) ۷۴ ثانیه ۸۳
- شکل ۳-۳۸: بررسی اثر کشش سطحی بر طول اختلاط - تزریق پلیمر ۱۰۰ در گلیسیرین ۹۰٪ - دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه - $R=1.09$ ۸۴
- شکل ۳-۳۹: بررسی اثر کشش سطحی بر بازده جاروبی - تزریق پلیمر ۱۰۰ در گلیسیرین ۹۰٪ - دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه - $R=1.09$ ۸۴
- شکل ۳-۴۰ - رشد نويز به حالت پایه در جابجایی‌های نیوتنی-نیوتنی ۸۶
- شکل ۳-۴۲ - نسبت نويز به حالت پایه در جابجایی‌های پلیمری-نیوتنی ۸۷
- شکل ۳-۴۱ - نسبت نويز به حالت پایه در جابجایی‌های نیوتنی-پلیمری ۸۷

۱ فصل اول:

مقدمه

۱-۱ مقدمه

جابجایی سیالی با ویسکوزیته بیشتر توسط سیالی با ویسکوزیته کمتر، منجر به ناپایداری ای می شود که نتیجه آن ایجاد ساختاری شبیه به انگشتها در سیال با ویسکوزیته کمتر می شود؛ یعنی مرز مشترک بین دو سیال به علت اختلاف ویسکوزیته، ثابت نبوده و ساختاری انگشت مانند به خود می گیرد. آغاز و تکامل بررسی ناپایداری ها، به مطالعه ناپایداری "انگشتی لزج"^۱ باز می گردد.



شکل ۱-۱ - ناپایداری انگشتی لزج

این ناپایداری به دلیل کاربردش در بسیاری از فرآیندها، عنوان تحقیقات فراوانی را در سال های اخیر به خود اختصاص داده است. بیشترین کاربرد این ناپایداری در استخراج ثانویه و ثالثیه^۲ مخازن نفتی اتفاق می افتد.

پس از عملیات حفر چاه و رسیدن به مخزن نفت، به دلیل فشار زیاد موجود در مخزن، جریان نفت به سوی دهانه خروجی چاه سرازیر می شود. این مرحله از استخراج که عامل آن فشار داخل خود مخزن است، به بازیافت اولیه نفت موسوم است. در برداشت اولیه نفت، از انرژی خود مخزن برای تولید نفت استفاده می شود. البته این بدان معنا نیست که اگر نفت خود به خود به سطح زمین نیاید،

^۱ Viscous fingering

^۲ Secondary and tertiary oil recovery

برداشت اولیه وجود نخواهد داشت بلکه وقتی از پمپ برای بالا آوردن نفت استفاده می‌کنیم، در واقع هنوز در مرحله اول برداشت نفت قرار داریم. در این مرحله انرژی خاصی وارد مخزن نمی‌شود. با افزایش تولید و کاهش فشار، سرعت تولید نیز کاهش می‌یابد تا اینکه فشار به حدی می‌رسد که دیگر نفت خارج نمی‌شود. در این مرحله ممکن است از ۳۰ تا ۵۰ درصد کل نفت مخزن استخراج شود. علاوه بر فشار مخزن عوامل دیگری مانند خواص سنگ مخزن و میزان تخلخل آنها و همچنین دمای مخازن نیز در میزان تولید مؤثرند.

به عنوان مثال، کل نفت مخازن آمریکا حدود ۴۰۰ هزار میلیون بشکه بوده است که تا سال ۱۹۷۰ حدود ۱۰۰ هزار میلیون بشکه آن توسط روشهای اولیه استخراج شده‌اند. البته هر چه میزان گاز آزاد در مخزن بیشتر باشد، مقدار تولید نفت توسط این روش بیشتر است، زیرا تغییرات حجم گاز در مقابل تغییر فشار بسیار زیاد است. به عنوان مثال در ایالت پنسیلوانیای آمریکا به دلیل پایین بودن نفوذپذیری (کمتر از ۵۰ میلی داریسی) و انرژی کم مخزن که ناشی از پایین بودن مقدار گاز طبیعی آزاد است، میزان نفت استخراج شده با روشهای اولیه بین ۵ تا ۲۵ درصد کل نفت بوده است و به همین دلیل در این ایالت روشهای مرحله دوم از سال ۱۹۰۰ شروع شده است.

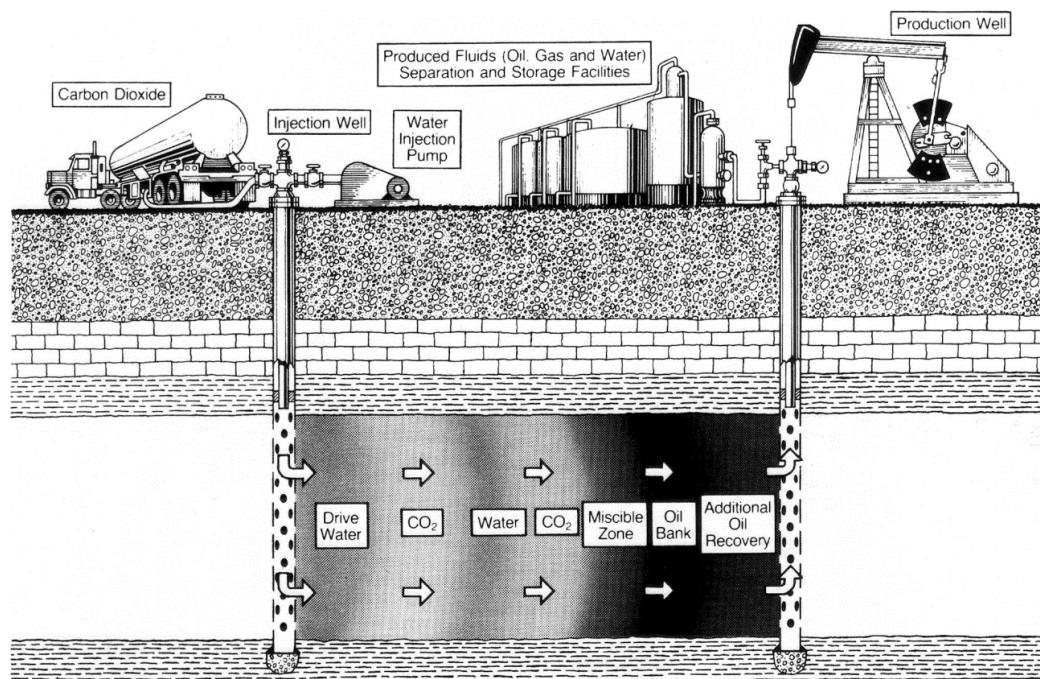
۲-۱ تزریق آب و گاز به مخازن

وقتی مخزن تخلیه شد و ما نتوانستیم نفت را حتی با پمپاژ از مخزن به چاه و از چاه به سطح زمین انتقال دهیم، در این صورت استفاده از روش ^۱EOR از نوع بازیافت ثانویه شروع می‌شود. در این روش از چاه تزریقی، آب به مخزن تزریق می‌شود و از چاه بهره‌برداری، نفت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در این روش، ما با تزریق سیال در سیستم مداخله می‌کنیم و سیال تزریقی، نفت را به طرف چاه تولیدی هدایت می‌کند. البته به جای آب، می‌توان گاز نیز تزریق کرد که به آن فرآیند تزریق گاز می‌گویند. باید توجه داشت که استفاده از این دو روش تزریقی با تزریق آب یا گازی که به منظور حفظ

^۱ Enhanced Oil Recovery

و نگهداری فشار مخزن انجام می‌گیرد، متفاوت است. چرا که در تزریق آب و گاز برای حفظ فشار مخزن، سیال تزریقی باعث حرکت نفت نمی‌شود، بلکه از افت سریع فشار مخزن در اثر بهره‌برداری جلوگیری می‌کند.

در حالت ثانویه برداشت زمانی فرا می‌رسد که ضمن تزریق آب به مخزن، در چاه تولیدی با تولید آب مواجه می‌شویم. در این حالت، چون نسبت آب به نفت زیاد می‌شود و تولید در این صورت بازده اقتصادی ندارد، باید از روش دیگر برای افزایش برداشت بهره بگیریم. اگر تزریق آب را متوقف کنیم و از فرایندهای دیگری نظیر تزریق گاز CO_2 استفاده کنیم. از روش‌های مؤثر در مرحله دوم یکی سیلاب‌زنی آبی و دیگری سیلاب‌زنی گازی یا تزریق گاز است.



شکل ۲-۱ - استخراج ثانویه و ثالثیه نفت از مخازن

ویسکوزیته آب به مراتب از ویسکوزیته نفت خام کمتر است. به همین علت در استخراج ثانویه و ثالثیه نفت خام، ناپایداری انگشتی لزج در مرز مشترک آب و نفت مشاهده می‌شود. بررسی عوامل مؤثر بر این ناپایداری و استخراج نفت خام خالص از موارد مهم می‌باشد. از کاربردهای دیگر مطالعه و

بررسی این ناپایداری، می‌توان به مطالعه فیلتراسیون^۱، هیدرولوژی^۲ و احیای بسترهای ثابت^۳ اشاره کرد. مطالعه این پدیده از دو جنبه صورت می‌گیرد:

(۱) مخلوط‌شدنی^۴ یا مخلوط‌نشدنی^۵ بودن دو سیال (در نظر گرفتن نیروهای مویینگی)

(۲) نیوتنی یا غیرنیوتنی بودن سیالات

مطالعات مربوط به ناپایداری انگشتی لزج در جابجایی سیالات نیوتنی و در محیط‌های متخلخل^۶، هم به صورت عددی و هم آزمایشگاهی به طور گسترده از دهه ۶۰ شروع شد. در این دهه برداشت اولیه از مخازن نفت کشف شده در ایالات متحده آمریکا رو به پایان بود و با شروع برداشت ثانویه از آنها و مشاهده پدیده انگشتی در مراحل استخراج، بررسی این ناپایداری اهمیت مضاعفی پیدا کرد.

پس از آن به دلیل استفاده مهندسين و محققين فعال در زمینه انتقال نفت از پلیمرهای خاص تزریق‌شده در آب که بازده استخراج نفت را افزایش می‌دادند، بررسی این ناپایداری در سیالات غیرنیوتنی نیز اهمیت ویژه‌ای پیدا کرد.

در ادامه فصل به بیان مفاهیم و اصطلاحات اولیه به کار رفته در ناپایداری انگشتی لزج پرداخته، تاریخچه‌ای از مطالعات انجام شده در این زمینه را ارائه و اهداف موردنظر از انجام این مطالعه را مشخص خواهیم کرد.

مفاهیم بعضی از اصطلاحات به کاررفته جریان سیالات در محیط متخلخل به شرح زیر می‌باشد:

^۱ filtration

^۲ Hydrology

^۳ Fixed bed regeneration

^۴ Miscible

^۵ Immiscible

^۶ Porous media

تخلخل^۱: این پارامتر معیاری برای تشخیص اندازه خلل و فرج موجود در محیط متخلخل می‌باشد و به صورت نسبت حجم منافذ و سوراخ‌های موجود در ماده به حجم کل می‌باشد. این پارامتر با عنوان تخلخل کامل نیز شناخته می‌شود. عبارت دیگری در همین زمینه به نام تخلخل موثر نیز ارائه شده است که فقط محدود به فضایی از محیط متخلخل می‌شود که در آن جریان وجود دارد.

نفوذپذیری^۲: این پارامتر خاصیتی از محیط متخلخل می‌باشد که به سیال اجازه می‌دهد، بدون اینکه تاثیر شیمیایی و یا فیزیکی از محیط بپذیرد، از محیط متخلخل عبور کند. هر چه مقدار این پارامتر برای یک محیط بیشتر باشد، عبور سیال نیز از آن آسان‌تر است. این پارامتر یک خاصیت محیط متخلخل است و از ویسکوزیته یا چگالی سیال مستقل می‌باشد. در بررسی جریان در محیط متخلخل، معمولاً این پارامتر همگن و همسانگرد در نظر گرفته می‌شود.

قابلیت تحرک^۳: قابلیت تحرک یک سیال در محیط متخلخل، به صورت نسبت نفوذپذیری محیط به ویسکوزیته سیال تعریف می‌شود.

$$M = \frac{k}{\mu} \quad (1-1)$$

نسبت تحرک نیز برای دو سیال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MR = \frac{M_1}{M_2} = \frac{(k/\mu)_1}{(k/\mu)_2} \quad (2-1)$$

در این رابطه زیرنویس ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به سیال جابجاکننده و سیال جابجاشونده می‌باشند. اگر این نسبت کوچک‌تر یا مساوی یک باشد، جابجایی پایدار و راندمان جاروبی ماکزیمم است ولی اگر این پارامتر مقادیری بزرگتر از یک داشته باشد، سیال با قابلیت تحرک بیشتر به صورت انگشتی درون

^۱ Porosity

^۲ Permeability

^۳ Mobility

سیال با قابلیت تحرک کمتر، نفوذ می‌کند. به همین علت است که بجای تزریق آب در مخازن نفت برای استخراج آن، از محلول‌های پلیمری استفاده می‌شود. این پلیمرها ویسکوزیته بالا یا به عبارتی قابلیت تحرک کمتری نسبت به آب دارند، بنابراین نسبت تحرک آن‌ها با نفت به عدد یک یا حتی پایین‌تر از آن می‌رسد و جریانی پایدار خواهیم داشت. برای محیط متخلخلی که نفوذپذیری آن ثابت باشد، نسبت تحرک به صورت ساده‌تر، نسبت ویسکوزیته‌ی سیال جابجاشونده به جابجاکننده می‌باشد. در بررسی ناپایداری انگشتی با استفاده از نسبت تحرک، پارامتری به صورت زیر تعریف می‌شود که برای گزارش نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها از آن استفاده می‌شود.

$$R = \ln \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (3-1)$$

در فصل سوم، از این پارامتر استفاده خواهیم کرد.

۳-۱ سیال باگر^۱

مایعی ویسکوالاستیک است که ویسکوزیته ثابتی دارد. اغلب مایعات ویسکوالاستیک، مخلوط‌ها یا محلول‌های پلیمری هستند که ذرات باریک شونده^۲ (یعنی ویسکوزیته با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد و این کاهش مقدار قابل توجهی نیز می‌باشد) هستند. با این وجود، باگرها محلول‌های پلیمری رقیقی هستند و رقت آن‌ها تا حدی است که تغییرات ویسکوزیته نسبت به نرخ برش قابل صرف‌نظر کردن است.

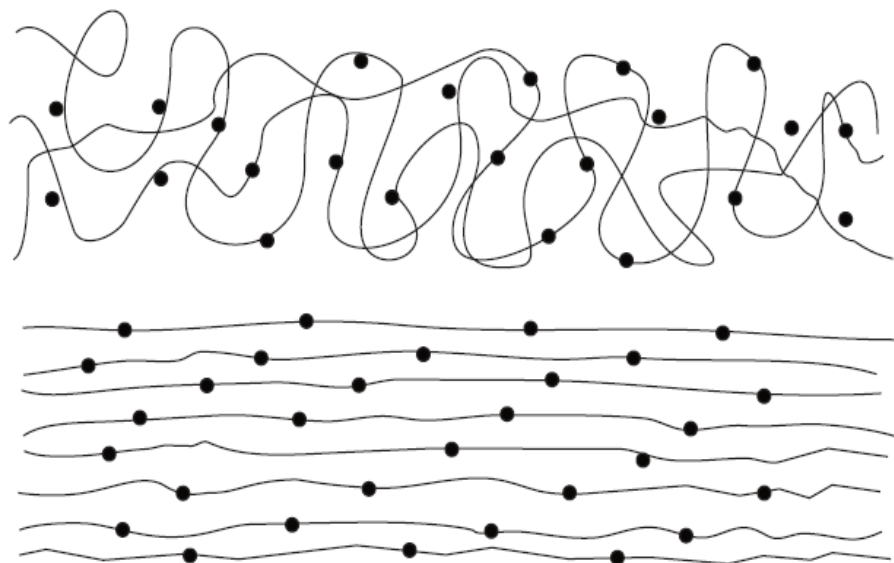
باگرها به این دلیل مهم هستند که قادرند در آزمایش با سیالات ویسکوالاستیک، اثرات الاستیک را کاملاً جدا از اثرات لزج نشان دهند. جدایی این دو خصلت امکان‌پذیر است زیرا در اصل، آزمایش حداقل با دو سیال انجام می‌شود: یک سیال باگر و یک سیال نیوتنی با ویسکوزیته یکسان.

^۱ Boger fluid

^۲ Shear thinning

تفاوت حاصل، در دبی^۱ یکسان رخ داده است؛ بنابراین نتایج، فقط و فقط اثر الاستیسیته است. در عمل، لازم نیست ویسکوزیته‌ها یکسان باشند و دبی‌ها نیز می‌توانند متفاوت باشند چون گروه اعداد بی‌بعد مناسب برای مقایسه نتایج استفاده خواهند شد. قابلیت جداسازی اثرات الاستیک، یکی از شاخه‌های بسیار پیچیده علم رئولوژی است. پیش از سیال باگر، تعیین این موضوع که یک اثر غیرنیوتنی مشاهده شده، به دلیل باریک شوندگی، اثر الاستیسیته یا هر دوی آن‌ها بوده، بسیار دشوار بود. خاصیت کلیدی باگرها، ثابت بودن (تقریبی) ویسکوزیته است.

در یک محلول پلیمری شبکه‌های پلیمری به صورت شل و ول پیچیده شده‌اند و معمولاً نامنظم، جهت‌دار هستند. برش، تمایل دارد شبکه‌های پلیمری را بکشد^۲ و آن‌ها را در راستای برش به خط کند^۳.



شکل ۱-۳ - تمایل برش به کشیدن و به خط کردن شبکه‌های پلیمری

این کار باعث به حداقل رسیدن مقاومت در برابر برش می‌شود. هر چند، اگر محلول به اندازه کافی رقیق باشد، ویسکوزیته پلیمر کسری از ویسکوزیته کل می‌باشد. بنابراین کاهش ویسکوزیته با افزایش

^۱ Flow rate

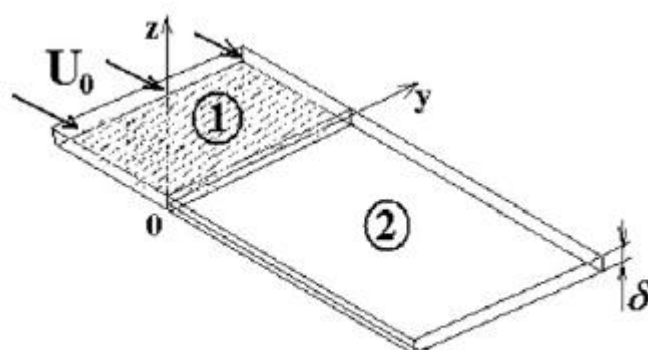
^۲ Stretch out

^۳ Align

نرخ برش به طور قابل قبولی کوچک است و سیال تقریباً ویسکوزیته ثابتی دارد. الاستیسیته سیال با کشش^۱ شبکه‌ها و حرکت براونی^۲ حلال مرتبط است. حرکت براونی با کشیده شدن و به خط شدن شبکه‌ها مخالفت می‌کند چون این حرکت تلاش می‌کند، شبکه‌ها را در ساختاری نامنظم نگه دارد. در یک جریان، درجه کشش بستگی به این دارد که نیروهای لزج چه مقدار به حرکت براونی برتری دارند. در جریان هنگامی که تنش برداشته شود (به عنوان مثال جریان بایستند)، شبکه‌ها به حالت تعادل خود می‌رسند (مانند پدیده عقب نشینی الاستیک). نرخ رهایی از تنش با عنوان "زمان رهایی" شناخته می‌شود. زمانی که برای سیال نیوتنی صفر است و معیاری برای سنجش الاستیسیته سیال در سیالات ویسکوالاستیک است. در فصل آینده به نحوه انتخاب و ساخت سیال با گر مورد استفاده در مطالعه حاضر خواهیم پرداخت.

۴-۱ سلول هل-شاو^۳

به علت پیچیدگی بررسی جریان سیالات در محیط متخلخل، محققین ناپایداری انگشتی لزج را در یک محیط ساده‌تر به نام سلول هل-شاو بررسی می‌کنند. از سلول هل-شاو به عنوان مثالی از میدان جریانی که در آن نیروهای اینرسی قابل صرف نظر است، یاد می‌شود. این محیط از کنار هم قرار گرفتن دو صفحه موازی با فاصله بسیار کم به وجود می‌آید و فضای بین دو صفحه معمولاً با سیال و با قرار



شکل ۴-۱ - نمایی شماتیک از سلول هل-شاو

^۱ extension

^۲ Brownian motion

^۳ Hele-Shaw cell

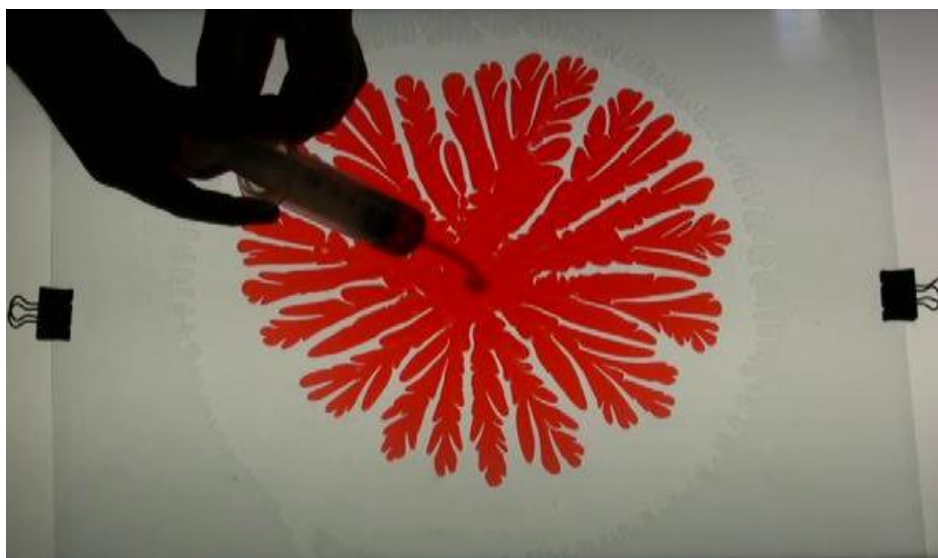
دادن اختلاف فشار پایا بین دو سر سلول پر می‌شود.

فاصله فضای خالی بین دو صفحه δ باید به اندازه‌ای کوچک باشد که مطمئن شویم نیروهای لزج غالب هستند (نیروهای لزج >> نیروهای اینرسی). معادلات دوبعدی حاکم بر این جریان معادله پیوستگی و دارسی، به صورت زیر می‌باشند:

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (۴-۱)$$

$$\nabla \cdot \bar{p} = -\frac{\mu}{\delta^2/12} \bar{u} + \rho g \quad (۵-۱)$$

در این معادلات، $\bar{u}$ بردار سرعت ماکرو سکوپیک و $\bar{p}$ فشار ماکرو سکوپیک می‌باشند. استفاده از این سلول همانند جریان در محیط متخلخل برای جریان‌هایی با رینولدز پایین امکان‌پذیر است. همچنین از سلول هل-شاو برای بررسی اثر عوامل مختلف بر شکل انگشتی‌ها در ناپایداری انگشتی لزج نیز استفاده می‌شود.



شکل ۵-۱ - بررسی شکل و نحوه شکل‌گیری انگشتی‌ها در سلول هل-شاو

در این روش سیال با ویسکوزیته بیشتر داخل سلول می‌باشد و سپس سیال با ویسکوزیته کمتر از یک نقطه به داخل محیط تزریق می‌شود. از این روش نمی‌توان برای بررسی کامل همه موارد از جمله

سرعت رشد انگشتی‌ها، سرعت پیشرفت جبهه پدیده و... استفاده کرد و بیش‌تر جهت بررسی شکل انگشتی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. جزئیات ساخت و نوع سلول انتخابی مورد استفاده در تحقیق حاضر در فصل آینده بحث خواهد شد.

۵-۱ مکانیزم ناپایداری انگشتی لزج

یک جابجایی مخلوط شدنی را در یک محیط متخلخل همگن که دارای نفوذ پذیری ثابت k می باشد، در نظر بگیرید. در این جریان، سیالی با خواص ρ_2 و μ_2 توسط سیال دیگری با خواص ρ_1 و μ_1 جابجا می‌شود. نیروی فشار $(p_1 - p_2)$ وارد شده بر سیال جابجاکننده که ناشی از جابجایی سطح مشترک به اندازه δx می‌باشد به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$(p_1 - p_2) = \left[\frac{(\mu_2 - \mu_1)U}{k} + (\rho_1 - \rho_2)g \right] \delta x \quad (۶-۱)$$

اگر نیروی خالص فشاری مثبت باشد، هر جابجایی کوچکی موجب تقویت ناپایداری می‌شود. بنابراین ترکیبی از اختلاف ویسکوزیته یا چگالی‌ها جریان را ناپایدار می‌کنند. با توجه به مثبت یا منفی بودن اختلاف ویسکوزیته و اختلاف چگالی، هر کدام می‌توانند عامل پایدارکننده یا ناپایدارکننده‌ی جریان باشند. به عنوان مثال جابجایی عمودی و رو به پائینی را در نظر بگیرید که در آن سیالی با ویسکوزیته و چگالی بیشتر توسط سیال دیگری با چگالی و ویسکوزیته کمتر جابجا می‌شود، یعنی داشته باشیم:

$$(p_1 - p_2) < 0 \quad ; \quad (\mu_2 - \mu_1) > 0 \quad (۷-۱)$$

در این حالت ویسکوزیته عامل ناپایداری است در حالی که نیروی گرانش موجب پایداری می‌شود. در نتیجه‌ی این شرایط سرعت بحرانی که در آن جریان ناپایدار می‌شود به صورت زیر بدست می‌آید:

$$u_c = \frac{(\rho_2 - \rho_1)gk}{(\mu_2 - \mu_1)} \quad (۸-۱)$$

۱-۶ تاریخچه

در این بخش به بررسی مطالعات و تحقیقاتی که در زمینه ناپایداری انگشتی لزج در محیط‌های متخلخل انجام شده است، می‌پردازیم. مطالعات صورت گرفته در این زمینه به چند بخش کلی تقسیم‌بندی می‌شوند که از جمله آن می‌توان به تحلیل عددی شامل تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های خطی و غیرخطی و مطالعات آزمایشگاهی اشاره کرد. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، بررسی این ناپایداری به دو بخش مربوط به جریان‌های مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشدنی و سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی تقسیم‌بندی می‌شوند که هر کدام روابط و اصول کاملاً مجزایی در روند شبیه‌سازی و آزمایش دارند. هومسی^۱ [۱] مروری بر اطلاعات موجود در زمینه این ناپایداری، هم در جریان‌های مخلوط‌شدنی و هم مخلوط‌نشدنی ارائه کرد که اطلاعات بسیار جامع و کاملی از این ناپایداری در محیط‌های متخلخل در اختیار علاقه‌مندان قرار می‌دهد. در این قسمت، ابتدا به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی‌های عددی می‌پردازیم سپس مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته را مورد بررسی و مقایسه قرار می‌دهیم.

۱-۶-۱ شبیه‌سازی‌های عددی پیشین

تحلیل پایداری خطی برای ناپایداری انگشتی لزج اولین بار توسط چووک و همکاران^۲ [۲] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی به بررسی این ناپایداری در جریان‌های مخلوط‌نشدنی پرداختند و عدد موج‌هایی را که در آن جریان، ناپایداری شدیدتری داشت، ارائه کردند. این نویسندگان همچنین نتایج تئوری بدست آورده را با نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در سلول‌های هل-شاو مورد مقایسه قرار دادند و به بررسی صحت نتایج بدست آمده، پرداختند. در ادامه پرین^۳ [۳] با استفاده از روش پرتوربیشن به بررسی پایداری خطی جابجایی مخلوط‌شدنی نفت و یک محلول با ویسکوزیته

^۱ Homsy

^۲ Chouke

^۳ Perrine

کمتر از نفت پرداخت و روش‌ها و مکانیزم‌های پخش یک سیال در سیال دیگر را مورد بررسی قرار داد. وودینگ^۱ [۴] با در نظر گرفتن یک مساله مقدار اولیه و بیان نرخ رشد آشفستگی‌ها به صورت چندجمله‌ای هرمیت، به بررسی پایداری این پدیده پرداخت.

راگر سون و میبورگ^۲ [۵، ۶] تاثیرات برش مماسی بر پایداری جریان‌های اختلاط‌پذیر را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن جزء مماسی سرعت بر سطح مشترک، به بررسی تغییرات اضافه کردن این عامل و مقایسه آن با حالت‌های مطالعه شده قبلی، پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که این عامل، پایداری جریان‌های مخلوط‌شدنی را افزایش می‌دهد، نتیجه‌ای که با نتایج بدست آمده‌ی آن‌ها در شبیه‌سازی غیرخطی همخوانی نداشت. آن‌ها طی شبیه‌سازی غیرخطی به این نتیجه رسیدند که برش مماسی عاملی بر ناپایداری بیشتر جریان می‌باشد. علاوه بر این دیویت و هومسی^۳ [۷] تحلیل خطی را برای محیط‌های متخلخل با نفوذپذیری نسبی پرودیک مورد مطالعه قرار دادند و نتایج آن را با شبیه‌سازی غیرخطی مقایسه و تحلیل کردند. از جمله مطالعات جدیدتری که در زمینه تحلیل پایداری خطی این ناپایداری انجام شده است، می‌توان به مطالعه انجام شده توسط میشر و همکاران^۴ [۸] اشاره کرد. آن‌ها با در نظر گرفتن جذب سطحی خطی برای محیط متخلخل به بررسی رفتار این ناپایداری در لوله‌های کروماتوگرافی پرداختند و مشاهده کردند که با افزایش این پارامتر، جریانی پایدارتر در جابجایی‌های مخلوط‌شدنی خواهند داشت. همچنین قسمت و همکاران^۵ [۹] تحلیل پایداری خطی را در محیطی با تانسور پراکندگی ناهمسانگرد و وابسته به سرعت جریان، انجام دادند و طول موج‌های بحرانی این ناپایداری را در حالت‌های خاص معرفی کرده و مورد بررسی قرار دادند.

مدل یک‌بعدی برای مطالعه ناپایداری انگشتی لزج در جابجایی سیالات نیوتنی توسط کووال^۶ [۱۰]

^۱ Wooding

^۲ Rogerson & Meiburg

^۳ De Wit & Homsy

^۴ Mishra

^۵ Ghesmat

^۶ Koval

به کار گرفته شد و با نتایج آزمایشگاهی که خود او انجام داده بود، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان دادند که اگرچه این مدل یک بعدی توانایی به نمایش کشیدن این پدیده را به درستی ندارد ولی با تقریب خوبی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. از دیگر شبیه سازی های اولیه ای که برای این ناپایداری انجام گرفت، شبیه سازی انجام شده توسط فایرز^۱ [۱۱] بود که در واقع از توسعه ای مدل کووال [۱۰] بدست آمده بود. او پارامترهای قابل تنظیمی را به این مدل یک بعدی اضافه کرد و با استفاده از آن ها به بررسی ناپایداری انگشتی در حالت دوبعدی پرداخت. در مطالعات اولیه تمام شبیه سازی ها با استفاده از تکنیک تفاضل محدود انجام می شد. پیس من و همکاران^۲ [۱۲] با استفاده از این روش به شبیه سازی این ناپایداری در جریان های مخلوط شدنی پرداختند. چریستی و باند^۳ [۱۳] همان روش تفاضل محدود^۴ را با اصلاح گره ها برای مقادیر بزرگتری از عدد پکلت و نسبت تحرک بکار بردند. این دو همچنین نتایج بدست آمده را با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققین مقایسه کردند. تمام شبیه سازی های انجام گرفته تا این زمان، با استفاده از روش های عددی کم دقت که به خوبی توانایی مدل کردن پدیده های غیرخطی را ندارند، شبیه سازی می شدند. این روش ها علاوه بر اینکه رشد انگشتی ها را به درستی نشان نمی دادند، توانایی شبیه سازی آن را در زمان های بیشتر نیز نداشتند. تن و هومسی [۱۴] با معرفی و استفاده از روش دقیق طیفی برای اولین بار توانستند به شبیه سازی کامل ناپایداری انگشتی بپردازند. این دو، مدل دوبعدی را ارائه کردند که در آن با استفاده از روش طیفی^۵ و تبدیلات فوریه به مطالعه ناپایداری انگشتی پرداختند. آن ها پراکندگی هم سانگردی را در شبیه سازی خود پیاده کرده و به نتایجی مطابق با نتایج آزمایشگاهی رسیدند. چریستی^۶ [۱۵] با افزودن قسمتی به الگوریتم تن و هومسی [۱۶]، این ناپایداری را برای محیط متخلخل خاصی

^۱ Fayers

^۲ Peaceman

^۳ Christie & Bond

^۴ Finite Difference Method

^۵ Spectral Method

^۶ Christie

شبیه‌سازی کردند. در مدل شبیه‌سازی شده توسط وی، نفوذپذیری محیط ناهمگن و پراکندگی محیط متخلخل ناهمسانگرد در نظر گرفته شده بود، او همچنین تأثیرات گرانش بر این پدیده را بررسی کرد. در ادامه استفاده از این روش زیمرمن و هومسی^۱ [۱۷] این ناپایداری را برای محیط‌هایی با پراکندگی ناهمسانگرد مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها پراکندگی را وابسته به سرعت در نظر گرفته و به بررسی تأثیرات این ناهمسانگردی در شکل‌گیری انگشتی‌ها پرداختند. این دو همچنین این ناپایداری را در جریان مخلوط‌شدنی به صورت سه بعدی نیز شبیه‌سازی کرده [۱۸] و با مشاهده نتایج بدست آمده متوجه شدند که هیچ مکانیزم جدیدی در شکل‌گیری انگشتی‌ها در حالت سه بعدی مشاهده نمی‌شود. بنابراین نتیجه گرفتند که برای بررسی رفتار این ناپایداری در شرایط متفاوت، همان حالت دوبعدی کافی و مفید می‌باشد و نیازی به بررسی آن در حالت سه‌بعدی نمی‌باشد. بررسی این ناپایداری در محیط متخلخل با نفوذپذیری ناهمگن نیز، توسط تن و هومسی [۱۹] انجام پذیرفت.

بررسی ناپایداری انگشتی در محیط متخلخل با تانسور پراکندگی وابسته به سرعت، توسط غسمت و عزایز [۹] صورت پذیرفت که در آن به بررسی مکانیزم‌های مشاهده شده در این شبیه‌سازی و نیز معرفی پارامتری جدید به نام راندمان جاروبی در ناپایداری انگشتی پرداختند. علاوه بر این سجادی و عزایز^۲ [۲۰] به بررسی تأثیرات انتقال حرارت در این ناپایداری زمانی که هر سیال دمای متفاوتی دارد، پرداختند. این دو نیز پارامترهایی مانند راندمان جاروبی یا طول اختلاط^۳ تحت شرایط جدید مورد بررسی قرار دادند. همانند تحلیل پایداری خطی، در زمینه شبیه‌سازی غیرخطی ناپایداری انگشتی نیز، مطالعات انجام شده در بخش سیالات غیرنیوتنی به مراتب کمتر از جریان سیالات نیوتنی می‌باشد. بیشتر تحقیقات انجام شده در بررسی این ناپایداری در جریان سیالات غیرنیوتنی به صورت آزمایشگاهی صورت گرفته و مطالعات عددی محدودی آن‌ها بسیار محدود می‌باشد. در این قسمت به

^۱ Zimmerman & Homsy

^۲ Sajjadi & Azaiez

^۳ Mixing length

بخشی از مطالعاتی که مربوط به جریان سیالات غیرنیوتنی در محیط متخلخل می‌باشند، می‌پردازیم. یک روش عددی برای شبیه سازی جریان سیال پاور-لو توسط مک‌دونالد^۱ [۲۱] ارائه شد که در آن از سلول‌های هل-شاو شعاعی استفاده کرده بود. او در طرح اولیه خود مشاهده کرد، هنگامی که از مشخصات نفت خام در شبیه‌سازی استفاده می‌کند نتایج، خطای کمتری نسبت به حالتی دارند که از سیالی با خواص پاور-لو استفاده کند. روشی تحلیلی برای جریان ناپایداری از سیال پاورلو در محیط متخلخل توسط پاسکال [۲۲] ارائه شد که در آن به ارائه تاثیرات رئولوژیکی سیال بر نرخ جریان و فشار پرداخت. او گروهی از اعداد بی‌بعد جدید را معرفی کرد و به تحلیل رفتار جریان با این گروه‌های بی‌بعد پرداخت.

۱-۶-۲ مطالعات آزمایشگاهی

در این بخش به بررسی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در جریان‌های مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشدنی برای سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی می‌پردازیم.

بررسی ناپایداری انگشتی لزج در جریان‌های مخلوط‌شدنی اولین بار توسط هیل و همکاران^۲ [۲۳] گزارش شد. او بر پایه نیرویی بر اساس اختلاف فشار و نیز اغتشاشی در سطح مشترک دو سیال مورد آزمایش، به بررسی این ناپایداری پرداخت. پس از او اسلوباد و کوودل^۳ [۲۴] با استفاده از تکنیک پرتو ایکس به اندازه‌گیری راندمان جاروبی در این گونه جابجایی‌ها پرداختند. آن‌ها همچنین با استفاده از این تکنیک توانستند الگوهای متفاوت بدست آمده برای انگشتی‌ها در نسبت ویسکوزیته‌های مختلف را مشاهده و بررسی کنند. در ادامه ون میرس^۴ [۲۵] با بکار بردن مکانیزمی به مشاهده و تحلیل جریانی از آب و نفت در یک محیط متخلخل آزمایشگاهی پرداخت. این محیط متخلخل از موادی به

^۱ McDonald

^۲ Hill .

^۳ Slobod & caudle

^۴ Van Meurs

صورت پودر شیشه پر شده بود و دیواره‌هایی شیشه‌ای داشت. بررسی سطح مشترک دو سیال مخلوط‌نشده نیز توسط سافمن و تیلور^۱ [۲۶] انجام پذیرفت. آن‌ها با استفاده از یک سلول هل-شاو و یک سیستم جریانی که از هوا و گلیسرین تشکیل شده بود به بررسی آشفتگی‌ها و اغتشاشات بوجود آمده در سطح مشترک دو سیال پرداختند. این دو با تعریف پارامتری به شکل λ که نسبت ضخامت انگشتی به جابجایی آن را نشان می‌دهد به بررسی و تحلیل نتایج بدست آمده از این آزمایش پرداختند. مطالعات آزمایشگاهی متعددی نیز توسط هابرم^۲ [۲۷] در زمینه تاثیرات نسبت تحرک بر راندمان جابجایی و نیز چگونگی شکل‌گیری ناپایداری انگشتی صورت گرفت. او در مطالعاتش به این نتیجه رسید که نسب تحرک دو سیال نقش بسیار بیشتری از ناهمگنی محیط متخلخل در پیشروی ناپایداری دارد. بنهام و همکاران^۳ [۲۸] با استفاده از محلول سولفات آلومینیوم در جابجایی محلول گلیسرین، رفتار این جریان و چگونگی شکل‌گیری انگشتی‌ها مورد بررسی قرار دادند. در ادامه مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته با پرتو ایکس، اسلوباد و توماس^۴ [۲۹] به بررسی تاثیرات نسبت تحرک، در شکل و اندازه انگشتی‌ها پرداختند. با استفاده از همین روش پرکینس و همکاران^۵ [۳۰] به بررسی فرآیند پخش انگشتی‌ها در یک جابجایی مخلوط‌شده پرداختند. در حالت مخلوط‌نشده نیز پرکینس و جانستون^۶ [۳۱] مطالعاتی را با استفاده از همین روش انجام دادند. بررسی تاثیرات نیروی گرانش بر شکل‌گیری و نیز سرعت پیشروی انگشتی‌ها توسط اسلوباد و توماس [۲۹] انجام گرفت. در کنار این مطالعات، سغیر و همکاران^۷ [۳۲] به بررسی ناپایداری انگشتی در حالتی که سیالات به کار رفته با یکدیگر اختلاف دما داشته باشند، پرداختند.

^۱ Saffman & Taylor

^۲ Habermann

^۳ Benham

^۴ Slobod & Thomas

^۵ Perkins

^۶ Perkins & Johnston

^۷ Saghir

آن‌ها از گلیسرین و آب در این آزمایش استفاده و مشاهده کردند زمانی که آب داغ به سیستم تزریق می‌شود فاصله‌ی نوک تا پایه انگشتی‌ها کمتر از حالتی می‌باشد که آب سرد به سیستم تزریق می‌شود. همچنین مشاهده شد در این حالت، نیروی بایونسی از پیشرفت سریع انگشتی‌ها جلوگیری می‌کند. قسمتی از نتایج بدست آمده از این آزمایش در نشان داده شده است.

در بخش سیالات غیرنیوتنی مارشال و همکاران^۱ [۳۳] برای اولین بار به بررسی جریان سیالات غیرنیوتنی در محیط‌های متخلخل پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن گرانش، نقش این عامل را در رشد انگشتی‌ها مورد بررسی قرار دادند. پس از آن لی و همکاران^۲ [۳۴] مطالعات آزمایشگاهی دیگری با استفاده از سیالات شبه پلاستیک^۳ در سلول‌هل-شاو انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که سیال باریک شونده‌ی مورد استفاده در آزمایش، ناپایداری بیشتری نسبت به سیالات نیوتنی ایجاد می‌کند. نتیجه‌ای که با واقعیت‌های تئوری همخوانی ندارد زیرا همان‌طور که می‌دانیم در حالت کلی پلیمرها از سیالات نیوتنی ویسکوزتر هستند و در نتیجه نسبت تحرک کمتری خواهند داشت، پس اساساً ناپایداری در آن‌ها باید با سرعت کندتری پیش‌روی کند. در این میان بخش عظیمی از مطالعات آزمایشگاهی مربوط به بررسی تفاوت‌های جریان سیالان نیوتنی و غیرنیوتنی با یکدیگر می‌باشند. اولین مطالعه آزمایشگاهی که به بررسی جریان سیالات غیرنیوتنی در سلول‌های شعاعی می‌پرداخت توسط داکرد و همکاران^۴ [۳۵] انجام گرفت. آن‌ها به بررسی و تحلیل جابجایی یک سیال غیرنیوتنی توسط سیالی نیوتنی پرداختند و تشکیل انگشتی‌هایی با شاخه‌های زیاد را گزارش کردند. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که در این حالت انگشتی‌ها بیشتر تمایل به شکافته شدن دارند و میل چندانی به ایجاد انگشتی‌های پهن‌تر و عریض‌تر از خود بروز نمی‌دهند. علاوه بر این‌ها، آلن و بوگر^۵

^۱ Marshall

^۲ Lee

^۳ Pseudo plastic fluid

^۴ Daccord

^۵ Allen & Boger

[۳۶] حالت‌های مختلفی را برای سیال نیوتنی، سیال باریک‌شونده و سیال کاملاً الاستیک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در آزمایشات خود متوجه شدند که در حالت سیالات باریک‌شونده ناپایداری بیشتری در سطح مشترک دو سیال نسبت به حالت‌های دیگر قابل مشاهده است. این دو همچنین گزارش کردند که در شرایط یکسان، شکل‌گیری و فرم انگشتی‌ها در حالت غیرنیوتنی در مقایسه با حالت نیوتنی، کاملاً متفاوت می‌باشد. آن‌ها همچنین مطالعه دیگری به صورت جریان شعاعی در سلول هل-شاو انجام دادند که در آن از نوع خاصی از پلی استایرن^۱ به عنوان سیال غیرنیوتنی استفاده شده بود. مطالعه پهنای انگشتی‌ها تحت تابعی از سرعت پیش‌روی نوک انگشتی‌ها در جابجایی مخلوط‌شدنی توسط بان و همکاران^۲ [۳۷] مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه نقش ویسکوزیته و کشش سطحی بر ناپایداری انگشتی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با استفاده از مواد پلیمری و سورفکتانت^۳ به بررسی تفاوت‌های بوجود آمده ناشی از استفاده‌ی این مواد پرداختند. این نویسندگان در بخش دیگری از مطالعات خود از یک محلول پلیمری باریک‌شونده به عنوان سیال جابجاکننده و از هوا به عنوان سیال جابجا شونده استفاده کرده و به مقایسه شکل انگشتی‌های بوجود آمده پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که در سرعت‌های کم، انگشتی‌هایی باریک و نوک‌تیز بوجود می‌آید در حالی که در سرعت‌های بالاتر انگشتی‌هایی پهن‌تر و بدون نوک تیز قابل مشاهده هستند. برای بررسی تأثیرات کشش سطحی بر شکل انگشتی‌ها، آن‌ها با افزودن سورفکتانت‌ها و مقایسه‌ی آن‌ها با حالتی که از محلول‌های پلیمری استفاده کرده بودند، به این نتیجه رسیدند که کشش سطحی تأثیر قابل‌ذکری بر شکل انگشتی‌ها ندارد. از جمله مطالعات دیگری که با استفاده از مواد شیمیایی خاص به بررسی این ناپایداری پرداخته‌اند می‌توان به آزمایشات کاواگوچی و همکاران^۴ [۳۸] اشاره کرد. آن‌ها از هیدروکسی پروپیل متیل سلولز^۵ به عنوان سیال غیرنیوتنی و از محلولی از گلیسرین به عنوان سیال نیوتنی استفاده

^۱ Polystyrene

^۲ Bonn

^۳ surfactant

^۴ Kawaguchi

^۵ Hydroxyl Propyl Methy Cellulose (HPMC)

کردند. آن‌ها از نتایج بدست آمده از آزمایشات مشاهده کردند؛ در حالی که هوا، محلول نیوتنی گلیسیرین را جابجا می‌کند، انگشتی‌هایی یکنواخت که در آن‌ها فقط مکانیزم شکافتن نوک انگشتی اتفاق می‌افتد، مشاهده می‌شود در حالی که در حالت دیگری که هوا محلول هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز را جابجا می‌کند انگشتی‌هایی چند شاخه مشاهده می‌شود. از مطالعات جدیدتری که در این زمینه انجام گرفته است می‌توان به مطالعه‌ای آزمایشگاهی انجام شده توسط مالسچه و همکاران^۱ [۳۹] اشاره کرد. آن‌ها به جای استفاده از بستر آکنده^۲ به عنوان محیط متخلخل، از صفحه‌ای مشبک استفاده کردند و با دوربینی با کیفیت بسیار بالا به مشاهده انگشتی‌ها پرداختند. آن‌ها با اعمال اختلاف ویسکوزیته‌های متفاوت، چگونگی پیدایش انگشتی‌ها را مورد مقایسه قرار دادند. اوندانو و همکاران^۳ [۴۰] نیز با استفاده از نظر گرفتن گرانش، جریانی از نفت که توسط سیال نیوتنی، غیریوتنی باریک شونده و ویسکوالاستیک جابجا می‌شود را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که در حضور نیروهای ویسکوالاستیک، سطح مشترک دو سیال با سرعت کمتری حرکت می‌کند. آن‌ها با استفاده از این ویژگی و در نظر گرفتن شرایطی خاص، چگونگی بهترین حالت برای جابجایی نفت را گزارش کردند. در اکثر مطالعات آزمایشگاهی در زمینه ناپایداری انگشتی از همین سیستم برای بررسی پارامترهای موثر بر این ناپایداری استفاده می‌شود. در جدیدترین مطالعه، مالهورا و شرما^۴ [۴۱] به بررسی کیفی اثرات الاستیک بر سیال جابجا شونده پرداختند. آن‌ها در آزمایشات خود دریافتند که حضور اثرات الاستیک باعث تغییر الگوی انگشتی‌ها می‌شود و همچنین تعداد انگشتی‌ها در مقایسه با نوع نیوتنی خود، بیشتر می‌شود.

۷-۱ معرفی مطالعه حاضر

همان‌طور که دانستیم، مهمترین کاربرد بررسی ناپایداری انگشتی لزج، مربوط به استخراج نفت از

^۱ Malsche

^۲ Packed bed

^۳ Avendano .

^۴ Malhotra & Sharma

مخازن زیرزمینی است. مطالعات عددی و آزمایشگاهی متعددی جهت نیل به روشی سودمند در استخراج انجام شده است که اکثر آن‌ها در مورد سیالات نیوتنی و در عدم حضور خواص پلیمری بوده است. از طرفی ارتباط تنگاتنگ و جدایی‌ناپذیر خواص الاستیک و خواص لزج، موجب شد تا به بررسی اثر خاصیت الاستیک بر این ناپایداری که عامل اصلی آن لزجت می‌باشد، بپردازیم. البته این ارتباط تنگاتنگ بین خواص الاستیک و لزج، مطالعه اثر این عوامل بر یکدیگر را دشوار ساخته است به گونه‌ای که حجم مطالعات در این زمینه نسبت به حالت نیوتنی بسیار اندک است. با این وجود، در این مطالعه قصد داریم به بررسی اثر خواص الاستیک بر این پدیده بپردازیم. افزودن پلیمر به سیال پایه نیوتنی موجب تغییر ویسکوزیته و ایجاد رفتار الاستیک می‌شود. همچنین رفتارهای باریک‌شوندگی^۱ و یا ضخیم‌شوندگی^۲ را به سیال نیوتنی اضافه می‌کند.

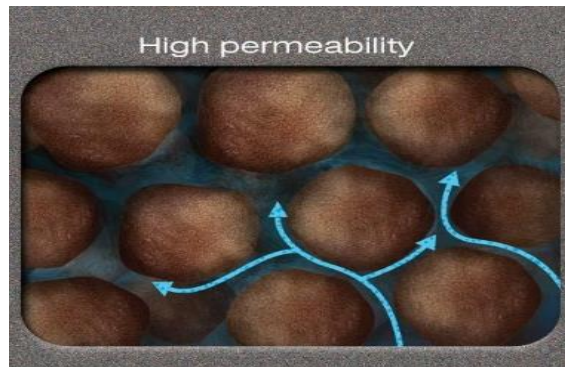
در این مطالعه با معرفی یک گروه از سیال‌های پلیمری و بیان ساختار و رفتار مولکولی آن‌ها در جریان‌های مختلف، ارتباط بین خواص الاستیک و لزج را شکسته و این دو عامل را مستقل از هم بررسی می‌کنیم. این گروه خاص که سیالات با گر نامیده می‌شوند، ضمن داشتن خواص الاستیک، با نرخ برش ویسکوزیته‌شان تغییر چندانی ندارد. از همین خاصیت برای مقایسه ناپایداری در سیالات نیوتنی استفاده خواهیم کرد. همچنین با انجام آزمایش‌های متعدد، یافته‌هایمان را در قالب چند نمونه سیال پلیمری با ویسکوزیته نسبتاً ثابت گزارش کرده و نحوه ساخت آن‌ها را با جزئیات، بیان می‌کنیم. ویسکوزیته نمونه‌ها با بهره‌گیری از ویسکومتری دقیق، اندازه‌گیری و گزارش شده است. با معرفی پارامتری برای سنجش میزان الاستیسیته، خواص الاستیک نمونه‌ها را بررسی و با هم مقایسه نمودیم. با انتخاب یک سیال نیوتنی با ویسکوزیته‌ای برابر با نوع پلیمری، هر آزمایش را یک بار با سیال پلیمری و بار دیگر با سیال نیوتنی انجام و نتایج حاصل را با هم مقایسه می‌کنیم. با افزایش خواص الاستیک و

^۱ Shear thinning

^۲ Shear thickening

با ثابت نگه داشتن خواص لزج، اثر افزایش این عامل را نیز بررسی می‌نماییم.

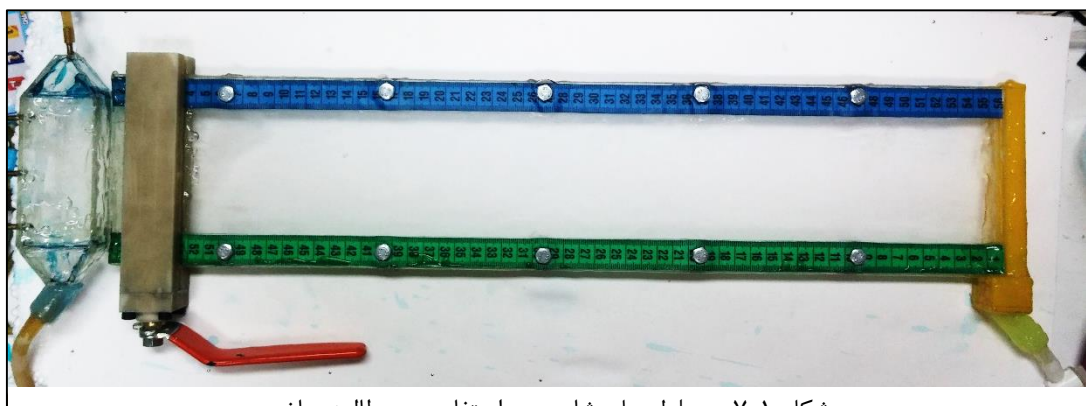
اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه، به بررسی عوامل مختلف موثر بر ناپایداری در محیط متخلخل، پرداخته‌اند. دلیل این موضوع واضح است زیرا مخازن نفتی مانند شکل ۶-۱ نیز متخلخل هستند و در



شکل ۶-۱ - متخلخل بودن مخازن نفتی

فرآیند استخراج سعی بر خارج ساختن نفت از میان این خلل و فرج‌ها می‌باشد. در مطالعات آزمایشگاهی و به منظور بررسی رژیم جریان، نیاز به محیط متخلخلی شفاف بسیار مورد نیاز است. همان‌طور که پیش‌تر هم ذکر شد، استفاده از سلول هل-شاو راه‌کاری برای این مشکل است.

در این مطالعه مطابق شکل ۷-۱ نیز از این سلول استفاده شده است. انتخاب ابعاد و ساخت قسمت‌های مختلف این سلول به گونه‌ای هو شمندانه و به نحوی انجام پذیرفته است که فضیات حاکم بر سلول کاملاً رعایت شده است و نتایج حاصل از آزمایش‌ها، برای محیط متخلخل کاربردی و قابل گزارش است. شایان ذکر است ستاپ مطالعه حاضر در هیچ یک از مطالعات آزمایشگاهی پیشین به این نحو مشاهده نشده است.



شکل ۷-۱ - سلول هل-شاو مورد استفاده در مطالعه حاضر

با عنایت به تمام موارد فوق، این تلاش قصد دارد به بررسی مستقل اثرات الاستیک بر ناپایداری انگشتی لزج در محیط متخلخل بپردازد. بدین منظور از دو پارامتر بسیار مهم و کاربردی بهره می‌جوییم. طول اختلاط و بازده جاروبی مولفه‌هایی هستند که به خوبی قادرند بسیاری از ویژگی‌های این ناپایداری را نشان دهند. این دو پارامتر در این مطالعه به طور کامل معرفی شده‌اند و نقاط مطلوب برای آن‌ها در شرایط مختلف معین شده است. نحوه تفسیر و درک ناپایداری براساس این دو مولفه بیان شده است و نتایج حاصل از آزمایشات برحسب آن‌ها بیان و تحلیل شده‌اند.

در فصل آینده تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر به طور کامل معرفی خواهند شد. ستاپ آزمایشگاهی و نکات مربوط به ساخت آن، در بخشی جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، همراه معرفی پلیمر مورد استفاده و دستور ساخت سیال، خواص ویسکومتری و الاستیک سیال‌ها گزارش شده است. در فصل سوم ابتدا با صحت‌سنجی ساخت سلول، بررسی تکرارپذیری آزمایشات و صحت‌سنجی نتایج چند آزمایش با کارهای گذشتگان از اعتبار نتایج و ستاپ اطمینان یافته‌ایم. سپس نتایج حاصل از آزمایشات و اثر عوامل مختلف بر ناپایداری را گزارش و بحثی پیرامون آن‌ها نموده‌ایم. در فصل آخر نیز به بیان خلاصه نتایج پژوهش و علل آن‌ها پرداخته‌ایم.

۲ فصل دوم:

مجموعه وسایل آزمایشگاهی

در این مطالعه به بررسی تجربی ناپایداری انگشتی لزج پرداخته شده است. بنابراین قبل از بررسی هر عاملی باید به شرح و سایل آزمایشگاهی مورد استفاده پرداخت. بدین منظور ابتدا به معرفی تجهیزات مورد استفاده و سپس مواد و سیالات بررسی شده در آزمایش‌ها خواهیم پرداخت و علل کلی استفاده از آن‌ها را مختصراً ذکر خواهیم کرد.

۲-۱ تجهیزات آزمایشگاه

۱-۱-۲ پمپ پرستالتیک^۱

پمپ پرستالتیک از دسته پمپ‌هایی است که به منظور جابجایی مایع با دقت بالا و نواخت یکسان در زمان طولانی استفاده می‌گردد. پمپ پرستالتیک از سه قسمت کلی تشکیل شده است :

۱. درایو پمپ^۲ پرستالتیک که مجموعه موتور دستگاه همراه، سیستم کنترلر، نمایشگر، ورودی‌ها

و خروجی‌ها و جعبه حاوی آن‌ها می‌باشد.

۲. هد پمپ^۳ پرستالتیک که به قسمتی گفته می‌شود که روی محور موتور دستگاه نصب می‌شود

و دارای چند غلطک می‌باشد که با ایجاد فشار روی بدنه بیرونی شلنگ، درون شلنگ ایجاد

خلأ و فشار می‌نمایند و سبب جابجا شدن مایع از یک سر شلنگ به سر دیگر آن می‌شوند.

۳. شلنگ منعطف^۴ (شلنگ سیلیکون) که به سبب خاصیت فیزیکی امکان انحنای به درون،

توسط غلطک‌های هد و بازگشت به حالت اولیه را، پس از عبور هر غلطک دارا می‌باشد.

معروف‌ترین نوع این شلنگ‌ها، از جنس سیلیکون می‌باشد.

^۱ Peristaltic pump

^۲ Pump drive

^۳ Pump Head

^۴ Flexible tube

پمپ مورد استفاده در آزمایش، مدل BT100-1F از سری دیسپنسر^۱ پمپ‌های پرستالتیک کمپانی Longer می‌باشد (شکل ۱-۲) که توانایی تامین دبی $0.2 \frac{\mu L}{min} - 500 \frac{mL}{min}$ را دارد.



شکل ۱-۲ - پمپ پرستالتیک مدل BT100-1F کمپانی Longer

۲-۱-۲ ترازو با دقت بالا

تمام نمونه برداری‌ها توسط ترازوی شرکت RADWAG مدل PS 510/C/1 با دقت 0.001 انجام گرفته است. بیش‌ترین اهمیت این دقت بالا، در ساخت پلیمر با غلظت‌های پایین نمایان‌گر بوده است.



شکل ۲-۲ - ترازوی مدل PS 510/C/1 شرکت RADWAG

^۱ dispenser

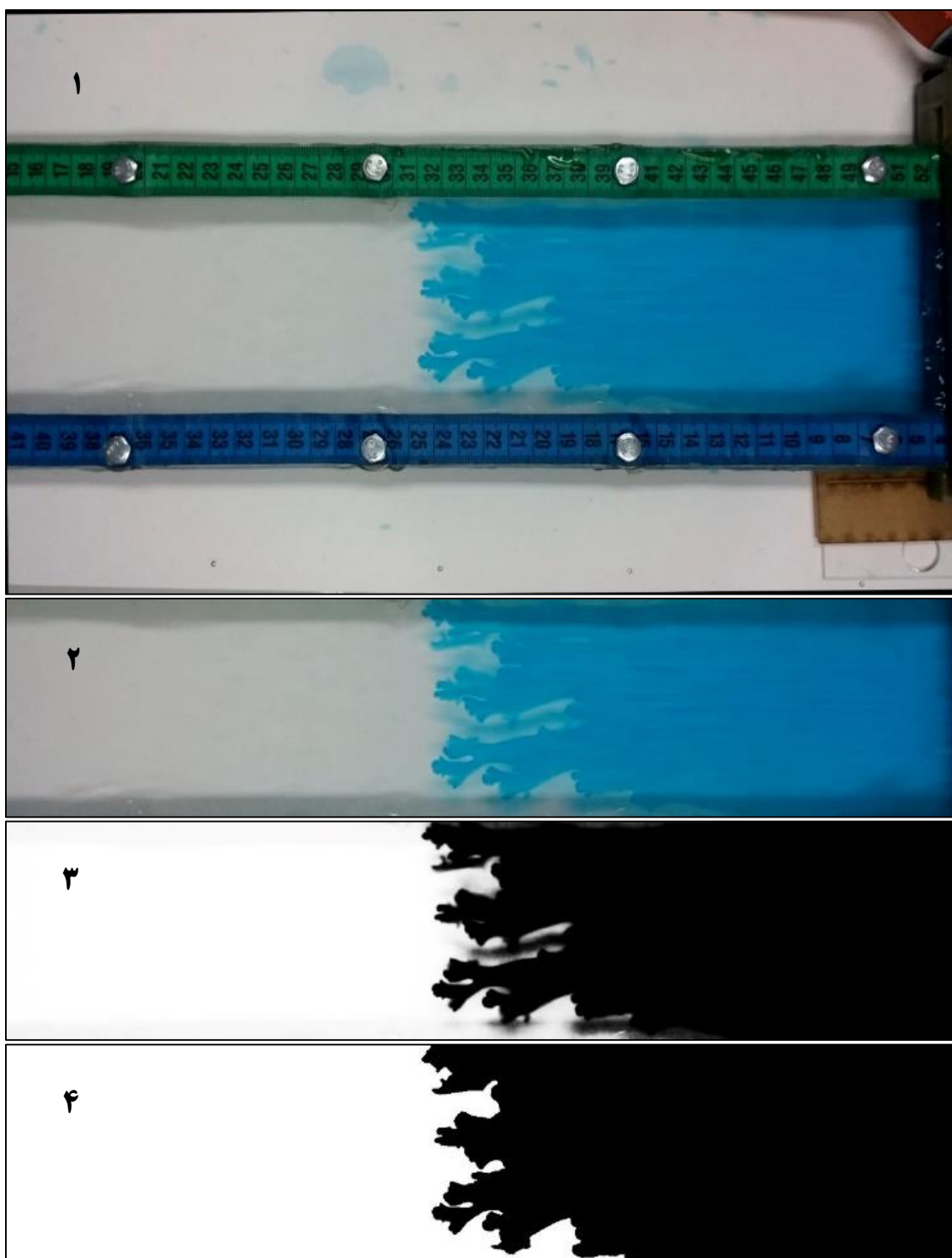
۳-۱-۲ دوربین با کیفیت بالا

در آزمایش‌های صورت گرفته به دلیل این که دبی سیال تزریق شونده نسبتاً پایین است و پیشرفت پدیده به آهستگی صورت می‌گیرد، نیازی به دوربین‌های سرعت بالا^۱ ضروری نیست. به همین دلیل سعی بر این شد از دوربین با کیفیت و رزولوشن بالا استفاده شود تا جزئیات بیش‌تری در تصاویر معلوم باشد. به همین منظور از یک دوربین ۱۳ مگاپیکسلی مجهز به فوکوس اتوماتیک و لرزش‌گیر اپتیکال تصویر جهت کاهش نویز، که قابلیت فیلمبرداری Full HD با سرعت ۶۰ فریم بر ثانیه (1080@60fps) و رزولوشن ۱۹۲۰*۱۰۸۰ را داراست، استفاده شد.

فیلم‌ها پس از ضبط و جهت پردازش تصویر، توسط نرم‌افزار After Effect کمپانی Adobe به تصویر تبدیل شدند. هر ثانیه فیلم به ۶۰ تصویر با رزولوشن ۱۹۲۰*۱۰۸۰ پیکسل تبدیل شده است. سپس ناحیه رخ دادن پدیده به صورت دقیق و با ابزارهای اندازه‌گیری مناسب موجود در افترافکت جدا شد. در مرحله بعد، با قرار دادن افکت‌هایی از قبیل افزایش روشنایی و بالا بردن تضاد رنگ‌ها و تعادل غلظت رنگ‌ها، تصویری با مرزهای مجزا بین دو سیال را ایجاد نمودیم. تصویر آماده شده را توسط یک کد پردازش تصویر و قرار دادن فیلترهای تصویری متعدد در ورودی آن به متلب فراخوانی کردیم. با دستورهای فراهم شده در متلب نویزهای تصاویر کاهش داده شده و تبدیل به تصاویر باینری^۲ شدند. تصاویر باینری، تصاویر صفر و یک هستند. یعنی هر جا مشکی باشد، مقدار پیکسل در ماتریس متناظر صفر و هر جا سفید باشد مقدار یک در ماتریس ظاهر می‌شود. حال یک ماتریس شامل صفر و یک داریم که نحوه قرارگیری صفرها، کاملاً شبیه شکل انگشتی در سلول می‌باشد. در شکل ۳-۲ مراحل مختلف ویرایش برای یک تصویر نشان داده شده است.

^۱ High speed camera

^۲ Binary pictures



شکل ۲-۳ - مراحل مختلف پردازش تصویر: (۱) فریم جدا شده از فیلم (۲) جدا کردن ناحیه رخ دادن پدیده (۳) افزودن افکتهای مورد نیاز جهت از بین بردن سایهها و متمایز شدن دو سیال از هم (۴) تصویر باینری ایجاد شده توسط کد پردازش تصویر در Matlab

با تبدیل تصویر به یک ماتریس شامل صفر و یک، هر عملیات محاسباتی قابل انجام است. در فصل آینده با معرفی چند پارامتر اندازه‌گیری، این موضوع را به تفصیل توضیح خواهیم داد.

۴-۱-۲ همزن هات پلیت^۱

سیال ویسکوالاستیک مورد استفاده در مطالعه حاضر، از ۳ قسمت تشکیل شده است: ماده پلیمری، آب مقطر به عنوان حلال و گلیسرین به عنوان ماده لزج کننده. برای همگن ساختن ترکیب فوق، از هر همزنی که سرعت‌های دورانی کم را بتواند تامین کند، می‌توان استفاده کرد. همزن هات پلیت IKA RCT مورد استفاده در آزمایش‌ها، این خاصیت را داراست. این همزن، سرعت دورانی ۵۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و دمای ۵۰-۳۶۰ درجه سانتی‌گراد را تامین می‌کند. این همزن با ایجاد میدان مغناطیسی دورانی، قرص مغنت موجود در محلول را می‌چرخاند.



شکل ۴-۲ - همزن هات پلیت IKA RCT

^۱ Hot plate stirrer

برای ساختن محلول‌های ویسکوالاستیک از سرعت دورانی ۹۰-۱۱۰ دور بر دقیقه استفاده کردیم. همچنین جهت جلوگیری از همپاشی^۱ ماده پلیمری، از تنظیم دمای دستگاه خودداری کرده و تمام محلول‌ها در دمای محیط (۲۳-۲۵ درجه سانتی‌گراد) تهیه شده‌اند.

۵-۱-۲ ویسکومتر

برای محاسبه ویسکوزیته سیالات نیوتنی موجود در آزمایش‌ها و همچنین تعیین تغییرات ویسکوزیته بر حسب نرخ برش محلول‌های پلیمری، از ویسکومتر کاربرپسند کمپانی Brookfield مدل DVE-LV استفاده کردیم. محدوده مجاز این دستگاه ۱-۲۰۰۰۰۰۰ سانتی‌پواز^۲ است (البته در صورت موجود بودن تمام اسپیندل‌های^۳ مرتبط با دستگاه).



شکل ۵-۲ - ویسکومتر مدل DVE-LV کمپانی Brookfield

^۱ degradation

^۲ centipoise

^۳ spindle

۲-۲ اجزای ستاپ^۱ آزمایشگاهی

۱-۲-۲ سلول هل-شاو

به علت کاربرد زیاد پدیده انگشتی لزج در استخراج ثانویه و ثالثیه نفت از مخازن، مطالعات در مورد پدیده انگشتی لزج بیش تر در محیط متخلخل انجام می شود. در این مطالعه بیش تر به جنبه نحوه پاسخ گویی پدیده به تغییر در خواص سیال ها و رژیم جریان می پردازیم. بنابراین محیط متخلخل مورد استفاده باید به گونه ای باشد، که شفاف باشد تا تغییرات پدیده قابل ثبت و بررسی باشد. برای حل این مشکل پروفسور هانری سلبی هل-شاو^۲ با انجام آزمایشات متعدد فهمید اگر دو صفحه شیشه ای به گونه ای روی هم قرار بگیرند که فاصله بین آن ها خیلی کم باشد (به عنوان مثال کمتر از ۰/۰۲ اینچ) جریان با هر سرعتی آرام است و فرم معادله حاکم بر محیط، کاملاً شبیه فرم معادله دارسی می باشد و همانطور که قبلاً هم ذکر شد، از مقایسه این دو معادله، نفوذپذیری سلول هل-شاو به صورت زیر محاسبه می شود:

$$k = \frac{b^2}{12} \quad (۲-۱)$$

که در آن k نفوذپذیری و b فاصله بین دو صفحه است. فاصله بین دو صفحه در ستاپ ما، برابر ۱ میلی متر است. از این رو نفوذپذیری تحقیق حاضر طبق رابطه (۲-۱)، $k = 8.33 \times 10^{-8}$ می باشد. با توجه به این موارد محیط متخلخل مورد استفاده در مطالعه حاضر، سلول هل-شاو با نفوذپذیری $k = 8.33 \times 10^{-8}$ می باشد.

^۱ setup

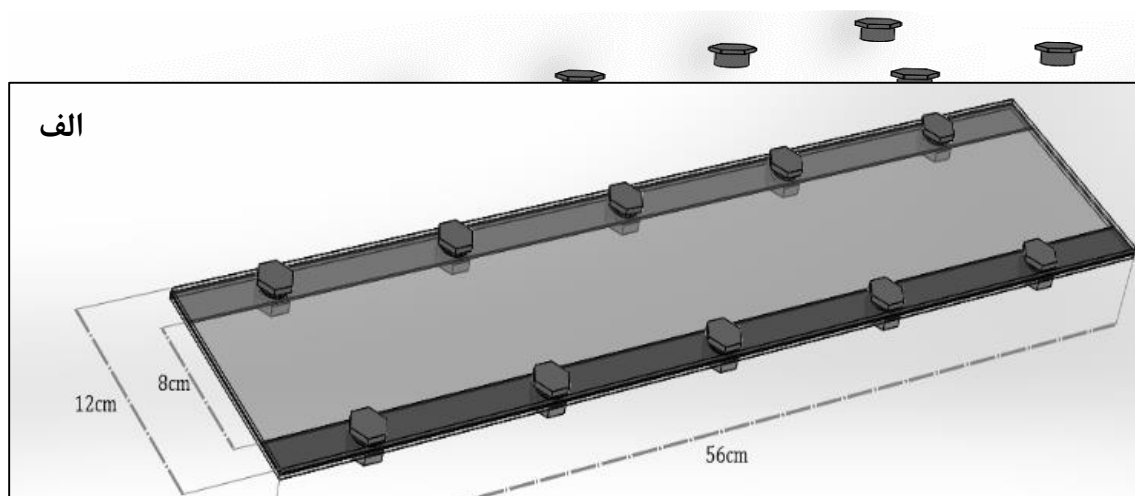
^۲ Henry Selbi Hele-Shaw

برای ساخت سلول، از دو صفحه پلکسی شیشه‌ای^۱ شفاف به ضخامت ۲ میلی‌متر و یک صفحه ۱ میلی‌متری برای بین دو صفحه استفاده شد. ابعاد سلول همانطور که در شکل ۲-۶ هم قابل مشاهده است، ۵۶ سانتی‌متر در جهت جریان و ۱۲ سانتی‌متر در جهت عمود بر جریان می‌باشد. از این ۱۲ سانتی‌متر ۲ سانتی‌متر در هر طرف، با پلکسی ۱ میلی‌متری پر شده و ۸ سانتی‌متر عرض شکاف جهت ورود سیال به محیط است. طول سلول طوری انتخاب شده‌اند که برای دبی‌های مدنظر، زمان نسبتاً کافی وجود داشته باشد که پدیده در سلول دیده شود و بتوان در لحظات مختلف رفتار پدیده بررسی

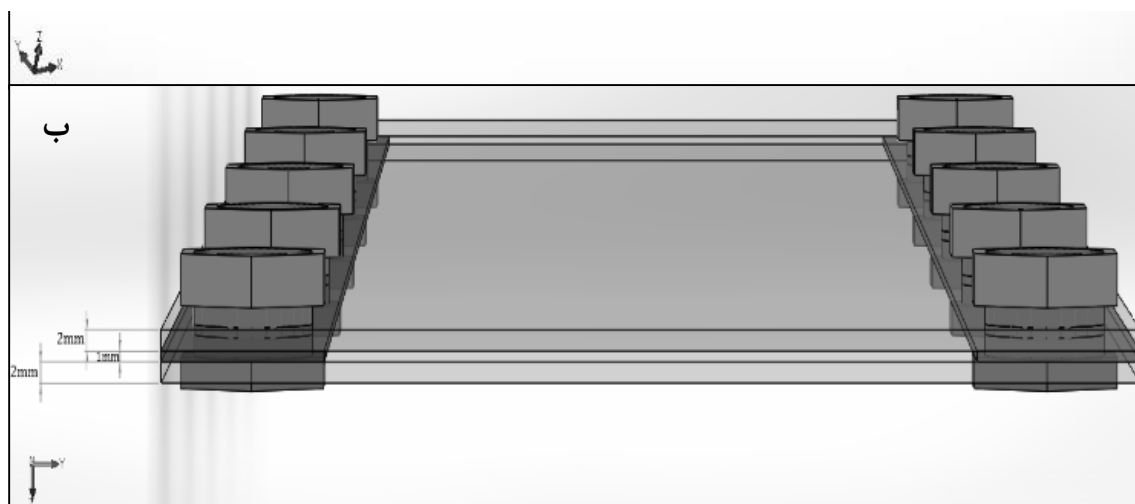
^۱ plexiglass

شود. همچنین عرض سلول می‌بایست به اندازه‌ای انتخاب می‌شد که محدودکننده تولید انگشتی نباشد. با عنایت به دو مورد فوق، ابعاد سلول مطابق شکل ۶-۲ انتخاب و سلول ساخته شده است.

صفحات ابتدا با چسب اپوکسی کاملاً به هم چسبانده شده‌اند، سپس با تعدادی پیچ و مهره تقویت شده تا در مقابل فشار احتمالی سیال داخل مقاوم باشند.



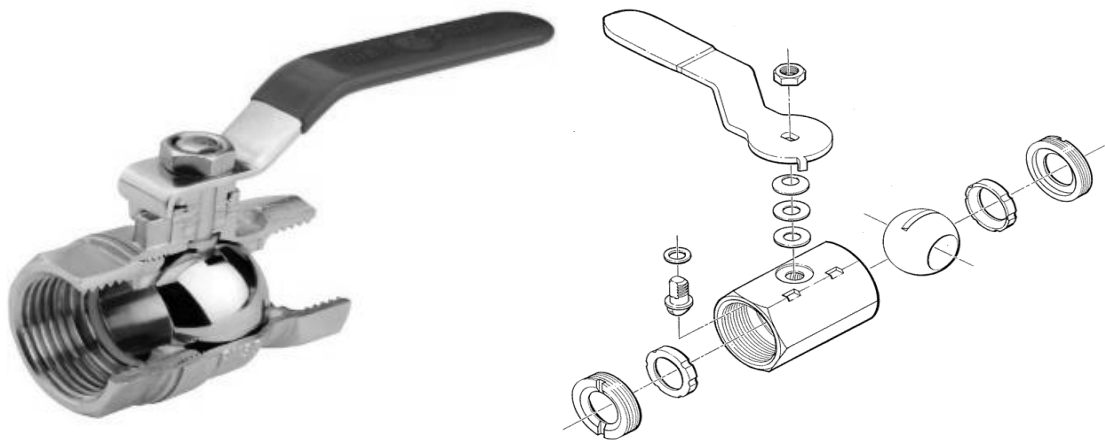
شکل ۷-۲ - نحوه کنار هم گذاشتن قطعات سلول هل-شاو



شکل ۶-۲ - ابعاد سلول هل-شاو (الف) نما از بالا و پهلو (ب) نما از بالا و روبه‌رو

۲-۲-۲ شیر ورودی

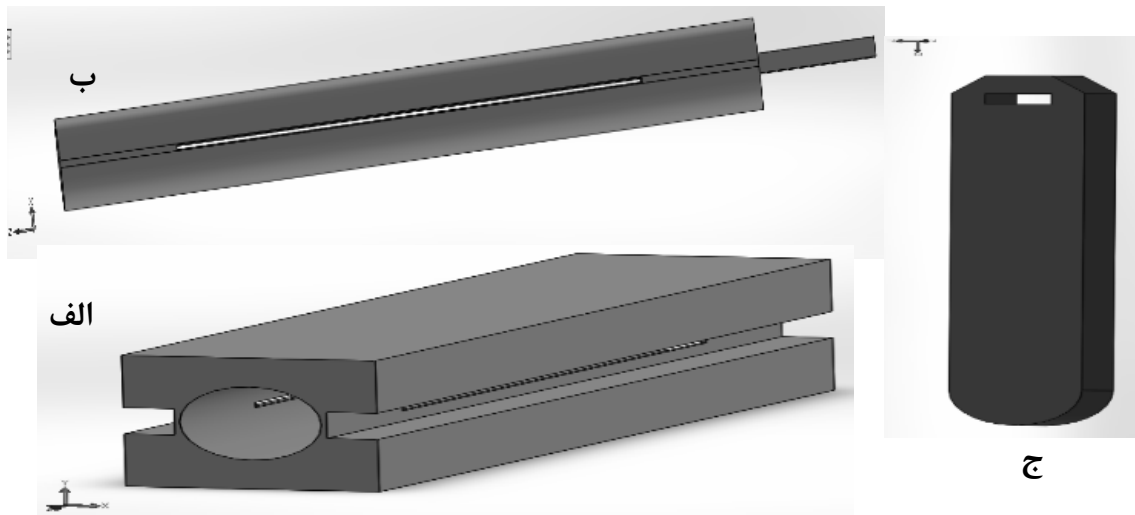
به منظور مشاهده مرز مشترک پدیده از ابتدای تزریق سیال به داخل سلول، باید دریچه‌ای طراحی شود تا به محض باز شدن دو سیال با هم در ارتباط باشند و مرز مشترک دو سیال کاملاً مشخص شود. به این منظور با الهام‌گیری از مکانیسم شیر توپی^۱ (شکل ۸-۲) به طراحی یک کنترل‌کننده ورودی پرداخته شد.



شکل ۸-۲ - مکانیسم شیر توپی به صورت شماتیک

^۱ Ball valve

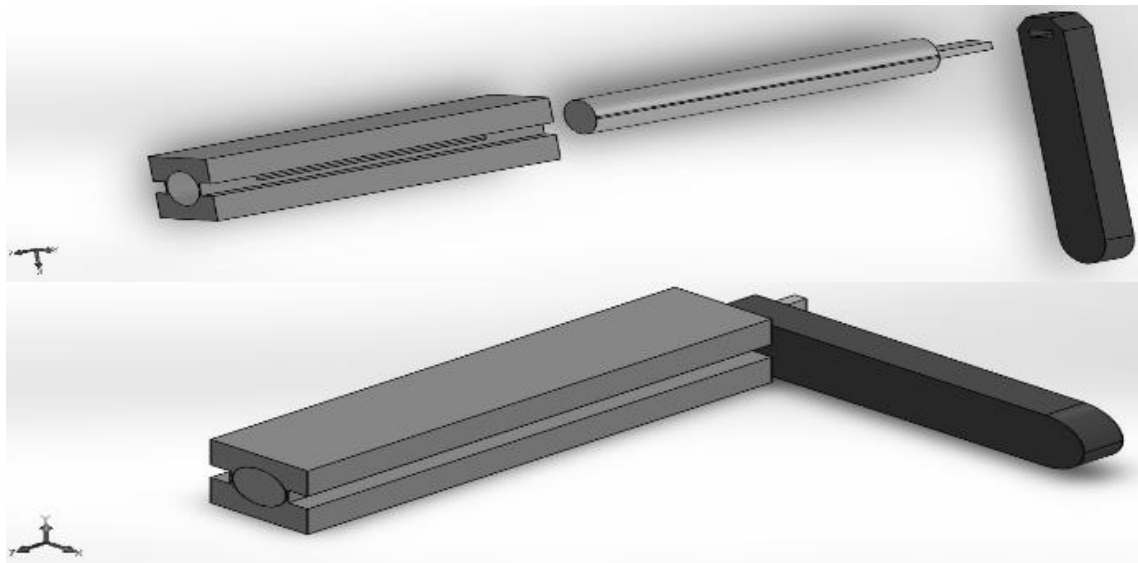
شیرهای توپی شیرهای ساده قطع و وصل هستند که از یک قطعه توپی شکل برای متوقف کردن و راه اندازی دبی سیال در پایین دست شیر استفاده می شود. با چرخش دسته شیر به سمت موقعیت باز شدن توپی چرخیده و سوراخی که در وسط آن تعبیه شده است در مسیر ورود و خروج سیال قرار می گیرد و در نتیجه سیال از شیر عبور می کند. وقتی که توپی طوری بچرخد که سوراخ آن عمود بر مسیر سیال قرار گیرد، دبی سیال متوقف می گردد. با همین ایده، یک ورودی جهت قرار دادن دو سیال در کنار هم و برر سی نحوه پیشرفت مرز مشترک از لحظه تزریق، طراحی شد. اجزای مورد نیاز برای این ورودی مطابق شکل ۹-۲، محفظه ای جهت قرارگیری توپی استوانه ای، توپی استوانه ای شیاردار و دستگیره چرخاننده توپی می باشند.



شکل ۹-۲ - اجزای شیر ورودی مورد استفاده (الف) محفظه جهت قرارگیری توپی (ب) توپی استوانه ای شیاردار (ج) دستگیره چرخاننده توپی

توپی استوانه ای، یک استوانه دارای شیار به ضخامت ۲ میلی متر می باشد که این شیار مستطیلی از هر طرف ۲ سانتی متر فاصله دارد تا شیار کاملاً روبه روی ورودی محفظه و سلول قرار بگیرد. خاری در قسمت انتهای آن برای چرخاندن داخل محفظه تعبیه شده است و دستگیره چرخاننده روی آن سوار می شود.

از ویژگی‌های مهم این ورودی، سیل و آب‌بند بودن آن است. به هیچ وجه در چرخش‌ها نباید ذره‌ای سیال به درز بین استوانه و محفظه نفوذ و از آن خارج شود. چون دبی جریان‌های مورد بررسی در این مطالعه بسیار پایین هستند خروج ذره‌ای سیال هم از دقت کار می‌کاهد. برای نیل به این مهم، از دستگاه‌های ابزاردقیق جهت تراش و فرزکاری این ورودی استفاده شد. با رعایت موارد فوق و طبق انتظار، ورودی در تمام آزمایشات کاملاً آب‌بند بود.



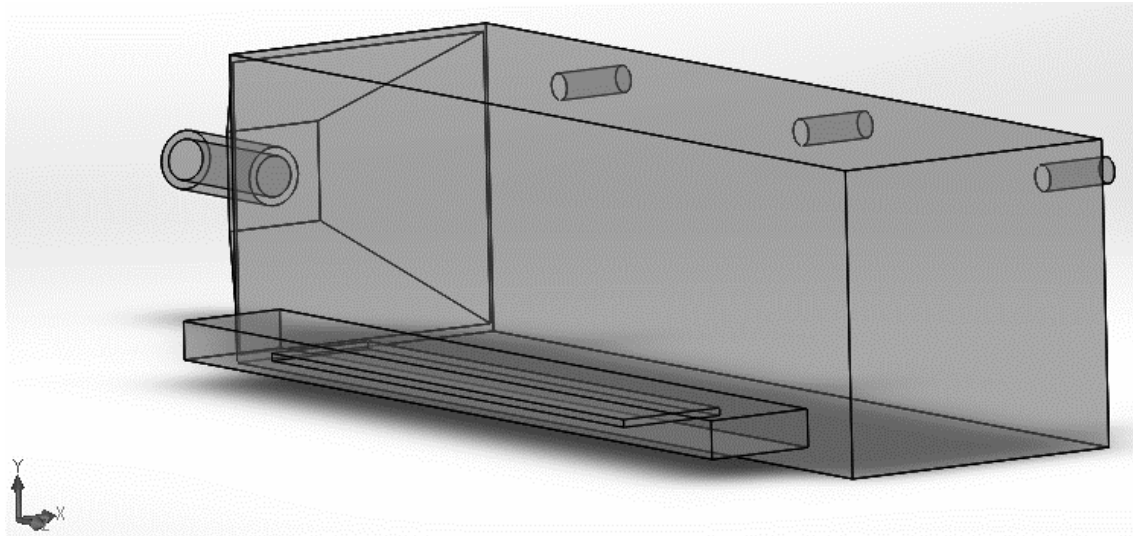
شکل ۲-۱۰ - قرارگیری و چینش اجزای شیر ورودی

۳-۲-۲ کلکتور^۱ ورودی

از آن‌جا که برای تزریق سیال به داخل سلول، از پمپ پریستالتیک استفاده می‌شود، برای تبدیل جریان از هندسه استوانه‌ای (شلنگ پمپ) به جریان یکنواخت و یک‌دست داخل کانال از یک کلکتور با سه ورودی بهره گرفته شد. مکانیسم کار این کلکتور به این صورت است که سیال از طریق سه مجرا از پشت کلکتور وارد آن می‌شود و از شیار جلوی کلکتور خارج می‌شود (شکل ۲-۱۱). ورودی و خروجی کلکتور در ارتفاعی برابر قرار ندارند و ورودی مجموعه در ارتفاعی بالاتر از خروجی قرار گرفته است. این

^۱ collector

موضوع به این علت است که اگر احیاناً به همراه سیال حبایی وارد مجموعه شد، در قسمت فوقانی کلکتور جمع می‌شود و وارد محیط مورد بررسی ما نمی‌شود.



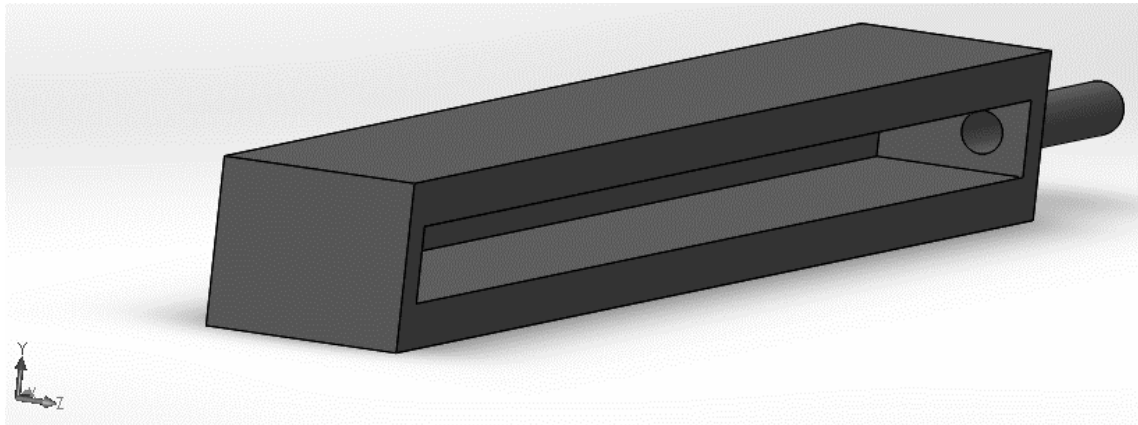
شکل ۱۱-۲ - نمایی شماتیک از کلکتور ورودی

همان‌طور که در شکل ۱۱-۲ هم مشاهده می‌شود، یک خروجی استوانه‌ای در انتهای کلکتور قرار گرفته است که وظیفه هواگیری را به عهده دارد. با قرار دادن یک شیر دو حالتی سر راه این خروجی هواگیری به خوبی انجام می‌گیرد. نحوه هواگیری، در ادامه و پس از معرفی تمام اجزای وسایل آزمایشگاهی به همراه نحوه انجام آزمایش توضیح داده خواهد شد.

در طراحی این کلکتور، دست یافتن به یک جریان یکنواخت و یک‌دست در خروجی، مهم‌ترین هدف بوده است. بنابراین ابعاد کلکتور و فواصل ورودی‌ها از یکدیگر، به گونه‌ای انتخاب شده است تا این مهم به خوبی تحقق یابد. فصل آینده در آزمایشی این موضوع به صورت مستند بررسی و نتایج آن گزارش شده است.

۴-۲-۲ خروجی سلول

در انتهای سلول نیز، یک جمع‌کننده سیال قرار داده شده است که هم مسیری برای خروج سیال در حین آزمایش است و هم یک ورودی برای پر کردن محیط از سیال جابجاشونده است. به همین منظور بین این مجرای استوانه‌ای خروجی و شلنگ متصل به آن، یک شیر توپی هم قرار گرفته است.

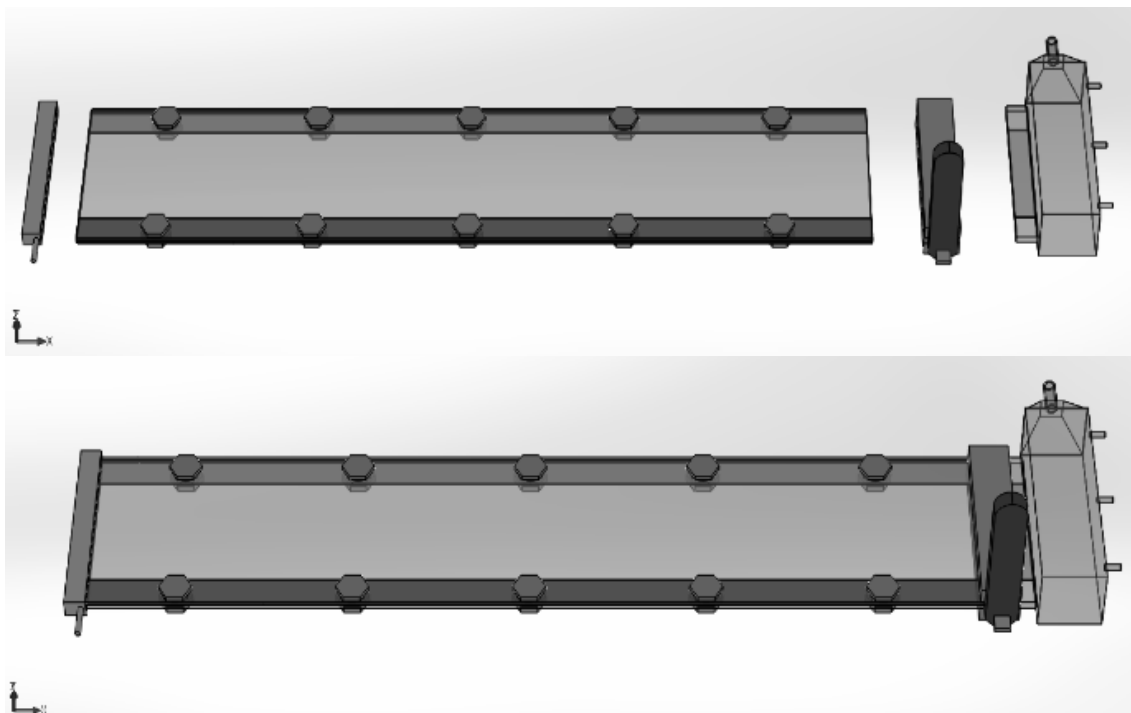


شکل ۲-۱۲ - نمای شماتیک خروجی سلول

۵-۲-۲ ستاپ^۱ آزمایشگاهی

با توضیحاتی که در شرح هر کدام از اجزاء آورده شد، نحوه و ترتیب قرارگیری قطعات تقریباً مشخص است. سیال جابجاکننده از پمپ وارد کلکتور می‌شود. سپس از شیر ورودی که در حالت باز قرار دارد، عبور کرده و به سیال داخل سلول برخورد و آن را به سمت انتهای سلول می‌راند. سیال داخل سلول از خروجی بیرون می‌رود. با این تفاسیر، ترتیب قرارگیری و شکل شماتیک ستاپ آزمایشگاهی به صورت شکل ۲-۱۳ می‌باشد که در آن، جهت جریان خلاف محور x است.

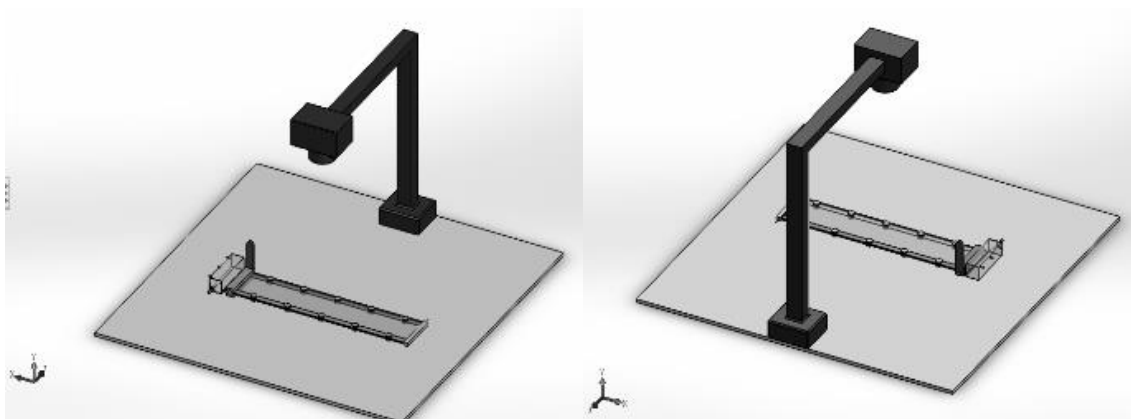
^۱ setup



شکل ۲-۱۳ - قرارگیری و چینش تمام اجزای سلول هل-شاو

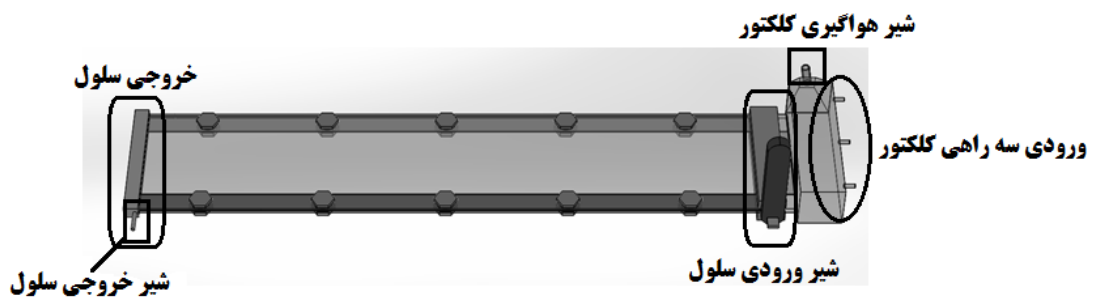
۲-۳ مراحل انجام آزمایش

به منظور انجام آزمایشات، دوربین کیفیت بالا را در ابتدای میز کار و توسط پایه آن کاملاً ثابت می‌کنیم. اگرچه با وجود تامین فشار توسط پمپ، نیروی گرانش اثرات جزئی بر تشدید یا تضعیف ناپایداری دارد، اما به جهت از بین بردن همین اثرات جزئی هم راهکاری در نظر گرفتیم. سلول را به صورت افقی و بر روی میز کار قرار می‌دهیم و از بالا تصاویر را ضبط می‌کنیم. این حالت به صورت شماتیک در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴ - نحوه قرارگیری سلول و دوربین نسبت به هم

ابتدا با استفاده از پمپ پریستالتیک و از قسمت خروجی، سلول را از سیال جابجاشونده پر می‌کنیم. در این حالت شیر ورودی سلول باز است. در این قسمت باید سلول را به حالت عمودی قرار داده تا در صورت ورود حباب به سلول، به قسمت فوقانی رفته و حبابی داخل سلول نماند. وقتی سلول، کاملاً پر شد و سیال از شیر ورودی عبور کرد، تزریق را متوقف کرده، شیر ورودی و شیر خروجی سلول را می‌بندیم و سلول را به حالت افقی در می‌آوریم. سپس پمپ را به قسمت ورودی برده و خروجی پمپ را به سه‌راهی کلکتور وصل می‌کنیم. سپس شیر هواگیری کلکتور را باز کرده و ابتدا درون کلکتور را کاملاً شستشو می‌دهیم تا از سیال جابجاشونده کاملاً تمیز شود. بعد از تعویض ظرف سیال و قرار دادن ظرف حاوی سیال جابجاکننده در ورودی پمپ با تنظیم دبی مورد نظر، شروع به تزریق سیال داخل کلکتور می‌کنیم. هنگامی که کلکتور کاملاً پر شد و همه حباب‌ها را از سیستم خارج کردیم، پمپ را متوقف کرده و شیر هواگیری کلکتور را می‌بندیم. در این وضعیت، دو سیال کاملاً در کنار هم قرار گرفته‌اند و به محض باز کردن شیر ورودی سلول، با هم برخورد می‌کنند.



شکل ۲-۱۵ - راهنمای اجزای سلول

در این حالت، دوربین تصویربرداری را روشن کرده، شیر خروجی سلول را باز می‌کنیم. سپس به طور تقریباً همزمان، پمپ را روشن و شیر ورودی سلول را در حالت باز قرار می‌دهیم. با این روند و در صورتی وجود اختلاف لزجت بین دو سیال، پدیده انگشتی لزج مشاهده می‌شود. با تغییر هر پارامتر، به راحتی اثرات آن قابل مطالعه می‌باشد.

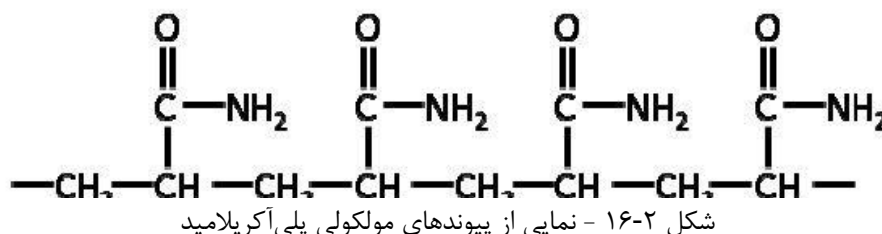
۲-۴ مواد مورد استفاده آزمایش

به منظور بررسی کامل اثرات الاستیک بر ناپایداری انگشتی لزج، باید اثرات لزجت را ثابت نگه داشت. این امر، کاری بس دشوار است. چون این دو عامل به شدت، روی هم اثر می‌گذارند. همان‌طور که در مقدمه نیز آمد، با استفاده از باگرها و فرمولاسیون خاص ساخت آن‌ها، این مشکل برطرف شده است. سیال‌های بررسی شده در این مطالعه، دو دسته هستند: ۱- سیالات نیوتنی که یا آب خالص هستند یا مخلوط آب و گلیسرین با درصد جرمی معلوم. ۲- محلول پلیمری با غلظت‌های پایین شامل پلی‌آکریلامید^۱.

۲-۴-۱ محلول پلیمری

یک بافت پلیمری را می‌توان مجموعه‌ای از ساختارهای کوچک دانست (مونومرها) که به تعداد بسیار زیادی این ساختار تکرار شده است. تولید پلیمر طی فرآیندی انجام می‌شود که پلیمریزاسیون^۲ نامیده می‌شود و دو نوع عمده آن تغلیظ^۳ و اضافه کردن^۴ می‌باشد. پلیمریزاسیون به روش اضافه کردن، وقتی اتفاق می‌افتد که یک رادیکال آزاد به ماده اضافه شود. رادیکال آزاد به موادی که اتصالات دوتایی دارند، حمله می‌کند تا تمام این اتصالات بشکنند و واکنش بین زنجیرهای پلیمری انجام شود. پلیمریزاسیون به روش تغلیظ به حالتی گفته می‌شود که دو مونومر در آب به هم متصل شوند.

پلیمریزاسیون رادیکال‌های آزاد مونومرهای آکریلامید در آب منجر به تولید پلی‌آکریلامید می‌شود.



^۱ Polyacrylamide

^۲ polymerization

^۳ condensation

^۴ Addition

این ماده در دسته پر کاربردترین پلیمرها در صنایع مختلف است. در اکثر موارد کاربردهای پلی آکریلامید، این ماده در یک ماده پایه آبی محلول است. این پلیمر به صورت پودری سفید رنگ و بدون بو موجود است و جرم مولکولی های 5×10^6 گرم بر مول و 2×10^7 گرم بر مول در آزمایشگاه موجود است که با انجام تست های ویسکومتری مختلف، نمونه دوم برای این کار انتخاب گردید.



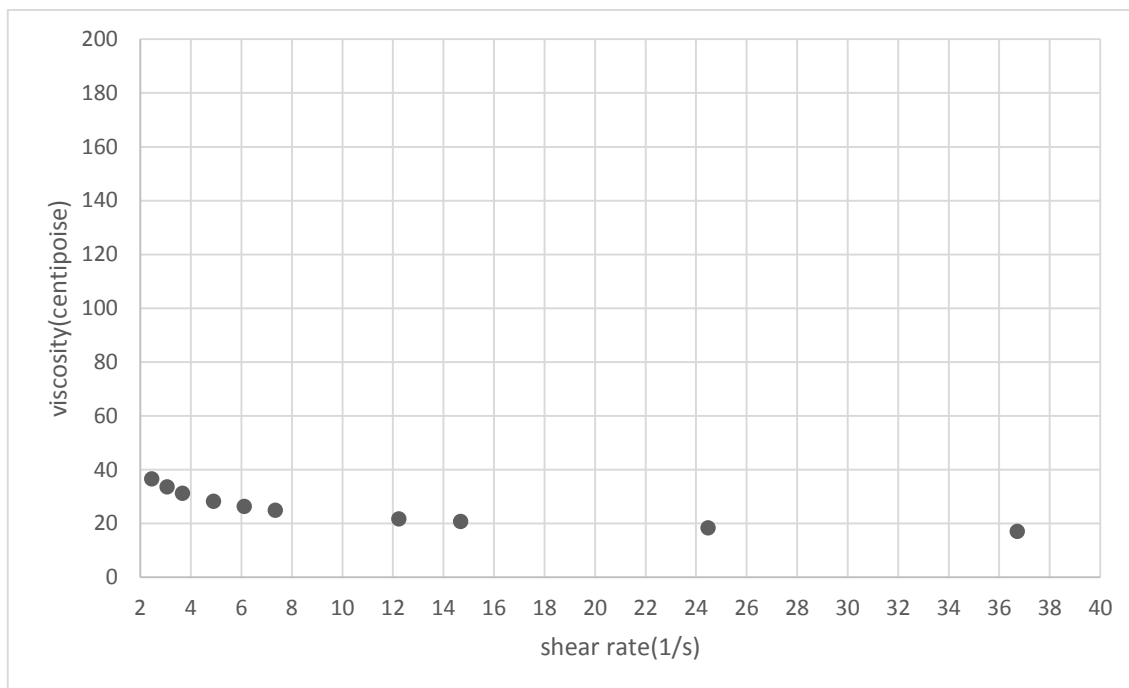
شکل ۲-۱۷ - حالت پودری پلی آکریلامید

در تمام آزمایش ها نیز، ابتدا غلظت مورد نظر از پلیمر در آب حل و سپس گلیسیرین کم کم به آن افزوده شده است. افزودن اندکی پلی آکریلامید به آب، موجب اندکی تغییر در لزجت و ایجاد خاصیت کشسانی می شود. گلیسیرین و آب به خوبی و به راحتی در یکدیگر حل می شوند. از گلیسیرین به عنوان عامل تنظیم لزجت استفاده می شود. شایان ذکر است، اگر ماده پلیمری به خوبی در آب حل نشده باشد، به آسانی قابل تشخیص نخواهد بود ولی با افزودن گلیسیرین، این ناهمگنی ها خود را به صورت رگه در محلول نمایان خواهند کرد.

۲-۵ سیال‌های منتخب آزمایشات

در این مطالعه قرار است پدیده انگشتی لزج در حضور اثرات الاستیک با حالتی که سیال‌ها نیوتنی هستند، مقایسه شود و همان‌طور که می‌دانیم عامل اساسی بروز این ناپایداری اختلاف لزجت بین دو سیال است. بنابراین هر سیال ویسکوالاستیک که انتخاب شود، باید یک سیال نیوتنی با ویسکوزیته برابر هم داشته باشد. از طرفی پدیده انگشتی لزج در اختلاف ویسکوزیته‌های کم، به وضوح دیده نمی‌شود. با در نظر گرفتن این نکته ویسکوزیته سیال‌های منتخب باید به گونه‌ای باشد که نکات فوق را رعایت کند. با عنایت به تمام موارد فوق و ساخت و نمونه‌گیری از بیش از ۵۰ سیال ساخته شده در آزمایشگاه، سه سیال پلیمری و معادل نیوتنی آن‌ها برای بررسی اثرات الاستیک انتخاب گردیدند که نتیجه تست ویسکوزیته بر حسب نرخ برش آن‌ها به همراه درصد ترکیب اجزای آن‌ها در زیر آمده است.

نمونه پلیمری اول: این نمونه از ترکیب ۰,۰۰۵٪ جرمی پلی‌آکریلامید 2×10^7 گرم بر مول در مخلوط آب و گلیسرین با نسبت ۵۰-۵۰ حجمی تشکیل شده است که طی ۲۴ ساعت و در همزن هات پلیت به صورت کاملاً همگن مخلوط شده‌اند. از این پس جهت راحتی، این ترکیب را با "پلیمر ۵۰" می‌شناسیم. شکل ۲-۱۸ نتیجه تست ویسکوزیته بر حسب نرخ برش این نمونه است که توسط ویسکومتر موجود در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است.



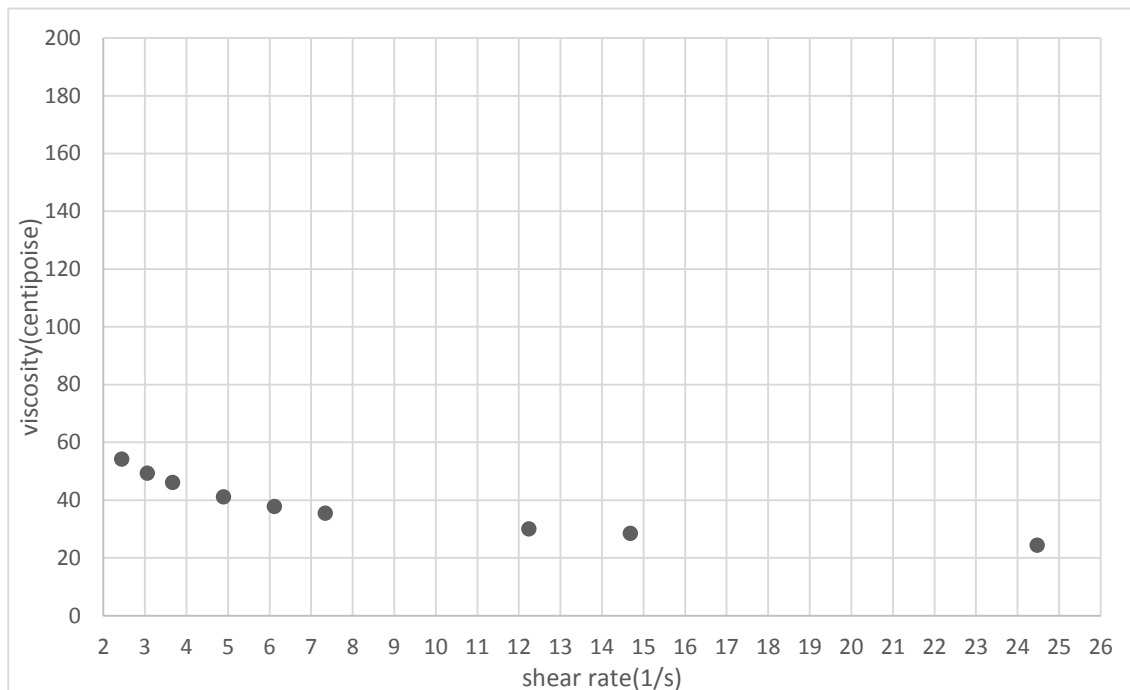
شکل ۲-۱۸ - ویسکوزیته بر حسب نرخ برش نمونه پلیمری اول

نظر به برقراری قوانین حاکم بر سلول هل-شاو، دبی آزمایش رینولدزهای کمی را تامین می‌کند. به همین دلیل انتخاب ویسکوزیته معادل برای سیال نیوتنی با تمرکز بر ویسکوزیته در ناحیه نرخ برش پایین انجام می‌گیرد. ویسکوزیته معادل این نمونه مقدار ۲۷ سانتی پواز است که با ترکیب گلیسیرین و آب با نسبت ۷۸٪ جرمی گلیسیرین به این ویسکوزیته خواهیم رسید.

جفت سیال پلیمری و نیوتنی منتخب اول: پلیمر ۵۰ - مخلوط گلیسیرین ۷۸٪

نمونه‌های بعدی نیز ترکیبی مشابه نمونه اول دارند فقط غلظت پلیمر در آن‌ها بیش‌تر است. عدد جلوی هر پلیمر نشانگر غلظت پلیمر است و واحد آن ppm می‌باشد.

نمونه دوم: "پلیمر ۱۰۰"

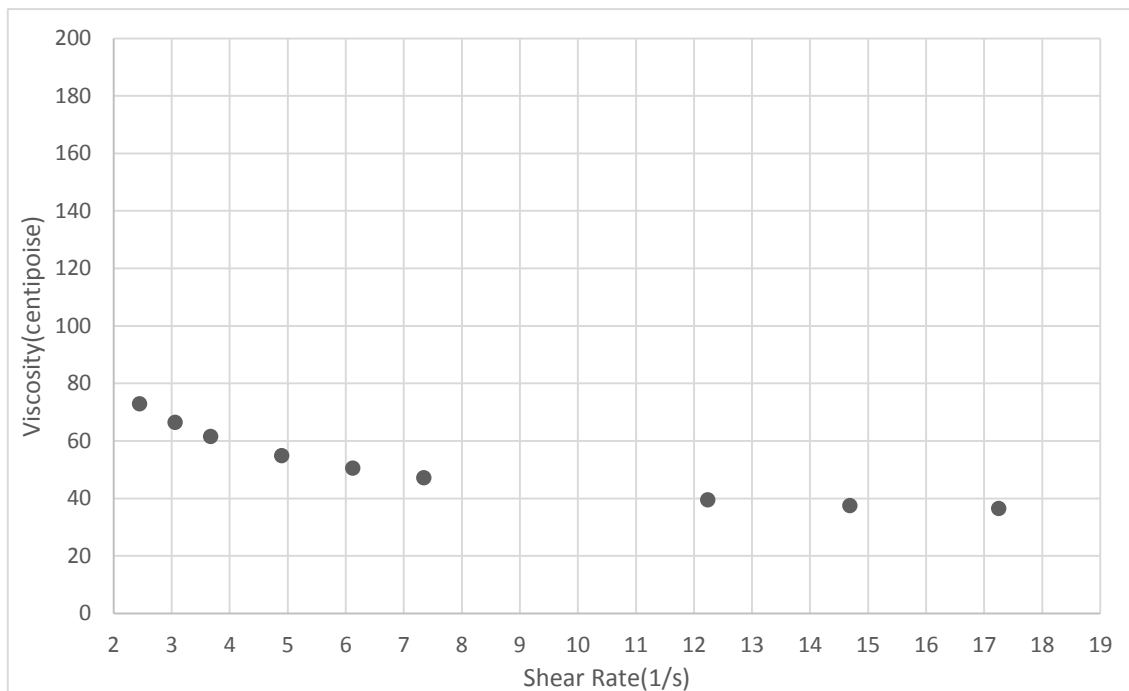


شکل ۱۹-۲ - ویسکوزیته بر حسب نرخ برش نمونه پلیمری دوم

ویسکوزیته معادل این نمونه ۴۲ سانتی پواز در نظر گرفته شده است که در گلیسیرین ۸۰٪ مشاهده می شود.

جفت سیال پلیمری و نیوتنی منتخب دوم: پلیمر ۱۰۰ - مخلوط گلیسیرین ۸۰٪

نمونه سوم: "پلیمر ۱۵۰"



شکل ۲-۲۰ - ویسکوزیته بر حسب نرخ برش نمونه پلیمری سوم

ویسکوزیته معادل این نمونه: ۵۸ سانتی پواز

جفت سیال پلیمری و نیوتنی منتخب سوم: پلیمر ۱۵۰ - مخلوط گلیسرین ۸۳,۵٪

ویسکوزیته درصد جرمی‌های مختلف گلیسرین و آب در جدول ۱-۲ آمده است.

جدول ۱-۲ - ویسکوزیته درصدهای مختلف جرمی گلیسرین

ردیف	درصد جرمی گلیسرین در ترکیب	ویسکوزیته (سانتی پواز)
۱	۲۰٪	۱,۵
۲	۳۰٪	۲,۱
۳	۹۰٪	۱۴۳,۵
۴	۹۱٪	۱۷۳

چند نکته :

- دبی خروجی پمپ برای هر سیال با هر ویسکوزیته‌ای مورد بررسی قرار گرفته است تا از یکسان بودن میزان سیال ورودی در هر دقیقه به سلول برای سیال‌های مختلف، اطمینان حاصل شود. یعنی هر سیال که درون پمپ ریخته شده، ابتدا در یک دقیقه حجم سیال پمپ‌شده توسط سرنگ، اندازه‌گیری و سپس آزمایشات انجام می‌شد.
- مخلوط‌های گلیسیرین در حجم نسبتاً زیاد درست شده‌اند تا خطای اپراتور به خطای وسایلی از قبیل سرنگ‌های آزمایشگاهی اضافه نشود و با سرنگ‌های مدرج ۱۰ میلی‌لیتری هم قابل برداشت باشند. هیچ حجمی زیر ۱ میلی‌لیتر برداشت نشده است و تقریبی در کار نبوده است. به عنوان مثال برای ساخت گلیسیرین ۸۳٫۵٪، سعی در این بوده تا حجمی از مخلوط تهیه شود که مقدار حجم گلیسیرین، عددی رند باشد و خطا به حداقل برسد.

۲-۵-۱ خاصیت الاستیک نمونه‌ها

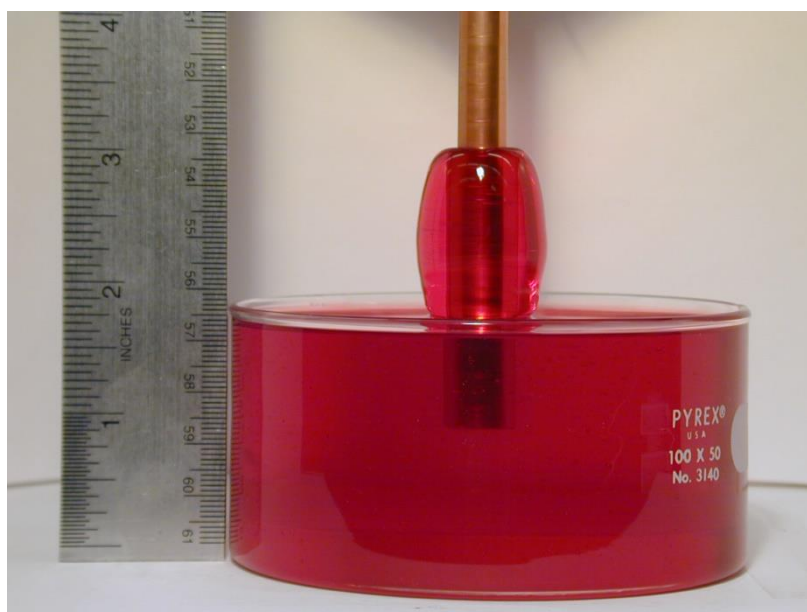
بالاروندگی^۱ رفتاری مختص به سیالات ویسکوالاستیک می‌باشد. هنگامی که یک میله چرخان را وارد ظرفی حاوی نیوتنی می‌کنید، سیال نزدیک میله به علت نیروهای گریز از مرکز به سمت خارج ظرف تمایل می‌یابد. در این حالت سیال اطراف میله فرو رفته و سیال نزدیک دیواره بالا می‌آید. این آزمایش برای سیالات ویسکوالاستیک، رفتاری متفاوت دارد. برای سیالات پلیمری، سیال رفتاری خلاف حالت نیوتنی دارد و سیال داخل ظرف به سمت مرکز ظرف گرایش پیدا می‌کند. این گرایش به حدی است که سیال نزدیک میله از آن بالا می‌رود و سیال نزدیک دیواره کمی فرو می‌رود. شکل ۲-۲۱ نشان‌گر این پدیده می‌باشد. این رفتار به دلیل وجود اختلاف تنش نرمال^۲ است. اگر معادلات حرکت را برای این پدیده بنویسیم و شرایط حاکم بر مسئله را اعمال کنیم، به رابطه (۲-۱) خواهیم رسید.

^۱ Rod climbing

^۲ Normal stress difference

$$\frac{d(\tau_{zz} + p)}{d(\ln r)} = 2\tau_{21} \frac{d}{d\tau_{21}} (\tau_{22} - \tau_{33}) + (\tau_{11} - \tau_{22}) + \rho v_1^2 \quad (2-2)$$

همان‌طور که در رابطه (۱-۲) مشاهده می‌کنید، ترم‌های $(\tau_{11} - \tau_{22})$ و $(\tau_{22} - \tau_{33})$ به ترتیب اختلاف تنش نرمال اول و اختلاف تنش نرمال دوم می‌باشند. البته اختلاف تنش نرمال اول اثر بیش‌تری در این پدیده دارد. هر چه میزان بالاروندگی سیال، بیش‌تر باشد، اختلاف تنش نرمال اول بالاتری دارد. در اکثر موادی که اختلاف تنش نرمال اول بالاتری دارند، معمولاً زمان‌هایی از تنش^۱ نیز بیش‌تر است.

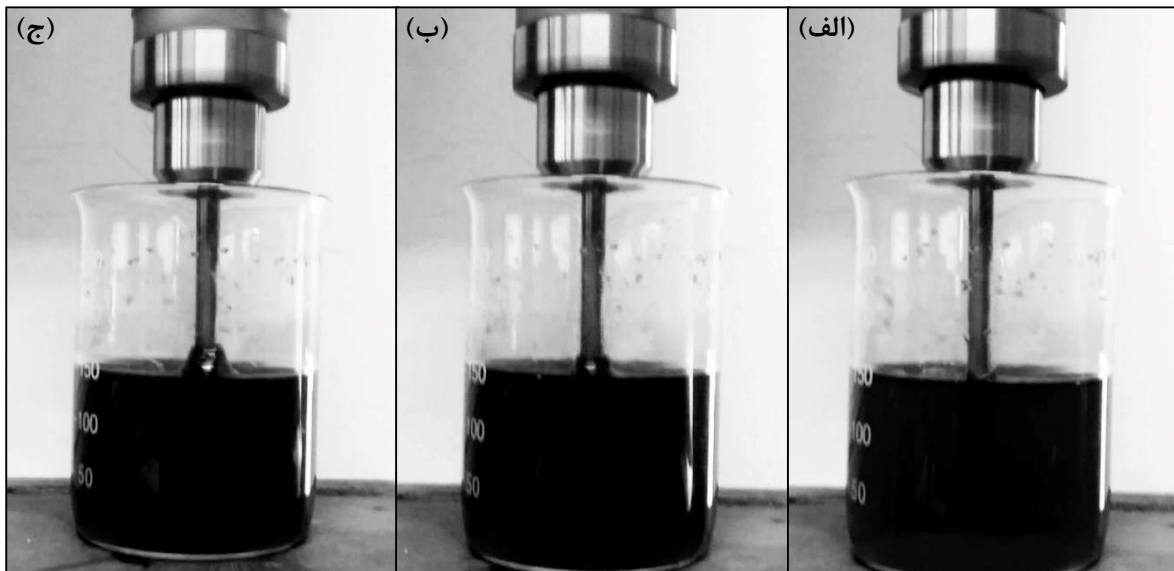


شکل ۲-۲۱ - پدیده بالاروندگی سیال ویسکوالاستیک

به منظور اطمینان از نحوه ساخت نمونه‌های معرفی شده در قسمت ۲-۵ و همچنین مقایسه خواص ویسکوالاستیک، آن‌ها را در معرض پدیده بالاروندگی قرار می‌دهیم. با مقایسه میزان بالاروندگی هر کدام، معیاری از خاصیت الاستیک آن‌ها به دست می‌آوریم. به این منظور از یک دریل با دور ثابت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه برای این آزمایش بهره می‌گیریم. دریل مخصوص سوراخ‌کاری می‌باشد و بر روی یک پایه متحرک قرار دارد. هر نمونه را درون بشری ریخته و زیر دریل قرار می‌دهیم. به جای مته از یک میله به قطر خارجی ۵ میلی‌متر استفاده کردیم. شکل ۲-۲۲ نتایج حاصل از آزمایش می‌باشد. از

^۱ Relaxation time

تکنیک‌های پردازش تصویر استفاده نمودیم و میزان بالاروندگی هر نمونه را با مقیاس‌بندی با ارتفاع بشر به دست آوردیم. میزان بالاروندگی پلیمرها در جدول ۲-۲ آمده است.



شکل ۲-۲ - پدیده بالاروندگی سیالات ویسکوالاستیک منتخب - (الف) پلیمر ۵۰ (ب) پلیمر ۱۰۰ (ج) پلیمر ۱۵۰

جدول ۲-۲ - میزان بالاروندگی نمونه‌های منتخب

میزان بالاروندگی (میلی‌متر)	نمونه
۲,۴	پلیمر ۵۰
۵,۹	پلیمر ۱۰۰
۹	پلیمر ۱۵۰

با عنایت به تمام موارد فوق، میزان الاستیسیته نمونه‌های ساخته شده، روندی افزایشی دارد و امکان بررسی اثر افزایش و کاهش الاستیسیته امکان‌پذیر است.

۳ فصل سوم:

نتایج و تحلیل آنها

در این فصل به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌پردازیم. البته قبل از این، از برقراری فرضیاتی که در فصول گذشته از آن صحبت و مسئله را بر پایه آن بنا کردیم، اطمینان حاصل می‌کنیم.

۱-۳ مروری بر شرایط حاکم بر مسئله

مسئله مورد بررسی ما، بررسی اثرات الاستیک بر ناپایداری انگشتی لزج در محیط متخلخل می‌باشد. به منظور بررسی اثرات الاستیک با معرفی سیال باگر و ساخت سه نمونه سیال با ویسکوزیته نسبتاً ثابت و غلظت‌های پلیمری متفاوت به افزایش اثرات الاستیک با ثابت نگه داشتن اثرات لزجت پرداختیم. سپس با معرفی سلول هل-شاو و قرار دادن این شرط که اگر جریان در این سلول رینولدزهای پایین داشته باشد، معادله حاکم بر آن همان معادله حاکم بر محیط متخلخل (معادله داریسی) خواهد بود، یک محیط متخلخل قابل مشاهده تعریف کردیم. بالاترین دبی برای سیال با کم‌ترین ویسکوزیته در این آزمایشات رینولدزی برابر ۷ را تجربه کرده است که تقریب مناسبی است (البته چون در تمام ترکیب‌ها در صد غالب را آب و گلیسیرین تشکیل داده‌اند و چگالی این دو سیال هم بسیار نزدیک به هم است، از اثر چگالی در مقایسه رینولدزها صرف‌نظر شده است). حال کافی است از یکنواخت بودن سلول ساخته شده در همه نقاط اطمینان حاصل کنیم.

۳-۱ پارامترهای ارزیابی نتایج

در ادامه و قبل از ارائه نتایج، دو پارامتر اصلی و یک پارامتر کمکی را جهت تحلیل نتایج معرفی و چگونگی اندازه‌گیری آن‌ها در آزمایشات را شرح خواهیم داد.

۳-۱-۱ طول اختلاط^۱

میزان ناحیه مخلوط شدن دو سیال درگیر در جابجایی مخلوط‌شدنی را طول اختلاط می‌گویند. به عبارتی ساده‌تر طول اختلاط را می‌توان میزان پیشرفت سیال با ویسکوزیته کمتر درون سیال با

^۱ Mixing length

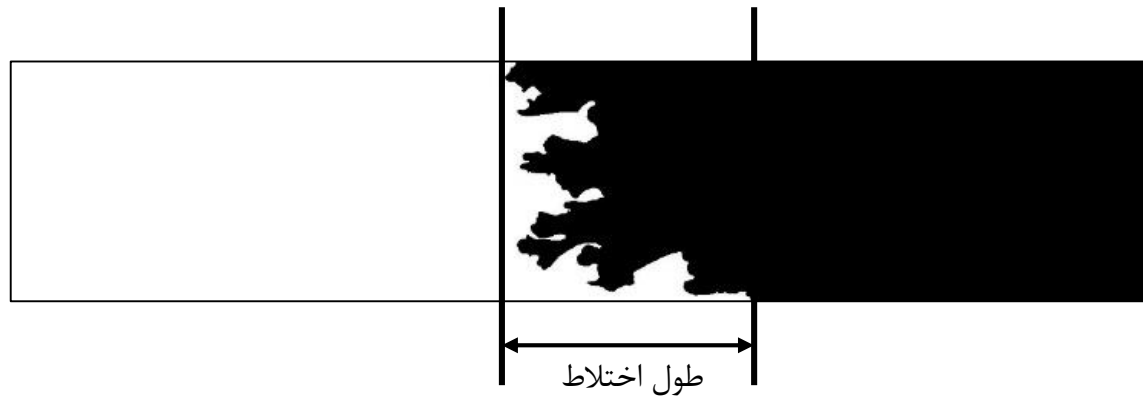
ویسکوزیته بیش‌تر، تعریف کرد. از این کمیت در ناپایداری انگشتی برای بیان مقدار پیشرفت و حرکت انگشتی‌ها در محیط متخلخل استفاده می‌شود. بدست آوردن طول اختلاط یک ایده‌ی بسیار خوب به محققین برای پیدا کردن نقطه‌ی حمله انگشتی‌ها ارائه می‌دهد. در حقیقت بیش‌ترین طول اختلاط بدست آمده، نشان‌دهنده بزرگ‌ترین طول انگشتی در ناحیه متخلخل مورد نظر می‌باشد.

برای یک جابجایی پایدار این طول متناسب با $t^{1/2}$ می‌باشد. در جابجایی‌های ناپایدار نیز در زمان‌های اولیه شروع جریان که هنوز اغتشاشات کم‌توان هستند، این طول متناسب با $t^{1/2}$ می‌باشد ولی با گذشت زمان و رشد انگشتی‌ها، طول اختلاط تابعی پیچیده بر حسب زمان می‌شود. بر همین اساس مطالعاتی زیادی در مورد چگونگی رفتار این کمیت بر حسب زمان در حالت‌های متفاوت انجام گرفته و معادلات گوناگونی برای آن گزارش شده است. کوال و همکاران [۱۰] در مدل یک‌بعدی خود، برای این کمیت یک رابطه خطی با زمان در نظر گرفتند و نتایج بدست آمده از این فرض را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. همچنین پرکینس [۳۰] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی توانست رابطه‌ای را بر نتایج بدست آمده منطبق کند و در حالت‌های متفاوت بعدی که امکان مدل سازی آزمایشگاهی وجود نداشت، از آن استفاده کند. علاوه بر این، تن و هومسی [۱۴] نیز طول اختلاط را در جابجایی‌های نیوتنی برای حالت‌های متفاوت بدست آورده و نتیجه گرفتند که به ازای مقادیر بسیار بزرگ از عدد پکلت این طول وابستگی خود را به عدد پکلت از دست می‌دهد. این دو همچنین مشاهده کردند که اگر اغتشاشات اولیه کوچک باشند، طول اختلاط ابتدا با $t^{1/2}$ تغییر می‌کند ولی پس از آن با رشد انگشتی‌ها رابطه‌ای خطی با t پیدا خواهد کرد. مطالعات انجام شده توسط این دو نویسنده با تحقیقات زیمرمن و هومسی [۴۲] ادامه یافت. این دو متوجه شدند که رفتار این کمیت برای بخش زیادی از حالت‌های جابجایی مورد آزمایش، تا زمان ۱۵۰ ثانیه تقریباً یکسان می‌باشد و پس از آن تغییرات در مقادیر بدست آمده محسوس خواهد شد. پس از این دو نیز، راگرسون و میبورگ [۶] پی بردند که اگرچه در تحقیقات خود برش‌های مماسی متفاوتی به سیستم اعمال می‌کنند ولی تغییرات طول اختلاط همانند نتایج بدست آمده زیمرمن و هومسی، تا زمان ۱۵۰ ثانیه تقریباً یکسان می‌باشد.

تغییرات طول اختلاط را بر حسب زمان برای حالت‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان طور که در نمودارها قابل مشاهده است، می‌توان دو بخش که دارای نرخ رشدهای یکسان می‌باشند را از هم مجزا کرد. طول اختلاط برای زمان‌های کمتر از ۱۵۰ ثانیه که در آن فرایند پخش سیال با ویسکوزیته کمتر در سیال با ویسکوزیته بیش‌تر حاکم است و طول اختلاط برای زمان‌های بعد از ۱۵۰ ثانیه که در آن رشد انگشتی‌ها موجب افزایش طول اختلاط می‌شود. میزان تفاوت افزایش در رشد طول اختلاط در این دو ناحیه بر اساس مطالعاتی که تن و هومسی [۱۴] انجام دادند ۱/۵ برابر می‌باشد. علاوه بر این نتایج، مشاهده می‌شود در حالتی که سیال غیریوتنی، سیال نیوتنی را جابجا می‌کند طول اختلاط کمتر از جابجایی نیوتنی می‌باشد در حالی که در حالت عکس آن، این مقدار بیش‌تر از حالت جابجایی نیوتنی است. این رخداد به صورت زیر قابل شرح است: در حالتی که یک سیال غیریوتنی سیال نیوتنی را جابجا می‌کند، ویسکوزیته سیال باریک شونده جابجا کننده، با زمان کاهش می‌یابد که در نتیجه آن نسبت تحرک افزایش می‌یابد. این افزایش در نسبت تحرک موجب افزایش نرخ رشد انگشتی‌ها و به تبع آن افزایش طول اختلاط خواهد شد. بررسی طول اختلاط علاوه بر موارد ذکر شده، بر اساس تغییرات لگاریتم نسبت تحرک R نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. همان‌طور که می‌دانیم هر چه R بزرگ‌تر باشد، ناپایداری انگشتی سریع‌تر شروع شده و با سرعت بیش‌تری به رشد خود ادامه می‌دهد. با توجه به همین علت، طول اختلاط نیز در R بزرگ‌تر، بیش‌تر خواهد بود.

برای محاسبه طول اختلاط در تصاویر باینری و با ایجاد یک حلقه شرطی و جارو کردن کل تصویر به صورت ستونی، فاصله اولین ستونی که در آن درایه صفر وجود دارد از آخرین ستونی که در آن درایه یک وجود دارد محاسبه شد. خط‌کش‌های راهنمای روی سلول، جهت محاسبه ضریب تبدیل اندازه استفاده شده‌اند. به این صورت که در فیلم ضبط شده از هر آزمایش طول ۱ سانتی‌متر از خط‌کش بریده شده و اندازه تصویر حاصل بر حسب پیکسل به دست آمده است. حال در محاسبات ضریب تبدیل اندازه، حاصل تقسیم ۱ سانتی‌متر بر تعداد پیکسل موجود در ۱ سانتی‌متر خواهد بود. فاصله

اختلاط به دست آمده بر حسب تعداد پیکسل در ضریب تبدیل اندازه ضرب و طول اختلاط بر حسب سانتی متر گزارش شده است. فاصله علامت گذاری شده در شکل ۱-۳ ، نمایان گر طول اختلاط می باشد.



شکل ۱-۳ - شماتیک تعریف طول اختلاط

نقطه مطلوب این پارامتر برای اکثر محققین، طول اختلاط صفر است. یعنی سیال جابجاکننده تمام سیال جابجاشونده را، انتقال داده است. هر چه این عدد مقدار کمتری داشته باشد، نتیجه حاصل مطلوب تر خواهد بود (البته چون بیش ترین کاربرد موضوع مطالعه حاضر، متوجه استخراج ثانویه و ثالثیه از مخازن نفتی می باشد، تحلیل های فیزیکی نیز با عنایت به این امر انجام پذیرفته است در غیراینصورت در کاربردهای دیگر مانند فرآیندهای اختلاط دو یا چند سیال، ممکن است نقطه مطلوب به گونه دیگری تعریف شود). در محاسبات طول اختلاط را با طول سلول بی بعد کرده ایم.

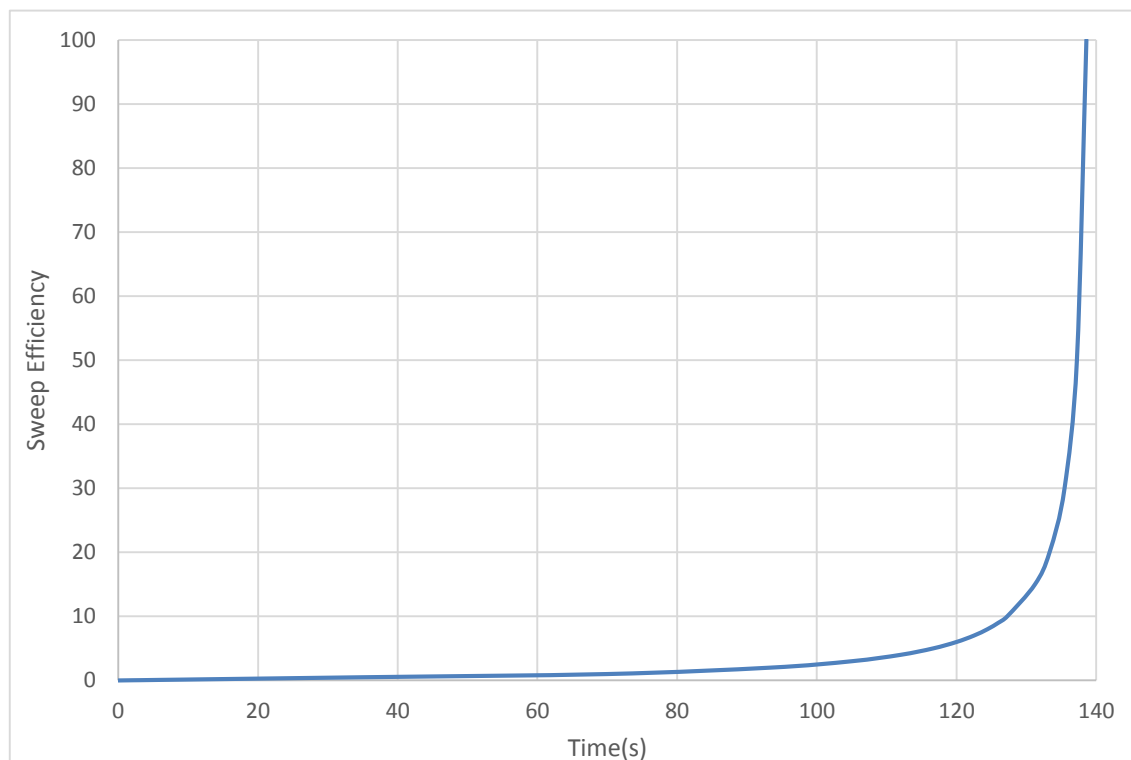
۳-۱-۲ بازده جاروبی^۱

حجم سیال جابجا شده در یک محیط متخلخل نسبت به حجم کل موجود از آن سیال در محیط متخلخل را بازده جاروبی می‌گویند. این بازده بنا به کاربردهای متفاوتی که دارد در چند نوع مختلف تعریف می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به بازده جاروبی عمودی، بازده جاروبی سطحی و بازده جاروبی واقعی اشاره کرد. در صنایع مربوط به نفت و استخراج آن، این بازده به صورت نسبت حجم کل مواد هیدروکربنی موجود در مخزن به حجم جاروب شده از این مواد هیدروکربنی توسط یک سیال تزریقی، تعریف می‌شود و معمولاً از آن به عنوان پارامتری که میزان بهره‌وری روش استخراجی را تعیین می‌کند، استفاده می‌شود. این پارامتر در بررسی ناپایداری انگشتی، نشان‌دهنده رشد انگشتی‌ها در محیط متخلخل می‌باشد.

این پارامتر در تحقیق حاضر از تقسیم تعداد درایه‌ها با مقدار صفر (یعنی حجم سیال جابجاکننده) بر درایه‌هایی با مقدار یک (حجم سیال جابجاشونده) به دست آمده است. البته محاسبه تمام پارامترها تا زمانی انجام شده است که سیال جابجاکننده به انتهای سلول نرسیده باشد و به محض اینکه هرگونه اثری از سیال جابجاکننده در خروجی مشاهده شده، تصویربرداری متوقف شده است. این لحظه نشانگر یک استخراج کاربردی و خالص است و تلاش تمام محققین برای بررسی خواص موارد مختلف برای به تاخیر انداختن این لحظه می‌باشد. در یک دبی مدنظر، هر چه این لحظه دیرتر اتفاق بیفتد، بازده جاروبی مقدار بیش‌تری اتخاذ خواهد کرد. نمودارهای بازده جاروبی بر حسب زمان رسم می‌شوند. بیش‌ترین بازده جاروبی تا لحظه رسیدن انگشتی به خروجی، معیاری از بازده استخراج خواهد بود. نمودار مطلوب بازده جاروبی وقتی که ناپایداری انگشتی لزج اتفاق نیفتد و مرز مشترک دو سیال به صورت یک خط تا انتها باقی بماند، دارای یک مجانب قائم می‌باشد. البته این مجانب بر حسب دبی‌های

^۱ Sweep efficiency

مختلف، جایگاه متفاوتی خواهد داشت. به عنوان مثال برای دبی $12 \frac{mL}{min}$ که بیشترین کاربرد را در آزمایشات ما داشته است، نمودار دقیق نقطه مطلوب برای بازده جارویی به شکل زیر خواهد بود:



شکل ۲-۳ - بازده جارویی ماکزیمم و در عدم رخداد انگشتی لزج برای دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه

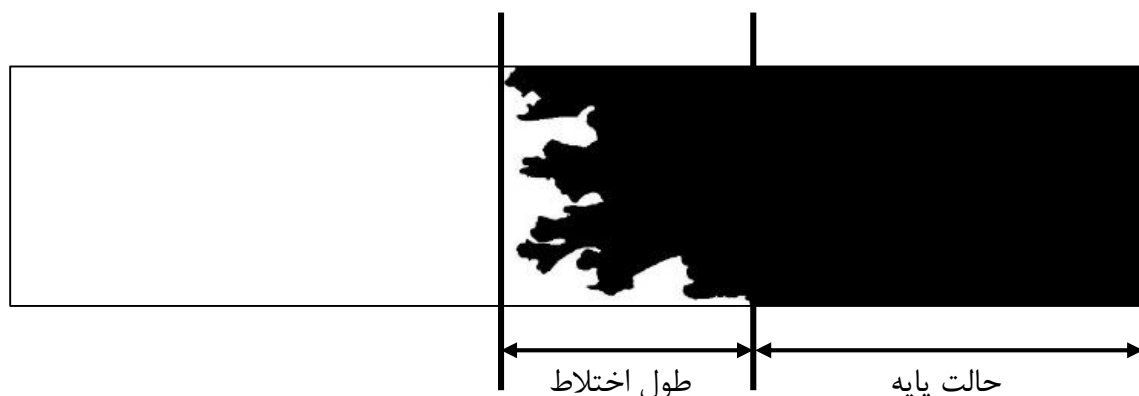
در شکل ۲-۳ چند نقطه قابل ذکر است:

- طول سلول، برای محاسبه نمودار فوق و به منظور رند بودن اعداد، ۳۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است. با دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه و یک شکاف به عرض ۱ میلی متر و طول ۸ سانتی متر سرعت متوسط خطی پیشرفت سیال ۰,۰۰۲۵ متر بر ثانیه به دست می آید و زمان جاروب کردن کل سلول ۱۴۰ ثانیه به دست خواهد آمد. مجانب قائم همیشه بر روی این زمان قرار دارد.
- همانطور که از نمودار هم قابل برداشت است، شیب این مولفه برحسب زمان ابتدا کم و سپس زیاد می شود. وقتی مرز مشترک دو سیال به نیمه برسد، بازده جارویی برابر ۱ می شود و از آن به بعد میزان پیشرفت مقادیر زیاد می شود. شاید میزان سیال جابجا شده برای سلول ما در

بازده جارویی ۵۰ و ۱۰۰ زیاد با هم تفاوت نداشته باشد اما در ابعاد مخازن نفتی، مقادیر نزدیک بازده‌های جارویی نیز تفاوت زیادی در استخراج خواهند داشت. بنابراین تلاش برای کشف ویژگی‌هایی که این معیار را افزایش دهند، تلاشی بسیار کاربردی برای کمک به صنعت کشور خواهد بود.

۳-۱-۳ نسبت رشد نويز به حالت پایه

پارامتری را در این تحقیق به عنوان پارامتر کمکی معرفی می‌کنیم که نسبت سرعت رشد انگشتی‌ها به رشد حالت پایه^۱ نشان می‌دهد. حالت پایه جایی است که سیال جابجاکننده در کل مقطع کانال حضور دارد و از آنجا به بعد طول اختلاط محاسبه می‌شود. در شکل ۳-۳ حالت پایه به صورت شماتیک نشان داده شده است.



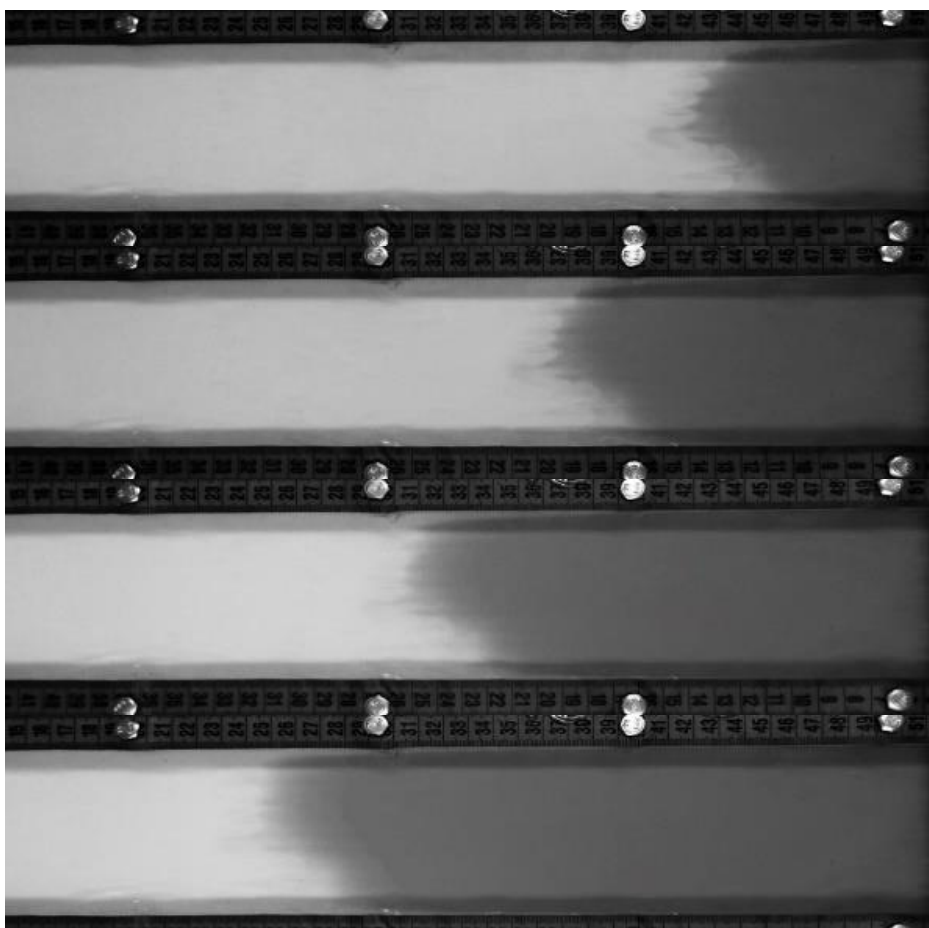
شکل ۳-۳ - شماتیک تعریف حالت پایه

نسبت طول اختلاط به حالت پایه را به عنوان نسبت رشد نويز به حالت پایه معرفی و میزان آن را در بعضی آزمایش‌ها، گزارش می‌کنیم. این پارامتر از طرفی همان طول اختلاط است که با حالت پایه بی‌بعد شده است. این نسبت بیش‌تر برای سنجش رفتار حالت پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انتهای فصل، با این پارامتر بحثی پیرامون نتایج ارائه خواهیم کرد.

^۱ Base state

۲-۳ صحت سنجی ستاپ آزمایشگاهی

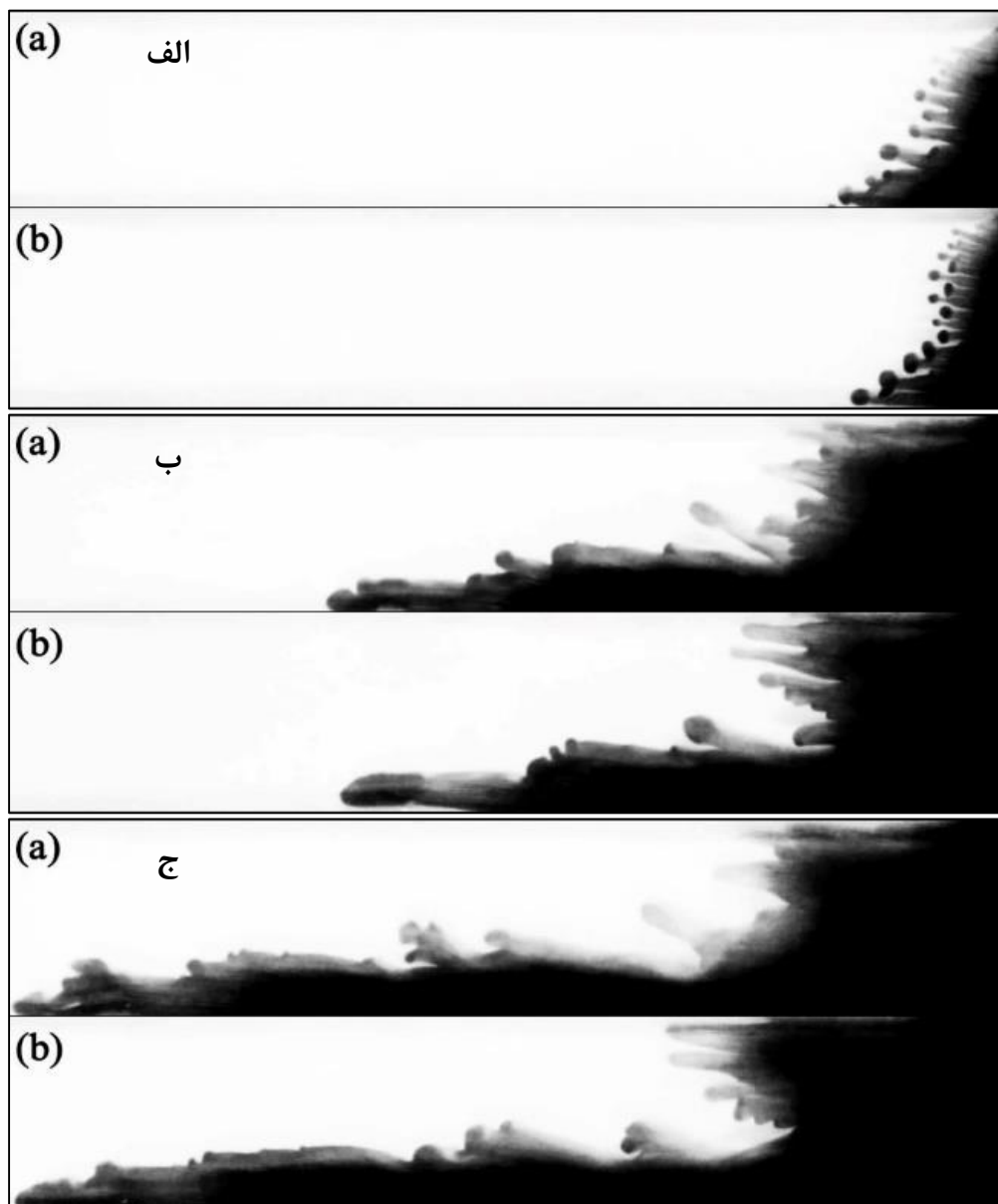
منظور اطمینان مضاعف از یکنواخت ساختن سلول، آزمایشی را طراحی نمودیم تا بررسی کنیم آیا فاصله موجود بین دو صفحه در سلول در همه نقاط یکسان است و جریان یکدست طی مسیر می‌کند یا خیر. به این منظور سلول را از آب مقطر پر نمودیم. سپس در ظرفی دیگر، مقداری رنگ خوراکی با آب مخلوط نمودیم و این مخلوط را که ویسکوزیته‌ای برابر با آب دارد را در سلول تزریق کردیم. نتیجه حاصل، پیشرفت جبهه سیال رنگی همانند شکل ۳-۴ است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، در فواصل زمانی یکسان، میزان جابجایی سیال برابر است. بنابراین سلول کاملاً یکنواخت و جریان یکدست می‌باشد.



شکل ۳-۴ - صحت سنجی موازی بودن سلول در تمام نقاط- ثبت تصاویر در لحظات ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ثانیه

۳-۳ تکرارپذیری^۱ آزمایش

دقت بدست آمده تحت شرایط یکسان، با روشها و تجهیزات یکسان است که توسط یک اپراتور بر روی نمونه‌های معادل بدست آمده است. با تعریف فوق، یک آزمایش را در شرایط یکسان و با نمونه‌های یکسان و ساخته شده در زمان‌های مختلف، تکرار کرده‌ایم و نتایج را به صورت شکل ۳-۵ و در لحظات یکسان آورده‌ایم.



شکل ۳-۵ - تست تکرارپذیری - (a) تزریق آب در گلیسرین ۸۳,۵٪ با دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه (b) تکرار آزمایش (الف) لحظه $t=13s$ (ب) $t=33s$ (ج) $t=47s$

^۱ Repeatability

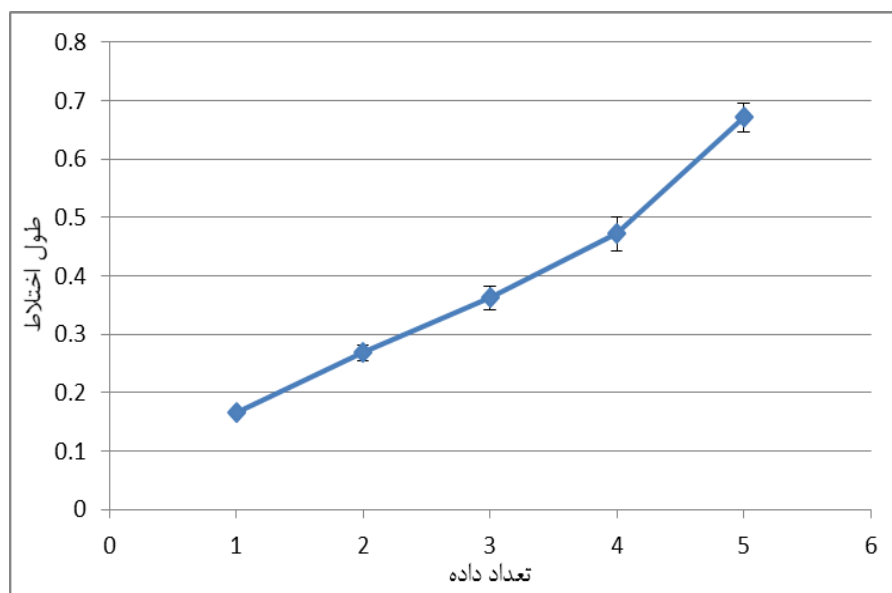
همانطور که در شکل‌های فوق قابل مشاهده است، مکانیسم و پارامترهای مهم از قبیل طول اختلاط و بازده جاروبی برای این آزمایش در دو حالت یکسان است.

۱-۳-۳ بازه اطمینان^۱

فاصله‌ای است که به احتمال زیاد، واقعیت در آن بازه اتفاق می‌افتد. این فاصله در اکثر مطالعات، ۹۰٪ گزارش شده است به این معنی که اگر مطالعه مورد نظر ۱۰۰ بار تکرار شود، ۹۰ بار آن همین محدوده به دست خواهد آمد. مقدار بازه خطا بر مبنای این پارامتر، طبق رابطه (۱-۳) محاسبه می‌شود:

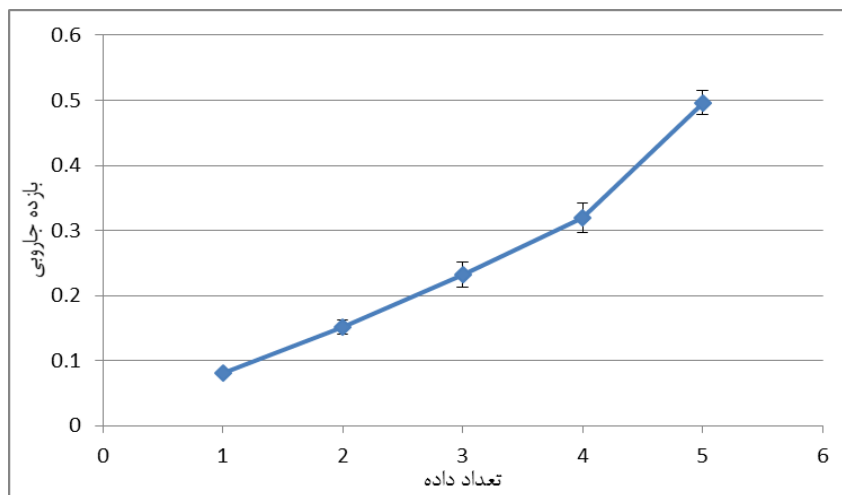
$$Er = \pm z_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (1-3)$$

که در آن N تعداد نمونه، σ انحراف معیار و $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ ضریبی است که براساس میزان بازه اطمینان و تعداد آزمایش مشخص می‌شود که برای آزمایش ما براساس بازه ۹۰٪ و ۲ آزمایش برابر ۱,۸۸۶ می‌باشد. این پارامتر برای طول اختلاط و بازده جاروبی، با نمونه‌گیری از قسمت‌های مختلف به صورت است. ماکزیمم خطای محاسبه شده طول اختلاط و بازده جاروبی به ترتیب ۳٪ و ۳,۲٪ می‌باشد.



شکل ۳-۶ - بازه اطمینان طول اختلاط برای ۵ نمونه مختلف

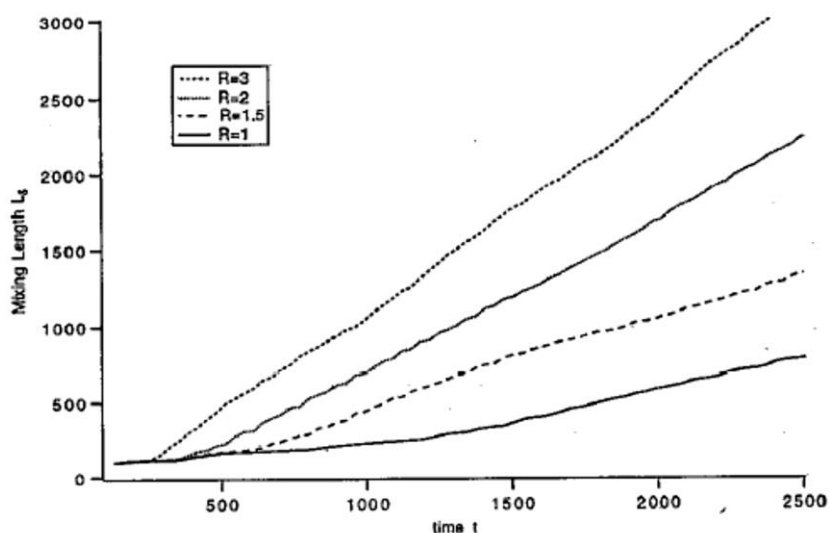
^۱ Confidence interval



شکل ۳-۷ - بازه اطمینان بازده جارویی برای ۵ نمونه مختلف

۳-۴ صحت سنجی نتایج نیوتنی

نتایج گزارش شده تا بدین لحظه در مورد ناپایداری انگشتی لزج و در عدم حضور عوامل غیرنیوتنی، حاکی از آن است که در دبی ثابت این پدیده تنها به نسبت ویسکوزیته دو سیال بستگی دارد به طوری که با افزایش این ضریب پدیده تشدید و با کاهش آن تضعیف می‌گردد. این موضوع را زیمرمن و هومسی [۴۳] در نتایج خود گزارش نموده‌اند. آن‌ها با تعریف نسبت ویسکوزیته طبق رابطه (۳-۱) حاصل شبیه‌سازی عددی خود را به صورت زیر گزارش نمودند:

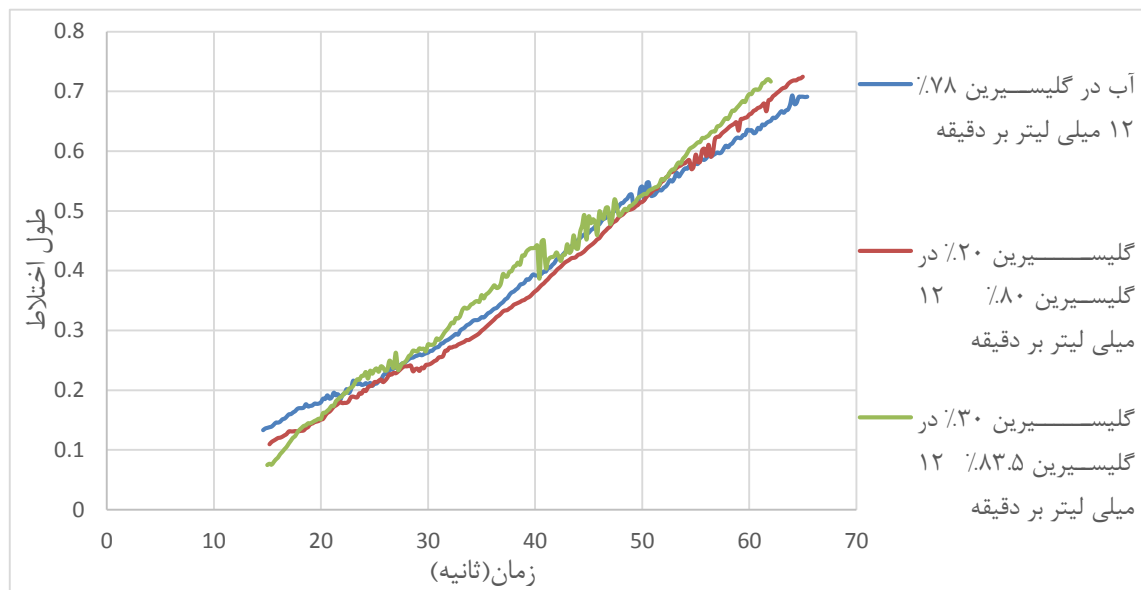


شکل ۳-۸ - طول اختلاط بر حسب زمان در $Pe = 8000$ و بر حسب نسبت ویسکوزیته‌های مختلف

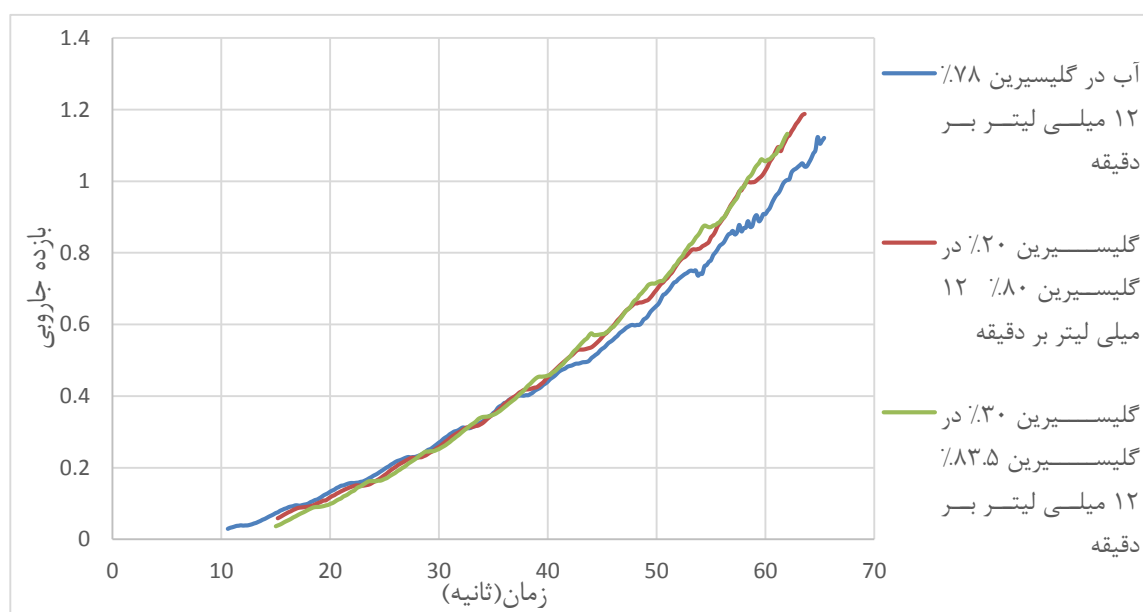
البته این موضوع بارها در کارهای دیگران نیز گزارش شده است. این اصل را در مورد سیالات نیوتنی و با سلول هل-شاو ساخته شده تحقیق نموده و نتایج را به صورت زیر آورده‌ایم.

۱-۴-۳ اثر ثابت ماندن نسبت ویسکوزیته

با ثابت نگه داشتن نسبت ویسکوزیته در مورد جابجایی سیالات نیوتنی، طول اختلاط ثابت می‌ماند.



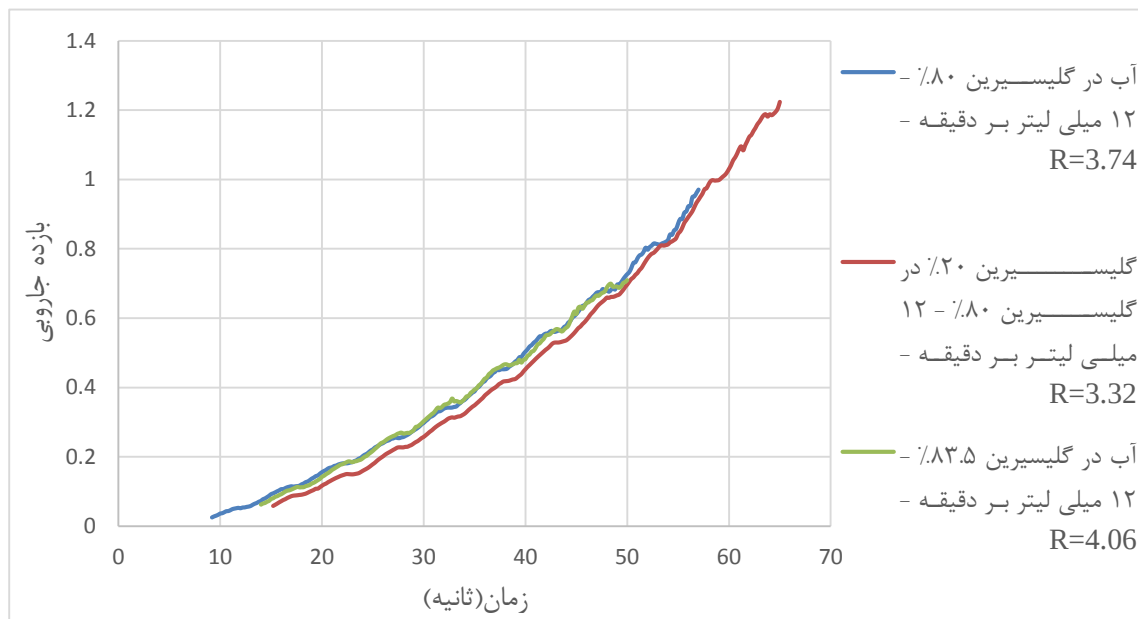
شکل ۱۰-۳ - طول اختلاط بر حسب زمان در $R=3.32$ و دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه



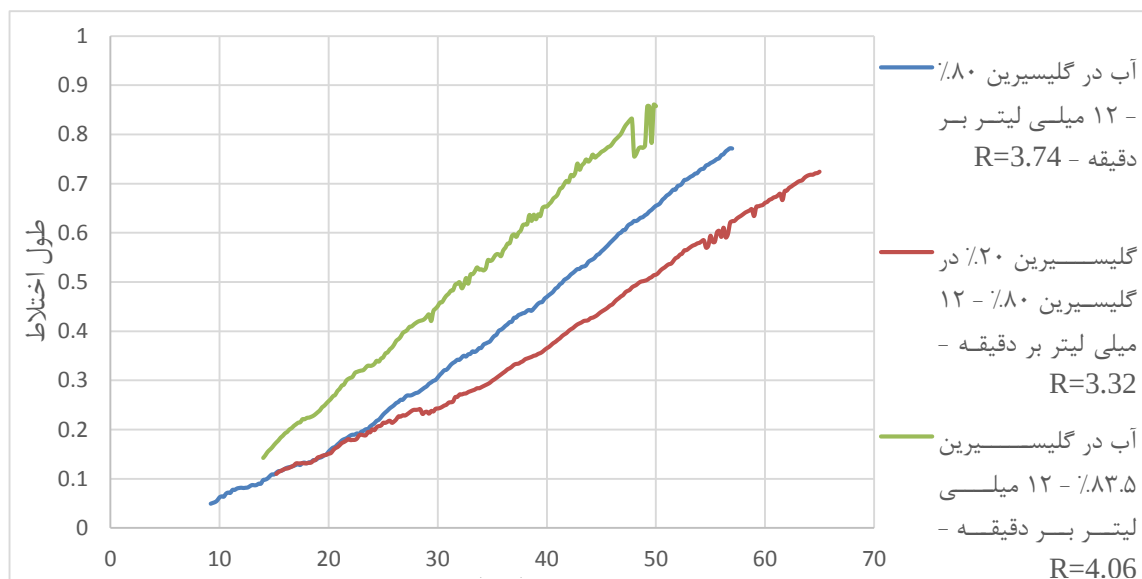
شکل ۹-۳ - بازده جاروبی بر حسب زمان در $R=3.32$ و دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه

۳-۴-۲ اثر افزایش نسبت ویسکوزیته

همان‌طور که پیش‌تر هم آمد، با افزایش نسبت ویسکوزیته طول اختلاط افزایش می‌یابد. در مورد میزان این افزایش، ذکر شد که تاکنون نتیجه کاملی حاصل نشده است و اکثر نتایج به صورت کیفی هستند. در این مطالعه نیز به صورت کیفی و برای سه مورد این اصل را تحقیق کرده‌ایم.



شکل ۳-۱۲ - تغییرات بازده جارویی در اثر افزایش نسبت ویسکوزیته و ثابت نگه داشتن بقیه شرایط



شکل ۳-۱۱ - تغییرات طول اختلاط با افزایش نسبت ویسکوزیته و ثابت نگه داشتن بقیه شرایط

۳-۵ دسته بندی آزمایشات

آزمایشات بر حسب حضور سیال پلیمری در جایگاه سیال جابجاکننده یا سیال جابجا شونده، به دو دسته اصلی تقسیم بندی شده اند:

۱. بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاشونده

۲. بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاکننده

علاوه بر این دو دسته اصلی، اثر نیروهای کشش سطحی هم با افزودن سورفکتانت^۱ برای یک حالت بررسی و نتایج آن گزارش شده است. همچنین، در یک سری آزمایش با تزریق هر کدام از جفت سیال های منتخب در یکدیگر این موضوع را بررسی شده است که آیا خود اثرات الاستیک می توانند موجب ایجاد پدیده انگشتی لزج شوند یا خیر. در نهایت یک بررسی کیفی از آزمایشات ارائه و بحثی روی نتایج انجام شده است.

۳-۶ بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاشونده

در فصل گذشته سه جفت سیال پلیمری و نیوتنی با ویسکوزیته نسبتاً برابر، انتخاب کردیم. حال به منظور بررسی حضور اثرات الاستیک در جایگاه سیال جابجا شونده، از این جفت سیال ها استفاده می کنیم. به این صورت که یک سیال با ویسکوزیته کمتر در هر کدام از این سیال ها تزریق می کنیم. به عنوان مثال ابتدا گلیسرین ۲۰٪ را درون پلیمر ۱۰۰ و سپس درون گلیسرین ۸۰٪ تزریق می کنیم. در صورت وجود مشاهده هر گونه تفاوت، اثر حضور الاستیسیته قابل بررسی خواهد بود.

از فصل ۱ به خاطر داریم که عامل اصلی ناپایداری انگشتی لزج، به اختلاف ویسکوزیته یا نسبت ویسکوزیته دو سیال بستگی داشت. تن و هومسی، لگاریتم نسبت ویسکوزیته سیال جابجاشونده به

^۱ Surfactant

ویسکوزیته سیال جابجاکننده را R نامیدند. با استفاده از همین تعریف، افزایش خصلت الاستیک را با افزایش غلظت پلیمر، بررسی خواهیم کرد.

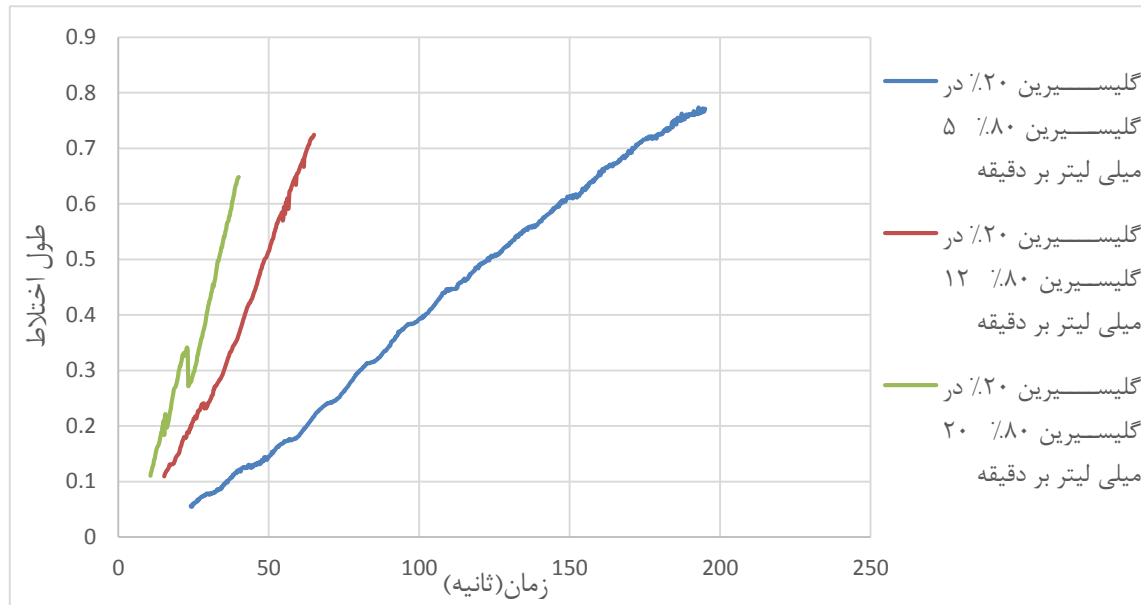
۳-۶-۱ اثر تغییرات دبی

با ثابت نگه داشتن بقیه عوامل از قبیل نسبت ویسکوزیته قصد داریم به بررسی اثرات افزایش دبی بر نحوه شکل‌گیری و رشد ناپایداری بپردازیم. برای تحقق کامل این امر، آزمایش را برای نمونه پلیمری و نیوتنی و برای سیال‌های مختلف انجام دادیم. به عنوان نمونه یکی سه آزمایش با افزایش دبی برای یک سیال را تفسیر می‌نماییم و رفتار بقیه به علت تشابه با همین اصول قابل برداشت است.

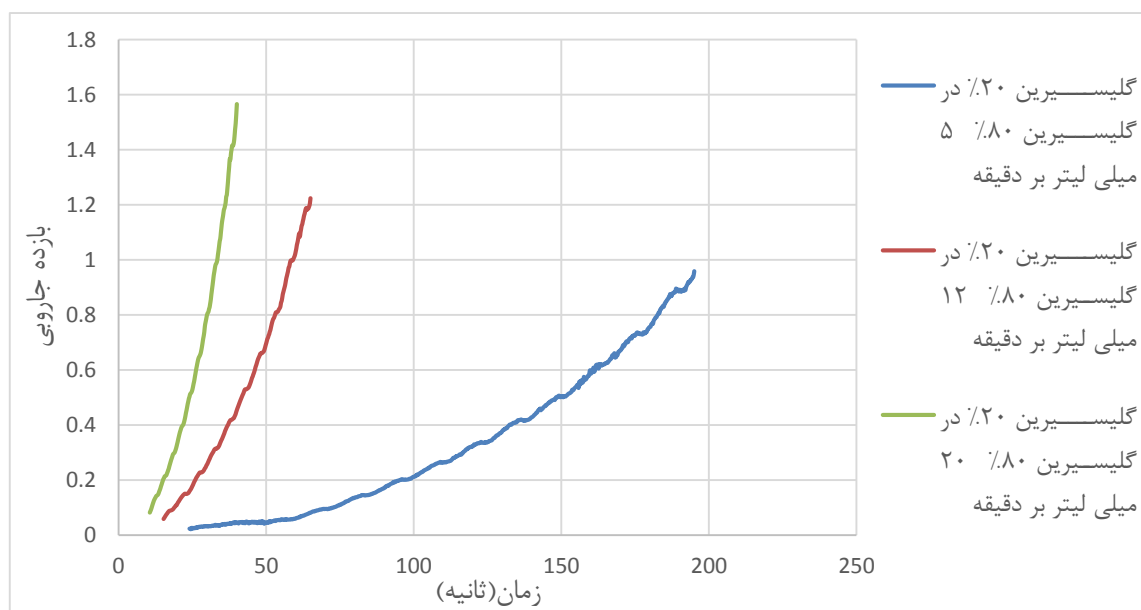
همان‌طور که در شکل ۳-۱۴ و شکل ۳-۱۳ مشاهده می‌شود، تغییرات طول اختلاط و بازده جاروبی با افزایش دبی معکوس هم می‌باشد. یعنی با افزایش دبی طول اختلاط کاهش و بازده جاروبی افزایش می‌یابد. ابتدا لازم است نحوه تحلیل یک آزمایش با این دو پارامتر را توضیح و سپس علت این رفتار کاهشی و افزایشی را توضیح دهیم. در آزمایش تزریق گلیسیرین ۲۰٪ در گلیسیرین ۸۰٪ با دبی ۵ میلی لیتر بر دقیقه، طول اختلاط به صورت خطی از مقادیر ۰٫۱ شروع و در پایان آزمایش مقدار ۰٫۸ را اختیار می‌کند. پایان آزمایشات لحظه‌ای است که انگشتی‌ها به انتهای سلول می‌رسند یعنی به محض مشاهده اثری از سیال جابجاکننده در خروجی، آزمایش متوقف می‌شود. افزایش خطی طول اختلاط تا مقدار ۰٫۸ نشان می‌دهد سرعت رشد حالت پایه به مراتب پایین‌تر از ناحیه اختلاط است یعنی به محض رشد اولین انگشتی‌ها، سیال تمایل به حرکت از مسیر همان انگشتی را دارد و حالت پایه حرکتی نمی‌کند. در این حالت تقریباً تمام سیال از همان مسیر خارج می‌شود و جابجایی بعد از لحظاتی متوقف می‌شود. نتیجه این امر مشاهده سیال جابجاکننده در خروجی سلول هستیم. از این لحظه به بعد هیچ گونه جابجایی و یا استخراجی اتفاق نمی‌افتد. مقدار نهایی بازده جاروبی، نشان‌گر این موضوع است که نیمی از حجم سیال داخل مخزن، خارج شده است.

با توجه نقطه پایان آزمایش و کاهش طول اختلاط ناشی از افزایش دبی به وضوح قابل برداشت است

که افزایش دبی منجر به پیشرفت بیشتر حالت پایه می‌شود که منجر به کاهش طول اختلاط می‌گردد. با توجه به نحوه محاسبه بازده جاروبی که در بخش ۳-۱-۲ توضیح داده شد، رشد حالت پایه تاثیر بسزایی در افزایش بازده جاروبی دارد. این موضوع در شکل ۳-۱۳ قابل مشاهده است. این رفتار در آزمایشات مختلف و با سیال‌های متفاوت نیز انجام شده که نتایج آن در ادامه گزارش شده است.

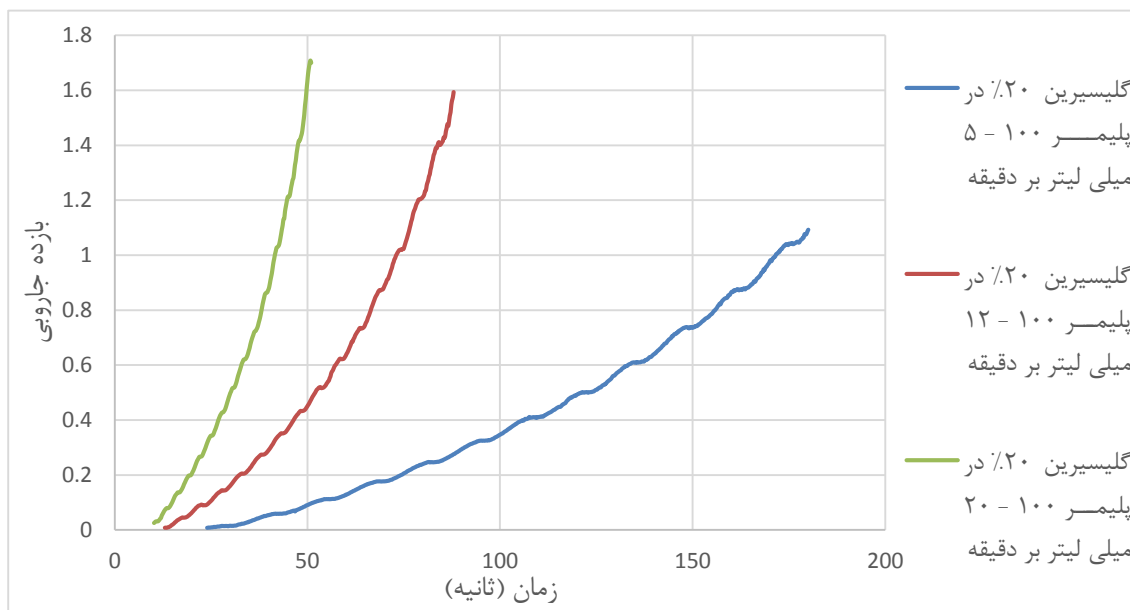


شکل ۳-۱۴ - تاثیر افزایش دبی بر طول اختلاط، جابجایی نیوتنی، $R=3.32$

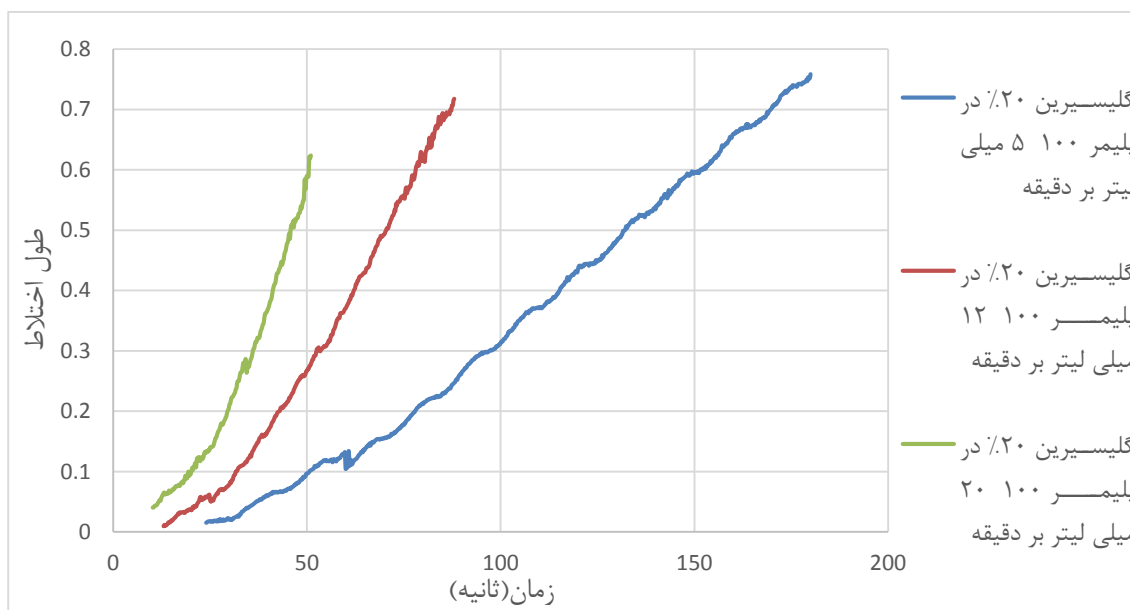


شکل ۳-۱۳ - تاثیر افزایش دبی بر بازده جاروبی، جابجایی نیوتنی، $R=3.32$

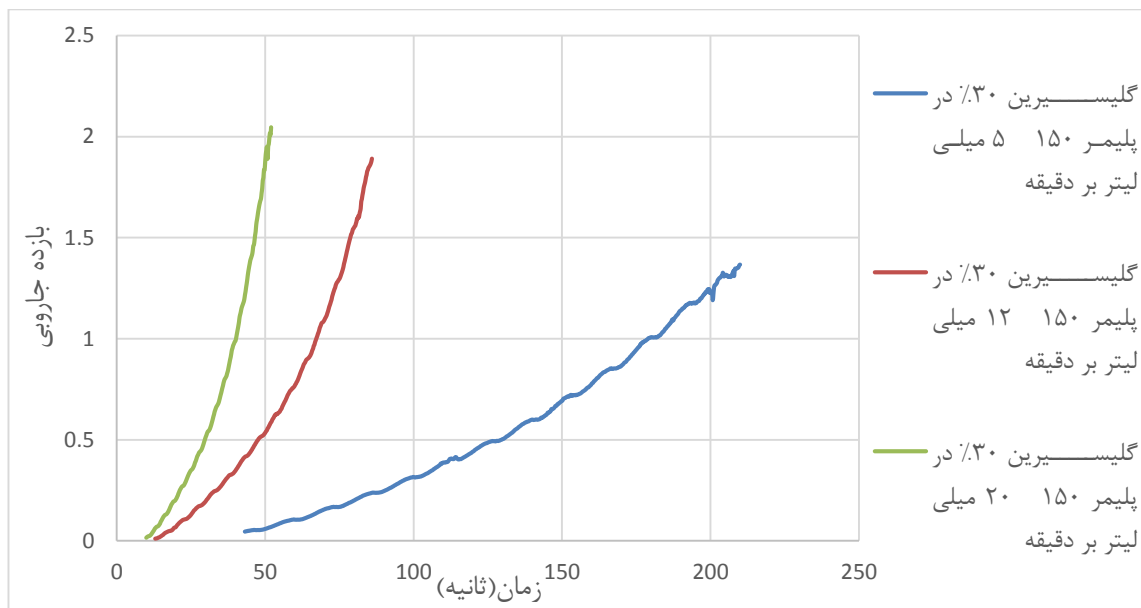
رفتار شرح داده شده برای طول اختلاط و بازده جارویی در اثر افزایش دبی، در نوع پلیمری نیز مشابه است با این تفاوت که بازده جارویی مقادیر متفاوتی اختیار کرده است. دلیل این امر مربوط به افزایش دبی نمی‌باشد و در آزمایشات بعدی علت این امر را مفصل توضیح خواهیم داد.



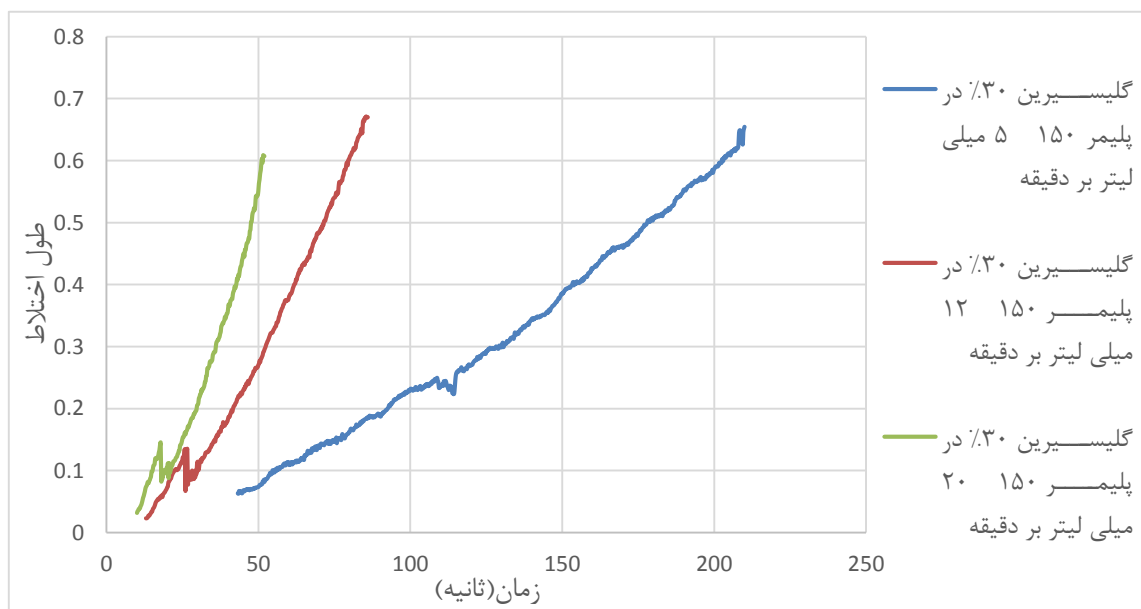
شکل ۳-۱۵ - تاثیر افزایش دبی بر بازده جارویی، جابجایی پلیمری با الاستیسیته کمتر، $R=3.32$



شکل ۳-۱۶ - تاثیر افزایش دبی بر طول اختلاط، جابجایی پلیمری با الاستیسیته کمتر، $R=3.32$

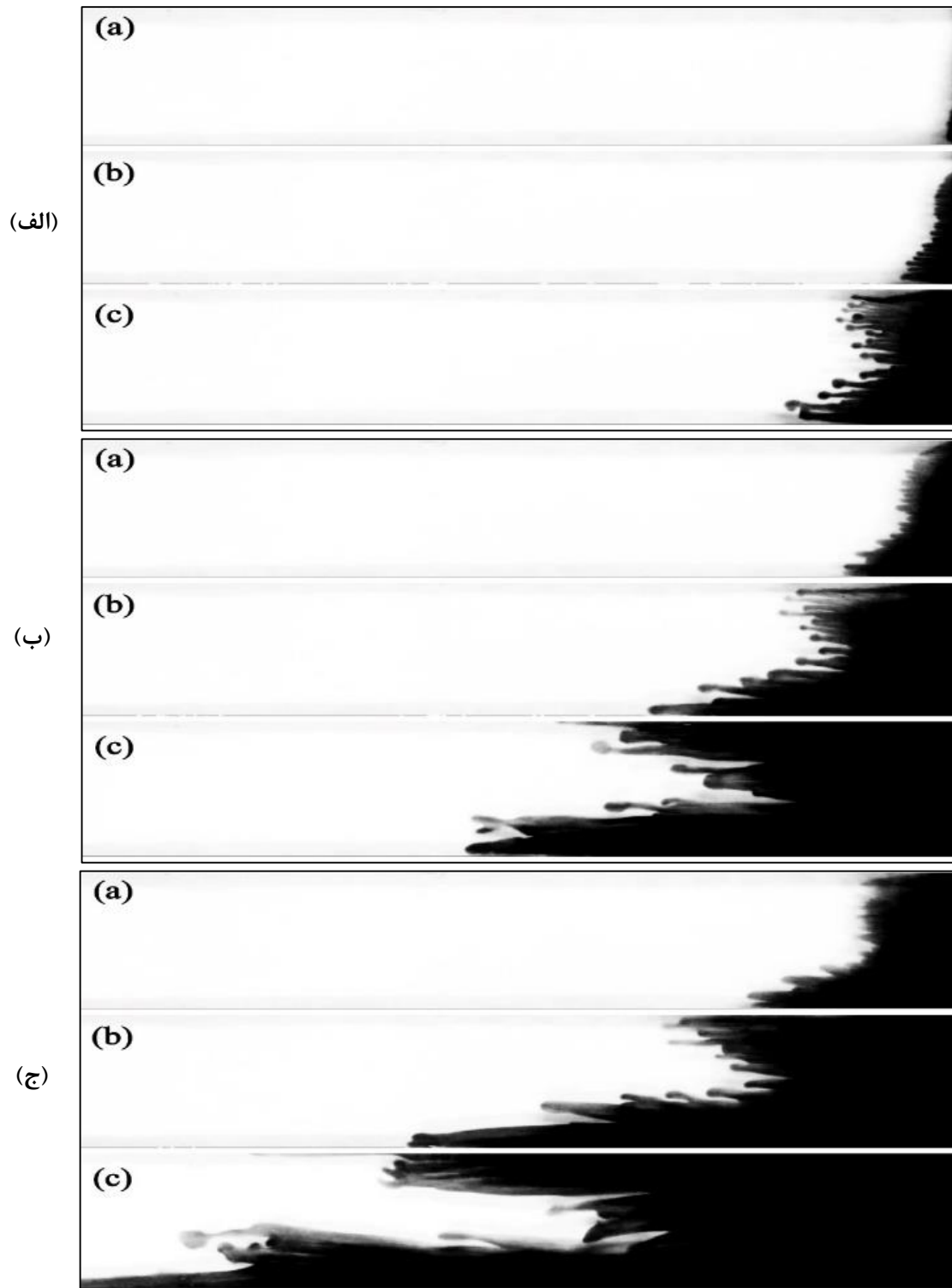


شکل ۳-۱۷ - تاثیر افزایش دبی بر طول اختلاط، جابجایی پلیمری با الاستیسیته بیشتر، $R=3.32$



شکل ۳-۱۸ - تاثیر افزایش دبی بر بازده جاروبی، جابجایی پلیمری با الاستیسیته بیشتر، $R=3.32$

در تصاویر زیر تاثیر دبی بر پدیده در لحظات مختلف گزارش شده است.



شکل ۳-۱۹ - تزریق گلیسرین ۳۰٪ در گلیسرین ۸۳٫۵٪ با دبی (a) ۵ میلی لیتر بر دقیقه (b) ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه (c) ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه- در لحظات (الف) ۱۴ ثانیه (ب) ۲۸ ثانیه (ج) ۴۰ ثانیه

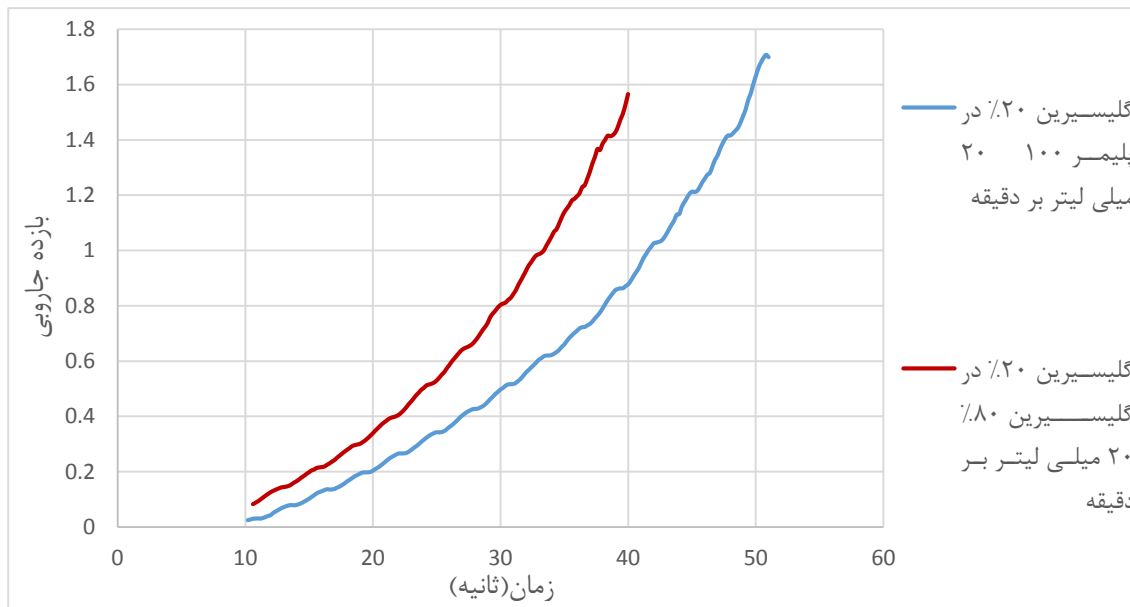
۳-۶-۲ اثر الاستیسیته

نتایج آزمایشات افزودن خواص الاستیک به سیال جابجاشونده با ثابت ماندن نسبت ویسکوزیته، حاکی از ثابت ماندن طول اختلاط و افزایش بازده جاروبی نسبت به نوع نیوتنی خود است. البته ثابت ماندن طول اختلاط به معنی انطباق بر نمودار جابجایی نیوتنی نیست ولی طول اختلاط در لحظه آخر برای این دو نوع جابجایی برابر است. این اختلاف فاز حاکی از این موضوع است که افزودن الاستیسیته به سیال جابجاشونده انگشتی لزج را به تاخیر می‌اندازد. این تاخیر به این دلیل است که در جابجایی نیوتنی تمایل به ایجاد یک انگشتی و عبور تمام سیال از همان مسیر وجود دارد اما در نوع پلیمری ایجاد دو یا چند انگشتی و رشد آن‌ها با هم منجر می‌شود سیال از چند مسیر پیشرفت کند و در نهایت مدت بیش‌تری طول می‌کشد تا به انتها برسد اما در نهایت طول بزرگ‌ترین انگشتی در لحظه نهایی در هر دو نوع جابجایی یکسان است. در این آزمایش هم استقلال حالت پایه از خواص سیال‌ها مشاهده می‌شود.

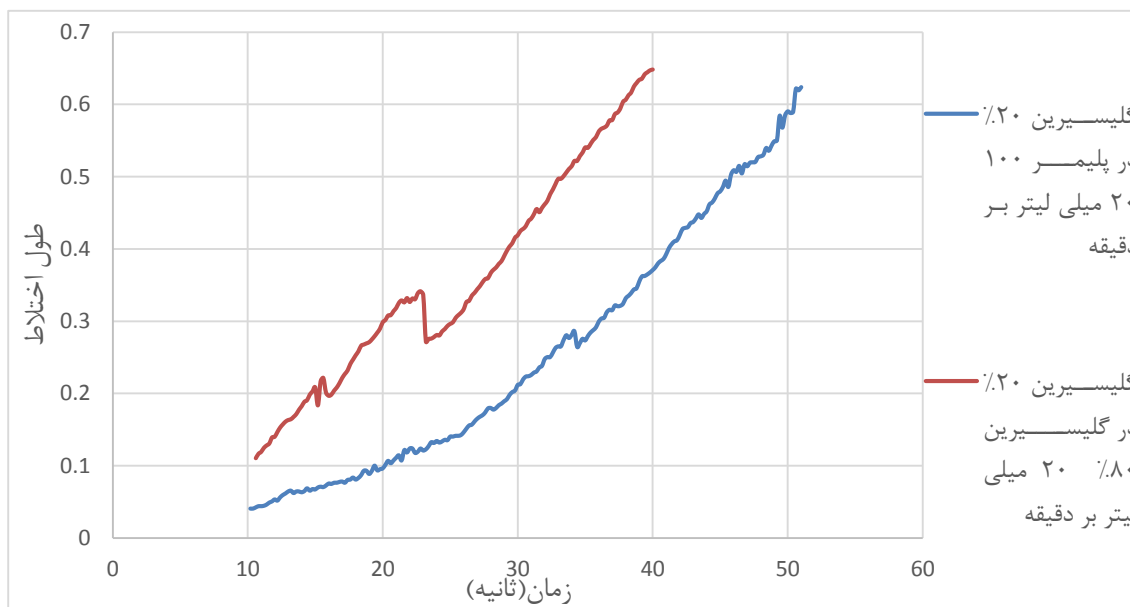
تاخیر ایجاد شده در رسیدن سیال جابجاکننده به انتهای سلول منجر به ورود حجم بیش‌تری سیال به محیط و در نتیجه خروج بیش‌تر سیال جابجاشونده از محیط می‌شود. این امر یعنی افزایش بازده جاروبی که در نمودارها نیز مشاهده می‌شود. رفتارهایی مانند رفتار سیفون کردن بدون لوله^۱ که سیال داخل ظرف خودش را به بیرون می‌کشد و همچنین رفتارهای مشاهده شده در آزمایشات تحقیق حاضر، این موضوع را تایید می‌کند که تفسیر هم‌بستگی برای خاصیت الاستیک دور از ذهن نیست. سیال در حالت پلیمری به علت داشتن شبکه‌های طویل، به هم‌بستگی و حرکت دسته‌جمعی بیش‌تری تمایل دارد. به عنوان مثال در زمانی که جابجایی نیوتنی طول اختلاط ۰,۲ را تجربه می‌کند، جابجایی پلیمری طول اختلاط کمتری دارد یعنی سیال پلیمری با نیروی کمتری از محیط سلول خارج می‌شود و شبکه‌های پلیمری تمایل به خروج از سلول دارند. البته این تمایل در یک زمان، در مقابل نیروهای

^۱ Tubeless siphon

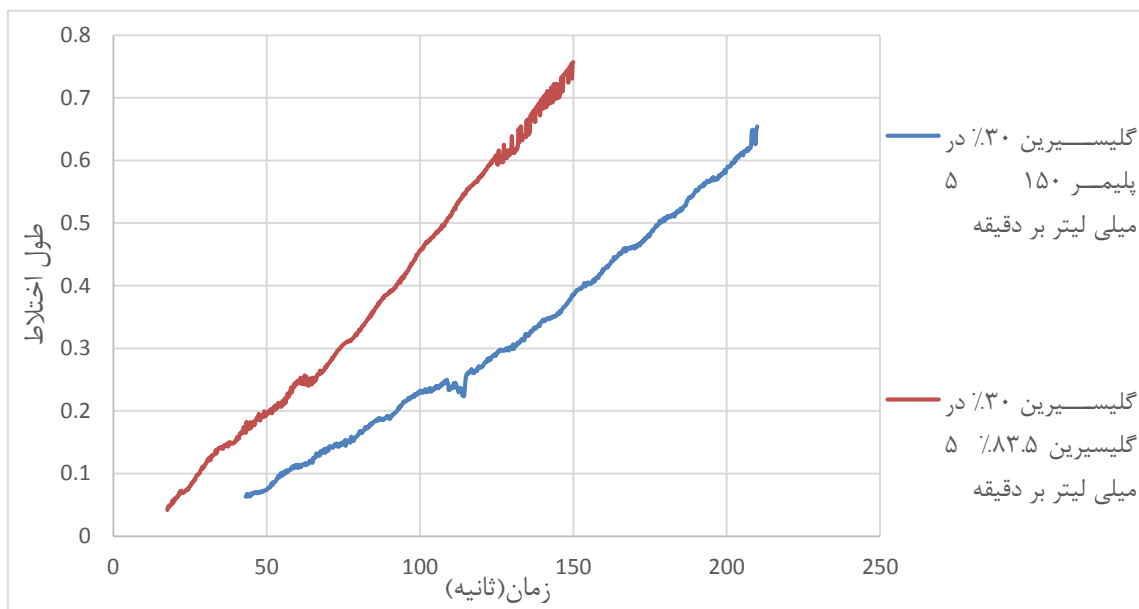
لزوج مغلوب می شود و انگشتی ها شروع به رشد در سیال پلیمری می کنند. نمودارهای زیر که شامل آزمایش با چند سیال در شرایط مختلف است، گویای مطالب فوق نیز هستند.



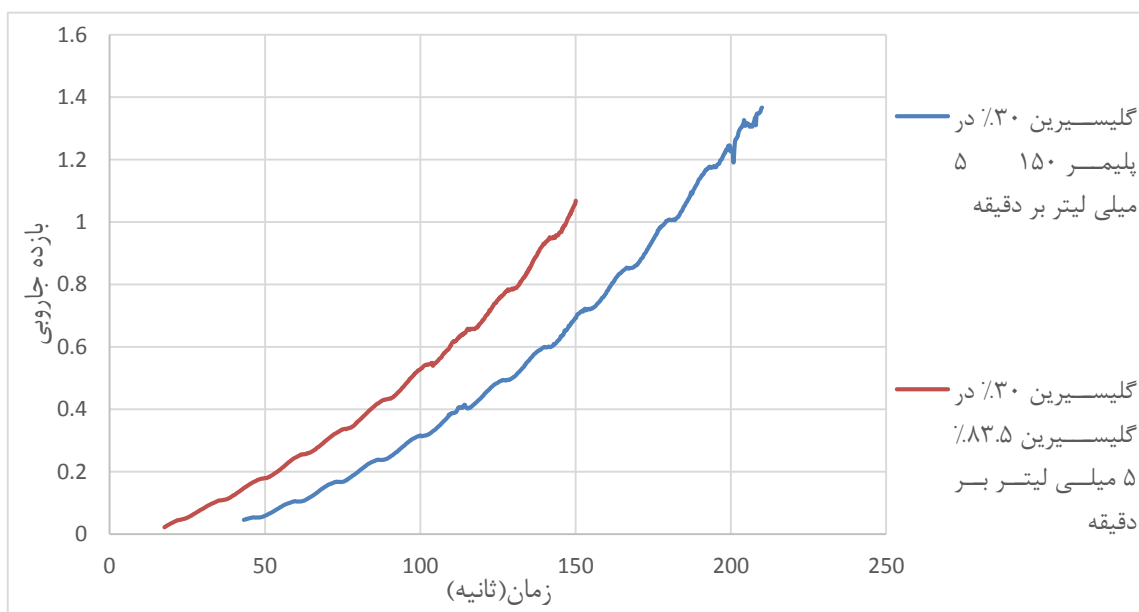
شکل ۳-۲۰ - اثر خواص الاستیک بر بازده جاروبی، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیته کمتر، $R=3.32$



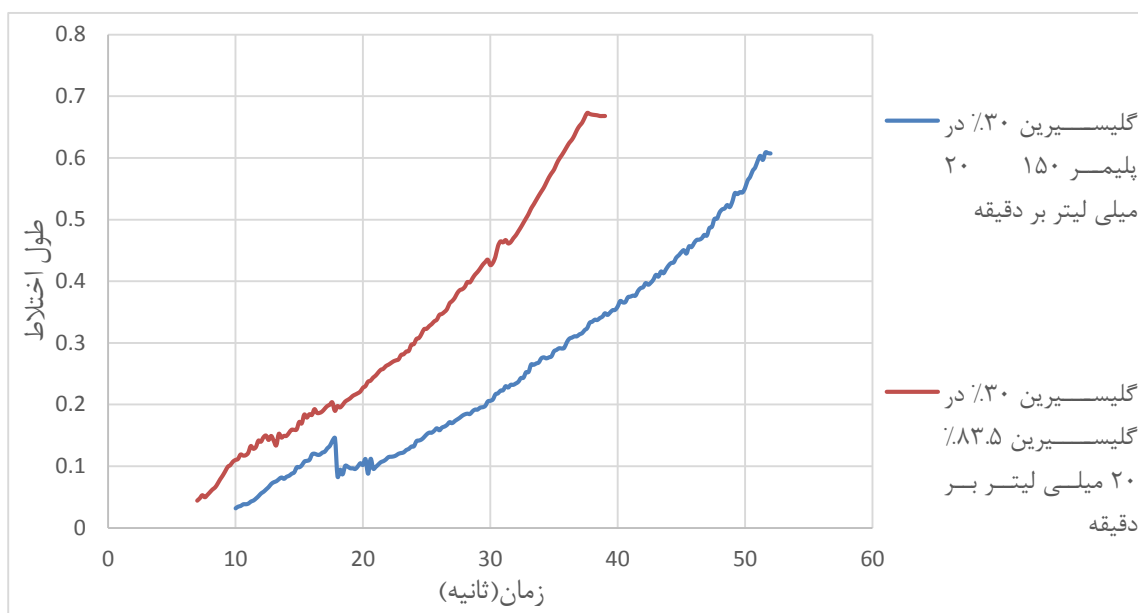
شکل ۳-۲۱ - اثر خواص الاستیک بر طول اختلاف، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیته کمتر، $R=3.32$



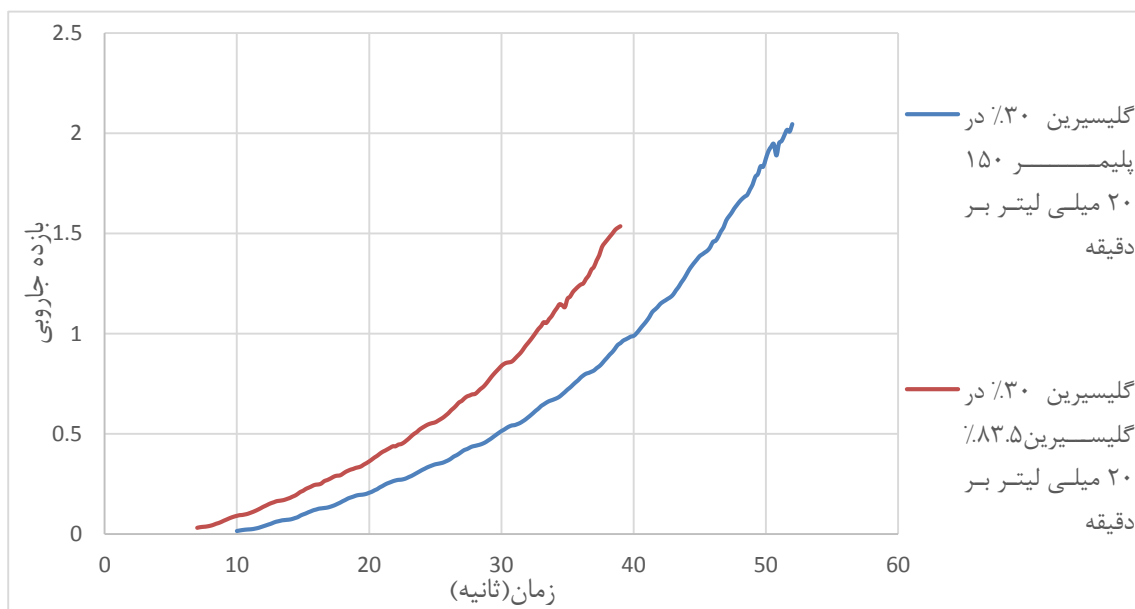
شکل ۳-۲۲ - اثر خواص الاستیک بر طول اختلاط، دبی ۵ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیته بیشتر، $R=3.32$



شکل ۳-۲۳ - اثر خواص الاستیک بر بازده جارویی، دبی ۵ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیته بیشتر، $R=3.32$

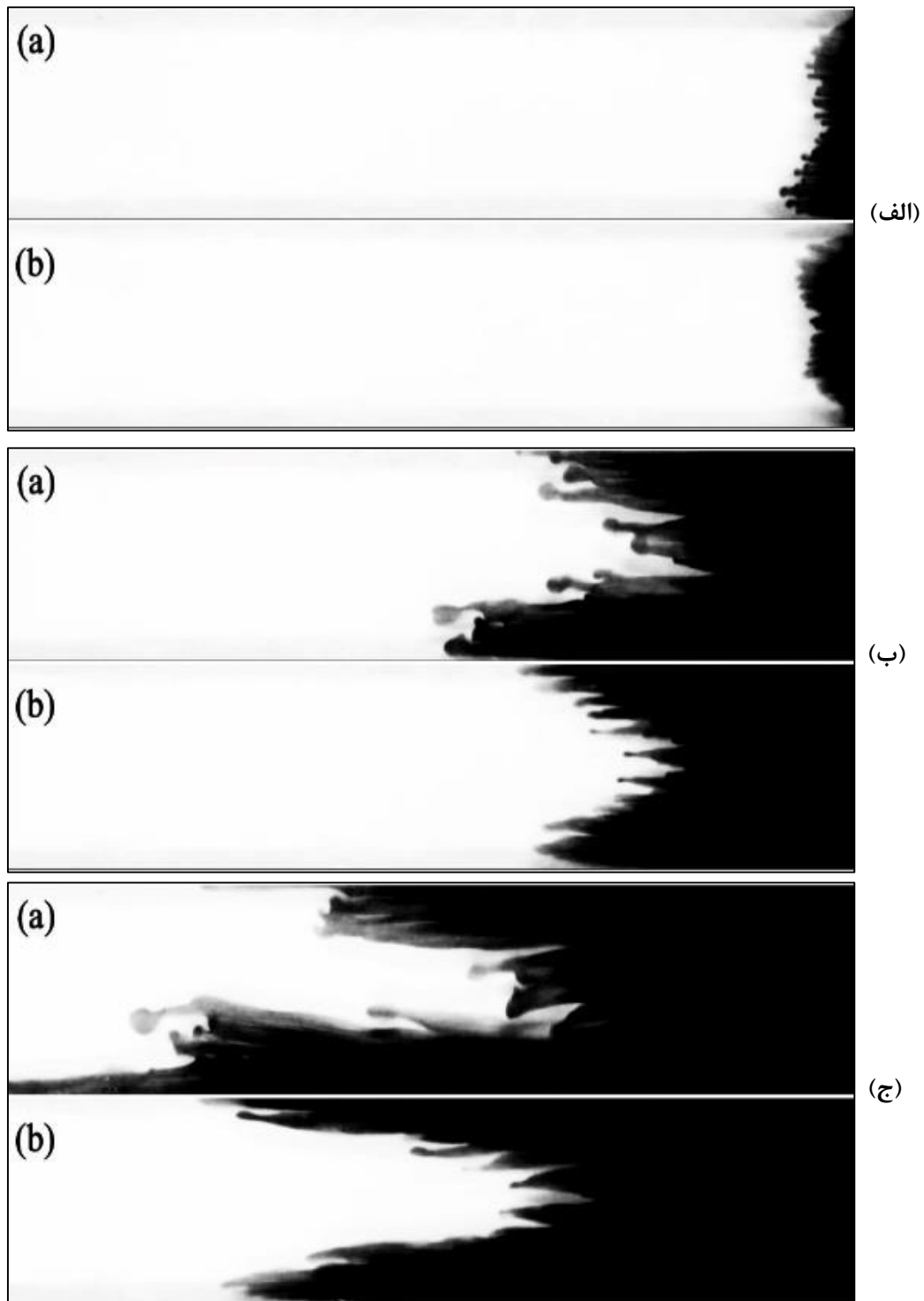


شکل ۳-۲۴ - اثر خواص الاستیک بر طول اختلاط، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیته بیشتر، $R=3.32$



شکل ۳-۲۵ - اثر خواص الاستیک بر بازده جارویی، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، الاستیسیته بیشتر، $R=3.32$

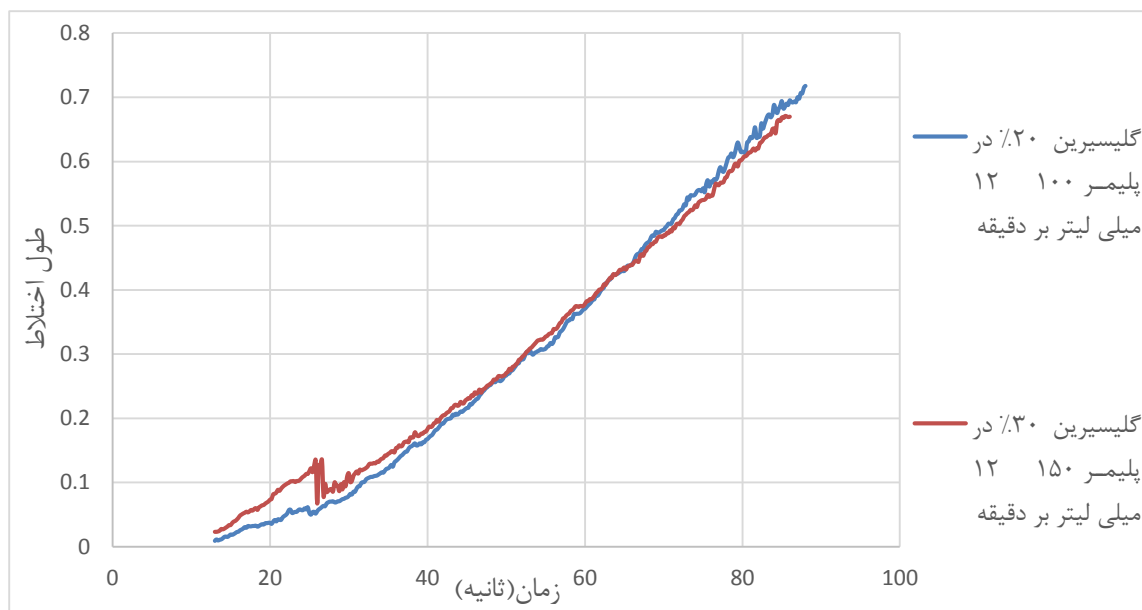
تصاویر زیر گویای نحوه شکل‌گیری و رشد برای یک جابجایی نیوتنی و پلیمری در شرایط یکسان می‌باشد.



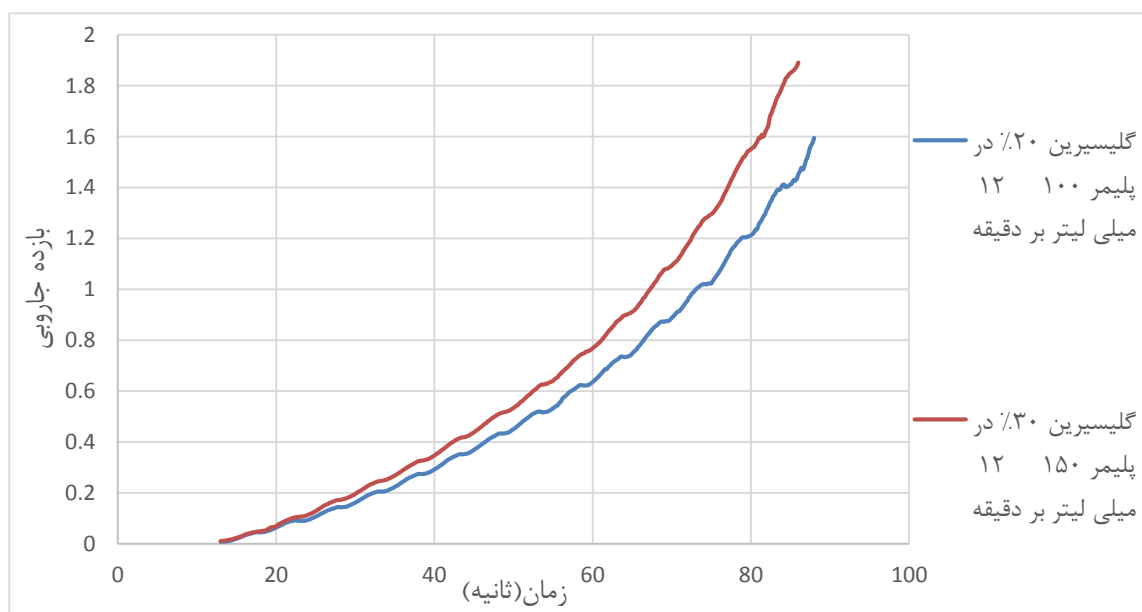
شکل ۳-۲۶ - تزریق (a) گلیسیرین ۳۰٪ در گلیسیرین ۸۳٫۵٪ و (b) گلیسیرین ۳۰٪ در پلیمر ۱۵۰- با دبی یکسان ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه- لحظات (الف) ۱۰ ثانیه (ب) ۲۵ ثانیه (ج) ۴۰ ثانیه

۳-۶-۳ اثر افزایش الاستیسیته

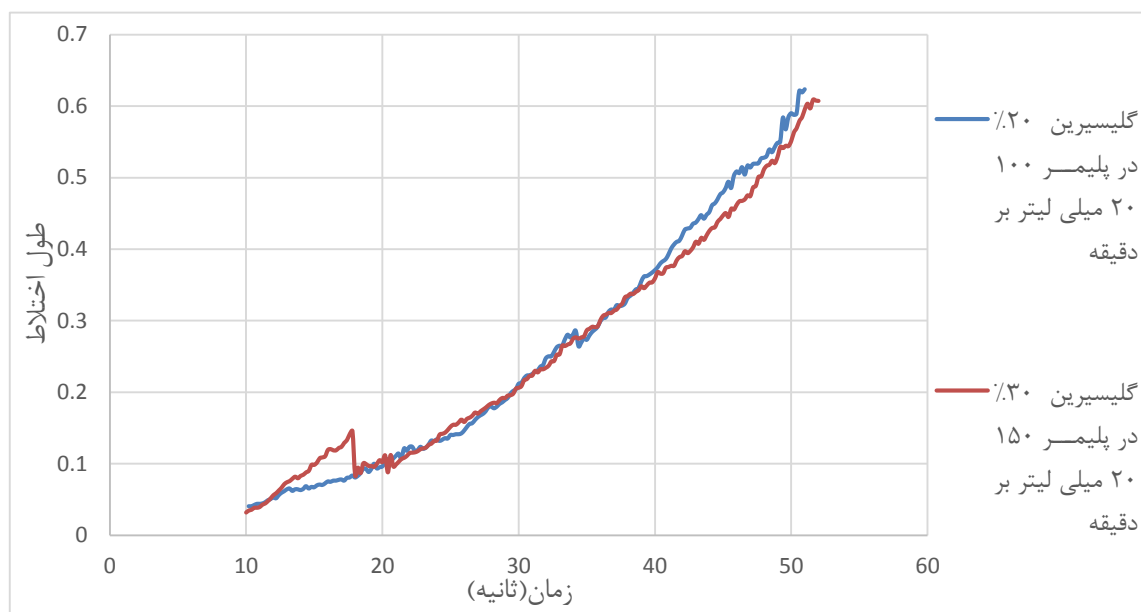
انطباق نسبی نمودارهای طول اختلاط و افزایش بازده جاروبی تقریباً مورد انتظارمان بود که نتایج مهر تاییدی بر این قضیه می‌باشند. افزایش الاستیسیته و در نتیجه افزایش هم‌بستگی، باعث خروج بیش‌تر سیال و در نتیجه بازده جاروبی بیش‌تر می‌شود.



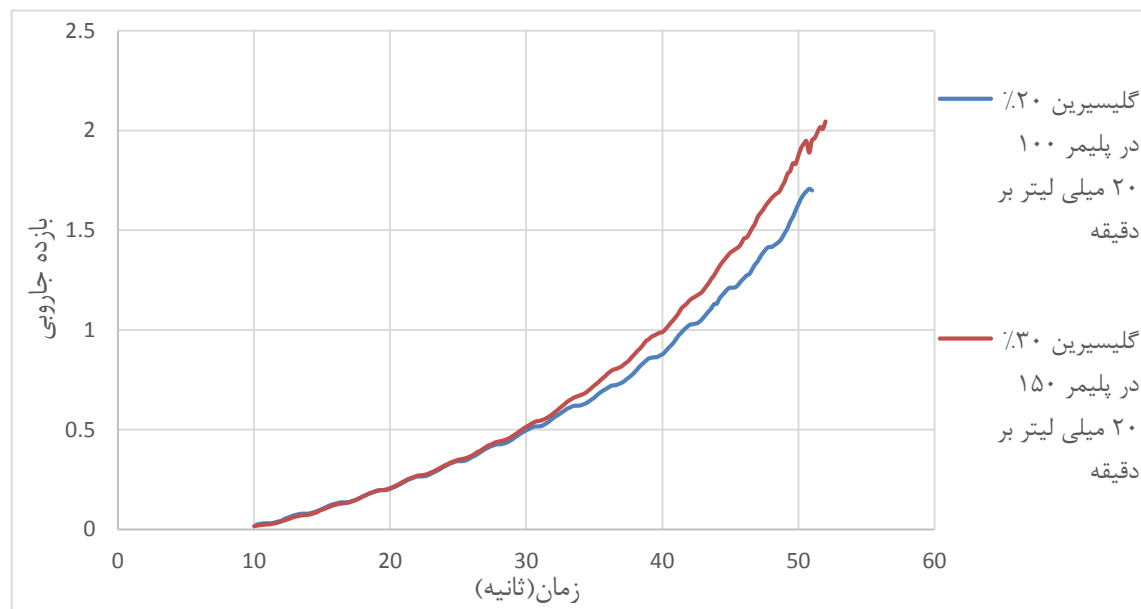
شکل ۳-۲۷ - اثر افزایش الاستیسیته بر طول اختلاط، دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه، $R=3.32$



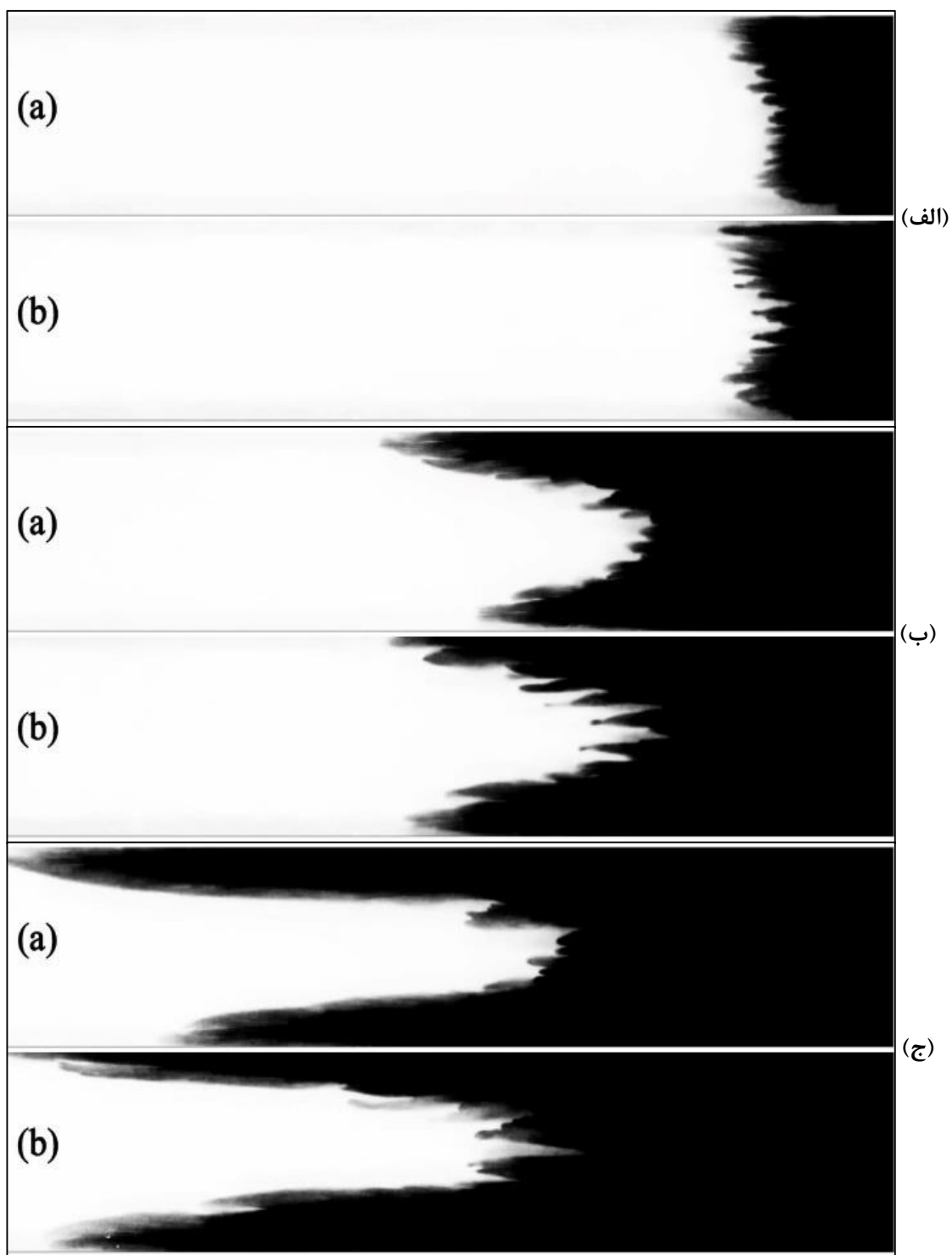
شکل ۳-۲۸ - اثر افزایش الاستیسیته بر بازده جاروبی، دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه، $R=3.32$



شکل ۳-۲۹ - اثر افزایش الاستیسیته بر طول اختلاط، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، $R=3.32$



شکل ۳-۳۰ - اثر افزایش الاستیسیته بر طول اختلاط، دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه، $R=3.32$



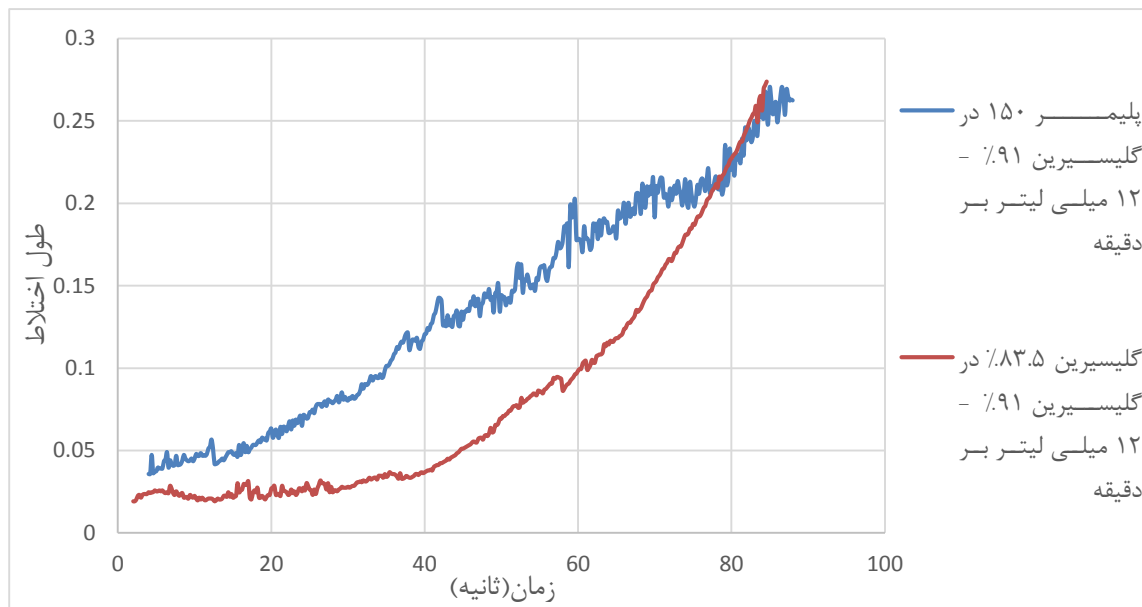
شکل ۳-۳۱ - تزریق (a) گلیسرین ۲۰٪ در پلیمر ۱۰۰ (b) گلیسرین ۳۰٪ در پلیمر ۱۵۰ - با دبی ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه - در لحظات (الف) ۱۶ ثانیه (ب) ۳۲ ثانیه (ج) ۴۸ ثانیه

۷-۳ بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاکننده

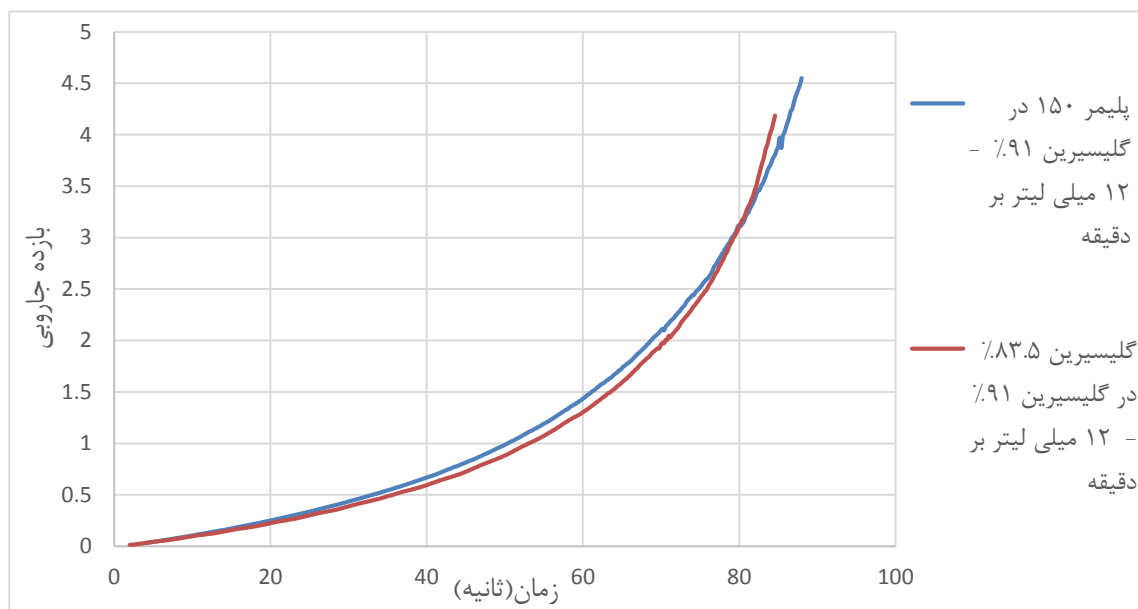
در این قسمت قصد داریم با قرار دادن سیال ویسکوالاستیک در جایگاه سیال جابجاکننده، اثرات الاستیک را بر شکل‌گیری و پیشرفت انگشتی‌ها بررسی کنیم. در این جا نیز از همان روش مقایسه با حالت نیوتنی بهره گرفته شده است. پارامترهای گزارش شده در آزمایش‌ها نیز همان دو پارامتر مهم و اصلی یعنی طول اختلاط و بازده جاروبی می‌باشد. تقسیم‌بندی آزمایشات در این بخش نیز مانند بخش قبل می‌باشد اما به دلیل گستردگی ارائه نمودارها در بخش قبل و مشاهده نتایجی شبیه به همان نتایج، به ارائه یک نمونه کمی از نتایج در بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاکننده بسنده می‌کنیم و در نهایت تحلیلی کیفی را ارائه خواهیم داد.

در این قسمت با تزریق پلیمر ۱۵۰ در گلیسیرین ۹۱٪ (ویسکوزیته آن در جدول ۲-۱ آمده است) و مقایسه آن با تزریق گلیسیرین ۸۳٫۵٪ در گلیسیرین ۹۱٪، اثر افزودن خاصیت الاستیک به سیال جابجاکننده را بررسی نمودیم. با مراجعه به جدول ۲-۱ و استفاده از رابطه (۱-۳)، نسبت ویسکوزیته در این مورد $R=1.09$ به دست خواهد آمد. از قسمت قبل به خاطر داریم، هر چه نسبت ویسکوزیته افزایش یابد، طول اختلاط نیز افزایش و بازده جاروبی کاهش می‌یابد. بنابراین در مقایسه نتایج این قسمت با بخش قبل، نکته فوق می‌بایست مد نظر باشد.

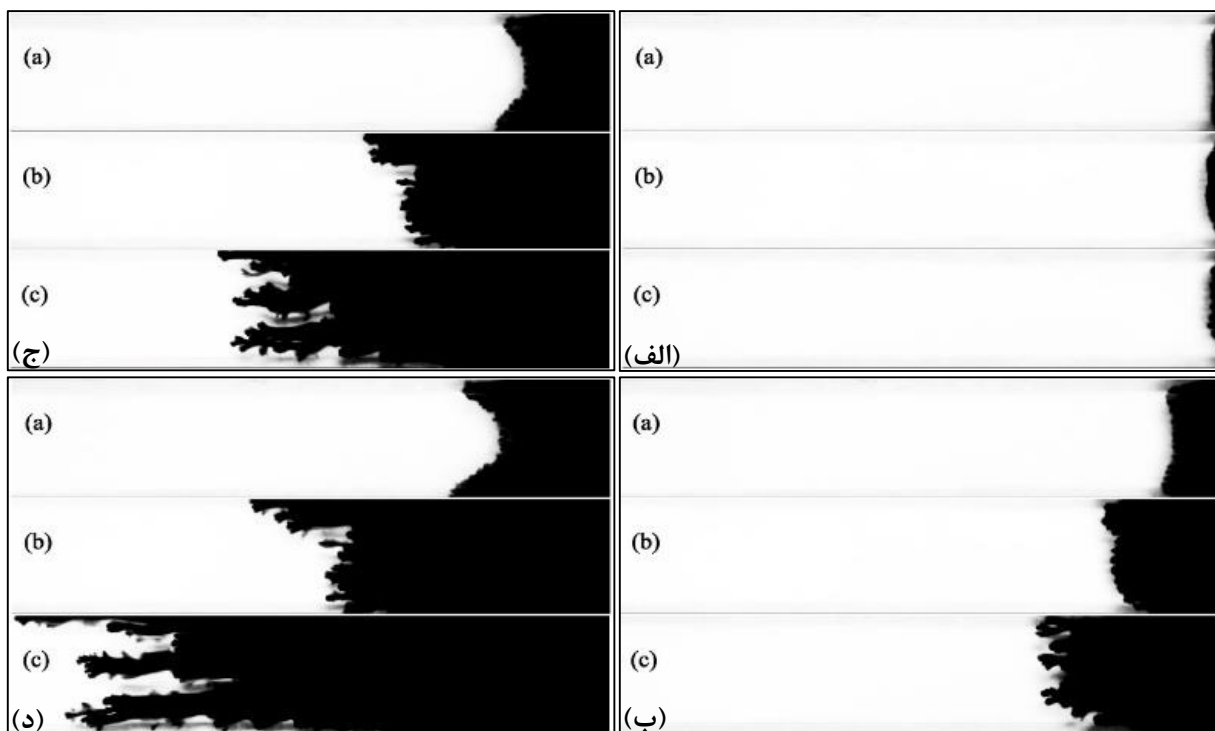
۱-۷-۳ اثر الاستیسیته



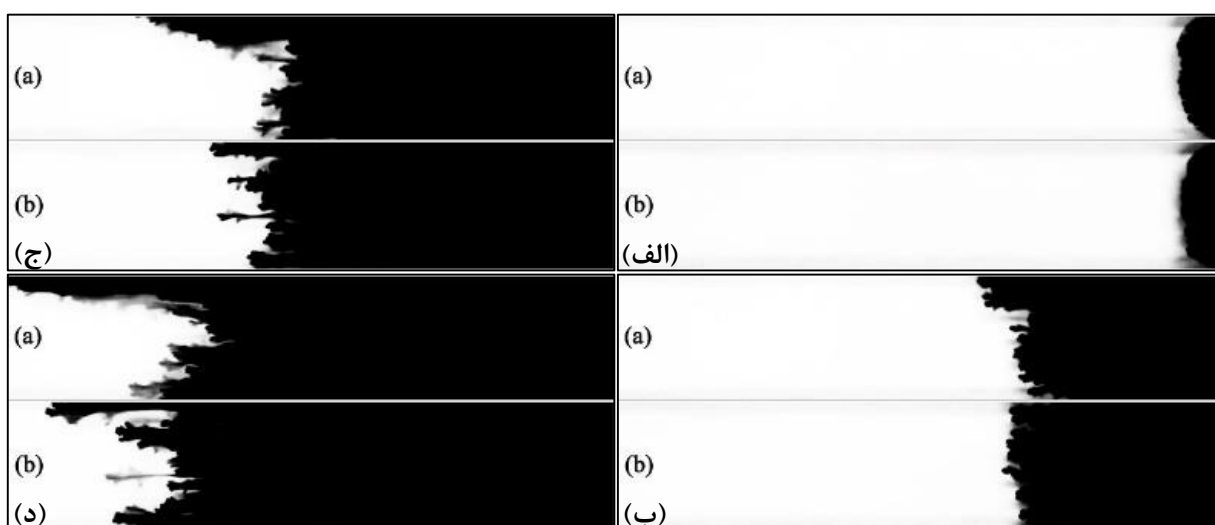
شکل ۳-۳۲ - اثر الاستیسیته بر طول اختلاط، دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه، $R=1.09$



شکل ۳-۳۳ - اثر الاستیسیته بر بازده جاروبی، دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه، $R=1.09$



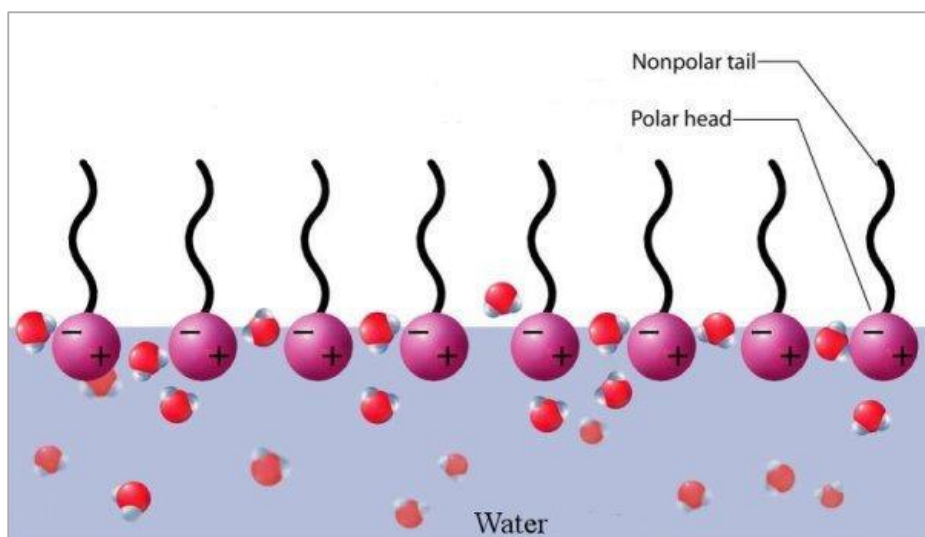
شکل ۳-۳۴ - تاثیر افزایش دبی- تزریق پلیمر ۱۰۰ در گلیسرین ۹۰٪- دبی (a) ۵ میلی لیتر بر دقیقه (b) ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه (c) ۲۰ میلی لیتر بر دقیقه - لحظات (الف) ۲ ثانیه (ب) ۱۸ ثانیه (ج) ۳۹ ثانیه (د) ۵۰ ثانیه



شکل ۳-۳۵ - تاثیر افزایش الاستیسیته - تزریق (a) پلیمر ۱۰۰ در گلیسرین ۹۰٪ (b) پلیمر ۱۵۰ در گلیسرین ۹۱٪- دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه - لحظات (الف) ۸ ثانیه (ب) ۳۷ ثانیه (ج) ۶۳ ثانیه (د) ۸۲ ثانیه

۳-۷-۲ اثر افزودن سورفکتانت^۱

سورفکتانت‌ها معمولاً ترکیباتی آلی هستند که دارای گروه‌های هیدروفوبیک (دافع آب) که نقش دم و دنباله را دارد و گروه‌های هیدروفیلیک (جاذب آب) که نقش سر را دارد، می‌باشند، بنابراین به تناسب ساختار مولکولی در حلال‌های آلی و آب حل می‌شوند و باعث کاهش کشش سطحی در فصل مشترک هوا-آب و یا روغن-آب می‌شوند.



شکل ۳-۳۶: ساختار دم و دنباله مانند سورفکتانت

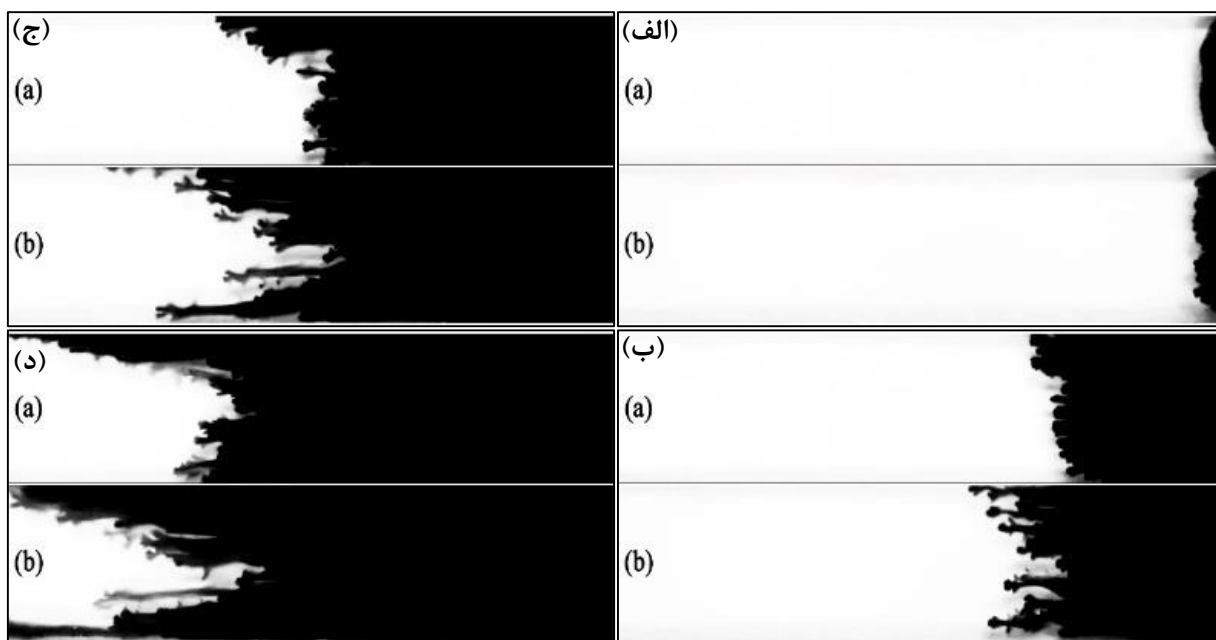
ساختار شیمیایی این مواد اغلب شامل یک مولکول نسبتاً طولانی با یک انتهای آب‌گریز و انتهای دیگر آب‌دوست می‌باشد. قسمت آب‌گریز این مواد (یک دنباله هیدروکربنی طولانی) با رزین سازگار بوده و در جهت آن حرکت می‌کند در حالی که قسمت آب‌دوست به سمت بیرون جهت‌گیری نموده (به سمت فاز آب) و با احاطه نمودن رزین باعث سازگاری آن با آب می‌شود. درواقع سورفکتانت‌ها موادی هستند که می‌توانند انرژی سطحی را بین سطوح به میزان زیادی تغییر دهند. خاصیت یک سورفکتانت ناشی از دو شخصیتی بودن ساختمان مولکولی آن است به این معنی که همزمان دارای گروه‌های آب‌دوست و آب‌گریز می‌باشند. سورفکتانت‌ها نقش مهمی در بسیاری از کاربردهای عملی و محصولات بازی می‌کنند مثلاً: شوینده‌ها، انعقادسازها (مثل: خون)، امولسیون کننده‌ها (مثل: کرم)، جوهرسازی،

^۱ Surfactant

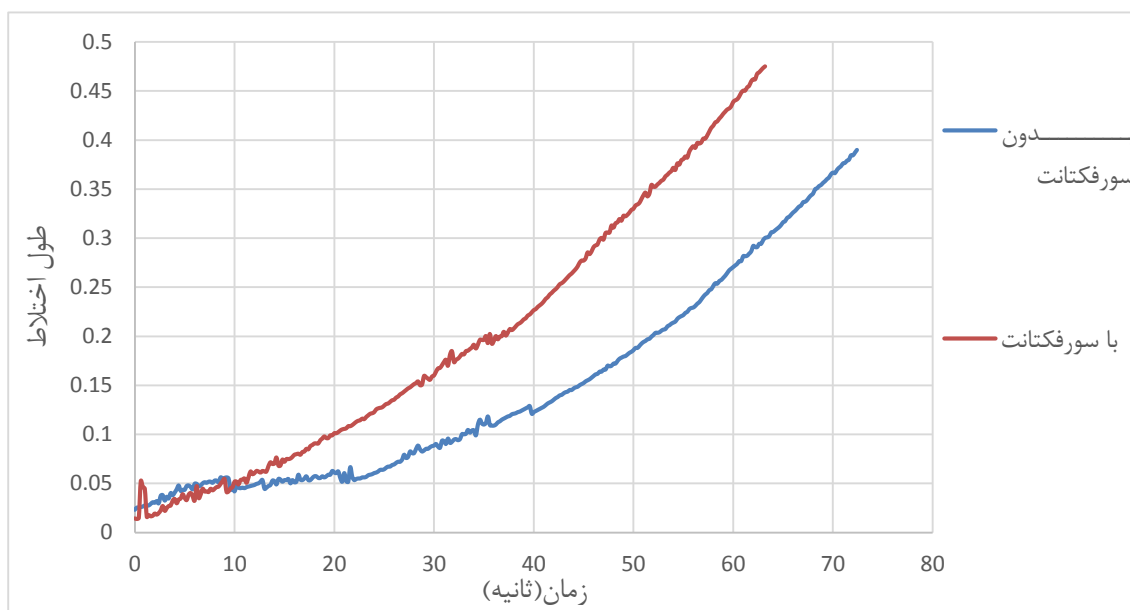
کف سازی (مثل: شامپو)، دیسپرسنتها (جداکننده ها)، پلیمر (مثل: لاستیک ماشین) و...

در این مطالعه به منظور بررسی اثرات کشش سطحی، پودر سورفکتانت را به میزان اشباع به دو سیال پلیمر ۱۰۰ و گلیسیرین ۹۰٪ اضافه می‌کنیم. البته برای افزودن سورفکتانت به پلیمر ۱۰۰، باید توجه کرد که این افزودن در حین ساخته شدن پلیمر و ذره ذره باید انجام گیرد تا محلول نهایی کاملاً همگن شود. حال با تزریق پلیمر ۱۰۰ همراه با سورفکتانت در گلیسیرین ۹۰٪ همراه با سورفکتانت و مقایسه آن با تزریق پلیمر ۱۰۰ در گلیسیرین ۹۰٪، اثر کشش سطحی را بررسی می‌کنیم. شایان ذکر است که با افزودن سورفکتانت، ویسکوزیته سیال‌ها تغییر چندانی نمی‌کند.

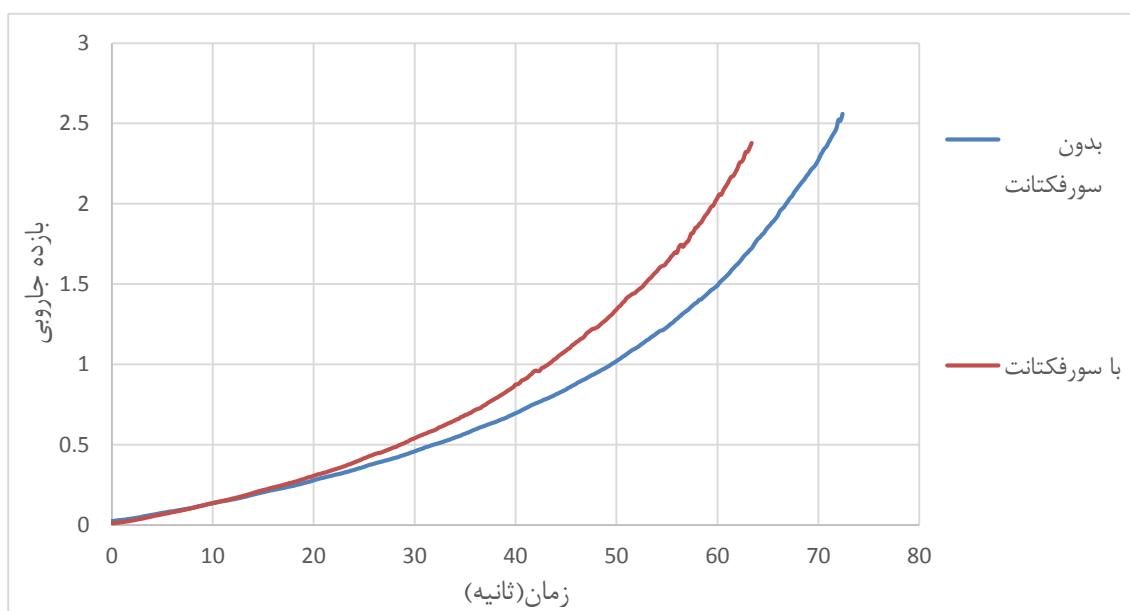
با توجه به شکل ۳-۳۷ مشاهده می‌شود الگوی رشد انگشتی‌ها کمی تغییر می‌کند اما پارامترهای اساسی مانند طول اختلاط و بازده جاروبی تغییر چندانی نمی‌کند (شکل ۳-۳۸ و شکل ۳-۳۹). البته عدم حضور سورفکتانت موجب بهبود بازده جاروبی و کاهش طول اختلاط می‌شود. همچنین ناپایداری را به تأخیر می‌اندازد.



شکل ۳-۳۷ - تأثیر کشش سطحی - تزریق پلیمر ۱۰۰ در گلیسیرین ۹۰٪ (a) بدون سورفکتانت (b) با سورفکتانت - دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه - لحظات (الف) ۴ ثانیه (ب) ۲۹ ثانیه (ج) ۵۴ ثانیه (د) ۷۴ ثانیه



شکل ۳-۳۸ - بررسی اثر کشش سطحی بر طول اختلاط - تزریق پلیمر ۱۰۰ در گلیسرین ۹۰٪ - دبی ۱۲ میلی لیتر
بر دقیقه - $R=1.09$



شکل ۳-۳۹ - بررسی اثر کشش سطحی بر بازده جاروبی - تزریق پلیمر ۱۰۰ در گلیسرین ۹۰٪ - دبی ۱۲ میلی لیتر
بر دقیقه - $R=1.09$

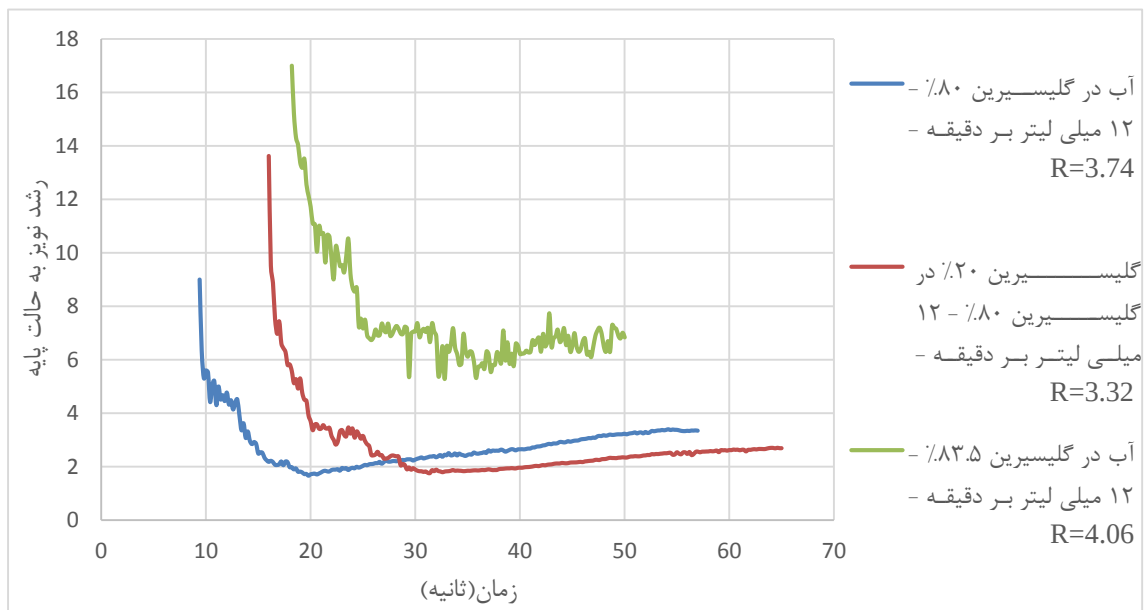
۳-۸ مطالعه نسبت رشد نويز به حالت پایه

همان طور که از بخش ۳-۱-۳ به خاطر داریم، پارامتر نسبت رشد نويز به حالت پایه، چگونگی حرکت اغتشاشات را نسبت به حالت پایه نشان می‌دهد. اهمیت این پارامتر به اندازه دو پارامتر اساسی گزارش شده در آزمایش‌ها نیست و در کارهای گذشتگان به صورت محدود گزارش شده است. با این وجود، نکات کاربردی و خوبی به دست می‌دهد. به عنوان مثال ممکن است طول اختلاط در یک آزمایش زیاد باشد اما حالت پایه نیز سرعت رشد خوبی داشته باشد. این مورد باعث می‌شود بازده جاروبی افزایش یابد. بنابراین مطالعه این نسبت مکمل بحث خواهد بود.

در این پژوهش، بررسی کامل این نسبت امکان‌پذیر نمی‌باشد. زیرا که طول سلول و دبی‌های اندازه‌گیری شده، به گونه‌ای هستند که زمان کافی برای مشاهده این نسبت و رفتار آن مهیا نیست. البته این موضوع دلایل مختلفی دارد، مانند محدودیت‌های آزمایشگاهی و تصویربرداری. با این وجود، با توجه به بضاعت پروژه، مسیری برای مطالعه بیش‌تر خوانندگان این تحقیق نشان خواهیم داد.

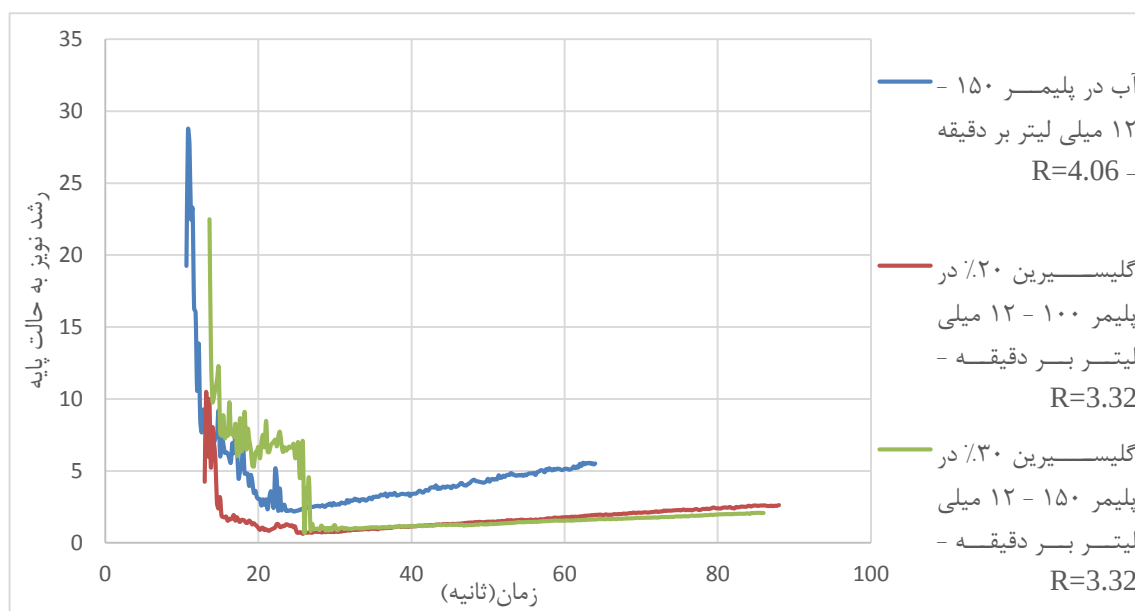
نسبت رشد نويز به حالت پایه در حالت مطلوب و در عدم حضور انگشتی‌ها، مقداری برابر با صفر دارد. یعنی حالت پایه بدون هیچ اغتشاشی، مسیر را طی می‌کند. هر چه این پارامتر افزایش یابد، حاکی از آن است که رشد اغتشاشات نسبت به حالت پایه بیش‌تر شده است و سیال تمایل دارد از مسیر انگشتی‌ها عبور کند. اگر این پارامتر در مقیاس‌های بزرگتر از سلول ما زیاد شود، دیگر امید به استخراج و جابجایی سیال کم‌رنگ می‌شود و باید انتظار داشت هر چه سیال به داخل مخزن تزریق شود، از سمت خروجی مخزن خارج می‌شود و از این لحظه به بعد بازده جاروبی صفر می‌شود. همچنین با توجه به وابستگی طول اختلاط به نسبت ویسکوزیته و وابستگی حالت پایه به دبی، انتظار می‌رود این پارامتر با این دو عامل تغییرات بیش‌تری داشته باشد. با عنایت به تمام موارد فوق، نمونه‌ای از رفتار جابجایی‌های نیوتنی و پلیمری را خواهیم آورد و اثر افزودن الاستیسیته را بر این پارامتر بررسی می‌کنیم.

در شکل ۳-۴۰ تاثیر افزایش نسبت ویسکوزیته بر پارامتر رشد نويز به حالت پایه، قابل مشاهده است. این شکل، انتظار ما را برآورده نموده است. رشد نويز به حالت پایه در نسبت ویسکوزیته‌های بالاتر، مقدار بیش‌تری دارد و مقدار نهایی آن نیز بیش‌تر از سایرین است. یعنی تقریباً حالت پایه بعد از زمان کوتاهی، متوقف و تنها انگشتی پیشرفت می‌کند. این رفتار در نمونه‌های دیگر با قوت و ضعف مشاهده شده است.

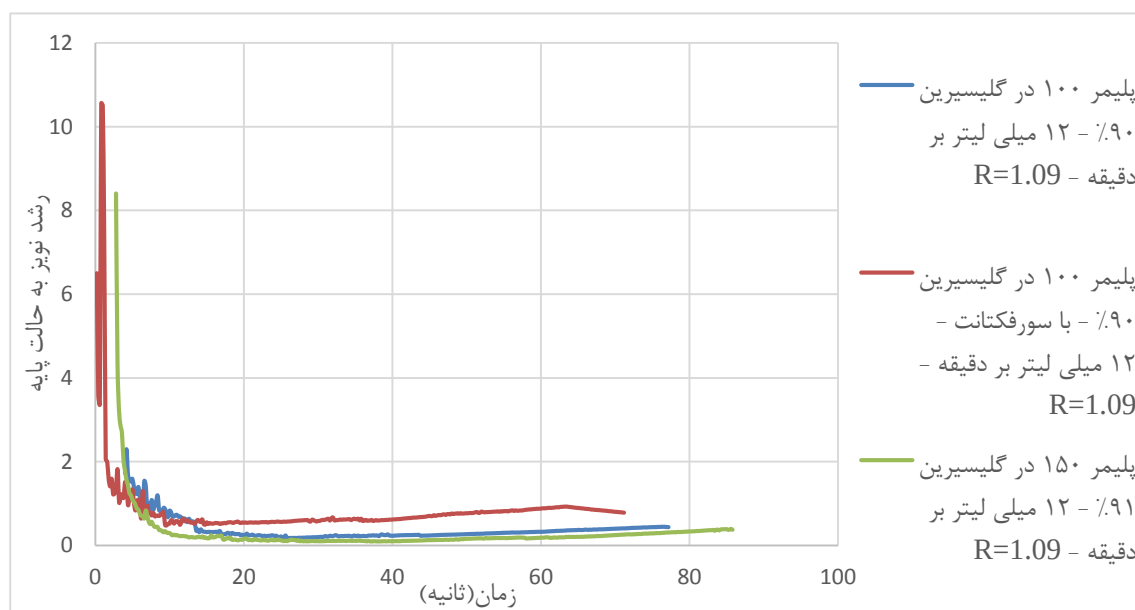


شکل ۳-۴۰ - رشد نويز به حالت پایه در جابجایی‌های نیوتنی-نیوتنی

شکل ۳-۴۲ مربوط به رشد نويز به حالت پایه در جابجایی نیوتنی-پلیمری می‌باشد و در آن اثر اختلاف ویسکوزیته و افزایش الاستیسیته قابل مشاهده است. مطابق شکل، افزایش نسبت ویسکوزیته باعث افزایش سرعت رشد انگشتی‌ها نسبت به حالت پایه می‌شود و این موضوع مستقل از نوع جابجایی می‌باشد. با افزایش اثر الاستیک و ثابت ماندن نسبت ویسکوزیته، نسبت طول بزرگترین انگشتی به حالت پایه تغییری نمی‌کند. البته این بدان معنا نیست که دو جابجایی کاملاً شبیه هم هستند بلکه در بازده جاروبی و تعداد انگشتی‌ها یا ضخامت انگشتی‌ها تفاوت دارند. در شکل ۳-۴۱ نیز رفتار مشابهی با حالت قبل مشاهده شد. تابعیت رشد نويز به حالت پایه طبق مطالعه حاضر، نسبت به دبی و نسبت ویسکوزیته می‌باشد.



شکل ۳-۴۲ - نسبت نويز به حالت پايه در جابجايي هاي نيوتني-پليمري



شکل ۳-۴۱ - نسبت نويز به حالت پايه در جابجايي هاي پليمري-نيوتني

۴ فصل چهارم:

نتیجه گیری

در این قسمت به بیان نتایج مشاهدات و ارزیابی‌های خود از اثر عوامل مختلف بر ناپایداری انگشتی لزج خواهیم پرداخت. در نهایت پیشنهاداتی برای انجام کارهای بعدی ارائه خواهیم کرد.

۴-۱ نتایج

در این مطالعه به بررسی اثر خواص الاستیک بر ناپایداری انگشتی لزج مخلوط‌شدنی در سلول هل-شاو که مدلی از محیط متخلخل می‌باشد، پرداختیم. تلاشی برای یافتن تابعیت عوامل مختلف نیز انجام شده است. اثر عواملی مانند تغییرات دبی، تغییر نسبت ویسکوزیته، افزودن خواص الاستیک، افزایش خواص الاستیک و همچنین در حالتی خاص اثر نیروهای کشش سطحی نیز بررسی شد که آثار تک‌تک این عوامل به طور خلاصه در ادامه خواهد آمد. دو پارامتر مهم و اساسی به نام طول اختلاط و بازده جاروبی معرفی شد که ابزاری برای تحلیل و بررسی کامل ناپایداری می‌باشند. نتایج به طور خلاصه به شرح زیر می‌باشند:

تغییرات دبی: به طور مستقیم بر رشد و پیشرفت حالت پایه تاثیر می‌گذارد و به طور غیر مستقیم بر طول اختلاط. یعنی با افزایش دبی میزان رشد حالت پایه بیش‌تر می‌شود که این موضوع باعث کاهش طول اختلاط می‌گردد. تاثیر پیشرفت‌های یکسان از طول اختلاط و حالت پایه بر بازده جاروبی یکسان نیست و پیشرفت حالت پایه تاثیر به مراتب بیش‌تری دارد. به همین دلیل با افزایش دبی، بازده جاروبی نیز افزایش می‌یابد. افزودن خواص الاستیک تنها باعث افزایش بازده جاروبی می‌شود ولی رفتار رو به رشد تغییری نمی‌کند.

نسبت ویسکوزیته: همان‌طور که در قسمت صحت‌سنجی نیز مشاهده شد، اثر اصلی تغییرات نسبت ویسکوزیته روی طول اختلاط می‌باشد. یعنی در آزمایشات به این نتیجه رسیدیم که طول اختلاط نهایی فقط و فقط به نسبت ویسکوزیته بستگی دارد و افزودن خواص الاستیک نیز هیچ تغییری در این مقدار نهایی این پارامتر ایجاد نمی‌کند. تنها باعث به تاخیر افتادن رشد انگشتی‌ها

می‌گردد و این موضوع یعنی افزایش بازده جاروبی. تاخیر رشد انگشتی‌ها نیز به علت رشد چند انگشتی به جای یک انگشتی اتفاق می‌افتد که علت آن را باید در هم‌بستگی بیش‌تر سیال پلیمری جویا شد. در مجموع با افزایش نسبت ویسکوزیته طول اختلاط افزایش و بازده جاروبی کاهش می‌یابد. افزودن خواص پلیمری باعث به تاخیر افتادن این افزایش و تغییر در میزان این کاهش می‌شود.

الاستیسیته: افزودن الاستیسیته به سیال به علت ایجاد شبکه‌های پلیمری باعث افزایش هم‌بستگی سیال و ایجاد چند انگشتی به جای یک انگشتی می‌شود. این موضوع باعث به تاخیر افتادن ناپایداری و به تبع آن باعث افزایش بازده جاروبی می‌شود. افزایش این خاصیت در نسبت ویسکوزیته ثابت، باعث افزایش این رفتار می‌گردد. در ضمن، الاستیسیته به تنهایی و در عدم وجود اختلاف ویسکوزیته عامل ایجاد انگشتی لزج نیست و علت اصلی این ناپایداری همان اختلاف ویسکوزیته می‌باشد.

کشش سطحی: در جابجایی‌های مخلوط‌شدنی، کشش سطحی اثر خاصی ندارد اما در آزمایشات ما حضور و عدم حضور آن تغییراتی جزئی در نتایج حاصل نمود. مشاهدات حاکی از آن است که حذف نیروهای کشش سطحی، باعث رشد سریع‌تر انگشتی‌ها و در نتیجه کاهش جزئی بازده جاروبی شود. البته رسالت این مطالعه موارد دیگری بود و بررسی کامل آثار این مورد جزو پیشنهادات برای کارهای آتی می‌باشد.

در مورد پارامتر نسبت رشد نوپ به حالت پایه نیز باید بگوییم که به نسبت ویسکوزیته و دبی بستگی دارد. البته پیشنهاد می‌شود این نتیجه در زمان‌های بیش‌تری مورد بررسی قرار بگیرد. آخرین نتیجه این تحقیق این است که با افزودن خواص الاستیک، الگوی رشد انگشتی‌ها نیز تغییر می‌کند.

۴-۲ پیشنهادات

به طور خلاصه و در پایان این مطالعه عامل اصلی ناپایداری انگشتی لزج را همان اختلاف ویسکوزیته

می‌باشد. بنابراین پیشنهادات این مطالعه بیش‌تر پیرامون عوامل موثر بر ویسکوزیته می‌باشد. تابعیت ویسکوزیته در جابجایی‌های نیوتنی کاملاً مشخص است که به طور کلی عبارتند از دما و غلظت.

حضور خواص الاستیک در این پدیده باعث بهبود می‌شود و عاملیت اصلی نیست. حال که می‌دانیم صلاحی اتفاق می‌افتد، اولین اقدامات می‌بایست یافتن تابعیت‌ها برای ویسکوزیته در این زمینه است که در علم رئولوژی این اتفاق می‌افتد.

این تلاش، به طور مشخص پیشنهاد می‌کند انتقال حرارت بر این پدیده در زمینه جابجایی‌های نیوتنی بررسی شود و آثار عوامل مختلف به‌دست آید. این بررسی از جنبه سیال جابجاشونده و سیال جابجاکننده و همچنین بازه‌های انتقال حرارتی متفاوت امکان انجام را دارد و عرصه نسبتاً ناشناخته و گسترده‌ای است. همچنین امکان بررسی کامل آثار کشش سطحی نیز فراهم نشد که این مورد خود زمینه جذابی است. مطالعه پارامتر نسبت رشد نويز به حالت پایه زمینه مناسبی برای دست یافتن به نتایج کاربردی در صنعت را فراهم می‌کند. فقط این نکته را باید لحاظ کرد که سلول ساخته شده باید ابعادی بزرگتر از مطالعه حاضر داشته باشد. اکثر نتایج گزارش شده در مطالعات مربوط به انگشتی لزج، کیفی می‌باشند. با ساخت ستاپی مناسب، بررسی کیفی و کمی در کنار هم نیز بسیار کاربردی می‌باشد. بررسی عددی این پدیده در صورت امکان، نیز کمک شایانی به یافتن عوامل مختلف جهت کنترل و بهبود ناپایداری انگشتی لزج می‌کند.

۱. Homsy, G.M. (1987) "Viscous Fingering in Porous Media" **Annual Review of Fluid Mechanics**.19(1),p,271-311.
۲. Chuoke, R.L., P.v. Meurs, and C.v.d. Poel (1959) *The Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-Liquid Displacements in Permeable Media*.
۳. Perrine, R.L. (1961) *The Development of Stability Theory for Miscible Liquid-Liquid Displacement*.
۴. Wooding, R. (1962) "The stability of an interface between miscible fluids in a porous medium" **Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP**.13,(۳)p,255-266.
۵. Rogerson, A. and E. Meiburg (1993) "Shear stabilization of miscible displacement processes in porous media" **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)**.5(6),p,1344-1355.
۶. Rogerson, A. and E. Meiburg (1993) "Numerical simulation of miscible displacement processes in porous media flows under gravity" **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)**.5(11),p,2644-2660.
۷. De Wit, A. and G.M. Homsy (1997) "Viscous fingering in periodically heterogeneous porous media. I. Formulation and linear instability" **The Journal of Chemical Physics**.107(22),p,9609-9618.
۸. Mishra, M., M. Martin, and A. De Wit (2007) "Miscible viscous fingering with linear adsorption on the porous matrix" **Physics of Fluids (1994-present)**.19(7),p.-,
۹. Ghesmat, K. and J .Azaiez (2008) "Viscous Fingering Instability in Porous Media: Effect of Anisotropic Velocity-Dependent Dispersion Tensor" **Transport in Porous Media**.73(3),p,297-318.
۱۰. KOVAL, E.J. (1963) *A Method for Predicting the Performance of Unstable Miscible Displacement in Heterogeneous Media*.
۱۱. Fayers, F.J. (1988) "An Approximate Model With Physically Interpretable Parameters for Representing Miscible Viscous Fingering" **SPE Reservoir Engineering**.3(2),p,551-558.
۱۲. PEACEMAN, D.W. and H.H. RACHFORD JR. (1962) *Numerical Calculation of Multidimensional Miscible Displacement*.
۱۳. Christie, M.A. and D.J. Bond (1987) "Detailed Simulation of Unstable Processes in Miscible Flooding" **SPE Reservoir Engineering**.2(4),p,514-522.
۱۴. Tan, C.T. and G.M. Homsy (1988) "Simulation of nonlinear viscous fingering in miscible displacement" **Physics of Fluids (1958-1988)**.31(6),p,1330-1338.
۱۵. Christie, M.A., *High-Resolution Simulation of Unstable Flows in Porous Media*. 1989.
۱۶. Tan, C. and G. Homsy (1987) "Stability of miscible displacements in porous media: Radial source flow" **Physics of Fluids**.30(1239).
۱۷. Zimmerman, W.B. and G.M. Homsy (1992) "Viscous fingering in miscible

- displacements: Unification of effects of viscosity contrast, anisotropic dispersion, and velocity dependence of dispersion on nonlinear finger propagation" **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)**.4(11),p,2348-2359.
- .١٨ Zimmerman, W.B. and G.M. Homsy (1992) "Three-dimensional viscous fingering: A numerical study" **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)**.4(6),p,1099-1101.
- .١٩ Tan, C.T. and G.M. Homsy (1992) "Viscous fingering with permeability heterogeneity" **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)**.4(6),p,1099-1101.
- .٢٠ Sajjadi, M. and J. Azaiez (2013) "Dynamics of fluid flow and heat transfer in homogeneous porous media" **The Canadian Journal of Chemical Engineering**.91(4),p,687-697.
- .٢١ McDonald, A.E., *APPROXIMATE SOLUTIONS FOR FLOW ON NON-NEWTONIAN POWER LAWS FLUIDS THROUGH POROUS MEDIA*, in *SPE Reservoir Simulation Symposium*. 1979, 1979 Copyright 1979, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. Petroleum Engineers, Inc. This paper was presented at the 1979 Society of Petroleum Engineers at AIME Fifth Symposium on Reservoir Simulation held in Denver, Colorado , February, 1-2, The material is subject to correction by the author. Permission to copy is restricted to an abstract of not more than 300 words. Write 6200 N. Central Expy., Dallas, Tx. 75206.: Denver, Colorado.
- .٢٢ Pascal, H. (1983) "Nonsteady flow of non-Newtonian fluids through a porous medium" **International Journal of Engineering Science**.21(3),p,199-210.
- .٢٣ Hill, S. and F.I. P (1952) "Channeling in packed columns" **Chemical Engineering Science**.1(6),p,247-253.
- .٢٤ Slobod, R.L. and B.H. Caudle, *X-Ray Shadowgraph Studies of Areal Sweepout Efficiencies*. 1952.
- .٢٥ Van Meurs, P., *The Use of Transparent Three-Dimensional Models for Studying the Mechanism of Flow Processes in Oil Reservoirs*. 1957.
- .٢٦ Saffman, P.G. and G. Taylor (1958) "The Penetration of a Fluid into a Porous Medium or Hele-Shaw Cell Containing a More Viscous Liquid" **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**.245(1242),p,312-329.
- .٢٧ Habermann, B., *The Efficiency of Miscible Displacement as a Function of Mobility Ratio*. 1960.
- .٢٨ Benham, A.L. and R.W. Olson, *A Model Study of Viscous Fingering*. 1963.
- .٢٩ Slobod, R.L. and R.A. Thomas, *Effect of Transverse Diffusion on Fingering In Miscible-Phase Displacement*. 1963.
- .٣٠ Perkins, T.K., O.C. Johnston ,and R.N. Hoffman, *Mechanics of Viscous Fingering in Miscible Systems*. 1965.
- .٣١ Perkins, T.K. and O.C. Johnston, *A Study of Immiscible Fingering in Linear Models*. 1969.
- .٣٢ Saghir, M.Z., O. Chaalal, and M.R. Islam (2000) "Numerical and experimental modeling of viscous fingering during liquid-liquid miscible displacement"

- Journal of Petroleum Science and Engineering**.26(1–4),p,253-262.
- .۳۳ Marshall, R.J. and A.B. Metzner (1967) "Flow of Viscoelastic Fluids through Porous Media" **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**.6(3),p,393-400.
- .۳۴ Lee, K.S. and E.L. Claridge, *Areal Sweep Efficiency of Pseudoplastic Fluids in a Five-Spot Hele-Shaw Model*. 1968.
- .۳۵ Daccord, G., J. Nittmann, and H.E. Stanley (1986) "Radial viscous fingers and diffusion-limited aggregation: Fractal dimension and growth sites" **Physical Review Letters**.56(4),p,336-339.
- .۳۶ Allen, E. and D.V. Boger, *The Influence of Rheological Properties on Mobility Control in Polymer-Augmented Waterflooding*. 1988.
- .۳۷ Bonn, D., et al. (1995) "Viscous fingering in complex fluids" **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**.220(1–2),p,60-73.
- .۳۸ Kawaguchi, M., K. Makino, and T. Kato (1997) "Comparison of viscous fingering patterns in polymer and newtonian solutions" **Physica D: Nonlinear Phenomena**.105(1–3),p,121-129.
- .۳۹ De Malsche, W., et al. (2009) "Visualization and quantification of the onset and the extent of viscous fingering in micro-pillar array columns" **Journal of Chromatography A**.1216(29),p,5511-5517.
- .۴۰ Avendano, J., et al. (201) "Enhanced displacement of a liquid pushed by a viscoelastic fluid" **Journal of Colloid and Interface Science**.410(0),p,172-180.
- .۴۱ Malhotra, S. and M.M. Sharma (2014) "Impact of fluid elasticity on miscible viscous fingering" **Chemical Engineering Science**.117(125-135).
- .۴۲ Zimmerman, W.B. and G.M. Homsy (1991) "Nonlinear viscous fingering in miscible displacement with anisotropic dispersion" **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)**.3(8),p,1859-1872.
- .۴۳ Zimmerman, W. and G. Homsy (1992) "Viscous fingering in miscible displacements: Unification of effects of viscosity contrast, anisotropic dispersion, and velocity dependence of dispersion on nonlinear finger propagation" **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)**.4(11),p,2348-2359.

Abstract

Viscous fingering instability is a well-known hydrodynamic instability in porous media. This phenomena occur when a less viscous fluid is injecting in a porous media that filled with more viscous fluid. Onset and propagation of fingers are playing an important role in fluids displacement, specially in oil discovery from reservoirs. Study of viscous fingering classify in two main category: miscible and immiscible displacements. Main researches on miscible viscous fingering has been on Newtonian fluids. Investigation of non-newtonian fluids generally is numerical and with GNF models that can't describe elastic effects.

In this try, we want to investigate elastic effects on viscous fingering experimentally. Special group of dilute polymer solution that called Boger fluids, separate elastic effect from viscous effects. We increase polymer concentration to arise elastic effects. Also we use Hele-Shaw cell as a clear porous media. In this study, we investigate effects of some factors on miscible viscous fingering e.g. viscosity differences, flow rate, elasticity and surfactants. Effects of each factors on finger's shape and sweep efficiency was expressed.

Keywords: viscous fingering instability, porous media, Hele-Shaw cell, miscible displacement, Boger fluids, fluid elasticity



Shahrood University

Department of Mechanical Engineering

**Experimental Investigation of Elastic Properties
Effects on Viscous Fingering Instability**

By:

Saeed Vaezi

Supervisors:

Dr. Mahmud norouzi

Dr. Ali jabbari moghadam

Co-Supervisors:

Dr. Mojtaba ghati

September 2015