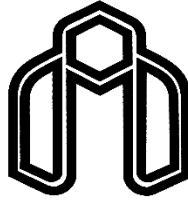


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

مطالعه‌ی آزمایشگاهی برخورد قطره‌ی غیر نیوتنی

روی سطوح جامد

دانشجو:

سمیرا ماندنی

استاد راهنمای اول:

دکتر محمود نوروزی

استاد راهنمای دوم:

دکتر محمد محسن شاهمردان

بهمن ۱۳۹۴

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم سمیرا ماندنی

تحت عنوان: مطالعه‌ی آزمایشگاهی برخورد قطره‌ی غیرنیوتنی روی سطوح جامد

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد

ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : محمود نوروزی محمد محسن شاه‌مردان

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم ہے:

پدر و مادر و ہمسر عزیزم

بہ پاس محبت ہامی بی کران شان

تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از لطف خدای مهربان

با تشکر از دو استاد بزرگواری که شایسته‌ی هر نوع سپاس، تجلیل و تکریم اند:

جناب آقای دکتر محمود نوروزی و دکتر محمد محسن شاه مردان؛ اساتید راهنمای ارجمند که با ایجاد عشق به نوشتن، صبورانه، با ارایه‌ی رهنمودها، انتقادهای سازنده و پیشنهادهایشان، در تمامی مراحل اجرای پایان نامه مرا حمایت و تشویق نمودند.

از پدر و مادر و همسر عزیزم که در تمامی مراحل پایان نامه مشوق و حامی من بودند.

از استادان محترمی که در طول دوران تحصیلی‌ام در دوره‌ی کارشناسی ارشد، جهت آموزش و ارتقای علمی بنده، زحمت کشیده‌اند سپاسگزارم.

در پایان هم از همراهی دوستان عزیزم و تمامی کسانی که ذکر نامشان در این مقاله نمی‌گنجد

صمیمانه قدردانی نمایم و از خداوند منان آرزوی سلامت و توفیق روزافزون برایشان دارم.

تعهد نامه

اینجانب سمیرا ماندنی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه آزمایشگاهی برخورد قطرهی غیرنیوتنی روی سطوح جامد تحت راهنمایی دکتر محمود نوروزی و دکتر محمد محسن شاه مردان متعهد می شوم .

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه 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 نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

برخورد قطره بر روی سطوح جامد از جمله موضوعات پیچیده و در عین حال جذاب در علم دینامیک سیالات می‌باشد که عامل اصلی پدیده‌های زیادی است و کاربردهای صنعتی فراوانی دارد. از جمله این کاربردها می‌توان به جوهرافشان پرینتر، پوشش‌دهی با اسپری، بررسی فرسایش خاک، خنک‌کاری با اسپری و سم‌پاشی محصولات کشاورزی اشاره کرد. در کار حاضر، دینامیک برخورد قطرات سیالات باگر بر روی سطوح جامد و خشک بررسی شده و با قطرات نیوتنی مورد مقایسه قرار گرفته است. اثر لزجت سیال، رطوبت‌پذیری سطح و سرعت برخورد بر رفتار قطره در حین پخش شدن و جمع شدن به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. قطرات آب و گلیسیرین (مایعات نیوتنی) و قطرات محلول پلی‌آکریلامید (مایعات غیرنیوتنی) در سرعت‌های برخورد $4/03$ و $4/22$ متر بر ثانیه بر روی پلکسی-گلاس و شیشه که سطوحی آب‌دوست هستند، برخورد کردند. قطرات پلی‌آکریلامید نسبت به قطرات گلیسیرین بسیار بیشتر پخش شده و با سرعت بیشتری جمع شدند. سرعت برخورد و لزجت سیال، اثری بارز بر مرحله پخش شدن داشتند. برعکس، رطوبت‌پذیری سطح تنها اثری جزئی بر مرحله پخش شدن داشت اما در مرحله جمع شدن، اثر قابل توجهی از خود نشان داد. اثر سرعت برخورد بر مرحله جمع شدن به قطراتی با لزجت پایین محدود می‌شد. بدین معنا که وقتی قطراتی با لزجت پایین روی سطح برخورد کردند، در سرعت برخورد بالاتر، سرعت جمع شدن افزایش یافت. به عبارت دیگر، جمع شدن قطره بر روی شیشه و پلکسی‌گلاس به طور قابل ملاحظه‌ای سرکوب شد. ممانعت از جمع شدن قطره، برای آب که لزجت پایین‌تری دارد، برجسته‌تر بود.

کلمات کلیدی: برخورد قطره، سطح جامد، سیال باگر، لزجت، ترشوندگی، سرعت برخورد.

فهرست مطالب

فصل اول	۱
مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- معرفی سیالات ویسکوالاستیک	۲
۳-۱- منشأ رفتار ویسکوالاستیک در پلیمرها	۳
۴-۱- سیال باگر	۵
۵-۱- تحقیقات پیشین (سیالات نیوتنی)	۵
۶-۱- کارهای پیشین (غیرنیوتنی)	۱۸
۷-۱- معرفی تحقیق حاضر	۲۴
۱-۷-۱- مشخصات کلی پژوهش	۲۴
۲-۷-۱- ضرورت، اهمیت و کاربرد موضوع	۲۵
۳-۷-۱- جنبه‌های نوآوری	۲۶
۴-۷-۱- مروری بر فصول پایان‌نامه	۲۷
تجهیزات آزمایش و مواد مورد استفاده	۲۹
۱-۲- مقدمه	۳۰
۲-۲- تجهیزات آزمایش	۳۰
۱-۲-۲- دوربین پرسرعت	۳۰
۲-۲-۲- پمپ تزریق سرنگی	۳۵

۳۶	.....ترازو با دقت بالا.....۳-۲-۲
۳۶	.....همزن هات پلیت.....۴-۲-۲
۳۸	.....ویسکومتر.....۵-۲-۲
۳۹	.....رئومتر.....۶-۲-۲
۴۰	.....دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی.....۷-۲-۲
۴۰	.....تجهیزات آزمایش و تنظیم آنها.....۳-۲-۳
۴۰	.....سوزن.....۱-۳-۲
۴۱	.....سطوح برخورد.....۲-۳-۲
۴۳	.....نحوه‌ی استقرار تجهیزات (ستاپ).....۳-۳-۲
۴۴	.....مواد مورد آزمایش.....۴-۲-۴
۴۵	.....محلول پلیمری.....۲-۴-۱
۴۷	.....سیالات غیرنیوتنی منتخب برای آزمایش‌ها.....۲-۴-۲
۴۹	.....بررسی خاصیت الاستیک نمونه‌ها.....۳-۴-۲
۵۱	.....مشخصات مواد مورد آزمایش.....۴-۴-۲
۵۷	.....فصل سوم
۵۷	.....تحلیل نتایج آزمایشگاهی برخورد قطره روی سطح جامد
۵۸	.....مقدمه.....۱-۳-۱
۵۸	.....مقدمه‌ای بر پردازش تصویر.....۲-۳-۲
۶۰	.....کاربردهای پردازش تصویر.....۱-۲-۳

۶۱	۲-۲-۳- مراحل انجام پردازش تصویر.....
۶۳	۳-۲-۳- پردازش تصاویر رنگی.....
۶۴	۴-۲-۳- معرفی نرم افزار ImageJ.....
۶۹	۳-۳- تکرارپذیری آزمایش.....
۷۰	۴-۳- مشاهدات آزمایشگاهی.....
۷۰	۱-۴-۳- زاویه تماس استاتیکی.....
۷۱	۲-۴-۳- قطر اولیه‌ی قطره.....
۷۱	۳-۴-۳- حجم قطرات.....
۷۲	۴-۴-۳- سرعت حد.....
۷۳	۵-۴-۳- سرعت قطرات در لحظه‌ی برخورد با سطح.....
۷۴	۶-۴-۳- اعداد بی بعد رینولدز، وبر و وایزنبرگ.....
۷۵	۷-۴-۳- مشاهدات آزمایشگاهی مربوط به قطره سیال غیرنیوتنی PAM2.....
۷۹	۸-۴-۳- اثر سرعت بر روی برخورد قطره و پخش شدن.....
۸۰	۹-۴-۳- تأثیر میزان آبدوستی سطح بر روی برخورد قطره و پخش شدن.....
۸۳	۵-۳- مقایسه رفتار قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی.....
۸۳	۱-۵-۳- اثر سرعت بر روی برخورد قطره.....
۸۶	۲-۵-۳- اثر لزجت مایع بر برخورد قطره.....
۸۹	۳-۵-۳- اثر میزان آبدوستی سطح بر روی برخورد قطره.....
۹۱	فصل چهارم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۹۱

۴-۱- مقدمه ۹۲

۴-۲- نتیجه‌گیری ۹۲

۴-۳- پیشنهادها ۹۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ میزان بالاروندگی نمونه‌های منتخب..... ۵۱
- جدول ۲-۲ خواص مایعات نیوتنی در دمای $T = 23 \pm 0.5^\circ$ ۵۲
- جدول ۳-۲ خواص مایعات غیرنیوتنی در دمای $T = 23 \pm 0.5^\circ$ ۵۲
- جدول ۴-۲. مقادیر λ_i و η_i برای سیال PAM1..... ۵۳
- جدول ۵-۲. مقادیر λ_i و η_i برای سیال PAM2..... ۵۴
- جدول ۱-۳ مقادیر به دست آمده از پردازش تصویر برای قطر اولیه قطرات..... ۷۱
- جدول ۲-۳ مقادیر آزمایشگاهی برای حجم قطره آب، گلیسیرین، PAM1 و PAM2..... ۷۱
- جدول ۳-۳ مقادیر سرعت حد بدست آمده از رابطه ۳-۶..... ۷۳
- جدول ۴-۳ مقادیر آزمایشگاهی سرعت برخورد برای قطرات در ارتفاع ۸۳ و ۹۱ سانتی‌متری..... ۷۴
- جدول ۵-۳ مقادیر رینولدز، وبر و وایزنبرگ برای قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی منتخب در دو سرعت
۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه..... ۷۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نمای شماتیک مولکول پلی‌اتیلن: (a) خطی (پلی‌اتیلن سنگین)، (b) شاخه‌دار (پلی‌اتیلن سبک) [۱]..... ۴
- شکل ۱-۲ تغییر آرایش مولکول پلیمری از حالت پایدار تصادفی به حالت جدید در اثر بارگذاری [۲]..... ۴
- شکل ۱-۳ شبیه‌سازی عددی پاشش بر اساس معادلات نویر-استوکس. سه مورد از شکل‌گیری تاج و انتشار با $We = 250, 437, 598$ و به ترتیب با $H = 0, 116, 0, 1, 0, 116$ (رایبر و فرون [۴]..... ۷
- شکل ۱-۴ یک کارت پستال آمریکایی با عکس معروفی از اگرتون (اگرتون-۲۰۰۵)..... ۸
- شکل ۱-۵ شکل شناسی برخورد قطره روی یک سطح خشک. برگرفته از ریپو و همکاران [۱۴]..... ۱۱
- شکل ۱-۶ رفتار ترکندگی قطره‌ی مایع بر اساس زاویه تماس [۶۵]..... ۱۳
- شکل ۱-۷ زاویه تماس جامد-مایع: بر روی سطوح آب‌دوست (سمت راست) و آب‌گریز (سمت چپ)..... ۱۴
- شکل ۱-۹ نمودار تنش برشی برحسب نرخ برش (مقایسه‌ی سیالات نیوتنی با سیالات غیرنیوتنی)..... ۱۹
- شکل ۱-۱۰ 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 [۷۷]..... ۲۱
- شکل ۱-۱۱ (a) حالت اولیه‌ی برخورد یک قطره و (b) نمای جانبی یک قطره روی صفحه‌ای جامد و شیب‌دار [۷۷]..... ۲۲
- شکل ۱-۱۲ شبیه‌سازی عددی مسئله‌ی برخورد قطره با استفاده از مدل Oldroyd-B ($Re = 5$). تصویر شکل قطره و میدان سرعت در زمان‌های بی‌بعد مختلف: (a) $t = 1.3$, $(Fr = 2.26, We = 1$ (b) $t = 2$, (c) $t = 2.4$, (d) $t = 2.7$, (e) $t = 4$, (f) $t = 5.9$, (g) $t = 6.6$, (h) $t = 6.8$, (i) $t = 7.1$, (j) $t = 11.2$ [۷۹]..... ۲۲
- شکل ۱-۱۳ تصویر شبیه‌سازی عددی مسئله‌ی برخورد قطره به‌صورت سه‌بعدی [۸۱]..... ۲۳
- شکل ۱-۲ دوربین پرسرعت CMOS مدل pco.dimax S1..... ۳۱

- شکل ۲-۲ نمونه‌ای از تصاویر تهیه شده از قطره..... ۳۲
- شکل ۳-۲ نرم‌افزار کنترلی دوربین..... ۳۳
- شکل ۴-۲ لنز مورد استفاده به همراه دوربین و نمای داخلی آن..... ۳۴
- شکل ۵-۲ پمپ تزریق سرنگ JMS مدل SP-500..... ۳۵
- شکل ۶-۲ ترازوی مدل PS 510/C/1 محصول شرکت RADWAG..... ۳۶
- شکل ۷-۲ همزن هات پلیت IKA RCT..... ۳۷
- شکل ۸-۲ ویسکومتر مدل DVE-LV شرکت Brookfield..... ۳۸
- شکل ۹-۲ دستگاه رئومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar..... ۳۹
- شکل ۱۰-۲ دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی تنسیومتر به روش ویل هلمی..... ۴۰
- شکل ۱۱-۲ سوزن ۱۶G مورد استفاده برای تشکیل قطره..... ۴۱
- شکل ۱۲-۲ نمونه‌ای از سطوح پلکسی‌گلاس..... ۴۱
- شکل ۱۳-۲ لام‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر..... ۴۲
- شکل ۱۴-۲ نمایی کلی از تنظیمات آزمایش..... ۴۳
- شکل ۱۵-۲ نمایی از پیوندهای مولکولی پلی‌آکریلامید..... ۴۵
- شکل ۱۶-۲ حالت پودری پلیمر پلی‌آکریلامید..... ۴۶
- شکل ۱۷-۲ مواد استفاده شده در ساخت محلول‌های پلیمری..... ۴۶
- شکل ۱۸-۲ نمودار لزجت برحسب نرخ برش برای نمونه پلیمری اول..... ۴۸
- شکل ۱۹-۲ نمودار لزجت برحسب نرخ برش برای نمونه پلیمری دوم..... ۴۸
- شکل ۲۰-۲ بالاروندگی سیال ویسکوالاستیک..... ۵۰
- شکل ۲۱-۲ پدیده بالاروندگی در سیالات منتخب: الف) PAM1 ب) PAM2..... ۵۱
- شکل ۲۳-۲ نمودار G' و G'' برحسب فرکانس زاویه‌ای برای سیال PAM1..... ۵۵
- شکل ۲۴-۲ نمودار G' و G'' برحسب فرکانس زاویه‌ای برای سیال PAM2..... ۵۵

- شکل ۳-۱ نمای کلی نرم‌افزار ImageJ ۶۴
- شکل ۳-۲ نمونه‌ای از پردازش‌های صورت گرفته بر روی تصویر چند سکه قدیمی در نرم‌افزار ImageJ ۶۴
- شکل ۳-۳ قابلیت ادغام کردن تصاویر در نرم‌افزار ImageJ ۶۵
- شکل ۳-۴ قابلیت مونتاژ کردن تصاویر توسط نرم‌افزار ImageJ که استفاده از آن در ارائه‌ی نتایج برای مثال در مقالات بسیار متداول است ۶۵
- شکل ۳-۵ نمونه‌ای از تصاویر برخورد قطره PAM1 بر روی سطح، قبل و بعد از استفاده از دستور crop ۶۶
- شکل ۳-۶ تبدیل تصویر RGB قطره PAM1 به یک عکس 8-bit ۶۸
- شکل ۳-۷ تصویر قطره PAM1 پس از اعمال دستور Make Binary ۶۸
- شکل ۳-۸ تصویر قطره PAM1 پس از اعمال دستور Find Edges ۶۸
- شکل ۳-۹ آزمون تکرارپذیری. (a) برخورد قطره PAM2 با سطح شیشه از در سرعت ۴,۲۲ متر بر ثانیه (b) تکرار آزمایش. (الف) لحظه‌ای قبل از برخورد (ب) لحظه $t = 0.8ms$ (ج) لحظه $t = 114.2ms$ ۶۹
- شکل ۳-۱۱ قطره در حال خروج از سرسوزن ۷۲
- شکل ۳-۱۲ نیروهای وارد بر قطره در حال سقوط در هوا ۷۳
- شکل ۳-۱۳ تصاویر فوق، مراحل تغییر شکل قطره PAM2 را پس از برخورد بر روی سطح پلکسی-گلاس با سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. هر تصویر، قطره و نحوه‌ی ته‌نشین شدن آن را به همراه بازتاب آن بر روی سطح نشان می‌دهد ۷۶
- شکل ۳-۱۴ مراحل کامل پخش شدن قطره PAM2 بر روی سطح پلکسی‌گلاس در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه: (الف) قطر تماس D به‌عنوان تابعی از t . (ب) ضریب پخش β و ارتفاع بی‌بعد ξ به‌عنوان تابعی از زمان بی‌بعد τ ۷۷

شکل ۳-۱۵ اثر سرعت برخورد بر روی تغییر زمان ضریب پخش β در طول مرحله سینماتیک برای قطره PAM2 برخورد کرده بر روی سطح پلکسی گلاس.....	۷۸
شکل ۳-۱۶ مراحل کامل برخورد قطره PAM2 بر روی سطح پلکسی گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه.....	۷۸
شکل ۳-۱۷ تصاویر مربوط به تغییرات قطره PAM2 در اثر برخورد روی سطح شیشه در سرعت ۴/۲۲.....	۸۱
شکل ۳-۱۸ تغییرات ضریب پخش برای قطره‌های PAM2 در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه بر روی شیشه و پلکسی گلاس در مرحله سینماتیک.....	۸۲
شکل ۳-۱۹ مراحل کامل تغییرات ضریب پخش برای قطره‌های PAM2 در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه بر روی شیشه و پلکسی گلاس.....	۸۲
شکل ۳-۲۰ اثر سرعت بر روی قطره PAM2 برخورد کرده بر روی پلکسی گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه.....	۸۴
شکل ۳-۲۱ اثر سرعت بر روی قطره PAM1، آب و گلیسیرین بر روی پلکسی گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه.....	۸۴
شکل ۳-۲۲ اثر سرعت بر روی قطره PAM2 برخورد کرده بر روی پلکسی گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه در مدت ۳۰ میلی ثانیه.....	۸۵
شکل ۳-۲۳ اثر سرعت بر روی قطره PAM1، آب و گلیسیرین بر روی پلکسی گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه در مدت ۳۰ میلی ثانیه.....	۸۵
شکل ۳-۲۴ تصاویر قطره آب، PAM1 و گلیسیرین در لحظات قبل از برخورد، حداکثر پخش شدگی و تعادل نهایی بر روی پلکسی گلاس و شیشه در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه.....	۸۶
شکل ۳-۲۵ نمودار تغییرات ضریب پخش بر حسب زمان برای قطره آب، PAM1 و گلیسیرین به منظور مقایسه اثر لزجت.....	۸۷

شکل ۳-۲۶ اثر لزجت بر پخش شدن و جمع شدن قطره پس از برخورد بر روی سطح پلکسی-گلاس
در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه: الف) سیالات نیوتنی (آب و گلیسرین)، ب) سیالات غیرنیوتنی (PAM1
و PAM2)..... ۸۸

شکل ۳-۲۷ اثر میزان آب دوستی سطح بر روی قطره آب، PAM1 و گلیسرین..... ۹۰

فهرست علائم

سطح از قطره که در مقابل جریان قرار دارد	A
عدد باند	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 θ_{rec}	d_r
کوچکترین قطر بر اساس θ_{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}
برایند نیروهای وارد بر قطره	F
عدد فرود	Fr
نیروی ناشی از کشش سطحی	F_σ
نیروی پسا	F_d

نیروی گرانش	F_g
شتاب گرانش	g
مدول صلبیت هم‌فاز	G'
مدول صلبیت غیر هم‌فاز	G''
ارتفاع قطره پس از برخورد	h
ضخامت فیلم بی‌بعد شده	H
ارتفاع سقوط قطره	H_1
ارتفاع سقوط قطره	H_2
ضخامت اولیه فیلم مایع	h_0
یک گروه مهم کامپوزیت	K
جرم قطره	m
عدد آهنسورگ	Oh
شعاع قطره	R
بزرگترین شعاع قطره	R_{max}
عدد رینولدز	Re
دما	T
زمان	t
زمان رسیدن قطره به بزرگترین قطر	t_{max}
سرعت قطره	U
سرعت برخورد	U_0
سرعت حد	U_t
حجم قطره	V
حداکثر حجم قطره	V_{max}
عدد وبر	We
عدد وایزنبرگ	Wi

نرخ برش	$\dot{\gamma}$
زمان آسودگی از تنش	λ
زمان آسودگی از تنش متوسط	$\bar{\lambda}$
فرکانس زاویه‌ای	ω
زمان بی‌بعد	τ
زمان بی‌بعد رسیدن به β^*	τ^*
تنش برشی	τ_s
کشش سطحی	σ
کشش سطحی جامد-سیال	σ_{SF}
کشش سطحی جامد-مایع	σ_{SL}
کشش سطحی مایع-سیال	σ_{LF}
اختلاف تنش‌های نرمال اول	$\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}$
چگالی	ρ
چگالی قطره	ρ_d
چگالی هوا	ρ_{air}
ویسکوزیته دینامیکی	η
ضریب پخش	β
حداکثر ضریب پخش	β^*
قطر بی‌بعد شده	ξ
زاویه قطره با نوک سوزن	θ
زاویه تماس تعادلی	θ_e
زاویه تماس دینامیکی	θ_d
زاویه تماس پیشروی	θ_{adv}
زاویه تماس پسروی	θ_{rec}

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

نقش سیالات در پدیده‌های طبیعی زندگی روزمره و به‌عنوان عاملی تأثیرگذار در کاربردهای صنعتی بر کسی پوشیده نیست. بهره بردن از خواص سیالات در زمینه‌های گوناگون موجب شده است تلاش‌های فراوانی برای شناخت ویژگی‌های این مواد صورت گیرد. در این میان جریان سیالات غیرنیوتنی در علم مکانیک سیالات از اهمیتی ویژه برخوردار گردیده است. کاربردهای فراوان سیالات ویسکوالاستیک در فناوری صنعت و نمونه‌هایی عینی در پیرامون ما نشان‌دهنده‌ی لزوم توجه به این پدیده در پیشبرد دانش سیالات است.

در این فصل ابتدا به معرفی سیالات ویسکوالاستیک و بااگر پرداخته می‌شود و سپس مروری بر تحقیقات گذشته در خصوص پدیده‌ی برخورد قطره‌ی سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی 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.

۱-۲- معرفی سیالات ویسکوالاستیک

سیال نیوتنی ماده‌ای است که در آن تنش برشی تنها تابعی از نرخ برش است (صفر بودن تنش برشی در نرخ برش صفر). بر این اساس سیال غیرنیوتنی را می‌توان به‌سادگی به‌صورت سیالی که فاقد رفتار نیوتنی است، تعریف نمود.

سیالات ویسکوالاستیک موادی هستند که به‌طور توأمان خواص ویسکوز و الاستیک را دارا می‌باشند. این موضوع نه‌تنها به مقدار کل تغییر شکل بلکه به نرخ آن نیز مربوط می‌شود. از آنجا که در سیالات،

تنش تابعی از نرخ برش و در جامدات تابعی از خود برش است، لذا این مواد دارای خواص هم‌زمان جامد و سیال هستند. به‌عنوان مثال، مایعات با وزن مولکولی بالا از جمله محلول‌ها و مذاب‌های پلیمری معمولاً غیرنیوتنی هستند. 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 (η) مقداری ثابت بوده و تنش برشی (τ_s) به‌طور مستقیم با نرخ برش ($\dot{\gamma}$) متناسب است:

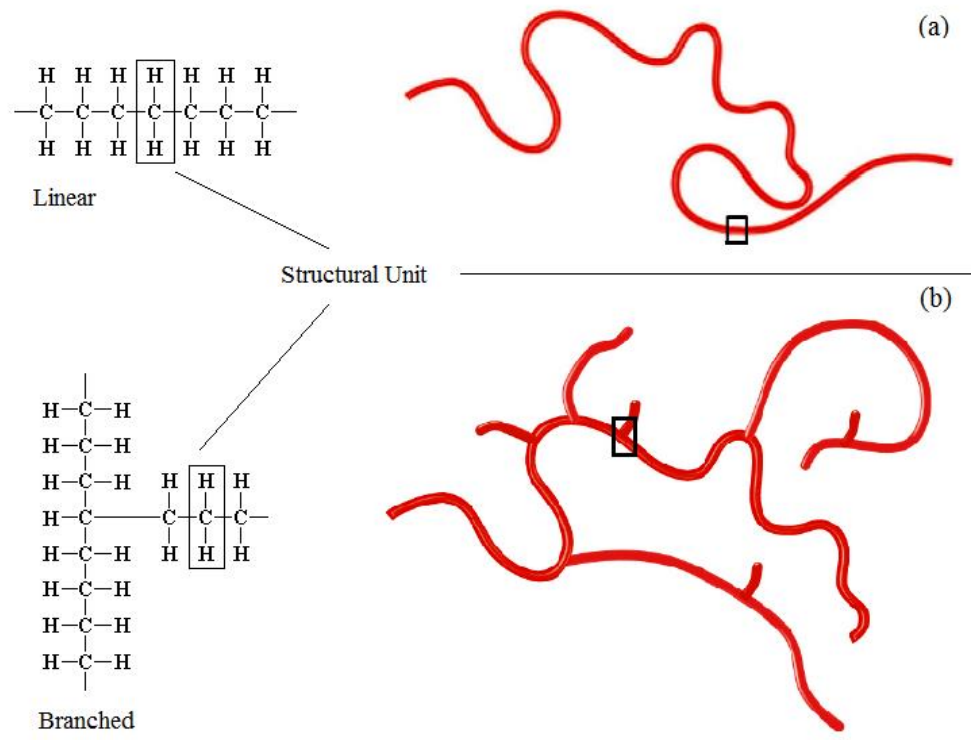
$$\tau_s = \eta \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

۱-۳- منشأ رفتار ویسکوالاستیک در پلیمرها

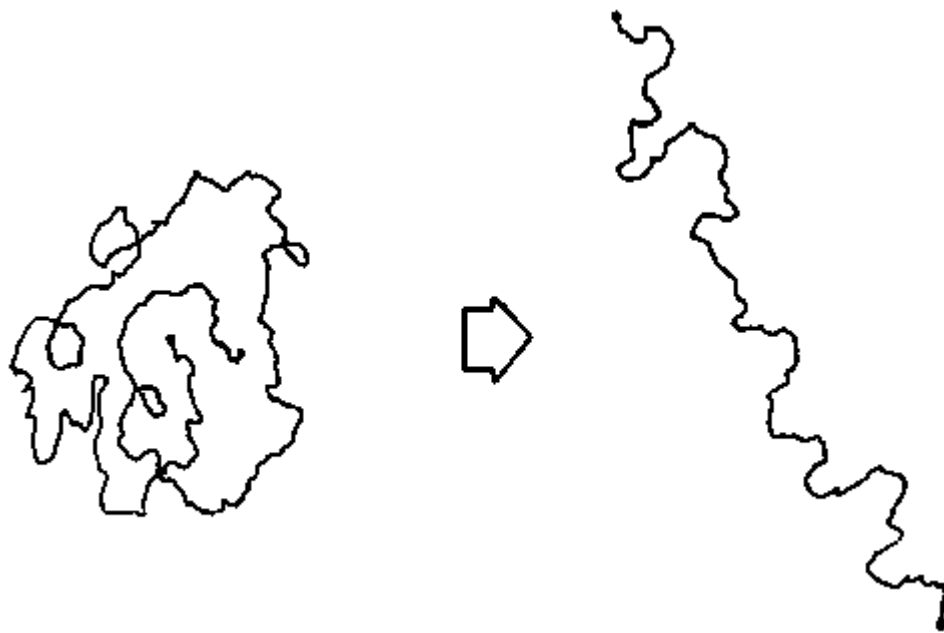
محلول‌ها و مذاب‌های پلیمری اغلب موادی به‌شدت غیرنیوتنی هستند. مواد پلیمری از مولکول‌های طولی تشکیل شده‌اند که از تکرار یک واحد مشخص به نام واحد ساختاری تشکیل شده‌اند. هم‌چنین مولکول‌های پلیمری می‌توانند به‌صورت یک رشته‌ی طولی که به مولکول خطی موسوم است و یا از چند رشته‌ی به‌هم‌پیوسته که مولکول شاخه‌دار نامیده می‌شود، تشکیل شوند. در شکل ۱-۱ مولکول خطی و شاخه‌دار پلی‌اتیلن با واحد ساختاری $CH_2 = CH_2$ نشان داده شده است.

به‌طور کلی مواد درشت مولکول عمدتاً از خود رفتار غیرنیوتنی نشان می‌دهند. در سیالات نیوتنی وزن مولکولی معمولاً از ۱۰۰۰ کمتر می‌باشد، حال آن‌که در مواد پلیمری وزن مولکولی بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ گرم بر مول است.

در محلول‌های پلیمری رقیق در صورتی که ماده برای مدت زمان کافی در حال سکون قرار بگیرد، مولکول‌ها یک آرایش درهم‌تنیده و تصادفی پایدار را پیدا می‌کنند. حال اگر این ماده پلیمری تحت انواع تغییر شکل‌ها قرار بگیرد در آن صورت مولکول‌های پلیمر در اثر بارگذاری، آرایش فضایی جدیدی پیدا می‌کنند. در شکل ۱-۲ نمونه‌ای از این تغییر آرایش مولکولی نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ نمای شماتیک مولکول پلی اتیلن: (a) خطی (پلی اتیلن سنگین)، (b) شاخه دار (پلی اتیلن سبک) [۱].



شکل ۲-۱ تغییر آرایش مولکول پلیمری از حالت پایدار تصادفی به حالت جدید در اثر بارگذاری.

به علاوه ممکن است که مولکول‌ها خودشان را با برخی جهت‌های خاص، تطبیق دهند به نحوی که آرایش مولکولی‌شان دیگر تصادفی نباشد. بنابراین در یک ماده‌ی پلیمری، تغییر آرایش مولکول‌ها موجب تغییر خواصی نظیر لزجت می‌شود و چون این تغییر آرایش به‌طور آنی انجام نمی‌شود، لذا سبب وابستگی تغییر شکل‌های سیال به زمان می‌گردد. زیرا در ساختار مولکولی، نیروهای بین اتمی مانند فنرهایی عمل می‌کنند که قادرند به ماده در حین تغییر آرایش، رفتار الاستیک نیز بدهند. به عبارت دیگر ماده از خود رفتار ویسکوالاستیک نشان می‌دهد.

۱-۴- سیال باگر^۱

سیال باگر مایعی ویسکوالاستیک با لزجت ثابت است. لزجت سیال باگر کاملاً یا تقریباً مستقل از نرخ برش می‌باشد. بنابراین هنگام آزمایش این مایعات ویسکوالاستیک می‌توان اثرات الاستیک را کاملاً جدا از اثرات لزجت در نظر گرفت. سیالات باگر محلول‌های پلیمری رقیقی هستند که به‌طور کلی با استفاده از حلالی به اندازه‌ی کافی لزج، ساخته می‌شوند که در آن‌ها تنش‌های ناشی از الاستیسیته قابل اندازه‌گیری هستند [۲]. بنابراین باگرها محلول‌های پلیمری رقیقی هستند که رقیق بودن آن‌ها به‌اندازه‌ی است که تغییرات لزجت نسبت به نرخ برش قابل صرف‌نظر کردن است. با توجه به این که در تحلیل رفتار سیالات غیرنیوتنی پارامترهای متعددی دخیل هستند، استفاده از سیال باگر موجب سهولت و دقت بیشتر در بررسی نتایج حاصل می‌گردد.

۱-۵- تحقیقات پیشین (سیالات نیوتنی)

برخورد قطره^۲ روی سطوح جامد و مایع، عامل اصلی پدیده‌های زیادی است که کاربردهای صنعتی فراوانی دارند. از جمله‌ی این کاربردها می‌توان به جوهرافشان پرنتر^۱، اسپری خنک‌کننده‌ی سریع^۲ سطوح داغ

^۱ Boger fluid

^۲ Drop impact

(پره‌های توربین، دستگاه‌های نورد در نورد کردن برای تولید فولاد، لیزر، تراشه‌های نیمه‌هادی^۲ و دستگاه‌های الکترونیکی)، آنیل کردن^۳، فرآیند کوئینچینگ^۴ آلیاژهای آلومینیوم و فولاد، اطفاء حریق^۵ توسط آب-پاش، موتورهای احتراق داخلی (مجاری مکش در موتورهای بنزینی و یا کاسه پیستون در موتورهای دیزل تزریق مستقیم)، کوره‌های زباله‌سوزی^۶، نقاشی و پوشش‌دهی با اسپری، تزریق پلازما، سم‌پاشی محصول^۷ اشاره کرد. ساختن مواد سازمان‌یافته در ابعاد میکرو، برآمدگی‌های لحیم‌کاری^۸ در بردها و مدارهای الکتریکی در میکروالکترونیک که از طریق توزیع دقیق لحیم‌کاری قطره تولید شده‌اند، هم‌چنین اتمیزه کردن و خالص کردن مایع و انباشته شدن یخ روی خطوط برق و هواپیما نیز برخورد قطره را دربرمی‌گیرند. این پدیده در پزشکی قانونی، در توسعه‌ی سطوح رطوبت‌ناپذیر^۹ و یا به‌طور کامل رطوبت‌پذیر، در فعال‌سازی یا غیرفعال کردن زیرلایه‌ها با دقت بالا توسط میکرو قطره‌ها، در حمل‌ونقل آلاینده‌های سطحی به داخل مایعات حجیم و در به دام انداختن گاز اهمیت پیدا کرده است. درک پدیده‌های فیزیکی توأم با آن برای فرموله کردن شرایط مرزی معتبر در کدهای عددی به‌منظور شبیه‌سازی اسپری از اهمیت زیادی برخوردار است. پدیده‌های طبیعی گسترده و در مقیاس بزرگ، مثل قرار گرفتن لایه‌های سطحی دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها در معرض هوا، به تشکیل حباب هوای ناشی از برخورد قطرات باران بستگی دارد. این برخوردها در سطح اقیانوس منجر به تشکیل جت‌هایی به سمت بالا و تشکیل قطرات ثانویه می‌شود که تبخیر شده و بلورهای نمک را تشکیل می‌دهند. فرسایش خاک، پراکندگی هاگ‌ها و میکروارگانیسم‌ها و نویز در عمق آب طی باران سه پدیده‌ی طبیعی دیگری هستند که با برخورد قطره درگیر می‌باشند.

¹ Ink-jet printing

² Rapid spray cooling

³ Semiconductor chips

⁴ annealing

⁵ quenching

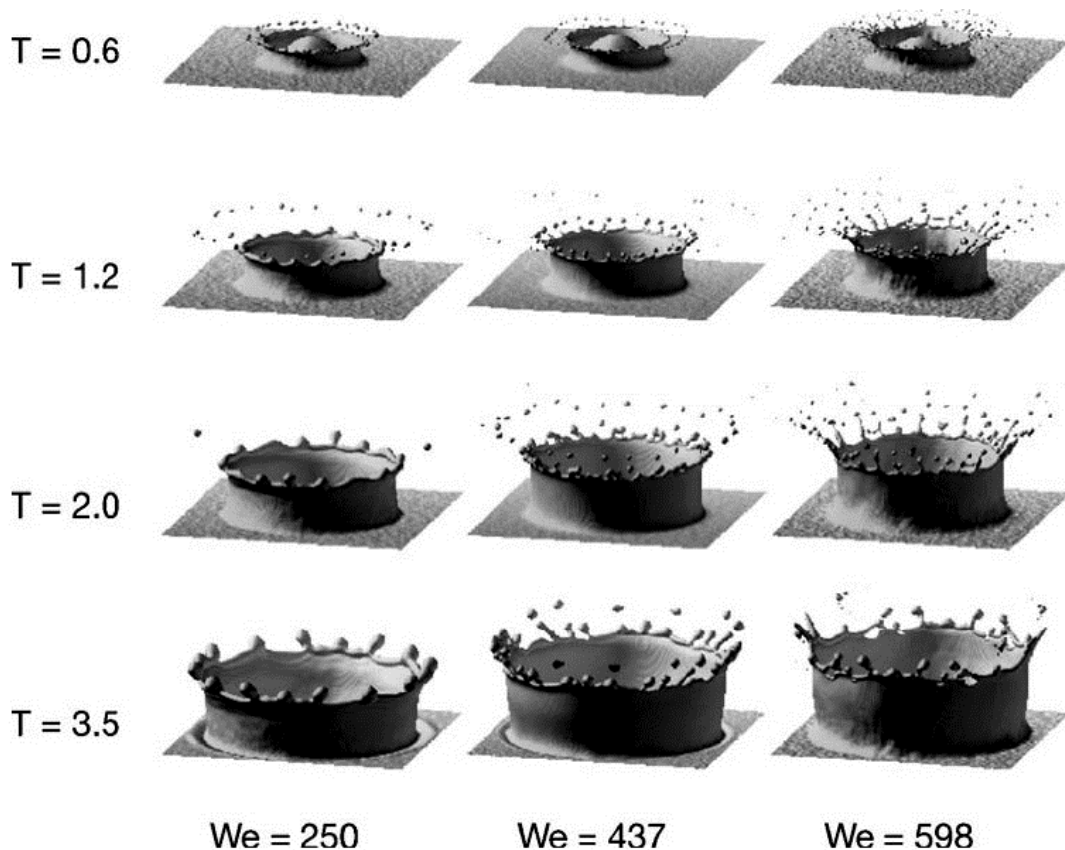
⁶ Fire suppression

⁷ incinerators

⁸ Crop spraying

⁹ Solder bumps

¹⁰ Non-wettable



شکل ۱-۳ شبیه‌سازی عددی پاشش بر اساس معادلات نویر-استوکس. سه مورد از شکل‌گیری تاج و انتشار با $We = 250, 437, 598$ و به ترتیب با $H = 0, 116, 0, 10, 116$ (رایبر^۱ و فرون^۲ [۳]).

ورتینگتون^۳ [۴] یکی از اولین کسانی بود که در یک اسلوب معین به بررسی این برخوردها پرداخت و کتاب او شامل بسیاری از عکس‌های شگفت‌انگیز از پدیده‌های توأم با برخورد قطره و توپ جامد بر روی استخرهای پر از آب می‌باشد. با وجود پیش پا افتادگی این موضوع و بیش از صد سال تحقیق، هنوز هم این پدیده به دور از یک درک کامل قرار دارد و همچنان به جذب فیزیکدانان، مهندسين و رياضيدانان ادامه می‌دهد. با توجه به تعداد آگهی‌های بازرگانی که بر اساس صحنه‌های برخورد قطره در تلویزیون پخش می‌شود و یا کارت‌پستال نشان داده شده در شکل ۱-۴، این پدیده حتی عموم مردم را به خود جذب کرده و انگیزه‌ای برای جذب مشتریان شده است.

¹Rieber

²Frohn

³Worthington



شکل ۱-۴ یک کارت پستال آمریکایی با عکس معروفی از اگرتون (اگرتون-۲۰۰۵).

پدیده‌های توأم با این پدیده، بسیار متنوع، پیچیده و حیرت‌انگیز هستند. در لحظه‌ی برخورد، قطره ممکن است با توجه به نوسانات، کروی یا بیضی باشد. این قطره ممکن است روی سطح آزاد مایع در استخر عمیق، روی یک فیلم نازک مایع بر روی یک دیوار و یا روی یک سطح جامد و خشک برخورد کند. این برخورد می‌تواند عمود یا مایل، در هوا و یا در خلأ صورت گیرد. مایع می‌تواند نیوتنی و یا غیرنیوتنی باشد (به‌عنوان مثال یک پلیمر ویسکوالاستیک^۱ و یا یک محلول سورفاکتانت^۲). مایعات مربوط به قطره، استخر یا فیلم ممکن است مخلوط‌شدنی یا مخلوط‌ناشدنی باشند. سطح جامد می‌تواند سخت یا نرم و از نظر شیمیایی همگن و یا ناهمگن باشد. این سطح ممکن است متخلخل^۳، تخت، منحنی‌شکل و در دمای متفاوت و یا مشابه دمای قطره‌ی موردنظر باشد. روی سطح مایع، امواجی که از قبل وجود داشته‌اند و یا

^۱ Viscoelastic polymer

^۲ Surfactant solution

^۳ porous

امواج تولید شده، ممکن است بر الگوی جریان تأثیر بگذارد. این برخورد ممکن است در قطره منجر به پخش شدن^۱ روی سطح جامد، جمع شدن^۲ و جهش^۳ گردد، و یا اگر تبخیر در نزدیکی دیوار داغ به اندازه‌ی کافی برای اثر لیدنفرست^۴ قوی باشد، ممکن است باعث معلق ماندن قطره شود. نتیجه‌ی برخورد قطره به سرعت برخورد، جهت آن نسبت به سطح، سایز قطره، خواص مایع (چگالی، لزجت، ویسکوالاستیسیته^۵) و برخی اثرات غیرنیوتنی دیگر برای سیالات پیچیده^۶، سطح یا کشش سطحی، زبری یا رطوبت‌پذیری سطح جامد، اثرات غیرهم‌دما بودن (به‌عنوان مثال انجماد و تبخیر) و به دام افتادن هوا بستگی دارد. در برخوردهای بسیار قوی، تراکم‌پذیری مایع نیز یک عامل محسوب می‌شود. به دنبال برخورد توپ‌های جامد و پرتابه‌های جامد روی صفحات زرهی در سرعت بالا، مواد جامد مانند سیالات جریان می‌یابند و تأثیر الاستیسیته، تنش تسلیم و پلاستیسیته در مقایسه با اثرات اینرسی قابل اغماض است. در نتیجه، پدیده‌هایی مثل پرتابه‌ی فرونتال^۷ و شکل‌گیری دهانه در برخورد جامد-جامد، یادآور ویژگی‌هایی از برخورد قطره‌ی مایع (به‌عنوان مثال پاشش^۸ و شکل‌گیری تاج^۹) هستند که باعث شد وورینگتون آن را پاشش‌های دائم بنامد. در مقیاس کیهانی، در برخورد سیارک‌ها (یک مثال دیدنی و جذاب آن دهانه‌ی شهاب‌سنگ آریزونا است)، تبخیر مواد یک عامل غالب محسوب می‌شود.

گروه‌های بی‌بعد اصلی حاکم بر برخورد قطره عبارت‌اند از:

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

$$K = We \cdot Oh^{-2/5}, \quad H = \frac{h_0}{D} \quad (2-1)$$

¹ spreading

² receding

³ rebounding

⁴ Leidenfrost effect

⁵ viscoelasticity

⁶ Rheologically complex fluids

⁷ Frontal ejecta

⁸ splashing

⁹ Crown formation

ρ ، μ و σ به ترتیب چگالی، گرانروی 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 آهنسورگ^۱ و H ضخامت فیلم بی‌بعد شده را مشخص می‌کنند و K یک گروه مهم کامپوزیت می‌باشد.

اثرات مربوط به جاذبه به‌وسیله‌ی عدد باندا $Bo = \rho g D^2 / \sigma$ ^۲ یعنی نسبت D^2 به جذر طول موئینگی $(\sigma / \rho g)^{1/2}$ یا توسط عدد فرود $Fr = U_0^2 / g D = We / Bo$ ^۳ مشخص می‌شود. با این حال توجه داشته باشید در پدیده‌های همراه با برخورد قطره، اثرات گرانش معمولاً اهمیت ندارند. پارامترهای بی‌بعد دیگری که اثرات زبری و رطوبت‌پذیری را مشخص می‌کنند در زیر ذکر شده‌اند. این پارامترها عمدتاً مربوط به برخورد قطره روی سطوح خشک و جامد می‌باشند [۵].

برخورد قطرات مایع روی سطوح جامد و مایع، از زمان توسعه‌ی عکاسی با سرعت بالا [۷،۶] و فیلمبرداری با سرعت بالا [۹،۸]، دانشمندان و عکاسان را مجذوب خود کرده است. با توجه به بهبود این تکنیک‌ها [۱۰-۱۲] 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 ترشوندگی و زبری، الگوهای جریان پیچیده‌تری را نسبت به برخورد قطرات روی سطوح خیس‌شده نشان می‌دهد. آزمایش‌ها ریویو^۴ و همکارانش [۱۳] شش نتیجه‌ی ممکن برای برخورد قطره روی یک دیوار خشک را نشان داده که در شکل

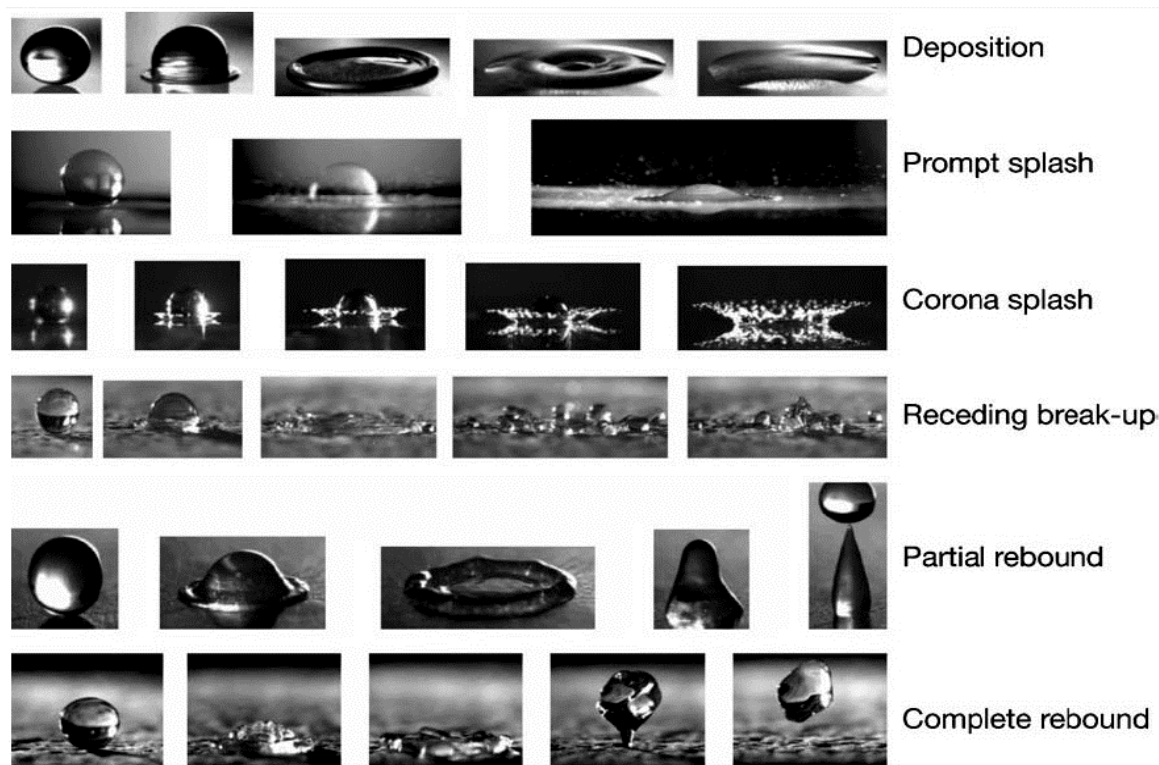
¹ Ohnesorge

² Bond number

³ Froude number

⁴ Rioboo

۵-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱ شکل شناسی برخورد قطره روی یک سطح خشک. برگرفته از ریپو و همکاران [۱۴].

حالت ته‌نشینی شامل دو مرحله است: ته‌نشینی^۱ سینماتیک و ته‌نشینی واقعی. ریپو و همکارانش [۱۴] در مرحله‌ی سینماتیک، شعاع قطره را بدون در نظر گرفتن خواص فیزیکی مایع و سطح بر مبنای مورد، در پایان، این قطره‌ها بر روی سطح پخش شده و در همان‌جا می‌مانند که مثالی از آن در خط بالای شکل ۵-۱ نشان داده شده است. نسبت قطر لایه‌ی نهایی در دیوار به قطر لایه‌ی نهایی در قطره، یعنی ماکزیمم ضریب انتشار $\xi = 2R_{max}/D$ ، برای برخورد قطرات مختلف و در ته‌نشینی بدون جمع شدن تقریباً در حدود ۱/۲۵ تا ۵ می‌باشد [۱۴ و ۱۵].

^۱ deposition

اسکلر^۱ و بوسفیلد^۲ [۱۶] رابطه‌ای به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$\xi = 0.61(Re^2 Oh)^{0.166} = 0.61 \left(\frac{We}{Oh}\right)^{0.166} \quad (3-1)$$

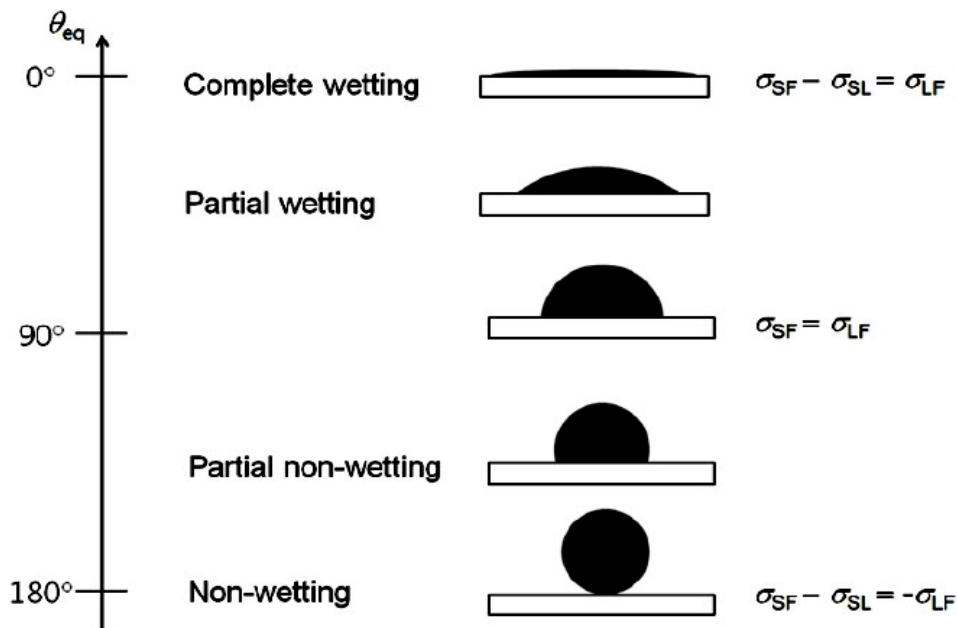
در مرحله‌ی اول و بخشی از مرحله‌ی دوم، یک فاز اولیه از حالات دیگر برخورد قطره روی یک سطح خشک ایجاد می‌شود (شکل ۱-۵). دیر یا زود عوامل دیگری روی کار آمده و به معرفی ویژگی‌های جدید ظاهری می‌پردازند. حالت پاشش سریع (خط دوم از بالا در شکل ۱-۵) با افزایش سرعت برخورد روی یک سطح زیر سرعت می‌یابد، در نتیجه در لابه‌ی لایه‌ی مایع تولید شده توسط قطره‌ی پخش شده، قطرات کوچکی 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 (خط سوم از بالا در شکل ۱-۵). این تاج یادآور تاج‌های ثبت شده در پاشش قطرات روی فیلم‌های بسیار نازک مایع می‌باشد [۱۷]. پاشش تاجی شکل را می‌توان به طور کامل با کاهش فشار گاز اطراف سرکوب کرد [۱۸]، که علاوه بر اثر مستقیم زبری، به نقش مهم گاز در تحریک آشفتگی‌های لایه‌ی پخش شده اشاره دارد. پس از آن که بخشی از انرژی جنبشی توسط نیروهای ویسکوز از بین می‌رود و بخشی از آن به انرژی سطحی، که تا حد زیادی با افزایش مساحت سطح آزاد همراه است، تبدیل می‌شود. رفتار بعدی لایه تا حد زیادی به رطوبت‌پذیری سطح بستگی دارد (شکل ۱-۶). مورد بعدی زاویه تماس^۳ می‌باشد. 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 رطوبت‌پذیری سطح می‌باشد. رطوبت‌پذیری هر سطح به وسیله‌ی زاویه تماس بین مایع با سطح جامد

¹ Scheller

² Bousfield

³ Contact angle

مشخص می‌گردد. شکل ۵ نشان‌دهنده‌ی زاویه تماس مایع - جامد در حالت سکون قطره بر روی سطح می‌باشد. زاویه تماس در مدل‌سازی عددی و تحلیلی به‌عنوان یک شرط مرزی مهم به‌کاربرده می‌شود.



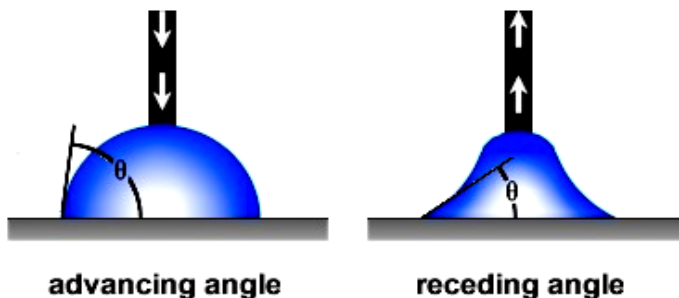
شکل ۱-۶ رفتار ترکنندگی قطره‌ی مایع بر اساس زاویه تماس [۶۴].

مخصوصاً نقش آن در برخوردهایی با انرژی اینرسی کم نسبت به انرژی ویسکوز یا موئینگی، بسیار اساسی است. زاویه تماس تعادلی (θ_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 منحصراً به خواص فیزیکی سطح بستگی دارد. زاویه تماسی که در حین حرکت خط تماس مشاهده می‌گردد را زاویه تماس دینامیکی (θ_d) می‌نامند. زاویه تماس در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱-۸ 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 (θ_{adv}) و در حین جمع شدن قطره (و حرکت خط تماس به سمت فاز مایع) زاویه تماس پسروی (θ_{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^۱ زاویه تماس (در صورت وجود)، $\theta_{rec} < \theta_{adv}$ می‌باشد (یعنی بدون وجود هیستریزیس $\theta_{rec} = \theta_{adv}$ می‌باشد).



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



شکل ۱-۸ زاویه تماس پیشروی و پسروی.

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 θ_{rec}) و کوچک‌ترین قطر d_a (بر اساس θ_{adv}) را تعریف کرد، که شکل تقریبی قطره به‌صورت یک کلاه کروی ناقص می‌باشد [۱۴]:

$$\frac{d_i}{D} = 2 \left[\frac{\sin^3 \theta_i}{2(1 - \cos \theta_i)(2 - \cos \theta_i - \cos^2 \theta_i)} \right]^{1/3} \quad (۴-۱)$$

^۱ Hysteresis

به ترتیب وقتی $d_i = d_r$ است، $\theta_i = \theta_{rec}$ و وقتی $d_i = d_a$ است، $\theta_i = \theta_{adv}$ می‌باشد. ریو و همکارانش [۱۴] و چیافینو^۱ و سونین^۲ [۱۹] 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.

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 به‌طور قابل توجهی بزرگ‌تر از θ_{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 گرانشی کم، خط تماس حرکت رو به عقب خود را پس 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 θ_{adv} و θ_{rec} قرار دارد. در این مرحله (خط چهارم از بالا در شکل ۱-۵)، حالت فروپاشی همراه با پسروی، مشخصه‌ی سطوح رطوبت‌ناپذیر می‌باشد ($d_a \rightarrow 0$ و $\theta_{adv} \rightarrow 180^\circ$) و لایه‌ی منقبض شده به تعدادی انگشتی^۳ 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 به‌اندازه‌ی کافی بزرگ باشد و به‌طور کامل در مرحله‌ی جمع شدن از بین نرود، و با d_a غیر صفر دیده

¹ Schiaffino

² Sonin

³ Fingers

شود و یا با $d_a = 0$ به یک سطح رطوبت ناپذیر میل کند. در چنین مواردی سرعت جمع شدن به اندازه کافی بالا باقی می ماند 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 مویینگی، بخشی از این ستون می‌تواند در سطح باقی بماند و یک یا چند قطره‌ی کوچک را به بالا پرتاب کند (حالت جهش غیرکامل، خط پنجم از بالا در شکل ۱-۵)، و یا مانند یک قطره‌ی کامل از سطح جدا شود (حالت جهش کامل، آخرین خط در شکل ۱-۵). چیافینو و سونین [۱۹] جهش قطره‌ی جیوه را در یک سطح شیشه‌ای و در عدد وبر برخورد $We \leq 2/41$ 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^۱ و همکارانش [۲۰] توانستند دینامیک پخش شدن قطره‌ی آب را روی سطوح فوق آب‌گریز^۲ اندازه‌گیری کرده و قوانین مقیاس‌بندی را استخراج کنند. پیشرفت‌های فنی اخیر در تکنیک جدید اشعه‌ی ایکس با سرعت بالا توسط ژانگ^۳ و همکارانش [۲۱] توسعه پیدا کرد که جزئیات جدیدی از پاشش قطره را نشان داده است. زو^۴ و همکاران [۱۸] به اثر بسیار زیاد هوای زیر قطره بر روی پاشش آن اشاره کردند که وقتی هوا خارج شود می‌تواند مانع از پاشش گردد. به دنبال این خط تحقیق، ریست^۵ و همکاران [۲۲] و تی‌سای^۶ و همکاران [۲۴، ۲۳] 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

¹ Clanet

² Super-hydrophobic

³ Zhang

⁴ Xu

⁵ Reyssat

⁶ Tsai

تاجی شکل و انگشتی‌های آن تغییر شکل می‌دهد، به‌تازگی نیز وندر وین^۱ و همکارانش [۲۵] تأثیر سطوح میکرو ساختار بر دینامیک فیلم هوای زیر قطره‌ی آب را، بعد از برخورد مورد بررسی قرار دادند. چندین مدل و شبیه‌سازی عددی به‌منظور تولید مجدد فیزیک پیچیده‌ی پخش شدن قطره مورد آزمایش قرار گرفته است [۲۶-۳۱]. به‌رغم این بهبود قابل‌توجه در توانایی‌های محاسباتی در سال‌های اخیر، تا به امروز هیچ شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌ای از برخورد قطره روی سطح جامد در سرعت زیاد وجود ندارد تا به‌خوبی 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 پرداخت شده در پوشش‌دهی و رنگ‌آمیزی با اسپری و جوهرافشان پرینتر نقش مهمی دارد [۱۶ و ۳۲-۳۶]. علاوه بر این، برآورد دقیق ماکزیمم پخش‌شدگی، در پیش‌بینی تمایل قطره به جهش ضرورت دارد زیرا انرژی سطح در این حالت نشان‌دهنده‌ی انرژی موجود برای جمع شدن قطره می‌باشد [۳۷]. روش‌های به‌کار گرفته شده جهت به‌دست آوردن ماکزیمم قطر پخش شدن برای سیالات نیوتنی در حالت کلی به سه دسته تقسیم می‌شود: قوانین مقیاس‌بندی [۱۶، ۲۰]، بقای انرژی [۳۷-۴۱] و بقای اندازه حرکت [۳۱، ۳۴]. 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 از دست رفته در اثر تلفات لزجت یعنی E_{K2} ، E_{G2} ، E_{S2} و E_{D2} برای قطره‌ی پخش شده برابر باشد. به عبارتی خواهیم داشت:

$$E_{K1} + E_{G1} + E_{S1} = E_{K2} + E_{G2} + E_{S2} + E_{D2} \quad (۵-۱)$$

^۱Van der Veen

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

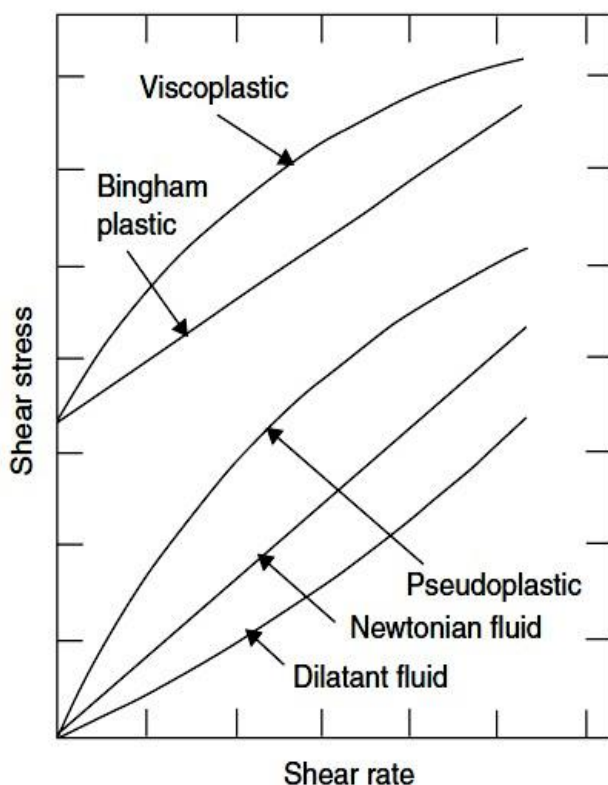
$$E_{K1} + E_{S1} = E_{S2} + E_{D2} \quad (۶-۱)$$

در این میان تنها قوانین مقیاس‌بندی هستند که برای توجیه منطقی مشاهدات تجربی پیشنهاد شده‌اند. در مورد مرحله‌ی قبل از پاشش، در مقالات قوانین مقیاس‌بندی متعددی به منظور توجیه پخش شدن قطره‌ی نیوتنی روی سطح جامد پیشنهاد شده است. با فرض این که تمام انرژی جنبشی از طریق اصطکاک ویسکوز با سطح از بین برود، حداکثر میزان پخش شدن به صورت $D_{max} \sim D_0 Re^{1/5}$ پیشنهاد شده که عدد رینولدز با چگالی قطره ρ ، سرعت اولیه‌ی U_0 ، قطر اولیه D_0 و گرانیوی قطره‌ی مایع μ ، به صورت $Re = \rho U_0 D_0 / \mu$ تعریف شده است. برای سیالات غیر لزج، انتظار می‌رود که انرژی جنبشی به طور کامل به پخش شدن انتقال یابد، که ارزش انرژی آن متناسب با کشش سطحی مایع σ خواهد بود. بنابراین یک مقیاس‌بندی با عدد وبر $We = \rho D_0 U_0^2 / \sigma$ ، به صورت $D_{max} / D_0 \sim We^{1/2}$ انتظار می‌رود. با این حال، کلانت و همکارانش [۲۰] نشان دادند که میزان پخش شدن، یعنی $D_{max} / D_0 \sim We^{1/4}$ ، که آن‌ها آن را به طور فیزیکی با موازنه‌ی کشش سطحی و اینرسی توضیح دادند، بسیار پایین‌تر است.

۱-۶- کارهای پیشین (غیرنیوتنی)

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 غیرنیوتنی، به دلیل مصارف زیاد سیالات غیرنیوتنی در بسیاری از بخش‌های صنعتی، رشد قابل توجهی داشته است. محققان مختلف [۴۲-۸۳] دینامیک برخورد سیالات غیرنیوتنی مانند سیالات ویسکوالاستیک، سیالات

دارای تنش تسلیم (پلاستیک بینگهام^۱) و برشی رقیق شونده (شبه پلاستیک^۲) را مورد بررسی قرار داده-
 اند. در شکل ۹-۱ نمودار تنش برشی برحسب نرخ برش برای سیالات نیوتنی و سیالات غیرنیوتنی مختلف
 نمایش داده شده است. برگرون و همکارانش [۴۲] و چند محقق دیگر [۴۳-۵۲] 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.



شکل ۹-۱ نمودار تنش برشی برحسب نرخ برش (مقایسه‌ی سیالات نیوتنی با سیالات غیرنیوتنی).

رفعی^۳ و همکارانش [۵۳] بر روی دو خاصیت سیالات غیر نیوتنی یعنی گرانیروی 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

¹ Bingham plastic

² Pseudoplastic

³ Rafai

می‌کند. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که قانون تنر^۱ در توصیف رفتار سیالات برشی رقیق‌شونده بسیار قوی عمل می‌کند. در ادامه نیز رفعی و بون^۲ [۵۴] 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^۳) پدیده‌ی فرا پخش‌شدگی (پدیده‌ای که در آن قطره سریع‌تر از حالتی که سایر سورفاکتانت‌ها استفاده شده‌اند پخش می‌شود) را به دنبال داشت. اخیراً نیگن^۴ [۵۵]، جرمن^۵ و برتولا^۶ [۵۶]، لو^۷ و فورتر^۸ [۵۷] و سعیدی و همکاران [۵۸] 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 [۵۶] ثابت کردند که در مورد سیالات برشی رقیق‌شونده، ماکزیمم قطرهای پخش‌شدگی معمولاً بسیار بزرگ‌تر از آن دسته از قطرات نیوتنی هستند که حتی هر دوی آن‌ها در برخورد، مورفولوژی^۹ یکسانی از خود نشان داده‌اند. در همین راستا، دیچلیت^{۱۰} و همکاران [۵۹] و آن^{۱۱} و لی^{۱۲} [۶۰] گزارشی ارائه کردند که نشان می‌داد برای درک رفتار قطره‌ی برشی رقیق‌شونده بعد از برخورد به تحلیلی گذرا نیاز است زیرا گرانروی مایع در طول کل فرایند برخورد تغییر می‌کند. سپس آن و لی [۶۱] در راستای گسترش کارهای قبلی خود به بررسی برخورد قطره‌ی برشی رقیق‌شونده بر روی سطوحی با میزان ترشوندگی 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 پرینتر بسیار رایج است و به همین دلیل

¹ Tanner's Law

² Bonn

³ Trisiloxane

⁴ Nigen

⁵ German

⁶ Bertola

⁷ Luu

⁸ Forterre

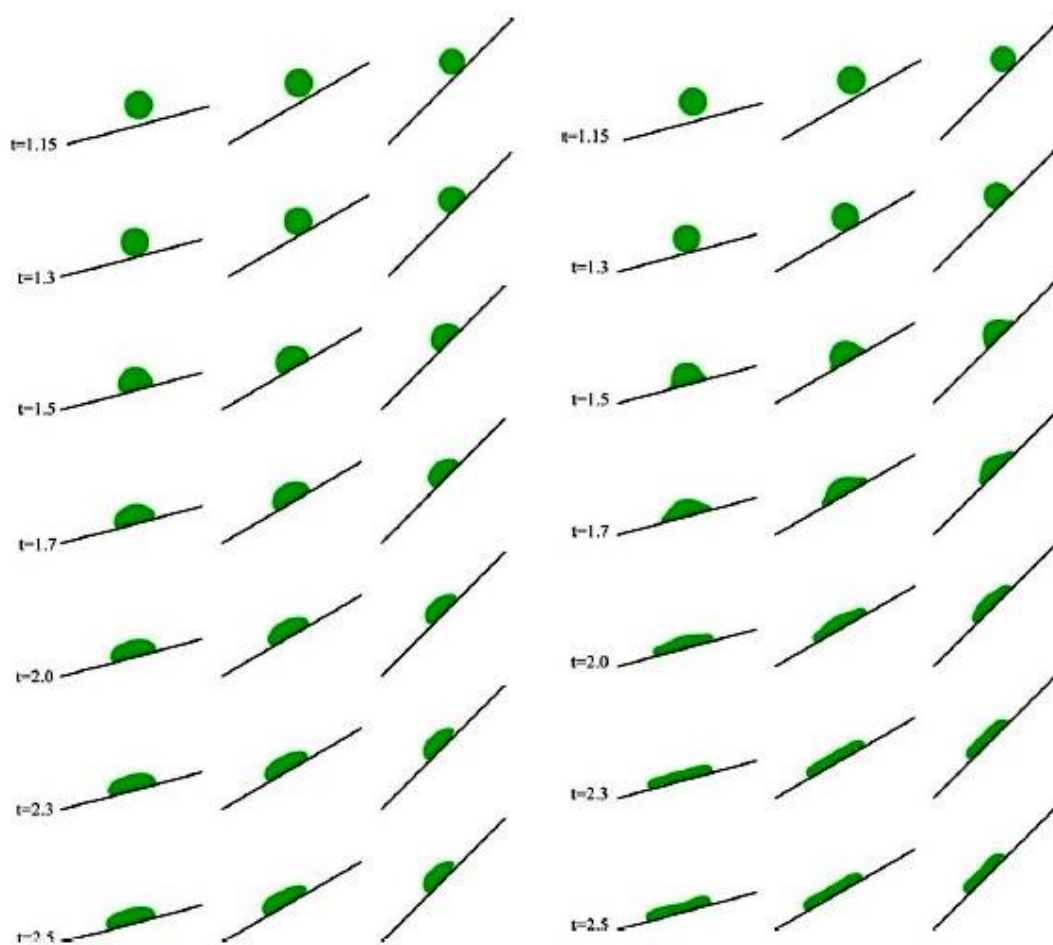
⁹ Morphology

¹⁰ Dechelette

¹¹ An

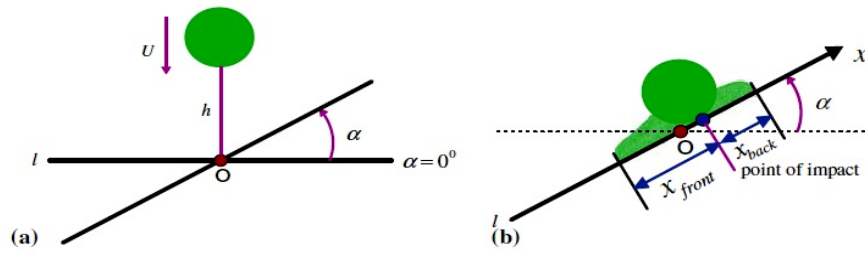
¹² Lee

تلاش‌های متعددی در این زمینه بر روی سیالات غیرنیوتنی [۶۲-۶۸] نیز صورت پذیرفته است. اخیراً نیز محققان به بررسی دقیق‌تر زاویه و خط تماس پرداخته‌اند [۵۱ و ۶۹-۷۴]. در این میان بیوله^۱ و برتولا [۷۲] 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.

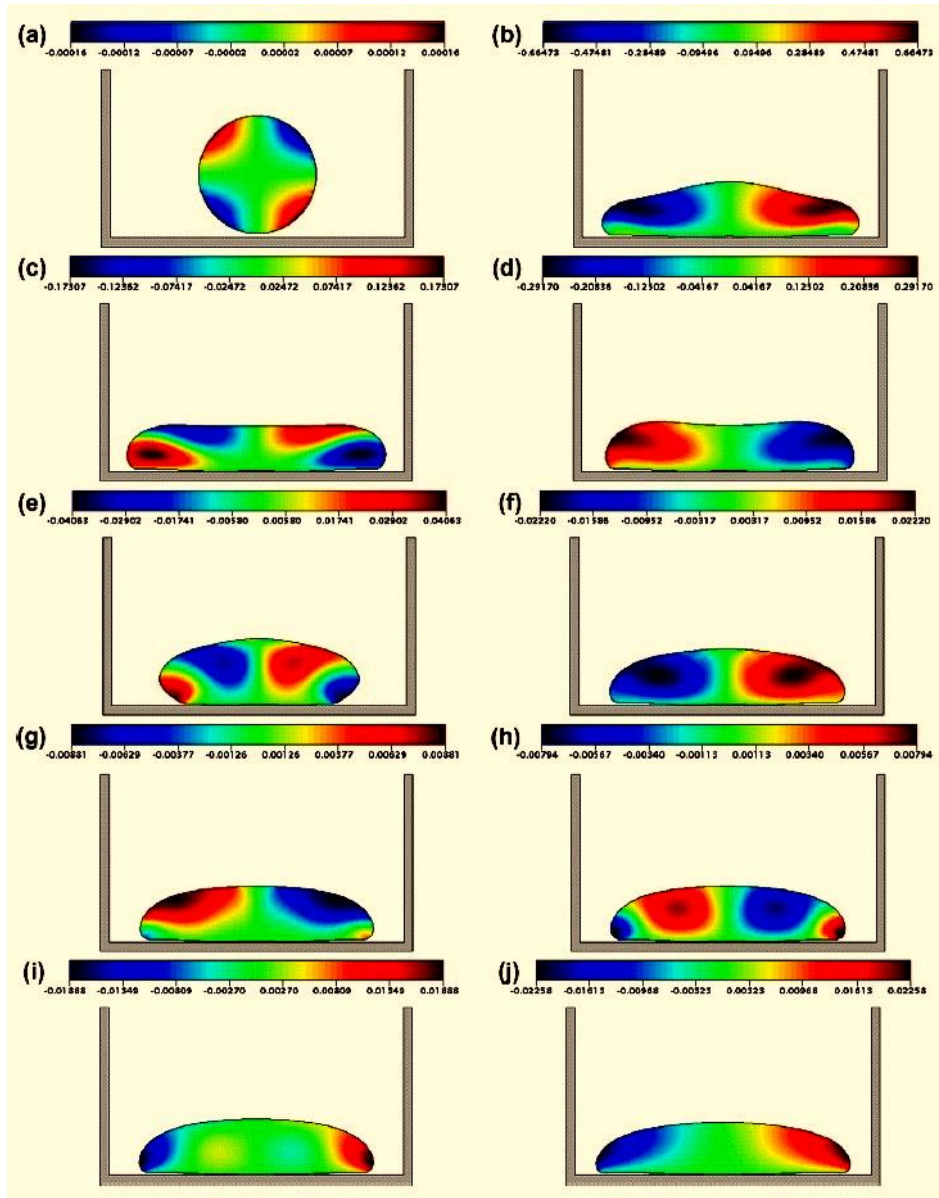


شکل ۱- ۱۰ به تصویر کشیدن سیال در زمان‌های بی‌بعد مختلف. سمت راست) شبیه‌سازی SPH برای یک قطره‌ی Oldroyd-B در زوایای برخورد ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه. سمت چپ) شبیه‌سازی SPH برای یک قطره‌ی نیوتنی در زوایای برخورد ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه [۷۶].

^۱ Biole



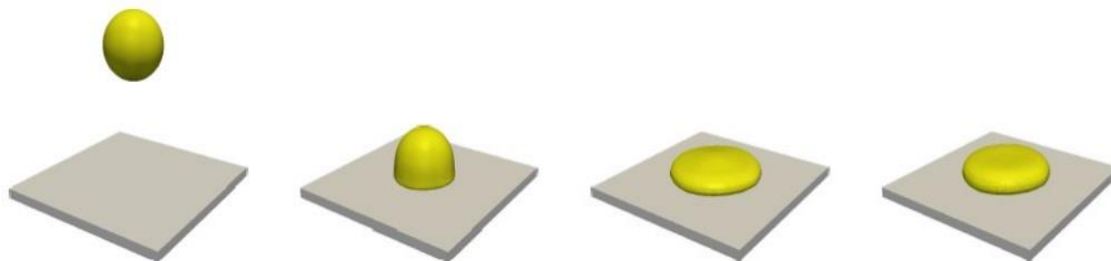
شکل ۱- ۱۱ (a) حالت اولیه‌ی برخورد یک قطره و (b) نمای جانبی یک قطره روی صفحه‌ای جامد و شیب‌دار [۷۶].



شکل ۱- ۱۲ شبیه‌سازی عددی مسئله‌ی برخورد قطره با استفاده از مدل Oldroyd-B ($Fr = 2.26, We = 1, Re = 5$). تصویر شکل قطره و میدان سرعت در زمان‌های بی‌بعد مختلف: (a) $t = 1.3$ (b) $t = 2.4$ (c) $t = 2$ (d) $t = 2.7$ (e) $t = 4$ (f) $t = 4$ (g) $t = 5.9$ (h) $t = 6.6$ (i) $t = 6.8$ (j) $t = 7.1$ (k) $t = 11.2$ [۷۸].

علاوه بر این، جیانگ^۱ و همکارانش [۷۶] با بهره‌گیری از روش SPH^۲ و افزودن تنش‌های کمکی به معادله‌ی اندازه حرکت به شبیه‌سازی برخورد و پخش قطره‌ی ویسکوالاستیک بر روی صفحه‌ای شیب‌دار پرداختند. نمونه‌هایی از این شبیه‌سازی در شکل‌های ۱-۱۰ و ۱-۱۱ نشان داده شده است. همچنین رحیمی و ویس^۳ [۷۷] دینامیک برخورد سیالات غیرنیوتنی پیچیده‌تر (یعنی مواد برشی رقیق شونده‌ی دارای تنش تسلیم و الاستیسیت) را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند.

همان‌طور که در شکل ۱-۱۲ مشاهده می‌شود، اوشی^۴ و همکارانش [۷۸] نیز با استفاده از مدل XPP^۵، کاربرد روش تفاضل محدود ضمنی^۶ را در دو جریان سطحی آزاد یعنی برخورد قطره و جت ناپایدار^۷ نشان دادند. علاوه بر این، فیگوریدو^۸ و همکارانش [۷۹] با به‌کارگیری مدل آلدروید-بی^۹ و بهبود روش XPP که قبل از آن توسط فیگوریدو [۸۰] ارائه شده بود، به صورت سه‌بعدی به بررسی عددی برخورد قطره سیال ویسکوالاستیک پرداختند (شکل ۱-۱۳).



شکل ۱-۱۳ تصویر شبیه‌سازی عددی مسئله‌ی برخورد قطره به صورت سه‌بعدی [۸۰].

¹ Jiang

² Smoothed particle hydrodynamics

³ Weihs

⁴ Oishi

⁵ eXtended Pom-Pom model

⁶ implicit finite difference method

⁷ jet buckling

⁸ Figuieredo

⁹ Oldroyd-B

کارهای محدودی نیز به صورت تحلیلی صورت گرفته است برای مثال استارو و همکارانش [۸۱] به کمک روابط تحلیلی، شعاع پخش شدگی و زاویه تماس مایعات غیرنیوتنی اُستوالد-دی‌واله^۱ را محاسبه کرده و داندپات و سینگ [۸۲] هم با به کارگیری روشی مبتنی بر انرژی، مدلی تئوری برای پخش شدن مایع پاورلا ارائه کردند. به تازگی نیز سینگ و داندپات [۸۳] با بهره بردن از روش انرژی موفق به پیدا کردن رابطه‌ای میان زبری سطح، نرخ پخش شدن قطره و زاویه تماس شدند و بدین وسیله نشان دادند که قطره سیال غیرنیوتنی بر روی سطح زبر سریع‌تر از سطح صاف پخش می‌شود. به علاوه آن‌ها مشاهده کردند که بر روی سطح زبر سرعت پخش شدن سیال برشی غلیظ شونده نسبت به سیال برشی رقیق شونده بیشتر است. با وجود این تلاش‌های فراوان، تحقیق در مورد برخورد قطره‌ی غیرنیوتنی هنوز هم کاملاً ناقص است و اثرات خواص رئولوژیک سیال غیرنیوتنی بر رفتار قطره پیش از برخورد همچنان فاصله‌ی زیادی تا شناخت کامل این پدیده دارد.

۱-۷- 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.

۱-۷-۱- مشخصات کلی پژوهش

در این تحقیق برخورد قطره مایعات نیوتنی (آب و گلیسرین) و نوع خاصی از قطرات غیرنیوتنی (سیالات باگر حاصل از ترکیب پلی‌آکریلامید، آب و گلیسرین) بر روی سطوح جامد، صاف و خشک (پلکسی‌گلاس و شیشه) به طور آزمایشگاهی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. برای انجام این آزمایش، تجهیزات

¹ Non-Newtonian Ostwald-de Waele

به‌گونه‌ای تعبیه و جایگذاری شده‌اند که قطرات بر روی سطحی عمود بر راستای سوزن برخورد کنند و دوربین تصاویر را بدون هیچ‌گونه زاویه‌ای نسبت به سطح تهیه کند تا ارتفاع قطره نیز به‌طور مستقیم از تصاویر به‌دست آید. از طرفی از آنجا که دمای محیط و دمای سطح تأثیر بسیار قابل‌توجهی بر روی نتایج آزمایش دارد، در تمام آزمایش‌ها دمای محیط در $23 \pm 0.3^\circ\text{C}$ ثابت نگه داشته شده است. برای تشکیل قطره‌ها، ابتدا سیال موردنظر توسط پمپ به درون سوزن هدایت‌شده 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 سیال، سرعت برخورد و میزان ترشوندگی سطح بر رفتار قطره در مرحله پخش شدن و جمع شدن بررسی شده است.

۱-۷-۲- اهمیت و کاربرد موضوع

مطالعه جنبه‌های گسترده برخورد قطره روی سطوح جامد به دلیل کاربردهای روزافزون آن در زمینه‌های مختلف

بسیار موردتوجه 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، پوشش‌دهی سطوح در تولید محصولات نظیر شیرآلات و سی-دی‌ها، پاشش رنگ بر روی سطوحی مانند بدنه اتومبیل و نیز رسوب‌گذاری قطرات حاوی ذرات و نحوه‌ی گسترش و رسوب‌گذاری قطرات مذاب فلزات بر روی سطوح جامد گوناگون اشاره کرد.

نمونه‌های دیگری از کاربردهای پدیده‌ی برخورد قطره نیوتنی و غیرنیوتنی 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.

۱-۷-۳ - جنبه‌های نوآوری

در این پژوهش با توجه به جایگاه و اهمیت موضوع، بررسی و مطالعه‌ی آزمایشگاهی برخورد قطره ویسکوالاستیک بر روی سطح جامد، مدنظر قرار گرفته است. در مطالعات پیشین، پدیده‌ی برخورد قطره با سطح جامد به صورت تئوری، عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است، اما در این میان باگراها به دلیل پیچیدگی آن‌ها در ساخت، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از آنجا که تشکیل، سقوط و برخورد قطره ویسکوالاستیک با سطح نتیجه‌ی برهم‌کنش چندین نیرو می‌باشد و از طرفی نتیجه‌ی برخورد به شدت 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. باگراها با وجود پیچیدگی در ساخت، چون لزجت آن‌ها با تغییرات تنش برشی تقریباً ثابت می‌ماند، تحلیل رفتار قطره غیرنیوتنی 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 آنجا که 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 (برای قطرات نیوتنی $763.2 \leq We \leq 1035.3$ و برای قطرات غیرنیوتنی $891.143 \leq We \leq 991.414$).

۱-۷-۴- مروری بر فصول پایان نامه

مطالعه حاضر بدین ترتیب ادامه می یابد که در فصل دوم تجهیزات آزمایشگاهی و مواد مورد آزمایش معرفی می گردد. در این تحقیق از یک دوربین پرسرعت که قادر به ثبت ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه می باشد، استفاده شده است. برای استخراج اطلاعات پایه ای همچون قطر، ارتفاع و سرعت قطرات از تصاویر، از نرم افزار پردازش تصویر ImageJ استفاده شده و کدی در برنامه متلب نوشته شده است. آزمایش ها بر روی دو مایع نیوتنی و دو مایع غیرنیوتنی انجام شده است.

در فصل سوم به بحث و بررسی نتایج حاصل از آزمایش ها صورت گرفته بر روی قطرات پرداخته می شود. ابتدا نتایج اولیه همچون قطر قطره، حجم آن، سرعت حد و سرعت قطره در لحظه برخورد ارائه شده و سپس به منظور مقایسه رفتار قطرات غیرنیوتنی با یکدیگر و همچنین مقایسه قطرات نیوتنی با غیر- نیوتنی، نمودارهای قطر و ارتفاع بی بعد شده برای تمام قطرات رسم شده و مورد بحث قرار می گیرد. در این راستا اثر سه عامل یعنی لزجت سیال، سرعت برخورد و رطوبت پذیری سطح بر رفتار قطرات در مراحل پخش شدن و جمع شدن مورد بررسی قرار می گیرد.

نهایتاً در فصل چهارم، نتیجه گیری از تحقیق اخیر و پیشنهادهایی جهت ادامه تحقیق حاضر ارائه می-

شود.

فصل دوم

تجهيزات آزمایش و مواد مورد استفاده

۲-۱- مقدمه

تجهیزات مناسب و به‌روز، نیاز اساسی در انجام هرچه بهتر و دقیق‌تر مطالعات آزمایشگاهی 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 مدت زمانی 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 ساخته شده 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

۲-۲-۱- دوربین پرسرعت

مبنای تمامی آزمایش‌ها صورت گرفته تصویربرداری از حرکت قطرات و سپس پردازش تصاویر می‌باشد. بدین منظور از یک دوربین پرسرعت (pco.dimax S1)¹ CMOS استفاده شده است که در بالاترین

¹ Complementary metal-oxide-semiconductor

سرعت توانایی ثبت ۴۵۰۰ تصویر بر ثانیه را داراست. رزولوشن^۱ دوربین از ۲۴۰×۱۶ تا ۱۰۰۸×۱۰۰۸ قابل تغییر است که با افزایش سرعت تصویربرداری به دلیل محدودیت‌های حافظه، به‌طور طبیعی رزولوشن کم می‌شود. برای این دوربین نیز در پایین‌ترین رزولوشن یعنی ۲۴۰×۱۶، سرعت ۱۵۲۸۱۱ تصویر بر ثانیه را خواهیم داشت. دوربین و نمای پشت آن در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.

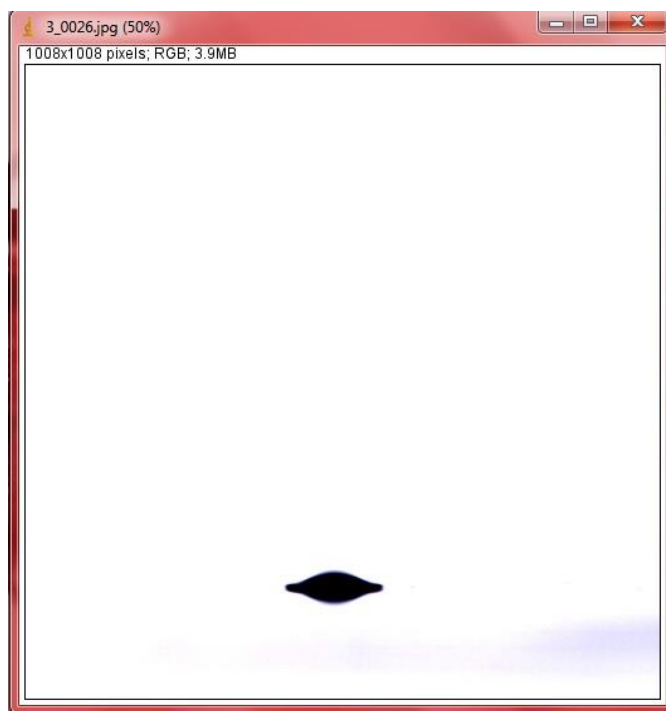


شکل ۱-۲ دوربین پرسرعت CMOS مدل pco.dimax S1.

¹ resolution

محدوده زمانی نوردهی این دوربین از $1/5$ میکروثانیه تا 40 میلی ثانیه می باشد و قابلیت کنترل هوشمند باتری را دارد. این دوربین برای ذخیره تصاویر نیز به حافظه داخلی 36GB مجهز است و رابط-های آن شامل USB 3.0 ، GigE/USB 2.0 ، HD-SDI و CameraLink می باشد.

در شکل ۲-۲ می توان یک نمونه از تصاویر قطرات منتخب را مشاهده نمود. ابعاد تصویر واقعی $4/2 \times 4/2$ سانتی متر مربع است که با توجه به اینکه از رزولوشن 1008×1008 و سرعت 4500 تصویر بر ثانیه برای تصویربرداری استفاده شده است، می توان نتیجه گرفت هر پیکسل فضایی معادل $0,00001$ سانتی متر مربع را پوشش می دهد. بهره گیری از چنین رزولوشن بالایی در هنگام تصویربرداری این اطمینان را به وجود می آورد که چنانچه پیکسلی بر مرزهای قطره واقع شود، خطای قابل ملاحظه ای وارد محاسبات نمی گردد.

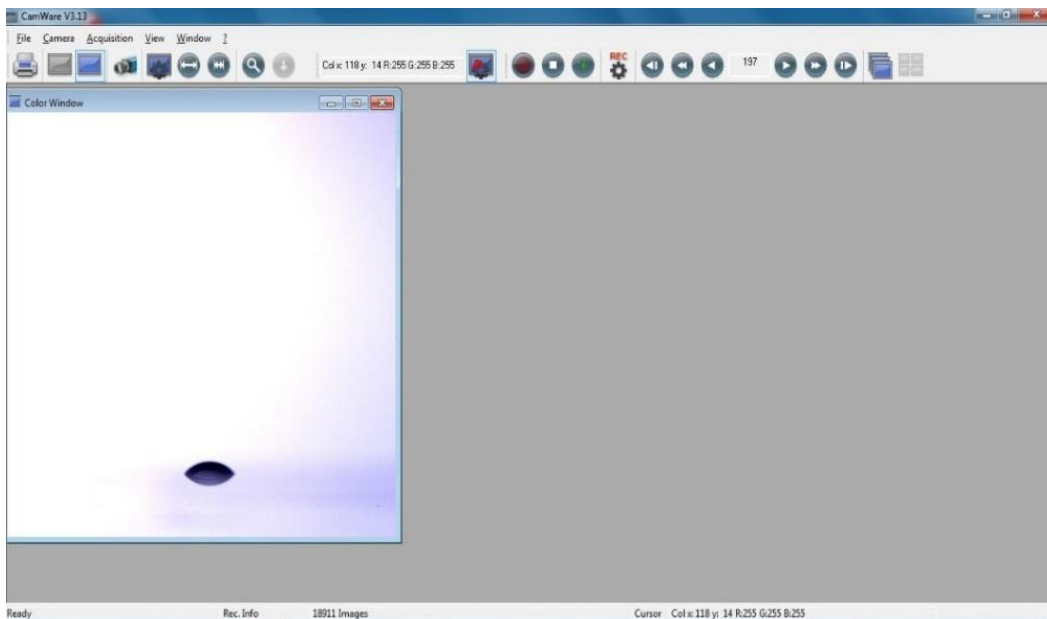


شکل ۲-۲ نمونه ای از تصاویر تهیه شده از قطره.

یکی از نکات قابل توجه در استفاده از دوربین، نورپردازی موردنیاز آن است. بدین منظور از یک نورافکن 1000 وات استفاده شده است. در تأمین روشنایی موردنیاز باید به این نکته توجه داشت که نورپردازی

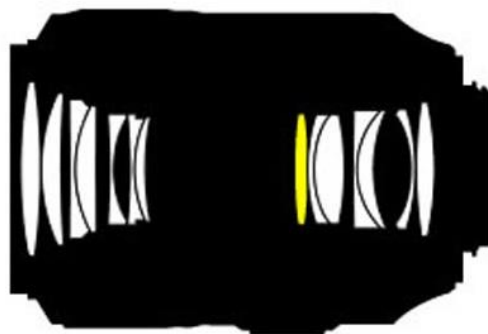
به‌گونه‌ای باشد که مرزهای قطره از فضای اطراف آن کاملاً قابل تفکیک باشند. در غیر این صورت نقاطی نورانی در مرز قطره مشاهده خواهد شد که پردازش تصویر را دشوار کرده و نتایج دقیقی به دست نخواهد آمد. در آزمایش‌ها صورت گرفته در این مطالعه، پس از انجام بررسی‌های لازم، نورپردازی از پشت قطره به‌عنوان بهترین گزینه جهت تصویربرداری انتخاب شده است. زیرا در این حالت مرزها به‌خوبی از محیط قابل تفکیک هستند و فقط ممکن است نقاطی نورانی داخل قطره مشاهده شوند که این نقاط به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر به‌آسانی 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 به‌واسطه‌ی آن می‌توان کلیه‌ی تنظیمات مطلوب را بر روی دوربین اجرا کرد. اطلاعات ضبط شده توسط دوربین را می‌توان با فرمت‌های مختلفی نظیر TIFF، JPEG، AVI، WMV و غیره ذخیره‌سازی کرد. فرمت TIFF بهترین و امن‌ترین فرمت جهت ذخیره کردن تصاویر است زیرا اطلاعات را بدون فشرده‌سازی ذخیره می‌کند. از دیگر ویژگی‌های این دوربین امکان تبدیل تصاویر به فیلم می‌باشد.



شکل ۲-۳ نرم‌افزار کنترلی دوربین.

به همراه دوربین از یک لنز Nikon مدل AF-S Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED VR برای آزمایش‌ها استفاده شده است. این لنز ماکرو مخصوص عکاسی و فیلم‌برداری از نزدیک^۱ (تا بزرگنمایی ۱:۱) و پرتره^۲ می‌باشد. لنز مذکور این قابلیت را دارد که به هنگام نزدیک شدن دوربین به پدیده‌ی موردنظر، تصویری واضح از آن را در اختیار می‌گذارد. شکل ۲-۴ لنز مورد استفاده در این مطالعه و نمای داخلی آن را نشان می‌دهد.



■: ED glass elements

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

¹ Close up
² portrait

۲-۲-۲- پمپ تزریق سرنگی

در این آزمایش از یک دستگاه پمپ تزریق سرنگ^۱ JMS مدل SP-500 (شکل ۲-۵) استفاده شده است. دستگاه پمپ سرنگی جهت به کارگیری انواع سرنگ‌ها طراحی شده است. این دستگاه با توجه به ابعاد سرنگ استفاده شده، قابلیت تزریق مقدار معینی محلول با سرعت‌های مختلف را دارا می‌باشد. به طور کلی این سیستم در تمامی مواردی که نیاز به تزریق کم (میلی‌لیتر بر ساعت) و کنترل شده محلول می‌باشد، کاربرد دارد. استفاده از این پمپ در مصارف پزشکی بسیار متداول و شناخته شده است. علاوه بر این، از این دستگاه می‌توان در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی به منظور تحقیق بر روی موضوعات مختلف از جمله نفت، گاز، مواد شیمیایی، رنگ‌ها و کلیه‌ی آزمایش‌ها مرتبط با تشکیل و تزریق قطره بهره‌های فراوان برد. پمپ تزریق سرنگ JMS مدل SP-500 پر فروش‌ترین پمپ سرنگ در ایران است که ساخت کشور ژاپن بوده و قابلیت استفاده با کلیه سرنگ‌های داخلی با سایزهای مختلف (۱۰، ۲۰، ۴۰، ۳۰، ۵۰ سی‌سی) را دارد.



شکل ۲-۵ پمپ تزریق سرنگ JMS مدل SP-500.

^۱ Syringe pump

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 (۰/۱-۹۹۹/۹ 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 انجام گرفته 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^۱

سیال غیرنیوتنی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، از سه قسمت تشکیل شده است: آب مقطر به‌عنوان

¹ Hot plate stirrer

حلال، ماده پلیمری (پلی آکریلامید^۱)، و گلیسیرین به عنوان ماده لزج کننده. برای همگن ساختن ترکیب فوق به همزنی با سرعت های 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 سانتی گراد را تأمین می کند. این همزن با ایجاد میدان مغناطیسی دورانی، قرص مگنت موجود در محلول را می چرخاند.



شکل ۲-۷ همزن هات پلیت IKA RCT.

برای ساختن محلول های پلیمری از سرعت دورانی ۷۰-۱۱۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. علاوه بر این به منظور جلوگیری از همپاشی ماده ویسکوالاستیک از تنظیم دمای دستگاه خودداری کرده و تمام محلول ها در دمای ۲۵-۲۷ درجه سانتی گراد تهیه شده اند.

¹ polyacrylamide

۲-۲-۵- ویسکومتر

برای محاسبه‌ی گرانیوی سیالات نیوتنی 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 ۱-۲۰۰۰۰۰۰ سنتی‌پواز^۱ است (البته در صورت وجود تمام اسپیندل-های^۲ مرتبط با دستگاه). در هنگام استفاده از این دستگاه باید توجه داشت که از ظرف مناسب با هر اسپیندل استفاده شود (قطر ظرف بیش از دو برابر قطر اسپیندل نباشد) و دما ثابت نگه داشته شود.



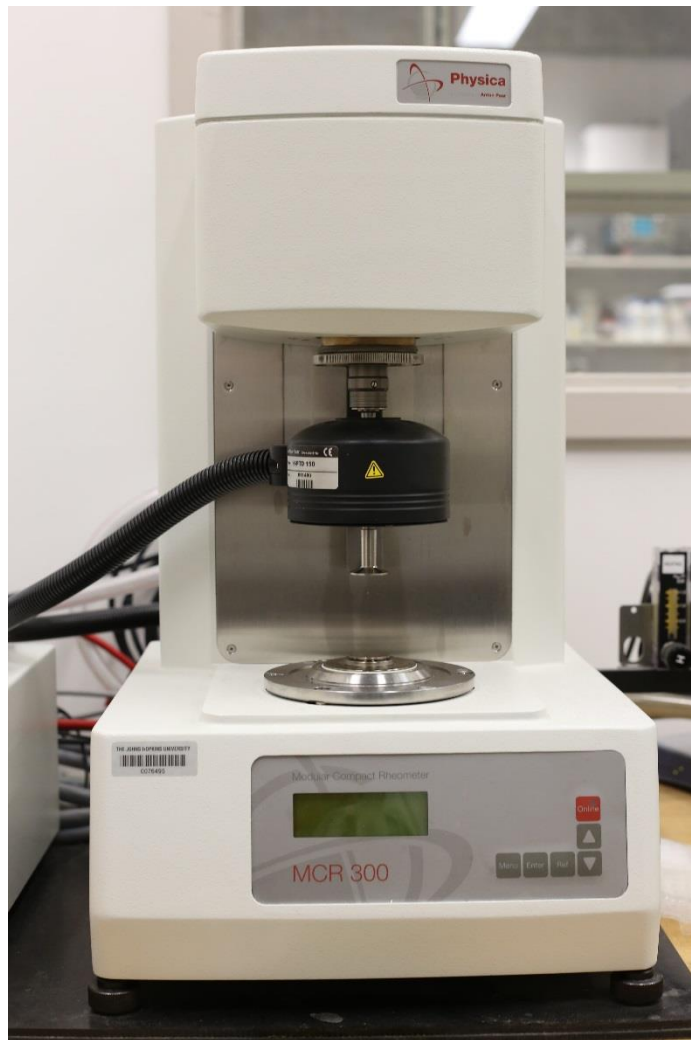
شکل ۲-۸ ویسکومتر مدل DVE-LV شرکت Brookfield

¹ centipoise

² spindle

۲-۲-۶- رنومتر^۱

همان طور که در شکل ۲-۹ مشاهده می‌شود، برای اندازه‌گیری خواص رنومتری سیالات غیرنیوتنی منتخب در این تحقیق، از یک دستگاه رنومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar استفاده شده است. تمام آزمایش‌های رنومتری توسط آزمایشگاه پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ و پوشش تهران انجام شده است. نتایج این آزمایش در جداول پیوست موجود می‌باشد.

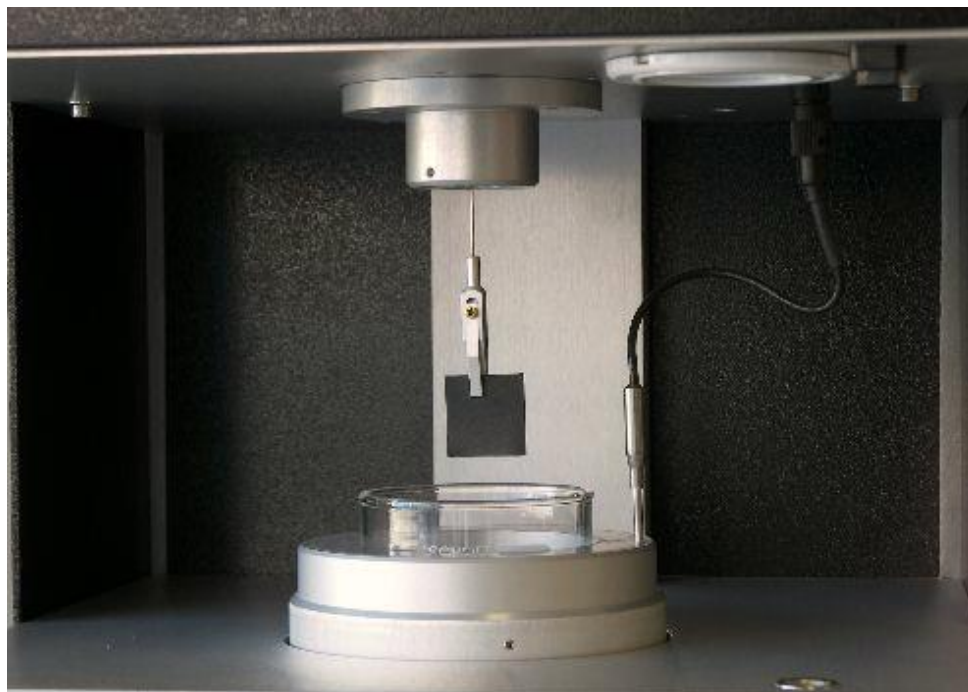


شکل ۲-۹ دستگاه رنومتر MCR300 ساخت شرکت Anton Paar

¹ Rheometer

۲-۲-۷- دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی

شکل ۲-۱۰ دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی تَنسیومتر^۱ را نشان می‌دهد که به روش ویل‌هلمی^۲ کشش سطحی سیال را محاسبه می‌کند. این آزمایش نیز در آزمایشگاه پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ و پوشش انجام شده است.



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

۲-۳- تجهیزات آزمایش و تنظیم آن‌ها

۲-۳-۱- سوزن

برای آزمایش‌ها از یک سوزن تزریق ۱۶G، ساخت شرکت JMS (شکل ۲-۱۱) و دارای قطر داخلی ۱/۱۹ میلی‌متر که نوک آن بریده و صاف شده، استفاده گردیده است. ثابت نگه داشتن سوزن شرایط ثابتی در

¹ Tensiometer

² Wilhelmy

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 ۱۱-۲ سوزن ۱۶G مورد استفاده برای تشکیل قطره.

۲-۳-۲- سطوح برخورد



شکل ۱۲-۲ نمونه‌ای از سطوح پلکسی‌گلاس.



شکل ۲-۱۳ لام‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر

در این مطالعه از ورق آکرلیک با نام تجاری پلکسی گلاس^۱ با ضخامت سه میلی‌متر و تیغه‌ی شیشه‌ای (لام) به‌عنوان سطوح برخورد استفاده شده است که سطوحی آب‌دوست^۲ محسوب می‌گردند. پلکسی گلاس نوعی پلاستیک می‌باشد که ظاهری بسیار شفاف و شبیه به شیشه دارد. جنس پلکسی گلاس از نوعی پلی-کربنات شفاف می‌باشد که نوعی پلیمر است. پلکسی گلاس 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 زیرا میزان تبادل حرارت بین این ورق‌ها و محیط تقریباً ۱۰٪ از شیشه کمتر است. 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

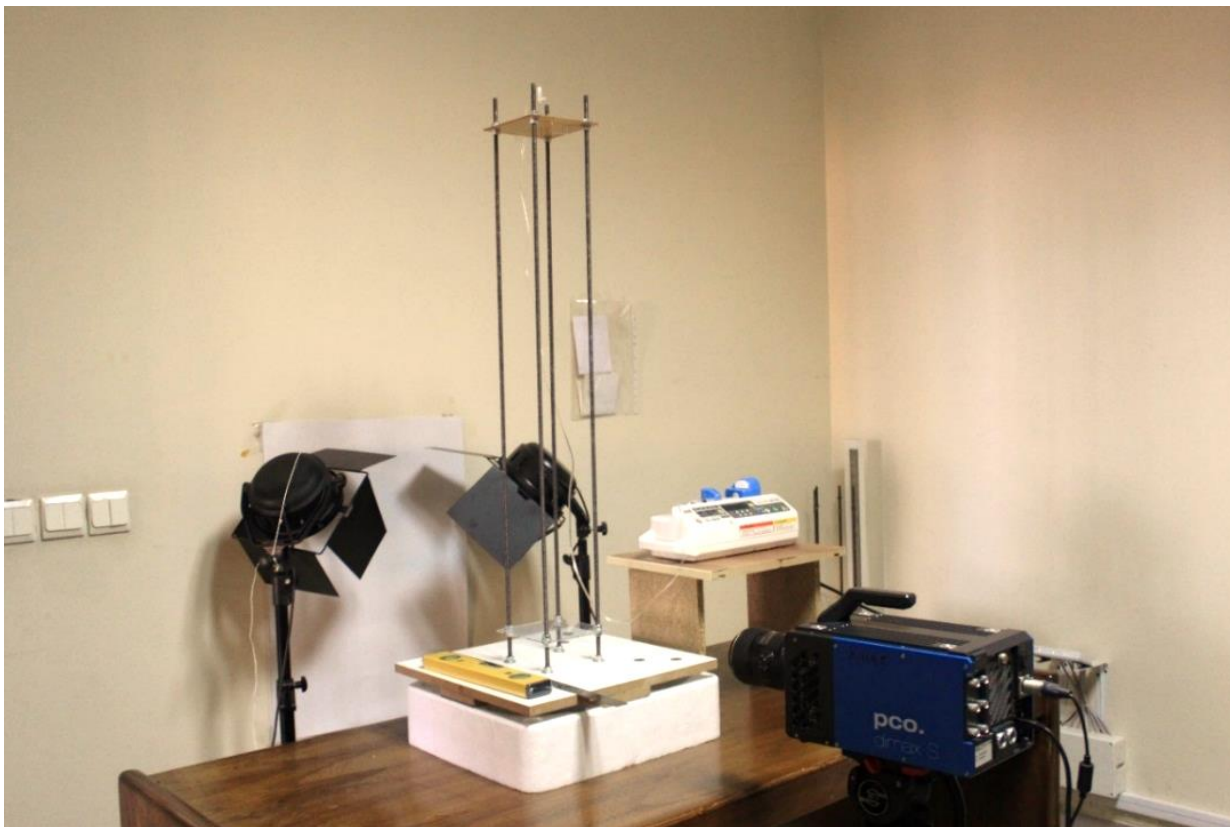
^۱ plexiglas

^۲ hydrophilic

برنده نیست و در نتیجه باعث جراحت نمی‌شود. لام نیز صفحه‌ای شیشه‌ای به شکل مستطیل است که ابعاد آن $2/5 \times 7/5$ و ضخامت آن یک میلی‌متر می‌باشد. در شکل‌های ۱۲-۲ و ۱۳-۲ به ترتیب تصاویری از سطوح پلکسی‌گلاس و لام نشان داده شده است.

۳-۳-۲- نحوه‌ی استقرار تجهیزات (ستاپ)^۱

به‌منظور انجام آزمایش‌ها، از دو صفحه‌ی موازی از جنس پلکسی‌گلاس که توسط چهار میله‌ی رزوه شده به ارتفاع ۱ متر کنترل و متصل شده‌اند، استفاده گردیده است. با توجه به رزوه بودن میله‌ها، می‌توان به‌راحتی فاصله‌ی صفحات نسبت به یکدیگر را تغییر داد. برای ثابت نگه داشتن صفحات و میله‌ها و حفظ تعادل آن‌ها، صفحه‌ای بزرگ‌تر به‌عنوان پایه در زیر این مجموعه تعبیه شده است.



شکل ۱۴-۲ نمای کلی از تنظیمات آزمایش.

¹ Setup

قبل از انجام هر آزمایش، موازی بودن صفحات پلکسی گلاس به وسیله‌ی تراز بررسی شده است. از آنجا که 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 با سطح برخورد کند. همان‌طور که در شکل ۲-۱۴ مشاهده می‌شود، 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 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 تمیز شده و سپس کاملاً خشک شده است.

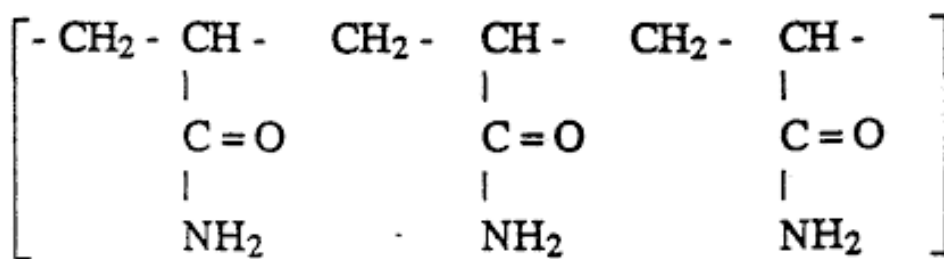
۲-۴- مواد مورد آزمایش

به منظور انجام مقایسه بین رفتار قطره‌ی مایعات نیوتنی و غیرنیوتنی در شرایط آزمایشگاهی یکسان، مایعات مختلفی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در این مطالعه از آب و گلیسرین به عنوان سیالات نیوتنی و از دو محلول پلیمری با غلظت‌های پایین که حاوی پلی‌آکریلامید هستند، به عنوان سیال غیرنیوتنی بهره برده شده است. همان‌طور که پیش از این 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 هر کدام از این خاصیت‌ها به‌طور جداگانه کار بسیار دشواری است. در نتیجه به منظور بررسی کامل اثرات الاستیک بر پدیده‌ی برخورد قطره با سطح جامد، باید اثرات لزجت را ثابت نگه داشت. با استفاده از باگرها 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^۱ اتفاق می‌افتد که دو نوع عمده آن تغلیظ^۲ و اضافه کردن^۳ می‌باشد. پلیمریزاسیون به روش اضافه کردن زمانی اتفاق می‌افتد که یک رادیکال آزاد به ماده اضافه شود. رادیکال آزاد به موادی که اتصالات دوتایی دارند حمله می‌کند تا تمام این اتصالات بشکنند و واکنش بین زنجیرهای پلیمری انجام شود. روش تغلیظ نیز به حالتی اطلاق می‌شود که دو مونومر در آب به هم متصل شوند.

پلیمریزاسیون رادیکال‌های آزاد مونومرهای آکریلامید در آب منجر به تولید پلی‌آکریلامید می‌گردد. در شکل ۲-۱۵ نمایی از پیوندهای مولکولی این ماده نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۵ نمایی از پیوندهای مولکولی پلی‌آکریلامید.

این ماده در دسته‌ی پرکاربردترین پلیمرها در صنایع مختلف است. در اکثر موارد کاربردهای پلی-آکریلامید، این ماده در یک ماده پایه آبی محلول است. این پلیمر به صورت پودری سفید رنگ و بی‌بو (شکل ۲-۱۶) موجود است که جرم‌های مولکولی 5×10^6 گرم بر مول و 20×10^6 در آزمایشگاه موجود می‌باشد. در این مطالعه از نمونه‌ی اول برای ساخت پلیمر استفاده شده است.

¹ polymerization

² condensation

³ Addition



شکل ۱۶-۲ حالت پودری پلیمر پلی آکریلامید.



شکل ۱۷-۲ مواد استفاده شده در ساخت محلول های پلیمری.

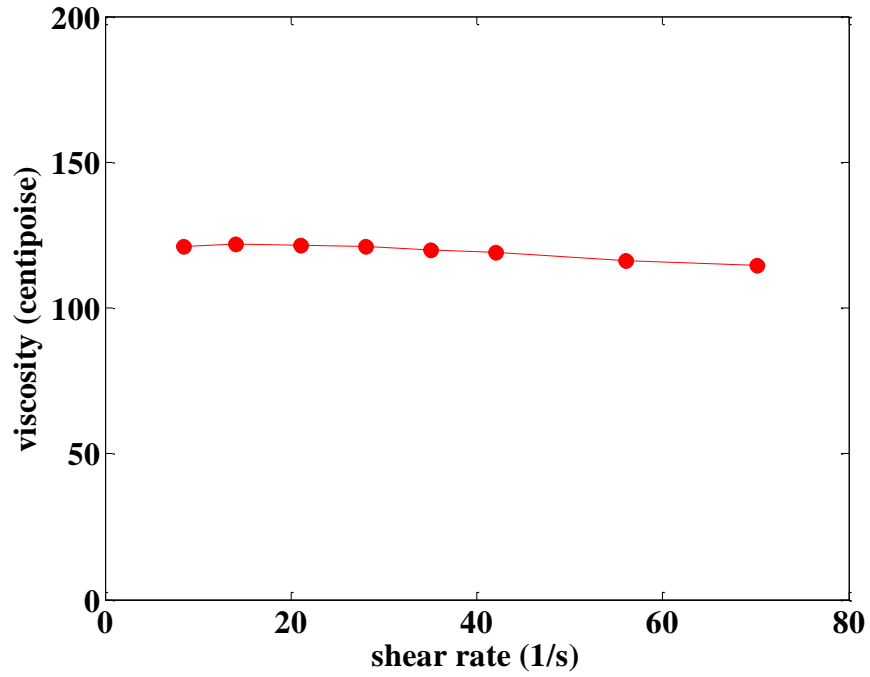
در تمام آزمایش‌ها، برای ساخت محلول پلیمری، ابتدا مقدار کمی از پودر پلی‌آکریلامید (به‌اندازه‌ی غلظت موردنظر) به آب مقطر افزوده می‌شود. پس از اطمینان از حل شدن کامل پودر پلیمر در آب و همگن بودن آن، به آرامی گلیسرین به آن اضافه می‌گردد. افزودن اندکی پلی‌آکریلامید به آب، موجب اندکی تغییر در لزجت و ایجاد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

۲-۴-۲- سیالات غیرنیوتنی منتخب برای آزمایش‌ها

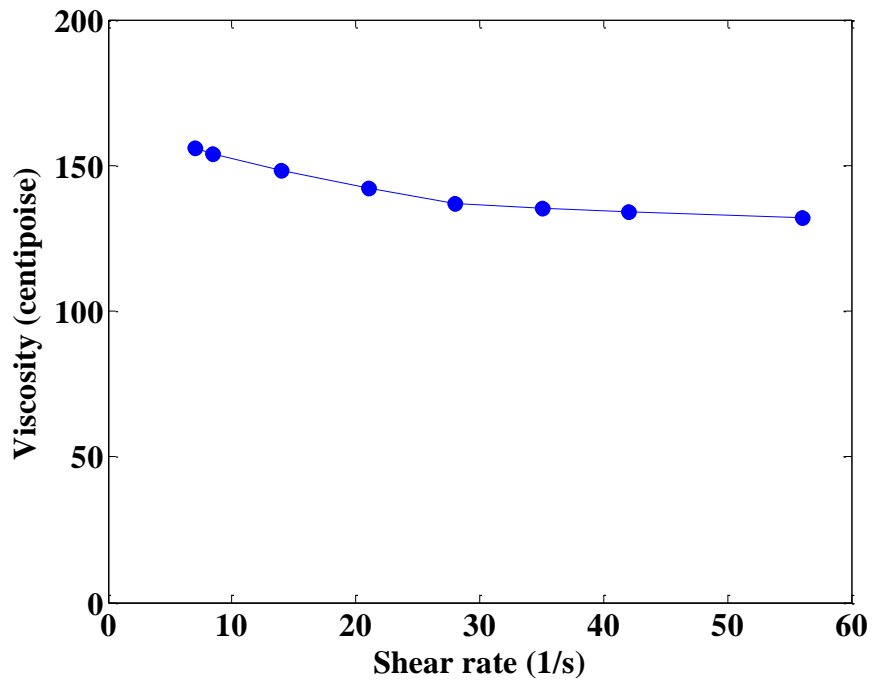
در این مطالعه قرار است که پدیده‌ی برخورد قطره روی سطح جامد در حضور اثرات ویسکوالاستیک با حالتی که سیالات نیوتنی هستند، مورد مقایسه قرار گیرد. در این راستا پلیمرهای زیادی با استفاده از مواد معرفی شده در قسمت قبل ساخته شده‌اند. در این میان پس از بررسی خواص نمونه‌ها و هم‌چنین توانایی آن‌ها در تولید قطره،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

نمونه پلیمری اول: این نمونه از ترکیب ۰.۰۵٪ جرمی پلی‌آکریلامید 5×10^6 گرم بر مول در

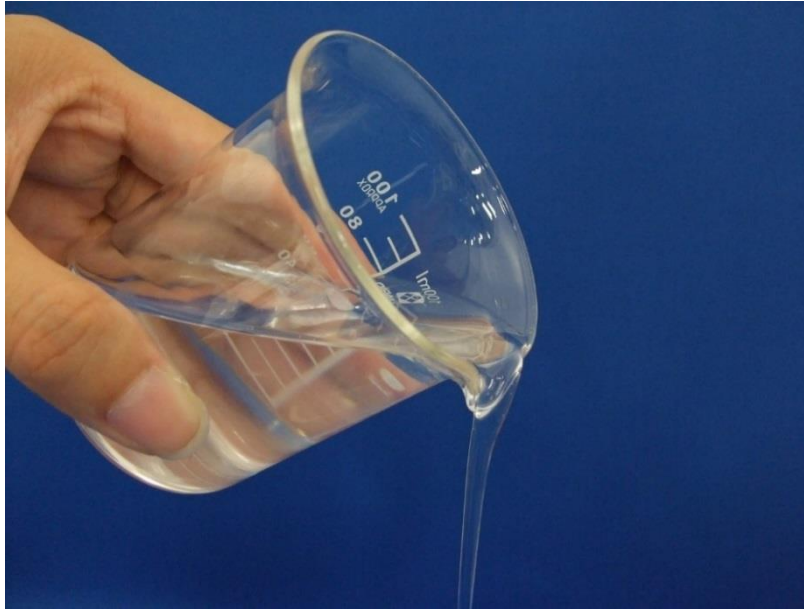
مخلوط آب و گلیسرین با نسبت ۲۰-۸۰ حجمی تشکیل شده است که به مدت ۱۸ ساعت در دمای 25°C بر روی همزن هات پلیت قرار داده شده است تا کاملاً همگن شود. در ادامه برای راحتی، این ترکیب تحت عنوان "PAM1" نام برده می‌شود. شکل ۲-۱۸ نتیجه‌ی آزمون لزجت برحسب نرخ برش این نمونه را نشان می‌دهد که توسط ویسکومتر موجود در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. لزجت معادل این نمونه ۱۱۹/۵ سانتی پواز در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۸-۲ نمودار لزجت برحسب نرخ برش برای نمونه پلیمری اول.



شکل ۱۹-۲ نمودار لزجت برحسب نرخ برش برای نمونه پلیمری دوم.



شکل ۲-۱۹ پلیمر PAM1 تهیه شده در آزمایشگاه.

نمونه پلیمری دوم: ساخت نمونه‌ی پلیمری دوم نیز کاملاً مشابه نمونه‌ی اول است با این تفاوت که در این نمونه از ترکیب ۰,۰۱٪ جرمی پلی‌آکریلامید 5×10^6 گرم بر مول با آب و گلیسرین با نسبت ۲۰-۸۰ حجمی استفاده شده است. از این پس این ترکیب نیز تحت عنوان "PAM2" نام برده می‌شود. شکل ۲-۱۸ نتیجه‌ی آزمون لزجت برحسب نرخ برش این نمونه را نشان می‌دهد. لزجت معادل این سیال ۱۴۲/۳ سانتی پواز می‌باشد.

۲-۴-۳- بررسی خاصیت الاستیک نمونه‌ها

هنگامی که یک سیال نیوتنی در یک ظرف به‌وسیله‌ی یک میله‌ی چرخان، هم زده می‌شود، سطح سیال در وسط ظرف پایین و در نزدیکی دیواره بالا می‌آید. این پدیده ناشی از اثر نیروی گریز از مرکز بوده و سبب تبدیل سطح آزاد سیال به سطحی مقعر با تقارن محوری می‌گردد.

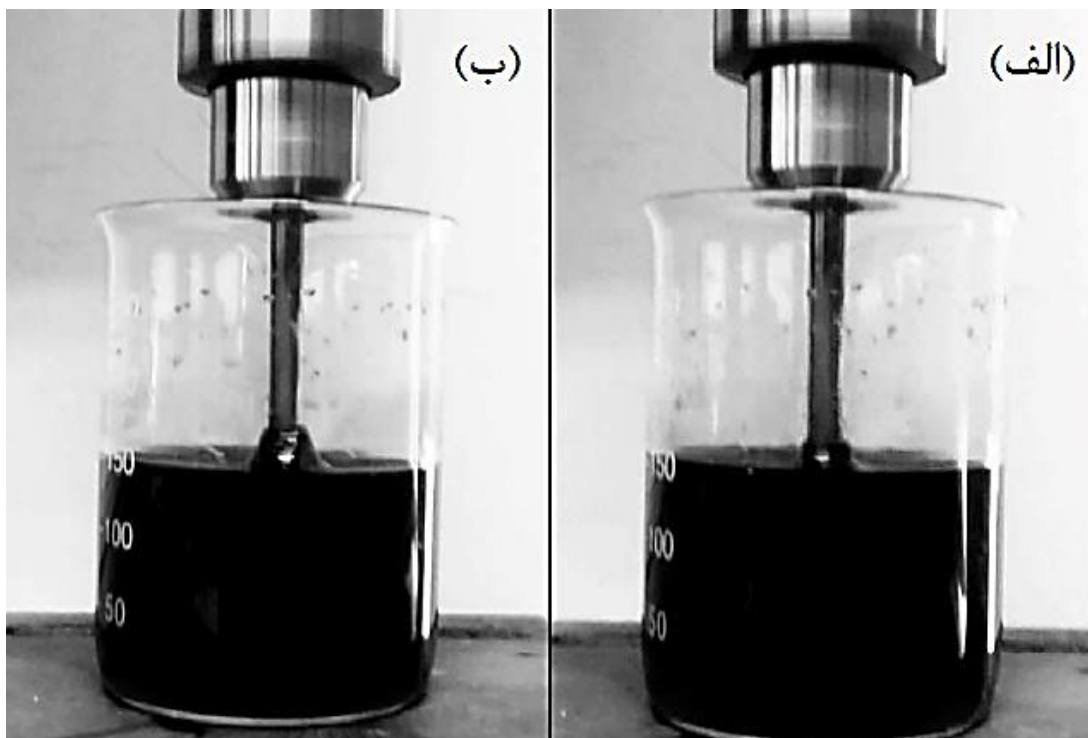
چنانچه این آزمایش با یک سیال ویسکوالاستیک تکرار شود، سطح جریان به شکل یک سطح محدب در می‌آید و اصطلاحاً گفته می‌شود که سیال تمایل به بالا رفتن از میله‌ی چرخان را دارد. این پدیده ناشی

از اختلاف تنش‌های نرمال اول در این مواد است. طبق مطالعات انجام شده، در این آزمایش مقدار $(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr})/r$ مقدار غیر صفر و مثبت است که می‌تواند به اثر نیروی گریز از مرکز چیره شود و رفتار متضادی را به نمایش بگذارد. این پدیده در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۰ بالاروندگی سیال ویسکوالاستیک.

به‌منظور اطمینان از نحوه‌ی ساخت پلیمرهای معرفی شده در قسمت ۲-۳-۲ و هم‌چنین مقایسه‌ی خواص ویسکوالاستیک آن‌ها، خاصیت بالاروندگی در مورد آن‌ها مورد آزمایش قرار داده شد. با مقایسه‌ی میزان بالاروندگی نمونه‌ها، معیاری از خاصیت الاستیک آن‌ها به دست می‌آید. بدین منظور از دریلی با سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. نمونه‌ها به ترتیب داخل بشر ریخته شده و زیر دریل قرار داده شده است. البته توجه داشته باشید که به جای مته از یک میله‌ی صاف به قطر ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است. شکل ۲-۲۱ نتایج حاصل از آزمایش را نشان می‌دهد. با کمک پردازش تصویر می‌توان میزان بالاروندگی هر نمونه را به دست آورد. میزان بالاروندگی هر کدام از پلیمرها در جدول ۲-۱ درج شده است.



شکل ۲-۲۱ پدیده بالاروندگی در سیالات منتخب: الف) PAM1 ب) PAM2.

جدول ۱-۲ میزان بالاروندگی نمونه‌های منتخب.

نمونه	میزان بالاروندگی (میلی‌متر)
PAM1	۲۵
PAM2	۱۰

۲-۴-۴- مشخصات مواد مورد آزمایش

جداول ۲-۲ و ۳-۲ خواص فیزیکی مواد را نشان می‌دهند. مقادیر از اندازه‌گیری مستقیم خواص توسط آزمایشگاه حاصل شده‌اند. به دلیل اهمیت کشش سطحی در آزمایش‌ها، مواد در این جداول بر اساس این خاصیت مرتب شده‌اند. منطقی است که جدول ۳-۲ شامل لزجت مایعات غیرنیوتنی نباشد.

جدول ۲-۲ خواص مایعات نیوتنی در دمای $T = 23 \pm 0.5^\circ$

گلیسرین	آب	
۶۳	۷۲	کشش سطحی $\sigma(\text{dynes/cm})$
۱۲۶۰	۹۹۷/۶	چگالی $\rho(\text{kg/m}^3)$
۱۴۹	۱	لزجت $\mu(\text{cP})$

جدول ۳-۲ خواص مایعات غیرنیوتنی در دمای $T = 23 \pm 0.5^\circ$

PAM2	PAM1	
۶۴/۲۷۲	۶۵/۳۷۳	کشش سطحی $\sigma(\text{dynes/cm})$
۱۲۰۸	۱۲۰۸	چگالی $\rho(\text{kg/m}^3)$

گستره‌ی رهایی از تنش، (λ_i, η_i) ها، به وسیله‌ی داده‌های آزمون سیال PAM1 و PAM2 (شکل ۲-۲) -
 ۲۲ و ۲۳-۲) در مد نویسانی بدست می‌آید. برای مدل‌سازی سیال PAM1 و PAM2 در مد نویسانی از مدل
 ماکسول استفاده شده است. در این مدل G' و G'' با روابط (۲-۲) و (۱-۲) تعریف می‌شوند:

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

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

روابط (۱-۲) و (۲-۲)، G' و G'' را به n مؤلفه تقسیم می‌کنند که هر مؤلفه با یک زمان رهایی از تنش
 λ_i و یک ضریب لزجت η_i مشخص می‌شود. مقدار n برای هر مد تا زمانی که به یک برآزش خوب برای
 داده‌ها برسیم افزایش می‌یابد. بدین منظور تابع f_{min} را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$f_{min} = \sum_{i=1}^m \left[\left(G'_{model}(\omega) - G'_{exp}(\omega) \right)^2 + \left(G''_{model}(\omega) - G''_{exp}(\omega) \right)^2 \right] \quad (3-2)$$

گستره‌ی رهایی از تنش، (λ_i, η_i) ها برای سیال PAM1 و PAM2 به ترتیب در جداول ۴-۲ و ۵-۲ آمده است.

حال با مشخص بودن مقدار (λ_i, η_i) ها می‌توان با استفاده از رابطه (۴-۲) مقدار زمان رهایی از تنش متناسب با نمونه‌های غیرنیوتنی PAM1 و PAM2 را محاسبه کرد.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} \quad (4-2)$$

با توجه به گستره‌ی رهایی از تنش، (λ_i, η_i) ها، زمان رهایی از تنش متوسط برای سیال PAM1 و PAM2 به ترتیب ۱۱/۹۰ و ۱۲/۹۶ ثانیه می‌باشد.

جدول ۴-۲. مقادیر λ_i و η_i برای سیال PAM1

λ_i	η_i	i
۰/۱۲۵۷	۰/۰۰۱۷	۱
۰/۹۴۱۵	۰/۰۰۱۹	۲
۳/۵۴۱۲	۰/۰۲۱۶	۳
۷/۵۳۸۱	۱	۴
۱۰/۶۰۹۵	۱/۰۰۲۶	۵
۱۰/۷۵۴۲	۱/۰۰۶۵	۶
۱۱/۸۲۹۷	۱/۰۰۷۳	۷
۱۵/۴۴۸۸	۲/۰۰۴۸	۸

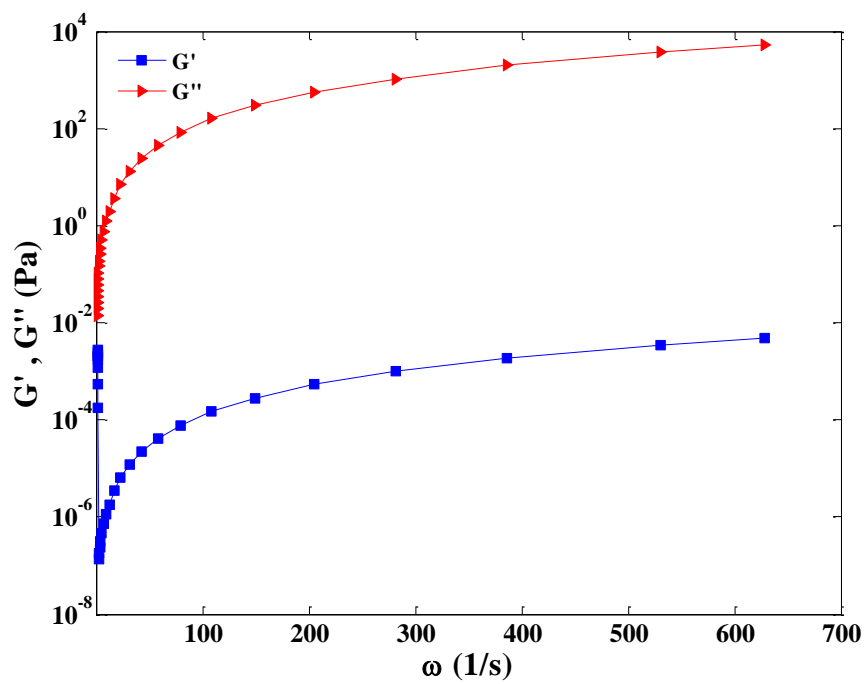
جدول ۵-۲. مقادیر λ_i و η_i برای سیال PAM2

λ_i	η_i	i
۷/۵۹۵۹	۰/۰۰۱۹	۱
۷/۹۷۶۴	۰/۰۰۶۵	۲
۹/۳۰۴۰	۰/۰۰۹۷	۳
۱۰/۶۳۳۴	۰/۰۱۵۶	۴
۱۰/۹۴۸۱	۰/۰۱۶۹	۵
۱۰/۹۷۳۵	۰/۰۲۶۲	۶
۱۲/۵۷۷۲	۱/۰۰۵	۷

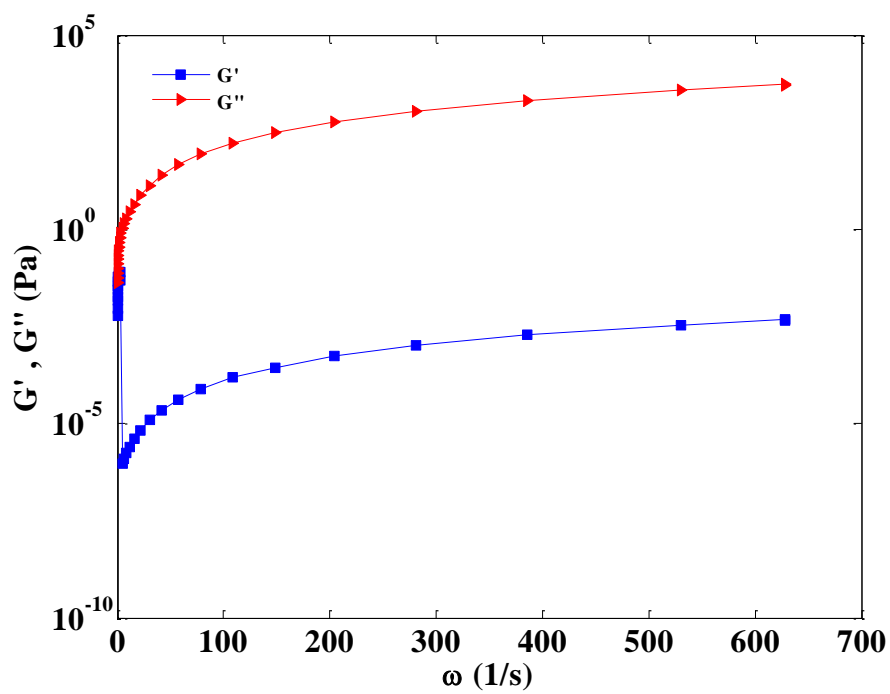
مقیاس زمان مشخصه برای یک ماده ویسکوالاستیک همان زمان رهایی از تنش است. این زمان برای

گازها و مایعات نیوتنی زمانی بسیار کوچک (کوچک‌تر از 10^{-6} تا 10^{-4} ثانیه) و برای جامدات الاستیک عدد بزرگی (بزرگ‌تر از ۱۰۰ ثانیه) می‌باشد. بنابراین زمان مشخصه برای یک سیال ویسکوالاستیک در حد وسط این محدوده می‌گنجد. از زمان رهایی از تنش برای بدست آوردن عدد وایزنبرگ^۱ استفاده می‌شود. عدد 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 (۵-۲) متداول‌ترین شکل بیان آن می‌باشد. بنابراین در یک سیال به‌خصوص، بالا بودن عدد وایزنبرگ به معنای غیرنیوتنی بودن این سیال است.

$$Wi = \lambda \quad (۵-۲)$$



شکل ۲۲-۲ نمودار G' و G'' برحسب فرکانس زاویه‌ای برای سیال PAM1



شکل ۲۳-۲ نمودار G' و G'' برحسب فرکانس زاویه‌ای برای سیال PAM2

فصل سوم

تحليل نتايج آزمايشگاهي بر خورد قطره

روي سطح جامد

۳-۱- مقدمه

در این فصل به بحث و بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها انجام شده در زمینه‌ی برخورد قطره‌ی سیالات مختلف نیوتنی و غیرنیوتنی بر روی سطح جامد پرداخته می‌شود. اگرچه سیستم‌های کاربردی در عمل با گروهی از قطرات سرو کار دارند، مطالعه یک قطره منفرد بستری مناسب برای بررسی و مطالعه پارامترهای تاثیرگذار بر بازده و عملکرد چنین سیستم‌هایی را فراهم می‌کند.

در این فصل پارامترهای مختلفی برای هر قطره مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پارامترها عبارتند از: (۱) زاویه تماس استاتیکی (θ_s)، (۲) قطر اولیه قطره (D_0)، (۳) حجم قطره (V)، (۴) سرعت حد (U_t)، (۵) سرعت قطره در لحظه‌ی برخورد با سطح (U_0)، (۶) اعداد وبر و رینولدز و وایزنبرگ و (۷) تغییرات ضریب پخش^۱ $\beta = D/D_0$ و ارتفاع بی‌بعد شده $\xi = h/D_0$ بر حسب زمان. تمامی اطلاعات مورد استفاده، از پردازش تصاویر مربوط به حرکت قطرات حاصل شده‌اند. بنابراین قبل از ارائه نتایج، اشاره‌ای به موضوع پردازش تصویر و معرفی نرم‌افزارهای پردازش تصویر استفاده شده در این تحقیق خواهد شد. هدف از انجام مطالعه حاضر، بررسی رفتار قطره‌ی سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی (باگرها) به هنگام پخش شدن و جمع شدن روی یک سطح صاف، خشک و جامد و مقایسه‌ی رفتار این قطرات با یکدیگر می‌باشد. در پایان نیز درباره‌ی نقش خواص قطرات، سرعت برخورد و ویژگی‌های سطح در نتایج به‌دست آمده بحث می‌شود.

۳-۲- مقدمه‌ای بر پردازش تصویر

اگر کمی در تاریخ مطالعه کنیم در می‌یابیم 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 اشکال برای همدیگر بیان می‌کردند. بسیاری از وقایع تاریخی و باستانی نیز از روی تصاویر حک شده در دیواره غارها و عمارت‌های قدیمی ثبت شده‌اند. حتی علوم طبیعی نیز از تصاویر بهره زیادی برده‌اند که

¹ Spreading factor

نمونه آن 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 به عنوان یک سیگنال دو بعدی 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 برداشته شده با دوربین دیجیتال یا پوشش شده توسط پوششگر هستند، سر و کار دارد. پردازش تصاویر، دارای دو شاخه عمده بهبود تصاویر و بینایی ماشین است. بهبود تصاویر، در برگیرنده روش‌هایی چون استفاده از فیلتر محوکننده و افزایش تضاد برای بهتر کردن کیفیت دیداری تصاویر و اطمینان از نمایش درست آن‌ها در محیط مقصد (مانند چاپگر یا نمایشگر رایانه) است؛ درحالی که بینایی ماشین به روش‌هایی می‌پردازد که به کمک آن‌ها می‌توان معنی و محتوای تصاویر را درک کرد تا از آن‌ها در کارهایی چون رباتیک و محور تصاویر استفاده کرد. یک تصویر دیجیتال تصویری است که از تعداد زیادی مربعات کوچک (پیکسل^۱) تشکیل شده است. هر پیکسل دارای یک شماره رقمی^۲ می‌باشد که بیانگر میزان روشنایی آن پیکسل است. هنگامی که داده‌ها به فرمت

^۱ Pixel

^۲ Digital Number

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. هم-چنین 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 در نهایت 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 پیش پردازش‌ها و انجام پردازش خاص، استخراج ویژگی مورد نیاز برای رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده می‌باشد.

۳-۲-۱- کاربردهای پردازش تصویر

پردازش تصویر از سال ۱۹۶۴ تاکنون رشد فراوانی یافته است. تقریباً همه روزه شاهد ظهور زمینه‌های کاربردی جدیدی برای علم پردازش تصاویر رقومی هستیم. نقطه‌ی آغازین این علم، اکتشافات فضایی است که با هدایت محققین و تکنیسین‌های موسسه‌ی ملی هوا و فضایی آمریکا^۱ 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 هدایت شونده 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

^۱ NASA

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 علم پردازش تصویر بهره برده‌اند. 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 (چند تصویر از یک منطقه که با بسامدهای مختلف، از یک منطقه اخذ شده‌اند) را می‌توان در اکتشافات نفت و معادن به کار برد، هم‌چنین تصاویر کف اقیانوس‌ها را می‌توان با استفاده از سنجنده‌های رادار فضایی به دست آورد و نقشه‌های آن را به دست آورد، 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 منظوره‌های 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 غیر-نیوتنی، 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.

۳-۲-۲- مراحل انجام پردازش تصویر

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

الف - دریافت تصویر ورودی

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

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 کاربر موردنظر خود استفاده کرد. شناسایی نقاط ویژه و انحنای، طبقه‌بندی یا تشخیص اشیاء مختلف از جمله عملیات تشخیص لبه و بخش‌بندی تصاویر، ویژگی‌هایی هستند که در سیستم تشخیص اثر انگشت می‌توانند استخراج گردند. ویژگی این پردازش این است که ورودی آن معمولاً تصویر و خروجی آن صفاتی از اشیاء تصویر مانند لبه‌ها، کانتورها و تشخیص اشیاء است.

د - پردازش تصویر (پردازش سطح بالا)

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

۳-۲-۳- پردازش تصاویر رنگی

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

الف- تصاویر باینری^۱ (دودویی)

در این تصاویر هر پیکسل دارای دو رنگ سیاه و سفید است. از آنجاکه هر پیکسل دارای دو مقدار ممکن است، برای نمایش هر پیکسل نیاز به تنها یک بیت داریم. این‌گونه تصاویر را به‌راحتی می‌توان ذخیره نمود.

تصاویری که بصورت باینری نمایش داده می‌شوند، اغلب شامل نوشته‌ها، اثر انگشت‌ها و یا نقشه‌های مهندسی هستند.

ب- تصاویر با درجات خاکستری

هر پیکسل در این تصاویر دارای یک درجه (سایه) خاکستری است که به‌طور معمول از صفر (سیاه) شروع شده و تا ۲۲۵ (سفید) ادامه می‌یابد. این دامنه از اعداد را می‌توان در ۸ بیت ذخیره نمود. این دامنه برای دست‌کاری یک فایل تصویری بسیار مناسب است. از دیگر دامنه‌ها نیز گاهی استفاده می‌شود. اما معمولاً این دامنه‌ها بصورت توانی از دو بیان می‌شوند. برخی تصاویر به‌دست آمده از پزشکی، تصاویر مربوط به کارهای چاپی و دیگر تصاویر با داشتن ۲۵۶ اختلاف در درجات خاکستری برای شناسایی طیف وسیعی از اشیا کافی هستند.

ج- تصاویر رنگی

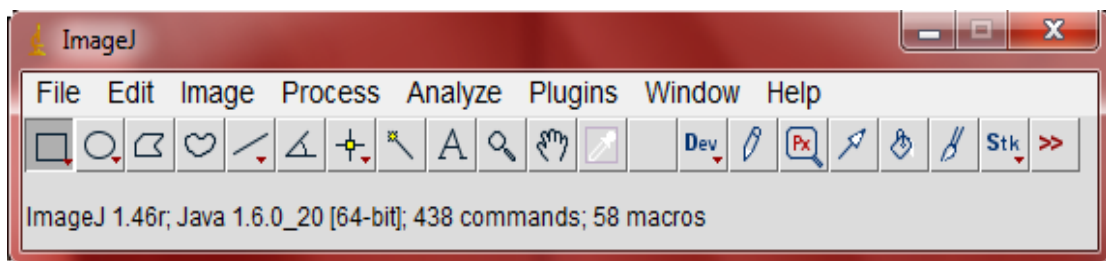
در رایج‌ترین مدل رنگ گرافیک کامپیوتری، رنگ‌ها از ترکیب سه رنگ قرمز، سبز و آبی به وجود می‌آیند که در مجموع ۱۶۵۸۱۳۷۵ رنگ متفاوت توسط این سه مؤلفه می‌توان تولید کرد. این مدل رنگ در گرافیک کامپیوتری با نام RGB شناخته می‌شود. در کنار مدل رنگ RGB مدل‌های دیگری همچون

¹ Binary

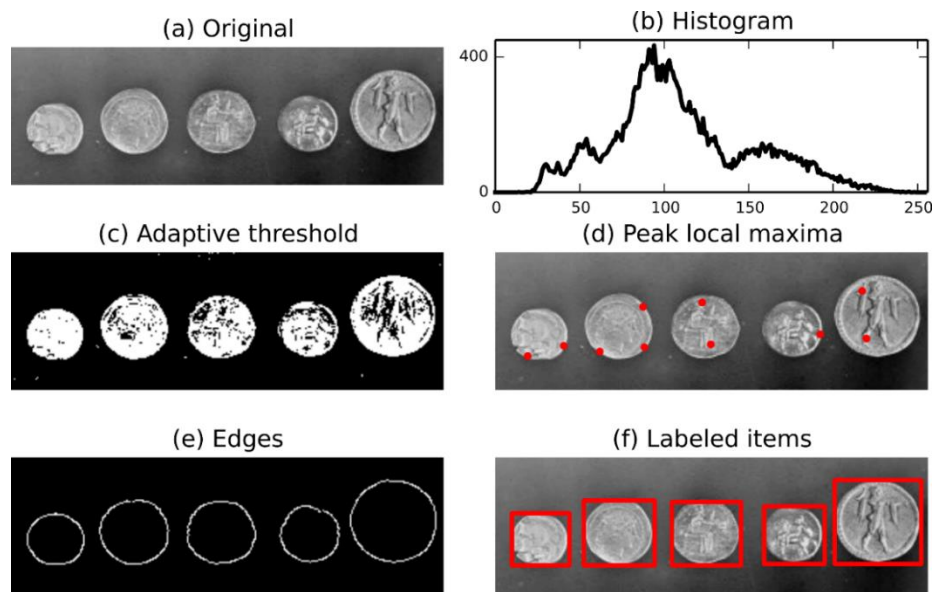
CMYK, HSI, HSV و غیره نیز وجود دارند که هر یک از آن‌ها به روش متفاوتی به نمایش رنگ‌ها می‌پردازند. استفاده از رنگ در پردازش تصویر، ناشی از دو عامل است. اولاً، رنگ توصیفگر قدرتمندی است که غالباً شناسایی و استخراج اشیا را از صحنه آسان می‌سازد. ثانیاً، انسان می‌تواند در مقایسه با فقط ۲۴ سایه خاکستری، هزاران سایه رنگ و شدت را تشخیص دهد. این عامل دوم، مخصوصاً در تحلیل تصویر دستی (یعنی وقتی که توسط انسان انجام می‌گیرد) مهم است.

۳-۲-۴ - معرفی نرم‌افزار ImageJ

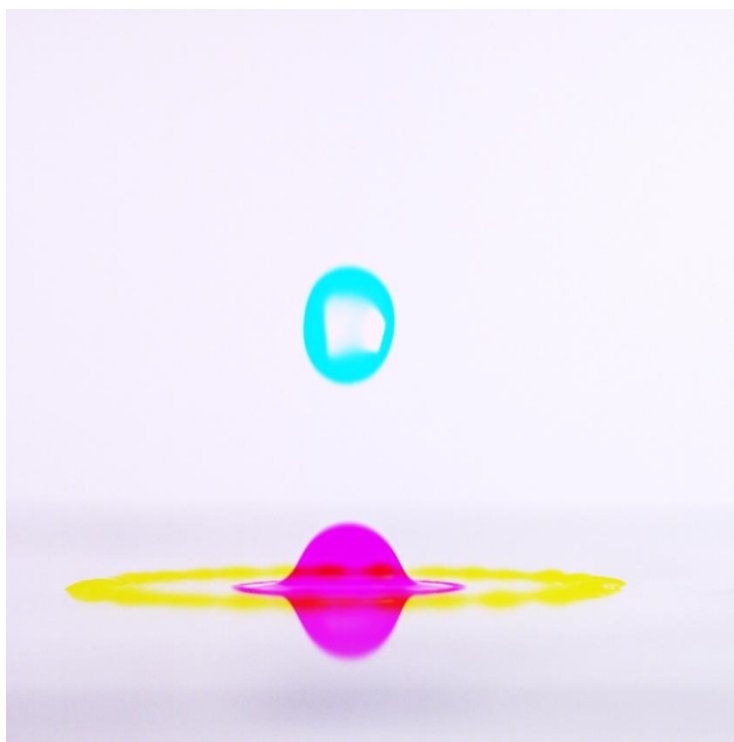
نرم‌افزار ImageJ یک برنامه قدرتمند برای پردازش تصاویر است. این نرم‌افزار به راحتی در دسترس می‌باشد و بر روی سیستم‌های عامل مختلف کار می‌کند.



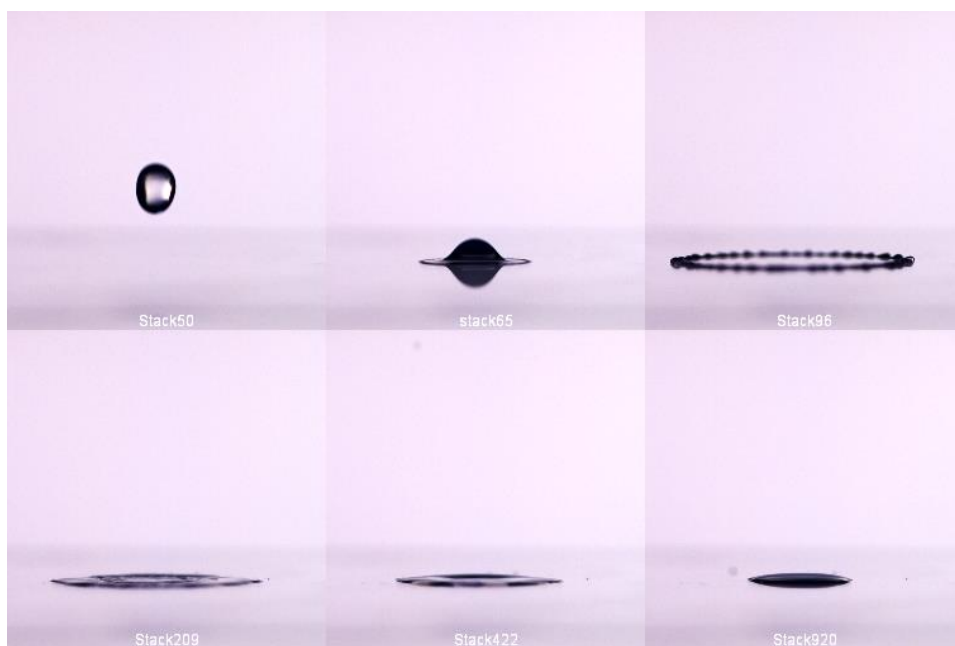
شکل ۳-۱ نمای کلی نرم‌افزار ImageJ.



شکل ۳-۲ نمونه‌ای از پردازش‌های صورت گرفته بر روی تصویر چند سکه قدیمی در نرم‌افزار ImageJ.



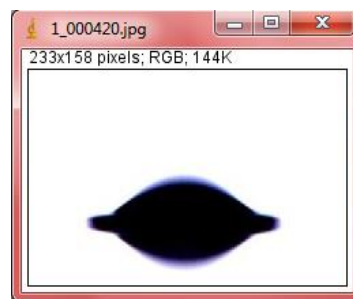
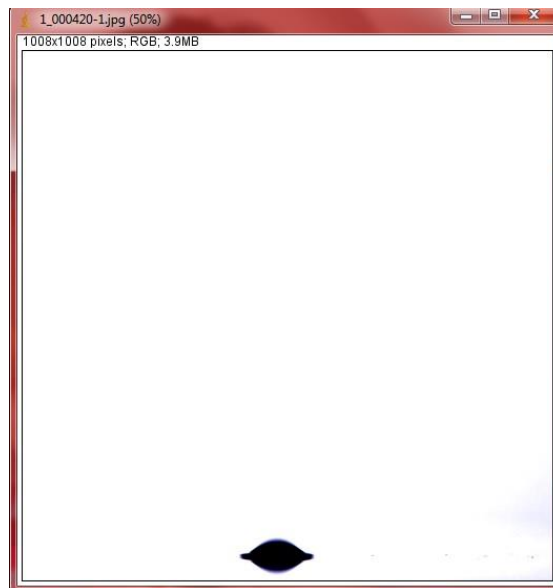
شکل ۳-۳ قابلیت ادغام کردن تصاویر در نرم افزار ImageJ.



شکل ۳-۴ قابلیت مونتاژ کردن تصاویر توسط نرم افزار ImageJ که استفاده از آن در ارائه‌ی نتایج برای مثال در مقالات بسیار متداول است.

با آن که ImageJ یکی از نرم‌افزارهای تخصصی مهندسی مواد و متالوژی محسوب می‌شود اما در سال‌های اخیر کاربرد وسیعی در علوم مختلف از جمله مهندسی مکانیک پیدا کرده است. یکی از نکات قابل توجه در مورد این نرم‌افزار این است که هر کاربر به راحتی می‌تواند آن را ارتقا دهد و یا از پلاگین‌های ارائه شده توسط سایر کاربرها استفاده نماید. در شکل‌های ۱-۳، ۲-۳، ۳-۳ و ۴-۳ به ترتیب نمایی از برنامه و نمونه‌هایی از توانایی‌های ImageJ نمایش داده شده است.

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 سریع‌تر و با سهولت بیشتری صورت گیرد.



شکل ۳-۵ نمونه‌ای از تصاویر برخورد قطره PAMI بر روی سطح، قبل و بعد از استفاده از دستور crop.

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

گام اول:

پس از فراخوانی تصاویر در برنامه، همان‌طور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه جهت انجام پردازش تصویر برای هر ماده از ۲۲۵۰ تصویر استفاده شده است، برای کاهش حجم تصاویر و سرعت بخشیدن به فرایند پردازش تصویر، با استفاده از دستور crop بخشی از تصاویر که تأثیری بر نتایج ندارند، حذف شده‌اند.

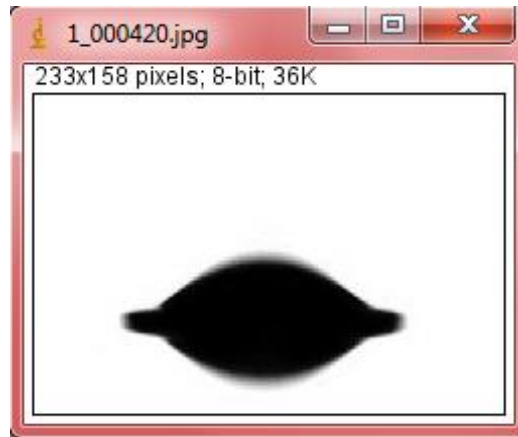
گام دوم:

در این گام تصاویر RGB را با استفاده از منوی Image، زیر منوی Type، به عکس 8-bit (شکل ۳-۶) تبدیل می‌گردند. لازم به ذکر است که انجام این تبدیل لازمه اجرای گام بعد می‌باشد و مرحله بعد بر روی تصاویر RGB قابل اجرا نیست.

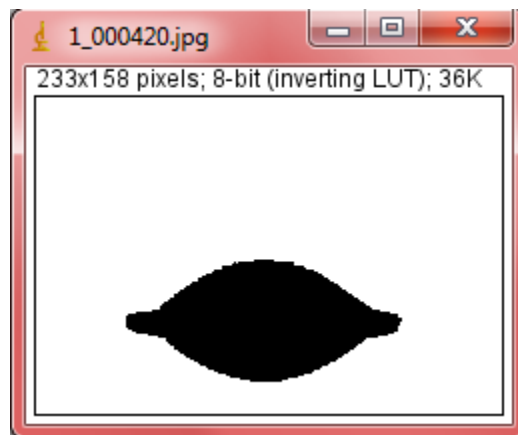
گام سوم:

در این قسمت نیز می‌توان با کمک منوی Process، عملیات مختلفی از جمله از بین بردن یا اضافه کردن نویزها، حذف کردن سایه‌ها، اعمال انواع فیلترها، باینری کردن تصویر (شکل ۳-۷)، پیدا کردن لبه‌های قطره (شکل ۳-۸) و هموار ساختن لبه‌ها غیره را اعمال نمود.

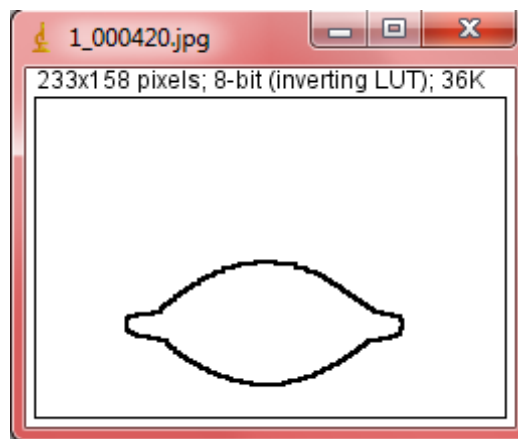
حال تصاویر آماده‌ی پردازش نهایی هستند و می‌توان اطلاعات موردنیاز را از آن‌ها استخراج کرد. جهت استخراج داده‌های نهایی و تبدیل آن‌ها به داده‌های قابل استفاده در رسم نمودار از برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب بهره برده شده است. این برنامه با محیط کردن مستطیلی به اطراف قطره قادر است اطلاعاتی شامل قطر عمودی و افقی قطره، فاصله آن از بالای تصویر و سمت چپ تصویر را در اختیار ما قرار دهد.



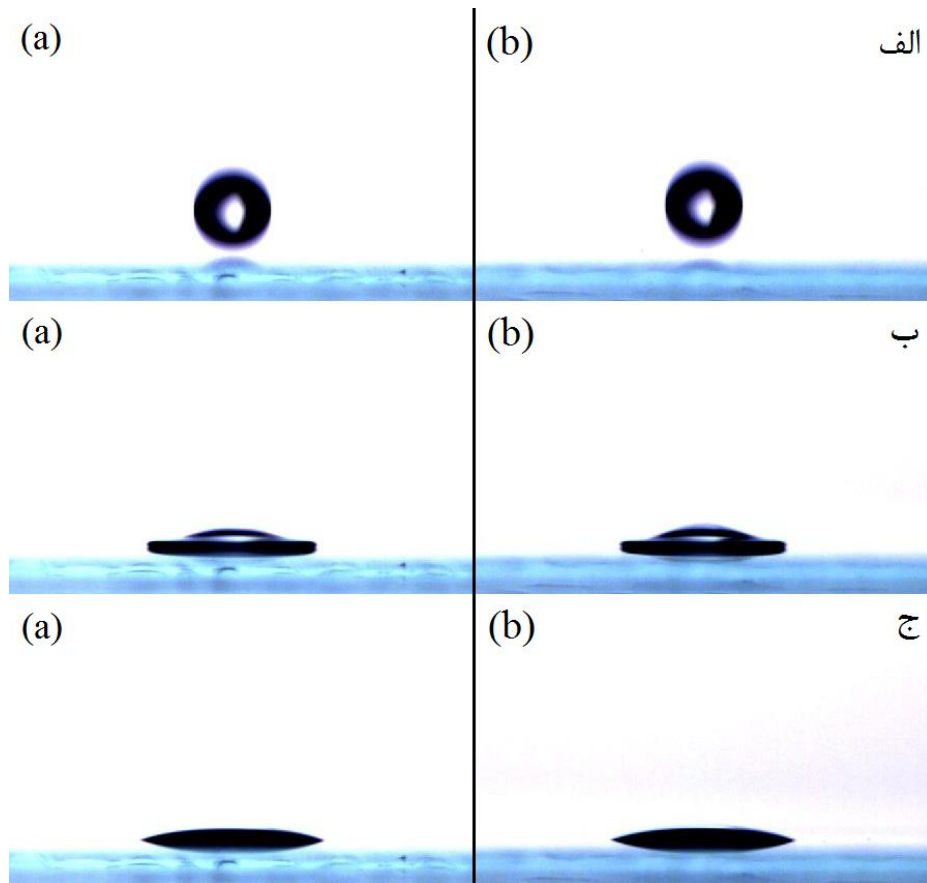
شکل ۳-۶ تبدیل تصویر RGB قطره PAM1 به یک عکس 8-bit.



شکل ۳-۷ تصویر قطره PAM1 پس از اعمال دستور Make Binary.



شکل ۳-۸ تصویر قطره PAM1 پس از اعمال دستور Find Edges.



شکل ۹-۳ آزمون تکرارپذیری. (a) برخورد قطره PAM2 با سطح شیشه در سرعت ۴,۲۲ متر بر ثانیه (b) تکرار آزمایش. (الف) لحظه‌ای قبل از برخورد (ب) لحظه $t = 0.8ms$ (ج) لحظه $t = 114.2ms$.

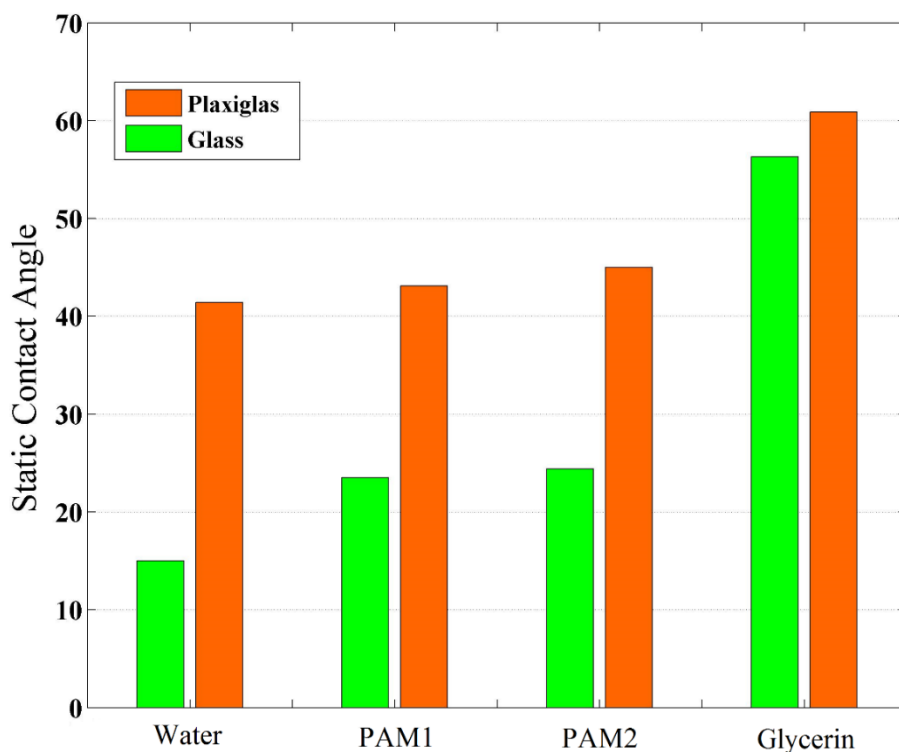
۳-۳- تکرارپذیری آزمایش

دقت به دست آمده در آزمایش‌ها، تحت شرایط یکسان، با روش‌ها و تجهیزات یکسان می‌باشد که تمامی آن‌ها توسط یک اپراتور بر روی نمونه‌های معادل به دست آمده است. با تعریف فوق، یک آزمایش در شرایط یکسان و با نمونه‌های یکسان تکرار شده است و نتایج در قالب شکل ۹-۳ و در لحظاتی یکسان ارائه شده است. همان‌طور که در تصاویر موجود در شکل ۹-۳ مشاهده می‌شود، پارامترهای مهم از قبیل قطر قطره

قبل از برخورد، میزان گسترش و جمع شدن قطره با گذشت زمان و ارتفاع قطره برای این آزمایش در هر دو حالت یکسان می‌باشد.

۴-۳- مشاهدات آزمایشگاهی

۴-۳-۱- زاویه تماس استاتیکی



شکل ۳-۱ زاویه تماس استاتیکی آب، PAM1، PAM2 و گلیسیرین بر روی سطح پلکسی گلاس و شیشه

همان‌طور که در شکل ۳-۱ دیده می‌شود، مقادیر زاویه تماس استاتیکی برای آب، PAM1، PAM2 و گلیسیرین بر روی سطح پلکسی گلاس و شیشه به کمک نرم‌افزار Measure اندازه‌گیری شده است. میانگین θ_s بر روی پلکسی گلاس $47/6^\circ$ و بر روی شیشه $29/7^\circ$ می‌باشد.

۳-۴-۲- قطر اولیه‌ی 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 $D_0 = \sqrt[3]{d_h^2 d_v}$ [۶۲] قطر مربوط به هر قطره محاسبه می‌گردد (جدول ۳-۱).

در این رابطه d_h و d_v به ترتیب قطر افقی و عمودی قطره می‌باشند.

جدول ۳-۱ مقادیر به دست آمده از پردازش تصویر برای قطر اولیه قطرات.

PAM2	PAM1	گلیسرین	آب	قطر اولیه D_0 (mm)
۲/۹۶	۲/۹۷	۲/۹۱	۳/۳۸	

۳-۴-۳- حجم قطرات

با توجه به نتایج قسمت قبل، حجم قطرات نیز با توجه به کرووی شکل بودن آن‌ها به راحتی از رابطه حجم

کره به دست می‌آید. در تحقیق حاضر، حجم قطرات از این جهت حائز اهمیت است که در به دست آوردن

سرعت حد مورد نیاز می‌باشد. جدول ۳-۲ بیشترین حجم بدست آمده برای قطره سیالات منتخب در این

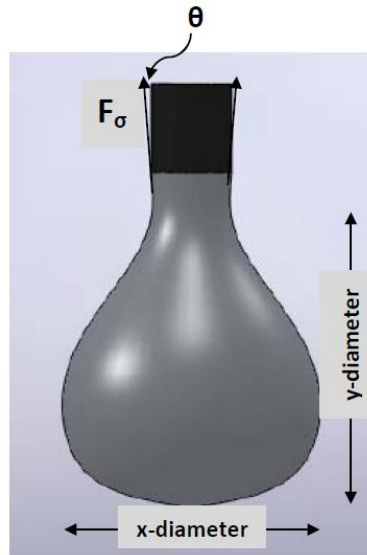
پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۲ مقادیر آزمایشگاهی برای حجم قطره آب، گلیسرین، PAM1 و PAM2

PAM2	PAM1	گلیسرین	آب	حجم آزمایشگاهی (mm^3) $V_{max} = \frac{\pi}{6} D_{max}^3$
۱۴	۱۴/۱۳	۱۳/۴۴	۲۰/۶	

شکل ۳-۱۱ تصویر قطره را در حال خروج از نوک سوزن نشان می‌دهد. در واقع قطره تا جایی که

کشش سطحی دیگر نتواند وزن آن را متعادل کند، شروع به بزرگ شدن می‌کند.



شکل ۳-۱۱ قطره در حال خروج از سرسوزن.

۳-۴-۴- سرعت حد

سرعت حد بالاترین سرعتی است که یک شیء به هنگام سقوط در هوا قادر است به آن دست یابد. این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که مجموع نیروی پسا و نیروی شناوری با نیروی ناشی از گرانش برابر شود. البته به دلیل اختلاف زیاد چگالی هوا با سیالات مورد مطالعه می‌توان از نیروی شناوری صرف‌نظر کرد (شکل ۳-۱۲). هدف از محاسبه‌ی سرعت حد، اطمینان از این موضوع است که قطره تا زمان برخورد با سطح به سرعت حد نمی‌رسد. با برقراری یک رابطه‌ی تعادلی ساده بین نیروهای وارد بر قطره داریم:

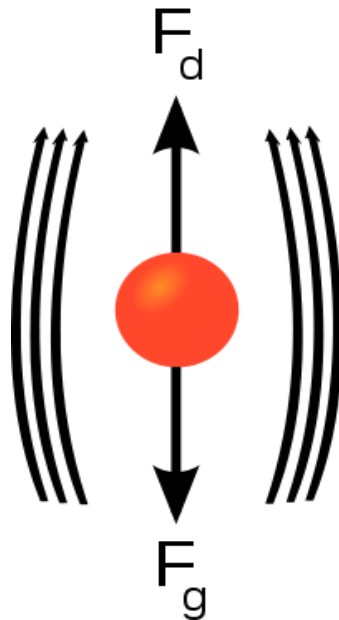
$$F = F_d - F_g \quad (۳-۳)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_{air} C_d U^2 A \quad (۴-۳)$$

$$F_g = mg = \rho_d V g \quad (۵-۳)$$

$$U_t = \sqrt{\frac{4 \rho_d D_0 g}{3 \rho_{air} C_d}} \quad (۶-۳)$$

در این روابط F برآیند نیروهای وارد بر قطره، F_d نیروی پسا، F_g نیروی گرانش، ρ_{air} چگالی هوا، C_d ضریب پسا، U سرعت قطره، A سطحی از قطره که در مقابل جریان قرار دارد، m جرم قطره، g شتاب گرانش، ρ_d چگالی قطره، V حجم قطره و U_t سرعت حد آن می‌باشد.



شکل ۳-۱۲ نیروهای وارد بر قطره در حال سقوط در هوا.

جدول ۳-۳ مقادیر سرعت حد به دست آمده از رابطه ۳-۶.

PAM2	PAM1	گلیسرین	آب	سرعت حد U_t (m/s)
۹/۰۱	۹/۰۲	۹/۱۲	۸/۷۶	

۳-۴-۵- سرعت قطرات در لحظه‌ی برخورد با سطح

در تمامی آزمایش‌ها، قطره از ارتفاع $H_1 = 83$ و $H_2 = 91$ 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.

چنانچه نتایج به دست آمده برای سرعت برخورد با مقادیر سرعت حد مقایسه شود، از آنجاکه سرعت برخورد تمام قطرات کوچک تر از سرعت حد مربوط به آن هاست، بنابراین هیچ کدام از قطرات به سرعت حد نرسیدند که این موضوع به ویژگی های لزجت و چگالی پایین هوا مربوط می شود.

جدول ۳-۴ مقادیر آزمایشگاهی سرعت برخورد برای قطرات در ارتفاع ۸۳ و ۹۱ سانتی متری.

PAM2	PAM1	گلیسرین	آب	
۴/۰۲۶	۴/۰۲۶	۴/۰۲۶	۴/۰۲۵	سرعت برخورد (m/s) $U_0 = \sqrt{2g(H_1 - D_0)}$
۴/۲۱۶	۴/۲۱۶	۴/۲۱۷	۴/۲۱۵	سرعت برخورد (m/s) $U_0 = \sqrt{2g(H_2 - D_0)}$

۳-۴-۶- اعداد بی بعد رینولدز، وبر و وایزنبرگ

در این قسمت مقادیر اعداد بی بعد رینولدز و وبر برای تمام مواد منتخب در این تحقیق و عدد وایزنبرگ برای مواد غیرنیوتنی در دو سرعت ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه محاسبه شده است.

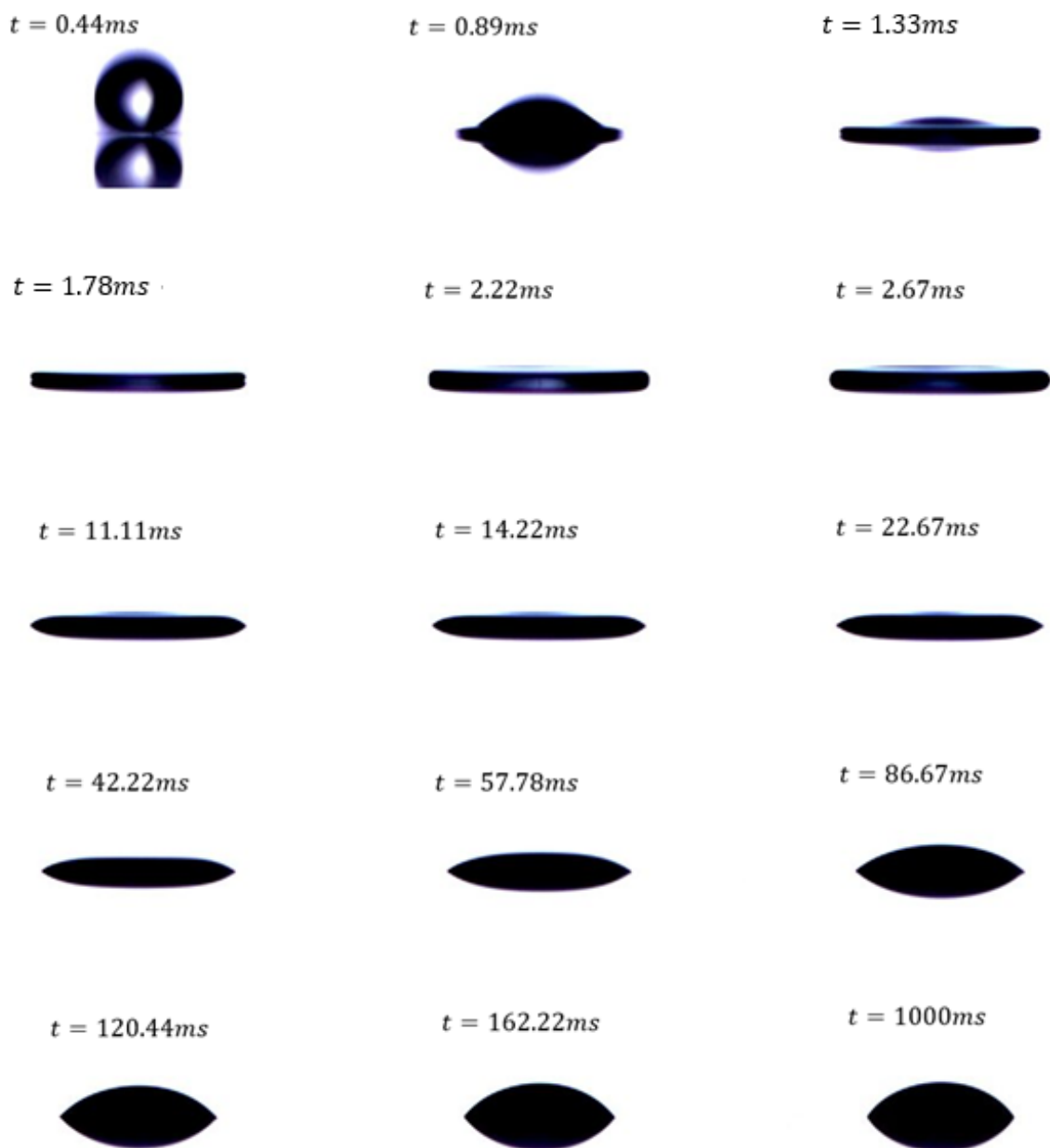
جدول ۳-۵ مقادیر رینولدز، وبر و وایزنبرگ برای قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی منتخب در دو سرعت ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه.

PAM2	PAM1	گلیسرین	آب	
۱۰۱/۳	۱۲۱	۱۴۷۶۰	۱۳۶۳۴/۷	Re_1
۹۰۴/۱۵	۸۹۱/۱۴	۹۴۴/۲	۷۶۳/۲	We_1
۱۰۶/۱	۱۲۶/۷	۱۵۴۵۶/۶	۱۴۲۷۷/۵	Re_2
۹۹۱/۴۱	۹۷۷/۱۵	۱۰۳۵/۳	۸۳۶/۸	We_2
۱۷۶۲۳/۲۷	۱۶۱۳۴/۰۹	-	-	Wi_1
۱۸۴۵۴/۹۷	۱۶۸۹۵/۵۱	-	-	Wi_2

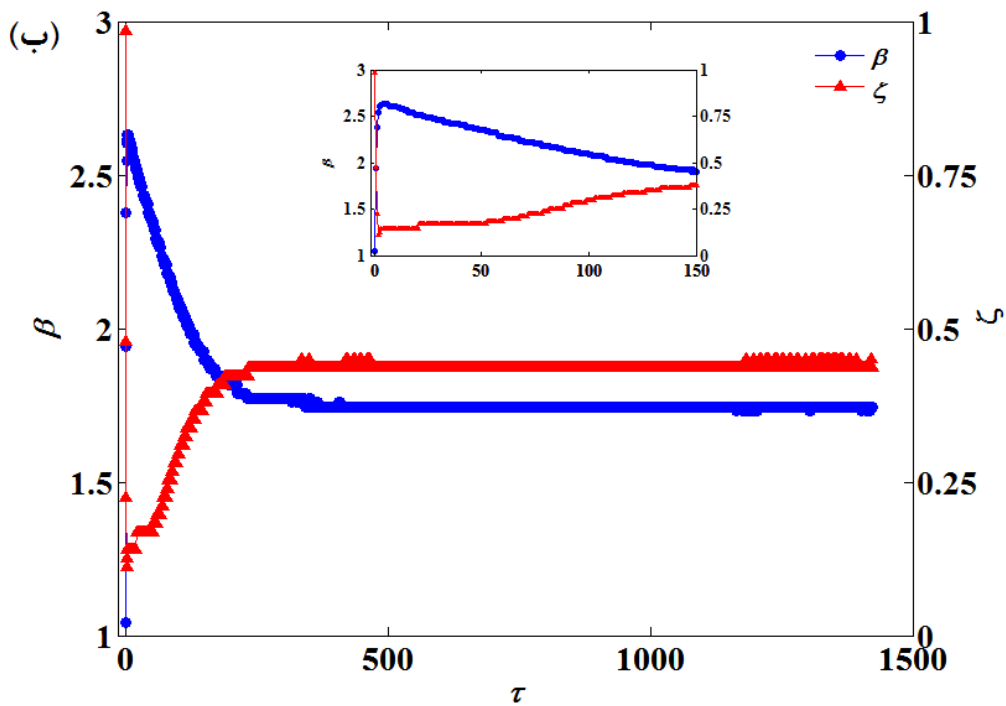
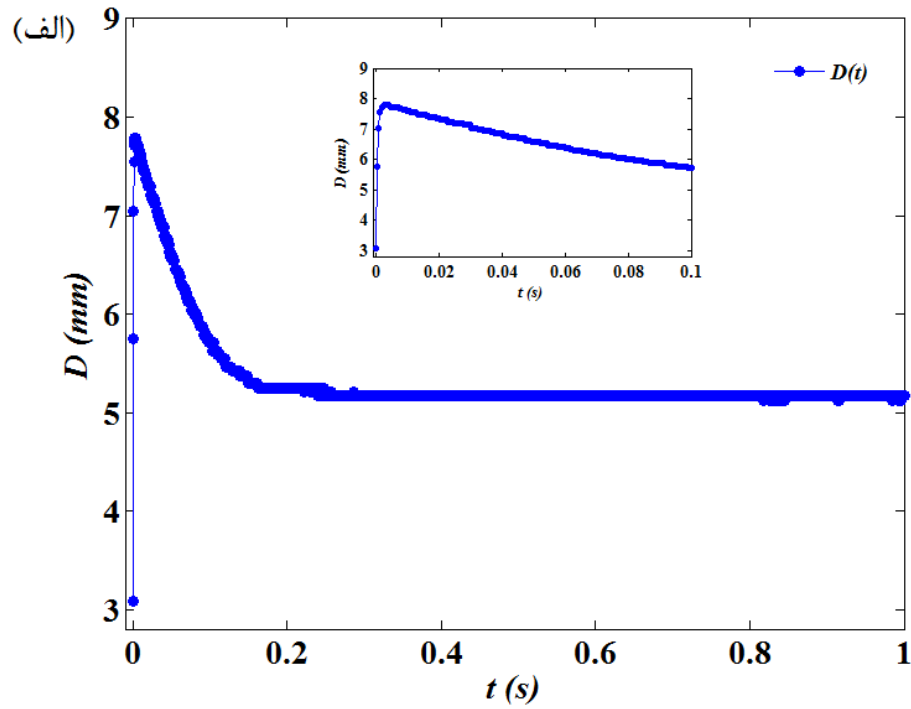
در جدول ۳-۵، مقادیر We_1 ، Re_1 و Wi_1 مربوط به سرعت $4/0.3$ متر بر ثانیه می‌باشد و We_2 ، Re_2 و Wi_2 مقدار و بر و رینولدز را در سرعت $4/22$ متر بر ثانیه نشان می‌دهد.

۳-۴-۷- مشاهدات آزمایشگاهی مربوط به قطره سیال غیرنیوتنی PAM2

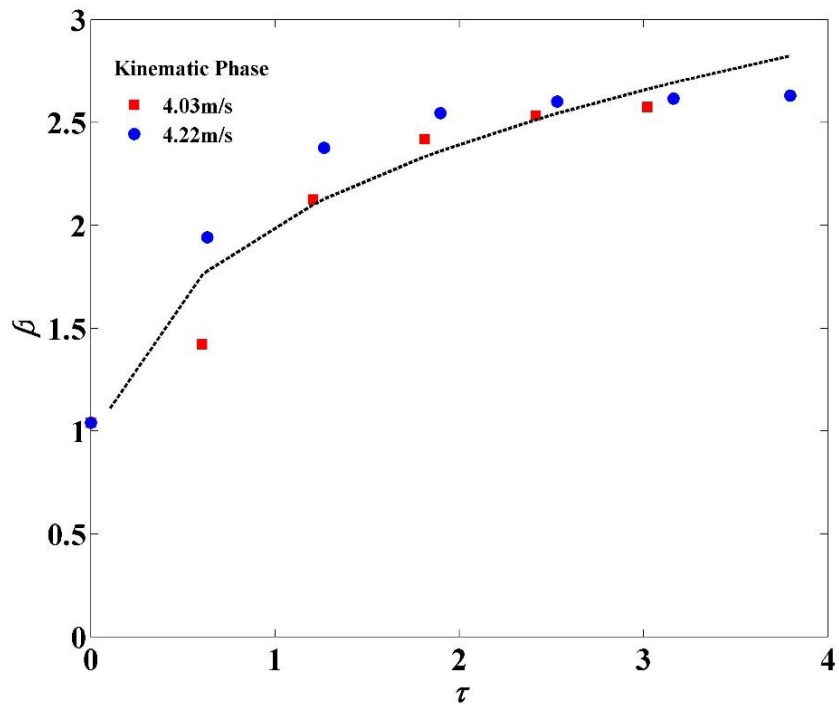
در این بخش نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی مایعات غیرنیوتنی گزارش و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا به سراغ قطره حاصل از سیال غیرنیوتنی PAM2 رفته‌ایم. قطره PAM2 با قطر $2/96$ میلی‌متر و سرعت $4/22$ متر بر ثانیه روی سطح پلکسی‌گلاس (یک سطح آب‌دوست) ته‌نشین می‌شود. تصاویر متوالی از این پدیده در مدت زمان ۲ ثانیه ثبت شده‌اند. تغییر شکل قطره و قطر تماس آن را می‌توان از طریق شکل‌های ۳-۱۳ و ۳-۱۴ پیش‌بینی کرد. شکل ۳-۱۴ (الف) تغییرات قطر تماس برحسب زمان را بعد از برخورد نشان می‌دهد. در شکل ۳-۱۴ (ب) این مقادیر بصورت بی‌بعد نشان داده شده است. وقتی قطره با سطح برخورد می‌کند، ابتدا یک شکل کلاه مانند (حدوداً تا زمان $1/1$ میلی‌ثانیه) را ایجاد می‌کند. همان‌طور که در شکل ۳-۱۳ در لحظه $1/3$ میلی‌ثانیه نشان داده شده است، در طول چند دهم میلی‌ثانیه بعدی، با تغییر شکل قطره به یک دیسک صاف، دایره‌ی تماس بصورت شعاعی، از نقطه‌ی برخورد گسترش یافته است. پس از آن تا زمانی که انرژی جنبشی، بعد از $1/78$ میلی‌ثانیه، برای لحظه‌ای صفر شود (در ضریب پخش β^*)، قطره همچنان به گسترش خود ادامه می‌دهد. در این نقطه ارتفاع قطره نیز به کمترین مقدار خود (0.417 میلی‌متر) می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است، بین زمان‌های $2/9$ و $14/2$ میلی‌ثانیه، زاویه تماس به تدریج کاهش می‌یابد. پس از آن لایه‌ای که در طول مرحله‌ی پخش شدن، کشیده شده بود، آرام به شکل یک کلاه کروی درمی‌آید و زاویه تماس نیز در این مرحله رو به افزایش است. قطره پس از گذشت تقریباً ۲ ثانیه، به قطر نهایی $5/167$ میلی‌متر می‌رسد که این مقدار چیزی حدود $1/74$ برابر قطر قطره‌ی اولیه آن می‌باشد.



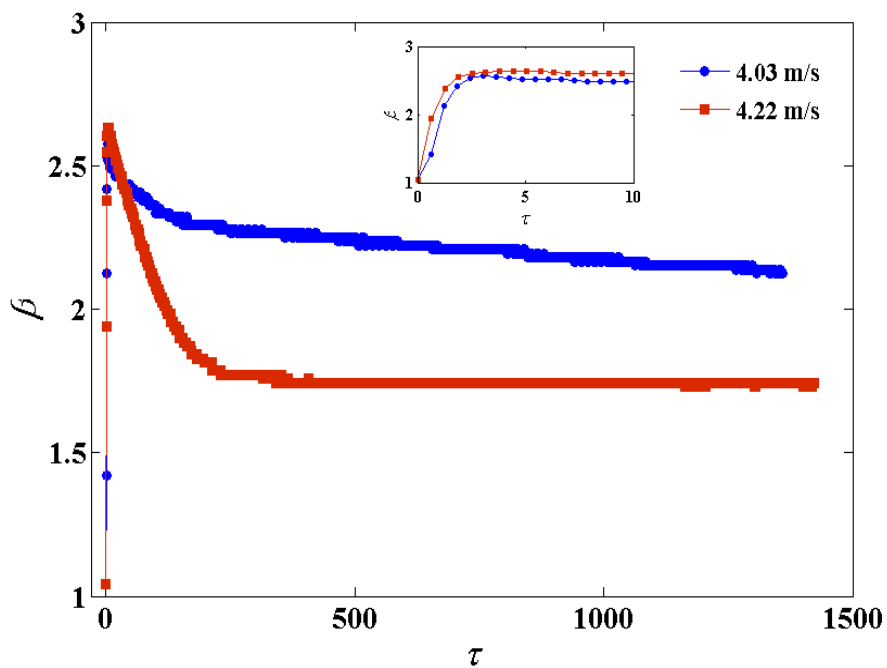
شکل ۳-۱۳ تصاویر فوق، مراحل تغییر شکل قطره PAM2 را پس از برخورد بر روی سطح پلکسی گلاس با سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. هر تصویر، قطره و نحوه‌ی ته‌نشین شدن آن را به همراه بازتاب آن بر روی سطح نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۴ مراحل کامل پخش شدن قطره PAM2 بر روی سطح پلکسی گلاس در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه: (الف) قطر تماس به عنوان تابعی از t . (ب) ضریب پخش β و ارتفاع بی بعد ζ به عنوان تابعی از زمان بی بعد τ .



شکل ۱۵-۳ اثر سرعت برخورد بر روی تغییر زمان ضریب پخش β در طول مرحله‌ی سینماتیک برای قطره PAM2 برخورد کرده بر روی سطح پلکسی گلاس.



شکل ۱۶-۳ مراحل کامل برخورد قطره PAM2 بر روی سطح پلکسی گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه.

۳-۴-۸- اثر سرعت بر روی برخورد قطره و پخش شدن

در لحظه‌ی برخورد، با تغییر ارتفاع از ۹۱ سانتی‌متر تا ۸۳ سانتی‌متر، سرعت قطره از ۴/۲۲ تا ۴/۰۳ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. لازم به ذکر است که ارتفاع سقوط قطره را نمی‌توان از ۸۳ سانتی‌متر کمتر در نظر گرفت زیرا در این صورت قطره در لحظه برخورد به همراه رشته‌ای 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 پدیده‌ای به لزجت کششی^۱ 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 شاهد افزایش طول این رشته‌ها هستیم. 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. شکل ۳-۱۵ تغییر ضریب پخش در مرحله‌ی سینماتیک ($\tau < 3/8$) و شکل ۳-۱۶ مراحل کامل تغییرات ضریب پخش را نشان می‌دهد. صرف‌نظر از سرعت برخورد، هر دو قطره در $\tau \approx 3$ به $\beta = 2/6$ می‌رسند. علاوه بر این، در هر دو سرعت، قطر با τ از همان قانون پاورلا پیروی کرد ($\beta = 2\tau^{0.26}$). ضریب پخش که در ابتدا به‌طور مداوم افزایش می‌یافت، پس از رسیدن به بیشترین مقدار خود β^* در زمان τ^* سیر نزولی پیدا کرد و در واقع قطره شروع به جمع شدن می‌کند. هر چه سرعت برخورد بیشتر باشد، مقدار β^* بیشتر و τ^* بزرگ‌تر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است،

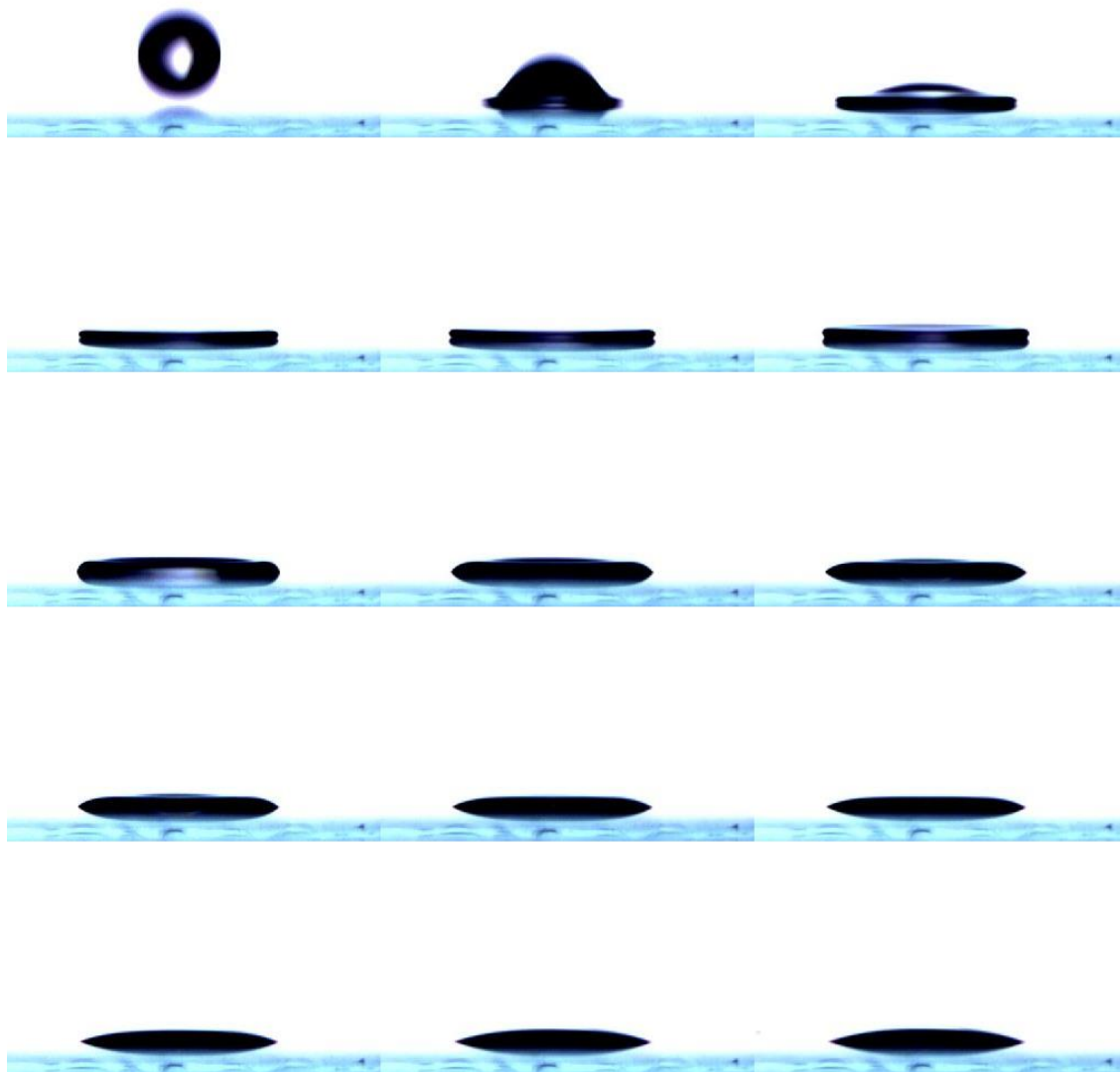
¹ Extensional Viscosity

قطره‌ای که سرعت بیشتری دارد، بیشتر پخش شده و بیشتر هم جمع می‌شود و سرعت جمع شدن آن نیز بیشتر است. بنابراین قطره‌ای که از ارتفاع ۹۱ سانتی‌متری رها می‌شود، با سرعت بیشتری جمع شده و زودتر به حالت تعادل می‌رسد.

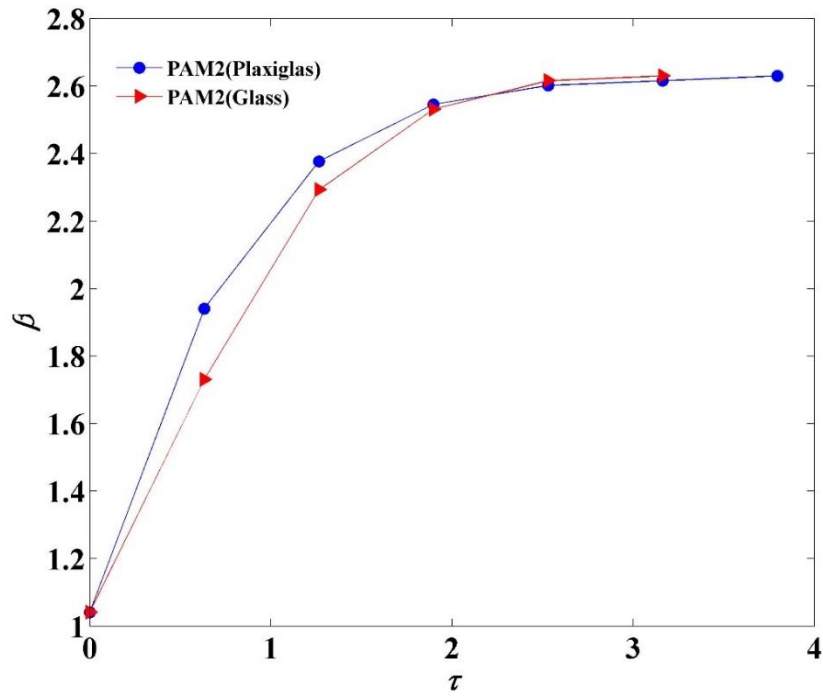
۳-۴-۹- تأثیر میزان آب‌دوستی سطح بر روی برخورد قطره و پخش شدن

به‌منظور بررسی اثر میزان آب‌دوستی سطح، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بر روی سطح پلکسی‌گلاس و شیشه انجام شد. به‌استثنای سطح، تمام شرایط دیگر مانند سرعت برخورد و خواص سیال یکسان باقی مانده‌اند. تصاویر متوالی از تغییرات قطره PAM2 در اثر برخورد روی سطح شیشه در سرعت ۴/۲۲ در شکل ۳-۱۷ نمایش داده شده است. در شکل ۳-۱۸ و ۳-۱۹ نیز تغییرات ضریب پخش برای قطره‌های PAM2 در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه بر روی هر دو سطح نشان داده شده است. ضریب پخش در طول مرحله‌ی سینماتیک طبق رابطه‌ی پاورلا $\beta \propto \tau^{0.26}$ برای هر دو سطح افزایش یافت. با تغییر سطح از پلکسی‌گلاس به شیشه تغییری در مقدار β^* مشاهده نشد اما مقدار τ^* کاهش یافت. به‌بیان دیگر تغییر میزان آب‌دوستی سطح تأثیر محسوسی بر مقدار بیشترین قطر پخش‌شدگی نداشت و فقط زمان وقوع آن را بر روی شیشه تسریع کرد. با آنکه هنگام برخورد شرایط برای قطره بر روی هر دو سطح یکسان بود اما قطره بر روی پلکسی‌گلاس برخلاف شیشه بسیار آرام‌تر جمع می‌شود (مرحله جمع شدن بر روی پلکسی‌گلاس طولانی‌تر از شیشه است) به‌گونه‌ای که β^∞ آن بسیار کوچک‌تر ($\beta^\infty \approx 1/74$) از مقدار آن بر روی شیشه ($\beta^\infty \approx 2/45$) می‌باشد.

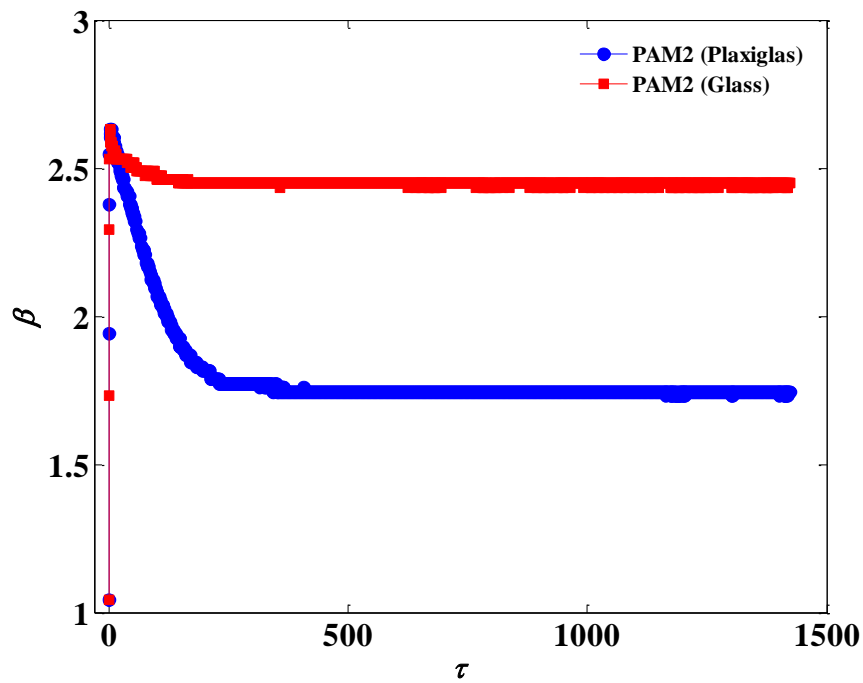
این نتایج نشان می‌دهند که میزان ترشوندگی سطح اثری بر مرحله پخش شدن نداشته اما در مرحله عقب‌نشینی و جمع شدن قطره تأثیر زیادی از خود بر جای گذاشته است.



شکل ۳-۱۷ تصاویر مربوط به تغییرات قطره PAM2 در اثر برخورد روی سطح شیشه در سرعت ۰.۴/۲۲.



شکل ۳-۱۸ تغییرات ضریب پخش برای قطره‌های PAM2 در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه بر روی شیشه و پلکسی‌گلاس در مرحله سینماتیک.



شکل ۳-۱۹ مراحل کامل تغییرات ضریب پخش برای قطره‌های PAM2 در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه بر روی شیشه و پلکسی‌گلاس.

۳-۵- مقایسه رفتار قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی

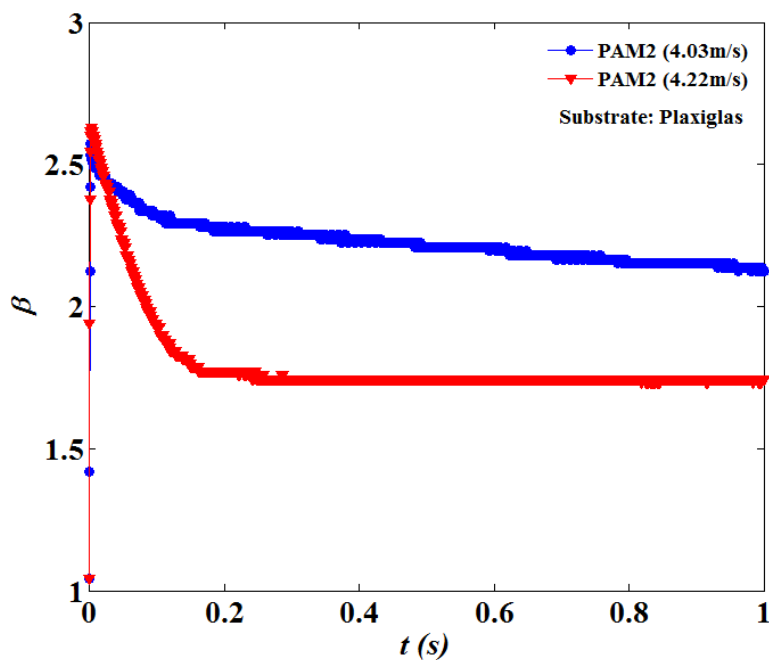
برای تمام قطرات برخورد کرده بر روی سطوح، مرحله‌ی گسترش در مدت زمان تنها چند میلی‌ثانیه اتفاق افتاد، درحالی‌که مرحله جمع شدن چند صد میلی‌ثانیه به طول انجامید. تمام قطراتی که روی شیشه و پلکسی‌گلاس (دو سطح آب‌دوست با درجه آب‌دوستی متفاوت) برخورد کردند، پخش شده و نشست کردند (رژیم پخش شدن).

شرح مفصلی از رفتار پخش شدن و جمع شدن هر قطره در بخش‌های زیر در قالب اثرات سرعت برخورد، میزان آب‌دوستی سطح و لزجت مایع ارائه خواهد شد.

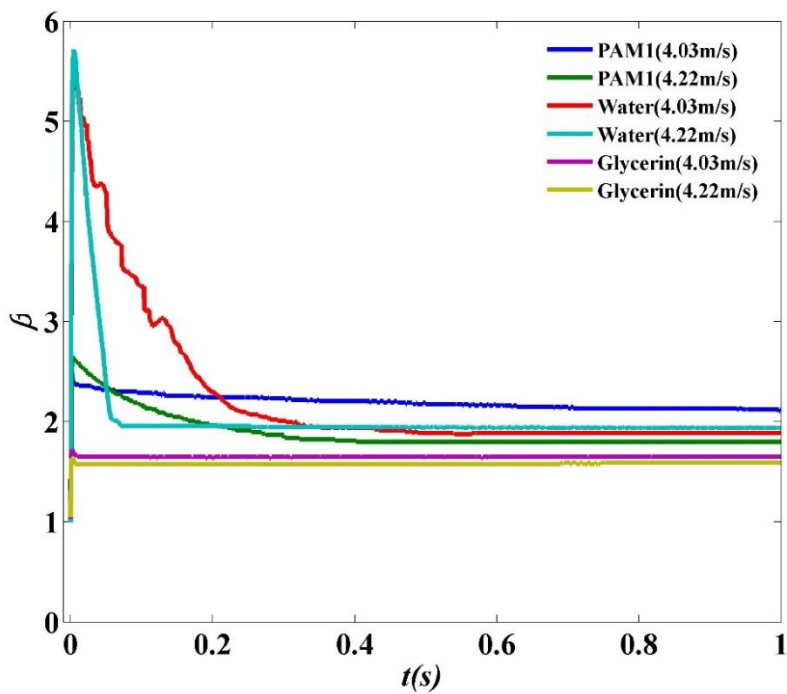
۳-۵-۱- اثر سرعت بر روی برخورد قطره

شکل‌های ۳-۲۰ و ۳-۲۱ رفتار قطره‌های PAM1، PAM2 و آب و گلیسیرین را به هنگام پخش شدن و جمع شدن بر روی پلکسی‌گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه نشان می‌دهند. به‌منظور درک بهتر این موضوع، شکل‌های ۳-۲۰ و ۳-۲۱ در بازه زمانی ۳۰ میلی‌ثانیه به تصویر کشیده شده‌اند (شکل-های ۳-۲۲ و ۳-۲۳). وقتی قطره با سرعت بالاتری برخورد می‌کند، به دلیل انرژی بیشتری که به هنگام برخورد دارد، بیشتر پخش می‌شود و این پخش‌شدگی در مدت زمانی بیش‌تر (در t_{max} و τ^* بزرگ‌تر) و با سرعتی بیشتر. در مقابل، رفتار قطره در زمان جمع شدن در سرعت بالاتر، تحت تأثیر توأمان لزجت سیال و میزان آب‌دوستی سطح قرار دارد. وقتی قطره PAM2 بر روی پلکسی‌گلاس برخورد می‌کند، چنانچه سرعت برخورد بیشتر باشد، سرعت جمع شدن نیز افزایش می‌یابد. برای قطره PAM2 بر روی شیشه نیز همین روند البته با شدت کمتر برقرار است. بر اساس بررسی‌های انجام شده برای قطره آب و PAM1، نتایج فوق در مورد قطره این دو مایع نیز صدق می‌کند. در این میان سرعت جمع شدن قطره گلیسیرین به دلیل لزجت بالایی که دارد، چه بر روی شیشه و چه بر روی پلکسی‌گلاس، مستقل از سرعت آن می‌-

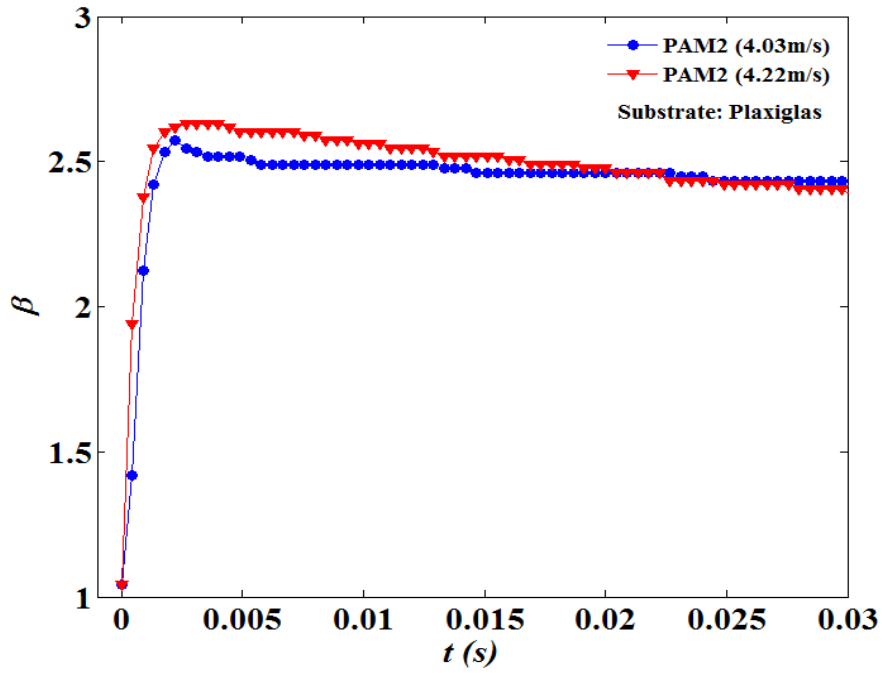
باشد و در هر دو سرعت نتایج بسیار مشابهی را ارائه می‌دهد.



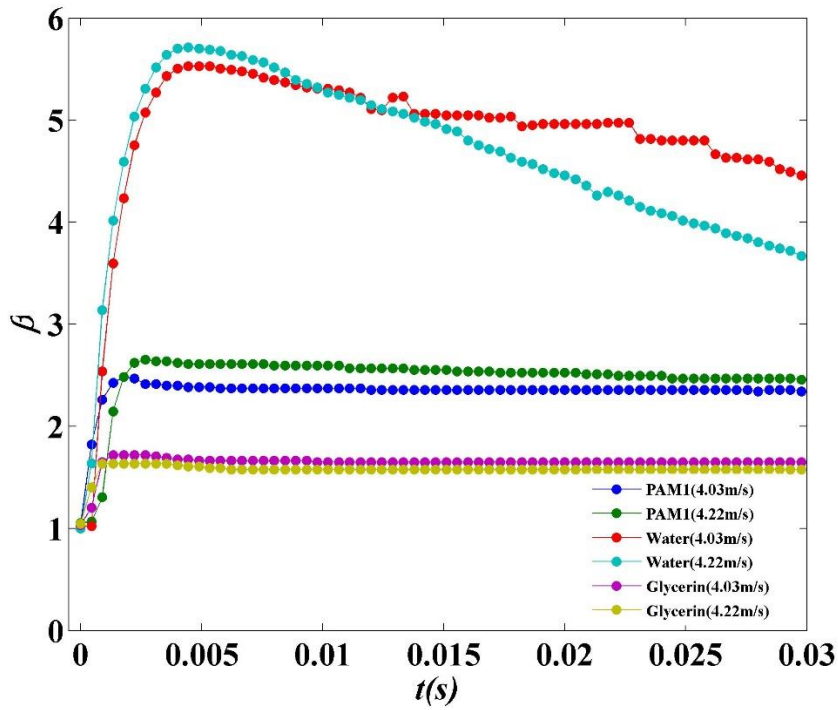
شکل ۳-۲۰ اثر سرعت بر روی قطره PAM2 برخورد کرده بر روی پلکسی‌گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه.



شکل ۳-۲۱ اثر سرعت بر روی قطره PAM1، آب و گلیسرین بر روی پلکسی‌گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه.



شکل ۳-۲۲ اثر سرعت بر روی قطره PAM2 برخورد کرده بر روی پلکسی گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه در مدت ۳۰ میلی ثانیه.

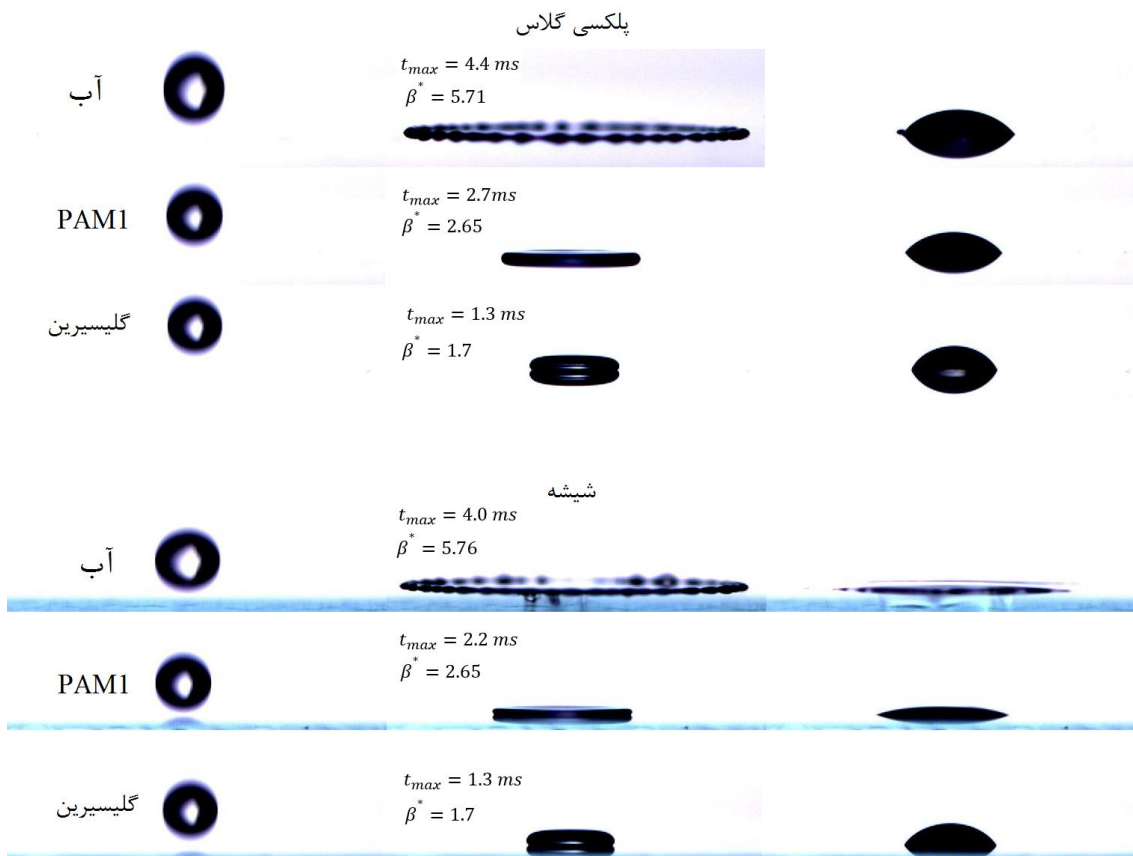


شکل ۳-۲۳ اثر سرعت بر روی قطره PAMI, آب و گلیسرین بر روی پلکسی گلاس در سرعت‌های ۴/۰۳ و ۴/۲۲ متر بر ثانیه در مدت ۳۰ میلی ثانیه.

۳-۵-۲- اثر لزجت مایع بر برخورد قطره

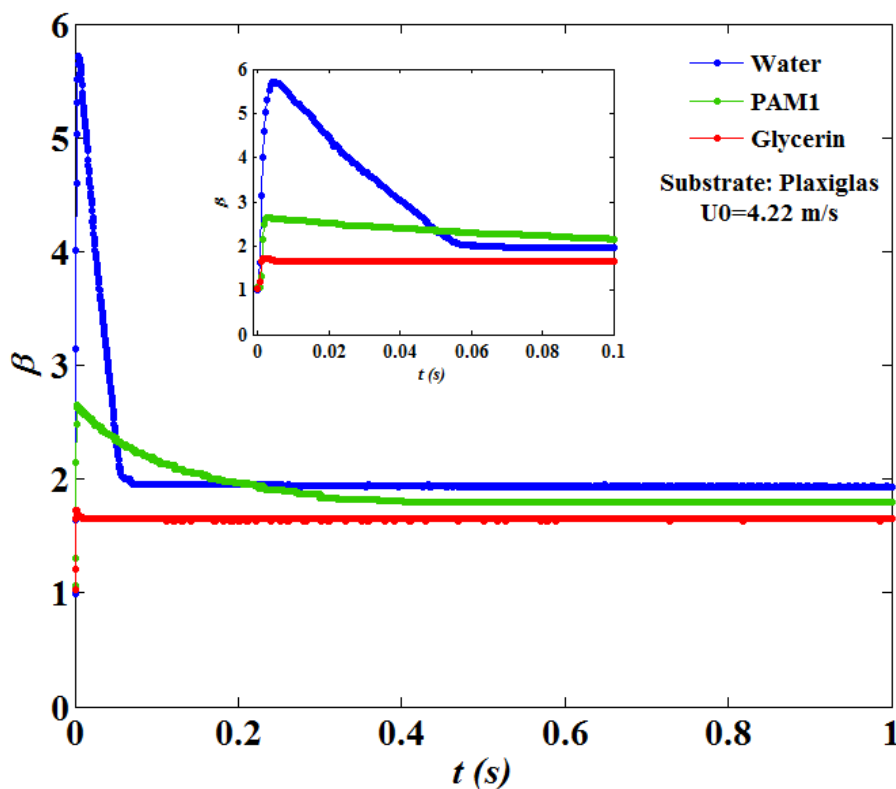
با توجه به مقادیر ارائه شده برای لزجت مواد مورد آزمایش در فصل دوم، مشاهده می‌شود که لزجت معادل هر دو نمونه پلیمری، کمتر از لزجت گلیسیرین و بیشتر از لزجت آب می‌باشد. البته به دلیل درصد بالای گلیسیرین استفاده شده در پلیمرها، لزجت آن‌ها به لزجت گلیسیرین نزدیک‌تر است.

شکل ۳-۲۴ تصاویر قطره آب، PAM1 و گلیسیرین را از لحظه برخورد تا رسیدن به مرحله تعادل نهایی، بر روی پلکسی‌گلاس و شیشه در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه به نمایش گذاشته است. شکل ۳-۲۵ نیز تغییرات زمانی ضریب پخش قطره برای هر چهار ماده مورد آزمایش را بر روی پلکسی‌گلاس در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه نشان می‌دهد.

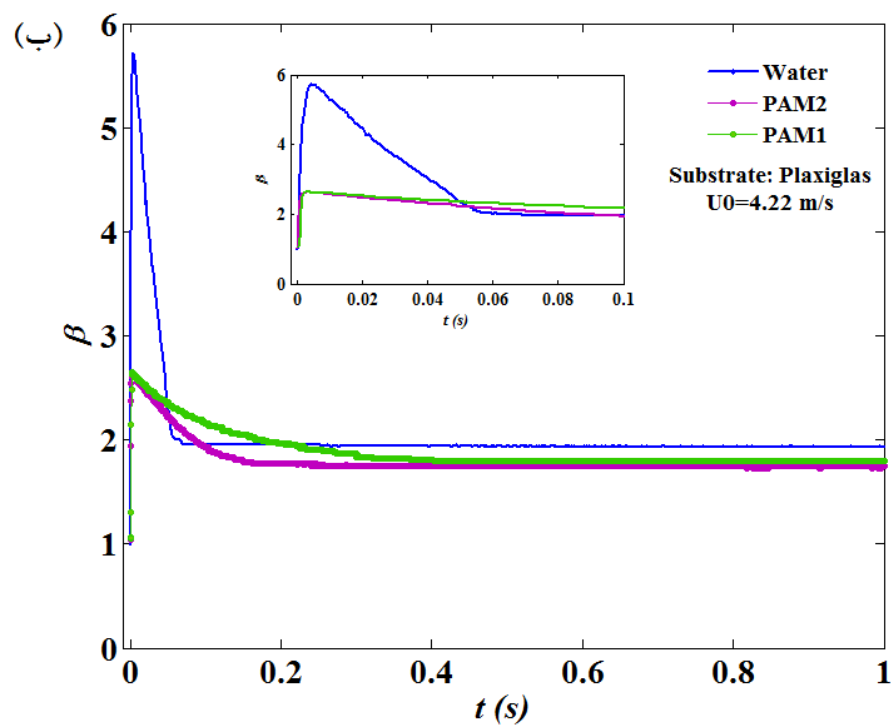
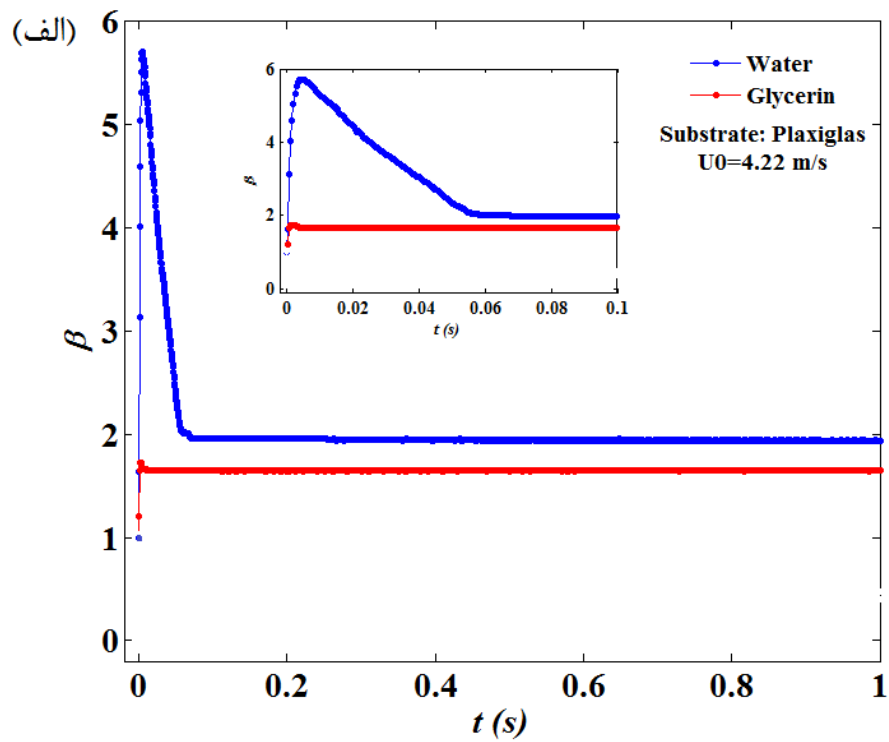


شکل ۳-۲۴ تصاویر قطره آب، PAM1 و گلیسیرین در لحظات قبل از برخورد، حداکثر پخش‌شدگی و تعادل نهایی بر روی پلکسی‌گلاس و شیشه در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه.

مقایسه مقادیر t_{max} در ستون سوم از شکل ۳-۲۴ 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 (t_{max})، از آب تا گلیسرین در حال کاهش است. باین حال قطره‌ها بیشتر پخش شده و در جهت معکوس با سرعت بیشتری جمع شدند. همان‌طور که در شکل ۳-۲۵ بر روی پلکسی‌گلاس نشان داده شده است، حداکثر قطر پخش شدن و سرعت جمع شدن قطره آب (شیب منفی نمودار ضریب پخش برحسب زمان در طول مرحله جمع شدن) مقداری بزرگ‌تر از پلیمر PAM1 و بسیار بیشتر از گلیسرین می‌باشد. در شکل ۳-۲۶ نیز اثر لزجت بر سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی منتخب بصورت مجزا نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۵ نمودار تغییرات ضریب پخش برحسب زمان برای قطره آب، PAM1 و گلیسرین به منظور مقایسه اثر لزجت.



شکل ۳-۲۶ اثر لزجت بر پخش شدن و جمع شدن قطره پس از برخورد بر روی سطح پلکسی گلاس در سرعت 4.22 m/s متر بر ثانیه: الف) سیالات نیوتنی (آب و گلیسرین)، ب) سیالات غیرنیوتنی (PAM1 و PAM2).

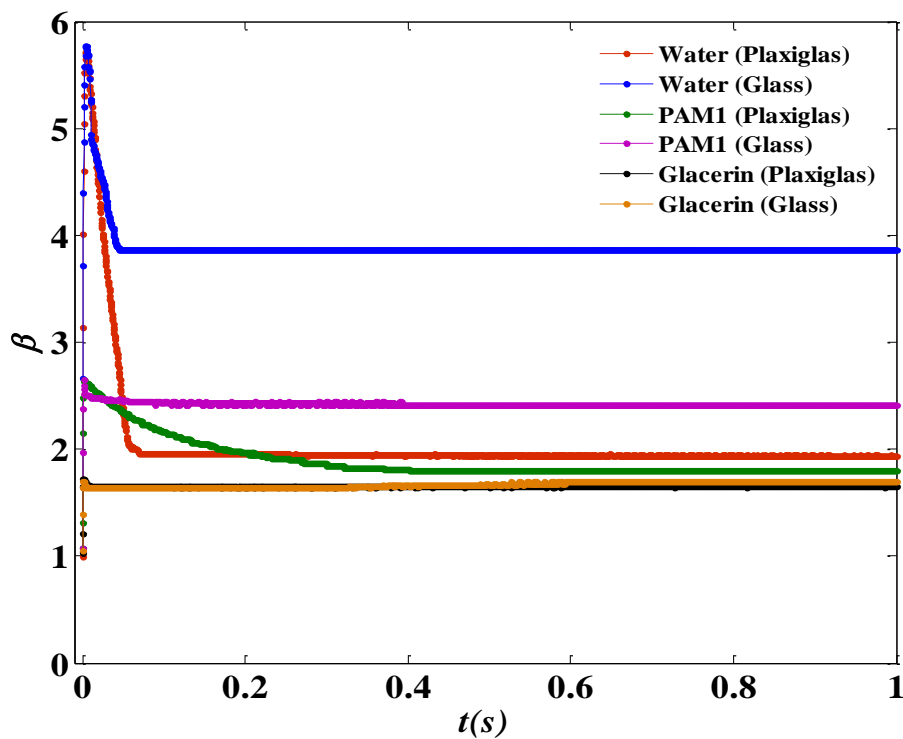
جدول ۳-۵ مقادیر τ^* برای سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی منتخب بر روی سطح پلکسی گلاس و شیشه در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه.

PAM2	PAM1	گلیسرین	آب	
۳/۷۹۶	۳/۷۸۷	۱/۹۳۴	۵/۵۳۹	τ^* (پلکسی گلاس)
۳/۱۶۳	۳/۱۵۵	۱/۹۳۴	۴/۹۸۵	τ^* (شیشه)

۳-۵-۳- اثر میزان آب دوستی سطح بر روی برخورد قطره

شکل ۳-۲۷ وضعیت قطرات آب، PAM1 و گلیسرین را در حین پخش شدن و جمع شدن بر روی سطوح پلکسی گلاس و شیشه در سرعت ۴/۲۲ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳-۲۴ مشاهده می‌شود، مقایسه t_{max} در ستون سوم برای هر ماده نشان می‌دهد که تغییرات زمانی ضریب پخش در طول مرحله پخش شدن (و بر اساس بالاترین مقدار ضریب پخش β^*)، برای هر کدام از مواد، صرف‌نظر از نوع سطح تقریباً مشابه یکدیگر است. این تفاوت کم حاکی از آن است که تمام قطره‌های برخورد کرده بر روی شیشه در مدت زمان کمتری نسبت به قطره مشابه خود روی پلکسی گلاس به بیشترین قطر خود رسیده‌اند. به عبارتی قطره بر روی سطحی با میزان آب دوستی بالاتر (دارای زاویه تماس کوچک‌تر)، زودتر از سطحی با درجه آب دوستی کمتر (زاویه تماس بزرگ‌تر) به بزرگ‌ترین قطر پخش‌شدگی خود می‌رسد. تاکنون چندین محقق [۱۵، ۱۷، ۳۲ و ۳۵] گزارش داده‌اند که در مورد قطرات نیوتنی، میزان آب دوستی سطح تنها اثری جزئی بر بیشترین قطر پخش‌شدگی قطره دارد که این امر علاوه بر آب و گلیسرین، در مورد قطره سیالات با گر آزمایش شده در این مطالعه نیز صدق می‌کند. همان‌طور که در شکل ۳-۲۴ و ۳-۲۷ نشان داده شده است، با آن‌که آب و PAM1 هنگام جمع شدن روی هر سطح، رفتار بسیار متفاوتی از خود نشان دادند، اما هنگام جمع شدن قطره گلیسرین روی هر کدام از سطوح، تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد. به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد که میزان آب دوستی سطح تأثیر

قابل توجهی بر مرحله جمع شدن دارد که این تأثیر برای قطره‌هایی با لزجت کم بسیار مشهودتر می‌باشد. به بیان جزئی‌تر این‌طور می‌توان گفت که قطره آب بر روی سطحی با درجه آبدوستی بیشتر (شیشه) بسیار آرام جمع شد و همین امر باعث شد تا مرحله جمع شدن به‌طور قابل توجهی سرکوب شود. با این حال قطره آب بر روی پلکسی‌گلاس (سطحی با درجه آبدوستی کمتر) سریع‌تر جمع شد و به همین دلیل مرحله جمع شدن در این حالت دیرتر از شیشه متوقف شد.



شکل ۳-۲۷ اثر میزان آبدوستی سطح بر روی قطره آب، PAM1 و گلیسرین.

فصل چهارم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۴-۱- مقدمه

در این مطالعه، از طریق به تصویر کشیدن رفتار قطره سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی (باگر) پس از برخورد بر روی بسترهایی خشک و جامد، به مقایسه آن‌ها پرداخته شده است. فرایند نشست قطره و پخش شدن و جمع شدن آن روی سطوح صاف و غیر جاذب، از مرحله ابتدایی پخش شدن تا رسیدن به حالت تعادل نهایی مورد تحقیق قرار گرفته است. شرایط انتخاب شده برای انجام آزمایش‌ها با تحقیقات ارائه شده قبلی متفاوت بوده و مطالعه حاضر اولین کاری است که رفتار قطره را در این بازه از رینولدز و وبر بررسی می‌کند. علاوه بر این غلظت پلیمرهای منتخب در این مطالعه و دست یافتن به یک سیال باگر در کارهای قبلی انجام شده بر روی این پلیمر موجود نمی‌باشد.

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 برخورد و میزان آبدوستی سطح بر رفتار قطره منفرد پس از برخورد بر روی سطوح پرکاربردی همچون شیشه و پلکسی‌گلاس 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 ارتفاع آن و همچنین زاویه تماس قطره با سطح مناسب بودند، استفاده شد.

در طی مرحله اولیه پخش شدن، صرف‌نظر از سرعت پخش شدن و میزان آبدوستی سطح، قطر تماس قطره PAM2 از یک مدل ساده رابطه پاورلا یعنی $\beta \approx 2\tau^{0.26}$ پیروی کرد. از طرفی در این مرحله با افزایش سرعت برخورد، زمان رسیدن به حداکثر ضریب پخش‌شدگی β^* نیز افزایش یافت. در این نقطه

قطره به شکل یک دیسک صاف درمی‌آید و پس از آن در مرحله جمع شدن، ارتفاع قطره به سرعت افزایش می‌یابد و قطره به یک کلاه کروی تبدیل می‌شود.

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 (PAM1 و PAM2) نیز بیشتر و سریع‌تر از قطره نیوتنی با لزجت بالاتر از لزجت آن‌ها (گلیسرین) پخش شدند اما این قطرات غیرنیوتنی نسبت به قطره نیوتنی با لزجت پایین‌تر از لزجت آن‌ها (آب مقطر)، خیلی کمتر پخش شده و بسیار آرام‌تر جمع شدند. البته صرف‌نظر از نوع سطح، در یک زمان 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 آب-دوستی سطح تنها اثری جزئی بر این مرحله (مرحله پخش شدن) از خود نشان می‌دهد.

در ارتباط با مرحله عقب‌نشینی، میزان آب‌دوست بودن سطح و لزجت سیال هر دو نقش مهمی را ایفا می‌کنند. با این حال، اثر سرعت برخورد تنها در مورد قطراتی با لزجت پایین برجسته است.

۳-۴- پیشنهادها

به منظور تکمیل مطالعه حاضر پیشنهادها زیر ارائه می‌گردد:

۱- بررسی برخورد قطرات منتخب بر روی سطحی آب‌گریز و مقایسه آن با نتایج ارائه شده در این

تحقیق

۲- انجام آزمایش‌ها با طیف وسیع‌تری از سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی، به خصوص سیالات برشی-

رقیق‌شونده و برشی غلیظ‌شونده و مقایسه آن‌ها با سیالات باگر

۳- استفاده از سطح شیب‌دار با زوایای مختلف در آزمایش‌ها

۴- انجام آزمایش‌ها بر روی لایه‌ی نازکی از سیال

۵- انجام آزمایش‌ها در بازه گسترده‌تری از سرعت‌ها

۶- بررسی پدیده انتقال حرارت بین سیال و سطح برخورد

۷- استفاده از دو دوربین به منظور مشاهده هم‌زمان قطره در حین جدایش و برخورد و به‌دست

آوردن قطر اولیه دقیق‌تر برای قطره

۸- استفاده از سوزن‌هایی با قطرهای مختلف به منظور بررسی اثر قطر قطره بر رفتار آن پس از

برخورد

۹- بررسی برخورد چند قطره بر روی یکدیگر

پیوست‌ها

جدول پیوست-۱ نتایج آزمون ویسکومتر برای PAM1

Angular Velocity (RPM)	Viscosity (CentiPoise)	Torque (%)
۰/۵	۱۲۱/۱	۱۲/۱
۰/۶	۱۲۱/۸	۲۰/۱
۱	۱۲۱/۶	۳۰/۴
۱/۵	۱۲۱/۲	۴۰/۴
۲	۱۲۰	۵۰
۲/۵	۱۱۹/۲	۷۷/۶

جدول پیوست-۲ نتایج آزمون ویسکومتر برای PAM2

Angular Velocity (RPM)	Viscosity (CentiPoise)	Torque (%)
۰/۵	۱۵۶	۱۳/۳
۰/۶	۱۵۴	۱۵/۸
۱	۱۴۸/۲	۲۴/۷
۱/۵	۱۴۲	۳۵/۵
۲	۱۳۷/۱	۴۵/۷
۲/۵	۱۳۵/۱	۵۶/۲
۳	۱۳۴	۶۷
۴	۱۳۲	۸۸

جدول پیوست-۳ نتایج آزمون رئومتر برای PAMI

Angular Frequency [1/s]	Storage Modulus [Pa]	Loss Modulus [Pa]	Torque [μNm]
۶۲۸	$۴/۷۵ \times ۱۰^{-۳}$	$۵/۱۲ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۴۸ \times ۱۰^{-۴}$
۶۲۸	$۴/۸۳ \times ۱۰^{-۳}$	$۵/۲۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۵۲ \times ۱۰^{-۴}$
۵۳۰	$۳/۳۹ \times ۱۰^{-۳}$	$۳/۶۶ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۵۰ \times ۱۰^{-۴}$
۳۸۶	$۱/۸۵ \times ۱۰^{-۳}$	۲×۱۰^{-۳}	$۱/۰۶ \times ۱۰^{-۴}$
۲۸۱	$۹/۸۳ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۰۶ \times ۱۰^{-۳}$	$۵/۶۰ \times ۱۰^{-۳}$
۲۰۴	$۵/۳۰ \times ۱۰^{-۴}$	$۵/۷۱ \times ۱۰^{-۲}$	$۳/۰۱ \times ۱۰^{-۳}$
۱۴۹	$۲/۷۷ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۹۹ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۵۵ \times ۱۰^{-۳}$
۱۰۸	$۱/۴۹ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۶۱ \times ۱۰^{-۲}$	$۸/۴۳ \times ۱۰^{-۲}$
۷۸/۸	$۷/۸۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۸/۴۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۴/۳۷ \times ۱۰^{-۲}$
۵۷/۴	$۴/۲۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۵۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۲/۳۵ \times ۱۰^{-۲}$
۴۱/۸	$۲/۲۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۴۱ \times ۱۰^{-۱}$	$۱/۲۵ \times ۱۰^{-۲}$
۳۰/۴	$۱/۲۰ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۲۹ \times ۱۰^{-۱}$	$۶/۶۹ \times ۱۰^{-۱}$
۲۲/۱	$۶/۴۰ \times ۱۰^{-۶}$	۶/۹۰	$۳/۵۷ \times ۱۰^{-۱}$
۱۶/۱	$۳/۴۰ \times ۱۰^{-۶}$	۳/۶۷	$۱/۹۱ \times ۱۰^{-۱}$
۱۱/۷	$۱/۸۳ \times ۱۰^{-۶}$	۱/۹۸	$۱/۰۳ \times ۱۰^{-۱}$
۸/۵۳	$۱/۱۲ \times ۱۰^{-۶}$	۱/۲۱	۶/۲۶

Angular Frequency [1/s]	Storage Modulus [Pa]	Loss Modulus [Pa]	Torque [μNm]
6/21	$7/0.8 \times 10^{-7}$	$7/64 \times 10^{-1}$	3/97
4/52	$4/68 \times 10^{-7}$	$5/0.5 \times 10^{-1}$	2/63
3/29	$3/22 \times 10^{-7}$	$3/47 \times 10^{-1}$	1/82
2/4	$2/38 \times 10^{-7}$	$2/57 \times 10^{-1}$	1/34
1/74	$1/75 \times 10^{-7}$	$1/89 \times 10^{-1}$	1/02
1/27	$1/33 \times 10^{-7}$	$1/44 \times 10^{-1}$	$7/73 \times 10^{-1}$
0/924	$1/72 \times 10^{-7}$	$1/07 \times 10^{-1}$	$5/61 \times 10^{-1}$
0/672	$5/32 \times 10^{-7}$	$8/0.5 \times 10^{-2}$	$4/19 \times 10^{-1}$
0/489	$1/16 \times 10^{-7}$	$5/96 \times 10^{-2}$	$4/56 \times 10^{-1}$
0/356	$1/73 \times 10^{-7}$	$4/45 \times 10^{-2}$	$4/80 \times 10^{-1}$
0/259	$2/73 \times 10^{-7}$	$3/38 \times 10^{-2}$	$4/96 \times 10^{-1}$
0/189	$2/40 \times 10^{-7}$	$2/56 \times 10^{-2}$	$5/01 \times 10^{-1}$
0/137	$2/12 \times 10^{-7}$	$1/92 \times 10^{-2}$	$5/03 \times 10^{-1}$
0/1	$1/96 \times 10^{-7}$	$1/43 \times 10^{-2}$	$5/04 \times 10^{-1}$

جدول پیوست-۴ نتایج آزمون رئومتر برای PAM2

Angular Frequency [1/s]	Storage Modulus [Pa]	Loss Modulus [Pa]	Torque [μNm]
۶۲۸	$۴/۶۲ \times ۱۰^{-۳}$	$۴/۹۹ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۴۶ \times ۱۰^{-۴}$
۶۲۸	$۴/۹۵ \times ۱۰^{-۳}$	$۵/۳۴ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۵۵ \times ۱۰^{-۴}$
۵۳۰	$۳/۴۹ \times ۱۰^{-۳}$	$۳/۷۶ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۵۴ \times ۱۰^{-۴}$
۳۸۶	$۱/۸۷ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/۰۲ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۰۸ \times ۱۰^{-۴}$
۲۸۱	$۹/۹۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۰۷ \times ۱۰^{-۳}$	$۵/۶۷ \times ۱۰^{-۳}$
۲۰۴	$۵/۳۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۵/۷۸ \times ۱۰^{-۲}$	$۳/۰۳ \times ۱۰^{-۳}$
۱۴۹	$۲/۸۲ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۰۴ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۶۰ \times ۱۰^{-۳}$
۱۰۸	$۱/۵۱ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۶۳ \times ۱۰^{-۲}$	$۸/۴۵ \times ۱۰^{-۲}$
۷۸/۸	$۷/۹۰ \times ۱۰^{-۵}$	$۸/۵۳ \times ۱۰^{-۱}$	$۴/۴۱ \times ۱۰^{-۲}$
۵۷/۴	$۴/۲۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۵۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۲/۳۵ \times ۱۰^{-۲}$
۴۱/۸	$۲/۲۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۴۰ \times ۱۰^{-۱}$	$۱/۲۴ \times ۱۰^{-۲}$
۳۰/۴	$۱/۲۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۳۲ \times ۱۰^{-۱}$	$۶/۸۵ \times ۱۰^{-۱}$
۲۲/۱	$۶/۷۸ \times ۱۰^{-۶}$	۷/۳۱	$۳/۷۹ \times ۱۰^{-۱}$
۱۶/۱	$۴/۰۰ \times ۱۰^{-۶}$	۴/۳۲	$۲/۲۵ \times ۱۰^{-۱}$
۱۱/۷	$۲/۵۳ \times ۱۰^{-۶}$	۲/۷۳	$۱/۴۲ \times ۱۰^{-۱}$
۸/۵۳	$۱/۷۳ \times ۱۰^{-۶}$	۱/۷۸	۹/۷۷

Angular Frequency [1/s]	Storage Modulus [Pa]	Loss Modulus [Pa]	Torque [μNm]
6/21	$1/26 \times 10^{-6}$	1/36	7/0.8
4/52	$9/55 \times 10^{-7}$	1/0.3	5/60
3/29	$4/99 \times 10^{-2}$	$7/93 \times 10^{-1}$	4/28
2/4	$7/86 \times 10^{-2}$	$6/0.5 \times 10^{-1}$	3/20
1/74	$8/21 \times 10^{-2}$	$4/64 \times 10^{-1}$	2/47
1/27	$7/0.6 \times 10^{-2}$	$3/57 \times 10^{-1}$	1/89
0/924	$5/93 \times 10^{-2}$	$2/78 \times 10^{-1}$	1/48
0/672	$4/51 \times 10^{-2}$	$2/16 \times 10^{-1}$	1/15
0/489	$3/43 \times 10^{-2}$	$1/66 \times 10^{-1}$	$8/84 \times 10^{-1}$
0/356	$2/75 \times 10^{-2}$	$1/27 \times 10^{-1}$	$6/90 \times 10^{-1}$
0/259	$1/78 \times 10^{-2}$	$9/83 \times 10^{-2}$	$5/33 \times 10^{-1}$
0/189	$1/48 \times 10^{-2}$	$7/43 \times 10^{-2}$	$5/0.5 \times 10^{-1}$
0/137	$8/91 \times 10^{-2}$	$5/64 \times 10^{-2}$	$5/0.3 \times 10^{-1}$
0/1	$5/96 \times 10^{-2}$	$4/15 \times 10^{-2}$	$5/0.2 \times 10^{-1}$

- [1] T. Osswald, N. Rudolph, *Polymer Rheology Fundamentals and Applications*. Munich: Hanser Publications, 2015.
- [2] D. F. James, "Boger fluids," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 41, pp. 129-142, 2009.
- [3] M. Rieber, A. Frohn, "A numerical study of the mechanism of splashing," *Int. J. Heat Fluid Flow* vol. 20, pp. 455-461, 1999.
- [4] A. Worthington, *A Study of Splashes*: Longmans Green, 1908.
- [5] A. L. Yarin, "Drop impact dynamics: Splashing, spreading, receding, bouncing ...," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 38, pp. 159-192, 2006.
- [6] A. M. Worthington, "On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate," *Proc. R. Soc. London*, vol. 25, pp. 171–178, 1876.
- [7] H. E. Edgerton and J. R. Killian, *Flash!: Seeing the Unseen by Ultra-High-Speed Photography*: CT Branford Co., 1954.
- [8] S. T. Thoroddsen and J. Sakakibara, "Evolution of the fingering pattern of an impacting drop," *Phys. Fluids*, vol. 10, pp. 1359-1374, 1998.
- [9] S. T. Thoroddsen, T. G. Etoh and K. Takehara, "High-speed imaging of drops and bubbles," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 40, pp. 257–285, 2008.
- [10] M.-J. Thoraval, K. Takehara, T. G. Etoh, S. T. Thoroddsen. , "Drop impact entrapment of bubble rings," *J. Fluid Mech.*, vol. 724, pp. 234- 258, 2013.
- [11] X. Chen, J. Wang, M. Versluis, N. de Jong, F. S. Villanueva, "Ultra-fast bright field and fluorescence imaging of the dynamics of micrometer-sized Objects," *Rev. Sci. Instrum.* , vol. 84, p. 063701, 2013.
- [12] Q. Xu, I. Peters, S. Wilken, E. Brown, H. Jaeger, "Fast Imaging Technique to Study Drop Impact Dynamics of Non-Newtonian Fluids," *J. Vis. Exp.* , p. e51249, 2014.
- [13] R. Rioboo, C. Tropea, M. Marengo, "Outcomes from a drop impact on solid surfaces," *At. Sprays* vol. 11, pp. 155–165, 2001.
- [14] R. Rioboo, M. Marengo, C. Tropea, "Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces," *Exp. Fluids* vol. 33, pp. 112–124, 2002.

- [15] S. Sikalo, M. Marengo, C. Tropea, EN. Ganic, "Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 25, pp. 503-510, 2002.
- [16] BL. Scheller, DW. Bousfield, "Newtonian drop impact with a solid surface," *AICHE J.*, vol. 41, pp. 1357-67, 1995.
- [17] AB. Wang, CC. Chen "Splashing impact of a single drop onto very thin liquid films," *Phys. Fluids* vol. 12, pp. 2155–58, 2000.
- [18] L. Xu, WW. Zhang, SR. Nagel, "Drop splashing on a dry smooth surface," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 94, p. 184505, 2005.
- [19] S. Schiaffino, AA. Sonin, "Molten droplet deposition and solidification at low Weber numbers," *Phys. Fluids* vol. 9, pp. 3172–87, 1997.
- [20] C. Clanet, C. Beguin, D. Richard, D. Quere, "Maximal deformation of an impacting drop," *J. Fluid Mech.*, vol. 517, pp. 199–208, 2004.
- [21] L. Zhang, J. Toole, K. Feeza, R. D. Deegan, "Evolution of the ejecta sheet from the impact of a drop with a deep pool," *J. Fluid Mech.*, vol. 690, pp. 5–15, 2012.
- [22] M. Reyssat, D. Richard, C. Clanet, D. Quere, "Dynamical superhydrophobicity," *Faraday Discuss.*, vol. 146, pp. 19–31, 2010.
- [23] P. Tsai, R. C. A. Van der Veen, M. Van De Raa, D. Lohse, "How micropatterns and air pressure affect splashing on surfaces," *Langmuir*, vol. 26, pp. 16090–16095, 2010.
- [24] P. Tsai, M. H. W. Hendrix, R. R. M. Dijkstra, L. Shui, D. Lohse, "Microscopic structure influencing macroscopic splash at high Weber number," *Soft Matter*, vol. 7, pp. 11325–11333, 2011.
- [25] R. C. A. Van der Veen, M. H. W. Hendrix., T. Tran, C. Sun, P. Tsai, D. Lohse, "How microstructures affect air film dynamics prior to drop impact," *Soft Matter* vol. 10, pp. 3703–3707, 2014.
- [26] P. Attane, F. Girard, V. Morin, "An energy balance approach of the dynamics of drop impact on a solid surface," *Phys. Fluids*, vol. 19, p. 012101, 2007.
- [27] G. Tryggvason, R. Scardovelli, S. Zaleski, "Direct Numerical Simulations of Gas-Liquid Multiphase Flows," *Cambridge University Press*, 2011.

- [28] Y. Zhang, H. Wang, S. Wang, Y. Tong, K. Zhou, "A Deformable Surface Model for Real Time Water Drop Animation," *IEEE Trans Vis Comput Graph.*, vol. 18, pp. 1281-9, 2012.
- [29] M. Lan, X. Wang, "A case study on the dynamic process of water drop impacting on heated wood surface," *Case Studies in Thermal Engineering* vol. 2, pp. 23-28, 2014.
- [30] G. Riboux, J. M. Gordillo, "Experiments of Drops Impacting a Smooth Solid Surface: A Model of the Critical Impact Speed for Drop Splashing," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, p. 024507, 2014.
- [31] I. V. Roisman, R. Rioboo, C. Tropea, "Normal impact of a liquid drop on a dry surface: model for spreading and receding," *Proc. R. Soc. Lond. A* vol. 458, pp. 1411-1430, 2002.
- [32] S. Chandra, C.T. Avedisian, "Observations of droplet impingement on a ceramic porous surface," *Int. J. Heat Mass Trans.*, vol. 35, pp. 2377–2388, 1992.
- [33] 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, pp. 2900–2907, 2008.
- [34] I.V. Roisman, "Inertia dominated drop collisions. II. An analytical solution of the Navier–Stokes equations for a spreading viscous film," *Phys. Fluids* vol. 21, p. 052104, 2009.
- [35] D. B. Van Dam, C. L. Clerc, "Experimental study of the impact of an ink-jet printed droplet on a solid substrate," *Phys. Fluids*, vol. 16, pp. 3403-3414., 2004.
- [36] H. Dong, W. W. Carr, J. F. Morris, "Visualization of drop-on-demand inkjet- Drop formation and deposition," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 77, p. 085101, 2006.
- [37] T. Mao, D.C.S. Kuhn, H. Tran, "Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces," *AIChE J.*, vol. 43, pp. 2169–2179, 1997.
- [38] S. Chandra, C. T. Avedisian, "On the Collision of a Droplet with a Solid Surface," *Proc. R. Soc. Lond.*, vol. 432, pp. 13-41, 1991.
- [39] M. Pasandideh-Fard, Y. M. Qiao, S. Chandra, J. Mostaghimi, "Capillary effects during droplet impact on a solid surface," *Phys. Fluids* vol. 8, pp. 650-658 1996.

- [40] W.M. Healy, J.G. Hartley, S.I. Abdel-Khalik, "Surface wetting effects on the spreading of liquid droplets impacting a solid surface at low Weber numbers," *Int. J. Heat Mass Trans.*, vol. 44, pp. 235–240, 2001.
- [41] G. German, V. Bertola, "Review of drop impact models and validation with high viscosity Newtonian fluids," *At. Sprays* vol. 19, pp. 787–807, 2009.
- [42] V. Bergeron, D. Bonn, J.Y. Martin, L. Vovelle, "Controlling droplet deposition with polymer additives," *Nature*, vol. 45, pp. 772–775, 2000.
- [43] R. Crooks, D.V. Boger, "Influence of fluid elasticity on drops impacting on dry surfaces," *J. Rheol.*, vol. 44, pp. 973–996, 2000.
- [44] R. Crooks, J.J. Copper-White, D.V. Boger, "The role of dynamic surface tension and elasticity on the dynamics of drop impact," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 56, pp. 5575–5592, 2001.
- [45] J.J. Copper-White, R. Crooks, K. Chockalingam, D.V. Boger, "Dynamics of polymer surfactant complexes: elongational properties and drop impact behavior," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 41, pp. 6443–6459, 2002.
- [46] J.J. Copper-White, R. Crooks, D.V. Boger, "A drop impact study of worm-like viscoelastic surfactant solutions," *Colloids Surf. A* vol. 210, pp. 105–123, 2002.
- [47] D.C. Roux, J.J. Cooper-White, G.H. McKinley, V. Tirtaatmadja, "Drop impact of Newtonian and elastic fluids," *Phy. Fluids* vol. 15, p. S12, 2003.
- [48] V. Bertola, "Drop impact on a hot surface. Effect of a polymer additive," *Exp. Fluids* vol. 37, pp. 653–664, 2004.
- [49] D. Bartolo, A. Boudaoud, G. Narcy, D. Bonn, "Dynamics of non-Newtonian droplets," *Phys. Rev. Lett.* , vol. 99, p. 174502, 2007.
- [50] V. Bertola, "An experimental study of bouncing Leidenfrost drops: comparison between Newtonian and viscoelastic liquids," *Int. J. Heat Mass Trans.* , vol. 52, pp. 1786–1793, 2009.
- [51] V. Bertola, "Effect of polymer additives on the apparent dynamic contact angle of impacting drops, Colloids and Surfaces A," *Physicochem. Eng. Aspects* vol. 363, pp. 135–140, 2010.

- [52] X. Huang, P. Chen, M. Lan, X. Wang, G. Liao, "Experimental Study of Water Drops with Additive Impact on Wood Surfaces," *Procedia Engineering* vol. 62, pp. 852 – 858, 2013.
- [53] S. Rafai, D. Bonn, A. Boudaoud, "Spreading of non-Newtonian fluids on hydrophilic surfaces," *J. Fluid Mech*, vol. 513, pp. 77–85, 2004.
- [54] S. Rafai and D. Bonn, "Spreading of non-Newtonian fluids and surfactant solutions on solid surfaces," *Physica A* vol. 358, pp. 58–67, 2005.
- [55] S. Nigen, "Experimental investigation of the impact of an (apparent) yield-stress material," *At. Sprays* vol. 15, pp. 103–117, 2005.
- [56] G. German and V. Bertola, "Impact of shear-thinning and yield-stress drops on solid substrates," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 21, p. 16, 2009.
- [57] L. H. Luu, Y. Forterre, "Drop impact of yield-stress fluids," *J. Fluid Mech.*, vol. 632, pp. 301-327, 2009.
- [58] A. Saïdi, C. Martin, A. Magnin, "Influence of yield stress on the fluid drop impact control," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, vol. 165, pp. 596–606, 2010.
- [59] Dechelette A., Sojka P.E., Wassgren C.R., "Non-Newtonian drops spreading on a flat surface," *J. Fluids Eng*, vol. 132, p. 101302, 2010.
- [60] S. M. An, S. Y. Lee, "Observation of the spreading and receding behavior of a shear-thinning liquid drop impacting on dry solid surfaces," *Exp. Therm. Fluid Sci. in press.* , vol. 37, pp. 37-45, 2012.
- [61] S. M. An, S. Y. Lee, "Maximum spreading of a shear-thinning liquid drop impacting on dry solid surfaces," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 38, pp. 140–148, 2012.
- [62] H. Huang, "Non-Newtonian effects on inkjet droplets formation," *Studiegroep wiskunde met de industrie*, pp. 63-68, 2005.
- [63] 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," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* , vol. 162, pp. 78–87, 2009.

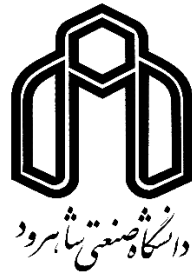
- [64] S. Jung, "Fluid characterisation and drop impact in inkjet printing for organic semiconductor devices," PhD Thesis, Department of Engineering, University of Cambridge, 2011.
- [65] S. Jung and I. M. Hutchings, "The impact and spreading of a small liquid drop on a non-porous substrate over an extended time scale," *Soft Matter*, vol. 8, p. 2686, 2012.
- [66] 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," *Microfluid Nanofluid*, vol. 14, pp. 163–169, 2013.
- [67] X. Yang, V. H. Chhasatia, Sun Y., "Oscillation and Recoil of Single and Consecutively Printed Droplets," *Langmuir*, vol. 29, p. 2185–2192, 2013.
- [68] F. Boyer, J. H. Snoeijer, J. F. Dijksman, D. Lohse, "Drop impact of shear thickening liquids Physics - Fluid Dynamics," *Phys. Rev. Lett*, vol. 1306, p. 3320, 2013.
- [69] S. G. Kandlikar and M. E. Steinke, "Contact Angle of Droplets During Spread and Recoil After Impinging on a Heated Surface," *Trans IChemE*, vol. 79, pp. 491-498, 2001.
- [70] J. H. Moon, J. B. Lee, S. H. Lee, "Dynamic Behavior of Non-Newtonian Droplets Impinging on Solid Surfaces," *Materials Transactions*, vol. 54, pp. 260-265, 2013.
- [71] 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.
- [72] D. Biolè and V. Bertola, "A goniometric mask to measure contact angles from digital images of liquid drops," *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 467, pp. 149–156, 2015.
- [73] V. Bertola and M. Wang, "Dynamic contact angle of dilute polymer solution drops impacting on a hydrophobic surface," *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 481, pp. 600–608, 2015.
- [74] D. Biolè and V. Bertola, "The role of the micro-scale contact line dynamics," *Arch. Mech.*, vol. 65, pp. 401-414, 2015.

- [75] A. Dechelette, P. E. Sojka, C. R. Wassgren, "Impact of Non-Newtonian Drops on Pharmaceutical Tablet Surfaces," presented at the ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago, USA, 2006.
- [76] T. Jiang, J. Ouyang, B. Yang, J. Ren, "The SPH method for simulating a viscoelastic drop impact and spreading on an inclined plate," *Comput. Mech.*, vol. 45, pp. 573–583, 2010.
- [77] S. Rahimi, D. Weihs, "Gelled fuel simulant droplet impact onto a solid surface," *Propel. Explos. Pyrot.*, vol. 36, pp. 273–281, 2011.
- [78] C. M. Oishi, F. P. Martins, M. F. Tomé, M. A. Alves, "Numerical simulation of drop impact and jet buckling problems using the eXtended Pom–Pom model," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, vol. 169-170, pp. 91–103, 2012.
- [79] R. A. Figueiredo, C. M. Oishi, J. A. Cuminato, J. C. Azevedo, A. M. Afonso, M. A. Alves, "Numerical investigation on of three dimensional viscoelastic free surface flows impacting drop problem," presented at the 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 2014.
- [80] R. A. Figueiredo, C. M. Oishi, J. A. Cuminato, M. A. Alves, "Three-dimensional transient complex free surface flows: Numerical simulation of XPP fluid," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, vol. 195, pp. 88–98, 2013.
- [81] V. M. Starov, A. N. Tyatyushkin, M. G. Velarde, S. A. Zhdanov, "Spreading of non-Newtonian liquids over solid substrates," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 257, pp. 284–290, 2003.
- [82] B.S. Dandapat, S.K. Singh, "Spreading of a non-Newtonian liquid drop over a horizontal plane," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 65, pp. 3427–3430, 2010.
- [83] S.K. Singh, B.S. Dandapat, "Spreading of a non-Newtonian liquid drop over a homogeneous rough surface," *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 419, pp. 228– 232, 2013.

Abstract

Drop impact onto solid surfaces is among on the complicate and yet interesting issues in fluid dynamic science that is a key element of a wide variety of phenomena encountered in technical applications, such as ink-jet printing, spray coating, soil erosion, spray cooling and crop spraying. In the present work, the impact dynamics of Boger drops on dry solid surfaces is investigated and compared with that of Newtonian drops. The effects of liquid viscosity, surface wettability and impact velocity on the spreading and receding behavior of the drops were investigated experimentally. Water, glycerin drops (Newtonian liquids), and polyacrylamide drops (Non-Newtonian liquids) were impinged upon plaxiglas and glass substrate, which have hydrophilic properties, at the impact velocities 4.03 and 4.22 m/s. The polyacrylamide drops spread out more widely and receded more rapidly than the glycerin drops. The impact velocity and the liquid viscosity had a dominant effect on the spreading phase. In contrast, the surface wettability had only a minor effect on the spreading phase but a very significant effect on the receding phase. The effect of the impact velocity on the receding phase was limited to the low-viscosity drops. That is, when the low-viscosity drops impacted on a hydrophilic substrate, the receding velocity increased greatly with higher impact velocity. On the other hand, drop receding was significantly suppressed on the glass and plaxiglas substrates. Suppression of drop receding was more prominent with the liquid having a lower viscosity.

Keywords: Drop impact, Solid surface, Boger fluid, Viscosity, Wettability, Impact velocity.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis in Energy Conversion

An Experimental Investigation on Non-Newtonian Drop Impact onto Solid Surfaces

Samira Mandani

Supervisors:

Dr. Mahmood Norouzi

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

February 2016