

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک-گرایش تبدیل انرژی

مطالعه آزمایشگاهی ناپایداری انگشتی لزج برای سیال نیوتنی و غیر نیوتنی در محیط متخلخل
شفاف با ساختاری فشرده از دانه‌های شیشه

نگارنده: سید مجید خطیبی

استاد راهنما:

دکتر علی خالقی

استاد مشاور:

دکتر محمود نوروزی

شهریور ۱۳۹۶



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

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 سید مجید خطیبی با شماره دانشجویی ۹۳۰۷۱۱۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان مطالعه آزمایشگاهی ناپایداری انگشتی لزوج برای سیال نیوتنی و غیر نیوتنی در محیط متخلخل شفاف با ساختاری فشرده از دانه‌های شیشه که در تاریخ ۹۶/۶/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با امتیاز درجه عالی.....) مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر علی خالقی	۱- استاد راهنمای اول
—	—	—	۲- استاد راهنمای دوم
	دانشیار	دکتر محمود نوروزی	۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر پوریا اکبرزاده	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استاد	دکتر محمدحسن کیهانی	۵- استاد ممتحن اول
	دانشیار	دکتر محسن نظری	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

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

تقدیم به

حضرت ولی عصر (عج)

و تمام بزرگمردانی که با حمیت و غیرت و در کمال خلوص، جان گرانهای خود را فدا نمودند تا کشوری سر بلند و

سرافراز داشته باشیم و در سایه امنیت، بتوانیم به پیشرفت و تعالی بیندیشیم.

در میان مومنان مردانی هستند که بر سر عهدی که با خدا بسته اند صادقانه ایستاده اند؛ بعضی پیمان خود را به آخر بردند (در راه او شربت

شهادت نوشیدند)، و بعضی دیگر در انتظارند؛ و هرگز تخیر و تبدیلی در عهد خود ندادند.

سوره مبارکه احزاب آیه ۲۳

شکر و قدردانی:

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قرمت و به شکر اندرش فرید نعمت، هر نفسی که فرو می رود مدتی است و چون برمی آید متحرک ذات پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکر واجب

از دست و زبان که برآید کز همه شکرش به درآید

خدای را شاکرم که توفیق یافتم تا نقشی کوچک در جهاد علمی برای اعتلای ایران اسلامی عزیز داشته باشم.

در اینجا بر خود لازم می دانم که از زحمات استادان ارجمند جناب آقای دکتر علی خالقی و جناب آقای دکتر محمود نوروزی که در تمام مراحل انجام پایان نامه، بنده را از راهبانی های ارزنده شان بهره مند نمودند کمال شکر و قدردانی را به جای آورم.

از پدر گرانقدر و مادر مهربانم، این دو بزرگوار که در تمام عرصه های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بودند نهایت تقدیر و شکر را دارم.

و سپاس از همسر عزیزم که در سیه همیاری و بهیلى او به این منظور نائل شدم.

سید مجید خطیبی

تعهد نامه

اینجانب سید مجید خطیبی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مطالعه آزمایشگاهی ناپایداری انگشتی لزج برای سیال نیوتنی و غیر نیوتنی در محیط متخلخل شفاف با ساختاری فشرده از دانه‌های شیشه تحت راهنمایی آقای دکتر خالقی 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» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت 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 اخلاق 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، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی 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.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

چکیده

ناپایداری انگشتی لزج زمانی اتفاق می‌افتد که سیالی با لزجت کمتر، درون محیط متخلخلی که از سیال با لزجت بیشتر پر شده، تزریق شود. رشد و شکل‌گیری این انگشتی‌ها نقشی بسیار مهم در فرآیند جابجایی سیالات، به‌خصوص انتقال نفت از مخازن دارد. در پژوهش حاضر، با رویکردی تجربی به مطالعه ناپایداری انگشتی لزج در جابجایی مخلوط شدنی سیال‌های نیوتنی و همچنین ترکیبی از سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی پرداخته شده است. به‌منظور واقعی‌تر شدن نتایج این پژوهش، محیطی متخلخل با دیواره‌های شفاف و ساختاری فشرده از دانه‌های کروی شیشه ساخته شد که نفوذپذیری آن به ماسه سنگ نفت نزدیک باشد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثرات خواص الاستیک بر این ناپایداری به کمک سیالات باگر است. سیالات باگر دسته خاصی از محلول‌های پلیمری رقیق هستند که در آن‌ها وابستگی لزجت و الاستیسیته از بین رفته و هر عامل را می‌توان به‌طور مستقل کنترل کرد. با افزایش غلظت پلیمر، بر خواص الاستیک باگر افزوده و نتایج آن بر این ناپایداری موردبررسی قرار گرفته است. همچنین به تأثیر عوامل دیگری مانند نسبت لزجت‌ها و عدد بی‌بعد بلیک بر نحوه رشد و شکل انگشتی‌ها و همچنین تأثیر آن‌ها بر پارامترهای فیزیکی مهمی از جمله طول اختلاط، بازده جاروبی و رشد اغتشاش به حالت پایه نیز پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: ناپایداری انگشتی لزج، محیط متخلخل، جابجایی مخلوط شدنی، سیال باگر، دانه‌های شیشه،

الاستیسیته سیال

فهرست عنوان‌ها

ک	فهرست شکل‌ها
ع	فهرست جدول‌ها
ف	فهرست نشانه‌ها
۱	فصل ۱ مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- افزایش راندمان برداشت از مخازن نفت
۶	۳-۱- سیال غیرنیوتنی باگر
۸	۴-۱- مفاهیم و اصطلاحات
۱۰	۵-۱- سلول هل- شاو
۱۱	۶-۱- مکانیزم ناپایداری انگشتی لزج
۱۲	۷-۱- تاریخچه
۱۳	۱-۷- مطالعات عددی
۱۴	۲-۷-۱- مطالعات آزمایشگاهی
۱۸	۸-۱- معرفی مطالعه حاضر و تشریح نوآوری‌ها
۲۳	فصل ۲ مواد، تجهیزات و ستاپ آزمایش
۲۴	۱-۲- تجهیزات آزمایشگاهی
۲۴	۱-۱-۲- همزن هات پلیت
۲۵	۲-۱-۲- دستگاه ویسکومتر
۲۶	۳-۱-۲- پمپ پرستالتیک
۲۷	۴-۱-۲- دمپر پمپ
۲۸	۵-۱-۲- ترازو
۲۹	۶-۱-۲- دوربین
۲۹	۷-۱-۲- دستگاه رئومتر
۳۰	۲-۲- ستاپ آزمایشگاهی
۳۰	۱-۲-۲- محیط متخلخل شفاف
۳۴	۲-۲-۲- شیر ورودی و خروجی
۳۷	۳-۲-۲- کلکتور ورودی
۳۸	۴-۲-۲- رابط شیر خروجی

۳۹	..... ۵-۲-۲ ستاپ آزمایش
۴۰	..... ۳-۲ سیالات مورد استفاده
۴۱	..... ۱-۳-۲ محلول پلیمری
۴۳	..... ۲-۳-۲ سیالات غیر نیوتنی با گر منتخب برای آزمایش ها
۴۶	..... ۳-۳-۲ تستهای رئومتری
۵۱	..... ۴-۲ اعداد بی بعد
۵۴	..... ۵-۲ مراحل انجام آزمایش
۵۴	..... ۱-۵-۲ تزریق سیال جابجا شونده
۵۵	..... ۲-۵-۲ تزریق سیال جابجا کننده

فصل ۳ پردازش تصویر..... ۵۷

۵۸	..... ۱-۳ مقدمه
۵۸	..... ۲-۳ کاربردها
۵۹	..... ۳-۳ تاریخچه
۶۰	..... ۴-۳ مراحل انجام پردازش تصویر
۶۱	..... ۵-۳ پردازش تصاویر رنگی
۶۲	..... ۶-۳ پردازش تصاویر آزمایش ها
۶۸	..... ۷-۳ پارامترهای ارزیابی نتایج
۶۸	..... ۱-۷-۳ طول اختلاط
۷۰	..... ۲-۷-۳ بازده جارویی
۷۱	..... ۳-۷-۳ نسبت رشد اغتشاش به حالت پایه
۷۲	..... ۸-۳ صحت سنجی ستاپ آزمایش
۷۲	..... ۱-۸-۳ یکنواختی جبهه پیش رونده
۷۴	..... ۲-۸-۳ تکرار پذیری آزمایش

فصل ۴ شرح و تحلیل نتایج..... ۷۷

۷۸	..... ۱-۴ مقدمه
۷۸	..... ۲-۴ آزمایش های مربوط به سیالات نیوتنی
۷۸	..... ۱-۲-۴ تأثیر افزایش نسبت لزجت ها (R)
۸۲	..... ۲-۲-۴ تأثیر افزایش عدد بی بعد بلیک
۸۵	..... ۳-۴ آزمایش های مربوط به سیالات با گر
۸۵	..... ۱-۳-۴ بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجا کننده
۹۸	..... ۲-۳-۴ بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجا شونده

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....۱۰۵

۵-۱- مقدمه.....۱۰۶

۵-۲- نتیجه‌گیری.....۱۰۶

۵-۳- پیشنهادها.....۱۰۷

پیوست‌ها.....۱۰۹

مراجع.....۱۱۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ ناپایداری انگشتی لزج در حالت مخلوط شدنی..... ۲
- شکل ۲-۱ برداشت اولیه از مخزن نفتی..... ۳
- شکل ۳-۱ برداشت ثانویه از مخزن نفتی..... ۴
- شکل ۴-۱ برداشت ثالثیه از مخزن نفتی..... ۵
- شکل ۵-۱ تمایل نیروی برشی به کشیدن و به خط کردن رشته‌های پلیمری..... ۸
- شکل ۶-۱ نمای شماتیک سلول هل- شاو..... ۱۱
- شکل ۷-۱ یک نمونه از سیستم آزمایشگاهی بکار رفته در بررسی ناپایداری انگشتی [۳۰]..... ۱۸
- شکل ۸-۱ نفت گیر افتاده در محیط متخلخل..... ۲۰
- شکل ۹-۱ محیط متخلخل ساخته شده برای مطالعه حاضر..... ۲۱
- شکل ۱-۲ همزن هات پلیت IKA RCT..... ۲۵
- شکل ۲-۲ ویسکومتر Brookfield مدل DVE-LV..... ۲۶
- شکل ۳-۲ پمپ پرستالتیک مدل BT100-1F کمپانی Longer..... ۲۷
- شکل ۴-۲ دمپر پمپ پرستالتیک..... ۲۸
- شکل ۵-۲ ترازوی شرکت RADWAG مدل PS 510/C/1..... ۲۸
- شکل ۶-۲ دوربین سونی مدل Cyber-shot DSC-WX۲۲۰..... ۲۹
- شکل ۷-۲ دستگاه رئومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar..... ۳۰
- شکل ۸-۲ نمای شماتیک محیط متخلخل ساخته شده برای این مطالعه..... ۳۲
- شکل ۹-۲ هندسه جریان در محیط متخلخل..... ۳۲
- شکل ۱۰-۲ اختلاف فشار دو سر محیط متخلخل در دبی‌های مختلف تزریق آب..... ۳۳
- شکل ۱۱-۲ محیط متخلخل ساخته شده در این مطالعه..... ۳۴
- شکل ۱۲-۲ مکانیزم شیر تویی..... ۳۵

- شکل ۲-۱۳ اجزای اصلی شیر: الف) بدنه شیر ب) استوانه برنجی شیاردار ج) دستگیره شیر..... ۳۵
- شکل ۲-۱۴ شیر ورودی و خروجی محیط متخلخل..... ۳۶
- شکل ۲-۱۵ کلکتور ورودی..... ۳۷
- شکل ۲-۱۶ کلکتور ورودی به همراه متعلقات..... ۳۸
- شکل ۲-۱۷ مدل طراحی شده رابط شیر خروجی..... ۳۸
- شکل ۲-۱۸ رابط شیر خروجی..... ۳۹
- شکل ۲-۱۹ ستاپ بسته شده روی میز افقی..... ۴۰
- شکل ۲-۲۰ نمایی از پیوندهای مولکولی پلی آکرلامید..... ۴۱
- شکل ۲-۲۱ پودر پلیمر پلی آکرلامید..... ۴۲
- شکل ۲-۲۲ آب مقطر، گلیسرین و پلی آکرلامید استفاده شده در این پژوهش..... ۴۲
- شکل ۲-۲۳ آزمون لزجت برحسب نرخ برش باگر ۵۰..... ۴۴
- شکل ۲-۲۴ آزمون لزجت برحسب نرخ برش باگر ۱۰۰..... ۴۵
- شکل ۲-۲۵ مدل فنر و دمپر ماکسول..... ۴۸
- شکل ۲-۲۶ رفتار مدولهای G' , G'' برای باگر ۵۰..... ۵۰
- شکل ۲-۲۷ رفتار مدولهای G' , G'' برای باگر ۱۰۰..... ۵۰
- شکل ۲-۲۸ پر کردن محیط متخلخل از سیال جابجا شونده..... ۵۵
- شکل ۲-۲۹ اجزای ستاپ آزمایش در حالت آماده برای تست گرفتن..... ۵۶
- شکل ۲-۳۰ تشریح شماتیک اجزای ستاپ آزمایش در حالت آماده برای تست گرفتن..... ۵۶
- شکل ۳-۱ جدا کردن ناحیه موردنظر برای پردازش تصویر در نرم افزار Any MTS Converter..... ۶۳
- شکل ۳-۲ الف) لحظه شروع فیلم برداری ب) لحظه پایان فیلم برداری..... ۶۴
- شکل ۳-۳ حالت های مختلف نورپردازی محیط متخلخل: الف) نورپردازی مستقیم از پشت محیط متخلخل
ب) نورپردازی بک لایت ج) نورپردازی از بالا و پوشاندن پشت محیط متخلخل با یک صفحه سفید..... ۶۶

- شکل ۳-۴ مراحل پردازش تصویر، (۱) جداسازی ناحیه رخ دادن پدیده، (۲) کاهش اغتشاش تصویر در متلب، (۳) باینری کردن تصویر در متلب. ۶۷
- شکل ۳-۵ شماتیک طول اختلاط. ۷۰
- شکل ۳-۶ نمایش شماتیک حالت پایه. ۷۱
- شکل ۳-۷ صحت سنجی پایداری و یکنواختی جبهه حرکت. الف) ثانیه ۱۵ ب) ثانیه ۳۰ ج) ثانیه ۴۵ د) ثانیه ۶۰ ه) ثانیه ۷۵. ۷۳
- شکل ۳-۸ تزریق آب به محلول آب و گلیسرین ۸۰٪ حجمی گلیسرین با دبی ۱۲ میلی لیتر بر دقیقه. (۱) آزمایش اول (۲) آزمایش دوم. ۷۵
- شکل ۴-۱ آزمایش ۱، تزریق محلول ۸۹/۲ به محلول ۲۲۲/۹، $Q=5\text{ml/min}$ ، $R=0/916$ و 10^{-2} . $Bl=1/24$. ۷۸
- شکل ۴-۲ آزمایش ۲، تزریق محلول ۶۳/۶ به محلول ۶۴۵، $Q=5\text{ml/min}$ ، $R=2/31$ و $Bl=1/73 \times 10^{-2}$. ۷۹
- شکل ۴-۳ آزمایش ۳، تزریق آب به محلول ۲۲۲/۹، $Q=5\text{ml/min}$ ، $R=5/5$ و $Bl=1/02$. ۷۹
- شکل ۴-۴ طول اختلاط برای نسبت لزجت های مختلف، $Q=5\text{ml/min}$. ۸۰
- شکل ۴-۵ بازده جاروبی برای نسبت لزجت های مختلف، $Q=5\text{ml/min}$. ۸۱
- شکل ۴-۶ رشد اغتشاش به حالت پایه برای نسبت لزجت های مختلف، $Q=5\text{ml/min}$. ۸۲
- شکل ۴-۷ تزریق محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲ ($R=0/916$). ۸۳
- شکل ۴-۸ طول اختلاط برای بلیک های مختلف، ($R=0/916$). ۸۴
- شکل ۴-۹ بازده جاروبی برای بلیک های مختلف، ($R=0/916$). ۸۴
- شکل ۴-۱۰، آزمایش ۷، تزریق باگر ۵۰ به محلول ۱۵۹/۲، $R=0/916$ ، $Bl=1/73 \times 10^{-2}$ و $El=464/4$. ۸۵
- شکل ۴-۱۱، آزمایش ۸، تزریق باگر ۵۰ به محلول ۶۴۵، $R=2/31$ ، $Bl=1/73 \times 10^{-2}$ و $El=464/4$. ۸۶
- شکل ۴-۱۲ طول اختلاط برای نسبت لزجت های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $Bl=1/73 \times 10^{-2}$ و $El=464/4$. ۸۶
- شکل ۴-۱۳ بازده جاروبی برای نسبت لزجت های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $Bl=1/73 \times 10^{-2}$ و $El=464/4$. ۸۷

- شکل ۴-۱۴ رشد اغتشاش به حالت پایه برای نسبت لزجت های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $\times 10^{-2}$
- ۸۸ $El=464/4$ و $BI=1/73$
- شکل ۴-۱۵ تزریق باگر ۵۰ به محلول ۱۵۹/۲، $R=0/916$ و $El=464/4$ ۸۹
- شکل ۴-۱۶ طول اختلاط در بلیک های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $R=0/916$ و $El=464/4$ ۹۰
- شکل ۴-۱۷ بازده جاروبی برای بلیک های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $R=0/916$ و $El=464/4$ ۹۰
- شکل ۴-۱۸ رشد اغتشاش به حالت پایه برای بلیک های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $R=0/916$ و
- ۹۱ $El=464/4$
- شکل ۴-۱۹ طول اختلاط در بلیک های مختلف، $R=0/916$ و $El=883/15$ ۹۲
- شکل ۴-۲۰ بازده جاروبی در بلیک های مختلف، $R=0/916$ و $El=883/15$ ۹۲
- شکل ۴-۲۱ رشد اغتشاش به حالت پایه برای بلیک های مختلف، $R=0/916$ و $El=883/15$ ۹۳
- شکل ۴-۲۳ مقایسه طول اختلاط در تزریق باگر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲، $R=0/916$ و R^{-2}
- ۹۵ $BI=3/46 \times 10$
- شکل ۴-۲۴ مقایسه بازده جاروبی در تزریق باگر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲، $R=0/916$ و R^{-2}
- ۹۵ $BI=3/46 \times 10$
- شکل ۴-۲۵ مقایسه رشد اغتشاش به حالت پایه در تزریق باگر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲،
- ۹۶ $R=0/916$
- شکل ۴-۲۶ مقایسه طول اختلاط در تزریق باگر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۶۴۵، $R=2/31$ و R^{-2}
- ۹۷ $BI=1/73 \times 10$
- شکل ۴-۲۷ مقایسه بازده جاروبی در تزریق باگر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۶۴۵، $R=2/31$ و R^{-2}
- ۹۷ $BI=1/73 \times 10$
- شکل ۴-۲۸ مقایسه رشد اغتشاش به حالت پایه در تزریق باگر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۶۴۵، $R=2/31$ و
- ۹۸ $BI=1/73 \times 10^{-2}$
- شکل ۴-۲۹ تزریق محلول ۱/۲۵ به باگر ۱۰۰ در بلیک های مختلف، $R=4/27$ ۹۹
- شکل ۴-۳۰ طول اختلاط در تزریق محلول ۱/۲۵ به باگر ۱۰۰ در بلیک های مختلف، $R=4/27$ ۱۰۰

شکل ۳۱-۴ بازده جاروبی در تزریق محلول ۱/۲۵ به باگر ۱۰۰ در بلیک های مختلف، $R=۴/۲۷$ ۱۰۰

شکل ۳۲-۴ تأثیر افزایش الاستیسیته روی سیال جابجا شونده، $R=۴/۲۷$ ، $Q=۱۰\text{ ml/min}$ ۱۰۲

شکل ۳۳-۴ تأثیر افزایش الاستیسیته بر طول اختلاط در تزریق سیال نیوتنی به باگر، $R=۴/۲۷$

..... ۱۰۳ $Q=۱۰\text{ ml/min}$

شکل ۳۴-۴ تأثیر افزایش الاستیسیته بر بازده جاروبی در تزریق سیال نیوتنی به باگر، $R=۴/۲۷$

..... ۱۰۳ $Q=۱۰\text{ ml/min}$

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ لزجت و چگالی آب، گلیسرین و محلول‌های آب و گلیسرین با درصد حجمی‌های مختلف گلیسرین، مورد استفاده در این مطالعه..... ۴۶
- جدول ۲-۲ عدد بلیک برای سیالات جابجا کننده مختلف، بر حسب دبی ورودی..... ۵۲
- جدول ۳-۲ عدد وایزنبرگ برای سیالات جابجا کننده غیر نیوتنی، بر حسب دبی ورودی..... ۵۳
- جدول ۴-۲ عدد الاستیسیته باگر ۵۰ و باگر ۱۰۰..... ۵۴

فهرست نشانه‌ها

سطح مقطع محیط متخلخل (cm^2)	A
فاصله بین دو صفحه سلول هل شاو (m)	b
عدد بی بعد بلیک	Bl
قطر هیدرولیکی (m)	D_h
قطر ذرات محیط متخلخل (m)	D_p
مدول صلبیت هم‌فاز	G'
مدول صلبیت غیر هم‌فاز	G''
نفوذپذیری (m^2)	k
طول محیط (cm)	L
فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	P
دبی (ml/s)	Q
لگاریتم نسبت لزجت ها	R
زمان (s)	t
سرعت سیال ورودی (m/s)	t
حجم کل محیط متخلخل (m^3)	V_T
حجم منافذ محیط متخلخل (m^3)	V_V
عدد وایزنبرگ	Wi

تخلخل	φ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
نرخ برش (s^{-1})	$\dot{\gamma}$
زمان رهایی از تنش (s)	λ
زمان رهایی از تنش متوسط (s)	$\bar{\lambda}$
فرکانس زاویه‌ای (rads^{-1})	ω
تانسور تنش	τ
چگالی (kgm^{-3})	η

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- مقدمه

ناپایداری انگشتی لزج^۱ یکی از شناخته شده ترین ناپایداری های هیدرودینامیکی در محیط متخلخل^۲ هست. این ناپایداری زمانی اتفاق می افتد که سیالی با لزجت کمتر، درون محیط متخلخلی که از سیالی با لزجت بیشتر اشباع شده است، تزریق شود. سطح مشترک بین دو سیال به علت اختلاف لزجت موجود ناپایدار شده و با گذشت زمان طرح هایی شبیه به انگشت در این سطح مشترک ایجاد می شوند. این ناپایداری هم در حالت مخلوط شدنی^۳ (در نظر نگرفتن نیروهای موئینگی) و هم غیر مخلوط شدنی^۴ اتفاق می افتد. این ناپایداری در حالت مخلوط شدنی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ ناپایداری انگشتی لزج در حالت مخلوط شدنی

این ناپایداری دارای کاربردهای فراوان در فرایندهای مختلف است که از جمله آن ها می توان به مطالعه جریان آب های سطحی و زیر سطحی، علوم مربوط به بررسی پراکندگی آلودگی های زیست محیطی ناشی از

^۱ Viscous fingering instability

^۲ Porous media

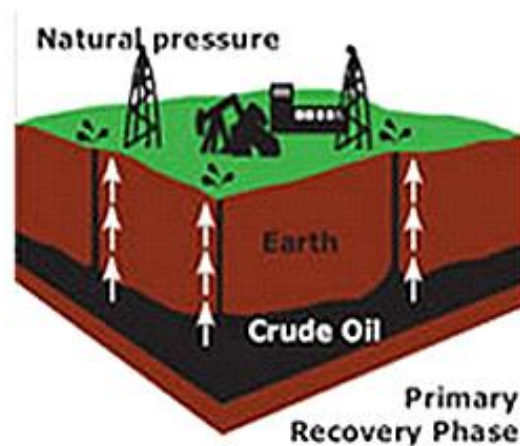
^۳ Miscible

^۴ Immiscible

مواد هیدروکربنی در مخازن و سفره‌های آب زیرزمینی، کروماتوگرافی^۱ و جداسازی مواد اشاره کرد؛ همچنین یکی از مهم‌ترین این کاربردها افزایش راندمان برداشت از مخازن نفت می‌باشد.

۲-۱- افزایش راندمان برداشت از مخازن نفت

برداشت نفت از مخازن به سه مرحله تقسیم می‌شود. مرحله آغازین یا برداشت اولیه^۲ تولید با استفاده از انرژی طبیعی موجود در مخزن که منبع اصلی انرژی برای جابجایی نفت به سمت چاه تولیدی است، انجام می‌شود. در این مرحله تنها در حدود ۳۰-۵ درصد نفت اولیه موجود در مخزن^۳ برداشت می‌شود. در شکل ۲-۱ برداشت اولیه از مخزن نفتی نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ برداشت اولیه از مخزن نفتی

مرحله دوم عملیات به‌طور معمول بعد از کاهش انرژی مخزن و در نتیجه کاهش برداشت نفت، استفاده می‌شود. در برداشت ثانویه^۴ هدف، تثبیت یا افزایش فشار مخزن است که به کمک تزریق آب یا گاز انجام می‌شود. آب، نفت را به سمت چاه‌های تولیدی می‌راند و این فرآیند تا زمانی که نسبت آب به نفت در چاه‌های تولیدی زیاد شود و تولید نفت بیشتر صرفه اقتصادی نداشته باشد، ادامه می‌یابد. در پایان این

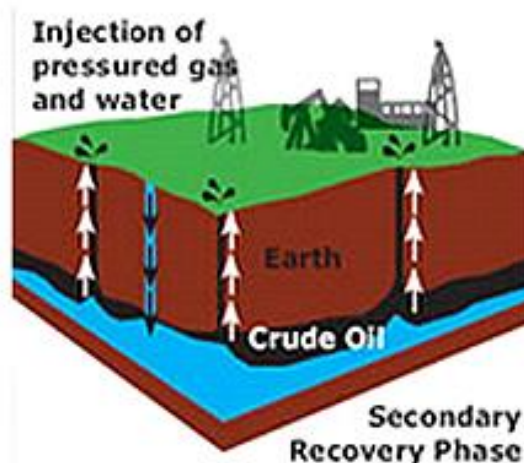
^۱ Chromatography

^۲ Primary Recovery

^۳ Original Oil in Place (OOIP)

^۴ Secondary Recovery

مرحله برداشت نفت به ۴۰-۶۰ درصد می‌رسد. در شکل ۳-۱ برداشت ثانویه از مخزن نفتی نشان داده شده است.

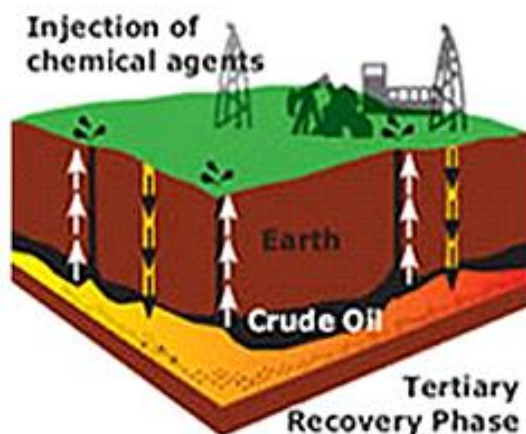


شکل ۳-۱ برداشت ثانویه از مخزن نفتی

به عبارتی برداشت ثانویه با افزایش انرژی طبیعی مخزن باعث جلوگیری از افت تولید و سپس افزایش تولید می‌شود؛ اما همچنان، در اثر عواملی که به‌طور عمده ناشی از شرایط ترشوندگی نامطلوب، ناهمگنی سنگ مخزن و به دام افتادن نفت در اثر موینگی است، مقدار قابل توجهی از نفت (۴۰-۶۰ درصد) در مخزن باقی می‌ماند. برای برداشت این مقدار نفت و افزایش برداشت نهایی، از روش‌های ازدیاد برداشت نفت^۱ استفاده می‌شود. این روش‌ها، برداشت ثالثیه^۲ نامیده می‌شوند. شکل ۴-۱ برداشت ثالثیه از مخزن نفتی را نشان می‌دهد. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان روش‌های ازدیاد برداشت را به دودسته روش‌های مبتنی بر تزریق گاز و روش‌های مبتنی بر تزریق آب تقسیم کرد. در روش‌های ازدیاد برداشت که بر پایه آب هستند، آب به‌عنوان محرک اصلی و یا به عبارتی سیال حامل این روش‌ها به شمار می‌رود. روش‌های شیمیایی، روش‌های متناوب، روش‌های حرارتی، روش‌های میکروبی و... همگی از آب به‌عنوان سیال حامل استفاده می‌کنند.

۱ Enhanced Oil Recovery (EOR)

۲ Tertiary Recovery



شکل ۴-۱ برداشت ثالثیه از مخزن نفتی

ایران دارای ۶۵۰ میلیارد بشکه نفت درجاست که با احتساب ضریب بازیافت ۲۴ درصد ذخایر آن به ۱۵۶ میلیارد بشکه بالغ می‌شود. به عبارت ساده‌تر در صورت ثابت بودن ضریب برداشت، بالغ بر ۴۹۴ میلیارد بشکه نفت در زیر زمین باقی خواهد ماند. اهمیت افزایش راندمان برداشت از مخازن نفت آنجا مشخص می‌شود که به‌عنوان مثال تنها یک درصد ازدیاد برداشت از مخازن نفتی متعارف کشور که ۶۵۰ میلیارد بشکه ظرفیت دارند، ۵۰۰ میلیارد دلار درآمد عاید کشور می‌کند.

لزجت آب از لزجت نفت خام کمتر است. به همین علت در استخراج ثانویه و ثالثیه نفت خام، ناپایداری انگشتی لزج در مرز مشترک آب و نفت مشاهده می‌شود. لذا بررسی عوامل مؤثر بر این ناپایداری در زمینه‌ی استخراج نفت خام بسیار مهم و کاربردی می‌باشد. مطالعات مربوط به بررسی ناپایداری انگشتی لزج در جابجایی سیالات نیوتنی در محیط‌های متخلخل هم به‌صورت عددی و هم آزمایشگاهی به‌طور گسترده از دهه ۶۰ میلادی شروع شد. در این دهه برداشت اولیه از مخازن نفت کشف شده در ایالات متحده آمریکا رو به پایان بود و با شروع برداشت ثانویه از آن‌ها و بروز پدیده انگشتی در مراحل استخراج، بررسی این ناپایداری اهمیتی مضاعف پیدا کرد. در این دهه بررسی ناپایداری انگشتی تنها محدود به بررسی جریان سیالات نیوتنی می‌شد. پس از آن، به دلیل استفاده مهندسين و محققين فعال در زمینه‌ی انتقال نفت از پلیمرهای خاص تزریق‌شده در آب که بازده استخراج نفت را افزایش می‌دادند، بررسی این ناپایداری در سیالات غیرنیوتنی نیز اهمیت ویژه‌ای پیدا کرد. در واقع این پلیمرها در دسته‌ای از سیالات غیرنیوتنی

طبقه‌بندی می‌شدند که در تهیه امولسیون‌ها و فوم‌هایی تزریقی به آب برای افزایش بازده استخراج نفت مورد استفاده قرار می‌گرفتند. پلیمرهای بکار گرفته شده با کاهش پدیده انگشتی در مخازن نفت، راندمان استخراج را بالا می‌بردند. بنابراین با توجه به دلایل ذکر شده، مطالعه و آشنایی جامع با چگونگی رفتار این پدیده در جریان سیالات غیرنیوتنی در محیط‌های متخلخل، به‌عنوان یک نیاز اصلی در صنایع و پروژه‌های مهندسی شناخته شد.

۱-۳- سیال غیرنیوتنی باگر^۱

مایعی ویسکوالاستیک است که لزجت ثابتی دارد. اغلب مایعات ویسکوالاستیک، مخلوط‌ها یا محلول‌های پلیمری هستند که ذاتاً رقیق شونده (یعنی لزجت با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد و این کاهش مقدار قابل توجهی نیز می‌باشد) هستند. با این وجود، باگرها محلول‌های پلیمری رقیقی هستند و تا حدی رقیق هستند که تغییرات لزجت نسبت به نرخ برش قابل صرف نظر کردن است.

باگرها به این دلیل مهم هستند که قادرند اثرات الاستیک را کاملاً جدا از اثرات لزج نشان دهند. جدایی این دو خصلت امکان‌پذیر است زیرا در اصل، آزمایش حداقل با دو سیال انجام می‌شود: یک سیال باگر و یک سیال نیوتنی با لزجت یکسان. تفاوت حاصل، در دبی یکسان رخ داده است: بنابراین نتایج، فقط و فقط اثر الاستیسیته است. در عمل، لازم نیست لزجت‌ها یکسان باشند و دبی‌ها نیز می‌توانند متفاوت باشند چون گروه اعداد بی بعد مناسب برای مقایسه نتایج استفاده خواهند شد. قابلیت جداسازی اثرات الاستیک، یکی از شاخه‌های بسیار پیچیده علم رئولوژی است. پیش از سیال باگر، تعیین این موضوع که یک اثر غیرنیوتنی مشاهده شده، به دلیل رقیق شوندگی، اثر الاستیسیته یا هردوی آن‌ها بوده، بسیار دشوار بود. خاصیت کلیدی باگرها، ثابت بودن (تقریبی) لزجت است.

^۱ Boger fluid

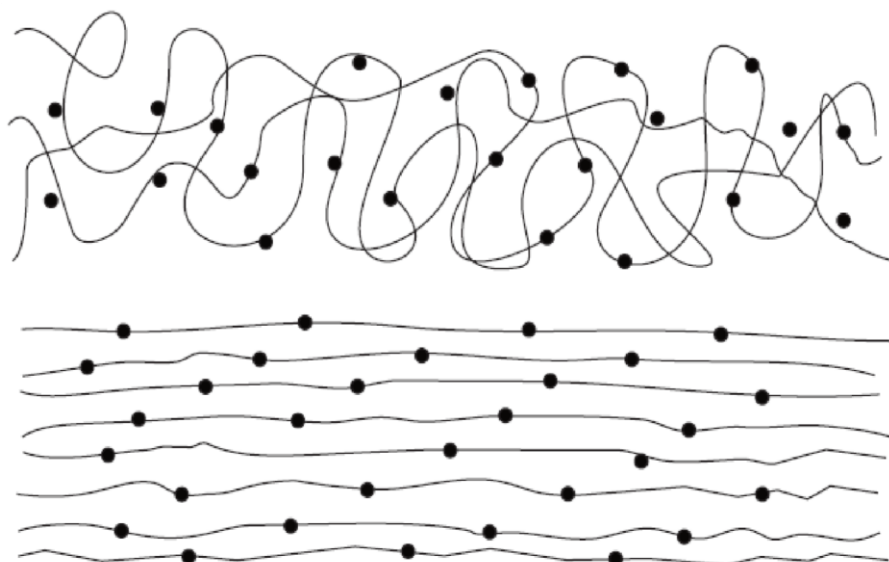
در یک محلول پلیمری شبکه‌های پلیمری به صورت شل و ول پیچیده شده‌اند و معمولاً نامنظم، جهت‌دار هستند. نیروی برشی، تمایل دارد رشته‌های پلیمری را بکشد^۱ و آن‌ها را در راستای برش به خط کند^۲. این موضوع در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. این کار باعث به حداقل رسیدن مقاومت در برابر برش می‌شود. هرچند، اگر محلول به اندازه کافی رقیق باشد، لزجت پلیمر کسری از لزجت کل می‌باشد. بنابراین کاهش لزجت با افزایش نرخ برش به طور قابل قبولی کوچک است و سیال تقریباً لزجت ثابتی دارد. الاستیسیته سیال با کشش^۳ شبکه‌ها و حرکت براونی^۴ حلال مرتبط است. حرکت براونی با کشیده شدن و به خط شدن شبکه‌ها مخالفت می‌کند چون این حرکت تلاش می‌کند، شبکه‌ها را در ساختاری نامنظم نگه دارد. در یک جریان، درجه کشش بستگی به این دارد که نیروهای لزج چه مقدار به حرکت براونی برتری دارند. در جریان هنگامی که تنش برداشته شود (به عنوان مثال جریان بایستد)، شبکه‌ها به حالت تعادل خود می‌رسند (مانند پدیده عقب‌نشینی الاستیک). نرخ رهایی از تنش با عنوان "زمان رهایی از تنش" شناخته می‌شود. زمانی که برای سیال نیوتنی صفر است و معیاری برای سنجش الاستیسیته سیال در سیالات ویسکوالاستیک است. در فصل آینده به نحوه انتخاب و ساخت سیال با گر مورد استفاده در مطالعه حاضر خواهیم پرداخت.

¹ Stretch out

² Align

³ extension

⁴ Brownian motion



شکل ۵-۱ تمایل نیروی برشی به کشیدن و به خط کردن رشته‌های پلیمری

۴-۱- مفاهیم و اصطلاحات

برخی از اصطلاحات رایج بکار رفته برای جریان سیالات در محیط‌های متخلخل که در این مطالعه از آن‌ها استفاده شده است، به شرح زیر بیان شده‌اند:

تخلخل^۱: این پارامتر که آن را با ϕ نمایش می‌دهند، معیاری برای تشخیص اندازه‌ی خلل و فرج موجود در محیط متخلخل می‌باشد و به صورت نسبت حجم منافذ و سوراخ‌های موجود در ماده به حجم کل آن می‌باشد. این پارامتر با عنوان تخلخل کامل نیز شناخته می‌شود. عبارت دیگری در همین زمینه به نام تخلخل مؤثر نیز ارائه شده است که فقط محدود به فضایی از محیط متخلخل می‌شود که در آن جریان وجود دارد. روش‌های بسیار زیادی در مطالعات مربوط به این مبحث برای تعیین مقادیر تخلخل کامل و تخلخل مؤثر وجود دارد که در بخش تاریخچه به قسمتی از آن‌ها اشاره می‌شود.

نفوذپذیری^۲: این پارامتر که آن را با k نمایش می‌دهند، خاصیتی از محیط متخلخل می‌باشد که به سیال اجازه می‌دهد، بدون این‌که تأثیر شیمیایی و یا فیزیکی از محیط بپذیرد، از محیط متخلخل عبور

^۱ Porosity

^۲ Permeability

کند. هرچه مقدار این پارامتر برای یک محیط بیشتر باشد، عبور سیال از آن نیز آسان تر است. این پارامتر یک خاصیت محیط متخلخل است و از لزجت یا چگالی سیال مستقل می‌باشد. در بررسی جریان در محیط متخلخل، معمولاً این پارامتر همگن و همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این اکثراً نسبت به زمان نیز ثابت فرض می‌شود.

قابلیت تحرک^۱: قابلیت تحرک یک سیال در محیط متخلخل، به صورت نسبت نفوذپذیری محیط به لزجت سیال تعریف می‌شود.

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

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

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

در این رابطه زیرنویس ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به سیال جابجاکننده و سیال جابجاشونده می‌باشند. اگر این نسبت کوچک تر یا مساوی یک باشد، جابجایی پایدار و راندمان جاروبی^۲ ماکزیمم است ولی اگر این پارامتر مقادیری بزرگ تر از یک داشته باشد، سیال با قابلیت تحرک بیشتر به صورت انگشتی درون سیال با قابلیت تحرک کمتر، نفوذ می‌کند. به همین علت است که بجای تزریق آب در مخازن نفت برای استخراج آن، از محلول‌های پلیمری استفاده می‌شود. این پلیمرها لزجت بالا یا به عبارتی قابلیت تحرک کمتری نسبت به آب دارند، بنابراین نسبت تحرک آن‌ها با نفت به عدد یک یا حتی پایین تر از آن می‌رسد و جریانی پایدار خواهیم داشت. برای محیط متخلخلی که نفوذپذیری آن ثابت باشد، نسبت تحرک به صورت ساده تر، نسبت لزجت سیال جابجاشونده به جابجاکننده می‌باشد. در این مطالعه نیز محیط متخلخل طوری ساخته شده که تخلخل و نفوذپذیری در تمام محیط یکنواخت می‌باشد؛ در فصل بعد محیط متخلخل ساخته شده و ویژگی‌های آن تشریح خواهد شد. در بررسی ناپایداری انگشتی با استفاده از نسبت تحرک، پارامتری را

^۱ Mobility

^۲ Sweep efficiency

به صورت رابطه (۳-۱) تعریف می شود که برای گزارش نتایج به دست آمده از شبیه سازی ها از آن استفاده می شود.

$$R = \ln \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (۳-۱)$$

۱-۵- سلول هل - شاو^۱

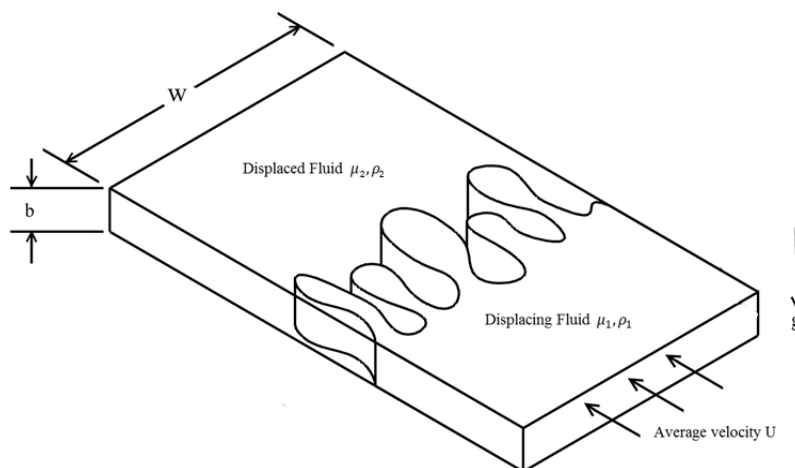
محققین برای مدل سازی ناپایداری انگشتی لزج به جای استفاده از محیط متخلخل از یک محیط ساده تر به نام سلول هل - شاو استفاده می کنند. به عبارت دیگر این سلول شبیه سازی ای از یک محیط متخلخل واقعی می باشد. تصویری شماتیک از سلول هل - شاو در شکل ۱-۶ آورده شده است؛ در این تصویر b ضخامت سلول و W عرض آن را نشان می دهد. جریان بین دو صفحه ی موازی که از یکدیگر به اندازه ی b فاصله دارند با سرعت U جریان می یابد. بدین ترتیب معادلات دوبعدی حاکم بر این جریان معادله پیوستگی و داری، به صورت زیر تعریف شده است:

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

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

در این معادلات، \bar{u} بردار سرعت ماکروسکوپی و \bar{p} فشار ماکروسکوپی می باشند. استفاده از این سلول همانند جریان در محیط متخلخل برای جریان هایی با رینولدز پایین امکان پذیر است. استفاده از سلول هل - شاو یکی از پرکاربردترین روش ها در مطالعه جریان سیالات در محیط متخلخل می باشد.

^۱ Hele-Shaw cell



شکل ۶-۱ نمای شماتیک سلول هل-شاو

۶-۱- مکانیزم ناپایداری انگشتی لزج

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

$$(p_1 - p_2) = \left[\frac{(\mu_2 - \mu_1)U}{k} + (\rho_1 - \rho_2)g \right] \delta x \quad (6-1)$$

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

$$(p_1 - p_2) < 0 \quad ; \quad (\mu_2 - \mu_1) > 0 \quad (7-1)$$

در این حالت لزجت عامل ناپایداری است در حالی که نیروی گرانش موجب پایداری می شود. در نتیجه ی این شرایط سرعت بحرانی که در آن جریان ناپایدار می شود به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{(\rho_2 - \rho_1) g k}{(\mu_2 - \mu_1)} \quad (8-1)$$

۷-۱- تاریخچه

در این بخش به بررسی مطالعات و تحقیقاتی که در زمینه ی ناپایداری انگشتی لزج 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 ی آنها می توان به تحلیل پایداری خطی^۱، شبیه سازی غیرخطی^۲ و همچنین مطالعات آزمایشگاهی اشاره کرد. در یک دسته بندی کلی تر بررسی این ناپایداری به دو بخش مربوط به جریان های مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی تقسیم بندی می شوند که هر کدام روابط و اصول کاملاً مجزایی در روند شبیه سازی و آزمایش دارند. بررسی این ناپایداری همان گونه که ذکر شد، از حدود دهه ۶۰ میلادی شدت بیشتری پیدا کرد و با در نظر گرفتن شرایط متفاوت و حالت های خاص، گسترش یافت. هومسی^۳ [۱] مروری بر اطلاعات موجود در زمینه ی این ناپایداری، هم در جریان های مخلوط شدنی و هم مخلوط نشدنی ارائه کرد که اطلاعات بسیار جامع و کاملی از این ناپایداری در محیط های متخلخل در اختیار علاقه مندان قرار می دهد. در این قسمت، ابتدا به بررسی مطالعات عددی می پردازیم سپس مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته را مورد بررسی و مقایسه قرار می دهیم.

^۱ Linear stability analysis

^۲ Non-linear simulation

^۳ Homsy

۱-۷-۱ مطالعات عددی

از جمله مطالعات عددی که در زمینه‌ی جابجایی سیال‌های نیوتنی انجام شده می‌توان به بررسی پایداری خطی جابجایی مخلوط شدنی نفت و یک محلول با لزجت کمتر از نفت پرداخت که توسط پرین [۲] انجام شد. او همچنین روش‌ها و مکانیزم‌های پخش یک سیال در سیال دیگر را مورد بررسی قرارداد. هلر [۳] نیز در روند بررسی پایداری یک جابجایی مخلوط شدنی، به معادله مقدار ویژه ناهمگن مرتبه دومی رسید که مسیر پیشرفت اغتشاشات را مشخص می‌کرد. او نواحی پایدار را با توجه به نرخ دبی ورودی، تغییرات لزجت و نیز تغییرات چگالی مورد بررسی قرارداد. در این زمان تن و هومسی [۴, ۵] به صورت تئوری، تحلیلی جامع و کامل در مورد پایداری جابجایی‌های مخلوط شدنی در جریان‌های مستقیم‌الخط و شعاعی ارائه کردند. این دو با استفاده از تقریب شبه خطی به پیش‌بینی نرخ رشد اغتشاشات و مقایسه آن‌ها با پاسخ تحلیلی به دست آمده برای زمان اولیه پرداختند. پیس‌من و همکاران [۶] نیز با استفاده از روش تفاضل محدود به شبیه‌سازی غیرخطی این ناپایداری در جریان‌های مخلوط شدنی پرداختند. در ادامه زیمرمن و هومسی [۷] با استفاده از روش طیفی^۱ این ناپایداری را برای محیط‌هایی با پراکندگی ناهمسانگرد مورد مطالعه قراردادند. آن‌ها پراکندگی را وابسته به سرعت در نظر گرفته و به بررسی تأثیرات این ناهمسانگردی در شکل‌گیری انگشتی‌ها پرداختند. این دو همچنین این ناپایداری را در جریان مخلوط شدنی به صورت سه بعدی نیز شبیه‌سازی کرده [۸] و با مشاهده نتایج به دست آمده متوجه شدند که هیچ مکانیزم جدیدی در شکل‌گیری انگشتی‌ها در حالت سه بعدی مشاهده نمی‌شود. بنابراین نتیجه گرفتند که برای بررسی رفتار این ناپایداری در شرایط متفاوت، همان حالت دوبعدی کافی و مفید است و نیازی به بررسی آن در حالت سه بعدی نیست. در ادامه می‌توان به مطالعه قسمت و عزایز [۹] در تحلیل پایداری خطی این ناپایداری در محیطی با تانسور پراکندگی ناهمسانگرد و وابسته به سرعت جریان، اشاره کرد؛ آن‌ها طول موج‌های بحرانی این ناپایداری را در حالت‌های خاص معرفی کرده و مورد بررسی قراردادند. نوروزی و شوقی [۱۰] نیز اثر ناهمسانگردی را بر روی ناپایداری انگشتی در جابجایی مخلوط شدنی مورد بررسی قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش

۱. Spectral Method

پراکندگی و کاهش نفوذپذیری، ناپایداری افزایش می‌یابد. از جمله جدیدترین کارهای عددی که با استفاده از روش شبکه بولتزمن برای نسبت لزجت های مختلف انجام شده، مطالعه صالح‌آبادی و همکاران [۱۱] هست که رژیم‌های ویسکوز فینگرینگ و کپیلاری فینگرینگ را بررسی و مقایسه کردند. جکسون و همکاران [۱۲] نیز به صورت عددی این ناپایداری را در حالت مخلوط شدنی در سلول هل-شاو برای نفوذپذیری‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند.

۱-۷-۲ مطالعات آزمایشگاهی

در این بخش به بررسی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در جریان‌های مخلوط شدنی و مخلوط نشدنی برای سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی می‌پردازیم.

بررسی ناپایداری انگشتی لزج در جریان‌های مخلوط شدنی اولین بار توسط هیل و همکاران [۱۳] گزارش شد. او بر پایه نیرویی بر اساس اختلاف فشار و نیز اغتشاشی در سطح مشترک دو سیال مورد آزمایش، به بررسی این ناپایداری پرداخت. پس از او اسلوباد و کوودل [۱۴] با استفاده از تکنیک پرتوایکس به اندازه‌گیری راندمان جارویی در این گونه جابجایی‌ها پرداختند. آن‌ها همچنین با استفاده از این تکنیک توانستند الگوهای متفاوت به دست آمده برای انگشتی‌ها در نسبت لزجت های مختلف را مشاهده و بررسی کنند. در ادامه ون میرس [۱۵] با بکار بردن مکانیزمی به مشاهده و تحلیل جریانی از آب و نفت در یک محیط متخلخل آزمایشگاهی پرداخت. این محیط متخلخل از موادی به صورت پودر شیشه پر شده بود و دیواره‌هایی شیشه‌ای داشت. بررسی سطح مشترک دو سیال مخلوط نشدنی نیز توسط سافمن و تیلور [۱۶] انجام پذیرفت. آن‌ها با استفاده از یک سلول هل-شاو و یک سیستم جریانی که از هوا و گلیسیرین تشکیل شده بود به بررسی آشفتگی‌ها و اغتشاشات به وجود آمده در سطح مشترک دو سیال پرداختند. این دو با تعریف پارامتری به شکل λ که نسبت ضخامت انگشتی به جابجایی آن را نشان می‌دهد به بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده از این آزمایش پرداختند. مطالعات آزمایشگاهی متعددی نیز توسط هارمن [۱۷] در زمینه تأثیرات نسبت تحرک بر راندمان جابجایی و نیز چگونگی شکل‌گیری ناپایداری انگشتی صورت گرفت. او در مطالعاتش به این نتیجه رسید که نسب تحرک دو سیال نقش بسیار بیشتری از ناهمگنی

محیط متخلخل در پیشروی ناپایداری دارد. بنهام و همکاران [۱۸] با استفاده از محلول سولفات آلومینیوم در جابجایی محلول گلیسرین، رفتار این جریان و چگونگی شکل‌گیری انگشتی‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در ادامه مطالعات آزمایشگاهی انجام‌گرفته با پرتوایکس، اسلوباد و توماس [۱۹] به بررسی تأثیرات نسبت تحرک، در شکل و اندازه‌ی انگشتی‌ها پرداختند. با استفاده از همین روش پرکینس و همکاران [۲۰] به بررسی فرایند پخش انگشتی‌ها در یک جابجایی مخلوط شدنی پرداختند. در حالت مخلوط نشدنی پرکینس و جانستون [۲۱] نیز مطالعاتی را با استفاده از همین روش انجام دادند. بررسی تأثیرات نیروی گرانش بر شکل‌گیری و نیز سرعت پیشروی انگشتی‌ها توسط اسلوباد و توماس [۱۹] انجام گرفت. در کنار این مطالعات، سقیر و همکاران [۲۲] به بررسی ناپایداری انگشتی در حالتی که سیالات به‌کار رفته با یکدیگر اختلاف دما داشته باشند، پرداختند. آن‌ها از گلیسرین و آب در این آزمایش استفاده و مشاهده کردند زمانی که آب داغ به سیستم تزریق می‌شود فاصله‌ی نوک تا پایه انگشتی‌ها کمتر از حالتی می‌باشد که آب سرد به سیستم تزریق می‌شود. همچنین مشاهده شد در این حالت، نیروی بویانسی از پیشرفت سریع انگشتی‌ها جلوگیری می‌کند.

در بخش سیالات غیرنیوتنی مارشال و همکاران [۲۳] برای اولین بار به بررسی جریان سیالات ویسکوالاستیک 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 [۲۴] مطالعات آزمایشگاهی دیگری با استفاده از سیالات شبه‌پلاستیک^۱ در سلول هل-شاو انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که سیال رقیق شونده‌ی مورد استفاده در آزمایش، ناپایداری بیشتری نسبت به سیالات نیوتنی ایجاد می‌کند. نتیجه‌ای که با واقعیت‌های تئوری همخوانی ندارد، زیرا همان‌طور که می‌دانیم در حالت کلی پلیمرها از سیالات نیوتنی لزج‌تر هستند و در نتیجه نسبت تحرک کمتری خواهند داشت، پس اساساً ناپایداری در آن‌ها باید با سرعت کندتری پیشروی کند. در این میان بخش عظیمی از مطالعات آزمایشگاهی مربوط به بررسی تفاوت‌های جریان سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی با یکدیگر می‌باشند. اولین مطالعه آزمایشگاهی که به بررسی جریان

^۱ Pseudo plastic fluid

سیالات غیرنیوتنی در سلول‌های شعاعی می‌پرداخت توسط داکرد و همکاران [۲۵] انجام گرفت. آن‌ها به بررسی و تحلیل جابجایی یک سیال غیرنیوتنی توسط سیالی نیوتنی پرداختند و تشکیل انگشتی‌هایی با شاخه‌های زیاد را گزارش کردند. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که در این حالت انگشتی‌ها بیشتر تمایل به شکافته شدن دارند و میل چندانی به ایجاد انگشتی‌های پهن‌تر و عریض‌تر از خود بروز نمی‌دهند. علاوه بر این‌ها، الن و بوگر [۲۶] حالت‌های مختلفی را برای سیال نیوتنی، سیال باریک شونده و سیال کاملاً الاستیک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در آزمایش‌های خود متوجه شدند که در حالت سیالات رقیق شونده ناپایداری بیشتری در سطح مشترک دو سیال نسبت به حالت‌های دیگر قابل مشاهده است. این دو همچنین گزارش کردند که در شرایط یکسان، شکل‌گیری و فرم انگشتی‌ها در حالت غیرنیوتنی در مقایسه با حالت نیوتنی، کاملاً متفاوت می‌باشد. آن‌ها همچنین مطالعه دیگری به صورت جریان شعاعی در سلول هل-شاو انجام دادند که در آن از نوع خاصی از پلی استایرن^۱ به عنوان سیال غیرنیوتنی استفاده شده بود. مطالعه پهنای انگشتی‌ها تحت تابعی از سرعت پیشروی نوک انگشتی‌ها در جابجایی مخلوط نشدنی توسط بان و همکاران [۲۷] مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه نقش لزجت و کشش سطحی بر ناپایداری انگشتی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با استفاده از مواد پلیمری و سورفکتانت^۲ به بررسی تفاوت‌های به وجود آمده‌ی ناشی از استفاده‌ی این مواد پرداختند. این نویسندگان در بخش دیگری از مطالعات خود از یک محلول پلیمری باریک شونده به عنوان سیال جابجاکننده و از هوا به عنوان سیال جابجاشونده استفاده کرده و به مقایسه شکل انگشتی‌های به وجود آمده پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که در سرعت‌های کم، انگشتی‌هایی باریک و نوک‌تیز به وجود می‌آید در حالی که در سرعت‌های بالاتر انگشتی‌هایی پهن‌تر و بدون نوک‌تیز قابل مشاهده هستند. برای بررسی تأثیرات کشش سطحی بر شکل انگشتی‌ها، آن‌ها با افزودن سورفکتانت‌ها و مقایسه‌ی آن‌ها با حالتی که از محلول‌های پلیمری استفاده کرده بودند، به این نتیجه رسیدند که کشش سطحی تأثیر قابل‌ذکری بر شکل انگشتی‌ها ندارد. از جمله مطالعات دیگری که با استفاده از مواد شیمیایی خاص به بررسی این ناپایداری پرداخته‌اند می‌توان به آزمایش‌های کاواگوچی و همکاران [۲۸] اشاره کرد. آن‌ها از هیدروکسی

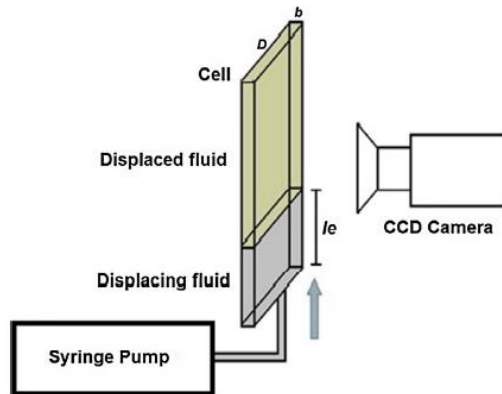
^۱ Polystyrene

^۲ surfactant

پروپیل متیل سلولز^۱ به عنوان سیال غیرنیوتنی و از محلولی از گلیسیرین به عنوان سیال نیوتنی استفاده کردند. آن‌ها از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مشاهده کردند؛ در حالی که هوا، محلول نیوتنی گلیسیرین را جابجا می‌کند، انگشتی‌هایی یکنواخت که در آن‌ها فقط مکانیزم شکافتن نوک انگشتی اتفاق می‌افتد، مشاهده می‌شود در حالی که در حالت دیگری که هوا محلول هیدروکسی پروپیل متیل سلولز را جابجا می‌کند انگشتی‌هایی چند شاخه مشاهده می‌شد. از مطالعات جدیدتری که در این زمینه انجام گرفته است می‌توان به مطالعه‌ای آزمایشگاهی انجام شده توسط مالسچ و همکاران [۲۹] اشاره کرد. آن‌ها به جای استفاده از بستر آکنده^۲ به عنوان محیط متخلخل، از صفحه‌ای مشبک استفاده کردند و با دوربینی با کیفیت بسیار بالا به مشاهده انگشتی‌ها پرداختند. آن‌ها با اعمال اختلاف لزجت‌های متفاوت، چگونگی پیشرفت انگشتی‌ها را مورد مقایسه قرار دادند. اوندانو و همکاران [۳۰] نیز با در نظر گرفتن گرانش، جریانی از نفت که توسط سیال نیوتنی، غیرنیوتنی باریک شونده و ویسکوالاستیک جابجا می‌شد را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که در حضور نیروهای ویسکوالاستیک، سطح مشترک دو سیال با سرعت کم‌تری حرکت می‌کند. آن‌ها با استفاده از این ویژگی و در نظر گرفتن شرایطی خاص، چگونگی بهترین حالت برای جابجایی نفت را گزارش کردند. در شکل ۱-۷ تصویری از سیستم آزمایشگاهی آن‌ها نشان داده شده است. در اکثر مطالعات آزمایشگاهی در زمینه‌ی ناپایداری انگشتی از همین سیستم برای بررسی پارامترهای مؤثر بر این ناپایداری استفاده می‌شود. از مطالعات جدیدتری که می‌توان به آن اشاره کرد، بررسی کیفی اثرات الاستیک بر سیال جابجا شونده با استفاده از سلول هل - شاو توسط مالهورا و شرما [۳۱] می‌باشد. آن‌ها مشاهده کردند که حضور اثرات الاستیک باعث تغییر الگوی انگشتی‌ها می‌شود همچنین تعداد انگشتی‌ها در مقایسه با نوع نیوتنی خود، بیشتر می‌شود.

^۱ Hydroxyl Propyl Methy Cellulose (HPMC)

^۲ Packed bed



شکل ۷-۱ یک نمونه از سیستم آزمایشگاهی بکار رفته در بررسی ناپایداری انگشتی [۳۰]

۸-۱- معرفی مطالعه حاضر و تشریح نوآوری‌ها

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

در این مطالعه با معرفی یک گروه از سیال‌های پلیمری و بیان ساختار و رفتار مولکولی آن‌ها در جریان‌های مختلف، ارتباط بین خواص الاستیک و لزج شکسته شده و این دو عامل مستقل از هم مورد

^۱ Shear thickening

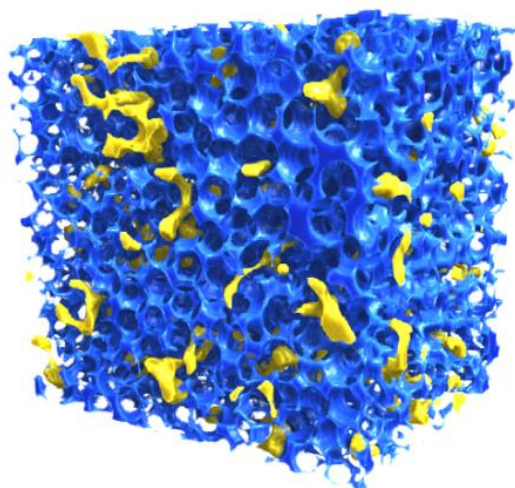
بررسی قرار خواهد گرفت. این گروه خاص که سیالات با گر نامیده می‌شوند، ضمن داشتن خواص الاستیک، در نرخ برش‌های متفاوت لزجت شان تغییر چندانی ندارد. از همین خاصیت برای مقایسه ناپایداری در سیالات نیوتنی استفاده خواهد شد. همچنین با انجام آزمایش‌های متعدد، نتایج در قالب چند نمونه سیال پلیمری با لزجت نسبتاً ثابت گزارش شده و نحوه ساخت آن‌ها با جزئیات، بیان خواهد شد. لزجت نمونه‌ها با بهره‌گیری از ویسکومتری دقیق، اندازه‌گیری و گزارش شده است. با معرفی پارامتری برای سنجش میزان الاستیسیته، خواص الاستیک نمونه‌ها را بررسی و باهم مقایسه نمودیم. با انتخاب یک سیال نیوتنی با لزجتی برابر با نوع پلیمری، هر آزمایش را یک‌بار با سیال پلیمری و بار دیگر با سیال نیوتنی انجام و نتایج حاصل باهم مقایسه می‌شود. با افزایش خواص الاستیک و با ثابت نگه‌داشتن خواص لزج، اثر افزایش این عامل نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. علاوه بر آزمایش‌های غیرنیوتنی، در بخشی از این مطالعه با انجام آزمایش‌هایی، ناپایداری انگشتی لزج در حالت نیوتنی مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل نتایج آزمایش‌های نیوتنی و غیرنیوتنی، به تأثیر عواملی مانند نسبت لزجت‌ها و افزایش نیروهای اینرسی بر نحوه رشد و شکل انگشتی‌ها و همچنین تأثیر آن‌ها بر پارامترهای فیزیکی مهمی از جمله طول اختلاط^۱، بازده جاروبی^۲ و رشد اغتشاش به حالت پایه^۳ نیز پرداخته شده است. طول اختلاط و بازده جاروبی مؤلفه‌هایی هستند که به خوبی قادرند بسیاری از ویژگی‌های این ناپایداری را نشان دهند. نحوه تفسیر و درک ناپایداری بر اساس این دو مؤلفه بیان شده است و نتایج حاصل از آزمایش‌ها، برحسب آن‌ها بیان و تحلیل شده‌اند.

اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه، به بررسی عوامل مختلف مؤثر بر ناپایداری در محیط متخلخل، پرداخته‌اند. دلیل این موضوع واضح است زیرا مخازن نفتی مانند شکل ۱-۸ متخلخل هستند و در حقیقت نفت در این خلل و فرج‌ها گیر افتاده است. در فرآیند استخراج سعی بر خارج ساختن نفت از این محیط می‌باشد. در مطالعات آزمایشگاهی و به‌منظور بررسی رژیم جریان، محیط متخلخل شفاف‌ی که بتواند به خوبی این پدیده را در آن مشاهده کرد، بسیار موردنیاز است.

^۱ Mixing length

^۲ Sweep efficiency

^۳ Base state



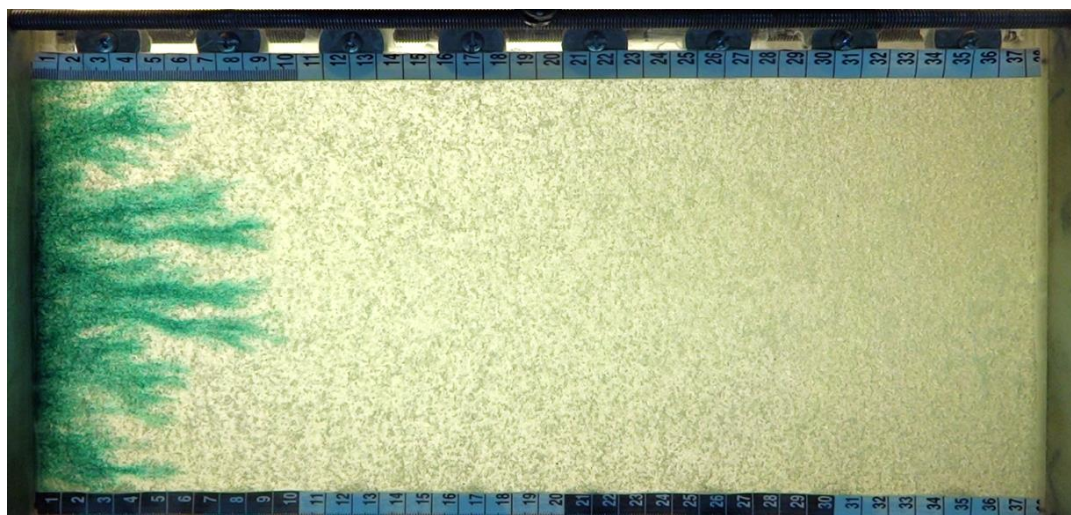
شکل ۸-۱ نفت گیر افتاده در محیط متخلخل

با بررسی مطالعاتی که تاکنون روی این پدیده انجام شده، می توان دریافت که مطالعه این ناپایداری در حالت دوبعدی کافی است، لذا استفاده از سلول هل - شاو برای شبیه سازی محیط متخلخل امری رایج بوده است؛ اما نفوذپذیری^۱ این سلول در مقایسه با مخازن نفتی بستر زمین اختلاف زیادی دارد که در ادامه بیان خواهد شد. در این مطالعه به منظور کاربردی تر شدن نتایج و شبیه سازی دقیق تر محیط متخلخل مخازن نفتی زمین، محیط متخلخل شفاف دوبعدی ای با استفاده از دانه های شیشه^۲ ساخته شده است که تخلخل^۳ و نفوذپذیری آن به مراتب به مخازن نفتی بستر زمین نزدیک تر است. در فصل بعد به تشریح مشخصات این محیط خواهیم پرداخت. در شکل ۹-۱ این محیط متخلخل نشان داده شده است.

1. Permeability

2 Glass beads

3. Porosity



شکل ۹-۱ محیط متخلخل ساخته شده برای مطالعه حاضر

در فصل آینده تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر به طور کامل معرفی خواهند شد. ستاپ آزمایشگاهی و نکات مربوط به ساخت آن، در بخشی جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، همراه معرفی پلیمر مورد استفاده و دستور ساخت سیال، خواص ویسکومتری و الاستیک سیال ها گزارش شده است. در فصل سوم، به نحوه پردازش تصویر، صحت سنجی ساخت سلول و بررسی تکرارپذیری آزمایش ها پرداخته شده است. در فصل چهارم نتایج حاصل از آزمایش ها و اثر عوامل مختلف بر ناپایداری گزارش و بحثی پیرامون آن ها ارائه خواهد شد. در فصل آخر نیز خلاصه نتایج پژوهش و علل آن ها بیان می گردد.

فصل ۲

مواد، تجهیزات و ستاپ آزمایش

در این فصل ابتدا به معرفی تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده خواهیم پرداخت، سپس اجزای مختلف ستاپ ساخته شده تشریح خواهد شد، پس از آن سیالات مورد استفاده و خواص آنها بررسی شده و در ادامه اعداد بی بعد مورد استفاده بیان می‌گردد، در نهایت نیز مراحل انجام آزمایش بیان می‌شود.

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

۲-۱-۱ همزن هات پلیت^۱

دستگاه هات پلیت، دستگاهی است که برای مصارف عمومی در آزمایشگاه طراحی و تولید شده است. دستگاه هات پلیت IKA RCT با همزن مغناطیسی می‌تواند هم‌زمان در حالی که مایع درون ظرف را گرم می‌کند آن را هم بزند. این دستگاه از یک صفحه حرارت دهنده که معمولاً از جنس آلومینیوم فشرده می‌باشد، تشکیل شده است. صفحه کنترل دارای دو ولوم می‌باشد. یکی از آن‌ها مشخص‌کننده دمای صفحه حرارت دهنده است که معمولاً تا ۳۰۰ درجه سانتی-گراد را حرارت می‌دهد و با ولوم دیگر که مربوط به موتور است، می‌توان سرعت چرخش سیستم مغناطیسی دستگاه را تنظیم نمود و آن را تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه رساند. برای آزمایش‌های گوناگون دما و سرعت چرخش به صورت مستقل قابل تنظیم می‌باشد. به منظور مخلوط نمودن مایعات از مگنت داخل ظرف و بدون ارتباط مکانیکی استفاده می‌شود. طرز کار دستگاه بدین صورت است که در زیر صفحه اصلی یک آهنربا وجود دارد که توسط یک موتور به حرکت درمی‌آید و با جابجا شدن قطب‌های آهنربا و قرار گرفتن قطب‌های همنام و دفع یکدیگر مگنت داخل بشر به حرکت درمی‌آید.

در صورت نیاز و تسریع در انحلال مواد می‌توان به سیال گرما داد و یا سرعت چرخش را بالا برد، ولی برای ساخت سیالات غیر نیوتنی در این آزمایش به خاطر از بین رفتن رشته‌های مولکولی پلیمر، تمام فرآیندهای همگن‌سازی در دمای محیط (۲۴ درجه سانتی‌گراد) و با

¹ Hot plate stirrer

سرعت ۱۰۰-۱۱۰ دور بر دقیقه انجام گرفته شده است. در شکل ۱-۲ همزن مورد استفاده در این تحقیق نمایش داده شده است.



شکل ۱-۲ همزن هات پلیت IKA RCT

۲-۱-۲ دستگاه ویسکومتر

برای محاسبه لزجت سیالات نیوتنی موجود در آزمایش‌ها و همچنین تعیین تغییرات لزجت بر حسب نرخ برش محلول‌های پلیمری، از ویسکومتر Brookfield مدل DVE-LV استفاده کردیم که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. محدوده مجاز این دستگاه ۱-۲۰۰۰۰۰۰ سانتی پواز^۱ است (البته در صورت موجود بودن تمام اسپیندل‌های^۲ مرتبط با دستگاه).

در این نوع از ویسکومترها یک سیلندر (Bob) درون استوانه دیگری (Cup) قرار گرفته، سیال در حجم محصور بین این دو استوانه ریخته می‌شود و یکی از استوانه‌ها را با سرعت زاویه‌ای (Ω) معینی چرخانده، گشتاور (T) را بر روی استوانه چرخان یا استوانه ثابت اندازه می‌گیریم. بنابراین رابطه گشتاور و سرعت زاویه‌ای به دست می‌آید. اما از طرفی تنش وارده از طرف سیال (τ) بر روی دیواره استوانه‌ها با گشتاور رابطه مستقیم داشته و نرخ برش ($\dot{\gamma}$) نیز با سرعت درون استوانه متناسب است. در نهایت از روی این روابط، ارتباط

¹ centipoise

² spindle

تنش و سرعت برش به دست می‌آید و با توجه به رابطه (۲۲-۱)، لزجت در نرخ برش‌های مختلف به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (۲۲-۱)$$



شکل ۲-۲ ویسکومتر Brookfield مدل DVE-LV

۳-۱-۲ پمپ پرستالتیک^۱

پمپ پرستالتیک از دسته پمپ‌هایی است که به‌منظور جابجایی مایع با دقت بالا و نواخت یکسان در زمان طولانی استفاده می‌گردد. این پمپ جریان را به‌صورت ضربه‌ای (پالس به پالس) انتقال می‌دهد. پمپ پرستالتیک از سه قسمت کلی تشکیل شده است:

۱. درایو پمپ^۲ پرستالتیک که مجموعه موتور دستگاه همراه، سیستم کنترلر، نمایشگر، ورودی‌ها و خروجی‌ها و جعبه حاوی آن‌ها می‌باشد.

^۱ Peristaltic pump

^۲ Pump drive

۲. هد پمپ^۱ پرستالتیک که به قسمتی گفته می‌شود که روی محور موتور دستگاه نصب می‌شود و دارای چند غلطک می‌باشد که با ایجاد فشار روی بدنه بیرونی شلنگ، درون شلنگ ایجاد خلأ و فشار می‌نمایند و سبب جابجا شدن مایع از یک سر شلنگ به سر دیگر آن می‌شوند.

۳. شلنگ منعطف^۲ (شلنگ سیلیکون) که به سبب خاصیت فیزیکی امکان انحنای به درون، توسط غلطک های هد و بازگشت به حالت اولیه را، پس از عبور هر غلطک دارا می‌باشد. معروفترین نوع این شلنگ‌ها، از جنس سیلیکون می‌باشد.

پمپ مورد استفاده در این آزمایش، مدل BT100-1F از سری دیسپنسر^۳ پمپ‌های پرستالتیک کمپانی Longer می‌باشد (شکل ۲-۳) که توانایی تأمین دبی ۲-۵۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه را دارد.



شکل ۲-۳ پمپ پرستالتیک مدل BT100-1F کمپانی Longer

۲-۱-۴ دمپر پمپ

همان‌طور که اشاره شد، پمپ پرستالتیک جریان را به صورت پایدار انتقال نمی‌دهد. به منظور از بین بردن پالس‌هایی که این پمپ به جریان منتقل می‌کند و جلوگیری از تأثیر آن بر نحوه شکل‌گیری و رشد

¹ Pump Head

² Flexible tube

³ Dispenser

انگشتی‌ها در مرز ناپایداری، از دمپر پمپ پریستالتیک (شکل ۲-۴) استفاده می‌شود. این دمپر در حقیقت یک مخزن تحت فشار است که از دو قسمت بالا و پایین تشکیل شده است. قسمت بالا از هوا پر شده است. هنگامی که سیال از قسمت پایین دمپر عبور می‌کند، پالس‌های جریان به هوای قسمت بالای دمپر منتقل و جذب آن می‌شود و در خروجی دمپر، شاهد جریانی پایدار هستیم.



شکل ۲-۴ دمپر پمپ پریستالتیک

۲-۱-۵ ترازو

در این پژوهش نمونه‌برداری‌ها توسط ترازوی شرکت RADWAG مدل PS 510/C/1 با دقت ۰,۰۰۱ گرم انجام گرفته است (شکل ۲-۵). بیشترین اهمیت این دقت بالا، در ساخت پلیمر با غلظت‌های پایین نمایانگر بوده است.



شکل ۲-۵ ترازوی شرکت RADWAG مدل PS 510/C/1

۶-۱-۲ دوربین

در آزمایش‌های صورت گرفته به دلیل این که دبی سیال تزریق شونده نسبتاً پایین است و پیشرفت پدیده به آهستگی صورت می‌گیرد، استفاده از دوربین‌های سرعت بالا^۱ ضروری نبود. لذا سعی بر این شد از دوربین با کیفیت و رزولوشن بالا استفاده شود تا جزئیات بیشتری در تصاویر معلوم باشد. به همین منظور از یک دوربین ۱۸ مگاپیکسلی ساخت شرکت سونی^۲ شکل ۶-۲ مجهز به لرزش گیر اپتیکال تصویر، جهت کاهش اغتشاش، که قابلیت فیلم‌برداری Full HD با سرعت ۵۰ فریم بر ثانیه و رزولوشن ۱۹۲۰×۱۰۸۰ را داراست، استفاده شد.



شکل ۶-۲ دوربین سونی مدل Cyber-shot DSC-WX220

۷-۱-۲ دستگاه رئومتر^۳

برای اندازه‌گیری خواص رئومتری سیالات غیرنیوتنی منتخب در این تحقیق، از دستگاه رئومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar استفاده شده است. تمام آزمایش‌های رئومتری توسط آزمایشگاه مرکزی شاهرود انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جداول پیوست موجود می‌باشد. در شکل ۷-۲ این دستگاه مشاهده می‌شود.

^۱ High speed camera

^۲ Sony Cyber-shot DSC-WX220

^۳ Rheometer



شکل ۲-۷ دستگاه رئومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar

۲-۲-۲- ستاپ^۱ آزمایشگاهی

۲-۲-۱- محیط متخلخل شفاف

به علت کاربرد زیاد پدیده انگشتی لزج در استخراج ثانویه و ثالثیه از مخازن نفتی بستر زمین، مطالعات پیرامون این پدیده بیشتر در محیط متخلخل انجام می‌شود. در این مطالعه قصد داریم به رفتار این ناپایداری با تغییر در خواص سیال‌ها و دبی جریان بپردازیم. بنابراین محیط متخلخل مورد استفاده باید شفاف باشد، تا تغییرات پدیده قابل ثبت و بررسی باشند. همان‌طور که در فصل قبل نیز بیان شد سلول هل - شاو محیطی شفاف و مشابه با یک محیط متخلخل واقعی است. نفوذپذیری در سلول هل - شاو از رابطه (۲-۲) به دست می‌آید [۳۲].

$$k = \frac{b^2}{12} \quad (2-2)$$

در رابطه بالا b فاصله بین دو صفحه سلول می‌باشد. سلول هل - شاوی با فاصله بین دو

صفحه $b = 1 \text{ mm}$ [۳۱] نفوذپذیری‌ای برابر با $K = 8/33 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ خواهد داشت.

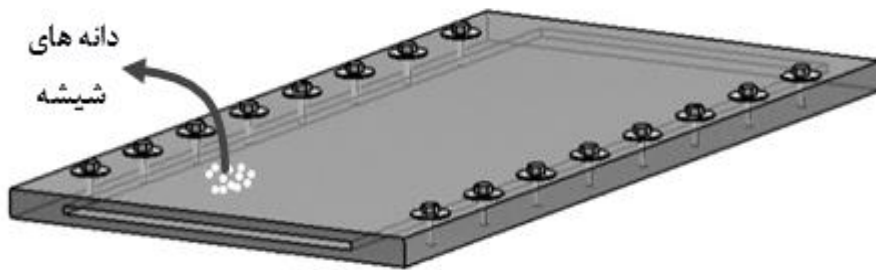
^۱ Setup

تخلخل و نفوذپذیری در میدان‌های نفتی مقدار ثابتی نیست و به عوامل مختلفی بستگی دارد. به‌عنوان نمونه در میدان گازی پارس جنوبی، سنگ مخزن از توالی‌های کربناته و تبخیری تشکیل شده است. تخلخل و نفوذپذیری رسوبات کربناته معمولاً پس از رسوب‌گذاری تحت تأثیر فشار روباره (افزایش عمق تدفین) در اعماق کم بشدت کاهش می‌یابد؛ ولی تقریباً در اعماق بیشتر از ۱ km افزایش عمق تأثیر چندانی بر روی کیفیت مخزنی سنگ‌های کربناته نمی‌گذارد [۳۳]. در حالت کلی تغییرات زیادی در تخلخل سنگ مخزن در جهت عمودی دیده می‌شود اما در جهت موازی با صفحات لایه‌ها این تغییرات زیاد نیست [۳۴]. در این مطالعه به‌منظور کاربردی‌تر کردن نتایج و نزدیک کردن بیشتر آن‌ها به واقعیت، سعی کردیم محیط متخلخلی شفاف بسازیم که نسبت به سلول هل - شاو، پارامترهای مؤثر بر ناپایداری، به مخازن نفتی شباهت بیشتری داشته باشد. از آنجاکه مخازن نفتی از جنس‌های متفاوتی تشکیل شده‌اند، بستری از جنس ماسه سنگ نفت^۱ به‌عنوان مرجع انتخاب شد. محیط متخلخل ساخته شده در این پژوهش شبیه‌سازی ساده‌ای از یک مخزن نفتی از جنس ماسه سنگ نفت، در یک عمق ثابت می‌باشد که تخلخل و نفوذپذیری آن ثابت است. با توجه به محدودیت‌هایی که برای ساخت یک محیط متخلخل شفاف مصنوعی وجود داشت (آب‌بند بودن محیط، حفظ شفافیت در کل ضخامت محیط متخلخل به‌منظور مشاهده بهتر فینگرها، تحمل فشار و عدم جابجایی دانه‌های شیشه و...)، دانه‌های شیشه در اندازه‌ای انتخاب شد تا تخلخل و نفوذپذیری تا حد امکان به محدوده ماسه سنگ نفت نزدیک باشند.

به‌منظور ایجاد محیط متخلخل با تخلخل و نفوذپذیری نزدیک به محدوده بیان شده که بتوان ناپایداری را در آن مشاهده کرد، محفظه‌ای شفاف از پلکسی گلس^۲ ساخته شد که در شکل ۲-۸ به صورت شماتیک مشاهده می‌شود. این محفظه دارای شکافی به ضخامت ۴/۵mm است. طول این شکاف ۴۰۰mm و عرض آن ۱۵۹mm است. داخل این شکاف از مخلوط همگن دانه‌های شیشه کروی به قطر ۰/۹-۰/۶mm به صورت تصادفی، فشرده و پر شده و دو سر شکاف با صفحات توری بسته شده است.

^۱ Sandstone (Oil sand)

^۲ Plexiglass

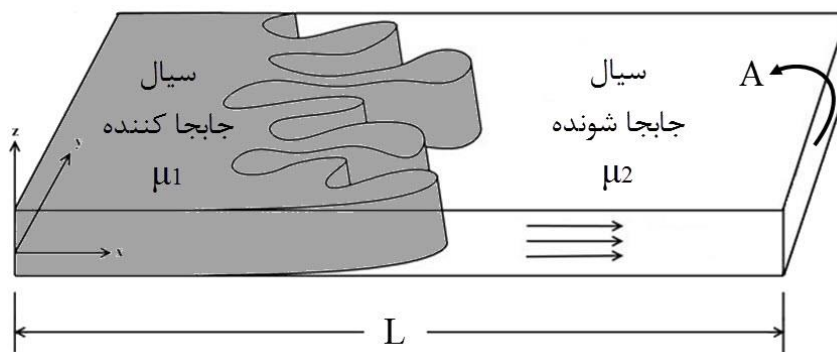


شکل ۸-۲ نمای شماتیک محیط متخلخل ساخته شده برای این مطالعه

برای محاسبه نفوذپذیری محیط متخلخل ساخته شده در این مطالعه، معادله مومنوم داری با توجه به هندسه جریان در این محیط، به صورت رابطه (۳-۲) نوشته می شود [۳۵].

$$k = \frac{Q\mu L}{\Delta P A} \quad (3-2)$$

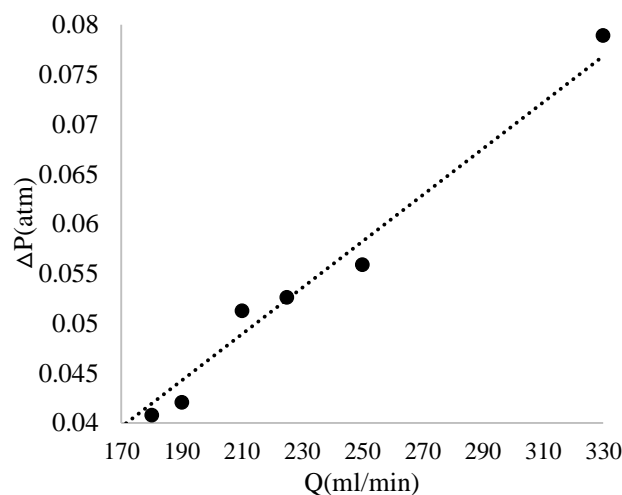
در این معادله L طول و A سطح مقطع ورودی محیط متخلخل است که در شکل ۹-۲ نشان داده شده است.



شکل ۹-۲ هندسه جریان در محیط متخلخل

برای به دست آوردن نفوذپذیری این محیط، آب را با دبی های مختلف به آن تزریق و هر بار اختلاف فشار دو طرف محیط متخلخل اندازه گرفته شد. نتایج این آزمایش ها به صورت شکل ۱۰-۲ به دست آمد. با محاسبه شیب خطی که بر داده های شکل ۱۰-۲ منطبق شده، $\frac{\Delta P}{Q} = 2/3 \times 10^{-4}$ بدست می آید؛ با قرار

دادن این مقدار در رابطه (۳-۲) همچنین جایگذاری ابعاد محیط و لزجت آب در این رابطه، نفوذپذیری محیط $K=4/04 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ به دست می‌آید. مشاهده می‌شود که نفوذپذیری محیط متخلخل ساخته شده در این پژوهش، حدود ۲۰۶ برابر کمتر از سلول هل- شاو بیان شده با ضخامت بین دو صفحه $b = 1 \text{ mm}$ است. در مخازن نفتی که از جنس ماسه سنگ نفت می‌باشند، نفوذپذیری در محدوده 10^{-12} m^2 - 10^{-16} می‌باشد [۳۵].



شکل ۱۰-۲ اختلاف فشار دو سر محیط متخلخل در دبی‌های مختلف تزریق آب

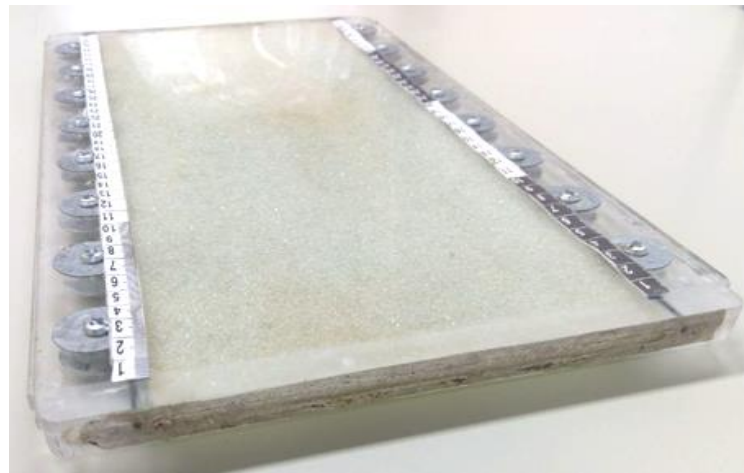
همان‌طور که در فصل قبل بیان شد، تخلخل به صورت رابطه (۴-۲) محاسبه می‌شود.

$$\varphi = \frac{\text{حجم منافذ محیط متخلخل}}{\text{حجم کل محیط متخلخل}} \quad (4-2)$$

برای محاسبه حجم منافذ محیط متخلخل ساخته شده، ابتدا محیط را در حالتی که هیچ سیالی در آن نبود وزن کردیم سپس محیط را کاملاً پر از آب کردیم و مجدداً وزن آن را حساب کردیم، تفاضل این دو، وزن آبی بود که در محیط وجود داشت، با مشخص بودن چگالی آب، حجم آبی که در منافذ محیط متخلخل قرار داشت یا به عبارتی حجم منافذ محیط متخلخل به دست آمد، با داشتن ابعاد کل محیط متخلخل حجم کل محیط محاسبه شد و در نهایت با جایگذاری مقادیر به دست آمده در رابطه (۴-۲)،

تخلخل $\varphi=0.39$ بدست آمد. در مخازن نفتی که از جنس ماسه سنگ نفت می باشند تخلخل در محدوده $\varphi=0.08 - 0.38$ است [۳۵].

با بررسی تخلخل و نفوذپذیری ماسه سنگ نفت و مقایسه آن با این پارامترها در محیط متخلخل ساخته شده در این مطالعه که در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده، مشاهده می شود که شباهت این محیط نسبت به سلول هل - شاو به ماسه سنگ نفت بیشتر شده است؛ لذا نتایج به دست آمده از این پژوهش به واقعیت نزدیک تر بوده و برای مخازن نفتی که از ماسه سنگ نفت تشکیل شده اند، کاربردی خواهد بود.



شکل ۱۱-۲ محیط متخلخل ساخته شده در این مطالعه

۲-۲-۲ شیر ورودی و خروجی

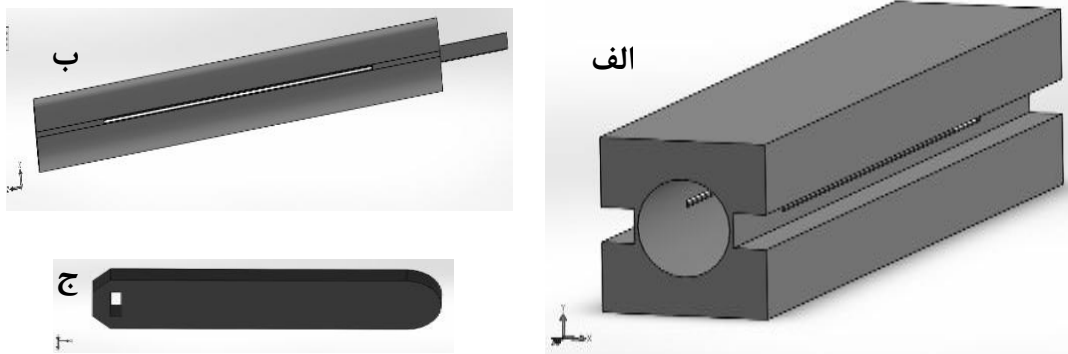
شیر ورودی و خروجی محیط متخلخل با الهام گرفتن از مکانیزم شیر توپی^۱ شکل ۱۲-۲، به گونه ای ساخته شده که به محض باز شدن، دو سیال در تمام مقطع محیط متخلخل در یک لحظه باهم در تماس قرار بگیرند.

^۱. Ball valve



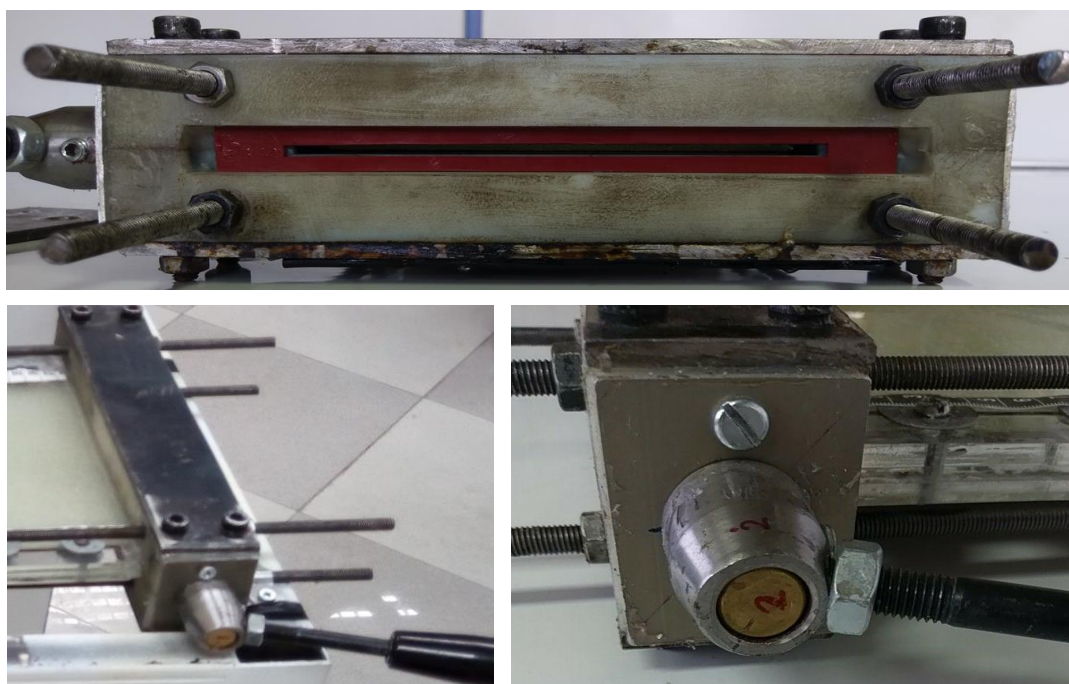
شکل ۱۲-۲ مکانیزم شیر توپی

شیرهای توپی شیرهای ساده قطع و وصل هستند که از یک قطعه توپی شکل برای متوقف کردن و راه اندازی دبی سیال در پایین دست شیر استفاده می شود. با چرخش دسته شیر به سمت موقعیت باز شدن توپی چرخیده و سوراخی که در وسط آن تعبیه شده است، در مسیر ورود و خروج سیال قرار می گیرد و در نتیجه سیال از شیر عبور می کند. وقتی که توپی طوری بچرخد که سوراخ آن عمود بر مسیر سیال قرار گیرد، دبی سیال متوقف می گردد. با همین ایده، یک شیر ورودی و یک شیر خروجی برای ابتدا و انتهای محیط متخلخل، طراحی شد. اجزای اصلی این شیرها مطابق شکل ۱۳-۲ می باشد.



شکل ۱۳-۲ اجزای اصلی شیر: الف) بدنه شیر ب) استوانه برنجی شیاردار ج) دستگیره شیر

بدنه شیرها از جنس پلی آمید^۱ ساخته شده است. پلی آمیدها موادی چقرمه^۲، با مقاومت سایشی بالا، ضربه‌پذیر، دارای مقاومت ترکیبگی بالا و مقاومت ترک‌خوردگی بالا در خم شدن‌های متوالی هستند. توپی در این شیر، استوانه‌ای برنجی است که شیاری به‌اندازه سطح مقطع محیط متخلخل $4/5 \times 159 \text{ mm}$ دارد. در حالی که شیر باز باشد، شکاف برابر مقطع ورودی و خروجی شیر قرار گرفته و جریان را از خود عبور می‌دهد؛ با چرخش 90° درجه‌ای دسته شیر، شکاف استوانه برنجی عمود بر مقطع ورود و خروج شیر قرار گرفته و جریان قطع می‌شود. در شکل ۲-۱۴ نمای مختلف از این شیر که به محیط متخلخل متصل شده مشاهده می‌شود. در داخل شکاف‌هایی که در شیرها برای قرار گرفتن سایر قطعات ستاپ ایجاد شده، یک واشر لاستیکی تخت از جنس سیلیکون کاشته شده که نقش آب‌بندی بین قطعات را بر عهده دارد. به‌منظور اتصال شیرها با یکدیگر و با سایر قطعات سوراخ‌هایی در چهار طرف شیرها ایجاد شده و به‌وسیله چهار پیچ رزوه قطعات ستاپ مهار می‌شوند.



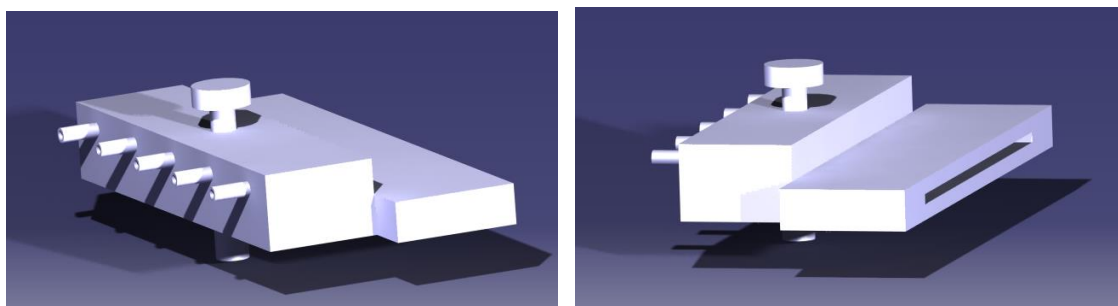
شکل ۲-۱۴ شیر ورودی و خروجی محیط متخلخل

^۱. Polyamide

^۲. High Fracture Toughness

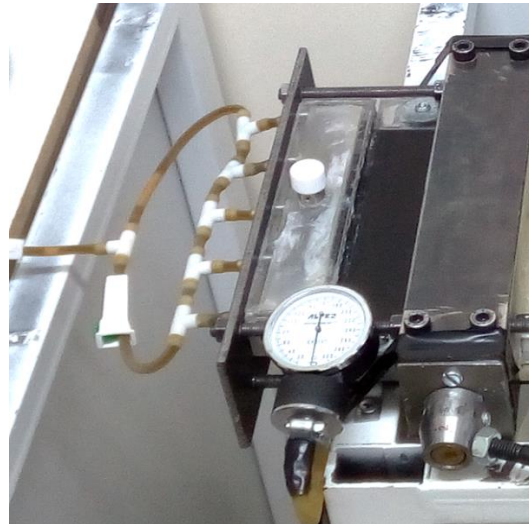
۳-۲-۲ کلکتور ورودی

تزیق سیال جابجا کننده توسط پمپ پرستالتیک و با استفاده از دمپر انجام می شود. به منظور یکنواخت و یکدست کردن جریان و حرکت جبهه سیال در تمام مقطع محیط متخلخل به صورت خطی، از کلکتور ورودی استفاده کردیم. در فصل آینده با انجام آزمایش هایی، یکنواخت کردن جریان توسط کلکتور ورودی را بررسی خواهیم کرد. شکل ۱۵-۲ مدل طراحی شده این کلکتور را نشان می دهد.



شکل ۱۵-۲ کلکتور ورودی

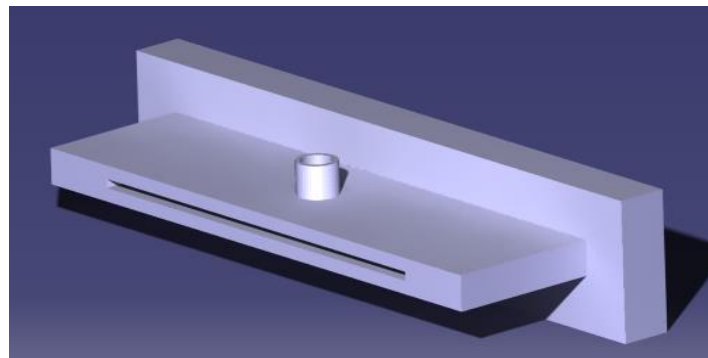
سیالی که از دمپر پمپ توسط یک شیلنگ سیلیکونی خارج می شود، توسط یک تبدیل از جنس شیلنگ سیلیکون به پنج قسمت تقسیم و از طریق پنج شیلنگ با قطر کوچک به پنج ورودی کلکتور که در شکل ۱۵-۲ دیده می شود، متصل می شود. در ادامه سیال از مخزن کلکتور، وارد کانال پایدارکننده می شود. مقطع این کانال برابر با مقطع محیط متخلخل است و طول آن نیز ۵cm می باشد. برای مشاهده سیال درون کلکتور و کانال پایدارکننده، این قسمت ها از پلکسی گلس شفاف ساخته شده است. به منظور خارج کردن حباب های هوای احتمالی در سیال ورودی و جلوگیری از ورود آن به محیط متخلخل، در بالای مخزن کلکتور یک شیر هوا تعبیه شده است. در کف مخزن نیز برای تخلیه و شست و شوی کلکتور و محیط متخلخل، یک خروجی پیش بینی شده است. برای محاسبه فشار، یک گیج فشارسنج به وسیله شیلنگ سیلیکونی به رابطی که روی خروجی کف مخزن کلکتور قبل از شیر ربع گرد قرار دارد، متصل می شود. این کلکتور با استفاده از یک صفحه آهنی و به کمک چهار پیچ رزوه به شیرها متصل شده است. در شکل ۱۶-۲ کلکتور ورودی متصل به شیر، به همراه متعلقات نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۶ کلکتور ورودی به همراه متعلقات

۲-۲-۴ رابط شیر خروجی

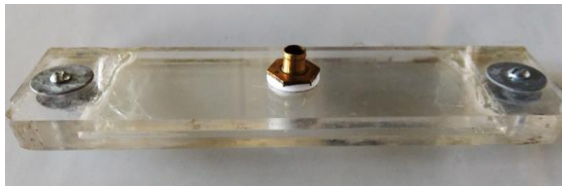
برای پر کردن محیط متخلخل از سیال بستر (سیال جابجا شونده در آزمایش‌ها) این رابط به شیر خروجی متصل شده و سیال موردنظر را از طریق یک شیلنگ سیلیکونی که به پمپ متصل است به سمت محیط متخلخل هدایت می‌کند. شکل ۲-۱۷ مدل طراحی شده این رابط را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۷ مدل طراحی شده رابط شیر خروجی

سطح مقطع این رابط و محیط متخلخل یکسان می‌باشد. این رابط که از پلکسی گلس ساخته شده است، از یک طرف داخل شکاف تعبیه شده در شیر قرار می‌گیرد و از سمت دیگر به وسیله صفحه‌ای که با

چهار پیچ رزوه به شیرها متصل است، مهار می‌شود. از این رابط برای شست و شوی محیط بعد از هر آزمایش نیز استفاده می‌شود. در شکل ۱۸-۲ این رابط به صورت مجزا و در حالتی که به ستاپ متصل شده، مشاهده می‌شود.

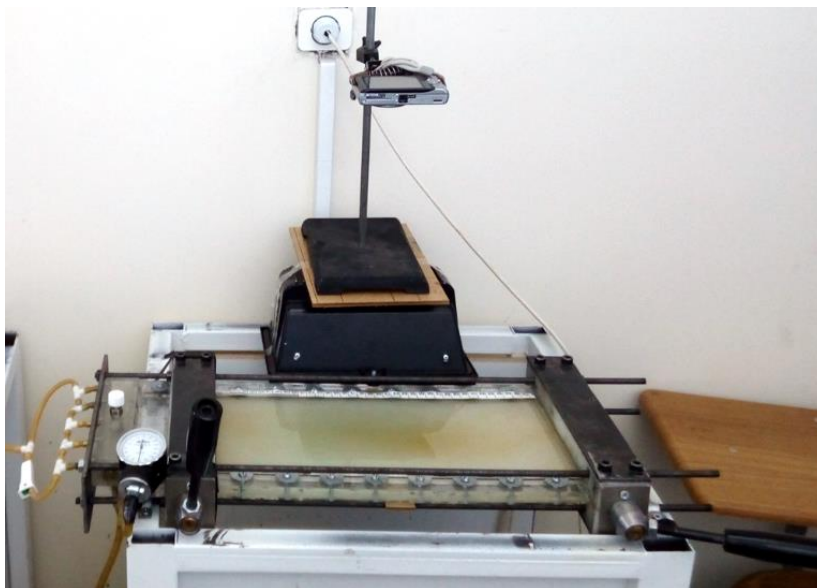


شکل ۱۸-۲ رابط شیر خروجی

۵-۲-۲ ستاپ آزمایش

تا اینجا به تشریح تک تک اجزای ستاپ پرداختیم. این ستاپ طوری طراحی شده که پدیده ناپایداری انگشتی لزج در آن به صورت افقی اتفاق می‌افتد. (به دلیل ضخامت کم محیط متخلخل، می‌توان از تأثیر نیروی گرانش روی این ناپایداری صرف نظر کرد). به منظور سهولت باز و بست قطعات مختلف، مجموعه ستاپ طوری طراحی شده که برای آببندی بین قطعات، نیازی به استفاده از چسب نیست و تمام قطعات به وسیله لاستیک‌های تخت سیلیکونی در محل تماس شان باهم، تحت فشار آببندی می‌شوند. برای ایجاد این فشار از چهار پیچ رزوه که در چهار طرف ستاپ جایگذاری شده، استفاده می‌شود. تنظیم فشار مورد نیاز هر قطعه به کمک مهره‌هایی که داخل پیچ رزوه و پشت قطعه قرار گرفته، انجام می‌شود. به منظور ثابت کردن مجموعه ستاپ بسته شده، این ستاپ روی یک میز افقی قرار گرفته و نصب می‌شود. برای ثبت پدیده ناپایداری انگشتی

لزوج، دوربین فیلم‌برداری به کمک یک پایه قابل تنظیم متصل به میز ستاپ، روی محیط متخلخل قرار می‌گیرد. شکل ۱۹-۲ ستاپ را در حالت بسته‌شده روی میز افقی نشان می‌دهد.



شکل ۱۹-۲ ستاپ بسته‌شده روی میز افقی

۲-۳- سیالات مورد استفاده

به منظور بررسی کامل اثرات الاستیک بر ناپایداری انگشتی لزج، باید اثرات لزجت را ثابت نگه داشت. این امر، کاری بس دشوار است. چون این دو عامل به شدت، روی هم اثر می‌گذارند. همان‌طور که در مقدمه نیز آمد، با استفاده از سیالات باگر، این مشکل برطرف شده است.

سیال‌های بررسی شده در این مطالعه، دودسته هستند:

۱- سیالات نیوتنی (آب خالص یا محلول آب و گلیسرین با درصد حجمی مشخص).

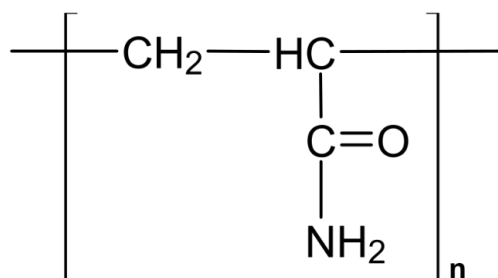
۲- محلول‌های پلیمری (باگر) ساخته شده از پلی‌آکریلامید^۱ با غلظت پایین

^۱ Polyacrylamide

۲-۳-۱ محلول پلیمری

یک بافت پلیمری را می‌توان مجموعه‌ای از ساختارهای کوچک دانست (مونومرها) که این ساختار به تعداد بسیار زیادی تکرار شده است. تولید پلیمر طی فرایندی به نام پلیمریزاسیون^۱ اتفاق می‌افتد که دو نوع عمده آن تغلیظ^۲ و اضافه کردن^۳ می‌باشد. پلیمریزاسیون به روش اضافه کردن زمانی اتفاق می‌افتد که یک رادیکال آزاد به ماده اضافه شود. رادیکال آزاد به موادی که اتصالات دوتایی دارند حمله می‌کند 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 ۲-۲۰ نمایی از پیوندهای مولکولی این ماده نمایش داده شده است.



شکل ۲-۲۰ نمایی از پیوندهای مولکولی پلی آکریلامید.

پلی آکریلامید در دسته‌ی پرکاربردترین پلیمرها در صنایع مختلف است. در اکثر موارد کاربردهای پلی آکریلامید، این ماده در یک ماده پایه آبی محلول است. این پلیمر به صورت پودری سفیدرنگ و بدون بو شکل ۲-۲۱ موجود است. در این مطالعه از پلی آکریلامید با جرم مولکولی 5×10^6 گرم بر مول برای ساخت پلیمر استفاده شده است.

^۱ Polymerization

^۲ Condensation

^۳ Addition



شکل ۲-۲۱ پودر پلیمر پلی آکریلامید

در تمام آزمایش‌ها، برای ساخت محلول پلیمری، ابتدا مقدار کمی از پودر پلی آکریلامید (به‌اندازه درصد جرمی موردنظر) به آب مقطر افزوده می‌شود. پس از اطمینان از حل شدن کامل پودر پلیمر در آب و همگن بودن آن، به آرامی گلیسرین به آن اضافه می‌گردد. افزودن اندکی پلی آکریلامید به آب، موجب اندکی تغییر در لزجت و ایجاد خاصیت کشسانی می‌گردد. گلیسرین و آب به راحتی در یکدیگر حل می‌شوند. از گلیسرین به‌عنوان عامل تنظیم لزجت استفاده می‌گردد. این نکته قابل توجه است که چنانچه ماده پلیمری به خوبی در آب حل نشده باشد، تشخیص آن کار ساده‌ای نیست اما با افزودن گلیسرین ناهمگنی‌ها به صورت رگه در محلول نمایان خواهند شد. شکل ۲-۲۲ تصاویر آب مقطر، گلیسرین و پلی آکریلامید استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۲ آب مقطر، گلیسرین و پلی آکریلامید استفاده‌شده در این پژوهش

۲-۳-۲ سیالات غیرنیوتنی باگر منتخب برای آزمایش‌ها

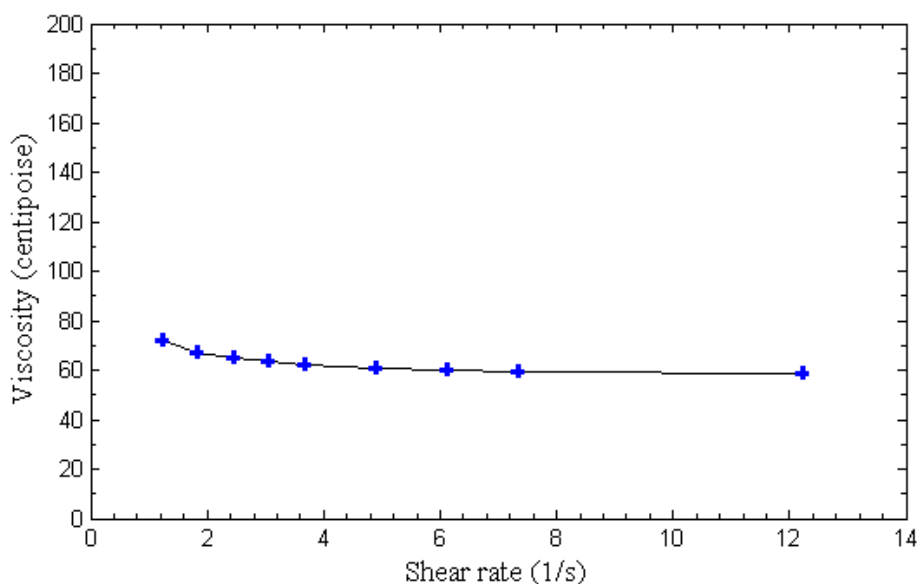
در این مطالعه قرار است که پدیده‌ی ناپایداری انگشتی لزج در حضور اثرات الاستیک با حالتی که سیال‌ها نیوتنی هستند، مقایسه شود و همان‌طور که می‌دانیم عامل اساسی بروز این ناپایداری اختلاف لزجت بین دو سیال است. بنابراین هر سیال باگر که انتخاب شود، باید سیال نیوتنی با لزجت برابر هم داشته باشد.

با در نظر گرفتن این نکات لزجت سیال‌های منتخب باید به گونه‌ای باشد که با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی امکان ساخت آن‌ها وجود داشته باشد. با عنایت به تمام موارد فوق و ساخت و نمونه‌گیری از نمونه‌های مختلف ساخته شده، در نهایت دو سیال غیر نیوتنی باگر و مدل نیوتنی آن‌ها برای بررسی اثرات الاستیک انتخاب گردیدند که نتیجه تست لزجت برحسب نرخ برش آن‌ها به همراه درصد ترکیب اجزای آن‌ها در زیر آمده است. سیال باگر تولیدشده، بی‌رنگ می‌باشند. به خاطر اینکه بتوان مرز بین این دو سیال را تشخیص داد، از مواد رنگ دهنده استفاده می‌کنیم. باید توجه داشت که اکثر مواد رنگ دهنده محلول در آب جزء نمک‌ها دسته‌بندی می‌شوند و این مواد می‌توانند تأثیرات زیادی روی خواص سیال داشته باشند (معمولاً باعث کاهش شدید لزجت و خواص الاستیک سیال می‌شوند). پس با توجه به دانستن این مسئله، در ابتدای امر به همان میزان رنگ که به محلول اضافه خواهیم کرد از مقدار آب کم کرده و به همراه آب و پلیمر درون بشر ریخته و ترکیب می‌کنیم. رنگ خوراکی مشکلی که به‌سادگی در آب حل می‌شود و تأثیرات کمی روی ماده ویسکوالاستیک دارد، در این آزمایش انتخاب شده است. به این منظور، مقدار بسیار کمی از این ماده (کم‌تر از ۱ گرم) برای مدت ۱ ساعت با محلول آب و پلیمر مخلوط شده است. هم‌زدن محلول به مدت ۲۴ ساعت با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه در دمای محیط 25°C توسط هات پلیت انجام می‌شود. بعد از این مرحله، گلیسرین به تدریج به محلول اضافه شده و سیال برای مدت ۲۴ ساعت هم‌خورده تا به یک محلول کاملاً همگن تبدیل شود. (در تمام آزمایش‌ها، برای مشاهده بهتر مرز ناپایداری، به سیال جابجا کننده رنگ خوراکی مشکلی افزوده شده است).

نمونه پلیمری اول: این نمونه از ترکیب $0.05 / 0.1$ جرمی (۵۰ ppm) پلی آکریلامید 5×10^6 گرم

بر مول در مخلوط آب و گلیسرین با نسبت ۲۰ - ۸۰ حجمی تشکیل شده است. در ادامه برای راحتی، این

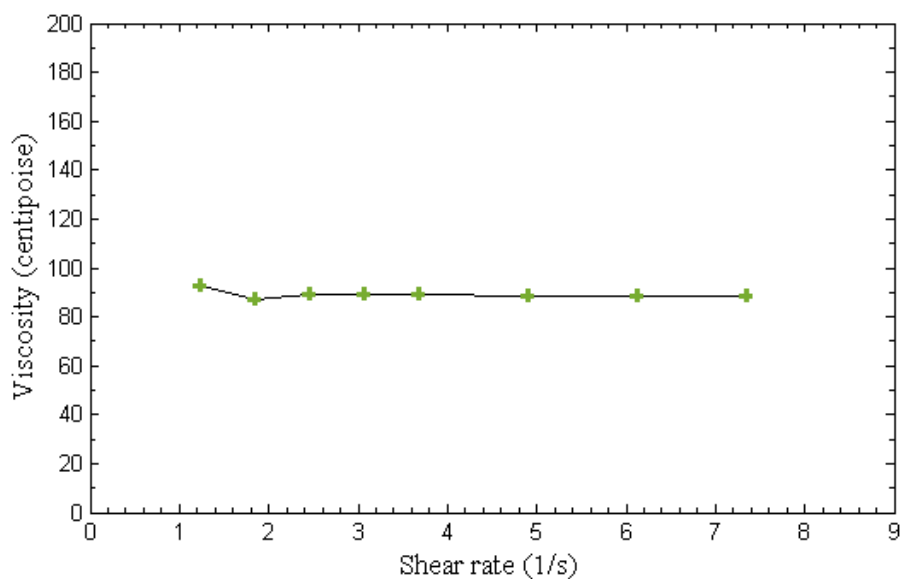
ترکیب تحت عنوان "باگر ۵۰" نام برده می‌شود. شکل ۲-۲۳ نتیجه‌ی آزمون لزجت برحسب نرخ برش این نمونه را نشان می‌دهد که توسط ویسکومتر موجود در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. لزجت معادل این نمونه ۶۳/۶۶ سانتی پواز در نظر گرفته شده است.



شکل ۲-۲۳ آزمون لزجت برحسب نرخ برش باگر ۵۰

برای ساخت سیال نیوتنی با لزجت معادل باگر ۵۰، از محلول آب و گلیسرین با درصد حجمی ۷۹/۵٪ گلیسرین استفاده شد.

نمونه پلیمری دوم: ساخت نمونه‌ی پلیمری دوم نیز کاملاً مشابه نمونه‌ی اول است با این تفاوت که در این نمونه از ترکیب ۰,۰۱٪ جرمی (۱۰۰ ppm) پلی آکریلامید 5×10^6 گرم بر مول با آب و گلیسرین با نسبت ۲۰ - ۸۰ حجمی استفاده شده است. از این پس این ترکیب نیز تحت عنوان "باگر ۱۰۰" نام برده می‌شود. شکل ۲-۲۴ نتیجه‌ی آزمون لزجت برحسب نرخ برش این نمونه را نشان می‌دهد. لزجت معادل این سیال ۸۹/۱۸ سانتی پواز می‌باشد.



شکل ۲-۲۴ آزمون لزجت برحسب نرخ برش باگر ۱۰۰

برای ساخت سیال نیوتنی با لزجت معادل باگر ۱۰۰، از محلول آب و گلیسیرین با درصد حجمی

۸۲/۸٪ گلیسیرین استفاده شد.

در جدول ۱-۲، لزجت و چگالی آب، گلیسیرین و محلول‌های آب و گلیسیرین با درصد حجمی‌های

مختلف گلیسیرین، که در این مطالعه از آنها استفاده شده است، مشاهده می‌شود. در ادامه، نام گذاری

نمونه‌ها بر مبنای این جدول خواهد بود.

جدول ۱-۲ لزجت و چگالی آب، گلیسیرین و محلول‌های آب و گلیسیرین با درصد حجمی‌های مختلف گلیسیرین، مورد استفاده در این مطالعه

ردیف	نام نمونه	درصد حجمی گلیسیرین در نمونه	چگالی (kg/m^3) در دمای 25°C	لزجت (cp) در دمای 25°C
(۱)	آب	٪ ۰	۹۹۶/۸۵	۰/۸۹
(۲)	محلول ۱/۲۵	٪ ۱۱	۱۰۲۸/۸	۱/۲۵
(۳)	محلول ۶۳/۶	٪ ۷۹/۵	۱۲۱۳/۳	۶۳/۶
(۴)	محلول ۸۹/۲	٪ ۸۲/۸	۱۲۲۰/۹	۸۹/۲
(۵)	محلول ۱۵۹/۲	٪ ۸۷/۸	۱۲۳۲/۲	۱۵۹/۲
(۶)	محلول ۲۲۲/۹	٪ ۹۰/۵	۱۲۳۹/۲	۲۲۲/۹
(۷)	محلول ۶۴۵	٪ ۹۷/۹	۱۲۵۳/۹	۶۴۵
(۸)	گلیسیرین	٪ ۱۰۰	۱۲۵۸	۹۰۵
(۹)	باگر ۵۰	٪ ۸۰	۱۲۱۴/۵	۶۳/۶
(۱۰)	باگر ۱۰۰	٪ ۸۰	۱۲۱۴/۵	۸۹/۲

۳-۳-۲ تست‌های رئومتر

مجموعه آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری خواص ویسکوالاستیک به تست‌های رئومتر معروف هستند. این آزمایش‌های منجر به شناسایی خواص اصلی سیال می‌شوند.

۳-۳-۲-۱- زمان رهایی از تنش

زمان رهایی از تنش زمانی است که معرف فاصله زمانی بین تنش اعمالی و تغییر شکل حاصل از آن است. یکی از راه‌های تخمین زمان رهایی از تنش تفسیر نتایج G' و G'' بر اساس مدل ماکسول است. مدول‌های G' و G'' مدول‌های مادی هستند که از آزمون نوسان حاصل می‌شوند. به این صورت که، با ترسیم نمودار تغییرات مدول‌های G' و G'' بر حسب فرکانس اعمالی، اولین نقطه برخورد این مدول‌ها بر حسب فرکانس برابر

با عکس زمان رهایی از تنش اول $\frac{1}{\lambda}$ می‌باشد که در ادامه نحوه استخراج این روابط بیان شده است. باید توجه داشت یک ماده دارای یک طیف رهایی از تنش می‌باشد.

۲-۳-۳-۲- تست نوسان

تست نوسان یکی از معروف‌ترین تست‌های سیالات ویسکوالاستیک است. در این تست ماده تحت یک تنش نوسانی قرار گرفته و تغییر شکل ماده مورد بررسی قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود که تغییر شکل و تنش هم‌فرکانس باشند اما یک اختلاف فاز به اندازه δ در آن‌ها مطابق رابطه (۶-۲) مشاهده می‌شود:

$$\tau = \tau_0 \cos \omega t \quad (۵-۲)$$

$$\gamma = \gamma_0 \cos(\omega t - \delta) \quad (۶-۲)$$

در این تست مقدار γ_0 بسیار کوچک لحاظ شده است تا از تغییر شکل‌های بزرگ اجتناب گردد.

بدین منظور طبق روابط (۷-۲) و (۸-۲) از تنش و برش مختلط استفاده شده است که قسمت حقیقی آن تنش و برش هستند:

$$\tau^* = G^* \gamma^* \quad (۷-۲)$$

$$\tau^* = \eta^* \dot{\gamma}^* \quad (۸-۲)$$

همچنین G^* دارای یک بخش حقیقی و یک بخش موهومی است:

$$G^* = G' + iG'' \quad (۹-۲)$$

که در رابطه (۹-۲)، G'' معرف بخش سیال ماده (ویسکوز) و G' معرف بخش جامد ماده (الاستیک)

است. بر اساس مدل‌سازی جامد داریم:

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} = \frac{\tau e^{i\omega t}}{\gamma e^{i(\omega t - \delta)}} \quad (۱۰-۲)$$

در رابطه (۱۰-۲) خود اختلاف فاز می‌تواند تابع فرکانس باشد، لذا می‌توان نوشت:

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (11-2)$$

$$G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad (12-2)$$

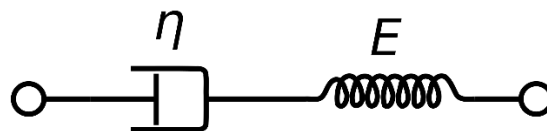
از تقسیم دو رابطه اخیر داریم:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (13-2)$$

۲-۳-۳-۳-مدل ماکسول

یکی از بهترین مدل‌ها برای تفسیر نتایج تست نوسان مدل ماکسول است. این مدل از یک فنر و دمپر

سری مطابق شکل ۲-۲۵ تشکیل شده است.



شکل ۲-۲۵ مدل فنر و دمپر ماکسول

مدل ماکسول به صورت رابطه (۲-۱۴) بیان می‌شود:

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta \dot{\gamma} \quad (14-2)$$

با جایگذاری روابط (۲-۵) و (۲-۶) در رابطه ماکسول، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau_0 \cos \omega t - \lambda \tau_0 \sin \omega t = \eta \dot{\gamma} \quad (15-2)$$

با توجه به فرضیات داریم:

$$\gamma_0 = \frac{\lambda \tau_0}{\eta \cos \theta} \quad \& \quad \tan \delta = \frac{1}{\lambda \omega} \quad (16-2)$$

در نتایج آزمایشگاهی، برای مکانی که دو نمودار یکدیگر را قطع می‌کنند مدول‌های مادی برابر

هستند ($G'' = G'$) در نتیجه با استفاده از رابطه (۱۳-۲) خواهیم داشت:

$$\tan \delta = \frac{1}{\lambda \omega} = 1 \rightarrow \omega = \frac{1}{\lambda} \quad (۱۷-۲)$$

برای حالتی که مدول‌های G'' و G' هیچ نقطه تلاقی نداشته باشند، از روابط (۱۸-۲) و (۱۹-۲)

استفاده می‌شود:

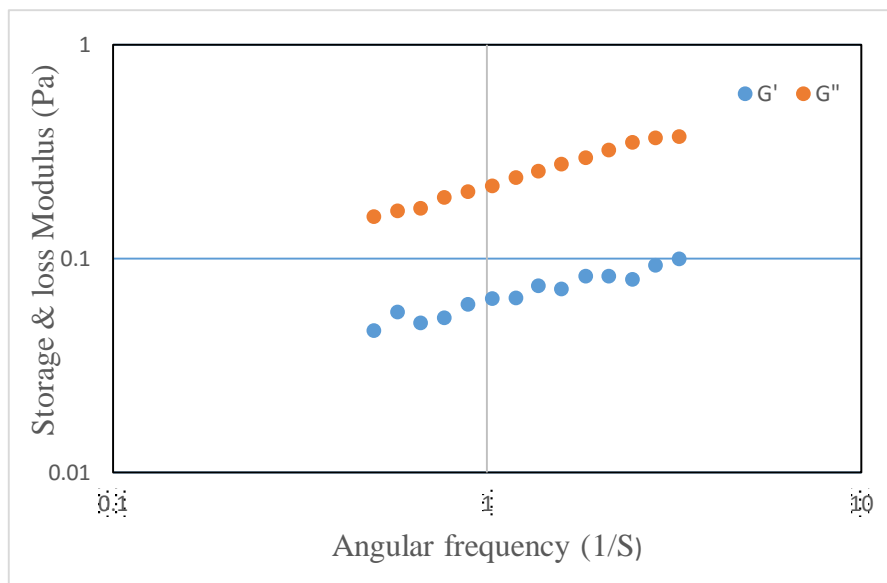
$$G' = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \lambda_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (۱۸-۲)$$

$$G'' = \eta_s \omega + \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (۱۹-۲)$$

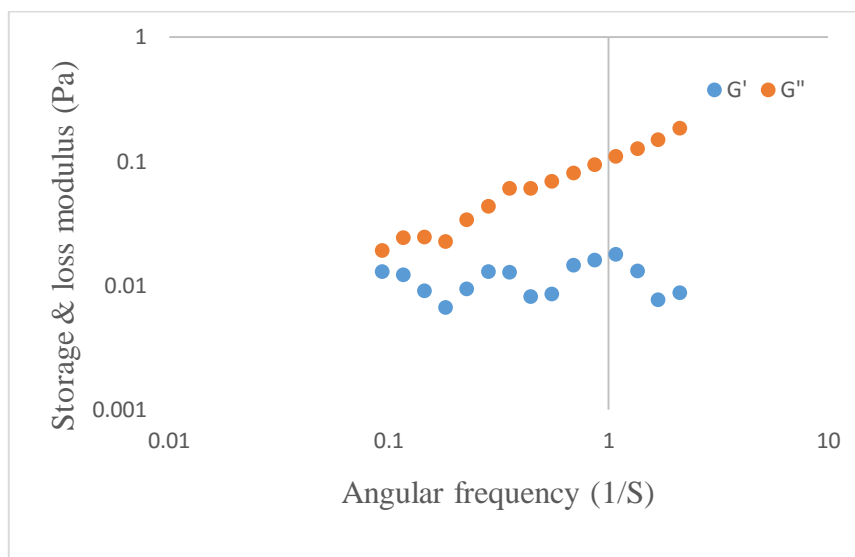
روابط (۱۸-۲) و (۱۹-۲)، G'' و G' را به n مؤلفه تجزیه می‌کنند که هر مؤلفه با یک‌زمان‌هایی از تنش λ_i و یک ضریب لزجت η_i برای هر مود، تا زمانی که به یک برآزش خوب برای داده‌های آزمایشگاهی برسد، افزایش می‌یابد. در مطالعه حاضر مدول‌های G' ، G'' همان‌طور که در شکل ۲۶-۲ و شکل ۲۷-۲ مشاهده می‌شود، نقطه تلاقی ندارند که با استفاده از روابط (۱۸-۲) و (۱۹-۲) طیفی از مقادیر‌هایی از تنش به دست می‌آید و با جایگذاری در رابطه (۲۰-۲) مقدار متوسط زمان‌هایی از تنش تعیین می‌شود.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} \quad (۲۰-۲)$$

برای باگر ۵۰، زمان‌هایی از تنش $\lambda = 1/4s$ و برای باگر ۱۰۰ نیز زمان‌هایی از تنش $\lambda = 1/9s$ به دست آمد. مدول‌های الاستیک G' و G'' نسبت به تغییرات فرکانس زاویه‌ای برای باگر ۵۰ و باگر ۱۰۰ در آزمایشگاه مرکزی شاهرود، اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲۶-۲ رفتار مدول‌های G' , G'' برای باگر ۵۰



شکل ۲۷-۲ رفتار مدول‌های G' , G'' برای باگر ۱۰۰

۴-۲- اعداد بی بعد

با توجه به هندسه و سیالات مورد استفاده در این مطالعه، برای گزارش نتایج آزمایش‌ها به صورت بی بعد، از اعداد بی بعدی استفاده شده که تشریح خواهند شد. این اعداد بیانگر رژیم و مشخصات سیال تزریق شونده به محیط متخلخل می‌باشند.

عدد بی بعد بلیک^۱: یک کمیت بدون بعد می‌باشد که در دینامیک سیالات نشان‌دهنده نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزج است. این کمیت در واقع تعمیم یافته عدد بدون بعد رینولدز است. عدد بلیک بیشتر در بررسی رفتار سیالات در سطوح متخلخل استفاده می‌شود. این عدد به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۶].

$$Bl = \frac{D_h \rho u}{\mu(1 - \phi)} \quad (21-2)$$

از این عدد برای سیال جابجا کننده (تزریق شونده به محیط متخلخل) استفاده می‌شود. در رابطه

(۲۱-۲) D_h قطر هیدرولیکی محیط متخلخل می‌باشد که از رابطه (۲۲-۲) به دست می‌آید [۳۷].

$$D_h = \frac{\phi}{(1 - \phi)} D_p \quad (22-2)$$

در رابطه بالا D_p میانگین قطر دانه‌های شیشه کروی محیط متخلخل می‌باشد. با استفاده از رابطه

(۲۲-۲) $D_h = 4/79 \times 10^{-3} \text{m}$ به دست می‌آید.

در جدول ۲-۲ عدد بلیک برای سیال‌های جابجا کننده (تزریق شونده) با دبی‌های مختلف محاسبه شده

است.

^۱ Blake number

جدول ۲-۲ عدد بلیک برای سیالات جابجا کننده مختلف، برحسب دبی ورودی

ردیف	نام نمونه (سیال جابجا کننده)	دبی ورودی (ml/min)	عدد بی بعد بلیک
.۱	آب	۵	۱/۰۲
		۱۰	۲/۰۴
.۲	محلول ۱/۲۵	۲/۵	$۳/۷۸ \times ۱۰^{-۱}$
		۱۰	۱/۴۹
.۳	محلول ۶۳/۶	۵	$۱/۷۳ \times ۱۰^{-۲}$
		۷/۵	$۲/۶۱ \times ۱۰^{-۲}$
.۴	محلول ۸۹/۲	۱۰	$۳/۴۹ \times ۱۰^{-۲}$
		۲/۵	$۶/۲ \times ۱۰^{-۳}$
.۵	باگر ۵۰	۵	$۱/۲۴ \times ۱۰^{-۲}$
		۷/۵	$۱/۸۶ \times ۱۰^{-۲}$
.۶	باگر ۱۰۰	۵	$۱/۷۳ \times ۱۰^{-۲}$
		۷/۵	$۲/۶۱ \times ۱۰^{-۲}$
		۱۰	$۳/۴۹ \times ۱۰^{-۲}$
		۲/۵	$۶/۲ \times ۱۰^{-۳}$
		۵	$۱/۲۴ \times ۱۰^{-۲}$
		۷/۵	$۱/۸۶ \times ۱۰^{-۲}$

عدد بی بعد وایزنبرگ^۱: عدد وایزنبرگ برای توصیف سیالات ویسکوالاستیک به کار می‌رود و بر اساس نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک به نیروی حاصل از لزجت تعریف می‌شود. این عدد بر اساس روابط مختلفی تعریف شده که رابطه (۲۳-۲) متداول‌ترین شکل بیان آن می‌باشد. بنابراین برای یک سیال به خصوص، بالا بودن عدد وایزنبرگ به معنای تمایل بیشتر آن سیال به رفتار غیرخطی است.

$$Wi = \lambda \dot{\gamma} \quad (23-2)$$

در این رابطه λ زمان رهایی از تنش و $\dot{\gamma}$ نرخ برش می‌باشد. برای محاسبه $\dot{\gamma}$ در محیط متخلخل از رابطه (۲۴-۲) استفاده شده است [۳۸].

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{\sqrt{k}} \quad (24-2)$$

در این رابطه u سرعت سیال ورودی به محیط متخلخل و k نفوذپذیری محیط می‌باشد. جدول ۳-۲ عدد وایزنبرگ را برای باگر ۵۰ و باگر ۱۰۰ نشان می‌دهد.

جدول ۳-۲ عدد وایزنبرگ برای سیالات جابجا کننده غیر نیوتنی، برحسب دبی ورودی

عدد Wi	دبی ورودی (ml/min)	نام نمونه (سیال جابجا کننده)	ردیف
۸/۰۷	۵		
۱۲/۱۱	۷/۵	باگر ۵۰	۱.
۱۶/۱۵	۱۰		
۵/۴۷	۲/۵		
۱۰/۹۶	۵	باگر ۱۰۰	۲.
۱۶/۴۳	۷/۵		

^۱ Weissenberg number

عدد بی بعد الاستیسیته^۱: از این کمیت بدون بعد برای بیان الاستیسیته سیال استفاده می شود، این عدد به صورت نسبت نیروهای الاستیک به نیروهای اینرسی تعریف می شود. در این مطالعه، عدد الاستیسیته به صورت نسبت عدد وایزنبرگ به عدد بلیک تعریف شده است.

$$El = \frac{Wi}{Bl} \quad (25-2)$$

جدول ۴-۲ عدد الاستیسیته باگر ۵۰ و باگر ۱۰۰ را نشان می دهد. مشاهده می شود که اعداد الاستیسیته در این مطالعه بزرگ می باشند؛ دلیل آن، کوچک بودن قطر هیدرولیکی محیط متخلخل ساخته شده است ($D_h = 4/79 \times 10^{-3} m$)؛ به بیان دیگر هندسه محیط متخلخل ساخته شده باعث ایجاد جریان خزشی می شود، می دانیم که نیروهای اینرسی در جریان خزشی کوچک هستند، این امر سبب بزرگ شدن عدد الاستیسیته شده است.

جدول ۴-۲ عدد الاستیسیته باگر ۵۰ و باگر ۱۰۰

ردیف	نام نمونه (سیال جابجا کننده)	عدد بی بعد الاستیسیته
۱.	باگر ۵۰	۴۶۴/۴
۲.	باگر ۱۰۰	۸۸۳/۱۵

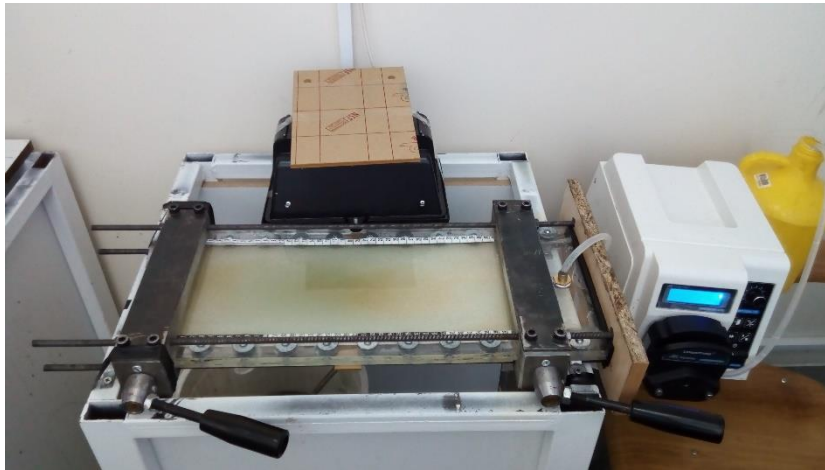
۲-۵- مراحل انجام آزمایش

۲-۵-۱ تزریق سیال جابجا شونده

پس از اتصال شیرها به محیط متخلخل و بستن ستاپ روی میز افقی، ابتدا باید محیط متخلخل از سیال جابجا شونده (سیال بستر) پر شود. برای این منظور رابط شیر خروجی را به شیر خروجی ستاپ متصل

^۱ Elasticity number

می‌کرده، شیر ورودی و خروجی ستاپ را باز کرده و با استفاده از پمپ پریستالتیک سیال جابجا کننده از قسمت خروجی وارد محیط متخلخل می‌شود (شکل ۲-۲۸). برای اینکه در محیط متخلخل حباب‌های هوا باقی نماند این فرایند باید به آهستگی اتفاق بیافتد. لذا از دبی‌های پایین (۵-۱۰ ml/min) برای پر کردن محیط استفاده می‌شود. پس از پر شدن محیط پمپ را خاموش کرده، شیر ورودی و خروجی را می‌بندیم و رابط شیر خروجی را از شیر جدا می‌کنیم. اگر در جلوی شیر ورودی ستاپ که بسته شده است از سیال بستر وجود داشته باشد، آن را جمع می‌کنیم تا در هنگام ورود سیال تزریق شونده، امتزاج دو سیال را در این قسمت نداشته باشیم.



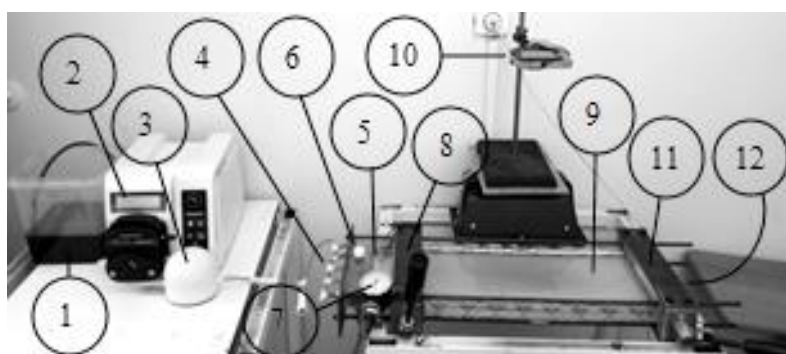
شکل ۲-۲۸ پر کردن محیط متخلخل از سیال جابجا شونده

۲-۵-۲ تزریق سیال جابجا کننده

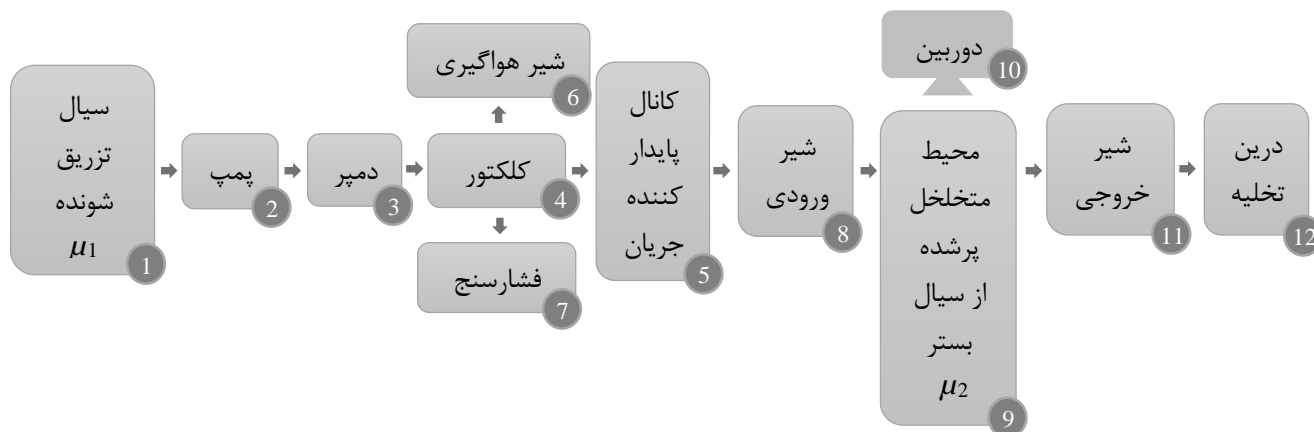
برای این منظور، کلکتور ورودی را به شیر ورودی ستاپ متصل کرده و شیلنگ سیلیکونی پنج راهه را به درگاه‌های ورودی کلکتور وصل می‌کنیم؛ سمت دیگر شیلنگ به دمپر متصل می‌شود و دمپر نیز به واسطه یک شیلنگ دیگر به پمپ پریستالتیک متصل می‌شود. ابتدا باید سیال جابجا کننده (سیال تزریق شونده) تا پشت شیر ورودی ستاپ برسد، برای این کار شیر هواگیری کلکتور ورودی را باز کرده و شیر تخلیه زیر کلکتور را می‌بندیم سپس پمپ را روشن می‌کنیم. پس از پر شدن کلکتور و کانال پایدارکننده از سیال و رسیدن سیال به شیر ورودی و اطمینان از تخلیه حباب‌های احتمالی موجود در سیال، از طریق شیر

هواگیری، پمپ را خاموش می‌کنیم. اکنون سیال جابجا کننده و سیال جابجا شونده در مجاورت هم (دو طرف شیر ورودی) قرار گرفته‌اند و همه چیز برای انجام آزمایش آماده است.

برای شروع آزمایش دوربین را روشن و تنظیم می‌کنیم سپس تقریباً در یک لحظه شیر ورودی و خروجی را باز و پمپ را روشن می‌کنیم. شکل ۲-۲۹ اجزای ستاپ آزمایش را در حالت آماده برای تست گرفتن نشان می‌دهد؛ شکل ۲-۳۰ نیز به‌طور شماتیک به تشریح اجزای ستاپ می‌پردازد.



شکل ۲-۲۹ اجزای ستاپ آزمایش در حالت آماده برای تست گرفتن



شکل ۲-۳۰ تشریح شماتیک اجزای ستاپ آزمایش در حالت آماده برای تست گرفتن

فصل ۳

پردازش تصویر

۳-۱- مقدمه

پردازش تصویر^۱ روشی برای تبدیل یک تصویر به صورت دیجیتال و انجام برخی از عملیات بر روی آن، به منظور دریافت یک تصویر بهبودیافته و یا برای استخراج برخی از اطلاعات مفید از آن است. پردازش تصاویر امروزه بیشتر به موضوع پردازش تصویر دیجیتال گفته می‌شود که شاخه‌ای از دانش رایانه است که با پردازش سیگنال دیجیتال که نماینده تصاویر برداشته شده با دوربین دیجیتال یا پویش شده توسط پویشگر هستند سروکار دارد.

۳-۲- کاربردها

پردازش تصاویر دارای دو شاخه‌ی عمده بهبود تصویر^۲ و بینایی ماشین^۳ است. بهبود تصاویر دربرگیرنده روش‌هایی چون استفاده از فیلتر محوکننده و افزایش تضاد برای بهتر کردن کیفیت دیداری تصاویر و اطمینان از نمایش درست آن‌ها در محیط مقصد (مانند چاپگر یا نمایشگر رایانه) است، درحالی که بینایی ماشین به روش‌هایی می‌پردازد که به کمک آن‌ها می‌توان معنی و محتوای تصاویر را درک کرد تا از آن‌ها در کارهایی چون رباتیک استفاده شود. در معنای خاص آن پردازش تصویر عبارت است از هر نوع پردازش سیگنال که ورودی یک تصویر است مثل عکس یا صحنه‌ای از یک فیلم خروجی. پردازشگر تصویر می‌تواند یک تصویر یا یک مجموعه از نشانه‌های ویژه یا متغیرهای مربوط به تصویر باشد. اغلب تکنیک‌های پردازش تصویر شامل برخورد با تصویر به عنوان یک سیگنال دوبعدی و بکار گرفتن تکنیک‌های استاندارد پردازش سیگنال روی آن‌ها می‌شود. پردازش تصویر اغلب به پردازش دیجیتالی تصویر اشاره می‌کند ولی پردازش نوری و آنالوگ تصویر هم وجود دارد. از سال ۱۹۶۴ تاکنون، موضوع پردازش تصویر، رشد فراوانی کرده است. علاوه بر برنامه تحقیقات فضایی، اکنون از فنون پردازش تصویر، در موارد متعددی استفاده می‌شود. گر چه اغلب این مسائل باهم نامرتبط هستند، اما عموماً نیازمند روش‌هایی هستند که قادر به ارتقای

^۱ Image processing

^۲ Image enhancement

^۳ Machine vision

اطلاعات تصویری برای تعبیر و تحلیل انسان باشد. برای نمونه در پزشکی شیوه‌های رایانه‌ای کنتراست^۱ تصویر را ارتقا می‌دهند یا این‌که برای تعبیر آسان‌تر تصاویر اشعه ایکس یا سایر تصاویر پزشکی، سطوح شدت روشنایی را با رنگ، رمز می‌کنند. متخصصان جغرافیایی نیز از این روش‌ها یا روش‌های مشابه برای مطالعه الگوهای آلودگی هوا که با تصویر برداری هوایی و ماهواره‌ای به دست آمده است، استفاده می‌کنند. در باستان‌شناسی نیز روش‌های پردازش تصویر برای بازیابی عکس‌های مات شده‌ای که تنها باقی‌مانده آثار هنری نادر هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فیزیک و زمینه‌های مرتبط، فنون رایانه‌ای بارها تصاویر آزمایش‌های مربوط به موضوعاتی نظیر پلاسماهای پرانرژی و تصاویر میکروسکوپ‌های الکترونی را ارتقا داده‌اند. کاربردهای موفق دیگری از پردازش تصویر را نیز می‌توان در نجوم، زیست‌شناسی، پزشکی هسته‌ای، اجرای قانون و صنعت بیان کرد.

۳-۳- تاریخچه

در اوایل دهه ۶۰ سفینه فضایی رنجر ۷ متعلق به ناسا شروع به ارسال تصاویر تلویزیونی مبهمی از سطح ماه به زمین کرد. استخراج جزئیات تصویر برای یافتن محلی برای فرود سفینه آپولو نیازمند اعمال تصمیماتی روی تصاویر بود. این کار مهم به عهده لابراتوار ج پی ال^۲ قرار داده شد. بدین ترتیب زمینه تخصصی پردازش تصاویر دیجیتال آغاز گردید. ابتدایی‌ترین کاربردهای پردازش تصاویر دیجیتال در دهه ۶۰ و ۷۰ جنبه‌های نظامی و جاسوسی بود که باعث شد نیاز به تصاویر باکیفیت بالاتر به وجود آید. پس از آن مصارف دیگری برای تصاویر دیجیتال سطح زمین پیدا شد که کاربرد تصاویر چند طیفی^۳ در کشاورزی و جنگلداری از آن جمله است. همچنین با استفاده از تصاویر دیجیتال عملیات‌هایی مثل کنکاش نفت در سرزمین‌های دورافتاده و یا ردیابی منابع آلودگی شهری از داخل دفتر کار متخصصین آن‌ها، انجام شد. از اواسط دهه ۷۰ تا اواسط دهه ۸۰ اختراع اسکنرهای کت^۴ و اسکنرهای ام آر آی^۵ پزشکی را متحول کردند. صنعت چاپ

^۱ Contrast

^۲ (JPL) Jet Propulsion

^۳ Multi Spectral

^۴ CAT (Computerized Aerial Topography)

^۵ MRI (Magnetic Resonance Imagery)

استفاده‌کننده بعدی بود. در اواخر دهه ۸۰ پردازش تصاویر دیجیتال وارد دنیای سرگرمی شد به طوری که امروزه این نقش به امر عادی تبدیل شده است. به همین ترتیب دنیای صنعت با روبات‌هایی که عملاً می‌بینند یعنی در واقع با ظهور بینایی ماشین متحول شد و هنوز هم در حال تحول است.

۳-۴- مراحل انجام پردازش تصویر

انجام پردازش بر روی تصاویر به منظور بهبود یا استخراج اطلاعات از آن‌ها می‌باشد و به طور کلی شامل مراحل زیر است:

الف- دریافت تصویر ورودی

در این مرحله، تصویر از ورودی خوانده شده و وارد سیستم می‌شود. تصویر ورودی می‌تواند بر روی ابزار ذخیره‌سازی بوده یا از یک دوربین گرفته شود به عنوان مثال در سیستم تشخیص اثر انگشت، ورودی از طریق اسکنر اثر انگشت وارد سیستم می‌شود.

ب- پیش‌پردازش تصویر (پردازش مقدماتی)

اهداف کلی این مرحله را می‌توان ارتقاء تصویر و حذف مؤلفه‌های غیر ضروری از تصویر (حذف اغتشاش) دانست که با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر از جمله ترمیم تصاویر، بالا بردن دقت عکس، عمل کانولوشن یا فیلتر کردن و هیستوگرام تصویر انجام می‌پذیرد.

ج- پیش‌پردازش تصویر (پردازش متوسط)

هدف کلی در این مرحله شناسایی ویژگی‌هایی از تصویر است که بتوان از آن‌ها برای کاربر مورد نظر خود استفاده کرد. شناسایی نقاط ویژه و انحناها، طبقه‌بندی را تشخیص اشیاء مختلف از جمله عملیات تشخیص لبه و بخش‌بندی تصاویر، ویژگی‌هایی هستند که در سیستم تشخیص اثر انگشت می‌توانند استخراج گردند. ویژگی این پردازش این است که ورودی آن معمولاً تصویر و خروجی آن صفاتی از اشیاء تصویر مانند لبه‌ها، کانتورها و تشخیص اشیاء است.

د- پردازش تصویر (پردازش پیشرفته)

در این مرحله با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده به آنالیز تصویر می‌پردازیم. پردازش سطح بالا شامل فهمیدن روابط بین اشیاء تشخیص داده شده، استنباط و تفسیر صحنه و انجام تفسیر و تشخیص‌هایی است که سیستم بینایی انسان انجام می‌دهد.

۳-۵- پردازش تصاویر رنگی

به‌طور کلی تصاویر دیجیتال به سه دسته اصلی زیر تقسیم می‌شوند:

الف- تصاویر باینری^۱ (دودویی)

در این تصاویر هر پیکسل دارای دو رنگ سیاه و سفید است. از آنجاکه هر پیکسل دارای دو مقدار ممکن است، برای نمایش هر پیکسل نیاز به تنها یک بیت داریم. این‌گونه تصاویر را به راحتی می‌توان ذخیره نمود. تصاویری که به صورت باینری نمایش داده می‌شوند، اغلب شامل نوشته‌ها، اثر انگشت‌ها و یا نقشه‌های مهندسی هستند.

ب- تصاویر با درجات خاکستری

هر پیکسل در این تصاویر دارای یک درجه (سایه خاکستری است که به‌طور معمول از صفر (سیاه) شروع شده و تا ۲۲۵ (سفید) ادامه می‌یابد. این دامنه از اعداد را می‌توان در ۸ بیت ذخیره نمود. این دامنه برای دست‌کاری یک فایل تصویری بسیار مناسب است. از دیگر دامنه‌ها نیز گاهی استفاده می‌شود. اما معمولاً این دامنه‌ها به صورت توانی از دو بیان می‌شوند. برخی تصاویر به دست آمده از پزشکی، تصاویر مربوط

^۱ Binary

به کارهای چاپی و دیگر تصاویر با داشتن ۲۵۶ اختلاف در درجات خاکستری برای شناسایی طیف وسیعی از اشیا کافی هستند.

ج - تصاویر رنگی

در رایج‌ترین مدل رنگ گرافیک کامپیوتری، رنگ‌ها از ترکیب سه رنگ قرمز، سبز و آبی به وجود می‌آیند که در مجموع ۱۶۵۸۱۳۷۵ رنگ متفاوت توسط این سه مؤلفه می‌توان تولید کرد. این مدل رنگ در گرافیک کامپیوتری با نام RGB شناخته می‌شود. در کنار مدل رنگ RGB مدل‌های دیگری همچون CMYK، HSI، HSV و غیره نیز وجود دارند که هر یک از آن‌ها به روش متفاوتی به نمایش رنگ‌ها می‌پردازند. استفاده از رنگ در پردازش تصویر، ناشی از دو عامل است. اولاً، رنگ توصیفگر قدرتمندی است که غالباً شناسایی و استخراج اشیا را از صحنه آسان می‌سازد. ثانیاً، انسان می‌تواند در مقایسه با فقط ۲۴ سایه خاکستری، هزاران سایه رنگ و شدت را تشخیص دهد. این عامل دوم، مخصوصاً در تحلیل تصویر دستی (یعنی وقتی که توسط انسان انجام می‌گیرد) مهم است.

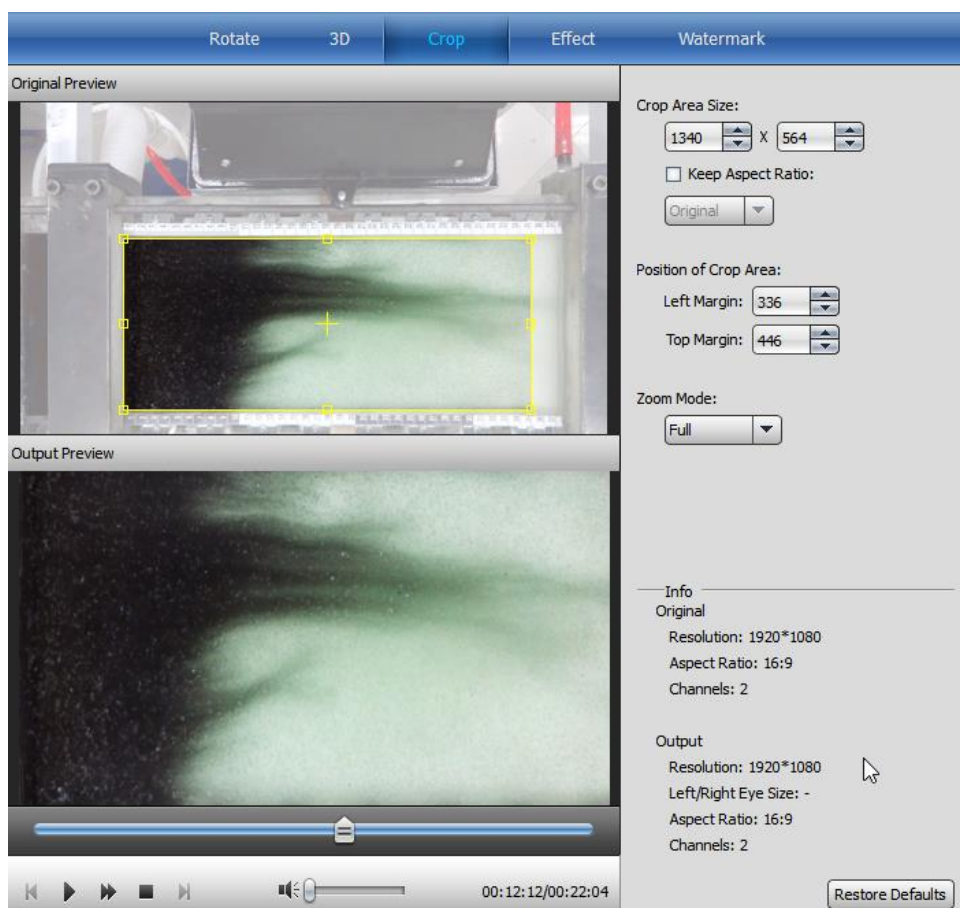
۳-۶- پردازش تصاویر آزمایش‌ها

گام اول:

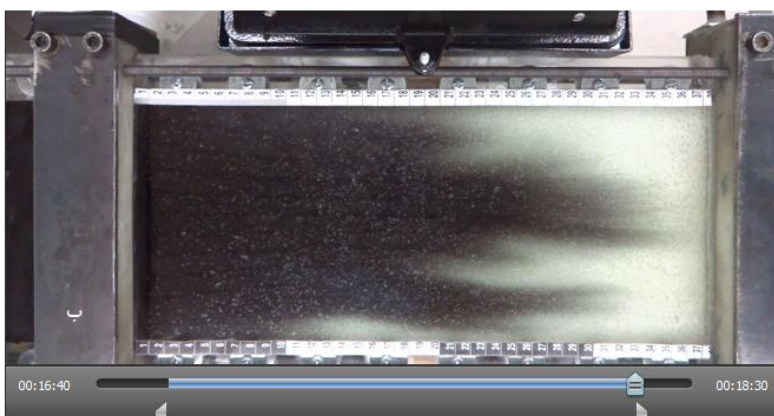
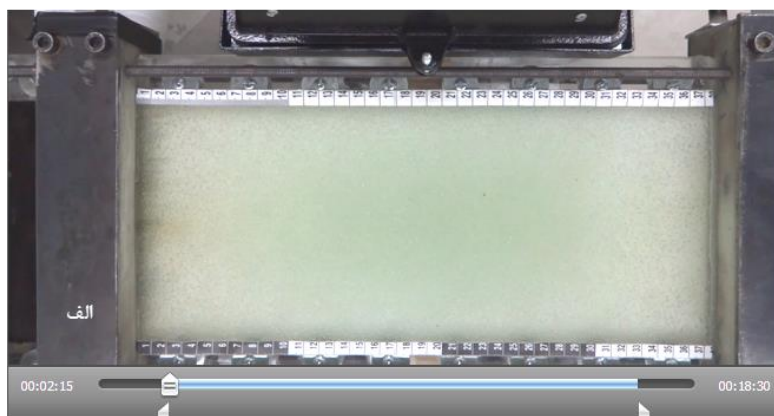
قبلاً نیز اشاره شد که در هر آزمایش برای تصویربرداری از پدیده ناپایداری انگشتی لزج، از یک دوربین فیلم‌برداری با کیفیت 1080×1920 پیکسل و سرعت ۳۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار Any MTS Converter که در شکل ۳-۱ نشان داده شده، ناحیه موردنظر برای پردازش تصویر به‌طور دقیق جدا شده^۱ است. ابعاد کادری از محیط متخلخل که در این مرحله جدا شده و عملیات پردازش روی آن انجام می‌شود به طول ۳۵cm و عرض ۱۵/۵ cm است. همچنین به کمک این نرم‌افزار قسمتی از فیلم اصلی ضبط شده که پدیده ناپایداری در آن زمان اتفاق می‌افتد را جدا می‌کنیم. شروع فیلم از لحظه‌ای است که اولین فینگر سیال جابجا کننده، در محیط متخلخل رؤیت شود؛ شکل ۳-۲ پایان فیلم را نشان

^۱ Crop

می‌دهد، پایان فیلم‌برداری لحظه‌ای خواهد بود که اولین فینگر به انتهای کادر جدا شده به طول ۳۵cm
برسد.



شکل ۱-۳ جدا کردن ناحیه موردنظر برای پردازش تصویر در نرم‌افزار Any MTS Converter



شکل ۲-۳ الف) لحظه شروع فیلم برداری ب) لحظه پایان فیلم برداری

گام دوم:

در این مرحله فیلمی که در گام اول آماده شد را به نرم افزار متلب^۱ فرا می خوانیم. به منظور پردازش تصویر در نرم افزار متلب، فرمت فیلم را بدون کاهش کیفیت به avi تبدیل می کنیم. در واقع نرم افزار متلب هر ثانیه از این فیلم را به صورت مجموعه ای از ۳۰ عکس می خواند (فیلم برداری با سرعت ۳۰ فریم بر ثانیه بوده است). برای رسیدن به بهترین نورپردازی برای فیلم برداری از پدیده ناپایداری روش های مختلفی بررسی شد:

۱. نورپردازی مستقیم از پشت محیط متخلخل: این روش باعث ایجاد اغتشاشهای شدید حین فیلم برداری می شد.

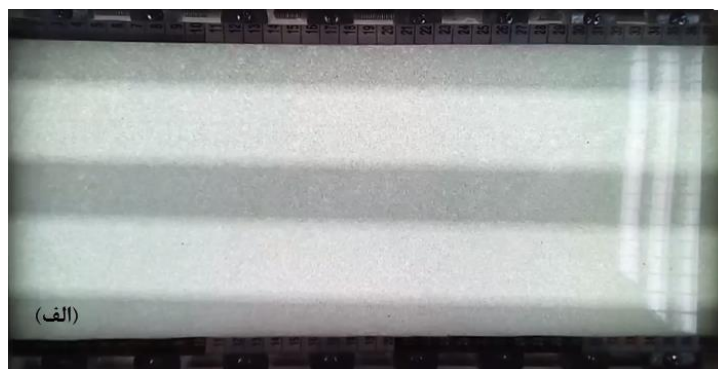
^۱ Matlab

۲. نورپردازی بک لایت: این روش فینگرها را به خوبی نشان می‌داد اما در پردازش تصویر، خروجی خوبی نداشتیم.

۳. نورپردازی از بالا و پوشاندن پشت محیط متخلخل با یک صفحه سفید: در این حالت شکست نور کمتری داشتیم و هنگام پردازش تصویر شاهد اغتشاش کمتری در تصاویر بودیم.

در شکل ۳-۳ حالت‌های مختلف نورپردازی نشان داده شده است. علت شکست نور در محیط متخلخل، استفاده از دانه‌های شیشه برای ساخت این محیط است. این شکست نور باعث ایجاد اغتشاشهایی در تصاویر می‌شود که در پردازش تصویر به آن‌ها، اغتشاش نمک و فلفل^۱ می‌گویند. در گام دوم ابتدا فیلم از حالت رنگی به سیاه و سفید تبدیل می‌کنیم سپس با استفاده از دستورات مربوطه نرم‌افزار، اغتشاشهای عنوان شده را تا حد امکان کاهش می‌دهیم.

^۱ Salt and pepper noise



شکل ۳-۳ حالت‌های مختلف نورپردازی محیط متخلخل: الف) نورپردازی مستقیم از پشت محیط متخلخل ب) نورپردازی بک لایت ج) نورپردازی از بالا و پوشاندن پشت محیط متخلخل با یک صفحه سفید

گام سوم:

در این مرحله برای تحلیل و بررسی هر یک از فریم‌های فیلم و استخراج داده‌های مورد نیاز آن‌ها، تصاویر به دست آمده از گام دوم را به تصاویر باینری تبدیل می‌کنیم. در حالت باینری صفر معادل سفید و یک معادل سیاه است. در کد مربوط به باینری کردن تصاویر ضربی بین صفر و یک باید به نرم افزار بدهیم. هر پیکسل تصویر نیز ضربی بین صفر و یک است. به طور مثال اگر ضربی را $0/5$ در نظر بگیریم، پیکسل‌هایی که درجه خاکستری بودنشان کمتر از $0/5$ باشند، در تصویر باینری سفید شده و پیکسل‌هایی که درجه

خاکستری بودن آن‌ها بیشتر از ۰/۵ باشند، در تصویر باینری سیاه می‌شوند. پس از باینری شدن تصاویر می‌توان پارامترهای مورد نظر را برای تحلیل ناپایداری و نحوه شکل‌گیری و رشد انگشتی‌ها استخراج کرد. در شکل ۳-۴ مراحل پردازش تصویر برای زمان‌های مختلف یک آزمایش نشان داده شده است.



۱

۲

۳

$t=300(s)$

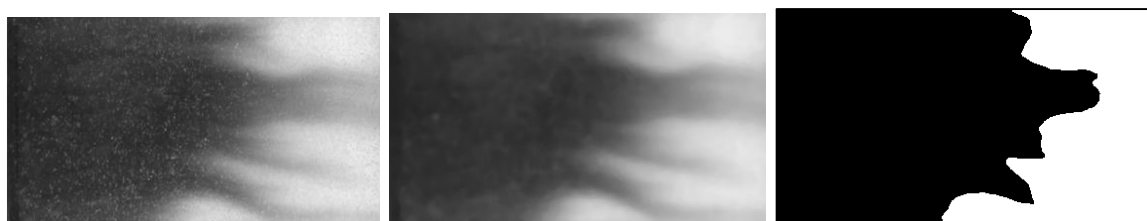


۱

۲

۳

$t=600(s)$



۱

۲

۳

$t=900(s)$

شکل ۳-۴ مراحل پردازش تصویر، (۱) جداسازی ناحیه رخ دادن پدیده، (۲) کاهش اغتشاش تصویر در متلب، (۳) باینری کردن تصویر در متلب

۷-۳- پارامترهای ارزیابی نتایج

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

۷-۳-۱ طول اختلاط

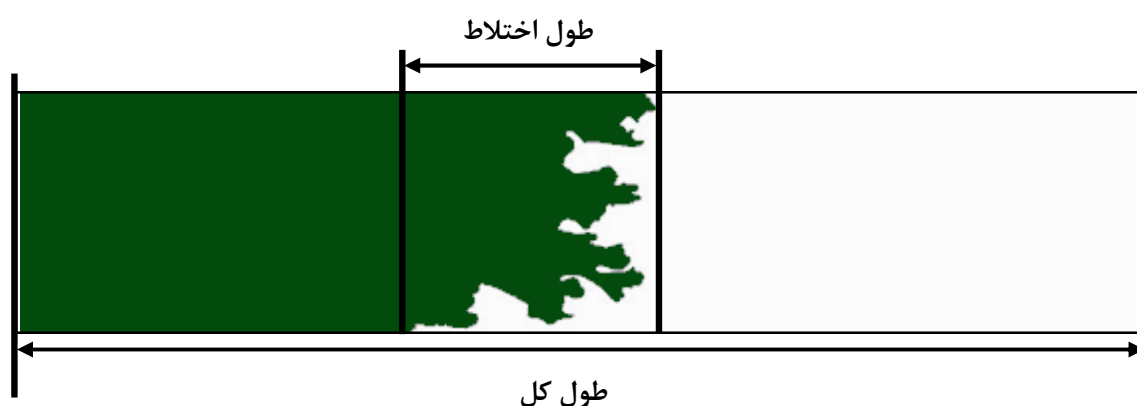
میزان ناحیه مخلوط شدن دو سیال در گیر در جابجایی مخلوط شدنی را طول اختلاط می‌گویند. به عبارت ساده‌تر طول اختلاط را می‌توان میزان پیشرفت سیال با لزجت کمتر درون سیال با لزجت بیشتر، تعریف کرد. از این کمیت در ناپایداری انگشتی برای بیان مقدار پیشرفت و حرکت انگشتی‌ها در محیط متخلخل استفاده می‌شود. به دست آوردن طول اختلاط یک ایده‌ی بسیار خوب به محققین برای پیدا کردن نقطه‌ی حمله انگشتی‌ها ارائه می‌دهد. در حقیقت بیشترین طول اختلاط به دست آمده، نشان‌دهنده بزرگ‌ترین طول انگشتی در ناحیه متخلخل مورد نظر می‌باشد.

برای یک جابجایی پایدار این طول متناسب با $t^{1/2}$ می‌باشد. در جابجایی‌های ناپایدار نیز در زمان‌های اولیه شروع جریان که هنوز اغتشاشات کم‌توان هستند، این طول متناسب با $t^{1/2}$ می‌باشد ولی با گذشت زمان و رشد انگشتی‌ها، طول اختلاط تابعی پیچیده برحسب زمان می‌شود. بر همین اساس مطالعات زیادی در مورد چگونگی رفتار این کمیت برحسب زمان در حالت‌های متفاوت انجام گرفته و معادلات گوناگونی برای آن گزارش شده است. کوال و همکاران [۳۹] در مدل یک‌بعدی خود، برای این کمیت یک رابطه خطی با زمان در نظر گرفتند و نتایج به دست آمده از این فرض را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. همچنین پرکینس [۴۰] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی توانست رابطه‌ای را بر نتایج به دست آمده منطبق کند و در بررسی‌های دیگر روی طول اختلاط که امکان مدل‌سازی آزمایشگاهی وجود نداشت، از آن استفاده کند. علاوه بر این، تن و هومسی [۴۱] نیز طول اختلاط را در جابجایی‌های نیوتنی برای حالت‌های متفاوت به دست آورده و نتیجه گرفتند که به ازای مقادیر بسیار بزرگ از عدد پکلت این طول وابستگی خود را به عدد پکلت از دست می‌دهد. این دو همچنین مشاهده کردند که اگر اغتشاشات اولیه کوچک باشند، طول اختلاط ابتدا با $t^{1/2}$ تغییر می‌کند ولی پس از آن با رشد انگشتی‌ها رابطه‌ای خطی با t پیدا خواهد کرد.

مطالعات انجام شده توسط این دو نویسنده با تحقیقات زیمرمن و هومسی [۴۲] ادامه یافت. این دو متوجه شدند که رفتار این کمیت برای بخش زیادی از حالت‌های جابجایی مورد آزمایش، تا زمان ۱۵۰ ثانیه تقریباً یکسان می‌باشد و پس از آن تغییرات در مقادیر به دست آمده محسوس خواهد شد. در ادامه، راگرسون و میبورگ [۴۳] پی بردند که اگرچه در تحقیقات خود برش‌های مماسی متفاوتی به سیستم اعمال می‌کنند ولی تغییرات طول اختلاط همانند نتایج به دست آمده زیمرمن و هومسی، تا زمان ۱۵۰ ثانیه تقریباً یکسان می‌باشد. نتایج آن‌ها نشان داد که می‌توان دو بخش که دارای نرخ رشد‌های یکسان می‌باشند را از هم مجزا کرد. طول اختلاط برای زمان‌های کمتر از ۱۵۰ ثانیه که در آن فرایند پخش سیال با لزجت کمتر در سیال با لزجت بیشتر حاکم است و طول اختلاط برای زمان‌های بعد از ۱۵۰ ثانیه که در آن رشد انگشتی‌ها موجب افزایش طول اختلاط می‌شود. میزان تفاوت افزایش در رشد طول اختلاط در این دو ناحیه بر اساس مطالعاتی که تن و هومسی [۴۱] انجام دادند $1/5$ برابر می‌باشد. علاوه بر این نتایج، مشاهده می‌شود در حالتی که سیال غیرنیوتنی، سیال نیوتنی را جابجا می‌کند طول اختلاط کمتر از جابجایی نیوتنی می‌باشد در حالی که در حالت عکس آن، این مقدار بیشتر از حالت جابجایی نیوتنی است. این رخداد به صورت زیر قابل شرح است: در حالتی که یک سیال غیرنیوتنی سیال نیوتنی را جابجا می‌کند، لزجت سیال جابجا کننده (سیال رقیق شونده)، با زمان کاهش می‌یابد که در نتیجه آن نسبت تحرک افزایش می‌یابد. این افزایش در نسبت تحرک موجب افزایش نرخ رشد انگشتی‌ها و به تبع آن افزایش طول اختلاط خواهد شد. بررسی طول اختلاط علاوه بر موارد ذکر شده، بر اساس تغییرات لگاریتم نسبت تحرک R نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. همان‌طور که می‌دانیم هر چه R بزرگ‌تر باشد، ناپایداری انگشتی سریع‌تر شروع شده و با سرعت بیشتری به رشد خود ادامه می‌دهد. با توجه به همین علت، طول اختلاط نیز در R بزرگ‌تر، بیشتر خواهد بود.

برای محاسبه طول اختلاط در تصاویر باینری و با ایجاد یک حلقه شرطی و جارو کردن کل تصویر به صورت ستونی، فاصله اولین ستونی که در آن درایه صفر وجود دارد از آخرین ستونی که در آن درایه یک وجود دارد محاسبه شد. فاصله اختلاط به دست آمده بر حسب تعداد پیکسل است. برای بی‌بعد کردن آن، این

فاصله به طول کل محیط (برحسب پیکسل) که مورد پردازش تصویر قرار گرفته تقسیم می‌شود. لذا در نمودارها، طول اختلاط درصدی از طول کل می‌باشد. شکل ۳-۵ نمایان گر طول اختلاط می‌باشد.



شکل ۳-۵ شماتیک طول اختلاط

نقطه مطلوب این پارامتر برای اکثر محققین، طول اختلاط صفر است. یعنی سیال جابجاکننده تمام سیال جابجاشونده را، انتقال داده است. هر چه این عدد مقدار کمتری داشته باشد، نتیجه حاصل مطلوب تر خواهد بود (البته چون بیشترین کاربرد موضوع مطالعه حاضر، متوجه استخراج ثانویه و ثالثیه از مخازن نفتی می‌باشد، تحلیل‌های فیزیکی نیز با عنایت به این امر انجام پذیرفته است در غیر این صورت در کاربردهای دیگر مانند فرآیندهای اختلاط دو یا چند سیال، ممکن است نقطه مطلوب به گونه دیگری تعریف شود). نمودارهای طول اختلاط برحسب زمان رسم می‌شوند.

۳-۷-۲ بازده جاروبی

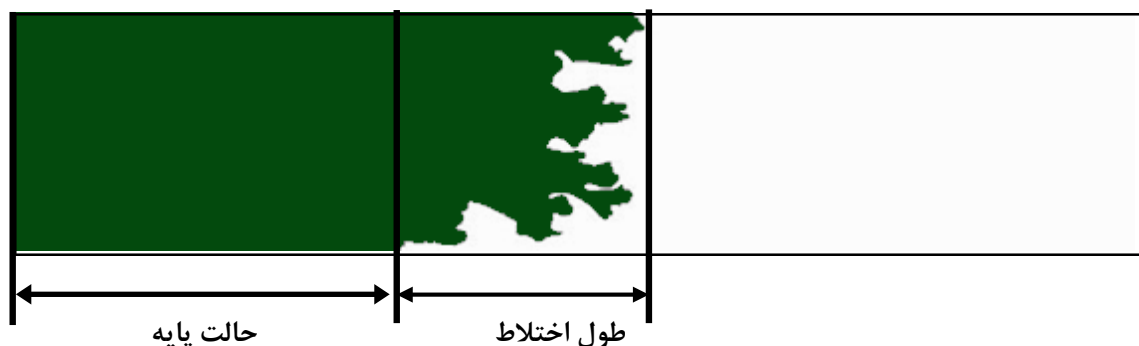
حجم سیال جابجا شده در یک محیط متخلخل نسبت به حجم کل موجود از آن سیال در محیط متخلخل را بازده جاروبی می‌گویند. این بازده بنا به کاربردهای متفاوتی که دارد در چند نوع مختلف تعریف می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به بازده جاروبی عمودی، بازده جاروبی سطحی و بازده جاروبی واقعی اشاره کرد. در صنایع مربوط به نفت و استخراج آن، این بازده به صورت نسبت حجم جاروب شده از این مواد هیدروکربنی توسط یک سیال تزریقی به حجم کل مواد هیدروکربنی موجود در مخزن، تعریف می‌شود و معمولاً از آن

به‌عنوان پارامتری که میزان بهره‌وری روش استخراجی را تعیین می‌کند، استفاده می‌شود. این پارامتر در بررسی ناپایداری انگشتی، نشان‌دهنده رشد انگشتی‌ها و حالت پایه، در محیط متخلخل می‌باشد.

این پارامتر در تحقیق حاضر از تقسیم تعداد درایه‌ها با مقدار یک (یعنی مساحت سیال جابجاکننده) به تمام درایه‌ها (مساحت سیال جابجاشونده و جابجاکننده) به‌دست آمده است. لذا پارامتری بی‌بعد می‌باشد. لازم به ذکر است که محاسبه تمام پارامترها تا زمانی انجام شده است که سیال جابجاکننده به انتهای محیط نرسیده باشد و به‌محض اینکه هرگونه اثری از سیال جابجاکننده در خروجی محیط مورد پردازش مشاهده شود، تصویربرداری متوقف می‌شود. این لحظه نشانگر یک استخراج کاربردی و خالص است و تلاش تمام محققین برای بررسی خواص موارد مختلف برای به تأخیر انداختن این لحظه می‌باشد. در یک دبی خاص، هر چه این لحظه دیرتر اتفاق بیفتد، بازده جاروبی مقدار بیشتری خواهد بود. نمودارهای بازده جاروبی برحسب زمان رسم می‌شوند.

۳-۷-۳ نسبت رشد اغتشاش به حالت پایه

پارامتری را در این تحقیق به‌عنوان پارامتر کمکی معرفی می‌کنیم که نسبت سرعت رشد انگشتی‌ها به رشد حالت پایه را نشان می‌دهد. حالت پایه جایی است که سیال جابجاکننده در کل مقطع کانال حضور دارد و از آنجا به بعد طول اختلاط محاسبه می‌شود. در شکل ۳-۶ حالت پایه به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۳-۶ نمایش شماتیک حالت پایه

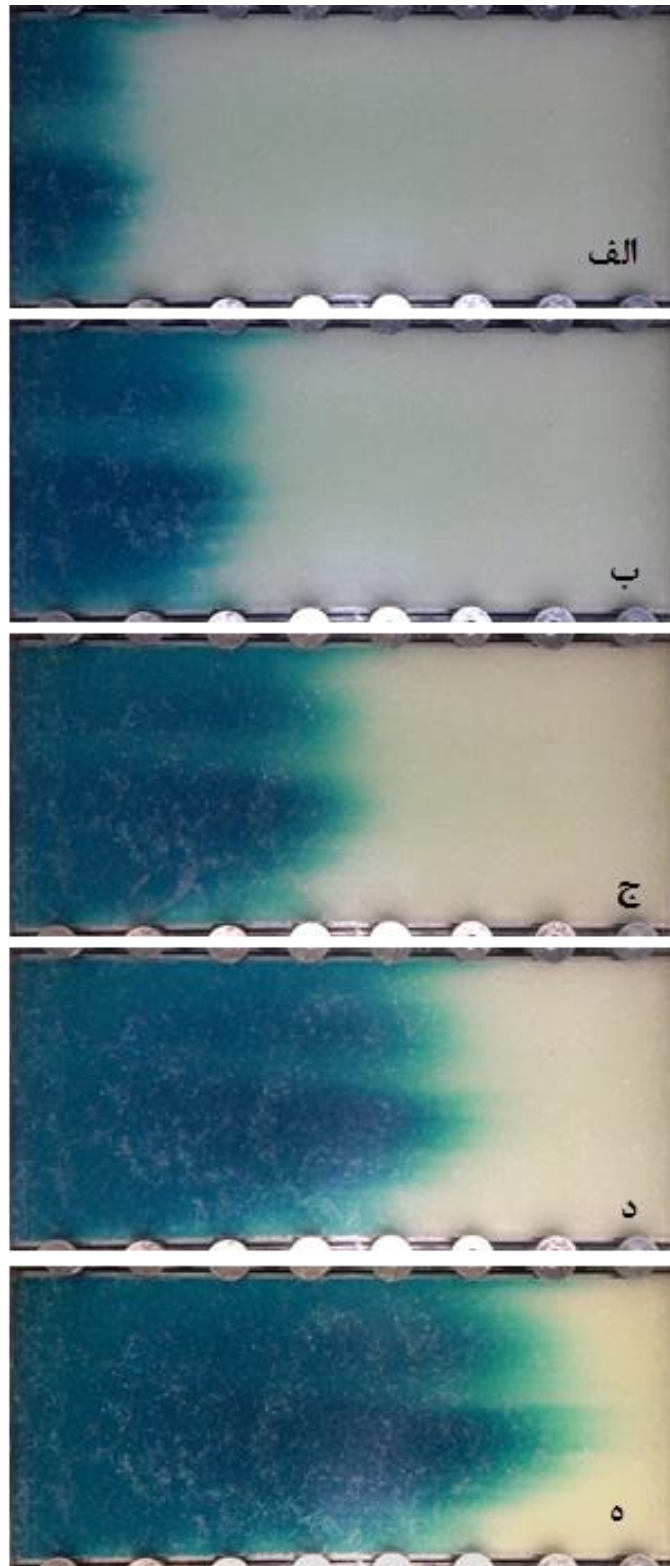
نسبت طول اختلاط به حالت پایه را به عنوان نسبت رشد اغتشاش به حالت پایه معرفی و میزان آن را در بعضی آزمایش‌ها گزارش می‌کنیم. این نسبت بیشتر برای سنجش رفتار حالت پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً تا ۳۰٪ - ۱۵٪ زمانی اول هر آزمایش تغییرات این پارامتر شدید و قابل تفسیر نیست ولی پس از آن حرکت صعودی یا نزولی و محدوده اعدادی که این پارامتر در آن هست، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۸- صحت سنجی ستاپ آزمایش

به منظور اطمینان از ساخت محیط متخلخل به صورت یکدست و یکنواخت و همچنین بررسی عملکرد کلکتور ورودی در پایدار و خطی کردن جبهه حرکت جریان، آزمایش‌هایی طراحی شده که بیان خواهند شد.

۳-۸-۱ یکنواختی جبهه پیش‌رونده

به منظور بررسی حرکت یکنواخت جبهه پیش‌رونده، ابتدا محیط متخلخل را از آب پر کرده، سپس آب رنگی (بدون تغییر در لزجت آب) را به سلول تزریق می‌کنیم. شکل ۳-۷ جبهه حرکت را در فواصل زمانی یکسان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پیشروی جبهه حرکت پایدار و یکنواخت می‌باشد.



شکل ۳-۷ صحت سنجی پایداری و یکنواختی جبهه حرکت. الف) ثانیه ۱۵ ب) ثانیه ۳۰ ج) ثانیه ۴۵ د) ثانیه ۶۰ ه) ثانیه ۷۵

۲-۸-۳ تکرارپذیری^۱ آزمایش

منظور از تکرارپذیری، دقت به دست آمده تحت شرایط یکسان، با روش‌ها و تجهیزات یکسان است که توسط یک اپراتور بر روی نمونه‌های معادل به دست آمده است. با تعریف فوق، یک آزمایش را در شرایط یکسان و با نمونه‌های یکسان در دو زمان مختلف، تکرار کرده‌ایم. شکل ۳-۸ مقایسه این آزمایش‌ها را در لحظات یکسان نشان می‌دهد.

^۱ Repeatability

همان‌طور که در شکل ۸-۳ مشاهده می‌شود، نحوه شکل‌گیری و رشد انگشتی‌ها و پارامترهای مهم از قبیل طول اختلاط و بازده جارویی برای این آزمایش در دو حالت، یکسان است.

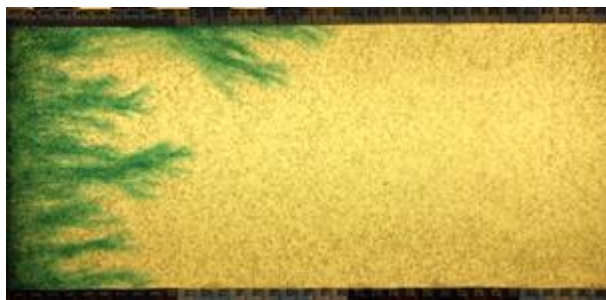


۱



۲

$t=40(s)$

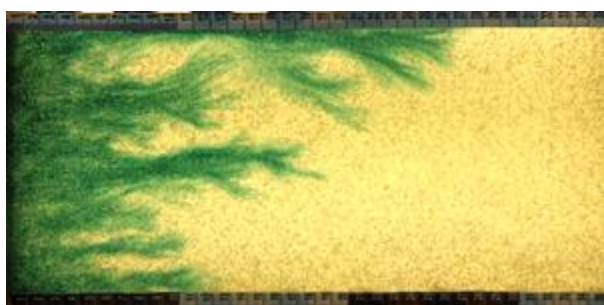


۱



۲

$t=80(s)$



۱



۲

$t=120(s)$

شکل ۸-۳ تزریق آب به محلول آب و گلیسیرین ۸۰٪ حجمی گلیسیرین با دبی ۱۲ میلی‌لیتر بر دقیقه. (۱) آزمایش اول
(۲) آزمایش دوم

فصل ۴

شرح و تحلیل نتایج

۴-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد. در نگاه کلی آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه را می‌توان به دو بخش تقسیم‌بندی کرد:

۱. آزمایش‌های مربوط به سیالات نیوتنی

۲. آزمایش‌های مربوط به سیالات باگر

آزمایش‌های مربوط به سیالات باگر نیز برحسب حضور سیال پلیمری در جایگاه سیال جابجاکننده یا

سیال جابجاشونده، به دودسته اصلی تقسیم‌بندی شده‌اند:

۱. بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاکننده

۲. بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاشونده

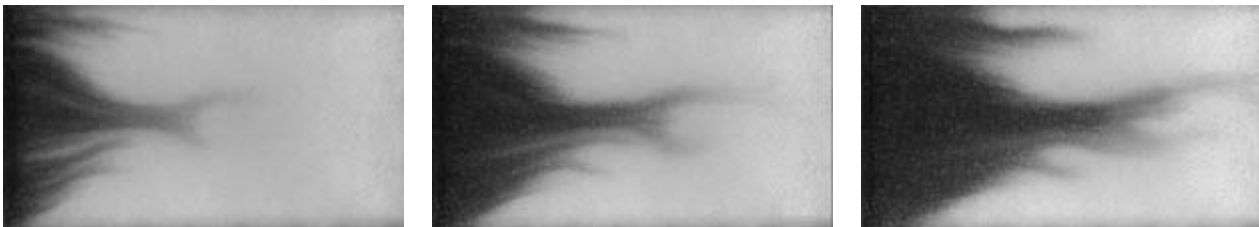
برای بررسی و تحلیل هر آزمایش نمودارهای طول اختلاط، بازده جاروبی و در بعضی آزمایش‌ها نمودار

رشد اغتشاش به حالت پایه ترسیم شده است.

۴-۲- آزمایش‌های مربوط به سیالات نیوتنی

۴-۲-۱- تأثیر افزایش نسبت لزجت ها (R)

شکل ۴-۱، آزمایش ۱ را نشان می‌دهد که در آن محلول ۸۹/۲ به محلول ۲۲۲/۹ با دبی ۵ml/min تزریق می‌شود. در این آزمایش لزجت سیال بستر حدود ۲/۵ برابر سیال تزریق شونده است ($R=۰/۹۱۶$). مشاهده می‌شود که سیال جابجا کننده تمایل به کانالیزه شدن دارد.



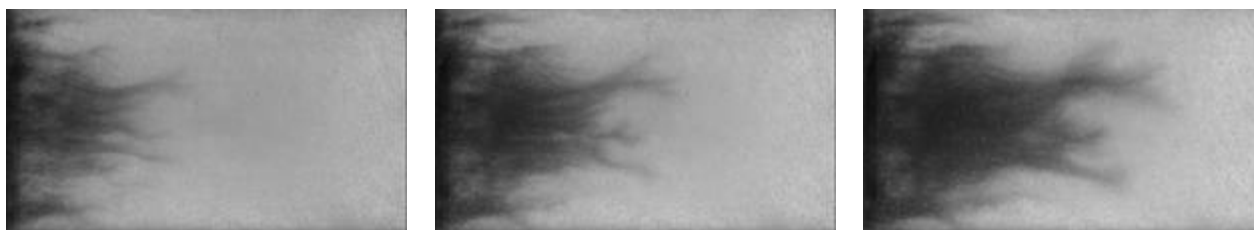
$t=۳۰۰(s)$

$t=۴۲۰(s)$

$t=۵۴۰(s)$

شکل ۴-۱ آزمایش ۱، تزریق محلول ۸۹/۲ به محلول ۲۲۲/۹، $Q=۵ml/min$ ، $R=۰/۹۱۶$ و $Bl=۱/۲۴ \times ۱۰^{-۲}$

شکل ۴-۲، آزمایش ۲ را نشان می‌دهد که در آن محلول ۶۳/۶ به محلول ۶۴۵ با دبی ۵ml/min تزریق می‌شود. در این آزمایش لزجت سیال بستر حدود ۱۰ برابر سیال تزریق شونده است ($R=۲/۳۱$). مشاهده می‌شود که سیال جابجا کننده نسبت به آزمایش ۱ تمایل کمتری به کانالیزه شدن دارد و به صورت چند شاخه‌ای رشد می‌کند.



$t=۳۰۰(s)$

$t=۴۲۰(s)$

$t=۵۴۰(s)$

شکل ۴-۲، آزمایش ۲، تزریق محلول ۶۳/۶ به محلول ۶۴۵، $Q=۵ml/min$ ، $R=۲/۳۱$ و $Bl=۱/۷۳ \times ۱۰^{-۲}$

شکل ۴-۳، آزمایش ۳ را نشان می‌دهد که در آن آب به محلول ۲۲۲/۹ با دبی ۵ml/min تزریق می‌شود. در این آزمایش لزجت سیال بستر حدود ۲۵۰ برابر سیال تزریق شونده است ($R=۵/۵$). مشاهده می‌شود که تمایل سیال جابجا کننده برای شاخه‌شاخه شدن و ایجاد انگشتی‌های ریز افزایش پیدا کرده و سرعت پیش روی سیال نیز بیشتر شده است.



$t=۳۰۰(s)$

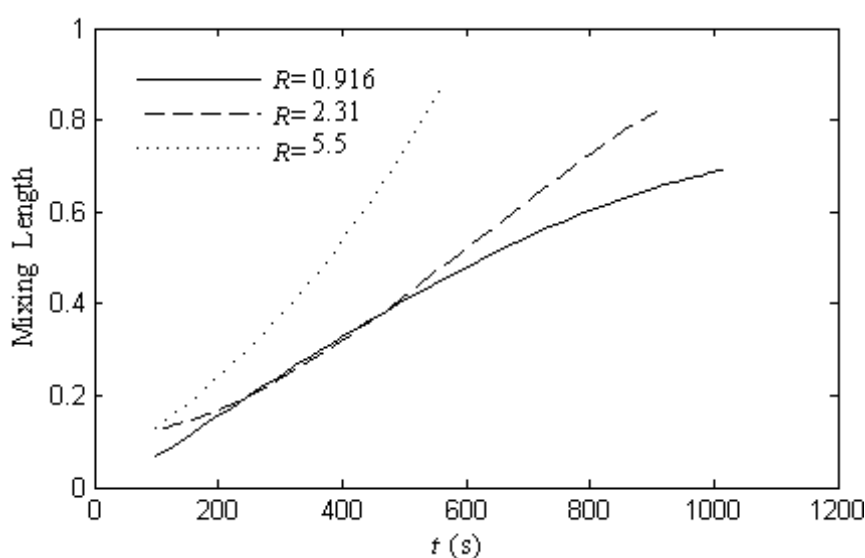
$t=۴۲۰(s)$

$t=۵۴۰(s)$

شکل ۴-۳، آزمایش ۳، تزریق آب به محلول ۲۲۲/۹، $Q=۵ml/min$ ، $R=۵/۵$ و $Bl=۱/۰۲$

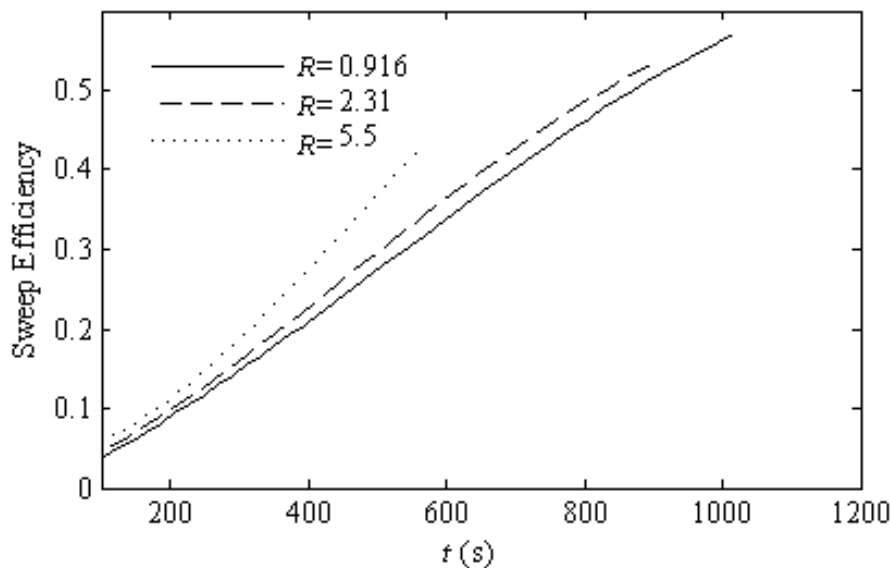
با مقایسه شکل ۴-۱ تا شکل ۴-۳ و مشاهده انگشتی‌ها در یک‌زمان مشخص در R های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش R ، تمایل انگشتی‌ها به پخش شدن افزایش می‌یابد. نتایج گزارش شده حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی پیشین حاکی از آن است که در دبی ثابت این ناپایداری و طول اختلاط

تنها به نسبت لزجت دو سیال بستگی دارد، به طوری که با افزایش R ، پدیده تشدید و با کاهش آن تضعیف می‌شود؛ این موضوع را زیمرمن و هومسی [۷] در نتایج خود گزارش کرده‌اند. در شکل ۴-۴ طول اختلاط برای R های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت این مطالعه نیز نتایج عددی گذشته را تأیید می‌کند. هرچند که در زمان‌هایی ممکن است طول اختلاط با افزایش R افزایش پیدا نکند، اما همان‌طور که قبلاً گفته شد آخرین نقطه در هر نمودار اهمیت دارد، لذا می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش R طول اختلاط و سرعت پیشروی انگشتی‌ها افزایش می‌یابد.



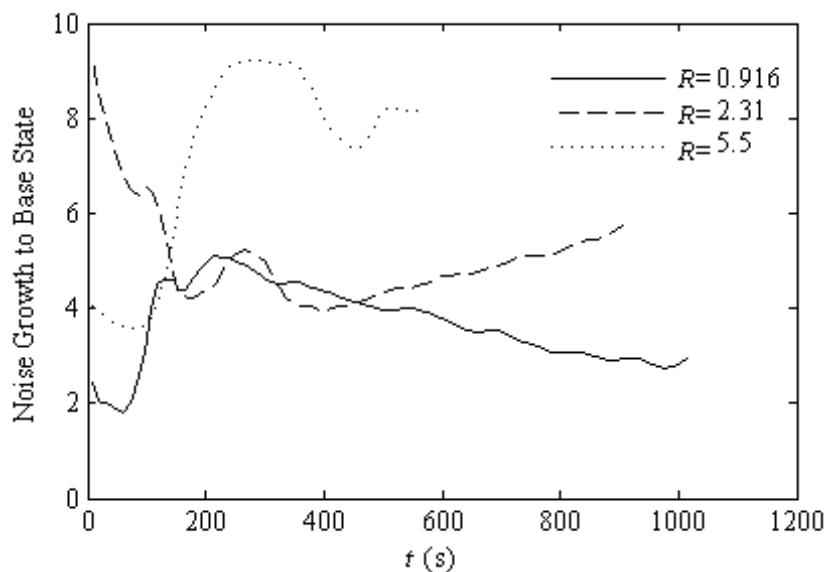
شکل ۴-۴ طول اختلاط برای نسبت لزجت های مختلف، $Q=5\text{ml/min}$

با افزایش R ، بازده جاروبی کاهش می‌یابد. با توجه به مشاهدات عینی علت این رفتار را می‌توان به جاروب نشدن کامل سیال بستر توسط سیال تزریق شونده در R های بزرگ عنوان کرد. کاهش غلظت رنگ مشکی با افزایش R در شکل ۴-۱ تا شکل ۴-۳ گویای این مطلب است. در R های بزرگ، سیال تزریق شونده بیشتر از اینکه بخواهد سیال بستر را در تمام ضخامت محیط متخلخل (4.5 mm) جاروب کند، به دنبال پیدا کردن خلل و فرج‌هایی است که بتواند سریع‌تر به حرکت خود ادامه دهد. در شکل ۴-۵ بازده جاروبی برای R های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ بازده جارویی برای نسبت لزجت های مختلف، $Q=5\text{ml/min}$

شکل ۴-۶ رشد اغتشاش به حالت پایه را در R های مختلف نشان می دهد. هر چه مقدار این پارامتر کمتر باشد نشان دهنده کوچک تر بودن انگشتی ها و جاروب شدن بهتر محیط متخلخل توسط سیال تزریق شونده است. با بررسی نقطه پایانی هر نمودار می توان نتیجه گرفت که با افزایش R رشد اغتشاش به حالت پایه افزایش می یابد. از بررسی شکل ۴-۴ نیز می توان نتیجه گرفت که در هر لحظه از آزمایش با افزایش R طول اختلاط یا ثابت مانده یا افزایش می یابد، بنابراین نوسان هر یک از نمودارها در شکل ۴-۶ مربوط به تغییرات حالت پایه است. در هر R مشخص، جایی که رشد حالت پایه بیشتر از رشد طول اختلاط است، نمودار نزولی و جایی که رشد حالت پایه کمتر از رشد طول اختلاط است، نمودار صعودی است.



شکل ۴-۶ رشد اغتشاش به حالت پایه برای نسبت لزجت های مختلف، $Q=5\text{ml/min}$

۲-۲-۴ تأثیر افزایش عدد بی بعد بلیک

شکل ۴-۷، آزمایش های ۴، ۵ و ۶ را نشان می دهد، در این آزمایش ها تزریق محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲ برای بلیک های مختلف در زمان های مشخص نشان داده شده است و در تمام آن ها لزجت سیال بستر حدود ۲/۵ برابر سیال تزریق شونده است ($R=0.916$). بررسی تصاویر نشان می دهد سیال تزریق شونده بیشتر تمایل دارد از مسیر انگشتی ای که از قبل به وجود آمده به حرکت ادامه دهد. در بلیک پایین سیال فرصت دارد تا وارد کانال انگشتی ای شود که از قبل به وجود آمده و باعث رشد بیشتر آن شود؛ اما با افزایش بلیک، تعداد انگشتی های پهن افزایش می یابد. نکته دیگر پخش شدن انگشتی ها در جهات مختلف با افزایش بلیک است که باعث افزایش جاروب کردن محیط می شود.

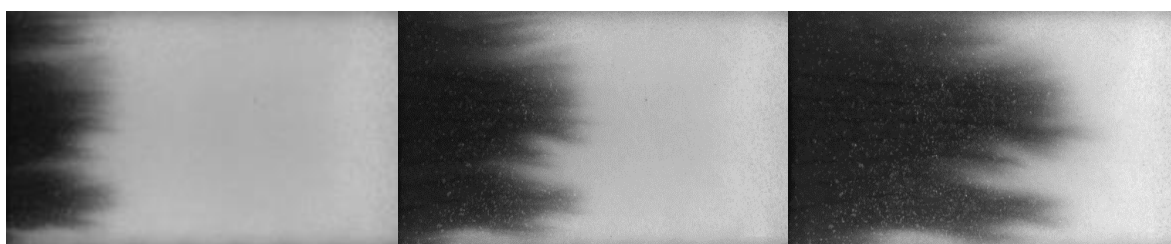


$t=400$ (s)

$t=600$ (s)

$t=800$ (s)

آزمایش ۴ - $BI=1/73 \times 10^{-2}$

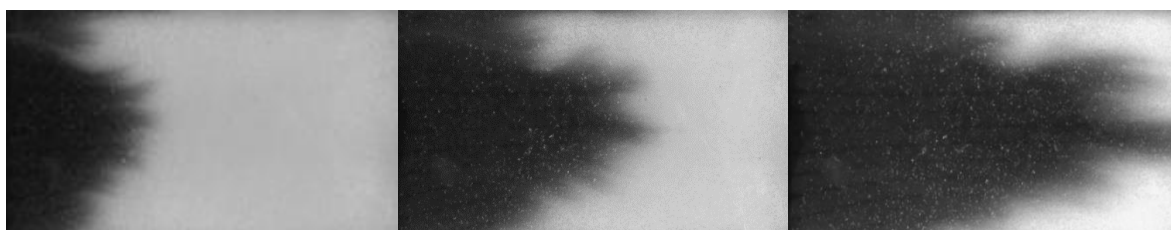


$t=400$ (s)

$t=600$ (s)

$t=800$ (s)

آزمایش ۵ - $BI=2/6 \times 10^{-2}$



$t=400$ (s)

$t=600$ (s)

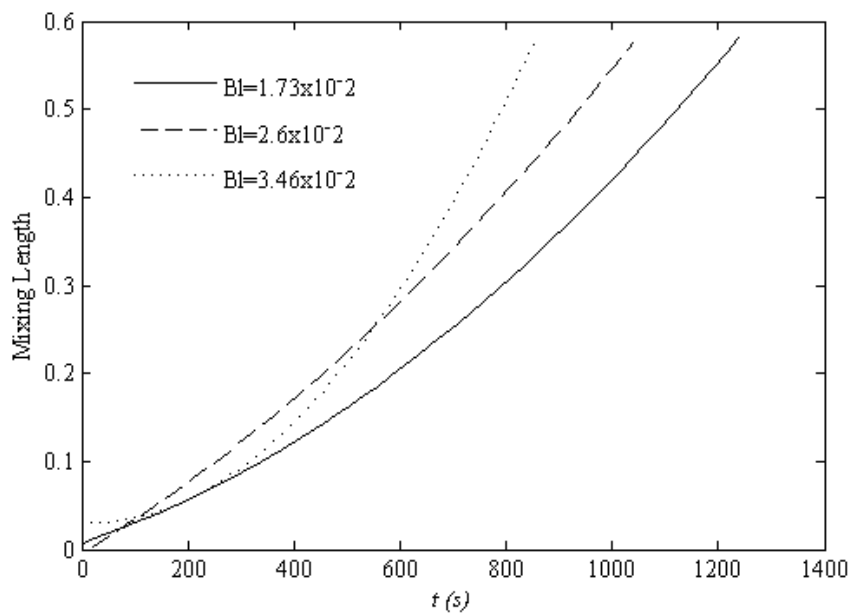
$t=800$ (s)

آزمایش ۶ - $BI=3/46 \times 10^{-2}$

شکل ۴-۷ تزریق محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲ ($R=0/916$)

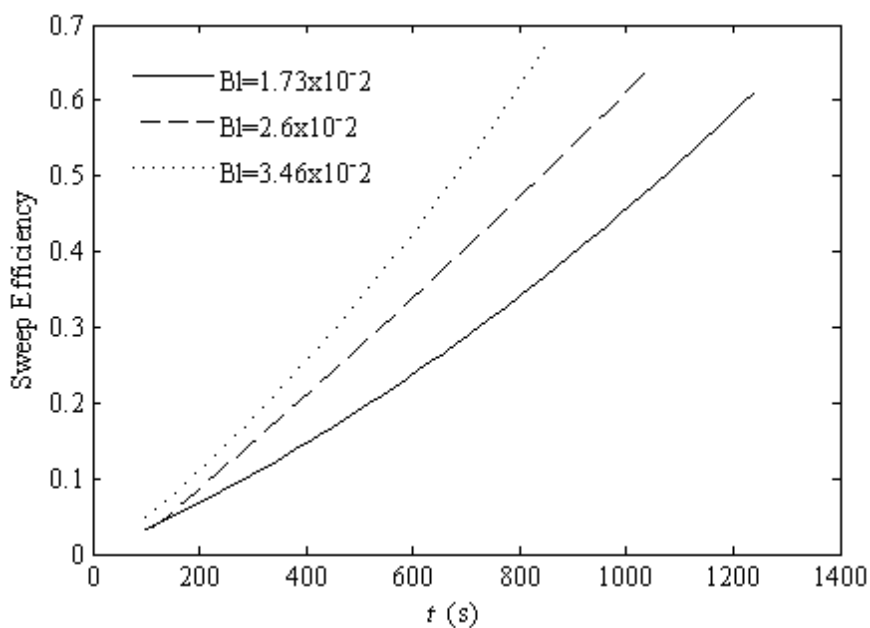
شکل ۴-۸، طول اختلاط را برای تزریق محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲ در بلیک های مختلف نشان می دهد.

مشاهده می شود که با افزایش بلیک، طول اختلاط مقدار کمی کاهش می یابد.



شکل ۸-۴ طول اختلاط برای بلیک های مختلف، ($R=0.916$)

شکل ۹-۴، بازده جاروبی را برای تزریق محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲ در بلیک های مختلف نشان می دهد. با توجه به اختلاف لزجت کم سیال جابجا کننده با سیال بستر و با بررسی شکل ۷-۴، علت افزایش بازده جاروبی با افزایش بلیک را می توان پخش شدن نوک انگشتی ها و فرصت نیافتن سیال جابجا کننده برای کانالیزه شدن در بلیک های بالاتر عنوان کرد.



شکل ۹-۴ بازده جاروبی برای بلیک های مختلف، ($R=0.916$)

۳-۴- آزمایش‌های مربوط به سیالات باگر

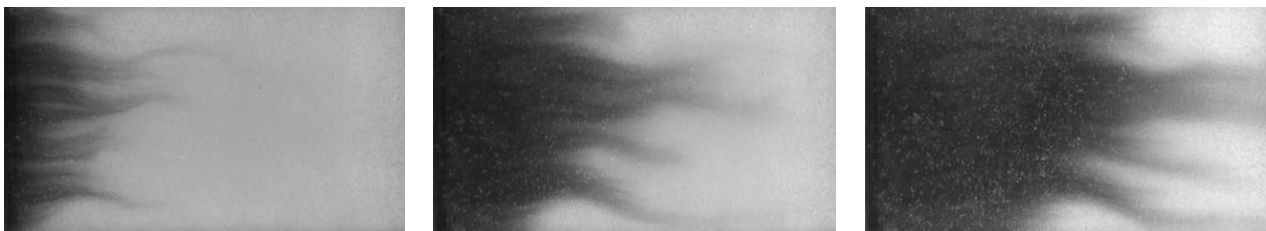
۱. بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاکننده

۲. بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاشونده

۱-۳-۴ بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجاکننده

۳-۳-۱-۱- تأثیر افزایش نسبت لزجت ها (R)

شکل ۴-۱۰، آزمایش ۷ را نشان می‌دهد که در آن باگر ۵۰ به محلول ۱۵۹/۲ تزریق می‌شود. در این آزمایش لزجت سیال بستر حدود ۲/۵ برابر سیال تزریق شونده است ($R=۰/۹۱۶$)، عدد بلیک برابر با $۱۰^{-۲}$ و عدد الاستیسیته برابر است با $El=۴۶۴/۴$. مشاهده می‌شود که سیال جابجا کننده تمایل به کانالیزه شدن دارد.



$t=۳۰۰(s)$

$t=۶۰۰(s)$

$t=۹۰۰(s)$

شکل ۴-۱۰، آزمایش ۷، تزریق باگر ۵۰ به محلول ۱۵۹/۲، $R=۰/۹۱۶$ ، $El=۴۶۴/۴$ و $Bl=۱/۷۳ \times ۱۰^{-۲}$.

شکل ۴-۱۱، آزمایش ۸ را نشان می‌دهد که در آن باگر ۵۰ به محلول ۶۴۵ تزریق می‌شود. در این آزمایش لزجت سیال بستر حدود ۱۰ برابر سیال تزریق شونده است ($R=۲/۳۱$)، عدد بلیک برابر با $۱۰^{-۲}$ و عدد الاستیسیته برابر است با $El=۴۶۴/۴$. مشاهده می‌شود که نسبت به آزمایش ۷ تعداد انگشتی‌ها در مرز ناپایداری افزایش پیدا کرده است.



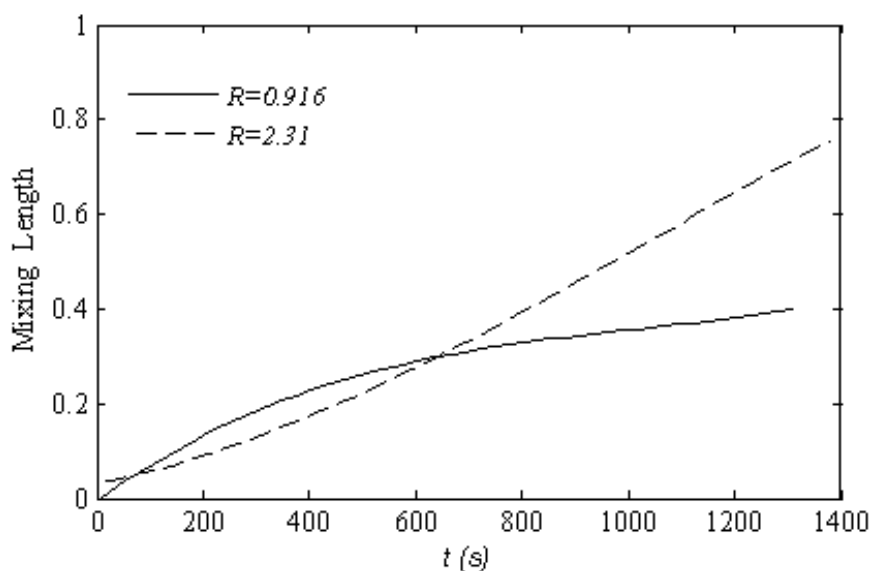
$t=300(s)$

$t=600(s)$

$t=900(s)$

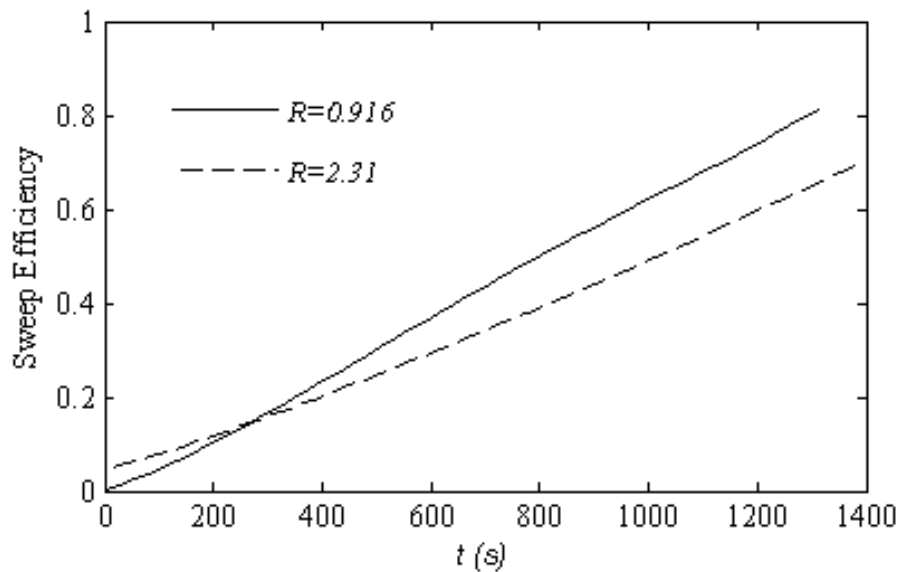
شکل ۴-۱۱، آزمایش ۸، تزریق با گر ۵۰ به محلول ۶۴۵، $R=2/31$ ، $Bl=1/73 \times 10^{-2}$ و $El=464/4$.

با مقایسه شکل ۴-۱۰ و شکل ۴-۱۱ و مشاهده انگشتی‌ها در یک‌زمان مشخص در R های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش R ، ناپایداری افزایش و رشد حالت پایه کاهش می‌یابد. در شکل ۴-۱۲ طول اختلاط برای R های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت نتایج در حالت غیر نیوتنی مشابه نتایج آزمایش‌های نیوتنی است. همان‌طور که قبلاً گفته شد آخرین نقطه در هر نمودار اهمیت دارد، لذا می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش R طول اختلاط و سرعت پیشروی انگشتی‌ها افزایش می‌یابد.



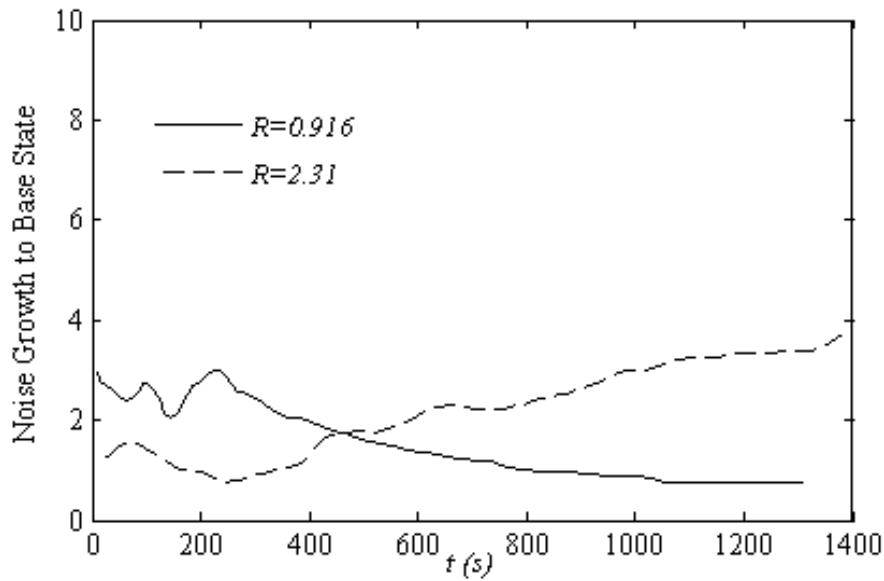
شکل ۴-۱۲ طول اختلاط برای نسبت لزجت های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $Bl=1/73 \times 10^{-2}$ و $El=464/4$.

با افزایش R ، بازده جارویی کاهش می‌یابد. علت این رفتار را می‌توان کاهش رشد حالت پایه عنوان کرد. در شکل ۱۳-۴ بازده جارویی برای R های مختلف در حالت غیر نیوتنی نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۴ بازده جارویی برای نسبت لزجت های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $BI=1/73 \times 10^{-2}$ و $EI=464/4$.

شکل ۱۴-۴ رشد اغتشاش به حالت پایه را در R های مختلف نشان می‌دهد. هر چه مقدار این پارامتر کمتر باشد، نشان‌دهنده کوچک‌تر بودن انگشتی‌ها و جاروب شدن بهتر محیط متخلخل توسط سیال تزریق شونده است. با بررسی روند کلی و نقطه پایانی هر نمودار می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش R رشد اغتشاش به حالت پایه افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۱۴ رشد اغتشاش به حالت پایه برای نسبت لزجت های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $BI = 1/73 \times 10^{-2}$ و

$$.El = 464/4$$

به طور کلی می توان نتیجه گرفت در حالت غیر نیوتنی مشابه حالت نیوتنی با افزایش R ناپایداری

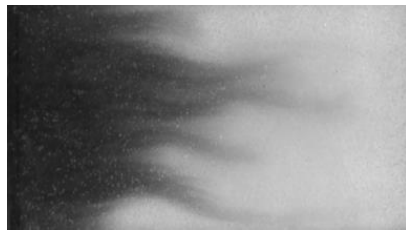
افزایش پیدا می کند.

۳-۱-۲- تأثیر افزایش عدد بی بعد بلیک

شکل ۴-۱۵، آزمایش های ۷ و ۹ را نشان می دهد، در این دو آزمایش تزریق با گر ۵۰ به محلول $159/2$ برای بلیک های مختلف در زمان های مشخص نشان داده شده است و در آن ها لزجت سیال بستر حدود $2/5$ برابر سیال تزریق شونده است ($R = 0/916$)، عدد الاستیک نیز در این آزمایش ها برابر است با $El = 464/4$. بررسی تصاویر نشان می دهد سیال تزریق شونده بیشتر تمایل دارد از مسیر انگشتی ای که از قبل به وجود آمده به حرکت ادامه دهد. در بلیک پایین سیال فرصت دارد تا وارد کانال انگشتی ای شود که از قبل به وجود آمده و باعث رشد بیشتر آن شود؛ اما با افزایش بلیک، ناپایداری کاهش و رشد حالت پایه افزایش می یابد.



$t=300(s)$



$t=600(s)$

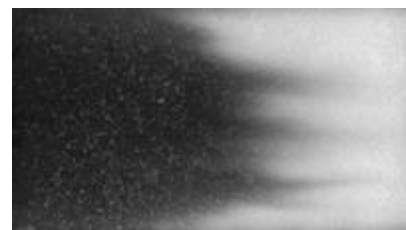


$t=900(s)$

آزمایش ۷ - $Bl=1/73 \times 10^{-2}$



$t=300(s)$



$t=600(s)$

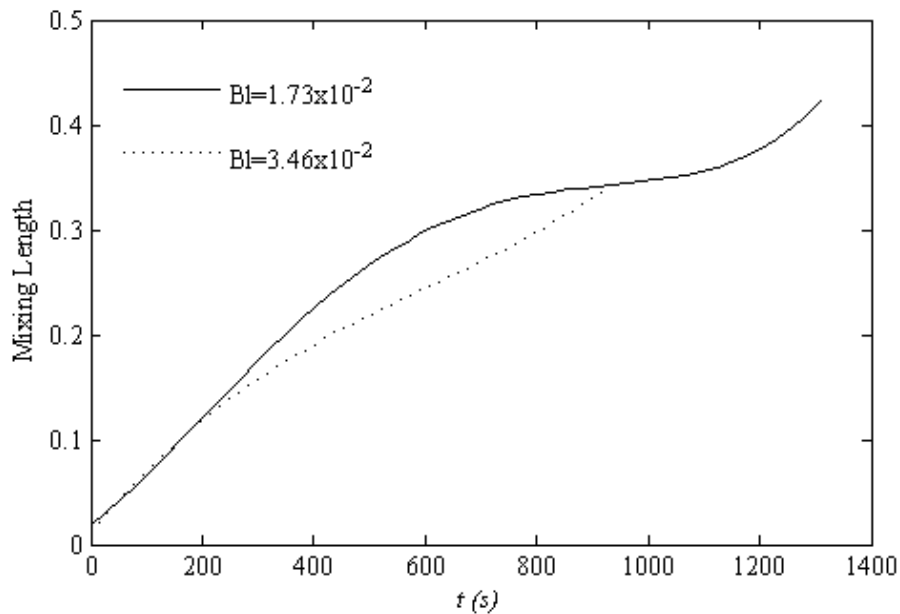


$t=900(s)$

آزمایش ۹ - $Bl=3/46 \times 10^{-2}$

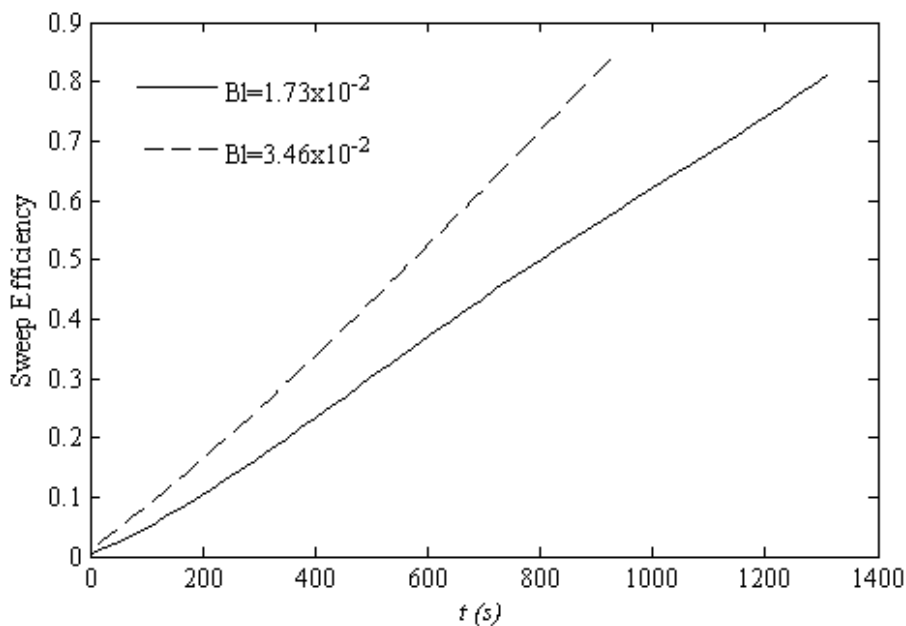
شکل ۴-۱۵ تزریق باگر ۵۰ به محلول ۱۵۹/۲، $R=0/916$ و $El=464/4$.

شکل ۴-۱۶، طول اختلاط را برای تزریق باگر ۵۰ به محلول ۱۵۹/۲ در بلیک های مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش بلیک، طول اختلاط کاهش می یابد.



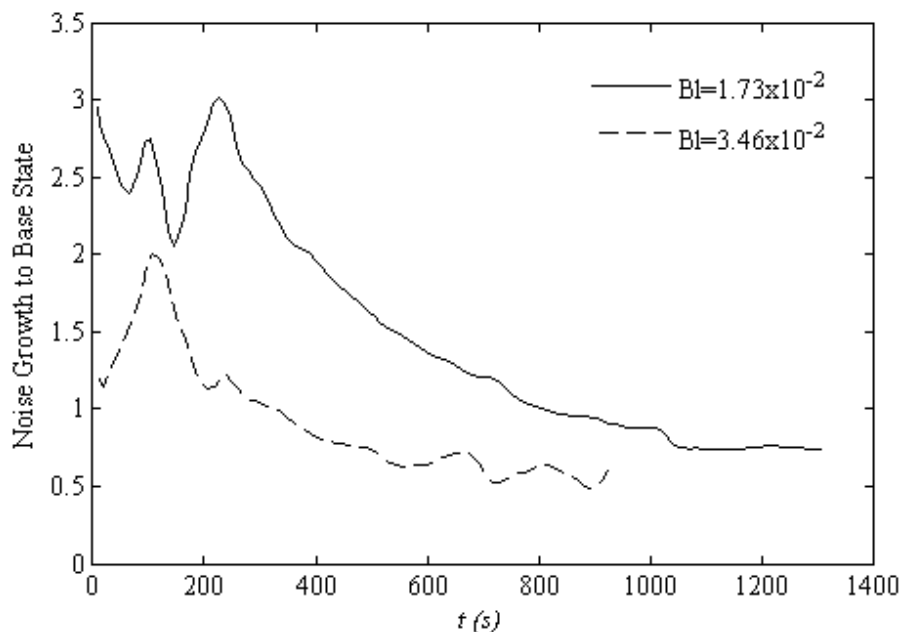
شکل ۴-۱۶ طول اختلاط در بلیک های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $R = 0.916$ و $El = 464/4$.

شکل ۴-۱۷، بازده جاروبی را برای تزریق باگر ۵۰ به محلول ۱۵۹/۲ در بلیک های مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش بلیک، بازده جاروبی مقدار کمی افزایش پیدا می کند.



شکل ۴-۱۷ بازده جاروبی برای بلیک های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $R = 0.916$ و $El = 464/4$.

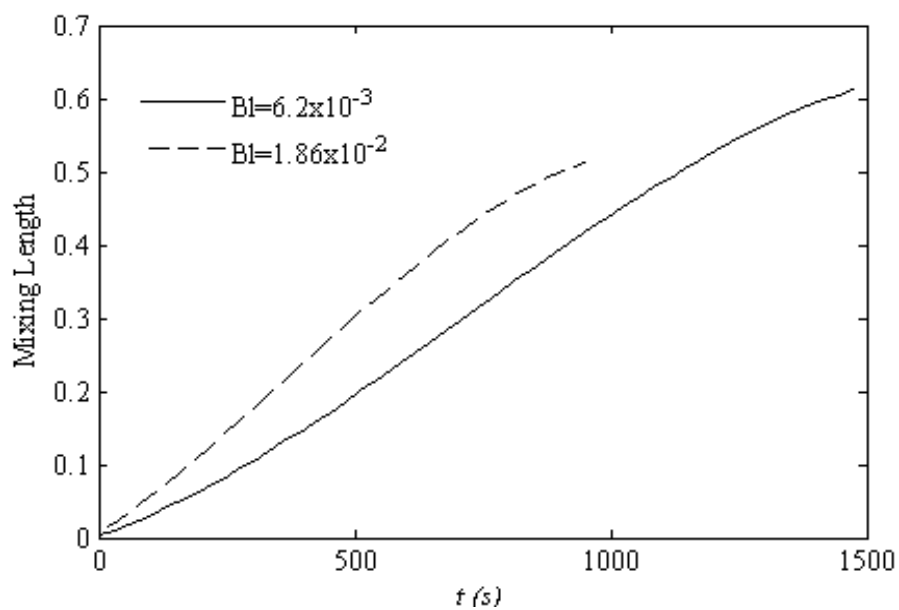
شکل ۴-۱۸، رشد اغتشاش به حالت پایه را برای تزریق باگر ۵۰ به محلول ۱۵۹/۲ در بلیک های مختلف نشان می‌دهد. با بررسی این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد بلیک، ناپایداری کاهش پیدا می‌کند.



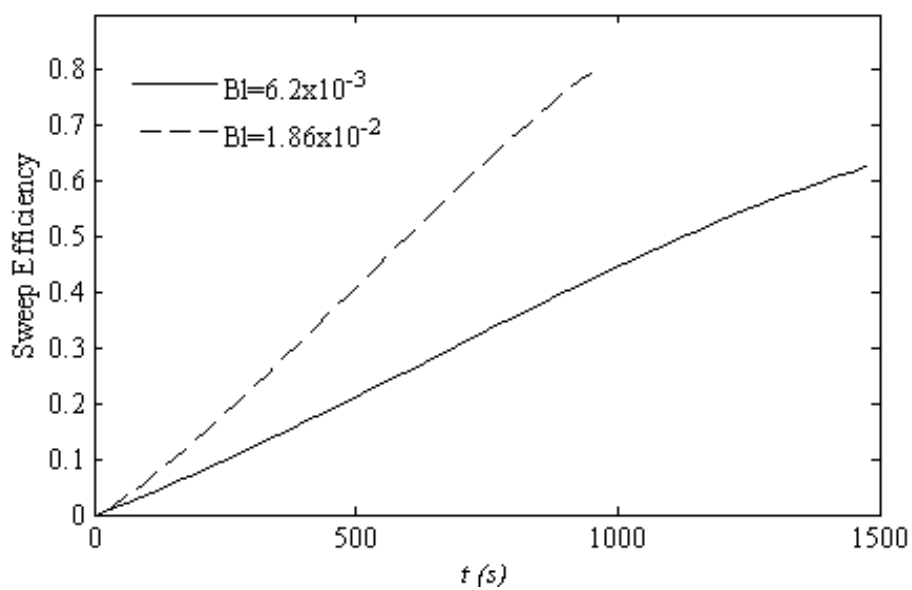
شکل ۴-۱۸ رشد اغتشاش به حالت پایه برای بلیک های مختلف در حالت غیر نیوتنی، $R=0/916$ و $EI=464/4$.

در ادامه به بررسی تأثیر افزایش بلیک در آزمایش‌هایی با الاستیسیته بالاتر می‌پردازیم.

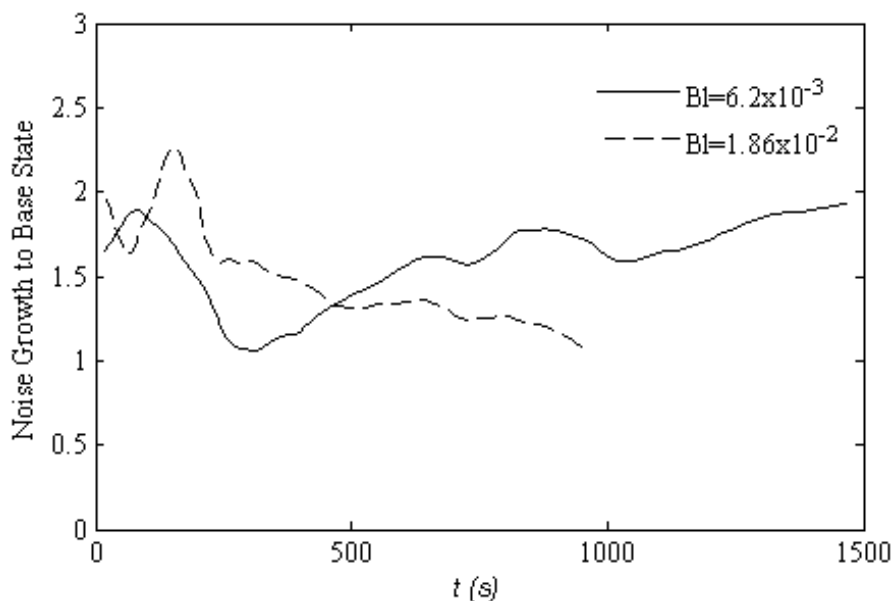
شکل ۴-۱۹ تا شکل ۴-۲۱ به ترتیب نمودارهای طول اختلاط، بازده جارویی و رشد اغتشاش به حالت پایه را برای آزمایش‌های ۱۰ و ۱۱ در بلیک های مختلف نشان می‌دهند، در این دو آزمایش تزریق باگر ۱۰۰ به محلول ۲۲۲/۹ انجام شده است و در آن‌ها لزجت سیال بستر حدود ۲/۵ برابر سیال تزریق شونده است ($R=0/916$)، عدد الاستیک نیز در این آزمایش‌ها برابر است با $EI=883/15$. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در این آزمایش‌ها نیز مشابه با آزمایش‌های غیر نیوتنی که با الاستیسیته $EI=464/4$ انجام شد، با افزایش بلیک، ناپایداری و طول اختلاط کاهش و بازده جارویی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹-۴ طول اختلاط در بلیک های مختلف، $R = 0.916$ و $El = 883/15$.



شکل ۲۰-۴ بازده جارویی در بلیک های مختلف، $R = 0.916$ و $El = 883/15$.

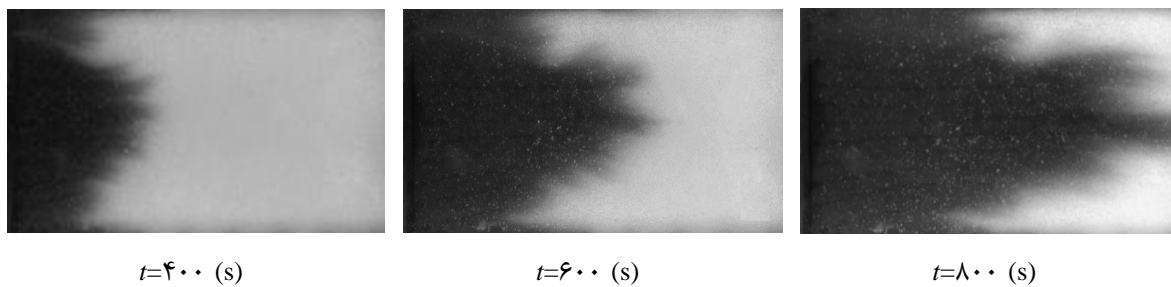


شکل ۴-۲۱ رشد اغتشاش به حالت پایه برای بلیک های مختلف، $R=0/916$ و $El=883/15$.

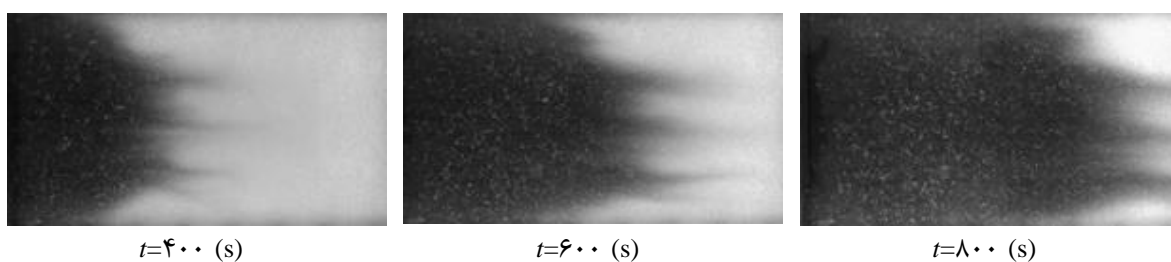
۳-۱-۳-۳ مقایسه حالت نیوتنی و غیر نیوتنی (تأثیر الاستیسیته)

برای مشاهده تأثیر خواص الاستیک بر سیال جابجا کننده و نقش آن در شکل گیری و رشد ناپایداری انگشتی لزج، آزمایش هایی را طراحی شده که در آن ها تمام پارامترهای مؤثر بر آزمایش ثابت هستند؛ در این آزمایش ها یکبار از باگر در نقش سیال جابجا کننده استفاده شده است و یکبار از سیال نیوتنی با لزجت معادل باگر.

شکل ۴-۲۲، آزمایش های ۶ و ۹ را نشان می دهد، در آزمایش ۹ تزریق باگر ۵۰ به محلول ۱۵۹/۲ در زمان های مشخص نشان داده شده است. عدد الاستیک نیز در این آزمایش برابر است با $El=464/4$. در آزمایش ۶ نیز محلول ۶۳/۶ که لزجتی برابر با باگر ۵۰ دارد به محلول ۱۵۹/۲ تزریق شده و تصاویر آن در زمان های مشخص نشان داده شده است. در هر دو آزمایش لزجت سیال بستر حدود ۲/۵ برابر سیال تزریق شونده است ($R=0/916$)، همچنین عدد بلیک برای هر دو آزمایش $BI=3/46 \times 10^{-2}$ می باشد. بررسی تصاویر نشان می دهد که رشد حالت پایه در حالت غیر نیوتنی بیشتر از حالت نیوتنی است. الگوی تشکیل و رشد انگشتی ها نیز در حالت غیر نیوتنی کاملاً متفاوت از حالت نیوتنی است.



آزمایش ۶ - نیوتنی - $El = 0$

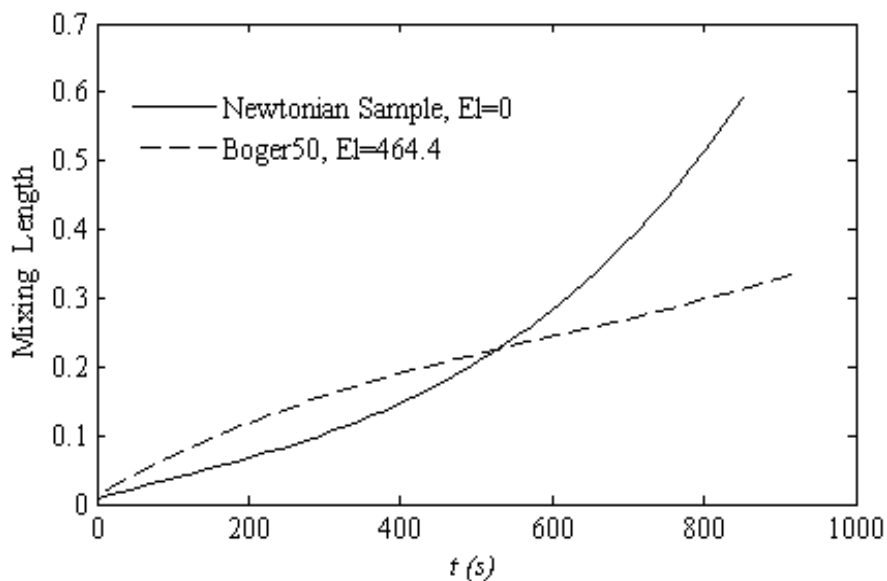


آزمایش ۹ - غیر نیوتنی - $El = 464.4$

شکل ۴-۲۲ مقایسه با گر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ در تزریق به محلول ۱۵۹/۲، $R=۰/۹۱۶$ و $BI=۳/۴۶ \times ۱۰^{-۲}$

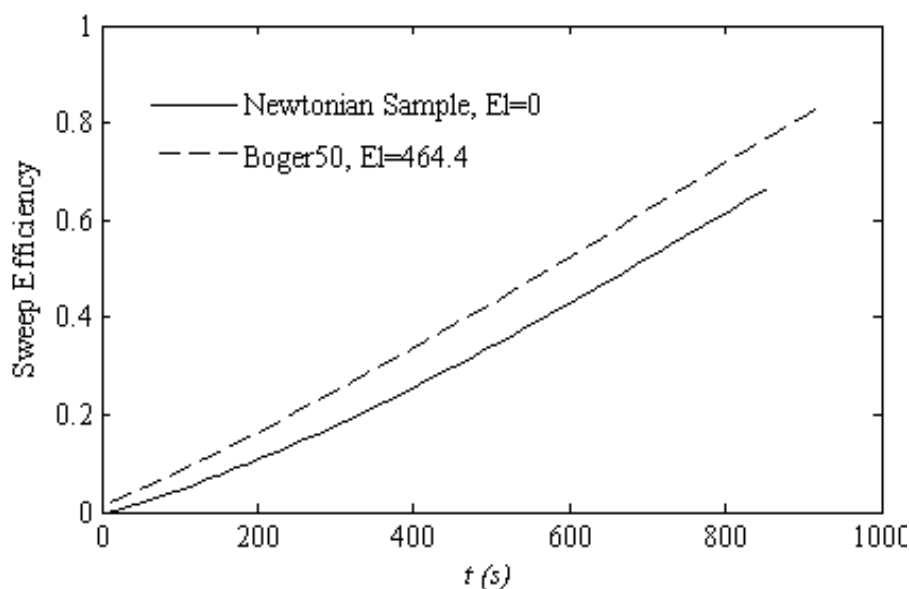
شکل ۴-۲۳، طول اختلاط را برای آزمایش‌های ۶ و ۹ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزودن

خواص الاستیک، طول اختلاط کاهش می‌یابد.



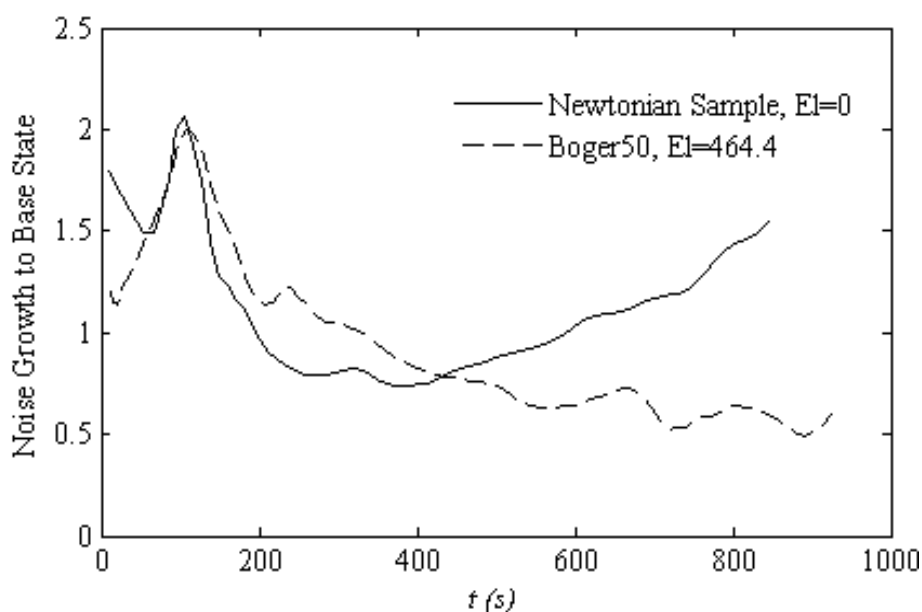
شکل ۴-۲۳ مقایسه طول اختلاط در تزریق با گر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲، $R=0.916$ و $BI=3/46 \times 10^{-2}$

شکل ۴-۲۴، بازده جاروبی را برای آزمایش‌های ۶ و ۹ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزودن خواص الاستیک، بازده جاروبی افزایش پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۴-۲۲ علت این امر را می‌توان رشد بیشتر حالت پایه و پایداری بیشتر مرز اختلاط در حالت غیرنیوتنی عنوان کرد.



شکل ۴-۲۴ مقایسه بازده جاروبی در تزریق با گر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲، $R=0.916$ و $BI=3/46 \times 10^{-2}$

شکل ۴-۲۵، رشد اغتشاش به حالت پایه را برای آزمایش‌های ۶ و ۹ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزودن خواص الاستیک، ناپایداری کاهش پیدا می‌کند. در تحلیل نمودار نیوتنی بعد از ۳۰٪ اولیه می‌توان گفت، با توجه به این که حالت پایه همیشه رو به افزایش است، افزایش طول انگشتی‌ها با گذشت زمان است؛ اما در نمودار غیرنیوتنی این شیب منفی است که نشان می‌دهد طول انگشتی‌ها با گذشت زمان کاهش پیدا می‌کنند.



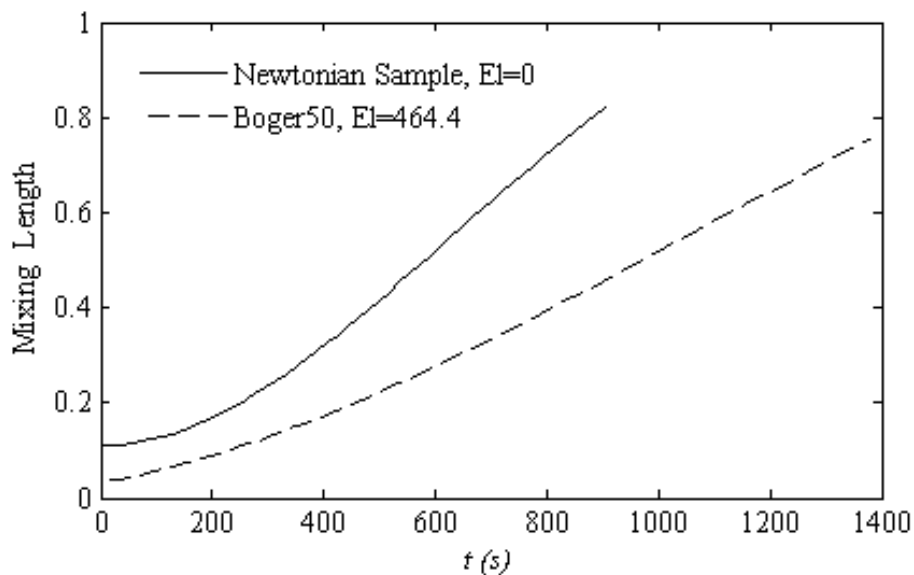
شکل ۴-۲۵ مقایسه رشد اغتشاش به حالت پایه در تزریق باگر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۱۵۹/۲، $R=0.916$

$$\text{و } BI=3/46 \times 10^{-2}$$

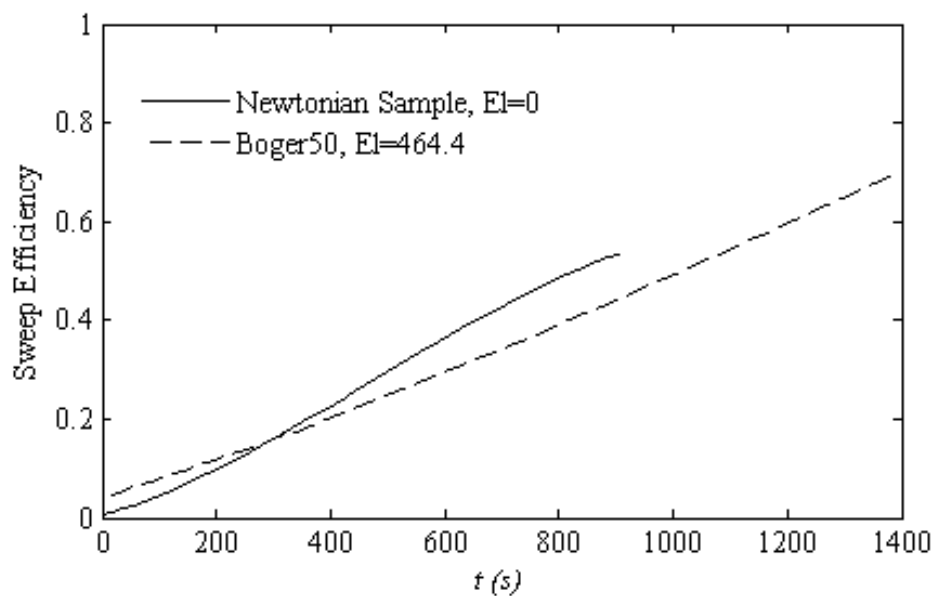
در ادامه به مقایسه این ناپایداری در حالت نیوتنی و غیرنیوتنی در R بزرگ‌تر می‌پردازیم.

شکل ۴-۲۶ تا شکل ۴-۲۸ به ترتیب نمودارهای طول اختلاط، بازده جاروبی و رشد اغتشاش به حالت پایه را برای آزمایش‌های ۲ و ۸ نشان می‌دهند، در آزمایش ۸ تزریق باگر ۵۰ به محلول ۶۴۵ انجام شده است. عدد الاستیک در این آزمایش برابر است با $El=464/4$. در آزمایش ۲ نیز محلول ۶۳/۶ که لزجتی معادل با باگر ۵۰ دارد به محلول ۶۴۵ تزریق شده است. در هر دو آزمایش لزجت سیال بستر حدود ۱۰ برابر سیال تزریق شونده است ($R=2/31$) و عدد بلیک در هر دو آزمایش $BI=1/73 \times 10^{-2}$ می‌باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در این آزمایش‌ها نیز مشابه با آزمایش‌های مقایسه حالت نیوتنی و غیرنیوتنی که با

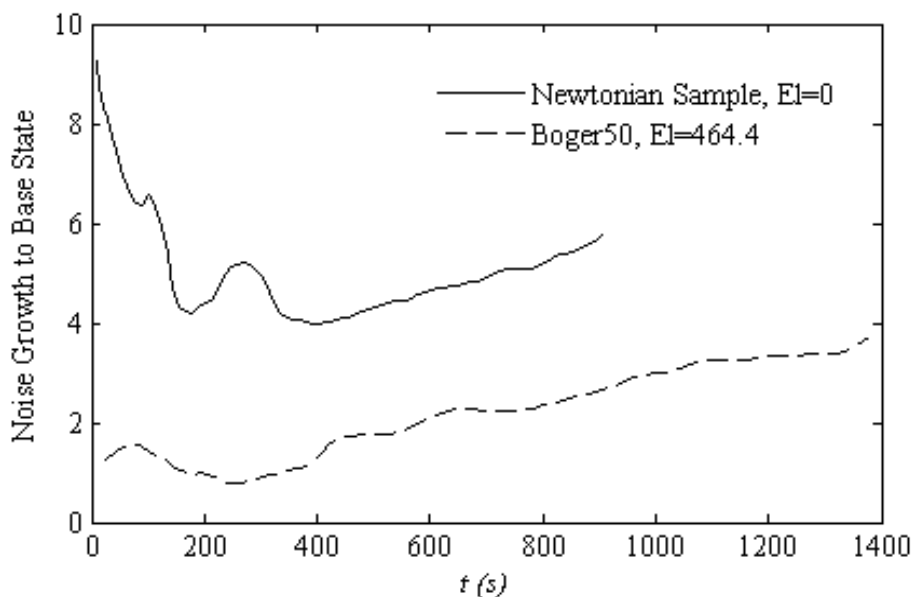
$R=0.916$ انجام شد، با افزودن خواص الاستیک، ناپایداری و طول اختلاط کاهش و بازده جاروبی افزایش می‌یابد.



شکل ۲۶-۴ مقایسه طول اختلاط در تزریق با گر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۶۴۵، $R=2/31$ و $BI=1/73 \times 10^{-2}$



شکل ۲۷-۴ مقایسه بازده جاروبی در تزریق با گر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۶۴۵، $R=2/31$ و $BI=1/73 \times 10^{-2}$



شکل ۴-۲۸ مقایسه رشد اغتشاش به حالت پایه در تزریق باگر ۵۰ و محلول ۶۳/۶ به محلول ۶۴۵، $R=۲/۳۱$

$$\text{و } BI=۱/۷۳ \times ۱۰^{-۲}$$

۲-۳-۴ بررسی اثرات الاستیک بر سیال جابجا شونده

۴-۳-۲-۱- تأثیر افزایش عدد بی بعد بلیک

شکل ۴-۲۹، آزمایش‌های ۱۲ و ۱۳ را نشان می‌دهد، در این دو آزمایش تزریق محلول ۱/۲۵ به باگر ۱۰۰ برای بلیک‌های مختلف در زمان‌های مشخص نشان داده شده است. در این آزمایش‌ها لزجت سیال بستر حدود ۷۱ برابر سیال تزریق شونده است ($R=۴/۲۷$). بررسی تصاویر نشان می‌دهد با افزایش بلیک، رشد حالت پایه کاهش می‌یابد و همگرایی انگشتی‌ها بیشتر می‌شود.



$t=280(s)$



$t=560(s)$



$t=840(s)$

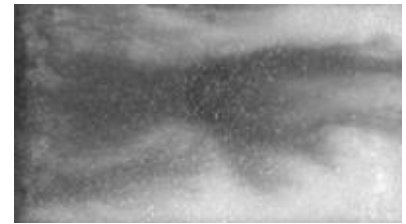
آزمایش ۱۲ - $BI = 3/78 \times 10^{-1}$



$t=100(s)$



$t=200(s)$



$t=280(s)$

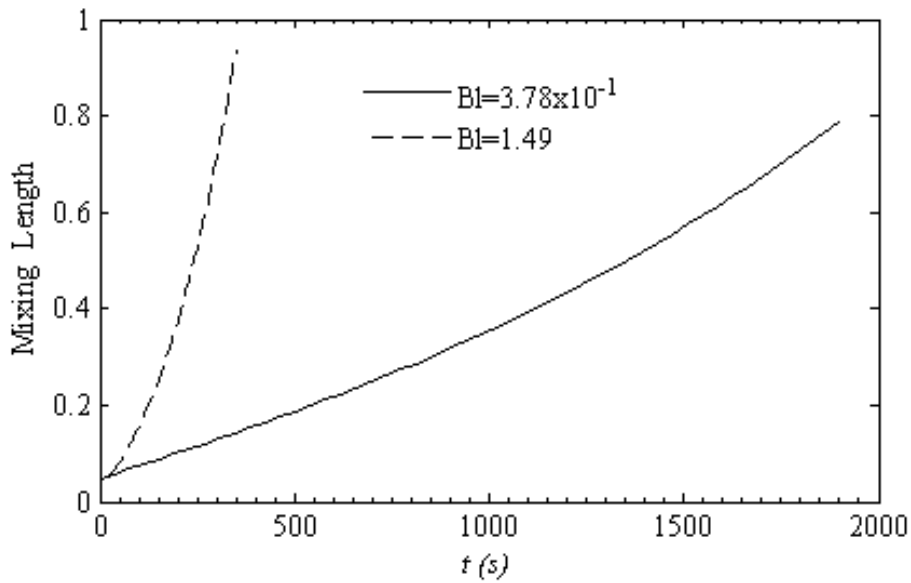
آزمایش ۱۳ - $BI = 1/49$

شکل ۴-۲۹ تزریق محلول ۱/۲۵ به باگر ۱۰۰ در بلیک های مختلف، $R = 4/27$

شکل ۴-۳۰، طول اختلاط را برای تزریق محلول ۱/۲۵ به باگر ۱۰۰ در بلیک های مختلف نشان

می دهد. مشاهده می شود که با افزایش بلیک، طول اختلاط افزایش می یابد. با توجه به شکل ۴-۲۹ علت

این رفتار را می توان همگرا شدن انگشتی ها با افزایش بلیک عنوان کرد.

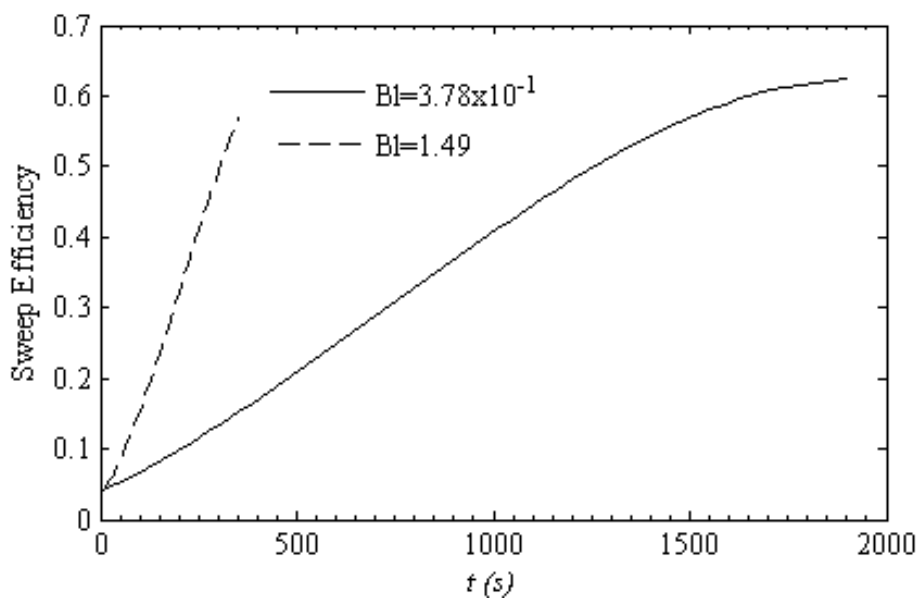


شکل ۴-۳۰ طول اختلاط در تزریق محلول ۱/۲۵ به باگر ۱۰۰ در بلیک های مختلف، $R=4/27$

شکل ۴-۳۱، بازده جاروبی را برای تزریق محلول ۱/۲۵ به باگر ۱۰۰ در بلیک های مختلف نشان

می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش بلیک، بازده جاروبی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۴-۲۹

علت این رفتار کاهش رشد حالت پایه با افزایش بلیک است.



شکل ۴-۳۱ بازده جاروبی در تزریق محلول ۱/۲۵ به باگر ۱۰۰ در بلیک های مختلف، $R=4/27$

۳-۳-۲-۲- تأثیر افزایش الاستیسیته

شکل ۴-۳۲، آزمایش‌های ۱۳ و ۱۴ را نشان می‌دهد، در آزمایش ۱۳ تزریق محلول ۱/۲۵ به باگر ۱۰۰ انجام شده و در آزمایش ۱۴ نیز آب به باگر ۵۰ تزریق شده است. در هر دو آزمایش‌ها لزجت سیال بستر حدود ۷۱ برابر سیال تزریق شونده است ($R=۴/۲۷$). همچنین دبی سیال جابجا کننده آزمایش‌ها $Q=۱۰\text{ ml/min}$ می‌باشد. با بررسی تصاویر هر آزمایش در زمان‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت جاروب کردن محیط در حالتی که از باگر ۵۰ استفاده شده بهتر است. این رفتار را می‌توان با توجه به خواص کشسان سیال باگر توجیه کرد. در حالتی که بستر از باگر ۱۰۰ که دارای رشته‌های پلیمری بیشتری می‌باشد پر شده، سیال تزریق شونده نمی‌تواند در تمام ضخامت محیط متخلخل، باگر را جابجا کند و در بخشی از این ضخامت به حرکت درمی‌آید و با سرعت زیادی به انتهای سلول می‌رسد؛ اما در حالتی که بستر از باگر ۵۰ پر شده است، سیال تزریق شونده می‌تواند باگر را در تمام ضخامت محیط جابجا کند. شکل ۴-۳۲ نشان می‌دهد که در آزمایش باگر ۵۰، سیال نیوتنی تمایل به کانالیزه شدن دارد در حالی که در آزمایش باگ ۱۰۰، سیال نیوتنی به صورت چند شاخه‌ای رشد می‌کند.



$t=200(s)$

$t=280(s)$

$t=360(s)$

آزمایش ۱۴ - سیال بستر = باگر ۵۰



$t=100(s)$

$t=200(s)$

$t=280(s)$

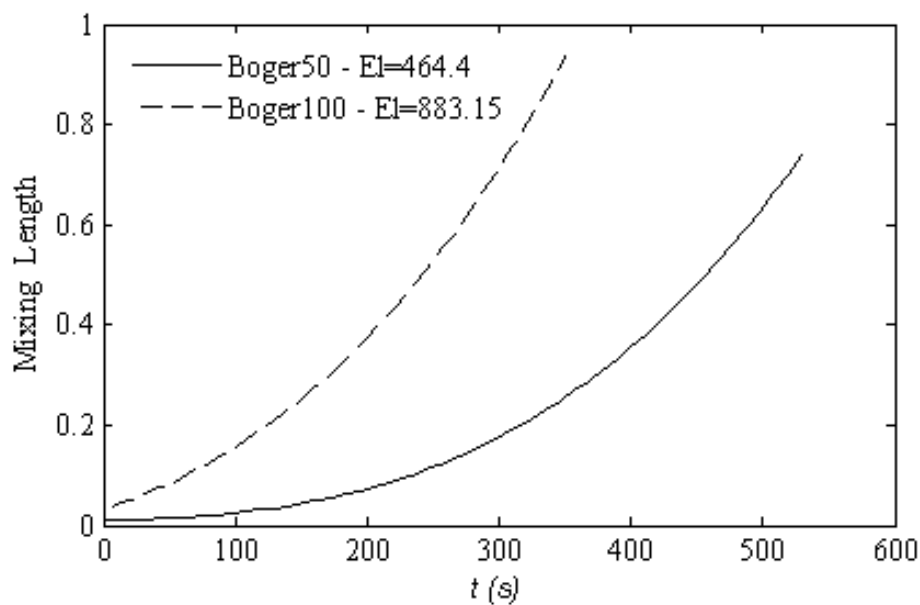
آزمایش ۱۳ - سیال بستر = باگر ۱۰۰

شکل ۳۲-۴ تأثیر افزایش الاستیسیته روی سیال جابجا شونده، $R=4/27$ ، $Q=10\text{ ml/min}$

شکل ۳۳-۴، طول اختلاط را برای آزمایش‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش

الاستیسیته سیال بستر، طول اختلاط افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۳۲-۴ علت این رفتار را می‌توان

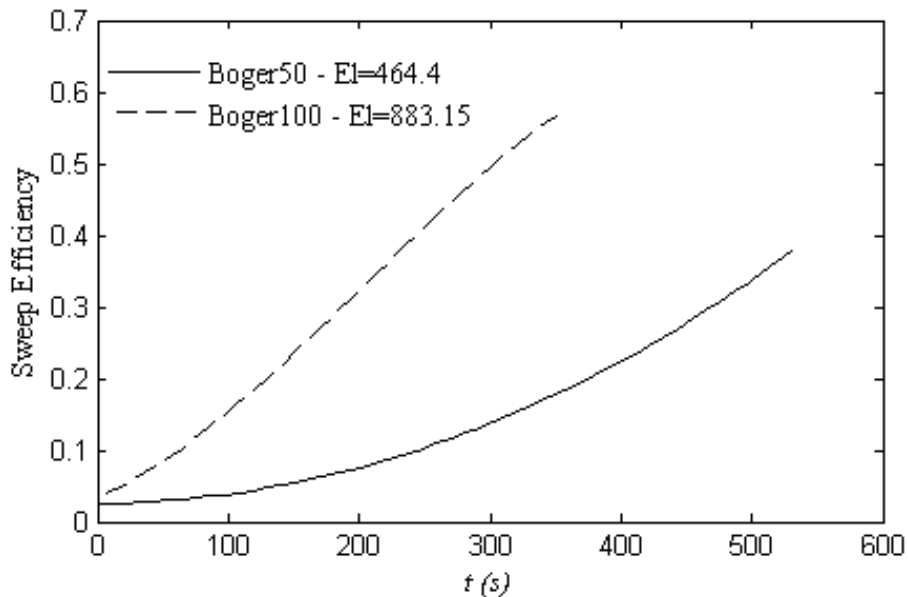
رشد کم حالت پایه با افزایش الاستیسیته عنوان کرد.



شکل ۳۳-۴ تأثیر افزایش الاستیسیته بر طول اختلاط در تزریق سیال نیوتنی به باگر، $R=4/27$ ، $Q=10\text{ ml/min}$

شکل ۳۴-۴، بازده جاروبی را برای آزمایش‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش

الاستیسیته سیال بستر، بازده جاروبی افزایش می‌یابد.



شکل ۳۴-۴ تأثیر افزایش الاستیسیته بر بازده جاروبی در تزریق سیال نیوتنی به باگر، $R=4/27$ ، $Q=10\text{ ml/min}$

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

در این مطالعه تلاش شد تا با انجام یک سری آزمایش، تحقیقاتی بر روی ناپایداری انگشتی لزج در جابجایی مخلوط شدنی نیوتنی و غیر نیوتنی انجام شود. به منظور کاربردی تر شدن نتایج، به جای استفاده از سلول هل-شاو، محیط متخلخل شفاف ساخته شد که تخلخل و نفوذپذیری آن به یک مخزن واقعی نفت (ماسه سنگ نفت) نزدیک تر باشد. در این آزمایش‌ها به بررسی تأثیر افزایش نسبت لزجت‌ها (R) و افزایش عدد بی بعد بلیک بر شکل انگشتی‌ها و تأثیر آن‌ها بر پارامترهای فیزیکی مهمی از جمله طول اختلاط، بازده جاروبی و رشد اغتشاش به حالت پایه برای جابجایی نیوتنی و غیر نیوتنی پرداخته شد. همچنین در حالت غیرنیوتنی به تأثیر الاستیسیته و افزایش این پارامتر نیز پرداخته شد. در ادامه جمع‌بندی نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است.

۵-۲- نتیجه‌گیری

افزایش نسبت لزجت‌ها (R): در جابجایی نیوتنی مشاهده شد که با افزایش R ، طول اختلاط و سرعت پیشروی سیال جابجا کننده افزایش و بازده جاروبی کاهش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده شد که با افزایش R تعداد شاخه‌ها افزایش یافته، انگشتی‌های ریز بیشتری تشکیل می‌شوند و تمایل انگشتی‌ها به پخش شدن نیز افزایش می‌یابد. از جمله نتایج دیگر به دست آمده این بود که با افزایش R سیال جابجا کننده در تمام ضخامت محیط متخلخل حرکت نمی‌کند و همچنان مقداری از سیال بستر در ضخامت جاروب شده باقی می‌ماند. به عبارت دیگر با افزایش R کیفیت جاروب کردن محیط متخلخل کاهش می‌یابد. در جابجایی سیال نیوتنی توسط سیال غیر نیوتنی نیز مشاهده شد که با افزایش R کیفیت جاروب کردن محیط متخلخل کاهش می‌یابد. همچنین مشابه جابجایی نیوتنی مشاهده شد که با افزایش R ، طول اختلاط افزایش و بازده جاروبی کاهش می‌یابد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت در حالت غیر نیوتنی مشابه حالت نیوتنی با افزایش R ناپایداری افزایش پیدا می‌کند.

افزایش عدد بی بعد بلیک: با افزایش این پارامتر یا به عبارتی افزایش نیروهای اینرسی سیال ورودی (سیال جابجا کننده) در جابجایی نیوتنی، انگشتی‌ها تمایل به واگرایی از خود نشان می‌دهند؛ در حالی که در بلیک های پایین پدیده کانالیزه شدن اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده شد که با افزایش عدد بلیک ناپایداری و طول اختلاط کاهش و بازده جاروبی افزایش می‌یابد. علت آن هم کاهش کانالیزه شدن و افزایش تعداد انگشتی‌ها در مرز ناپایداری با افزایش بلیک است. در جابجایی سیال نیوتنی توسط سیال غیرنیوتنی نتایج مشابه حالت نیوتنی بود؛ در این حالت مشاهده شد که با افزایش بلیک، ناپایداری کاهش و رشد حالت پایه افزایش می‌یابد. در نتیجه طول اختلاط کاهش و بازده جاروبی با افزایش مواجه بود. اما در جابجایی سیال غیرنیوتنی توسط سیال نیوتنی مشاهده شد که با افزایش بلیک، رشد حالت پایه کاهش پیدا می‌کند در نتیجه طول اختلاط افزایش و بازده جاروبی با کاهش مواجه بود.

الاستیسیته: افزودن خواص الاستیک به سیال باعث همبستگی بیشتر آن می‌شود. در مقایسه جابجایی سیال نیوتنی توسط سیال غیر نیوتنی با حالتی که سیال جابجا کننده نیز نیوتنی است، مشاهده شد که افزودن خواص الاستیک به سیال جابجا کننده به‌طور مستقیم باعث افزایش رشد حالت پایه می‌شود، در نتیجه طول اختلاط کاهش و بازده جاروبی افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده شد که خواص الاستیک موجب یکنواختی بیشتر مرز ناپایداری می‌شود. در جابجایی سیال غیر نیوتنی توسط سیال نیوتنی نیز مشاهده شد که با افزایش خواص الاستیک سیال جابجا شونده، سرعت پیشروی انگشتی‌ها افزایش می‌یابد، علت این رفتار حرکت نکردن انگشتی‌ها در تمام ضخامت محیط متخلخل است، در نتیجه رشد حالت پایه کاهش و طول اختلاط افزایش می‌یابد اما بازده جاروبی افزایش می‌یابد که علت آن ایجاد و رشد انگشتی‌های پهن است.

۵-۳- پیشنهادها

به‌منظور پی بردن به جنبه‌های ناشناخته ناپایداری انگشتی لزج و تکمیل این مطالعه پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

۱. تغییر تخلخل و نفوذپذیری محیط متخلخل به کمک تغییر قطر دانه‌های شیشه و بررسی تأثیر این پارامترها بر ناپایداری
۲. تأثیر خواص الاستیک بر ناپایداری در حالت مخلوط نشدنی
۳. انجام آزمایش‌ها در بازه گسترده‌تری از بلیک‌ها و بررسی تأثیر آن روی ناپایداری
۴. بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر کشش سطحی (استفاده از سورفکتانت و نانو سورفکتانت) بر ناپایداری در حالت مخلوط نشدنی
۵. بررسی تأثیر دما بر ناپایداری و نحوه شکل‌گیری و رشد انگشتی‌ها
۶. استفاده از فوم‌های تزریقی به‌عنوان سیال جابجا کننده و بررسی تأثیرات آن بر ناپایداری
۷. بررسی تأثیر استفاده از نانوسیال‌ها و سیال‌های هوشمند بر ناپایداری
۸. بررسی تأثیر استفاده از هیدرو ژل‌های نانو کامپوزیتی (NC gels) بر ناپایداری

پیوست ها

جدول پیوست ۱- مدول ذخیره شده G' و هدررفته G'' [Pa] برای باگر ۵۰		
Angular Frequency [1/s]	Storage module [Pa]	Loss module [Pa]
ω	G'	G''
۳/۲۶	۰,۰۹۹۷۷۸	۰,۳۷۲۰۸
۲,۸۲	۰,۰۹۳۵۲۴	۰,۳۶۷۷۲
۲,۴۴	۰,۰۸۰۱۹۲	۰,۳۵۰۱۱
۲,۱۱	۰,۰۸۲۹۲۸	۰,۳۳۲۲۷
۱,۸۳	۰,۰۸۲۹۲۵	۰,۳۲۷۸۸
۱,۵۸	۰,۰۷۲۲۷۵	۰,۳۱۷۳۹
۱,۳۷	۰,۰۷۵۱۰۶	۰,۳۰۷۳۳
۱,۱۹	۰,۰۶۵۸۱۴	۰,۲۹۳۹۳
۱,۰۳	۰,۰۶۵۲۶۱	۰,۲۸۱۹۴
۰,۸۸۷	۰,۰۶۱۴۶۵	۰,۲۰۵۶۷
۰,۷۶۸	۰,۰۵۳۲۷	۰,۱۹۳۸۶
۰,۶۶۴	۰,۰۵۰۲۴۵	۰,۱۷۲۸۹
۰,۵۷۵	۰,۰۵۶۴۰۴	۰,۱۶۸۰۵
۰,۴۹۷	۰,۰۴۶۳۹۳	۰,۱۵۸۱۶
۰,۴۳	۰,۰۲۸۰۸۴	۰,۱۴۸۸۵
۰,۳۷۲	۰,۰۱۳۷۲	۰,۱۴۴۰۴

جدول پیوست ۲- مدول ذخیره شده G' و هدررفته G'' برای باگر ۱۰۰

Angular Frequency [1/s]	Storage module [Pa]	Loss module [Pa]
ω	G'	G''
۲/۱	۰/۰۰۸۷۵۱	۰/۱۸۵
۱/۶۸	۰/۰۰۷۶۸۸	۰/۱۴۹۹۲
۱/۳۵	۰/۰۱۳۱۷۱	۰/۱۲۷۱۷
۱/۰۸	۰/۰۱۷۷۹۷	۰/۱۰۹۷۶
۰/۸۶۲	۰/۰۱۶۰۹۹	۰/۰۹۳۶۵۲
۰/۶۹	۰/۰۱۴۵۸۴	۰/۰۸۰۴۹۶
۰/۵۵۲	۰/۰۰۸۵۶۱	۰/۰۶۸۸۹۳
۰/۴۴۲	۰/۰۰۸۱۷۷	۰/۰۶۰۳۴۵
۰/۳۵۳	۰/۰۱۲۸۵۴	۰/۰۶۰۸۵۳
۰/۲۸۳	۰/۰۱۲۹۹۲	۰/۰۴۳۷۵۸
۰/۲۲۶	۰/۰۰۹۴۴۳	۰/۰۳۳۸۲۱
۰/۱۸۱	۰/۰۰۶۶۹۸	۰/۰۲۲۶۴۳
۰/۱۴۵	۰/۰۰۹۰۵۴	۰/۰۲۴۴۸۴
۰/۱۱۶	۰/۰۱۲۱۷۵	۰/۰۲۴۴۶۳
۰/۰۹۲۸	۰/۰۱۳۰۲	۰/۰۱۹۱۷۶

- [1] G. M. Homsy, "Viscous Fingering in Porous Media," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 19, pp. 271-311, 1987.
- [2] R. L. Perrine, "The development of stability theory for miscible liquid-liquid displacement," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 1, pp. 17-25, 1961.
- [3] J. P. Heller, "Onset of Instability Patterns between Miscible Fluids in Porous Media," *Journal of Applied Physics*, vol. 37, pp. 1566-1579, 1966.
- [4] C. Tan and G. Homsy, "Stability of miscible displacements in porous media: Rectilinear flow," *The Physics of fluids*, vol. 29, pp. 3549-3556, 1986.
- [5] 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.
- [6] D. W. PEACEMAN and H. H. RACHFORD JR., "Numerical Calculation of Multidimensional Miscible Displacement," *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1962.
- [7] 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.
- [8] W. B. Zimmerman and G. M. Homsy, "Three-dimensional viscous fingering: A numerical study," *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*, vol. 4, pp. 1901-1914, 1992.
- [9] K. Ghesmat and J. Azaiez, "Viscous fingering instability in porous media: effect of anisotropic velocity-dependent dispersion tensor," *Transport in Porous Media*, vol. 73, pp. 297-318, 2008.
- [10] 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.
- [11] 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 امیرکبیر ، vol. 48, pp. 55-66, 2016.
- [12] S. Jackson, H. Power, D. Giddings, and D. Stevens, "The stability of immiscible viscous fingering in Hele-Shaw cells with spatially varying permeability," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 320, pp. 606-632, 2017.
- [13] S. Hill and F. I. P, "Channeling in packed columns," *Chemical Engineering Science*, vol. 1, pp. 247-253, 1952.

- [14] R. L. Slobod and B. H. Caudle, "X-Ray Shadowgraph Studies of Areal Sweepout Efficiencies," *Society of Petroleum Engineers*, 1952.
- [15] P. Van Meurs, "The Use of Transparent Three-Dimensional Models for Studying the Mechanism of Flow Processes in Oil Reservoirs," 1957.
- [16] P. G. Saffman and G. Taylor, "The Penetration of a Fluid into a Porous Medium or Hele-Shaw Cell Containing a More Viscous Liquid," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 245, pp. 312-329, 1958.
- [17] B. Habermann, "The Efficiency of Miscible Displacement as a Function of Mobility Ratio," 1960.
- [18] A. L. Benham and R. W. Olson, "A Model Study of Viscous Fingering," *Society of petroleum engineers journal*, vol. 3, pp.138-144, 1963.
- [19] 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.
- [20] T. K. Perkins, O. C. Johnston, and R. N. Hoffman, "Mechanics of Viscous Fingering in Miscible Systems," *Society of petroleum engineers journal*, vol. 3, pp.301-317, 1965.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] R. J. Marshall and A. B. Metzner, "Flow of Viscoelastic Fluids through Porous Media," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 6, pp. 393-400, 1967.
- [24] K. S. Lee and E. L. Claridge, "Areal Sweep Efficiency of Pseudoplastic Fluids in a Five-Spot Hele-Shaw Model," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 8, pp.52-62, 1968.
- [25] G. Daccord, J. Nittmann, and H. E. Stanley, "Radial viscous fingers and diffusion-limited aggregation: Fractal dimension and growth sites," *Physical Review Letters*, vol. 56, pp. 336-339, 1986.
- [26] E. Allen and D. V. Boger, "The Influence of Rheological Properties on Mobility Control in Polymer-Augmented Waterflooding," *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1988.
- [27] D. Bonn, H. Kellay, M. Bräunlich, M. B. Amar, and J. Meunier, "Viscous fingering in complex fluids," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 220, pp. 60-73, 1995.

- [28] M. Kawaguchi, K. Makino, and T. Kato, "Comparison of viscous fingering patterns in polymer and newtonian solutions," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 105, pp. 121-129, 1997.
- [29] W. De Malsche, J. Op De Beeck, H. Gardeniers, and G. Desmet, "Visualization and quantification of the onset and the extent of viscous fingering in micro-pillar array columns," *Journal of Chromatography A*, vol. 1216, pp. 5511-5517, 2009.
- [30] J. Avendano, N. Pannacci, B. Herzhaft, P. Gateau, and P. Coussot, "Enhanced displacement of a liquid pushed by a viscoelastic fluid," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 410, pp. 172-180, 2013.
- [31] S. Malhotra and M. M. Sharma, "Impact of fluid elasticity on miscible viscous fingering," *Chemical Engineering Science*, vol. 117, pp. 125-135, 2014.
- [32] B. K. Hartline and C. Lister, "An experiment to verify the permeability of Hele-Shaw cells," *Geophysical Research Letters*, vol. 5, pp. 225-227, 1978.
- [33] م. بیکی، ح. رحیم‌پور بناب، غ. حسین یار، آ. پیرایه‌گر "تعیین نگارهای مؤثر بر نفوذپذیری مخازن نفتی و گازی با روش تحلیل آماری مقادیر RSE" مجله علوم دانشگاه تهران، 35, pp. 27-37, 2016.
- [34] T. Ahmed, "Reservoir engineering handbook," ed: Gulf Professional Pub., 2001.
- [35] M. Kaviany, "Principles of heat transfer in porous media" Springer Science & Business Media, pp. 20-28, New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [36] A. Rushton and R. Holdich, "Solid-Liquid Filtration and Separation Technology." pp. 212, New York: John Wiley & Sons, 2008
- [37] C.-T. Hsu, "Dynamic modeling of convective heat transfer in porous media," *Handbook of porous media*, vol. 2, 2005.
- [38] N. Reuvers and M. Golombok, "Shear rate and permeability in water flooding," *Transport in porous media*, vol. 79, pp. 249-253, 2009.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] C. Tan and G. Homsy, "Simulation of nonlinear viscous fingering in miscible displacement," *The Physics of fluids*, vol. 31, pp. 1330-1338, 1988.
- [42] W. Zimmerman and G. Homsy, "Nonlinear viscous fingering in miscible displacement with anisotropic dispersion," *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 3, pp. 1859-1872, 1991.

- [43] A. Rogerson and E. Meiburg, "Numerical simulation of miscible displacement processes in porous media flows under gravity," *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 5, pp. 2644-2660, 1993.

Abstract

The viscous fingering instability occur when a less viscous fluid is injecting in a porous media that filled with more viscous fluid. Onset and propagation of fingers are playing an important role in fluids displacement, especially in oil discovery from reservoirs.

In this study, the viscous fingering instability in miscible displacements of Newtonian fluids and also combination of Newtonian and Non-Newtonian fluids is studied experimentally. In order to obtain more actualized results, a porous media with transparent walls and compact structure of spherical glass beads is constructed, that has close permeability to oil sand. The main purpose of this study is to investigate the effects of elastic properties on this instability with the help of Boger fluids. Boger fluids are a special group of dilute polymer solution in which the viscosity and elastic dependence are eliminated and each factor can be controlled independently. With increasing the polymer concentration, the Boger elastic properties increased and its results on this instability have been investigated. Also, the effects of other factors such as the viscosity ratio and Blake dimensionless number on the quality of growth and the shape of the fingers, as well as their effect on important physical parameters including the mixing length, sweep efficiency and noise growth to base state are also discussed.

Keywords: viscous fingering instability, porous media, miscible displacement, Boger fluid glass beads, fluid elasticity



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

**An experimental investigation on viscous fingering instability of
Newtonian and Non-Newtonian fluids in transparent porous media with
compact structure consisting of glass beads**

By: Seyed Majid Khatibi

Supervisor:

Dr. Ali Khaleghi

Adviser:

Dr. Mahmood Norouzi

September 2017