

رسالة محمد



دانشکده مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی آزمایشگاهی تغییر شکل یک قطره غیر نیوتنی در حال

سقوط در یک سیال ویسکوز

حسین عبدالنژاد باغلوچه

استاد راهنما: دکتر محمود نوروزی

تیرماه ۱۳۹۵

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم

بہ پاس محبت ہامی بی کران نشان

## مشکر و قدردانی

از خداوند متعال سپاسگزارم که توفیق کسب علم و دانش را به من عطا فرمود تا بتوانم این مرحله از علم را با موفقیت به پایان برسانم. از خانواده عزیزم به خاطر محبت‌های بی‌دریغی که نسبت به من داشته و دارند، کمال تشکر و سپاس را دارم. از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر محمود نوروزی به پاس همراهی صمیمانه، نکته‌سنجی‌های علمی در کلیه مراحل انجام پایان‌نامه تقدیر و تشکر می‌نمایم. به‌علاوه از تمامی زحمات، حمایت‌ها و دلگرمی‌های دوستان خوبم کمال تشکر را دارم.

در انتها نیز از تمامی اساتید محترم دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود که توفیق شاگردیشان را داشتم، سپاسگزاری نموده و از خداوند منان آرزوی سلامت و توفیق روزافزون برایشان دارم.

## تعهد نامه

اینجانب **حسین عبدالنژاد باغلوچه** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی) دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان با عنوان **بررسی آزمایشگاهی سقوط قطره غیر نیوتنی در حال سقوط در یک سیال ویسکوز** تحت راهنمایی **دکتر محمود نوروزی** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار 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، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها 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.

## چکیده

تشکیل قطره از انتهای یک نازل و نحوه حرکت آن در محیط اطراف، از جمله موضوعات جذاب و پرکاربردی است که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. شناخت بهتر فیزیک قطرات و آشنایی با عوامل موثر در تشکیل، جدایش و حرکت قطره، موجب بهبود و افزایش بازده فرایندهای صنعتی مرتبط می‌گردد. در همین راستا در مطالعه حاضر به بررسی تغییر شکل و ضریب پسای دو قطره ویسکوالاستیک (باگر) با خاصیت‌های الاستیک متفاوت، در حال سقوط در هوا و نفت و مقایسه نتایج آنها با سه قطره نیوتنی آب و اتانول و همچنین محلول آب و نمک سدیم دودسیل بنزن سولفانات به عنوان فعال سطحی پرداخته شده است. در مطالعه حاضر از قطرات در حال سقوط تصویربرداری شده است و با استفاده از پردازش تصویر نتایج بدست آمده است. در قسمت اول به بررسی سینماتیک قطرات پرداخته شده است. نتایج نشان داد که قطرات با شتابی ثابت و کمتر از شتاب گرانش در حال سقوط هستند و به سرعت حدی خود نرسیدند که دلیل آن پایین بودن لزجت هوا است اما در مورد سقوط قطرات در نفت مقادیر شتاب بسیار کم شده و مقدار سرعت کاهش چشمگیری داشت که این امر ناشی از افزایش لزجت سیال بستر است. موضوع بعدی که مورد بررسی قرار گرفت مسیر حرکت قطرات بود که مسیر قطرات در حال سقوط در هوا به دلیل بسیار پایین بودن لزجت هوا کاملاً یک خط مستقیم بوده ولی بلعکس قطرات در حال سقوط در نفت دارای حرکت نوسانی هستند که دلیل آن ایجاد گردابه‌های کارمن در پشت قطره است. در رینولدزهای پایین دو گردابه متقارن، در دو طرف قطره تشکیل می‌شود که در نتیجه آن قطره به شکل مستقیم به حرکت خود ادامه می‌دهد. در حالی که با افزایش رینولدز رشد گردابه‌ها غیر متقارن بوده و مسیر حرکت قطره بصورت نوسانی درمی‌آید. حجم قطرات نیز به روش انتگرال‌گیری حول محور تقارن قطره از المان‌های

کوچک حجم با فرض متقارن بودن قطره محاسبه گردید و سپس با مقادیر تئوری مقایسه شد که نتایج نشان دهنده تطابق خوب مقادیر آزمایشگاهی و تئوری است.

همچنین ضریب پسای قطرات مورد بررسی قرار گرفت. تغییرشکل‌های قطرات و تاثیرات این تغییرشکل‌ها، باعث دشواری یافتن روابطی بمنظور توصیف ضرائب پسای قطرات شده است. از اینرو از دو دیدگاه متفاوت بهره گرفته شد. نخست از تغییرشکل‌های قطره حین حرکت صرفنظر و قطره بصورت یک جسم جامد در نظر گرفته شد و برپایه قانون دوم نیوتن رابطه تئوری برای توصیف ضریب پسا بر اساس عدد رینولدز بیان گردید. در دیدگاه دوم با استفاده از روش‌های پردازش تصاویر، تغییرشکل‌ها مورد بررسی و بصورت کاملاً دقیق در محاسبه ضرائب پسا اعمال گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که روابط ارائه شده از دقت قابل قبولی برخوردار است. البته لازم به ذکر است که قطرات نیوتنی دچار تغییرشکل بیشتری نسبت به قطرات ویسکوالاستیک می‌شوند که در پی آن مقادیر خطا افزایش می‌یابد. همچنین اثرات نسبت ویسکوزیته، خاصیت الاستیک و کشش سطحی بر روی ضریب پسا بررسی شد و نتایج نشان داد که با افزایش نسبت ویسکوزیته ( $k$ ) مقادیر ضریب پسا افزایش و برای قطراتی با نسبت ویسکوزیته یکسان به ترتیب، با افزایش عدد الاستیسیته ( $En$ ) و افزایش کشش سطحی مقدار ضریب پسا افزایش می‌یابد. بررسی تغییرشکل قطرات از دیگر موضوعات مورد بررسی در مطالعه حاضر است. تغییرشکل قطرات نیوتنی در حین سقوط در هوا بصورت تناوبی بوده که این تناوبات ناشی از برهم‌کنش میان نیروهای کشش سطحی و فشار هیدرودینامیکی و وجود جریان‌های چرخشی درون قطره است که منجر به ناپایداری در سطح قطرات می‌گردد. در حالی که تغییرشکل تناوبی قطرات هنگام حرکت در نفت رفته رفته میرا می‌شود که ناشی از لزجت بالای نفت نسبت به هوا است. اما در مورد قطرات ویسکوالاستیک می‌توان گفت که با افزودن پلیمرها دامنه نوسانات میرا می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که غلظت‌های بالاتر پلیمرها موجب نوسانات کمتر قطره در حین حرکت می‌شود. بعلاوه افزودن پلیمرها موجب بی‌نظمی‌هایی در رفتار قطرات می‌شود.

بعبارت دیگر الگوهای تناوبی مانند آنچه در مورد قطرات نیوتنی دیده شد مشاهده نمی‌شود. از سوی دیگر محدوده دامنه نوسانات برای قطرات ویسکوالاستیک بطرز قابل توجهی کمتر از قطرات نیوتنی است. در حالیکه قطرات ویسکوالاستیک در نفت بیشتر دچار تغییرشکل می‌شوند و شکل کروی خود را از دست می‌دهند و به بیضی تغییرشکل می‌دهند.

**واژه‌های کلیدی:** قطره ویسکوالاستیک، تغییرشکل، ضریب پسا، پردازش تصویر.





## فهرست مطالب

- ۱- فصل اول: مقدمه و تاریخچه ..... ۱
- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۱-۱-۱- اهمیت و جایگاه مطالعه در خصوص دینامیک قطره ..... ۲
- ۱-۱-۲- معرفی سیالات غیر نیوتنی ..... ۵
- ۱-۲-۱-۱- سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان ..... ۷
- ۱-۲-۱-۲- سیالات غیرنیوتنی وابسته به زمان ..... ۸
- ۱-۲-۱-۳- سیالات ویسکوالاستیک ..... ۹
- ۱-۲-۱-۴- سیالات باگر ..... ۱۰
- ۱-۳-۱-۱- روش‌های تولید قطره ..... ۱۲
- ۱-۴-۱-۱- اعداد بی بعد ..... ۱۵
- ۱-۴-۱-۱-۱- عدد دپورا ..... ۱۵
- ۱-۴-۱-۱-۲- عدد وایزبرگ ..... ۱۶
- ۱-۴-۱-۱-۳- عدد موئینگی ..... ۱۶
- ۱-۴-۱-۱-۴- عدد وبر ..... ۱۶
- ۱-۴-۱-۱-۵- عدد اونسرگ ..... ۱۷
- ۱-۴-۱-۱-۶- عدد رینولدز ..... ۱۷
- ۱-۴-۱-۱-۷- عدد گرانشی باند ..... ۱۷
- ۱-۴-۱-۱-۸- عدد اتووس ..... ۱۷
- ۱-۴-۱-۱-۹- عدد مورتون ..... ۱۸

۱۸	۱-۴-۱۰- عدد الاستیسیته
۱۸	۱-۴-۱۱- عدد استروهاال
۱۸	۱-۴-۱۲- نسبت ویسکوزسته
۱۹	۱-۴-۱۳- پارامتر تغییرشکل
۱۹	۲-۱- مروری بر تحقیقات گذشته
۱۹	۱-۲-۱- مطالعات در زمینه سیالات نیوتنی
۲۵	۲-۲-۱- مطالعات در زمینه سیالات غیرنیوتنی
۳۰	۳-۲-۱- مطالعات در زمینه حباب‌ها
۳۲	۳-۱- معرفی تحقیق حاضر
۳۲	۱-۳-۱- جنبه‌های نوآوری تحقیق
۳۳	۲-۳-۱- ساختار کلی پایان‌نامه
۳۳	۲- فصل دوم: تجهیزات آزمایشگاهی
۳۴	۱-۲- مقدمه
۳۴	۲-۲- تجهیزات آزمایش
۳۴	۱-۲-۲- دوربین پرسرعت
۳۷	۲-۲-۲- ترازو با دقت بالا
۳۸	۳-۲-۲- همزن هات‌پلیت
۳۹	۴-۲-۲- پمپ تزریق سرنگی
۴۰	۵-۲-۲- ساختار و مشخصات مواد مورد استفاده
۴۰	۶-۲-۲- طریقه ساخت سیال باگر
۴۱	۷-۲-۲- اندازه‌گیری خواص

۴۱	..... ۲-۲-۷-۱- کشش سطحی
۴۴	..... ۲-۲-۷-۲- تست ویسکوزیته
۴۶	..... ۲-۲-۷-۳- تست رئومتری
۵۱	..... ۲-۲-۸- ستاپ آزمایش
۵۳	..... ۳- فصل سوم: تحلیل نتایج آزمایشگاهی
۵۴	..... ۳-۱- مقدمه
۵۴	..... ۳-۲- سقوط قطره در هوا
۵۴	..... ۳-۲-۱- موقعیت، سرعت و شتاب قطره
۵۶	..... ۳-۲-۲- حجم قطرات
۶۰	..... ۳-۲-۳- محاسبه ضریب پسا
۶۶	..... ۳-۲-۳-۱- بررسی اثر نسبت ویسکوزیته و خاصیت الاستیک بر روی ضریب پسا
۶۷	..... ۳-۲-۴- تغییر شکل قطرات
۷۳	..... ۳-۳- سقوط قطرات در نفت
۷۳	..... ۳-۳-۱- موقعیت، سرعت و شتاب قطره
۷۴	..... ۳-۳-۲- مسیر حرکت قطرات
۷۷	..... ۳-۳-۳- حجم قطرات
۷۹	..... ۳-۳-۴- محاسبه ضریب پسا
۸۲	..... ۳-۳-۵- تغییر شکل قطرات
۸۹	..... ۴- فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۹۰	..... ۴-۱- مقدمه
۹۰	..... ۴-۲- نتیجه‌گیری

۹۲..... ۴-۳- پیشنهادات

۹۳..... پیوست

۹۹..... مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. فرایند رنگ‌زنی خودرو ..... ۲
- شکل ۲-۱. فرایند تولید پنسیلین ..... ۵
- شکل ۳-۱. منحنی‌های تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات مستقل از زمان [۱۰] ..... ۸
- شکل ۴-۱. جریان برشی ساده [۱۰] ..... ۹
- شکل ۵-۱. الف) چکه کردن ب) جت پیوسته ج) جت ناپیوسته [۱۳] ..... ۱۲
- شکل ۶-۱. تولید قطره به روش الف) الکتروهیدرودینامیک، ب) جریان‌های هم‌مرکز [۱۵] ..... ۱۳
- شکل ۷-۱. روش تولید قطره به هنگام نیاز با استفاده از الف) محرک پیزوالکتریک، ب) محرک حرارتی [۱۵] ..... ۱۵
- شکل ۸-۱. پارامتر تغییرشکل [۱۷] ..... ۱۹
- شکل ۹-۱. اثر دیواره بر حرکت و شکل قطره در حال سقوط الف) موقعیت اولیه قطره نزدیک دیواره کانال ب) موقعیت اولیه قطره در مرکز کانال [۲۹] ..... ۲۲
- شکل ۱۰-۱. تغییرشکل سقوط قطره به ازای اعداد اتووس مختلف و عدد اونسورگ ثابت [۳۱] ..... ۲۴
- شکل ۱۱-۱. مقایسه شکل قطرات نیوتنی با ویسکوزیته‌های متفاوت با قطرات ویسکوپلاستیک در حال افزایش تنش تسلیم [۳۶] ..... ۲۶
- شکل ۱۲-۱. شکل پایای قطره الف) قطره ویسکوالاستیک ب) قطره نیوتنی [۳۸] ..... ۲۷
- شکل ۱-۲. دوربین پرسرعت ..... ۳۵
- شکل ۲-۲. لنز Nikon مورد استفاده ..... ۳۶
- شکل ۳-۲. سقوط قطره آب در نفت ..... ۳۶

- شکل ۲-۴. تصویر پردازش شده سقوط قطره آب در نفت ..... ۳۷
- شکل ۲-۵. ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم ..... ۳۷
- شکل ۲-۶. همزن هات پلیت ..... ۳۸
- شکل ۲-۷. پمپ تزریق سرنگی ..... ۳۹
- شکل ۲-۸. پلی آکریلامید ..... ۴۰
- شکل ۲-۹. ساختار مولکولی سه بعدی پلی آکریلامید ..... ۴۱
- شکل ۲-۱۰. دستگاه اندازه گیری کشش سطحی ..... ۴۳
- شکل ۲-۱۱. تشکیل قطره اتانول برای تعیین کشش سطحی ..... ۴۳
- شکل ۲-۱۲. ویسکومتر به همراه اسپیندل و ظرف مورد نیاز ..... ۴۴
- شکل ۲-۱۳. الف) تغییرات لزجت بر حسب تغییرات نرخ برش برای سیال PWG2 (ب) تغییرات لزجت بر حسب تغییرات نرخ برش برای سیال PWG1 ..... ۴۵
- شکل ۲-۱۴. مدل فنر و دمپر ماکسول ..... ۴۷
- شکل ۲-۱۵. رفتار مدولهای  $G'$ ,  $G''$  برای سیال PWG1 ..... ۵۰
- شکل ۲-۱۶. رفتار مدولهای  $G'$ ,  $G''$  برای سیال PWG2 ..... ۵۰
- شکل ۲-۱۷. الف) سوزن ۱۴ با قطر داخلی ۱/۸ میلیمتر (ب) سوزن ۱۶ با قطر داخلی ۱/۰۷ میلیمتر ..... ۵۲
- شکل ۲-۱۸. ستاپ آزمایش در تحقیق حاضر ..... ۵۲
- شکل ۳-۱. نمودارهای موقعیت (سمت چپ) و سرعت (سمت راست) قطره به هنگام سقوط در هوا با سوزن ۱۴ ..... ۵۶

- شکل ۳-۲. ضریب پسا برحسب عدد رینولدز برای قطرات باسوزن ۱۶: الف) آب ب) SDDBS-Water (ج) اتانول ..... ۶۲
- شکل ۳-۳. ضریب پسا برحسب عدد رینولدز برای قطرات باسوزن ۱۴: الف) آب ب) SDDBS-Water (ج) اتانول ..... ۶۴
- شکل ۳-۴. نوسانات قطره PWG1 در حال سقوط در هوا ..... ۶۶
- شکل ۳-۵. ضریب پسا برحسب عدد رینولدز به ازای نسبت ویسکوزیته‌های مختلف ..... ۶۷
- شکل ۳-۶. تغییرشکل قطرات در حال سقوط در هوا با سوزن ۱۶ الف) آب ب) SDDBS-Water (ج) اتانول ..... ۶۹
- شکل ۳-۷. تغییرشکل قطرات در حال سقوط در هوا با سوزن ۱۴ الف) آب ب) SDDBS-Water (ج) اتانول ..... ۷۰
- شکل ۳-۸. نوسانات قطره آب در حال سقوط در هوا ..... ۷۱
- شکل ۳-۹. تغییرشکل قطرات ویسکوالاستیک در هوا با سوزن ۱۶ الف) PWG1 ب) PWG2 ..... ۷۲
- شکل ۳-۱۰. تغییرشکل قطرات ویسکوالاستیک در هوا با سوزن ۱۶ الف) PWG1 ب) PWG2 ..... ۷۳
- شکل ۳-۱۱. نمودارهای موقعیت (سمت چپ) و سرعت (سمت راست) قطره به هنگام سقوط در نفت با سوزن ۱۴ ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۲. مسیر سقوط قطرات در نفت با سوزن ۱۶ ..... ۷۵
- شکل ۳-۱۳. مسیر سقوط قطرات با سوزن ۱۴ ..... ۷۶
- شکل ۳-۱۴. مسیر حرکت قطره آب در حال سقوط در نفت ..... ۷۷
- شکل ۳-۱۵. ضریب پسا برحسب عدد رینولدز بر مبنای قطر متغیر (BVD) و قطر معادل (BED) ..... ۷۸



با سوزن ۱۶ ..... ۸۰

شکل ۱۶-۳. ضریب پسا برحسب عدد رینولدز بر مبنای قطر متغیر (BVD) و قطر معادل (BED)

با سوزن ۱۴ ..... ۸۱

شکل ۱۷-۳. تغییرشکل قطرات در حال سقوط در نفت با سوزن ۱۶ (الف) آب (ب) اتانول (ج)

۸۴ ..... PWG2 (د) PWG1

شکل ۱۸-۳. تغییرشکل قطرات در حال سقوط در نفت با سوزن ۱۴ (الف) آب (ب) اتانول (ج)

۸۵ ..... PWG2 (د) PWG1

شکل ۱۹-۳. تغییرشکل قطرات از حالت کروی به بیضوی هنگام سقوط در نفت (الف) PWG1،

۸۶ .....  $E_o = 0.1979$ ، آب، (ب)  $E_o = 0.5232$

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲. خواص مایعات در دمای ۲۵ °C ..... ۴۴
- جدول ۲-۲. طیف‌رهایی از تنش و لزجت ..... ۴۹
- جدول ۱-۳. روش‌های محاسبه حجم ..... ۵۷
- جدول ۲-۳. مقادیر آزمایشگاهی برای حجم قطره و میزان انحراف از تئوری ارائه شده برای حرکت قطرات در هوا با سوزن ۱۶ ..... ۵۹
- جدول ۳-۳. مقادیر آزمایشگاهی برای حجم قطره و میزان انحراف از تئوری ارائه شده برای حرکت قطرات در هوا با سوزن ۱۴ ..... ۵۹
- جدول ۴-۳. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری ضریب پسا برای سقوط قطرات در هوا با سوزن ۱۶ .. ۶۴
- جدول ۵-۳. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری ضریب پسا برای سقوط قطرات در هوا با سوزن ۱۴. ۶۵
- جدول ۶-۳. مقادیر اعداد نسبت ویسکوزیته، الاستیسیته و باند ..... ۶۷
- جدول ۷-۳. مقادیر فرکانس و عدد استروهمال ..... ۷۰
- جدول ۸-۳. مقادیر اعداد نسبت ویسکوزیته، الاستیسیته و اتووس ..... ۷۶
- جدول ۹-۳. مقادیر آزمایشگاهی برای حجم قطره و میزان انحراف از تئوری ارائه شده برای حرکت قطرات در نفت با سوزن ۱۶ ..... ۷۸
- جدول ۱۰-۳. مقادیر آزمایشگاهی برای حجم قطره و میزان انحراف از تئوری ارائه شده برای حرکت قطرات در نفت با سوزن ۱۴ ..... ۷۸
- جدول ۱۱-۳. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری ضریب پسا برای سقوط قطرات در نفت با سوزن ..... ۸۲
- جدول ۱۲-۳. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری ضریب پسا برای سقوط قطرات در نفت با سوزن

۸۲..... ۱۴



## فهرست علائم

سطح مقطع قطره	$A (m^2)$
عدد ارشمیدس	Ar
عدد موئینگی	Ca
ضریب پسا	$C_D$
قطر سوزن	$D_n (mm)$
قطر قطره	$D_d (mm)$
عدد دبورا	De
پارامتر تغییر شکل	Df
عدد الاستیسیته	En
عدد اتووس	Eo
فرکانس	$f (\frac{1}{s})$
نیروی پسا	$F_D (N)$
نیروی کشش سطحی	$F_\Gamma (N)$
شتاب گرانش	$g (\frac{m}{s^2})$
عدد گرانشی باند	G
جرم قطره	$m (kg)$
نسبت ویسکوزیته	k
عدد مورتون	Mo
اختلاف تنش نرمال اول	$N_1 (\frac{N}{m^2})$
اختلاف تنش نرمال دوم	$N_2 (\frac{N}{m^2})$
عدد اونسبرگ	Oh

عدد رینولدز	Re
عدد استروهال	St
سرعت قطره	$u \left(\frac{m}{s}\right)$
حجم قطره	$V (mm^3)$
حجم ماکزیمم قطره	$V_{max} (mm^3)$
وزن ظاهری	$W_{app} (N)$
عدد ویر	We
عدد وایزنبرگ	Wi
نرخ برش	$\dot{\gamma} \left(\frac{1}{s}\right)$
لزجت	$\mu (cP)$
چگالی	$\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$
زمان رهایی از تنش	$\lambda (s)$
کشش سطحی	$\Gamma \left(\frac{dyn}{cm}\right)$

#### زیرنویس‌ها

هوا	air
قطره	drop
نفت	oil

# فصل اول

## مقدمه و تاریخچه

## ۱-۱- مقدمه

تشکیل قطره از انتهای یک نازل و نحوه حرکت آن در محیط اطراف، از جمله موضوعات جذاب و پرکاربردی است که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. شناخت بهتر فیزیک قطرات و آشنایی با عوامل موثر در تشکیل، جدایش و حرکت قطره، موجب بهبود و افزایش بازده فرایندهای صنعتی مرتبط می‌گردد.

### ۱-۱-۱- اهمیت و جایگاه مطالعه در خصوص دینامیک قطره

جهت آشکار شدن اهمیت و جایگاه این موضوع به تعدادی از کاربردهایی که پدیده رشد، تشکیل و حرکت قطره در آنها اهمیت بسزایی دارد، اشاره می‌شود.

در موارد مختلفی می‌توان شاهد ریزش و برخورد قطره روی سطوح مایع و یا جامد بود. به عنوان مثال، می‌توان به برخورد جوهر با سطح کاغذ در چاپگرها، رنگ‌زنی یا پوشش‌دهی با اسپری، خنک‌کاری سطوح و پاشش سوخت توسط انژکتور در موتورهای احتراق داخلی اشاره کرد. مطالعه رفتار قطره در کنترل کیفیت هر یک از این فرایندها و افزایش راندمان آنها موثر خواهد بود. برای مثال همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده‌است، در فرایند رنگ‌زنی خودرو با شناخت رفتار قطره می‌توان ضخامت لایه رنگ را کنترل کرده و از پاشش قطرات اضافی و ایجاد قطرات ثانویه که باعث کاهش کیفیت رنگ می‌شود، جلوگیری نمود و همچنین زمان پروسه رنگ‌زنی را کاهش داد [۱].



شکل ۱-۱. فرایند رنگ‌زنی خودرو



از دیگر کاربردهای مهم قطره در صنعت، به نقش آن در استخراج مایع-مایع<sup>۱</sup> می‌توان اشاره کرد که موضوع مشترکی در بسیاری از زمینه‌ها همچون مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی، متالورژی و علوم کاربردی فیزیک و شیمی به شمار می‌آید. این نوع استخراج به عنوان یک فرایند مناسب و مقرون به صرفه در بسیاری از صنایع نظیر نفت (جداسازی ترکیبات آروماتیک از روغن پایه موتور و پالایش آن)، پلیمر، شیمیایی (جداسازی الفین‌ها و پارافین)، دارویی، غذایی، مهندسی هوا فضا، مواد و متالورژی (ذوب و ریخته‌گری) بصورت وسیعی کاربرد دارد. به عنوان مثال در صنایع ذوب فلزات، شناخت دقیق رفتار قطره در حین و بعد از سقوط از اهمیت زیادی برخوردار است. معمولاً دستگاههای استخراج مایع-مایع بصورت ستون‌هایی هستند که انتقال جرم توسط قطرات صورت می‌گیرد. در این ستون‌ها جهت افزایش سطح تماس میان دو فاز، یکی از فازها بصورت قطره در فاز پیوسته دیگری توزیع می‌شود. برای طراحی بهینه عملیات استخراج مایع-مایع، وجود اطلاعات دقیقی از اندازه و شکل قطره در هر زمان و سرعت قطره دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد [۲، ۳]. همچنین ایده بکارگیری قطرات در مبدل‌های حرارتی تماس مستقیم<sup>۲</sup> از جمله کاربردهای صنعتی این موضوع است. در مبدل‌هایی که عمل انتقال حرارت میان دو مایع مخلوط نشدنی صورت می‌گیرد، وجود دیواره‌های جدا کننده بین دو مایع به میزان چشم‌گیری بازده انتقال حرارت را کاهش و هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. اما در مقابل، در مبدل‌های تماس مستقیم یکی از مایعات بصورت قطره در بستر مایع دیگر حرکت نموده و در طی حرکت به انتقال حرارت با سیال محیط می‌پردازد. شناخت فیزیک حرکت قطرات موجب کنترل بهتر فرایندهایی از این قبیل خواهد شد [۴]. به منظور دستیابی به طراحی بهینه چنین فرایندهایی، داشتن اطلاعات دقیق از اندازه، تغییرشکل، سرعت، جریانهای چرخشی درون قطره و نیز تاثیر جریانهای متلاطم محیطی بر حرکت قطره بسیار مهم است.

---

<sup>1</sup> Liquid-Liquid extraction

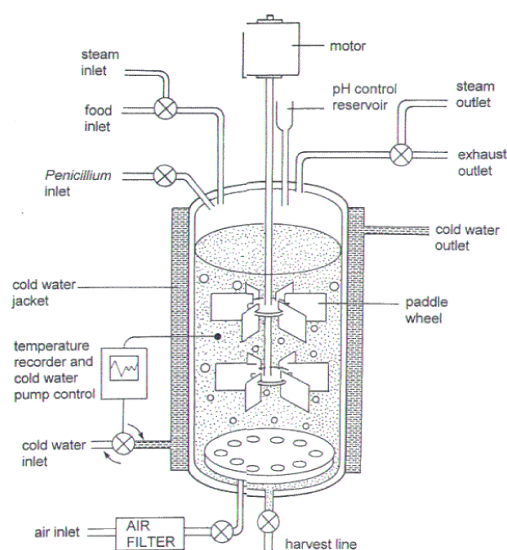
<sup>2</sup> Direct-Contact Heat Exchangers

علاوه بر این، بررسی و مطالعه قطرات سنگین آب که تحت نیروی وزن خود سقوط می‌کنند، از جایگاه ویژه‌ای در هواشناسی و تئوری‌های مربوط به بارش باران برخوردارند. زیرا تئوری تشکیل باران متکی بر شکسته شدن و یا چند تکه شدن<sup>۱</sup> قطرات بزرگ آب در حین سقوط است. همچنین بررسی برخورد قطرات باران با سطح خاک و نقش آن در الگوهای فرسایش خاک، برخورد قطرات آب با سطح اقیانوس‌ها و دریاها و نقش آن در تبادل اکسیژن و تاثیر آن در سیستم‌های میکروبیولوژیکی، نمونه‌ای از کاربردهای پرشمار این پدیده است [۵، ۶].

به دلیل شباهت‌های قابل توجه رفتار فیزیکی قطره و حباب در جریان‌های دوفازی، برخورد محققین برای بررسی و مطالعه آنها در بسیاری از موارد معمولاً مشابه است. جریان‌های دوفازی گاز-مایع نیز دارای کاربردهای متعددی هستند. دینامیک و شکل قطرات در فرایندهایی نظیر انتقال آلاینده-های زیرزمینی، تولید هیدروکربن در چاه‌های نفت و انتقال آن در خطوط لوله حائز اهمیت است [۷]. برای مثال در صنایع داروسازی و تولید پنیسیلین، گاز اکسیژن بصورت حباب در یک سیال خارجی مطابق شکل ۱-۲ تزریق می‌شود. وقتی که گاز اکسیژن بصورت حباب در مخازن تخمیر وارد شود در اطراف این حباب‌ها غلظت اکسیژن افزایش می‌یابد و این در حالی است که در مکان‌های دیگر این غلظت کمتر می‌باشد. با توجه به این مسئله که اکسیژن نقش بسیار کلیدی در فرایندهای متابولیکی هوازی دارد، نیاز به کنترل دقیق آن در سطح تماس گاز-مایع دارد. در این فرایند مسئولیت تزریق اکسیژن به عهده اسپری کننده‌های موجود در کف مخزن است که به منظور جلوگیری از تولید فوم در سطح تماس حباب با مایع از همزن‌های مکانیکی بهره‌گیری شده است. این دسته از جریان‌ها که حباب‌های گاز درون سیال لزج پراکنده شده‌اند، در پروسه‌های مختلف صنعتی دیگر نظیر رآکتورهای شیمیایی، نیروگاه‌های هسته‌ای، بیورآکتورها و موتورهای احتراق نیز مشاهده می‌شوند.

---

<sup>1</sup> Fragmentation



شکل ۱-۲. فرایند تولید پنسیلین

اگر علاوه بر این زمینه‌های کاربردی مهم، به نقش این پدیده در تحولات فیزیکی و شیمیایی، زیست محیطی و کاربردهای جدیدتری همچون زمینه‌های نانو تکنولوژی، بیومکانیک، ساخت ذرات میکرو توجه شود، به وضوح می‌توان به اهمیت بالای این مبحث در زندگی روزمره و تکنولوژی روز دنیا پی برد [۸، ۹].

### ۱-۱-۲- معرفی سیالات غیر نیوتنی

با رشد صنایع مختلف، مهندسان و دانشمندان با سیالاتی روبرو شدند که رفتار برشی آنها با استفاده از مدل سیال نیوتنی قابل توصیف نبود. این مشکل به خصوص با پیدایش علم پلیمر نمود آشکارتری پیدا کرد. دانشمندان دریافتند که مدل نیوتنی برای گازها و مایعات دارای وزن مولکولی کمتر از ۱۰۰۰ با دقت بسیار مناسبی قابل به کارگیری است، اما این مدل برای مواد درشت مولکول چندان دقیق نیست و جریان برخی محلول‌ها و مذاب‌های پلیمری رفتارهای متفاوت و بعضاً متضادی را نسبت به سیالات نیوتنی نشان می‌دهند [۱۰]. نیاز به مطالعه جریان این سیالات منجر به پیدایش شاخه جدیدی از علم

به نام رئولوژی<sup>۱</sup> گردید. واژه رئولوژی از ریشه کلمه یونانی رئو<sup>۲</sup> به معنی جریان می باشد و علم رئولوژی روی چگونگی جریان یافتن سیالات و واکنش آنها در برابر نیروهای مکانیکی بحث می کند. دانش رئولوژی در سال های بین دو جنگ جهانی توسعه یافت و انگیزه اصلی این مطالعات مسائل عمده عملی و نه نظری بودند. در طی جنگ جهانی دوم استفاده از مواد شعله افکن به مطالعه در خصوص جت مواد ویسکوالاستیک منجر شد. سلاح شعله افکن به منظور پرتات مایعات آتش زا به سمت هدف مورد استفاده قرار می گرفت. مشکل اصلی در این راه، واگرایی جت این مواد در فواصل نزدیک بود که سبب عدم استفاده موثر از این سلاح می شد. دانشمندان با اضافه نمودن مواد پلیمری، مایع آتش زا را به سیالی ویسکوالاستیک تبدیل می کردند که جت این سیال تا فاصله مناسبی همگرا باقی می ماند. در آن زمان، مهندسين آلمانی به یکی از مهمترین کاربردهای دانش رئولوژی دست یافتند. آنها توانستند با اضافه نمودن مواد صابونی و ۱۰ تا ۵۰ ppm مواد پلیمری به بنزین، افت فشار انتقال این سیال را تا ۹۰٪ کاهش دهند. به این ترتیب استفاده از این مواد جهت کاهش نیروی پسا مورد توجه قرار گرفت که از آن جمله می توان به تزریق مواد پلیمری در بدنه اژدرها و ایجاد پوشش های پلیمری بر روی این جنگ افزار اشاره نمود. بعدها ثابت شد که با اضافه نمودن مواد پلیمری به سیال نیوتنی و تبدیل آن به یک محلول ویسکوالاستیک، نیروی پسای جریان مغشوش به شدت کاهش می یابد. استفاده از این خاصیت در جنبه های مختلف کاربردی، مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۱]. به مرور زمان دانش رئولوژی در جنبه های مختلف گسترش یافته و علاوه بر صنعت پلیمر به سایر صنایع نظیر صنعت نفت و پتروشیمی، مواد غذایی، نظامی، صنایع شیمیایی سبک و سنگین، تولید انواع لاستیک، رنگ، رزین و مواد پوشش دهنده (نظیر اپوکسی و ...)، تولید مواد آرایشی و بهداشتی، شوینده ها و صابون ها، مهندسی بیولوژی، تولید دارو (انواع سوسپانسیون ها و امولسیون ها)، صنعت چاپ، تولید کاغذ، تولید سیمان، صنایع هسته ای، فرآیندهای تخمیری، تولید سیمان، تولید مواد روانکار حفاری و

---

<sup>1</sup> Rheology

<sup>2</sup> Rheo

... گسترش یافته است. با توجه به وسعت صناعی که با سیالات غیرنیوتنی روبرو هستند، مشخص است که شناخت علم رئولوژی از ضرورتی اجتناب ناپذیر برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که به دلیل وجود پیچیدگی و تنوع خانواده های سیالات غیرنیوتنی، این شاخه از علم هنوز رشد چندانی نیافته و زمینه های فراوانی جهت مطالعه و تحقیق در علم رئولوژی وجود دارد. از اینرو، از اوایل قرن بیستم تاکنون، دانش مکانیک سیالات غیرنیوتنی، موضوع بسیاری از تحقیقات تئوری و آزمایشگاهی بوده است. به طور خلاصه، انحرافات سیال از رفتار نیوتنی به شکل زیر قابل بیان است:

- وجود تنش تسلیم در ماده

- وابستگی ویسکوزیته به نرخ برش و یا زمان

- وجود خاصیت الاستیک در سیال

در این میان، مطالعه سیالات ویسکوالاستیک به سبب پیچیدگی های حاکم بر رفتار فیزیکی و نیز کاربردهای گسترده صنعتی، نظامی و پزشکی از اهمیت خاصی برخوردار است.

### ۱-۱-۲-۱- سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان

سیالاتی هستند که در آنها تنش برشی تنها تابعی غیرخطی از نرخ برش می باشد. این گروه از سیالات غیرنیوتنی به دو دسته سیالات دارا و فاقد تنش تسلیم تقسیم می شوند. در مواردی که دارای تنش تسلیم باشند شرط لازم برای جریان یافتن این است که تنش به حد کافی برسد و در تنش های کمتر از آن سیال مانند یک جامد رفتار کرده و تنش را تحمل می کند. پلاستیک بینگهام<sup>۱</sup> یکی از معروفترین موادی است که دارای تنش تسلیم می باشد. سیالاتی که فاقد تنش تسلیم هستند، سیالات غیرنیوتنی تعمیم یافته نام دارند که به دو دسته تقسیم می شوند:

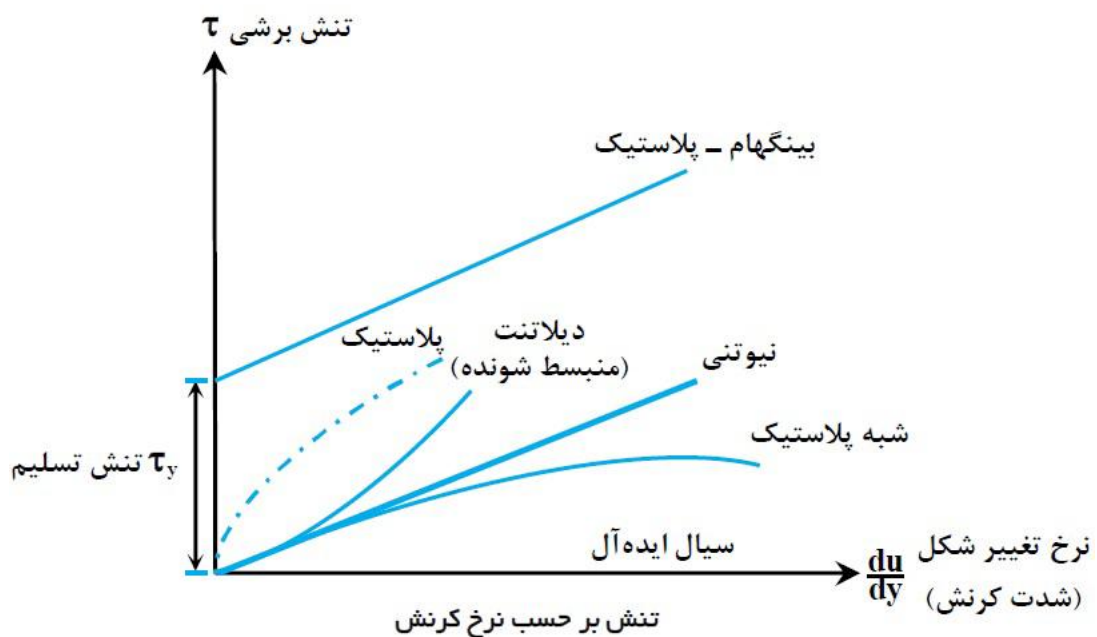
---

<sup>1</sup> Bingham

۱. سیالات شبه پلاستیک<sup>۱</sup>

۲. سیالات دایلاتنت<sup>۲</sup>

ویسکوزیته این مواد بصورت یک تابع از نرخ برش سیال می باشد. شکل ۱-۳ رفتار تنش در برابر نرخ برش را برای انواع سیالات نشان می دهد [۱۰].



شکل ۱-۳. منحنی های تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات مستقل از زمان [۱۰]

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

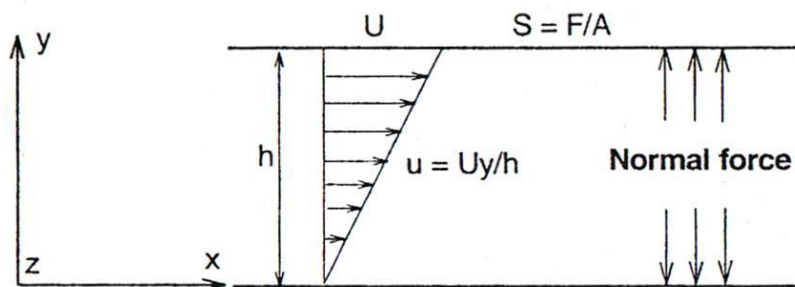
در بعضی از سیالات غیر نیوتنی، علاوه بر اینکه ویسکوزیته تابعی از شدت برش است، تابعی از زمان نیز می باشد. به عبارت دیگر در این سیالات، در حین یک نرخ برش ثابت، ساختمان مولکولی ماده بطور مداوم در حال تغییر است در نتیجه مقدار ویسکوزیته و تنش برشی نیز تابعی از زمان خواهد بود [۱۰].

<sup>1</sup> Pseudoplastic

<sup>2</sup> Dilatant

### ۱-۱-۲-۳- سیالات ویسکوالاستیک

گروه سوم از سیالات غیرنیوتنی، سیالات ویسکوالاستیک<sup>۱</sup> هستند که همزمان خواص ویسکوز سیال و الاستیک جامد را دارا می‌باشند. آزمایشی که در مورد رفتار سیال ویسکوالاستیک می‌توان به آن اشاره کرد، آزمایش جریان برشی ساده می‌باشد. مطابق شکل ۱-۴ چنانچه یک سیال ویسکوالاستیک بین دو صفحه موازی قرار گیرد و صفحه بالایی با سرعت  $U$  حرکت کند، یک جریان برشی ساده ایجاد می‌گردد. اگر صفحه بالایی ناگهان متوقف شود تنش بطور آنی صفر نمی‌شود. این در حالی است که برای سیالات نیوتنی تنش سریعاً صفر می‌شود. در سیالات ویسکوالاستیک کاهش تنش برشی دارای بازه زمانی یا به عبارت دیگر دارای زمان رهایی از تنش<sup>۲</sup> می‌باشد. همچنین در سیالات ویسکوالاستیک پس از توقف صفحه بالایی در جریان برشی ساده، صفحه کمی به عقب بر می‌گردد ولی در سایر سیالات توقف صفحه بالایی آنی صورت می‌پذیرد. این بازگشت به خاصیت الاستیک سیال بر می‌گردد [۱۰].



شکل ۱-۴. جریان برشی ساده [۱۰]

خاصیت دیگر سیالات ویسکوالاستیک این است که این مواد دارای اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم می‌باشند. در جریان برشی ساده سیال نیوتنی، تنش‌های عمودی همواره مقداری ثابت و برابر

<sup>1</sup> Viscoelastic

<sup>2</sup> Relaxation time

فشار استاتیکی می‌باشند. این در حالی است که در سیالات ویسکوالاستیک، بین تنش‌های عمودی اختلاف وجود دارد. در جریان برش ساده، اگر جهت جریان را در راستای X و راستای تغییرات سرعت را Y بنامیم، اختلاف تنش‌های عمودی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$N_1 = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} \quad (1-1)$$

حال اگر جهت راستگرد عمود بر جهت‌های X و Y را جهت Z بنامیم می‌توان اختلاف تنش عمودی دوم را نیز بصورت زیر تعریف کرد:

$$N_2 = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} \quad (2-1)$$

#### ۱-۲-۴- سیالات باگر<sup>۱</sup>

دسته‌ای از سیالات ویسکوالاستیک هستند که برخلاف سیالات غیرنیوتنی دیگر، ویسکوزیته آنها با نرخ برش تغییرات بسیار جزئی دارد در عین حال تمامی خصوصیات دیگر سیالات ویسکوالاستیک از جمله زمان رهایی از تنش را دارا هستند. در تحلیل رفتار سیالات ویسکوالاستیک پارامترهای مختلفی تاثیرگذار هستند که ثابت نگه‌داشتن هر کدام از این پارامترها تحلیل رفتاری این دسته از سیالات را ساده‌تر می‌کند که در این میان سیالات باگر به دلیل اینکه ویسکوزیته آنها با تغییرات نرخ برش تقریباً ثابت می‌ماند، این امکان را می‌دهد که با دقت بیشتری به تحلیل رفتار این دسته از سیالات پرداخت. همچنین اهمیت بالای این سیالات به این دلیل است که خواص الاستیک را کاملاً متمایز از خواص ویسکوز سیال نشان می‌دهند [۱۲]. نخستین سیال باگر توسط دیوید باگر<sup>۲</sup> و از ترکیب محلول آبی شکر (شربت ذرت) با ۸۰ ppm پلی‌آکریلامید ساخته شد. که ویسکوزیته این محلول حدود ۲۲Pa.s و

<sup>1</sup> Boger Fluids

<sup>2</sup> David V. Boger



زمان رهایی از تنش تقریباً ۴ ثانیه بود. در ادامه پریلاتسکی<sup>۱</sup> و همکارانش بودند که توانستند محلول رقیق پلی‌ایزوبوتیلین<sup>۲</sup> (PIB) در مخلوط پلی‌بوتن<sup>۳</sup> (PB) و مقداری نفت سفید بعنوان سیال باگر بسازند. سیالات باگر دیگری که توسط محققین دیگر ساخته شد بترتیب می‌توان ترکیب پلی‌اتیلن اکساید<sup>۴</sup> و پلی‌اتیلن گلیکول<sup>۵</sup>، پلی‌استایرن<sup>۶</sup> در دیوکتیل فثالات<sup>۷</sup> و پلی‌استایرن در الیگومریک پلی‌استایرن<sup>۸</sup> را نام برد. ساده‌ترین مدل در معادلات حاکم بر این دسته از سیالات مدل ماکسول<sup>۹</sup> است که دیوید باگر برای تخمین زمان رهایی از تنش محلول باگر خود از این مدل استفاده کرد. مدل دیگری که در این دسته سیالات کاربرد دارد و توسط پریلاتسکی و همکارانش پیشنهاد شد، مدل الدرود-بی<sup>۱۰</sup> است که بصورت زیر بیان می‌شود

$$\lambda \dot{\sigma} + \sigma = 2\mu(D + \lambda_r \dot{D}) \quad (3-1)$$

که در آن  $\sigma$  تانسور تنش،  $D$  تانسور نرخ تغییر شکل،  $\lambda$  زمان رهایی از تنش،  $\mu$  ویسکوزیته و  $\lambda_r$  ثابت تاخیر زمانی است. علامت  $\hat{\quad}$  نشان دهنده مشتق زمانی همرفتی می‌باشد. همچنین رابطه (۳-۱) می‌تواند بعنوان معادله ساختاری برای حلال‌ها و پلیمرها در نظر گرفته شود. برای حلال‌ها تنش  $\sigma_s$  بصورت زیر است:

$$\sigma_s = 2\mu_s D \quad (4-1)$$

---

<sup>1</sup> Prilutski

<sup>2</sup> Polyisobutylene

<sup>3</sup> Polybutene

<sup>4</sup> Polyethylene oxide

<sup>5</sup> Polyethylene glycol

<sup>6</sup> Polystyrene

<sup>7</sup> Dioctyl phthalate

<sup>8</sup> Oligomeric polystyrene

<sup>9</sup> Maxwell model

<sup>10</sup> Oldroyd-B

که  $\mu_s$  ویسکوزیته حلال است. بعلاوه با جایگذاری تنش پلیمر  $\sigma_p$  در مدل ماکسول داریم:

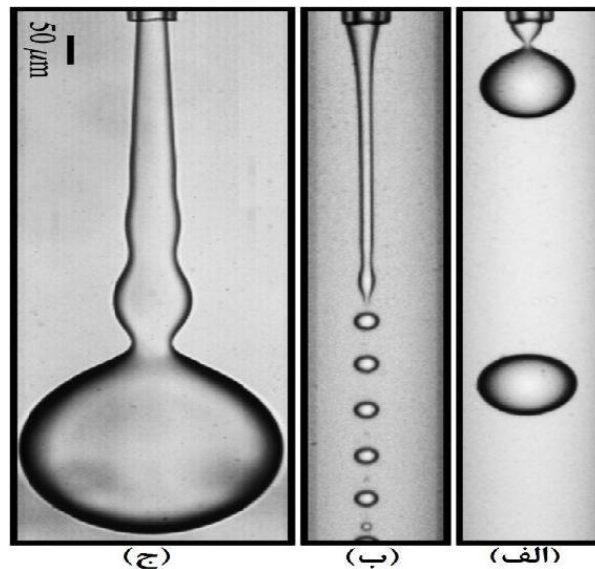
$$\lambda \dot{\sigma}_p + \sigma_p = 2\mu_p D \quad (5-1)$$

که  $\mu_p$  ویسکوزیته پلیمر است. در صورتی که هر دو تنش حلال و پلیمر همزمان با هم اضافه شوند منجر به مدل الروید-بی می‌گردد که در رابطه (۳-۱) بیان شد. برای نمونه در جریان برشی ساده این معادله تنش برشی را بصورت زیر پیش‌بینی می‌کند:

$$\sigma_{xy} = (\mu_s + \mu_p) \dot{\gamma}_{xy} \quad (6-1)$$

### ۱-۱-۳- روش‌های تولید قطره

بر اساس موارد کاربرد و نیاز کاربر، ابعاد و حجم قطره‌های مورد استفاده متفاوت خواهند بود. یکی از مهمترین عوامل تعیین کننده، روش تولید قطره<sup>۱</sup> است. در فرایند شکل‌گیری قطره، سه رژیم اصلی چکیدن<sup>۲</sup>، جت پیوسته<sup>۳</sup> و جت ناپیوسته وجود دارد که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۵-۱. الف) چکه کردن ب) جت پیوسته ج) جت ناپیوسته [۱۳].

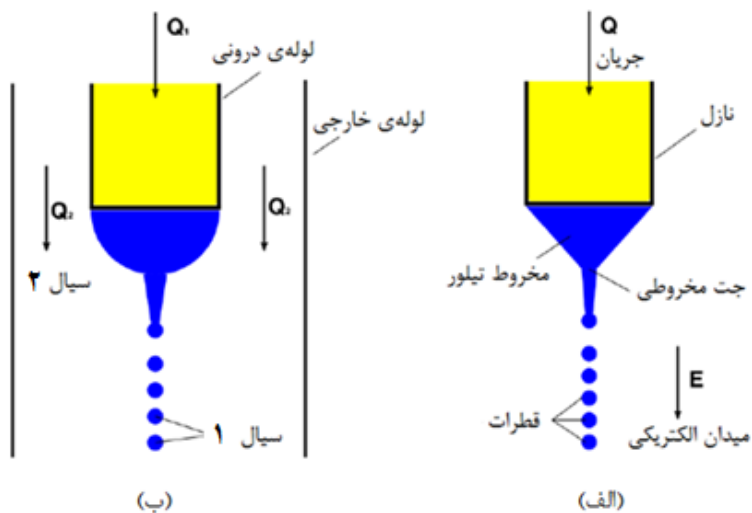
<sup>1</sup> Drop formation methods

<sup>2</sup> Dripping

<sup>3</sup> Continuous jetting

در بسیاری از فرایندها مایع توسط نازل به درون سیال انحلال ناپذیر<sup>۱</sup> دیگری تزریق می‌شود. در نرخ جریان‌های اندک، تاثیر نیروی کشش سطحی غالب بوده و مایع بصورت قطراتی مجزا و گسسته از انتهای نازل خارج می‌شود. از آنجایی که نرخ تولید قطره پایین خواهد بود، از این روش بیشتر در دستگاه‌های اندازه‌گیری همچون تعیین میزان کشش سطحی و زاویه تماس استفاده می‌کنند. به دلیل طولانی بودن مدت زمان رشد و جدایش قطره (چندین ثانیه تا چندین دقیقه) از این روش کمتر در کاربردهای صنعتی بهره می‌گیرند. اما در مقابل با مطالعه رژیم چکیدن قطره، اطلاعات سودمندی از نحوه رفتار آن بدست می‌آید [۱۴].

با افزایش دبی سیال، مایع خروجی به شکل جتی پیوسته خواهد شد. که در پایین دست خروجی نازل به دلیل ناپایداری‌های رایلی<sup>۲</sup> به قطرات کوچکی شکسته می‌شود. با اعمال اختلالات تناوبی به سیستم، زنجیره‌ای از قطرات یکسان و منظم پدید می‌آیند که از آنها می‌توان در کاربردهایی نظیر چاپگرها بهره گرفت. روش‌های متعددی جهت تولید قطرات منظم در این رژیم وجود دارد که دو نوع متداول آن در شکل ۱-۶ بصورت شماتیک نشان داده شده‌اند.



شکل ۱-۶. تولید قطره به روش الف) الکتروهیدرودینامیک، ب) جریان‌های هم مرکز [۱۵]

<sup>1</sup> Immiscible

<sup>2</sup> Rayleigh instability

در نوع اول، وجود میدان الکتریکی خارجی موجب می‌شود که سیال خروجی از نازل به شکل یک مخروط باشد، که به آن مخروط تیلور<sup>۱</sup> گفته می‌شود. جت کوچک خروجی به دلیل عملکرد نیروهای سطحی و الکتریکی به قطره‌های ریزی شکسته می‌شود. این پروسه در صنعت به نام جریان الکتروهایدرودینامیک شناخته شده و از پر کاربردترین روش‌های موجود است. علاوه بر آنچه گفته شد، وجود یک جریان خارجی نیز می‌تواند موجب شکست جت سیال شود. در نوع دوم دو سیال متفاوت دو لوله هم مرکز جریان می‌یابند. وجود سیال خارجی موجب می‌شود که جت خروجی دارای نوکی تیز بوده و به قطرات کوچکی شکسته شود. نکته قابل ذکر این است که، اندازه و ابعاد قطره تولید شده بدین روش نسبت به روش قبلی کوچکتر و کمتر خواهد بود. اما به دلیل سرعت و فرکانس بالای قطرات تولید شده در رژیم جت پیوسته، استفاده از آنها به سیستم کنترل پیچیده‌ای نیازمند خواهد بود. همچنین در صورت استفاده از این رژیم، قطره بصورت مداوم و پیوسته تولید می‌شود، که در برخی از کاربردها باید قطره در زمان مورد نیاز تولید شود. به همین دلیل حالت دیگری جهت تولید قطره در کاربردهای صنعتی وجود دارد که به آن جت ناپیوسته یا تولید قطره به هنگام نیاز<sup>۲</sup> گفته می‌شود. در این روش تحت پالس‌های منظم فشاری مقدار معینی سیال از خروجی نازل به بیرون رانده می‌شود که در صورت کنترل میدان فشار، سیال خروجی به صورت قطره‌ای منفرد خواهد بود [۱۶].

در شکل ۱-۷، دو روش معمول این نوع تولید قطره نشان داده شده است. در روش اول مطابق شکل ۱-۷ (الف)، نوک لوله موئین توسط مهره پیزوالکتریک احاطه می‌شود؛ در اثر اعمال ولتاژ، ماده پیزوالکتریک تغییر شکل داده و یک پالس فشاری داخل سیال به وجود می‌آورد که سیال از لوله خارج می‌گردد. عملکرد مهره پیزوالکتریکی به وسیله ولتاژهای پالسی تنظیم می‌شود.

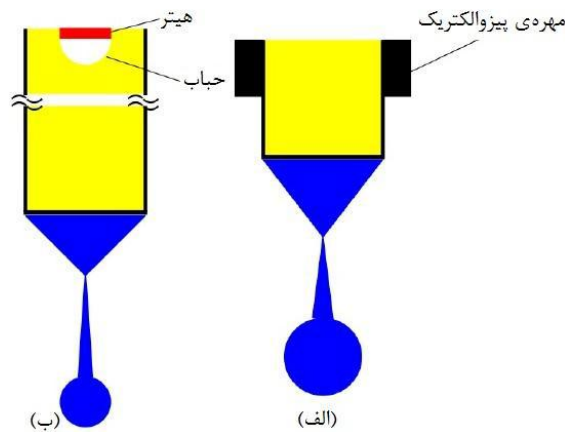
در روش دیگر همانطور که در شکل ۱-۷ (ب) نشان داده شده است، از پالس‌های حرارتی جهت تولید

---

<sup>1</sup> Taylor Cone

<sup>2</sup> Drop-on-Demand (DOD)

قطره استفاده می‌کنند. پالس‌های اعمالی موجب تولید حباب‌هایی در لوله می‌شود، که به سیال درون نازل فشار وارد کرده بدین ترتیب قطره در هنگام نیاز از انتهای نازل خارج می‌شود. این شیوه از جدیدترین روش‌های تولید قطره بوده که علاوه بر چاپگرهای جوهری، در کاربردهای بسیاری از قبیل تولید میکرو ساختارهای بیولوژیکی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱-۷. روش تولید قطره به هنگام نیاز با استفاده از (الف) محرک پیزوالکتریک، (ب) محرک حرارتی [۱۵]

#### ۱-۱-۴- اعداد بی بعد

از آنجایی که در علم مکانیک سیالات اغلب پدیده‌ها به متغیرهای زیادی وابسته‌اند، تجزیه و تحلیل آنها کار پرهزینه و وقت‌گیری خواهد بود. این مشکل با استفاده از آنالیز ابعادی حل شده است. در این روش به جای استفاده از تک تک پارامترها، اعداد بدون بعد مربوطه را به دست آورده و از آن‌ها استفاده می‌کنند. در همین راستا در پژوهش حاضر نیز جهت تحلیل نتایج به دست آمده از اعداد بی بعد بهره گرفته شده است. در ادامه به معرفی کلی اعداد بدون بعد در زمینه حرکت قطره پرداخته شده است:

#### ۱-۱-۴-۱- عدد دبورا<sup>۱</sup>

عدد دبورا برابر نسبت زمان رهایی از تنش به زمان مشخصه است.

<sup>1</sup> Deborah number

$$De = \frac{\text{زمان رهایی از تنش}}{\text{زمان مشخصه}} = \frac{\lambda}{T} \quad (3-1)$$

#### ۱-۱-۴-۲ عدد وایزنبرگ<sup>۱</sup>

عدد وایزنبرگ برابر نسبت نیروهای الاستیک به نیروهای ویسکوز است.

$$Wi = \frac{\text{نیروی الاستیک}}{\text{نیروی ویسکوزیته}} = \lambda \dot{\gamma} \quad (4-1)$$

که  $\dot{\gamma}$  نرخ برش جریان است.

#### ۱-۱-۴-۳ عدد موئینگی<sup>۲</sup>

عدد موئینگی نشان دهنده نسبت نیروی لزجتی به نیروی کشش سطحی در مرز دو سیال انحلال ناپذیر است.

$$Ca = \frac{\mu u}{\Gamma} \quad (5-1)$$

که  $\mu$  لزجت،  $u$  سرعت قطره و  $\Gamma$  کشش سطحی میان دو فاز است.

#### ۱-۱-۴-۴ عدد وبر<sup>۳</sup>

$$We = \frac{\rho u^2 D}{\Gamma} \quad (6-1)$$

عدد وبر اهمیت نسبی اینرسی سیال در مقابل کشش سطحی را مشخص می‌سازد، که اغلب در تجزیه و تحلیل جریان‌های سطح آزاد و تشکیل حباب و قطره مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً در تعیین این عدد از چگالی سیال بستر استفاده می‌شود.

---

<sup>1</sup> Weissenberg number

<sup>2</sup> Capillary number

<sup>3</sup> Weber number

۱-۱-۴-۵- عدد اونسرگ<sup>۱</sup>

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\Gamma D}} \quad (7-1)$$

این عدد نشان دهنده نسبت نیروی لزجی به نیروی کشش سطحی بوده و پارامترهای به کار رفته در این رابطه متعلق به سیال فاز قطره هستند.

۱-۱-۴-۶- عدد رینولدز<sup>۲</sup>

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (8-1)$$

که  $\rho$ ،  $u$ ،  $D$  و  $\mu$  به ترتیب بیانگر چگالی، سرعت، قطر و لزجت سیال هستند. این عدد بدون بعد نسبت میان نیروهای اینرسی به لزجی را نشان می‌دهد.

۱-۱-۴-۷- عدد گرانشی باند<sup>۳</sup>

این عدد بیانگر نسبت نیروهای گرانشی به کشش سطحی است.

$$Bo = \frac{\rho g D^2}{\Gamma} \quad (9-1)$$

۱-۱-۴-۸- عدد اتووس<sup>۴</sup>

$$Eo = \frac{\Delta\rho g D^2}{\Gamma} \quad (10-1)$$

در این رابطه  $\Delta\rho$  اختلاف چگالی میان دو فاز است. مفهوم فیزیکی عدد اتووس مشابه عدد باند است.

---

<sup>1</sup> Ohnesorge number

<sup>2</sup> Reynolds number

<sup>3</sup> Gravitational Bond number

<sup>4</sup> Eotvos number

### ۱-۱-۴-۹- عدد مورتون<sup>۱</sup>

$$Mo = \frac{\Delta\rho g \mu^4}{\rho^2 \Gamma^3} \quad (11-1)$$

در دینامیک سیالات معمولاً بمنظور دسته بندی اشکال مختلف قطره و حباب از اعداد مورتون و اتووس استفاده می‌شود. این عدد بیانگر نسبت نیروهای گرانشی و لزجتی به کشش سطحی است. چگالی و لزجت ذکر شده در رابطه مربوط به سیال محیط اطراف می‌باشد.

### ۱-۱-۴-۱۰- عدد الاستیسیته<sup>۲</sup>

عدد الاستیسیته برابر با نسبت عدد وایزنبرگ به عدد رینولدز است.

$$En = \frac{Wi}{Re} \quad (12-1)$$

### ۱-۱-۴-۱۱- عدد استروهل<sup>۳</sup>

عدد استروهل که برای توصیف مکانیزم جریان نوسانی سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرد، بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$St = \frac{fD}{u} \quad (13-1)$$

که  $f$  فرکانس،  $D$  قطر قطره و  $v$  سرعت قطره است.

### ۱-۱-۴-۱۲- نسبت ویسکوزیته

این عدد برابر نسبت ویسکوزیته قطره به ویسکوزیته سیال بستر می‌باشد که بصورت زیر بیان می‌شود.

$$k = \frac{\mu_d}{\mu_c} \quad (14-1)$$

---

<sup>1</sup> Morton number

<sup>2</sup> Elasticity number

<sup>3</sup> Strouhal number

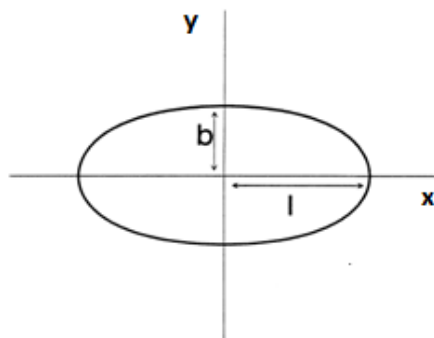


در رابطه (۱-۱۴)،  $\mu_d$  ویسکوزیته قطره و  $\mu_c$  ویسکوزیته سیال بستر است.

### ۱-۴-۱۳- پارامتر تغییرشکل<sup>۱</sup>

$$Df = \frac{l - b}{l + b} \quad (1-15)$$

که  $l$  شعاع در راستای محور  $x$  و  $b$  شعاع در راستای محور  $y$  است.



شکل ۱-۸. پارامتر تغییرشکل [۱۷]

که در مطالعه حاضر اعداد بی بعد رینولدز، باند، اتووس، الاستیسیته، استروهل، نسبت ویسکوزیته و پارامتر تغییرشکل مورد استفاده قرار گرفته اند.

### ۲-۲-۱- مروری بر تحقیقات گذشته

#### ۱-۲-۱- مطالعات در زمینه سیالات نیوتنی

حرکت و شکل قطره در حال سقوط در یک فاز مایع از مسائل مهم در دینامیک سیالات می باشد. در این قسمت، گزارشی از مطالعات قبلی که در زمینه آزمایشگاهی، حل تحلیلی و عددی پیرامون حرکت و شکل سقوط یک قطره در فاز مایع دیگر مورد صورت گرفته است، مورد بررسی قرار می گیرد. مطالعات زیادی در زمینه حرکت سیالات نیوتنی در یک سیال نیوتنی دیگر صورت گرفته است. تیلور<sup>۲</sup> [۱۸] نخستین محقق بود که تغییرشکل قطرات نیوتنی معلق در یک سیال نیوتنی دیگر را بصورت

<sup>1</sup> Deformation parameter

<sup>2</sup> Taylor

آزمایشگاهی و تحلیلی مورد بررسی قرار داد. آزمایشات او مشخصات کیفی تغییرشکل و تجزیه قطره را نشان داد. رالیسون و اگریوس<sup>۱</sup> [۱۹] مطالعات تیلور را بسط دادند. آنها به تفصیل وابستگی شرایط بحرانی برای تجزیه قطره با پارامترهای مختلف را پیش‌بینی کردند. نتایج حاصل از آزمایشات بنتلی و لیل<sup>۲</sup> [۲۰] مطابقت خوبی با این پیش‌بینی‌ها داشت.

وایرگی و گریس<sup>۳</sup> [۲۱] تاثیر خواص فیزیکی فاز قطره و سیال محیط اطراف را بر شکل قطره بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که برای گستره وسیعی از اعداد رینولدز ( $1 < Re < 10000$ )، عدد وبر تعیین کننده شکل قطره خواهد بود. برای  $We \ll 1$  قطره کروی باقی می‌ماند، درحالیکه برای  $We \geq 1$  قطره از شکل کروی انحراف پیدا می‌کند. طبق این آزمایشات قطره‌های بزرگتر معمولاً به دو شکل مشاهده می‌شوند؛ در محدوده رینولدز پایین ( $1/2 < Re < 40$ ) قطره بصورت کلاه بیضی شکل بوده و با افزایش رینولدز به کلاه کروی تغییرشکل می‌دهد. تیلور و اگریوس<sup>۴</sup> [۲۲] به صورت تحلیلی نشان دادند که در اعداد رینولدز صفر و اعداد موئینگی محدود قطره دقیقاً کروی باقی می‌ماند و فقط در اعداد رینولدز پایین شکل قطره کروییت خود را از دست داده و شکلی پهن شده به خود می‌گیرد. بعلاوه فنگ و برد<sup>۵</sup> [۲۳] حل پایدار معادله ناویر-استوکس را برای تعیین شکل قطره باران انجام داده و بر روی تاثیر پارامترهای فیزیکی مختلف بر روی شکل قطرات در محدوده وسیعی از خواص قطره تمرکز نمودند.

هلنبروک و ادواردز<sup>۶</sup> [۲۴] تغییرشکل قطره‌ای مایع در یک جریان گازی غیریکنواخت را شبیه سازی نموده و رابطه‌ای برای پیش‌بینی شکل قطره بر پایه نسبت چگالی، نسبت لزجت و نیز اعداد وبر

---

<sup>1</sup> Rallison and Acrivos

<sup>2</sup> Bentley and Leal

<sup>3</sup> Wairegi and Grace

<sup>4</sup> Taylor and Acrivos

<sup>5</sup> Feng and Beard

<sup>6</sup> Helenbrook and Edwards

و اونسرگ تعیین نمودند. ماگاروی و تیلور<sup>۱</sup> [۲۵] بصورت آزمایشگاهی تجزیه قطرات را مورد بررسی قرار دادند. آنها قطراتی با شعاعی حدود ۷ میلیمتر تولید کردند و مشاهده کردند با افزایش شعاع، قطره به تعداد قطرات بیشتری شکسته و تجزیه می‌شود. در همین راستا آرچی<sup>۲</sup> و همکاران [۲۶] در آزمایش‌هایشان برای سقوط قطرت سنگین و بزرگ، شکست و تجزیه‌های پی‌درپی و تشکیل قطرات ثانویه را مشاهده کردند. گراهام و هیگدن<sup>۳</sup> [۲۷] نیز به مطالعه عددی حرکت یک قطره ویسکوز در یک مجرای تنگ با استفاده از روش المان محدود پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که با افزایش اندازه قطره از حد بحرانی، قطره به دو و حتی بیشتر از دو قطره دیگر تجزیه می‌شود. آنها همچنین تاثیر هندسه‌ی کانال و عدد باند را بر تغییرشکل و تجزیه قطره بررسی کردند. باومن<sup>۴</sup> و همکاران [۲۸] ایجاد گردابه‌های ناشی از سقوط یک قطره در یک سیال ساکن را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که حالت‌های مختلف تغییرشکل و تجزیه در نسبت‌های پایین چگالی میان دو فاز اتفاق می‌افتد. در ادامه نی<sup>۵</sup> و همکارانش [۲۹] به منظور روشن ساختن تاثیرات تغییرشکل، نحوه فروپاشی قطره و اینرسی بر حرکت قطره، سقوط یک قطره کروی را با استفاده از روش تعیین سطح مورد مطالعه عددی قرار دادند. آنها با قرار دادن قطره اولیه در مکان‌های عرضی متفاوت، تاثیر دیواره بر حرکت قطره را مشاهده نمودند. همانطور که در شکل ۱-۹ نشان داده شده است در صورتی که قطره نزدیک دیواره کانال قرار بگیرد؛ به دلیل تنش دیواره، قطره تغییرشکل داده و به سمت مرکز حرکت می‌کند. زمانی که نیروی اینرسی قوی باشد (رینولدز بالا)، اختلاف فشار و نیروی چرخشی بار دیگر قطره را از مرکز کانال به طرف دیواره هدایت می‌کند. سپس دوباره با نزدیک شدن قطره به دیواره، نیروی تنشی موثر شده و آن را به سمت خط مرکزی باز می‌گرداند و این چرخه ادامه پیدا

---

1 Magarvey and Taylor

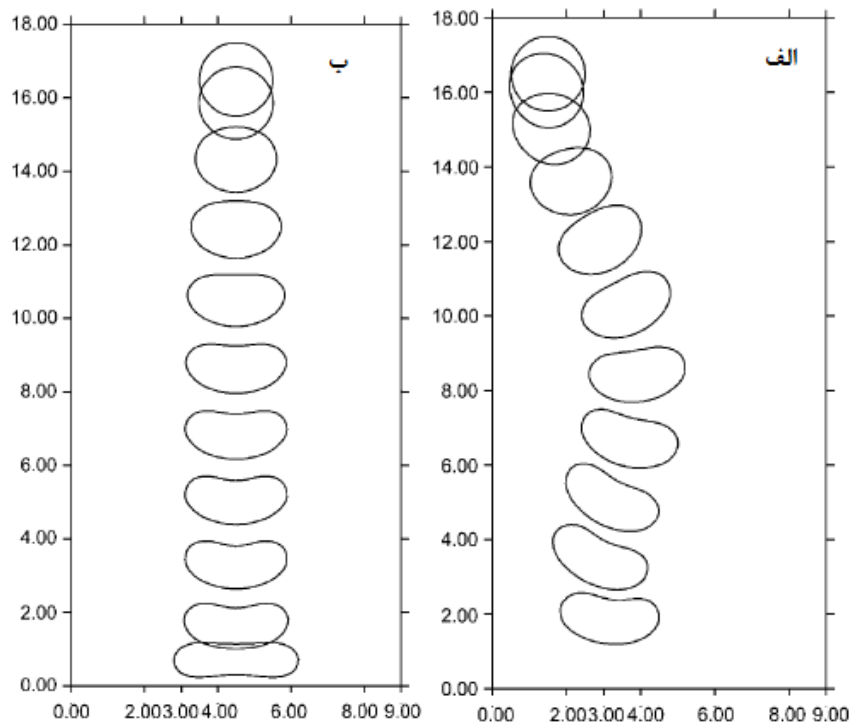
2 Arcchi

3 Graham and Higdon

4 Baumann

5 Ni

می‌کند. در مقابل اگر رینولدز اندک باشد، قطره از دیواره به سمت مرکز حرکت کرده و سپس بصورت مستقیم سقوط خواهد کرد.



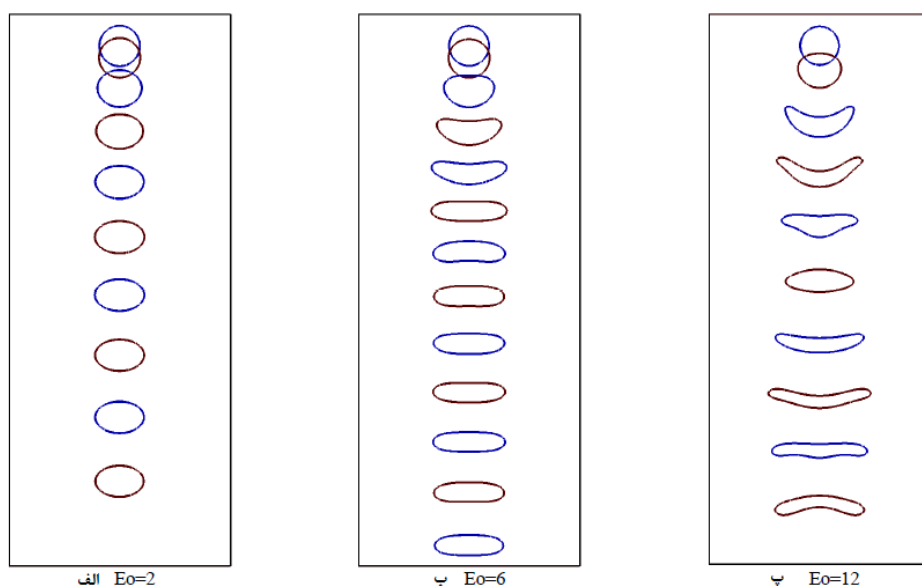
شکل ۹-۱. اثر دیواره بر حرکت و شکل قطره در حال سقوط (الف) موقعیت اولیه قطره نزدیک دیواره کانال (ب) موقعیت اولیه قطره در مرکز کانال [۲۹]

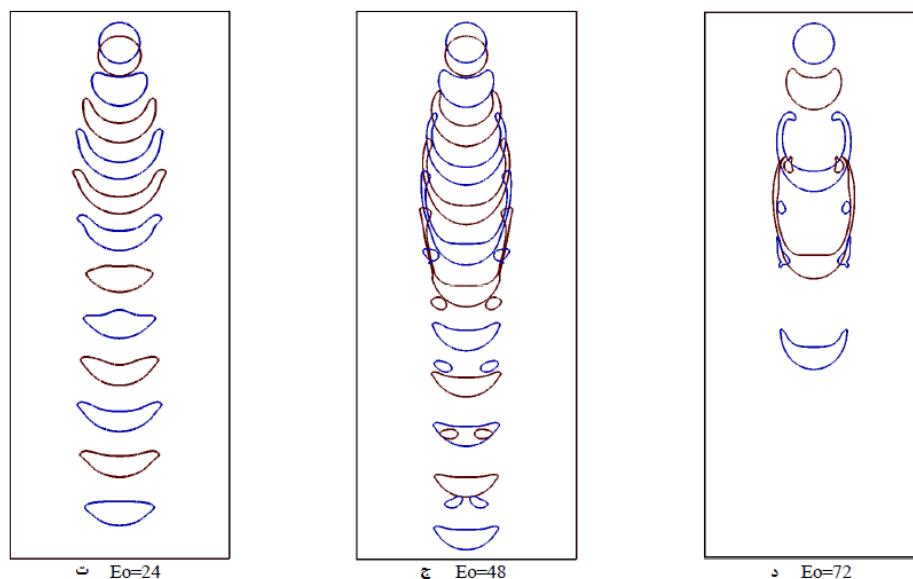
فخاری و رحیمیان [۳۰] تغییر شکل قطره در حال سقوط را با استفاده از روش لیتیس-بولتزمن<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار دادند. آنها اثر لزجت و کشش سطحی را به ازای مقادیر مختلف اعداد بدون بعد اتووس، مورتون و ارشمیدس<sup>۲</sup> ( $Ar = \frac{gD^3 \rho_l (\rho - \rho_l)}{\mu^2}$ ) مطالعه نموده و انواع مختلف تغییر شکل بر اساس اعداد بدون بعد مربوطه را تعیین نمودند. آنها مشاهده کردند که به ازای اعداد اتووس پایین قطره کمی تغییر شکل پیدا می‌کند و پایدار می‌شود. با افزایش اعداد اتووس نرخ تغییر شکل افزایش می‌یابد و در اعداد اتووس به اندازه کافی بزرگ قطره تجزیه می‌شود.

<sup>1</sup> Lattice Boltzmann

<sup>2</sup> Archimedes number

اخیرا موسوی و همکاران [۳۱] از مدل پتانسیل بین ذره‌ای روش شبکه لیتس-بولتزمن برای شبیه‌سازی تغییرشکل و جدایش یک قطره در حال سقوط تحت نیروی وزن را به کار گرفته‌اند. آنها اثر دیوار بر شکل و سرعت متوسط قطره مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که در شرایطی که نسبت عرض کانال به قطر قطره بیشتر از ۶ باشد سرعت متوسط قطره در زمان‌های مختلف مستقل از اثرات دیوار می‌باشد. آنها همچنین تغییرشکل و جدایش یک قطره در حال سقوط در محدوده‌هایی از اعداد بی‌بعد اتووس و اونسرگ مورد مطالعه قرار دادند و مطابق شکل ۱-۱۰ مشاهده کردند که در اعداد اتووس بسیار پایین که نیروی کشش سطحی غالب است، قطره کمی تغییرشکل می‌دهد و بدون جدایش به حالت پایا می‌رسد. همچنین در عدد اتوس بالاتر نیروی وزن بر کشش سطحی غلبه می‌کند و قطره تغییرشکل بیشتری می‌دهد. برای حالت‌های جدایش قطره در عدد اونسرگ کوچک، اگر عدد اتووس تا مقادیر میانی افزایش یابد، قطره بیش از حالت قبل تغییرشکل می‌دهد و سرانجام به شکل یک کیسه رو به عقب درمی‌آید. در نهایت برای اعداد اتووس بالا مشاهده می‌شود که قطعه‌هایی از قطره از لبه بریده می‌شوند که به آن مکانیزم جدایش از لبه می‌گویند. از طرف دیگر عدد اونسرگ در برقراری ثبات قطره را مورد مطالعه قرار دادند. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با افزایش عدد اونسرگ برای مشاهده حالت‌های مختلف جدایش، عدد اتوس باید افزایش یابد.





شکل ۱-۱۰. تغییر شکل سقوط قطره به ازای اعداد اتووس مختلف و عدد اونسورگ ثابت [۳۱]

اوهتا و سوزوکی<sup>۱</sup> [۳۲] رفتار یک قطره نیوتنی را با استفاده از روش حجم سیال مدل سازی نمودند. هدف اصلی آنها بدست آوردن اطلاعاتی دقیق از میدان جریان درون و اطراف قطره و بررسی قابلیت این روش محاسباتی در پیش بینی رفتار گذرای قطره بود. نتایج این مدل سازی نشان داد که حرکت و شکل قطره به شدت به خواص فیزیکی هر دو سیال وابسته است. بطوریکه با افزایش تدریجی عدد باند و مورتون شکل قطره از کره به بیضی و سپس دارای فرورفتگی و در نهایت قطره ناپایدار تغییر پیدا می کند. همچنین روش حجم سیال<sup>۲</sup> یک روش مفید و کارآمد است که با دقت خوبی می تواند رفتار قطره را تحت شرایط مختلف پیش بینی کند.

سپس وگنر<sup>۳</sup> و همکارانش [۳۳] به صورت آزمایشگاهی دینامیک حرکت قطره تولوئن در آب را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که در قطرات کوچک، تغییر شکل محسوسی اتفاق نمی افتد و در نتیجه قطرات پس از آزاد شدن از نوک نازل شتاب گرفته و به سرعت حدی<sup>۴</sup> خود می رسند. با

<sup>1</sup> Ohta and Suzuki

<sup>2</sup> Volume of Fluid (VOF)

<sup>3</sup> Wegener

<sup>4</sup> Terminal velocity

افزایش قطر نازل، سرعت قطره حول مقدار حدی خود شروع به نوسان کرده و شکل آن از بیضی عمودی به بیضی افقی تغییر پیدا می‌کند. در نهایت رابطه‌ای نیمه تجربی جهت تعیین سرعت حدی صعود قطره تولوئن در آب ارائه نمودند. علاوه بر این جهت بررسی تغییر شکل قطره، ضریب پسای یک قطره را با نتایج موجود برای یک کره جامد مقایسه نمودند و دریافتند که ضریب پسای قطره در مقایسه با کره‌ای با ابعاد مشابه، کمتر خواهد بود.

### ۱-۲-۲- مطالعات در زمینه سیالات غیرنیوتنی

موخرجی و سرکار<sup>۱</sup> [۳۴] ته‌نشینی قطره ویسکوالاستیک در یک سیال نیوتنی را به شکل عددی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که یک گودی در قسمت انتهایی قطره ایجاد می‌شود. این گودی نسبت به حالت کروی قطره نیوتنی باعث کاهش سرعت نهایی قطره و افزایش تنش‌های ویسکوالاستیک قطره در حال سقوط می‌گردد.

ایرینا اسماگین<sup>۲</sup> و همکاران [۳۵] ته‌نشینی قطره سیال بینگهام تغییرپذیر در سیال نیوتنی بی نهایت را با استفاده از روش معادله انتگرالی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که به ازای اعداد موپینگی کم شکل قطره همانند شکل قطره نیوتنی در حال سقوط می‌باشد و توانستند محدوده بحرانی عدد موپینگی را برای ناپایداری شکل قطره و تبدیل قطره کروی به پهن دوکی شکل را بدست آورند.

جرمن و برتولا<sup>۳</sup> [۳۶] شکل قطره ویسکوپلاستیک را که تحت نیروی گرانش، در حال سقوط آزاد بوده است را بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نتایج بدست آمده را با قطره نیوتنی در حال سقوط مقایسه نمودند. در شکل ۱-۱۱، شکل قطرات نیوتنی با ویسکوزیته‌های متفاوت و قطرات

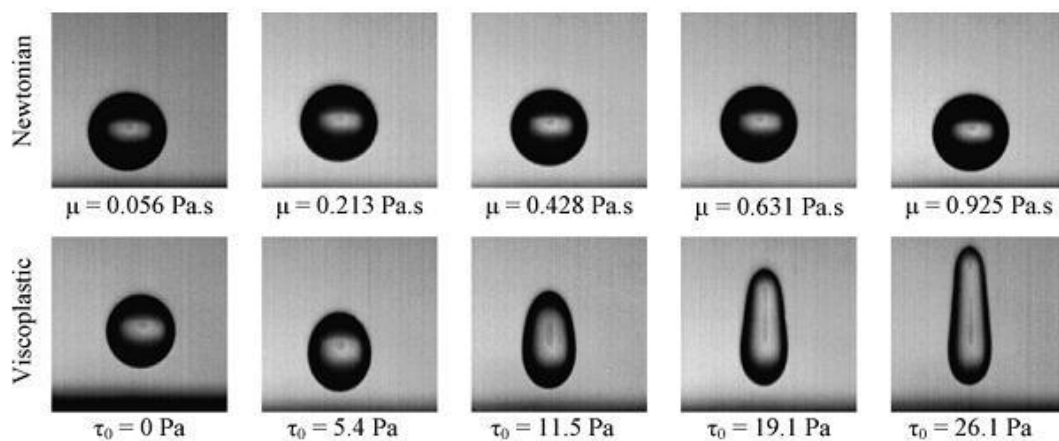
---

<sup>1</sup> Mukherjee and Sarkar

<sup>2</sup> Irina Smagin

<sup>3</sup> German and Bertola

ویسکوپلاستیک به ازای روند افزایشی تنش تسلیم به نمایش گذاشته شده است. قطرات نیوتنی پس از رهایی از سر نازل سریع شکل کروی به خود می‌گیرند و از این طریق نیروی وارد بر سطح قطره ناشی از ویسکوزیته سیال کاهش پیدا می‌کند. این در حالی است که برای قطره ویسکوپلاستیک این روند تکرار نمی‌شود و هنگامی که تنش تسلیم سیال قطره بر نیروهای وارد بر سطح قطره غلبه می‌کند در تمام مدت سقوط شکل قطره دوکی<sup>۱</sup> شکل باقی می‌ماند.



شکل ۱-۱۱. مقایسه شکل قطرات نیوتنی با ویسکوزیته‌های متفاوت با قطرات ویسکوپلاستیک در حال افزایش تنش تسلیم [۳۶]

میلیکن و لیل<sup>۲</sup> [۳۷] متوجه تغییر شکل و تجزیه قطرات پلیمری (غیرنیوتنی) در جریان کششی پایای دوبعدی بسیار لزج شدند. آنها مشاهده کردند که با نسبت ویسکوزیته‌های یکسان و عدد موینگی مشخص، تغییر شکل‌های بزرگتری در قطرات غیرنیوتنی نسبت به قطرات نیوتنی اتفاق می‌افتد. قطرات با نسبت ویسکوزیته محدود و زیاد در ابتدا مانند سیال نیوتنی کشیده می‌شوند سپس بسته به بزرگی عدد دبورا، این قطرات به کشش ادامه می‌دهند تا شکل نوک پیازی<sup>۳</sup> در می‌آیند یا نوک تیز می‌گردند. رامسوامی و لیل<sup>۴</sup> [۱۷] دریافتند که در جریان‌های کششی یکنواخت، یک قطره پلیمری

<sup>1</sup> Prolate

<sup>2</sup> Milliken and Leal

<sup>3</sup> Bulbous ends

<sup>4</sup> Ramaswamy and Leal



کمتر از همتای نیوتنی خود دچار تغییر شکل می‌شود در صورتی که خواص پلیمری گرایش بیش‌تری برای تغییر شکل قطره دارد. آدام و گری لیل<sup>۱</sup> [۳۸] تغییر شکل پایا و گذرای یک قطره الاستیک معلق در یک سیال نیوتنی و در جریان کششی تولید شده توسط آسیاب چهار غلتکی<sup>۲</sup> را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها متوجه شدند که اثرات ویسکوالاستیک شکل پایای قطره را از بیضوی به شکلی بدون نوکی تیز تغییر می‌دهد. شکل ۱-۱۲ شکل پایای دو قطره ویسکوالاستیک و نیوتنی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۲. شکل پایای قطره الف) قطره ویسکوالاستیک ب) قطره نیوتنی [۳۸]

هو و لیل<sup>۳</sup> [۳۹] حرکت خزشی ذرات سیال را در یک لوله بررسی کردند. آن‌ها از هر دو سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک به عنوان سیال بستر برای بررسی اثر خاصیت الاستیک استفاده کردند. در این پژوهش متوجه شدند که قطرات در سیال ویسکوالاستیک با افزایش نسبت ویسکوزیته کشیده‌تر می‌شوند.

فاولوکیس و همکارانش<sup>۴</sup> [۴۰] نیز تغییر شکل و تفکیک یک قطره باریک غیرنیوتنی در یک جریان کششی ساده و خزشی مایعی نیوتنی را بصورت تئوری مورد مطالعه قرار دادند. مدل توانی<sup>۵</sup> برای سیال درون قطره انتخاب شده و تغییر شکل قطره توسط یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول

<sup>1</sup> Adam and Gary Leal

<sup>2</sup> Four roll mill

<sup>3</sup> Ho and Leal

<sup>4</sup> Favelukis

<sup>5</sup> Power law

توصیف شده است. در این بررسی نتایج مربوط به شکل قطره و تفکیک آن بصورت تابعی از عدد موینگی، نسبت لزجت، و نوع سیال نیوتنی درون قطره ارائه شده است.

سوستارز و بلمونته<sup>۱</sup> [۴۱] سقوط قطره ویسکوالاستیک در فاز سیال نیوتنی برای جریان خزشی بصورت آزمایشگاهی و تحلیلی بررسی کردند. آنها از محلول آب و گلیسرین و پلیمر زانتام<sup>۲</sup> به عنوان فاز قطره و از روغن پلی دیمتیل سیلوگزان<sup>۳</sup> به عنوان فاز سیال ویسکوز در حل آزمایشگاهی بهره بردند. آنها از تکنیک حساب اغتشاشات<sup>۴</sup> به عنوان روش حل تحلیلی برای قطره ویسکوالاستیک در حال سقوط و فاز نیوتنی استفاده کردند. در این تحقیق اعداد دبور و موینگی به عنوان پارامترهای اغتشاشی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از مدل مرتبه سه برای مدل سازی قطره ویسکوالاستیک به عنوان معادله ساختاری استفاده کردند. در قسمت آزمایشگاهی این تحقیق مشخص گردید شکل قطره در حال سقوط به ازای حجم‌های به اندازه کافی کوچک ( $0.1$  میلی لیتر  $\leq$  حجم) کاملاً کره‌گونه باقی می‌ماند. با افزایش حجم قطره یا همان قطر معادل قطره شکل قطره ناپایدار شده و کرویت خود را از دست می‌دهد و به شکل یک قطره پهن‌شده تبدیل می‌گردد. با افزایش حجم قطره ( $0.35$  میلی لیتر  $\geq$  حجم) یک گودی در قسمت بالایی قطره پدید می‌آید. این گودی به گونه‌ای ایجاد می‌شود که قسمت بالایی قطره را به سمت داخل خود کشیده و یک حفره در قسمت فوقانی قطره ایجاد می‌نماید. با رشد حجم قطره این فرورفتگی افزایش می‌یابد و در نهایت به شکل گردابی تبدیل می‌شود.

وانچو<sup>۵</sup> و همکارانش [۴۲] بر روی سقوط قطره نیوتنی در مایعات ویسکوالاستیک و غیرالاستیک تحقیقاتی را انجام داده و نموداری برای پیش‌بینی شکل قطرات پیشنهاد نمودند. در این راستا گویدو و

---

<sup>1</sup> Sostarecz and Belmonte

<sup>2</sup> Xanthan

<sup>3</sup> Polydimethylsiloxan

<sup>4</sup> Perturbation

<sup>5</sup> Wanchoo

همکارانش<sup>۱</sup> [۴۳] تغییرشکل‌های یک قطره کوچک نیوتنی در یک سیال باگر تحت جریان برشی آهسته و در شرایط پایدار را با استفاده از روش‌های پردازش تصویر<sup>۲</sup> مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه آزمایشگاهی قابل توجه این تحقیق که با تئوری مطابقت خوبی دارد این است که جهت‌گیری قطره بسوی جهت جریان، در مقایسه با جریان مایعات نیوتنی بطرز چشم‌گیری بهتر است. در حقیقت برپایه این نتایج می‌توان یک روش بصری برای بدست آوردن اختلاف تنش‌های نرمال اول سیال محیط ارائه نمود. آنها همچنین نشان دادند کشش سطحی بین دو مایع با مقایسه بین پیش‌بینی‌های تئوری و اطلاعات حاصل از پردازش تصاویر بدست آمده از نماهای پهلو و بالای قطره براحتی قابل حصول است.

کیشوره<sup>۳</sup> و همکارانش [۴۴] نیز ضریب پسا و الگوهای جریان قطره کروی نیوتنی در حال ته‌نشین شدن در سیال غیرنیوتنی را بصورت عددی مطالعه کرده‌اند. آنها در این مطالعه تاثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز و اندیس قانون توانی ( $n$ ) را بر پسای فشاری، پسای اصطکاکی و پسای کل مورد بررسی قرار داده و رابطه‌ای ساده برای ضریب پسای کل پیشنهاد نمودند. نتایج این مطالعه برای پیش‌بینی نرخ ته‌نشین شدن قطرات کروی در مایعات غیرنیوتنی مفید می‌باشد. از جمله مطالعات ارزشمند در زمینه مطالعه رفتار قطرات غیرنیوتنی در محیط غیرنیوتنی دیگر مربوط به کار فرانسسکو گرکو<sup>۴</sup> [۴۵] است. وی تغییرشکل‌های یک قطره غیرنیوتنی در مایع غیرنیوتنی و مخلوط نشدنی دیگر را با استفاده از حساب آشفتگی بصورت تحلیلی بررسی کرده است. در این مطالعه دو مایع به نحوی انتخاب شدند که از معادله مشخصه سیال مرتبه دو پیروی نمایند. بنابراین، اگرچه نتایج این بررسی به تغییرشکل‌های قطرات کوچک محدود می‌شود، ولی نتایج ارائه شده بسیار عمومی هستند.

---

<sup>1</sup> Guido et al

<sup>2</sup> Image processing

<sup>3</sup> Kishore

<sup>4</sup> Francesco Greco

### ۱-۲-۳- مطالعات در زمینه حباب‌ها

ویژگی‌های حباب‌های بالا رونده در سیالات ویسکوالاستیک نیز مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که به لحاظ کیفی از سیالات نیوتنی لزج متفاوت هستند. وگنر و پارالنگ<sup>۱</sup> [۴۶]، کلیفت<sup>۲</sup> و همکاران [۴۷] و چابرا<sup>۳</sup> [۴۸] گزارش دادند که شکل حباب بالا رونده در سیالات نیوتنی لزج با افزایش حجم، از کروی به بیضوی پهن شده در قطبین و در نهایت به بیضوی کلاهدار تغییر می‌یابد. نوک تیزی که در انتهای دنباله‌دار حباب‌های بالارونده در سیالات ویسکوالاستیک وجود دارد توسط پژوهشگران بسیاری اشاره شده است [۴۹-۵۲]. هاساگر<sup>۴</sup> [۵۳] نشان داد که نوک تیز دنباله‌دار در واقع دو بعدی است و لبه نوک تیز در یک جهت و لبه بیلی شکل در جهت عمود بر آن است. هاساگر متوجه شد که شکل نوک تیز انتهای دنباله حباب بالارونده مربوط به رشد گردابه‌ای است که در پشت حباب تشکیل می‌شود. لیو<sup>۵</sup> و همکاران [۵۴] تحقیقات آزمایشگاهی هاساگر را با گزارش یک مجموعه نوک تیز دو بعدی در انتهای دنباله حباب‌های بالارونده در یک سیال ویسکوالاستیک، همراه یک لبه پهن برای قسمت نوک تیز که مانند یک کره مسطح گردیده مورد تایید قرار دادند. ویژگی جالب دیگری که در بالاروی آزادانه‌ی حباب‌ها در یک سیال ویسکوالاستیک وجود دارد، ناپیوستگی در سرعت حدی حباب‌ها در حجم بحرانی حباب است. پدیدار شدن ناپیوستگی در رابطه سرعت بالاروی حباب با حجم حباب برای اولین بار توسط آستاریتا و آپوزو<sup>۶</sup> [۴۹] گزارش شد. دیگر مطالعات دلایل مختلفی برای این ناپیوستگی مانند کاهش نیروی پسا [۵۴] و پدیدار شدن گردابه در جریان پشت حباب بالا رونده مطرح کردند. گردابه پشت یک حباب گازی بالارونده در یک سیال غیرنیوتنی با کوشش هاساگر

---

<sup>1</sup> Wegener and Parlange

<sup>2</sup> Clift

<sup>3</sup> Chhabra

<sup>4</sup> Hassager

<sup>5</sup> Liu

<sup>6</sup> Astarita and Apuzzo

(۱۹۷۹) کشف شد. هررا-ولارد<sup>۱</sup> و همکاران [۵۵] نشان دادند که گردابه‌ها تنها در حباب‌هایی با حجمی بیش از حجم بحرانی، پدیدار می‌گردند. پیلاپاکام<sup>۲</sup> [۵۶] در مطالعه عددی خود به بررسی حالت گذرا و پایای بالاروی حباب در سیال ویسکوالاستیک پرداخت و به این نتیجه رسید که بعد از توسعه نوک تیز حباب، شکل آن به صورت محسوسی با افزایش غلظت در پلیمر در سیال معلق تغییر نمی‌یابد. همچنین وو و غریب<sup>۳</sup> [۵۷] صعود یک حباب کوچک را بصورت آزمایشگاهی مطالعه نمودند و دریافتند در محدوده‌ای که اعداد مورتون و اوتووس اندک باشد، حباب تنها دو شکل کره یا بیضی را به خود می‌گیرد. سپس به منظور بررسی بیشتر، میتسوهیرو اوها<sup>۴</sup> و همکاران [۵۸] تشکیل حباب در ناحیه اتووس بالا و مورتون پایین را مدل‌سازی کردند. آنها توانستند تاثیر شرایط اولیه را در شکل نهایی و نحوه حرکت حباب تعیین نمایند.

لی<sup>۵</sup> و همکاران [۵۹]، همچنین برهان<sup>۶</sup> و همکاران [۶۰] بصورت آزمایشگاهی دینامیک قطرات و حباب‌ها را در یک کانال مربعی برای سیالات نیوتنی بررسی کردند. آقای لی و همکاران به مطالعه حرکت حباب‌ها در یک کانال مربعی حاوی سیال نیوتنی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که حباب‌های هوا دارای کشیدگی کمتری می‌باشند و سرعت بالا روی بیشتری نسبت به کانال دایره‌ای با همان شعاع دارند. برهان و همکاران [۶۰] نیز تغییرشکل و تجزیه قطرات ویسکوز را از میان یک کانال مربعی که با سیال نیوتنی پر شده بود، بررسی کردند. آنها دریافتند که مکانیزم اصلی تجزیه در کانال مربعی یک حالت حفره بازگشتی است که این با تحقیقات پیشین در کانال دایره‌ای شباهت داشت.

---

<sup>1</sup> Herrera-Velarde

<sup>2</sup> Pillapakkam

<sup>3</sup> Wu and Gharib

<sup>4</sup> Mitsuhiro Ohta

<sup>5</sup> Li

<sup>6</sup> Borhan

### ۱-۳- معرفی تحقیق حاضر

همانطور که بطور کامل در بخش ۱-۱-۱ بیان شد با توجه به کاربردهای وسیع و متنوعی که حرکت و سقوط قطرات در صنایع مختلف دارد، داشتن اطلاعاتی دقیق از رفتار، اندازه، تغییرشکل و سرعت قطرات در طراحی بهینه فرایندهای صنعتی مختلفی نظیر مبدل‌های حرارتی تماس مستقیم، استخراج مایع مایع، صنایع داروسازی و فرایندهای شیمیایی (فرایندهای پلیمری) تاثیر بسزایی دارد. همچنین از آنجایی که حرکت یک قطره توسط ضریب پسای آن توصیف می‌شود و ضریب پسا خود وابسته به شکل قطره است در همین راستا در مطالعه حاضر به بررسی تغییرشکل و ضریب پسای دو قطره ویسکوالاستیک (باگر) با خاصیت‌های الاستیک متفاوت، در حال سقوط در هوا و نفت و مقایسه نتایج آنها با سه قطره نیوتنی آب و اتانول و همچنین محلول آب و نمک سدیم دودسیل بنزن سولفانات<sup>۱</sup> به عنوان فعال سطحی<sup>۲</sup> پرداخته شده است. درآزمایشات از محلول آب و گلیسرین با نسبت حجمی ۸۰:۲۰ و پلیمر پلی‌آکریلامید<sup>۳</sup> با درصدهای جرمی ۵۰ ppm و ۱۰۰ ppm برای ساخت قطرات ویسکوالاستیک استفاده شده است. همچنین در این مطالعه از دو سوزن با قطرهای داخلی ۱/۰۷ و ۱/۸ میلی‌متر جهت تشکیل قطرات با قطرهای مختلف بهره گرفته شده است بدین منظور که اثر تغییر اندازه قطرات بر تغییرشکل و ضریب پسا مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق از یک دوربین پرسرعت که قادر به ثبت ۴۵۰۰ عکس در یک ثانیه است، استفاده شده است. یک کد پردازش تصویر با استفاده از نرم‌افزار متلب برای استخراج اطلاعات پایه‌ای همچون حجم قطرات، سرعت و موقعیت حرکت آنها، مسیر حرکت و نیز نحوه تغییرشکل‌های قطرات از تصاویر نوشته شده است.

### ۱-۳-۱- جنبه‌های نوآوری تحقیق

همانطور که در بخش مطالعات پیشین بیان شد تحقیقات زیادی در مورد نحوه حرکت و تغییرشکل

---

<sup>1</sup> Sodium Dodecyl Benzene Sulfanates

<sup>2</sup> Surfactant

<sup>3</sup> Polyacrylamid

قطرات نیوتنی و غیر نیوتنی انجام شده است که سهم سیالات ویسکوالاستیک بسیار کم بوده و در این میان به دلیل پیچیدگی خاصی که در ساخت سیالات باگر وجود دارد، این دسته از سیالات غیر نیوتنی کمتر مورد تحقیقات آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند که در تحقیق حاضر دو محلول باگر با خاصیت‌های الاستیک متفاوت و تاثیر همزمان پارامترهای بی‌بعدی نظیر عدد باند، عدد اتووس، عدد الاستیسیته و نسبت ویسکوزیته بر روی تغییر شکل و ضریب پسای قطرات که در تحقیقات گذشته صورت نگرفته، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به دلیل اینکه اکثر فرایندهای صنعتی نظیر جداکننده‌های مایع-مایع<sup>۱</sup> در بستر سیالاتی مانند آب و نفت اتفاق می‌افتد در این تحقیق نیز از این دو سیال استفاده شده است.

### ۱-۳-۲- ساختار کلی پایان نامه

این مطالعه با بیان جایگاه و کاربردهای متعدد پدیده تشکیل قطره، روش‌های تولید قطره، معرفی سیالات غیر نیوتنی و در ادامه مروری بر مطالعات تئوری و آزمایشگاهی در زمینه حرکت و تغییر شکل قطره آغاز شده است.

در فصل دوم تجهیزات آزمایشگاهی، مواد اولیه مورد نیاز و روش ساخت سیال قطره، مکانیزم آزمایش، تست‌های کشش سطحی، ویسکوزیته و رئولوژی سیالات معرفی شده است.

نتایج و بحث در مورد محاسبه حجم، تغییر شکل، ضریب پسا، مسیر حرکت، موقعیت و سرعت قطرات در شرایط مختلف به تفصیل در فصل سوم آورده شده است.

نهایتاً در فصل چهارم خلاصه‌ای از نتایج و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده در این زمینه مطرح گردیده است.

---

<sup>1</sup> Liquid- Liquid Separator





## فصل دوم

### تجهيزات آزمایشگاهی

## ۲-۱- مقدمه

مطالعات آزمایشگاهی نیازمند به کارگیری ابزارهای کارآمد و به روز جهت دستیابی به نتایج دقیق و قابل اطمینان می باشد. از جمله مهم ترین این ابزارها در این زمینه می توان به دوربین های پرسرعت اشاره کرد. این ابزار قابلیت ثبت پدیده هایی را دارد که در مدت زمانی بسیار کوتاه رخ می دهند.

در مطالعه حاضر از دوربین پرسرعت به منظور ثبت تصاویر مربوط به حرکت قطره استفاده شده است که در این فصل مشخصات آن بیان خواهد شد. همچنین در ادامه تجهیزات آزمایشگاهی، مواد اولیه مورد نیاز و روش ساخت سیال قطره، تست های کشش سطحی، ویسکوزیته و رئولوژی و در نهایت مکانیزم آزمایش مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲-۲- تجهیزات آزمایش

### ۲-۲-۱- دوربین پرسرعت

تمامی آزمایش های صورت گرفته تصویربرداری از حرکت قطرات و سپس پردازش تصاویر می باشد. بدین منظور از یک دوربین پرسرعت (pco.dimax S1) CMOS<sup>۱</sup> استفاده شده است که در بالاترین رزولوشن<sup>۲</sup>، توانایی ثبت ۴۵۰۰ تصویر بر ثانیه را داراست. رزولوشن دوربین از ۱۶×۲۴۰ تا ۱۰۰۸×۱۰۰۸ قابل تغییر است که با افزایش سرعت تصویربرداری به دلیل محدودیت های حافظه، به طور طبیعی رزولوشن کم می شود. برای این دوربین نیز در پایین ترین رزولوشن یعنی ۱۶×۲۴۰، سرعت ۱۵۲۸۱۱ تصویر بر ثانیه را خواهد داشت. دوربین در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. در این آزمایش ها از رزولوشن ۱۰۰۸×۱۰۰۸ استفاده شده است. محدوده زمانی نوردهی این دوربین از ۱/۵ میکروثانیه تا ۴۰ میلی ثانیه است و قابلیت کنترل هوشمند باتری را دارد. این دوربین برای ذخیره تصاویر نیز به حافظه داخلی ۳۶ گیگا بایت مجهز است و رابط های آن شامل USB 3.0، GigE/USB، HD-SDI، 2.0 و CameraLink می باشد.

<sup>1</sup> Complementary metal-oxide-semiconductor

<sup>2</sup> Resolution



شکل ۱-۲. دوربین پرسرعت

به همراه دوربین از یک لنز Nikon مدل AF-S Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED VR برای آزمایش‌ها استفاده شده است. این لنز ماکرو مخصوص عکاسی و فیلم‌برداری از نزدیک<sup>۱</sup> (تا بزرگنمایی ۱:۱) و پرتره<sup>۲</sup> می‌باشد. لنز مذکور این قابلیت را دارد که به هنگام نزدیک شدن دوربین به پدیده‌ی موردنظر، تصویری واضح از آن را در اختیار می‌گذارد. شکل ۲-۲ لنز مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین در شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴ نمونه‌ای از تصویر گرفته شده از قطره آب در حال سقوط در نفت و تصویر پردازش شده نشان داده شده است.

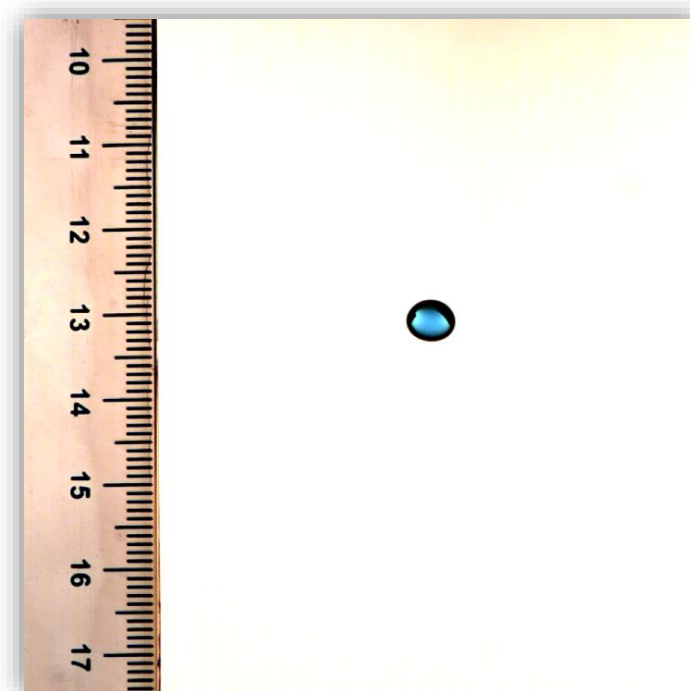
---

<sup>1</sup> Close up

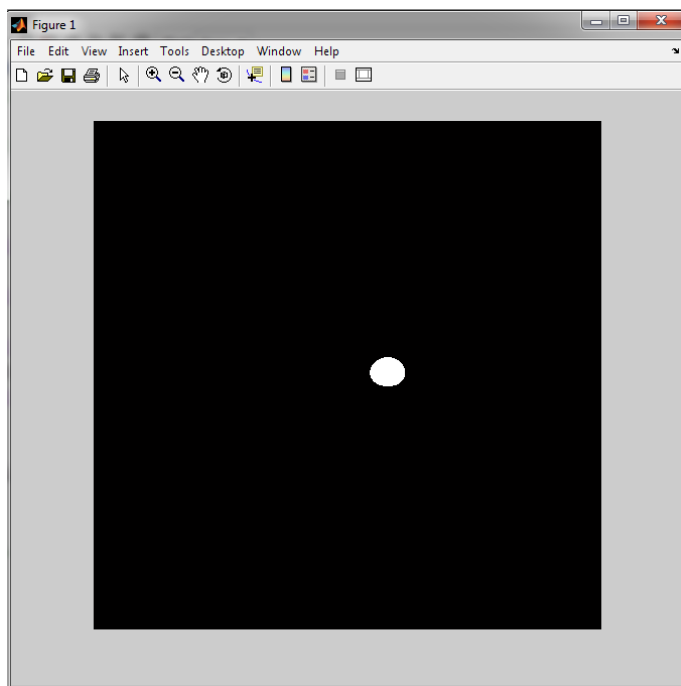
<sup>2</sup> Portrait



شکل ۲-۲. لنز Nikon مورد استفاده



شکل ۲-۳. سقوط قطره آب در نفت



شکل ۲-۴. تصویر پردازش شده سقوط قطره آب در نفت

### ۲-۲-۲- ترازو با دقت بالا

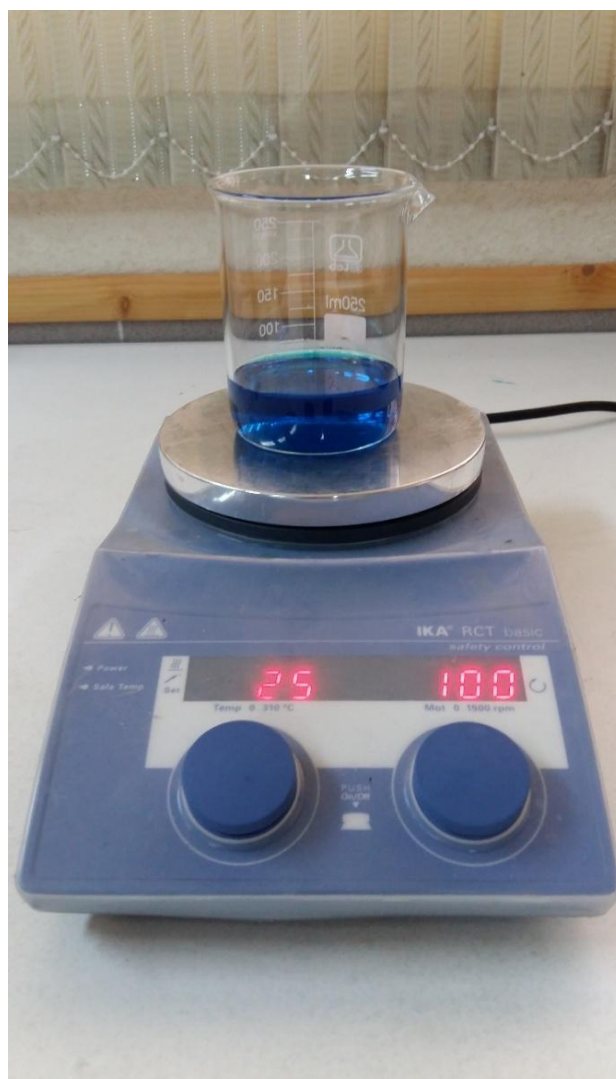
تمام نمونه‌برداری‌ها توسط ترازوی شرکت RADWAG مدل PS 510/C/1 با دقت  $0.001$  گرم انجام گرفته شده است. بیش‌ترین اهمیت این دقت بالا، در ساخت پلیمر با غلظت‌های پایین نمایان شده است. در شکل ۲-۵ تصویر این ترازو نشان داده شده است.



شکل ۲-۵. ترازو با دقت  $0.001$  گرم

### ۳-۲-۲- همزن هات پللیت

در این آزمایش‌ها از همزن هات پللیت<sup>۱</sup> IKA RCT استفاده شده است. این همزن سرعت دورانی ۵۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و دمای ۳۰-۳۱۰ درجه سانتی‌گراد را تأمین می‌کند. این همزن با ایجاد میدان مغناطیسی دورانی، قرص مگنت موجود در محلول را می‌چرخاند. در شکل ۶-۲ تصویر همزن هات پللیت نمایش داده شده است.



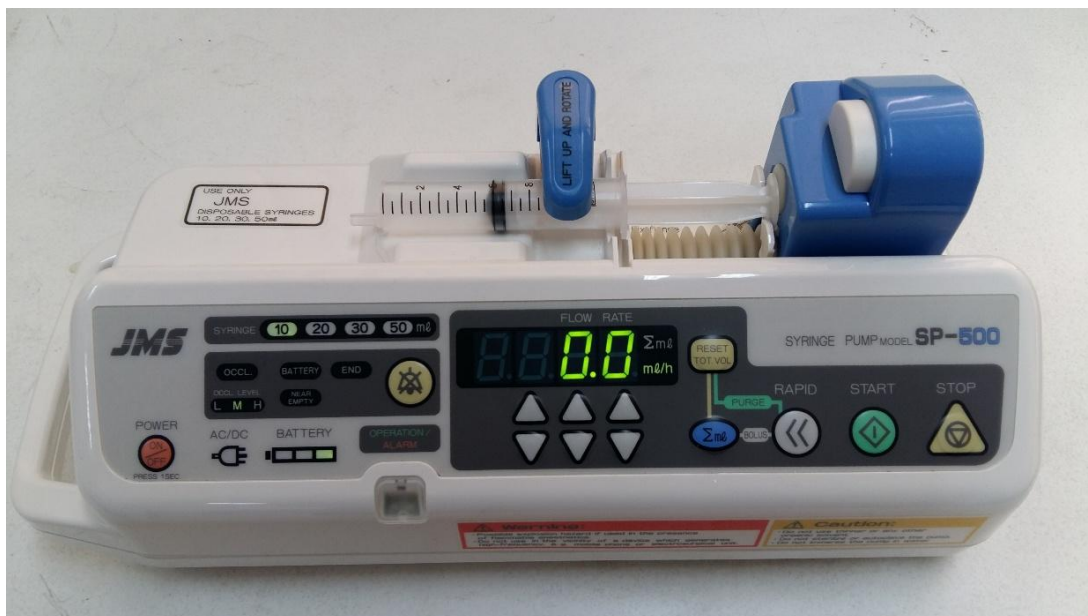
شکل ۶-۲. همزن هات پللیت

---

<sup>1</sup> Hot plate stirrer

## ۴-۲-۲- پمپ تزریق سرنگی

در این آزمایش‌ها از یک دستگاه پمپ تزریق سرنگی<sup>۱</sup> JMS مدل SP-500 که در شکل ۷-۲ نشان داده شده، استفاده شده است. دستگاه پمپ سرنگی جهت به کارگیری انواع سرنگ‌ها طراحی شده است. این دستگاه با توجه به ابعاد سرنگ استفاده شده، قابلیت تزریق مقدار معینی محلول با سرعت‌های مختلف را دارا می‌باشد. به طور کلی این سیستم در تمامی مواردی که نیاز به تزریق کم (میلی‌لیتر بر ساعت) و کنترل شده محلول می‌باشد، کاربرد دارد. استفاده از این پمپ در مصارف پزشکی بسیار متداول و شناخته شده است. علاوه بر این، از این دستگاه می‌توان در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی به منظور تحقیق بر روی موضوعات مختلف از جمله نفت، گاز، مواد شیمیایی، رنگ‌ها و کلیه آزمایش‌ها مرتبط با تشکیل و تزریق قطره بهره‌های فراوان برد. پمپ تزریق سرنگ JMS مدل SP-500 ساخت کشور ژاپن بوده و قابلیت استفاده با کلیه سرنگ‌های داخلی با سایزهای مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ سی‌سی) را دارد.



شکل ۷-۲. پمپ تزریق سرنگی

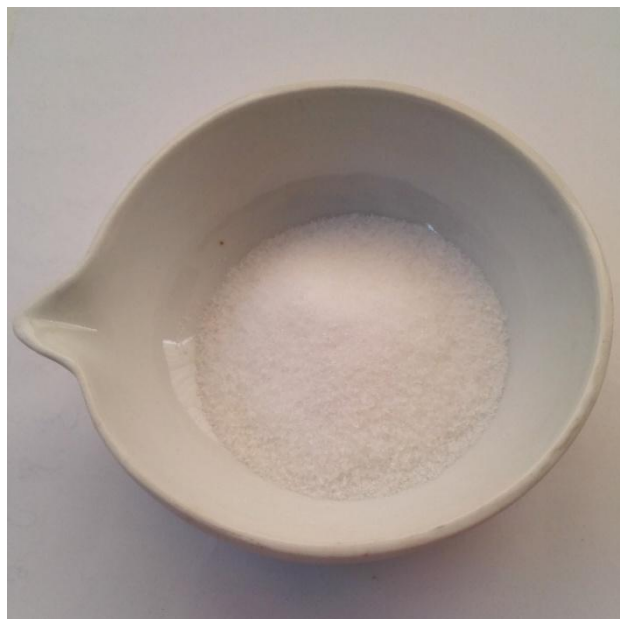
<sup>1</sup> Syringe pump

## ۲-۲-۵- ساختار و مشخصات مواد مورد استفاده

در این قسمت به توضیح مواد استفاده شده در آزمایشات و خواص آنها پرداخته می‌شود. از آب، اتانول و محلول آب و نمک سدیم دودسیل بنزن سولفانات به عنوان سیالات نیوتنی و از دو محلول آب و گلیسرین با پلی‌آکریلامید با غلظت‌های مختلف به عنوان سیالات ویسکوالاستیک استفاده شده است. آزمایشات همانطور که در فصل قبل ذکر شد در هوا و نفت به‌عنوان سیال بستر انجام شده است.

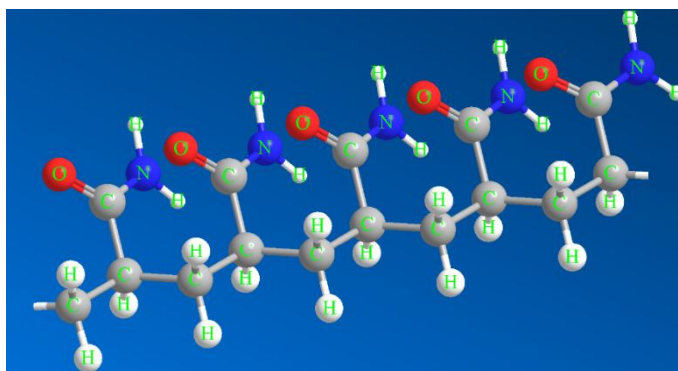
## ۲-۲-۶- طریقه‌ی ساخت سیال باگر

جهت ساخت قطره ویسکوالاستیک از آب و گلیسرین با نسبت حجمی ۸۰:۲۰ و پلی‌آکریلامید با نسبت جرمی ۰,۰۵, ۰,۰۱ و ۰,۰۱ استفاده شده است. پلی‌آکریلامید یک ماده سفیدرنگ و بی‌بو است که در آب حل می‌شود و ترکیب شیمیایی آن با فرمول  $C_3H_5NO$  نشان داده می‌شود. از کاربردهای صنعتی پلی‌آکریلامید می‌توان به ساخت چسب‌ها، کاغذها، مواد پلاستیکی و آرایشی و... اشاره کرد. همچنین پلی‌آکریلامید از دسته مواد پاک‌کننده برای تسهیل آب‌آشامیدنی و حذف مواد زائد آن به شمار می‌رود. در شکل‌های ۲-۸ و ۲-۹ به ترتیب پلی‌آکریلامید و ساختار مولکولی این پلیمر نشان داده شده است.



شکل ۲-۸. پلی‌آکریلامید





شکل ۲-۹. ساختار مولکولی سه بعدی پلی آکریلامید

برای ساخت محلول پلیمری نکات مهمی باید مورد توجه قرار گیرد در غیر این صورت محلول بدست آمده همگن نمی باشد. نخست پلیمر با استفاده از ترازو با دقت بالا وزن می شود، سپس آب به آن اضافه می شود. باید توجه داشت که پلی آکریلامید در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  در آب حل می شود برای این کار از همزن حرارتی که در بخش ۲-۲-۳ معرفی شد، بهره گرفته شده است. پس از آنکه پلیمر به خوبی در آب حل شد در چندین مرحله گلیسیرین به آن اضافه می شود و اجازه داده می شود تا محلول ۲۴ ساعت هم زده شود که کاملاً همگن شود. لازم به ذکر است که گلیسیرین لزجت محلول را افزایش می دهد.

## ۲-۲-۷- اندازه گیری خواص

### ۲-۲-۷-۱- کشش سطحی

نیروی کشش سطحی یکی از مهمترین نیروهای وارد بر قطرات در حال سقوط است و مستقیماً روی شکل و حرکت قطره تاثیر می گذارد. کشش سطحی بین مایعات مورد آزمایش نسبت به هوا در آزمایشگاه پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ و پوشش اندازه گیری شده است. این تستها با استفاده از یک کشش سنج با روش ویل هلمی<sup>۱</sup> صورت گرفته است. همچنین اندازه گیریهای مربوط به کشش سطحی بین مایعات با نفت در پژوهشکده ذخیره سازی مواد نفت و گاز دانشکده معدن دانشگاه صنعتی

<sup>1</sup> Wilhelmy

شاهرود با استفاده از دستگاه کشش سطحی مایع-مایع به روش قطره معلق<sup>۱</sup> بدست آمده است. در این روش همانطور که در شکل ۲-۱۰ مشاهده می‌شود سیال بستر (نفت) در داخل یک سلول کوچک قرار می‌گیرد و فاز قطره از طریق یک سرنگ به سوزنی با اندازه مشخصی تزریق می‌شود. چگالی هر دو سیال، اندازه قطر سوزن، دما و فشار محیط به نرم‌افزار داده می‌شود. مکانیزم دستگاه به این صورت است که با استفاده از یک دوربین با وضوح بالا تصاویر قطره معلق را ضبط کرده و مقدار کشش سطحی بین دو فاز را محاسبه می‌کند. در شکل ۲-۱۱ نمونه‌ای از تصویر قطره اتانول مشاهده می‌شود. البته لازم به ذکر است که روش‌هایی نیز وجود دارد که می‌توان از طریق آنها با داشتن کشش سطحی هر فاز با هوا مقدار کشش سطحی بین دو فاز سیال را بدست آورد [۶۱]. از جمله این روشها می‌توان به روش آنتونوف<sup>۲</sup> و گریفالکو-گود<sup>۳</sup> اشاره کرد که هرکدام در ادامه مختصراً شرح داده شده‌اند. آقای آنتونوف پیش‌بینی کرد که کشش سطحی بین دو فاز مایع برابر است با اختلاف کشش سطحی هرکدام از دو مایع نسبت به هوا که بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\Gamma_{AB} = \Gamma_A - \Gamma_B \quad (۱-۲)$$

گریفالکو و گود رابطه‌ای که آقای آنتونوف پیشنهاد داده بود را اصلاح کردند و رابطه‌ی اصلاحی خود را بصورت زیر ارائه کردند:

$$\Gamma_{AB} = \Gamma_A + \Gamma_B - 2\phi\sqrt{\Gamma_A\Gamma_B} \quad (۲-۲)$$

که  $\phi$  بصورت رابطه‌ای از نسبت حجم مولی دو سیال بیان می‌شود:

---

<sup>1</sup> Pendant drop

<sup>2</sup> Antonoff

<sup>3</sup> Girifalco-Good

$$\phi = \frac{4(\bar{v}_A \bar{v}_B)^{1/3}}{[(\bar{v}_A)^{1/3} + (\bar{v}_B)^{1/3}]^2} \quad (3-2)$$

که  $\bar{v}_A$  و  $\bar{v}_B$  حجم‌های مولی دو سیال هستند. هر کدام از این روش‌ها با خطاهای همراه می‌باشند که در این آزمایشات ترجیح داده شد که از اندازه‌گیری مستقیم و دقیق بهره گرفته شود. جدول ۱-۲ خواص مواد را نشان می‌دهد. مقادیر از اندازه‌گیری مستقیم خواص توسط آزمایشگاه سرامیک پیشرفته، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ و پوشش تهران و پژوهشکده ذخیره‌سازی مواد نفت و گاز دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود حاصل شده است.



شکل ۱۰-۲. دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی



شکل ۱۱-۲. تشکیل قطره اتانول برای تعیین کشش سطحی

جدول ۱-۲. خواص مایعات در دمای ۲۵ °C

PWG2	PWG1	اتانول	SDBS-Water	آب	
۶۵/۳۷۳	۶۴/۲۷۲	۲۴/۳	۲۲	۷۲	کشش سطحی در هوا (dynes/cm)
۲۶	۲۵	۱۵	-	۳۵	کشش سطحی با نفت (dynes/cm)
۱۲۰.۸	۱۲۰.۸	۷۸۷	۹۹۸	۹۹۸	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
-	-	۱/۳۰	۱	۱	لزجت (cP)

#### ۲-۷-۲-۲- تست ویسکوزیته

برای اندازه‌گیری تغییرات لزجت در برابر نرخ برش از دستگاه ویسکومتر مدل DV-E/LV ساخت شرکت BROOKFIELD استفاده شده است. محدوده مجاز این دستگاه ۱-۲۰۰۰۰۰۰ سنتی‌پواز<sup>۱</sup> است (البته در صورت وجود تمام اسپیندل‌های<sup>۲</sup> مرتبط با دستگاه). در هنگام استفاده از این دستگاه باید توجه داشت که از ظرف مناسب با هر اسپیندل استفاده شود (قطر ظرف بیش از دو برابر قطر اسپیندل نباشد) و دما ثابت نگه داشته شود. شکل ۱۲-۲ تصویر ویسکومتر و یکی از اسپیندل‌ها همراه با ظرف مورد نیازش را نشان می‌دهد.

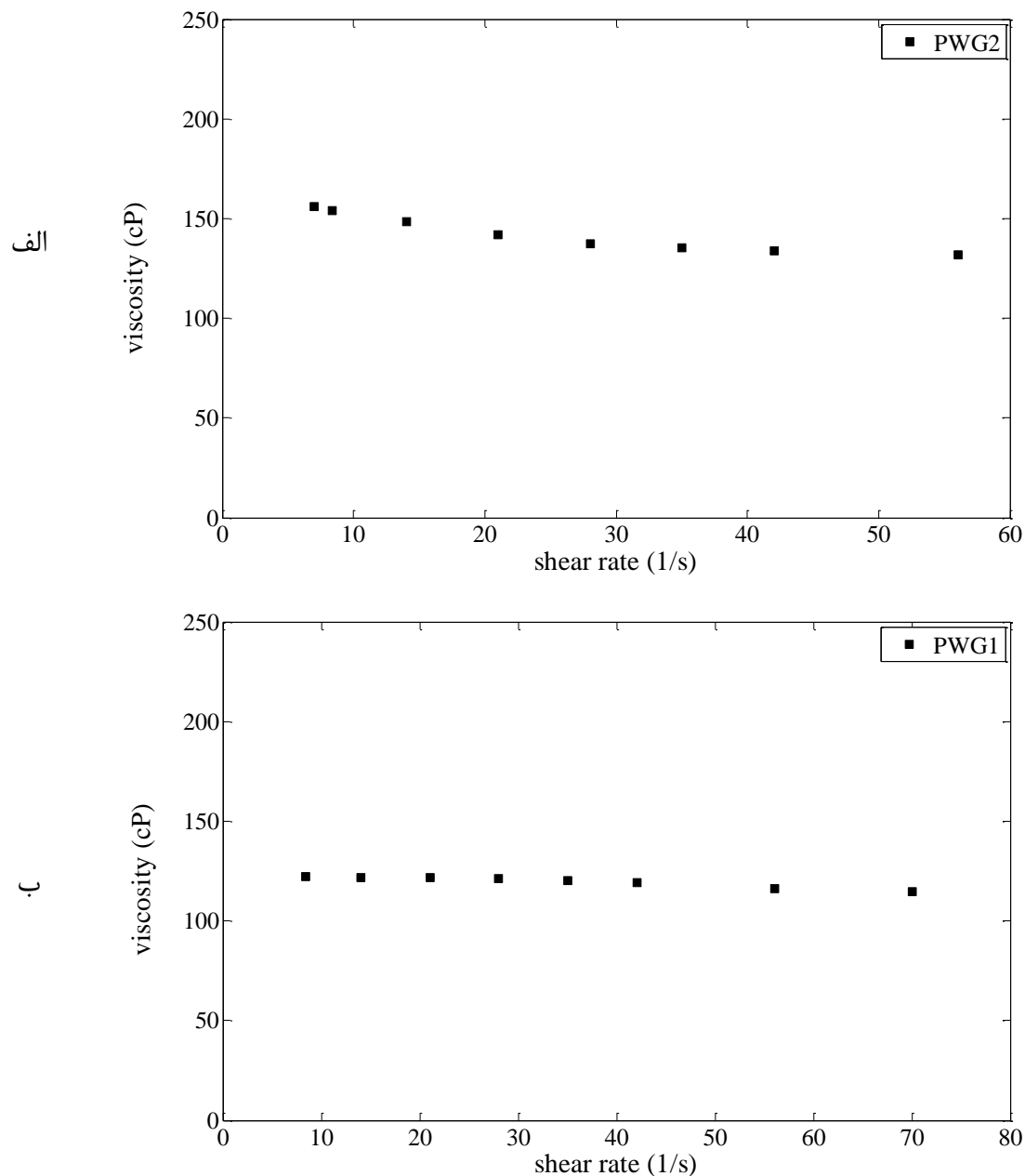


شکل ۱۲-۲. ویسکومتر به همراه اسپیندل و ظرف مورد نیاز

<sup>1</sup> centipoise

<sup>2</sup> spindle

شکل ۲-۱۳ تغییرات لزجت در برابر نرخ برش برای سیالات ویسکوالاستیک را نشان می‌دهد. این شکل همچنین نشان می‌دهد همه سیالات بیان شده از نوع باگر بوده و با افزایش نرخ برش بیشتر تغییرات جزئی در لزجت آنها بوجود می‌آید. نتایج مربوط به این تست‌ها در بخش پیوست‌ها آورده شده است.



شکل ۲-۱۳. الف) تغییرات لزجت بر حسب تغییرات نرخ برش برای سیال PWG2 (ب) تغییرات لزجت بر حسب تغییرات نرخ برش برای سیال PWG1

## ۲-۲-۷-۳- تست رئومتر

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر سقوط قطره ویسکوالاستیک زمان رهایی از تنش است. زمان رهایی از تنش معرف فاصله زمانی بین تنش اعمالی و تغییرشکل حاصل از آن است. یکی از راه‌های تخمین زمان رهایی از تنش تفسیر نتایج مدول‌های اتلاف<sup>۱</sup> ( $G''$ ) و ذخیره<sup>۲</sup> ( $G'$ ) براساس مدل ماکسول است. مدول‌های  $G'$ ,  $G''$  مدول‌های مادی هستند که از آزمون نوسان حاصل می‌شوند. به این صورت که، با ترسیم نمودار تغییرات مدول‌های  $G'$ ,  $G''$  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.

## ۲-۲-۷-۳-۱- تست نوسان

تست نوسان یکی از معروف‌ترین تست‌های سیالات ویسکوالاستیک است. در این تست ماده تحت یک تنش نوسانی (رابطه (۲-۴)) قرار گرفته و تغییرشکل ماده مورد بررسی قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود که تغییرشکل و تنش هم فرکانس باشند اما یک اختلاف فاز به اندازه  $\delta$  در آن‌ها مطابق رابطه (۲-۵) مشاهده می‌شود:

$$\tau = \tau_0 \cos \omega t \quad (۲-۴)$$

$$\gamma = \gamma_0 \cos(\omega t - \delta) \quad (۲-۵)$$

در این تست مقدار  $\gamma_0$  بسیار کوچک لحاظ شده است تا از تغییرشکل‌های بزرگ اجتناب گردد. بدین منظور طبق روابط (۲-۶) و (۲-۷) از تنش و برش مختلط استفاده شده است که قسمت حقیقی آن تنش و برش هستند:

$$\tau^* = G^* \gamma^* \quad (۲-۶)$$

---

<sup>1</sup> Loss Modulus

<sup>2</sup> Storage Modulus

$$\tau^* = \eta^* \dot{\gamma}^* \quad (7-2)$$

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

$$G^* = G' + iG'' \quad (8-2)$$

که در رابطه (۸-۲)،  $G''$  معرف بخش سیال ماده (ویسکوز) و  $G'$  معرف بخش جامد ماده (الاستیک) است. براساس مدل سازی جامد داریم:

$$G^* = \frac{\tau^*}{\dot{\gamma}^*} = \frac{\tau e^{i\omega t}}{\dot{\gamma} e^{i(\omega t - \delta)}} \quad (9-2)$$

در رابطه (۹-۲) خود اختلاف فاز می تواند تابع فرکانس باشد. می توان نوشت:

$$G' = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0} \cos \delta \quad (10-2)$$

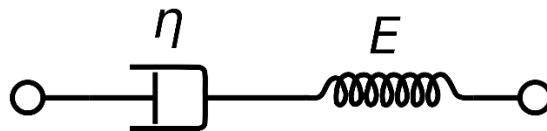
$$G'' = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0} \sin \delta \quad (11-2)$$

از تقسیم دو رابطه اخیر داریم:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (12-2)$$

۲-۲-۷-۳-۲ مدل ماکسول

یکی از بهترین مدل ها برای تفسیر نتایج تست نوسان مدل ماکسول است. این مدل از یک فنر و دمپر سری مطابق شکل ۱۴-۲ تشکیل شده است.



شکل ۱۴-۲. مدل فنر و دمپر ماکسول

مدل ماکسول بصورت رابطه (۱۳-۲) بیان می شود:

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta \dot{\gamma} \quad (13-2)$$

با جایگذاری روابط (۴-۲) و (۵-۲) در رابطه ماکسول، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\tau_0 \cos \omega t - \lambda \tau_0 \sin \omega t = \eta \dot{\gamma} \quad (۱۴-۲)$$

با فرض  $\tan \theta = \frac{1}{\lambda \omega}$  خواهیم داشت:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \omega t - \tan \theta \cos \omega t = -\frac{\eta \dot{\gamma}}{\lambda \tau_0 \omega} \\ \sin \omega t - \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \cos \omega t = -\frac{\eta \dot{\gamma}}{\lambda \tau_0 \omega} \\ \cos \theta \sin \omega t - \sin \theta \cos \omega t = -\frac{\eta \dot{\gamma}}{\lambda \tau_0 \omega} \cos \theta \end{array} \right. \Rightarrow \gamma = \frac{\lambda \tau_0}{\eta \cos \theta} \cos(\omega t - \theta) \quad (۱۵)$$

با توجه به فرضیات داریم:

$$\gamma_0 = \frac{\lambda \tau_0}{\eta \cos \theta} \quad \& \quad \tan \delta = \frac{1}{\lambda \omega} \quad (۱۶-۲)$$

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

هستند ( $G'' = G'$ ) در نتیجه داریم از رابطه (۱۲-۲) خواهیم داشت:

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

برای حالتی که مدول‌های  $G'$ ،  $G''$  هیچ نقطه تلاقی نداشته باشند از روابط زیر 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  $n$  مولفه تجزیه می‌کنند که هر مولفه با یک زمان رهایی

از تنش  $\lambda_i$  و یک ضریب لزجت  $\eta_i$  برای هر مود، تا زمانی که به یک برآزش خوب برای داده‌های



آزمایشگاهی برسد افزایش می‌یابد. برای این منظور تابع  $f_{min}$  بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_{min} = \sum_{i=1}^m [(G'_{model}(\omega) - G'(\omega))^2 + (G''_{model}(\omega) - G''(\omega))^2] \quad (20-2)$$

برای بهینه کردن جواب‌های تابع رابطه (20-2) از تابع الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در مطالعه حاضر مدول‌های  $G', G''$  همانطور که در شکل‌های 2-15 و 2-16 مشاهده می‌شود نقطه تلاقی ندارند که با استفاده از روابط (2-18) و (2-19) طیفی از مقادیر رهایی از تنش بدست می‌آید و با جایگذاری در رابطه (2-21) مقدار متوسط زمان رهایی از تنش تعیین می‌شود.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} \quad (21-2)$$

در جدول 2-2 مقادیر زمان رهایی از تنش دو ماده ویسکوالاستیک PWG1 و PWG2 آورده شده

است.

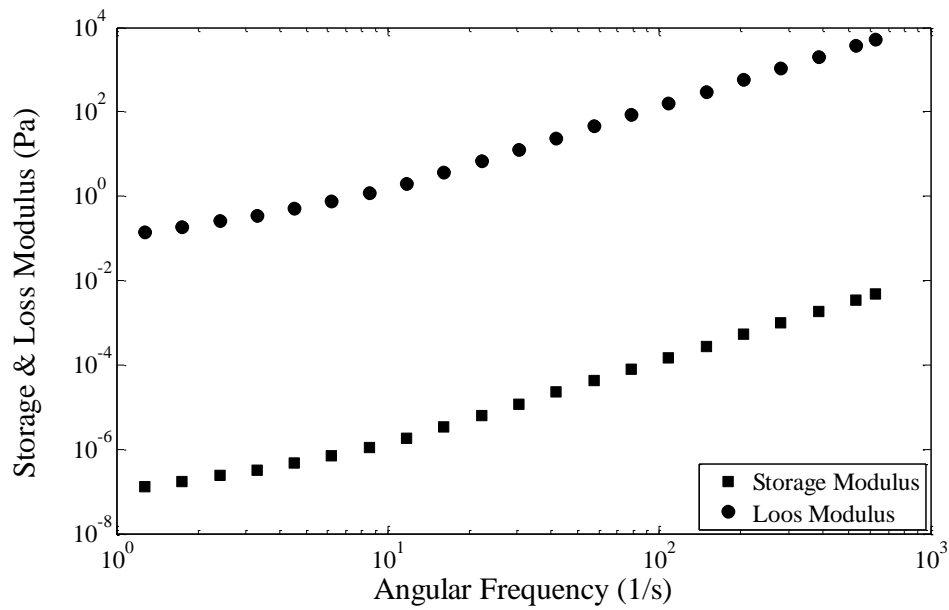
جدول 2-2. طیف رهایی از تنش و لزجت

PWG2		PWG1	
$\lambda_i$ (s)	$\eta_i$ (cP)	$\lambda_i$ (s)	$\eta_i$ (cP)
7/59	0/0019	0/12	0/0017
7/97	0/0065	0/94	0/0019
9/30	0/0097	3/54	0/0216
10/63	0/0156	7/53	1
10/94	0/0169	10/60	1/0026
10/97	0/0262	10/75	1/0065
12/57	1/005	11/82	1/0073
-	-	15/44	2/0048

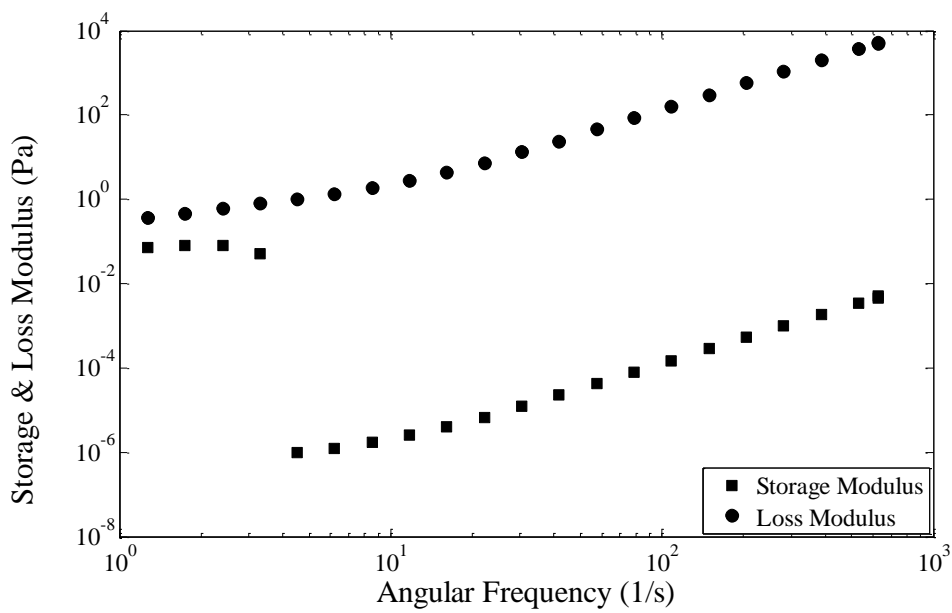
نتایج زمان رهایی از تنش دو ماده ویسکوالاستیک PWG1 و PWG2 به ترتیب برابر ۱۱/۸۹ و

۱۲/۴۱ ثانیه است. تست‌های نوسان تحقیق حاضر در پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ و پوشش تهران

حاصل شده است.



شکل ۲-۱۵. رفتار مدول‌های  $G'$ ,  $G''$  برای سیال PWG1



شکل ۲-۱۶. رفتار مدول‌های  $G'$ ,  $G''$  برای سیال PWG2

## ۸-۲-۲- ستاپ<sup>۱</sup> آزمایش

برای انجام آزمایشات در نفت از یک سلول پلکسی گلاس<sup>۲</sup> با ابعاد ۱۵ × ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۵۰ سانتیمتر استفاده شده است. بوسیله یک لوله که یک سر آن به سرنگی که در پمپ سرنگی تعبیه شده است و سر دیگر آن به سوزن متصل شده است قطرات به داخل سلول تزریق می‌شوند. برای جلوگیری از اثرات دیواره بر روی حرکت قطرات، سوزن در مرکز سلول قرار داده شده است. با استفاده از پمپ سرنگی سیال به داخل سوزن تزریق می‌شود. زمانی که سیال داخل سوزن تزریق شود پمپ خاموش می‌شود و اجازه داده می‌شود که قطره بر اثر وزن و بدون سرعت اولیه داخل نفت به حرکت درآید. در این آزمایشات از دو سوزن با اندازه‌های مختلف جهت بررسی اثرات قطر بر تغییر شکل قطرات استفاده شده است که در شکل ۲-۱۷ مشاهده می‌شود. نکته بسیار مهم در این آزمایشات این است که سر سوزن‌ها باید در داخل نفت قرار داشته باشند زیرا در صورتی که قطره ابتدا در هوای محیط رها و سپس وارد سلول شود تغییر فاز موجب ایجاد تغییر شکل اولیه در قطره می‌گردد. از سوی دیگر، رها سازی قطره در هوای محیط به دلیل اختلاف چگالی زیاد بین فاز قطره و هوا باعث سرعت گرفتن قطره شده و با فرورفتن در نفت مساله تبدیل به سقوط قطره با سرعت و شکل اولیه می‌گردد. همچنین از نکات مهم دیگر در تولید قطرات این است که، سر سوزن‌هایی که برای تشکیل قطرات استفاده شده‌اند باید کاملاً صاف باشد چرا که در صورت زاویه‌دار بودن سر سوزن قطره تولیدی کاملاً متقارن نخواهد شد، بنابراین بر حرکت و تغییر شکل قطره تاثیر نامطلوب می‌گذارد و قطره تولیدی متقارن نخواهد شد. برای ثبت تصاویر با کیفیت بالا از دو پروژکتور هر کدام با توان ۱۰۰۰ وات بهره گرفته شده است. برای انتخاب مایعات مورد استفاده آزمایشاتی که درون نفت صورت می‌گیرد توجه به غیر قابل حل بودن آنها ضروری است، چرا که یکی از فرض‌های بنیادین در بررسی قطرات ثبات جرم آنها است. همچنین برای واضح شدن مرز میان قطرات و نفت به هر ۱۰۰ میلی لیتر سیال فاز قطره دو قطره رنگ خوراکی

---

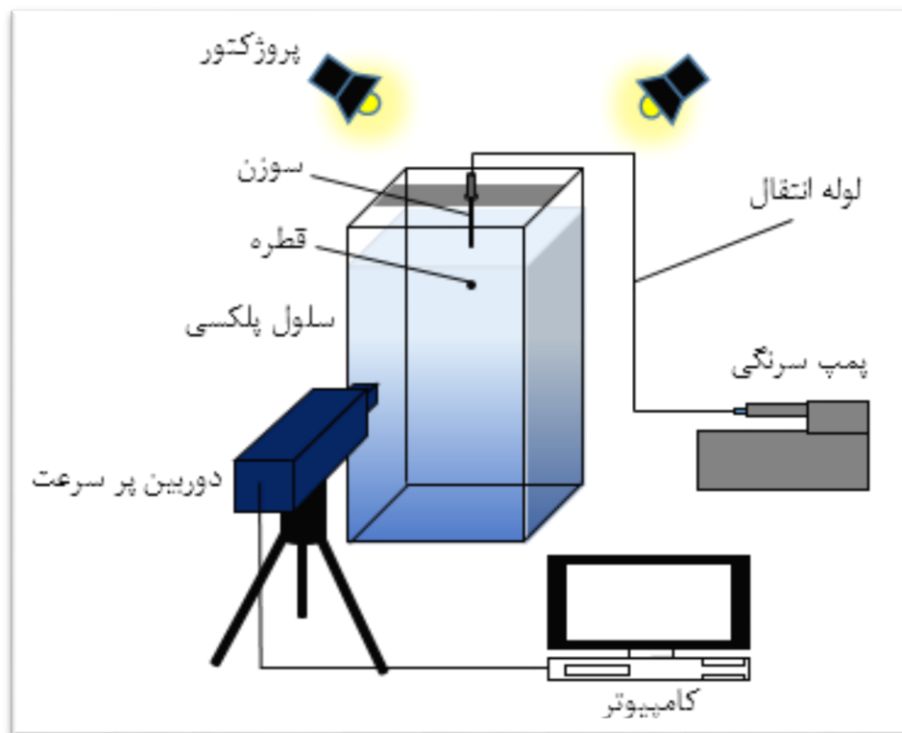
<sup>1</sup> Setup

<sup>2</sup> Plexiglas

اضافه شده است که بر خواص سیال اثر چندانی نداشته است. در شکل ۲-۱۸ ستاپ آزمایش مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۷. الف) سوزن ۱۴ با قطر داخلی ۱/۸ میلی‌متر ب) سوزن ۱۶ با قطر داخلی ۱/۰۷ میلی‌متر



شکل ۲-۱۸. ستاپ آزمایش در تحقیق حاضر

## فصل سوم

### تحليل نتايج آزمائشگاهي

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل به بحث و بررسی بر روی نتایج آزمایشات انجام گرفته بر روی قطرات پرداخته شده است. به دلیل تفاوت‌های قابل توجهی که در خواص نفت و هوا وجود دارد و نیز بدلیل آنکه فرایندهای صنعتی و بیولوژیکی زیادی در بستر این دو سیال اتفاق می‌افتد، بحث‌ها و نتایج در این فصل به دو قسمت اصلی تقسیم شده‌اند: مطالعات ابتدا در هوا و سپس در نفت. در هر قسمت ۵ موضوع مورد بحث قرار می‌گیرد:

(۱) موقعیت، سرعت و شتاب قطرات

(۲) مسیر حرکت قطرات

(۳) حجم قطرات

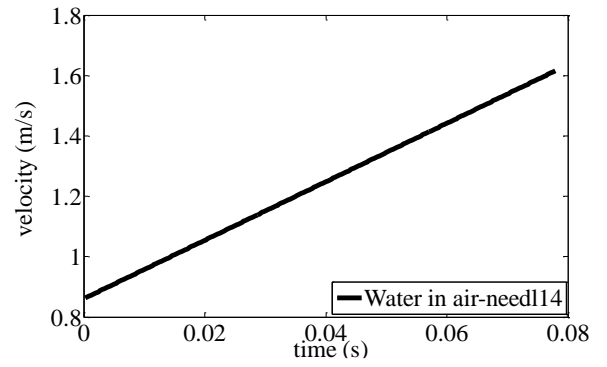
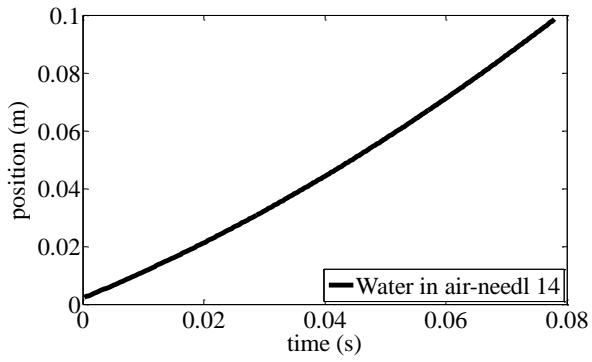
(۴) محاسبه ضریب پسا

(۵) تغییر شکل قطرات

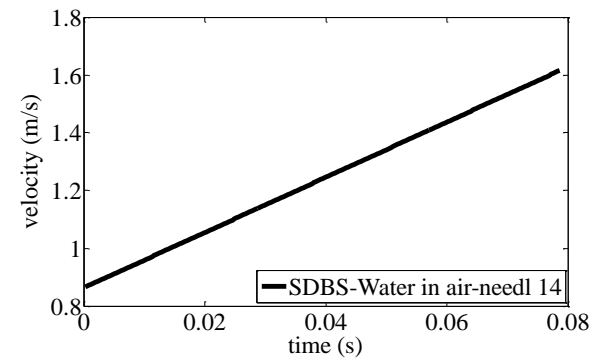
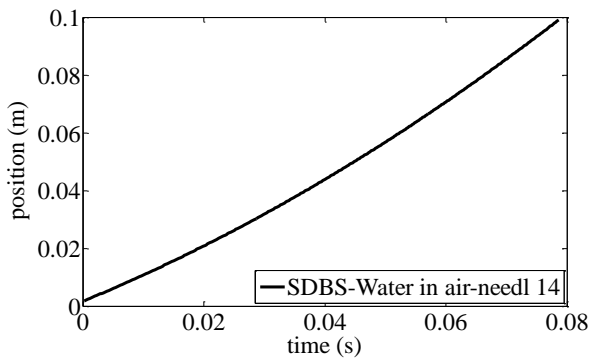
### ۳-۲- سقوط قطره در هوا

#### ۳-۲-۱- موقعیت، سرعت و شتاب قطره

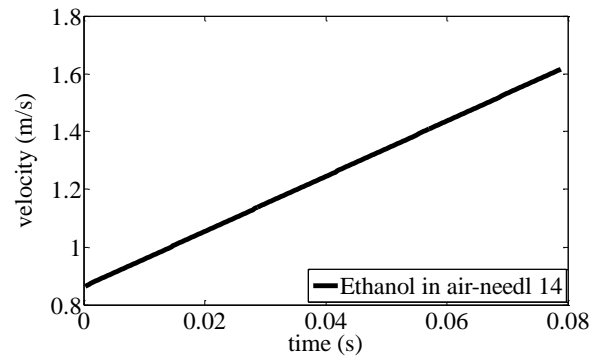
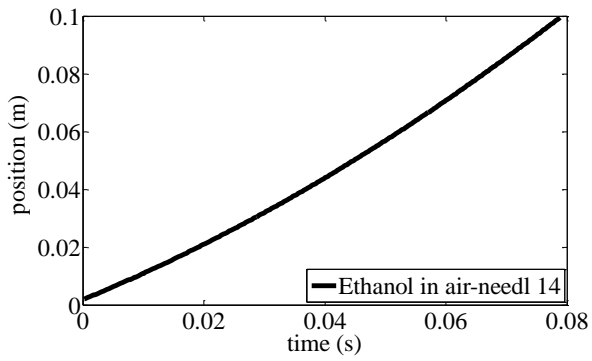
در این بخش سینماتیک حرکت قطرات مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که موقعیت قطره در حین سقوط در هوا بر حسب زمان، تقریباً بصورت سهموی می‌باشد که بدین معنی است قطره با شتاب ثابتی سقوط می‌کند. در شکل ۳-۱ نمودارهای موقعیت و سرعت برای قطره‌های مختلف با سوزن ۱۴ مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از آن است که مقادیر شتاب، از شتاب گرانش کمتر هستند و از ۹/۱۶ تا  $9/69 \text{ m/s}^2$  براساس خواص مایعات تغییر می‌کند. بدین ترتیب کاملاً مشخص است که قطره به سرعت حدی خود نمی‌رسد. همچنین با کاهش قطر سوزن تغییر جزئی در سرعت و شتاب قطره ایجاد می‌گردد. مقادیر شتاب قطرات در جداول ۳-۲ و ۳-۳ گزارش شده است.



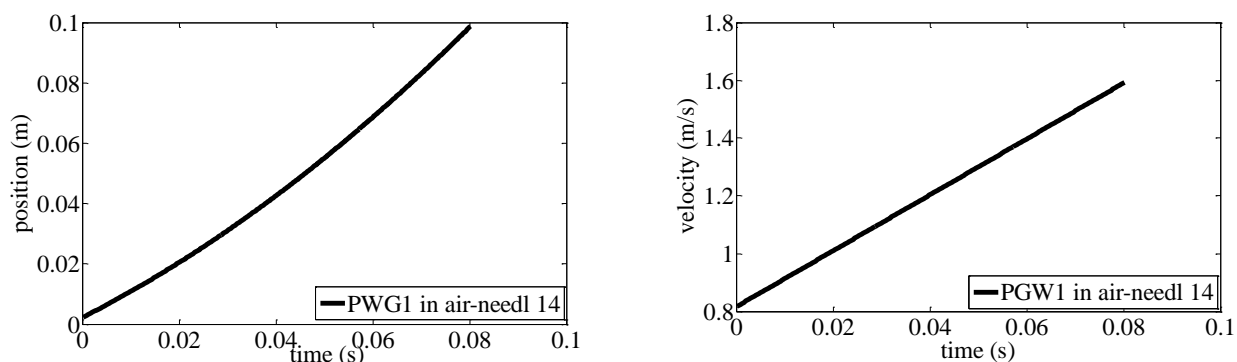
الف) آب



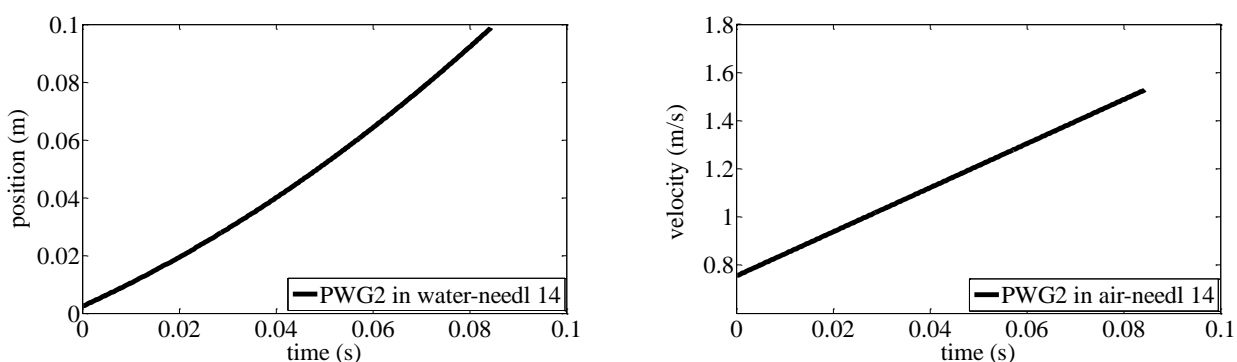
ب) SDBS-Water



### ج) اتانول



### د) PWG1



### ه) PWG2

شکل ۳-۱. نمودارهای موقعیت (سمت چپ) و سرعت (سمت راست) قطره به هنگام سقوط در هوا با سوزن ۱۴

### ۳-۲-۲- حجم قطرات

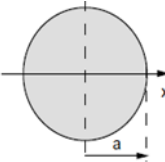
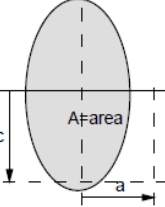
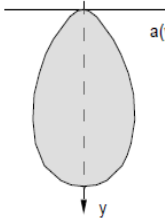
برای محاسبه حجم قطره از تصاویر نیاز به برنامه‌ای برای پردازش آنها می‌باشد. بدین منظور از روشی که توسط هوگلی<sup>۱</sup> [۶۲] برای محاسبه حجم معرفی شده است بعنوان الگوریتم برنامه موردنیاز استفاده می‌شود. مبنای تئوری این روش‌ها در جدول نمایش داده شده‌اند. تمامی این روش‌ها بر پایه این فرض

<sup>1</sup> Hugli



اساسی استوار هستند که شکل قطره در هنگام حرکت، نسبت به محور عمودی کاملاً متقارن است. در جدول ۱-۳ روابط مربوط به این روش‌ها بیان شده است.

جدول ۱-۳. روش‌های محاسبه حجم

حجم قطره	شکل قطره	
$V = \frac{4}{3} \pi a^3$		روش اول
$V = \frac{4\pi}{3} a^2 c$		روش دوم
$V = \pi \int_{y_1}^{y_2} a(y)^2 dy$		روش سوم

همانطور که در جدول ۱-۳ نشان داده شد در روش اول فرض بر آن است که قطره شکلی کاملاً کروی دارد. این فرض در روش دوم به بیضوی بودن تغییر می‌کند، سپس با فرض متقارن بودن شکل، حجم محاسبه می‌شود. فرضیات مورد استفاده در این دو روش فاصله زیادی از شکل حقیقی قطره در حین حرکت دارد. برای اصلاح این فرضیات، روش سوم بر مبنای شکل حقیقی قطره در حین حرکت پایه‌ریزی شده است. در این روش حول محور تقارن قطره، با انتگرال‌گیری از المان‌های کوچک حجم، حجم کلی قطره محاسبه می‌گردد. بصورت تئوری نیز حجم قطره‌ای را که از سوزن جدا می‌شود می‌توان بدست آورد. این کار را می‌توان با نوشتن معادله تعادل بین نیروهای کشش سطحی ( $F_\sigma$ ) و

گرانس انجام داد [۶۳]. در واقع قطره تا جایی که کشش سطحی دیگر نتواند وزن آن را متعادل کند شروع به بزرگ شدن می کند. بصورت ریاضی داریم:

$$\left. \begin{array}{l} F_{\Gamma} \cos \theta = \Gamma \pi D_n \cos \theta \\ mg = \rho V g \end{array} \right\} \rightarrow \Gamma \pi D_n \cos \theta = \rho V g \quad (1-3)$$

در رابطه (۱-۳)،  $\Gamma$  کشش سطحی،  $D_n$  قطر سوزن،  $m$  و  $V$  جرم و حجم قطره هستند. چون چگالی هوا بسیار کمتر از مایعات مورد استفاده است، بنابراین از اثر نیروی شناوری صرف نظر شده است. با رشد قطره زاویه  $\theta$  به سمت صفر شدن شروع به کاهش می کند که منجر به افزایش مقدار  $\cos(\theta)$  می شود. بنابراین، در زمان جدایش زاویه  $\theta$  برابر صفر خواهد بود. از این رو بیشترین حجم قطره در هنگام جدایش، از رابطه (۲-۳) قابل حصول است:

$$V_{max} = \frac{\Gamma \pi D_n}{\rho g} \quad (2-3)$$

همچنین می توان حجم قطره را براساس قطر آن ( $D_d$ ) نوشت:

$$V = \frac{\pi D_d^3}{6} \quad (3-3)$$

با تقسیم دو رابطه اخیر عبارت بدون بعد زیر حاصل می شود:

$$\frac{D_d}{D_n} = \left( \frac{6}{Bo} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.82 Bo^{-\frac{1}{3}} = N_d \cdot Bo^{-\frac{1}{3}} \quad (4-3)$$

که در آن  $Bo = \frac{D_n^2 \rho g}{\Gamma}$  عدد باند است.

$$N_d = \frac{D_d}{D_n} Bo^{\frac{1}{3}} \quad (5-3)$$

مقدار تئوری  $N_d$  برابر با ۱/۸۱۷ است. بمنظور مقایسه حجم های تئوری و آزمایشگاهی، مقدار  $N_d$

از داده‌های آزمایشگاهی محاسبه و با مقادیر تئوری مورد مقایسه قرار گرفته است. جداول ۲-۳ و ۳-۳ نتایج حاصل از این بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳. مقادیر آزمایشگاهی برای حجم قطره و میزان انحراف از تئوری ارائه شده برای حرکت قطرات در هوا با سوزن ۱۶

PWG2	PWG1	اتانول	SDBS-Water	آب		
۱۳/۶۰	۱۲/۹۴	۸/۱۰	۶/۵۹	۱۸/۴۰	حجم قطره (mm <sup>3</sup> )	
۳/۱۰	۳	۲/۶	۲/۴	۳/۴	قطر قطره (mm)	نتایج حاصل از پردازش تصاویر
۹/۵۳۷	۹/۶۹۱۴	۹/۵۴۹۴	۹/۵۲	۹/۶۷۶۴	شتاب قطره (m/s <sup>2</sup> )	
۰/۲۰۷۵	۰/۲۱۱۰	۰/۳۶۳۷	۰/۵۰۹۵	۰/۱۵۵۶	عدد باند	
۱/۷۱	۱/۶۶۹	۱/۷۳۴	۱/۷۹	۱/۷۰۹	N <sub>d</sub>	محاسبات
۵/۸۸	۸/۱۴	۴/۵۶	۱/۴۸	۵/۹۴	درصد انحراف (%)	

جدول ۳-۳. مقادیر آزمایشگاهی برای حجم قطره و میزان انحراف از تئوری ارائه شده برای حرکت قطرات در هوا با سوزن ۱۴

PWG2	PWG1	اتانول	SDBS-Water	آب		
۲۱/۳۲	۲۰/۶۰	۱۲/۳۹	۹/۹۶	۲۹/۴۹	حجم قطره (mm <sup>3</sup> )	
۳/۶۵	۳/۵	۳/۱	۲/۹	۴/۱	قطر قطره (mm)	نتایج حاصل از پردازش تصاویر
۹/۱۶۰	۹/۶۸۱۴	۹/۵۵۷۴	۹/۵۶۲۶	۹/۶۸۷۲	شتاب قطره (m/s <sup>2</sup> )	
۰/۵۸۷۳	۰/۵۹۷۳	۱/۰۲۹۳	۱/۳۷۹۲	۰/۴۴۰۵	عدد باند	
۱/۶۹	۱/۶۳۷	۱/۷۳۸	۱/۷۹۳	۱/۷۳۳	N <sub>d</sub>	محاسبات
۶/۹	۹/۹	۴/۳۴	۱/۳۲	۴/۶۲	درصد انحراف (%)	

بررسی دقیق جدول‌های ۲-۳ و ۳-۳ تایید می‌کند که در مورد قطرات نیوتنی با کاهش میزان کشش سطحی یا به عبارتی با افزایش عدد باند، مقادیر خطا کاهش می‌یابد. این حقیقت می‌تواند بدین ترتیب توضیح داده شود که قطره‌ای با کشش سطحی بیشتر (آب) در زاویه‌ای بیشتر از صفر درجه از سوزن جدا می‌شود. اما در مورد قطرات ویسکوالاستیک مقدار خطا نسبتاً افزایش پیدا کرده است که

دلیل این امر تشکیل رشته‌های نازک<sup>۱</sup> هنگام جدایش از سوزن بوده و عملاً قطره در زاویه‌ای غیر از صفر درجه جدا می‌شود.

### ۳-۲-۳- محاسبه ضریب پسا

حرکت و سینماتیک قطره با نیروهای متعددی از جمله نیروی پسا توصیف می‌شود. از اینرو یافتن روابطی برای ضریب پسا ضروری است. ابتدا در این قسمت، مدلی تئوری برای بدست آوردن ضریب پسا بصورت تابعی از عدد رینولدز و خواص سیال ارائه شده‌است؛ سپس با پردازش تصاویر، مقادیر آزمایشگاهی ضریب پسا بررسی شده‌است. با نوشتن قانون دوم نیوتن برای قطره در حال سقوط داریم [۶۴]:

$$W_{app} - F_D = m \frac{du}{dt} \quad (۶-۳)$$

$W_{app}$  وزن ظاهری قطره و  $F_D$  نیروی پسای اعمال شده بر آنست.  $m$  و  $\frac{dv}{dt}$  بترتیب جرم و شتاب قطره هستند. معادله (۶-۳) می‌تواند بصورت زیر نیز بیان شود:

$$(\rho_{drop} - \rho_{air})Vg - \frac{1}{2}\rho_{air}Au^2C_D = \rho_{drop}V \frac{du}{dt} \quad (۷-۳)$$

$\rho_{air}$  و  $\rho_{drop}$  بترتیب بیانگر چگالی قطره و هوا،  $A$  سطح مقطع قطره و  $v$  سرعت سقوط قطره است. با بازنویسی رابطه (۷-۳) برحسب  $C_D$  داریم:

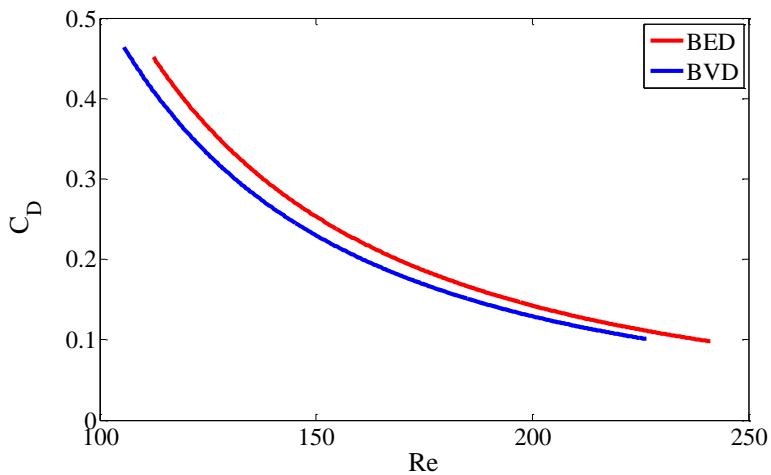
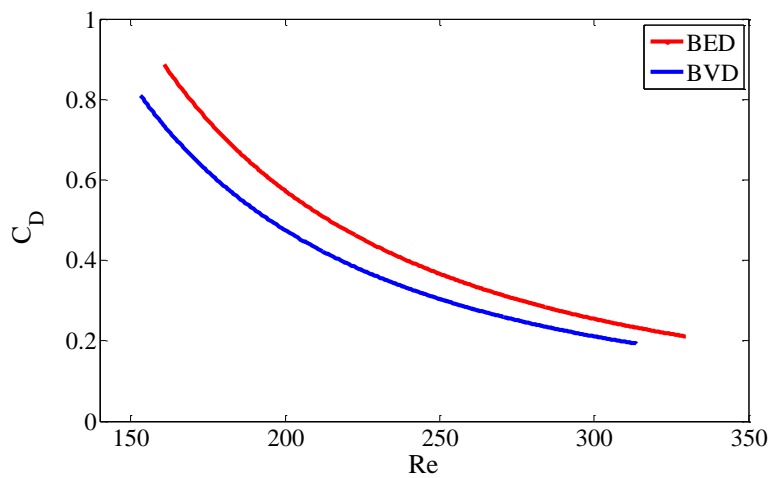
$$C_D = \frac{8}{\pi} \left( \frac{\rho_{air}V}{\mu_{air}^2} \right) \left[ \rho_{drop} \left( g - \frac{du}{dt} \right) - \rho_{air}g \right] 1/Re^2 \quad (۸-۳)$$

که در رابطه (۸-۳)،  $C_D$  تابعی از عدد  $C_D = f(Re)$  رینولدز است. نخست مقادیر ضریب پسا براساس تئوری و با فرض عدم تغییرشکل قطره بدست آورده شده است (بر مبنای قطر معادل<sup>۲</sup>) و سپس با ضریب پسای واقعی که تغییرشکل‌های قطره در حین حرکت لحاظ گردیده است (بر مبنای

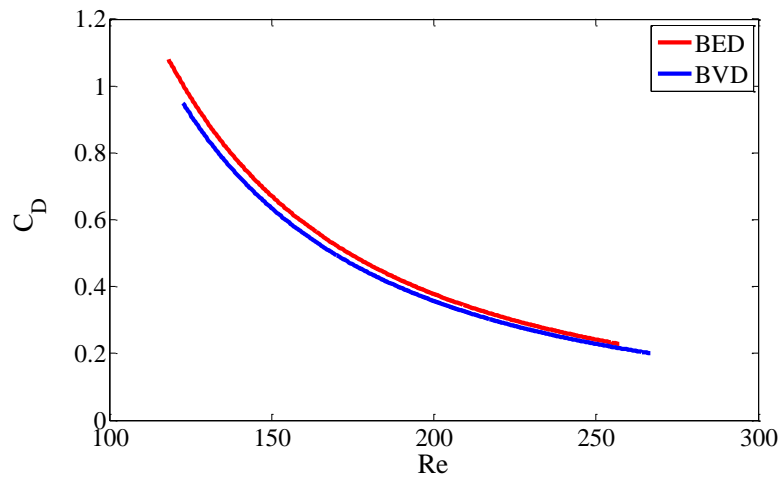
<sup>1</sup> Filaments

<sup>2</sup> Based on Equivalent Diameter (BED)

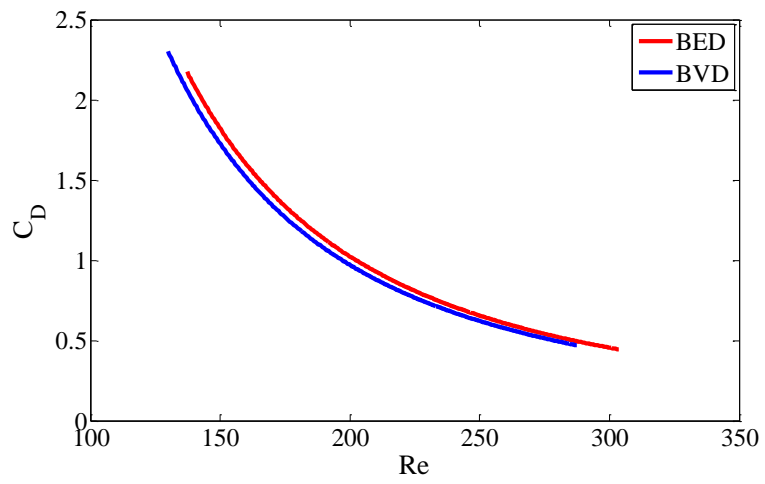
قطر متغیر<sup>۱</sup> مقایسه شده است. ضریب پسا بصورت تابعی  $C_D = a.Re^b$  در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه دو رابطه بدست آمده برای  $C_D$ ؛ برپایه تئوری بیان شده و نتایج آزمایشات، مقادیر ضرائب  $a$  و  $b$  در دو رابطه مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند. شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳ ضریب پسای قطرات را بر حسب عدد رینولدز نشان به ترتیب با سوزن‌های ۱۶ و ۱۴ می‌دهد. همچنین جدول‌های ۳-۴ و ۳-۵ مقادیر این ضرائب را که از آزمایش و تئوری حاصل شده‌اند نشان می‌دهد.



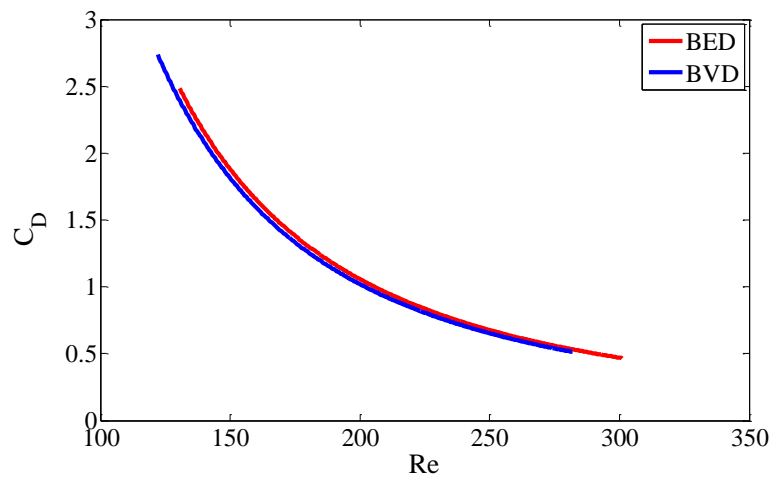
<sup>1</sup> Based on Variable Diameter (BVD)



ج



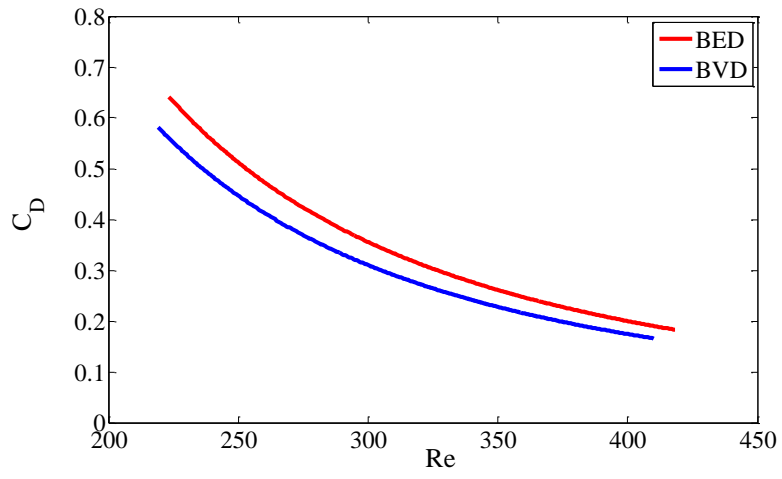
د



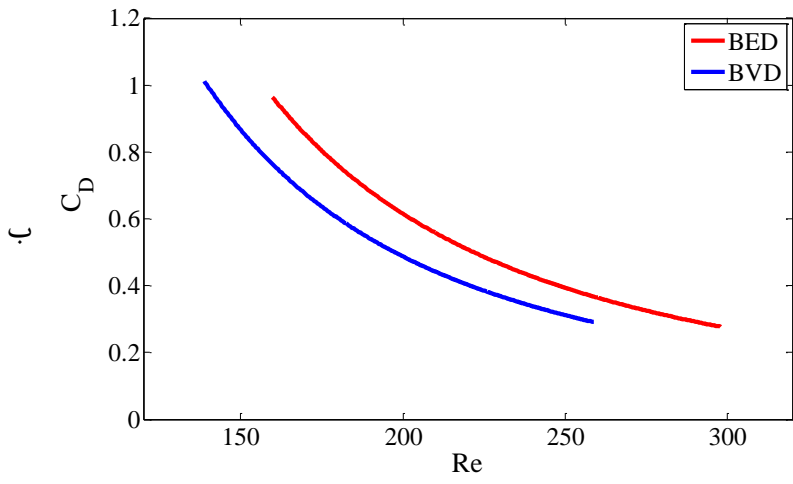
ه

شکل ۳-۲. ضریب پسا برحسب عدد رینولدز برای قطرات باسوزن ۱۶: الف) آب ب) SDBS-Water ج) اتانول

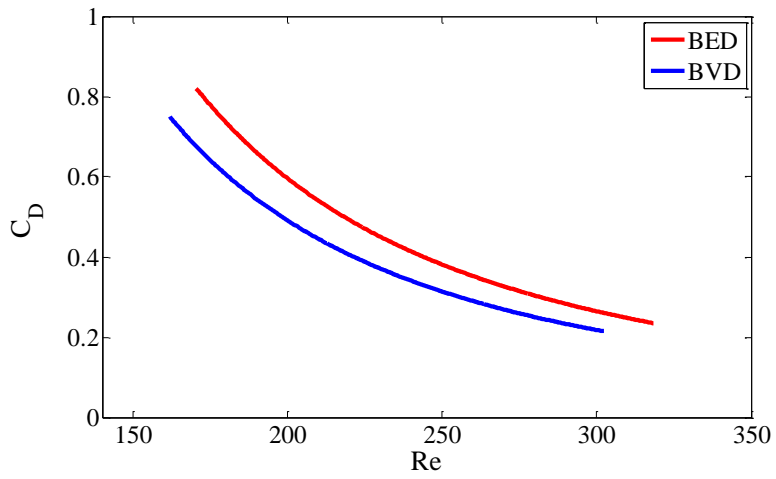
د) PWG1 ه) PWG2



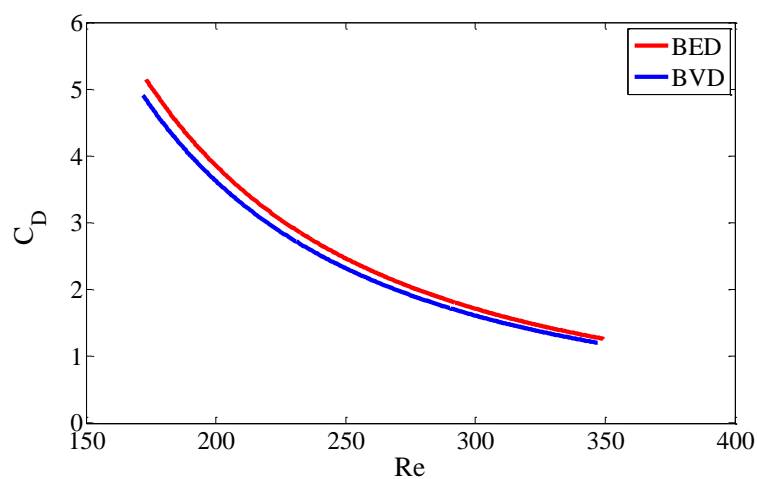
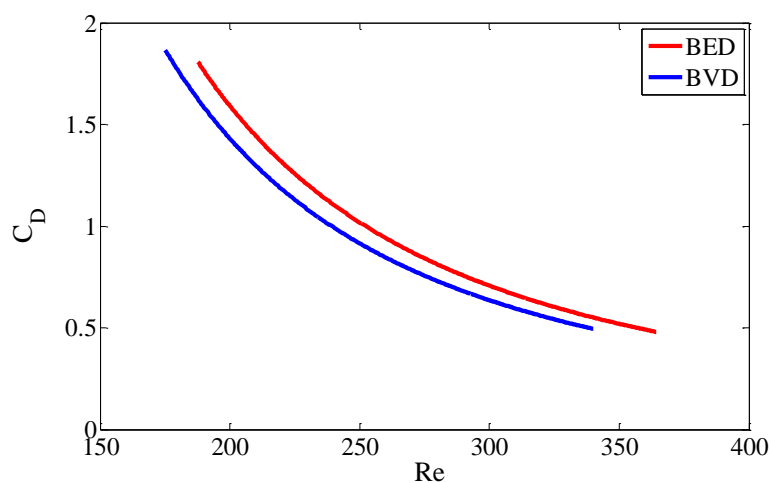
الف



ب



ج



شکل ۳-۳. ضریب پسا برحسب عدد رینولدز برای قطرات باسوزن ۱۴: الف) آب ب) SDBS-Water ج) اتانول  
 د) PWG1 ه) PWG2

جدول ۳-۴. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری ضریب پسا برای سقوط قطرات در هوا با سوزن ۱۶

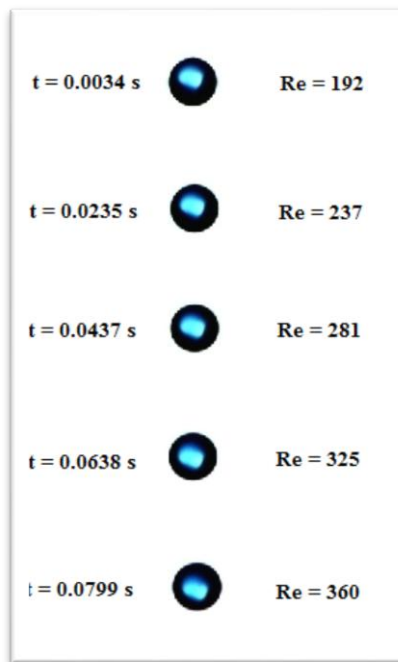
PWG2	PWG1	اتانول	SDBS-Water	آب		
۶۵/۳۷۳	۶۴/۲۷۲	۲۴/۳	۲۲	۷۲	کشش سطحی (dynes/cm)	
۴۲۳۱۰	۴۰۹۶۰	۱۵۱۰۰	۵۶۹۸	۲۲۹۲۰	<i>a</i>	تئوری
-۲	-۲	-۲	-۲	-۲	<i>b</i>	
۴۰۸۰۰	۳۸۸۳۰	۱۴۲۸۰	۵۱۷۰	۱۹۰۰۰	<i>a</i>	آزمایشات
-۲	-۲	-۲	-۲	-۲	<i>b</i>	
۳/۵۶	۵/۲	۵/۴۳	۹/۲۶	۱۷/۱	خطای <i>a</i> (%)	



جدول ۳-۵. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری ضریب پسا برای سقوط قطرات در هوا با سوزن ۱۴

PWG2	PWG1	اتانول	SDBS-Water	آب		
۶۵/۳۷۳	۶۴/۲۷۲	۲۴/۳	۲۲	۷۲	کشش سطحی (dynes/cm)	
۱۵۷۵۰۰	۶۳۶۵۰	۲۳۸۳۰	۲۴۶۰۰	۳۲۰۱۰	<i>a</i>	تئوری
-۲	-۲	-۲	-۲	-۲	<i>b</i>	
۱۴۹۰۰۰	۵۷۲۰۰	۱۹۶۳۰	۱۹۴۹۰	۲۷۹۲۰	<i>a</i>	آزمایشات
-۲	-۲	-۲	-۲	-۲	<i>b</i>	
۵/۳۹	۱۰/۱۳	۱۷/۶۲	۲۰/۷۷	۱۲/۷۷	خطای <i>a</i> (%)	

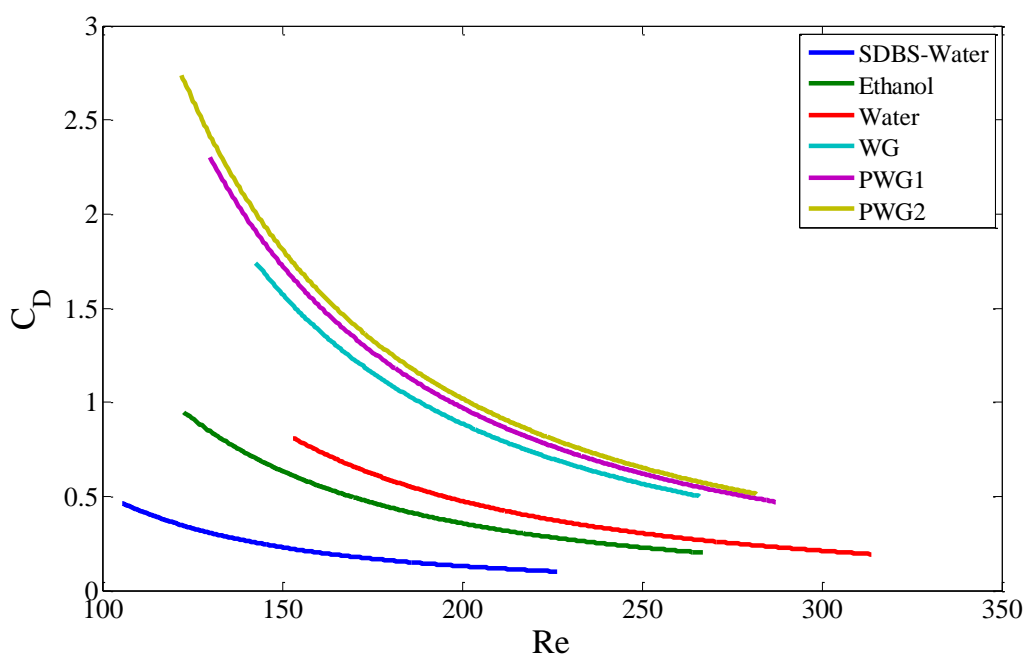
جدول ۳-۵ نشان می‌دهد بیشترین مقدار خطا برای سیالات نیوتنی برابر، ۲۰/۷۷٪ است، در نتیجه ضریب پسای قطره در حال سقوط با پذیرش خطای بیان شده بخوبی می‌تواند از رابطه تئوری محاسبه گردد. این در حالیست که با افزایش قطر قطرات انتظار می‌رود که مقدار خطا افزایش پیدا کند زیرا قطرات کوچکتر تمایل بیشتری برای حفظ کرویت بودن خود دارند و در نتیجه تغییرشکل اهمیت کمتری دارد. اما در مورد دو سیال ویسکوالاستیک (باگر) مقدار خطا نسبتاً کاهش می‌یابد. زیرا قطرات ویسکوالاستیک همانطور که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است کمتر دچار تغییرشکل می‌شوند و در تمام مسیر سقوط تقریباً شکل کروی خود را حفظ می‌کنند. نکته قابل توجه دیگر این است که بالارفتن غلظت پلیمرها در مایعات مورد آزمایش میزان خطا به کمترین مقدار خود یعنی ۳/۵۶ درصد که مربوط به قطره PWG2 با خاصیت الاستیک بیشتر است، می‌رسد.



شکل ۳-۴. نوسانات قطره PWG1 در حال سقوط در هوا

### ۳-۲-۳-۱- بررسی اثر نسبت ویسکوزیته و خاصیت الاستیک بر روی ضریب پسا

همانطور که در شکل ۳-۵ دیده می‌شود با افزایش نسبت ویسکوزیته مقادیر ضریب پسا افزایش می‌یابد. همچنین به‌منظور تاثیر خاصیت الاستیک بر روی ضریب پسا، محلولی از آب و گلیسرین (WG) با نسبت ویسکوزیته تقریباً یکسان با قطره PWG2 مورد بررسی قرار گرفته است که از شکل ۳-۵ دیده می‌شود خواص الاستیک باعث افزایش ضریب پسا شده است. همچنین تاثیر کشش سطحی نیز با مقایسه دو قطره آب و SDBS-Water که نسبت ویسکوزیته آنها برابر است نیز بررسی شده است نتایج حاکی از آن است که با کاهش کشش سطحی، ضریب پسا نیز کاهش می‌یابد. مقادیر مربوط به نسبت ویسکوزیته، عدد الاستیک و عدد باند قطرات شکل ۳-۵ در جدول آورده شده است.



شکل ۳-۵. ضریب پسا برحسب عدد رینولدز به ازای نسبت ویسکوزیته‌های مختلف

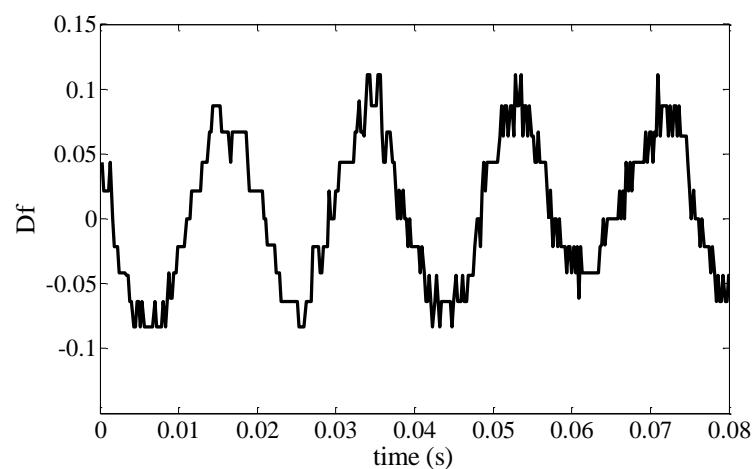
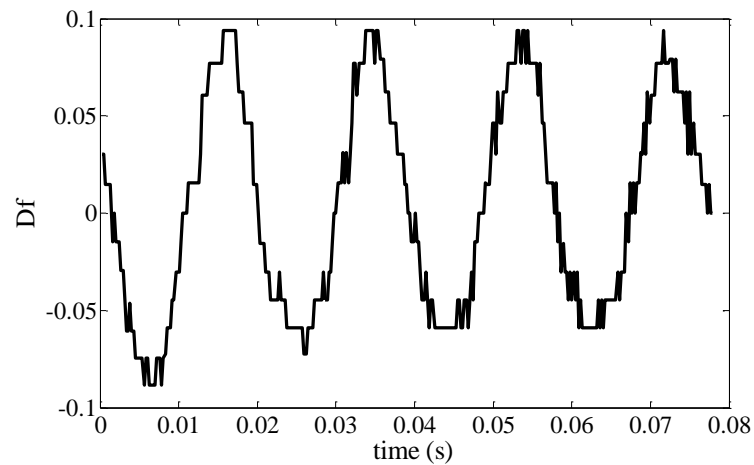
جدول ۳-۶. مقادیر اعداد نسبت ویسکوزیته، الاستیسیته و باند

Bo	En	k	
۰/۱۵۵۶	۰	۵۵	آب
۰/۵۰۹۵	۰	۵۵	SDBS-Water
۰/۳۶۳۷	۰	۷۲	اتانول
۰/۲۱۵۳	۰	۷۹۰۵	WG
۰/۲۱۱۰	۱۹/۸۳	۶۶۴۴	PWG1
۰/۲۰۷۵	۲۰/۲۲	۷۹۰۵	PWG2

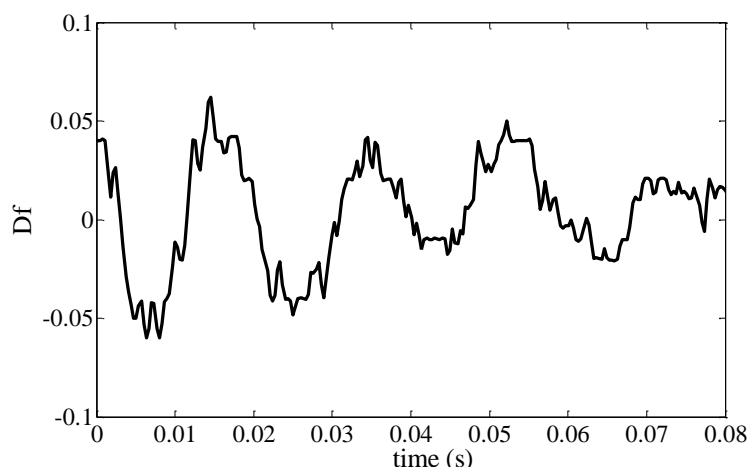
### ۳-۲-۴- تغییر شکل قطرات

برای بررسی تغییر شکل قطرات از پارامتر تغییر شکل که نخستین بار توسط آقای تیلور تعریف شد، استفاده شده است. در طی سقوط قطرات نیوتنی، قطر قطرات بصورت تناوبی در هر دو جهت افقی و عمودی تغییر می‌کند. دلیل فیزیکی این نوسانات ناشی از وجود نیروهای پریودیک به دلیل جدایش گردابه‌ها و همچنین برهم‌کنش میان نیروهای کشش سطحی و فشار هیدرودینامیکی و وجود جریان‌های

چرخشی درون قطره است که منجر به ناپایداری در سطح قطرات می‌گردد و در پی آن قطرات بصورت تناوبی نوسان می‌کنند [۶۵]. نتایج تحقیق حاضر از لحاظ کیفی تطابق خوبی با نتایج مطالعه بکر<sup>۱</sup> و همکاران [۶۶] دارد. شکل‌های ۳-۶ و ۳-۷ تغییرشکل قطرات آب، SDBS-Water و اتانول را در حین سقوط نشان می‌دهد.

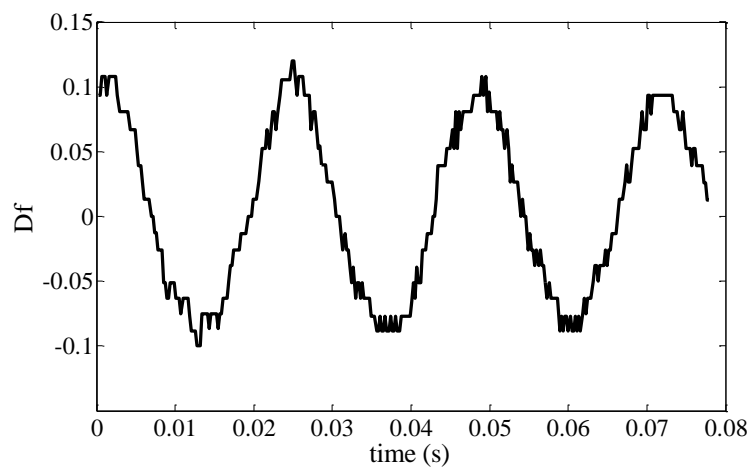


<sup>1</sup> Becker

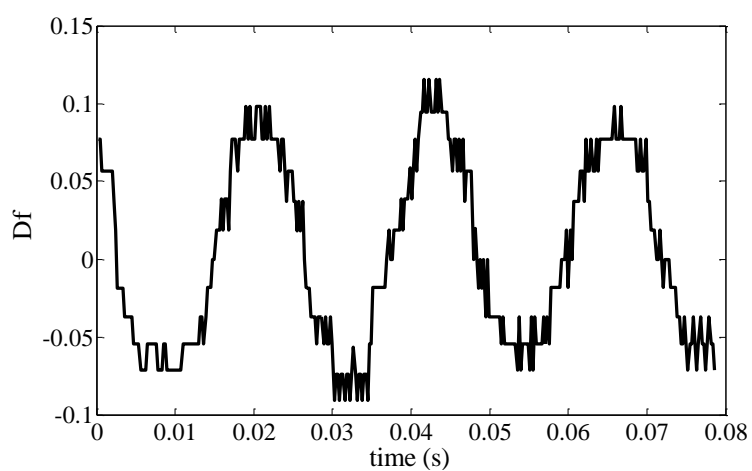


ج

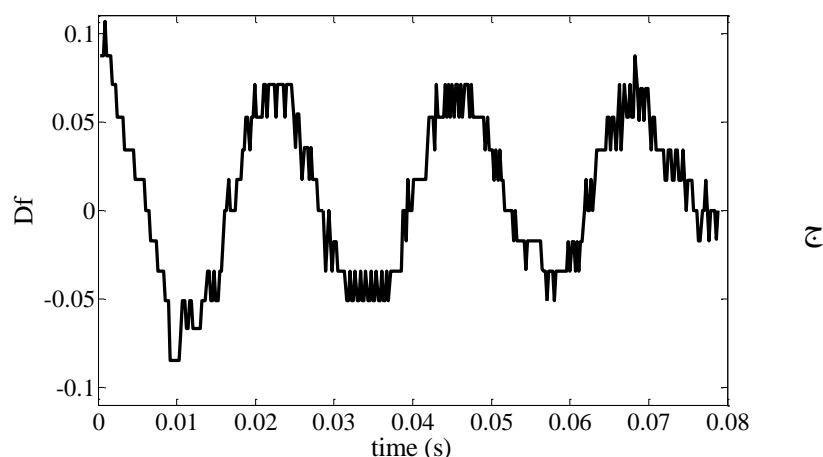
شکل ۳-۶. تغییر شکل قطرات در حال سقوط در هوا با سوزن ۱۶ الف) آب ب) SDBS-Water ج) اتانول



الف



ب



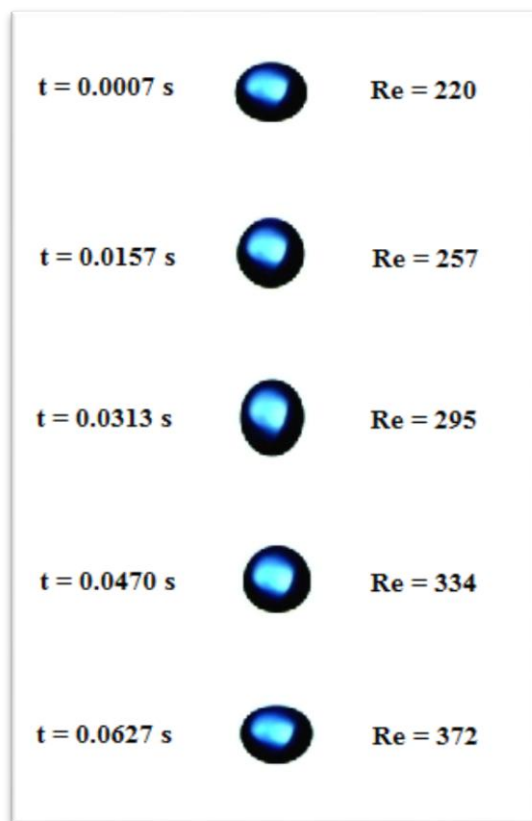
شکل ۳-۷. تغییر شکل قطرات در حال سقوط در هوا با سوزن ۱۴ (الف آب ب) SDBS-Water (ج) اتانول

جهت تمرکز بیشتر روی نوسانات تغییر شکل قطره می‌توان یک عدد استروهال برای آن تعریف نمود که در فصل اول بیان شد. در جدول ۳-۶ اعداد استروهال برای دو قطر مختلف سوزن و سه ماده متفاوت بیان شده است.

جدول ۳-۷. مقادیر فرکانس و عدد استروهال

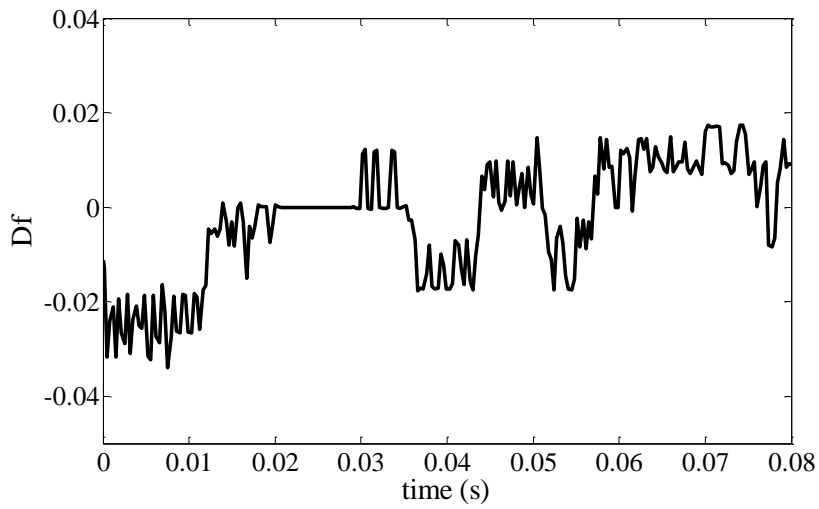
اتانول	SDBS-Water	آب		
۵۳/۳۳	۵۳/۱۹	۵۲/۳۵	مقادیر $f(1/s)$	
۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱۸	عدد استروهال $St$	سوزن ۱۶
۴۳/۱۰	۴۵/۲۴	۴۱/۶۶	مقادیر $f(1/s)$	
۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۴	عدد استروهال $St$	سوزن ۱۴

از بررسی جدول ۳-۶ می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش کشش سطحی سیالات، عدد استروهال افزایش و همچنین با افزایش قطر قطرات (افزایش قطر سوزن)، مقدار عدد استروهال کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۳-۸ تصویری از نوسانات قطره آب نمایش داده شده است.

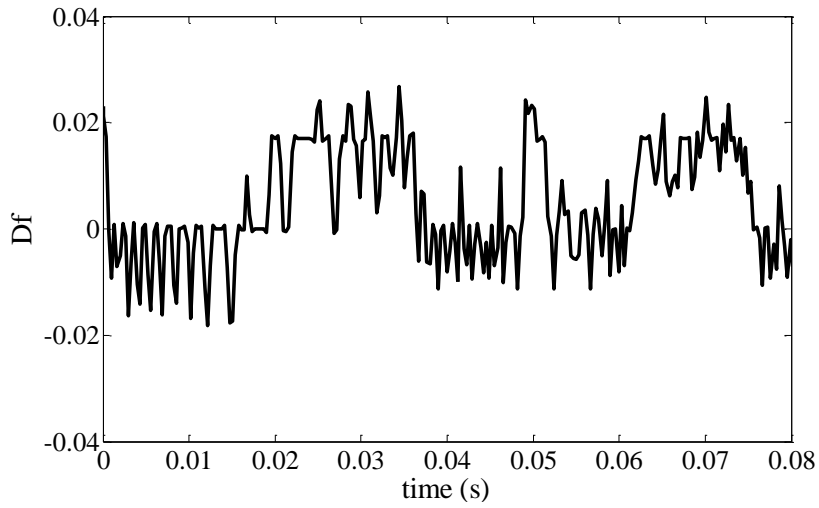


شکل ۳-۸. نوسانات قطره آب در حال سقوط در هوا

اما در مورد دامنه نوسانات قطرات ویسکوالاستیک که در شکل‌های ۳-۹ و ۳-۱۰ نشان داده شده‌اند می‌توان گفت که با افزودن پلیمرها دامنه نوسانات میرا می‌شود. مقایسه بین شکل‌های الف و ب (۳-۹)، نشان می‌دهد که غلظت‌های بالاتر پلیمرها موجب نوسانات کمتر قطره در حین حرکت می‌شود. بعلاوه بنظر می‌رسد افزودن پلیمرها موجب بی‌نظمی‌هایی در رفتار قطرات می‌شود. از سوی دیگر محدوده دامنه نوسانات برای قطرات ویسکوالاستیک به طرز قابل توجهی کمتر از قطرات نیوتنی است که این امر ناشی از خاصیت الاستیک این قطرات است. همچنین جریان‌های داخلی قطره در تغییر شکل‌های آن نقش بسزایی دارد. با توجه به غیرنیوتنی بودن مایعات، مولفه‌های تنش جدید افزوده شده که پیش‌تر صفر بودند باعث می‌گردد تا قطرات نوسانات منظم خود را از دست دهند. بعبارت دیگر الگوهای تناوبی مانند آنچه در مورد قطرات نیوتنی دیده شد، مشاهده نمی‌شود.

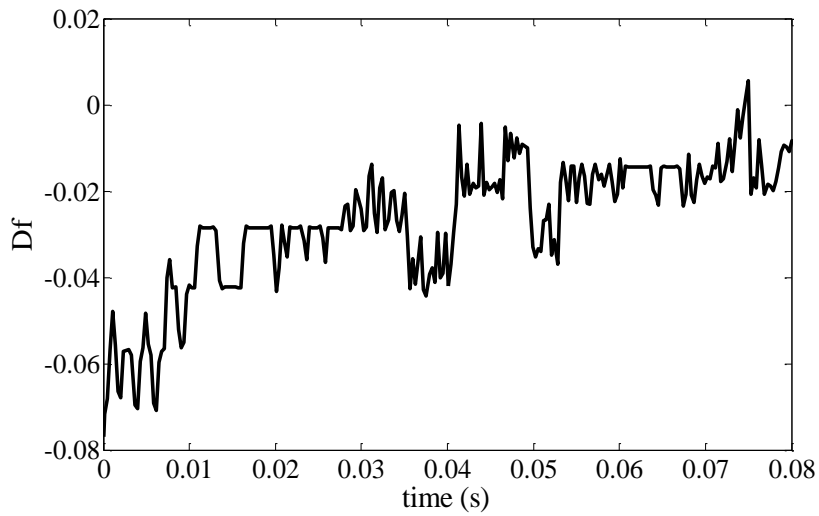


الف



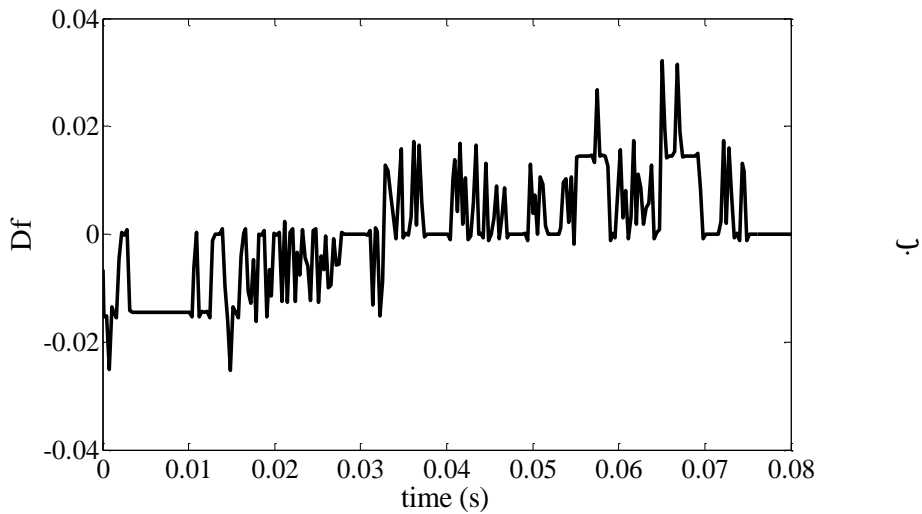
ب

شکل ۳-۹. تغییر شکل قطرات ویسکوالاستیک در هوا با سوزن ۱۶ الف) PWG1 ب) PWG2



الف



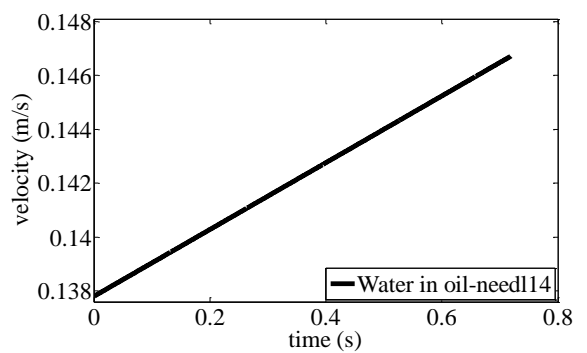
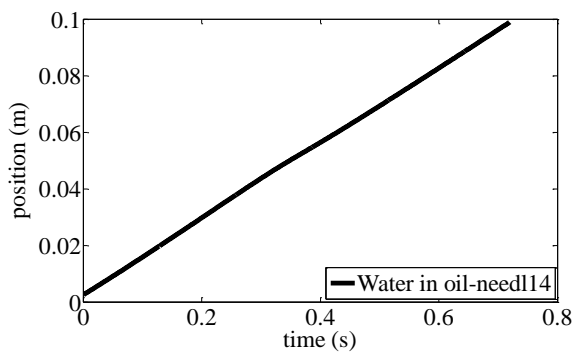


شکل ۳-۱۰. تغییر شکل قطرات ویسکوالاستیک در هوا با سوزن ۱۶ (الف) PWG1 (ب) PWG2

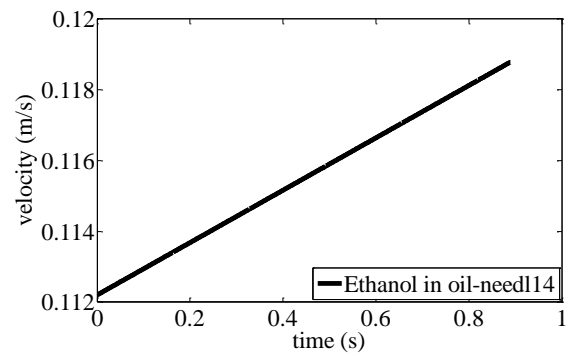
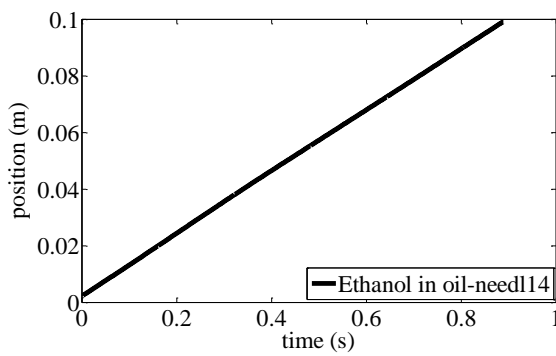
### ۳-۳- سقوط قطرات در نفت

#### ۳-۳-۱- موقعیت، سرعت و شتاب قطره

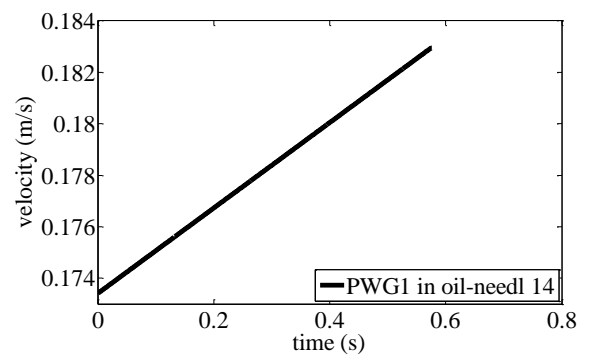
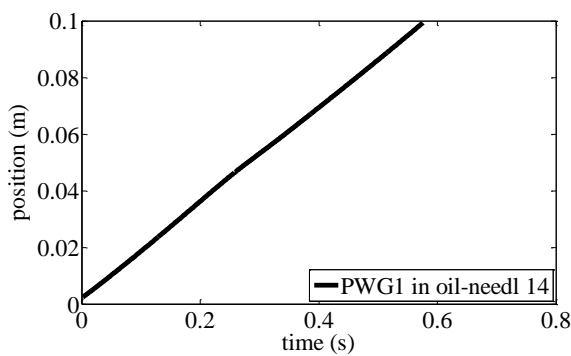
سینماتیک سقوط قطرات در نفت با سقوط آنها در هوا یک تفاوت اساسی دارد و آن این است که تغییرات سرعت قطرات بسیار کم است و در پی آن شتاب قطرات بسیار کم می‌باشد. در شکل ۳-۱۱ نمودارهای موقعیت و سرعت برای قطره‌های مختلف مشاهده می‌شود. مقادیر مربوط به نسبت ویسکوزیته، عدد الاستیسیته و عدد اتووس سقوط قطرات در نفت، در جدول ۳-۸ آورده شده است.



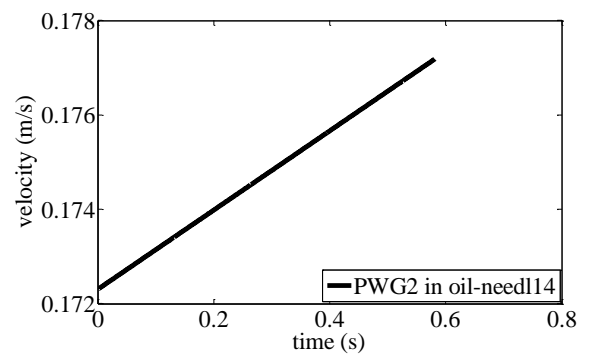
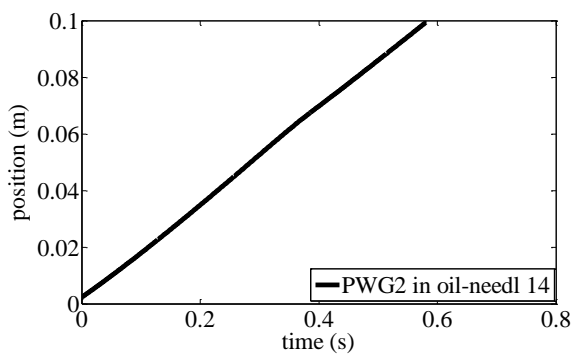
الف) آب



ب) اتانول



ج) PWG1



د) PWG2

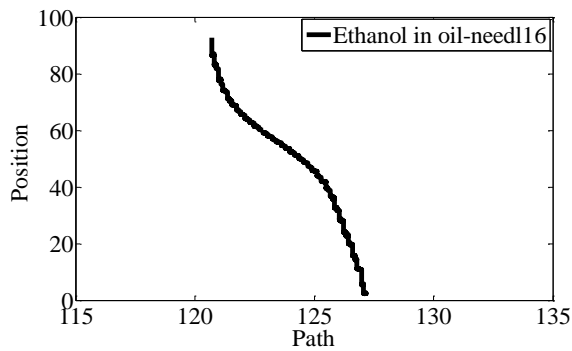
شکل ۳-۱۱. نمودارهای موقعیت (سمت چپ) و سرعت (سمت راست) قطره به هنگام سقوط در نفت با سوزن ۱۴

### ۳-۳-۲- مسیر حرکت قطرات

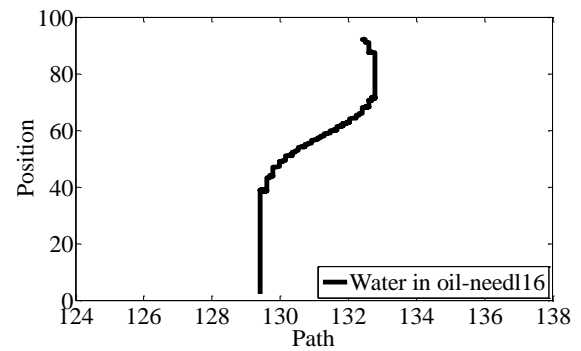
مسیر سقوط قطرات نیز در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که از شکل‌های ۳-۱۲ و

۳-۱۳ مشخص است قطره بصورت نوسانی با تغییرمکان عرضی در حال حرکت است. گردابه‌های کارمن

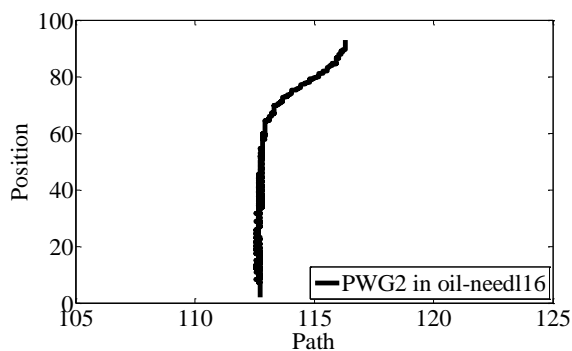
مکانیزم نوسانات حرکت قطره را آشکار می‌سازد. در اعداد رینولدز پایین دو گردابه متقارن، در دو طرف قطره تشکیل می‌شود که در نتیجه آن قطره به شکل مستقیم به حرکت خود ادامه می‌دهد. در حالی که با افزایش رینولدز رشد گردابه‌ها غیر متقارن شده و در اثر این ناپایداری، الگوی متقارن ناحیه جریان پشت قطره دستخوش تغییر می‌شود که در نتیجه آن توزیع فشار حول قطره تغییر می‌کند و گردابه‌ها بصورت متناوب یکی در بالا و دیگری در پایین محور تقارن قطره تشکیل می‌شوند که این پدیده موجب وارد شدن نیروهای متناوب افقی (عمود بر مسیر سقوط قطره) می‌گردد و باعث می‌شود که مسیر سقوط قطره بصورت نوسانی درآید.



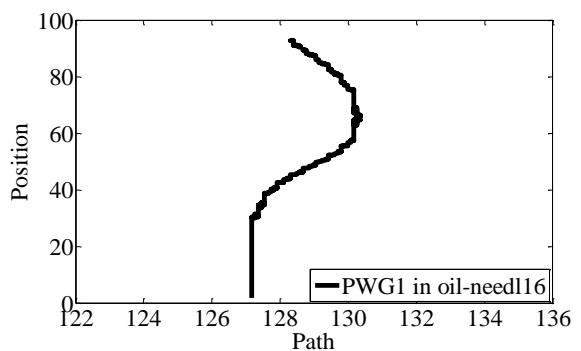
ب) قطره اتانول



الف) قطره آب

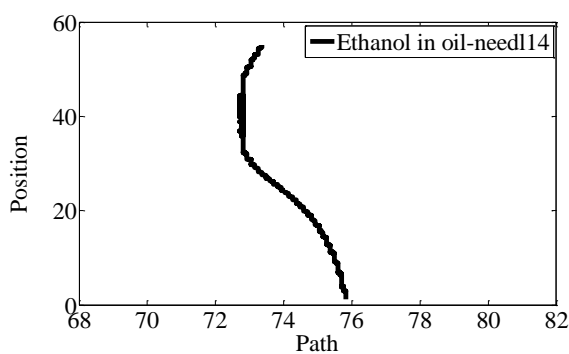


د) قطره PWG2

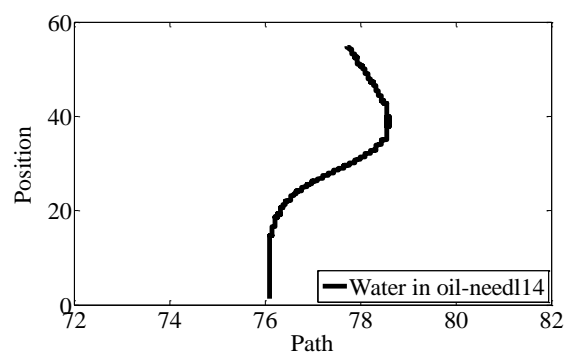


ج) قطره PWG1

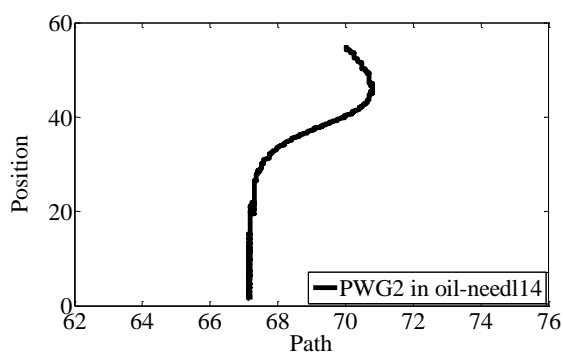
شکل ۳-۱۲. مسیر سقوط قطرات در نفت با سوزن ۱۶



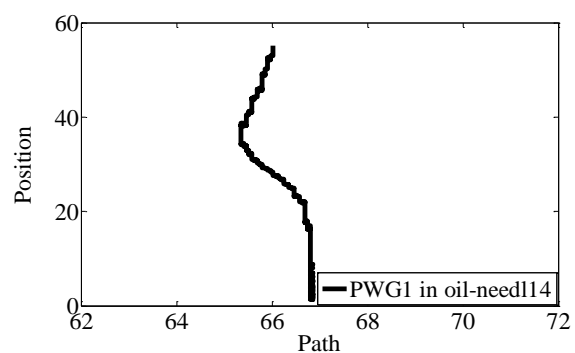
ب) قطره اتانول



الف) قطره آب



د) قطره PWG2



ج) قطره PWG1

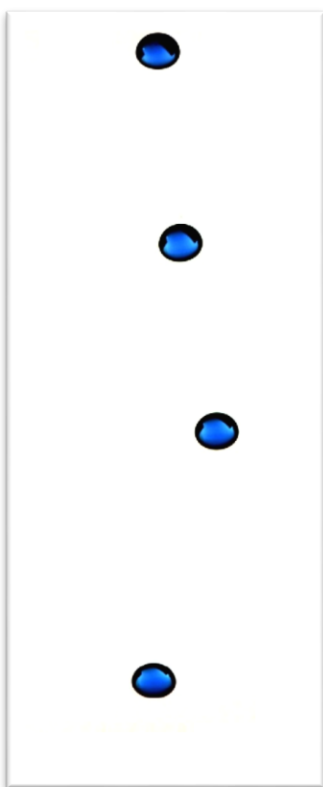
شکل ۳-۱۳. مسیر سقوط قطرات با سوزن ۱۴

جدول ۳-۸. مقادیر اعداد نسبت ویسکوزیته، الاستیسیته و اتووس

Eo	En	k	
۰/۰۶۹۹	۰	۰/۶	آب
۰/۰۰۶۰	۰	۰/۷۹	اتانول
۰/۱۹۲۳	۱۹/۸۳	۷۲/۹	PWG1
۰/۱۸۴۹	۲۰/۲۲	۸۶/۷	PWG2

در شکل ۳-۱۴، تصویری از مسیر حرکت قطره آب در حین سقوط در نفت نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود قطره بصورت نوسانی با تغییر مکان عرضی در حال حرکت است.



شکل ۳-۱۴. مسیر حرکت قطره آب در حال سقوط در نفت

### ۳-۳-۳- حجم قطرات

با روشی مشابه آنچه در بخش ۳-۲-۲ انجام شد، می توان روابطی برای بدست آوردن حجم قطراتی که در نفت سقوط می کنند بدست آورد. در اینجا مقدار نیروی شناوری کوچک نیست و بنابراین نمی توان از آن صرف نظر نمود. بمنظور بررسی نیروی شناوری از وزن ظاهری قطره در محاسبات استفاده می شود. نوشتن نیروهای وارد بر قطره منجر به رابطه زیر می شود:

$$\Gamma \pi D_c \cos \theta = (\rho_{drop} - \rho_{oil}) V g \quad (9-3)$$

که در آن چگالی قطره،  $\rho_{oil}$  چگالی نفت و  $\Gamma$  کشش سطحی بین نفت و قطره است. مجدداً هنگامی که قطره رشد می کند زاویه  $\theta$  به سمت صفر میل می کند و در لحظه جدایش به مقدار صفر می رسد. بیشترین حجم قطره از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V_{max} = \frac{\Gamma \pi D_n}{\Delta \rho g} \quad (10-3)$$

با یک مقایسه ساده بین معادلات می توان نتیجه گرفت که معادلات در اینجا نیز برقرارند؛ بشرطی که  $\rho$  با  $\Delta \rho$  جایگزین گردد. با این کار عدد باند جای خود را به عدد بدون بعد اتووس ( $EO = \frac{\Delta \rho g D_n^2}{\Gamma}$ ) خواهد داد.

$$\frac{D_d}{D_n} = \left( \frac{6}{EO} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.82 EO^{-\frac{1}{3}} = N_d \cdot EO^{-\frac{1}{3}} \quad (11-3)$$

$$N_d = \frac{D_d}{D_n} EO^{\frac{1}{3}} \quad (12-3)$$

مقدار تئوری  $N_d$  معادل ۱/۸۱۷ است. نتایج در جداول ۷-۳ و ۸-۳ نشان داده شده است.

جدول ۹-۳. مقادیر آزمایشگاهی برای حجم قطره و میزان انحراف از تئوری ارائه شده برای حرکت قطرات در نفت با سوزن ۱۶

PWG2	PWG1	اتانول	آب		
۱۰/۲۰	۹/۹۰	۱۵/۵۹	۳۵/۴۱	حجم قطره (mm <sup>3</sup> )	
۳	۲/۹	۳/۳۰	۴/۵	قطر قطره (mm)	نتایج حاصل از پردازش تصاویر
۰/۱۸۴۹	۰/۱۹۲۳	۰/۰۰۶۰	۰/۰۶۹۹	عدد اتووس	
۱/۶۰	۱/۵۶	۰/۵۶۰۴	۱/۷۳۳	$N_d$	محاسبات
۱۱/۹۴	۱۳/۹	۶۹/۱	۴/۶۲	خطا (%)	

جدول ۱۰-۳. مقادیر آزمایشگاهی برای حجم قطره و میزان انحراف از تئوری ارائه شده برای حرکت قطرات در نفت با سوزن ۱۴

PWG2	PWG1	اتانول	آب		
۱۹/۰۹	۱۸/۶۹	۲۷/۵۷	۴۵/۰۸	حجم قطره (mm <sup>3</sup> )	
۳/۸	۳/۷	۴/۱	۵	قطر قطره (mm)	نتایج حاصل از پردازش تصاویر
۰/۵۲۳۲	۰/۵۴۴۱	۰/۰۱۷۰	۰/۱۹۷۹	عدد اتووس	
۱/۷	۱/۶۷۸	۰/۵۸۵	۱/۶۱۹	$N_d$	محاسبات
۶/۴	۷/۶	۶۷/۸	۱۰/۸	خطا (%)	

### ۴-۳-۳- محاسبه ضریب پسا

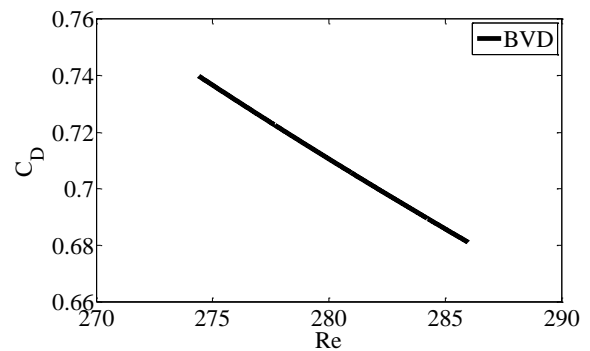
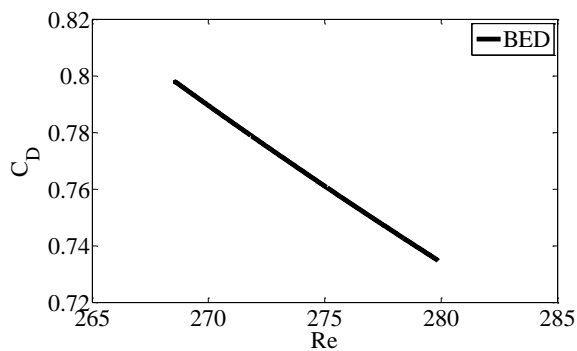
مشابه قسمت قبل و با جایگزینی  $\rho_{air}$  با  $\rho_{oil}$  ، معادلات در مورد سقوط قطرات در نفت نیز صادق هستند.

$$W_{app} - F_D = m \frac{du}{dt} \quad (۱۳-۳)$$

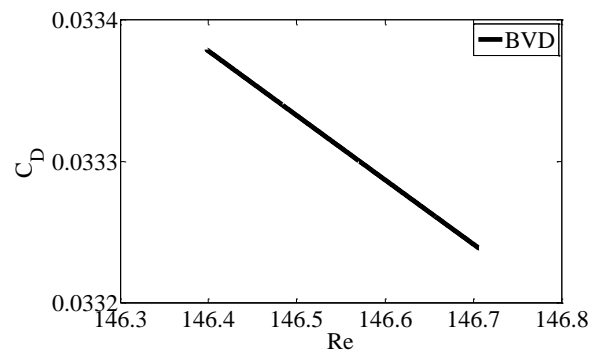
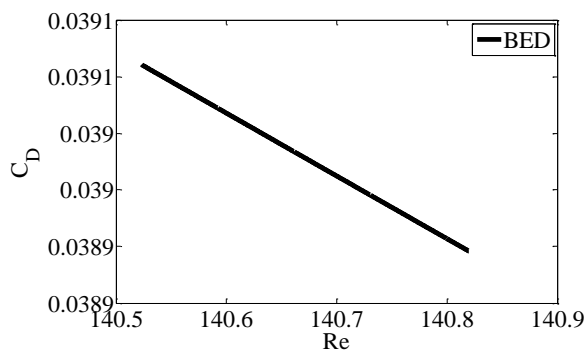
$$(\rho_{drop} - \rho_{oil})Vg - \frac{1}{2}\rho_{oil}Au^2C_D = \rho_{drop}V \frac{du}{dt} \quad (۱۴-۳)$$

$$C_D = \frac{8}{\pi} \left( \frac{\rho_{oil}V}{\mu_{oil}^2} \right) \left[ \rho_{drop} \left( g - \frac{du}{dt} \right) - \rho_{oil}g \right] 1/Re^2 \quad (۱۵-۳)$$

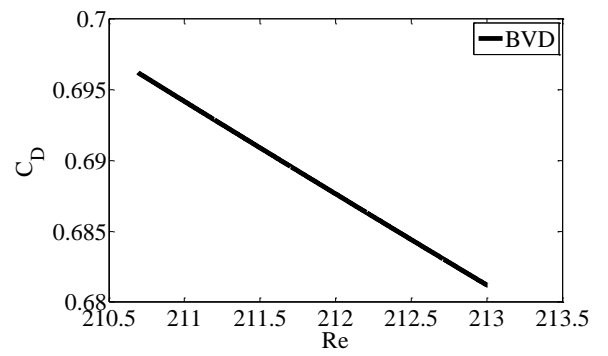
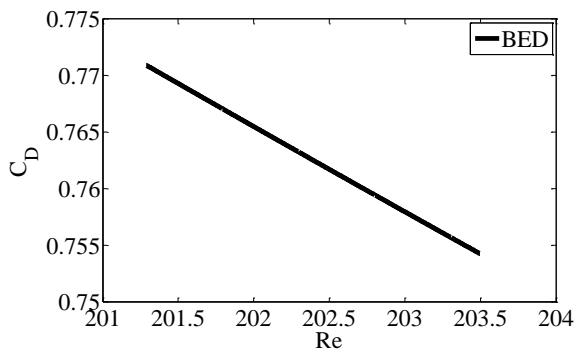
مجدداً در این قسمت نیز مقادیر  $C_D$  بدست آمده از آزمایشات و مقادیر بدست آمده از مدل تئوری باهم مقایسه شده است. شکل‌های ۱۵-۳ و ۱۶-۳ ضریب پسای قطرات را بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد و نتایج در جداول ۹-۳ و ۱۰-۳ نشان داده شده است.



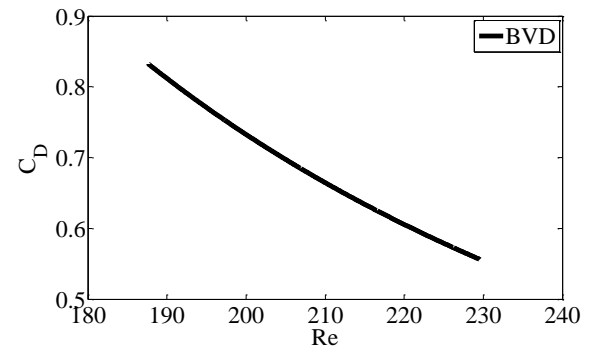
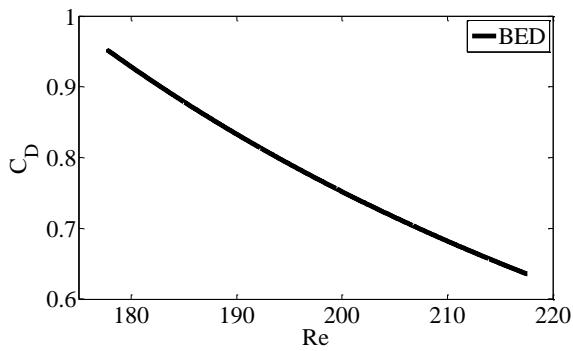
الف) آب



ب) اتانول

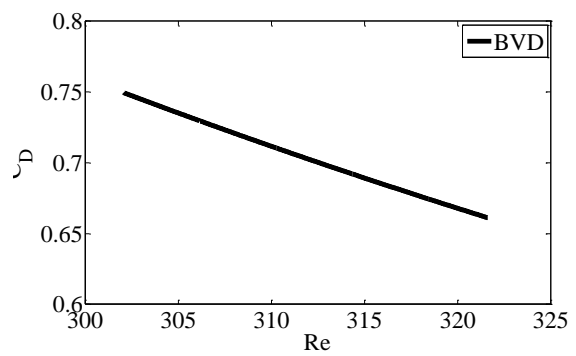
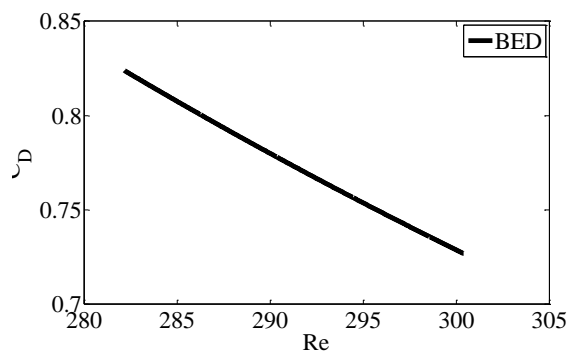


ج) PWG1



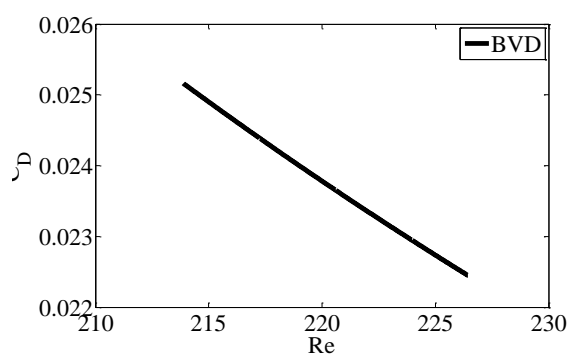
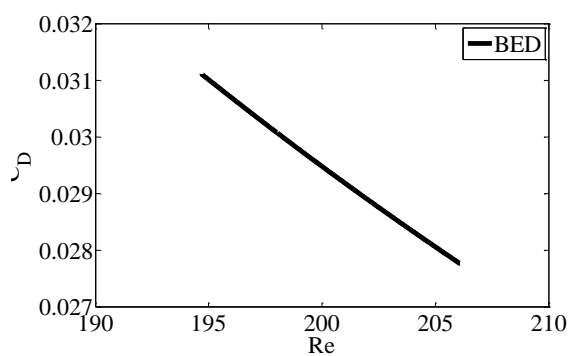
د) PWG2

شکل ۳-۱۵. ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز بر مبنای قطر متغیر (BVD) و قطر معادل (BED) با سوزن ۱۶

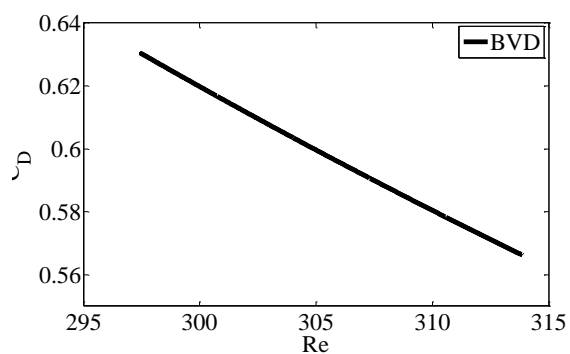
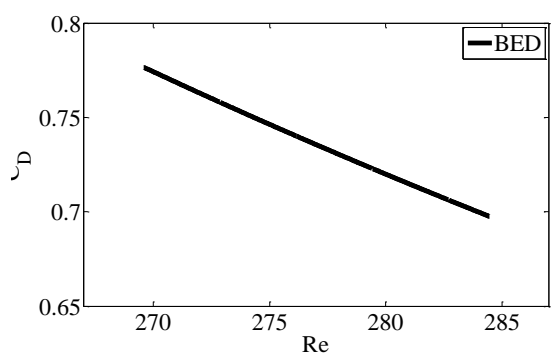


الف) آب

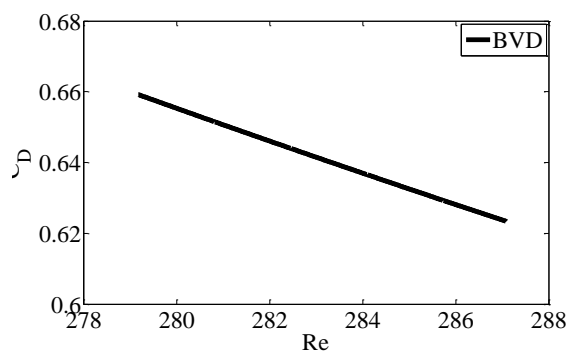
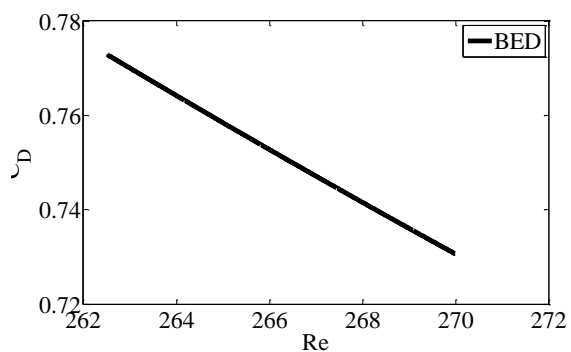




(ب) اتانول



(ج) PWG1



(د) PWG2

شکل ۳-۱۶. ضریب پسا برحسب عدد رینولدز بر مبنای قطر متغیر (BVD) و قطر معادل (BED) با سوزن ۱۴

همانطور که در شکل ۳-۱۵ (ب) مشاهده می‌شود قطره اتانول با سوزن ۱۶ تقریباً به سرعت

حدی خود رسیده و مقدار ضریب پسا تقریباً به عدد ثابت ۰/۰۳۳ رسیده است.

جدول ۱۱-۳. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری ضریب پسا برای سقوط قطرات در نفت با سوزن ۱۶

PWG2	PWG1	اتانول	آب		
۲۶	۲۵	۱۵	۳۵	کشش سطحی ( $dynes/cm$ )	
۲۹۳۲۰	۳۱۲۴۰	۷۷۲/۳	۵۷۵۶۰	<i>a</i>	تئوری
-۲	-۲	-۲	-۲	<i>b</i>	
۳۰۰۸۰	۳۰۹۱۰	۷۱۵/۴	۵۵۷۲۰	<i>a</i>	آزمایشات
-۲	-۲	-۲	-۲	<i>b</i>	
۲/۵۹	۱/۰۵	۷/۳۶	۳/۱۹	خطای <i>a</i> (%)	

جدول ۱۲-۳. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری ضریب پسا برای سقوط قطرات در نفت با سوزن ۱۴

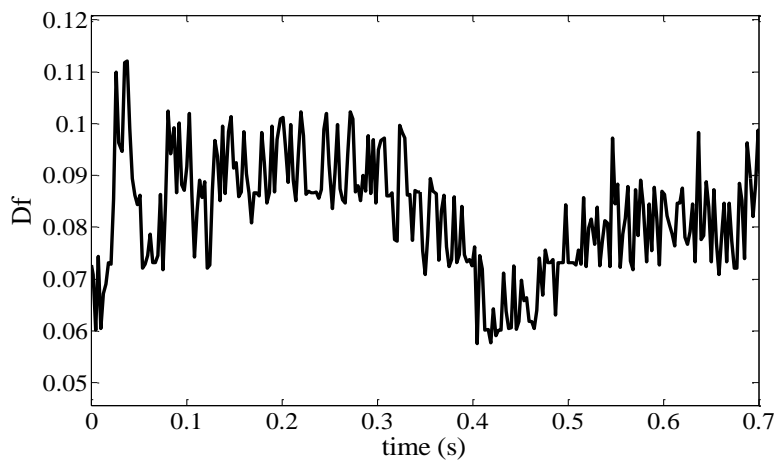
PWG2	PWG1	اتانول	آب		
۲۶	۲۵	۱۵	۳۵	کشش سطحی ( $dynes/cm$ )	
۵۳۲۶۰	۵۶۴۵۰	۱۱۸۰	۶۵۶۱۰	<i>a</i>	تئوری
-۲	-۲	-۲	-۲	<i>b</i>	
۵۱۳۸۰	۵۵۷۹۰	۱۱۵۱	۶۸۴۰۰	<i>a</i>	آزمایشات
-۲	-۲	-۲	-۲	<i>b</i>	
۳/۵۲	۱/۱۶	۲/۴۵	۴/۲۵	خطای <i>a</i> (%)	

نتایج جدول‌های ۹-۳ و ۱۰-۳ نشان دهنده کاهش نسبی خطا نسبت به حالتی است که قطرات در هوا سقوط می‌کنند. یکی از دلایل این امر می‌تواند این باشد که قطرات نوسانات اندازه و تغییر شکل‌های کمتری را از خود نشان می‌دهند.

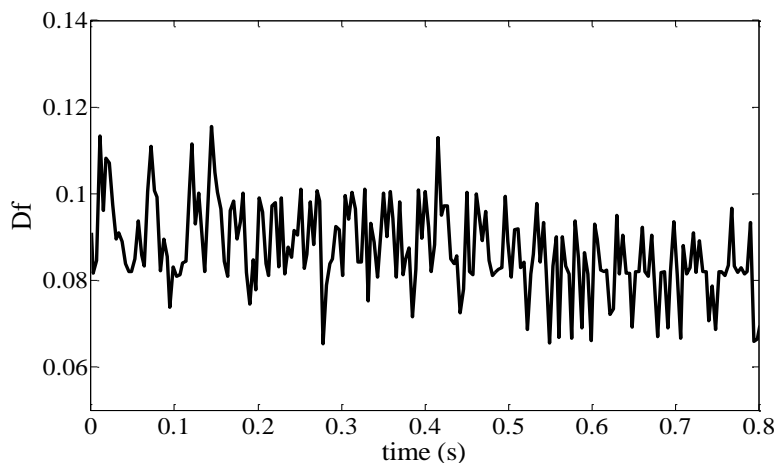
### ۳-۳-۵- تغییر شکل قطرات

همانطور که در شکل‌های ۱۷-۳ و ۱۸-۳ مشاهده می‌شود یک تفاوت اساسی بین سقوط قطرات نیوتنی در نفت نسبت به حالتی که در هوا سقوط می‌کنند وجود دارد که نوسانات منظم قطرات زمانی که در

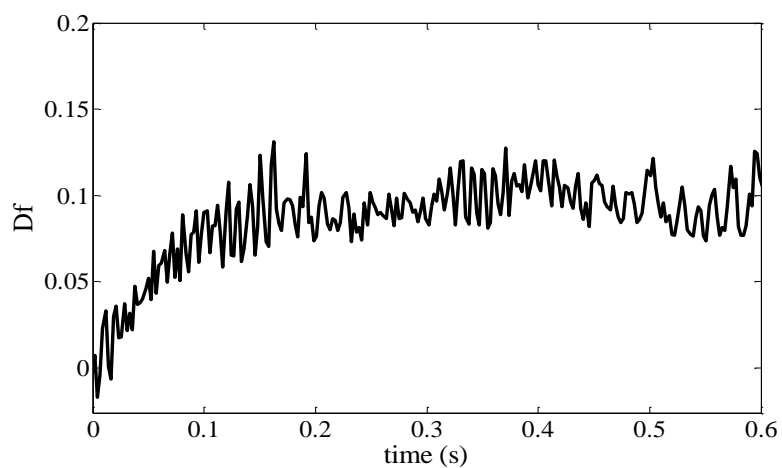
نفت حرکت می‌کنند به سرعت میرا می‌شود در حالیکه تقریباً رفتار میرا شونده‌ای به هنگام حرکت آن در هوا مشاهده نشد. دلیل اصلی این تفاوت می‌تواند اثرات لزجت سیال بستر (نفت) یا به عبارتی دیگر کاهش نسبت ویسکوزیته ( $k$ ) باشد. اما در مورد قطرات ویسکوالاستیک در مقایسه نسبت به آزمایشات در هوا مشاهده می‌شود که دامنه نوسانات افزایش پیدا کرده است و قطرات بیشتر دچار تغییرشکل شده‌اند. و نکته حائز اهمیت این است که با افزایش خاصیت الاستیک (عدد الاستیسیته  $En$ ) دامنه نوسانات کاهش می‌یابد. همچنین در مورد تغییر اندازه سوزن می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اندازه قطر قطرات، دامنه نوسانات هم در قطرات نیوتنی و هم در قطرات ویسکوالاستیک افزایش پیدا کرده است. در این میان کمترین دامنه نوسانی مربوط به قطره اتانول با سوزن ۱۶ است که قطره به سرعت حدی خود رسیده و تغییرشکل کمتری دارد. مقادیر اعداد نسبت ویسکوزیته، عدد الاستیسیته و عدد اتووس برای شکل‌های ۱۷-۳ و ۱۸-۳ در جدول ۳-۸ بیان شد.



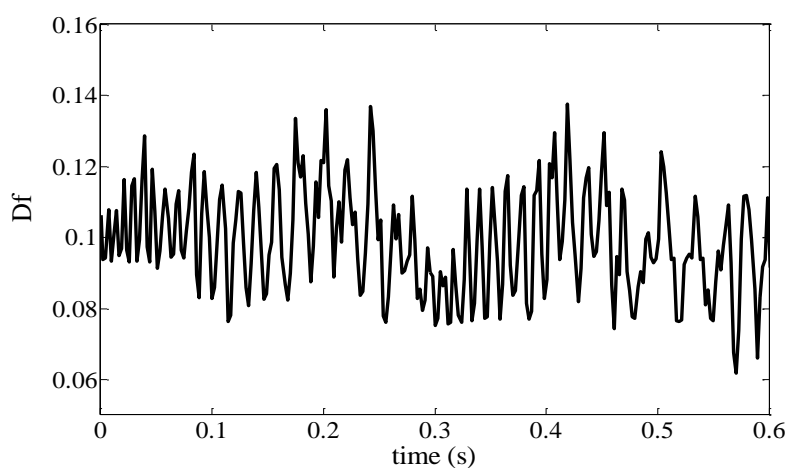
الف



ب

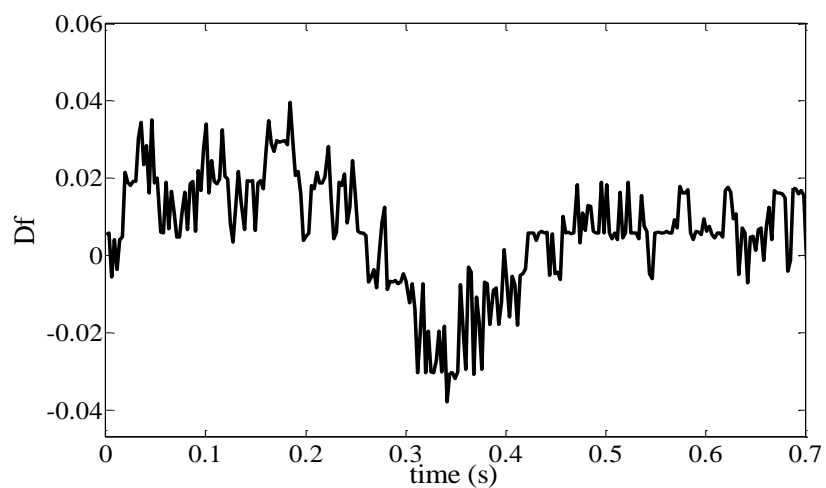


ج

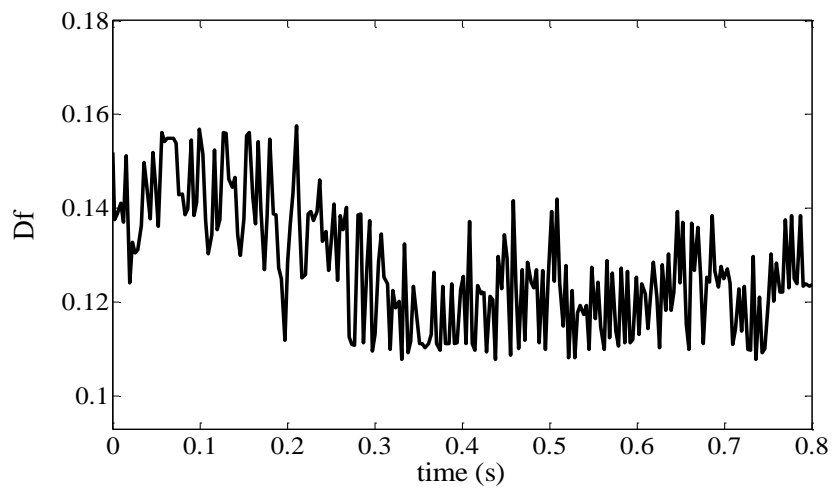


د

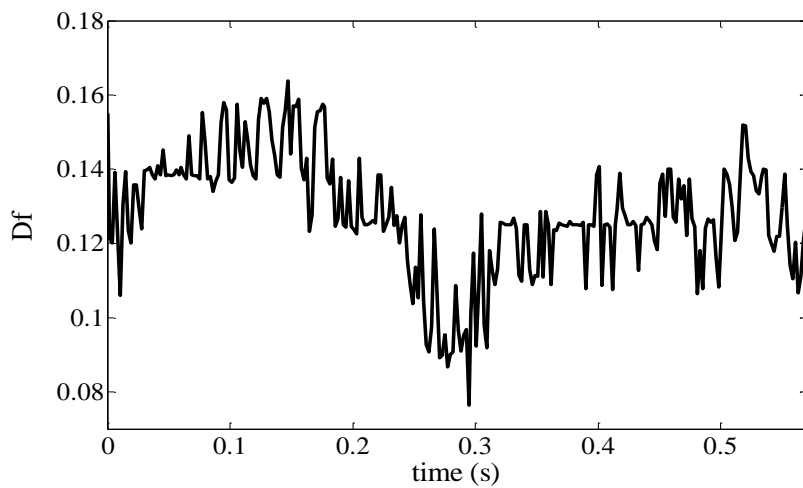
شکل ۳-۱۷. تغییر شکل قطرات در حال سقوط در نفت با سوزن ۱۶ الف) آب ب) اتانول ج) PWG1 د) PWG2



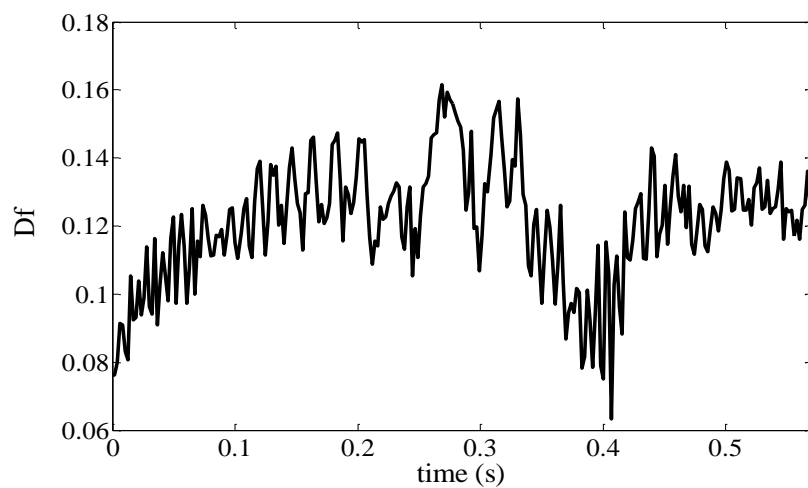
الف



ب.



ج.

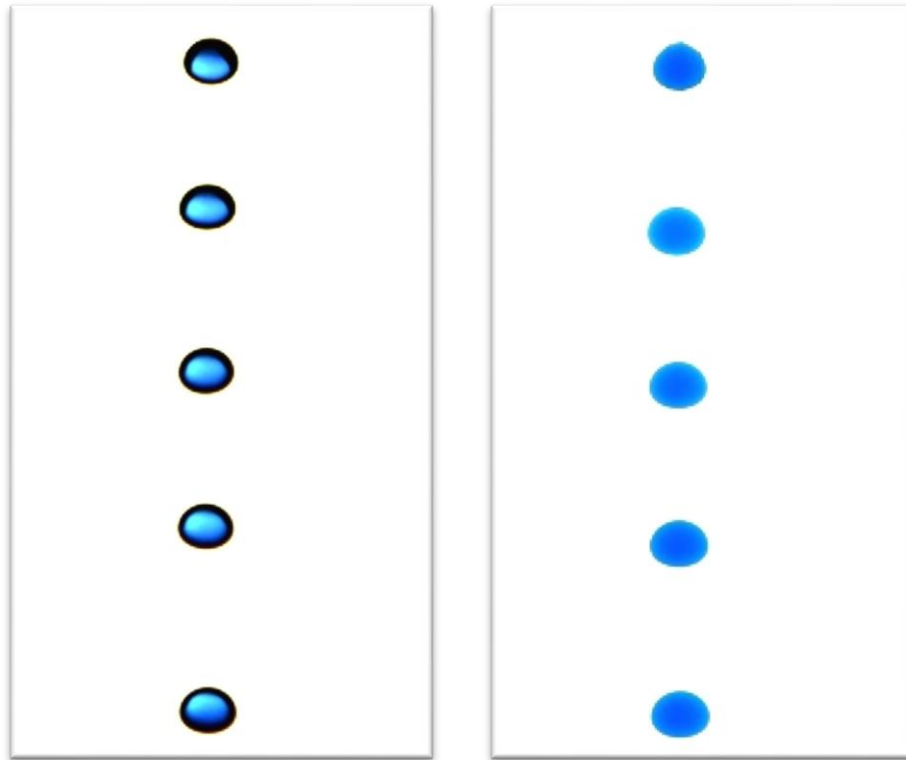


د.

شکل ۳-۱۸. تغییر شکل قطرات در حال سقوط در نفت با سوزن ۱۴ (الف) آب (ب) اتانول (ج) PWG1 (د) PWG2

همچنین در مورد شکل نهایی قطرات همانطور که در مقاله موسوی و همکارانش [۳۱] بیان شد، در اعداد اتوس پایین (حداکثر تا  $Eo = 2$ ) به دلیل غلبه نیروی کشش سطحی به نیروی وزن، قطره

دچار تغییرشکل کمی می‌شود و از حالت کروی به شکل بیضی افقی درمی‌آید که در شکل ۱۹-۳ نشان داده شده است.



ب

الف

شکل ۱۹-۳. تغییرشکل قطرات از حالت کروی به بیضوی هنگام سقوط در نفت (الف)  $PWG1$ ،  $Eo = 0.5232$  (ب) آب،  $Eo = 0.1979$







## فصل چهارم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

#### ۴-۱- مقدمه

در مطالعه حاضر بصورت آزمایشگاهی به بررسی تغییرشکل قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی پرداخته شد. بمنظور بررسی تاثیر محیط بر حرکت قطرات، آزمایشات در هوا و نفت بعنوان دو محیطی که بستر بسیاری از فرایندهای بیولوژیکی و صنعتی است انجام گرفت. نتایج در پنج قسمت مورد بحث که شامل موقعیت، سرعت و شتاب قطرات، مسیر حرکت قطرات، حجم قطرات، ضریب پسا و تغییرشکل قطرات بود، قرار گرفت.

#### ۴-۲- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر از قطرات در حال سقوط تصویربرداری شد و با استفاده از پردازش تصویر نتایج بدست آمد. در قسمت اول به بررسی سینماتیک قطرات پرداخته شد. نتایج نشان داد که قطرات با شتابی ثابت و کمتر از شتاب گرانش در حال سقوط هستند و قطرات به سرعت حدی خود نرسیدند که دلیل آن پایین بودن لزجت هوا است اما در مورد سقوط قطرات در نفت مقادیر شتاب بسیار کم شده و مقدار سرعت کاهش چشمگیری داشت که این امر ناشی از افزایش لزجت سیال بستر است.

موضوع بعدی که مورد بررسی قرار گرفت مسیر حرکت قطرات بود که مسیر قطرات در حال سقوط در هوا به دلیل بسیار پایین بودن لزجت هوا کاملاً یک خط مستقیم بوده ولی بلعکس قطرات در حال سقوط در نفت دارای حرکت نوسانی هستند که دلیل آن ایجاد گردابه‌های کارمن در پشت قطره است. در رینولدزهای پایین دو گردابه متقارن، در دو طرف قطره تشکیل می‌شود که در نتیجه آن قطره به شکل مستقیم به حرکت خود ادامه می‌دهد. در حالی که با افزایش رینولدز رشد گردابه‌ها غیر متقارن شده و در اثر این ناپایداری، الگوی متقارن ناحیه جریان پشت قطره دستخوش تغییر می‌شود که در نتیجه آن توزیع فشار حول قطره تغییر می‌کند و گردابه‌ها بصورت متناوب یکی در بالا و دیگری در پایین محور تقارن قطره تشکیل می‌شوند که این پدیده موجب وارد شدن نیروهای متناوب افقی (عمود بر مسیر سقوط قطره) می‌گردد و باعث می‌شود که مسیر سقوط قطره بصورت نوسانی درآید.

حجم قطرات نیز به روش انتگرال گیری حول محور تقارن قطره از المان های کوچک حجم با فرض متقارن بودن قطره محاسبه گردید و سپس با مقادیر تئوری مقایسه شد که نتایج نشان دهنده تطابق خوب مقادیر آزمایشگاهی و تئوری است.

همچنین ضریب پسای قطرات مورد بررسی قرار گرفت. تغییرشکل های قطرات و تاثیرات این تغییرشکل ها، باعث دشواری یافتن روابطی بمنظور توصیف ضرائب پسای قطرات شده است. از اینرو از دو دیدگاه متفاوت بهره گرفته شد. نخست از تغییرشکل های قطره حین حرکت صرفنظر و قطره بصورت یک جسم جامد در نظر گرفته شد و برپایه قانون دوم نیوتن رابطه ای تئوری برای توصیف ضریب پسا بر اساس عدد رینولدز بیان گردید. در دیدگاه دوم با استفاده از روش های پردازش تصاویر، تغییرشکل ها مورد بررسی و بصورت کاملاً دقیق در محاسبه ضرائب پسا اعمال گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که روابط ارائه شده از دقت قابل قبولی برخوردار است. البته لازم به ذکر است که قطرات نیوتنی دچار تغییرشکل بیشتری می شوند که در پی آن مقادیر خطا افزایش می یابد اما مقادیر خطا در قطرات ویسکوالاستیک بدلیل تغییرشکل کم و تمایل این قطرات به حفظ کرووی بودن کاهش پیدا می کند. همچنین اثرات نسبت ویسکوزیته، خاصیت الاستیک و کشش سطحی بر روی ضریب پسا بررسی شد و نتایج نشان داد که با افزایش نسبت ویسکوزیته ( $k$ ) مقادیر ضریب پسا افزایش و برای قطراتی با نسبت ویسکوزیته یکسان به ترتیب، با افزایش عدد الاستیسیته ( $En$ ) و افزایش کشش سطحی مقدار ضریب پسا افزایش می یابد.

بررسی تغییرشکل قطرات از دیگر موضوعات مورد بررسی در مطالعه حاضر است. تغییرشکل قطرات نیوتنی در حین سقوط در هوا بصورت تناوبی بوده که این تناوبات ناشی از برهم کنش میان نیروهای کشش سطحی و فشار هیدرودینامیکی و وجود جریان های چرخشی درون قطره است که منجر به ناپایداری در سطح قطرات می گردد. همچنین با افزایش قطر قطرات دامنه نوسات افزایش

می‌یابد. در حالی که تغییر شکل تناوبی قطرات هنگام حرکت در نفت رفته رفته میرا می‌شود که ناشی از لزجت بالای نفت نسبت به هوا است. اما در مورد قطرات ویسکوالاستیک می‌توان گفت که با افزودن پلیمرها دامنه نوسانات میرا می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که غلظت‌های بالاتر پلیمرها موجب نوسانات کمتر قطره در حین حرکت می‌شود. بعلاوه افزودن پلیمرها موجب بی‌نظمی‌هایی در رفتار قطرات می‌شود. عبارت دیگر الگوهای تناوبی مانند آنچه در مورد قطرات نیوتنی دیده شد مشاهده نمی‌شود. از سوی دیگر محدوده دامنه نوسانات برای قطرات ویسکوالاستیک در هوا بطرز قابل توجهی کمتر از قطرات نیوتنی است در حالیکه قطرات ویسکوالاستیک در نفت بیشتر دچار تغییر شکل می‌شوند و شکل کروی خود را از دست می‌دهند و به بیضی تغییر شکل می‌دهند.

#### ۳-۴- پیشنهادات

موارد زیر جهت تکمیل تحقیق حاضر پیشنهاد می‌گردد:

- انجام آزمایشات در بستر سیالات غیر نیوتنی.
- تصویربرداری در دو جهت از سقوط قطره جهت بررسی سه بعدی حرکت قطرات.
- بررسی تغییر شکل سیالات غیر نیوتنی Shear-thickening.
- بررسی فرایند انتقال حرارت بین قطره و سیال بستر.

## پیوست

جدول پیوست-۱. نتایج تست ویسکومتر برای سیال PWG1

Angular Velocity (RPM)	Viscosity (CentiPoise)	Torque (%)
0.5	122	11.8
0.6	121.8	19.5
1	121.6	31
1.5	121.2	42.3
2	120	50.2
2.5	119.2	65.4
3	116.4	73.7
4	114.5	89

جدول پیوست-۲. نتایج تست ویسکومتر برای سیال PWG2

Angular Velocity (RPM)	Viscosity (CentiPoise)	Torque (%)
0.3	156	10.1
0.5	154	12.3
0.6	148.2	16
1	142	23.3
1.5	137.1	39.8
2	135.1	56.7
2.5	134	70
3	132	81.4

جدول پیوست-۳. نتایج تست رئومتر برای سیال PWG1

Angular Frequency (1/s)	Storage Modulus (Pa)	Loss Modulus (pa)	Torque ( $\mu\text{Nm}$ )
628	4.62E-03	4.99E+03	1.46E+04
628	4.95E-03	5.34E+03	1.55E+04
530	3.49E-03	3.76E+03	1.54E+04
386	1.87E-03	2.02E+03	1.08E+04
281	9.96E-04	1.07E+03	5.67E+03
204	5.36E-04	5.78E+02	3.03E+03
149	2.82E-04	3.04E+02	1.60E+03
108	1.51E-04	1.63E+02	8.45E+02
78.8	7.90E-05	8.53E+01	4.41E+02
57.4	4.21E-05	4.54E+01	2.35E+02
41.8	2.23E-05	2.40E+01	1.24E+02
30.4	1.22E-05	1.32E+01	6.85E+01
22.1	6.78E-06	7.31E+00	3.79E+01
16.1	4.00E-06	4.32E+00	2.25E+01
11.7	2.53E-06	2.73E+00	1.42E+01
8.53	1.73E-06	1.87E+00	9.77E+00

Angular Frequency (1/s)	Storage Modulus (Pa)	Loss Modulus (pa)	Torque ( $\mu\text{Nm}$ )
6.21	1.26E-06	1.36E+00	7.08E+00
4.52	9.55E-07	1.03E+00	5.60E+00
3.29	4.99E-02	7.93E-01	4.28E+00
2.4	7.86E-02	6.05E-01	3.20E+00
1.74	8.21E-02	4.64E-01	2.47E+00
1.27	7.06E-02	3.57E-01	1.89E+00
0.924	5.93E-02	2.78E-01	1.48E+00
0.672	4.51E-02	2.16E-01	1.15E+00
0.489	3.43E-02	1.66E-01	8.84E-01
0.356	2.75E-02	1.27E-01	6.90E-01
0.259	1.78E-02	9.83E-02	5.33E-01
0.189	1.48E-02	7.43E-02	5.05E-01
0.137	8.91E-03	5.64E-02	5.03E-01
0.1	5.96E-03	4.15E-02	5.02E-01



جدول پیوست-۴. نتایج تست رئومتر برای سیال PWG2

Angular Frequency (1/s)	Storage Modulus (Pa)	Loss Modulus (pa)	Torque ( $\mu\text{Nm}$ )
628	4.75E-03	5.12E+03	1.48E+04
628	4.83E-03	5.21E+03	1.52E+04
530	3.39E-03	3.66E+03	1.50E+04
386	1.85E-03	2.00E+03	1.06E+04
281	9.83E-04	1.06E+03	5.60E+03
204	5.30E-04	5.71E+02	3.01E+03
149	2.77E-04	2.99E+02	1.55E+03
108	1.49E-04	1.61E+02	8.43E+02
78.8	7.82E-05	8.44E+01	4.37E+02
57.4	4.21E-05	4.54E+01	2.35E+02
41.8	2.24E-05	2.41E+01	1.25E+02
30.4	1.20E-05	1.29E+01	6.69E+01
22.1	6.40E-06	6.90E+00	3.57E+01
16.1	3.40E-06	3.67E+00	1.91E+01
11.7	1.83E-06	1.98E+00	1.03E+01
8.53	1.12E-06	1.21E+00	6.26E+00

Angular Frequency (1/s)	Storage Modulus (Pa)	Loss Modulus (pa)	Torque ( $\mu\text{Nm}$ )
6.21	7.08E-07	7.64E-01	3.97E+00
4.52	4.68E-07	5.05E-01	2.63E+00
3.29	3.22E-07	3.47E-01	1.82E+00
2.4	2.38E-07	2.57E-01	1.34E+00
1.74	1.75E-07	1.89E-01	1.02E+00
1.27	1.33E-07	1.44E-01	7.73E-01
0.924	1.72E-04	1.07E-01	5.61E-01
0.672	5.32E-04	8.05E-02	4.19E-01
0.489	1.16E-03	5.96E-02	4.56E-01
0.356	1.73E-03	4.45E-02	4.80E-01
0.259	2.73E-03	3.38E-02	4.96E-01
0.189	2.40E-03	2.56E-02	5.01E-01
0.137	2.12E-03	1.92E-02	5.03E-01
0.1	1.96E-03	1.43E-02	5.04E-01

## مراجع

- [1] T. Kékési, G. Amberg, and L. P. Wittberg, "Drop deformation and breakup," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 66, pp. 1-10, 2014.
- [2] K. Bäumlér, M. Wegener, A. Paschedag, and E. Bänsch, "Drop rise velocities and fluid dynamic behavior in standard test systems for liquid/liquid extraction—experimental and numerical investigations," *Chemical engineering science*, vol. 66, pp. 426-439, 2011.
- [3] S. Hu and R. Kinter, "The fall of single liquid drops through water," *AICHE Journal*, vol. 1, pp. 42-48, 1955
- [4] J. Isenberg and S. Sideman, "Direct contact heat transfer with change of phase: bubble condensation in immiscible liquids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 13, pp. 997-1011, 1970.
- [5] S. D. Aziz and S. Chandra, "Impact ,recoil and splashing of molten metal droplets," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 43, pp. 2841-2857, 2000.
- [6] H. Aryafar and H. Kavehpour, "Drop coalescence through planar surfaces," *Physics of Fluids (1994-present)*, vol. 18, p. 072105, 2006
- [7] L. Liu, H. Tang, and S. Quan, "Shapes and terminal velocities of a drop rising in stagnant liquids," *Computers & Fluids*, vol. 81, pp. 17-25, 2013.
- [8] C. Chung, M. A. Hulsen, J. M. Kim, K. H. Ahn, and S. J. Lee, "Numerical study on the effect of viscoelasticity on drop deformation in simple shear and 5: 1: 5 planar contraction/expansion microchannel," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 155, pp. 80-93, 2008.
- [9] Y. Yao, S. Lu, and Y. Liu, "Numerical simulation of droplet formation in contact micro-liquid dispensing," in *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2011, pp. 709-712.
- [10] R. B. Bird, R. Armstrong, and O. Hassager, "Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1: Fluid mechanics ", 1987.
- [11] A. Y. Malkin, "Fundamental topics in rheology: Rheology Fundamentals," *Ontario: ChemTec Publishing*, 1994.
- [12] D. F. James, "Boger fluids," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 41, pp. 129-142, 2009.
- [13] A. S. Utada, A. Fernandez-Nieves, H .A. Stone, and D. A. Weitz, "Dripping to jetting transitions in coflowing liquid streams," *Physical review letters*, vol. 99, p. 094502, 2007.
- [14] X. Zhang, "Dynamics of drop formation in viscous flows," *Chemical Engineering Science*, vol. 54, pp. 1759-1774, 1999.
- [15] P. P. Bhat, "Drop formation: Methods and applications".

- [16] B. J. de Gans, P. C. Duineveld, and U. S. Schubert, "Inkjet printing of polymers: state of the art and future developments," *Advanced materials*, vol. 16, pp. 203-213, 2004.
- [17] S. Ramaswamy and L. Leal, "The deformation of a viscoelastic drop subjected to steady uniaxial extensional flow of a Newtonian fluid," *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, vol. 85, pp. 127-163, 1999.
- [18] G. Taylor, "The formation of emulsions in definable fields of flow," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 146, pp. 501-523, 1934.
- [19] J. Rallison and A. Acrivos, "A numerical study of the deformation and burst of a viscous drop in an extensional flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 89, pp. 191-200, 1978.
- [20] B. Bentley and L. Leal, "Computer-controlled four-roll mill for investigations of particle and drop dynamics in two-dimensional linear shear flows," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 167, pp. 219-40, 1986.
- [21] T. Wairegi and J. Grace, "The behaviour of large drops in immiscible liquids," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 3, pp. 67-77, 1976.
- [22] T. Taylor and A. Acrivos, "On the deformation and drag of a falling viscous drop at low Reynolds number," *J. Fluid Mech*, vol. 18, pp. 466-476, 1964.
- [23] J. Q. Feng and K. V. Beard, "Raindrop shape determined by computing steady axisymmetric solutions for Navier–Stokes equations," *Atmospheric Research*, vol. 101, pp. 480-491, 2011.
- [24] B. Helenbrook and C. Edwards, "Quasi-steady deformation and drag of uncontaminated liquid drops," *International journal of multiphase flow*, vol. 28, pp. 1631-1657, 2002.
- [25] R. Magarvey and B. Taylor, "Free fall breakup of large drops," *Journal of Applied Physics*, vol. 27, pp. 1129-1135, 1956.
- [26] F. Arecchi, P. Buah-Bassuah, F. Francini, and S. Residori, "Fragmentation of a drop as it falls in a lighter miscible fluid," *Physical Review E*, vol. 54, p. 424, 1996.
- [27] D. Graham and J. Higdon, "Oscillatory flow of droplets in capillary tubes. Part 2. Constricted tubes," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 425, pp. 55-77, 2000.
- [28] N. Baumann, D. D. Joseph, P. Mohr, and Y. Renardy, "Vortex rings of one fluid in another in free fall," *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*, vol. 4, pp. 567-580, 1992.
- [29] M.-J. Ni, S. Komori, and N. B. Morley, "Direct simulation of falling droplet in a closed channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 366-376, 2006.
- [30] A. Fakhari and M. H. Rahimian, "Investigation of deformation and breakup of a falling droplet using a multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method,"

*Computers & Fluids*, vol. 40, pp. 156-171, 2011.

- [31] S. Tilehboni, K. Sedighi, M. Farhadi, and E. Fattahi, "Lattice Boltzmann Simulation of Deformation and Breakup of a Droplet under Gravity Force Using Interparticle Potential Model," *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics*, vol. 26, p. 781, 2013.
- [32] M. Ohta, M. Yamamoto, and M. Suzuki, "Numerical analysis of a single drop formation process under pressure pulse condition," *Chemical engineering science*, vol. 50, pp. 2923-2931, 1995.
- [33] M. Wegener, M. Kraume, and A. R. Paschedag, "Terminal and transient drop rise velocity of single toluene droplets in water," *AIChE journal*, vol. 56, pp. 2-10, 2010.
- [34] S. Mukherjee and K. Sarkar, "Viscoelastic drop falling through a viscous medium," *Physics of Fluids (1994-present)*, vol. 23, p. 013101, 2011.
- [35] I. Smagin, M. Pathak, O. M. Lavrenteva, and A. Nir, "Motion and shape of an axisymmetric viscoplastic drop slowly falling through a viscous fluid," *Rheologica acta*, vol. 50, pp. 361-374, 2011.
- [36] G. German and V. Bertola, "The free-fall of viscoplastic drops," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 165, pp. 825-828, 2010.
- [37] W. Milliken and L. Leal, "Deformation and breakup of viscoelastic drops in planar extensional flows," *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, vol. 40, pp. 355-379, 1991.
- [38] A. S. Hsu and L. G. Leal, "Deformation of a viscoelastic drop in planar extensional flows of a Newtonian fluid," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 160, pp. 176-180, 2009.
- [39] B. Ho and L. Leal, "The creeping motion of liquid drops through a circular tube of comparable diameter," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 71, pp. 361-383, 1975.
- [40] M. Favelukis, O. M. Lavrenteva, and A. Nir, "Deformation and breakup of a non-Newtonian slender drop in an extensional flow," *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, vol. 125, pp. 49-59, 2005.
- [41] M. C. Sostarecz and A. Belmonte, "Motion and shape of a viscoelastic drop falling through a viscous fluid," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 497, pp. 235-252, 2003.
- [42] R. Wanchoo, S. K. Sharma, and R. Gupta, "Shape of a Newtonian liquid drop moving through an immiscible quiescent non-Newtonian liquid," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 42, pp. 387-393, 2003.
- [43] S. Guido, M. Simeone, and F. Greco, "Deformation of a Newtonian drop in a viscoelastic matrix under steady shear flow: Experimental validation of slow flow theory," *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, vol. 114, pp. 65-82, 2003.
- [44] N. Kishore, R. Chhabra, and V. Eswaran, "Drag on a single fluid sphere translating in power-law liquids at moderate Reynolds numbers," *Chemical engineering science*, vol. 62, pp. 2422-2434, 2007.

- [45] F. Greco, "Drop deformation for non-Newtonian fluids in slow flows," *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, vol. 107, pp. 111-131, 2002.
- [46] P. P. Wegener and J.-Y. Parlange, "Spherical-cap bubbles," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 5, pp. 79-100, 1973.
- [47] R. Clift, J. R. Grace, and M. E. Weber, *Bubbles, drops, and particles*: Courier Corporation, 2005.
- [48] R. P. Chhabra, *Bubbles, drops, and particles in non-Newtonian fluids*: CRC press, 2006.
- [49] G. Astarita and G. Apuzzo, "Motion of gas bubbles in non-Newtonian liquids," *AIChE Journal*, vol. 11, pp. 815-820, 1965.
- [50] L. Leal, J. Skoog, and A. Acrivos, "On the motion of gas bubbles in a viscoelastic liquid," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 49, pp. 569-575, 1971.
- [51] E. Zana and L. Leal, "The dynamics and dissolution of gas bubbles in a viscoelastic fluid," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 4, pp. 237-262, 1978
- [52] M. Coutanceau and M. Hajjam, "Viscoelastic effect on the behaviour of an air bubble rising axially in a tube," in *Mechanics and Physics of Bubbles in Liquids*, ed: Springer, 1982, pp. 199-207.
- [53] O. Hassager, "Negative wake behind bubbles in non-Newtonian liquids," 1979.
- [54] Y. Liu, T. Liao, and D. Joseph, "A two-dimensional cusp at the trailing edge of an air bubble rising in a viscoelastic liquid," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 304, pp. 321-342, 1995.
- [55] J. R. Herrera-Velarde, R. Zenit ,D. Chehata, and B. Mena, "The flow of non-Newtonian fluids around bubbles and its connection to the jump discontinuity," *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, vol. 111, pp. 199-209, 2003.
- [56] S. B. Pillapakam, P. Singh, D. Blackmore, and N. Aubry" ,Transient and steady state of a rising bubble in a viscoelastic fluid," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 589, pp. 215-252, 2007.
- [57] M. Wu and M. Gharib, "Experimental studies on the shape and path of small air bubbles rising in clean water," *Physics of Fluids (1994-present)*, vol. 14, pp. L49-L52, 2002.
- [58] M. Ohta, T. Imura, Y. Yoshida, and M. Sussman, "A computational study of the effect of initial bubble conditions on the motion of a gas bubble rising in viscous liquids," *International journal of multiphase flow*, vol. 31, pp. 223-237, 2005.
- [59] J. Li, V. Bulusu, and N. Gupta, "Buoyancy-driven motion of bubbles in square channels," *Chemical Engineering Science*, vol. 63, pp. 3766-3774, 2008.
- [60] A. Borhan and J. Pallinti, "Breakup of drops and bubbles translating through cylindrical capillaries," *Physics of Fluids (1994-present)*, vol. 11, pp. 2846-2855,

1999.

- [61] P. Ghosh, "Interfacial Tension".
- [62] H. Hugli and J. J. Gonzalez, "Drop volume measurements by vision," in *Electronic Imaging*, 2000, pp.60-66.
- [63] S. Middleman, *An introduction to fluid dynamics: principles of analysis and design*: John Wiley & Sons Incorporated, 1998.
- [64] C. Kleinstreuer and Y. Feng, "Computational analysis of non-spherical particle transport and deposition in shear flow with application to lung aerosol dynamics—A review," *Journal of biomechanical engineering*, vol. 135, p. 021008, 2013.
- [65] S. Winnikow and B. Chao, "Droplet motion in purified systems," *Physics of Fluids (1958-1988)*, vol. 9, pp. 50-61, 1966.
- [66] E. Becker, W. Hiller, and T. Kowalewski, "Experimental and theoretical investigation of large-amplitude oscillations of liquid droplets," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 231, pp. 189-210, 1991.



## Abstract

Droplet formation from end of nozzle and its motion in periphery environment, is considered as an attractive and useful subject that turned attentions of many researchers. Better understanding of drops physics and affecting factors on formation, separation and motion of the drop result in improvement of related industrial process efficiency. Accordingly, this study investigates on the deformation and drag coefficient of two viscoelastic (Boger) droplet with different elastic properties, falling in the air and kerosene. These results have been compared with three Newtonian fluids consisting of water, ethanol and solution of sodium dodecyl benzene sulfonates salt in water as a surfactant. The results are obtained from image processing of droplet falling imaging. The results of droplet cinematic investigation showed that drops fall with constant and less acceleration than gravitational acceleration and because of low air viscosity, they haven't reached their terminal velocity, but in droplet falling into the kerosene, due to increase of fluid bulk viscosity, the amount of acceleration reduced considerably. The path of the drops is the next issue that is examined. The path of the falling droplets in the air because of the low viscosity of air is quite a straight line but the path of falling droplets in kerosene is swinging due to creating Karman vortices. At low Reynolds numbers, two symmetric vortices, which are formed on both sides of the drop, cause the drop to continue its movement straightly while with increasing Reynolds number, the growth of vortices is asymmetric and the path of the drop comes just swinging. The volume of drops is calculated by integration of drops small elements around its symmetry axis with assumption of axisymmetric condition. It is compared with theoretical result and showed a suitable agreement.

The drops drag coefficient is also examined. Droplet deformation and its effects, makes it difficult to find relationships to describe the drags coefficient. Therefore, two different views were used. First, by ignoring the drop deformations while its move and assuming it as a rigid particle, based on Newton's second-law theory to describe the relationship between the drag coefficients based on the

Reynolds number. In the second view, based on image processing methods, deformations were used to calculate the drag coefficient quite accurately. The results showed that the presented formulas has an acceptable accuracy, it should be noted that the Newtonian droplets have a more deformation comparing to the viscoelastic droplets, results in rising error values. The effects of viscosity, elastic properties and surface tension on the drag coefficient were considered, and results showed that by increasing the viscosity ratio ( $k$ ) values of drag coefficient increases. For drops with the same viscosity ratio by increasing the elasticity number ( $En$ ) and increasing the amount of surface tension, drag coefficient increases. The present study also investigates on the drop deformation. Newtonian droplet deformation during their fall in the air is periodical and it is because of interaction between surface tension forces and hydrodynamic pressure and internal circulation currents, leads to instability in the droplets. Whereas, periodical deformation of droplets, while moving in the kerosene gradually damped. This is because of higher kerosene viscosity compared to the air. However, in the case of viscoelastic droplets, it can be said that by adding more polymers, the oscillations will be damped. Also, the results showed that higher concentrations of polymers would lead to less oscillations during the motion drops. In addition, polymer additives causes irregularities in the behavior of the droplets. In other words, the periodic patterns like those were seen on Newtonian droplets, is not observed. On the other hand, the range of volatility for viscoelastic droplets is remarkably less than Newtonian droplets while viscoelastic droplets deform more in kerosene, losing their spherical shape and are changed into oval shape.

**Keywords:** Viscoelastic droplet; Deformation; Drag coefficient; Image processing.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mechanical Engineering**

**MSc Thesis in Mechanical Engineering**

**Experimental investigation of non-Newtonian drop  
deformation in a viscous fluid**

**Hossein Abdolnezhad Baghlojeh**

**Supervisor:**

**Dr. Mahmood Norouzi**

**July 2016**