

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بررسی آزمایشگاهی ناپایداری انگشتی سیالات ویسکوالاستیک

به صورت مخلوط نشدنی در یک محیط متخلخل

نگارنده:

احمد کاظمی

اساتید راهنما:

دکتر علی عباس نژاد

دکتر محمود نوروزی

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۳۵۴/۲۸۷/۱۳۴
تاریخ: ۹۷/۶/۱۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای احمد کاظمی با شماره دانشجویی ۹۴۱۴۳۵۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی ناپایداری انگشتی سیالات ویسکوالاستیک، به صورت مخلوط‌نشدنی در یک محیط متخلخل که در تاریخ ۱۳۹۷/۶/۱۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید، به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی.....) ☒ ☐ مردود			
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	علی عباس نژاد	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	محمود نوروزی	دانشیار	
۳- نماینده تحصیلات تکمیلی	محمد محسن شاه‌مردان	دانشیار	
۴- استاد ممتحن اول	محسن نظری	دانشیار	
۵- استاد ممتحن دوم	محمد حسن کیهانی	استاد	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه‌مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز: تحویل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم

و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از

پروردگار، مایه هستی ام بوده اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این

وادی زندگی پر از فراز و نشیب به من آموختند.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ برحسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ : "

از استادان با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر محمود نوروزی و جناب آقای دکتر علی عباس‌نژاد که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از دوستان عزیزم؛ سید امید حقّی، حسین نوری و سید مجید خطیبی به جهت کمک‌های دلسوزانه و بی‌چشم‌داشتشان؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم، باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

احمد کاظمی

۱۳۹۷

تعهد نامه

اینجانب **احمد کاظمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بررسی آزمایشگاهی ناپایداری انگشتی سیالات ویسکوالاستیک به صورت مخلوط‌نشدنی در یک محیط متخلخل تحت راهنمایی دکتر محمود نوروزی و دکتر علی عباس‌نژاد متعهد می‌شوم.**

- 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 صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- 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 اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در بسیاری از کاربردهای صنعتی و شیمیایی مانند استخراج نفت در صنایع پتروشیمی و آزمایشگاه‌های شیمی به منظور جداسازی مایعات مختلف از هم و ... با پدیده‌ی ناپایداری سافمن-تیلور مواجه هستیم. به این صورت که سیال با ویسکوزیته‌ی کمتر به داخل سیال با ویسکوزیته بالاتر تزریق می‌شود. در مطالعه حاضر به صورت آزمایشگاهی، ضمن بهره‌گیری از یک محیط متخلخل متراکم از دانه‌های شیشه‌ای که به شرایط واقعی یک میدان نفتی بسیار نزدیک می‌باشد، اثر الاستیسیته‌ی سیال جابه‌جا کننده روی سیال بستر (روغن سیلیکون)، در یک جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی مورد بررسی قرار گرفته است. در تمام آزمایشات، روغن سیلیکون به عنوان سیال جابه‌جاشونده استفاده گردیده است. ضمن اینکه برای ساخت سیالات جابه‌جاکننده نیوتنی، از اختلاط آب و گلیسرین و همچنین برای ساخت سیالات غیرنیوتنی از ترکیب آب، گلیسرین و پودر پلی‌آکریلامید به عنوان پلیمر، استفاده گردیده است. در هر آزمایش درصد پلیمر اضافه شده به سیال افزایش می‌یابد و در هر حالت با سیال نیوتنی معادل مقایسه شده است. سیال‌های پلیمری ساخته شده تا مقدار ۱۰۰ ppm جزء سیالات باگر دسته‌بندی می‌شوند که در نرخ برش‌های مختلف ویسکوزیته‌ی ثابتی دارند. ولی سیالات با غلظت بالاتر پلیمر، خاصیت الاستیک بیشتری خواهند داشت و جزء سیالات باریک‌شونده دسته‌بندی می‌شوند. به این معنی که در نرخ برش‌های مختلف ویسکوزیته‌ی مختلفی دارند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد، در مقایسه با جابه‌جایی نیوتنی که به دلیل تشکیل انگشتی‌های بسیار ریز، جاروب شدن سیال بستر مطلوب نمی‌باشد، افزایش اثر الاستیک سبب می‌شود از تعداد انگشتی‌های ریز کاسته شده و با تشکیل انگشتی‌های ضخیم تر، سیال بستر بهتر جاروب شود. این روند بهبود در جابه‌جایی، برای سیال پلیمری ۴۰۰ ppm به اوج خود رسیده است که شاهد بهترین عملکرد در جاروب کردن سیال بستر هستیم. در این مطالعه توسط دو پارامتر ارزیابی نتایج یعنی بازده جاروبی و طول اختلاط، اثر افزایش نسبت ویسکوزیته‌ها و افزایش عدد بی بعد بلیک بر روی جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی بررسی گردید. مشاهده شد، با افزایش هر کدام از دو عامل اخیر بازده جاروبی کاهش و طول اختلاط افزایش می‌یابد. همچنین جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی با یک جابه‌جایی مخلوط‌شدنی مقایسه گردید. نتایج نشان داد در حالت مخلوط‌نشدنی نسبت به حالت مخلوط‌شدنی، از تعداد انگشتی‌ها کاسته و به ضخامت آن‌ها افزوده شده است که این امر نیز به بهبود بازده جاروبی انجامید.

کلید واژه‌گان: ناپایداری سافمن-تیلور، انگشتی، جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی، محیط متخلخل، دانه‌های شیشه‌ای، الاستیسیته، باریک‌شوندگی، روغن سیلیکون، پلی‌آکریلامید، بازده جاروبی، طول اختلاط

فهرست

فصل ۱ مقدمه و تاریخچه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ سیالات غیرنیوتنی	۸
۱-۲-۱ سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان	۸
۱-۲-۲ سیالات غیر نیوتنی وابسته به زمان	۹
۱-۲-۳ سیالات ویسکوالاستیک	۱۰
۱-۳ مفاهیم و اصطلاحات	۱۲
۱-۴ سلول هل-شاو	۱۴
۱-۵ مروری بر تحقیقات گذشته	۱۵
۱-۵-۱ شبیه سازی‌های عددی	۱۶
۱-۵-۲ مطالعات آزمایشگاهی	۱۸
۱-۶ معرفی مطالعه حاضر	۲۴
۱-۷ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۲۸
فصل ۲ تجهیزات آزمایشگاهی	۲۹
۲-۱ تجهیزات آزمایشگاهی	۳۰
۲-۱-۱ پمپ پرستالتیک	۳۰
۲-۱-۲ دمپر پمپ	۳۱
۲-۱-۳ ترازو	۳۲
۲-۱-۴ همزن هاتپلنت	۳۳
۲-۱-۵ دوربین	۳۴
۲-۱-۶ دستگاه رئومتر	۳۴
۲-۱-۷ ستاپ آزمایش	۳۵
۲-۱-۷-۱ شیر ورودی و خروجی	۳۸
۲-۱-۷-۲ کولکتور ورودی	۳۹
۲-۱-۷-۳ رابط شیر خروجی	۴۰
۲-۱-۷-۴ محیط متخلخل شفاف	۴۱
۲-۲ صحت سنجی ستاپ آزمایش	۴۲

۴۲	۲-۲-۱ یکنواختی جبهه‌ی پیشرونده
۴۳	۲-۲-۲ تکرارپذیری آزمایش‌ها
۴۴	۲-۳ سیالات مورد استفاده
۴۴	۲-۳-۱ روغن سیلیکون
۴۶	۲-۳-۲ محلولهای پلیمری
۴۸	۲-۴ تست‌های رئومتر
۴۹	۲-۴-۱ تست کشش سطحی
۵۲	۲-۴-۲ تست ویسکوزیته
۵۲	۲-۴-۲-۱ نمونه پلیمری ۵۰ ppm
۵۴	۲-۴-۲-۲ نمونه پلیمری ۲۰۰ ppm
۵۶	۲-۴-۲-۳ نمونه پلیمری ۴۰۰ ppm
۵۸	۲-۴-۲-۴ ویسکوزیته روغن سیلیکون
۶۰	۲-۵ اعداد بی بعد
۶۰	۲-۵-۱ عدد بی بعد موینگی
۶۴	۲-۵-۲ عدد بی بعد بلیک
۶۶	۲-۵-۳ عدد بی بعد وایزبرگ
۷۱	۲-۵-۴ -عدد بی بعد الاستیسیته
۷۲	۲-۶ مراحل انجام آزمایش
۷۶	۲-۷ شماتیک کلی ستاپ آزمایش
۷۷	فصل ۳ پارامترهای ارزیابی نتایج و پردازش تصویر
۷۸	۳-۱ پارامترهای ارزیابی نتایج
۷۸	۳-۱-۱ بازده جارویی
۷۸	۳-۱-۲ طول اختلاط
۸۰	۳-۲ پردازش تصویر
۸۱	۳-۲-۱ انواع تصاویر
۸۴	۳-۲-۲ مراحل پردازش تصویر آزمایش‌ها
۸۴	۳-۲-۲-۱ ویرایش فیلم
۸۵	۳-۲-۲-۲ پیش پردازش تصاویر
۸۷	۳-۲-۲-۳ پردازش اصلی تصاویر

فصل ۴ بررسی نتایج و داده‌ها ۸۹

۴-۱ مقدمه..... ۹۰

۴-۲ آزمایش‌های مربوط به سیالات نیوتنی ۹۰

۴-۲-۱ تاثیر افزایش نسبت ویسکوزیته‌ها..... ۹۰

۴-۲-۲ اثر افزایش عدد بی بعد بلیک..... ۹۴

۴-۲-۳ مقایسه بین حالت مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی ۹۵

۴-۳ آزمایش‌های مربوط به سیالات غیرنیوتنی ۹۷

۴-۳-۱ اثر افزایش الاستیسته ۹۸

۴-۳-۲ افزایش نسبت ویسکوزیته..... ۱۰۱

۴-۳-۳ افزایش بلیک ۱۰۴

۴-۳-۴ مقایسه جابجایی غیرنیوتنی در حالت مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی ۱۰۵

فصل ۵ نتیجه‌گیری ۱۰۹

۵-۱ مقدمه..... ۱۱۰

۵-۲ نتیجه‌گیری..... ۱۱۰

۵-۲-۱ اثر افزایش الاستیسیته..... ۱۱۰

۵-۲-۲ اثر افزایش نسبت ویسکوزیته‌ها..... ۱۱۱

۵-۲-۳ اثر افزایش عدد بی بعد بلیک..... ۱۱۲

۵-۲-۴ مقایسه جابجایی مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشدنی مطالعه حاضر ۱۱۲

۵-۳ پیشنهادها ۱۱۳

مراجع ۱۱۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نمونه ای از جابه جایی مخلوط نشدنی در یک محیط متخلخل مطالعه حاضر ۲
- شکل ۲-۱ فاز اولیه استخراج نفت ۴
- شکل ۳-۱ فاز ثانویه استخراج نفت ۵
- شکل ۴-۱ فاز ثالثیه استخراج نفت ۶
- شکل ۵-۱ توزیع حجمی نفت آمریکا در سال ۱۹۹۳ ۷
- شکل ۶-۱ نمودار تنش- کرنش سیالات مستقل از زمان ۹
- شکل ۷-۱ نمودار تنش- کرنش سیالات وابسته به زمان ۱۰
- شکل ۸-۱ شماتیک جریان آزاد کوئت ۱۱
- شکل ۹-۱ سلول هل-شاو ۱۴
- شکل ۱۰-۱ محیط متخلخل دارای لایه‌هایی با نفوذپذیری متفاوت ۲۳
- شکل ۱۱-۱ بررسی جابه‌جایی دو سیال وابسته به عمق کانال ۲۳
- شکل ۱۲-۱ تصویر سمت چپ جابجایی در عدم حضور و تصویر سمت راست جابجایی در حضور پلیمر ۲۴
- شکل ۱۳-۱ نمایی از فضای داخلی یک محیط متخلخل ۲۵
- شکل ۱۴-۱ نمایی از سلول مورد استفاده در مطالعه حاضر که داخل آن از دانه های شیشه ای پر شده است ۲۵
- شکل ۱-۲ پمپ پرستالتیک ۳۱
- شکل ۲-۲ دمپر پمپ پرستالتیک ۳۲
- شکل ۳-۲ ترازوی با دقت چهار رقم اعشار از شرکت Satorios ۳۲
- شکل ۴-۲ همزن هات پلیت شرکت IKA آلمان ۳۳
- شکل ۵-۲ دوربین فیلم برداری ساخت شرکت کنون با قابلیت تصویر برداری Full HD ۳۴
- شکل ۶-۲ دستگاه رئومتر Anton Paar ۳۵
- شکل ۷-۲ اختلاف فشار بر حسب دبی تزریقی ۳۷
- شکل ۸-۲ نماهای مختلف شیر مورد استفاده در سلول مطالعه حاضر ۳۹
- شکل ۹-۲ کولکتور ورودی ستاپ آزمایش ۳۹
- شکل ۱۰-۲ رابط شیر خروجی ستاپ آزمایش ۴۰
- شکل ۱۱-۲ محیط متخلخل مطالعه حاضر به همراه دانه های شیشه ای متراکم داخل آن ۴۱
- شکل ۱۲-۲ نمای کلی ستاپ پس از در کنار هم قرار گرفتن قسمت های مختلف ۴۱
- شکل ۱۳-۲ تزریق آب رنگی به داخل آب بدون رنگ با دبی ۱۰ میلی لیتر ۴۲
- شکل ۱۴-۲ تزریق محلول ۳/۳۸ به سیال بستر روغن سیلیکون ۴۳
- شکل ۱۵-۲ ترکیب شیمیایی روغن سیلیکون ۴۵

- شکل ۲-۱۶ نمونه ای از روغن سیلیکون ساخت شرکت KCC..... ۴۵
- شکل ۲-۱۷ ترکیب شیمیایی پلی آکریلامید..... ۴۶
- شکل ۲-۱۸ آب مقطر، پلی آکریلامید و گلیسرین مورد استفاده در آزمایش ها..... ۴۷
- شکل ۲-۱۹ نحوه ایجاد کشش سطحی در سطوح مایعات..... ۴۹
- شکل ۲-۲۰ دو سیال در تماس باهم..... ۵۰
- شکل ۲-۲۱ دستگاه کشش سطحی آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود..... ۵۱
- شکل ۲-۲۲ نمودار ویسکوزیته برحسب نرخ برش برای پلیمر ۵۰..... ۵۲
- شکل ۲-۲۳ نمودار ویسکوزیته برحسب نرخ برش برای پلیمر ۲۰۰..... ۵۵
- شکل ۲-۲۴ نمودار ویسکوزیته برحسب نرخ برش برای پلیمر ۴۰۰..... ۵۶
- شکل ۲-۲۵ نمودار تعیین رژیم جریان مورد مطالعه لنورمند و همکاران..... ۶۱
- شکل ۲-۲۶ ناحیه آزمایش های مطالعه حاضر در نمودار رژیم جریان..... ۶۳
- شکل ۲-۲۷ رفتار مدول های G' و G'' برای باگر ۵۰..... ۶۸
- شکل ۲-۲۸ رفتار مدول های G' و G'' برای سیال پلیمری ۴۰۰..... ۶۹
- شکل ۲-۲۹ تراز نمودن ستاپ در دو جهت طولی و عرضی..... ۷۳
- شکل ۲-۳۰ پر شدن ستاپ از سیال بستر (روغن سیلیکون)..... ۷۳
- شکل ۲-۳۱ زمان شروع و پایان فیلم برداری از آزمایش ها..... ۷۴
- شکل ۲-۳۲ شماتیک مجموعه ستاپ مطالعه حاضر در حال آزمایش..... ۷۶
- شکل ۳-۱ شماتیک طول اختلاط..... ۷۹
- شکل ۳-۲ تصویر RGB..... ۸۲
- شکل ۴-۱ افزایش نسبت ویسکوزیته جابه جایی نیوتنی: برای سه آزمایش عدد کیلاری $Ca = 0/029$ ۹۴
- شکل ۴-۲ طول اختلاط برای نسبت ویسکوزیته های مختلف، $Q=5 \text{ ml/min}$ ۹۶
- شکل ۴-۳ بازده جاروبی برای نرخ ویسکوزیته های مختلف، $Q=5 \text{ ml/mi}$ ۹۶
- شکل ۴-۴ تزریق محلول $10/2/4$ به محلول $838/5 - 8/19$ ، $Ca = 0/049$ ، $M^* = 2/56$ ۹۷
- شکل ۴-۵ طول اختلاط برای بلیک های مختلف، $M^* = 2/56$ ۹۸
- شکل ۴-۶ بازه جاروبی بلیک های برای مختلف، $M^* = 2/56$ ۹۹
- شکل ۴-۷ مقایسه ی جابه جایی نیوتنی در دو حالت مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی..... ۱۰۰
- شکل ۴-۸ طول اختلاط برای جابه جایی مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی..... ۱۰۱
- شکل ۴-۹ بازده جاروبی برای جابه جایی مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱۰ اثر افزایش الاستیسیته بر جابه جایی مخلوط نشدنی..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۱ طول اختلاط برای جابه جایی روغن سیلیکون توسط سیالات با درصد جرمی مختلف از پلی-آکریلامید..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۲ بازده جاروبی برای جابه جایی روغن سیلیکون توسط سیالات با درصد جرمی مختلف از پلی-آکریلامید..... ۱۰۵

- شکل ۴-۱۳ افزایش نسبت ویسکوزیته‌ها برای جابه‌جایی غیرنیوتنی ۱۰۶
- شکل ۴-۱۴ طول اختلاط برای جابه‌جایی روغن سیلیکون توسط پلیمر ۴۰۰ با نسبت ویسکوزیته‌های مختلف ۱۰۷
- شکل ۴-۱۵ بازده جاروبی برای جابه‌جایی روغن سیلیکون توسط پلیمر ۴۰۰ با نسبت ویسکوزیته‌های مختلف ۱۰۷
- شکل ۴-۱۶ اثر افزایش عدد بلیک بر جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی غیرنیوتنی ۱۰۸
- شکل ۴-۱۷ طول اختلاط برای جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی غیرنیوتنی در بلیک‌های مختلف ۱۰۹
- شکل ۴-۱۸ بازده جاروبی برای جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی غیرنیوتنی در بلیک‌های مختلف ۱۰۹
- شکل ۴-۱۹ مقایسه‌ی جابه‌جایی نیوتنی در دو حالت مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشدنی ۱۱۰
- شکل ۴-۲۰ طول اختلاط جابه‌جایی غیرنیوتنی برای حالت مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشدنی ۱۱۱
- شکل ۴-۲۱ بازده جاروبی جابه‌جایی غیرنیوتنی برای حالت مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشدنی ۱۱۱

فهرست جداول

جدول ۱-۲	مقادیر کشش سطحی مواد مختلف مورد استفاده در مطالع حاضر	۵۱
جدول ۲-۲	ویسکوزیته پلیمر ۲۰۰ برای نرخ برشهای مختلف	۵۵
جدول ۳-۲	ویسکوزیته پلیمر ۴۰۰ برای نرخ برشای مختلف	۵۶
جدول ۴-۲	ویسکوزیته و چگالی آب و محلولهای آب و گلیسرین	۵۷
جدول ۵-۲	ویسکوزیته های روغن سیلیکون مورد استفاده در مطالعه حاضر	۵۹
جدول ۶-۲	اعداد موینگی برای آزمایشهای مطالعه حاضر	۶۲
جدول ۷-۲	اعداد بلیک برای سیالهای جا به جا کننده مطالعه حاضر در دبیهای مختلف	۶۴
جدول ۸-۲	مقادیر زمان رهایی از تنش برای سیالات پلیمری مختلف	۷۰
جدول ۹-۲	مقادیر اعداد وایزنبرگ برای سیال های جابه جا کننده پلیمری	۷۰
جدول ۱۰-۲	مقدار عدد الاستیسیته را برای سیال های پلیمری این مطالعه	۷۲

فصل ۱

مقدمه و تاریخچه

۱-۱ مقدمه

در کاربردهای بسیاری نظیر مطالعه جریان آب‌های سطحی و زیرسطحی، کروماتوگرافی^۱، علوم مربوط به بررسی پراکندگی آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مواد هیدروکربنی، جداسازی مواد و بازیابی مخازن نفتی به منظور ازدیاد برداشت نفت^۲، با ناپایداری مواجه هستیم که ناپایداری سافمن-تیلور^۳ نامیده می‌شود. این ناپایداری زمانی اتفاق می‌افتد که یک سیال با ویسکوزیته کمتر، سیال با ویسکوزیته بیشتر را جابه‌جا می‌کند. سطح مشترک دو سیال به علت اختلاف در ویسکوزیته، ناپایدار شده و با ادامه یافتن تزریق، الگوهایی شبیه به انگشت در سطح مشترک دو سیال ایجاد می‌شود. این ناپایداری به دو صورت مخلوط‌شدنی^۴ و مخلوط‌نشدنی^۵ اتفاق می‌افتد. شکل ۱-۱ نمونه ای از این ناپایداری در حالت مخلوط-نشدنی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ نمونه ای از جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی در یک محیط متخلخل مطالعه حاضر

زمانیکه جابجایی بین دو سیال مخلوط‌شدنی می‌باشد، نیروی فشاری وارد شده بر سیال جابجا کننده که ناشی از جابجایی سطح مشترک می‌باشد، به صورت رابطه‌ی (۱-۱)، بیان می‌گردد [۱]:

¹ Chromatography

² Enhanced Oil Recovery

³ Saffman-taylor instability

⁴ Miscible

⁵ Immiscible

$$(P_1 - P_2) = \left[\frac{(\mu_2 - \mu_1)U}{k} + (\rho_1 - \rho_2)g \right] \delta x \quad (1-1)$$

اگر نیروی خالص فشاری مثبت باشد، هر جابه‌جایی 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 ناپایدارکننده جریان باشند. مثلاً جابه‌جایی عمودی و رو به پایین را در نظر بگیرید که در آن سیالی با ویسکوزیته و چگالی بیشتر توسط سیال دیگری با چگالی و ویسکوزیته کمتر جابه‌جا می‌شود، یعنی داشته باشیم:

$$(\rho_1 - \rho_2) < 0 \quad ; \quad (\mu_2 - \mu_1) > 0 \quad (1-2)$$

در این حالت ویسکوزیته عامل ناپایداری است در حالی که گرانش عامل پایدارکننده می‌باشد. معمولاً در بیشتر بررسی‌ها از عامل چگالی صرف‌نظر می‌گردد و تنها عامل ناپایدارکننده جریان، اختلاف ویسکوزیته می‌باشد.

اما در حالت مخلوط‌نشدنی، اختلاف فشار علاوه بر اختلاف ویسکوزیته، از کشش سطحی^۱ بین دو سیال نیز متاثر می‌باشد:

$$(P_1 - P_2) = \sigma K_n \quad (1-3)$$

در اینجا σ کشش سطحی بین دو سیال و K_n انحناى سطح مرز مشترک را نشان می‌دهد. در جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی علاوه بر نیروهای ویسکوز، نیروهای موینگی^۲ نیز در تغییر شکل الگوهای این

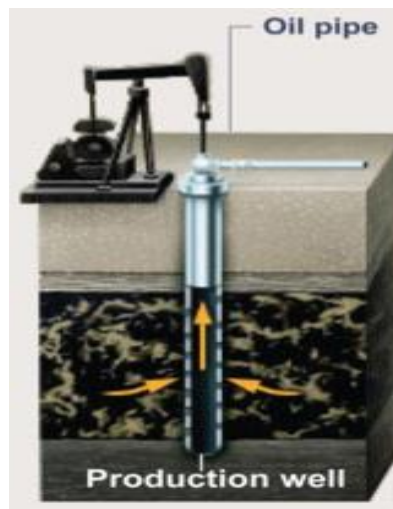
¹ Surface Tension

² Capillary Forces

ناپایداری موثر می‌باشند [۲].

از بین کار برده‌های مطرح شده برای ناپایداری انگشتی، ازدیاد برداشت نفت از اهمیت بالایی برخوردار است و موضوع مطالعات زیادی قرار گرفته است. باید توجه داشت که ناپایداری انگشتی در مبحث بازیابی مخازن نفتی یک پدیده‌ی نامطلوب تلقی می‌گردد و تلاش بر آن است که با کاهش این ناپایداری، راندمان برداشت نفت، بهبود یابد. بسته به عمر تولیدی یک مخزن، بازیابی نفت شامل سه فاز می‌باشد: فاز اولیه^۱، فاز ثانویه^۲ و فاز ثالثیه^۳.

شکل ۱-۲ فاز اولیه را نشان می‌دهد که در آن، نفت موجود در مخزن با فشار اولیه موجود در خود مخزن به سمت بیرون جریان می‌یابد. در این مرحله تنها حدود ۵ الی ۱۰ درصد نفت موجود در مخزن، برداشت می‌شود. شکل ۱-۲ برداشت اولیه‌ی نفت را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲ فاز اولیه استخراج نفت

در بازیابی ثانویه به دلیل کاهش فشار طبیعی مخزن، در اطراف چاه تولیدی^۴ آب یا گاز تزریق

¹ Primary

² Secondary

³ Tertiary

⁴ Producing Well

می‌گردد، به این ترتیب، نفت به سمت چاه تولیدی هدایت می‌شود. شکل ۳-۱ استخراج ثانویه نفت را نشان می‌دهد. در این مرحله که تنها با هدف حفظ فشار مخزن صورت می‌گیرد، برداشت نفت به حدود ۲۵ الی ۳۰ درصد می‌رسد.

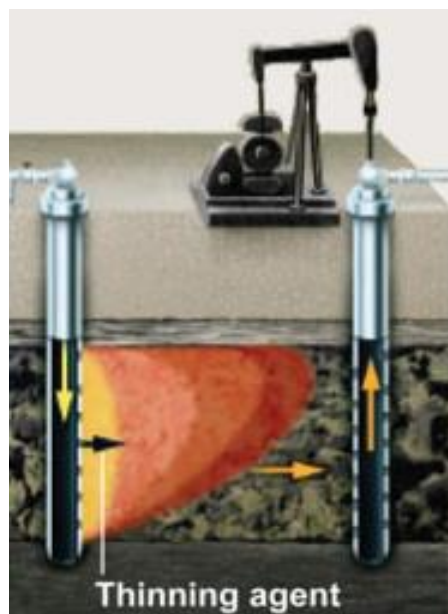


شکل ۳-۱ فاز ثانویه استخراج نفت

شکل ۴-۱ فاز ثالثیه را نشان می‌دهد که به دلیل یک سری عوامل نظیر ترشوندگی^۱ نامطلوب، ناهمگنی^۲ آسنگ مخزن و به دام افتادن نفت در اثر موئینگی، هنوز مقدار قابل توجهی از نفت در مخزن باقی می‌ماند. به منظور استخراج نفت باقی مانده، از روش‌های ازدیاد برداشت نفت یا برداشت ثالثیه استفاده می‌شود. این مرحله قادر است که حدود ۳۰ درصد از نفت باقی‌مانده از مراحل قبل را بازیابی نماید.

¹ Wettability

² Heterogeny



شکل ۴-۱ فاز ثالثیه استخراج نفت

لزجت آب از لزجت نفت خام کمتر می‌باشد. به همین دلیل در استخراج ثانویه و ثالثیه نفت شاهد بروز ناپایداری انگشتی^۱ در مرز مشترک آب و نفت هستیم. لذا به کارگیری روش‌های ازدیاد برداشت نفت و بررسی عوامل موثر بر ناپایداری انگشتی در زمینه‌ی استخراج نفت خام بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بطور کلی روش‌های ازدیاد برداشت به دودسته تزریق گاز (گاز زنی)^۲ و تزریق آب (سیلاب زنی)^۳ تقسیم می‌شوند. در تزریق گاز از گازهایی نظیر کربن دی اکسید^۴ استفاده می‌گردد، در حالی که در تزریق آب از یک سری مواد شیمیایی نظیر پلیمرهای^۵ حلال در آب استفاده می‌شود. در مرحله تزریق آب که در مرحله ثانویه انجام می‌گیرد، بازده جاروبی^۶ مقدار کمتری دارد و آب تمایل دارد به صورت انگشت‌هایی به داخل نفت نفوذ پیدا کند در حالی که پلیمرزنی^۷ به عنوان یکی از روش‌های ازدیاد برداشت با کم کردن تمایل سیال تزریق شده به کانالیزه شدن^۸ میزان بازده جاروبی را به شکل قابل توجه افزایش

¹ Fingering Instability

² Gas Flooding

³ Water Flooding

⁴ Carbon Dioxide

⁵ Polymers

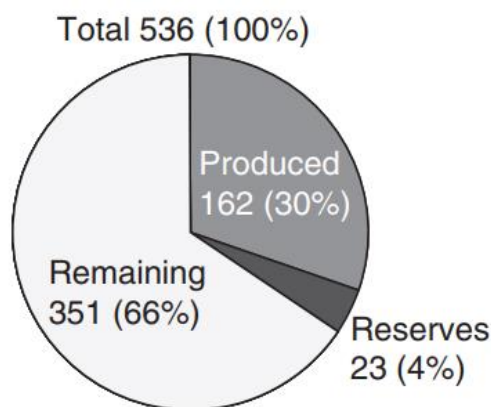
⁶ Sweep Efficiency

⁷ Polymer Flooding

⁸ Canalizing

می‌دهد. در مورد بازده جاروبی در فصول آینده بیشتر بحث خواهد شد.

به عنوان یک نمونه، در آمریکا تا سال ۱۹۹۳، مقدار ۵۳۶ هزار میلیون بشکه نفت کشف شده بود. از این میزان فقط حدود ۱۶۲ هزار میلیون بشکه (۳۰ درصد) تولید و مقدار ۲۳ هزار میلیون بشکه (۴ درصد) ذخیره شده بود. این میزان بیش‌ترین بهره برداری از طریق روش‌های مرسوم در آن زمان بود. در حالی که حدود ۳۵۱ هزار میلیون بشکه (۶۶ درصد) برداشت نشده بود. شکل ۱-۵ توزیع حجمی نفت در آمریکا در سال ۱۹۹۳ را نشان می‌دهد. اگر روش‌های ازدیاد برداشت می‌توانست حتی نیمی از نفت باقی مانده (۱۷۶ هزار میلیون بشکه) را بازیابی کند، این امکان فراهم می‌شد که بتوان مقدار نفت ذخیره شده را دو برابر کرد.



شکل ۱-۵ توزیع حجمی نفت آمریکا در سال ۱۹۹۳

مطالعات مربوط به بررسی ناپایداری انگشتی هم به صورت آزمایشگاهی و هم عددی به طور گسترده از دهه ۶۰ میلادی آغاز شد. در آن زمان برداشت اولیه نفت کشف شده در آمریکا رو به پایان بود و با شروع برداشت ثانویه از آن‌ها و بروز پدیده انگشتی در مراحل استخراج، بررسی این پدیده اهمیت مضاعفی پیدا کرد. در این دهه بررسی ناپایداری انگشتی تنها محدود به جریان سیالات نیوتنی می‌شد. در ادامه محققین از یک سری پلیمرهای خاص که در آب حل می‌شد، استفاده کردند که بازده استخراج نفت را افزایش داد. لذا بررسی این ناپایداری در جریان سیالات غیرنیوتنی نیز اهمیت زیادی

پیدا کرد. با توجه به مراتب بالا، بررسی و مطالعه چگونگی رفتار این پدیده در جریان سیالات غیرنیوتنی در محیط متخلخل^۱ به عنوان یک نیاز مهم شناخته شد.

۱-۲ سیالات غیرنیوتنی

تاثیر گذاری سیالات در کاربردهای صنعتی سبب شده است که تلاش‌های زیادی جهت شناخت ویژگی‌های این مواد صورت گیرد. در این میان جریان سیالات غیرنیوتنی در مکانیک سیالات از اهمیت فراوانی برخوردار است. همچنین با توجه به اینکه در مطالعه حاضر از یک سری سیالات غیرنیوتنی استفاده شده است، سعی می‌شود در ادامه این سیالات معرفی و رفتار آن‌ها بیان شود.

سیال نیوتنی ماده‌ای است که در آن تنش برشی^۲ بدون وجود تنش تسلیم^۳، تنها تابعی خطی از نرخ برش^۴ باشد. به این ترتیب سیال غیرنیوتنی به سیالی اطلاق می‌شود که رفتار نیوتنی نداشته باشد. به طور کلی سیالات غیر نیوتنی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

۱-۲-۱ سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان^۵

سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان سیالاتی هستند که تنش برشی در آن‌ها تنها تابعی غیرخطی از نرخ برش است. به عبارت دیگر در این سیالات ویسکوزیته تابعی خطی از نرخ برش می‌باشد. با توجه به شکل ۱-۶ خود این سیالات به دو دسته کلی سیالاتی که دارا و فاقد تنش تسلیم هستند، تقسیم می‌شوند. معروف‌ترین این دسته از مواد که دارای تنش تسلیم است، پلاستیک بینگهام^۶ می‌باشد.

¹ Porous Media

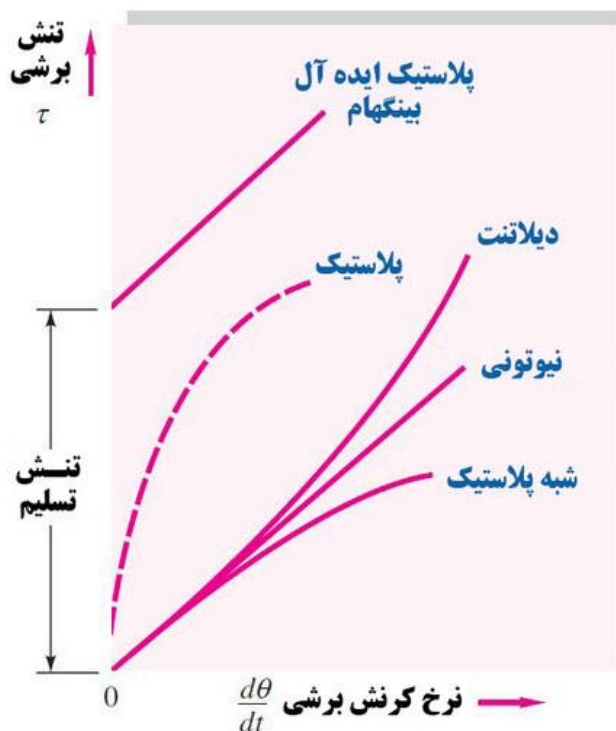
² Shear Stress

³ Yield Stress

⁴ Shear Rate

⁵ Time Independent Non-newtonian Fluid

⁶ Bingham Plastic



شکل ۶-۱ نمودار تنش-کرنش برشی سیالات مستقل از زمان

۱-۲-۲ سیالات غیر نیوتنی وابسته به زمان^۱

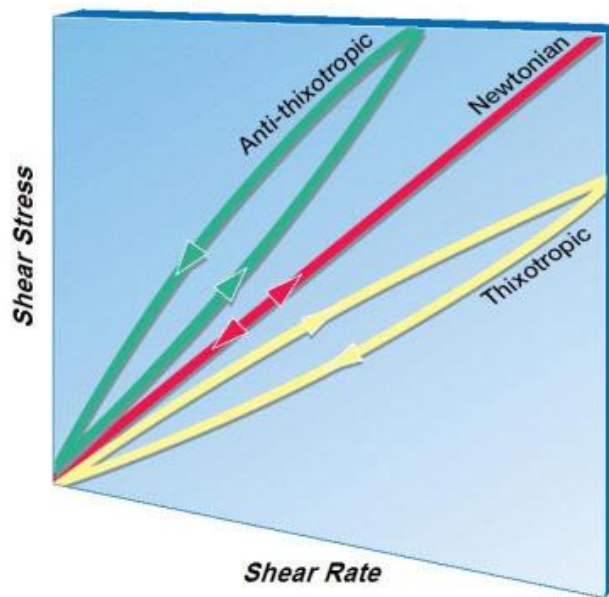
در این سیالات، در حین یک نرخ برش ثابت، ساختمان مولکولی ماده بطور مداوم در حال تغییر است. به همین دلیل مقدار ویسکوزیته و تنش برشی نیز تابعی از زمان خواهد بود. بطور کلی این مواد به دو دسته سیالات تیکسوتروپیک^۲ و سیالات رئوپکتیک^۳ تقسیم می‌شوند. در سیالات تیکسوتروپیک، چنانچه ماده در معرض یک شدت برش ثابت و دمای معین قرار داده شود، تنش برشی یک کاهش برگشت پذیر نسبت به زمان پیدا می‌کند. برخی پلیمرهای درشت مولکول و محلول‌های مواد غذایی دارای این رفتار هستند. سیالات رئوپکتیک موادی بسیار نادر هستند که رفتار آن‌ها کاملاً بر عکس سیالات

^۱ Time dependent Non-newtonian Fluid

^۲ Tixotropic Fluid

^۳ Reoplectic Fluid

تیکسوتروپیک می‌باشد. به عنوان نمونه در بعضی سیالات مانند خمیر گچ یا سوسپانسیون‌های^۱ رقیق اولئات آمونیوم^۲ رفتار رئوپکتیک مشاهده شده است. در شکل ۷-۱ منحنی تنش در برابر نرخ برش برای این دسته از سیالات نشان داده شده است.



شکل ۷-۱ نمودار تنش-کرنش سیالات وابسته به زمان

۱-۲-۳ سیالات ویسکوالاستیک^۳

سیالات ویسکوالاستیک موادی هستند که توامان خواص ویسکوز و الاستیک را دارا می‌باشند. از آنجا که در سیالات، تنش تابعی از نرخ برش و در جامدات تابعی از خود برش است، لذا این مواد دارای خواص هم زمان جامد و سیال هستند. خواص رئولوژیکی^۴ مواد ویسکوالاستیک در هر لحظه تابع وضعیت

¹ Suspension

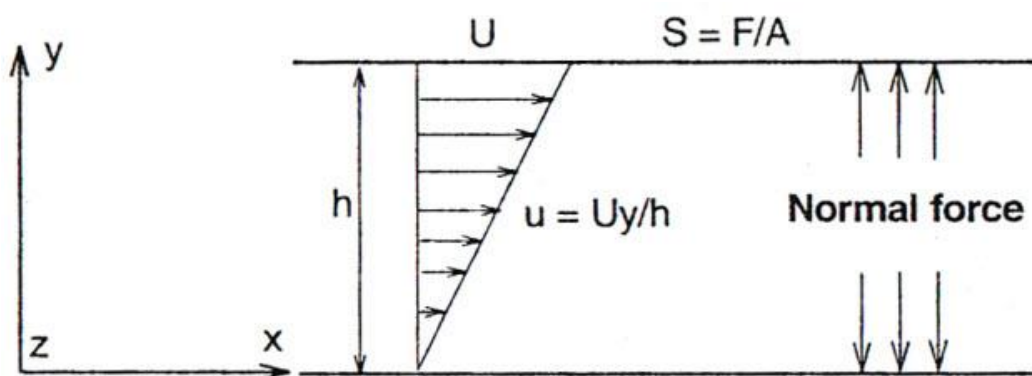
² Amoniom Oleat

³ Viscoelastic Fluids

⁴ Reological

پیشین آن است. به این ترتیب امکان این که بتوان رابطه‌ای بین تنش برشی و نرخ برش بیان کرد، وجود ندارد.

آزمایش جریان کوئت^۱ یک آزمایش معروف برای بررسی رفتار جریان مواد ویسکوالاستیک می باشد، در شکل ۸-۱ شماتیک این آزمایش مشاهده می شود. بر اساس این آزمایش اگر یک سیال ویسکوالاستیک بین دو صفحه تخت موازی قرار بگیرد و صفحه بالایی با سرعت U حرکت نماید، یک جریان برشی ساده ایجاد می گردد. اگر عمل برش دهی قطع و صفحه بالایی به طور ناگهانی متوقف شود، برخلاف سیالات نیوتنی که در آن‌ها تنش برشی به طور آنی صفر می شود، در مواد ویسکوالاستیک، کاهش تنش برشی دارای بازه‌ی زمانی یا به اصطلاح دارای زمان آسودگی از تنش^۲ است.



شکل ۸-۱ شماتیک جریان آزاد کوئت

همچنین اگر در حین حرکت صفحه بالایی، تنش برشی یک مرتبه قطع گردد (نیروی روی صفحه قطع و صفحه به حال خود رها گردد)، صفحه بالایی تا حدی به عقب بر می گردد، در حالی که در سایر سیالات توقف صفحه بالایی نیز آنی است. در واقع بازگشت صفحه بالایی ناشی از خاصیت الاستیک ماده است. اما این بازگشت نسبت به مواد الاستیک کندتر است که این موضوع ناشی از وجود مکانیزم ویسکوز^۳

¹ Couette Flow

² Relaxation Time

³ Viscous Mechanism

در این مواد است. با توجه به توضیحات بالا می‌توان گفت این مواد دارای یک حافظه جهت دار^۱ از تغییر شکل‌های خود بوده و از حالت قبلی خود آگاه هستند.

در مطالعه حاضر از دسته ای از سیالات ویسکوالاستیک استفاده شده است که در ادامه به بررسی رفتار آن‌ها و همچنین در فصل بعد به نحوه ی ساخت آن‌ها اشاره خواهد شد.

۳-۱ مفاهیم و اصطلاحات

برخی مفاهیم و اصطلاحات به کار رفته در جریان سیالات در محیط متخلخل به شرح زیر می باشد:

تخلخل^۲: عبارت است از تمام خلل و فرج‌های موجود در رسوب یا سنگ که به دو صورت کل یا موثر بیان می‌شود. تخلخل کل شامل تمام منافذ موجود در رسوب یا سنگ است که از نسبت حجم حفره‌های موجود در سنگ به حجم کل سنگ بدست می‌آید و آن را به در صد بیان می‌کنند. تخلخل موثر یا مفید شامل حفره‌های متصل به هم است که قادر است مایعات را از خود عبور دهد. این تخلخل از نسبت حجم حفره‌های متصل به هم به حجم کل سنگ بدست می‌آید. لازم به ذکر است که در سنگ، حفره‌هایی وجود دارد که قادر نیستند مایعات را از خود عبور دهند. این حفره‌ها به نام تخلخل غیر مفید نامیده می‌شود و از تفاضل تخلخل مفید از تخلخل کل بدست می‌آید.

نفوذپذیری^۳: سهولت عبور جریان مایعات از داخل حفره‌های رسوب‌ها یا سنگ‌ها را نفوذپذیری می‌نامند. هر چه میزان این پارامتر بالاتر باشد، عبور سیال نیز آسان‌تر است. مقدار نفوذپذیری به اندازه حفره‌ها، غلظت مایع و نیروی کششی که با کاهش اندازه دانه‌ها کم می‌شود، بستگی دارد. نفوذ پذیری را معمولاً با واحد داری^۴ و به صورت k بیان می‌کنند. یک داری عبارتست از نفوذپذیری که در آن

¹ Oriented Memory

² Porosity

³ Permeability

⁴ Darcy

یک مایع با غلظت یک سانتی متر در ثانیه تحت فشار یک اتمسفر بر سانتی متر عبور کند. نفوذپذیری اغلب سنگ‌ها بطور کلی کمتر از ۱ داری می‌باشد.

قابلیت تحرک! قابلیت تحرک یک سیال در محیط متخلخل بصورت نسبت نفوذپذیری محیط به لزجت سیال تعریف می‌شود:

$$M = \frac{k}{\mu} \quad (4-1)$$

در رابطه اخیر μ ویسکوزیته سیال می‌باشد.

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

$$MR = \frac{M_1}{M_2} = \frac{(k/\mu)_1}{(k/\mu)_2} \quad (5-1)$$

اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب برای سیال جابه‌جا کننده و جابجا شونده می‌باشد. اگر این نسبت کوچکتر یا مساوی یک باشد، جابه‌جایی 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 سیال با قابلیت تحرک کمتر نفوذ می‌کند. به همین دلیل بجای تزریق آب در مخازن نفت برای استخراج آن، از پلیمرزنی استفاده و محلول‌های پلیمری تزریق می‌شود. این محلول‌ها نسبت به آب ویسکوزیته بالاتری پیدا می‌کنند، لذا قابلیت تحرک آن‌ها کمتر می‌شود. در نتیجه نسبت تحرک آن‌ها با نفت به یک یا کمتر از یک می‌رسد و جریانی پایدار و با انگشتی‌های کمتر خواهیم داشت. برای محیط متخلخلی که نفوذپذیری آن ثابت باشد، نسبت تحرک به صورت ساده‌تر، نسبت ویسکوزیته سیال جابه‌جا شونده به

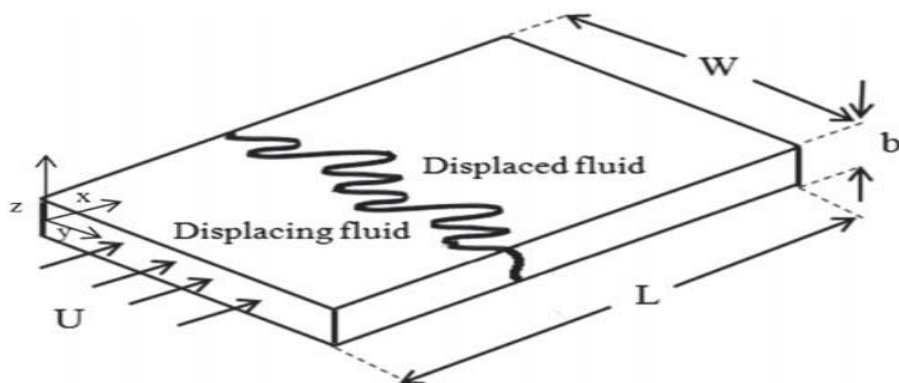
¹ Mobility

جابه‌جا کننده تعریف می‌شود.

$$MR = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (۶-۱)$$

۴-۱ سلول هل-شاو^۱

بررسی جریان سیالات در یک محیط متخلخل پیچیدگی‌ها و سختی‌های فراوانی دارد. لذا محققان پدیده ناپایداری انگشتی را در یک محیط ساده تر به نام سلول هل-شاو، بررسی می‌کنند. این محیط در واقع شبیه ساز یک محیط متخلخل می‌باشد که به محققان این اجازه را می‌دهد که بفهمند جریان سیال در یک محیط متخلخل چه رفتاری از خود بروز می‌دهد. در این سلول نیروهای اینرسی^۲ قابل صرف‌نظر هستند. این محیط از کنار هم قرار گرفتن دو صفحه موازی با فاصله اندک به وجود می‌آید و فضای بین دو صفحه معمولاً با سیال و با ایجاد اختلاف فشار پایا بین دو سر سلول پر می‌شود. شکل ۱-۹ نمای این سلول را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۱ سلول هل-شاو

به منظور نزدیک کردن شرایط این سلول به یک محیط متخلخل واقعی فاصله بین دو صفحه بسیار

^۱ Hele-Shaw Cell

^۲ Inertia Forces

اندک در نظر گرفته شده است. در این شرایط نیروهای لزج^۱ بر نیروهای اینرسی غالب هستند. استفاده از این سلول مانند جریان در محیط متخلخل، برای جریان‌ها با عدد رینولدز^۲ پایین امکان پذیر است. معادلات دوبعدی حاکم بر این جریان معادله پیوستگی^۳ و دارسی، به صورت زیر می باشند:

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (7-1)$$

$$\nabla \cdot \bar{p} = -\frac{\mu}{\delta^2} \bar{u} + \rho g \quad (8-1)$$

در این معادلات، $\bar{u}$ بردار سرعت ماکروسکوپی^۴ و $\bar{p}$ فشار ماکروسکوپی^۵ می باشند.

۵-۱ مروری بر تحقیقات گذشته

در این بخش به بررسی مطالعات و تحقیقاتی که در زمینه ناپایداری انگشتی در محیط های متخلخل انجام شده است، می پردازیم. مطالعات صورت گرفته در این زمینه به چند بخش کلی تقسیم بندی می شوند که از جمله آن می توان به تحلیل عددی شامل تحلیل ها و شبیه سازی های خطی و غیرخطی^۶ و مطالعات آزمایشگاهی اشاره کرد. همان طور که قبلا نیز اشاره شد، بررسی این ناپایداری به دو بخش مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی و سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی تقسیم بندی می شوند که هر کدام روابط و اصول کاملا مجزایی دارند. بررسی این ناپایداری همان طور که ذکر گردید، از حدود دهه ۶۰ میلادی شدت بیشتری گرفت. هومسی^۷ [۳] مروری بر اطلاعات موجود در زمینه این ناپایداری، هم بصورت

¹ Viscous Forces

² Reynold Number

³ Continuity Equation

⁴ Microscopic Velocity

⁵ Microscopic Pressure

⁶ Linear and Non-Linear simulation

⁷ Homay

مخلوط شدنی و هم مخلوط‌نشدنی ارائه کرد که اطلاعات بسیار جامعی از این ناپایداری در محیط متخلخل در اختیار علاقه‌مندان قرار می‌دهد. در ابتدا به بررسی مطالعات عددی انجام گرفته می‌پردازیم و در ادامه، کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته را بررسی خواهیم نمود.

۱-۵-۱ شبیه سازی‌های عددی

برای نخستین بار بود که چوک و همکاران [۴] تحلیل پایداری خطی برای ناپایداری انگشتی لزج را مورد بررسی قرار دادند. هلر [۵] نیز در روند بررسی یک پایداری مخلوط شدنی، به معادله مقدار ویژه ناهمگن مرتبه دومی رسید که مسیر پیشرفت اغتشاشات را مشخص می‌کرد. او نواحی پایداری را با توجه به نرخ دبی ورودی، تغییرات لزجت و نیز تغییرات چگالی مورد بررسی قرار داد. در ادامه پرین [۶] در زمینه جابه‌جایی سیالات نیوتنی با استفاده از روش پرتوربیشن^۱، به بررسی پایداری خطی جابه‌جایی مخلوط‌شدنی نفت و یک محلول با لزجت کم‌تر از نفت پرداخت. او همچنین مکانیزم‌ها و روش‌های پخش یک سیال در سیال دیگر را مورد بررسی قرار داد. وودینگ [۷] برای بررسی پایداری، یک م‌ساله مقدار اولیه و با بیان نرخ رشد آشفتگی‌ها به صورت چند جمله‌ای هرمیت^۲ در نظر گرفت. پیس‌من و همکاران [۸] با استفاده از روش تفاضل محدود^۳ به شبیه سازی غیر خطی این ناپایداری در جریان‌های مخلوط‌شدنی پرداختند. در این زمان تن و هومسی [۹ و ۱۰] به صورت تئوری، تحلیل جامع و کامل در مورد پایداری جابه‌جایی مخلوط‌شدنی در جریان‌های مستقیم الخط و شعاعی ارائه کردند. مدل یک بعدی برای مطالعه ناپایداری انگشتی لزج در جابجایی سیالات نیوتنی توسط کووال [۱۱] به کار گرفته شد و با نتایج آزمایشگاهی که خود او انجام داده بود، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که گرچه این مدل یک بعدی توانایی به نمایش کشیدن این پدیده را به درستی

¹ Perturbation

² Hermitt polynomial

³ Finite difference

نداشت، ولی با تقریب خوبی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. بررسی ناپایداری انگشتی با استفاده از روش طیفی^۱ برای محیط‌هایی با پراکندگی ناهمسانگرد توسط زیمرمن و هومسی [۱۲] انجام گرفت. از جمله جدیدترین کارهای عددی با استفاده از روش شبکه بولتزمن^۲ برای نسبت لزجت‌های مختلف انجام شده، می‌توان به مطالعه صالح آبادی و همکاران [۱۳] اشاره نمود. آن‌ها رژیم‌های ویسکوز فینگرینگ و کپیلاری فینگرینگ را بررسی نمودند. آن‌ها پراکندگی را وابسته به سرعت در نظر گرفتند و به بررسی تاثیرات این ناهمسانگردی در شکل‌گیری انگشتی‌ها پرداختند. این دو همچنین این ناپایداری را در جریان مخلوط شدنی به صورت سه بعدی شبیه‌سازی کردند و با مشاهده نتایج بدست آمده متوجه شدند که مکانیزم جدیدی در شکل‌گیری انگشتی‌ها در حالت سه بعدی مشاهده نمی‌شود. لذا نتیجه گرفتند که برای بررسی رفتار این ناپایداری در شرایط متفاوت همان حالت دوبعدی کافی است و نیازی به بررسی سه‌بعدی نمی‌باشد. نوروزی و شوقی [۱۴] نیز اثر ناهمسانگردی را برای ناپایداری انگشتی در جابه‌جایی مخلوط شدنی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش پراکندگی و کاهش نفوذپذیری، ناپایداری افزایش می‌یابد. بررسی ناپایداری انگشتی در محیط متخلخل با تانسور پراکندگی وابسته به سرعت، توسط قسمت و عزایز [۱۵] صورت پذیرفت که در آن به بررسی مکانیزم‌های مشاهده شده در این شبیه‌سازی و نیز پارامتری جدید به نام راندمان جاروبی در ناپایداری انگشتی پرداختند. علاوه بر این سجادی و عزایز [۱۶] به بررسی تاثیرات انتقال حرارت بر این ناپایداری زمانی که هر سیال دمای متفاوت دارد، پرداختند. این دو نیز پارامترهایی نظیر راندمان جاروبی یا طول اختلاط^۳ را تحت شرایط جدید مورد بررسی قرار دادند. بیشتر بررسی‌های عددی مربوطه به سیالات نیوتنی می‌باشد و مطالعه این ناپایداری برای سیالات غیرنیوتنی اکثراً به صورت آزمایشگاهی انجام گرفته است. تعداد زیادی از مطالعات در زمینه ناپایداری انگشتی لزج به ویژه برای جابه‌جایی نیوتنی-نیوتنی انجام شده است که از جمله این مقالات می‌توان به کارهای بنسیمان و

¹ Spectral method

² Lattice Boltzman method

³ Mixing Length

همکاران [۱۷]، هومسی [۳]، هوهلوو [۱۸]، تنویر [۱۹ و ۲۰]، کودر [۲۱] و هويسان [۲۲] اشاره کرد که منابع بسیار جامعی برای درک بیشتر این ناپایداری در زمینه سیالات نیوتنی هستند. نوروزی و درانی [۲۳] شبیه سازی غیر خطی ناپایداری انگشتی لزج حرارتی را در محیط متخلخل نا همسانگرد بررسی نمودند. نتایج کار آن‌ها نشان داد با افزایش نفوذپذیری در جهت جریان نسبت به نفوذپذیری در جهت عمود جریان، انگشتی‌ها دیرتر به انتهای جبهه می‌رسند، ناپایداری کاهش پیدا می‌کند و جریان پایدارتری بدست می‌آید. در جدیدترین بررسی‌های عددی مخلوط‌شدنی، می‌توان به بررسی عددی ناپایداری سافمن-تیلور یک سیال ویسکوالاستیک به صورت مخلوط‌شدنی توسط نوروزی و یزدی [۲۴] اشاره نمود. آن‌ها نتیجه گرفتند، افزایش پارامترهای بی‌بعد مانند عدد کیپلاری و عدد الاستیسیته، باعث پایدار شدن جریان سیال می‌شود. همچنین دریافتند که الاستیسیته‌ی سیال جابجا کننده یک اثر پایدار کننده روی میدان جریان می‌گذارد.

۲-۵-۱ مطالعات آزمایشگاهی

در این قسمت به بررسی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در جریان‌های مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشدنی می‌پردازیم.

به عنوان نخستین بررسی در جریان‌های مخلوط‌شدنی، هیل و همکاران بر اساس اختلاف فشار و نیز اغتشاشی در سطح مشترک دو سیال مورد آزمایش، ناپایداری انگشتی را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. در ادامه اسلوباد و کوودل [۲۵] با استفاده از تکنیک پرتو ایکس^۱ به اندازه‌گیری راندمان جاروبی در این گونه جابه‌جایی‌ها پرداختند. پس از اون میرس [۲۶] با استفاده از یک

¹ X-Rays technic

مکانیزم خاص به مشاهده و تحلیل جریانی از آب و نفت در یک محیط متخلخل آزمایشگاهی پرداخت. محیط مورد استفاده او از دو صفحه شیشه که داخل آن با دانه‌های ریز شیشه‌ای^۱ پر شده بود تشکیل شده تشکیل می‌شد. از جمله نخستین بررسی‌های آزمایشگاهی جابجایی مخلوط‌نشده مربوط به بررسی سافمن و تیلور [۱] می‌شود. این دو با استفاده از یک سلول هل-شاو و مشاهده جابه‌جایی دوسیال هوا و گلیسرین^۲، به بررسی آشفته‌گی‌ها و اغتشاشات بوجود آمده در سطح مشترک دو سیال پرداختند. آن‌ها همچنین پارامتری به شکل λ تعریف کردند که نشان دهنده ی نسبت ضخامت انگشتی به جابجایی آن را نشان می‌داد. با استفاده از این پارامتر به بررسی و تحلیل نتایج بدست آمده از این آزمایش پرداختند. آزمایش‌های متعددی در زمینه تأثیرات نسبت تحرک بر راندمان جاروبی و نیز چگونگی شکل‌گیری ناپایداری انگشتی توسط هابرمین [۲۷] صورت گرفت. او به این نتیجه رسید که اثر نسبت تحرک بر پیشروی ناپایداری بسیار بیشتر از اثر نا همگنی محیط متخلخل است. بنهام و همکاران [۲۸] با استفاده از سولفات آلومینیوم^۳ در جابجایی محلول گلیسرین، رفتار این جریان و چگونگی شکل‌گیری انگشتی‌ها را مورد بررسی قرار دادند. والد و ماهر [۲۹] ناپایداری انگشتی لزج را در سلول هل-شاو برای سیال باگرف بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که جابه‌جایی مخلوط‌نشده سیال باگرف در سرعت‌های پایین ناپایداری را به سمت چند شاخه‌ای شدن سوق می‌دهد. از جمله مطالعات آزمایشگاهی دیگر روی انگشتی لزج روی سیال غیرنیوتنی متمرکز می‌باشد، می‌توان به مطالعه لیندر و همکاران [۳۰] اشاره نمود. آن‌ها آزمایشی به منظور بررسی اثر خواص مختلف سیالات غیرنیوتنی روی ناپایداری انگشتی لزج فراهم کردند. در این آزمایش، انگشتی لزج در محلول‌های رقیق و نیمه‌رقیق پلیمری که توسط آب جابه‌جا می‌شود بررسی شده است. نتایج نشان داد که برای محلول‌ها با غلظت پلیمری بالا اثرات غیر نیوتنی بیشتر از محلول‌هایی با غلظت

¹ Glass beads

² Glycin

³ Sulfate Aluminum

⁴ Boger Fluid

پایین اهمیت دارد. برای سیال‌های باریک‌شونده^۱ انگشتی‌های باریک‌تری نسبت به حالت نیوتنی مشاهده شده است درحالی‌که برای پلیمرهای الاستیک که باعث تشکیل انگشتی‌های عریض‌تری نسبت به حالت نیوتنی می‌شود. همچنین مشاهده شد که سرعت انگشتی‌ها تفاوتی با حالت نیوتنی ندارد. ژائو و ماهر [۳۱] انگشتی لزج را در یک سلول هل-شاو شعاعی برای محلول‌های آبی پلی-اتیل-اکسید^۲ و هیدروفوبیک پلی-اتیلن-اکسید^۳ که توسط آب جابه‌جا می‌شد را بررسی کردند. ناپایداری سافمن-تیلور در موقعیت‌های دیگر نیز مشاهده می‌شود. به عنوان مثال در جابه‌جایی یک سیال معمولی توسط جتی از سیال مخلوط‌شونده، این ناپایداری ظاهر می‌شود. فولر و همکاران اثر الاستیک را روی دینامیک جریان با شیب صعودی بررسی کردند. در این مطالعه آزمایشگاهی، پدیده انگشتی در سطح مشترک بین جت ویسکوالاستیک با ویسکوزیته کم و سیال نیوتنی با ویسکوزیته زیاد مشاهده گردید. نتایج نشان داد که خواص الاستیک نمونه روی الگوی انگشتی‌ها تاثیر می‌گذارد و به سمت از بین بردن اغتشاشات در حوالی پرش هیدرولیکی^۴ میل می‌کند. در ادامه مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته با پرتو ایکس، اسلوباد و توماس [۳۲] تاثیر نسبت تحرک بروی شکل و اندازه انگشتی‌ها را بررسی کردند. آن‌ها همچنین به بررسی تاثیر نیروی گرانش بر شکل‌گیری و سرعت انگشتی‌ها پرداختند. در یکی دیگر از بررسی‌های آزمایشگاهی به صورت مخلوط نشدنی، پرکینز و جانستون [۳۳] نیز با استفاده از همین روش جابجایی مخلوط نشدنی را بررسی نمودند. بررسی اثرات دمایی زمانی که دو سیال با همدیگر اختلاف دما داشته باشند، توسط صغیر و همکاران [۳۴] صورت گرفت. آن‌ها از گلیسرین و آب در آزمایش خود استفاده کردند. نتیجه کار آن‌ها به این شکل بود که وقتی آب داغ به سیستم تزریق شود، فاصله نوک تا پایه انگشتی‌ها کمتر از حالتی است که آب سرد به سیستم تزریق شود.

¹ Shear Thinning

² Poly Ethil Oxide

³ Hydrophobic poly etillen oxide

⁴ Hydrolic jump

در بخش سیالات غیرنیوتنی مارشال و همکاران [۳۵] برای اولین بار به بررسی جریان سیالات غیر نیوتنی 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 [۳۶] مطالعات دیگری با استفاده از سیالات شبه پلاستیک^۱ در یک سلول هل-شاو انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند سیال غیرنیوتنی مورد استفاده ناپایداری بیشتری نسبت به نمونه نیوتنی ایجاد کرد. نتیجه‌ای که با واقعیت‌های تئوری همخوانی ندارد، زیرا پلیمرها از سیالات نیوتنی ویسکوزتر هستند و در نتیجه طبیعتاً باید نسبت تحرک کمتری داشته باشند. لذا ناپایداری در آن‌ها باید با سرعت کمتری پیشروی کند. داکرد و همکاران [۳۷] به بررسی جابه‌جایی یک سیال غیرنیوتنی توسط سیال نیوتنی پرداخته و تشکیل انگشتی‌هایی با شاخه‌های زیاد گزارش کردند. آن‌ها گزارش کردند 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 این، الن و باگر [۳۸] حالت‌های مختلفی را برای سیال نیوتنی، سیال باریک‌شونده و سیال کاملاً الاستیک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها متوجه شدند که در حالت سیال باریک‌شونده ناپایداری بیشتری در سطح مشترک دو سیال نسبت به حالت‌های دیگر قابل مشاهده است. آن‌ها هم چنین گزارش کردند که در شرایط یکسان، شکل‌گیری و فرم انگشتی‌ها در حالت غیرنیوتنی در مقایسه با حالت نیوتنی، کاملاً متفاوت می‌باشد. بان و همکاران [۳۹] به مطالعه پهنای انگشتی‌ها تحت تابعی از سرعت پیش روی نوک انگشتی‌ها در جابجایی مخلوط‌نشده پرداختند. در این مطالعه نقش ویسکوزیته و کشش سطحی بر ناپایداری انگشتی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اثرات کشش سطحی بر شکل انگشتی‌ها، آن‌ها با افزودن سورفکتانت‌ها^۲ و مقایسه آن‌ها با حالتی که از محلول‌های پلیمری استفاده کرده بودند، به این نتیجه رسیدند که کشش سطحی تأثیری قابل ذکر در شکل انگشتی‌ها ندارد. از جمله مطالعات دیگری که با استفاده از مواد شیمیایی خاص به بررسی این

¹ Sedo-Plastic fluids

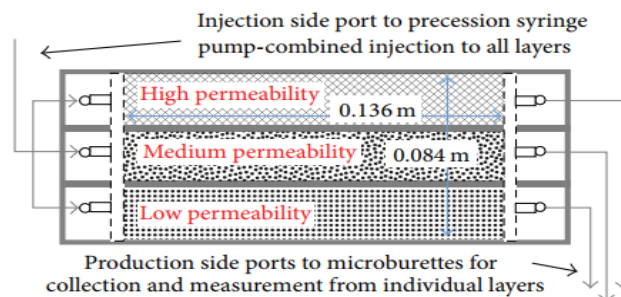
² Surfactants

ناپایداری پرداخته اند، می‌توان به آزمایشات کاواگوچی و همکاران [۴۰] اشاره نمود. آن‌ها از هیدروکسی پروپیل متیل^۱ سلولز به عنوان سیال غیریوتنی و از محلولی گلیسیرین به عنوان سیال نیوتنی استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند وقتی هوا، محلول نیوتنی گلیسیرین را جابه‌جا 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 سلولز را جابه‌جا می‌کند، انگشتی‌ها چند شاخه مشاهده می‌شد. از مطالعات جدیدتر در این زمینه می‌توان به بررسی آزمایشگاهی انجام شده توسط مالسچ و همکاران [۴۱] اشاره کرد. آن‌ها به جای استفاده از بستر آکنده به عنوان محیط متخلخل، از صفحه‌ای مشبک استفاده کردند و با دوربینی با کیفیت بسیار بالا به مشاهده انگشتی‌ها پرداختند. اونها و همکاران [۴۲] با در نظر گرفتن گرانش، جریانی از نفت که توسط سیال نیوتنی، غیر نیوتنی و سیال ویسکوالاستیک جابه‌جا می‌شد را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که در حضور نیروهای ویسکوالاستیک، سطح مشترک دو سیال با سرعت کمتری حرکت می‌کند. در جدیدترین مطالعه، ماهوترا و شرما [۴۳] به صورت کیفی اثرات الاستیک بر سیال جابه‌جا شونده پرداختند. این دو دریافتند که حضور اثرات الاستیک باعث تغییر الگوی انگشتی‌ها می‌شود و همچنین تعداد انگشتی‌ها در مقایسه با نوع نیوتنی خود بیشتر می‌شود.

مطالعات مربوط به جابجایی‌های مخلوط‌نشده در مقایسه با مخلوط‌شدنی به مراتب کمتر می‌باشد. از جمله این مطالعات می‌توان به بررسی جابه‌جایی مخلوط‌شدنی روغن با ویسکوزیته‌های مختلف توسط آب اشاره کرد که توسط الشلابی و همکارانش [۴۴] انجام گرفت. آن‌ها یک محیط متخلخل با لایه‌های مختلف تهیه کردند که این لایه‌ها دارای نفوذپذیری‌های متفاوتی بود. در شکل ۱-۱۰ نمای از ستاپ آن‌ها نشان داده شده است.

¹ Hydroxy propil metil

² Gravity



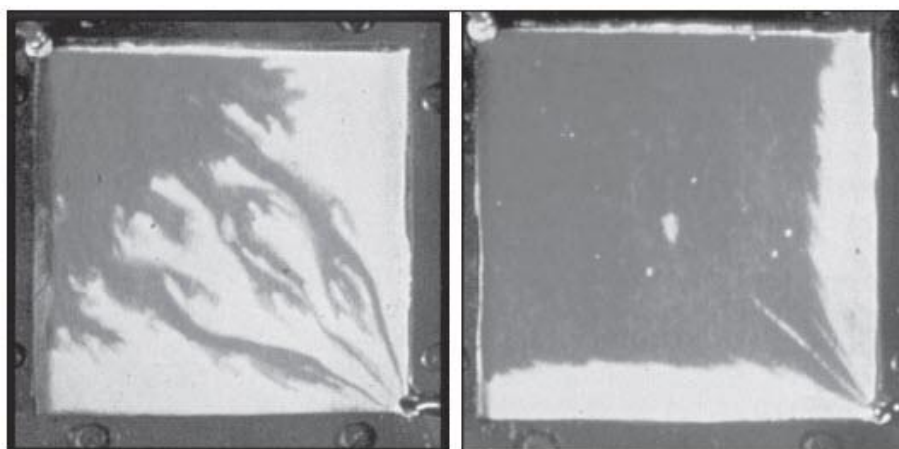
شکل ۱۰-۱ محیط متخلخل دارای لایه هایی با نفوذپذیری متفاوت [۴۴]

آن‌ها مشاهده کردند، در قسمت‌هایی که نفوذپذیری پایین‌تری دارد، مقدار راندمان جابجایی بالاتر است. فرانکو گومز و همکاران [۴۵] حساسیت الگوهای انگشتی ناپایداری سافمن-تیلور به تغییرات عمق کانال را مورد بررسی قرار دادند. شکل ۱۱-۱ نمایی از ستاپ آن‌ها در حال آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۱ بررسی جابجایی دو سیال وابسته به عمق کانال [۴۵]

سوربی [۴۶] نیز اثر پلیمرزنی بر جابجایی غیرنیوتنی را مشاهده نمود. وقتی که پلیمر بین لایه‌های عمودی و غیریکنواختی تزریق می‌شود، جریان تقاطعی بین لایه‌ها در تخصیص پلیمر به لایه‌های عمودی بهبود ایجاد می‌کند که این امر بازده جاروبی را بهبود می‌بخشد. شکل ۱۲-۱ حاصل کار او می‌باشد و اثر پلیمرزنی را نشان می‌دهد.

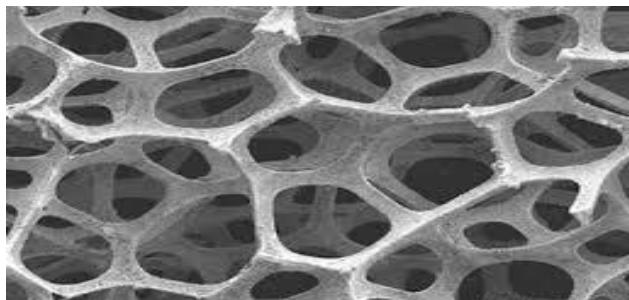


شکل ۱-۱۲ تصویر سمت چپ جابجایی در عدم حضور و تصویر سمت راست جابجایی در حضور پلیمر [۴۷]

شنگ [۴۷] و ونگ و همکاران [۴۸] نیز در مورد نحوه اثر کردن پلیمر در بهبود جاروب کردن نفت در بحث ازدیاد برداشت مطالعاتی انجام دادند.

۱-۶ معرفی مطالعه حاضر

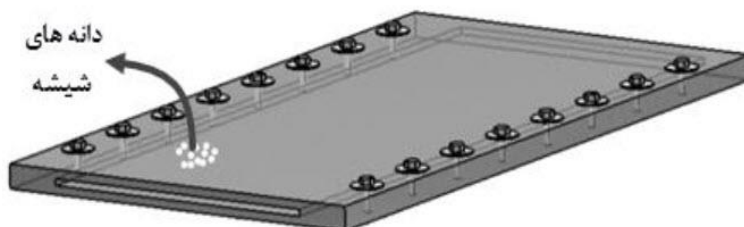
در مطالعه حاضر، اثرات الاستیک بر ناپایداری انگشتی در یک محیط متخلخل در حالتی که سیالات در تماس با هم مخلوط‌نشده هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. از بین کاربردهای مختلف بررسی ناپایداری انگشتی، تلاش شده است تا در این مطالعه، کاربرد ازدیاد برداشت نفت به عنوان اولویت اصلی قرار بگیرد و شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی انجام گرفته در حد توان به شرایط مخازن نفتی و برداشت نفت نزدیک باشد. یک مخزن نفت در واقع یک محیط متخلخل می‌باشد که نفت در خلل فرج‌های این محیط قرار گرفته است. شکل ۱-۱۳ نمای یک محیط متخلخل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳-۱ نمایی از فضای داخلی یک محیط متخلخل

نزدیک بودن شرایط آزمایش‌های مطالعه‌ی حاضر به شرایط برداشت نفت در حالت واقعی را می‌توان در دو مورد مشاهده نمود:

۱. محیط متخلخل مورد استفاده: در مطالعه پیش رو، از ستاپی^۱ استفاده شده است که تا حدودی شبیه سلول هل-شاو است، با این تفاوت که فاصله بین صفحات آن بیشتر از حد معمول است و داخل آن توسط دانه‌های شیشه (که قطر آن‌ها بین ۰,۶ تا ۰,۹ میلی‌متر است) پر شده است. شکل ۱۴-۱ نمایی از این محیط را نشان می‌دهد. حضور این دانه‌های شیشه‌ای سبب شده است که این مجموعه نفوذپذیری و تخلخل نزدیک‌تری به یک مخزن نفت داشته باشد. بدین ترتیب صحت نتایج گزارش شده به واقعیت نزدیک‌تر خواهند بود.



شکل ۱۴-۱ نمایی از سلول مورد استفاده در مطالعه حاضر متراکم از دانه‌های شیشه‌ای

¹ Set-up

۲. انحلال ناپذیر بودن دو سیال در تماس با هم: در شرایط واقعی اقدام برای ازدیاد برداشت

نفت، آب یا یک سیال پلیمری که پایه آب می باشد، به داخل میدان نفتی تزریق می گردد. این موضوع به این معنی است که دو سیال در تماس با هم انحلال ناپذیر هستند. لذا در شرایط واقعی، یک جابه جایی مخلوط نشدنی اتفاق می افتد. در مطالعه حاضر نیز بررسی دو سیال مخلوط نشدنی صورت گرفته که نشان دهنده نزدیک بودن نتایج مطالعه حاضر با شرایط واقعی استخراج نفت می باشد.

در مطالعه پیش رو، چند نمونه سیالات پلیمری مورد استفاده قرار خواهند گرفت که با ترکیب کردن نوعی پلیمر (پلی آکریلامید) با آب و گلیسرین ساخته می شوند. اضافه کردن پلیمر به سیالات نیوتنی هم سبب تغییر ویسکوزیته در آن ها می شود و هم خاصیت الاستیک به آن ها اضافه می کند. ضمن اینکه رفتار باریک شونده یا رقیق شونده را نیز برای سیال به دنبال دارد. این سیالات با در صدهای جرمی مختلف از پلیمر ساخته می شوند. در یک محدوده خاص از درصد جرمی پلیمری که به آب اضافه می شود، شاهد بوجود آمدن سیال منحصر به فردی هستیم که خواص جالبی دارد. این سیال که با گر نامیده می شود، ضمن داشتن خواص الاستیک در مقابل نرخ برش های مختلف، تغییر ویسکوزیته ناچیزی دارد که می توان آن را ثابت در نظر گرفت. به کمک همین ویژگی این امکان فراهم می شود که با جداسازی دو خاصیت الاستیک و ویسکوز سیال، این دو پارامتر را به صورت جدا از هم بررسی نمود. سیالات حاصل شده از درصدهای جرمی بالاتر پلیمر، خارج از محدوده سیالات با گر قرار می گیرند که دارای خاصیت الاستیک بیشتر و همچنین خاصیت رقیق شونده یا غلیظ شونده بیشتری می باشند. این به این معنی است که در نرخ برش های متفاوت، شاهد ویسکوزیته های مختلفی هستیم.

در فصل بعد به جزییات ساخت این سیالات پرداخته می شود. به منظور مشاهده خاصیت

¹ Polyacrilamid

مخلوط‌نشدنی سیالات، در تمام آزمایشات از روغن سیلیکون^۱ با ویسکوزیته‌های مختلف به عنوان سیال بستر استفاده گردیده است. سیالات پلیمری پایه آب هستند، لذا در روغن سیلیکون نامحلول می‌باشند. به دلیل همین نامحلول بودن دو سیال، خاصیت کشش سطحی بین دو سیال حاصل می‌شود که نیروی موینگی را به دنبال دارد. با اندازه گیری کشش سطحی بین دو سیال توسط دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی و همچنین دبی تزریقی در آزمایشگاه مرکزی شاهرود در هر آزمایش، می‌توان با محاسبه کردن عدد موینگی، نوع رژیم جریان^۲ را از لحاظ حاکم بودن اثر کپیلاری یا ویسکوز بودن را تعیین نمود. ویسکوزیته نمونه‌ها نیز توسط رئومتر^۳ بسیار دقیق موجود در آزمایشگاه مرکزی شاهرود سنجیده شد. با معرفی یک پارامتر برای مشخص نمودن میزان الاستیسیته نمونه‌ها، خواص الاستیک آن‌ها را مشخص کرده و با هم مقایسه می‌کنیم. برای هر نمونه پلیمری یک سیال نیوتنی با ویسکوزیته مشابه تهیه شد. با انجام آزمایش برای دو حالت مذکور و با مشاهده رفتار هر آزمایش می‌توان اثر الاستیک را مشاهده کرد. تمامی تست‌ها در شرایط یکسان و مناسب انجام گرفتند. پس از انجام هر تست محیط متخلخل موجود بوسیله مواد شوینده کاملاً شست و شو داده می‌شد. پس از شستن کامل، محیط متخلخل موجود در مجاورت هوای دمیده شده از سمت کمپر سور^۴ هوا قرار می‌گرفت تا زمانی که دانه‌های شیشه‌ای موجود در محیط، خشک و آماده تست بعدی گردند.

با توجه به مراتب بالا، نوآوری‌های زیر برای مطالعه‌ی حاضر قابل بیان هستند:

- استفاده از یک محیط متخلخل شبیه سلول هل-شاو، که شرایط یک مخزن نفت واقعی را با تقریب قابل قبولی شبیه‌سازی می‌کند

¹ Silicon Oil

² Flow regime

³ Reometer

⁴ Compresor

- بررسی اثر سیال جابه‌جا کننده^۱ ویسکوالاستیک، بر جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی در ناپایداری سافمن-تیلور، به صورت آزمایشگاهی
- بررسی اثر افزایش نسبت ویسکوزیته در یک محیط متراکم^۲ از دانه‌های شیشه

۷-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در فصل بعدی تجهیزات آزمایشگاهی، مواد و سیالات مورد استفاده به همراه مراحل ساخت آن‌ها توضیح داده خواهد شد. فصل سوم به چگونگی و روش دریافت اطلاعات از تست‌ها، بوسیله پردازش تصویر^۳ می‌پردازیم. در این فصل همچنین تکرارپذیری^۴ آزمایشات و صحت سنجی ساخت سلول پرداخته شده است. در فصل چهارم نتایج حاصل از تست‌ها بیان خواهد شد. نهایتاً در فصل پنجم به جمع‌بندی فعالیت‌های انجام شده در این پژوهش و بیان کلی نتایج پرداخته خواهد شد. برخی پیشنهادها به عنوان زمینه فکری برای کارهای آینده، ارائه خواهند شد.

¹ Displacing fluid

² Packed media

³ Image processing

⁴ Repeatability

فصل ۲ تجهیزات و مشاهدات آزمایشگاهی

در این بخش تجهیزات، مکانیزم آزمایش تزریق سیال غیرنیوتنی در فاز نیوتنی، مواد اولیه مورد نیاز، چگونگی ساخت سیال‌ها، تست‌های رئولوژی^۱ مورد نیاز و نحوه‌ی انجام آزمایشات مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲-۱ تجهیزات آزمایشگاهی

۲-۱-۱ پمپ پریستالتیک^۲

این پمپ به منظور جابه‌جایی سیال با دقت بالا و نواخت یکسان در زمان طولانی استفاده می‌گردد. پمپ پریستالتیک از سه قسمت کلی تشکیل شده است:

۱. درایو پمپ پریستالتیک که مجموعه موتور دستگاه همراه، سیستم کنترل^۳، نمایشگر، ورودی و خروجی‌ها و جعبه حاوی آن‌ها می‌باشد.

۲. هد پمپ پریستالتیک به قسمتی گفته می‌شود که روی محور موتور دستگاه نصب می‌شود و دارای چند غلتک می‌باشد. با ایجاد فشار روی بدنه بیرونی شلنگ، درون شلنگ ایجاد خلاء و فشار می‌شود و سبب جابه‌جا شدن مایع از یک سر شلنگ به سر دیگر آن می‌شوند.

۳. شلنگ سیلیکونی^۴ که به دلیل خاصیت فیزیکی امکان انحنای به درون توسط غلتک‌های هد و بازگشت به حالت اولیه را پس از عبور هر غلتک دارا می‌باشد.

پمپ مورد استفاده در این آزمایش، مدل BT100-1F از شرکت Longer می‌باشد، که توانایی تامین دبی بین ۰/۲ تا ۵۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه را دارا می‌باشد. شکل ۱-۲ این پمپ را نشان می‌دهد.

¹ Reologic tests

² Prestaltic pump

³ Control systems

⁴ Silicon tube



شکل ۱-۲ پمپ پرستالتیک

۲-۱-۲ دمپر^۱ پمپ

در توضیحات مربوط به پمپ پرستالتیک اشاره شد که این پمپ جریان را بصورت یکنواخت و پایدار انتقال نمی‌دهد. این امر سبب می‌شود که آزمایشات در شرایط طبیعی و یکنواخت انجام نشود و خطاهای زیادی بوجود بیاید. به منظور از بین بردن ضربه‌ها و پالس‌هایی که این پمپ به جریان منتقل می‌کند و جلوگیری از تاثیراتی که بر نحوه شکل‌گیری و رشد انگشتی‌ها می‌گذارد، از دمپر پمپ پرستالتیک استفاده می‌شود. این دمپر به نوعی یک مخزن تحت فشار است که دو قسمت دارد. قسمت بالایی از هوا پر شده است. وقتی سیال از پایین دمپر می‌گذرد، پالس‌های جریان به هوای بالای دمپر منتقل و جذب آن می‌شود. به این صورت در خروجی دمپر جریان بصورت یکنواخت و پایدار خواهد بود. شکل ۲-۲ این دمپر را نشان می‌دهد.

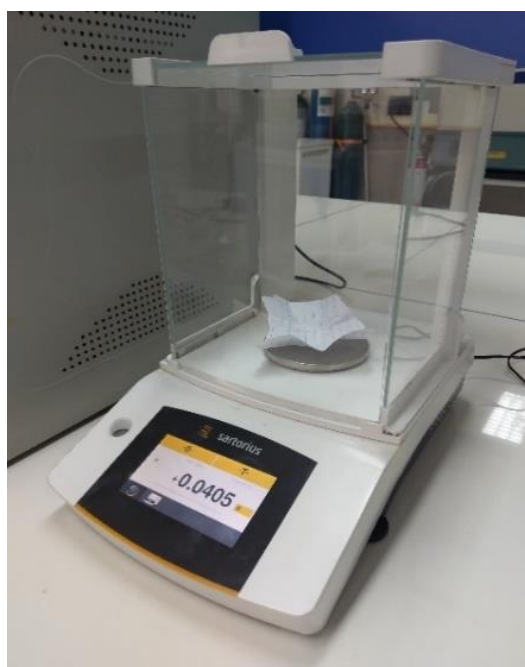
¹ Damper



شکل ۲-۲ دمپر پمپ پرستالتیک

۳-۱-۲ ترازو

به منظور نمونه برداری از مواد مورد استفاده در آزمایش از ترازو شرکت Sartorius با مدل PS 510/C/1 با دقت 0.0001 استفاده گردید. شکل ۲-۳ نمایی از ترازو را نشان می‌دهد. علت استفاده از ترازو با این دقت بالا این است که در ساخت سیال پلیمری، نمونه برداری از پلیمر مورد نظر به میزان دقیق تعیین شده، بسیار با اهمیت می‌باشد. زیرا در صورت نمونه برداری به میزان حتی یک هزارم کمتر یا بیشتر از پلیمر مورد نظر، خواص سیال تولیدی تغییر خواهد کرد.



شکل ۳-۲ ترازوی با دقت چهار رقم اعشار از شرکت Sartorius

۴-۱-۲ همزن هات پللیت^۱

همزن مورد استفاده در این آزمایش، مدل IKA RCT، ساخت کشور آلمان می باشد. این همزن قادر است به طور همزمان هم سیال مورد نظر را هم بزند و هم به آن حرارت بدهد. اجزای آن از یک صفحه آلومینیوم و ولوم های کنترل کننده سرعت هم زدن و حرارت، تشکیل شده است. ولوم^۲ مربوط به حرارت قادر است دمای صفحه را تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد بالا ببرد. همچنین ولوم مربوط به تعیین سرعت می تواند با توجه به نیاز ما تا سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه سیال مورد نظر ما را هم بزند. مکانیزم هم زدن سیال در این همزن بصورت غیر مکانیکی و با استفاده از نیروی مغناطیسی^۳ است. به این صورت که یک سری مگنت های^۴ استاندارد را داخل محلول قرار می دهیم که این محلول نیز در داخل یک ظرف، مانند بشر روی صفحه دستگاه قرار می گیرد. با ایجاد میدان مغناطیسی^۵ توسط ولوم مربوطه، مگنت ها شروع به چرخیدن می کنند که این امر نیز سبب چرخیدن و هم خوردن سیال داخل ظرف می شود. شکل ۲-۴ سیال در حال هم خوردن را روی همزن نشان می دهد.



شکل ۲-۴ همزن هات پللیت شرکت IKA آلمان

¹ Hot plate mixer

² volume

³ Magnetic force

⁴ Magnets

⁵ Magnetic field

در صورت نیاز و جهت تسریع در انحلال سیالات داخل بشر می‌توان به آن گرما داد یا سرعت چرخش را زیاد کرد. اما به دلیل اینکه در این آزمایش از سیالی استفاده می‌کنیم که در آن رشته‌های پلیمری وجود دارد، جهت جلوگیری از پاره شدن این رشته‌ها و در نتیجه از بین رفتن خاصیت پلیمری سیال، تمامی اختلاط‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و برای دوره‌های ۱۰۰ الی ۱۳۰ دور بر دقیقه انجام گرفت.

۵-۱-۲ دوربین

در این آزمایش پیشرفت جبهه‌ی سیال به دلیل دبی کم سیال تزریقی، کم می‌باشد، لذا نیازی به استفاده از دوربین سرعت بالا نبود. به همین منظور از یک دوربین ۲۱ مگاپیکسل ساخت شرکت کنون که قابلیت فیلم برداری Full HD با سرعت ۶۰ فریم بر ثانیه را داراست، استفاده شد.



شکل ۵-۲ دوربین فیلم برداری ساخت شرکت کنون با قابلیت تصویر برداری Full HD و نرخ 60 fps

۶-۱-۲ دستگاه رئومتر

به منظور بدست آوردن خواص رئومتری سیالات مورد استفاده در این آزمایش، از دستگاه رئومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar استفاده شد. این دستگاه قادر است، رنج بسیار گسترده‌ای از تست‌های تخصصی، چه برای سیالات نیوتنی و چه غیرنیوتنی را انجام دهد. تمامی تست‌های مورد نیاز در این آزمایش در آزمایشگاه مرکزی شاهرود و توسط دستگاه رئومتر موجود انجام

گرفت. در شکل ۶-۲ این دستگاه مشخص می باشد.



شکل ۶-۲ دستگاه رنومتر Anton Paar

۲-۱-۷ ستاپ آزمایش

در این مطالعه قصد بر آن است تا به رفتار ناپایداری انگشتی با تغییر در خواص سیال ها و دبی جریان پرداخته شود. لذا نیاز به یک محیط متخلخل شفاف^۱ داریم که تغییرات پدیده قابل مشاهده باشد. در فصل قبل بیان شد که سلول هل-شاو یک محیط شفاف و مشابه یک محیط متخلخل واقعی می باشد. به عبارت دیگر این سلول شبیه ساز محیط متخلخل است و نه یک محیط متخلخل واقعی. نفوذپذیری در سلول هل-شاو از رابطه زیر بدست می آید:

$$k = \frac{b^2}{12} \quad (۱-۲)$$

در رابطه بالا b فاصله بین دو صفحه سلول می باشد. برای یک سلول هل-شاو که مقدار b برابر با

¹ Transparent

یک میلی متر می باشد، نفوذپذیری برابر با $k = 8.33 \times 10^{-8} m^2$ خواهد شد.

تخلخل و نفوذپذیری در میدان های نفتی مقدار ثابتی نیست و به عوامل مختلفی بستگی دارد. بطور کلی تغییرات زیادی در تخلخل سنگ مخزن در جهت عمودی دیده می شود، اما در جهت موازی با لایه ها این تغییرات زیاد نیست. لذا در مطالعه حاضر جهت نزدیک کردن نتایج آزمایش با شرایط واقعی یک مخزن نفتی، از یک محیط متخلخل شفاف استفاده گردید. محیط متخلخل موجود یک محیط همگن می باشد. لذا دو خاصیت نفوذپذیری و تخلخل که خاصیت یک محیط متخلخل می باشند، هر دو مقادیر ثابت دارند.

این محیط شفاف از جنس پلکسی گلس^۱ و دارای شکافی به قطر ۴,۵ میلی متر می باشد. این شکاف طول و عرضی به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۱۵۹ میلی متر دارد. دانه های بسیار ریز از جنس شیشه با قطر بین ۰,۶ تا ۰,۹ میلی متر داخل این محیط را پر کرده اند. درواقع خاصیت متخلخل بودن این محیط وابسته به این دانه های شیشه ای می باشد.

به منظور بدست آوردن نفوذپذیری محیط متخلخل موجود از رابطه داری داریم:

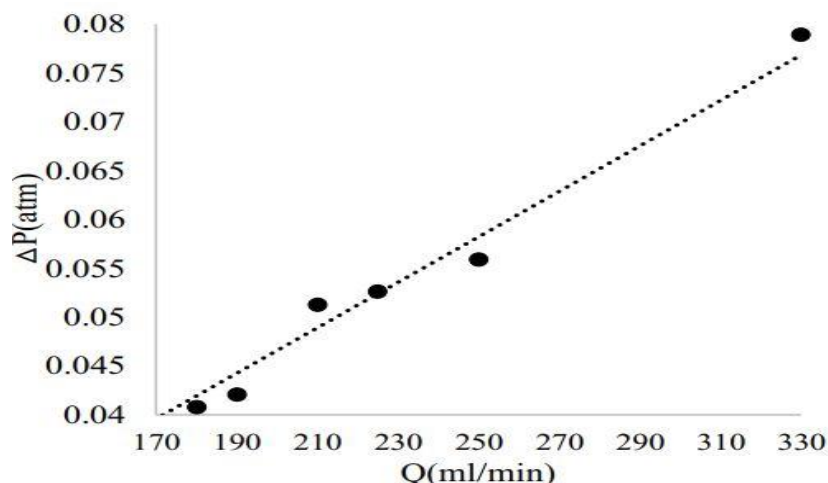
$$k = \frac{Q \mu L}{\Delta P A} \quad (2-2)$$

در این معادله L طول و A سطح مقطع ورودی محیط متخلخل است.

نحوه محاسبه نفوذپذیری به این شکل است که آب را با دبی های متفاوت به داخل محیط تزریق می شود. هر بار با اندازه گیری فشار دوسر محیط، نموداری شبیه نمودار شکل ۲-۷ ترسیم می شود. با

محاسبه شیب خط این نمودار، مقدار $\frac{\Delta P}{Q} = 2.3 \times 10^{-4}$ بدست می آید.

¹ Plaxy glass



شکل ۷-۲ اختلاف فشار بر حسب دبی تزریقی

با قرار دادن این مقدار در رابطه قبلی، همچنین با جاگذاری ابعاد محیط و لزجت آب به عدد $4.04 \times 10^{-10} m^2$ ، برای نفوذپذیری می‌رسیم. مشاهده می‌شود، نفوذپذیری محیط متخلخل این مطالعه حدود ۲۰۶ برابر از نفوذپذیری سلول هل-شاو کمتر شده است. با توجه به این که نفوذپذیری در مخازن نفتی در محدوده $3 \times 10^{-12} m^2$ الی $50 \times 10^{-16} m^2$ می باشد، لذا سلول مورد استفاده در مطالعه حاضر نفوذپذیری نزدیک‌تری به مخازن نفت دارد.

همانطور که در فصل قبل داشتیم، تخلخل یک محیط متخلخل از رابطه زیر حساب می شود:

$$\phi = \frac{\text{حجم منافذ محیط متخلخل}}{\text{حجم کل محیط متخلخل}} \quad (2-3)$$

جهت یافتن حجم منافذ، محیط را یک بار بدون آنکه داخل آن سیالی تزریق شود، وزن کرده و بار دیگر در حالی که آب به تمام محیط تزریق شده، دوباره با استفاده از ترازو های دقیق موجود در آزمایشگاه، وزن آن به دست می‌آید. تفاضل وزن محیط در دو حالت ذکر شده وزن آب موجود در ستاپ را به دست می‌دهد. با داشتن چگالی آب، حجم آب تزریق شده که همان حجم منافذ می‌باشد، بدست می‌آید. از طرف دیگر از آنجا که ابعاد شکاف موجود می‌باشد، حجم کل محیط متخلخل بدست می‌آید.

با جاگذاری این دو مقدار در فرمول تخلخل عدد $\phi = 0/39$ برای تخلخل بدست خواهد آمد.

در اغلب مخازن و بسترهای نفتی از جمله بسترهای نفتی ایران، جنس محیط و بستر نفتی از جنس ماسه سنگ نفت می‌باشند. در این نوع بستر تخلخل در محدوده $\phi = 0/08-0/38$ می‌باشد. لذا نتایج حاصله از آزمایشات با استفاده از ستاپ موجود به یک میدان نفتی که از جنس ماسه سنگ نفت است، نزدیک‌تر می‌باشد.

در ادامه اجزای تشکیل دهنده ستاپ مورد استفاده شرح داده خواهد شد:

۲-۱-۷-۱ شیر ورودی و خروجی

شیر ورودی و خروجی در این آزمایش به گونه‌ای هستند که با باز شدن، دو سیال در تمام مقطع محیط متخلخل در یک لحظه باهم در تماس قرار می‌گیرند. مکانیزم این شیر شبیه شیرهای ساده توپی می‌باشد. به این صورت که با چرخش دسته شیر در جهت باز شدن، شیار موجود روی توپی شیر در جهت ورودی جریان قرار می‌گیرد. در این لحظه مسیر حرکت سیال باز شده و سیال می‌تواند از محیط متخلخل عبور کند.

جنس این شیرها از نوع پلی آمید^۱ با مقاومت سایشی بالا^۲، ضربه‌پذیری مناسب، مقاومت ترکیدگی بالا و مقاومت ترک خوردگی بالا می‌باشد. شکل ۲-۸ نماهای مختلف این شیر را نمایش می‌دهد.

¹ Polyamid

² high fricative resistant



شکل ۸-۲ نماهای مختلف شیر مورد استفاده در سلول مطالعه حاضر

۲-۱-۷-۲ کلکتور^۱ ورودی

به منظور یک دست و یک نواخت کردن جریان خروجی از پمپ، از یک کلکتور استفاده شده است. در شکل ۹-۲ این کلکتور مشاهده می شود. این کلکتور دارای ۵ ورودی می باشد که بوسیله لوله هایی از جنس سیلیکون به خروجی دمپر متصل می باشند. در قسمت بالایی کلکتور یک شیر هوا تعبیه شده است که وظیفه آن خارج کردن هوای محبوس موجود در داخل کلکتور می باشد.



شکل ۹-۲ کلکتور ورودی ستاپ آزمایش

¹ Collector

جهت تخلیه سیالات بجا مانده از هر تست نیز یک شیر تخلیه در قسمت پایین وجود دارد. در کنار این شیر تخلیه یک فشارسنج نیز نصب شده است، که از طریق آن می توان فشار کاری و تزریقی سیال را در هر لحظه از آزمایش مشاهده نمود. این کلکتور از طریق یک صفحه ی آهنی به شیرها پیچ می شود.

۲-۱-۷-۳ رابط شیر خروجی

برای پر کردن محیط متخلخل از سیال بستر این رابط به شیر خروجی متصل شده و سیال مورد نظر را از طریق یک شیلنگ سیلیکونی از طریق پمپ به سمت محیط متخلخل هدایت می کند.

سطح مقطع این رابط و محیط متخلخل یکی می باشد. جنس این رابط صفحه پلکسی است، از یک طرف داخل شکاف تعبیه شده در شیر قرار می گیرد، از طرف دیگر بوسیله چهار پیچ به شیر متصل می باشد. از این رابط برای شستشو محیط متخلخل بعد از هر آزمایش نیز استفاده می شود. در شکل ۲-۱۰ این رابط مشاهده می شود.

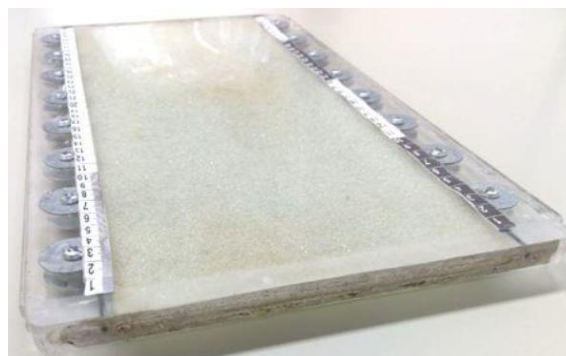


شکل ۲-۱۰ رابط شیر خروجی ستاپ آزمایش

¹ Barometer

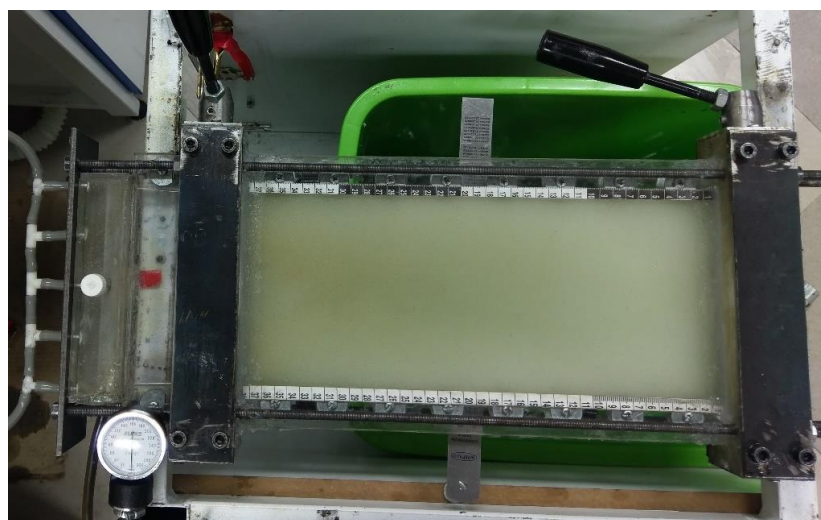
۲-۱-۷-۴ محیط متخلخل شفاف

همانطور که در قسمت های قبل اشاره شد، محیط مورد استفاده در مطالعه حاضر شبیه یک سلول هل-شاو می باشد، با این تفاوت که شکاف این محیط بیشتر از شکاف و فاصله بین صفحات در سلول هل-شاو می باشد. همچنین داخل این شکاف از دانه های شیشه پر شده است. شکل ۱۱-۲ نمای کلی این محیط را نمایش می دهد.



شکل ۱۱-۲ محیط متخلخل مطالعه حاضر به همراه دانه های شیشه ای متراکم داخل آن

با توجه به اجزا تشکیل دهنده مذکور شکل ۱۲-۲ مجموعه اجزای تشکیل دهنده ی ستاپ را نشان می دهد.



شکل ۱۲-۲ نمای کلی ستاپ پس از در کنار هم قرار گرفتن قسمت های مختلف

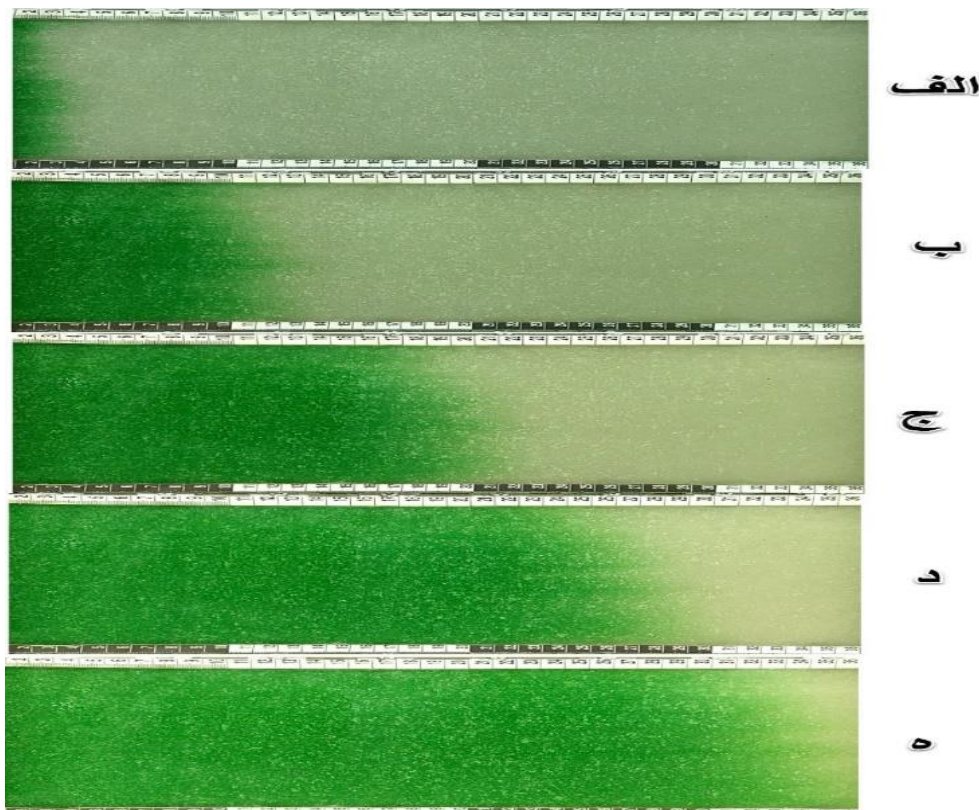
همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، شیرهای ورودی و خروجی بو سیله میله‌هایی به هم متصل شده‌اند که روی این میله‌ها مهره قرار دارد. با سفت کردن مهره‌ها و با استفاده از واشرهای سیلیکونی که قبلاً در سطح تماس شیر و محیط متخلخل قرار گرفته‌اند، می‌توان مجموعه را آب‌بندی نمود.

۲-۲ صحت‌سنجی ستاپ آزمایش

به‌منظور بررسی یک‌دست بودن، یکنواخت بودن و همچنین بررسی عملکرد کلکتور ورودی در پایداری و خطی کردن جبهه‌ی حرکت، آزمایش‌های زیر انجام گرفته است.

۲-۲-۱ یکنواختی جبهه‌ی پیش‌رونده

شکل ۲-۱۳ حرکت جبهه‌ی سیال در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد.

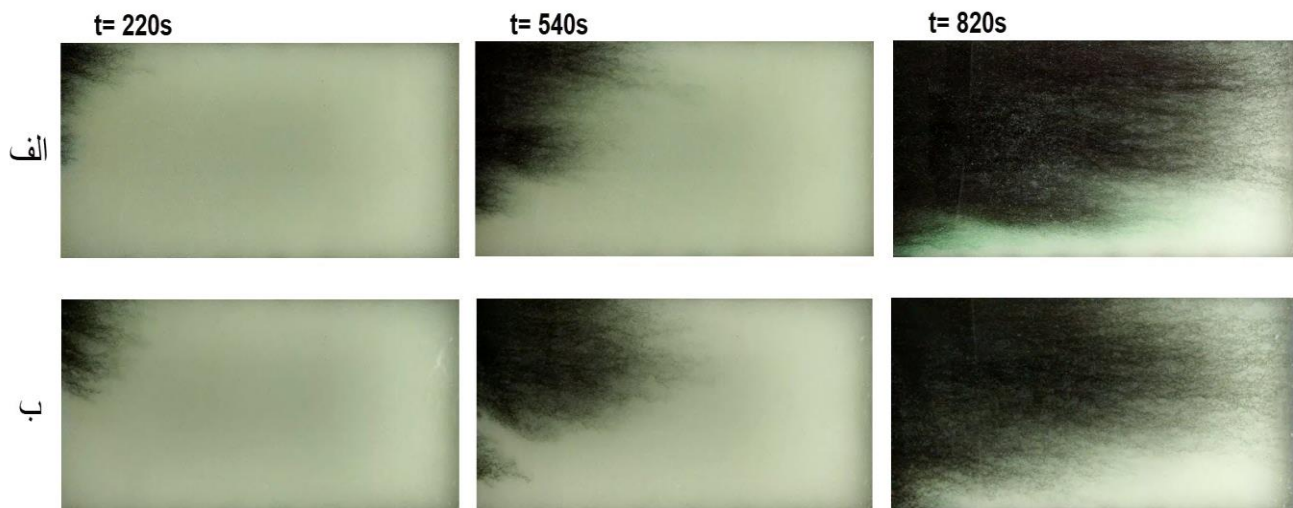


شکل ۲-۱۳ ۱۳ تزریق آب رنگی به داخل آب بدون رنگ با دبی ۱۰ میلی لیتر بر دقیقه در زمان‌های الف-۵۱۵۰ س ب-۳۰۰ س ج-۴۵۰ س د-۶۰۰ س ه-۹۰۰ س

به منظور بررسی یکنواخت بودن جبهه‌ی حرکت سیال، ابتدا محیط متخلخل را از آب پر می‌کنیم. در ادامه، آب رنگی (بدون تغییر در لزجت آب) را از کلکتور ورودی تزریق می‌کنیم. همانطور که انتظار می‌رفت، با توجه به یکسان بودن ویسکوزیته سیال جابه‌جاکننده با سیال جابه‌جا شونده، جبهه‌ی حرکت بین دو سیال بدون شکل‌گیری انگشتی به صورت یکنواخت حرکت می‌کند که این امر نشانه‌ی یکنواخت ساخته شدن مجموعه ستاپ می‌باشد.

۲-۲-۲ تکرارپذیری آزمایش‌ها

به منظور حصول اطمینان از اینکه ستاپ مورد استفاده در هر تست شرایط یکسانی دارد، آزمایشی انجام گرفت که در آن برای یک نسبت ویسکوزیته و دبی یکسان، یک آزمایش دو بار تکرار شد. شکل ۲-۱۴ این تست را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۴ تزریق محلول ۳۸/۳ به سیال بستر روغن سیلیکون با ویسکوزیته ۶۰۰ (mPa.s) - دبی ۵ (ml/min)

به دلیل ماهیت رفتار به شدت غیرخطی انگشتی‌ها در یک جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی، جزئیات شکل‌گیری انگشتی در هر آزمایش متفاوت می‌باشد ولی به طوری کلی پیشرفت توده‌ی سیال در

شرایط آزمایشگاهی یکسان (دبی و نسبت ویسکوزیته یکسان)، از الگویی مشابه پیروی می‌کند. انگشتی‌ها ابتدا از قسمت بالای ستاپ شروع به شکل‌گیری می‌کنند در ادامه با انگشتی شکل گرفته در قسمت پایین دست یکی شده و در نهایت به‌صورت یک انگشتی بزرگ تر به مسیر خود ادامه می‌دهد.

۲-۳ سیالات مورد استفاده

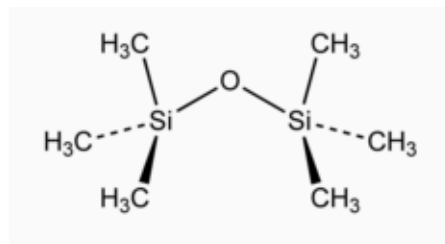
در این آزمایش در صدد بررسی اثرات الاستیک هستیم. لذا از چند نمونه سیالات پلیمری استفاده گردید. در عین حال نمونه‌های نیوتنی معادل با نمونه‌های ویسکوالاستیک نیز تولید شد. سیالات بررسی شده در این آزمایش :

- ۱- سیالات نیوتنی (آب خالص، مخلوط آب و گلیسرین با درصد حجمی مشخص و روغن سیلیکون)
- ۲- محلول‌های پلیمری ساخته شده از پلی آکریلامید با غلظت‌های متفاوت.

۲-۳-۱ روغن سیلیکون

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این مطالعه قصد بر آن است تا پدیده‌ی ناپایداری انگشتی برای حالت مخلوط‌نشده‌ی بررسی شود. در آزمایشات این مطالعه سعی شده بر خلاف سیال جابه‌جا کننده که آب و سیال غیر نیوتنی که آن هم پایه آب می‌باشد، سیال بستر سیالی انتخاب شود که پایه آب نباشد، یعنی در آب انحلال ناپذیر باشد. به این ترتیب امکان بررسی ناپایداری انگشتی به‌صورت مخلوط‌نشده‌ی محیا می‌شود. به این منظور از بین گزینه‌های موجود که حلالیتی در آب ندارند، روغن سیلیکون انتخاب شد. روغن سیلیکون دارای اتم‌های متغیر سیلیکون و اکسیژن است که دارای ویسکوزیته‌های متفاوتی

می‌باشد و همان‌طور که در شکل ۲-۱۵ مشخص می‌باشد، ساختار زنجیره‌ی پلیمری، از ۴۰ تا ۱۰۰۰ متغیر خواهد بود.



شکل ۲-۱۵ واحد ساختاری روغن سیلیکون

از جمله خواص روغن سیلیکون می‌توان به بی‌بو، بی‌مزه، غیر سمی، غیر اشتعال‌زا بودن، کشش سطحی بسیار پایین (حتی کم‌تر از آب، بین ۰/۰۲۱۳ - ۰/۰۱۱۵ نیوتن بر متر) و ضدکف بودن آن اشاره کرد.

روغن سیلیکون‌ها در یک سری ویسکوزیته‌های استاندارد (۵۰-۱۰۰-۳۰۰-۶۰۰-۱۰۰۰ cp) در بازار موجود هستند. در شکل ۲-۱۶ نمونه‌ای از روغن سیلیکون مورد استفاده که برای شرکت KCC کره جنوبی هست را مشاهده می‌کنید.



شکل ۲-۱۶ نمونه‌ای از روغن سیلیکون ساخت شرکت KCC

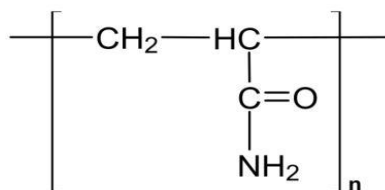
به این ترتیب جهت بدست آوردن روغن سیلیکون با ویسکوزیته دلخواه، می‌بایست روغن‌های

استاندارد موجود را با توجه به ویسکوزیته مورد نظر ما با یکدیگر مخلوط نمود.

۲-۳-۲ محلول‌های پلیمری

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

پلیمریزاسیون رادیکال‌های آزاد مونومرهای آکریلامید در آب منجر به تولید پلی آکریلامید می‌شود. در شکل ۲-۱۷ نمایی از واحد ساختاری زنجیره این پلیمر نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۷ واحد ساختاری پلی آکریلامید

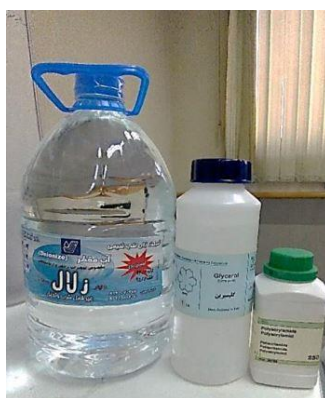
پلی آکریلامید در دسته‌ی پرکاربردترین پلیمرها در صنایع مختلف قرار می‌گیرد. در اکثر موارد استفاده پلی آکریلامید، این ماده در یک ماده پایه آبی محلول است. این پلیمر بصورت پودری سفیدرنگ و بدون بو موجود می‌باشد. در این مطالعه از پلی آکریلامید با جرم ملکولی 5×10^6 گرم بر مول برای ساخت سیال پلیمری استفاده شده است. در تمام آزمایشات، برای ساخت محلول پلیمری

¹ Monomers

² Polymerization

³ Free radical

ابتدا مقداری پلیمر به آب مقطر افزوده می‌شود. پس از حل شدن کامل پودر پلیمری در داخل آب مقطر و اطمینان از همگن بودن محلول حاصل، طی چند مرحله، گلیسیرین مورد نیازی که از قبل تهیه شده است را به آن اضافه می‌کنیم. افزودن مقداری از پلی‌آکریلامید به آب، سبب تغییر جزئی در لزجت آب شده و به آن خاصیت کشسانی^۱ می‌دهد. از گلیسیرین جهت تنظیم لزجت استفاده می‌شود. به این معنی که در صورت عدم اضافه کردن گلیسیرین، باز هم سیال و اسکوالا ستیک می‌باشد و افزودن گلیسیرین تنها به منظور رساندن ویسکوزیته سیال به ویسکوزیته مورد نظر می‌باشد. در شکل ۱۸-۲ تصویر آب مقطر، پلی‌آکریلامید و گلیسیرین مورد استفاده در آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۲ تصویر آب مقطر، پلی‌آکریلامید و گلیسیرین مورد استفاده در آزمایش ها

در مطالعه حاضر علاوه بر بررسی ناپایداری انگشتی در حال مخلوط نشدنی، اثرات الاستیک نیز بررسی می‌شود. یعنی بررسی خواهد شد که اثر استفاده از سیالات ویسکوالاستیک نسبت به استفاده از سیال نیوتنی، چیست. همچنین اثر افزایش مقدار الاستیسیته را نیز بررسی می‌کنیم.

در تمام آزمایشات این مطالعه سیال بستر روغن سیلیکون می‌باشد. این روغن یک روغن بی رنگ است. لذا جهت مشاهده چگونگی پیشرفت آزمایشات به هر دو دسته سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی رنگ اضافه گردید. باید توجه داشت که اکثر رنگ‌های محلول در آب جزء نمک‌ها دسته بندی می‌شوند که می

¹ Distilled water

² Elasticity

توانند تاثیرات زیادی روی خواص سیال بگذارند (معمولا سبب کاهش لزجت و خواص الاستیسیته سیال می شوند). لذا برای ساخت سیال باگر در مرحله اول ۱ ضافه کردن آب به پلیمر باید به همان میزان که رنگ مورد نیاز است از میزان آب کم کرده تا تاثیر اضافه کردن رنگ در خواص سیال جبران شود.

در آزمایش‌های مطالعه حاضر، به منظور مشاهده کامل و بهتر پدیده انگشتی، به ازای هر ۱۰۰ سی سی سیال جابه‌جاکننده مقدار ۸ سی سی رنگ خوراکی مشکی به آن افزوده گردید. پس از افزودن رنگ، خواص سیال از جمله ویسکوزیته و کشش سطحی اندازه‌گیری شد. مشاهده گردید افزودن رنگ خوراکی اثری روی خواص سیال جابه‌جا کننده ندارد.

جهت ساخت سیال رنگی، مقدار کمی از این رنگ، به محلول آب و پلیمر ضافه گردید. مخلوط حاصل به مدت ۲۴ ساعت روی هم‌زن هات‌پلیت با دور ۱۰۰ دوربر دقیقه با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس گلیسیرین به تدریج به مخلوط قبلی اضافه گردید. مخلوط حاضر به مدت ۲۴ ساعت روی هم‌زن قرار گرفت تا در نهایت یک محلول کاملاً همگن در اختیار باشد.

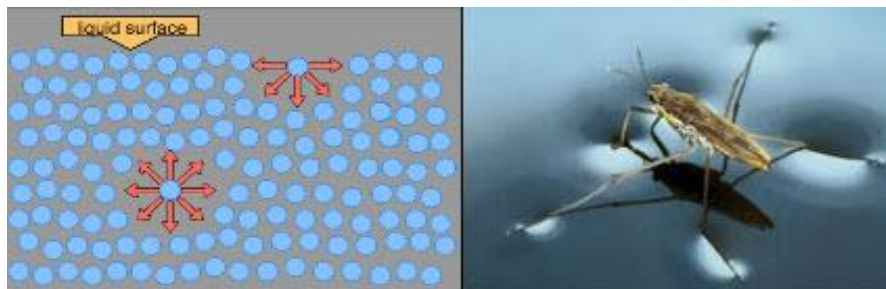
باید به این نکته توجه داشت که ساخت سیال پلیمری همگن و مناسب، از اهمیت فراوانی برخوردار است و باید مراحل ساخت این سیال‌ها را با دقت بالایی انجام داد. در غیر این صورت سیال تولید شده، فاقد خواص مناسب خواهد بود و آزمایش‌ها را با خطا روبرو می‌کند. ساخت سیالات با غلظت پلیمر بالاتر، دقت و حساسیت به مراتب بالاتری را می‌طلبد.

۲-۴ تست‌های سیالات

در این قسمت خواص اندازه‌گیری شده‌ی سیالات مختلف (ویسکوزیته و کشش سطحی) آورده شده است.

۱-۴-۲ تست کشش سطحی

دو سیال که در هم دیگر نامحلول هستند اگر در تماس با هم در حرکت باشند، سبب بوجود آمدن نیرویی به نام نیروی موینگی می‌شوند. این پدیده ناشی از خاصیتی به اسم کشش سطحی می‌باشد. اگر ظرفی از یک مایع را در نظر بگیریم، مولکول‌های داخل مایع توسط نیروهای ربایشی^۱ مولکول‌های اطراف جذب می‌شود و نیروها در جهات مختلف خنثی می‌شوند. ولی مولکول‌های سطح سیال فقط توسط مولکول‌های پایین جذب می‌شوند. این عامل به وجود آورنده‌ی کشش سطحی می‌باشد. شکل ۲-۱۹ نمایی از چگونگی ربایش مولکول‌های سطح سیال را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۹ نحوه ایجاد کشش سطحی در سطوح مایعات

همچنین زمانی که دو سیال مخلوط‌نشده در تماس با هم باشند همانند شکل ۲-۲۰، مولکول‌ها در سطح مشترک^۲ دو سیال مجاور هم، یک نیروی جاذبه‌ای را تجربه می‌کنند که منجر به ظاهر شدن کشش سطحی می‌شود.

^۱ Attraction forces

^۲ Interface



شکل ۲-۲۰ دو سیال مخلوط نشدنی در تماس باهم

در بین روش‌های تست کشش سطحی، روش قطره‌ی معلق از محبوبیت و دقت بالایی برخوردار است. در این روش بین پارامترهای مختلف سیال از جمله کشش سطحی و یک پارامتر هندسی (قطر نازل)، رابطه‌ای برقرار است که با استفاده از آن می‌توان مقدار دقیقی از اندازه کشش سطحی را تخمین زد.

کشش سطحی سیالات مورد استفاده در آزمایش‌ها با هوا و همچنین بین دو سیال جابجا کننده و جابه‌جا شوند، توسط دستگاه کشش سطحی مایع و گاز (IFT) شرکت Datis Energy دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود، اندازه‌گیری شده است. روش کار به این صورت است که فاز سیال محیط که در اینجا روغن سیلیکون می‌باشد، در یک سلول کوچک (بشر) قرار گرفته می‌شود و فاز قطره در یک سرنگ^۳ با حجم مشخص ریخته می‌شود. سرنگ نامبرده دارای نازل‌هایی با قطر مختلف می‌باشد. قطر مناسب با توجه به دو سیال قطره و محیط اختیار می‌شود. قطر نازل استفاده شده در تست کشش سطحی ۰/۱۲۹ سانتی‌متر می‌باشد. پس از عکس برداری از قطره مورد نظر در محیط نمونه (روغن سیلیکون) محاسبات لازم برای ضریب شکل^۴ و به دست آوردن کشش سطحی توسط نرم افزار انجام خواهد گرفت. چگالی^۵ قطره، چگالی سیال محیط و قطر نازل از جمله اطلاعاتی است که برای بدست آوردن کشش سطحی مورد نیاز است. در شکل ۲-۲۱ دستگاه تست کشش سطحی مورد

¹ Hanging drop

² Nozzle diameter

³ Syringe

⁴ Shape coefficient

⁵ Dencity

استفاده نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۱ دستگاه کشش سطحی آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود

در جدول ۱-۲ مقادیر کشش سطحی مواد مختلف با هوا و همچنین با مواد دیگر آورده شده است:

جدول ۱-۲ مقادیر کشش سطحی مواد مختلف مورد استفاده در مطالعه حاضر

کشش سطحی (mN/m)	دما ($^{\circ}C$)	فاز دوم	فاز اول
۷۲	۲۴	هوا	آب
۵۸	۲۴	هوا	گلیسرین
۲۱/۵	۲۴	هوا	روغن سیلیکون
۲۴/۴	۲۴	گلیسرین	روغن سیلیکون
۲۵/۴	۲۴	سیال پلیمری ۵۰	روغن سیلیکون
۲۶/۱	۲۴	سیال پلیمری ۲۰۰	روغن سیلیکون
۲۷/۲	۲۴	سیال پلیمری ۴۰۰	روغن سیلیکون

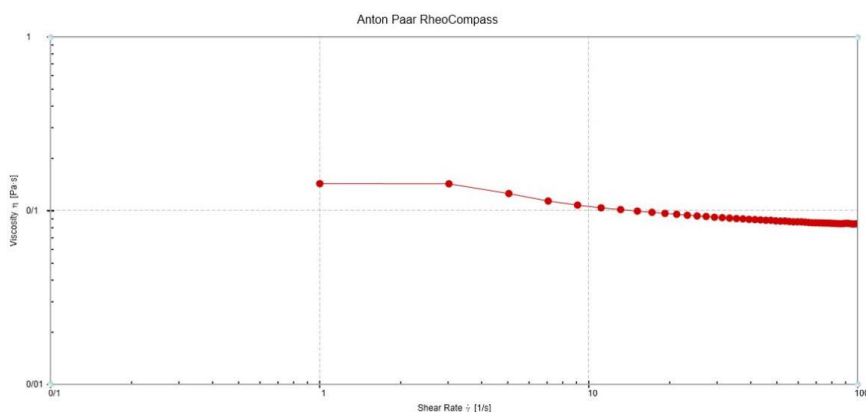
با توجه به جدول اخیر مشاهده می شود که افزایش غلظت پلیمر در محلول، سبب افزایش جزیی در مقدار کشش سطحی بین دو فاز شده است.

۲-۴-۲ تست ویسکوزیته

با توجه به نحوه ساخت سیالات پلیمری که در قسمت قبل توضیح داده شد، سیالات پلیمری مختلف با درصد های وزنی مختلف از پلیمر ساخته گردید.

۲-۴-۲-۱ نمونه پلیمری ۵۰ ppm

برای ساخت این نمونه، مقدار ۰/۰۰۵ درصد جرمی پودر پلی اکریلامید 5×10^6 را در مخلوط آب و گلیسرین با نسبت ۸۰-۲۰ حل می نماییم و اجازه می دهیم که مخلوط موجود، ۲۴ ساعت بر روی همزن هات پلیت، هم زده شود. شکل ۲-۲۳ نمودار ویسکوزیته بر حسب نرخ برش را برای این سیال نشان می دهد که توسط دستگاه رئومتر دقیق Anton Paar در آزمایشگاه سیالات پیچیده دانشگاه صنعتی شاهرود اندازه گیری شده است. جهت راحتی کار از این پس این نمونه را با نام "پلیمر ۵۰" نام گذاری می شود.



شکل ۲-۲۳ نمودار ویسکوزیته بر حسب نرخ برش برای پلیمر ۵۰

ویسکوزیته معادل این این نمونه برابر با ۹۲/۵۳ mPa.s می باشد. جهت ساختن سیال نیوتنی معادل این نمونه پلیمری، از ترکیب آب و گلیسرین با درصد ترکیبی ۱۷/۵ به ۸۲/۵ استفاده شد.

روش ساخت نمونه‌های بعدی شبیه این نمونه می‌باشد با این تفاوت که در صد پلیمر بالاتری دارند، همچنین نحوه‌ی گزارش کردن ویسکوزیته در آن‌ها متفاوت می‌باشد. سیالات پلیمری تا میزان^۱ ppm ۱۰۰ جزء سیالات باگر حساب می‌شوند. همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، سیالات باگر در نرخ برش‌های مختلف ویسکوزیته‌ی تقریباً ثابتی دارند. ولی در سیالات با غلظت بالاتر پلیمر، به دلیل خاصیت باریک شوندگی سیال، ویسکوزیته در مقابل تغییرات نرخ برش‌های مختلف، با تغییر مواجه است. در این موارد برای گزارش کردن عدد ویسکوزیته به ترتیب زیر عمل می‌کنیم:

از رابطه‌ی نفوذپذیری برای سلول هل-شاو داریم:

$$b = \sqrt{(12 \times k)} \quad (۴-۲)$$

با توجه به اینکه مقدار نفوذپذیری برای سلول مطالعه حاضر برابر با $4.04 \times 10^{-10} m^2$ است، بنابراین:

$$b = 6.6927 \times 10^{-5} m$$

از طرفی مقدار نرخ برش عبارت است از:

$$\dot{\gamma} = \frac{U_{max}}{b/2} \quad (۵-۲)$$

¹ Part Per Milion

برای یک پروفیل سرعت داریم:

$$U_{max} = \frac{3}{2} U \quad (۶-۲)$$

لذا با داشتن مقدار b و رابطه‌ی (۶-۲) خواهیم داشت:

$$\dot{\gamma} = \frac{3}{b} U = \frac{3}{bA} Q \quad (۷-۲)$$

Q دبی سیال جابه‌جا کننده، A سطح مقطه کانال سلول می‌باشد.

با توجه به رابطه اخیر، برای هر تزریقی که در آزمایش انجام می‌گیرد و با توجه به دبی حرکت سیال جابه‌جا کننده، یک مقدار $\dot{\gamma}$ (نرخ برش) خواهیم داشت. حال با داشتن مقدار $\dot{\gamma}$ و مراجعه به نمودار ویسکوزیته بر حسب نرخ برش که از دستگاه رئومتر به دست آمده است، میتوان مقدار ویسکوزیته متناظر با نرخ برش بدست آمده را به عنوان ویسکوزیته موثر^۱ سیال در هر تزریق گزارش نمود. لذا در جابه‌جایی‌های سیالات پلیمری با غلظت بالا، مقدار ویسکوزیته با توجه به تغییر سرعت جبهه‌ی سیال تغییر می‌کند.

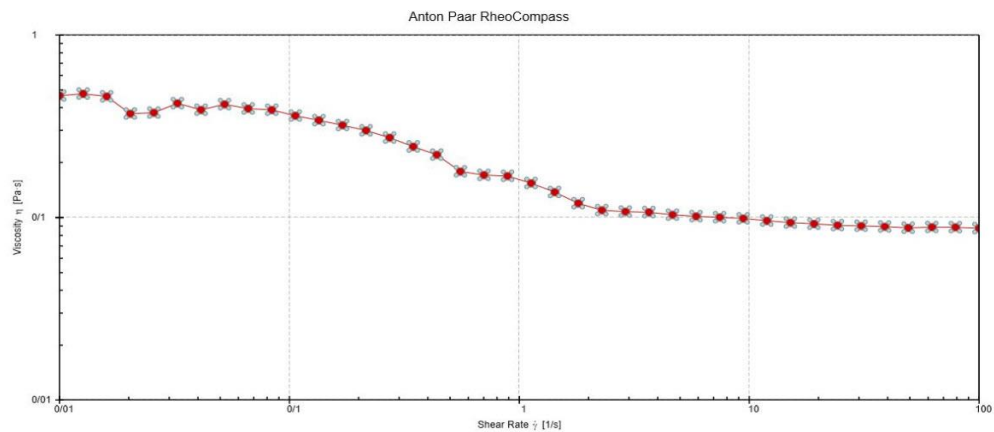
۲-۴-۲ نمونه پلیمری ۲۰۰ppm

برای ساخت این نمونه، مقدار ۰/۰۲ درصد جرمی پودر پلی‌اکریلامید 5×10^6 را در مخلوط آب و گلیسرین با نسبت ۸۰-۲۰ حل می‌نماییم.

با توجه به مراتب بالا چون سیال پلیمری موجود با گر نمی‌باشد، لذا مقدار ویسکوزیته بر حسب نرخ

¹ Effective viscosity

برش ثابت نمی‌باشد و ابتدا باید از رابطه (۲-۷) مقدار نرخ برش حساب گردد، سپس با مراجعه به نمودار ویسکوزیته بر حسب نرخ برش، مقدار ویسکوزیته سیال مورد نظر در آن نرخ برش محاسبه شود. در شکل ۲-۲۳ نمودار ویسکوزیته بر حسب نرخ برش برای سیال پلیمری اخیر مشاهده می‌شود:



شکل ۲-۲۳ نمودار ویسکوزیته بر حسب نرخ برش برای پلیمر ۲۰۰

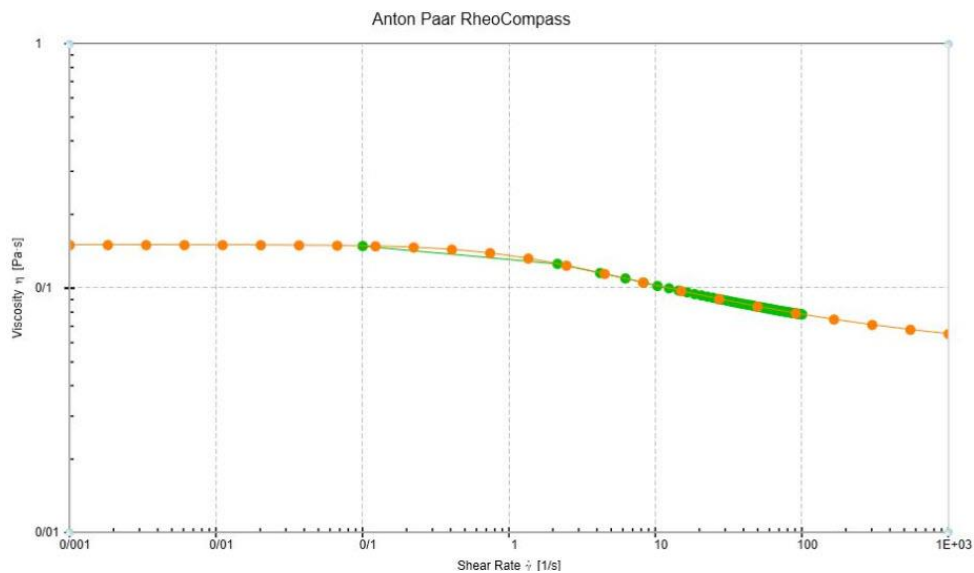
تمام آزمایش‌ها در سه دبی ۵، ۷/۵ و ۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه انجام گرفته است. جدول ۲-۲ ویسکوزیته برای هر دبی را نمایش می‌دهد.

جدول ۲-۲ ویسکوزیته پلیمر ۲۰۰ برای نرخ‌های مختلف

دبی	۵ mL/min	۷/۵ mL/min	۱۰ mL/min
نرخ برش (1/s)	۳/۵۲	۵/۲۸	۷/۰۴
ویسکوزیته سیال پلیمری (m Pa.s)	۱۰۸/۲	۱۰۲/۴	۹۵

۲-۴-۲-۳ نمونه پلیمری ۴۰۰ppm

برای این نمونه نیز همانند قبل خواهیم داشت:



شکل ۲-۴-۲ نمودار ویسکوزیته برحسب نرخ برش برای پلیمر ۴۰۰

جدول زیر ویسکوزیته برای هر دبی را نمایش می‌دهد.

جدول ۳-۲ ویسکوزیته پلیمر ۴۰۰ برای نرخ برش‌های مختلف

mL/min ۱۰	۷/۵mL/min	mL/min ۵	دبی
۷/۰۴	۵/۲۸	۳/۵۲	نرخ برش (1/s)
۱۰۷/۶	۱۱۲/۲	۱۲۰/۷	ویسکوزیته (mpa.s)

در جدول ۲-۴، ویسکوزیته‌ی نمونه‌های مورد آزمایش در این مطالعه به همراه چگالی هر کدام آورده شده است. نام‌گذاری هر نمونه بر اساس ویسکوزیته‌ی آن خواهد بود.

جدول ۲-۴ ویسکوزیته و چگالی آب و محلول‌های آب و گلیسرین با درصدهای حجمی مختلف از گلیسرین، مورد استفاده در این آزمایش

ردیف	نام نمونه	درصد گلیسرین در نمونه (%)	چگالی (Kg/m^3) در دمای 24°C	ویسکوزیته (mPa.s) در دمای 24°C
۱	آب	صفر	۹۹۶/۸	۰/۸۹
۲	محلول ۳۸/۳	۵۹/۵	۱۱۵۰	۳۸/۳
۳	محلول ۹۲/۵	۸۲/۵	۱۲۲۰	۹۲/۵
۴	محلول ۹۵	۸۲/۸	۱۲۲۱/۳	۹۵
۵	محلول ۱۰۲/	۸۳/۶	۱۲۲۳/۱	۱۰۲/۴
۶	محلول ۱۰۷/۶	۸۳/۹	۱۲۲۳/۸	۱۰۷/۶
۷	محلول ۱۰۸/۲	۸۴	۱۲۲۴	۱۰۸/۲
۸	محلول ۱۱۲/۲	۸۴/۴	۱۲۲۵/۲	۱۱۲/۲
۹	محلول ۱۲۰/۷	۸۵	۱۲۲۶/۳	۱۲۰/۷

۹۲/۵	۱۲۲۰/۴	۸۱/۶	پلیمر ۵۰	۱۰
۹۲/۵	۱۲۲۱	۸۱	پلیمر ۲۰۰	۱۱
۱۰۲/۴	۱۲۲۴	۸۲/۸	-	۱۲
۱۰۷/۶	۱۲۲۴/۳	۸۳	-	۱۳
۱۰۸/۲	۱۲۲۵	۸۳/۲	پلیمر ۴۰۰	۱۴
۱۱۲/۲	۱۲۲۵/۸	۸۳/۵	-	۱۵
۱۲۰/۷	۱۲۲۶/۸	۸۴/۵	-	۱۶

۲-۴-۲-۴ ویسکوزیته‌ی روغن سیلیکون

همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، روغن سیلیکون در یک سری ویسکوزیته‌های استاندارد در بازار موجود می‌باشند. لذا جهت انجام آزمایش‌ها و رسیدن به ویسکوزیته‌ی مورد نظر، می‌بایستی روغن سیلیکون با ویسکوزیته‌های استاندارد را با یکدیگر مخلوط نمود. برای آزمایش‌های مطالعه حاضر از سه نوع استاندارد روغن سیلیکون با ویسکوزیته‌های ۵۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ (mPa.s) استفاده شده است. در جدول ۲-۵، ویسکوزیته‌های روغن سیلیکون مورد استفاده در آزمایش‌های این مطالعه به همراه در صد ترکیب آن‌ها مشاهده می‌شود.

جدول ۵-۲ ویسکوزیته های روغن سیلیکون مورد استفاده در مطالعه حاضر به همراه درصد ترکیب روغن های استاندارد

ردیف	روغن ۵۰ (%)	روغن ۶۰۰ (%)	روغن ۱۰۰۰ (%)	ویسکوزیته معادل (mPa.s)
۱	۳۸	۶۲	---	۲۳۶/۱
۲	۳۶	۶۴	---	۲۴۵/۹
۳	۳۵	۶۵	---	۲۵۰/۸
۴	۳۴	۶۶	---	۲۵۸/۲
۵	۳۱	۶۹	---	۲۷۵/۴
۶	۲۹	۷۱	---	۲۹۵/۱
۷	۹	۹۱	---	۴۸۱
۸	---	۴۰	۶۰	۸۱۶/۶
۹	---	۳۶	۶۴	۸۳۲
۱۰	---	۳۰	۷۰	۸۵۷/۴
۱۱	---	۲۷	۷۳	۸۷۳
۱۲	---	۱۷	۸۳	۹۱۴/۶
۱۳	---	۴	۹۶	۹۸۰

۵-۲ اعداد بی بعد^۱

در ادامه جهت گزارش آزمایشات، از یک سری اعداد بی بعد استفاده خواهیم نمود که این اعداد، رژیم جریان و مشخصات سیالات تزریق شده به محیط متخلخل را بیان می کند.

۱-۵-۲ عدد بی بعد موینگی^۲

عدد موینگی عدد بی بعدی است که در مکانیک سیالات به نسبت بین نیروی ناشی از گرانشی (نیروهای ویسکوز)، به تنش سطحی که در سطح بین مایع و گاز یا در سطح بین دو مایع غیر قابل حل عمل می کنند، گفته می شود. طبق تعریف مقدار آن توسط رابطه زیر به دست می آید :

$$Ca = \frac{\mu U}{\gamma} \quad (۸-۲)$$

در این عبارت μ ویسکوزیته دینامیکی^۳، U سرعت و γ کشش سطحی بین دوسیال می باشد.

لنورمند^۴ و همکاران [۲] رژیم های جریان ناپایداری انگشتی را وابسته به عدد موینگی و همچنین نسبت ویسکوزیته سیال جابه جا کننده به جابه جا شونده (M') معرفی کردند. در واقع M' عکس نسبت تحرک (MR) در مطالعه حاضر می باشد. همانطور که در شکل زیر مشخص می باشد، براساس مطالعه آن ها در حین جریان ناپایداری انگشتی، سه رژیم جریان متفاوت آشکار می گردد. همان طور که در شکل ۲-۲۵ مشخص می باشد، این سه رژیم شامل جابه جایی پایدار^(الف)، رژیم جریان موینگی^(ب) و

¹ Dimensionless numbers

² Capillary number

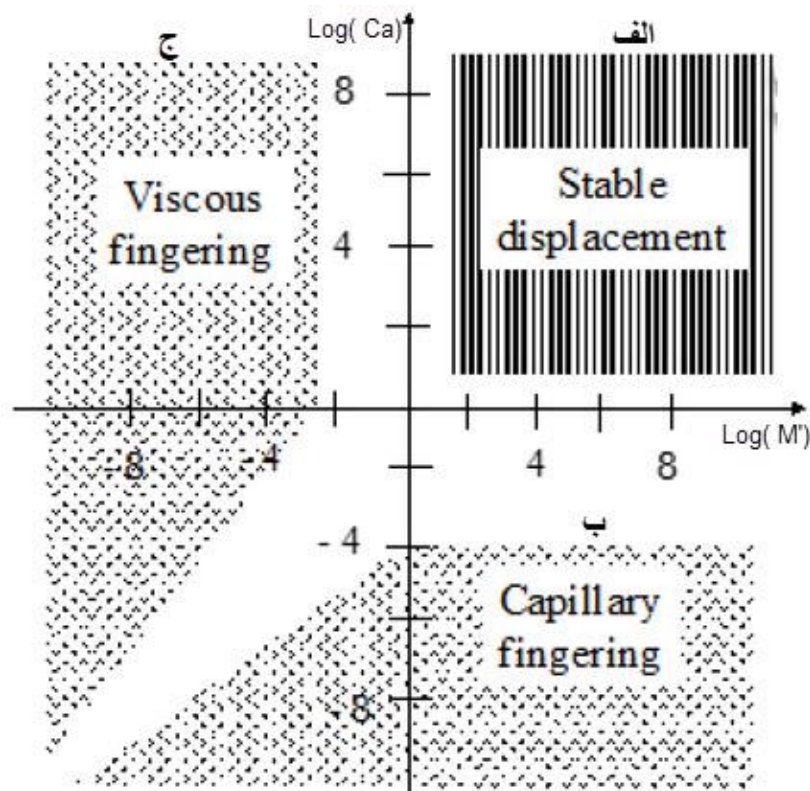
³ Dynamic viscosity

⁴ Lenormand

⁵ Stable displacement

⁶ Capillary fingering

انگشتی لزج (ج) می شود.



شکل ۲-۲۵ نمودار تعیین رژیم جریان مورد مطالعه لنورمند و همکاران [۲]

در رژیم جریان پایدار نرخ تزریق بالاست و نیروهای موینگی و نیروهای فشاری بسیار کوچک هستند. چیزی که در این رژیم مشخص است این است که جبهه‌ی حرکت در مرز دو سیال به صورت یکنواخت حرکت می کند.

در رژیم موینه، نیروهای ویسکوز قابل صرف نظر هستند و نرخ تزریق پایین می باشد. در نهایت در رژیم ویسکوز مقدار نسبت ویسکوزیته بالا می باشد.

با توجه به جدول ۱-۲ که مقادیر کشش سطحی بین سیال های این مطالعه آمده است، همچنین

¹ Viscous fingering

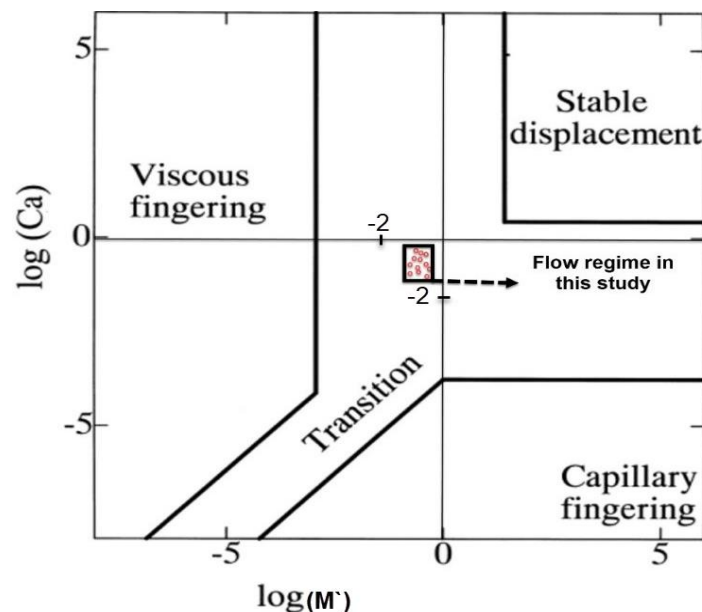
داشتن سرعت و ویسکوزیته سیال جابه‌جاکننده، مقادیر عدد موینگی (Ca) از رابطه (۲-۸) را برای تزریق‌های مختلف به‌صورت جدول ۲-۶ بدست خواهد آمد.

جدول ۲-۶ اعداد موینگی برای آزمایش‌های مطالعه حاضر

سیال جابجا- کننده	سیال جابجا- شونده	Q=5 ml/min	Q=7.5 ml/min	Q=10 ml/min
گلیسرین	روغن سیلیکون	۰/۰۲۹	۰/۰۴۲	۰/۰۵۶
سیال 50 ppm	-	۰/۰۲۷	۰/۰۴	۰/۰۵۳
سیال 200 ppm	-	۰/۰۳۱	۰/۰۴۳	۰/۰۵۴
سیال 400 ppm	-	۰/۰۳۲	۰/۰۴۵	۰/۰۵۸

از طرفی نسبت ویسکوزیته‌ها (M^*) در آزمایش‌های این مطالعه بین ۲/۵ الی ۸ متغیر می‌باشد. با توجه به تمام مراتب اخیر و شکل ۲-۲۶، تمامی جریان‌های این مطالعه بین دو رژیم ویسکوز و موینه قرار می‌گیرند. این ناحیه را ناحیه گذرا می‌نامند.

لذا انگشتی‌های شکل گرفته در این مطالعه، نه از نوع انگشتی موینگی مطلق و نه از نوع انگشتی ویسکوز مطلق می‌باشند.



شکل ۲-۲۶ ناحیه آزمایش های مطالعه حاضر در نمودار رژیم جریان

بر اساس نمودار فوق، برای جریان در یک محیط متخلخل وقتی عدد Ca پایین (کمتر از 10^{-5}) باشد، به طور مطلق نیروهای موئینه حاکم هستند و رژیم جریان یک رژیم موئینه می باشد. همچنین هرچقدر M^* (نسبت سیال جابه‌جا کننده به سیال جابه‌جا شونده) کمتر (کمتر از 10^{-3}) باشد، رژیم جریان به سمت رژیم ویسکوز پیش خواهد رفت.

اگر بخواهیم از لحاظ فیزیکی نمودار فوق را تحلیل کنیم، باید به کشش سطحی و مخلوط شدنی یا نشدنی بودن دو سیال توجه شود. به طور کلی هرچقدر کشش سطحی بین دو سیال بیشتر باشد، به این معنی است که عدد موئینگی پایین‌تر خواهد بود و با یک جابه‌جایی مخلوط نشدنی مواجه هستیم، لذا رژیم جریان به سمت یک رژیم کپیلاری پیش خواهد رفت. از طرفی در جابه‌جایی‌های مخلوط شدنی به دلیل اینکه در واقع کشش سطحی و برهم‌کنش بین دو سیال نزدیک به صفر می‌باشد، عدد موئینگی به سمت مقادیر خیلی زیاد میل می‌کند که همین امر سبب دور شدن از ناحیه‌ی موئینگی می‌شود.

۲-۵-۲ عدد بی بعد بلیک^۱

این عدد که تعمیم یافته عدد رینولدز می باشد، بصورت نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزج است. این عدد بیشتر در بررسی رفتار سیالات در یک محیط متخلخل استفاده می شود [۴۰]. این عدد که برای سیال جابجا کننده استفاده گردیده بصورت زیر می باشد:

$$Bl = \frac{D_h \rho u}{\mu(1 - \varphi)} \quad (۹-۲)$$

در رابطه بالا D_h قطر هیدرولیکی^۲، ρ چگالی سیال، u سرعت جریان سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال جابه جاکننده و φ تخلخل محلی محیط می باشد. قطر هیدرولیکی برای محیط متخلخل مطالعه حاضر نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$D_h = \frac{\varphi}{(1 - \varphi)} D_p \quad (۱۰-۲)$$

در این رابطه D_p میانگین قطر دانه های شیشه ای مورد استفاده در محیط متخلخل می باشد که به طور میانگین بین ۰/۶ تا ۰/۹ میلی متر می باشند. با استفاده از رابطه (۱۰-۲)، مقدار قطر هیدرولیکی عدد $D_h = 4.79 * 10^{-3} m$ بدست می آید.

جدول ۲-۷ عدد بلیک را برای سیالات جابجا کننده نشان می دهد.

جدول ۲-۷ اعداد بلیک برای سیال های جا به جا کننده مطالعه حاضر در دبی های مختلف

¹ Blake number

² Generalized

³ Hydrolic Diameter

ردیف	نام سیال جابه‌جاکننده	دبی (ml/min)	$BI \times 10^{-2}$
۱	محلول ۹۵	۵	۱/۲
		۷/۵	۱/۷
		۱۰	۲/۴
۲	محلول ۱۰۲/۴	۵	۱/۱۵
		۷/۵	۱/۱۷
		۱۰	۲/۳۱
۳	محلول ۱۰۷/۶	۵	۱/۱
		۷/۵	۱/۶
		۱۰	۲/۲
۴	محلول ۱۱۲/۲	۵	۱/۰۵
		۷/۵	۱/۶
		۱۰	۲/۱۱
۵	پلیمر ۵۰	۵	۱/۲۷
		۷/۵	۱/۹۱
		۱۰	۲/۵۵
۶	پلیمر ۲۰۰	۵	۱/۱۵
		۷/۵	۱/۱۷

۲/۳۱	۱۰		
۰/۹۸	۵	پلیمر ۴۰۰	۷
۱/۴	۷/۵		
۱/۹۶	۱۰		

۳-۵-۲ عدد بی بعد وایزنبرگ^۱

این عدد به صورت نسبت نیروهای ناشی از خاصیت الاستیک به نیروهای ناشی از لزجت تعریف می‌شود. رابطه‌ی زیر یکی از متداول ترین روابط موجود برای عدد وایزنبرگ است.

$$Wi = \lambda \dot{\gamma} \quad (۱۱-۲)$$

در این رابطه λ زمان رهایی از تنش و $\dot{\gamma}$ نرخ برش می‌باشد. برای محاسبه نرخ برش از رابطه زیر استفاده می‌شود [۴۷]:

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{\sqrt{k}} \quad (۱۲-۲)$$

U سرعت سیال و k نفوذپذیری محیط متخلخل می‌باشد.

حال برای محاسبه عدد وایزنبرگ به مقدار زمان رهایی از تنش نیاز داریم که در ادامه با استفاده از روابط، این مقدار حاصل شود.

زمان رهایی از تنش زمانی است که معرف فاصله زمانی بین تنش اعمالی و تغییر شکل حاصل از

¹ Weissenberg

آن برای یک سیال می‌باشد. برای محاسبه این زمان از یک سری تست‌ها، موسوم به تست نوسان استفاده می‌شود. در این تست‌ها مدوهای $\hat{G}$ و $\hat{G}'$ استخراج و تفسیر می‌شوند. قبلاً ذکر گردید که سیالات ویسکوالاستیک هم زمان دارای خواص جامد و مایع می‌باشند. لذا در این تست‌ها $\hat{G}$ معرف بخش جامد و $\hat{G}'$ معرف بخش سیال می‌باشد. با ترسیم تغییرات این مدول‌ها برحسب فرکانس اعمالی در تست نوسان، اولین نقطه‌ی تقاطع این مدول‌ها برابر با عکس زمان رهایی از تنش $\frac{1}{\lambda}$ می‌باشد. در مواقعی ممکن است که در نمودار مذکور نقطه‌ی تلاقی نداشته باشیم.

در این مواقع از روابط زیر کمک گرفته می‌شود:

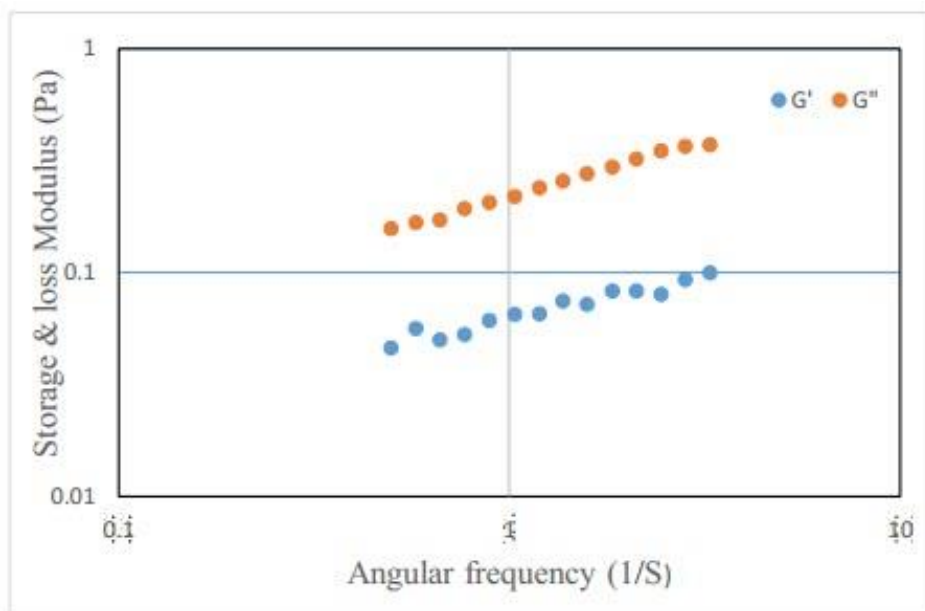
$$\hat{G} = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \lambda_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (2-13)$$

$$\hat{G}' = \eta_s \omega + \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (2-14)$$

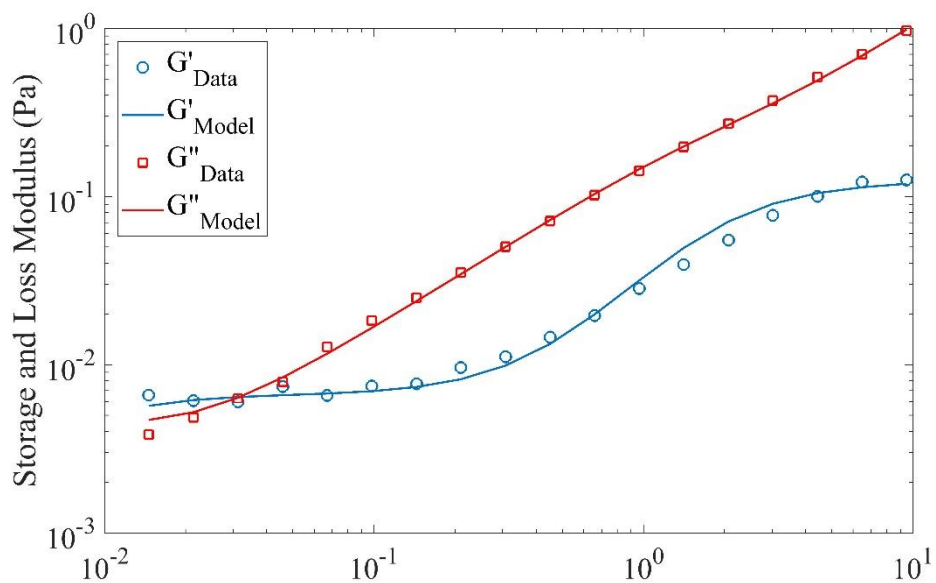
روابط بالا $\hat{G}$ و $\hat{G}'$ را به n مولفه تجزیه می‌کند که هر مولفه با یک زمان رهایی از تنش λ_i و یک ضریب لزجت η_i برای هرمد، تا زمانی که به یک برآزش خوب برای داده‌های آزمایشگاهی برسد، افزایش می‌یابد. با استفاده از روابط بالا طیفی از مقادیر رهایی از تنش بدست می‌آید که با جاگذاری در رابطه زیر مقدار متوسط زمان رهایی از تنش بدست می‌آید.

$$\lambda = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} \quad (2-15)$$

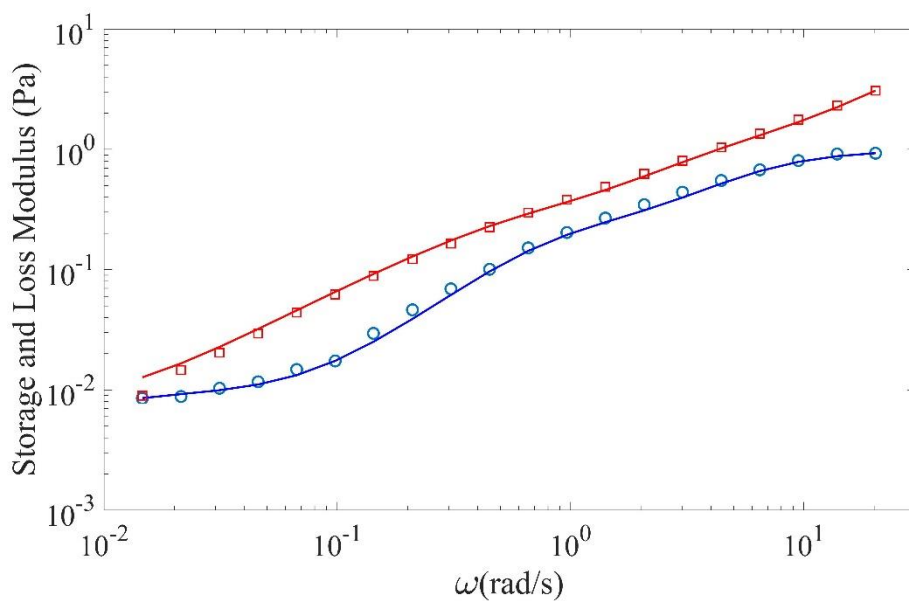
در مطالعه حاضر مقادیر مدول های $\hat{G}$ و $\hat{G}'$ توسط دستگاه رئومتر موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود اندازه گیری شده است. در شکل های ۲-۲۷ تا ۲-۲۹ نمودار این مدول ها ملاحظه می شود.



شکل ۲-۲۷ رفتار مدول های G' و G'' برای باگر ۵۰



شکل ۲-۲۸ رفتار مدول های G' و G'' برای سیال پلیمری ۲۰۰



شکل ۲-۲۸ رفتار مدول های G' و G'' برای سیال پلیمری ۴۰۰

با توجه به نحوه استخراج زمان رهایی از تنش از روابط (۲-۱۳)، (۲-۱۴) و (۲-۱۵)، زمان رهایی از تنش برای سیالات پلیمری مطالعه حاضر به صورت جدول ۲-۸ خواهد بود.

جدول ۸-۲ مقادیر زمان رهایی از تنش برای سیالات پلیمری مختلف

نوع سیال	سیال نیوتنی	سیال ۵۰ ppm	سیال ۲۰۰ ppm	سیال ۴۰۰ ppm
زمان رهایی از تنش (s)	صفر	۱/۴	۴/۲	۲۵

با توجه به مقادیر رهایی از تنش برای سیالات پلیمری موجود و نرخ برش‌های حاصله از دبی‌های مختلف، مقادیر عدد وایزنبرگ با استفاده از رابطه‌ی (۲-۱۱) بصورت جدول زیر خواهد بود.

جدول ۹-۲ مقادیر اعداد وایزنبرگ برای سیال‌های جابه‌جا کننده پلیمری

نام سیال	دبی (ml/min)	Wi
سیال ۵۰ ppm	۵	۴/۹
	۷/۵	۷/۴
	۱۰	۹/۸
سیال ۲۰۰ ppm	۵	۱۴/۷
	۷/۵	۲۲/۱۷
	۱۰	۲۹/۵

۸۸	۵	سیال ۴۰۰ppm
۱۳۲	۷/۵	
۱۷۶	۱۰	

باید توجه داشت برای نمونه های نیوتنی، به دلیل این که $1 \gg \lambda$ ، عدد وایزنبرگ برای آن ها صفر در نظر گرفته می شود.

۴-۵-۲-۶-۴-عدد بی بعد الاستیسیته^۱

این کمیت برای بیان میزان الاستیسیته ی یک سیال استفاده می شود، به صورت، نسبت نیروی الاستیک به نیروهای اینرسی تعریف می شود. در مطالعه حاضر عدد الاستیسیته، نسبت عدد وایزنبرگ به عدد بلیک تعریف شده است:

$$El = \frac{Wi}{Bl} \quad (۲-۱۶)$$

¹ Elasticity number

جدول ۱۰-۲ مقدار عدد الاستیسیته برای سیال‌های پلیمری این مطالعه

نام سیال جابه‌جاکننده	۵۰ ppm	۲۰۰ Ppm	۴۰۰ Ppm
عدد بی بعد الاستیسیته	۲۳۲/۲	۱۲۷۸/۲	۸۹۷۹/۶

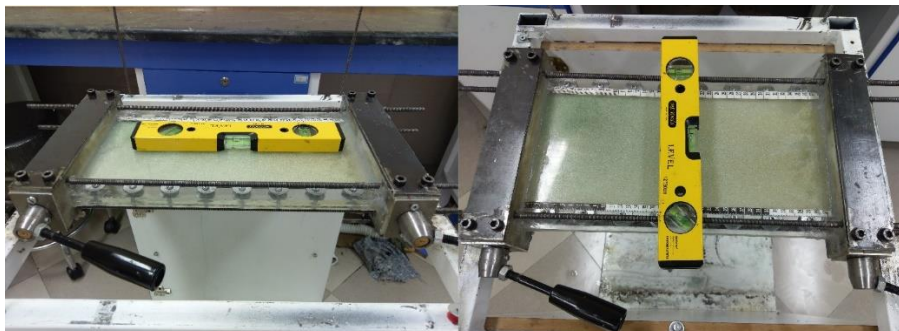
مقادیر بدست آمده برای عدد الاستیسیته این آزمایش بزرگ می‌باشد. دلیل این بزرگ بودن را می‌توان در قطر هیدرولیکی کوچک ستاپ آزمایش جستجو کرد. به عبارتی هندسه‌ی محیط متخلخل ساخته شده باعث ایجاد جریان خزشی^۱ می‌شود. از طرفی، در یک جریان خزشی نیروهای اینرسی کوچک می‌باشند، لذا این امر سبب بزرگ شدن عدد الاستیسیته شده است.

۲-۶ مراحل انجام آزمایش

در ادامه مراحل انجام آزمایش قدم به قدم تشریح شده است:

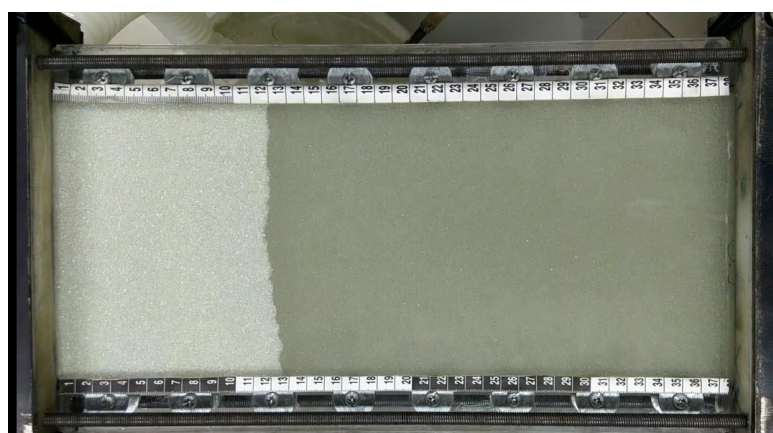
- **تراز کردن سلول:** تمام آزمایشات این مطالعه در حالتی که ستاپ آزمایش افقی می‌باشد، صورت گرفته است. درواقع تلاش شده اثرات نیروی گرانش در شکل‌گیری ناپایداری صفر باشد. به این منظور ستاپ مورد نظر به صورت افقی بر روی یک میز قرار گرفت و پس از تراز کردن مجموعه ستاپ به کمک تراز دیجیتال، بر روی میز پیچ شد و در جای خود محکم قرار گرفت. همانطور که در شکل ۲-۲۹ مشاهده می‌شود، مجموعه هم از طرف طولی و هم از طرف عرضی تراز شده است.

¹ Creeping flow



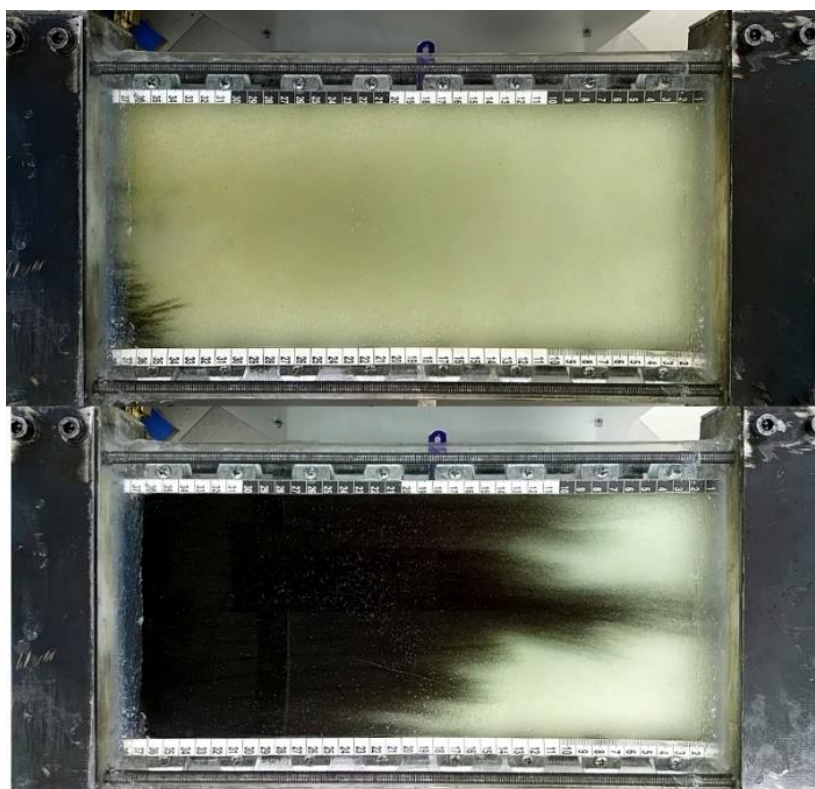
شکل ۲-۲۹ تراز نمودن ستاپ در دو جهت طولی و عرضی

- **پر کردن سلول با سیال بستر:** پس از آماده کردن سیال بستر، بوسیله پمپ، آن را از طریق رابط خروجی به داخل محیط متخلخل آزمایش تزریق می‌کنیم. تزریق سیال بستر باید به نحوی صورت بگیرد که اولاً: هوایی داخل ستاپ نماند، ثانیاً: دبی تزریقی آنقدر نباشد که دانه‌های شیشه‌ای را جابجا کند. لذا با توجه به غلظت سیال تزریقی باید دبی مناسب را برای آن تعیین کرد. مثلاً برای سیال‌های غلیظ دبی باید پایین باشد (حدود ۵ میلی‌لیتر بر دقیقه). پس از پر شدن محیط، شیرهای ورودی و خروجی را می‌بندیم تا سیال موجود به بیرون سرازیر نشود. شکل ۲-۳۰ نمایی از پر شدن ستاپ آزمایش توسط روغن سیلیکون را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۰ پر شدن ستاپ از سیال بستر (روغن سیلیکون)

- تزریق سیال رنگی و شروع فیلم برداری: در این مرحله، پس از نصب کلکتور ورودی بروی مجموعه، از طریق شلنگ‌های رابط، خط انتقال سیال جابه‌جا کننده تشکیل می‌شود. در حالتیکه شیر تخلیه هوا باز می‌باشد، تزریق سیال جابجا کننده تا زمانیکه کلکتور ورودی پر شود ادامه می‌یابد. دقت شود، جهت جلوگیری از امتزاج سیال جابجا کننده با سیال جابجا شونده، شیر ورودی به محیط متخلخل آزمایش بسته می‌باشد. در این مرحله پس از بستن شیر تخلیه و تنظیم دبی مورد نظر، شیر ورودی را باز می‌شود. پس از مشاهده اولین انگشتی‌ها از سیال جابجا کننده، ضبط آزمایش از طریق دوربین نصب شده بر بالای ستاپ، آغاز می‌شود. ضبط فیلم را زمانی متوقف می‌کنیم که اولین انگشتی به انتهای سلول برسد. این مورد را در تصویر ۲-۳۱ ملاحظه می‌کنید.

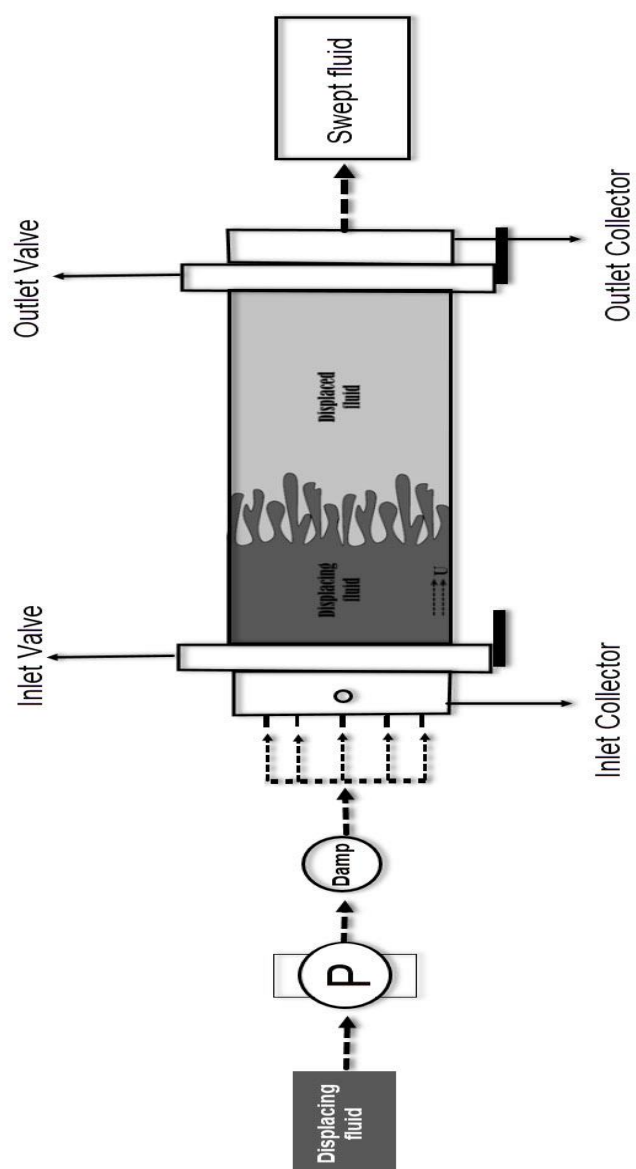


شکل ۲-۳۱ زمان شروع و پایان فیلم برداری از آزمایش‌ها

- **پاک‌سازی سلول:** پس از اتمام آزمایش، جهت آماده سازی سلول برای تست بعد، می‌بایست به شستن محیط متخلخل آزمایش بپردازیم، چرا که بستر سلول آکنده از بقایای روغن سیلیکون بجای مانده و سیال جابجا کننده آزمایش قبل می‌باشد. در واقع با این کار شرایط سلول برای تست‌های بعد را مثل حالت اول آماده می‌کنیم. برای این کار، مقدار کمی مواد شوینده داخل آب ولرم مخلوط کرده و آن را توسط کلکتور ورودی به داخل ست‌آپ تزریق می‌کنیم. تزریق ماده شوینده تا جایی ادامه یابد که دیگر اثری از سیال جابجا شونده و جابجا کننده مشاهده نشود. در اینجا اگر خود مواد شوینده داخل سلول باقی بماند، به دلیل اثری که روی جبهه‌ی سیال می‌گذارد، باعث ایجاد مشکل می‌شود. لذا بعد از هر مرحله تست، جهت حل این مشکل، آب گرم به مدت نیم ساعت داخل سلول تزریق می‌گردید. در مرحله آخر به منظور خشک کردن ست‌آپ، هوا از طریق کمپرسور به داخل محیط آزمایش دمیده می‌شد. عمل خشک کردن نیز به مدت نیم ساعت انجام می‌گرفت.

۲-۷ شماتیک کلی ستاپ آزمایش

در شکل ۳۲-۲ نمای کلی از مجموعه ستاپ در حال آزمایش به صورت شماتیک آورده شده است.



شکل ۳۲-۲ شماتیک مجموعه ستاپ مطالعه حاضر در حال آزمایش

فصل ۳ پارامترهای ارزیابی نتایج و پردازش تصویر

۳-۱ پارامترهای ارزیابی نتایج

در ادامه پارامترهایی که با کمک آن‌ها نتایج آزمایشات ارزیابی می‌شوند، معرفی شده است.

۳-۱-۱ بازده جاروبی

با توجه با کاربرد های مختلف، بازده جاروبی انواع مختلفی دارد که می‌توان به بازده جاروبی حجمی، بازده جاروبی سطحی و بازده جاروبی عمودی اشاره کرد که به انتخاب پارامترهای کلیدی موجود در مسئله مانند نسبت تحرک، همگن بودن، نفوذپذیری، الگوهای تزریق و غیره وابسته است.

در فرایند استخراج نفت و ازدیاد برداشت، این پارامتر نسبت حجم کل مواد هیدروکربنی موجود در مخزن به حجم جاروب شده از این مواد هیدروکربنی را که توسط سیال تزریقی جابه‌جا شده است، گزارش می‌دهد. مقدار بازده جاروبی تعیین کننده و نشان‌دهنده میزان بهره وری روش استخراج می‌باشد.

$$(۳-۱) \quad \text{بازده جاروبی} = \frac{\text{سیال جاروب شده}}{\text{کل سیال موجود}}$$

۳-۱-۲ طول اختلاط

میزان ناحیه‌ی مخلوط شدن دو سیال درگیر در یک جابجایی را طول اختلاط می‌گویند. به عبارت دیگر طول اختلاط را می‌توان میزان پیشرفت سیال با لزجت کم‌تر درون سیال با لزجت بیشتر، تعریف کرد. از این کمیت در ناپایداری انگشتی برای بیان مقدار پیشرفت و حرکت انگشتی‌ها در محیط متخلخل استفاده می‌شود. به‌دست آوردن طول اختلاط یک ایده بسیار خوب به محققین برای پیدا کردن نقطه حمله انگشتی‌ها ارائه می‌دهد. درواقع بیشترین طول اختلاط نشان دهنده بیشترین طول

انگشتی در محیط آزمایش می‌باشد. شکل ۳-۱ طول اختلاط را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱ شماتیک طول اختلاط

برای یک جابجایی پایدار این طول متناسب با $t^{\frac{1}{2}}$ می‌باشد. در جابجایی‌های ناپایدار نیز در زمان‌های اولیه‌ی شروع جریان که هنوز اغتشاشات کم توان هستند، این طول متناسب با $t^{\frac{1}{2}}$ می‌باشد، ولی با گذر زمان و رشد انگشتی‌ها، طول اختلاط تابعی پیچیده بر حسب زمان می‌شود. این پیچیدگی زمانی که یک جابجایی مخلوط‌نشده داریم، بسیار بیشتر می‌شود. بر همین اساس مطالعات زیادی در مورد چگونگی رفتار این کمیت بر حسب زمان در حالت‌های مختلف انجام گرفته است و معادلات گوناگونی برای آن گزارش شده است. کوال و همکاران [۵۱] در مدل یک‌بعدی خود، برای این کمیت یک رابطه‌ی خطی با زمان در نظر گرفتند و نتایج حاصله از این فرض را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. همچنین پرکینس [۵۲] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی توانست رابطه‌ای را بر نتایج به‌دست آمده منطبق کند و در بررسی‌های دیگر روی طول اختلاط که امکان مدل‌سازی آزمایشگاهی وجود نداشت، از آن استفاده کند. در جابه‌جایی نیوتنی، تن و هومسی [۵۳] طول اختلاط را به‌دست آوردند و نتیجه گرفتند که به ازای مقادیر بزرگ عدد پکلت این طول وابستگی خود را به عدد پکلت از دست می‌دهد. همچنین مشاهده کردند که اگر اغتشاشات اولیه کوچک باشد، طول اختلاط ابتدا با $t^{\frac{1}{2}}$ تغییر می‌کند ولی پس از آن با رشد انگشتی‌ها رابطه‌ای خطی با t پیدا خواهد کرد.

نقطه مطلوب این پارامتر طول اختلاط صفر است. یعنی سیال جابجاکنده، تمام سیال جابجاشونده را جاروب کند. امکان دارد برای کاربردهای دیگر نظیر اتلاط دو یا چند سیال دیگر، نقطه مطلوب طور دیگری در نظر گرفته شود.

۳-۲ پردازش تصویر

پردازش تصویر عبارتست از هر نوع پردازش سیگنال^۱ که ورودی آن یک تصویر است (مانند عکس یا صحنه‌ای از یک فیلم) و خروجی می‌تواند یک تصویر یا مجموعه‌ای از نشان‌های ویژه برای متغیرهای مربوط به تصویر باشد. اغلب تکنیک‌های پردازش تصویر شامل برخورد با تصویر به عنوان یک سیگنال دوبعدی و به کار گرفتن تکنیک‌های استاندارد پردازش سیگنال روی آن‌ها می‌شود.

پردازش تصویر دارای دو شاخه‌ی عمده‌ی بهبود تصاویر^۲ و بینایی ماشین^۳ می‌باشد. بهبود تصاویر دربرگیرنده‌ی روش‌هایی چون استفاده از فیلتر محو کننده و افزایش تضاد^۴ برای بهتر کردن کیفیت دیداری تصویر و اطمینان از نمایش درست آن‌ها در محیط مقصد (مانند چاپگر یا نمایشگر رایانه) است، درحالی‌که بینایی ماشین به روش‌هایی می‌پردازد که به کمک آن‌ها می‌توان معنی و محتوای تصاویر را درک کرد تا از آن‌ها در کارهایی چون رباتیک^۵ و محور تصاویر استفاده شود.

کاربرد استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر به مدت‌ها قبل بر می‌گردد. در اوایل دهه ۶۰ میلادی، زمانی که ناسا بوسیله‌ی کاوشگر رنجر هفت مبادرت به ارسال تصاویر از سطح ماه به زمین نمود، استخراج جزییات تصویر جهت یافتن محلی مناسب برای فرود سفینه آپولو^۷، نیازمند اعمال تغییراتی روی تصاویر

¹ Signal processing

² Image improvement

³ Machine vision

⁴ Contrast

⁵ Robotic

⁶ Ranger prob

⁷ Apollo vessel

بود. بدین ترتیب استفاده از پردازش بر روی عکس‌های ارسالی از ماه آغاز گردید. در آن دهه عمده استفاده از پردازش تصویر مربوط به کاربردهای نظامی و جاسوسی بود. کارشناسان جغرافیایی برای مطالعه الگوهای آلودگی هوا که با تصویر برداری هوایی^۱ و ماهواره‌ای به دست آمده است، از روش‌های پردازش تصویر بهره می‌برند. باستان‌شناسان نیز جهت بازیابی عکس‌های بسیار قدیمی که بر اثر فرسودگی مات شده‌اند، از تکنیک‌های پردازش تصویر استفاده می‌کنند. علاوه بر کاربردهای ذکر شده تا به اینجا، بهره‌گیری از پردازش تصویر در بسیار دیگر از موارد از جمله اتوماسیون صنعتی^۲، کالیبراسیون^۳ و ابزار دقیق^۴، حمل و نقل و پلاک خوان، مورد استفاده قرار گرفته است.

در مطالعه حاضر، پردازش تصویر توسط نرم‌افزار متلب^۵ انجام گرفته است. در متلب هر عکس به صورت یک ماتریس^۶ می‌باشد که تعداد سطر و ستون‌های این ماتریس همان رزولوشن^۷ عکس می‌باشند. درایه‌های این ماتریس را نیز پیکسل‌های^۸ عکس مورد نظر تشکیل می‌دهند. با توجه به نوع تصویر، هر کدام از این پیکسل‌ها یک عدد به خود اختصاص می‌دهند که بیانگر شدت رنگ آن پیکسل می‌باشد. به این ترتیب کلیه اقدامات به منظور پردازش تصویر، در واقع بر روی همین پیکسل‌ها انجام می‌گیرد. در ادامه به معرفی انواع پر کاربرد تصاویر پرداخته می‌شود.

۱-۲-۳ انواع تصاویر

در مبحث پردازش تصویر انواع مختلفی از تصاویر وجود دارد که در ادامه به معرفی انواع پر کاربرد آن‌ها می‌پردازیم.

¹ Aerial image

² Industrial Automation

³ Calibration

⁴ Accurat tools

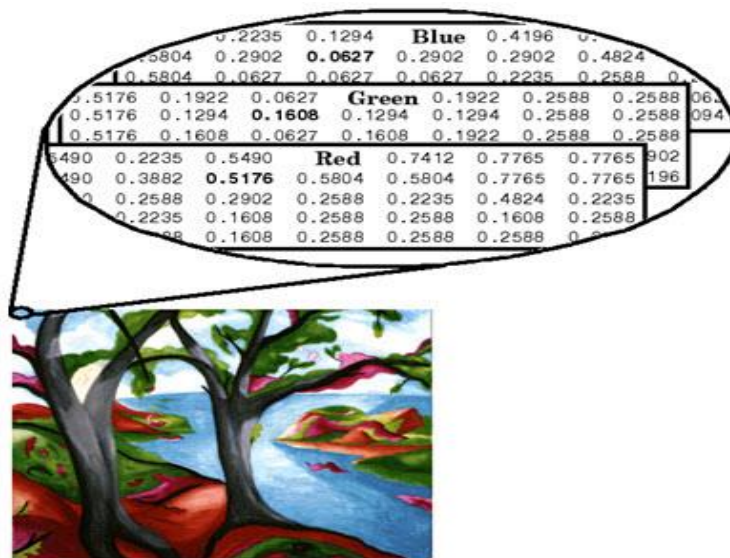
⁵ Matlab

⁶ Matrix

⁷ Resolution

⁸ Pixels

تصاویر (RGB): این نوع تصاویر متشکل از رنگ‌های قرمز، سبز و آبی می‌باشند (شکل ۳-۲) و با استفاده از این سه رنگ اصلی می‌توان رنگ‌های دیگری نیز تولید نمود. در حقیقت وقتی که یک تصویر رنگی را درون متغیری در نرم‌افزار متلب درج می‌کنیم، ماتریس‌های قرمز، سبز و آبی برای آن تصویر ایجاد می‌شود. هر پیکسل در این نوع تصویر، عددی بین صفر تا یک را دارا می‌باشد. هرچه عدد پیکسل‌ها به صفر نزدیک‌تر باشند، یعنی تیره‌تر و هرچه این عدد به یک نزدیک‌تر، یعنی آن پیکسل روشن‌تر است.



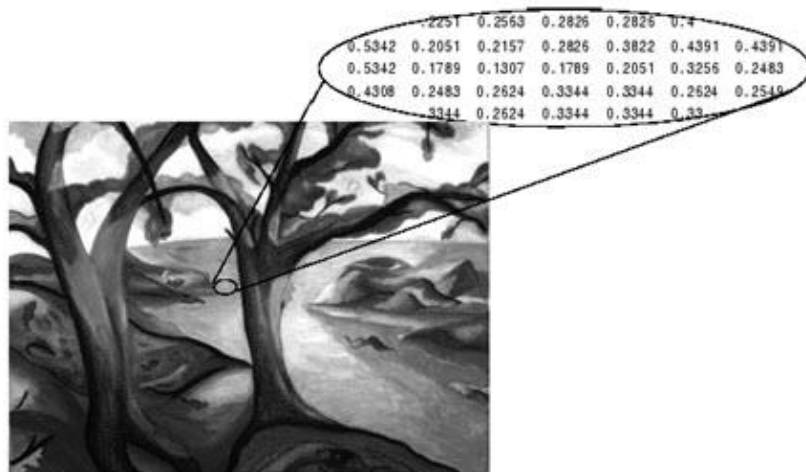
شکل ۳-۲ تصویر RGB

تصاویر (خاکستری): در این نوع تصویر پیکسل‌ها به صورت سیاه و سفید هستند. همچنین شدت این رنگ‌های سیاه و سفید متغیر می‌باشد. در واقع در تصاویر Gray، رنگ‌های سفید مطلق تا مشکی مطلق به صورت یک رنج در اختیار بوده و مقادیر خاکستری نیز قابل استفاده خواهند بود (شکل ۳-۳). بنابراین با نگاه سطحی به این تصاویر متوجه خواهید شد که تصاویر Gray همانند تصاویر RGB

¹ Red Green Blue

² Gray scale

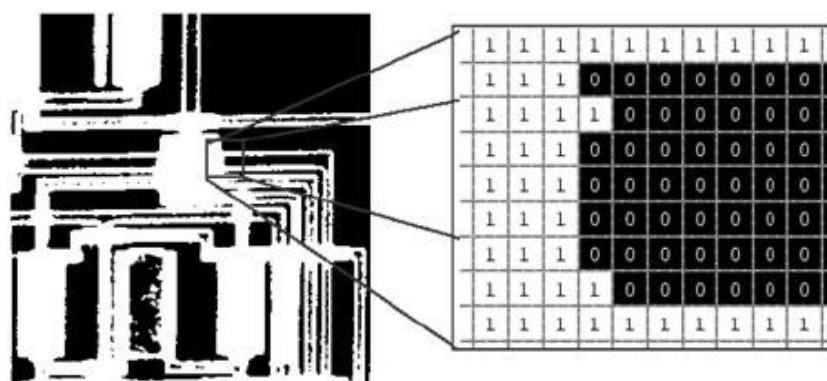
هستند، با این تفاوت که در آن‌ها رنگی به جز، سیاه، سفید و خاکستری دیده نمی‌شود. در نرم‌افزار متلب نیز تنها یک ماتریس برای این نوع تصویر تشکیل می‌شود که مانند قبل، پیکسل‌ها اعداد بین صفر تا یک را دارا می‌باشند.



شکل ۳-۳ یک تصویر *Scale Gray*

تصاویر باینری! دسته بسیار مهم دیگر از تصاویر، تصاویر باینری هستند که در آن، تنها رنگ‌های سفید و سیاه وجود دارد. در حقیقت هر پیکسل، اعداد متناظر صفر و یک را در ماتریس مربوطه دارا می‌باشد. نکته‌ای که در این جا باید به آن توجه داشت این است که منظور از صفر یا همان پیکسل خاموش^۲، رنگ سیاه و منظور از یک یا همان پیکسل روشن^۳، رنگ سفید می‌باشد. تصاویر باینری در مبحث پردازش تصاویر بسیار معروف بوده و معمولاً برای انجام محاسبات و استخراج اطلاعات از این نوع تصاویر استفاده می‌شود، چراکه از لحاظ پردازشی سبک هستند و می‌توان محاسبات سنگین را بر روی این تصاویر با سرعت بالاتری انجام داد. شکل زیر مفهوم این نوع تصویر را نشان می‌دهد.

¹ Binary
² Off pixel
³ On pixel



Pixel Values in a Binary Image

شکل ۳-۴ تصویر باینری

۳-۲-۲ مراحل پردازش تصویر آزمایش‌ها

پس آنکه فیلم هر آزمایش توسط دوربین با کیفیت تهیه شد، اقدامات زیر جهت انجام پردازش تصویر اعمال خواهد شد:

۳-۲-۲-۱ ویرایش فیلم

فیلم‌های تهیه شده از هر آزمایش به اصطلاح خام^۱ هستند و قبل از اعمال پردازش تصویر بر روی آن‌ها، نیاز به یک سری ویرایش^۲ دارند. این ویرایش‌ها توسط نرم افزار Aimersoft Video Converter انجام گرفت. در ادامه روند اعمال ویرایش‌ها بیان می‌گردند:

- فیلم‌ها از کل ستاپ گرفته شده اند، لذا ناحیه‌ای از فیلم که پدیده ناپایداری در آن رخ داده است، را برش می‌دهیم.
- با استفاده از ابزار های موجود در نرم افزار، کنتراست^۳ تصویر و روشنایی تصویر را مطابق با

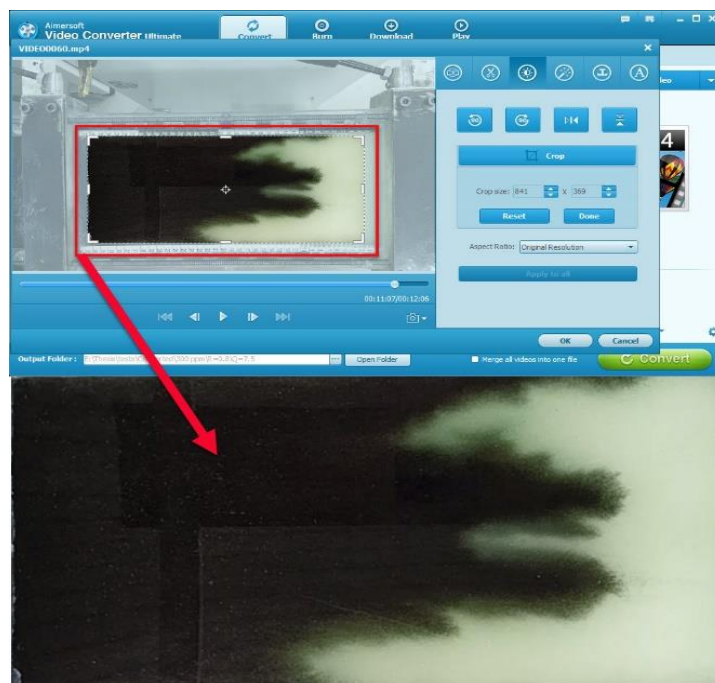
¹ Raw

² Edit

³ Contrast

نیاز پردازش تصویر تنظیم می‌کنیم.

- مدت زمان مورد نیازی که پدیده اتفاق می‌افتد مد نظر ماست. لذا قسمت‌های دیگر ویدئو را حذف می‌نماییم (مدت زمان مورد نیاز، از شکل گرفتن اولین انگشتی شروع می‌شود و تا زمانی که اولین انگشتی به انتهای محیط برسد، ادامه می‌یابد).
- در انتها نیز به منظور یکسان بودن کیفیت‌ها، فرمت کلیه ویدئو‌ها را به AVI تغییر می‌هیم.
- شکل ۳-۵ نمایی از محیط کار نرم‌افزار Aimersoft و برش تصویر، مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۵ جداسازی ناحیه‌ی رخدادن آزمایش توسط نرم‌افزار Aimersoft

۳-۲-۲-۲ پیش پردازش تصاویر

حال نوبت به آن می‌رسد که فیلم ویرایش شده از مرحله قبل را وارد کد دستوری نرم‌افزار متلب شود. این کد به این صورت می‌باشد که هر ده ثانیه یک‌بار، یک فریم از فیلم را جدا می‌کند. درواقع فریم جدا شده یک تصویر RGB می‌باشد در ادامه فریم جدا شده به یک تصویر باینری تبدیل می‌شود. محیط

ستاپ مطالعه حاضر به دلیل اشباع شدن از دانه‌های شیشه، در طول آزمایش نویزهایی را پدید می‌آورد که به نویزهای نمک و فلفل^۱ موسوم می‌باشند. قبل از تبدیل کردن فریم جدا شده به یک تصویر باینری بهتر است که فیلترهایی را بر روی فریم مذکور اعمال نماییم تا نویزهای مذکور به حداقل برسند.

- ابتدا فریم جدا شده که یک تصویر RGB می‌باشد پس از سیاه و سفید شدن، جهت از بین بردن نویزهای ذکر شده، با اعمال کد `medfilter` نویزهای تصویر تا حد زیادی از بین رفتند.
- مرحله آخر با استفاده از دستور `im2bw` تصویر فیلتر شده به یک عکس باینری که تمام پیکسل‌های آن یا سفید (یک) یا سیاه (صفر) هستند، تبدیل گردید.

در شکل ۳-۷ نحوه‌ی اعمال دستورات ذکر شده بر روی تصاویر را ملاحظه می‌کنید.



شکل ۳-۶ ویرایش و پیش‌پردازش نمونه ایی از آزمایشات. الف) تصویر اصلی جدا شده از فیلم. ب) اعمال فیلتر و حذف نویزهای نمک و فلفل توسط متلب ج) باینری کردن تصویر فیلتر شده توسط متلب

¹ Salt and Pepper Noises

² Filters

۳-۲-۳ پردازش اصلی تصاویر

پس آن که تصویر ورودی با اعمال فیلترهای مناسب به یک تصویر باینری تبدیل گردید، حال زمان آن است که به بررسی و تجزیه و تحلیل آن پرداخته شود. با توجه به تعاریف پارامترهای ارزیابی نتایج که در قسمت قبل همین فصل به آن اشاره شد، تصاویر باینری شده را پردازش شده، و اطلاعات لازمه را از آن‌ها استخراج می‌گردد.

۱. بررسی بازده جاروبی

از آن جا که پیکسل‌های یک تصویر باینری یا یک (سفید یا روشن) هستند یا صفر (مشکی یا خاموش)، می‌توان پارامتر بازده جاروبی را از تقسیم تعداد پیکسل‌های مشکی (مساحت سیال جابه‌جاکننده)، بر تعداد کل پیکسل‌های موجود در تصویر بدست آورد. به این صورت بازده جاروبی به صورت بی بعد در خواهد آمد.

۲. بررسی طول اختلاط

در تمام آزمایش‌ها سیال جابجا کننده از چپ به راست تزریق می‌شود. همانطور که می‌دانیم هر تصویر باینری، ماتریسی با درایه‌های صفر و یک می‌باشد. لذا طول اختلاط در هر تصویر عبارت است از: اختلاف شماره اولین ستونی از ماتریس تصویر که در آن درایه‌ی یک (پیکسل سفید) وجود دارد تا شماره‌ی آخرین ستونی که درایه صفر (پیکسل سیاه) در آن ستون موجود است. سپس مقدار بدست آمده برای طول اختلاط را به تعداد کل ستون‌های ماتریس تصویر باینری تقسیم می‌شود تا بتوان مقدار طول اختلاط را به صورت بی بعد گزارش نمود.

باید به این نکته توجه داشت که محاسبه‌ی تمام پارامترها تا زمانی انجام شده است که هنوز سیال جابه‌جاکننده به انتهای سلول نرسیده باشد. به محض رویت اولین قطرات سیال جابه‌جا کننده در

خروجی ستاپ، تصویر برداری متوقف می‌شود. در مبحث استخراج نفت تلاش محققان بر این است تا با استفاده از تکنیک‌ها و مواد مختلف، لحظه مورد بحث به تاخیر بی‌افتد. در واقع در یک دبی مشخص، هرچه قدر لحظه رسیدن سیال جابه‌جاکننده به انتهای سلول دیرتر باشد، این به این معنی است که طول انگشتی و اغتشاش کمتر می‌باشد و در نهایت بازده جاروبی بیشتر خواهد بود.

در فصل بعد، نمودار هر یک از پارامترهای ارزیابی مذکور بر حسب زمان رسم خواهند شد تا یک متر و معیار مناسب برای مقایسه آزمایش‌های مختلف داشته در اختیار باشد.

فصل ۴ بررسی نتایج و داده‌ها

۴-۱ مقدمه

در این بخش به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌ها پرداخته می‌شود. در کلیه آزمایشات سیال بستر، روغن سیلیکون که یک سیال نیوتنی می‌باشد، در نظر گرفته شده‌است. آزمایش‌ها از نظر نوع سیال جابه‌جاکننده به دو دسته تقسیم بندی گردیده اند:

۱ آزمایش‌های مربوط به سیال نیوتنی

۲ آزمایش‌های مربوط به سیال‌های غیر نیوتنی (ویسکوالاستیک)

برای بررسی و تحلیل هر آزمایش نمودارهای طول اختلاط، بازده جاروبی و در برخی آزمایش‌ها نمودار رشد اغتشاش به حالت پایه، ترسیم شده است. جهت تاکید مجدد این نکته یاد آوری می‌شود که تمام آزمایش‌ها از شکل گیری اولین انگشتی آغاز می‌گردد و تا زمانی که آخرین انگشتی و رگه به انتهای محیط متخلخل برسد، ادامه پیدا می‌کند.

۴-۲ آزمایش‌های مربوط به سیالات نیوتنی

۴-۲-۱ تاثیر افزایش نسبت ویسکوزیته‌ها (M)

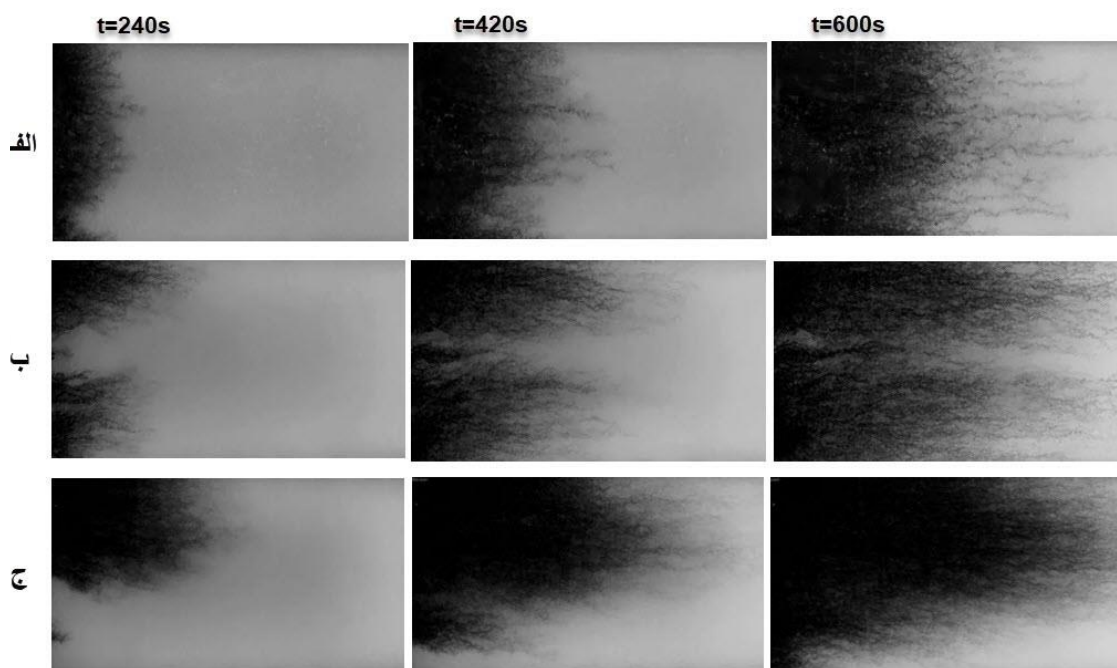
در حالت تزریق سیال نیوتنی در یک سیال نیوتنی دیگر و در حالتی که دو فاز در هم دیگر مخلوط ناپذیر باشند، علاوه بر مشاهده‌ی انگشتی‌های بزرگ، شاهد بوجود آمدن انگشتی‌های بسیار ریزی بودیم که شبیه به مویرگ‌های بدن انسان می‌باشند. در واقع انگشتی‌های بزرگ مذکور، راه خود را از طریق همین مویرگ‌ها باز می‌کنند و به پیشروی ادامه می‌دهند. در حالتیکه یک جابه‌جایی مخلوط‌نشده‌ی داریم برخلاف یک جابه‌جایی مخلوط‌شدنی، انگشتی‌ها تمایل به پهن شدگی بیش‌تری از خود نشان می‌دهند و همچنین تعداد این انگشتی‌های بزرگ نیز کاهش می‌یابد. این مورد را بان و همکاران [۴۲]

¹ Viscosity ratio

² Arteriole

مشاهده نمودند.

در شکل ۴-۱ زیر نسبت لزجت بین سیال جابجا کننده (مخلوط آب و گلیسرین) و سیال جابه‌جا شونده (روغن سیلیکون) افزایش یافته است.



شکل ۴-۱ افزایش نسبت ویسکوزیته جابه‌جایی نیوتنی: برای سه آزمایش عدد کپیلاری $Ca = 0/029$ می‌باشد.

الف- تزریق محلول ۱۰۲/۴ به محلول ۲۵۸/۲ - $M' = ۲/۵۱$ - $Q = ۵ \text{ ml/min}$ - $Bl = 1/15 \times 10^{-2}$

ب- تزریق محلول ۱۰۷/۶ به محلول ۴۸۸ - $M' = ۴/۵۶$ - $Q = ۵ \text{ ml/min}$ - $Bl = 1/1 \times 10^{-2}$

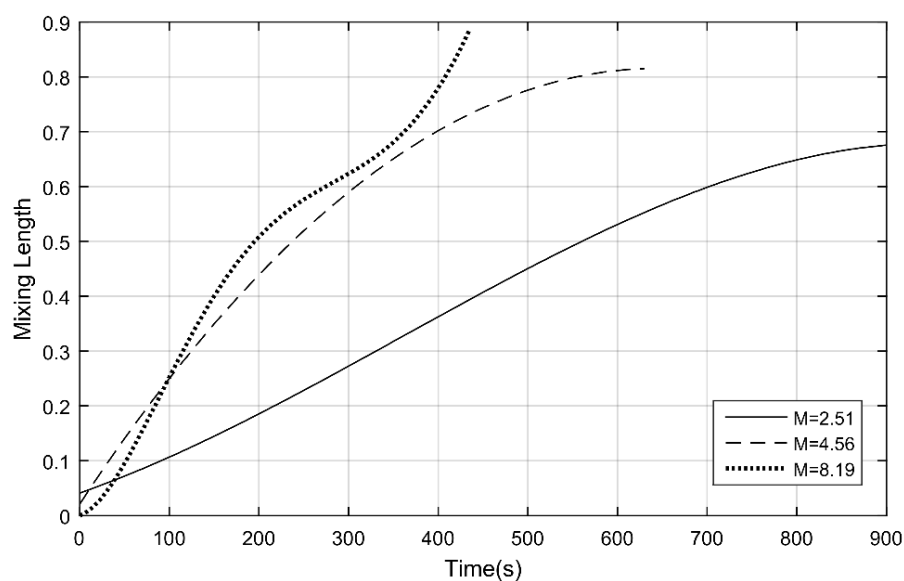
ج- تزریق محلول ۱۰۷/۶ به محلول ۸۵۷/۴، $M' = ۸/۱۹$ - $Q = ۵ \text{ ml/min}$ - $Bl = 1/1 \times 10^{-2}$

با توجه به این که جابه‌جایی مخلوط‌نشده‌ی بررسی می‌شود، انتظار این بود که جبهه‌ی حرکت سیال رنگی یا مرز مشترک بین دو سیال از هم‌دیگر کاملاً متمایز باشد. یکی از عواملی که در آزمایش‌های این کار سبب شد مرز حرکت سیال رنگی، کاملاً متمایز نباشد را می‌توان در کشش سطحی و جنس محیط متخلخل مورد استفاده در مطالعه اخیر جستجو نمود. همان‌طور که در فصول قبل ذکر گردید، ستاپ مورد استفاده در این مطالعه، دو صفحه موازی هم هستند که دانه‌های شیشه با قطر کم داخل آن‌را پر

کرده اند. وقتی سیال تزریق می‌شود در مرز مشترک دو سیال نیروی کپیلاری بوجود می‌آید تا از امتزاج دو سیال جلوگیری کند. میزان این نیرو تا اندازه‌ای به کشش سطحی بین دو سیال نیز بستگی دارد. به همین دلیل چون دو سیال قادر به حل شدن در یکدیگر نیستند و همچنین نیروی کپیلاری نیز به اندازه کافی زیاد نمی‌باشد که مرز دوسیال متمایز حرکت کند، لذا سیال تزریقی به‌صورت رگه‌هایی جذب خلل و فرج‌های محیط متخلخل می‌شوند و همین امر سبب بوجود آمدن انگشتی‌های بسیار ریز می‌شود.

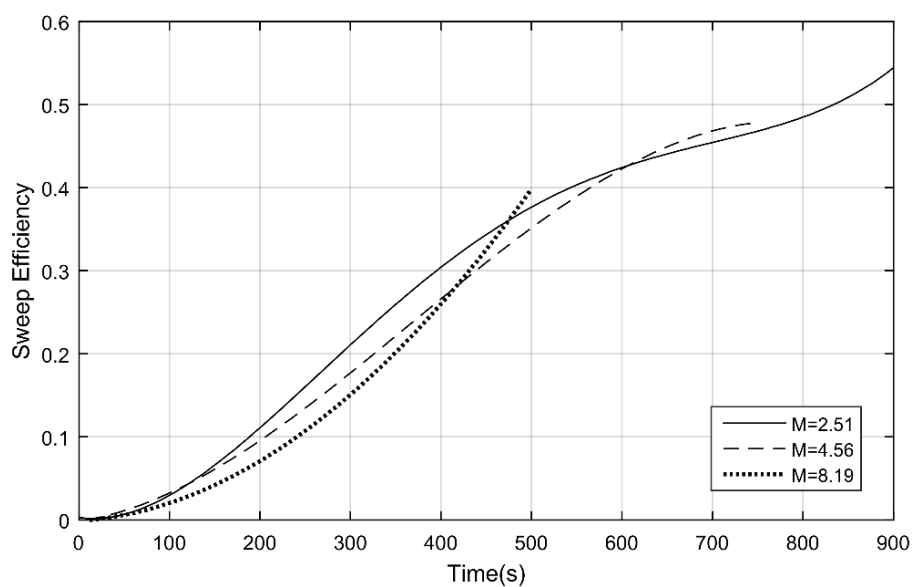
در آزمایش اول به دلیل کم بودن اختلاف ویسکوزیته، جبهه‌ی سیال تزریقی تقریباً به‌صورت یکنواخت حرکت می‌کند. در این آزمایش شاهد این هستیم که تعداد انگشتی‌های ریز با گذشت زمان و پیش‌روی بیش‌تر سیال جابه‌جا کننده، افزایش می‌یابد. ما در این آزمایش این انگشتی‌های ریز را ملاک محاسبه طول اختلاط در نظر گرفته‌ایم، به این معنی که آزمایش تا رسیدن اولین انگشتی ریز به انتهای سلول ادامه می‌یابد.

در آزمایش دوم مقدار اختلاف ویسکوزیته افزایش یافته است. در این حالت ابتدا دو انگشتی شکل گرفتند. با گذشت زمان این انگشتی‌های پهن، راه خود را از میان انگشتی‌های ریز باز می‌کنند و به حرکت ادامه می‌دهند. در آزمایش سوم ملاحظه می‌شود که به دلیل زیاد بودن اختلاف ویسکوزیته نسبت به آزمایش اول و دوم، یک انگشتی بزرگ در ابتدا شکل می‌گیرد. جبهه‌ی سیال، حالت حرکت یکنواختی خود را از دست داده و انگشتی بزرگ ابتدایی با یک انگشتی کوچک‌تر هم‌جوار خود یکی می‌شوند و مسیر خود را ادامه می‌هند تا به انتهای سلول برسند. حضور و نحوه‌ی گسترش انگشتی‌های ریز، همانند آزمایش اول و دوم می‌باشد.



شکل ۴-۲ طول اختلاط برای نسبت ویسکوزیته‌های مختلف، $Q=5\text{ml/min}$.

همانطور که انتظار می‌رفت، افزایش نسبت ویسکوزیته سبب شده است تا طول انگشتی‌ها بزرگ‌تر شده و زودتر به انتهای سلول برسد.



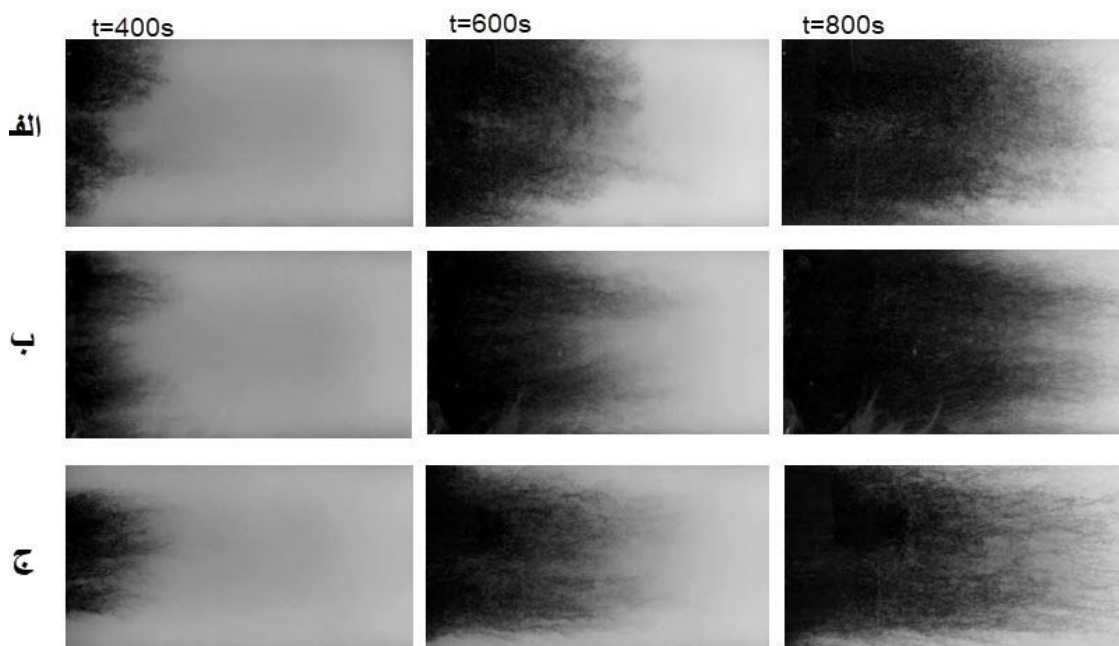
شکل ۴-۳ بازده جاروبی برای نرخ ویسکوزیته‌های مختلف، $Q=5\text{ml/min}$.

با توجه به نمودار بازده جاروبی مشاهده می‌شود که میزان بازده هرکدام از نسبت ویسکوزیته‌ها نزدیک هم می‌باشد. علت این امر را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که در نسبت ویسکوزیته‌های بالاتر هر

چند طول انگشتی بزرگتر ولی در واقع یک انگشتی بزرگ وجود دارد که به حرکت خود ادامه می‌دهد. همین انگشتی بزرگ این امکان را دارد که بتواند مقدار سیال بیشتری را جاروب کند.

۴-۲-۲ اثر افزایش عدد بی بعد بلیک

در آزمایش‌های زیر شاهد افزایش عدد بلیک هستیم. موردی که در اینجا شاهد آن هستیم این است که با افزایش عدد بلیک تمایل سیال جابه‌جا کننده به کانالیزه شدن در حال افزایش است. در بلیک پایین به دلیل کم‌تر بودن اثرات سرعت تمایل انگشتی شکل گرفته برای پخش شدن، بیش‌تر است. در حالیکه در بلیک‌های بالاتر شاهد این هستیم که به دلیل افزایش سرعت حرکت سیال جابه‌جا کننده، کانال‌هایی تشکیل می‌شود و سیال راه خود را از میان آن کانال یا کانال‌ها ادامه می‌دهد.

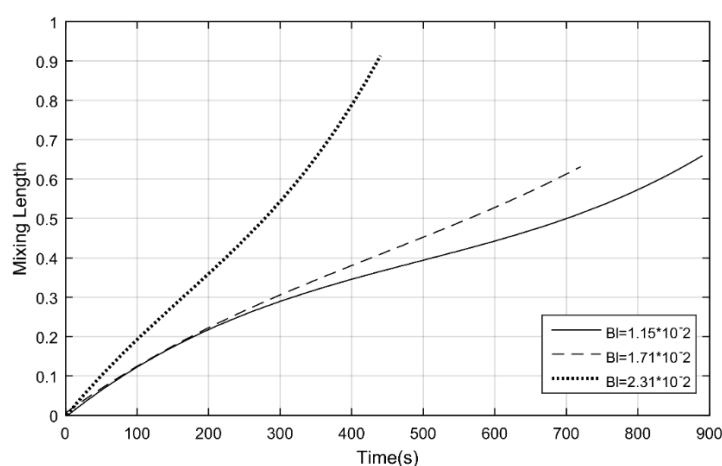


شکل ۴-۴ تزریق محلول ۱۰۲/۴ به محلول ۸۳۸/۵ - ۸/۱۹ - $M' = 0.42$ - $Ca =$

الف - $Bl = 1/15 \times 10^{-2}$. ب - $Bl = 1/71 \times 10^{-2}$. ج - $Bl = 2/31 \times 10^{-2}$

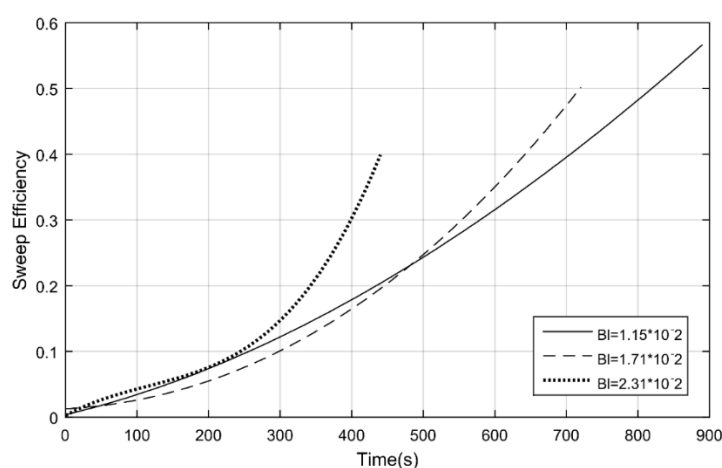
همانطور که در شکل ۴-۵ ملاحظه می‌شود، افزایش بلیک سبب افزایش طول اختلاط شده است. دلیل این امر را نیز می‌توان در تمایل کانالیزه شدن سیال جابه‌جا کننده در بلیک‌های بالاتر جستجو

نمود.



شکل ۴-۵ طول اختلاط برای بلیک‌های مختلف، $M^* = 2/56$

در مورد بازده جاروبی نیز می‌توان به این موضوع اشاره کرد که افزایش بلیک، بزرگتر شدن طول انگشتی و کانالیزه شدن جریان سیال را به دنبال دارد. این امر سبب می‌شود جریان سیال از یک کانال تشکیل شده به مسیر خود ادامه دهد و نتواند کل سیال در سلول را جاروب کند. به همین دلیل با افزایش عدد بلیک از مقدار بازده جاروبی کاسته شده است.



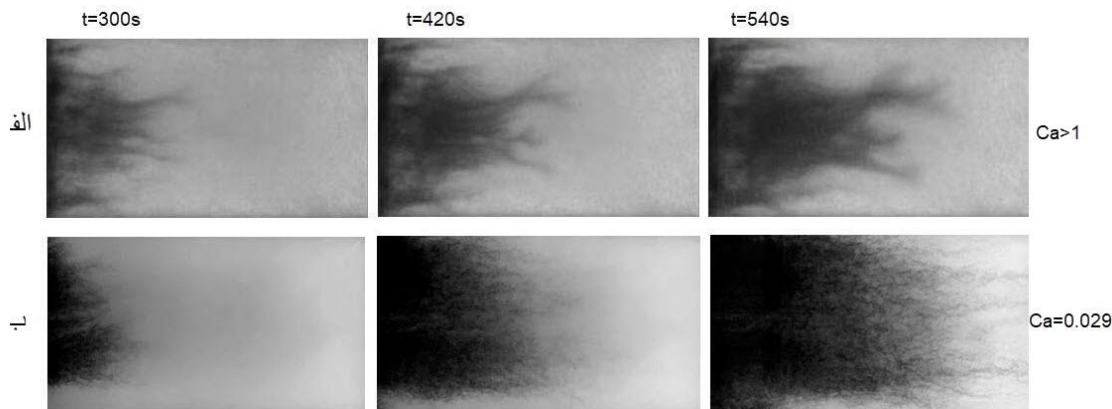
شکل ۴-۶ بازه جاروبی بلیک‌های مختلف، $M^* = 2/56$

۳-۲-۴ مقایسه بین حالت مخلوط شدنی و مخلوط‌نشدنی

از آن‌جا که هدف اصلی این مطالعه بررسی اثرات مخلوط‌نشدنی می‌باشد، نمونه‌ای از آزمایش این مطالعه

را با بررسی کار آزمایشگاهی خطیبی [۵۴] که یک مطالعه مخلوط‌شدنی است را مقایسه می‌کنیم.

شکل ۷-۴ ماهیت دو حالت مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشدنی را برای وقتی که دو سیال در تماس با هم نیوتنی باشند را به خوبی نمایش می‌دهد.



شکل ۷-۴ مقایسه‌ی جابه‌جایی نیوتنی (الف) حالت مخلوط‌شدنی [۵۴]: $M^* = 8/19$ - $Q = 5 \text{ ml/min}$ - $Bl = 1/73 \times 10^{-2}$

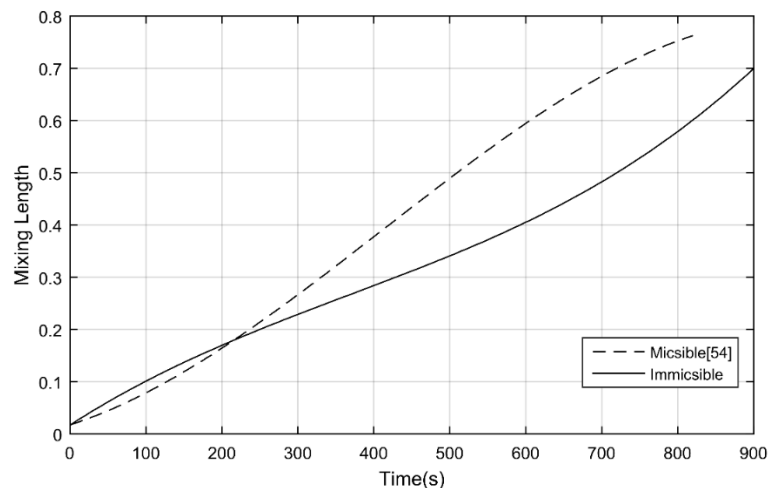
(ب) مخلوط‌نشدنی (مطالعه حاضر): تزریق محلول ۱۱۲ به محلول ۹۱۸ - $M^* = 8/19$ - $Q = 5 \text{ ml/min}$ - $Bl = 1/01 \times 10^{-2}$

$$Bl = 1/01 \times 10^{-2} -$$

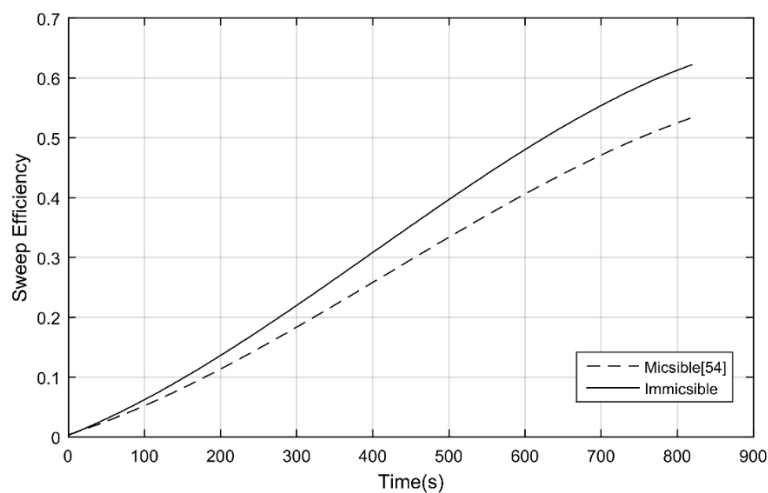
در دو آزمایش اخیر، ویسکوزیته سیال بستر حدود ۸ برابر ویسکوزیته سیال تزریقی می‌باشد. در حالت مخلوط‌شدنی، به دلیل اینکه کشش سطحی بین دو سیال بسیار کم است، عدد کپیلاری مقدار بزرگتر از یک را به خود اختصاص می‌دهد ($Ca > 1$) و امکان حل شدن دو سیال در مرز مشترک دو سیال وجود دارد. این در حالی است که برای جابه‌جایی دوم که یک جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی است (مطالعه حاضر)، بدلیل ماهیت دو سیال و وجود کشش سطحی بین آنها، امکان امتزاج دو سیال وجود ندارد و سیال جابه‌جا کننده به صورت کانال‌های بسیار ریز راه خود را از میان خلل و فرج‌های محیط متخلخل موجود باز کرده و به حرکت ادامه می‌دهد.

شکل ۸-۴ نمودار طول اختلاط بر حسب زمان برای یک جابه‌جایی نیوتنی در دو حالت مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشدنی را نشان می‌دهد. با توجه نمودار طول اختلاط دلیل بزرگتر بودن طول انگشتی‌ها در

حالت مخلوط شدنی را می‌توان در تمایل به کانالیزه شدن بیشتر جستجو نمود. در حالت مخلوط نشدنی به دلیل وجود تعداد زیاد انگشتی‌های ریز پخش شدگی بیشتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۴-۸ طول اختلاط برای جابه‌جایی مخلوط‌شدنی [54] و مخلوط‌نشدنی (مطالعه حاضر) - $Q = 5 \text{ ml/min}$ - $M' = 8/19$



شکل ۴-۹ بازده جاروبی برای جابه‌جایی مخلوط‌شدنی [51] و مخلوط‌نشدنی (مطالعه حاضر) - $M' = 8/19$

با توجه به شکل ۴-۹ و همان‌طور که در شکل ۴-۷ مشخص می‌باشد، میزان جاروب شدن سیال بستر در حالت مخلوط‌نشدنی بیشتر شده است.

۴-۳ آزمایش‌های مربوط به سیالات غیر نیوتنی

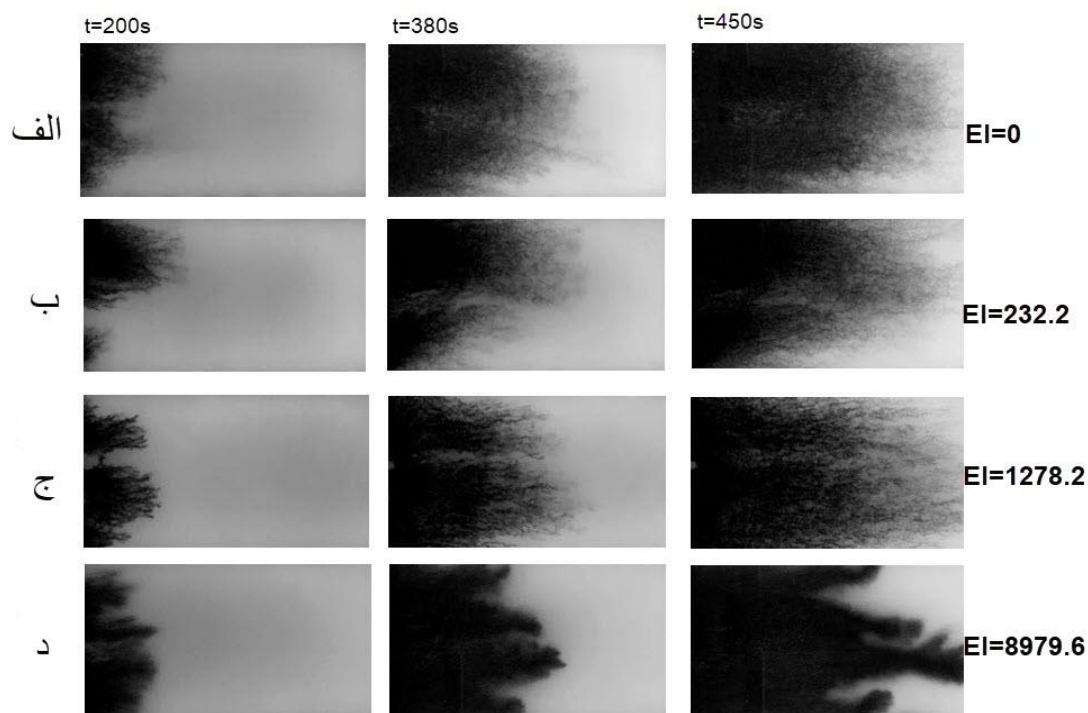
۱-۳-۴ اثر افزایش الاستیسته

یکی از اهداف مطالعه حاضر بررسی اثرات الاستیک سیال جابه‌جاکننده بر جابه‌جایی مخلوط‌شدنی می‌باشد. به این منظور سیالات پلیمری با غلظت‌های متفاوت از پودر پلی‌آکریلامید در آزمایشات مختلف مورد استفاده قرار گرفت. یکی از مواردی که در آزمایش سیالات پلیمری مورد استفاده در این آزمایش بسیار حائز اهمیت است، نحوه‌ی ساخت صحیح و با دقت سیال پلیمری است که در فصل دوم به آن اشاره گردید. در صورت عدم دقت در مراحل ساخت و همگن نبودن، سیال پلیمری ساخته شده فاقد خواص مورد نظر است.

شکل ۴-۱۰ تزریق سیالات پلیمری با غلظت‌های مختلف پلیمر به داخل سیال بستر (روغن سیلیکون) را نشان می‌دهد. در این تصویر به خوبی می‌توان اثر افزایش مقدار الاستیسیته‌ی محلول که ناشی از افزایش پلیمر است را مشاهده نمود. آزمایش ۱ سیال نیوتنی می‌باشد و همانطور که در قسمت آزمایش‌های نیوتنی بیان گردید، انگشتی‌های ریزی تشکیل شده و توده‌ی سیال جابه‌جاکننده از طریق این انگشتی‌های ریز راه خود را باز می‌کنند. در این نوع جابه‌جایی حجم زیادی از سیال جاروب نشده لابه‌لای انگشتی‌های ریز باقی می‌ماند.

آزمایش‌های ۲، ۳ و ۴ حاوی ذرات پلیمر محلول در سیال جابه‌جاکننده می‌باشند. همانطور که ملاحظه می‌شود، افزایش درصد پلیمر در محلول یک نتیجه‌ی قطعی دارد و آن کاهش انگشتی‌های ریز و یکنواخت‌تر شدن جبهه‌ی حرکت سیال است. این به معنی جاروب شدن بهتر سیال بستر می‌باشد. بهبود در جاروب شدن سیال بستر در غلظت‌های بالاتر پلیمر بیشتر به چشم می‌آید.

در آزمایش چهارم یکنواختی جبهه‌ی حرکت به اوج خود رسیده است، جاییکه در آن نمونه پلیمری 400 ppm به سیال بستر تزریق شده است.



شکل ۴-۱۰ اثر افزایش الاستیسیته بر جابه‌جایی مخلوط نشدنی: (الف) تزریق محلول ۱۰۲/۴ به محلول ۸۳۸/۵ -

(ب) تزریق پلیمر ۵۰ ppm به محلول ۷۵۷/۵ - $M^* = ۸/۱۹$ - $Ca = ۰/۰۴۲$ (ج)

تزریق پلیمر ۲۰۰ ppm به محلول ۸۵۷/۴ - $M^* = ۸/۱۹$ - $Ca = ۰/۰۴۳$ (د) تزریق پلیمر ۴۰۰ ppm به محلول

$$Ca = ۰/۰۴۵ - M^* = ۸/۱۹ - ۸۵۷/۴$$

آزمایش (الف) جابه‌جایی نیوتنی-نیوتنی می‌باشد و همانطور که در قسمت آزمایش‌های نیوتنی بیان گردید، انگشتی‌های ریزی تشکیل شده و توده‌ی سیال جابه‌جا کننده از طریق این انگشتی‌های ریز راه خود را باز می‌کنند. در این نوع جابه‌جایی حجم زیادی از سیال جاروب نشده لابه‌لای انگشتی‌های ریز باقی می‌ماند.

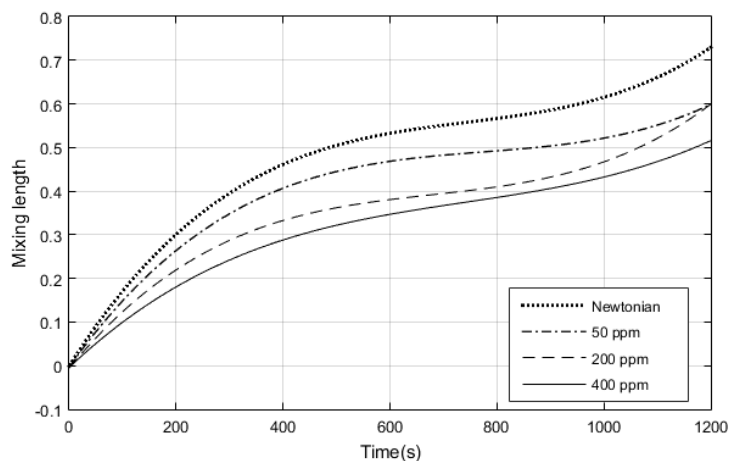
در آزمایش‌های (ب)، (ج) و (د) با جابه‌جایی غیرنیوتنی-نیوتنی مواجه هستیم که در آن‌ها سیال جابه‌جا کننده، حاوی ذرات پلیمری (پلی‌آکریلامید) می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، افزایش درصد پلیمر و به دنبال آن افزایش الاستیسیته سیال، یک نتیجه‌ی قطعی دارد و آن کاهش انگشتی‌های

ریز و یکنواخت تر شدن جبهه‌ی حرکت سیال است. این به معنی جاروب شدن بهتر سیال بستر می‌باشد. بهبود در جاروب شدن سیال بستر در غلظت‌های بالاتر پلیمر بیشتر به چشم می‌آید. در آزمایش چهارم یکنواختی جبهه‌ی حرکت به اوج خود رسیده است، جاییکه در آن نمونه پلیمری 400 ppm به سیال بستر تزریق شده است.

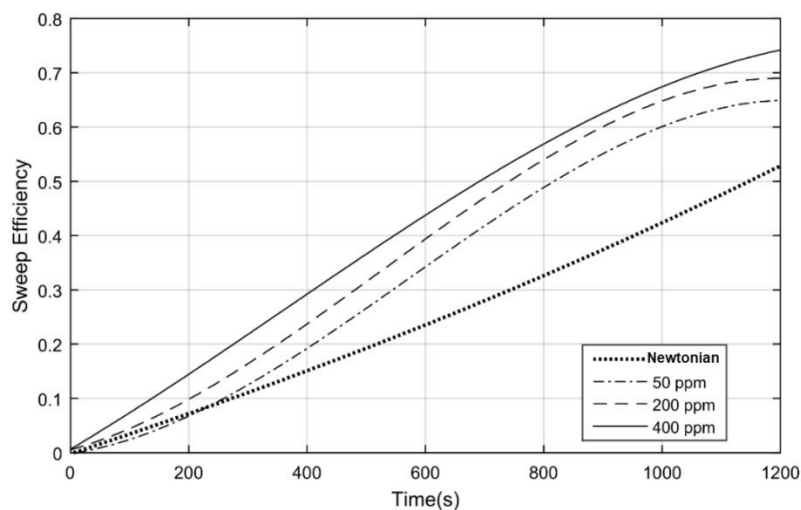
دلیل این تغییر رفتار بین آزمایش‌های شکل ۴-۱۰ را می‌توان در رفتار ویسکوالاستیک نمونه پلیمری جست و جو کرد. پلیمرها خواص ویسکوالاستیک دارند و تنش نرمال یکی از خواص سیالات ویسکوالاستیک می‌باشد لذا در مطالعه حاضر یک تنش نرمال بین نمونه پلیمری و سیال بستر (روغن سیلیکون) اتفاق می‌افتد. این تنش نرمال یک نیروی فشاری را روی قطرات یا فیلمی از سیال بستر اعمال می‌کند. در نهایت این نیرو سبب رانده شدن سیال بستر باقی‌مانده، از خلل و فرج محیط متخلخل می‌شود. طبیعی است که هرچقدر درصد پلیمر در محلول بیشتر باشد، خاصیت الاستیسیته سیال افزایش می‌یابد و میزان تنش نرمال و در نهایت نیروی اعمالی به سیال بستر بیشتر می‌شود که افزایش جاروب شدن سیال بستر را به دنبال خواهد داشت. این مورد را در تصویر آزمایش‌ها به خوبی مشخص است. به طور مثال در پلیمر ۵۰ ppm به دلیل غلظت پایین پلیمر، تفاوت کمی را در الگوی پیشرفت انگشتی‌ها در مقایسه با سیال نیوتنی می‌بینیم. ولی افزایش درصد پلیمر به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود در جاروب شدن سیال بستر را نشان می‌دهد.

سوربی [۴۶]، شنگ [۴۷] و ونگ [۴۸] نیز دلایل بهبود جابجایی در هنگام پلیمرزنی را بررسی نمودند. آن‌ها هم بهبود رفتار سیال در جابجایی را به خواص ویسکوالاستیک محلول پلیمری نظیر تنش نرمال مربوط دانستند.

با توجه به شکل ۴-۱۱ طول اختلاط سیال پلیمری ۴۰۰ کم‌تر از بقیه است. همچنین شکل ۴-۱۲ نشان می‌دهد که به دلیل بهبود جاروب شدن سیال پلیمری با افزودن بیشتر پلیمر بازده جاروبی برای سیالات با غلظت بیشتر پلیمر بیشتر می‌باشد.



شکل ۴-۱۱ طول اختلاط برای جابه‌جایی روغن سیلیکون توسط سیالات با درصد جرمی مختلف از پلی‌آکریلامید



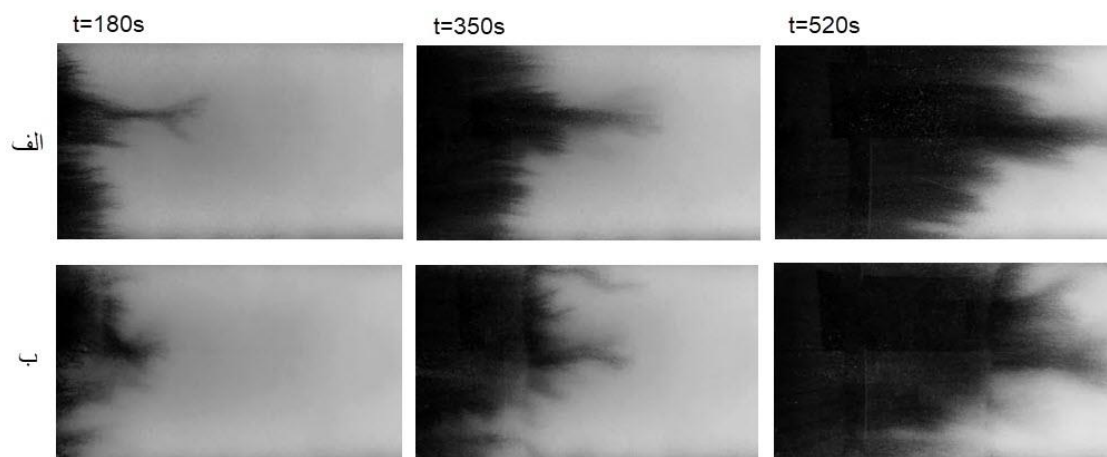
شکل ۴-۱۲ بازده جاروبی برای جابه‌جایی روغن سیلیکون توسط سیالات با درصد جرمی مختلف از پلی‌آکریلامید

با توجه به آزمایش اخیر الگوی حرکت سیال جابه‌جا کننده برای پلیمر ۴۰۰ متمایزتر و بهتر از الگوی جابه‌جایی پلیمرهای ۵۰ و ۲۰۰ می‌باشد. لذا به منظور نمایش بهتر اثر پلیمرزنی، در ادامه بررسی‌های سیالات غیرنیوتنی، از سیال با غلظت پلیمری ۴۰۰ ppm در آزمایش‌های استفاده شده است.

۲-۳-۴ افزایش نسبت ویسکوزیته

شکل ۴-۱۳ جابه‌جایی غیر نیوتنی را زمانی که دبی تزریق ۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه است را نشان می‌دهد. در این آزمایش به دلیل افزایش ویسکوزیته، انگشتی‌های شکل گرفته از حالت یکنواخت تر

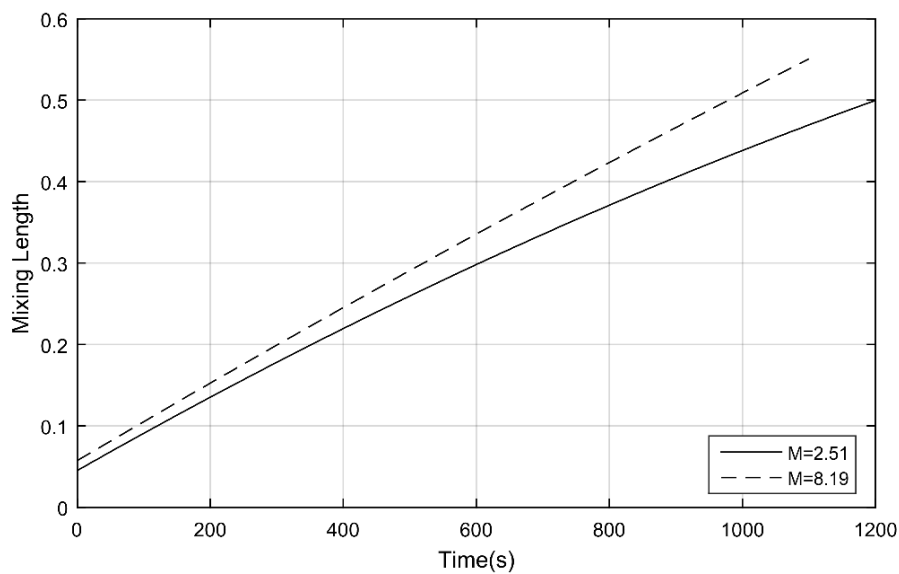
در قسمت (الف) به پراکندگی بیشتر در قسمت (ب) تمایل پیدا می کنند. همچنین برای آزمایش (الف) مشاهده می گردد که انگشتی های شکل گرفته به صورت طولی در مسیر مستقیم الخط به حرکت ادامه می دهند در حالی که برای آزمایش (ب) پراکندگی انگشتی ها سبب شده انگشتی ها در بعضی قسمت ها حرکت عرضی نیز داشته باشند.



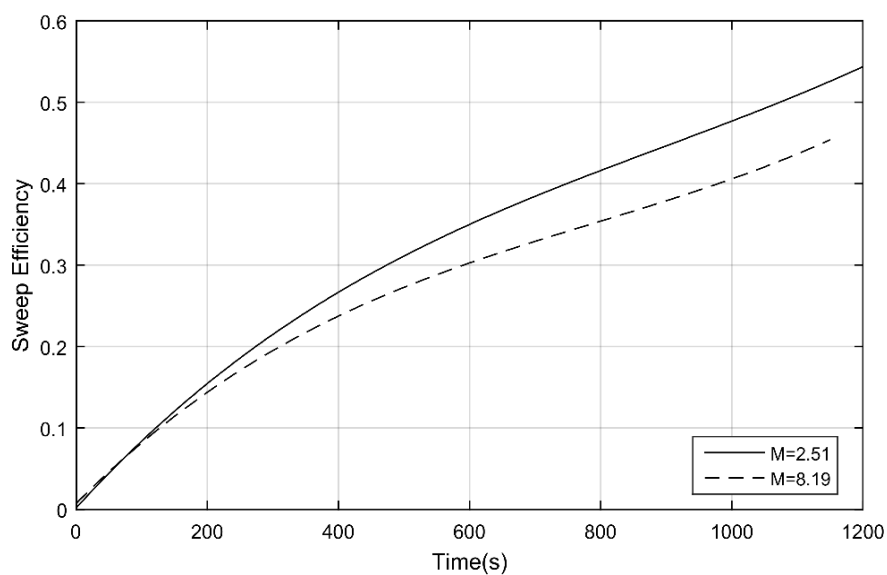
شکل ۴-۱۳ افزایش نسبت ویسکوزیته ها برای جابه جایی غیر نیوتنی:

الف- تزریق پلیمر ۴۰۰ ppm با ویسکوزیته ۱۰۲/۴ به محلول ۲۵۸/۲، $M' = ۲/۵۱$ ، $Q = 10 \text{ ml/min}$.

ب- تزریق پلیمر ۴۰۰ ppm با ویسکوزیته ۱۰۲/۴ به محلول ۸۵۰/۴، $M' = ۸/۱۹$ ، $Q = 10 \text{ ml/min}$.



شکل ۴-۱۴ طول اختلاط برای جابه‌جایی روغن سیلیکون توسط پلیمر ۴۰۰ با نسبت ویسکوزیته‌های مختلف

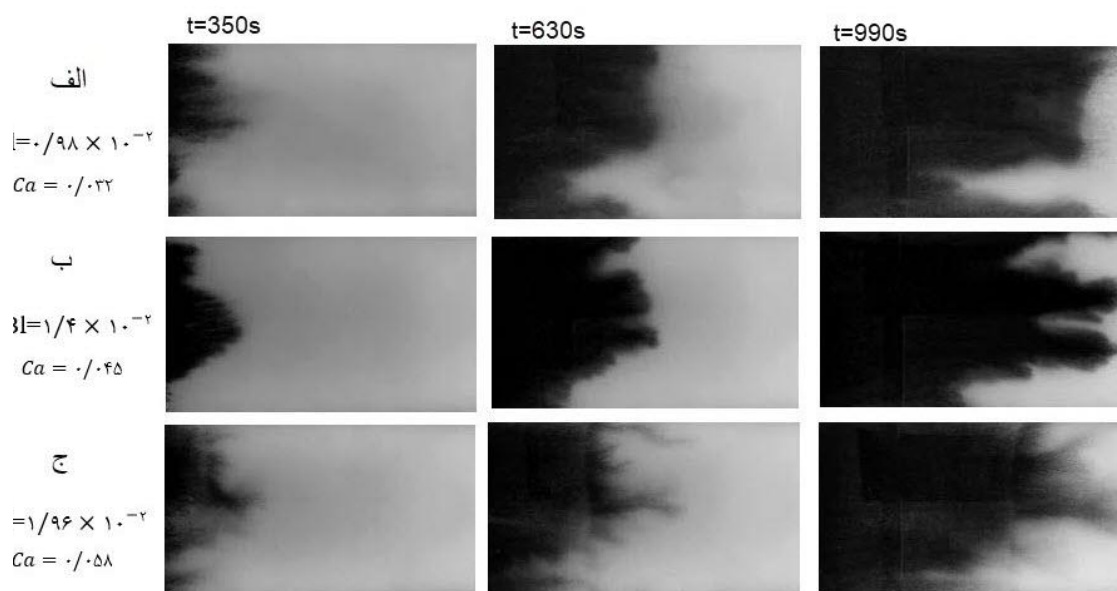


شکل ۴-۱۵ بازده جاروبی برای جابه‌جایی روغن سیلیکون توسط پلیمر ۴۰۰ با نسبت ویسکوزیته‌های مختلف

ملاحظه می‌شود، طول اختلاط افزایش یافته است. در مورد بازده جاروبی نیز در بیشتر زمان تست، در نسبت ویسکوزیته پایین تر، بازده بیشتر بوده است. و در نهایت بازده جاروبی در نسبت ویسکوزیته بالاتر بیشتر شده است.

۳-۳-۴ افزایش بلیک

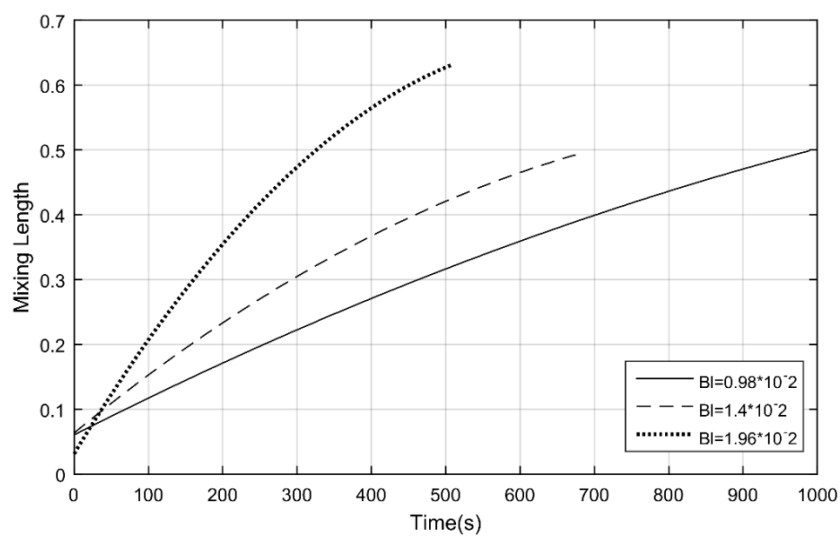
شکل ۴-۱۶ تزریق پلیمر ۴۰۰ داخل روغن سیلیکون با نسبت ویسکوزیته‌های ثابت را در بلیک‌های مختلف نشان می‌دهد. هرچند افزایش عدد بلیک، زیاده‌تر شدن مقدار عدد موینگی را نیز به دنبال دارد ولی به وضوح قابل مشاهده است که افزایش بلیک، پراکندگی بیشتر جبهه‌ی حرکت سیال و تیزتر شدن نوک انگشتی‌ها را به دنبال دارد. این امر به این معنی است که اثر عدد بلیک بر شکل‌گیری انگشتی‌ها در این آزمایش، بر اثر عدد موینگی قالب می‌باشد.



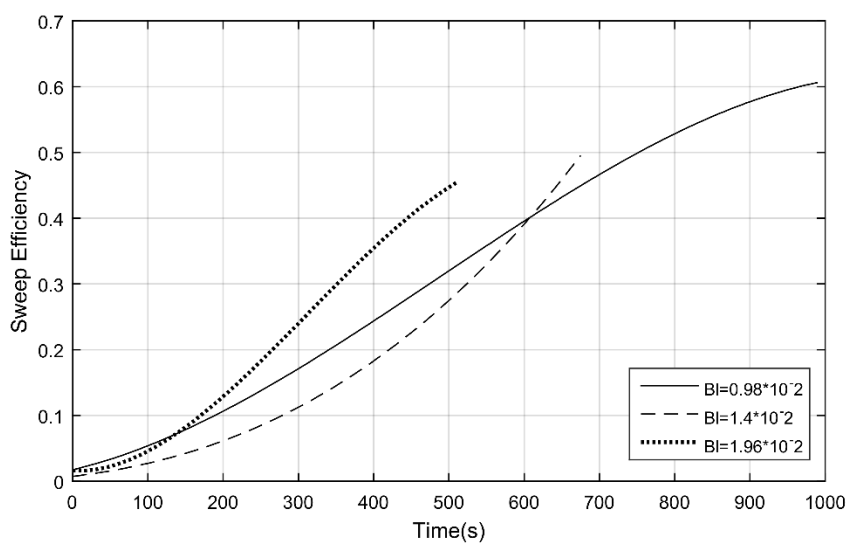
شکل ۴-۱۶ اثر افزایش عدد بلیک بر جابه‌جایی مخلوط‌نشده‌ی غیرنیوتنی: تزریق پلیمر ۴۰۰ ppm با ویسکوزیته

$$M' = 8/19, 850/4 \text{ به } 102/4$$

با توجه به شکل ۴-۱۷ پراکندگی بیشتر سبب شده که طول انگشتی‌ها افزایش یابد.



شکل ۴-۱۷ طول اختلاط برای جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی غیرنیوتنی در بلیک‌های مختلف

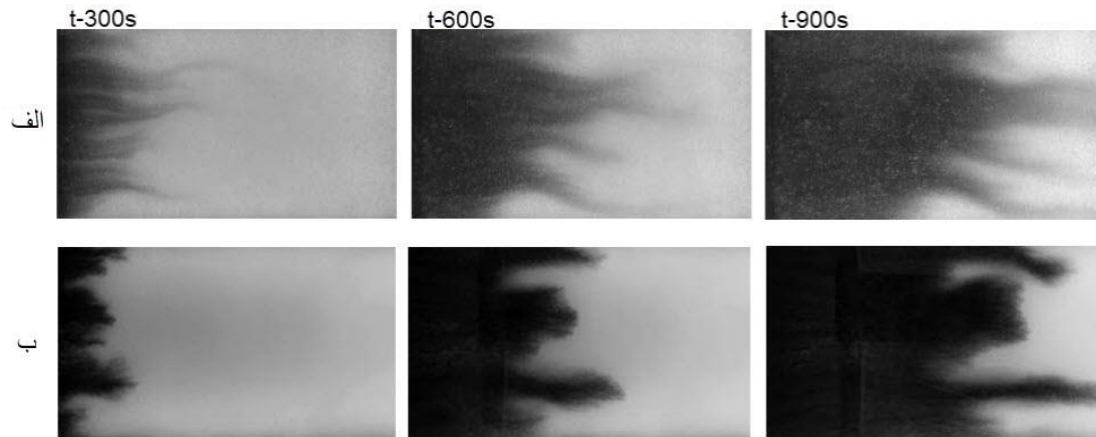


شکل ۴-۱۸ بازده جاروبی برای جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی غیرنیوتنی در بلیک‌های مختلف

همچنین با افزایش عدد بلیک از کیفیت جاروب شدن سیال بستر کاسته شده است. این مورد در شکل ۴-۱۸ مشخص می‌باشد.

۴-۳-۴ مقایسه جابه‌جایی غیرنیوتنی در حالت مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشدنی

شکل ۴-۱۹ یک جابه‌جایی غیر نیوتنی برای دو حالت مخلوط شدن [۵۴] و مخلوط نشدنی مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.

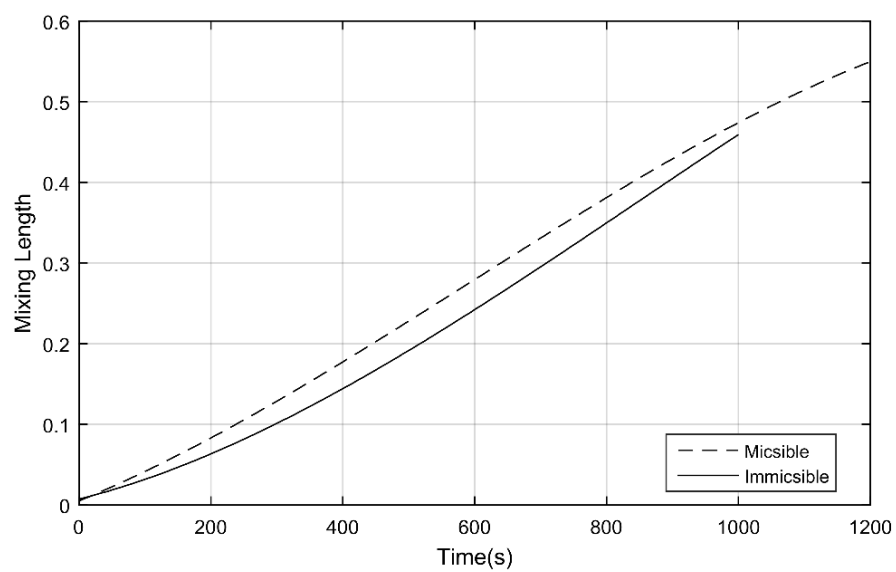


شکل ۴-۱۹ مقایسه‌ی جابه‌جایی نیوتنی (الف) حالت مخلوط‌شدنی [۵۴]: $M^* = 2/5$ - $Bl = 1/73 \times 10^{-2}$

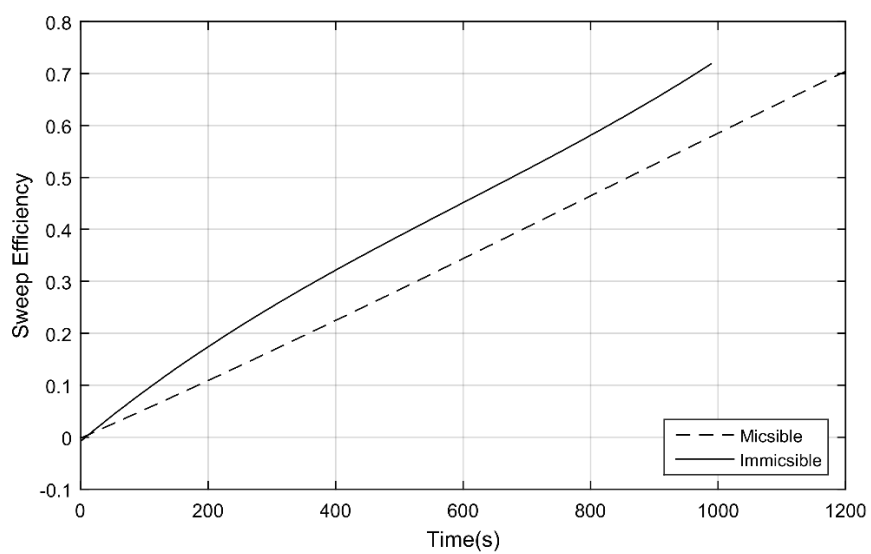
(ب) مخلوط‌نشدنی (مطالعه حاضر): تزریق محلول ۱۱۲ به محلول ۲۸۰ - $M^* = 8/19$ - $Bl = 1/4 \times 10^{-2}$

از آنجا که سیال تزریقی در دو آزمایش اخیر غیر نیوتنی هستند، ویژگی مشترک آن‌ها جابه‌جایی بهتر دو سیال در تماس با هم در مقایسه با جابه‌جایی نیوتنی می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، تعداد انگشتی‌ها در یک جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی به مراتب کم‌تر از جابه‌جایی مخلوط شدن می‌باشد. هرچند عرض و ضخامت انگشتی‌ها در حالت مخلوط‌نشدنی افزایش یافته است و شاهد انگشتی‌های پهن‌تری هستیم اما با توجه به شکل ۴-۲۰ طول اختلاط در طول انجام تست در دو حالت تقریباً یکسان می‌باشد.

اما پهن‌تر بودن طول انگشتی‌ها سبب می‌شود مقدار سیال بستر جارو شده بیشتر از حالت مخلوط-شده باشد. این مورد را می‌توان در نمودار بازده جاروبی شکل ۴-۲۱ ملاحظه نمود.



شکل ۴-۲۰ طول اختلاط جابه‌جایی غیرنیوتنی برای حالت مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی



شکل ۴-۲۱ بازده جاروبی جابه‌جایی غیرنیوتنی برای حالت مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی

فصل ۵ نتیجه‌گیری

۱-۵ مقدمه

در مطالعه‌ی پیش‌رو، ناپایداری انگشتی در حالتی که دو سیال در تماس با هم مخلوط‌نشده‌ی باشند، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. ذکر این نکته ضروری است که هرچند بررسی یک جابه‌جایی مخلوط‌نشده‌ی موضوع مطالعات زیادی چه به صورت آزمایشگاهی و یا عددی قرار گرفته است ولی اکثر آن‌ها اولاً سیالات نیوتنی را مورد بررسی قرار داده‌اند و ثانياً از یک سلول هل-شاو استفاده کرده‌اند. در مطالعه پیش‌رو به منظور نزدیک کردن شرایط آزمایش‌ها به شرایط واقعی یک میدان نفتی به منظور استخراج نفت، از سلولی استفاده شد که داخل آن از دانه‌های شیشه اشباع شده است. بدین ترتیب شرایط محیط آزمایش‌های این مطالعه (نفوذپذیری و تخلخل)، به شرایط یک میدان نفتی واقعی بسیار نزدیک‌تر از یک سلول هل-شاو می‌باشد. همچنین با استفاده از روش اضافه کردن پلیمر (پلیمرزنی) به محلول نیوتنی با غلظت‌های متفاوت، اثر الاستیسیته را بر جابه‌جایی غیرنیوتنی را بررسی نمودیم.

در این آزمایش‌ها اثر افزایش نسبت ویسکوزیته‌ها (M^*)، اثر افزایش عدد بلیک، اثر افزایش الاستیسیته و مقایسه‌ی دو حالت مخلوط‌شدنی و مخلوط‌نشده‌ی را در قالب نمودارهای طول اختلاط و بازده جارویی مورد بررسی قرار دادیم.

۲-۵ نتیجه‌گیری

۱-۲-۵ اثر افزایش الاستیسیته

در یک جابه‌جایی نیوتنی مخلوط‌نشده‌ی شاهد شکل‌گیری الگوهای انگشتی بسیار ریز بودیم. در آزمایش‌های مطالعه اخیر، هرکدام از این انگشتی‌های ریز را یک انگشتی مستقل در نظر گرفتیم. لذا هر تست تا رسیدن اولین انگشتی به انتهای سلول ادامه یافت. از مقایسه محلول‌های پلیمری که در سه غلظت متفاوت تهیه شدند، مشاهده گردید هرچه غلظت پلیمر در سیال جابه‌جاکننده بیشتر

می‌شد، ضخامت انگشتی‌های ریز افزایش می‌یافت. دلیل این امر را می‌توان در پلیمر افزوده شده جستجو نمود. افزایش در صد پلیمر، افزایش خواص الاستیسیته سیال جابه‌جاکننده را دنبال دارد. تنش نرمال یکی از خواص الاستیک پلیمر می‌باشد. لذا هرچه درصد پلیمر محلول بیشتر شود، سبب افزایش تنش نرمال خواهد شد که این امر نیروی مورد نیاز جاروب کردن سیال بستر را زیاده‌تر می‌کند. به‌طور کلی در آزمایش‌های مطالعه اخیر، افزایش الاستیسیته سبب کاهش نسبی طول اختلاط، تعداد انگشتی‌ها و افزایش بازده جاروبی را به دنبال دارد. همچنین مشاهده گردید که اثر افزودن پلیمر به‌منظور جاروب کردن بهتر سیال بستر، برای غلظت‌های بالاتر پلیمر، بسیار بیشتر می‌باشد.

۲-۲-۵ اثر افزایش نسبت ویسکوزیته‌ها (M')

در آزمایش‌های انجام گرفته در مطالعه حاضر، افزایش نسبت ویسکوزیته‌ها، چه در جابه‌جایی نیوتنی و چه در جابه‌جایی غیر نیوتنی، به‌طور کلی یک نتیجه یکسان به دنبال داشت و آن افزایش طول انگشتی‌ها و همچنین کاهش مقدار سیال بستر جاروب شده بود. در حالت تزریق نیوتنی-نیوتنی، با افزایش نسبت ویسکوزیته، علاوه بر شکل‌گیری انگشتی‌های ریز، جبهه‌ی حرکت سیال از حالت یکنواخت خارج شده و به‌صورت یک یا چند انگشتی بزرگ‌تر به حرکت خود ادامه می‌داد. برای یک تزریق غیرنیوتنی-نیوتنی نیز افزایش ویسکوزیته سبب می‌شود انگشتی‌های شکل گرفته پراکندگی بیشتر داشته باشند و علاوه بر حرکت طولی حرکت عرضی در محیط ستاپ نیز داشته باشند. لذا مشابه حالت نیوتنی برای یک جابه‌جایی غیرنیوتنی مخلوط‌نشده، افزایش نسبت ویسکوزیته سبب افزایش طول انگشتی و کاهش بازده جاروبی خواهد شد.

۳-۲-۵ اثر افزایش عدد بی بعد بلیک

افزایش عدد بلیک که به معنای افزایش نیروهای اینرسی سیال جابه‌جاکننده می‌باشد، پراکندگی و واگرایی بیشتر انگشتی‌ها در طول حرکت را به دنبال دارد. در جابه‌جایی نیوتنی در بلیک‌های پایین جبهه‌ی حرکت سیال یکنواخت‌تر از جابه‌جایی در بلیک‌های بالاتر می‌باشد. با افزایش عدد بلیک تعداد انگشتی‌های شکل گرفته در ابتدای مسیر حرکت افزایش می‌یابد. ولی در ادامه مسیر بیشتر انگشتی‌های شکل گرفته با یکدیگر ادغام می‌شوند و در نهایت توده‌ی حرکت سیال در دو الی سه انگشتی بزرگ به میر خود ادامه می‌دهند تا به انتهای سلول برسند. در جابه‌جایی غیرنیوتنی نیز پراکندگی بیشتر در بلیک‌های بالاتر را شاهد هستیم با این تفاوت که در مقایسه با جابه‌جایی نیوتنی، با افزایش عدد بلیک یا به عبارتی افزایش نیروهای اینرسی، انگشتی‌ها از ضخامت بیشتر در بلیک‌های پایین به انگشتی‌هایی با ضخامت کمتر و نوک تیزتر در بلیک‌های بالا تغییر ماهیت می‌دهند. همچنین در دو حالت جابه‌جایی نیوتنی-نیوتنی و غیرنیوتنی-نیوتنی، با افزایش عدد بی بعد بلیک سبب افزایش طول اختلاط و کاهش بازده جاروبی خواهد شد.

۳-۲-۵ مقایسه جابه‌جایی مخلوط‌شدنی [۵۴] و مخلوط‌نشدنی مطالعه حاضر

به‌طور کلی در جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی مطالعه حاضر نسبت به جابه‌جایی مخلوط‌شدنی، از تعداد انگشتی‌ها کاسته شده و از طرفی ضخامت انگشتی‌ها کمتر شده است. این امر سبب شده که جاروب شدن سیال بستر بیشتر باشد. هرچند بهبود جاروب شدن در حالت جابه‌جایی غیرنیوتنی به مراتب افزایش یافته است. با توجه به مراتب اخیر در جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی، طول اختلاط کاهش و بازده جاروبی افزایش یافته است.

۳-۵ پیشنهادها

در حین انجام آزمایش‌ها، چالش‌ها و سوال‌هایی بوجود می‌آمد که پیگیری و بررسی هر کدام از آن‌ها نیازمند زمان کافی می‌باشد. گزیده‌ای از این چالش‌ها که می‌توانند به تنهایی موضوع پایان نامه یا مقالات باشند به عنوان پیشنهاد در ادامه آورده شده‌اند:

- ۱- بررسی اثر گرانش بر ناپایداری انگشتی مخلوط‌نشدنی مجموعه ستاپ مطالعه حاضر با تغییر زاویه ستاپ با افق، از صفر تا ۹۰ درجه
- ۲- ایجاد تغییر در پارامترهای عدد موینگی و نسبت ویکوزیته، به منظور مشاهده رفتار جابه‌جایی مخلوط‌نشدنی در رژیم‌های ویسکوز و کپیلاری و مقایسه‌ی آن‌ها
- ۳- تغییر تخلخل و نفوذپذیری ستاپ مطالعه حاضر از طریق تغییر قطر دانه‌های شیشه‌ای و مشاهده‌ی تغییرات ناپایداری
- ۴- اثر تغییرات کشش سطحی بر روی ناپایداری انگشتی مخلوط‌نشدنی از طریق افزودن سورفکتانت‌ها
- ۵- بررسی اثر دما بر روی پدیده‌ی ناپایداری انگشتی

مراجع

- [1] P. G. Saffman and G. Taylor, "The penetration of a fluid into a porous medium or Hele Shaw cell containing a more viscous liquid," in Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, pp. 312-329, 1958
- [2] R. Lenormand, E. Touboul, and C. Zarcone, "Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media," Journal of fluid mechanics, vol. 189, pp. 165-187, 1988.
- [3] Homsy, G.M. (1987) "Viscous Fingering in Porous Media" Annual Review of Fluid Mechanics.19(1),p,271-311.
- [4] Chuoke, R.L., P.v. Meurs, and C.v.d. Poel (1959) The Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-Liquid Displacements in Permeable Media
- [5] J. P. Heller, "Onset of Instability Patterns between Miscible Fluids in Porous Media," Journal of Applied Physics, vol. 37, pp. 1566-1579, 1966
- [6] R. L. Perrine, "The development of stability theory for miscible liquid-liquid displacement," Society of Petroleum Engineers Journal, vol. 1, pp. 17-25, 1961.
- [7] Wooding, R. (1962) "The stability of an interface between miscible fluids in a porous medium" Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP. 13, 3(p,255-266)
- [8] D. W. PEACEMAN and H. H. RACHFORD JR., "Numerical Calculation of Multidimensional Miscible Displacement," Society of Petroleum Engineers Journal, 1962
- [9] C. Tan and G. Homsy, "Stability of miscible displacements in porous media: Rectilinear flow," The Physics of fluids, vol. 29, pp. 3549-3556, 1986
- [10] C. Tan and G. Homsy, "Stability of miscible displacements in porous media: Radial source flow," The Physics of fluids, vol. 30, pp. 1239-1245, 1987
- [11] KOVAL, E.J. (1963) A Method for Predicting the Performance of Unstable Miscible Displacement in Heterogeneous Media
- [12] W. Zimmerman and G. Homsy, "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, vol. 4, pp. 2348-2359, 1992
- [13] ح. صالح آبادی، آ. قادری، م. نظری، م.ح. کیهانی "مدل سازی نفوذ سیال با نسبت چگالی بالا در بستر متخلخل لایه ای به کمک معادلات حالت با روش شبکه بولتزمن"، نشریه مهندسی مکانیک امیر کبیر vol. 48, pp. 55-66, 2016
- [14] M. Norouzi and M. Shoghi, "A numerical study on miscible viscous fingering instability in anisotropic porous media," Physics of Fluids, vol. 26, pp. 084-102,

2014

- [15] 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
- [16] 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
- [17] D. Bensimon, L. P. Kadanoff, S. Liang, B. I. Shraiman, and C. Tang, "Viscous flows in two dimensions," *Reviews of Modern Physics*, vol. 58, p. 977, 1986
- [18] E. Y. Hohlov, "Time-dependent free boundary problems: the explicit solution," *MIAN Preprint*, vol. 14, 1990
- [19] S. Tanveer, "Viscous displacement in a Hele-Shaw cell," in *Asymptotics Beyond all orders*, ed: Springer, pp. 131-153, 1991
- [20] S. Tanveer, "Surprises in viscous fingering," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 409, pp. 273-308, 2000
- [21] Y. Couder, "Growth patterns: from stable curved fronts to fractal structures," in *Chaos, order, and patterns*, ed: Springer, pp. 203-227, 1991
- [22] S. Howison, "Complex variable methods in Hele-Shaw moving boundary problems," *111 European Journal of Applied Mathematics*, vol. 3, pp. 209-224, 1992
- [23] م. نوروزی، ص. درانی "شبیه سازی غیر خطی ناپایداری انگشتی لزج حرارتی در محیط متخلخل ناهمسانگرد" *نشریه مهندسی مکانیک مدرس* vol. 48, pp. 55-66, 2018
- [24] M. Norouzi, A.A. Yazdi, A.K. Birjandi "A numerical study on Saffman-taylor instability of immiscible viscoelastic-Newtonian displacement in a hele-shaw cell" *Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics*. vol. 409, pp. 273-308, 2018
- [25] Slobod, R.L. and B.H. Caudle, *X-Ray Shadowgraph Studies of Areal Efficiencies*. 1952
- [26] Van Meurs, P., *The Use of Transparent Three-Dimensional Models for Studying the Mechanism of Flow Processes in Oil Reservoirs*. 1957
- [27] B. Habermann, "The Efficiency of Miscible Displacement as a function of Mobility Ratio," 1960
- [28] A. L. Benham and R. W. Olson, "A Model Study of Viscous Fingering," *Society of petroleum engineers journal*, vol. 3, pp. 138-144, 1963
- [29] D. Vlad and J. Maher, "Tip-splitting instabilities in the channel Saffman-Taylor flow of constant viscosity elastic fluids," *Physical Review E*, vol. 61, p. 5439, 2000.
- [30] A. Lindner, D. Bonn, E. C. Poiré, M. B. Amar, and J. Meunier, "Viscous fingering in non-Newtonian fluids," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 469, pp. 237-256, 2002
- [31] H. Zhao and J. Maher, "Associating-polymer effects in a Hele-Shaw cell," *Physical Review E*, vol. 47, p. 4278, 1993
- [32] R. L. Slobod and R. A. Thomas, "Effect of Transverse Diffusion on Fingering In

- Miscible-Phase Displacement," Society of petroleum engineers journal, vol. 3, pp.9-13, 1963
- [33] T. K. Perkins and O. C. Johnston, "A Study of Immiscible Fingering in Linear Models," Society of Petroleum Engineers Journal, vol. 9, pp.39-46, 1969
- [34] M. Z. Saghir, O. Chaalal, and M. R. Islam, "Numerical and experimental modeling of viscous fingering during liquid–liquid miscible displacement," Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 26, pp. 253-262, 2000
- [35] Marshall, R.J. and A.B. Metzner (1967) "Flow of Viscoelastic Fluids through Porous Media" Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals.6(3),p,393-400
- [36] Lee, K.S. and E.L. Claridge, Areal Sweep Efficiency of Pseudoplastic Fluids in a Five-Spot Hele-Shaw Model. 1968
- [37] 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
- [38] Allen, E. and D.V. Boger, The Influence of Rheological Properties on Mobility Control in Polymer-Augmented Waterflooding. 1988
- [39] Bonn, D., et al. (1995) "Viscous fingering in complex fluids" Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.220(1–2),p,60-73
- [40] 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
- [41] 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
- [42] Avendano, J., et al. (2011) "Enhanced displacement of a liquid pushed by a viscoelastic fluid" Journal of Colloid and Interface Science.410(0),p,172-180
- [43] Malhotra, S. and M.M. Sharma (2014) "Impact of fluid elasticity on miscible viscous fingering" Chemical Engineering Science.117(125-135)
- [44] Emad W. Al-shalabi , B. Ghosh. (2016) "Effect of Pore-scale Heterogeneity and Capillary-Viscous Fingering on Commingled Waterflood Oil Recovery in Stratified Porous Media" Journal of Petroleum Engineering . 10.1155/2016/1708929
- [45] A. Franco-Gómez, A. B. Thompson, A. L. Hazel, and A. Juel, "Sensitivity of Saffman–Taylor fingers to channel-depth perturbations," Journal of Fluid Mechanics, vol. 794, pp. 343- 368, 2016
- [46] Sorbie, K.S. (1991). Polymer-Improved Oil Recovery, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- [47] Sheng, J.J. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice, Elsevier, 2011.
- [48] Wang, D.M., Cheng, J.-C., Xia, .F., Li, Q., and Shi, J.P. (2001). Viscous-elastic

fluids can mobilize oil remaining after water-flood by force parallel to the oil–water interface. Paper SPE 72123 presented at the SPE Asia Pacific Improved Oil Recovery Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, Oct. 8 – 9.

- [49] N. Reuvers and M. Golombok, "Shear rate and permeability in water flooding," *Transport in porous media*, vol. 79, pp. 249-253, 2009
- [50] E. Koval, "A method for predicting the performance of unstable miscible displacement in heterogeneous media," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 3, pp. 145-154, 1963
- [52] T. K. Perkins, O. C. Johnston, and R. N. Hoffman, "Mechanics of viscous fingering in miscible systems," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 5, pp. 301-317, 1965
- [53] Tan and G. Homsy, "Simulation of nonlinear viscous fingering in miscible displacement," *The Physics of fluids*, vol. 31, pp. 1330-1338, 1988
- [54] مجید خطیبی، م: "مطالعه ناپایداری انگشتی لزج برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در محیط متخلخل شفاف با ساختاری فشرده از دانه‌های شیشه"، کارشنای ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۶.

Abstract

In lots of applications such as oil recovery and chemistry laboratories in order to separate different phases of liquids, Soffman-Taylor instability appears. This instability starts with injection of less viscous fluid into higher viscous fluid and some patterns similar to fingers of a hand start to form. At current research, the effect of elasticity of displacing fluid on an immiscible displacement has been investigated in a porouse media denced with glass beads, experimentally. In all experiments, silicon oil is used as displaced fluid and a mixture of glycerin, water and polyacrilamid powder known as displacing fluid. Different viscoelastic fluids by different mass percen ranging from 50ppm to 400ppm have been produced by means of high accuracy equipment in labrotary. Viscoelastic fluids until 100ppm are known as Boger wich has constant viscosity versus shear rate. Higher denced polymer fluids are shear-thining wich has different viscosity by each shear rate. Experiments showed, in Newtonian displacement very small and tiny fingers similar to arterioles of human body formed. This tiny fingers further disperse all over the set-up and the bulk of the displacing fluid, follow the tiny fingers. By injecting highr denced polymer fluids, the number of tiny fingers reduces and a uniform front with less number of fingers and thicker fingers will form. Increasing density of polymer leads to more viscoelastic properties such as normal stress and elastic viscosity which conclude to a better displacement. The best desirable result was noted for 400ppm fluid. Mixing length and Sweep efficiency are two parameters to report the results. By increasing Blake number and viscosity ratio mixing length increases and sweep efficiency decreases. Also by increase of polymer in the solution, there will be a better sweep efficiency.

Keywords: *Soffman-Taylor instability, Fingering, Immiscible, Porous media, Glass beads, Shearthining, Polyacrilamid, sweep efficiency, Mixing lengt*



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

Experimental investigation of immiscible viscous fingering of viscoelastic fluids in porous media

By:

Ahmad Kazemi

Supervisors:

Dr. Ali Abbasnejad

Dr. Mahmood Norouzi

September 2018