

اللَّهُ  
الرَّحْمَنُ  
الرَّحِيمُ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک  
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

مطالعه‌ی آزمایشگاهی برخورد قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی  
روی سطوح جامد شیب‌دار

نگارنده : محمد کاظم شیخیان

استاد راهنما

دکتر محمود نوروزی

دکتر محمد محسن شاه مردان

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۳, ۲۸۴ / ۱۹۲  
تاریخ: ۹۲ / ۹ / ۲۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای محمد کاظم شیخیان با شماره دانشجویی ۹۳۱۰۷۰۴ رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان مطالعه‌ی آزمایشگاهی برخورد قطرات نیوتنی و غیر نیوتنی روی سطوح جامد شیب‌دار که در تاریخ ۹۶/۶/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با امتیاز ۱۹/۸ درجه عالی)  مردود   
نوع تحقیق: نظری  عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمود نوروزی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمد محسن شاه‌مردان	دانشیار	
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد ضامن	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر احمد نظری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علی عباس نژاد	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

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



## تشکر و قدردانی:

نخستین سپاس به درگاه خداوند متعال دارم که هر چه هست از اوست.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم که از زحمات استادان فرزانه و فریخته‌ام جناب آقایان دکتر محمود نوروزی و محمد محسن شاه مردان که در راه کسب علم و معرفت مرایاری نمودند و در تمام مراحل انجام پایان نامه، بنده را از راه‌نمایی ارزنده‌شان بی‌نصیب ننمودند، کمال تشکر و قدردانی را به جای آورم چرا که بدون راه‌نمایی‌های ایشان تائین این پایان نامه بسیار مشکل می‌نمود.

معلمانم ز عرش برتر باد، همیشه توست اندیشه‌ات مظفر باد.

همچنین از پدر و مادر عزیزتر از جانم، این دو بزرگوار که در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور بی‌چشم داشت برای من بودند نهایت تقدیر و تشکر را دارم.

اینجانب **محمد کاظم شیخیان** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مطالعه‌ی آزمایشگاهی برخورد قطرات نیوتنی و غیر نیوتنی**

**روی سطوح جامد شیب‌دار تحت راهنمایی دکتر محمود نوروزی - محمد محسن شاه‌مردان** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت‌های آن‌ها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. 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 نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد

## چکیده

برخورد قطرات بر روی سطوح جامد دارای کاربرد گسترده‌ای در صنایع نفت و گاز، رنگ‌آمیزی سطوح، خنک‌کاری سطوح داغ و سم‌پاشی محصولات کشاورزی می‌باشد. در مطالعه حاضر، ضریب پخش سیال غیرنیوتنی باگر روی سطوح شیبدار خشک از جنس آکرلیک (پلکسی‌گلس) و ورق استیل ضد زنگ به صورت آزمایشگاهی بررسی و با قطرات نیوتنی (آب و گلیسرین و محلول آن‌ها) مقایسه شده است. در این پژوهش، سقوط قطرات سیالات غیرنیوتنی و نیوتنی در دو ارتفاع 27 و 47 سانتیمتر از سطح جامد خشک و در محدوده اعداد ویر  $245 \leq We \leq 545$  مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر سرعت برخورد و زاویه سطح، لزجت و الاستیک بودن سیال، آبدوستی و زبری سطح بر رفتار پخش‌شدگی و جمع‌شدگی قطرات بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با کاهش لزجت و افزایش سرعت برخورد، نرخ و میزان پخش‌شدگی قطره بیشتر می‌شود. قطره غیرنیوتنی باگر در مقایسه با قطرات نیوتنی گلیسرین (با لزجت بیشتر) و آب (با لزجت کمتر) به ترتیب دارای نرخ و مقدار پخش‌شدگی بیشتر و کمتری است. همچنین سرعت برخورد و لزجت سیال تأثیری زیادی بر مرحله پخش‌شدگی دارند؛ ولی میزان آبدوستی و زبری سطح تأثیر ناچیزی بر پخش‌شدگی قطره دارند. از طرف دیگر، اثرات میزان آبدوستی و زبری سطح بر مرحله جمع‌شدگی قطره به مراتب بیشتر از مرحله پخش‌شدگی آن است. همچنین با افزایش سرعت برخورد، نرخ و میزان جمع‌شدگی قطره افزایش می‌یابد و مقدار این افزایش وابسته به لزجت سیال است. نرخ و میزان جمع‌شدگی قطرات روی سطح استیل به دلیل زبری زیاد این سطح نسبت به سطح پلکسی بیشتر است. برای بررسی خاصیت الاستیک سیالات، قطرات سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی دارای لزجت یکسان با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شرایط یکسان بودن لزجت‌ها، قطره غیرنیوتنی به دلیل دارا بودن خاصیت الاستیک در مقایسه با قطره نیوتنی به میزان کمتری پخش شده اما نرخ جمع‌شدگی آنها بیشتر است.

واژگان کلیدی: سطح شیب‌دار، سیال غیرنیوتنی باگر، لزجت سیال، زبری سطح، سرعت برخورد.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول
۲	۱-۱ مقدمه
۴	۲-۱ معرفی سیالات ویسکوالاستیک
۵	۳-۱ معرفی پلیمرها و رفتار ویسکوالاستیک در آنها
۶	۴-۱ سیال باگر
۷	۵-۱ کاربرد برخورد قطره در صنعت
۹	۶-۱ مروری بر تحقیقات پیشین (سیالات نیوتنی)
۱۸	۷-۱ تحقیقات پیشین (غیرنیوتنی)
۲۳	۸-۱ معرفی تحقیق حاضر
۲۳	۹-۱ مشخصات کلی پژوهش
۲۴	۱۰-۱ اهمیت و کاربرد موضوع
۲۴	۱۱-۱ جنبه‌های نوآوری
۲۵	۱۲-۱ مروری بر فصول پایاننامه
۲۷	فصل دوم
۲۸	۱-۲ مقدمه
۲۸	۲-۲ تجهیزات آزمایش
۲۸	۱-۲-۲ دوربین پرسرعت
۳۱	۲-۲-۲ پمپ تزریق سرنگی

۳۲	۳-۲-۲ ترازو با دقت بالا
۳۳	۴-۲-۲ همزن هات پلیت
۳۴	۵-۲-۲ ویسکومتر
۳۴	۶-۲-۲ رئومتر
۳۵	۷-۲-۲ دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی و زاویه تماس قطره با سطح
۳۶	۸-۲-۲ سوزن
۳۷	۹-۲-۲ سطوح برخورد
۳۸	۱۰-۲-۲ اندازه‌گیری زبری سطح (AFM)
۳۹	۳-۲ نحوه‌ی استقرار تجهیزات (ستاپ)
۴۰	۴-۲ مواد مورد آزمایش
۴۰	۱-۴-۲ محلول پلیمری
۴۲	۲-۴-۲ سیالات غیرنیوتنی منتخب برای آزمایشها
۴۴	۵-۲ مشخصات مواد مورد آزمایش
۴۶	۶-۲ زمان رهایی از تنش
۴۶	۷-۲ تست نوسان
۴۷	۸-۲ مدل ماکسول
۵۰	۹-۲ مقدمه‌ای بر پردازش تصویر
۵۲	۱-۹-۲ کاربردهای پردازش تصویر
۵۴	۲-۹-۲ مراحل انجام پردازش تصویر
۵۵	۳-۹-۲ پردازش تصاویر رنگی



۵۹	فصل سوم
۶۰	۱-۳ قطر اولیه قطره
۶۰	۲-۳ حجم قطرات
۶۱	۳-۳ سرعت قطرات در لحظه‌ی برخورد با سطح
۶۱	۴-۳ اعداد بی‌بعد رینولدز، وبر، اوهنسورگ، وایزنبرگ و الاستیسیته
۶۳	۵-۳ مشاهدات آزمایشگاهی مربوط به برخورد قطره روی سطح جامد شیب‌دار
۶۴	۶-۳ اثر سرعت روی برخورد قطره و پخش شدن
۷۰	۷-۳ زاویه برخورد
۷۱	۸-۳ اثر لزجت
۷۳	۹-۳ اثر آبدوستی و زبری سطح
۷۴	۱-۹-۳ زبری سطح
۷۹	۱۰-۳ اثر الاستیک
۸۵	فصل چهارم
۸۶	۱-۴ مقدمه
۸۶	۲-۴ نتیجه‌گیری
۸۷	۳-۴ پیشنهادها
۸۹	پیوست
۹۲	مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نمودار تنش برشی برحسب نرخ برش (مقایسه‌ی سیالات نیوتنی با سیالات غیرنیوتنی [1] ۴
- شکل ۲-۱ فرآیند اسپری خنک‌کننده سریع ۹
- شکل ۳-۱ فرآیند پاشش رنگ بدنه خودرو ۹
- شکل ۴-۱ شبیه‌سازی عددی پاشش بر اساس معادلات نویر-استوکس. شکل‌گیری تاج و انتشار با  $We = 598$  [۴] ۱۰
- شکل ۵-۱ شکل‌شناسی برخورد قطره روی یک سطح خشک. برگرفته از ریپو و همکاران [۸]. ۱۲
- شکل ۶-۱ رفتار ترکندگی قطره مایع بر اساس زاویه تماس [۲۵]. ۱۳
- شکل ۷-۱ زاویه تماس جامد-مایع: بر روی سطوح آبدوست (سمت راست) و آبگریز (سمت چپ). ۱۴
- شکل ۸-۱ زاویه تماس پیشروی و پسروی [۲۷]. ۱۴
- شکل ۹-۱ به تصویر کشیدن سیال در زمانهای بی‌باعد مختلف. سمت راست شبیه‌سازی SPH برای یک قطره‌ی Oldroyd-B در زوایای برخورد ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه. سمت چپ شبیه‌سازی SPH برای یک قطره‌ی نیوتنی در زوایای برخورد ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه [۴۶]. ۲۰
- شکل ۱۰-۱ الف) حالت اولی‌هی برخورد یک قطره و ب) نمای جانبی یک قطره روی صفحه‌ی جامد و شیب‌دار [۴۶]. ۲۱
- شکل ۱۱-۱ تصویر شبیه‌سازی عددی مسئله‌ی برخورد قطره به صورت سه‌بعدی [۵۸]. ۲۱
- شکل ۱-۲ دوربین پرسرعت CMOS مدل pco.dimax S1. ۲۹
- شکل ۲-۲ نمونه‌های از تصاویر تهیه‌شده از قطره. ۳۰
- شکل ۳-۲ نورافکن ۲۰۰۰ وات شرکت UNIMAT ۳۱

- شکل ۴-۲ لنز مورد استفاده به همراه دوربین و نمای داخلی آن ۳۱
- شکل ۵-۲ پمپ تزریق سرنگ JMS مدل SP-500 ۳۲
- شکل ۶-۲ ترازوی مدل PS 510/C/1 محصول شرکت RADWAG. ۳۳
- شکل ۷-۲ همزن هات پلیت IKA RCT. ۳۳
- شکل ۸-۲ ویسکومتر مدل DVE-LV شرکت Brookfield ۳۴
- شکل ۹-۲ دستگاه رئومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar ۳۵
- شکل ۱۰-۲ دستگاه اندازه گیری کشش سطحی تنسیومتر به روش ویلهلمی ۳۵
- شکل ۱۱-۲ نمونه کشش سطحی انجام شده برای قطره آب ۳۶
- شکل ۱۲-۲ سوزن ۱۶G مورد استفاده برای تشکیل قطره ۳۶
- شکل ۱۳-۲ نمونه ای از سطوح پلکسیگلاس (شکل راست) - نمونه ای از سطوح استیل (شکل چپ) ۳۷
- شکل ۱۴-۲ دستگاه AFM برای اندازه گیری زبری سطح ۳۸
- شکل ۱۵-۲ نمایی کلی از تنظیمات آزمایش. ۳۹
- شکل ۱۶-۲ نمایی از پیوندهای مولکولی پلیآکریلامید ۴۱
- شکل ۱۷-۲ پودر پلیمر پلیآکریلامید (شکل راست) - مواد استفاده شده در ساخت محلولهای پلیمری (شکل چپ) ۴۱
- شکل ۱۸-۲ نمودار لزجت بر حسب نرخ برش برای باگر اول ۴۳
- شکل ۱۹-۲ نمودار لزجت بر حسب نرخ برش برای باگر دوم ۴۳
- شکل ۲۰-۲ پلیمر باگر اول تهیه شده در آزمایشگاه ۴۴
- شکل ۲۱-۲ لحظه جدایش قطره از سوزن ۴۵
- شکل ۲۲-۲ مدل فئر و دمپر ماکسول ۴۸
- شکل ۲۳-۲ نمودار  $G'$  و  $G''$  بر حسب فرکانس زاویه های برای سیال باگر اول ۵۰

- شکل ۲-۲۴ نمودار  $G'$  و  $G''$  بر حسب فرکانس زاویه‌های برای سیال باگر دوم ۵۰
- شکل ۲-۲۵ عکس‌برداری از پلاک ماشین (کاربرد پردازش تصویر) ۵۴
- شکل ۲-۲۶ آنالیز عکس‌برداری هوایی به وسیله پردازش تصویر ۵۴
- شکل ۲-۲۷ مرحله اول ۵۷
- شکل ۲-۲۸ یافتن نقطه برخورد ۵۸
- شکل ۲-۲۹ محاسبه ضریب پخش ۵۸
- شکل ۳-۱ شماتیک برخورد قطره و ضرایب پخش آن ۶۴
- شکل ۳-۲ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش آب بر روی سطح پلکسی گلس در زاویه ۱۵ درجه ۶۶
- شکل ۳-۳ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش آب بر روی سطح پلکسی گلس در زاویه ۳۰ درجه ۶۶
- شکل ۳-۴ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش آب بر روی سطح استیل در زاویه ۳۰ درجه ۶۷
- شکل ۳-۵ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش باگر اول بر روی سطح پلکسی گلس در زاویه ۳۰ درجه ۶۸
- شکل ۳-۶ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش باگر اول بر روی سطح استیل در زاویه ۳۰ درجه ۶۸
- شکل ۳-۷ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش باگر دوم بر روی سطح پلکسی گلس در زاویه ۱۵ درجه ۶۹
- شکل ۳-۸ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش باگر دوم بر روی سطح پلکسی گلس در زاویه ۳۰ درجه ۶۹
- شکل ۳-۹ مقایسه ضریب پخش گلیسیرین بر روی پلکسی گلس با سرعت ۲/۳۰ متر بر ثانیه در دو زاویه مختلف ۷۰

- شکل ۳-۱۰ مقایسه ضریب پخش گلیسیرین بر روی استیل با سرعت  $2/30$  متر بر ثانیه در دو زاویه مختلف ۷۱
- شکل ۳-۱۱ مقایسه اثر لزجت بر ضریب پخش سیالات مختلف بر روی پلکسی گلس با سرعت  $2/30$  متر بر ثانیه در زاویه  $15$  درجه ۷۲
- شکل ۳-۱۲ مقایسه اثر لزجت بر ضریب پخش سیالات مختلف بر روی استیل با سرعت  $2/30$  متر بر ثانیه در زاویه  $30$  درجه ۷۲
- شکل ۳-۱۳ زاویه تماس جامد-مایع: بر روی سطوح آبدوست (سمت راست) و آبگریز (سمت چپ). ۷۴
- شکل ۳-۱۴ زاویه تماس قطره آب با سطح پلکسیگلس ۷۴
- شکل ۳-۱۵ تماس قطره آب با سطح استیل ۷۴
- شکل ۳-۱۶ نمونه تصویر نرم افزار imager ۷۶
- شکل ۳-۱۷ شماتیک قللها و درهها و میانگین آنها ۷۶
- شکل ۳-۱۸ نمونه تصویر سه بعدی سطح پلکسیگلس به وسیله دستگاه AFM ۷۶
- شکل ۳-۱۹ نمونه تصویر سه بعدی سطح استیل ضد زنگ به وسیله دستگاه AFM ۷۷
- شکل ۳-۲۰ مقایسه ضریب پخش آب بر روی پلکسیگلس و استیل در زاویه  $30$  درجه با سرعت  $3/03$  متر بر ثانیه ۷۸
- شکل ۳-۲۱ مقایسه ضریب پخش باگر اول روی پلکسیگلس و استیل در زاویه  $30$  درجه با سرعت  $2/30$  متر بر ثانیه ۷۹
- شکل ۳-۲۲ مقایسه اثر الاستیک بر ضریب پخش باگر اول و معادل نیوتنی آن بر روی پلکسی گلس در زاویه  $15$  درجه ۸۰
- شکل ۳-۲۳ مقایسه اثر الاستیک بر ضریب پخش باگر دوم و معادل نیوتنی آن بر روی پلکسی گلس در زاویه  $15$  درجه ۸۱

شکل ۳-۲۴ مقایسه اثر الاستیک بر ضریب پخش باگر اول و معادل نیوتنی آن بر روی پلکسی در زاویه ۳۰ درجه با سرعت ۳/۰۳ متر بر ثانیه

۸۲

شکل ۳-۲۵ مقایسه اثر الاستیک بر ضریب پخش باگر دوم و معادل نیوتنی آن بر روی پلکسی در زاویه ۳۰ درجه با سرعت ۳/۰۳ متر بر ثانیه

۸۲

شکل ۳-۲۶ مراحل تغییر شکل قطره آب بعد از برخورد با سطح استیل در زاویه ۳۰ درجه با سرعت ۳.۰۳ متر بر ثانیه

۸۳

شکل ۳-۲۷ مراحل تغییر شکل قطره باگر دوم بعد از برخورد با سطح پلکسیگلس در زاویه ۳۰ درجه با سرعت ۳.۰۳ متر بر ثانیه

۸۳

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲ خواص مایعات نیوتنی در دمای  $T = 25 \pm 0.5^\circ$  ۴۵
- جدول ۲-۲ خواص مایعات غیرنیوتنی در دمای  $T=25\pm 0.5^\circ$  ۴۵
- جدول ۱-۳ مقادیر قطر اولیه اندازه‌گیری شده برای قطرات نیوتنی و غیر نیوتنی ۶۰
- جدول ۲-۳ مقادیر آزمایشگاهی برای محاسبه حجم قطره ۶۱
- جدول ۳-۳ مقادیر آزمایشگاهی سرعت برخورد برای قطرات در ارتفاع ۲۷ و ۴۷ سانتی‌متری ۶۱
- جدول ۴-۳ مقادیر رینولدز، وبر، اوهنسورگ، وایزنبرگ و الاستیسیته برای قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی در دو سرعت  $2/30$  و  $3/03$  متر بر ثانیه ۶۲

## فهرست علائم

سطح از قطره که در مقابل جریان قرار دارد	$A$
عدد بانند	$Bo$
عدد موئینگی	$Ca$
ضریب پسا	$C_d$
قطر قطره	$D$
قطر اولیه قطره	$D_0$
قطر سوزن	$D_c$
حداکثر قطر پخش شدگی	$D_{max}$
بزرگترین قطر بر اساس $\theta_{rec}$	$d_r$
کوچکترین قطر بر اساس $\theta_{adv}$	$d_a$
قطر افقی قطره قبل برخورد	$d_h$
قطر عمودی قطره بعد از برخورد	$d_v$
انرژی جنبشی قطره در لحظه برخورد	$E_{K1}$
انرژی گرانشی قطره در لحظه برخورد	$E_{G1}$
انرژی سطحی قطره در لحظه برخورد	$E_{S1}$
انرژی جنبشی قطره پس از برخورد	$E_{K2}$
انرژی گرانشی قطره پس از برخورد	$E_{G2}$
انرژی سطحی قطره پس از برخورد	$E_{S2}$
انرژی از دست رفته در اثر تلفات ویسکوز	$E_{D2}$
عدد فرود	$Fr$
مدول صلبیت هم‌فاز	$G'$
مدول صلبیت غیر هم‌فاز	$G''$
ارتفاع قطره قبل از برخورد	$H$



ضخامت اولیه فیلم مایع	$h_0$
یک گروه مهم کامپوزیت	$K$
جرم قطره	$m$
عدد آهنسورگ	$Oh$
عدد رینولدز	$Re$
دما	$T$
زمان	$t$
زمان رسیدن قطره به بزرگترین قطر	$t_{max}$
سرعت قطره	$U$
سرعت برخورد	$U_0$
حجم قطره	$V$
عدد وبر	$We$
عدد وایزنبرگ	$Wi$
نرخ برش	$\dot{\gamma}$
نرخ برش مختلط	$\dot{\gamma}^*$
کرنش زاویه ای اولیه	$\gamma_0$
زمان آسودگی از تنش	$\lambda$
زمان آسودگی از تنش متوسط	$\bar{\lambda}$
فرکانس زاویه ای	$\omega$
عدد الاستیسیته	$El$
زمان بی بعد	$t^*$
تنش برشی	$\tau_s$
تنش برشی اولیه	$\tau_0$
تنش برشی مختلط	$\tau^*$
کشش سطحی	$\sigma$

کشش سطحی جامد-سیال	$\sigma_{SF}$
کشش سطحی جامد-مایع	$\sigma_{SL}$
کشش سطحی مایع-سیال	$\sigma_{LF}$
اختلاف تنش‌های نرمال اول	$\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}$
چگالی	$\rho$
ویسکوزیته دینامیکی	$\eta$
ضریب پخش در جلو نقطه برخورد	$X/D_{Front}$
ضریب پخش در عقب نقطه برخورد	$X/D_{Back}$
میانگین زبری سطح	$R_a$
ارتفاع ناهمواری سطح	$y_i$
زاویه قطره با نوک سوزن	$\theta$
زاویه تماس تعادلی	$\theta_e$
زاویه تماس دینامیکی	$\theta_d$
زاویه تماس پیشروی	$\theta_{adv}$
زاویه تماس پسروی	$\theta_{rec}$

# فصل اول

## مقدمه

در مباحث مهندسی آشنایی با سیالات همواره مورد اهمیت بوده و این که بدانیم انواع آن و رفتار آن‌ها به چه شکل می‌باشد می‌تواند کمک بسیاری در پیشبرد صنعت داشته باشد. شناخت علم سیالات در بسیاری از زمینه‌های علمی و پژوهشی مورد اهمیت بوده و می‌تواند کمک زیادی در پیشبرد بسیاری از مسائل کند.

یک ویژگی متداول مایعات و گازها این است که در سکون فقط می‌توانند فشار عمود بر سطوح جامد یا مایع یا احاطه‌کننده مایع و گاز را انتقال دهند. نیروهای مماسی روی چنین سطوحی اولین بارزمانی به وقوع خواهد پیوست که بین مایع یا گاز و سطح مایع یا جامد حرکت نسبی وجود داشته باشد برای مثال جریان روی یک رودخانه به‌صورتی است که سرعت جریان در وسط رودخانه بیشترین و در نزدیک ساحل رودخانه به صفر کاهش می‌یابد. این پدیده با مفهوم نیروهای مماسی (تنش برشی) بین لایه‌های آب که سعی برکند کردن جریان دارند توضیح داده می‌شود. حجم یک المان از مایع در حال جریان تقریباً ثابت است این بدین معناست که چگالی آن یعنی جرم واحد حجم مایع تقریباً ثابت است بنابراین مایعات را تراکم ناپذیر در نظر می‌گیریم. این موضوع را نیز باید دانست که مواد جامد نیز ممکن است رفتاری سیال گونه از خود نشان دهند تغییر شکل پلاستیک و خزش، رفتارهایی سیال گونه است به‌عنوان مثال خزش در فولاد در دماهای بالای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد ولی پایین‌تر از دمای ذوب به‌وقوع می‌پیوندد.

شارش‌شناسی یا رئولوژی<sup>۱</sup> علم جریان و تغییر شکل جریان‌ها است که برهم‌کنش بین نیروها، تغییر شکل و زمان را توصیف می‌کند. رئولوژی از واژه رئوس<sup>۲</sup> که واژه‌ای یونانی به معنای جریان است، اقتباس شده است. رئولوژی برای تمام مواد از گازها تا مایعات کاربردی است. علم رئولوژی

---

<sup>۱</sup> Rheology

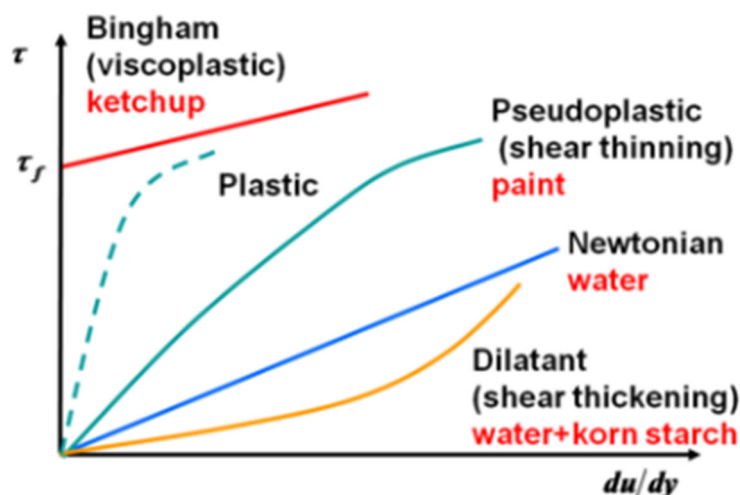
<sup>۲</sup> Rheos

حدود یک قرن سابقه دارد که برای اولین بار به علت نیاز به توصیف خواص سیالات مطرح شد. اگر ویسکوزیته، مقاومت در برابر جریان و الاستیسیته، ساختار و پایداری ابعادی ماده را معرفی کند، می‌توان گفت که رئولوژی در واقع رفتار ویسکوز و الاستیک سیستم‌ها را به صورت مجزا و در ارتباط با یکدیگر بررسی می‌کند. سیالات را به‌طور کلی می‌توان به سیالات نیوتنی، غیر نیوتنی مستقل از زمان، غیرنیوتنی وابسته به زمان و ویسکوالاستیک طبقه‌بندی کرد که جریان شناسی سیالات غیرنیوتنی و ویسکوالاستیک وظیفه خطیر دانش رئولوژی است.

در سیالات نیوتنی، رابطه بین تغییرات تنش برشی و نرخ تنش اعمال شده به صورت خطی است و ضریب ثابت تبدیل‌کننده این تناسب خطی به معادله، همان لزجت<sup>1</sup> یا گرانروی است؛ ولی در سیالات غیر نیوتنی، دیگر اثری از رابطه خطی میان تغییرات تنش برشی و نرخ تنش اعمال شده نیست و در این طیف از سیالات، مدت‌زمان اعمال تنش نقش مهمی در تنش برشی حاصل شونده ایجاد می‌کند. در نتیجه در سیالات غیرنیوتنی ضریبی ثابت مانند لزجت برای توصیف وضعیت تنش برشی معنا ندارد.

---

<sup>1</sup> Viscosity



شکل ۱-۱ نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش (مقایسه‌ی سیالات نیوتنی با سیالات غیرنیوتنی) [1]

در این فصل ابتدا به معرفی سیالات ویسکوالاستیک و باگر پرداخته می‌شود و سپس مروری بر تحقیقات گذشته در خصوص پدیده‌ی برخورد قطره‌ی سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی بر روی سطح صورت می‌گیرد. به این ترتیب ضمن بیان تاریخچه‌ی تحقیقات پیشین، به کاربردها، مراحل مختلف برخورد قطره با سطح، رفتارهایی که قطره پس از برخورد از خود نشان می‌دهد و اهمیت تحقیق در این زمینه اشاره خواهد شد. در ادامه، تحقیق حاضر معرفی شده و به بیان مشخصات کلی، اهداف و موارد نوآوری پرداخته خواهد شد. در پایان نیز مروری اجمالی بر ساختار کلی تحقیق حاضر صورت می‌گیرد.

## ۲-۱ معرفی سیالات ویسکوالاستیک

خاصیت دسته‌ای از مواد است که رفتاری میان دو خاصیت کلی ویسکوز بودن و کشسان بودن از خود نشان می‌دهند و این خاصیت به هنگام تحمیل نیروی خارجی و اعمال تغییر شکل بر آن پدیدار می‌شود. مواد ویسکوز، مانند عسل، در برابر تنش اعمال شده، پاسخهایی به صورت جریان برشی و کرنش (تغییر شکل طولی) با تغییرات خطی نسبت به زمان از خود نشان می‌دهند. مواد کشسان، مانند آهن نیز به هنگام رویارویی با تنش، به آرامی کشیده می‌شوند و در صورتی که میزان تنش از

$$\tau_s = \eta \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

آستانه کشسانی آن‌ها فراتر نرفته باشد، به محض برداشته شدن تنش، به وضعیت اولیه خود بازمی‌گردند. مواد ویسکوالاستیک به‌مانند نام خود، خواصی از این دودسته کلی مواد دارند. از جمله داشتن خاصیت مقاومت وابسته به زمان در برابر کرنش.

کشسان بودن به‌طور معمول ناشی از وجود پیوندهای گسترده مولکولی در سرتاسر صفحات بلوری جامدات و وجود ساختار منظم و سازمان‌یافته آن‌هاست، ولی در سوی مقابل لزجت، ناشی از نفوذ مولکول‌ها و اتم‌ها به درون ساختار نامنظم سیالات است از جمله مواد ویسکوالاستیک مشهور می‌توان به پلیمرهای آمورف، پلیمرهای نیمه بلوری، بیوپلیمرها، فلزات در دماهای بسیار بالا و مواد قیری اشاره کرد. در مورد این‌گونه مواد، تنش برشی رابطه‌ای خطی با نرخ برش ندارد. برای سیالات نیوتنی مانند آب، هوا و مایعاتی با وزن‌های مولکولی پایین، لزجت ( $\eta$ ) مقداری ثابت بوده و تنش برشی ( $\tau_s$ ) به‌طور مستقیم با نرخ برش ( $\dot{\gamma}$ ) متناسب است:

### ۳-۱ معرفی پلیمرها و رفتار ویسکوالاستیک در آن‌ها

در زمینه شیمی پلیمر، شناخت محلول‌های پلیمری اهمیت زیادی دارد. چون پلیمرها حجم نسبتاً زیاد در غلظت مولی کم دارند، انحلال آن‌ها غیرعادی بوده و این ویژگی بر رفتار محلول‌های پلیمر تأثیرگذار است. این محلول‌ها حتی در غلظت مولی کم بسیار ویسکوز هستند. این ویژگی در بسیاری از صنایع مانند صنعت رنگ و صنایع غذایی که در آن‌ها پلیمرها نقش غلیظ کننده دارند کاربرد دارد. در روش‌های تعیین خواص پلیمرها مانند تعیین جرم مولی نسبی یا کروماتوگرافی نفوذ ژل<sup>۱</sup> از خواص محلول‌های پلیمر استفاده می‌شود. تعدادی از پلیمرهای مصنوعی که کاربرد صنعتی دارند در آب محلول هستند. این پلیمرها دارای گروه عامل‌های بسیار قطبی بوده و شامل سلولزهای اصلاح‌شده می‌باشند. البته فقط دارا بودن گروه عامل‌های قطبی برای انحلال در آب کافی نخواهد بود. در انحلال

---

<sup>۱</sup> GPC

پلیمرهای محلول در آب عامل دیگری به نام "احتمال برهم کنش های آبگریز" نیز باید در نظر گرفته شود. هر پلیمر حتی از نوع محلول در آب از دو قسمت تشکیل شده است: گروه عوامل قطبی و شاخه اصلی غیر قطبی. معمولاً پلیمرهای دارای شاخه اصلی آلی شامل زنجیر C - C هستند که بیشتر موقعیت های ظرفیتی موجود روی اتم های کربن توسط اتم های هیدروژن اشغال شده اند؛ به عبارت دیگر این نوع پلیمر به صورت جزئی دارای ماهیت هیدروکربنی است و در برابر انحلال در آب مقاومت می کند.

در محلول های پلیمری رقیق در صورتی که ماده برای مدت زمان کافی در حال سکون قرار بگیرد، مولکول ها یک آرایش درهم رفته و تصادفی پایدار را پیدا می کنند. حال اگر این ماده پلیمری تحت انواع تغییر شکل ها قرار بگیرد در آن صورت مولکول های پلیمر در اثر بارگذاری، آرایش جدیدی پیدا می کنند. به علاوه ممکن است که مولکول ها خودشان را با برخی جهت های خاص، تطبیق دهند به نحوی که آرایش مولکولی شان دیگر تصادفی نباشد؛ بنابراین در یک ماده ی پلیمری، تغییر آرایش مولکول ها موجب تغییر خواصی نظیر لزجت می شود و چون این تغییر آرایش به طور آبی انجام نمی شود، لذا سبب وابستگی تغییر شکل های سیال به زمان می گردد؛ زیرا در ساختار مولکولی، نیروهای بین اتمی مانند فنرهای عمل می کنند که قادرند به ماده در حین تغییر آرایش، رفتار الاستیک نیز بدهند؛ به عبارت دیگر ماده از خود رفتار ویسکوالاستیک نشان می دهد.

## ۴-۱ سیال باگر<sup>۱</sup>

سیال باگر مایعی ویسکوالاستیک با لزجت ثابت است. لزجت سیال باگر به طور تقریبی مستقل از نرخ برش می باشد؛ بنابراین هنگام آزمایش این مایعات ویسکوالاستیک می توان اثرات الاستیک را کاملاً مستقل از اثرات لزجت در نظر گرفت. سیالات باگر محلول های پلیمری رقیقی هستند که به طور کلی با استفاده از حلالی به اندازه ی کافی لزج، ساخته می شوند که در آن ها تنش های ناشی از

<sup>1</sup> Boger Fluid



الاستیسیته قابل اندازه‌گیری هستند؛ بنابراین باگرها محلول‌های پلیمری رقیقی هستند که رقیق بودن آن‌ها به اندازه‌ای است که تغییرات لزجت نسبت به نرخ برش قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. با توجه به این‌که در تحلیل رفتار سیالات غیر نیوتنی پارامترهای متعددی دخیل هستند، استفاده از سیال باگر موجب سهولت و دقت بیشتر در بررسی نتایج حاصل می‌گردد.

## ۱-۵ کاربرد برخورد قطره در صنعت

برخورد قطره روی سطوح جامد خشک و فیلم مایع، عامل اصلی پدیده‌های زیادی است که کاربرد-های صنعتی فراوانی دارند. طبیعی‌ترین راه شکل‌گیری یک قطره مجزا، از طریق چکاندن قطره از یک سوزن در غیاب هر گونه ناپایداری و عوامل مزاحم می‌باشد. در این فرایند، هنگامی که قطره به قدر کافی بزرگ و سنگین شود که وزن آن بر تنش‌های سطحی بین مایع و سطح سوزن غلبه کند، سقوط خواهد کرد. به دلیل بالا بودن تنش‌های سطحی در مایعات، قطره‌هایی که از طریق چکاندن، شکل می‌گیرند، بسیار بزرگ‌تر از قطر نازل خواهند بود. جهت تولید قطره‌های کوچک‌تر، بایستی ناپایداری‌هایی برای تسهیل شکل‌گیری قطره‌های کوچک و قطع کردن سطح نازل به صورت کنترل شده وجود داشته باشد. شاید رایج‌ترین مولد قطره‌ای مورد استفاده، مولد قطره‌ای حرارتی باشد. از این شیوه در بیشتر چاپگرهای جوهرافشان<sup>۱</sup> استفاده شده است و به عنوان جوهرافشان یا حباب افشان حرارتی نام برده می‌شود. اولین جوهرافشان حرارتی تجاری موفق، توسط شرکت هیولت پاکارد و کانن<sup>۲</sup> معرفی شد. از آن زمان به بعد، فناوری جوهرافشان حرارتی به طور چشم‌گیری با افزایش دقت و سرعت، بهبود پیدا کرد. در یک جوهرافشان حرارتی برای تولید شار حرارتی بالا، یک پالس الکتریکی کوتاه (۱-۵  $\mu\text{s}$ ) به یک گرمکن برقی اعمال می‌شود. در این شرایط، جوهر فوق‌گرم می‌شود و به شرایط فراپایدار می‌رسد که منجر به شکل‌گیری یک حباب بخار می‌گردد. شکل‌گیری

---

<sup>۱</sup> Ink jet printing

<sup>۲</sup> Pakart & cannon

ناگهانی حباب بخار، باعث ایجاد یک تکانه فشاری شده که منجر به رشد قطره می گردد. رشد ناگهانی حباب، باعث جدایش قطره کوچک جوهر از نازل در نزدیکی گرمکن می شود. به محض اینکه قطره سقوط کند، نازل بنا به نیروی مویینگی دوباره پر می شود و برای پالس بعدی آماده می گردد [۲]. فناوری جوهر افشان حرارتی در هر جایی که نیاز به پاششی در حد پیکو قطرات باشد نیز استفاده می گردد. از قبیل صنعت بیوپزشکی، نمایشگرهای مسطح (تلویزیون های کریستال مایع و پلا سما) و صنعت انژکتورهای میکرو قطره. به عنوان مثال در صنعت بیوپزشکی، از آن می توان در سنتز DNA که نیاز به اندازه معین میکرو قطره ها با دقت بالا وجود دارد، استفاده کرد [۳]. کاربرد آن در صنعت نمایشگرهای مسطح نیز به علت قابلیت پوشش دهی یک پارچه اش، بسیار چشمگیر می باشد. علاوه بر این از انژکتورهای میکرو قطره ای، برای کنترل اختلاط در محفظه های احتراق موتورهای پاششی استفاده می شود. از دیگر کاربردهای فرایند برخورد قطره، اسپری خنک کننده ی سریع<sup>۱</sup> سطوح داغ (پره های توربین، دستگاه های نورد در نورد کردن برای تولید فولاد، لیزر، تراشه های نیمه هادی<sup>۲</sup> و دستگاه های الکترونیکی)، اطفاء حریق<sup>۳</sup> توسط آب پاش، کوره های زباله سوزی<sup>۴</sup>، نقاشی و پوشش دهی با اسپری، تزریق پلاسما، سم پاشی محصول<sup>۵</sup> اشاره کرد.

---

<sup>1</sup> Rapid spray cooling

<sup>2</sup> Semiconductor chips

<sup>3</sup> Fire suppression

<sup>4</sup> incinerators

<sup>5</sup> Crop spraying



شکل ۲-۱ فرآیند اسپری خنک‌کننده سریع



شکل ۳-۱ فرآیند پاشش رنگ بدنه خودرو

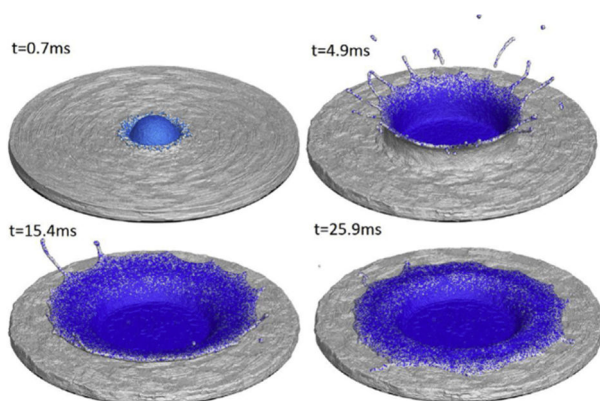
### ۶-۱ مروری بر تحقیقات پیشین (سیالات نیوتنی)

پدیده برخورد قطره به صفحه تاکنون موضوع مطالعه گسترده عددی و آزمایشگاهی بوده است. برخورد قطره به صفحه به دودسته (۱) برخورد قطره به سطح صفحه جامد (۲) برخورد قطره به لایه نازکی از سیال تقسیم می‌شود. گروه‌های بی‌بعد اصلی حاکم بر برخورد قطره عبارت‌اند از:

$$We = \frac{\rho D U_0^2}{\sigma}, \quad Re = \frac{\rho D U_0}{\eta}, \quad Oh = \frac{\mu}{(\rho \sigma D)^{1/2}} = \frac{We^{1/2}}{Re} \quad (۲-۱)$$

$$K = We \cdot Oh^{-2/5} \quad , \quad H = \frac{h_0}{D}$$

$\rho$ ،  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب چگالی، گرانیروی و کشش سطحی مایع هستند و  $D$  و  $U_0$  به ترتیب قطر قطره و سرعت برخورد هستند و  $h_0$  ضخامت اولیه‌ی فیلم مایع می‌باشد.  $We$ ،  $Re$  و  $Oh$  به ترتیب اعداد وبر، رینولدز و اهنسورگ<sup>۱</sup> و  $H$  ضخامت فیلم بی‌بعد شده را مشخص می‌کنند و  $K$  یک گروه مهم کامپوزیت می‌باشد. اثرات مربوط به جاذبه به وسیله‌ی عدد باند<sup>۲</sup>  $Bo = \rho g D^2 / \sigma$  یعنی نسبت  $D^2$  به جذر طول موئینگی  $(\sigma/\rho g)^{1/2}$  یا توسط عدد فرود<sup>۳</sup>  $Fr = U_0^2 / gD = We^2 / \rho g D^3$  مشخص می‌شود. باین حال توجه داشته باشید در پدیده‌های همراه با برخورد قطره، اثرات گرانش معمولاً اهمیت ندارند. پارامترهای بی‌بعد دیگری که اثرات زبری و رطوبت پذیری را مشخص می‌کنند در ادامه ذکر شده‌اند. این پارامترها عمدتاً مربوط به برخورد قطره روی سطوح خشک و جامد می‌باشند.



شکل ۴-۱ شبیه‌سازی عددی پاشش بر اساس معادلات نویر-استوکس. شکل‌گیری تاج و انتشار با  $We = 598$  [۴]

در مرحله‌ی اول و بخشی از مرحله‌ی دوم، یک فاز اولیه از حالات دیگر برخورد قطره روی یک سطح خشک ایجاد می‌شود (شکل ۴-۱). دیر یا زود عوامل دیگری روی کار آمده و به معرفی ویژگی‌های جدید ظاهری می‌پردازند. حالت پاشش سریع با افزایش سرعت برخورد روی یک سطح زبر سرعت می‌یابد، در نتیجه در لبه‌ی لایه‌ی مایع تولید شده توسط قطره‌ی پخش شده، قطرات کوچکی

<sup>۱</sup> Ohnesorge

<sup>۲</sup> Bond number

<sup>۳</sup> Froude number

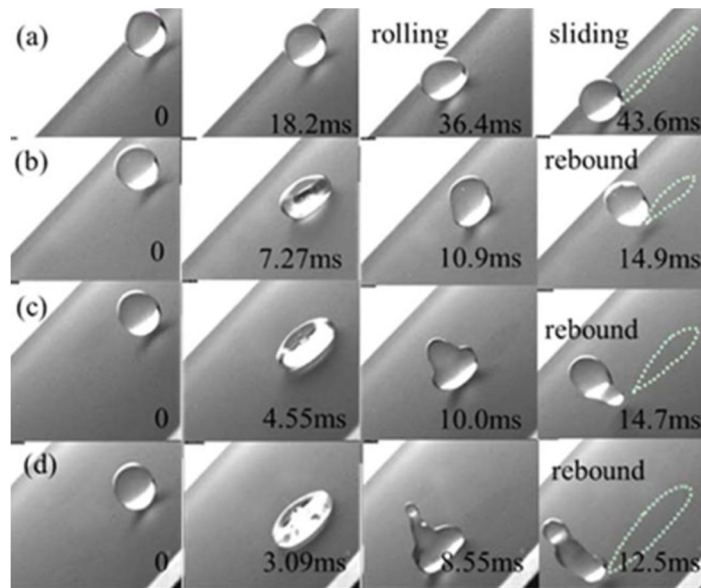
جدا می‌شوند. در پایان، قطره‌ی برخورد کرده، پخش شده و در دیواره باقی می‌ماند. چون کشش سطحی کاهش می‌یابد، لایه‌ی مایع می‌تواند از دیواره جدا شود که نتیجه‌ی آن حالت پاشش تاجی شکل است این تاج یادآور تاج‌های ثبت شده در پاشش قطرات روی فیلم‌های بسیار نازک مایع می‌باشد.

برخورد قطرات مایع روی سطوح جامد و مایع، از زمان توسعه‌ی عکاسی با سرعت بالا و فیلم‌برداری با سرعت بالا [۷-۵]، دانشمندان و عکاسان را مجذوب خود کرده است. با توجه به بهبود این تکنیک‌ها و اهمیت این موضوع، تحقیق در مورد برخورد قطره همچنان در حال گسترش است. از آنجا که پارامترهای مختلفی نتایج برخورد قطره را تحت تأثیر قرار می‌دهند، این پدیده به مسئله‌ای پیچیده تبدیل شده است. به همین دلیل باوجود پیشرفت در این زمینه، هنوز هم نیازمند تحقیق بیش‌تری هستیم. برخورد قطرات روی سطوح خشک به دلیل تأثیر بافت سطح، یعنی تر شوندگی و زبری، الگوهای جریان پیچیده‌تری را نسبت به برخورد قطرات روی سطوح خیس‌شده نشان می‌دهد. آزمایش‌های ریبو<sup>۱</sup> و همکارانش [۸] نتایج مختلفی را برای برخورد قطره روی یک دیوار شیب‌دار خشک نشان داده که در شکل ۱-۵ نمایش داده شده است. حالت جهش شامل دو مرحله است: جهش<sup>۲</sup> ناقص و جهش کامل. ریبو و همکارانش در مرحله‌ی سینماتیک، شعاع قطره را بدون در نظر گرفتن خواص فیزیکی مایع و سطح بر مبنای  $R \sim t^{1/2}$  محاسبه کردند. وابستگی به این پارامترها تنها در مرحله ته‌نشینی واقعی احساس شد. در هر دو مورد، در پایان، این قطره‌ها بر روی سطح پخش شده و در همان‌جا می‌مانند که مثالی از آن در ستون دوم شکل ۱-۵ نشان داده شده است. همچنین در ستون آخر جدایش قطره از سطح نشان داده شده است.

---

<sup>۱</sup> Rioboo

<sup>۲</sup> Rebound



شکل ۱-۵ شکل شناسی برخورد قطره روی یک سطح خشک. برگرفته از ریو و همکاران [۸].

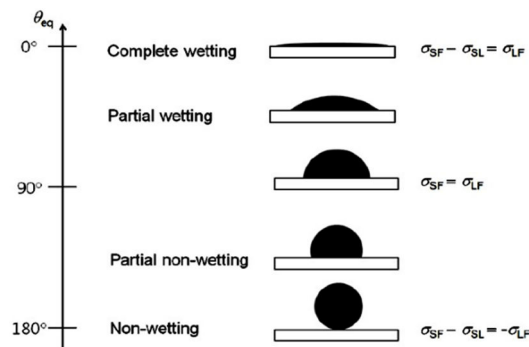
پسندیده فرد<sup>۱</sup> و همکاران [۹] طراحی و ساخت یک مولد قطره به منظور بررسی تجربی برخورد قطره به سطح را مورد بررسی قرار دادند و با ساخت دستگاهی با تولید قطره به روش پیزوالکتریک تولید قطرات با قطر یکسان را مورد مطالعه قرار دادند. پیشه ور<sup>۲</sup> و همکاران [۱۰] اثر طرح دار کردن سطح روی زاویه تماس استاتیکی را به روش DPD بررسی کردند در این تحقیق، سطح از ذرات منجمدی تشکیل شده است که حرکت ندارند و آب دوستی یا آب گریزی سطح با تغییر ضریب جاذبه نیروی بقایی بین ذرات سطح و سیال ایجاد می شود و از تابع رنگ برای اندازه گیری زاویه تماس استاتیکی استفاده می شود.

زاویه تماس تأثیر بسیار مهمی در رفتار قطره به هنگام برخورد با سطح جامد، از جمله تغییر شکل، پخش شدن و یا حتی جدا شدن قطره از روی سطح دارد. رفتار قطره در برخورد با سطح جامد، تحت تأثیر رطوبت پذیری سطح می باشد. رطوبت پذیری هر سطح به وسیله زاویه تماس بین مایع با سطح جامد مشخص می گردد. شکل ۱-۶ نشان دهنده زاویه تماس مایع - جامد در حالت سکون قطره بر روی سطح می باشد. زاویه تماس در مدل سازی عددی و تحلیلی به عنوان یک شرط مرزی مهم

<sup>1</sup> Pasandideh fard

<sup>2</sup> Pische var

به کار برده می شود.



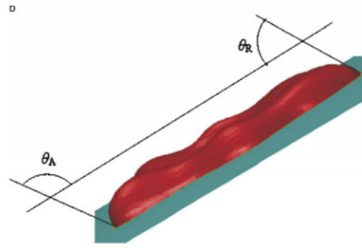
شکل ۶-۱ رفتار ترکندگی قطره مایع بر اساس زاویه تماس. [۱۱]

مخصوصاً نقش آن در برخوردهایی با انرژی اینرسی کم نسبت به انرژی ویسکوز یا موئینگی، بسیار اساسی است. زاویه تماس تعادلی ( $\theta_e$ ) به کشش‌های سطحی جامد-گاز، جامد-مایع و مایع-گاز بستگی دارد و در حالت ایستایی کامل قطره بر روی سطح، اندازه‌گیری می‌شود. زاویه تماس تعادلی منحصرأ به خواص فیزیکی سطح بستگی دارد. زاویه تماسی که در حین حرکت خط تماس مشاهده می‌گردد را زاویه تماس دینامیکی ( $\theta_d$ ) می‌نامند. زاویه تماس در شکل ۷-۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸-۱ مشاهده می‌شود، زاویه تماس دینامیکی به وجود آمده را در حین پخش شدن قطره بر روی سطح (و حرکت خط تماس به سمت فاز گاز)، زاویه تماس پیشروی ( $\theta_{adv}$ ) و در حین جمع شدن قطره (و حرکت خط تماس به سمت فاز مایع) زاویه تماس پسروی ( $\theta_{rec}$ ) می‌نامند. این زوایا می‌توانند با استفاده از روش قطره‌ی چسبیده، در سرعت خاصی از حرکت خط تماس ( $U$ ) اندازه‌گیری شوند.  $U$  نیز از طریق عدد موئینگی  $Ca = U\eta/\sigma$  تعیین می‌شود. به علت هیستریزیس<sup>۱</sup> زاویه تماس (در صورت وجود)،  $\theta_{rec} < \theta_{adv}$  می‌باشد (یعنی بدون وجود هیستریزیس  $\theta_{rec} = \theta_{adv}$  می‌باشد).

<sup>۱</sup> Hysteresis



شکل ۷-۱ زاویه تماس جامد-مایع: بر روی سطوح آبدوست (سمت راست) و آب‌گریز (سمت چپ).



شکل ۸-۱ زاویه تماس پیشروی و پسروی [۱۲].

زاویه تماس دینامیکی، برخلاف زاویه تماس تعادلی، خاصیت فیزیکی و مادی نبوده بلکه به سرعت خط تماس بستگی دارد. در مراحل مختلف برخورد قطره با سطح، زاویه تماس دینامیکی به‌عنوان شرط مرزی مهم در مدل‌سازی‌ها نقش بسزایی دارد. مورد بعدی به خاطر اثر زبری دیواره یا ناهمگنی‌های شیمیایی می‌باشد. برای قطره‌ای با حجم معین و ثابت می‌توان بزرگ‌ترین قطر  $d_r$  (بر اساس  $\theta_{rec}$ ) و کوچک‌ترین قطر  $d_a$  (بر اساس  $\theta_{adv}$ ) را تعریف کرد، که شکل تقریبی قطره به‌صورت یک کلاه کروی ناقص می‌باشد.

$$\frac{d_i}{D} = 2 \left[ \frac{\sin^3 \theta_i}{2(1 - \cos \theta_i)(2 - \cos \theta_i - \cos^2 \theta_i)} \right]^{1/3} \quad (۳-۱)$$

به ترتیب وقتی  $d_i = d_r$  است،  $\theta_i = \theta_{rec}$  و وقتی  $d_i = d_a$  است،  $\theta_i = \theta_{adv}$  می‌باشد. چیافینو<sup>۱</sup> و سونین<sup>۲</sup> [۱۲] استدلال کردند که اگر اثرات ویسکوز بیشترین مقدار انرژی جنبشی موجود را تلف می‌کند، لایه‌ای که به آرامی در حال پیشروی است، باید به قطر  $d_a$  برسد.

<sup>۱</sup> Schiaffino

<sup>۲</sup> Sonin



در مقابل، در سطح بالایی از انرژی جنبشی، پس از این که قطره پسروی را آغاز کند، قطر لایه‌ی پخش شده ممکن است از  $d_r$  بیشتر شود. توجه داشته باشید که بلافاصله بعد از این حالت شکل لایه باید کاملاً از یک کلاه کروی متفاوت باشد و زاویه تماس ممکن است به طور قابل توجهی بزرگ‌تر از  $\theta_{adv}$  باشد، زیرا حرکت خط تماس، بیشتر به علت کاهش سرعت لایه‌ی نزدیک دیواره، متوقف شده است. پس از آن یک موج موئین که احتمالاً از جلوی قطره منعکس شده، زاویه تماس را کاهش می‌دهد، درحالی که خط تماس هنوز پابرجاست. برای مایعاتی با گرانش کم، خط تماس حرکت رو به عقب خود را پس از یک تأخیر، در حدود  $(\rho D^3/\sigma)^{1/2}$ ، آغاز خواهد کرد (چند میلی‌ثانیه برای قطره‌هایی با اندازه‌ی میلی‌متری) و هنوز هم با انتشار موج موئین روی لایه همراه است. وقتی حرکت رو به عقب لایه‌ی منقبض شده به اندازه‌ی کافی کند باشد، ممکن است در  $d_r$  متوقف شود، درحالی که در سرعت‌های پسروی زیاد، لایه از  $d_r$  می‌گذرد و بین  $d_a$  و  $d_r$  به تعادل می‌رسد. تمام مقادیر متوسط زاویه تماس، به دلیل وجود هیستریزس زاویه تماس، بین  $\theta_{adv}$  و  $\theta_{rec}$  قرار دارد. در این مرحله، حالت فروپاشی همراه با پسروی، مشخصه‌ی سطوح رطوبت ناپذیر می‌باشد (  $d_a \rightarrow 0$  و  $\theta_{adv} \rightarrow 180^\circ$  ) و لایه‌ی منقبض شده به تعدادی انگشتی<sup>1</sup> تجزیه می‌شود که هر یک از این انگشتی‌ها احتمالاً به دلیل ناپایداری موئینگی، دوباره قادرند بیشتر تجزیه شوند.

انرژی سطح و انرژی جنبشی باقیمانده در لایه‌ی مایع در پایان مرحله‌ی پخش شدن، ممکن است به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد و به طور کامل در مرحله‌ی جمع شدن از بین نرود و با  $d_a$  غیر صفر دیده شود و یا با  $d_a = 0$  به یک سطح رطوبت ناپذیر میل کند. در چنین مواردی سرعت جمع شدن به اندازه‌ی کافی بالا باقی می‌ماند و در نزدیکی نقطه‌ی برخورد، لایه‌ی منقبض شده عملاً از بین می‌رود. انرژی جنبشی چنین فروپاشی‌ای هنوز هم می‌تواند برای فشردن مایع به سمت بالا کافی باشد و یک ستون مایع در حال صعود را ایجاد کند. به دلیل ناپایداری موئینگی، بخشی از این ستون می‌-

---

<sup>1</sup> Fingers

تواند در سطح باقی بماند و یک یا چند قطره‌ی کوچک را به بالا پرتاب کند (حالت جهش غیر کامل، ستون آخر در شکل ۱-۵)، و مانند یک قطره‌ی کامل از سطح جدا شود (حالت جهش کامل، آخرین خط در شکل ۱-۵). چیا فینو و سونین جهش قطره‌ی جیوه را در یک سطح شیشه‌ای و در عدد وبر  $1/88 \leq We \leq 2/41$  مورد مشاهده قرار دادند که در  $We < 1/88$  قطرات جیوه شروع به جمع شدن کردند اما روی سطح باقی ماندند. جالب است که حتی بدون برخورد قطره، پرش‌هایی شبیه به حالت جهش می‌تواند تولید شود.

کلانت<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۳] توانستند دینامیک پخش شدن قطره‌ی آب را روی سطوح فوق آب‌گریز<sup>۲</sup> اندازه‌گیری کرده و قوانین مقیاس بندی را استخراج کنند. پیشرفت‌های فنی اخیر در تکنیک جدید اشعه‌ی ایکس با سرعت بالا توسط ژانگ و همکارانش [۱۴] توسعه پیدا کرد که جزئیات جدیدی از پاشش قطره را نشان داده است. به دنبال این خط تحقیق، ریست و همکاران [۱۵] و تی-سای و همکاران [۱۶، ۱۷] نیز نشان دادند که چگونه الگوبندی میکروسکوپی در سطح، نه تنها می‌تواند پاشش را تقویت کند بلکه می‌تواند جهت‌های ترجیحی پاشش را نیز اصلاح کند، در نتیجه پاشش تاجی شکل و انگشتی‌های آن تغییر شکل می‌دهد، به‌تازگی نیز وندر وین و همکارانش [۱۸] تأثیر سطوح میکرو ساختار بر دینامیک فیلم هوای زیر قطره‌ی آب را، بعد از برخورد مورد بررسی قرار دادند. به‌رغم این بهبود قابل توجه در توانایی‌های محاسباتی در سال‌های اخیر تا به امروز هیچ شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌ای از برخورد قطره روی سطح جامد در سرعت زیاد وجود ندارد تا به خوبی با آزمایش‌ها مقایسه شود.

یکی از کارهای متداول در زمینه‌ی بررسی برخورد قطره، پیش‌بینی ماکزیمم قطر پخش‌شدگی است. ماکزیمم پخش‌شدگی یک عامل مهم در تعیین عملکرد اسپری خنک‌کننده است و هم‌چنین در تعیین کیفیت سطح پرداخت‌شده در پوشش دهی و رنگ‌آمیزی با اسپری و جوهرافشان پرنتر

---

<sup>1</sup> Clanet

<sup>2</sup> Super-hydrophobic

نقش مهمی دارد [۱۹]. علاوه بر این، برآورد دقیق ماکزیمم پخش شدگی، در پیش‌بینی تمایل قطره به جهش ضرورت دارد زیرا انرژی سطح در این حالت نشان‌دهنده‌ی انرژی موجود برای جمع شدن قطره می‌باشد. روش‌های به کار گرفته‌شده جهت به دست آوردن ماکزیمم قطر پخش شدن برای سیالات نیوتنی در حالت کلی به سه دسته تقسیم می‌شود: قوانین مقیاس بندی بقای انرژی و بقای اندازه حرکت، بقای انرژی به دلیل ساده بودن و توانایی آن در تولید رابطه‌ای تحلیلی، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. این روش بر این واقعیت استوار است که مجموع انرژی جنبشی  $E_{K1}$ ، گرانشی  $E_{G1}$  و انرژی سطحی  $E_{S1}$  قطره در برخورد، باید با مجموع انرژی جنبشی، انرژی گرانشی، انرژی سطحی و انرژی ازدست‌رفته در اثر تلفات لزجت یعنی  $E_{K2}$ ،  $E_{G2}$ ،  $E_{S2}$  و  $E_{D2}$  برای قطره‌ی پخش‌شده برابر باشد. به عبارتی خواهیم داشت:

$$E_{K1} + E_{G1} + E_{S1} = E_{K2} + E_{G2} + E_{S2} + E_{D2} \quad (۴-۱)$$

اگر قطره به حداکثر قطر خود در پایان مرحله‌ی پخش شدن برسد، قبل از مرحله‌ی آرامش یا نوسان، پس‌از آن انرژی جنبشی قطره، لحظه‌ای صفر می‌شود. از آنجاکه سهم انرژی گرانش برای یک قطره‌ی خیلی کوچک قابل اغماض است، این معادله به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$E_{K1} + E_{S1} = E_{S2} + E_{D2} \quad (۵-۱)$$

در این میان تنها قوانین مقیاس بندی هستند که برای توجیه منطقی مشاهدات تجربی پیشنهاد شده‌اند. در مورد مرحله‌ی قبل از پاشش، در مقالات قوانین مقیاس بندی متعددی به‌منظور توجیه پخش شدن قطره‌ی نیوتنی روی سطح جامد پیشنهاد شده است [۲۰]. با فرض این که تمام انرژی جنبشی از طریق اصطکاک ویسکوز با سطح از بین برود، حداکثر میزان پخش شدن به‌صورت  $D_{max} \sim D_0 Re^{1/5}$  پیشنهاد شده که عدد رینولدز با چگالی قطره  $\rho$ ، سرعت اولیه‌ی  $U_0$ ، قطر اولیه  $D_0$  و گرانیوی قطره‌ی مایع  $\mu$ ، به‌صورت  $Re = \rho U_0 D_0 / \mu$  تعریف شده است. برای سیالات غیر لزج،

انتظار می‌رود که انرژی جنبشی به‌طور کامل به پخش شدن انتقال یابد، که ارزش انرژی آن متناسب با کشش سطحی مایع  $\sigma$  خواهد بود. بنابراین یک مقیاس بندی با عدد وبر  $We = \rho D_0 U_0^2 / \sigma$ ، به صورت  $D_{max}/D_0 \sim We^{1/2}$  انتظار می‌رود. باین‌حال، کلانت و همکارانش [۱۳] نشان دادند که میزان پخش شدن، یعنی  $D_{max}/D_0 \sim We^{1/4}$ ، که آن‌ها آن را به‌طور فیزیکی با موازنه‌ی کشش سطحی و اینرسی توضیح دادند، بسیار پایین‌تر است.

سیکالو و همکارانش [۲۱] با بررسی برخورد قطرات آب و گلیسرین در زوایای مختلف نشان دادند پدیده جهش قطره در زوایای بزرگ‌تر بر روی سطوح نرم و خشک اتفاق می‌فتد اما در سطوح زیر اثری از جهش نمایان نبوده است. همچنین بووا و همکارانش [۲۲] مطالعه آزمایشگاهی سیکالو و همکارانش را به‌صورت مدل عددی شبیه‌سازی کردند و دریافتند که مدل زاویه تماس استاتیکی قادر به پیش‌بینی رفتار پخش‌شدگی قطره در سطوح آب‌گریز می‌باشد اما برای سطوح آب‌دوست باید از مدل زاویه تماس دینامیکی استفاده کرد. لیانگ و همکارانش [۲۳] به بررسی سیالات نیوتنی محلول آب و گلیسرین و بوتانول بر روی سطوح شیب‌دار در محدوده زاویه ۱۵ تا ۶۰ درجه پرداختند و نشان دادند که لزجت سیال و تنش‌های سطحی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر رفتار ماده در هنگام پخش شدن دارند همچنین با افزایش سرعت برخورد، سرعت پخش و جمع شدن سیال افزایش می‌یابد. چوی و همکارانش [۲۴] با تجزیه بردار سرعت به دو بردار سرعت مماسی و عمود بر نقطه برخورد تأثیرات هرکدام از سرعت‌ها را بر پخش شدن و جمع شدن قطره بر روی سطوح آب‌گریز بررسی کردند

#### ۷-۱ تحقیقات پیشین (غیر نیوتنی)

همان‌طور که توضیح داده شد تقریباً تا یک دهه‌ی قبل، اغلب مطالعات در مورد برخورد قطره بر سیالات نیوتنی متمرکز شده بود. با این حال، در سال‌های اخیر تحقیق درباره‌ی برخورد قطره‌ی غیر نیوتنی، به دلیل مصارف زیاد سیالات غیر نیوتنی در بسیاری از بخش‌های صنعتی، رشد قابل‌توجهی داشته است. محققان مختلف دینامیک برخورد سیالات غیر نیوتنی مانند سیالات ویسکوالاستیک،

سیالات دارای تنش تسلیم (پلاستیک بینگهام<sup>۱</sup>) و برشی رقیق شونده (شبه پلاستیک<sup>۲</sup>) را مورد بررسی قرار داده‌اند. برگرون و همکارانش [۲۵] و چند محقق دیگر [۲۶-۲۸] نشان دادند که جهش یا پاشش قطره با افزودن مقدار کمی از افزودنی‌های پلیمری به‌طور قابل توجهی خنثی می‌شود و در نتیجه نشست قطره‌ی ویسکوالاستیک بر روی سطح جامد به‌طور مؤثری بهبود داده شد. نوروزی<sup>۳</sup> و همکاران [۲۹] برخورد قطره بر روی سطوح جامد صاف شامل شیشه و پلکسی گلس را برای سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش سرعت برخورد به سطح میزان حداکثر پخش‌شدگی قطره بر روی هر دو سطح شیشه و پلکسی گلس بسته به آبدوستی آن زیاد می‌شود. رفعی و همکارانش [۳۰] بر روی دو خاصیت سیالات غیر نیوتنی یعنی گرانروی و تنش‌های نرمال تمرکز کرده و وابستگی نرخ برش به این دو خاصیت را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که به دلیل حضور تنش‌های نرمال، نیرویی ایجاد می‌شود که بر مقاومت ویسکوز در نزدیکی خط تماس غلبه می‌کند. آن‌ها همچنین نشان دادند که قانون تر<sup>۴</sup> در توصیف رفتار سیالات برشی رقیق شونده بسیار قوی عمل می‌کند. در ادامه نیز رفعی و بون [۳۱] به بررسی افزودن پلیمر و سورفاکتانت پرداختند که هر دو منجر به کاهش سرعت پخش شدن سیال شد و استفاده از نوع خاصی از سورفاکتانت‌ها (تریسیلوکسان<sup>۵</sup>) پدیده‌ی فرا پخش‌شدگی (پدیده‌ای که در آن قطره سریع‌تر از حالتی که سایر سورفاکتانت‌ها استفاده شده‌اند پخش می‌شود) را به دنبال داشت. اخیراً جرمن و برتولا [۳۲]، لو و فورتر [۳۳] مشاهده کردند که وجود تنش تسلیم، مانع از پخش شدن یا جمع شدن قطره می‌گردد و این پدیده با افزایش تنش تسلیم شدت می‌یابد. جرمن و برتولا ثابت کردند که در مورد سیالات برشی رقیق شونده، ماکزیمم قطرهای پخش‌شدگی معمولاً بسیار بزرگ‌تر از آن دسته از قطرات نیوتنی هستند که حتی هردوی آن‌ها در برخورد، مورفولوژی یکسانی از خود نشان داده‌اند.

---

<sup>1</sup> Bingham plastic

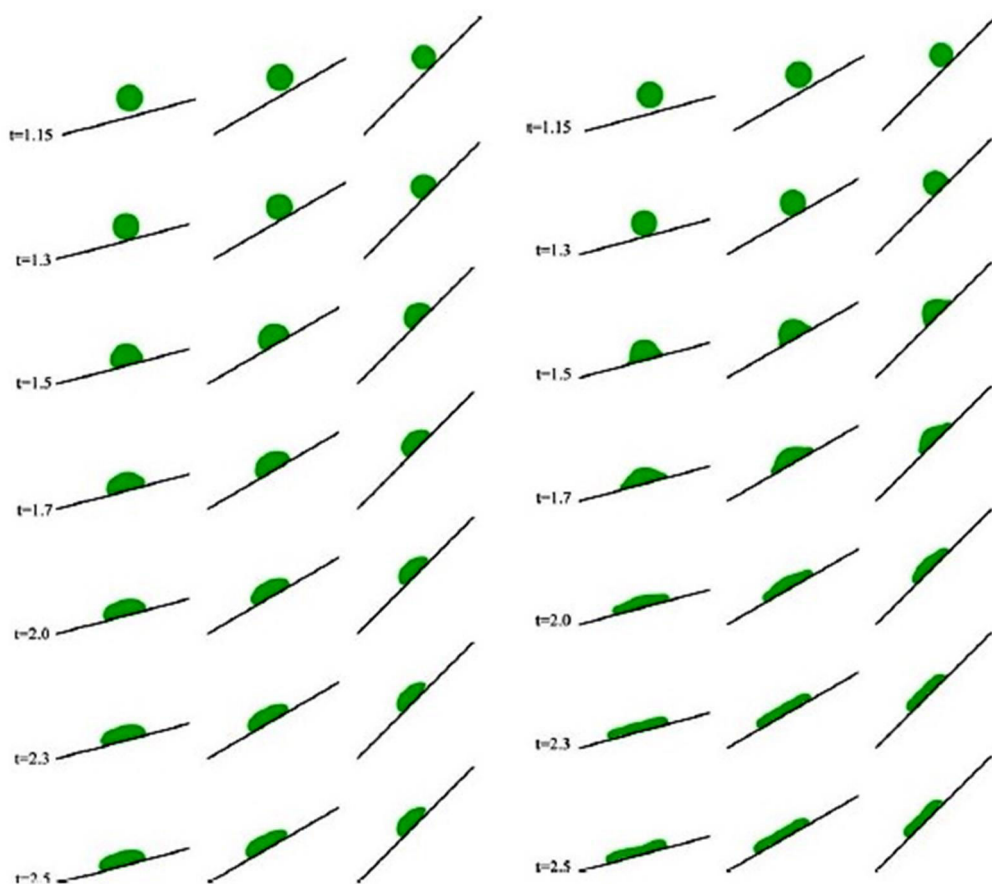
<sup>2</sup> Pseudoplastic

<sup>3</sup> Noroozi

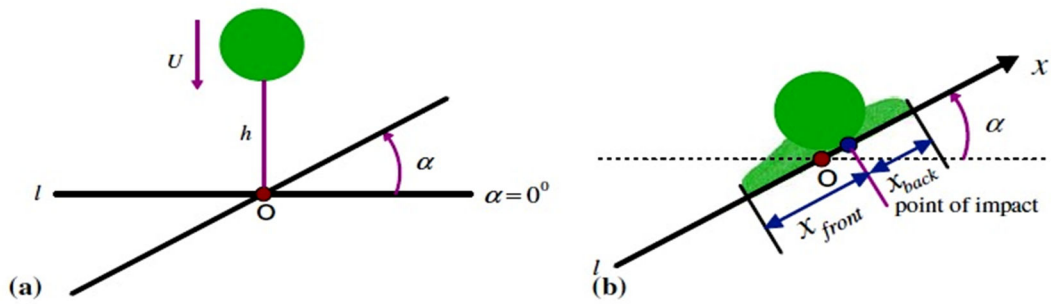
<sup>4</sup> Tanner's Law

<sup>5</sup> Trisiloxane

در همین راستا، دیچلت و همکاران [۳۴] و آن و لی [۳۵] گزارشی ارائه کردند که نشان می‌داد برای درک رفتار قطره‌ی برشی رقیق شونده بعد از برخورد به تحلیلی گذرا نیاز است زیرا گرانروی مایع در طول کل فرایند برخورد تغییر می‌کرد. سپس آن و لی [۳۶] در راستای گسترش کارهای قبلی خود به بررسی برخورد قطره‌ی برشی رقیق شونده بر روی سطوحی با میزان تر شوندگی مختلف پرداختند و رابطه‌ی تجربی جدیدی را برای ماکزیمم قطر پخش‌شدگی ارائه کردند. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، بررسی برخورد قطره در ابعاد میکرون به دلیل اهمیت آن در جوهرافشان پرنتر بسیار رایج است و به همین دلیل تلاش‌های متعددی در این زمینه بر روی سیالات غیر نیوتنی نیز صورت پذیرفته است. اخیراً نیز محققان به بررسی دقیق‌تر زاویه و خط تماس پرداخته‌اند [۳۷-۴۱]

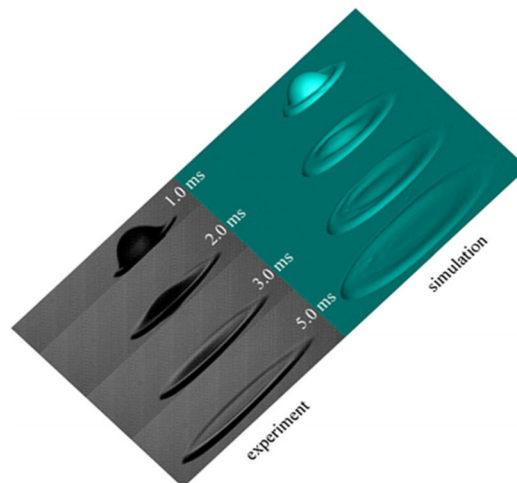


شکل ۹-۱ به تصویر کشیدن سیال در زمان‌های بی‌بعد مختلف. سمت راست) شبیه‌سازی SPH برای یک قطره‌ی Oldroyd-B در زوایای برخورد ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه. سمت چپ) شبیه‌سازی SPH برای یک قطره‌ی نیوتنی در زوایای برخورد ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه [۴۲].



شکل ۱۰-۱ الف) حالت اولیه‌ی برخورد یک قطره و ب) نمای جانبی یک قطره روی صفحه‌ی جامد و شیب‌دار [۴۲].

علاوه بر این، جیانگ و همکارانش [۴۲] با بهره‌گیری از روش SPH<sup>۱</sup> و افزودن تنش‌ی کمکی به معادله‌ی اندازه حرکت به شبیه‌سازی برخورد و پخش قطره‌ی ویسکوالاستیک بر روی صفحه‌ای شیب‌دار پرداختند. نمونه‌هایی از این شبیه‌سازی در شکل ۹-۱ و شکل ۱۰-۱ نشان داده شده است. هم‌چنین رحیمی و ویس [۴۳] دینامیک برخورد سیالات غیر نیوتنی پیچیده‌تر (یعنی مواد برشی رقیق شونده‌ی دارای تنش تسلیم و الاستیسیته) را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند.



شکل ۱۱-۱ تصویر شبیه‌سازی عددی مسئله‌ی برخورد قطره به صورت سه‌بعدی [۵۸].

<sup>۱</sup> Smoothed particle hydrodynamics

همان‌طور که در شکل ۱-۱۱ مشاهده می‌شود، اوشی و همکارانش [۴۴] نیز با استفاده از مدل XPP<sup>۱</sup>، کاربرد روش تفاضل محدود ضمنی<sup>۲</sup> را در دو جریان سطحی آزاد یعنی برخورد قطره و جت ناپایدار<sup>۳</sup> نشان دادند. علاوه بر این، فیگوریدو<sup>۴</sup> و همکارانش [۴۵] با به‌کارگیری مدل آلدروید-بی<sup>۵</sup> و بهبود روش XPP که قبل از آن توسط فیگوریدو [۴۶] ارائه شده بود، به‌صورت سه‌بعدی به بررسی عددی برخورد قطره سیال ویسکوالاستیک پرداختند.

کارهای محدودی نیز به‌صورت تحلیلی صورت گرفته است برای مثال استارو و همکارانش [۴۷] به کمک روابط تحلیلی، شعاع پخش‌شدگی و زاویه تماس مایعات غیر نیوتنی اُستوالد-دی‌واله<sup>۶</sup> را محاسبه کرده و داندایات و سینگ هم با به‌کارگیری روشی مبتنی بر انرژی، مدلی تئوری برای پخش شدن مایع پاورلا ارائه کردند. به‌تازگی نیز سینگ و داندایات [۴۸] با بهره بردن از روش انرژی موفق به پیدا کردن رابطه‌ای میان زبری سطح، نرخ پخش شدن قطره و زاویه تماس شدند و بدین‌وسیله نشان دادند که قطره سیال غیر نیوتنی بر روی سطح زبر کندتر از سطح صاف پخش می‌شود. به‌علاوه آن‌ها مشاهده کردند که بر روی سطح زبر سرعت پخش شدن سیال برشی غلیظ شونده نسبت به سیال برشی رقیق شونده بیشتر است. در این میان بیوله و برتولا [۴۹] با بهره‌گیری از روش پردازش تصویر و ابزار زاویه‌سنج، طرحی محاسباتی برای دستیابی به زاویه تماس معرفی کردند که در این صورت دیگر نیازی به برازش لبه با منحنی‌های تحلیلی نیست. همچنین برتولا و وانگ [۵۰] با بررسی زاویه تماس دینامیکی برای محلول‌های پلیمری دریافتند که با افزایش غلظت پلیمر زاویه تماس دینامیکی افزایش‌یافته و همچنین زاویه تماس در حالت جمع شدن قطره محلول پلیمری کمتر از حالت مشابه برای آب مقطر است. باین‌وجود تلاش‌های فراوان، تحقیق در مورد برخورد قطره‌ی غیر نیوتنی هنوز هم کاملاً ناقص است و اثرات خواص رئولوژیک سیال غیر نیوتنی بر رفتار

<sup>1</sup> eXtended Pom-Pom model

<sup>2</sup> implicit finite difference method

<sup>3</sup> jet buckling

<sup>4</sup> Figuieredo

<sup>5</sup> Oldroyd-B

<sup>6</sup> Non-Newtonian Ostwald-de Waele



قطره پیش از برخورد همچنان فاصله‌ی زیادی تا شناخت کامل این پدیده دارد.

### ۸-۱ معرفی تحقیق حاضر

در این بخش ابتدا به معرفی تحقیق حاضر و بیان مشخصات کلی آن خواهیم پرداخت. سپس به اهمیت، کاربردها و موارد نوآوری موضوع پرداخته می‌شود و در پایان نیز مروری اجمالی بر ساختار کلی تحقیق حاضر صورت می‌گیرد.

### ۹-۱ مشخصات کلی پژوهش

در این تحقیق برخورد قطره مایعات نیوتنی (آب و گلیسرین) و نوع خاصی از قطرات غیر نیوتنی (سیالات باگر حاصل از ترکیب پلی‌آکریلامید، آب و گلیسرین) بر روی سطوح جامد، شیب‌دار و خشک (پلکسی‌گلاس و استیل) به‌طور آزمایشگاهی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. برای انجام این آزمایش، تجهیزات به‌گونه‌ای تعبیه و جایگذاری شده‌اند که قطرات بر روی سطحی شیب‌دار برخورد کنند و دوربین تصاویر را بدون هیچ‌گونه زاویه‌ای نسبت به سطح تهیه کند تا قطر قطره نیز به‌طور مستقیم از تصاویر به دست آید. از طرفی از آنجاکه دمای محیط و دمای سطح تأثیر بسیار قابل‌توجهی بر روی نتایج آزمایش دارد، در تمام آزمایش‌ها دمای محیط در  $25 \pm 0.3^\circ\text{C}$  ثابت نگه‌داشته شده است. برای تشکیل قطره‌ها، ابتدا سیال مورد نظر توسط پمپ به درون سوزن هدایت شده و سپس با قطع کردن جریان پمپ این امکان به وجود می‌آید که قطره در اثر وزن خود و بدون سرعت اولیه سقوط کند. در این تحقیق اثر لزجت و الاستیک بودن سیال، سرعت برخورد و زاویه سطح و میزان آب‌دوستی و زبری سطح بر رفتار قطره در مرحله پخش شدن و جمع شدن بررسی شده است.

## ۱-۱۰ اهمیت و کاربرد موضوع

مطالعه جنبه‌های گسترده برخورد قطره روی سطوح جامد به دلیل کاربردهای روزافزون آن در زمینه‌های مختلف بسیار مورد توجه قرار گرفته است. وجود کاربردهای وسیع و متنوعی که با تشکیل، حرکت و برخورد قطره سروکار دارند، تأثیر مهمی در توجه به این موضوعات و پیشرفت آن‌ها داشته باشد. فرایندهای صنعتی بسیاری وجود دارند که برخورد قطره با سطح در آن‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. به‌طور مثال می‌توان به برخورد قطرات جوهر با سطح کاغذ در پرینترها، سم‌پاشی محصولات کشاورزی، اسپری خنک‌کننده سطوح داغ، پوشش دهی سطوح در تولید محصولات نظیر شیرآلات و سی‌دی‌ها، پاشش رنگ‌بر روی سطوحی مانند بدنه اتومبیل و نیز رسوب‌گذاری قطرات حاوی ذرات و نحوه گسترش و رسوب‌گذاری قطرات مذاب فلزات بر روی سطوح جامد گوناگون اشاره کرد. نمونه‌های دیگری از کاربردهای پدیده‌ی برخورد قطره نیوتنی و غیر نیوتنی بر روی سطح نیز وجود دارند که در ابتدای این فصل نیز به آن‌ها اشاره شده است. به‌طور مثال وجود کاربردهای فراوان این پدیده در زمینه‌هایی نظیر پزشکی، بیومکانیک و نقش آن در تحولات فیزیکی و شیمیایی، سبب افزایش اهمیت این موضوع در زندگی روزمره و فناوری روز دنیا گردیده است.

## ۱-۱۱ جنبه‌های نوآوری

در این پژوهش با توجه به اهمیت موضوع، بررسی و مطالعه‌ی آزمایشگاهی برخورد قطره ویسکوالاستیک و تأثیر خاصیت الاستیک آن‌ها بر روی سطح جامد شیب‌دار، مدنظر قرار گرفته است. در مطالعات پیشین، پدیده‌ی برخورد قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی با سطح جامد شیب‌دار به‌صورت تئوری، عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است، اما در این میان سیالات ویسکوالاستیک به دلیل پیچیدگی آن‌ها در ساخت، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از آنجاکه تشکیل، سقوط و برخورد قطره ویسکوالاستیک با سطح نتیجه‌ی برهم‌کنش چندین نیرو می‌باشد و از طرفی نتیجه‌ی برخورد به‌شدت تحت تأثیر عواملی چون لزجت سیال، کشش سطحی، خواص رئولوژی و خصوصیات سطح

قرار دارد، این پدیده از جمله مسائل بسیار پیچیده و جذاب در علم مکانیک سیالات بوده و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردیده است، به طوری که امروزه مورد توجه بسیاری از پژوهشگران واقع شده است. بسیاری از عوامل مؤثر بر این پدیده به یکدیگر وابسته هستند و امکان تفکیک آن‌ها از یکدیگر و بررسی اثر هر کدام به صورت جداگانه وجود ندارد؛ بنابراین ثابت نگه داشتن هر کدام از این پارامترها کمک زیادی به ما خواهد کرد. سیالات با گر با وجود پیچیدگی در ساخت، چون لزجت آن‌ها با تغییرات تنش برشی تقریباً ثابت می‌ماند، تحلیل رفتار قطره غیر نیوتنی را ساده‌تر کرده و اجازه می‌دهند تا اثر سایر پارامترهای مؤثر در پدیده برخورد با دقت و اطمینان بیشتری بررسی شود. علاوه بر این، از آنجاکه برخورد قطره با سطح در سرعت‌های بالا به واقعیت نزدیک‌تر و در نتیجه از اهمیت بیشتری برخوردار است، در تحقیق حاضر، آزمایش‌ها در اعداد وبری که بزرگ‌تر از مطالعات پیشین می‌باشد انجام شده است (قطرات نیوتنی  $245 \leq We \leq 545$  - قطرات غیر نیوتنی  $295 \leq We \leq 516$ ).

## ۱-۱۲ مروری بر فصول پایان‌نامه

مطالعه حاضر بدین ترتیب ادامه می‌یابد که در فصل دوم تجهیزات آزمایشگاهی و مواد مورد آزمایش معرفی می‌گردد. در این تحقیق از یک دوربین پرسرعت که قادر به ثبت ۸۰۰۰ فریم<sup>۱</sup> بر ثانیه می‌باشد، استفاده شده است. برای استخراج اطلاعات پایه‌ای همچون قطر، حجم و سرعت قطرات از تصاویر، از نرم‌افزار پردازش تصویر متلب<sup>۲</sup> استفاده شده و کدی در برنامه متلب نوشته شده است. آزمایش‌ها بر روی دو مایع نیوتنی و دو مایع غیر نیوتنی انجام شده است.

در فصل سوم به بحث و بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی قطرات پرداخته می‌شود. ابتدا نتایج اولیه همچون قطر قطره، حجم آن و سرعت قطره در لحظه برخورد ارائه شده و سپس به منظور مقایسه رفتار قطرات غیر نیوتنی با یکدیگر و همچنین مقایسه قطرات نیوتنی با غیر

<sup>1</sup> Frame

<sup>2</sup> Matlab

نیوتنی، نمودارهای قطر بی بعد شده برای تمام قطرات رسم شده و مورد بحث قرار می گیرد. در این راستا اثر شش عامل یعنی لزجت و الاستیک بودن سیال، سرعت برخورد و زاویه صفحه و آبدوستی و زبری سطح بر رفتار قطرات در مراحل پخش شدن و جمع شدن مورد بررسی قرار می گیرد. مشاهده می شود که با افزایش سرعت برخورد یا به عبارتی افزایش عدد وبر حداکثر میزان پخش شدگی قطره افزایش می یابد همچنین سیالات غیر نیوتنی به دلیل خاصیت الاستیک در مقایسه با سیالات نیوتنی هم لزجت خود به میزان کمتری پخش شده اما سرعت جمع شدن آنها بیشتر از سیالات نیوتنی است. نهایتاً در فصل چهارم، نتیجه گیری از تحقیق اخیر و پیشنهادهایی جهت ادامه تحقیق حاضر ارائه می شود.

## فصل دوم

معرفی تجهیزات آزمایشگاهی و خواص مواد

مورد استفاده در آزمایش

تجهیزات مناسب و به‌روز آزمایشگاهی، نیاز اساسی بشر در انجام هرچه بهتر و دقیق‌تر مطالعات هستند. دقت بالا و قابلیت انعطاف‌پذیری تجهیزات آزمایش موجب کوتاه شدن زمان آزمایش‌ها و افزایش امکان تکرار آن‌ها می‌گردد. یکی از ابزارهایی که زمینه‌ی مطالعات جدیدی را فراهم نموده و در بهبود نتایج آزمایشگاهی پیشین نقش بسزایی داشته است دوربین‌های پرسرعت هستند.

با استفاده از این دوربین‌ها می‌توان پدیده‌هایی را که وقوع آن‌ها در مدت‌زمانی بسیار کوتاه رخ می‌دهند، ثبت و مورد مطالعه قرار داد. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، پدیده‌هایی همچون انفجار، جریان‌های اسپری و برخورد قطرات با سطوح از جمله وقایعی در مکانیک سیالات هستند که وقوع آن‌ها در کسری از ثانیه رخ می‌دهد و امروزه روش‌های پردازش تصاویر کمک قابل‌توجهی به شناخت و مطالعه هرچه بهتر آن‌ها نموده است.

مبنای مطالعه‌ی حاضر، پردازش تصاویر حاصل از دوربین پرسرعتی است که در ادامه ویژگی‌های آن بیان می‌گردد. همچنین سایر تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها معرفی و درباره ابزارهای ساخته‌شده نیز توضیح داده می‌شود. در قسمت انتهایی این فصل مواد مورد استفاده در آزمایش‌ها معرفی و درباره خواص و ویژگی‌های آن‌ها بحث می‌شود.

## ۲-۲ تجهیزات آزمایش

### ۱-۲-۲ دوربین پرسرعت

مبنای تمامی آزمایش‌ها صورت گرفته عکس‌برداری از حرکت قطرات و سپس پردازش تصاویر می‌باشد. بدین منظور از یک دوربین پرسرعت (pco.dimax S1) CMOS<sup>۱</sup> استفاده شده است که در

<sup>۱</sup> Complementary metal-oxide-semiconductor

بالاترین سرعت توانایی ثبت ۴۵۰۰ تصویر بر ثانیه را دارا است. رزولوشن<sup>۱</sup> دوربین قابلیت تغییر از ۲۴۰×۱۶ تا ۱۰۰۸×۱۰۰۸ را دارا می‌باشد که با افزایش سرعت تصویربرداری به دلیل محدودیت های حافظه، به طور طبیعی رزولوشن کم می‌شود. برای این دوربین نیز در پایین‌ترین رزولوشن یعنی ۲۴۰×۱۶، سرعت ۱۵۲۸۱۱ تصویر بر ثانیه را خواهیم داشت. دوربین در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۲ دوربین پرسرعت CMOS مدل pco.dimax S1

محدوده زمانی نوردهی این دوربین از ۲/۵ تا ۴۲ میلی‌ثانیه می‌باشد و قابلیت کنترل هوشمند باتری را دارد. این دوربین برای ذخیره تصاویر نیز به حافظه داخلی ۳۲ GB مجهز است و رابط‌های آن شامل USB 2.0، USB 3.0 می‌باشد.

در شکل ۲-۲ می‌توان یک نمونه از تصاویر قطرات منتخب را مشاهده نمود. ابعاد تصویر واقعی ۳ × ۳ سانتی‌متر مربع است که با توجه به اینکه از رزولوشن ۷۲۰×۷۲۰ و سرعت ۸۰۰۰ تصویر بر ثانیه برای تصویربرداری استفاده شده است، می‌توان نتیجه گرفت هر پیکسل فضایی معادل ۰/۰۴ میلی‌متر را پوشش می‌دهد. استفاده از چنین رزولوشن بالایی در هنگام تصویربرداری خطای محاسبات قطر و پخش‌شدگی قطره را به میزان قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. (دقت نتایج آزمایش شده ۹۷٪ است)

<sup>1</sup> resolution



شکل ۲-۲ نمونه‌ای از تصاویر تهیه‌شده از قطره.

یکی از نکات قابل توجه در استفاده از دوربین، نورپردازی موردنیاز آن است. بدین منظور از دو نورافکن ۲۰۰۰ وات UNIMAT استفاده شده است. در تأمین روشنایی موردنیاز باید به این نکته توجه داشت که نورپردازی به گونه‌ای باشد که مرزهای قطره از فضای اطراف آن کاملاً قابل رؤیت باشند. در غیر این صورت نقاطی نورانی در مرز قطره مشاهده خواهد شد که پردازش تصویر را دشوار کرده و نتایج دقیقی به دست نخواهد آمد. در آزمایش‌های صورت گرفته در این مطالعه، پس از انجام بررسی‌های لازم، نورپردازی از پشت قطره به عنوان بهترین گزینه جهت تصویربرداری انتخاب شده است. زیرا در این حالت مرزها به خوبی از محیط قابل تفکیک هستند و فقط ممکن است نقاطی نورانی داخل قطره مشاهده شوند که این نقاط به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر به آسانی برطرف می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود، کنترل عملکرد دوربین توسط نرم‌افزار CamWare V3.13 صورت می‌گیرد که پس از نصب بر روی کامپیوتر به واسطه‌ی آن می‌توان کلیه تنظیمات مطلوب را بر روی دوربین اجرا کرد. اطلاعات ضبط‌شده توسط دوربین را می‌توان با فرمت‌های مختلفی نظیر TIFF، JPEG، AVI، WMV و غیره ذخیره‌سازی کرد. در این پژوهش از فرمت JPEG برای ذخیره کردن تصاویر استفاده شده است





شکل ۳-۲ نورافکن ۲۰۰۰ وات شرکت UNIMAT

به همراه دوربین از یک لنز Nikon مدل AF-S برای آزمایش‌ها استفاده شده است. این لنز ماکرو مخصوص عکاسی و فیلم‌برداری از نزدیک<sup>۱</sup> (تا بزرگنمایی ۱:۱) 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 ۴-۲ لنز مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲ لنز مورد استفاده به همراه دوربین و نمای داخلی آن

## ۲-۲-۲ پمپ تزریق سرنگی

در این آزمایش از یک دستگاه پمپ تزریق سرنگ<sup>۲</sup> JMS مدل SP-500 (شکل ۵-۲) استفاده شده است. دستگاه پمپ سرنگی جهت به‌کارگیری انواع سرنگ‌ها طراحی شده است. این دستگاه با توجه به ابعاد سرنگ استفاده‌شده، قابلیت تزریق مقدار معینی محلول با سرعت‌های مختلف را دارا می‌باشد. به‌طور 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 شناخته‌شده است. علاوه بر این، از این دستگاه می‌توان در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی به‌منظور تحقیق بر روی

<sup>1</sup> Close up

<sup>2</sup> Syringe pump

موضوعات مختلف از جمله نفت، گاز، مواد شیمیایی، رنگ‌ها و کلیه‌ی آزمایش‌ها مرتبط با تشکیل و تزریق قطره بهره‌های فراوان برد. پمپ تزریق سرنگ JMS مدل SP-500 پرفروش‌ترین پمپ سرنگ در ایران است که ساخت کشور ژاپن بوده و قابلیت استفاده با کلیه سرنگ‌های داخلی با سایزهای مختلف (۱۰، ۲۰، ۴۰، ۳۰ و ۵۰ سی‌سی) را دارد.



شکل ۲-۵ پمپ تزریق سرنگ JMS مدل SP-500

این پمپ دارای صفحه نمایش LED هفت قسمتی است که اطلاعاتی شامل سطح انسداد، نوع سرنگ، نرخ جریان برحسب میلی‌لیتر بر ساعت، مجموع حجم تزریق شده (۹۹۹/۹-۰/۱ میلی‌لیتر)، هشداردهنده‌های مختلف سرعت، گرفتگی، نزدیک شدن به انتهای تزریق، کامل شدن تزریق و ضعیف بودن باتری را نمایش می‌دهد. به‌علاوه این پمپ مجهز به پورت انتقال اطلاعات RS-232 و باتری شارژی داخلی می‌باشد.

## ۲-۲-۳ ترازو با دقت بالا

تمام نمونه‌برداری‌ها توسط ترازوی شرکت RADWAG مدل PS 510/C/1 (شکل ۲-۶) با دقت ۰/۰۰۱ گرم انجام‌گرفته شده است. بیش‌ترین اهمیت این دقت بالا، در ساخت پلیمر با غلظت‌های پایین نمایان شده است.



شکل ۲-۶ ترازوی مدل PS 510/C/1 محصول شرکت RADWAG.

## ۲-۲-۴ همزن هات پلیت<sup>۱</sup>

سیال غیرنیوتنی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، از سه قسمت تشکیل شده است: آب مقطر به‌عنوان حلال، ماده پلیمری (پلی‌آکریلامید<sup>۲</sup>)، و گلیسرین به‌عنوان ماده لزج کننده. برای همگن ساختن ترکیب فوق به همزنی با سرعت‌های دورانی کم نیاز است. در این آزمایش نیز از همزن هات پلیت IKA RCT (شکل ۲-۷ مشاهده شود) استفاده شده که این خاصیت را داراست. 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.



شکل ۲-۷ همزن هات پلیت IKA RCT.

برای ساختن محلول‌های پلیمری از سرعت دورانی ۱۲۰-۱۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. علاوه بر این به‌منظور جلوگیری از هم‌پاشی ماده ویسکوالاستیک از تنظیم دمای دستگاه خودداری کرده و تمام محلول‌ها در دمای ۲۴-۲۶ درجه سانتی‌گراد تهیه شده‌اند.

<sup>1</sup> Hot plate stirrer

<sup>2</sup> polyacrylamide

## ۲-۲-۵ ویسکومتر

برای محاسبه‌ی لزجت سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی موجود در آزمایش‌ها و همچنین تغییر لزجت برحسب نرخ برش برای محلول‌های پلیمری از ویسکومتر کمپانی Brookfield مدل DVE-LV (شکل ۲-۸) استفاده شده است. محدوده مجاز این دستگاه ۱-۲۰۰۰۰۰ 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 (ظرف ظرف بیش از دو برابر قطر اسپیندل نباشد) و دما ثابت نگه داشته شود.



شکل ۲-۸ ویسکومتر مدل DVE-LV شرکت Brookfield

## ۲-۲-۶ رئومتر<sup>۳</sup>

همان‌طور که در شکل ۲-۹ مشاهده می‌شود، برای اندازه‌گیری خواص رئومتری سیالات غیر-نیوتنی منتخب در این تحقیق، از یک دستگاه رئومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar استفاده شده است. تمام آزمایش‌های رئومتری توسط آزمایشگاه مرکزی شاهرود انجام شده است.

<sup>1</sup> Centipoise

<sup>2</sup> Spindle

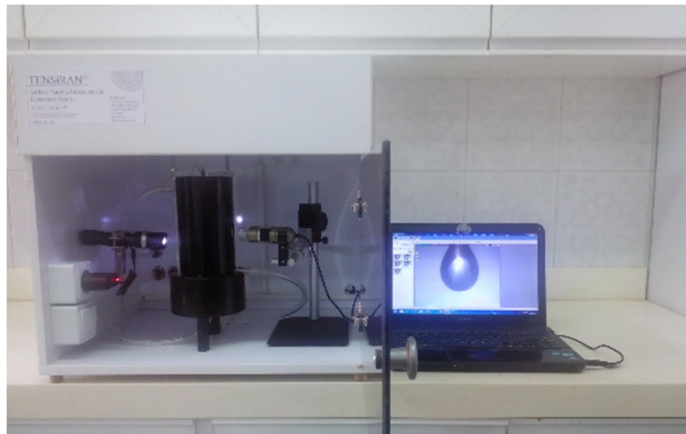
<sup>3</sup> Rheometer



شکل ۹-۲ دستگاه رئومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar

### ۷-۲-۲ دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی و زاویه تماس قطره با سطح

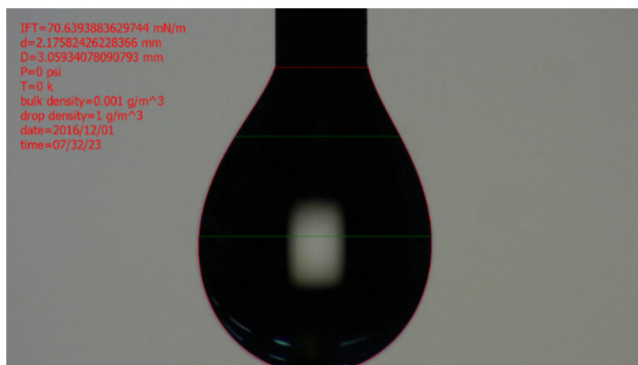
شکل ۱۰-۲ دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی تنسیومتر<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد که به روش ویل‌هلمی<sup>۲</sup> کشش سطحی سیال را محاسبه می‌کند. این آزمایش در آزمایشگاه سنگ و سیال دانشکده معدن انجام شده است. شکل ۱۱-۲ نمونه تست کشش سطحی برای قطره آب را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۲ دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی تنسیومتر به روش ویل‌هلمی

<sup>۱</sup> Tensiometer

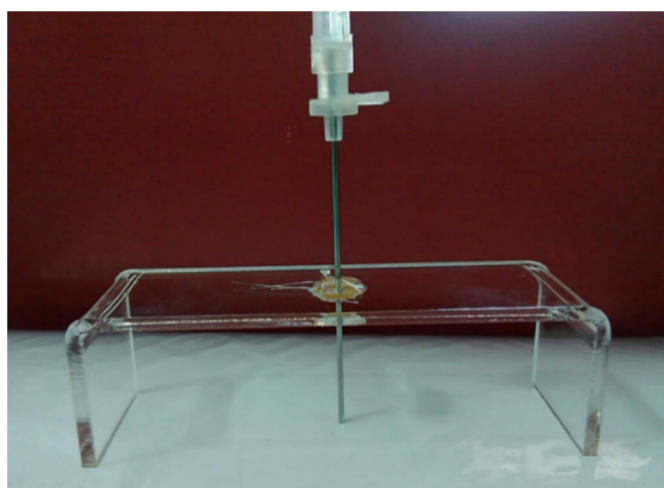
<sup>۲</sup> Wilhelmy



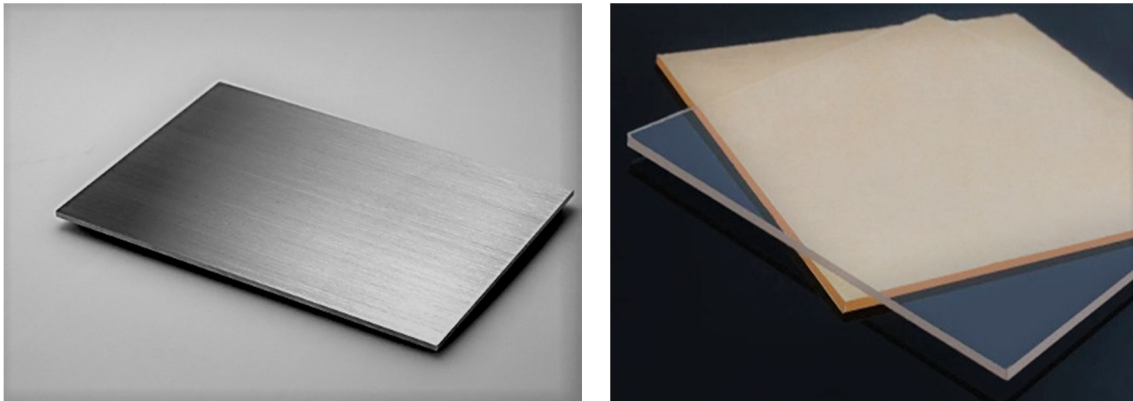
شکل ۱۱-۲ نمونه کشش سطحی انجام شده برای قطره آب

## ۸-۲-۲ سوزن

برای آزمایش‌ها از یک سوزن تزریق ۱۶G، ساخت شرکت JMS (شکل ۱۲-۲) و دارای قطر داخلی ۱/۱۹ میلی‌متر که نوک آن بریده و صاف شده، استفاده گردیده است. ثابت نگه داشتن سوزن شرایط ثابتی در حین تصویربرداری فراهم می‌کند که در پردازش تصاویر بسیار ضروری می‌باشد. در قسمت تنظیمات مربوط به آزمایش، نحوه‌ی ثابت نگه داشتن سوزن بالای سطح برخورد نمایش داده شده است.



شکل ۱۲-۲ سوزن ۱۶G مورد استفاده برای تشکیل قطره



شکل ۱۳-۲ نمونه‌ای از سطوح پلکسی‌گلاس (شکل راست) - نمونه‌ای از سطوح استیل (شکل چپ)

در این مطالعه از پلکسی گلس بانام تجاری پلکسی گلس<sup>۱</sup> با ضخامت سه میلی‌متر و استیل ضدزنگ مات<sup>۲</sup> به‌عنوان سطوح برخورد استفاده شده است که سطوحی آب‌دوست<sup>۳</sup> محسوب می‌گردند. پلکسی‌گلاس نوعی پلاستیک می‌باشد که ظاهری بسیار شفاف و شبیه به شیشه دارد. پلکسی‌گلاس از مهم‌ترین و محکم‌ترین پلیمرهای شفاف می‌باشد که مقاومتی در حدود پنج برابر شیشه هم ضخامت خود را دارد و برخلاف شیشه از خاصیت انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار است. این ورق‌ها را می‌توان به‌عنوان عایق‌های صوتی و حرارتی نیز استفاده کرد علاوه بر این، به دلیل سبکی و ثبات رنگ و مقاومت در برابر عوامل جوی مانند اشعه‌ی خورشید و عوامل شیمیایی مانند اسیدها و روغن‌ها و انواع پاک‌کننده‌های خانگی جایگزین مناسبی برای شیشه در صنعت و ساختمان می‌باشد. هم‌چنین این ورق‌ها به دلیل خواص مکانیکی خاص، در برابر تغییرات دمایی محیط و در برابر باران و تگرگ مقاوم بوده و نسبت به شیشه‌های معمولی از درصد جذب رطوبت کمتری برخوردار هستند و در برابر شوک‌های حرارتی نسبت به شیشه مقاوم‌تر می‌باشند و در صورت شکستگی سطح آن‌ها تیز و برنده نیست و در نتیجه باعث جراحت نمی‌شود.

<sup>۱</sup> Plexiglass

<sup>۲</sup> Stainless Steel

<sup>۳</sup> Hydrophilic

آلیاژهای فولاد زنگ نزن به علت داشتن مقاومت بالا نسبت به خوردگی یکی از پرکاربردترین مواد سرمهندسی است. این مقاومت به دلیل وجود مقدار زیادی کروم در آن‌ها ناشی می‌شود. مقدار کم کروم<sup>۱</sup>، مثلاً ۰.۵٪، مقاومت به خوردگی آهن را مقداری افزایش می‌دهد، اما برای رسیدن به فولاد زنگ نزن، حداقل ۱۲٪ کروم نیاز است. برابر با نظریه‌های کلاسیک، کروم با تشکیل یک لایه اکسید سطحی که لایه‌های زیرین را از خوردگی محافظت می‌کند، سطح آهن را زنگ نزن می‌سازد. برای ایجاد این لایه محافظ، سطح فولاد زنگ نزن باید در تماس با عوامل اکسید کننده باشد در شکل ۲-۲-۱۳ به ترتیب تصاویری از سطوح پلکسی‌گلاس و استیل ضد زنگ نشان داده شده است.

### ۲-۲-۱۰ اندازه گیری زبری سطح (AFM)

میکروسکوپ‌های نیروی اتمی (AFM) دسته‌ای از میکروسکوپ‌های غیر تماسی روبشی است که برای اندازه‌گیری خصوصیات سطح از جمله زبری<sup>۲</sup> آن استفاده می‌شود. به این ترتیب منظور از دستگاه AFM<sup>۳</sup> موجود در آزمایشگاه نانو فیزیک ساخت شرکت آرا پژوهش ایران استفاده شده است که در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است. در فصل بعد توضیح نحوه عملکرد و نرم‌افزار دستگاه شرح داده شده است.



شکل ۲-۱۴ دستگاه AFM برای اندازه‌گیری زبری سطح

<sup>1</sup> Chrome

<sup>2</sup> Roughness

<sup>3</sup> Atomic Force Microscope



## ۳-۲ نحوه‌ی استقرار تجهیزات (ستاپ)<sup>۱</sup>

به منظور انجام آزمایش‌ها، از یک صفحه‌ی پلکسی‌گلاس برای ثابت نگه‌داشتن سوزن و سطح شیب‌دار ساخته‌شده که توسط چهار میله‌ی رزوه شده به ارتفاع ۱ متر کنترل و متصل شده‌اند، استفاده گردیده است. با توجه به رزوه بودن میله‌ها، می‌توان به راحتی فاصله‌ی صفحات نسبت به یکدیگر را تغییر داد. برای ثابت نگه‌داشتن صفحات و میله‌ها و حفظ تعادل آن‌ها، صفحه‌ای بزرگ‌تر به‌عنوان پایه در زیر این مجموعه تعبیه شده است. پایه سطح شیب‌دار ساخته‌شده از جنس استیل بوده و محفظه کشویی آن از جنس تفلون است و صفحه مورد آزمایش در محفظه کشویی قرار داده شده و پیچ‌های روی محفظه صفحه را بدون حرکت نگه می‌دارد.



شکل ۲-۱۵ نمایی کلی از تنظیمات آزمایش.

قبل از انجام هر آزمایش، صفر بودن زاویه صفحات پلکسی‌گلاس و استیل به وسیله‌ی تراز بررسی شده است. از آنجاکه تولید قطره از حساسیت بالایی برخوردار است، هر آزمایش چندین بار تکرار شده است. سوزن نیز با ایجاد دو شیار بر روی صفحه‌ی بالا ثابت شده است، به گونه‌ای که قطره به صورت کاملاً قائم از سوزن جدا شود. دوربین با زاویه‌ی صفر نسبت به سطح برخورد قطره قرار داده شده است و نورافکن نیز در مقابل آن بر روی صفحه‌ای سفید می‌تابد. مواد مورد آزمایش از طریق پمپ و توسط

<sup>1</sup> Setup

یک سرنگ و لوله‌ی متصل به آن به سوزن انتقال می‌یابد. لازم به ذکر است که قبل از انجام هر آزمایش، سطح باید به‌طور کامل تمیز شود زیرا در غیر این صورت قطره قادر نخواهد بود رفتار طبیعی خود را به نمایش بگذارد. برای پاک‌سازی، ابتدا سطح به‌دقت با استون صنعتی تمیز شده و سپس کاملاً خشک شده است.

## ۲-۴ مواد مورد آزمایش

به‌منظور انجام مقایسه بین رفتار قطره‌ی مایعات نیوتنی و غیرنیوتنی در شرایط آزمایشگاهی یکسان، مایعات مختلفی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در این مطالعه از آب مقطر و گلیسرین خالص و دو محلول آب و گلیسرین به‌عنوان سیالات نیوتنی و از دو محلول پلیمری با غلظت‌های پایین که حاوی پلی‌آکریلامید هستند، به‌عنوان سیال غیرنیوتنی بهره برده شده است. لزجت محلول آب و گلیسرین معادل لزجت دو محلول پلیمری ساخته‌شده است همان‌طور که پیش‌ازاین اشاره شد، پیچیدگی رفتار پلیمرها سبب می‌شود که برای بیان خواص این مواد، حداقل به یک خاصیت الاستیک به همراه یک خاصیت ویسکوز نیاز باشد که در این صورت پی بردن به اثر هرکدام از این خاصیت‌ها به‌طور جداگانه کار بسیار دشواری است. در نتیجه به‌منظور بررسی کامل اثرات الاستیک بر پدیده‌ی برخورد قطره با سطح جامد، باید اثرات لزجت را ثابت نگه داشت. با استفاده از بارها و ویژگی خاص آن‌ها این هدف محقق می‌گردد.

## ۲-۴-۱ محلول پلیمری

یک بافت پلیمری را می‌توان مجموعه‌ای از ساختارهای کوچک دانست (مونومرها) که این ساختار به تعداد بسیار زیادی تکرار شده است. تولید پلیمر طی فرایندی به نام پلیمریزاسیون<sup>۱</sup> اتفاق می‌افتد که دو نوع عمده آن تغلیظ<sup>۲</sup> و اضافه کردن<sup>۳</sup> می‌باشد. پلیمریزاسیون به روش اضافه کردن زمانی اتفاق می‌افتد که یک رادیکال آزاد به ماده اضافه شود. رادیکال آزاد به موادی که اتصالات دوتایی دارند

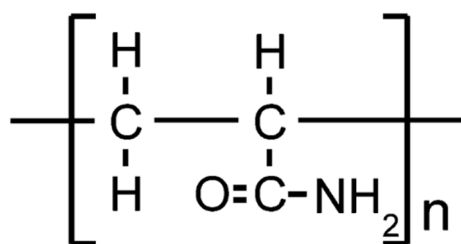
<sup>۱</sup> polymerization

<sup>۲</sup> condensation

<sup>۳</sup> Addition

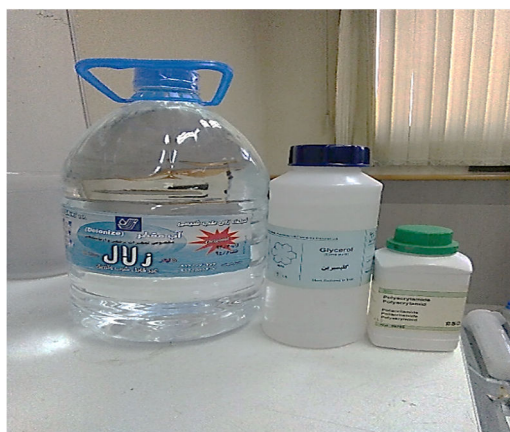
حمله می کند تا تمام این اتصالات بشکنند و واکنش بین زنجیرهای پلیمری انجام شود. روش تغلیظ نیز به حالتی اطلاق می شود که دو مونومر در آب به هم متصل شوند.

پلیمریزاسیون رادیکال های آزاد مونومرهای آکریلامید در آب منجر به تولید پلی آکریلامید می گردد. در شکل ۱۶-۲ نمایی از پیوندهای مولکولی این ماده نمایش داده شده است.



شکل ۱۶-۲ نمایی از پیوندهای مولکولی پلی آکریلامید

این ماده در دسته ی پرکاربردترین پلیمرها در صنایع مختلف است. در اکثر موارد کاربردهای پلی-آکریلامید، این ماده در یک ماده پایه آبی محلول است. این پلیمر به صورت پودری سفیدرنگ و بی بو (شکل ۱۷-۲) موجود است که جرم های مولکولی  $5 \times 10^6$  گرم بر مول و  $20 \times 10^6$  در آزمایشگاه موجود می باشد. در این مطالعه از نمونه ی اول برای ساخت پلیمر استفاده شده است.



شکل ۱۷-۲ پودر پلیمر پلی آکریلامید (شکل راست)- مواد استفاده شده در ساخت محلول های پلیمری (شکل چپ)

در تمام آزمایش‌ها، برای ساخت محلول پلیمری، ابتدا مقدار کمی از پودر پلی‌آکریلامید (به‌اندازه‌ی غلظت موردنظر) به آب مقطر افزوده می‌شود. پس از اطمینان از حل شدن کامل پودر پلیمر در آب و همگن بودن آن، به‌آرامی گلیسیرین به آن اضافه می‌گردد. افزودن اندکی پلی‌آکریلامید به آب، موجب اندکی تغییر در لزجت و ایجاد خاصیت کشسانی می‌گردد. گلیسیرین و آب به‌راحتی در یکدیگر حل می‌شوند. از گلیسیرین به‌عنوان عامل تنظیم لزجت استفاده می‌گردد. این نکته قابل توجه است که چنانچه ماده پلیمری به‌خوبی در آب حل نشده باشد، تشخیص آن کار ساده‌ای نیست اما با افزودن گلیسیرین ناهمگنی‌ها به‌صورت رگه در محلول نمایان خواهند شد. شکل ۲-۱۷ تصاویر آب مقطر، گلیسیرین و پلی‌آکریلامید استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

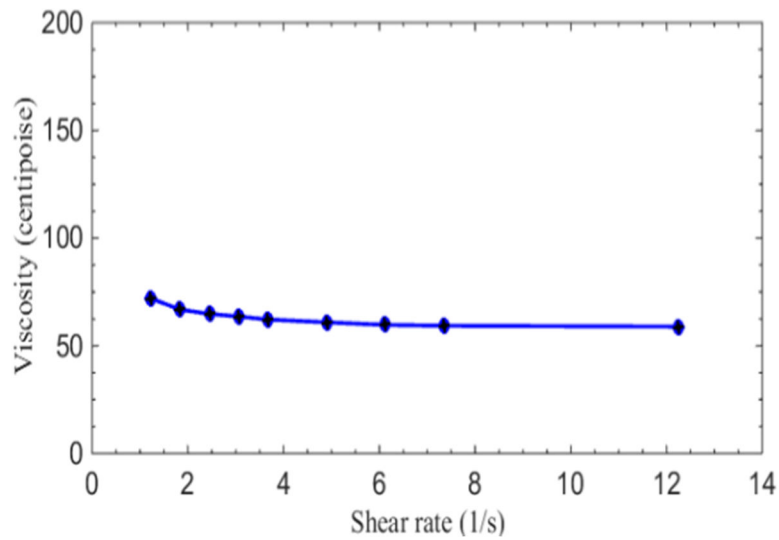
#### ۲-۴-۲ سیالات غیرنیوتنی منتخب برای آزمایش‌ها

در این مطالعه قرار است که پدیده‌ی برخورد قطره روی سطح جامد در حضور اثرات ویسکوالاستیک باحالتی که سیالات نیوتنی هستند، مورد مقایسه قرار گیرد. در این راستا پلیمرهای زیادی با استفاده از مواد معرفی شده در قسمت قبل ساخته شده‌اند. در این میان پس از بررسی خواص نمونه‌ها و هم‌چنین توانایی آن‌ها در تولید قطره، دو سیال پلیمری برای بررسی اثرات غیرنیوتنی انتخاب گردیدند.

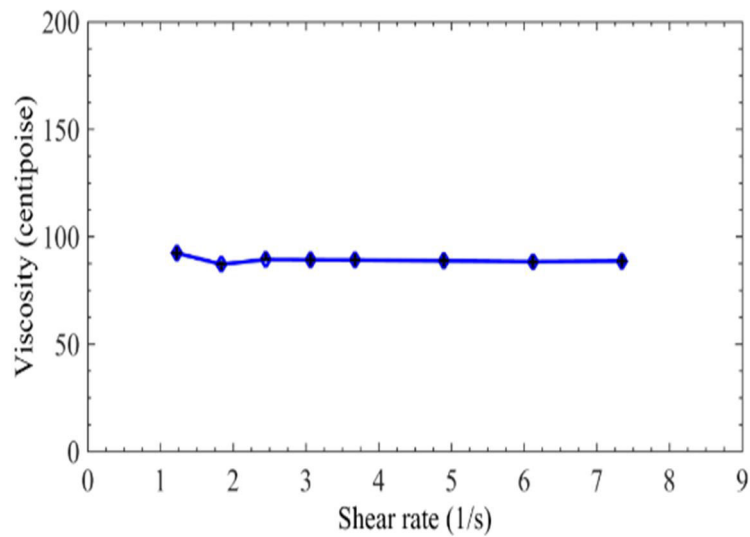
**باگر اول:** این نمونه از ترکیب  $0.006\%$  جرمی پلی‌آکریلامید  $5 \times 10^6$  گرم بر مول در مخلوط آب و گلیسیرین با نسبت ۲۰-۸۰ حجمی تشکیل شده است که به مدت ۱۸ ساعت در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  بر روی همزن هات پلیت قرار داده شده است تا کاملاً همگن شود. شکل ۲-۱۸ نتیجه‌ی آزمون لزجت برحسب نرخ برش این نمونه را نشان می‌دهد که توسط ویسکومتر موجود در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. لزجت معادل این نمونه ۶۳ سانتی پواز در نظر گرفته شده است.

**باگر دوم:** ساخت نمونه‌ی پلیمری دوم نیز کاملاً مشابه نمونه‌ی اول است با این تفاوت که در این

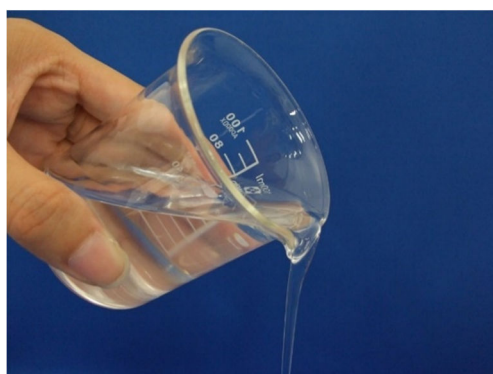
نمونه از ترکیب ۰.۰۱۲٪ جرمی پلی‌آکریلامید  $5 \times 10^6$  گرم بر مول با آب و گلیسرین با نسبت ۸۰-۲۰ حجمی استفاده شده است. شکل ۱۹-۲ نتیجه‌ی آزمون لزجت بر حسب نرخ برش این نمونه را نشان می‌دهد. لزجت معادل این سیال ۸۹ سانتی پواز می‌باشد.



شکل ۱۸-۲ نمودار لزجت بر حسب نرخ برش برای باگر اول



شکل ۱۹-۲ نمودار لزجت بر حسب نرخ برش برای باگر دوم



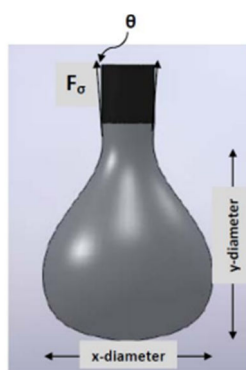
شکل ۲-۲۰ پلیمر باگر اول تهیه شده در آزمایشگاه

WG<sub>1</sub>: سیال نیوتنی که شامل ۷۹٪ گلیسرین و ۲۱٪ آب می باشد و لزجتی معادل باگر اول دارد. ساخت آن مشابه باگر اول بوده با این تفاوت که این محلول شامل پلیمر نبوده و در زمان بسیار کمتری آماده می شود.

WG<sub>2</sub>: این نمونه شامل ۸۳٪ گلیسرین و ۱۷٪ آب می باشد و لزجتی معادل باگر دوم دارد. ساخت آن نیز مشابه باگر دوم است. در این محلول نیز از پلیمر استفاده نشده و زمان ساختن آن بسیار کمتر است.

## ۲-۵ مشخصات مواد مورد آزمایش

جدول ۱-۲ و جدول ۲-۲ خواص فیزیکی مواد را نشان می دهند. مقادیر از اندازه گیری مستقیم خواص توسط آزمایشگاه حاصل شده اند. به دلیل اهمیت کشش سطحی در آزمایش ها، مواد در این جداول بر اساس این خاصیت مرتب شده اند. منطقی است که جدول ۲-۳ شامل لزجت مایعات غیرنیوتنی نباشد. شکل زیر ۲-۲۲ تصویر قطره را در حال خروج از نوک سوزن نشان می دهد. در واقع قطره تا جایی که کشش سطحی دیگر نتواند وزن آن را متعادل کند، شروع به بزرگ شدن می کند.



شکل ۲-۲۱ لحظه جدایش قطره از سوزن

جدول ۱-۲ خواص مایعات نیوتنی در دمای  $T = 25 \pm 0.5^\circ$

W G2	W G1	گلیسد یرین	آ ب	
۶۴	۶۵	۶۳	۷ ۱	کشش سطحی $\sigma(\text{dynes/cm})$
۱۲ ۴۲	۱۱ ۹۵	۱۲۶۰	۱۶ ۹۹۷	چگالی $\rho(\text{kg/m}^3)$
۸۹	۶۳	۱۴۹۰	۱	لزجت $\mu(\text{cP})$

جدول ۲-۲ خواص مایعات غیرنیوتنی در دمای  $T=25\pm 0.5^\circ$

باگر دوم	باگر اول	
۶۳	۶۳	کشش سطحی $\sigma(\text{dynes/cm})$
۱۲۰ ۸	۱۲۰ ۸	چگالی $\rho(\text{kg/m}^3)$

## ۶-۲ زمان رهایی از تنش

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر سقوط قطره ویسکوالاستیک زمان رهایی از تنش است. زمان رهایی از تنش زمانی است که معرف فاصله زمانی بین تنش اعمالی و تغییر شکل حاصل از آن است. یکی از راه‌های تخمین زمان رهایی از تنش تفسیر نتایج  $G'$  و  $G''$  بر اساس مدل ماکسول است. مدول‌های  $G'$  و  $G''$  مدول‌های مادی هستند که از آزمون نوسان حاصل می‌شوند. به این صورت که، با ترسیم نمودار تغییرات مدول‌های  $G'$  و  $G''$  بر حسب فرکانس اعمالی، اولین نقطه برخورد این مدول‌ها بر حسب فرکانس برابر با عکس زمان رهایی از تنش اول  $\frac{1}{\lambda}$  می‌باشد که در ادامه نحوه استخراج این روابط بیان شده است. باید توجه داشت یک ماده دارای یک طیف رهایی از تنش می‌باشد.

## ۷-۲ تست نوسان

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

$$\tau = \tau_0 \cos \omega t \quad (1-2)$$

$$\gamma = \gamma_0 \cos(\omega t - \delta) \quad (2-2)$$

در این تست مقدار  $\gamma_0$  بسیار کوچک لحاظ شده است تا از تغییر شکل‌های بزرگ اجتناب گردد. بدین منظور طبق روابط (۲-۳) و (۲-۴) از تنش و برش مختلط استفاده شده است که قسمت

---

<sup>1</sup> Storage module

<sup>2</sup> Loss module



حقیقی آن تنش و برش هستند:

$$\tau^* = G^* \gamma^* \quad (۳-۲)$$

$$\tau^* = \eta^* \dot{\gamma}^* \quad (۴-۲)$$

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

$$G^* = G' + iG'' \quad (۵-۲)$$

که در رابطه (۵-۲)،  $G''$  معرف بخش سیال ماده (ویسکوز) و  $G'$  معرف بخش جامد ماده (الاستیک) است. براساس مدل سازی جامد داریم:

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} = \frac{\tau e^{i\omega t}}{\gamma e^{i(\omega t - \delta)}} \quad (۶-۲)$$

در رابطه (۶-۲) خود اختلاف فاز می تواند تابع فرکانس باشد. می توان نوشت:

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (۷-۲)$$

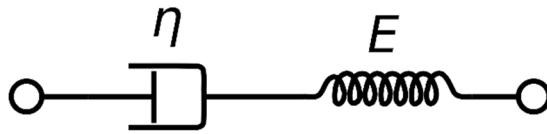
$$G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad (۸-۲)$$

از تقسیم دو رابطه اخیر داریم:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (۹-۲)$$

## ۸-۲ 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 ۲-۲۳ تشکیل شده است.



شکل ۲-۲۲ مدل فنر و دمپر ماکسول

مدل ماکسول به صورت رابطه (۱۰-۲) بیان می‌شود:

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta \dot{\gamma} \quad (10-2)$$

با جایگذاری روابط در رابطه ماکسول، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau_0 \cos \omega t - \lambda \tau_0 \sin \omega t = \eta \dot{\gamma} \quad (11-2)$$

با توجه به فرضیات داریم:

$$\gamma_0 = \frac{\lambda \tau_0}{\eta \cos \theta} \quad \& \quad \tan \delta = \frac{1}{\lambda \omega} \quad (12-2)$$

در نتایج آزمایشگاهی، برای مکانی که دو نمودار یکدیگر را قطع می‌کنند مدول‌های مادی برابر هستند ( $G'' = G'$ ) در نتیجه داریم از رابطه (۹-۲) خواهیم داشت:

$$\tan \delta = \frac{1}{\lambda \omega} = 1 \rightarrow \omega = \frac{1}{\lambda} \quad (13-2)$$

برای حالتی که مدول‌های  $G'$ ,  $G''$  هیچ نقطه تلاقی نداشته باشند از روابط (۱۴-۲) و (۱۵-۲) استفاده می‌شود:

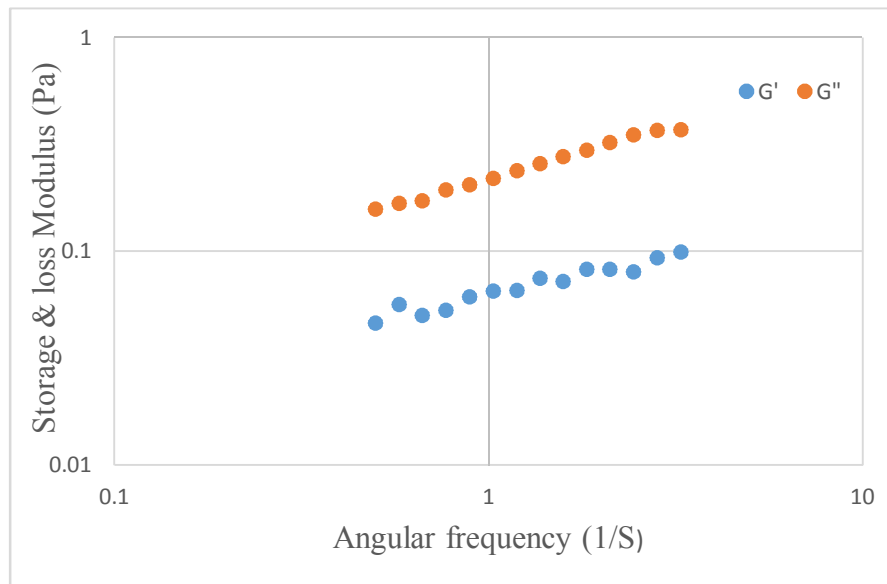
$$G' = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \lambda_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (14-2)$$

$$G'' = \eta_s \omega + \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (15-2)$$

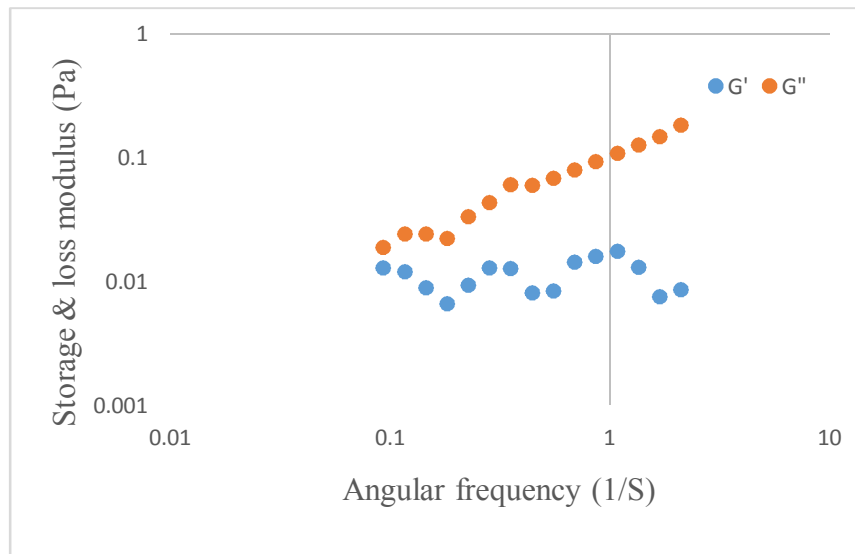
روابط (۱۴-۲) و (۱۵-۲)،  $G'$  و  $G''$  را به  $n$  مؤلفه تجزیه می‌کنند که هر مؤلفه با یک زمان رهایی از تنش  $\lambda_i$  و یک ضریب لزجت  $\eta_i$  برای هر مود، تا زمانی که به یک برآزش خوب برای داده‌های آزمایشگاهی برسد افزایش می‌یابد. در مطالعه حاضر مدول‌های  $G'$ ،  $G''$  همان‌طور که در شکل ۲۳-۲ نمودار  $G'$  و  $G''$  برحسب فرکانس زاویه‌ای برای سیال باگر اول مشاهده می‌شود نقطه تلاقی ندارند که با استفاده از روابط (۱۴-۲) و (۱۵-۲) طیفی از مقادیر رهایی از تنش به دست می‌آید و با جایگذاری در رابطه (۱۶-۲) مقدار متوسط زمان رهایی از تنش تعیین می‌شود.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} \quad (16-2)$$

برای قطره ویسکوالاستیک باگر اول مورد آزمایش که حاوی ترکیب ۱: ۴ آب و گلیسیرین و ۰.۰۶٪ پلیمر می‌باشد، زمان رهایی از تنش  $\lambda = 1.4 s$  و برای باگر دوم،  $\lambda = 1.9 s$  می‌باشد مدول‌های الاستیک  $G'$  و  $G''$  قطره ویسکوالاستیک نسبت به تغییرات فرکانس در پژوهشکده رنگ و پلیمر ایران اندازه‌گیری شده است



شکل ۲-۲۳ نمودار  $G'$  و  $G''$  برحسب فرکانس زاویه‌ای برای سیال باگر اول



شکل ۲-۲۴ نمودار  $G'$  و  $G''$  برحسب فرکانس زاویه‌ای برای سیال باگر دوم

## ۲-۹ مقدمه‌ای بر پردازش تصویر

اگر کمی در تاریخ مطالعه کنیم درمی‌یابیم که ابتدایی‌ترین ارتباطات انسان‌ها با یکدیگر بر اساس تصاویر بوده است. در زمانی که زبان و صحبت کردن مفهومی نداشت، انسان‌ها منظور خود را با

کشیدن تصاویر و شکل‌ها برای همدیگر بیان می‌کردند. بسیاری از وقایع تاریخی و باستانی نیز از روی تصاویر حک‌شده در دیواره غارها و عبارت‌های قدیمی ثبت‌شده‌اند. حتی علوم طبیعی نیز از تصاویر بهره زیادی برده‌اند که نمونه آن‌ها فسیل‌ها می‌باشند. اما از زمانی که صنعت عکاسی و در پی آن تصویربرداری اختراع گردید، مفهوم تصویر برای همگان تغییر کرد و باعث شد تصاویر گذشته به نقاشی یا طراحی و غیره تغییر نام پیدا کند. صنعت تصویربرداری ثابت و به دنبال آن متحرک اختراع شد و امروزه به جرئت می‌توان گفت که تصاویر تلویزیونی و دیجیتالی جزء جدایی‌ناپذیر زندگی بشر شده است

پردازش تصویر عبارت است از هر نوع پردازش سیگنال که ورودی آن یک تصویر مانند عکس یا صحنه‌ای از یک فیلم می‌باشد. خروجی پردازشگر تصویر می‌تواند یک تصویر یا یک مجموعه از نشانه‌های ویژه یا متغیرهای مربوط به تصویر باشد. اغلب تکنیک‌های پردازش تصویر شامل برخورد با تصویر به‌عنوان یک سیگنال دوبعدی و به کار بستن تکنیک‌های استاندارد پردازش سیگنال روی آن‌ها می‌باشند. پردازش تصویر اغلب به پردازش دیجیتالی تصویر اشاره می‌کند ولی پردازش نوری و آنالوگ تصویر هم وجود دارند. پردازش تصاویر، امروزه بیشتر به موضوع پردازش تصویر دیجیتال گفته می‌شود که شاخه‌ای از دانش رایانه است که با پردازش سیگنال دیجیتال که نماینده تصاویر برداشته‌شده با دوربین دیجیتال یا پویش شده توسط پویشگر هستند، سروکار دارد.

پردازش تصاویر، دارای دوشاخه عمده بهبود تصاویر و بینایی ماشین است. بهبود تصاویر، دربرگیرنده روش‌هایی چون استفاده از فیلتر محوکننده و افزایش تضاد برای بهتر کردن کیفیت دیداری تصاویر و اطمینان از نمایش درست آن‌ها در محیط مقصد (مانند چاپگر یا نمایشگر رایانه) است درحالی‌که بینایی ماشین به روش‌هایی می‌پردازد که به کمک آن‌ها می‌توان معنی و محتوای تصاویر را درک کرد تا از آن‌ها در کارهایی چون رباتیک و محور تصاویر استفاده کرد. یک تصویر دیجیتال تصویری است که از تعداد زیادی مربعات کوچک (پیکسل) تشکیل شده است. هر پیکسل

دارای یک شماره رقمی می‌باشد که بیانگر میزان روشنایی آن پیکسل است. هنگامی که داده‌ها به فرمت دیجیتال باشند، می‌توان با استفاده از کامپیوتر، بر روی این داده‌ها، پردازش و تجزیه و تحلیل‌های دیجیتالی انجام داد. این پردازش برای افزایش کیفیت داده‌ها و تفسیرهای چشمی انجام می‌گیرد. همچنین می‌توان موضوع یا اطلاعات به خصوصی را از تصویر به دست آورد که همگی به صورت خودکار توسط کامپیوتر انجام می‌گیرد

امروزه پردازش تصویر، بهترین ابزار برای استخراج ویژگی‌ها و تحلیل موقعیت و درنهایت تصمیم‌گیری صحیح است و در مورد انسان نیز، به همین صورت می‌باشد. اطلاعات از طریق چشم به مغز ارسال می‌شود و مغز با پردازش این اطلاعات، تصمیم نهایی را گرفته و فرمان صادر می‌کند. هدف از پردازش تصویر، پیاده‌سازی عملکرد ذهنی انسان در قبال داده‌های دریافتی از چشم نیست؛ زیرا این عملیات؛ بسیار پیچیده و حجیم است. هدف از پیش‌پردازش‌ها و انجام پردازش خاص، استخراج ویژگی موردنیاز برای رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده می‌باشد

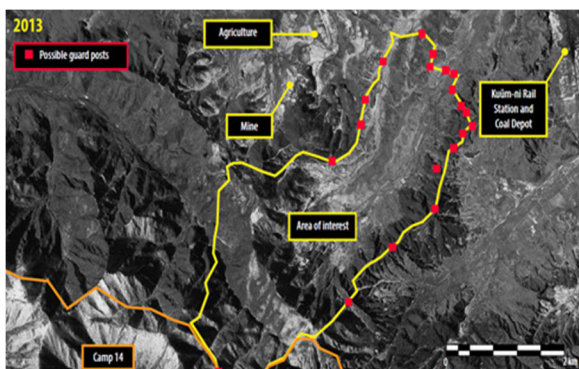
## ۲-۹-۱ کاربردهای پردازش تصویر

پردازش تصویر از سال ۱۹۶۴ تاکنون رشد فراوانی یافته است. تقریباً همه‌روزه شاهد ظهور زمینه‌های کاربردی جدیدی برای علم پردازش تصاویر رقومی هستیم. نقطه‌ی آغازین این علم، اکتشافات فضایی است که با هدایت محققین و فن‌ورزهای موسسه‌ی ملی هوا و فضایی آمریکا انجام گرفت. این علم به سرعت به ابزاری برای تفسیر عکس‌ها در سازمان‌های جاسوسی دنیا تبدیل گردید. پردازش تصویر، به خصوص بینایی هوشمند، در علوم نظامی و امنیتی بسیار مهم است. به عنوان مثال، موشک هدایت‌شونده خودکاری وجود دارد که می‌تواند بر روی یک ساختمان قفل کند. در مسائل امنیتی، تصویر دوربین‌های خودکار از ماشین‌هایی که تخلف رانندگی انجام می‌دهند، می‌تواند عکس‌برداری کند. یکی از این روش‌های بهره‌گیری از پردازش تصویر، استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند سرعت و ثبت تخلف در سال‌های اخیر است. این سیستم‌ها برای تشخیص سرعت خودروهای عبوری،

از روش‌های متفاوتی استفاده می‌کنند. با استفاده از دو دوربین و اندازه‌گیری کردن آن‌ها و پردازش تفاوت دید موجود در تصاویر به دست آمده از دو دوربین، امکان تشخیص عمق خودروی عبوری را فراهم می‌کند که با مشتق‌گیری از مکان، سرعت خودرو به دست می‌آید. از دیگر سو، سایر علوم نیز از تأثیرات ناخواسته این علم مصون نماندند. زمین‌شناسان با استفاده از این علم تصاویر با اطلاعات بسیار مفیدی از سطح زمین به دست می‌آورند؛ در این تصاویر می‌توان جابه‌جایی‌های پوسته زمین را به راحتی تشخیص داد. تصاویر چند طیفی (چندتصویر از یک منطقه که با بسامدهای مختلف، از یک منطقه گرفته شده‌اند) را می‌توان در اکتشافات نفت و معادن به کار برد، همچنین تصاویر کف اقیانوس‌ها را می‌توان با استفاده از سنجش‌گرهای رادار فضایی به دست آورد و نقشه‌های آن را ترسیم کرد، نقشه‌های هواشناسی را نیز می‌توان از این مقوله دانست. در حالی که متخصصان علوم زمینی و نقشه‌برداری از تصاویر رقومی برای اکتشاف و تهیه نقشه از منابع طبیعی استفاده می‌کنند برنامه‌ریزان و طراحان از روش‌هایی مشابه برای منظورهای دیگر سود می‌برند. با استفاده از GIS مسئولین دولتی می‌توانند پیشرفت‌های پروژه‌های عمرانی را با استفاده از عکس‌های هوایی پیگیری کنند، می‌توان منطقه‌ی تحت پوشش مرکز تلفن حوادث اضطراری را روی نقشه‌های مراکز جمعیتی قرار داد. همچنین می‌توان از کاربردهای علم پردازش تصاویر در پزشکی و دندانپزشکی، پردازش اسناد و مدارک، کاربردهای صنعتی و رباتیک (دید ماشینی)، بررسی رفتار مایعات مختلف نیوتنی و غیرنیوتنی، نشر و چاپ، صنعت سرگرمی و سینما، کاربردهای تجاری و حتی کاربردهای خانگی نظیر استفاده از دوربین‌های رقومی، نمابر و تلویزیون و دیگر کاربردها نام برد.



شکل ۲-۲۵ عکس برداری از پلاک ماشین (کاربرد پردازش تصویر)



شکل ۲-۲۶ آنالیز عکس برداری هوایی به وسیله پردازش تصویر

## ۲-۹-۲ مراحل انجام پردازش تصویر

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

### الف- دریافت تصویر ورودی

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



## ب- پیش‌پردازش تصویر (پردازش سطح پایین)

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

## ج- پیش‌پردازش تصویر (پردازش سطح میانی)

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

## د- پردازش تصویر (پردازش سطح بالا)

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

## ۲-۹-۳ پردازش تصاویر رنگی

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

## الف- تصاویر باینری (دودویی)

در این تصاویر هر پیکسل دارای دورنگ سیاه‌وسفید است. از آنجاکه هر پیکسل دارای دو مقدار ممکن

است، برای نمایش هر پیکسل نیاز به تنها یک بیت داریم. این گونه تصاویر را به راحتی می توان ذخیره نمود. تصاویری که به صورت باینری<sup>۱</sup> نمایش داده می شوند، اغلب شامل نوشته ها، اثر انگشت ها و یا نقشه های مهندسی هستند.

### ب- تصاویر با درجات خاکستری

هر پیکسل در این تصاویر دارای یک درجه (سایه) خاکستری است که به طور معمول از صفر (سیاه) شروع شده و تا ۲۵۵ (سفید) ادامه می یابد. این دامنه از اعداد را می توان در ۸ بیت ذخیره نمود. این دامنه برای دست کاری یک فایل تصویری بسیار مناسب است. از دیگر دامنه ها نیز گاهی استفاده می شود. اما معمولاً این دامنه ها به صورت توانی از دو بیان می شوند. برخی تصاویر به دست آمده از پزشکی، تصاویر مربوط به کارهای چاپی و دیگر تصاویر با داشتن ۲۵۵ اختلاف در درجات خاکستری برای شناسایی طیف وسیعی از اشیا کافی هستند.

### ج- تصاویر رنگی

در رایج ترین مدل رنگ گرافیک کامپیوتری، رنگ ها از ترکیب سه رنگ قرمز، سبز و آبی به وجود می آیند که می توان رنگ های بسیار زیادی توسط این سه رنگ تولید کرد. این مدل رنگ در گرافیک کامپیوتری با نام RGB شناخته می شود. در کنار مدل رنگ RGB مدل های دیگری همچون HSV, HIS, CMYK و غیره نیز وجود دارند که هر یک از آن ها به روش متفاوتی به نمایش رنگ ها می پردازند. استفاده از رنگ در پردازش تصویر، ناشی از دو عامل است. اولاً، رنگ توصیف گر قدرتمندی است که غالباً شناسایی و استخراج اشیا را از صحنه آسان می سازد. ثانیاً، انسان می تواند در مقایسه با فقط ۲۴ سایه خاکستری، هزاران سایه رنگ و شدت را تشخیص دهد. این عامل دوم، مخصوصاً در تحلیل تصویر دستی (یعنی وقتی که توسط انسان انجام می گیرد) مهم است.

---

<sup>1</sup> Binary

در مطالعه حاضر، با توجه به سریع بودن پدیده برخورد قطره و نیاز به ثبت تعداد زیادی تصویر، ابتدا سعی شده تا حد امکان تصاویر با نورپردازی و کیفیت مناسب تهیه شوند تا فرایند پردازش تصویر سریع تر و با سهولت بیشتری صورت گیرد. جهت استخراج داده‌ها و تبدیل آن‌ها به داده‌های قابل استفاده در رسم نمودار از برنامه‌ای در نرم افزار متلب بهره برده شده است. این برنامه با محیط کردن مستطیلی به اطراف قطره قادر است اطلاعاتی شامل قطر عمودی و افقی قطره، فاصله آن از بالای تصویر و سمت چپ تصویر را در اختیار ما قرار دهد

برای به دست آوردن اطلاعات و داده‌های تصاویر، مراحل زیر به ترتیب اجرا شده است:

#### • گام اول

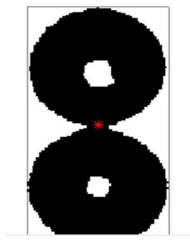
در این قسمت می‌توان با چرخاندن تصویر به میزان زاویه موردنظر و عملیات مختلفی از جمله از بین بردن یا اضافه کردن نویزها، حذف کردن سایه‌ها، اعمال انواع فیلترها، باینری کردن تصویر (تبدیل تصویر رنگی به سیاه و سفید) و پیدا کردن لبه‌های قطره برای محاسبه قطر آن را اعمال نمود



شکل ۲-۲۷ مرحله اول

#### • گام دوم

در این قسمت با مدل کردن مسیر حرکت قطره به صورت خط و تقاطع آن با صفحه موردنظر محل برخورد قطره مشخص شده تا بتوان با توجه به محل برخورد قطره میزان پخش شدگی آن را در قسمت جلویی و عقبی نقطه برخورد مشخص کرد.



شکل ۲۸-۲ یافتن نقطه برخورد

• گام سوم

در این مرحله میزان طول پخش شدگی نسبت به قطر اولیه قطره قبل از برخورد را در قسمت جلویی و عقب نقطه برخورد، محاسبه و نمودار آن بر حسب زمان بی بعد در هر لحظه ترسیم می شود.



شکل ۲۹-۲ محاسبه ضریب پخش



$t=0.0 \text{ ms}$



$t=0.5 \text{ ms}$



$t=1 \text{ ms}$



$t=1.5 \text{ ms}$



$t=2 \text{ ms}$



$t=2.5 \text{ ms}$

شکل ۳۰-۲ مراحل تغییر شکل قطره باگر اول بعد از برخورد با سطح پلکسی گلس در زاویه ۳۰ درجه

با سرعت ۳.۰۳ متر بر ثانیه

## فصل سوم

تحلیل نتایج آزمایشگاهی برخورد قطره

روی سطح جامد شیب‌دار

### ۳-۱ قطر اولیه قطره

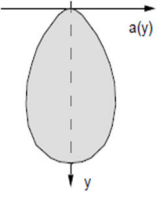
در این قسمت ابتدا قطر عمودی و افقی هر قطره را با استفاده از پردازش تصاویر مربوط به آن به دست آورده و سپس از رابطه‌ی  $D_0 = \sqrt[3]{d_h^2 d_v}$  قطر مربوط به هر قطره محاسبه می‌گردد. در این رابطه  $d_h$  و  $d_v$  به ترتیب قطر افقی و عمودی قطره می‌باشند.

جدول ۳-۱ مقادیر قطر اولیه اندازه‌گیری شده برای قطرات نیوتنی و غیر نیوتنی

قطر قطره	آب	گلیسرین	WG <sub>1</sub>	WG <sub>2</sub>	باگر اول	محلول پلیمری ۲
D <sub>0</sub> (mm)	۳/۳۸	۲/۹۱	۳/۰۶	۳/۰۴	۲/۹۸	۲/۹۶

### ۳-۲ حجم قطرات

برای محاسبه حجم قطره از تصاویر نیاز به برنامه‌ای برای پردازش آن‌ها می‌باشد. بدین منظور از روشی که برای محاسبه‌ی حجم معرفی شده است، به‌عنوان الگوریتم برنامه موردنیاز استفاده می‌شود. این روش 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. این روش نیز با محدودیت‌هایی همراه است، زیرا محاسبه‌ی حجم المان‌ها با این فرض انجام می‌شود که سطح مقطع قطره در هر لحظه به‌صورت دایره است. این در حالی است که وجود آشفتگی‌ها باعث تغییر شکل سطح مقطع از دایره می‌شود.

$V = \pi \int_{y_1}^{y_2} a(y)^2 dy$		محاسبه حجم
--------------------------------------	---	---------------

جدول ۲-۳ مقادیر آزمایشگاهی برای محاسبه حجم قطره

باگر دوم	باگراول	WG <sub>2</sub>	WG <sub>1</sub>	گلیسرین	آب	حجم قطره
۱۳/۹۹	۱۴/۰۸	۱۶/۰۲	۱۶/۳۱	۱۳/۳۵	۲۰/۳	V(mm <sup>3</sup> )

### ۳-۳ سرعت قطرات در لحظه‌ی برخورد با سطح

در تمامی آزمایش‌ها، قطره از ارتفاع ۲۷ و ۴۷ سانتی‌متری در اثر وزن خود سقوط کرده است. بنابراین با توجه به قطر اولیه‌ی قطره که از پردازش تصویر به دست آمده و با استفاده از رابطه‌ی سرعت جسم در حالت سقوط آزاد، سرعت قطره در لحظه‌ی برخورد به دست می‌آید.

جدول ۳-۳ مقادیر آزمایشگاهی سرعت برخورد برای قطرات در ارتفاع ۲۷ و ۴۷ سانتی‌متری

ارتفاع ۴۷ سانتی‌متری	ارتفاع ۲۷ سانتی‌متری	سرعت برخورد
۳/۰۳	۲/۳۰	$U = \sqrt{2g(H - D_0)}$

۳-۴ اعداد بی‌بعد رینولدز<sup>۱</sup>، وبر<sup>۲</sup>، اوهنسورگ<sup>۳</sup>، وایزنبرگ<sup>۴</sup> و الاستیسیته<sup>۵</sup>

در این قسمت مقادیر اعداد بی‌بعد رینولدز، وبر و اوهنسورگ برای تمام مواد منتخب در این تحقیق و عدد وایزنبرگ برای مواد غیرنیوتنی در دو سرعت ۲/۳۰ و ۳/۰۳ متر بر ثانیه محاسبه شده است. عدد

<sup>1</sup> Reynolds

<sup>2</sup> Weber

<sup>3</sup> Ohnesorge

<sup>4</sup> Weissenberg

<sup>5</sup> Elasticity

وایزنبرگ بر اساس نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک به نیروی حاصل از لزجت تعریف می‌شود. این عدد بر اساس روابط مختلفی تعریف شده که رابطه‌ی (۳-۳) متداول‌ترین شکل بیان آن می‌باشد..

$$We = \frac{\rho DU_0^2}{\sigma} \quad (3-1)$$

$$Re = \frac{\rho DU_0}{\eta} \quad (3-2)$$

$$Oh = \frac{\mu}{(\rho\sigma D)^{1/2}} = \frac{We^{1/2}}{Re} \quad (3-5)$$

$$Wi = \lambda\dot{\gamma} \quad (3-3)$$

$$El = \frac{Wi}{Re} \quad (3-4)$$

جدول ۳-۴ مقادیر رینولدز، وبر، اوهنسورگ، وایزنبرگ و الاستیسیته برای قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی در دو سرعت ۲/۳۰ و ۳/۰۳ متر بر ثانیه

عدد بی‌بعد	آب	گلیسرین	WG <sub>1</sub>	WG <sub>2</sub>	باگر اول	باگر دوم
<b>Re<sub>1</sub></b>	۷۷۷۵	۵/۷۵	۱۳۱	۹۴	۱۲۷	۹۱
<b>Re<sub>2</sub></b>	۱۰۲۴۱	۷/۴۵	۱۷۲	۱۲۴	۱۶۸	۱۲۱
<b>We<sub>1</sub></b>	۲۴۵	۳۱۰	۳۰۵	۳۰۲	۲۹۸	۲۹۵
<b>We<sub>2</sub></b>	۴۳۰	۵۴۵	۵۳۰	۵۲۶	۵۱۶	۵۱۲
<b>Oh<sub>1&amp;2</sub></b>	۰/۰۰۲۱	۳/۰۶	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۱۸
<b>Wi<sub>1</sub></b>	-	-	-	-	۴۲۹	۵۸۲
<b>Wi<sub>2</sub></b>	-	-	-	-	۵۶۵	۷۶۷
<b>El<sub>1&amp;2</sub></b>	-	-	-	-	۳/۳۷	۶/۳۲



بنابراین در یک سیال به خصوص، بالا بودن عدد وایزبرگ به معنای غیرنیوتنی بودن این سیال است. عدد بی بعد الاستیسیته نیز حاصل تقسیم وایزبرگ به رینولدز می باشد و بیان کننده خاصیت الاستیک بودن سیال غیرنیوتنی است. همچنین در مقالات پیشین برای بررسی اثر لزجت سیال به صورت عدد بی بعد، از عدد بی بعد اوهنسورگ استفاده می شود. مقادیر اعداد بی بعد با اندیس شماره ۱ مربوط به سرعت  $2/30$  و با اندیس شماره ۲ مربوط به سرعت  $3/03$  هستند

### ۳-۵ مشاهدات آزمایشگاهی مربوط به برخورد قطره روی سطح جامد شیب دار

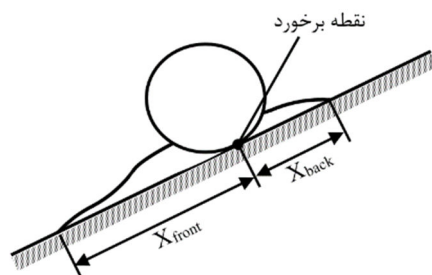
در این بخش آزمایش های انجام شده بر روی چهار سیال نیوتنی (آب، گلیسرین،  $WG_1$ ،  $WG_2$ ) و دو سیال غیرنیوتنی (باگر اول و باگر دوم) بر روی دو سطح پلکسی گلس و استیل با زاویه ۱۵ و ۳۰ درجه در دو ارتفاع مختلف مورد پردازش و تحلیل قرار گرفته و اثرات پارامترهای مختلف شامل سرعت برخورد، لزجت سیال، زاویه سطح، خصوصیات سطح شامل آبدوستی<sup>۱</sup> و زبری سطح<sup>۲</sup> بر روی ضریب پخش<sup>۳</sup> قطره در قسمت جلویی و عقبی نقطه برخورد بررسی می شود. ضریب پخش قطره حاصل تقسیم طول پخش شدگی قطره بعد از برخورد ( $X$ ) به قطر اولیه آن قبل از برخورد بوده که عددی بی بعد است. ضریب پخش در قسمت جلویی با  $X/D_{Front}$  و ضریب پخش در قسمت عقبی با  $X/D_{Back}$  نمایش داده شده است. در ادامه نمودار ضریب پخش در قسمت جلویی و عقبی نقطه برخورد بر حسب زمان بی بعد ( $t^* = tU/D$ ) رسم می شود که  $t$  زمان بر حسب ثانیه،  $U$  سرعت برخورد قطره و  $D$  قطر قطره قبل از لحظه برخورد می باشد.

---

<sup>1</sup> Hydrophillic

<sup>2</sup> Surface roughness

<sup>3</sup> Spreading Factor



شکل ۳-۱ شماتیک برخورد قطره و ضرایب پخش آن

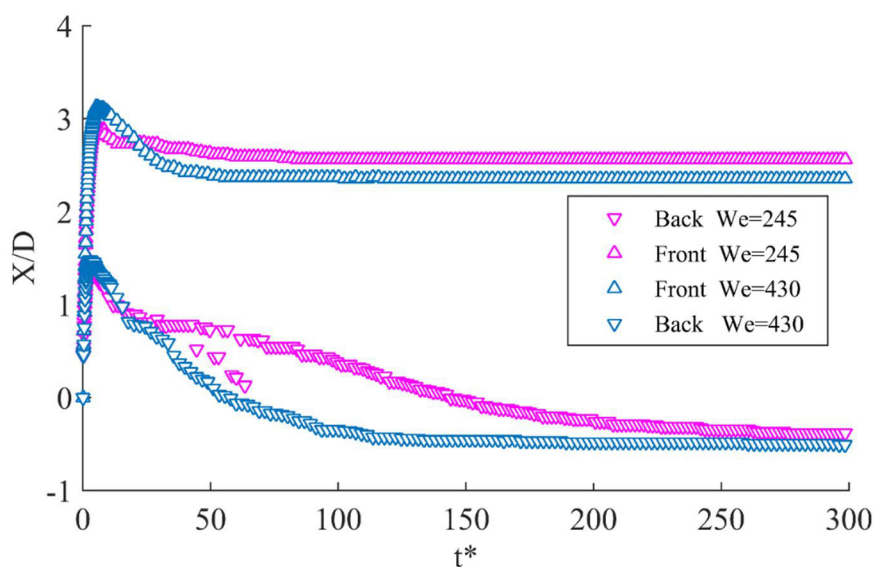
### ۳-۶ اثر سرعت روی برخورد قطره و پخش شدن

در لحظه‌ی برخورد، با تغییر ارتفاع از ۲۷ سانتی‌متر تا ۴۷ سانتی‌متر، سرعت قطره از ۲/۳۰ تا ۳/۰۳ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. لازم به ذکر است که ارتفاع سقوط قطره را نمی‌توان از ۲۷ سانتی‌متر کمتر در نظر گرفت زیرا در این صورت قطره در لحظه‌ی برخورد به همراه رشته‌هایی<sup>۱</sup> خواهد بود که رفتار قطره به هنگام برخورد را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از نکات قابل توجه در جدایش قطرات از سوزن، مربوط به ویژگی‌های ویسکوالاستیک آن‌هاست. به هنگام جدایش قطرات غیرنیوتنی شاهد تشکیل رشته‌های نازکی هستیم که در فاصله‌ی قابل توجهی از نوک سوزن، ارتباط بین قطره و سوزن را حفظ می‌کند. از طرفی تشکیل این رشته‌ها به اندازه‌ای که در مورد قطرات ویسکوالاستیک اهمیت دارد، در مورد قطرات نیوتنی مشهود نیست. چنین پدیده‌هایی به لزجت کششی مایعات ویسکوالاستیک مربوط می‌شود. خاصیتی که موجب مقاومت سیال در برابر کشش می‌شود. تشکیل چنین رشته‌هایی بر دقت نتایج آزمایش‌ها تأثیر زیادی دارد. نکته قابل توجه دیگر این است که با بالا رفتن غلظت پلیمرها در مایعات مورد آزمایش باعث افزایش طول این رشته‌ها می‌شود. بدان معنا که افزودن درصد بالاتری از پلیمرها باعث افزایش لزجت کششی مایعات گردیده است. بنابراین لازم است که در انجام آزمایش‌ها، فاصله مناسبی بین سوزن و سطح برخورد انتخاب شود. در این قسمت اثر سرعت برخورد و افزایش آن بر ضرایب پخش قطره بررسی می‌شود در مقالات برای بیان اثر سرعت برخورد به صورت بی بعد از عدد وبر استفاده می‌شود.

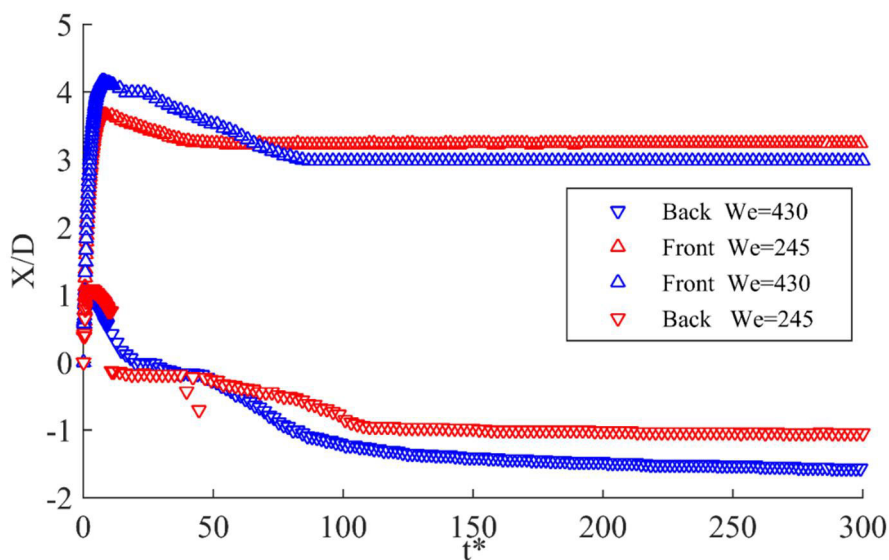
<sup>۱</sup>Filament

وقتی قطره با سرعت بالاتری برخورد می‌کند (عدد وبر بزرگ‌تر) ، به دلیل دارا بودن انرژی جنبشی بیشتر به هنگام برخورد ، بیشتر پخش شده و این پخش‌شدگی در مدت‌زمانی بیشتر (در  $t_{max}$  بزرگ‌تر) و با سرعتی بیشتر اتفاق می‌افتد در مقابل، رفتار قطره در زمان جمع شدن در سرعت بالاتر، تحت تأثیر توأمان لزجت سیال و میزان آب‌دوستی و زبری سطح قرار داد. وقتی قطره آب بر روی پلکسی‌گلاس برخورد می‌کند، چنانچه سرعت برخورد بیشتر باشد، سرعت جمع شدن نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۲-۳ و شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود حداکثر ضریب پخش در قسمت جلویی قطره با سرعت  $2/30$  متر بر ثانیه ( $We=245$ ) ، و با سرعت  $3/03$  متر بر ثانیه ( $We=430$ ) ،  $3/18$  بوده که نشان می‌دهد در زاویه  $15^\circ$  درجه بر روی پلکسی با افزایش  $31\%$  درصدی سرعت برخورد میزان پخش‌شدگی قطره آب  $8\%$  افزایش یافته است. این افزایش در شرایط مشابه برای زاویه  $30^\circ$  درجه حدود  $9\%$  است . این مقایسه نشان می‌دهد با دو برابر شدن زاویه سطح اختلاف میزان پخش‌شدگی به میزان  $1\%$  افزایش پیدا می‌کند. همچنین در زاویه  $15^\circ$  درجه اختلاف سرعت جمع شدن قطره برای دو سرعت برخورد مختلف بیشتر از اختلاف آن در زاویه  $30^\circ$  درجه می‌باشد، اما ضریب پخش ناحیه عقبی برخورد تفاوت چندانی نداشته و در زاویه  $15^\circ$  درجه بسیار نزدیک به هم است. حال آنکه در زاویه  $30^\circ$  درجه این ضریب با افزایش سرعت به دلیل بیشتر کشیده شدن قطره به سمت جلو  $0/02$  کمتر هم می‌شود. همان‌طور که در شکل شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود مقایسه اثر سرعت برای سطح استیل با زاویه  $30^\circ$  درجه در دو سرعت مختلف انجام شده است که با افزایش  $31\%$  درصدی سرعت، ضریب پخش در قسمت جلویی  $7\%$  افزایش پیدا کرده که  $2\%$  از پلکسی در شرایط مشابه کمتر است . علت آن به خصوصیات سطح شامل آب‌دوستی و زبری سطح برمی‌گردد که در ادامه به آن اشاره شده است. همچنین همانند پلکسی با افزایش سرعت برخورد، سرعت و میزان جمع شدن افزایش می‌یابد، که این افزایش بر روی استیل به دلیل زبری بیشتر کمتر است. در ضریب پخش ناحیه عقبی برخورد نیز در هنگام پخش شدن تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود

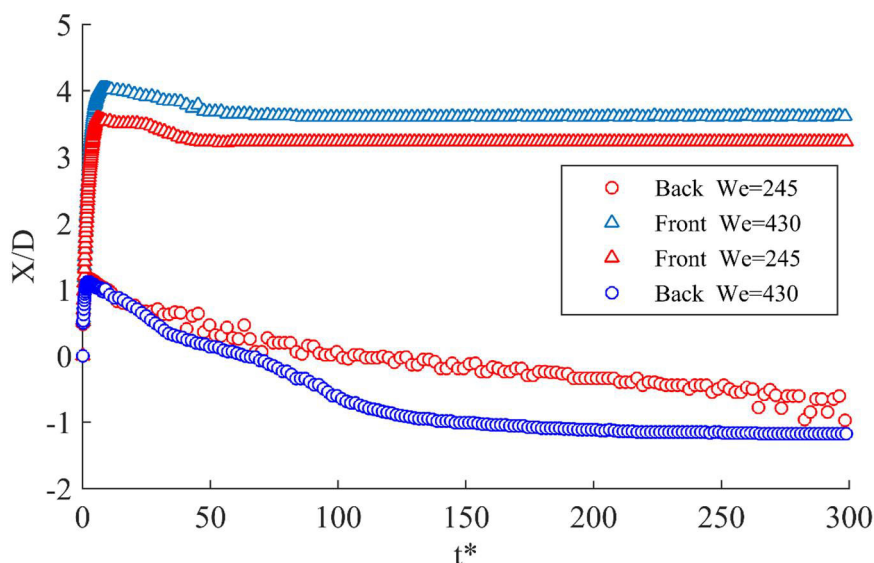
و قطره‌ای که در مرحله جمع شدن با سرعت بیشتری برخورد کرده بود سریع‌تر جمع شده و میزان جمع شدگی آن نیز بیشتر بود



شکل ۲-۳ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش آب بر روی سطح پلکسی گلس در زاویه ۱۵ درجه

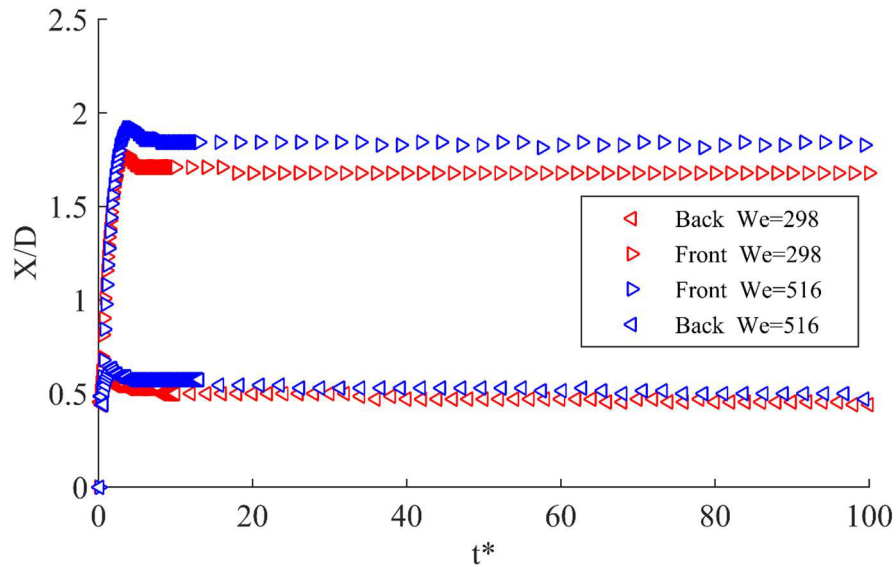


شکل ۳-۳ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش آب بر روی سطح پلکسی گلس در زاویه ۳۰ درجه

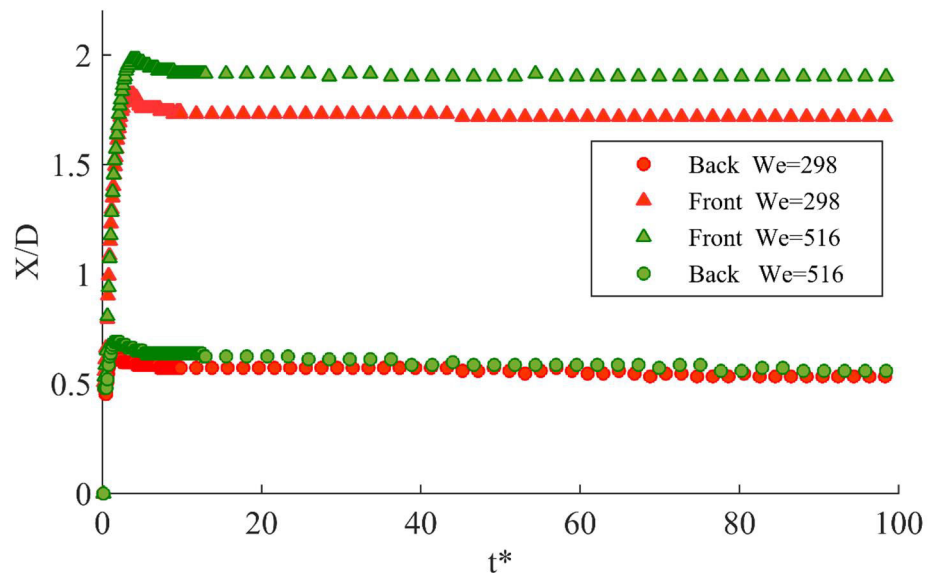


شکل ۳-۴ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش آب بر روی سطح استیل در زاویه ۳۰ درجه

در شکل ۳-۵ و شکل ۳-۶ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش باگر اول بر روی سطح استیل در زاویه ۳۰ درجه مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش باگر اول بر روی سطح استیل در زاویه ۳۰ درجه اثر افزایش سرعت برای سیال غیر نیوتنی باگر اول بررسی شده است که با افزایش سرعت برخورد، میزان حداکثر ضریب پخش شدگی قسمت جلویی در زاویه ۳۰ درجه حدود ۸٪ افزایش پیدا کرده و زمان رسیدن به قطر حداکثری نیز به میزان اندکی افزایش می‌یابد. اما به دلیل لزجت بالای این سیال (۶۳ برابر لزجت آب) در هنگام جمع شدگی قطره، سرعت و میزان جمع شدن آن به میزان بسیار کمی افزایش می‌یابد. برای ضریب پخش در ناحیه عقبی نقطه برخورد نیز با افزایش سرعت برخورد، میزان حداکثر قطر پخش شدگی افزایش یافته اما سرعت و میزان جمع شدن به دلیل اتلاف انرژی قطره بعد از برخورد و غالب بودن اثرات لزجت در هنگام جمع شدن تغییر چندانی نمی‌کند.



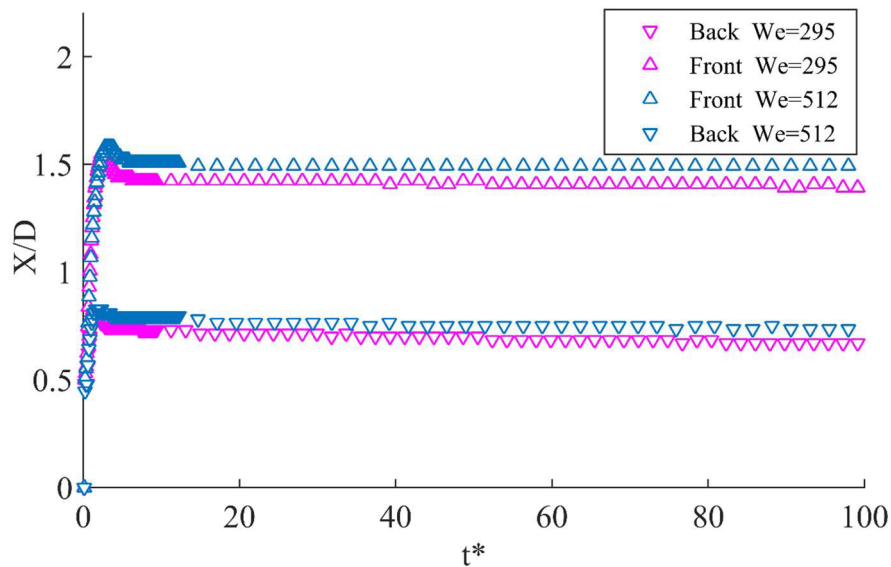
شکل ۵-۳ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش باگر اول بر روی سطح پلکسی گلس در زاویه ۳۰ درجه



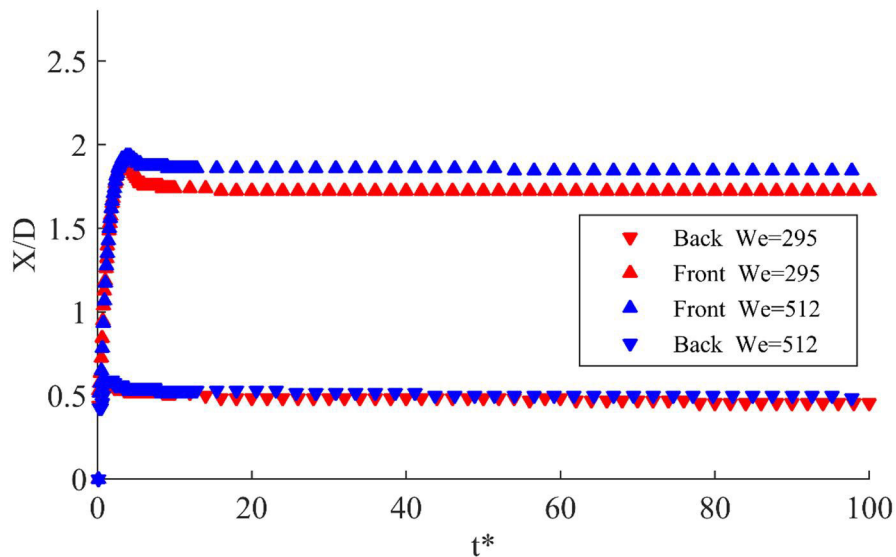
شکل ۶-۳ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش باگر اول بر روی سطح استیل در زاویه ۳۰ درجه

در نمودارهای شکل ۳-۷ و شکل ۳-۸ اثر افزایش سرعت بر سیال باگر دوم که دارای لزجت و خاصیت الاستیک بیشتر نسبت به باگر اول است بررسی شده است همان طور که مشخص است با افزایش سرعت نیز مقدار ضریب پخش در قسمت جلویی افزایش حدود ۴ درصدی را نشان می دهد که به دلیل لزجت و خاصیت الاستیک بیشتر باگر دوم نسبت به باگر اول این افزایش حدود ۴٪

کاهش می‌یابد همچنین سرعت و میزان جمع شدن قطره به دلیل لزجت بالا و خاصیت الاستیک آن تفاوت چندانی نمی‌کند.



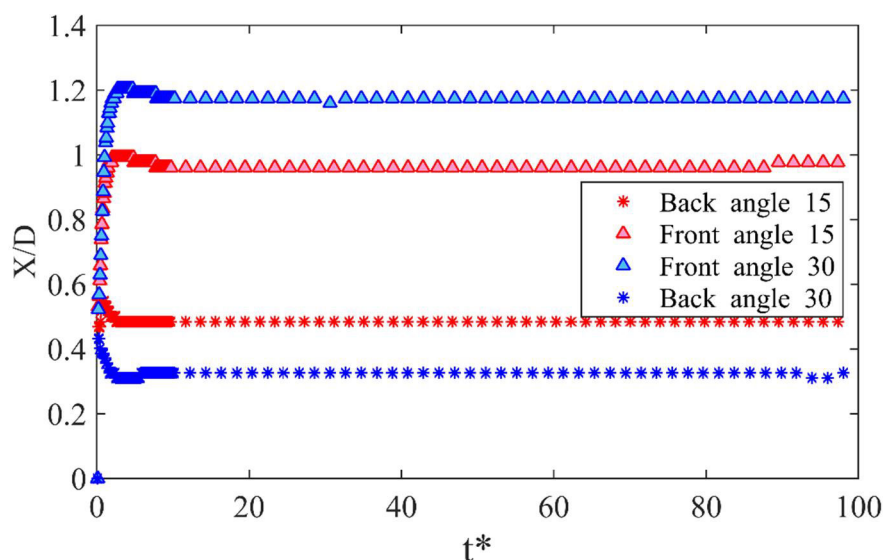
شکل ۳-۷ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش باگر دوم بر روی سطح پلکسی گلس در زاویه ۱۵ درجه



شکل ۳-۸ مقایسه اثر سرعت بر روی ضریب پخش باگر دوم بر روی سطح پلکسی گلس در زاویه ۳۰ درجه

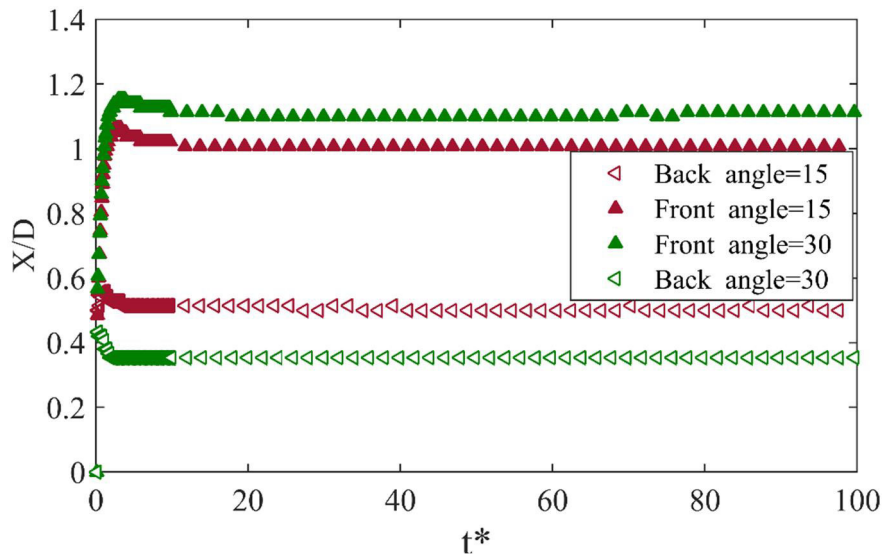
### ۳-۷ زاویه برخورد

در نمودارهای شکل ۳-۹ و شکل ۳-۱۰ ضریب پخش سیال گلیسیرین بر اساس زاویه سطح مورد بررسی قرار گرفته است و سایر پارامترها شامل سرعت و لزجت سیال ثابت فرض شده است. به علت لزجت بسیار زیاد گلیسیرین تأثیر افزایش سرعت بر روی آن ناچیز بوده و در این دو نمودار تأثیر زاویه برخورد و نوع سطح بر روی گلیسیرین بررسی شده است. با افزایش زاویه سطح پلکسی گلس و دو برابر کردن آن، میزان حداکثر ضریب پخش در قسمت جلویی برخورد افزایش ۲۱ درصدی داشت اما برخلاف آن این ضریب در قسمت عقبی برخورد ۲۵٪ کاهش یافت همچنین سرعت جمع شدن ضریب پخش عقبی در زاویه ۳۰ درجه نسبت به زاویه ۱۵ درجه بیشتر بوده حال آنکه این سرعت در قسمت جلویی کمتر است. بر روی سطح استیل نیز افزایش ضریب پخش جلویی به میزان ۱۰٪ و کاهش ضریب پخش در ناحیه عقبی نزدیک به ۲۳٪ مشاهده شد که نشان دهنده افزایش بیشتر (۱۱٪) ضریب پخش جلویی بر روی سطح پلکسی نسبت به استیل به دلیل زبری کمتر آن است اما زبری در کاهش ضریب پخش در قسمت عقبی برخورد تأثیر زیادی نداشت (حدود ۲٪).



شکل ۳-۹ مقایسه ضریب پخش سیال گلیسیرین بر روی پلکسی گلس با سرعت ۲/۳۰ متر بر ثانیه در دو زاویه مختلف





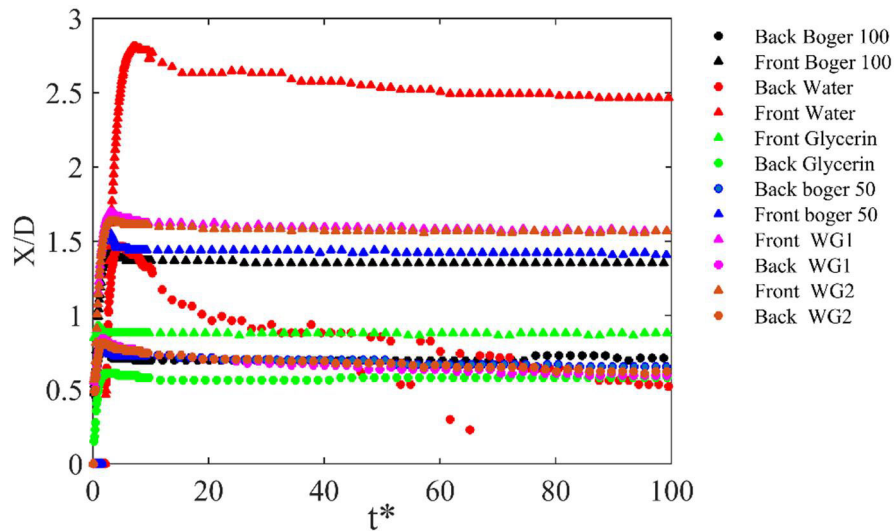
شکل ۳-۱۰ مقایسه ضریب پخش گلیسرین بر روی استیل با سرعت ۲/۳۰ متر بر ثانیه در دو زاویه مختلف

### ۳-۸ اثر لزجت

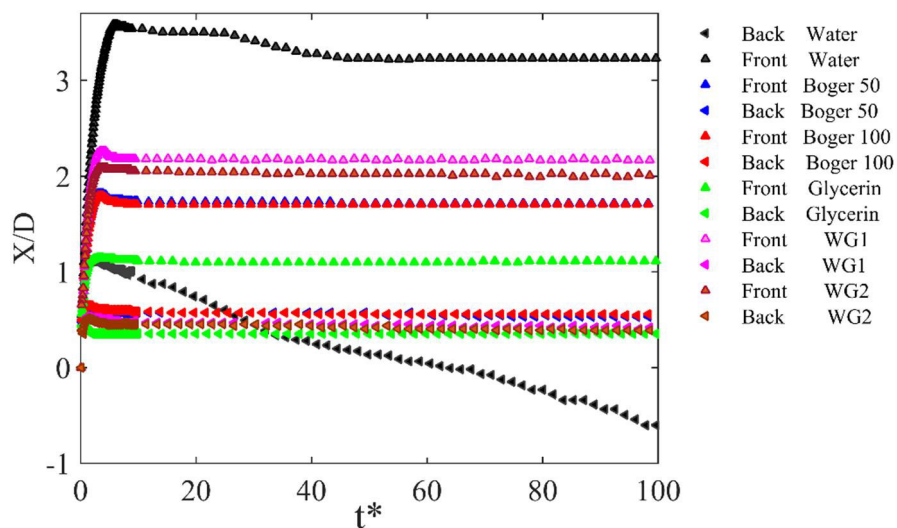
لزجت عبارت است از مقاومت یک سیال در برابر اعمال تنش برشی، به تعریفی دیگر، مقاومت اصطکاکی یک مایع یا گاز را در برابر شارش یا لغزیدن لایه‌ها، هنگامی که تحت تنش برشی قرار گیرد لزجت می‌گویند در این بخش به مقایسه سیالات با لزجت‌های مختلف بر روی سطح پلکسی‌گلس با ثابت فرض کردن پارامترهای دیگر می‌پردازیم، تنوع لزجت سیالات استفاده شده در این آزمایش در محدوده ۱ تا ۱۴۹۰ سانتی پواز است که نشان دهنده اختلاف زیاد لزجت آن‌ها است. برای یافتن اثر لزجت سعی شده بقیه پارامترها شامل دما و فشار سیال ثابت فرض شود. دما در محدوده ۲۵ درجه سیلیسوس و فشار هم فشار اتمسفر هوا در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳-۱۱ و شکل ۳-۱۲ مشاهده می‌شود، سیال آب به دلیل لزجت پایین‌تر نسبت به گلیسرین و سیالات باگر بیشتر پخش شده است. این عدد در شرایط زاویه ۱۵ درجه و سرعت ۲/۳۰ متر بر ثانیه بر روی سطح پلکسی‌گلس حدود ۲/۸ برابر قطر اولیه و در شرایط زاویه ۳۰ درجه و با همین سرعت بر روی استیل ۳/۶ برابر قطر اولیه می‌باشد. همچنین سیالات  $WG_1$  و  $WG_2$  به‌رغم داشتن لزجت یکسان با سیالات باگر به دلیل نداشتن خاصیت الاستیک که در ادامه به آن اشاره شده است بیشتر پخش شده و با

سرعت کمتری جمع می‌شوند. سیالات با لزجت پایین‌تر به میزان بیشتری پخش شده و با سرعت کمتری جمع می‌شوند همچنین میزان جمع شدگی در آن‌ها نسبت به سیالات با لزجت بالاتر بیشتر

است



شکل ۳-۱۱ مقایسه اثر لزجت بر ضریب پخش سیالات مختلف بر روی پلکسی گلس با سرعت  $2/30$  متر بر ثانیه در زاویه  $15^\circ$  درجه



شکل ۳-۱۲ مقایسه اثر لزجت بر ضریب پخش سیالات مختلف بر روی استیل با سرعت  $2/30$  متر بر ثانیه در زاویه  $30^\circ$  درجه

مقایسه مقادیر  $t_{max}$  برای هر سطح، نشان می‌دهد که تحت شرایطی که سرعت برخورد و سطح یکسان هستند، زمانی که طول می‌کشد تا قطره به بیشترین قطر خود برسد از آب تا گلیسیرین در حال کاهش است. با این حال قطره‌ها بیشتر پخش شده و در جهت معکوس با سرعت کمتری جمع شدند.

### ۳-۹ اثر آب‌دوستی و زبری سطح

زاویه تماس تأثیر بسیار مهمی در رفتار قطره به هنگام برخورد با سطح جامد، از جمله تغییر شکل، پخش شدن و یا حتی جدا شدن قطره از روی سطح دارد. رفتار قطره در برخورد با سطح جامد، تحت تأثیر رطوبت پذیری سطح می‌باشد. رطوبت پذیری هر سطح به وسیله‌ی زاویه تماس بین مایع با سطح جامد مشخص می‌گردد. شکل ۳-۱۳ نشان‌دهنده‌ی زاویه تماس مایع - جامد در حالت سکون قطره بر روی سطح می‌باشد. زاویه تماس سطوح آب‌گریز مقداری بیش از ۹۰ درجه و سطوح آب‌دوست مقداری کمتر از ۹۰ درجه است که بسته به درجه آب‌دوستی آن تغییر می‌کند. زاویه تماس در مدل‌سازی عددی و تحلیلی به عنوان یک شرط مرزی مهم به کار برده می‌شود. مخصوصاً نقش آن در برخوردهایی با انرژی اینرسی کم نسبت به انرژی ویسکوز یا موئینگی، بسیار اساسی است. هر چه زاویه تماس قطره با سطح مقدار کمتری باشد رطوبت پذیری سطح بیشتر بوده و به عبارتی درجه آب‌دوستی دوستی سطح بالاتر است. در آزمایش صورت گرفته آب‌دوستی دو سطح پلکسی گلس و استیل مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۳-۱۴ و شکل ۳-۱۵ مشاهده می‌کنید زاویه تماس میانگین قطره آب بر روی سطح پلکسی گلس برابر با  $64/23$  درجه و برای سطح استیل  $74/30$  درجه است که حکایت از آب‌دوستی بیشتر پلکسی گلس نسبت به استیل دارد.



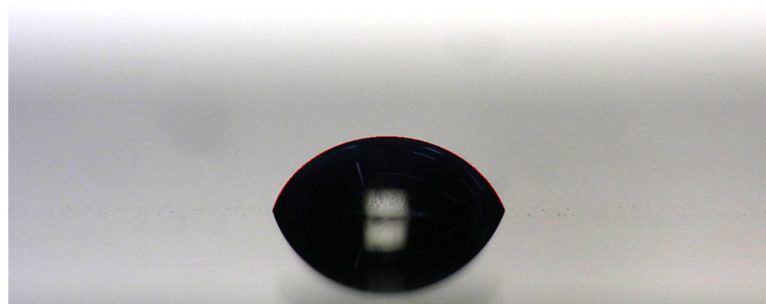
شکل ۳-۱۳ زاویه تماس جامد-مایع: بر روی سطوح آب دوست (سمت راست) و آب گریز (سمت چپ).

average angle=64.2338061016202 Deg  
 left angle=67.4632124894072 Deg  
 right angle=61.0043997138332 Deg  
 date=2017/06/12  
 time=12/59/56



شکل ۳-۱۴ زاویه تماس قطره آب با سطح پلکسی گلس

average angle=74.3001469147523 Deg  
 left angle=78.0643974567326 Deg  
 right angle=70.535896372772 Deg  
 date=2017/06/12  
 time=12/48/39



شکل ۳-۱۵ تماس قطره آب با سطح استیل

### ۳-۹-۱ زبری سطح

زبری خاصیتی از بافت سطحی ماده است، که با توپوگرافی ناهموار آن در مقایسه با یک سطح صاف ایده آل شناسایی می‌شود. یک سطح زبر حاوی ناهمواری، برآمدگی و فرورفتگی‌هایی است که به فاصله بسیار کم از یکدیگر قرار گرفته‌اند. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری زبری سطحی وجود دارد که به دودسته تکنیک‌های تماسی و غیر تماسی قابل تقسیم هستند. در روش تماسی، که اساس

کار دستگاه پروفایل متر است، زبری سطح با حرکت دادن نوک حسگر در طول سطح اندازه‌گیری می‌شود. از ایرادات این دستگاه مخدوش ساختن سطح قطعه و دقت پایین تر آن نسبت به دستگاه‌های غیر تماسی است. یکی از متداول‌ترین دستگاه‌های غیر تماسی برای اندازه‌گیری زبری سطح، میکروسکوپ الکترونی (AFM) است. این میکروسکوپ به وسیله اشعه لیزر سطح موردنظر را روبش کرده و پستی‌ها و بلندی‌های سطح را آشکار می‌سازد. از مزایای این روش دقت بالاتر و سالم ماندن سطح قطعه نسبت به روش تماسی است. برای محاسبه زبری سطح از دستگاه AFM موجود در آزمایشگاه نانوفیزیک استفاده شده است. تصاویر روبش شده از سطح موردنظر به وسیله نرم‌افزار Imager مورد پردازش قرار گرفته و میانگین زبری کل سطح محاسبه می‌شود. در اینجا پارامتری به عنوان  $R_a$  به عنوان میانگین ارتفاع‌های بلند (قله‌ها) و ارتفاع‌های پایین (دره‌ها) معرفی شده که میانگین زبری سطح به وسیله آن محاسبه می‌شود

$$R_a = 1/n \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3-6)$$

ابتدا به وسیله دستور سطح‌بندی<sup>۱</sup>، شیب سطح موردنظر گرفته شده سپس برای از بین بردن غبار و کداری صفحه از گزینه نویز<sup>۲</sup> و فیلترینگ<sup>۳</sup> استفاده می‌شود، بعد از انجام این مراحل با دستور آنالیز<sup>۴</sup>، زبری میانگین صفحه محاسبه می‌شود.

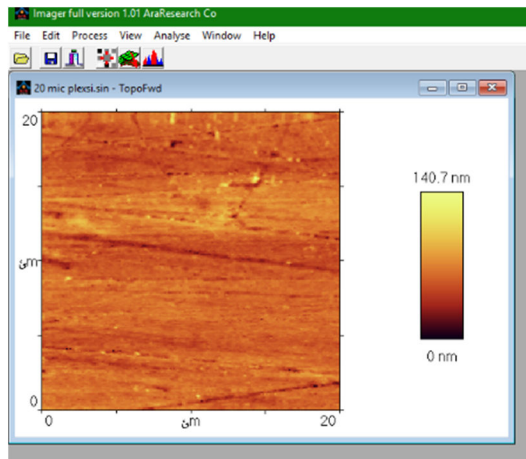
---

<sup>1</sup> Leveling

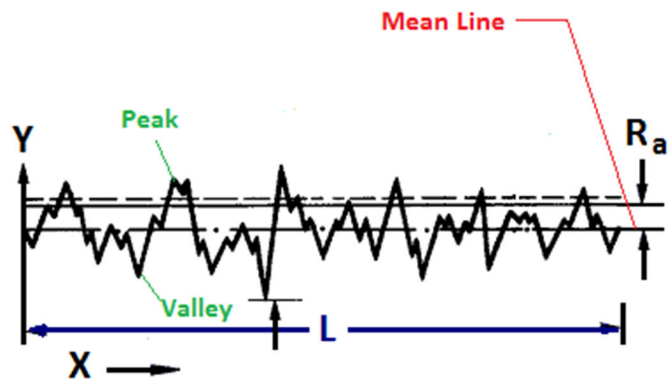
<sup>2</sup> Noise

<sup>3</sup> Filtering

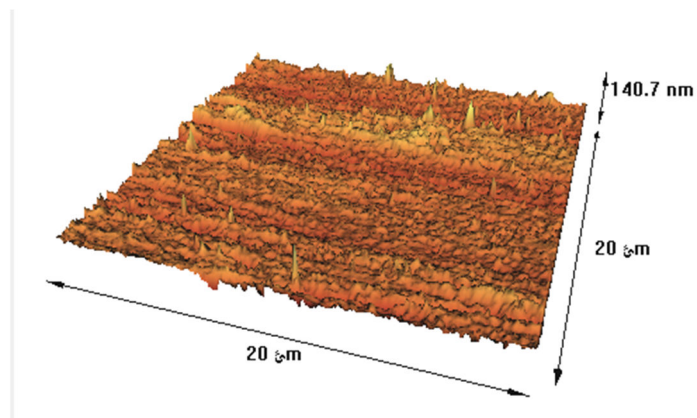
<sup>4</sup> Analyse



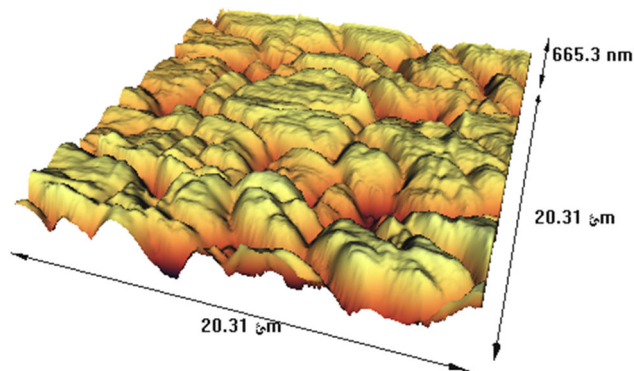
شکل ۳-۱۶ نمونه تصویر نرم افزار imager



شکل ۳-۱۷ شماتیک قله‌ها و دره‌ها و میانگین آن‌ها



شکل ۳-۱۸ نمونه تصویر سه‌بعدی سطح پلکسی‌گلس به وسیله دستگاه AFM

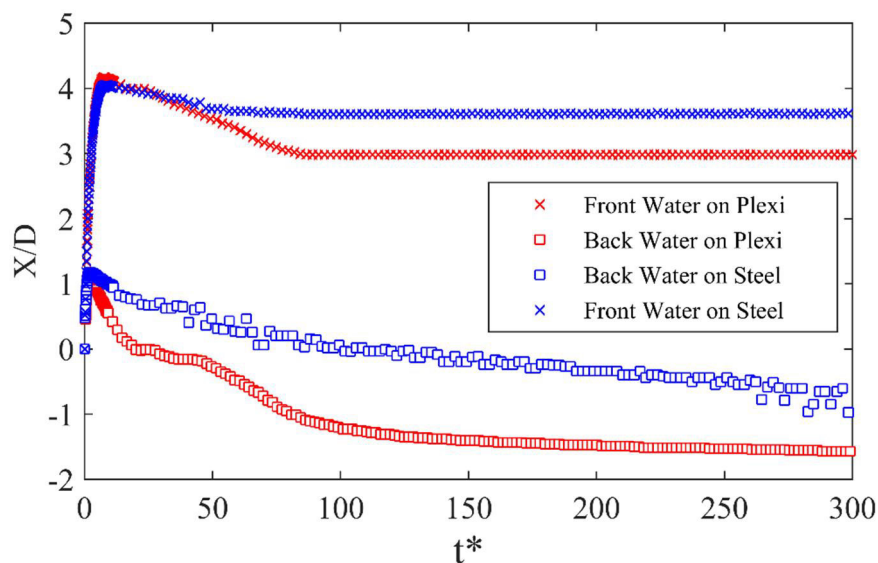


شکل ۳-۱۹ نمونه تصویر سه بعدی سطح استیل ضدزنگ به وسیله دستگاه AFM

واحد زبری در آزمایش موردنظر برحسب نانومتر بوده که حکایت از دقت بالا و خطای کم در محاسبات است. بعد از پردازش تصاویر زبری سطح پلکسی ۱۲ نانومتر و سطح استیل ۱۱۵ نانومتر به دست آمد که نشان دهنده زبری حدوداً ۱۰ برابری سطح استیل نسبت به پلکسی گلس می باشد. در ادامه تأثیرات زبری و آب دوستی سطح بر نحوه پخش و جمع شدن قطره بررسی شده است.

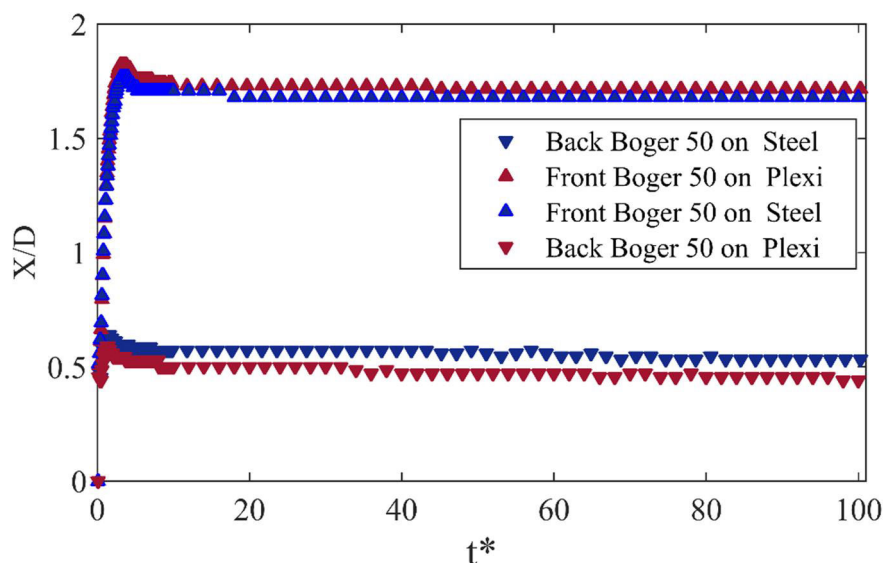
همان طور که در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. ضریب پخش آب بر روی دو سطح پلکسی-گلس و استیل در زاویه ۳۰ درجه و سرعت ۳/۰۳ مورد تحلیل قرار گرفته است. مقایسه ۴ نمودار نشان می دهد که آب بر روی سطح پلکسی گلس که دارای آب دوستی بیشتر و زبری کمتر نسبت به سطح استیل است، بیشتر پخش شده (حدود ۰/۱۲ بیشتر نسبت به استیل) اما در مرحله جمع شدن تأثیر زبری سطح بیشتر می باشد. علیرغم این که آب دوستی پلکسی گلس نسبت به استیل بیشتر است قطره بر روی پلکسی گلس نسبت به استیل بیشتر جمع شده و سرعت جمع شدگی پلکسی گلس نیز بیشتر می باشد، که این امر به دلیل زبری حدوداً ۱۰ برابری استیل نسبت به پلکسی گلس اتفاق می افتد. همچنین علت تأثیر بیشتر زبری در مرحله جمع شدن نسبت به مرحله پخش شدگی را می توان در کاهش انرژی جنبشی قطره در مرحله جمع شدن نسبت به مرحله پخش شدن دانست زیرا در مرحله پخش شدن به علت سقوط قطره از ارتفاع ۴۷ سانتیمتری قطره دارای انرژی جنبشی به مراتب

بیشتری نسبت به حالت جمع شدن آن است و به همین علت زبری و آب‌دوستی سطح، تأثیر خود را در مرحله جمع شدن بیشتر نشان می‌دهد. همچنین برای مقایسه زبری و آب‌دوستی دو سطح ضریب پخش سیال غیر نیوتنی باگر اول برای هر دو سطح استیل و پلکسی‌گلس در زاویه ۳۰ درجه و سرعت ۲/۳۰ متر برثانیه بررسی شده است. همان طور که در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است ضریب پخش در قسمت جلویی برخورد برای پلکسی نسبت به استیل بیشتر می‌باشد. همچنین میزان جمع شدگی در پلکسی به میزان بسیار کمتری (حدود ۰/۰۳) بیشتر از استیل است که این تفاوت کم به علت لزجت ۶۳ برابری باگر اول نسبت به سیال آب می‌باشد، که باعث شده تفاوت بر روی این دو سطح به میزان بسیار کمتری دیده شود. همچنین سرعت جمع شدن بر روی پلکسی نیز نسبت به استیل با تفاوت اندکی بیشتر است



شکل ۳-۲۰ مقایسه ضریب پخش آب بر روی پلکسی‌گلس و استیل در زاویه ۳۰ درجه با سرعت ۳/۰۳ متر بر ثانیه





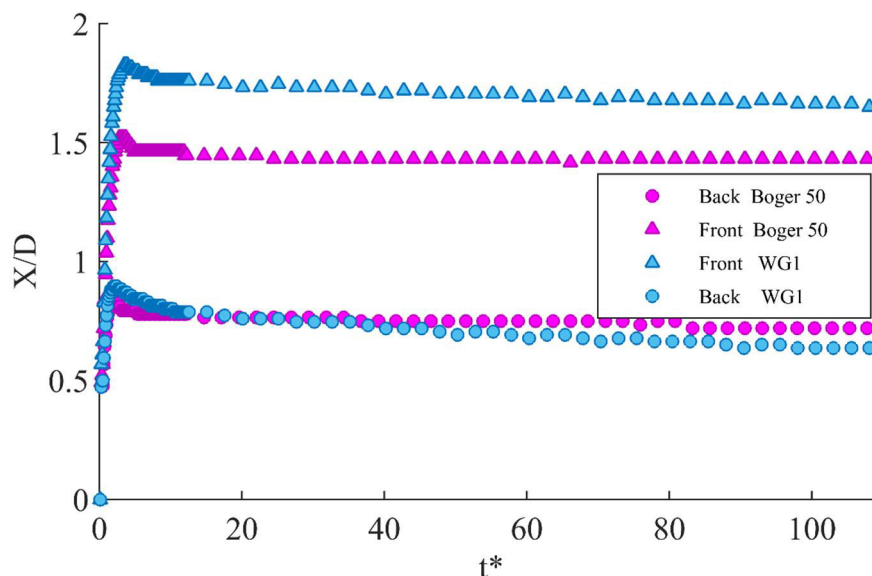
شکل ۳-۲۱ مقایسه ضریب پخش باگر اول روی پلکسی گلس و استیل در زاویه ۳۰ درجه با سرعت ۲/۳۰ متر بر ثانیه

### ۳-۱۰ اثر الاستیک

در این بخش به مقایسه سیال غیر نیوتنی باگر و سیال نیوتنی معادل آن با همان لزجت می-پردازیم، همان طور که در بخش قبلی ذکر شد سیال باگر یک سیال ویسکوالاستیک است که خاصیت ویسکوز و الاستیک بودن را توأمان در بردارد و ویسکوز بودن آن به مانند یک دمپر و الاستیک بودن آن را به وسیله فنر در مدل ماکسول بیان شده است. حال با مقایسه این دو سیال به بررسی اثر الاستیک بر پخش شدن و جمع شدن قطره و تفاوت آن با سیال نیوتنی معادل آن با همان لزجت که خاصیت الاستیک بودن را دارا نیست پرداخته شده است.

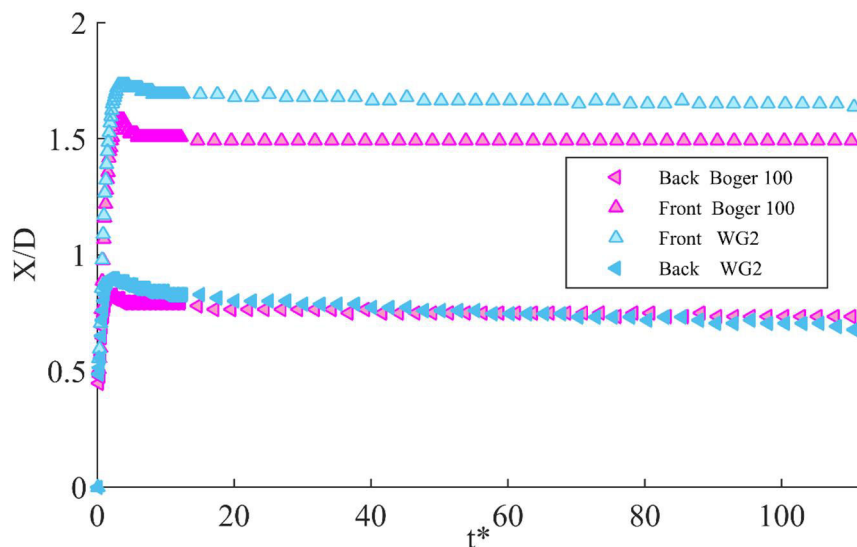
همان طور که در شکل ۳-۲۲ و شکل ۳-۲۳ نشان داده شده است ضریب پخش باگر اول و باگر دوم و معادل نیوتنی آن ها بر روی پلکسی گلس در شرایط زاویه ۱۵ درجه و سرعت ۳/۰۳ متر بر ثانیه بررسی شده است. ضریب پخش جلویی WG1 نسبت به باگر اول بسیار بیشتر پخش شده (افزایش ۱۸٪) و در قسمت عقبی برخورد نیز ۸ درصد افزایش می یابد. ضریب پخش جلویی سیال باگر دوم

نیز نسبت به معادل نیوتنی آن (WG2) ، ۱۰٪ افزایش می‌یابد. علت کمتر بودن این افزایش برای باگر دوم نسبت به باگر اول، لزجت بیشتر باگر دوم نسبت به باگر اول می‌باشد. همچنین سرعت و میزان جمع شدگی در WG1 و WG2 بیشتر از باگر اول و باگر دوم می‌باشد. ضریب پخش جلویی باگر اول در قسمت جمع شدن ۹٪ کاهش می‌یابد و در مقایسه با آن ضریب پخش WG1 ۱۳٪ کمتر می‌شود. در باگر دوم این جمع شدگی به ۸٪ تقلیل پیدا کرده و سیال نیوتنی معادل آن نیز ۱۱٪ کاهش را نشان می‌دهد. در قسمت ضریب پخش عقبی نیز شاهد همین روند با درصدهای کمتر هستیم. علت این امر را می‌توان در اثر الاستیک باگر اول و دوم نسبت به معادل‌های نیوتنی آن‌ها WG1 و WG2 دانست، زیرا که سیالات باگر به علت خاصیت الاستیک همانند یک فنر عمل کرده و در مرحله پخش شدن به میزان کمتری پخش می‌شود به این علت که رشته‌های پلیمری اجازه پخش شدن بیشتر را نداده و در مرحله جمع شدن نیز سرعت جمع شدگی آن‌ها بیشتر بوده و میزان جمع شدگی آن‌ها کمتر است و زمان کمتری برای رسیدن به قطر حداکثر و حداقلی در آن‌ها طی می‌شود.



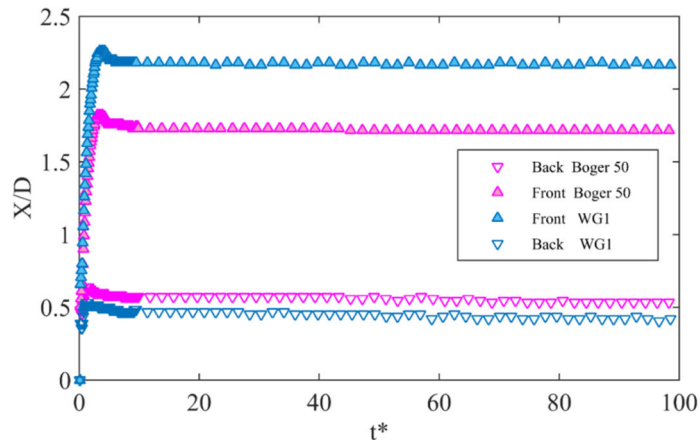
شکل ۳-۲۲ مقایسه اثر الاستیک بر ضریب پخش باگر اول و معادل نیوتنی آن بر روی پلکسی گلس در زاویه ۱۵

درجه با سرعت ۳/۰۳ متر بر ثانیه



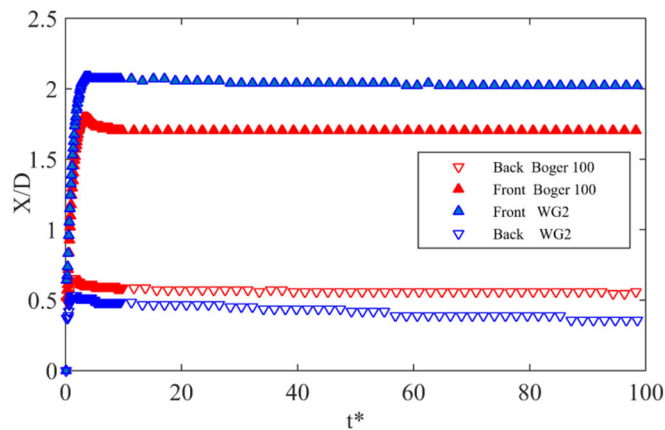
شکل ۳-۲۳ مقایسه اثر الاستیک بر ضریب پخش باگر دوم و معادل نیوتنی آن بر روی پلکسی گلس در زاویه ۱۵ درجه با سرعت ۳/۰۳ متر بر ثانیه

همان‌طور که در شکل‌های شکل ۳-۲۴ و شکل ۳-۲۵ نشان داده شده است، ضریب پخش باگر اول و باگر دوم و معادل نیوتنی آن‌ها بر روی پلکسی در شرایط زاویه ۳۰ درجه و سرعت ۳/۰۳ متر بر ثانیه بررسی شده است. همان‌طور که بر روی سطح پلکسی گلس ذکر شد ضریب پخش  $WG_1$  و  $WG_2$  نسبت به باگر اول و دوم در قسمت جلویی بیشتر پخش شده و سرعت جمع شدن آن نیز بیشتر است. ضریب پخش جلویی باگر اول در زاویه ۳۰ درجه افزایش ۲۲ درصدی به همراه دارد و این افزایش برای باگر اول به علت بالاتر بودن لزجت آن حدود ۱۶٪ می‌باشد همچنین سرعت جمع شدن در هر دو سیال نسبت به معادل نیوتنی آن‌ها بیشتر است با این تفاوت که در زاویه ۳۰ درجه اختلاف چندانی در میزان جمع شدن قطره مشاهده نمی‌شود. همچنین ضریب پخش در قسمت عقبی به علت بیشتر پخش شدن سیال در قسمت جلویی در باگر اول و دوم بیشتر از معادل نیوتنی آن‌ها  $WG_1$  و  $WG_2$  می‌باشد.



شکل ۳-۲۴ مقایسه اثر الاستیک بر ضریب پخش باگر اول و معادل نیوتنی آن بر روی پلکسی در زاویه ۳۰ درجه با

سرعت ۳/۰۳ متر بر ثانیه



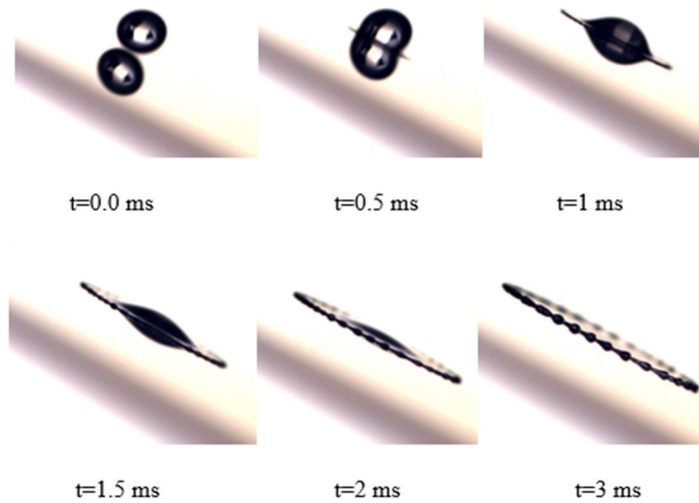
شکل ۳-۲۵ مقایسه اثر الاستیک بر ضریب پخش باگر دوم و معادل نیوتنی آن بر روی پلکسی در زاویه ۳۰ درجه با

سرعت ۳/۰۳ متر بر ثانیه

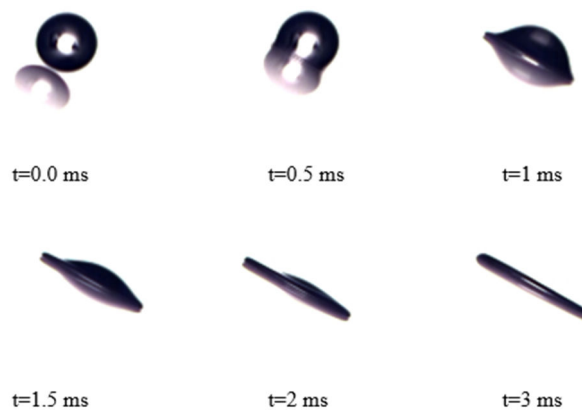
از مقایسه نمودارهای زاویه ۱۵ و ۳۰ درجه می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه سطح تأثیر خاصیت الاستیک بر میزان پخش‌شدگی بیشتر شده حال آنکه به علت افزایش زاویه تأثیر آن بر میزان جمع‌شدگی و سرعت آن نسبت به زاویه ۱۵ درجه کاهش محسوسی می‌یابد همچنین به علت افزایش دو برابری زاویه و پخش شدن بیشتر در قسمت جلویی، ضریب پخش عقبی برای باگر اول و ۱۰۰ بیشتر از معادل نیوتنی آن‌ها در زاویه ۳۰ درجه است.

با توجه به این‌که تصاویر با سرعت ۸۰۰۰ تصویر بر ثانیه گرفته شده است، فاصله زمانی هر عکس

تا عکس بعدی ۰/۱۲۵ میلی ثانیه بوده که دقت رسم نمودار ضریب پخش برحسب زمان را بهبود می-  
بخشد. در شکل ۲۶-۳ و ۲۷-۳ مراحل تغییر شکل سیال باگر دوم و آب بر روی پلکسی و استیل در  
زاویه ۳۰ درجه با سرعت ۳/۰۳ متر بر ثانیه نشان داده شده است.



شکل ۲۶-۳ مراحل تغییر شکل قطره آب بعد از برخورد با سطح استیل در زاویه ۳۰ درجه با سرعت ۳.۰۳ متر بر  
ثانیه



شکل ۲۷-۳ مراحل تغییر شکل قطره باگر دوم بعد از برخورد با سطح پلکسی گلس در زاویه ۳۰ درجه با سرعت ۳.۰۳

متر بر ثانیه



## فصل چهارم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه، از طریق به تصویر کشیدن رفتار قطره سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی (باگر) پس از برخورد بر روی سطوح شیب‌دار خشک و جامد، به مقایسه آن‌ها پرداخته شده است. فرایند نشست قطره و پخش شدن و جمع شدن آن روی سطوح شیب‌دار و آب‌دوست، از مرحله ابتدایی پخش شدن تا رسیدن به حالت تعادل نهایی مورد تحقیق قرار گرفته است.

مطالعه یک قطره منفرد زمینه مناسبی را برای بررسی تأثیر عوامل مختلف بر دینامیک قطره و تعیین پارامترهای مؤثر بر رفتار آن را فراهم می‌کند. از این رو در این قسمت چگونگی تأثیر عواملی چون لزجت سیال، سرعت و زاویه برخورد و میزان آب‌دوستی و زبری سطح و همچنین خاصیت الاستیک سیالات غیر نیوتنی بر رفتار قطره منفرد پس از برخورد بر روی سطوح پرکاربردی همچون پلکسی‌گلس و استیل مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۲ نتیجه‌گیری

مبنای مطالعه حاضر تصویربرداری از حرکت قطرات و سپس پردازش تصاویر حاصل از آن بود. بنابراین در این راستا از روش‌های مختلف پردازش تصویر و نرم‌افزارهایی که برای به دست آوردن ابعاد قطره از جمله قطر و حجم و طول پخش‌شدگی آن استفاده شد و همچنین خصوصیات سطح از جمله زبری آن به وسیله نرم‌افزارهای مخصوص پردازش شد.

در طی مرحله پخش‌شدگی قطره با افزایش سرعت برخورد، میزان حداکثر قطر پخش شدن هم در قسمت جلویی و هم در قسمت عقبی نقطه برخورد افزایش یافت ضمن اینکه زمان رسیدن به قطر حداکثری نیز افزایش پیدا کرد. همچنین با افزایش سرعت برخورد، سرعت جمع شدن قطره و میزان جمع شدن آن نیز افزایش پیدا کرد میزان افزایش ضریب پخش‌شدگی و همچنین افزایش سرعت جمع شدن قطره بسته به نوع سیال و لزجت آن متغیر بود و برای آب با لزجت بسیار کمتر نسبت به



گلیسیرین و سیال غیر نیوتنی باگر رشد این ضریب بسیار بیشتر بود. با مقایسه قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی، بررسی‌ها نشان دادند در مرحله پخش شدن، قطره‌ای که از لزجت کمتر و سرعت برخورد بالاتری برخوردار است، با سرعتی بیشتر و تا فاصله‌ای دورتر پخش می‌شود. قطرات غیرنیوتنی باگر اول و باگر دوم نیز بیشتر و سریع‌تر از قطره نیوتنی با لزجت بالاتر از لزجت آن‌ها (گلیسیرین) پخش شدند اما این قطرات غیرنیوتنی نسبت به قطره نیوتنی با لزجت پایین‌تر از لزجت آن‌ها (آب)، خیلی کمتر پخش شده و بسیار آرام‌تر جمع شدند. البته صرف‌نظر از نوع سطح، در یک‌زمان سپری شده یکسان، شکل قطره‌های باگر در تمام طول مرحله پخش شدن تقریباً مشابه یکدیگر بودند. در نتیجه سرعت برخورد و لزجت سیال اثری بارز بر مرحله پخش شدن دارند. از سوی دیگر، میزان آب‌دوستی و زبری سطح تنها اثری جزئی در این مرحله از خود نشان می‌دهد.

با اینکه آب‌دوستی پلکسی‌گلس به میزان کمی از استیل بیشتر است اما به دلیل زبری ۱۰ برابری استیل نسبت به پلکسی‌گلس تأثیر زبری بر ضریب پخش بسیار محسوس‌تر بوده و در مرحله جمع شدن، میزان زبری سطح و لزجت سیال هر دو نقش مهمی را ایفا می‌کنند. با این وجود، اثر سرعت برخورد تنها در مورد قطراتی با لزجت پایین برجسته است. همچنین تفاوت سیال غیرنیوتنی و اسکوالاستیک با سیال نیوتنی دارای لزجت معادل آن برای پی بردن به خاصیت الاستیک بررسی شد که در نتیجه سیال نیوتنی معادل با طول زیادتر و در زمان بیشتری نسبت به سیال الاستیک پخش شده و در مرحله جمع شدن سرعت جمع شدن سیال الاستیک بیشتر بوده اما سیال نیوتنی به آرامی جمع شده و به طول حداقل خود رسید.

#### ۳-۴ پیشنهادها

به منظور تکمیل مطالعه حاضر پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

۱- استفاده از دو دوربین به منظور بررسی حرکت قطره به صورت سه بعدی بعد از جدایش از سوزن

۲- بررسی برخورد قطرات منتخب بر روی سطحی آب‌گریز و مقایسه آن با نتایج ارائه‌شده در این

تحقیق

۳- انجام آزمایش‌ها بر روی لایه‌ی نازکی از سیال

۴- انجام آزمایش در طیف گسترده‌تری از زاویه‌ها به‌منظور بررسی پدیده جهش احتمالی قطره

۵- بررسی پدیده انتقال حرارت بین سیال و سطح برخورد

۶- بررسی برخورد چند قطره بر روی یکدیگر

۷- استفاده از سوزن‌هایی با قطرهای مختلف به‌منظور بررسی اثر قطر قطره بر رفتار آن پس از

برخورد

۸- استفاده از دستگاه لیزر به‌منظور عکس‌برداری خودکار دوربین بعد از جدایش قطره

۹- انجام آزمایش بر روی یک سطح با زبری‌های مختلف

۱۰- انجام آزمایش با انواع سیالات غیر نیوتنی رقیق و غلیظ شونده

# پیوست

جدول پیوست ۱- مدول ذخیره شده [ $G'$ ] و هدرفتته [ $G''$ ] برای باگر اول		
Angular Frequency [1/s]	Storage module [Pa]	Loss module [Pa]
$\omega$	$G'$	$G''$
۳/۲۶	۰،۰۹۹۷۷۸	۰،۳۷۲۰۸
۲،۸۲	۰،۰۹۳۵۲۴	۰،۳۶۷۷۲
۲،۴۴	۰،۰۸۰۱۹۲	۰،۳۵۰۱۱
۲،۱۱	۰،۰۸۲۹۲۸	۰،۳۲۲۲۷
۱،۸۳	۰،۰۸۲۹۲۵	۰،۲۹۷۸۸
۱،۵۸	۰،۰۷۲۲۷۵	۰،۲۷۷۳۹
۱،۳۷	۰،۰۷۵۱۰۶	۰،۲۵۷۳۳
۱،۱۹	۰،۰۶۵۸۱۴	۰،۲۳۹۳
۱،۰۳	۰،۰۶۵۲۶۱	۰،۲۱۹۶۴
۰،۸۸۷	۰،۰۶۱۴۶۵	۰،۲۰۵۶۷
۰،۷۶۸	۰،۰۵۳۲۷	۰،۱۹۳۸۶
۰،۶۶۴	۰،۰۵۰۲۴۵	۰،۱۷۲۸۹
۰،۵۷۵	۰،۰۵۶۴۰۴	۰،۱۶۸۰۵
۰،۴۹۷	۰،۰۴۶۳۹۳	۰،۱۵۸۱۶
۰،۴۳	۰،۰۲۸۰۸۴	۰،۱۴۸۸۵
۰،۳۷۲	۰،۰۱۳۷۲	۰،۱۴۴۰۴

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

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

- [1] D. F. James, Boger fluids, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 41, pp. 129-142, 2009.
- [2] T. Goldmann, J. S. Gonzalez, DNA-printing: utilization of a standard inkjet printer for the transfer of nucleic acids to solid supports, *Journal of biochemical and biophysical methods*, Vol. 42, No. 3, pp. 105-110, 2000.
- [3] J.-T. Yeh, 'Simulation and Industrial Applications of Inkjet, in *Proceeding of*.
- [4] M. Rieber, A. Frohn, A numerical study on the mechanism of splashing, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, No. 5, pp. 455-461, 1999.
- [5] A. L. Yarin, Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing..., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 38, pp. 159-192, 2006.
- [6] H. E. Edgerton, J. R. Killian, *Flash!: Seeing the unseen by ultra high-speed photography*: CT Branford Co., 1954.
- [7] S. Thoroddsen, T. Etoh, K. Takehara, High-speed imaging of drops and bubbles, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 40, pp. 257-285, 2008.
- [8] R. Rioboo, C. Tropea, M. Marengo, Outcomes from a drop impact on solid surfaces, *Atomization and Sprays*, Vol. 11, No. 2, 2001.
- [9] ج. ظهرايي چکنه، طراحی و ساخت یک مولد قطره به منظور بررسی تجربی برخورد قطره به سطح، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهشهای کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، ۲۰۱۶.
- [10] ن. قربانی، ا. ر. پیشه ور، شبیه سازی هیدرودینامیکی برخورد قطره در مقیاس مزو با سطح جامد با روش *DPD*، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲۰۱۵.
- [11] B. L. Scheller, D. W. Bousfield, Newtonian drop impact with a solid surface, *AICHE Journal*, Vol. 41, No. 6, pp. 1357-1367, 1995.
- [12] S. Schiaffino, A. A. Sonin, Molten droplet deposition and solidification at low Weber numbers, *Physics of Fluids*, Vol. 9, No. 11, pp. 3172-3187, 1997.
- [13] C. Clanet, C. Béguin, D. Richard, D. Quéré, Maximal deformation of an impacting drop, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 517, pp. 199-208, 2004.
- [14] L. Zhang, J. Toole, K. Fezzaa, R. Deegan, Evolution of the ejecta sheet from the impact of a drop with a deep pool, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 690, pp. 5-15, 2012.
- [15] M. Reyssat, D. Richard, C. Clanet, D. Quéré, Dynamical superhydrophobicity, *Faraday discussions*, Vol. 146, pp. 19-33, 2010.
- [16] P. Tsai, R. CA van der Veen, M. van de Raa, D. Lohse, How micropatterns and air pressure affect splashing on surfaces, *Langmuir*, Vol. 26, No. 20, pp. 16090-16095, 2010.
- [17] P. Tsai, M. H. Hendrix, R. R. Dijkstra, L. Shui, D. Lohse, Microscopic structure influencing macroscopic splash at high Weber number, *Soft Matter*, Vol. 7, No. 24, pp. 11325-11333, 2011.
- [18] R. C. van der Veen, M. H. Hendrix, T. Tran, C. Sun, P. A. Tsai, D. Lohse, How microstructures affect air film dynamics prior to drop impact, *Soft matter*, Vol. 10, No. 21, pp. 3703-3707, 2014.

- [19] Y. Son, C. Kim, D. H. Yang, D. J. Ahn, Spreading of an inkjet droplet on a solid surface with a controlled contact angle at low Weber and Reynolds numbers, *Langmuir*, Vol. 24, No. 6, pp. 2900-2907, 2008.
- [20] I. V. Roisman, Inertia dominated drop collisions. II. An analytical solution of the Navier–Stokes equations for a spreading viscous film, *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 5, pp. 052104, 2009.
- [21] Š. Šikalo, C. Tropea, E. Ganić, Impact of droplets onto inclined surfaces, *Journal of colloid and interface science*, Vol. 286, No. 2, pp. 661-669, 2005.
- [22] S. F. Lunkad, V. V. Buwa, K. Nigam, Numerical simulations of drop impact and spreading on horizontal and inclined surfaces, *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, No. 24, pp. 7214-7224, 2007.
- [23] G. Liang, Y. Guo, Y. Yang, N. Zhen, S. Shen, Spreading and splashing during a single drop impact on an inclined wetted surface, *Acta Mechanica*, Vol. 224, No. 12, pp. 2993, 2013.
- [24] W. Choi, S. LeClear, J. LeClear, K.-C. Park, Drop impact on inclined superhydrophobic surfaces, in *Proceeding of*.
- [25] V. Bergeron, D. Bonn, J. Y. Martin, L. Vovelle, Controlling droplet deposition with polymer additives, *Nature*, Vol. 405, No. 6788, pp. 772-775, 2000.
- [26] D. Bartolo, A. Boudaoud, G. Narcy, D. Bonn, Dynamics of non-Newtonian droplets, *Physical review letters*, Vol. 99, No. 17, pp. 174502, 2007.
- [27] J. J. Cooper-White, R. C. Crooks, K. Chockalingam, D. V. Boger, Dynamics of Polymer– Surfactant Complexes: Elongational Properties and Drop Impact Behavior, *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 41, No. 25, pp. 6443-6459, 2002.
- [28] R. Crooks, D. V. Boger, Influence of fluid elasticity on drops impacting on dry surfaces, *Journal of Rheology*, Vol. 44, No. 4, pp. 973-996, 2000.
- [29] س. ماندنی، بررسی آزمایشگاهی برخورد قطره غیر نیوتنی با سطح جامد، پایان نامه دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۰۱۵.
- [30] S. Rafai, D. Bonn, A. Boudaoud, Spreading of non-Newtonian fluids on hydrophilic surfaces, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 513, pp. 77-85, 2004.
- [31] S. Rafai, D. Bonn, Spreading of non-Newtonian fluids and surfactant solutions on solid surfaces, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 358, No. 1, pp. 58-67, 2005.
- [32] G. German, V. Bertola, Impact of shear-thinning and yield-stress drops on solid substrates, *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 21, No. 37, pp. 375111, 2009.
- [33] L.-H. Luu, Y. Forterre, Drop impact of yield-stress fluids, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 632, pp. 301-327, 2009.
- [34] A. Dechelette, P. Sojka, C. Wassgren, Non-Newtonian drops spreading on a flat surface, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 132, No. 10, pp. 101302, 2010.
- [35] S. M. An, S. Y. Lee, Observation of the spreading and receding behavior of a shear-thinning liquid drop impacting on dry solid surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 37, pp. 37-45, 2012.
- [36] S. M. An, S. Y. Lee, Maximum spreading of a shear-thinning liquid drop impacting on dry solid surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 38, pp. 140-148, 2012.

- [37] V. Bertola, Dynamic wetting of dilute polymer solutions: the case of impacting droplets, *Advances in colloid and interface science*, Vol. 193, pp. 1-11, 2013.
- [38] D. Biolè, V. Bertola, The role of the microscale contact line dynamics in the wetting behaviour of complex fluids, *Archives of Mechanics*, Vol. 67, No. 5, pp. 401--414, 2015.
- [39] S. Jung, S. D. Hoath, I. M. Hutchings, The role of viscoelasticity in drop impact and spreading for inkjet printing of polymer solution on a wettable surface, *Microfluidics and nanofluidics*, Vol. 14, No. 1-2, pp. 163-169, 2013.
- [40] J. H. Moon, J. B. Lee, S. H. Lee, Dynamic behavior of non-Newtonian droplets impinging on solid surfaces, *Materials Transactions*, Vol. 54, No. 2, pp. 260-265, 2013.
- [41] Y. Son, C. Kim, Spreading of inkjet droplet of non-Newtonian fluid on solid surface with controlled contact angle at low Weber and Reynolds numbers, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 162, No. 1, pp. 78-87, 2009.
- [42] T. Jiang, J. Ouyang, B. Yang, J. Ren, The SPH method for simulating a viscoelastic drop impact and spreading on an inclined plate, *Computational Mechanics*, Vol. 45, No. 6, pp. 573-583, 2010.
- [43] S. Rahimi, D. Weihs, Gelled fuel simulant droplet impact onto a solid surface, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 36, No. 3, pp. 273-281, 2011.
- [44] C. Oishi, F. Martins, M. Tomé, M. Alves, Numerical simulation of drop impact and jet buckling problems using the eXtended Pom–Pom model, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 169, pp. 91-103, 2012.
- [45] R. A. Figueiredo, C. M. Oishi, J. A. Cuminato, J. M. C. Azevedo, A. M. P. Afonso, M. A. M. Alves, Numerical investigation of three dimensional viscoelastic free surface flows: impacting drop problem, in *Proceeding of International Association for Computational Mechanics (IACM)*, pp.
- [46] R. Figueiredo, C. Oishi, J. Cuminato, M. Alves, Three-dimensional transient complex free surface flows: Numerical simulation of XPP fluid, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 195, pp. 88-98, 2013.
- [47] V. Starov, A. Tyatyushkin, M. Velarde, S. Zhdanov, Spreading of non-Newtonian liquids over solid substrates, *Journal of colloid and interface science*, Vol. 257, No. 2, pp. 284-290, 2003.
- [48] S. Singh, B. Dandapat, Spreading of a non-Newtonian liquid drop over a homogeneous rough surface, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 419, pp. 228-232, 2013.
- [49] D. Biolè, V. Bertola, A goniometric mask to measure contact angles from digital images of liquid drops, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 467, pp. 149-156, 2015.
- [50] V. Bertola, M. Wang, Dynamic contact angle of dilute polymer solution drops impacting on a hydrophobic surface, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 481, pp. 600-608, 2015.



## **Abstract**

The collision of droplets on solid surfaces is widely used in oil and gas industry, surface painting, hot surface cooling and spraying of agricultural products. In the present study, non Newtonian drop fluid dispersion coefficient was studied experimentally on acrylic (Plexiglas) and stainless steel plate slopes, and compared with Newtonian droplets (water and glycerin and their solutions). In this study, non Newtonian and Newtonian fluid droplets collapsed at 27 and 47 cm from the solid solid surface in the range of Weber numbers  $245 \leq We \leq 545$ . The effect of collision velocity and surface angles, viscosity and elasticity of fluid, water wettability and surface roughness have been investigated on the dispersion behavior and droplet accumulation. The results of this study show that with a decrease in viscosity and an increase in the collision rate, the rate and extent of dropping drops are higher. Non-native droplets of the bug have a higher and lower spread and diffusion rate, respectively, compared to Newtonian droplets of glycerin (with a higher viscosity) and water (with a lower viscosity), respectively. Also, the velocity of the collision and fluid viscosity have a great influence on the spreading stage, but the level of water wettability and surface roughness have little effect on drop dispersion. On the other hand, the effects of water-friendliness and surface roughness on the droplet accumulation stage are far more than that of the spreading stage. Also, with increasing collision velocity, the rate and amount of droplet accumulation increase and the amount of this increase depends on fluid viscosity. The rate and amount of droplet accumulation on the surface of the steel due to its high roughness is higher than that of the plexiglass. To investigate the elasticity of fluids, the droplets of Newtonian and non Newtonian fluids have been compared with each other with the same viscosity. In the same condition of mesosity, non-native droplets are less emitted due to their elastic properties compared to Newton's drop, but their accumulation rates are higher.

**Keywords:** Inclined surface, Non-Newtonian fluid of boger, Viscosity, Surface roughness, Velocity contact



**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**

**M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering**

**Experimental study of Newtonian and non-Newtonian droplet collision  
on inclined solid surfaces**

**By: Mohammadkazem Sheykhan**

**Supervisors:**

**Dr. Mahmoud Norozi**

**Dr. Mohsen Shahmardan**

**September 2017**