

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
رساله دکتری مهندسی تبدیل انرژی

مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر خورد قطره بر لایه سیال در سیالات ویسکوالاستیک

نگارنده: محمدرضا رضائی

استاد راهنما:

دکتر محمود نوروزی

اساتید مشاور:

دکتر محمدحسن کیهانی

دکتر سید محمد تقوی

اسفند ۱۴۰۰



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره: ۱۱/۲۴۰۱/۱۳
تاریخ: ۱۹/۲/۱۴۰۱
ویرایش:

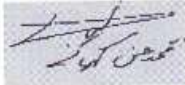
پیوست شماره ۲

دانشکده: مهندسی مکانیک

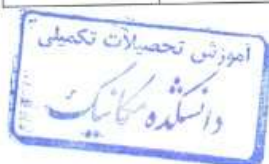
گروه: تبدیل انرژی

رساله دکتری آقای محمدرضا رضائی

تحت عنوان: مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر خورد قطره بر لایه سیال در سیالات دیسکوالاستیک
در تاریخ ۱۴۰۰/۱۲/۵ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد/ رساله دکتری ارزیابی گردید و
با درجه عالی..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی: دکتر محمد حسن کیهانی		نام و نام خانوادگی: دکتر محمود نوروزی
	نام و نام خانوادگی: دکتر سید محمد تقوی		نام و نام خانوادگی:

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: دکتر پوریا اکبرزاده		نام و نام خانوادگی: دکتر کیوان صادقی
			نام و نام خانوادگی: دکتر محمد محسن شاه مردان
			نام و نام خانوادگی: دکتر محسن نظری



تعمدنامه

اینجانب محمدرضا رضائی دانشجوی دوره دکتری تخصصی رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله مطالعه عددی و آزمایشگاهی برخورد قطره بر لایه سیال در سیالات ویسکوالاستیک تحت راهنمایی دکتر محمود نوروزی متعهد می شوم:

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

تاریخ امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

پدیده برخورد قطره سیال بر لایه سیال یکی از جذاب‌ترین پدیده‌های موجود در علم مکانیک سیالات است که با توجه به کاربردهای متنوع آن در صنعت چاپ، رنگ و پوشش‌دهی مورد توجه بسیاری از دانشمندان در عرصه‌های مختلف مهندسی و علوم است. این پدیده در سیالات ویسکوالاستیک به دلیل ظهور رفتار الاستیک و غیرخطی دربردارنده رفتارهای پیچیده‌ای است که نیاز به مطالعه بیشتر آن را آشکار می‌سازد. مطالعه تأثیر خواص غیرنیوتنی سیال در این پدیده می‌تواند در بهبود فرایند پوشش دهی، کاهش تولید قطرات ثانویه و فرایندهای مرتبط دیگر مفید واقع شود. عمده تحقیقات عددی صورت گرفته در این زمینه مربوط به حالتی است که سیال توسط مدل‌های فیزیکی ساده‌ای بیان شده است و همچنین تأثیر ضخامت لایه سیال و کشش سطحی در این پدیده در نظر گرفته نشده است. در مطالعه حاضر پدیده برخورد قطره بر لایه سیال در سیالات ویسکوالاستیک به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

به منظور شناخت این مسئله تحلیل آزمایشگاهی این پدیده برای سیال ویسکوالاستیک با گر انجام گرفته است. در تحلیل آزمایشگاهی حاضر از مخلوط آب و گلیسیرین به عنوان سیال پایه نیوتنی و از پودر پلیمر پلی اکریل آمید جهت تولید محلول‌های پلیمری با غلظت‌های دلخواه بهره برده شده است و عکسبرداری از پدیده برخورد نیز توسط دوربین با سرعت بالا صورت گرفته است. مدل‌سازی عددی این پدیده نیز می‌تواند تکمیل‌کننده مطالعات پیشین و مطالعه تجربی حاضر باشد. مدل‌سازی عددی با استفاده از روش حجم محدود و در حالت دوفازی و توسط مدل‌های اولدروید-بی و گزیکس انجام گرفته است. همچنین در ادامه بررسی تأثیر اعداد بدون بعد رینولدز، وبر، بوند، ضخامت لایه سیال و وایزنبرگ بر چگونگی تشکیل تاج و رشد آن در این پدیده مورد ارزیابی گرفته است.

نتایج بیانگر آن است که نیروهای الاستیک سیال و کشش سطحی بین سیالات تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ابعاد تاج دارند. همچنین تأثیر ضخامت لایه سیال بر دینامیک برخورد رفتار متفاوتی را در اعداد وایزنبرگ مختلف نمایش می‌دهد. به صورتی که در ضخامت‌های بزرگ لایه سیال با افزایش الاستیسیته سیال ابعاد تاج بزرگتر شده و در ضخامت‌های کوچک لایه سیال با افزایش خواص الاستیک سیال در ابتدا ابعاد تاج کوچک شده و سپس با افزایش بیشتر الاستیسیته سیال ابعاد تاج گسترش می‌یابد. در مطالعه عددی، نتایج به ازای پارامترهای مدل همچون نسبت ویسکوزیته و ضریب تحرک نیز آورده شده است.

کلمات کلیدی: پدیده برخورد، سیال ویسکوالاستیک، تحلیل عددی و آزمایشگاهی، لایه سیال، کشش سطحی

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- پدیده برخورد	۲
۲-۱- مروری بر تحقیقات گذشته	۷
۱-۲-۱- مطالعات در زمینه سیالات نیوتنی	۷
۱-۲-۲- مطالعات در زمینه سیالات غیرنیوتنی	۲۶
۳-۱- جمع بندی	۲۹
۴-۱- اهمیت و جایگاه پژوهش	۲۹
۵-۱- معرفی پژوهش حاضر	۳۰
۶-۱- نوآوری	۳۲
فصل ۲: مبانی مدل سازی عددی و تحلیل آزمایشگاهی	۳۵
۱-۲- مدل سازی عددی	۳۵
۱-۱-۲- مدل های ساختاری سیال	۴۰
۲-۱-۲- شرایط اولیه و مرزی	۴۷
۲-۱-۲- روش عددی	۴۹
۲-۲- تحلیل آزمایشگاهی	۵۲
۱-۲-۲- سیالات مورد استفاده	۵۲
۲-۲-۲- تحلیل خطا و تکرارپذیری	۵۸
فصل ۳: بحث و بررسی نتایج	۶۵
۱-۳- بررسی آزمایشگاهی دینامیک برخورد در سیالات باگر	۶۵
۲-۳- بررسی عددی دینامیک برخورد در سیالات ویسکوالاستیک	۸۱
۱-۲-۳- تحلیل اندازه دامنه محاسباتی و شبکه	۸۲
۲-۲-۳- اعتبارسنجی	۸۵
۳-۲-۳- مطالعه عددی برخورد قائم و مایل در حالت دو- بعدی	۹۲
۴-۲-۳- مطالعه عددی دینامیک برخورد در حالت تقارن محوری	۱۲۴
فصل ۴: نتیجه گیری	۱۴۵
پیوست الف:	۱۵۱
پیوست ب (تجهیزات آزمایش):	۱۵۳

پیوست ج: ۱۵۹

مراجع: ۱۶۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: مشاهدات آزمایشگاهی و عددی در پدیده برخورد قطره بر سطوح، (الف) خشک [۱۳]، (ب) تر [۱۴]..... ۵
- شکل ۲-۱: مشاهدات آزمایشگاهی در پدیده پاشش قطره [۶]..... ۶
- شکل ۳-۱: حالات مختلف برخورد قطره به لایه سیال [۹]..... ۷
- شکل ۴-۱: توالی برخورد قطره با لایه سیال [۲۴]،..... ۱۰
- شکل ۵-۱: نمودار رژیم های مختلف موجود در پدیده برخورد قطره به لایه سیال در اعداد وبر کوچک [۲۴]..... ۱۱
- شکل ۶-۱: حد شروع پدیده پاشش برای سیالات مختلف در اعداد رینولدز و اهنسبرگ مختلف به ازای $H \approx 3/9$ [۳۲]..... ۱۳
- شکل ۷-۱: طرحواره مکانیزم پاشش [۲۷]: ۱- باقیمانده قطره در حال برخورد، ۲- دیواره، ۳- برشی از صفحه تاج شکل، ۴- برشی از لبه آزاد، ۵- قطرات ثانویه تشکیل شده از لبه آزاد و ۶- لایه سیال بر روی دیواره..... ۱۵
- شکل ۸-۱: طرحواره متغیرهای تاج [۳۴]..... ۱۵
- شکل ۹-۱: تأثیر هوا محیط بر پدیده برخورد [۱۳]، (الف) مقایسه برخورد قطره بر روی لایه سیال به ازای چگالی مختلف هوا، (ب) مقایسه شعاع پایه تاج برای چگالیهای مختلف هوا با نتایج تئوری..... ۲۲
- شکل ۱۰-۱: مقایسه شعاع لبه تاج در برخورد قطره اتانول بر لایه سیال [۱۳]..... ۲۳
- شکل ۱-۲: دیدگاههای مختلف در تعیین مرز مشترک [۸۵]، (الف) دیدگاه اویلری، (ب) دیدگاه لاگرانژی..... ۳۷
- شکل ۲-۲: محدوده کاربرد علم رئولوژی [۸۹]..... ۴۱
- شکل ۳-۲: طرحواره برخورد قطره بر لایه سیال..... ۴۸
- شکل ۴-۲: طرحواره رویه حل عددی مسئله..... ۵۱
- شکل ۵-۲: طرحواره های از تجهیزات آزمایش..... ۵۲
- شکل ۶-۲: ویسکوزیته سیالات باگر..... ۵۴
- شکل ۷-۲: اختلاف تنش نرمال اول برای سیال ویسکوالاستیک..... ۵۵
- شکل ۸-۲: تغییرات مدول G' و G'' با فرکانس زاویه های برای سیال B1..... ۵۷
- شکل ۹-۲: تغییرات مدول G' و G'' با فرکانس زاویه های برای سیال B2..... ۵۸
- شکل ۱۰-۲: نمونه ای از تصاویر در پردازش تصویر..... ۶۰
- شکل ۱۱-۲: نمودار میله ای تغییرات اندازه قطره در هر آزمایش در سرعت برخورد، (الف) $U_0 = 3/92 \text{ m/s}$ و (ب) $U_0 = 4/41 \text{ m/s}$ ۶۲
- شکل ۱۲-۲: تحلیل تکرارپذیری آزمایشها برای سه سیال مختلف $h = 1 \text{ mm}$ ، $V = 3/92 \text{ m/s}$ و $D = 2/91 \text{ mm}$ ۶۳
- شکل ۱-۳: طرحواره ای از متغیرهای هندسی تاج..... ۶۶

- شکل ۳-۲: توالی برخورد قطره بر لایه سیال، سیال WG3 ۶۷
- شکل ۳-۳: تغییرات متغیر شعاع تاج با زمان ۶۹
- شکل ۳-۴: تغییرات (الف) ارتفاع تاج (Z^*)، (ب) شعاع تاج (R^*)، با زمان برای سیالات نیوتنی (WG3) و ویسکوالاستیک (B1 و B2)، $h = 1 \text{ mm}$ ، $V = 3/92 \text{ m/s}$ و $D = 2/91 \text{ mm}$ ۶۹
- شکل ۳-۵: تغییرات (الف) ارتفاع تاج (Z^*)، (ب) شعاع تاج (R^*)، با زمان برای سیالات ویسکوالاستیک B1 و B2، $h = 1 \text{ mm}$ ، $V = 3/92 \text{ m/s}$ ۷۱
- شکل ۳-۶: تاثیر اندازه قطره بر رشد تاج، سیال B2 ۷۲
- شکل ۳-۷: تغییرات (الف) ارتفاع تاج (Z^*)، (ب) شعاع تاج (R^*)، با زمان به ازای ضخامت‌های مختلف لایه سیال برای سیالات WG3 و B2، $V = 3/92 \text{ m/s}$ و $D = 2/91 \text{ mm}$ ۷۴
- شکل ۳-۸: تاثیر ضخامت لایه سیال بر رشد تاج، سیال B2 ۷۵
- شکل ۳-۹: تغییرات (الف) ارتفاع تاج (Z^*)، (ب) شعاع تاج (R^*)، با زمان به ازای اعداد وبر مختلف، سیال B2 و $h = 1 \text{ mm}$ ۷۵
- شکل ۳-۱۰: تاثیر الاستیسیته سیال بر تغییرات ارتفاع (Z^*) و شعاع (R^*) تاج برای $h = 1 \text{ mm}$ ، $V = 3/92 \text{ m/s}$ و $D = 3/92 \text{ mm}$ ۷۷
- شکل ۳-۱۱: تاثیر خواص الاستیک سیال بر شکل تاج در $t = 5 \text{ ms}$ ۷۸
- شکل ۳-۱۲: رژیم‌های مختلف در برخورد ۷۹
- شکل ۳-۱۳: شکل تاج به هنگام برهم خوردن شکل تقارن محوری برای سیالات مختلف در $h = 1 \text{ mm}$ ۸۰
- شکل ۳-۱۴: آستانه برهم خوردن رژیم تقارن محوری برای سیالات مختلف در $h = 1 \text{ mm}$ ۸۱
- شکل ۳-۱۵: تحلیل (الف) اندازه دامنه محاسباتی و (ب) تعداد شبکه محاسباتی برای مسئله دو-بعدی صفحه‌ای در $H = 0$ ، $\theta = 0$ ، $Wi = 1000$ و $\beta = 1/6$ ۸۳
- شکل ۳-۱۶: یک نمونه از شبکه محاسباتی ۸۴
- شکل ۳-۱۷: تحلیل تعداد شبکه محاسباتی برای مسئله دو-بعدی صفحه‌ای در $H = 0/2$ ، $\theta = 0$ ، $Wi = 1000$ و $\beta = 1/6$ ۸۴
- شکل ۳-۱۸: تحلیل شبکه محاسباتی برای مسئله دو-بعدی تقارن محوری در $H = 0/2$ ، $Wi = 100$ و $\beta = 1/6$ ۸۴
- شکل ۳-۱۹: تغییرات شعاع بدون بعد تاج با زمان در لحظات اولیه برخورد ($Wi = 0$) ۸۶
- شکل ۳-۲۰: طرحواره مسئله قطره در جریان برشی ۸۶
- شکل ۳-۲۱: مقایسه شکل قطره در جریان برشی در $t = 20 \text{ s}$ بین مطالعه حاضر و شونیر [۹۳] ۸۸
- شکل ۳-۲۲: توزیع تنش در تغییر شکل قطره در جریان برشی در $t = 20 \text{ s}$ ، (الف) شونیر [۹۳] و (ب) مطالعه حاضر ۸۸

- شکل ۳-۲۳: طرحواره مسئله برخورد قطره بر سطح خشک ۸۹
- شکل ۳-۲۴: مقایسه تغییرات زمانی پهنای قطره با مطالعات گذشته ۸۹
- شکل ۳-۲۵: مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی ۹۰
- شکل ۳-۲۶: مقایسه نتایج بین حلگرهای viscoelasticInterFoam و rheoInterFoam ۹۱
- شکل ۳-۲۷: طرحواره برخورد مایل قطره بر لایه سیال ۹۲
- شکل ۳-۲۸: طرحواره متغیرهای ابعاد تاج در برخورد مایل ۹۳
- شکل ۳-۲۹: تغییرات شکل تاج در لحظات مختلف به ازای $H = 0.2$, $\beta = 0.1$, $We = 400$, $\theta = 15^\circ$ و $Wi = 1000$ ۹۴
- شکل ۳-۳۰: توزیع سرعت در لحظات مختلف به ازای $H = 0.2$, $\beta = 0.1$, $We = 400$, $\theta = 15^\circ$ و $Wi = 1000$ ۹۵
- شکل ۳-۳۱: تغییرات زمانی (الف) شعاع تاج (R^*)، (ب) ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف، $\theta = 0$, $H = 0.2$, $\beta = 0.1$, $\alpha = 0$ و $We = 224$ ۹۶
- شکل ۳-۳۲: شکل تاج در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 4$ برای $\theta = 0$, $H = 0.2$, $\beta = 0.1$, $\alpha = 0$ و $Bo = 1/6$ و $We = 224$ ۹۶
- شکل ۳-۳۳: اندازه فشار و تنش برشی در نزدیکی گلوبی برخورد در $t^* = 0.08$ (مقادیر بیشینه در دایره قرمز رنگ) .. ۹۷
- شکل ۳-۳۴: تغییرات زمانی (الف) بیشینه فشار، (ب) بیشینه اندازه تنش برشی و (ج) سرعت جت خارج شده، با عدد وایزنبرگ در $\theta = 0$, $H = 0.2$, $\beta = 0.5$, $\alpha = 0$ و $Bo = 1/6$ و $We = 224$ ۹۸
- شکل ۳-۳۵: تغییرات زمانی شعاع تاج (R^*) و ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای ضخامت‌های مختلف لایه سیال، $\theta = 0$, $H = 0.2$, $\beta = 0.1$, $\alpha = 0$ و $We = 224$ و $Bo = 1/6$ (الف) $Wi = 100$ و (ب) $Wi = 1000$ ۱۰۰
- شکل ۳-۳۶: شکل تاج در ضخامت‌های مختلف لایه سیال در $t^* = 4$ برای $\theta = 0$, $Wi = 1000$, $\beta = 0.1$, $\alpha = 0$ و $Bo = 1/6$ ۱۰۱
- شکل ۳-۳۷: تاثیر ضخامت لایه سیال بر زاویه تاج $\theta = 0$, $Wi = 1000$, $\beta = 0.1$, $\alpha = 0$ و $Bo = 1/6$ ۱۰۱
- شکل ۳-۳۸: شکل تاج در نسبت ویسکوزیته‌های مختلف در $t^* = 4$ برای $\theta = 0$, $Wi = 1000$, $H = 0.2$, $\alpha = 0.1$ و $Bo = 1/6$ ۱۰۲
- شکل ۳-۳۹: تغییرات زمانی شعاع تاج (R^*) و ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای نسبت ویسکوزیته‌های مختلف، $\theta = 0$, $H = 0.2$, $\beta = 0.1$, $\alpha = 0$ و $We = 224$ (الف) $\beta = 0.1$ و (ب) $\beta = 0.3$ و (ج) $\beta = 0.5$ ۱۰۲
- شکل ۳-۴۰: تغییرات زمانی (الف) شعاع تاج (R^*) و (ب) ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای اعداد وبر مختلف، $\theta = 0$, $H = 0.2$, $\beta = 0.1$, $\alpha = 0$ و $We = 224$ (الف) $Wi = 100$ و (ب) $Wi = 1000$ ۱۰۳
- شکل ۳-۴۱: شکل تاج در اعداد وبر مختلف در $t^* = 4$ برای $\theta = 0$, $H = 0.2$, $\alpha = 0$ و $\beta = 0.5$ و $Bo = 1/6$ ۱۰۵
- شکل ۳-۴۲: تاثیر ضخامت لایه سیال بر زاویه تاج $\theta = 0$, $H = 0.2$, $\alpha = 0$ و $\beta = 0.5$ و $Bo = 1/6$ ۱۰۶

- شکل ۳-۴۳: تغییرات زمانی (الف) شعاع تاج (R^*) و (ب) ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای اعداد ضرایب تحرک مختلف،
 $\theta = 0.2, H = 224, We = 0.5, \beta = 1/6$ و $Bo = 107$ ۱۰۷
- شکل ۳-۴۴: شکل تاج در ضرایب تحرک مختلف در $t^* = 4$ برای $\theta = 0, H = 224, We = 0.5, \beta = 1/6$ و $Bo = 108$ ۱۰۸
- شکل ۳-۴۵: شکل تاج در اعداد بوند مختلف در $t^* = 4$ برای $\theta = 0, \beta = 0.5, H = 0.2$ و $We = 224$ ، (الف)
 $Wi = 100$ و (ب) $Wi = 1000$ ۱۰۹
- شکل ۳-۴۶: تغییرات زمانی متغیرهای تاج با عدد وایزنبرگ به ازای $H = 0.2, \beta = 0.1$ و $We = 400$ ۱۱۰
- شکل ۳-۴۷: شکل تاج در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 3/55$ برای $\theta = 30, \beta = 0.1, H = 0.2$ و $We = 400$ و $\alpha = 0$ ۱۱۱
- شکل ۳-۴۸: توزیع تنش در تاج در لحظه $t^* = 3/55$ برای $H = 0.2, \beta = 0.1, We = 400$ و $\theta = 30$ ، (الف) $Wi = 10$ ،
 (ب) $Wi = 100$ و (ج) $Wi = 1000$ ۱۱۲
- شکل ۳-۴۹: شکل تاج در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 3/55$ برای $\theta = 30, \beta = 0.1, H = 0.2$ و $We = 400$ و $\alpha = 0$ ۱۱۳
- شکل ۳-۵۰: توزیع تنش در تاج در لحظه $t^* = 3/55$ برای $Wi = 1000, \beta = 0.1, We = 400$ و $H = 0.2$ ، (الف) ۱۵
 $\theta = 30$ و (ب) $\theta = 45$ ۱۱۴
- شکل ۳-۵۱: تغییرات زمانی متغیرهای تاج با نسبت ویسکوزیته (β) به ازای $Wi = 1000, H = 0.2, We = 400$ و
 $\alpha = 0$ ۱۱۵
- شکل ۳-۵۲: توزیع اتلافات ویسکوز (Φ) در لحظه $t^* = 0.53$ به ازای $Wi = 1000, H = 0.2, We = 400$ و $\theta = 15$
 ۱۱۶
- شکل ۳-۵۳: اثر نسبت ویسکوزیته (β) بر شکل تاج در لحظه $t^* = 3/55$ به ازای $Wi = 1000, H = 0.2, We = 400$ و
 $\theta = 30$ ۱۱۶
- شکل ۳-۵۴: تغییرات زمانی متغیرهای تاج با عدد وبر به ازای $H = 0.2, \beta = 0.1$ و $Wi = 1000$ و $\alpha = 0$ ۱۱۷
- شکل ۳-۵۵: اثر عدد وبر (We) بر شکل تاج در لحظه $t^* = 3/55$ به ازای $Wi = 1000, H = 0.2, \beta = 0.1$ و $\theta = 30$
 ۱۱۸
- شکل ۳-۵۶: توزیع تنش در تاج در لحظه $t^* = 3/55$ برای $Wi = 1000, \beta = 0.1, \theta = 30$ و $H = 0.2$ ، (الف) ۲۰۰
 (ب) $We = 400$ و (ج) $We = 800$ ۱۱۹
- شکل ۳-۵۷: تاثیر عدد وبر بر زاویه دیواره‌های تاج $\theta = 30, H = 0.2, \alpha = 0, Wi = 1000, \beta = 0.1$ و $Bo = 1/6$ ۱۲۰
- شکل ۳-۵۸: تغییرات زمانی متغیرهای تاج با ثابت اختلاف تنش نرمال اول به ازای $H = 0.2, We = 400$ و $\theta = 30$ ۱۲۱

- شکل ۳-۵۹: توزیع اندازه اختلاف تنش نرمال اول برای $\beta = 0.1$ ، $\theta = 0$ و $H = 0.2$ ، $We = 400$ (الف) $Re = 100$
- ۱۲۲ $Re = 200$ (ج) و $Re = 150$ (ب)،
- شکل ۳-۶۰: طرحواره برخورد قطره بر لایه سیال در حالت تقارن محوری ۱۲۴
- شکل ۳-۶۱: تغییرات شکل تاج در لحظات مختلف در مدلسازی تقارن محوری ۱۲۵
- شکل ۳-۶۲: تغییرات زمانی (الف) شعاع تاج (R^*)، (ب) ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف، ۱۷۵
- ۱۲۷ $We = 400$ و $Bo = 1/6$ ، $\beta = 0.1$ ، $H = 0.2$ ، $Re = 175$
- شکل ۳-۶۳: تغییرات بیشینه ارتفاع تاج با عدد وایزنبرگ $Re = 175$ ، $H = 0.2$ ، $\beta = 0.1$ و $Bo = 1/6$ و $We = 400$
- شکل ۳-۶۴: شکل تاج در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 2/8$ برای $Re = 175$ ، $H = 0.2$ ، $\beta = 0.3$ و $Bo = 1/6$ و $We = 400$
- ۱۲۸ $Wi = 100$ (ج) و $Wi = 10$ (ب)، $Wi = 1$ (الف)، $We = 400$
- شکل ۳-۶۵: توزیع تنش برشی در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 2/8$ برای $Re = 175$ ، $H = 0.2$ ، $\beta = 0.1$ و $Bo = 1/6$
- و $We = 400$ (الف) $Wi = 1$ ، (ب) $Wi = 10$ و (ج) $Wi = 100$ ۱۲۹
- شکل ۳-۶۶: تغییرات زمانی شعاع (R^*) و ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای ضخامت‌های مختلف لایه سیال، $Re = 175$ ، $\beta = 0.1$
- و $Bo = 1/6$ و $We = 544$ (الف) $Wi = 1$ ، (ب) $Wi = 100$ ۱۳۰
- شکل ۳-۶۷: شکل تاج و توزیع سرعت در ضخامت‌های مختلف لایه سیال در $t^* = 2/8$ برای $Re = 175$ ، $Wi = 100$
- ۱۳۱ $H = 0.3$ (ج) و $H = 0.25$ (ب)، $H = 0.2$ (الف)، $We = 544$ و $Bo = 1/6$ ، $\beta = 0.3$
- شکل ۳-۶۸: توزیع فشار در ضخامت‌های مختلف لایه سیال در $t^* = 0.1$ برای $Re = 175$ ، $Wi = 100$ ، $\beta = 0.3$ و $Bo = 1/6$
- و $We = 400$ (الف) $H = 0.2$ ، (ب) $H = 0.25$ و (ج) $H = 0.3$ ۱۳۲
- شکل ۳-۶۹: تغییرات بیشینه ارتفاع تاج با عدد وایزنبرگ و ضخامت لایه سیال $Re = 175$ ، $\beta = 0.1$ و $Bo = 1/6$ و $We = 544$
- ۱۳۳ We
- شکل ۳-۷۰: توزیع کسر حجمی سیال و نسبت تروتون در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 1/6$ به ازای $Re = 175$ ، $\beta = 0.1$
- ۱۳۴ $We = 400$ و $Bo = 1/6$ ، $\beta = 0.1$
- شکل ۳-۷۱: تغییرات زمانی شعاع (R^*) و ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای تغییرات نسبت ویسکوزیته، $Re = 175$ ، $Bo = 1/6$ و $We = 400$
- ۱۳۶ $We = 400$
- شکل ۳-۷۲: تغییرات بیشینه ارتفاع تاج با نسبت ویسکوزیته $Re = 175$ ، $H = 0.2$ ، $Bo = 1/6$ و $We = 400$ ۱۳۷
- شکل ۳-۷۳: توزیع تنش برشی و نسبت تروتون در نسبت ویسکوزیته مختلف در $t^* = 1/6$ به ازای، $Wi = 1$ ، $H = 0.2$
- ۱۳۸ $We = 400$ و $Bo = 1/6$
- شکل ۳-۷۴: اثر نسبت ویسکوزیته (β) بر شکل تاج در لحظه $t^* = 2/8$ به ازای $Wi = 100$ ، $H = 0.2$ و $We = 400$ ۱۳۸
- شکل ۳-۷۵: تغییرات زمانی شعاع (R^*) و ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای اعداد وبر مختلف، $Re = 175$ ، $Bo = 1/6$ و $\beta = 0.3$
- ۱۴۰

- شکل ۳-۷۶: تغییرات بیشینه ارتفاع تاج با عدد وبر $Re = ۱۷۵$ ، $H = ۰/۲$ ، $Bo = ۱/۶$ و $We = ۴۰۰$ ۱۴۱
- شکل ۳-۷۷: اثر عدد وبر بر شکل تاج در لحظه $t^* = ۲/۸$ به ازای $Wi = ۱۰۰$ ، $H = ۰/۲$ و $\beta = ۰/۳$ (الف) $We = ۲۰۰$ ،
 (ب) $We = ۴۰۰$ و $We = ۸۰۰$ ۱۴۲
- شکل ۳-۷۸: مقایسه نتایج درحالات مختلف مدلسازی عددی و تجربی ۱۴۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: خواص فیزیکی سیالات ۵۴
- جدول ۲-۲: طیف زمانهای رهایی از تنش و ویسکوزیته برای سیالات ویسکوالاستیک B1 و B2 ۵۷
- جدول ۱-۳: مولفه‌های تنش (Pa) برای شبکه‌های مختلف در $t^* = 3/6$ برای مسئله دو- بعدی صفحه‌ای ۸۳
- جدول ۲-۳: اندازه تنش (Pa) برای شبکه‌های مختلف در $t^* = 3/2$ برای مسئله دو- بعدی تقارن محوری ۸۵

فهرست علائم

علائم انگلیسی

Bo	عدد بوند
D	قطر قطره، m
D	تانسور نرخ برش، s^{-1}
F	نیروی حجمی، $kg.m.s^{-2}$
g	شتاب گرانش، $m.s^{-2}$
h	ضخامت لایه سیال، m
H	ضخامت بدون بعد لایه سیال
p	فشار، $kgm^{-1}s^{-2}$
S	طول پخش، m
S^*	طول پخش بدون بعد قطره
Re	عدد رینولدز
t	زمان، s
t^*	زمان بدون بعد
v	سرعت، $m.s^{-1}$
We	عدد وبر
Wi	عدد وایزنبرگ
Z	ارتفاع تاج، m
Z^*	ارتفاع بدون بعد تاج

علائم یونانی

β	نسبت ویسکوزیته
ϕ	کسر حجمی سیال

η ویسکوزیته سیال، $\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$

λ زمان رهایی از تنش، s

θ زاویه برخورد

ρ چگالی، kg.m^{-3}

σ ضریب کشش سطحی، kg.s^{-2}

τ تنش، $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$

ψ اختلاف تنش، $\text{kgm}^{-2}\text{s}^2$

زیرنویس

L چپ

s حلال

p پلیمر

R راست

فصل ۱: مقدمه

در مطالعه‌ی حاضر، شبیه‌سازی عددی و بررسی آزمایشگاهی پدیده برخورد قطره بر روی لایه نازکی از سیال در سیالات غیر نیوتنی (سیالات ویسکوالاستیک) صورت پذیرفته است. پدیده برخورد سیال بر روی سطوح از جمله موضوعات جذاب و چالش‌برانگیز در علم مکانیک سیالات به شمار می‌رود. نقش سیالات در پدیده‌های طبیعی موجود در زندگی روزمره و به‌عنوان عاملی تأثیرگذار در کاربردهای صنعتی بر کسی پوشیده نیست. بهره‌گیری از خواص سیالات در زمینه‌های گوناگون موجب شده است تلاش‌های مضاعفی جهت شناخت ویژگی‌های این‌گونه مواد صورت پذیرد. در این میان جریان سیالات غیر نیوتنی در علم مکانیک سیالات از اهمیتی ویژه برخوردار است. کاربردهای فراوان سیالات ویسکوالاستیک در فناوری، صنعت و نمونه‌هایی عینی در پیرامون ما نشان‌دهنده لزوم توجه به این نوع سیالات در پیشبرد دانش مکانیک سیالات شده است.

پدیده برخورد قطره یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین فرایندهای موجود در صنایعی همچون چاپ جوهرافشان، پاشش رنگ، برخورد قطرات مایع به پره‌های توربین، برخورد قطرات سوخت بر دیواره محفظه احتراق، پوشش دهی و خنک کاری توسط اسپری، اسپری پلاسما و اتمیزه کردن مایعات به شمار می‌رود. در طبیعت نیز می‌توان به فرسایش سنگ‌ها و برخورد قطرات باران به سطح زمین و بال‌های هواپیما اشاره کرد. قطرات امکان برخورد بر روی سطوح خشک، لایه نازک سیال و یا حتی استخری از سیال را دارند. همچنین در اغلب کاربردها قطرات پس از برخورد به سطوح خشک، یک لایه نازک از سیال بر روی سطح جامد تشکیل می‌شود که متعاقباً سطح تر جایگزین سطح خشک در پدیده برخورد می‌شود. در کلیه حالات برخورد سبب پخش^۱ قطرات یا پاشش تعداد بی‌شمار قطرات کوچک به خارج از ناحیه برخورد می‌شود. در بسیاری از کاربردها کنترل وقایع ناشی از برخورد

¹ Spreading

حیاتی است. به عنوان نمونه نحوه پخش قطرات در فرایند پوشش دهی^۱ یا پرینترهای جوهرافشان مطلوب است در حالی که پدیده پاشش امکان بهبود بازدهی تبخیر و پدیده اختلاط در محفظه‌های احتراق می‌شود.

فصل اول این مطالعه با معرفی مفاهیم پایه و مرور مختصری از فیزیک پدیده برخورد قطرات بر روی سطوح تر آغاز می‌گردد. همچنین در این فصل مروری بر مطالعات عددی و تجربی انجام شده در این زمینه ارائه شده است. در فصل دوم مبانی مدلسازی و تحلیل آزمایشگاهی آورده شده است. در این فصل روش عددی به کار رفته در این پژوهش و همچنین معادلات حاکم بر جریان سیال معرفی شده و در ادامه روش انجام مطالعه آزمایشگاهی به صورت مفصل شرح داده شده است. در فصل سوم نتایج مطالعه تجربی و عددی به ازای متغیرهای موجود در مسئله آورده شده است و نتایج به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار داده شده است.

۱-۱- پدیده برخورد

برخورد قطرات بر روی سطوح جامد و مایع، در بسیاری از پدیده‌های طبیعی، زیستی و صنعتی قابل مشاهده است و در بسیاری از کاربردهای صنعتی نیز قابل مشاهده است. علاوه بر کاربردهای ذکر شده در قسمت قبل در بسیاری از فرایندهای صنعتی همچون آنیل کردن^۲، فرایند کوئینچینگ^۳ آلیاژهای آلومینیوم و فولاد، اطفاء حریق^۴ توسط آب‌پاش، موتورهای احتراق داخلی، کوره‌های زباله‌سوزی^۵ و سم‌پاشی^۶ محصولات کشاورزی اشاره کرد. ساخت مواد با سطوح سازمان‌یافته در ابعاد میکرو جهت استفاده در بردها و مدارهای الکتریکی موجود در تجهیزات میکروالکترونیک، همچنین اتمیزه کردن و خالص کردن مایع و تشکیل یخ بر روی خطوط انتقال برق نیز برخورد قطره را در بر می‌گیرند. این پدیده در پزشکی قانونی، در توسعه سطوح آب‌گریز و آب‌دوست، در فعال‌سازی یا غیرفعال کردن زیرلایه‌ها با دقت بالا توسط قطرات در ابعاد میکرو، در انتقال آلاینده‌های سطحی به

¹ Coating

² Annealing

³ Quenching

⁴ Fire suppression

⁵ Incinerators

⁶ Crop spraying

داخل مایعات حجیم و در به دام انداختن گاز اهمیت پیدا کرده است. درک پدیده‌های فیزیکی جهت فرمول-بندی روابط حاکم بر این پدیده از اهمیت بسزایی برخوردار است.

با وجود تحقیق در سالیان متمادی در زمینه پدیده برخورد، درک کاملی از پدیده برخورد صورت نگرفته است و همچنان مطالعات فراوانی در علوم مختلف فیزیک، مهندسی و ریاضیات کاربردی در حال انجام است. پدیده-های توأم با این پدیده بسیار متنوع، پیچیده و حیرت‌انگیز است. در لحظه‌ی برخورد، قطره ممکن است با توجه به نوسانات و اغتشاشات موجود دارای هندسه‌های کروی و بیضوی 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 (به عنوان مثال یک پلیمر ویسکوالاستیک^۱ و یا یک محلول سورفاکتانت^۲). مایعات مربوط به قطره، استخر یا فیلم سیال ممکن است مخلوط شدنی یا مخلوط ناشدنی باشند. سطح جامد می‌تواند سخت یا نرم و از نظر شیمیایی همگن و یا ناهمگن باشد. این سطح ممکن است متخلخل، تخت، منحنی شکل و در دمای متفاوت و یا مشابه دمای قطره‌ی مورد نظر باشد. امواج موجود و یا ایجاد شده بر روی سطح سبب تأثیرگذاری بر روی الگوی جریان می‌شوند. در پدیده برخورد، قطره امکان پخش شدن روی سطح جامد، جمع شدن^۳ و جهش^۴ گردد؛ و در صورت وجود تبخیر در نزدیکی دیواره به اندازه کافی داغ سبب معلق ماندن قطره بر روی سطح بر اثر پدیده لیدن فراست^۵ می‌شود. در برخورد قطره به سطوح به عواملی همچون سرعت برخورد، جهت برخورد، اندازه قطره، خواص سیال (چگالی، لزجت، ویسکوالاستیسیته) و یا رفتار پیچیده سیالات خاص، نوع سطح از نظر رطوبت پذیر بودن، کشش سطحی و زبری بستگی دارد.

¹ Viscoelastic polymer

² Surfactant solution

³ Receding

⁴ Rebounding

⁵ Leidenfrost

مطالعه برخورد قطرات مایع بر روی سطوح جامد و مایع، از زمان توسعه و پیشرفت در فناوری عکاسی با سرعت بالا [۱، ۲] دانشمندان در علوم مختلف و همچنین عکاسان را مجذوب خود کرده است. با توجه به بهبود این تکنیک‌ها [۳، ۴] و اهمیت و جایگاه 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 با وجود پیشرفت در این زمینه، این موضوع نیازمند تحقیق بیشتری است. به طور کلی فرایند برخورد قطره به یک لایه نازکی از سیال، یک جریان دو یا چند فازی است. تقابل بین فازهای گازی و مایع سبب بروز و ایجاد مجموعه‌ای از وقایع مختلف در سطح آزاد سیال می‌شود. هنگامی که یک قطره به سطح آزاد یک سیال برخورد می‌کند، امکان تولید قطرات دیگر وجود دارد. توانمندی مهندسين در مدل‌سازی دقیق سیستم‌های گاز-مایع دوفازی که شامل کلیه وقایع ذکر شده می‌باشد، تأثیرات فراوانی در رویه طراحی و کاهش هزینه‌های آزمایش و طراحی مجدد نمونه‌های اولیه را دارد.

بسیاری از آزمایش‌ها [۳، ۵-۱۲] نشان‌دهنده این موضوع است که برخورد قطره به لایه‌ی نازک سیال و یا سطح خشک با توجه به خواص فیزیک شیمیایی قطره و سطح جامد بسیار متفاوت است. در صورت برخورد قطره به سطح جامد، یک لایه دایروی بر روی سطح تشکیل و تا رسیدن به بیشینه قطر مشخص در جهت شعاعی گسترش می‌یابد. در صورتی که قطره سطح را تر نکند دوباره جمع شده و در طول این فرایند قطره رفتارهای متفاوتی همچون جمع شدن، جهش و یا پخش شدن را از خود نمایش می‌دهد. پدیده‌ها مختلفی همچون شناوری قطره^۱، بازگشت^۲، جذب^۳ توسط لایه سیال و پاشش^۴ در اثر برخورد قطره با لایه‌ای از سیال امکان‌پذیر است که در صورت برخورد قطره با سرعت‌های بالاتر بر روی لایه‌ی نازکی از سیال، سبب ایجاد پدیده پاشش می‌شود. در این حالت برخورد قطره سبب ایجاد شکلی شبیه تاج^۵ شده که متشکل از لایه نازکی از سیال

¹ Floating

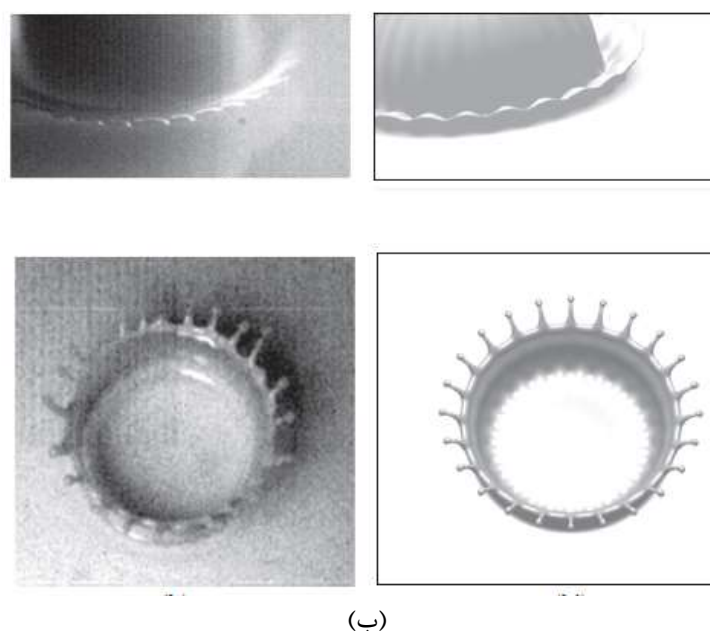
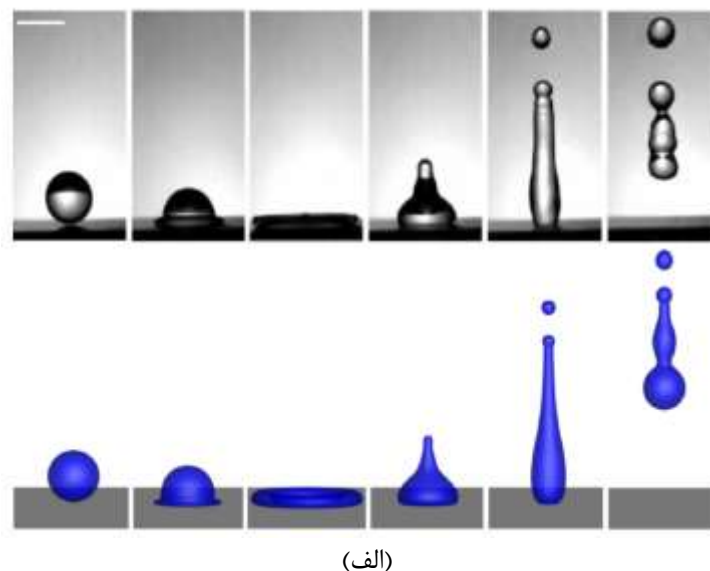
² Bouncing

³ Absorption (Coalescence)

⁴ Splash

⁵ Crown

به همراه لبه‌ی آزاد ناپایدار در بالای آن می‌باشد که تعداد زیادی قطرات ثانویه از آن خارج می‌شود (مطابق شکل ۱-۱).

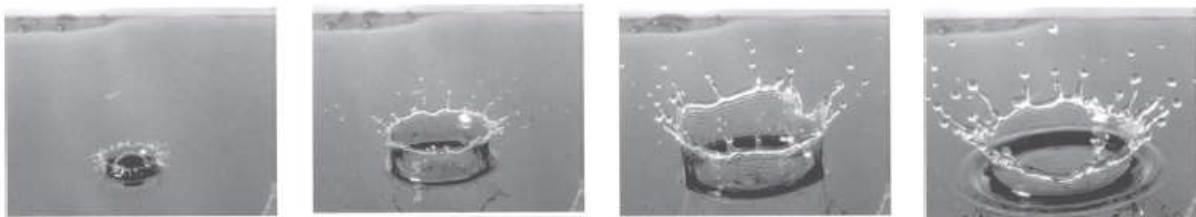


شکل ۱-۱: مشاهدات آزمایشگاهی و عددی در پدیده برخورد قطره بر سطوح، (الف) خشک [۱۳]، (ب) تر [۱۴].

ورتینگتون [۱] از محققان پیشرو در زمینه بررسی پدیده برخورد است. او توسط یک تحلیل آزمایشگاهی نشان داد که سقوط قطره نیوتنی بر روی سطح ساکن دارای سیال یکسان، سبب ایجاد مجموعه‌ای از پدیده‌های

مختلف می‌شود که در تصویر ۱-۲ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، تشکیل تاج ناشی از پدیده پاشش در نتیجه مجموعه‌ای از رویدادهای پیچیده است. در ابتدا لایه استوانه‌ای از سیال در جهت قائم بر لایه سیال خارج می‌شود که یک دیواره‌ی ضخیم را تشکیل می‌دهد. در ادامه تقارن استوانه‌ای موجود توسط ناپایداری خطی از بین می‌رود و ضخامت دیواره‌ی تشکیل شده به صورت تناوبی تغییر می‌کند. سپس با رشد ناپایداری‌ها، رأس دیواره گسترش یافته و سبب پدیدار شدن فواره‌هایی از سیال می‌شود. تاج تشکیل شده در این مرحله ناپایدار است و در حضور اغتشاشات و ناپایداری رایلی^۱ تاج تشکیل شده شکسته شده و در انتهای آن قطرات ثانویه‌ای تولید می‌شوند. در واقعیت، وقوع هر یک یا چند مورد از مراحل ذکر شده به ساختارهای متفاوت موجود در گستره متغیرهای کنترلی بستگی دارد.

مطالعات فراوانی در زمینه پدیده برخورد قطره بر روی سطوح تر و خشک صورت گرفته است. با توجه به این مطالعات، پارامترهای مختلفی در توصیف این پدیده موجود است. آزمایش‌ها فراوانی نشان دهنده این موضوع است که کشش سطحی سبب مهار پدیده پاشش در برخورد قطره به سطوح خشک و تر می‌شود. همچنین تحقیقات دیگر بیانگر این موضوع است که لزجت سیال در برخورد قطره به سطوح خشک سبب افزایش پاشش قطرات ثانویه شده در حالی که تأثیر لزجت سیال در برخورد قطره به سطوح تر سبب کاهش تولید قطرات ثانویه در پدیده پاشش می‌شود [۱۵].



شکل ۱-۲: مشاهدات آزمایشگاهی در پدیده پاشش قطره [۶]

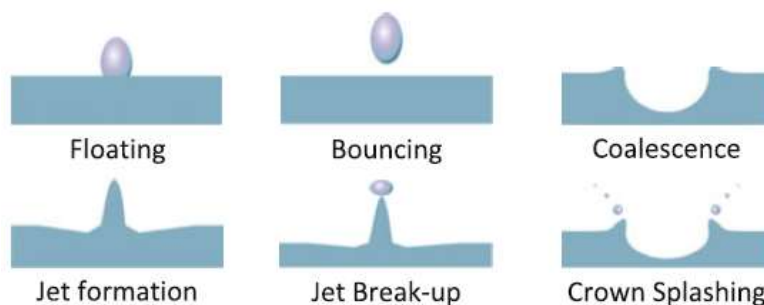
¹ Rayleigh

۱-۲- مروری بر تحقیقات گذشته

مطالعه پدیده برخورد بر روی سطوح از دیرباز مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته بوده است و تاکنون پژوهش‌های فراوانی در این موضوع انجام گرفته است. در بخش حاضر به معرفی اجمالی تعدادی از مطالعات صورت گرفته در این موضوع بسنده شده است. در ابتدا مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیشین بر روی این پدیده برای سیالات نیوتنی مورد بررسی گرفته و در ادامه مروری بر تحقیقات گذشته برای این پدیده در سیالات غیرنیوتنی آورده شده است.

۱-۲-۱- مطالعات در زمینه سیالات نیوتنی

ورتینگتون [۱۶] در سال ۱۹۰۸ جزء محققان پیشرو در زمینه مطالعه پدیده برخورد است و تألیفاتش حاوی عکس‌های شگفت‌انگیز از پدیده برخورد قطره و گلوله جامد به استخری از سیال است. برخلاف سادگی موضوع و ۱۰۰ سال تحقیق، درک دقیقی و کاملی از این پدیده صورت نگرفته است و بسیاری از دانشمندان علوم مختلف مجذوب این پدیده هستند. غالب مطالعات صورت گرفته در پدیده برخورد، مربوط به سقوط قطرات آب در سیال هوا است [۱۷، ۱۸]. نتایج مطالعات گذشته بیانگر این موضوع است که پارامترهایی همچون اینرسی برخورد، کشش سطحی و زاویه برخورد در پدیده برخورد اثرگذار است و پدیده‌ها مختلفی همچون شناوری قطره، بازگشت، جذب توسط لایه سیال و پاشش در اثر برخورد امکان پذیر است [۹، ۱۹-۲۱] (مطابق شکل ۱-۳). پارامتر کنترلی مهم در دینامیک برخورد قطره بر روی لایه سیال عدد وبر است $(We = \rho u^2 d / \sigma)$.



شکل ۱-۳: حالات مختلف برخورد قطره به لایه سیال [۹]

پدیده شناوری قطره هنگامی رخ می‌دهد که انرژی برخورد بسیار کوچک باشد و قطره توانایی شکاف لایه گاز میان قطره و لایه سیال را ندارد. با افزایش عدد وبر در پدیده برخورد حالت دیگری قابل مشاهده است که قطره بر روی لایه سیال دچار پرش یا بازگشت شده و در حالات خاص نیز قطره دچار جذب جزئی^۱ توسط لایه سیال شده و قطره‌ای کوچکتر بر روی لایه سیال بازگشت پیدا می‌کند. با افزایش بیشتر در عدد وبر حالت جذب و یکنواختی قطره و لایه سیال قابل مشاهده است. این یکنواختی سیال و قطره اغلب با ایجاد شکاف در مکان برخورد و بر روی لایه سیال همراه است. در این رژیم هیچ یک از حالات شکست جت سیال و تولید قطرات ثانویه رخ نخواهد داد. در صورت افزایش عدد وبر به اندازه کافی، پدیده پاشش در اثر برخورد رخ خواهد داد که این پدیده خود به سه دسته اصلی مختلف ۱- پاشش تاج، ۲- پاشش جت و ۳- محبوس شدن قطرات تقسیم بندی می‌شود.

مطالعات گسترده‌ای در زمینه برخورد مستقیم صورت پذیرفته است [۲۲، ۲۳] که بیانگر این موضوع است که در اعداد وبر بزرگ پدیده‌های جذب و گذار به پاشش رخ می‌دهد و در حالی که در مقادیر کوچک عدد وبر پدیده بازگشت مشاهده می‌شود [۵].

پن و لا [۲۴] توسط یک تحلیل آزمایشگاهی و عددی دینامیک برخورد قطره به فیلم سیال یکسان با تأکید بر گذار از رژیم بازگشت قطره به رژیم جذب توسط لایه سیال را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این تحلیل به ازای اعداد وبر مختلف و ضخامت‌های مختلف لایه سیال صورت پذیرفته است. در این مطالعه، نتایج آزمایشگاهی بیانگر این است که رژیم بازگشت به ازای اعداد وبر کوچک رخ می‌دهد و رژیم جذب در مقادیر بزرگ عدد وبر رخ می‌دهد. در شکل ۱-۴ هر یک از رژیم‌های بازگشت، جذب جزئی و جذب را شاهد هستیم. همچنین نتایج این مطالعه نشان دهنده این موضوع است که در ضخامت‌های بسیار کوچک ($H = h / R \ll 1$) و نزدیک به یک ($H = h / R \approx 1$) لایه سیال، پدیده جذب تسهیل پیدا می‌کند و در محدوده خاصی از عدد وبر (با توجه

¹ Partial absorption

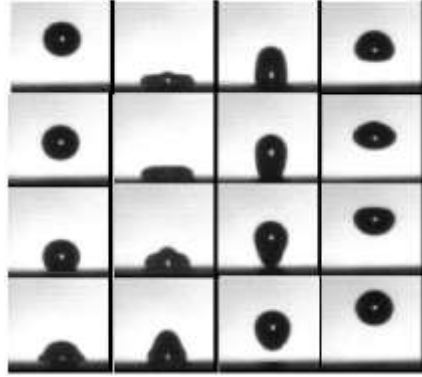
به شکل ۱-۵) افزایش ضخامت لایه سیال سبب بروز پاسخ‌های متفاوت و تکراری از پدیده برخورد هستیم (جذب ← بازگشت ← جذب ← بازگشت). جذب جزئی از دیگر حالاتی است که در پدیده برخورد قطره به لایه سیال اتفاق می‌افتد که در این رژیم قطره ثانویه با قطر کوچکتر از قطره اولیه از سطح جدا می‌شود که این رخداد برای قطرات بزرگ، $H \approx 1$ و در محدوده کوچک گذار بین پدیده بازگشت و جذب کامل اتفاق می‌افتد. در مطالعه پن و لا [۲۴] تحلیل عددی توسط تکنیک ردگیری جبهه^۱ صورت گرفته و با توجه به این در رژیم-های جذب و بازگشت جریان الگوی تقارن محوری دارد مدلسازی به صورت دوبعدی تقارن محوری انجام شده است. همچنین در گذار بین بازگشت و جذب مطالعات فراوانی توسط تانگ و همکاران [۲۵، ۲۶] صورت گرفته است و نمودارهای تغییرات رژیم بازگشت به جذب به ازای عدد وبر و ضخامت مختلف لایه سیال آورده شده است. همچنین در این مطالعات اثرات متغیرهای مختلفی همچون ویسکوزیته بر پی‌آمد برخورد مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج بیانگر این موضوع است که ناحیه رژیم جذب برای سیالات با ویسکوزیته بیشتر کوچکتر و رژیم جذب جزئی برای ویسکوزیته‌های خیلی بزرگ ناپدید می‌شود.

در گذار بین پدیده‌های پخش و پاشش در پدیده برخورد بر روی سطح جامد مطالعات فراوانی صورت گرفته است [۱۸، ۲۷، ۲۸] که از این مطالعات رابطه‌ی تجربی سامرفیلد^۲ بر حسب عدد وبر و عدد رینولدز به صورت زیر گزارش شده است.

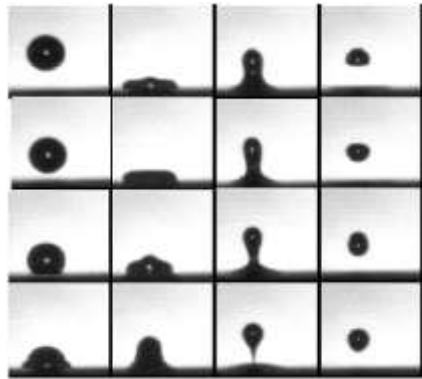
$$K = We^{\frac{1}{2}} Re^{\frac{1}{4}} \quad (۱-۱)$$

^۱ Front-tracking

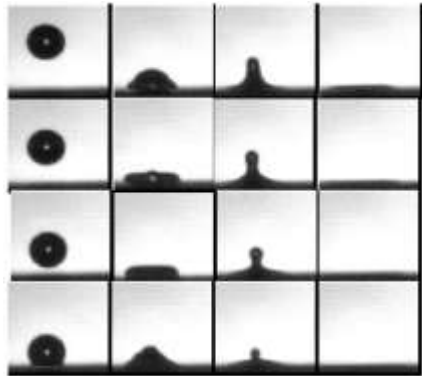
^۲ Sommerfeld



(الف)



(ب)



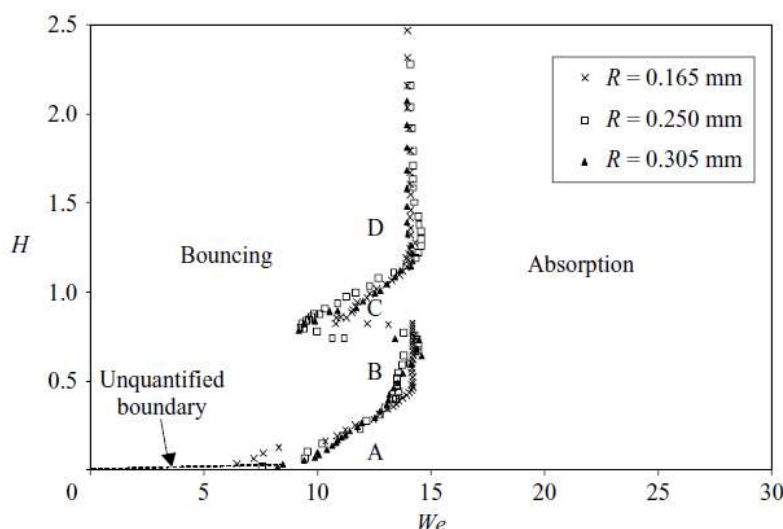
(ج)

شکل ۱-۴: توالی برخورد قطره با لایه سیال [۲۴].

(الف) بازگشت ($R = 278\mu m$, $V = 0.702ms^{-1}$, $h_f / R = 0.096$, $We = 9.32$)،

(ب) جذب جزئی ($R = 283.5\mu m$, $V = 0.733ms^{-1}$, $h_f / R = 0.099$, $We = 8.61$) و

(ج) جذب ($R = 289\mu m$, $V = 0.756ms^{-1}$, $h_f / R = 0.096$, $We = 9.32$)



شکل ۱-۵: نمودار رژیم‌های مختلف موجود در پدیده برخورد قطره به لایه سیال در اعداد وبر کوچک [۲۴]

در رابطه (۱-۱) هنگامی که متغیر K کوچکتر از مقدار حدی K_C باشد پدیده پخش به تنهایی قابل مشاهده است و در حالی که برای مقادیر $K > K_C$ پدیده پاشش به تنهایی رخ خواهد داد. مقدار پیش‌بینی شده برای حالت حدی به صورت تقریبی برابر با $K_C \approx 50$ است که مقدار دقیق این متغیر به زبری سطح جامد و ضخامت لایه سیال وابسته است.

جزراند و زالسکی [۲۹] یک مطالعه عددی جهت پیش‌بینی گذار بین پدیده پاشش و جذب ارائه کرده‌اند. در این مطالعه معادلات تراکم ناپذیر ناویر-استوکس به همراه کشش سطحی در حالت تقارن محوری حل و از روش حجم سیال جهت ردگیری سطح مشترک سیال و هوا استفاده شده است. نتایج ارائه شده انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایش‌ها و مطالعات عددی گذشته دارد. در این مطالعه بیان شده است که پدیده پاشش برای اعداد وبر و رینولدز بزرگ رخ خواهد داد و ویسکوزیته سیال در پدیده پاشش نقش مهمی را ایفا می‌کند.

در مطالعه یارین [۳۰] جهت تمایز بین پدیده پاشش و غیر پاشش رابطه زیر ارائه شده است:

$$K = We \cdot Oh^{-0.4} \quad (۲-۱)$$

که در این رابطه اثر ضخامت لایه سیال در نظر گرفته نشده است. در مطالعه‌ای دیگر توسط کوسالی و همکاران [۶] اثر ضخامت لایه در گذار بین پدیده پاشش و غیرپاشش در نظر گرفته شده است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$We \cdot Oh^{-0.4} = 2100 + 5880H^{1.44} \quad (3-1)$$

که این رابطه برای ضخامت‌های بدون بعد $0.1 < H < 1$ و بازه اعداد اهنسبرگ $Oh > 7 \times 10^{-3}$ برقرار است. با این وجود برای لایه‌های بسیار نازکی از سیال ($H < 0.1$)، اثر ضخامت لایه سیال بر روی شروع پدیده پاشش نامعلوم است. مطابق مطالعه ریویو و همکاران [۸] برای $H < 0.06$ ، ضخامت لایه سیال می‌تواند بر روی پارامتر K تأثیرگذار باشد و در حالی که برای بازه $0.06 < H < 0.14$ مقدار پارامتر K ثابت و برابر ۲۱۰۰ است. همچنین در مطالعه اکاوا و همکاران [۱۰] نیز بیان شده است که مقدار ثابت K برابر ۲۱۰۰ است. وندروالس و همکاران [۱۲] با تحقیق بر روی شروع پدیده پاشش، رابطه‌ای بر حسب عدد رینولدز و اهنسبرگ برای حالت گذار به پدیده پاشش به صورت زیر ارائه کردند.

$$Oh \times Re^{1.17} = 63 \quad (4-1)$$

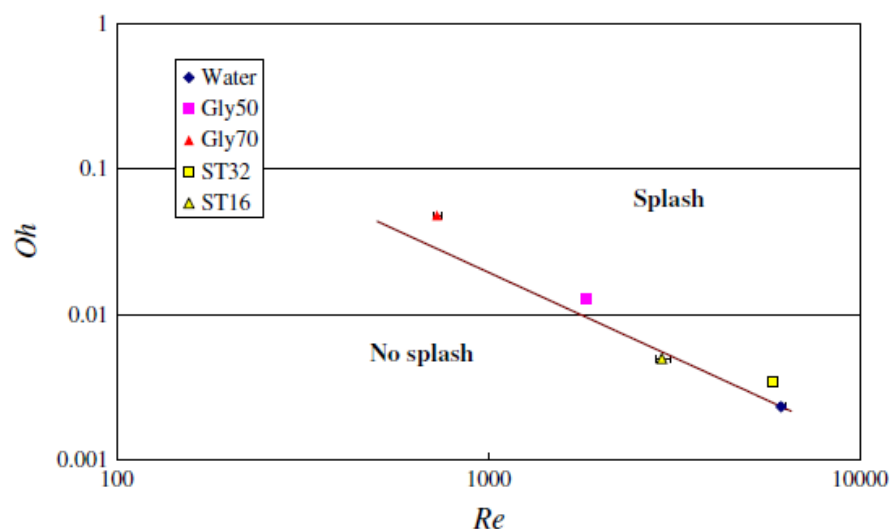
اسدی و پسندیده‌فرد [۳۱] با استفاده از برازش منحنی بر روی داده‌های حاصل شده از حل عددی رابطه‌ی زیر را برای وقوع پدیده پاشش معرفی نموده‌اند که این رابطه برای بازه اعداد اهنسبرگ $0.0018 < Oh < 0.0026$ برقرار است و همچنین این رابطه برای $H < 0.1$ به ضخامت لایه سیال حساس نبود.

$$We = 790(1 - e^{-24Oh}) \quad (5-1)$$

پن و هونگ [۳۲] به صورت تجربی مرز بین رژیم‌های مختلف جریان که در اثر برخورد قطره به سطوح دارای لایه نازک سیال ایجاد می‌شود را مطالعه کردند. در این مطالعه با استفاده از افزودن درصدی حجمی مختلف از گلیسرین، تأثیرات ویسکوزیته سیال در پدیده برخورد تحقیق شده است و همچنین با افزودن سورفاکتانت^۱ اثر

¹ Surfactant

تغییرات کشش سطحی در رژیم برخورد مورد مطالعه قرار گرفته شده است. نتایج این مطالعه بیانگر این حقیقت است که افزایش ویسکوزیته سبب تأخیر در وقوع گذار بین رژیم‌های مختلف می‌شود، در حالی که کاهش کشش سطحی سبب تسریع در وقوع گذار می‌شود. بنابراین در این مطالعه اظهار شده است که استفاده از افزودنی جهت تغییر در پدیده برخورد، تغییرات زیادی را در خصوصیات ماده ایجاد نمی‌کند. همچنین به عنوان مهم‌ترین نتیجه این تحقیق به این نکته می‌توان اشاره کرد که عدد وبر به تنهایی برای تفسیر این پدیده پیچیده کافی نیست و پارامترهای دیگری همچون عدد کپیلاری^۱ و اوهنسرگ که دربردارنده ویسکوزیته سیال می‌باشند جهت شناسایی بیشتر رفتارهای عمومی پدیده برخورد لازم است. با توجه به مطالعه پن و هونگ [۳۲]، در شکل ۶-۱ حد شروع پدیده پاشش برای چند نوع سیال متفاوت آورده شده و رابطه موجود برای این مرز ارائه شده است. در مطالعه وندروالس و همکاران [۱۲] این مرز توسط رابطه (۴-۱) بیان شده است. با توجه به این رابطه رژیم جریان به اعداد بدون بعد رینولدز و اهنسرگ وابسته است. شکل ۶-۱ بیانگر این موضوع است که وقوع پاشش دارای یک الگوی کلی است و در صورت ترکیب سیال آب با دیگر افزودنی‌ها و سورفاکتانت‌ها این الگو برقرار است و با رابطه موجود در مطالعه وندروالس و همکاران [۱۲] سازگار است.



شکل ۶-۱: حد شروع پدیده پاشش برای سیالات مختلف در اعداد رینولدز و اهنسرگ مختلف به ازای $H \approx 3/9$ [۳۲]

^۱ Capillary

در تحقیقات اولیه (۱۹۵۴) صورت گرفته در پدیده پاشش، ادرتون و کیلان [۲] نقش نیروهای اینرسی و کشش سطحی در سیال را بسیار حیاتی در نظر گرفته و ضرورت استفاده از دوربین‌های سرعت بالا جهت مشاهده زیبایی این پدیده را الزامی دانسته‌اند.

اوگز و پروسپرتی [۳۳] با فرض اینکه میدان جریان دارای تقارن محوری و غیرچرخشی است یک پتانسیل سرعت جهت ارضاء معادله لاپلاس تعریف کردند. آن‌ها با استفاده از روش عددی انتگرال مرزی و تکنیک‌های پایدار کننده حل عددی، به این نتیجه رسیدند که برخورد قطره بر سطح سیال سبب به دام انداختن حباب‌های هوا در محل برخورد می‌شود. همچنین این محققان دریافتند که محدوده متغیری که سبب بروز پدیده به دام افتادن حباب‌های هوا می‌شود بسیار محدود بوده و امکان وقوع این پدیده نسبتاً اندک است.

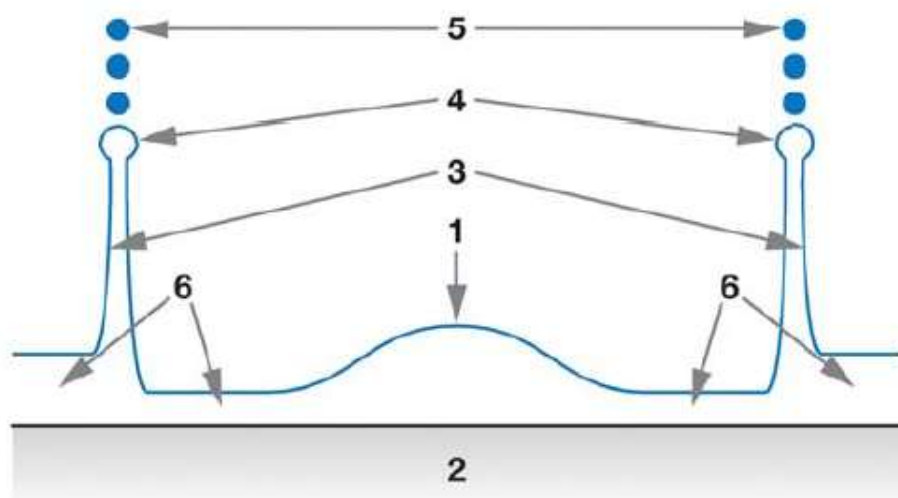
در تحقیقات مربوط به مسئله برخورد یک قطره بر روی لایه‌ای از سیال توسط کوسالی و همکاران [۶]، وانگ و چن [۷] و ریوبو و همکاران [۸]، تشکیل تاج (پدیده پاشش) در سرعت‌های برخورد به اندازه کافی بزرگ ثبت شده است. طرحواره‌ای از مکانیزم پدیده پاشش در شکل (۷-۱) ارائه شده است. همچنین جزئیات اطلاعات تجربی از پدیده پاشش و نحوه تشکیل جت‌ها و قطرات ثانویه در مرجع [۱۵] آورده شده است.

در پدیده پاشش هنگام تشکیل تاج، تغییرات شعاع و ارتفاع تاج با زمان یکی از مهم‌ترین متغیرهای موجود است. این رفتار تاج توسط دو متغیر بدون بعد R^* و Z^* مشخص می‌شود که این دو متغیر به صورت زیر تعریف می‌شوند.

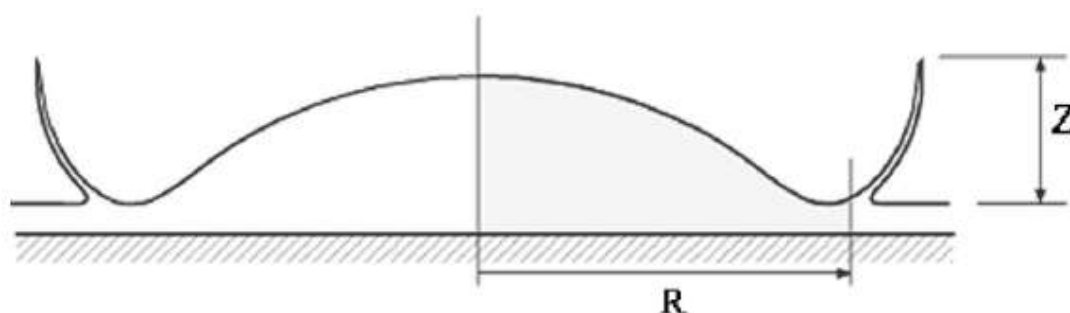
$$R^* = \frac{R}{D} \quad (۶-۱)$$

$$Z^* = \frac{Z}{D} \quad (۷-۱)$$

در این رابطه R بیانگر شعاع تاج و Z معرف ارتفاع تاج است (با توجه به شکل ۸-۱).



شکل ۱-۷: طرحواره مکانیزم پاشش [۲۷]: ۱- باقیمانده قطره در حال برخورد، ۲- دیواره، ۳- برشی از صفحه تاج
شکل، ۴- برشی از لبه آزاد، ۵- قطرات ثانویه تشکیل شده از لبه آزاد و ۶- لایه سیال بر روی دیواره



شکل ۱-۸: طرحواره متغیرهای تاج [۳۴]

یارین و ویس [۲۷] یک مدل تحلیلی شبه یک‌بعدی برای تغییر شکل تاج با در نظرگیری انتشار ناپیوستگی سینماتیک در سرعت و ضخامت لایه سیال در یک محیط غیرقابل تراکم ارائه نموده‌اند. سرعت اولیه این ناپیوستگی سینماتیک توسط سرعت برخورد قطره تقریب زده شده است. آن‌ها رابطه‌ی زیر برای وابستگی شعاع R^* پایه تاج با زمان را بدست آورده‌اند.

$$R^* = C (t^* - t_0^*)^n \quad (۸-۱)$$

که در این رابطه $n = 0.5$ ، $C = U_0^{\frac{1}{2}} / \left(6^{\frac{1}{4}} \pi^{\frac{1}{2}} \nu^{\frac{1}{8}} D_0^{\frac{1}{4}} f^{\frac{3}{8}} \right)$ و $t^* = t U_0 / D_0$ است. در این رابطه برخورد

قطرات با فرکانس منظم در نظر گرفته شده است که f فرکانس برخورد قطره و t_0^* با زمان تشکیل تاج تقریب زده می‌شود. دقت این رابطه توسط مقایسه با داده‌های تجربی برای تشکیل تاج به هنگام برخورد قطرات اتانول به یک لایه نازک سیال ارزیابی شده است. ارتباط تغییرات شعاع پایه تاج (R^*) با ضخامت لایه سیال (H) به صورت $R^* = (2/3)^{1/4} (1/H^{1/4}) (t^* - t_0^*)$ بیان می‌شود. فروپاشی تاج توسط ناپایداری‌های موجود در لبه سیال تفسیر می‌شود.

برای برخورد یک قطره بر روی لایه سیال موجود از قبل، لوین و هابز [۳۵] به کمک تحلیل آزمایشگاهی رابطه‌ی زیر با ۱۰٪ برآورد بیشتر را پیشنهاد داده‌اند.

$$R^* = \left(\frac{2}{3} \right)^{1/4} \frac{U_0^{1/2}}{D_0^{1/4} H^{1/4}} (t^* - t_0^*)^{1/2} \quad (9-1)$$

جزراند و زالسکی [۲۹] نیز توسط یک مطالعه عددی مبتنی بر روش حجم سیال نشان دادند که تغییرات شعاع پایه تاج (R^*) با زمان به صورت توانی و شبیه به نتایج تحلیلی موجود در مطالعه یارین و ویس [۲۷] (رابطه (۸-۱)) است.

تروجیلو و لی [۳۶] روش تحلیلی موجود در مطالعه یارین و ویس [۲۷] جهت در نظرگیری اثر اتلافات ویسکوز را تعمیم دادند. در این مطالعه نتایج نشان‌دهنده غلبه اینرسی سیال در تشکیل و گسترش تاج است و ویسکوزیته تأثیر اندک بر روی میدان جریان دارد و همچنین نتایج بیانگر این است که نرخ افزایش R^* با افزایش عدد رینولدز (Re) کاهش می‌یابد که با پیش‌بینی‌های آن‌ها [۲۷] سازگار است.

رویسمن و تروپا [۳۷] مطالعه موجود در مطالعه یارین و ویس [۲۷] جهت محاسبه توزیع سرعت در ناحیه برخورد را برای حالات غیر تقارن محوری و اعداد وبر بزرگ تعمیم داده‌اند. همچنین در این مطالعه شکل کلی و

ضخامت دیواره تاج برای هر یک از برخوردهای قائم و مایل قطره بر لایه سیال مورد بررسی قرار داده شده است. روابط مربوط به شعاع R^* و ارتفاع تاج Z^* با استفاده از پایداری جرم و مومنتوم و رابطه‌ی برنولی در پایه تاج حاصل گردیده است. در این تحلیل فرض شده است که تاج بالا رونده توسط لایه سیال در بالا محصور شده و شرط فروپاشی تاج توسط روش در نظرگرفته یارین و ویس [۲۷] به دست آمده است. همچنین در این مطالعه (رویسمن و تروپا [۳۷]) از روش ذکر شده جهت مدل‌سازی تقابل تاج‌های ناشی از پدیده پاشش در برخورد دو قطره در همسایگی یکدیگر استفاده شده است.

کوسالی و همکاران [۱۵] رفتار زمانی شعاع، ارتفاع، ضخامت تاج و اندازه قطرات ثانویه تشکیل شده ناشی از برخورد قطره بر روی دیواره تر را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. آن‌ها با در نظر گرفتن مقادیر 0.29 ، 0.67 و 1.13 برای ضخامت لایه سیال (H)، محدوده اعداد وبر (We) $297-842$ ، محدوده اعداد رینولدز (Re) $910-15366$ و عدد اهنسبرگ (Oh) 0.019 ، نشان دادند که تغییرات شعاع پایه تاج R^* با رابطه تحلیلی موجود در رابطه (۱-۸) سازگار است. با این وجود کوسالی و همکاران [۱۵] دریافتند که به صورت میانگین مقدار n برابر با 0.43 بوده و هر یک از متغیرهای n و C به ضخامت لایه سیال (H) وابسته نمی‌باشند. نتایج این مطالعه نشان دهنده این موضوع است که ارتفاع تاج با افزایش عدد وبر افزایش یافته و ضخامت تاج با زمان افزایش می‌یابد و ضخامت تاج مستقل از تغییرات ضخامت لایه سیال و سرعت برخورد است. همچنین برای اعداد وبر بزرگ اندازه قطرات ثانویه با زمان افزایش می‌یابد و از طرف مقابل برای اعداد وبر کوچک اندازه قطرات ثانویه مستقل از زمان است.

در مطالعات عددی، ویس و یارین [۳۸] با کمک روش انتگرال مرزی^۱ و در حالت تقارن محوری مسئله برخورد قطره به دیواره تر را با چشم‌پوشی از اثرات ویسکوزیته و تراکم‌پذیری مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج حاصل شده در این مطالعه برای شعاع پایه تاج (R^*) انطباق خوبی با نتایج حاصل از رابطه‌ی (۱-۴) دارد. آن‌ها

¹ Boundary-integral method

مشاهده نمودند که به دام افتادن حباب‌های کوچک هوا در لایه عمیق سیال فقط در سرعت‌های پایین رخ می‌دهد. همچنین در این مطالعه بیان شده است که در لایه‌های نازک سیال برخورد با سرعت بالا سبب ایجاد تاج می‌شود که در صورت انحراف تاج به سمت خارج و برخورد با لایه سیال سبب به دام افتادن حباب‌هایی از هوا می‌شود. در این مطالعه مقدار عدد وبر بحرانی برای تشکیل تاج در حالتی که ضخامت لایه سیال $H = 0.125$ باشد، در حدود ۱۰۰ به دست آمده است و برای اعداد وبر کوچکتر پدیده تشکیل تاج مشاهده نمی‌شود.

ریبر و فرون [۳۹] به کمک روش عددی حجم سیال (VOF) تغییر شکل تاج ناشی از برخورد قطره بر روی لایه سیال را به صورت سه‌بعدی مورد تحقیق قرار داده‌اند. در این مطالعه نسبت چگالی و ویسکوزیته دو فاز به ترتیب برابر ۱۰۰۰ و ۴۰ در نظر گرفته شده است. هدف از این تحقیق بررسی ناپایداری لبه آزاد تاج است که سبب تشکیل انگشتی و قطرات ثانویه می‌شود. وجود اغتشاشات تصادفی در میدان اولیه سرعت قطره و لایه سیال سبب فروپاشی تاج و به تبع آن سبب تشکیل قطرات ثانویه می‌شود و در حالت عدم وجود این اغتشاشات فروپاشی تاج قابل مشاهده نمی‌باشد. آن‌ها ناپایداری رایلی را به عنوان مکانیزم محرک در بروز فروپاشی در تاج معرفی کردند. همچنین نتایج مطالعه عددی آن‌ها حاکی از تابعیت گسترش شعاعی دیواره تاج با ضخامت لایه سیال و زمان است که مطابق با مطالعات گذشته در این زمینه است.

نیکولوپولوس و همکاران [۴۰] در یک مطالعه عددی به کمک روش حجم محدود برخورد قطره به صورت قائم بر روی لایه سیال را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه از فرمول‌بندی تقارن محوری معادلات ناویر-استوکس به همراه روش حجم سیال جهت ردیابی سطح مشترک میان میدان دو فازی مایع-گاز استفاده شده است. نتایج بیانگر این است که برش موجود در گردابه‌های تشکیل شده در فاز گازی در نزدیکی لبه تاج سبب تشکیل و جدا شدن قطرات ثانویه می‌شوند. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در مراحل اولیه برخورد ویسکوزیته اثر قابل توجهی بر میدان جریان ندارد و از طرف مقابل افزایش در ویسکوزیته فاز گاز سبب افزایش گرایش جهت فروپاشی در تاج می‌شود. دقت نتایج این مطالعه بیانگر این موضوع است که روش حجم سیال

توانایی بالایی در پیش‌بینی و مدل‌سازی پدیده‌ها در مقیاس کوچک همچون به دام افتادن حباب^۱ و امواج موینگی^۲ دارد.

وندروالس و همکاران [۱۲] آزمایش‌ها متعددی برای پدیده برخورد قطره بر روی سطوح تر برای سیالات با خواص مختلف انجام داده‌اند. این آزمایش‌ها به ازای ضخامت‌های مختلف لایه سیال انجام گرفته شده است و آن‌ها گزارش داده‌اند که برای سطوح خشک یا پوشیده شده با لایه سیال، کشش سطحی بزرگ سبب مهار پدیده پاشش می‌شود. در این تحلیل همچنین بیان شده است که در برخورد بر روی سطح خشک، ویسکوزیته سبب تقویت پدیده پاشش و از طرف مقابل برای قطره برخوردی بر روی لایه نازک سیال نقش ویسکوزیته معکوس است. در این مطالعه بین دو نوع مختلف پاشش سریع^۳ و پاشش کند^۴ تمایز قائل شده است. در پاشش سریع خروج قطرات از لبه تاج با رشد آن همراه است. در حالی که در پاشش کند تشکیل قطرات ثانویه از لبه تاج به هنگام رسیدن تاج به بیشینه اندازه خود رخ خواهد داد.

در زمینه تأثیر کشش سطحی بر روی اندازه تاج، فوجیموتو و همکاران [۴۱] در یک مطالعه تجربی و عددی برخورد یک قطره بر روی یک قطره نیم کروی ساکن را بررسی کردند و مشاهده کردند در اثر این برخورد الگوی تاجی شکل در پایین قطره برخورد تشکیل می‌شود و نشان دادند که کشش سطحی نقش مهمی در جلوگیری از رشد تاج دارد و با کاهش کشش سطحی، ضخامت تاج کاهش یافته و در صورتی که ارتفاع تاج و قطر آن افزوده می‌شود.

در زمینه تعداد و اندازه قطرات ثانویه، دیویدسون [۴۲] توسط یک تحلیل عددی به کمک روش انتگرال مرزی دریافت که با افزایش کشش سطحی تعداد قطرات ثانویه کاهش و اندازه متوسط آن‌ها افزایش پیدا می‌کند. این تحلیل با در نظر گرفتن تقارن محوری صورت گرفته است و جریان غیر لزج فرض شده و اثرات کشش

¹ Bubble entrapment

² Capillary waves

³ Prompt splashing

⁴ Delayed splashing

سطحی و جاذبه در نظر گرفته شده است. متزکوس و همکاران [۴۳] توسط یک تحلیل آزمایشگاهی اثرات پارامترهای مختلف همچون خواص سیالات (ویسکوزیته و کشش سطحی مایع-گاز)، خواص قطره برخوردی (سرعت و قطر قطره) و ضخامت لایه سیال را در انتشار ذرات تولیدی توسط برخورد قطره را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها بیانگر این است که افزایش سرعت و قطر قطره با کاهش در ضخامت لایه سیال سبب افزایش در میانگین تعداد قطرات ساطع شده از برخورد می‌شود که محدوده اندازه آن‌ها بین ۲ تا ۵۰ میکرومتر است. به علاوه از این مطالعه شاهد کاهش شدید در تعداد متوسط ذرات جدا شده از سطح با افزایش ویسکوزیته هستیم.

اسدی و پسندیده‌فرد [۳۱] و اسدی و پناهی [۴۴] در یک مطالعه عددی دوبعدی و تقارن محوری به کمک روش حجم محدود و با استفاده از روش حجم سیال (VOF) جهت مدل‌سازی مرز بین مایع و گاز، پدیده برخورد قطره بر روی سطح سیال را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان دهنده این است که فرایند دینامیکی پس از برخورد به شدت به سرعت اولیه و عمق لایه سیال وابسته است. برای اعداد وبر مختلف و ضخامت‌های مختلف لایه سیال بیشینه ارتفاع تاج محاسبه شده است. همچنین در این مطالعه عدد وبر بحرانی که به ازای آن پدیده پاشش رخ می‌دهد گزارش شده است که در رابطه (۲-۵) آورده شده است. در این مطالعه عدد وبر بحرانی حساس به ضخامت لایه سیال است و مقدار آن با کاهش عدد اهنس‌رگ و ویسکوزیته سیال کاهش می‌یابد.

کاپولا و همکاران [۴۵] برخورد قطره دوبعدی در لحظات اولیه و میانی بر روی لایه سیال یکسان را به صورت عددی و با حل معادلات سطح آزاد ناویر-استوکس (روش حجم سیال) مدل‌سازی کرده‌اند. در این پژوهش، دو هدف اصلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد؛ ۱- فهم جدید در مورد مکانیزم‌های اولیه ناشی از برخورد، ۲- بررسی تشابه و اعتبار میان مدل‌های دوبعدی و تقارن محوری است. از نتایج حاصله این مفهوم قابل درک است که در

عین سادگی تحلیل دوبعدی، در مراحل اولیه برخورد نتایج به ازای این فرض دقت قابل قبولی با نتایج مدل تقارن محوری دارد.

لی و همکاران [۴۶] توسط روش تعیین سطح به صورت عددی برخورد قطره سیال بر روی لایه سیال نازک افقی را مورد مطالعه قرار دادند. این تحلیل با فرض تقارن محوری صورت گرفته شده است و نتایج انطباق قابل قبولی با نتایج تجربی در مراحل اولیه تشکیل تاج دارد و همچنین نتایج به علت حل دوبعدی تقارن محوری دارای اختلاف اندکی با نتایج گذشته است. آن‌ها اظهار داشتند که اثر ویسکوزیته در مرحله تشکیل تاج ناچیز است و همچنین در ویسکوزیته‌های بزرگ، ارتفاع تاج کوچک بوده و تاج سریع‌تر از بین می‌رود. ژو و همکاران [۴۷] در یک تحلیل عددی دوبعدی تقارن محوری دیگر، با استفاده از روش ترکیبی حجم سیال و تعیین سطح^۱ (CLSVOF) تأثیر پارامترهای مختلفی همچون ضخامت لایه سیال و سرعت برخورد را در برخورد قطره بر روی لایه سیال ارزیابی کردند. با توجه به نتایج این روش عددی، پدیده به دام افتادن حباب به خوبی مدل‌سازی شده است و همچنین افزایش سرعت برخورد در بردارنده ظهور سریع‌تر پدیده پاشش است و قطر گسترش ناحیه برخورد با ضخامت لایه سیال رابطه عکس دارد.

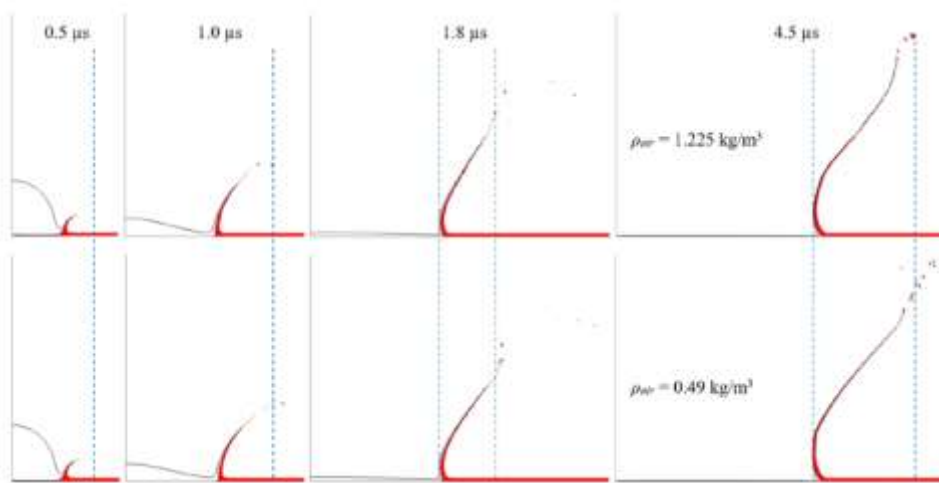
برامبیلا و همکاران [۴۸] با توسعه نرم‌افزار این فوم^۲ برخورد قطره بر روی لایه سیال را به صورت تقارن محوری و سه‌بعدی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه عملیات اصلاح تطبیقی شبکه^۳ در حلگر نرم‌افزار جهت حصول نتایج دقیق در لحظات اولیه برخورد بهبود بخشیده شده است و یک رویه جدید برای ارزیابی همگرایی شبکه معرفی شده است.

^۱ Combined level set and VOF

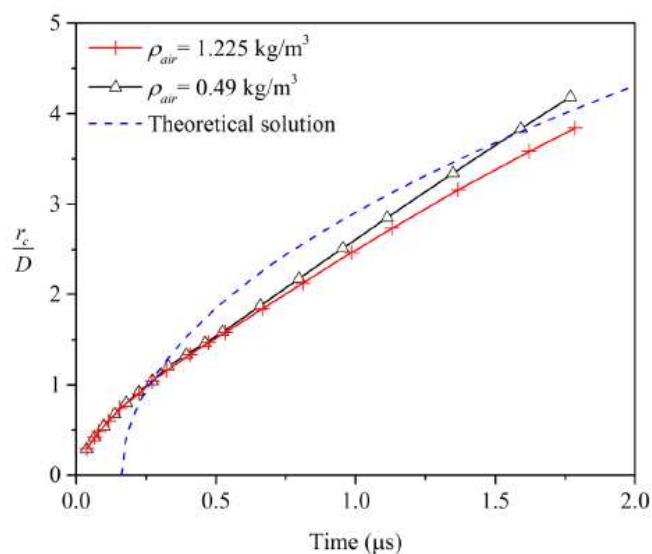
^۲ OpenFOAM

^۳ Adaptive grid refinement

ژو و همکاران [۱۳] در یک مطالعه عددی تأثیر هوای محیط بر روی برخورد قطره بر روی سطوح خشک و تر با سرعت‌های بالا را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه معادلات ناویر-استوکس از روش تصویر چگالی



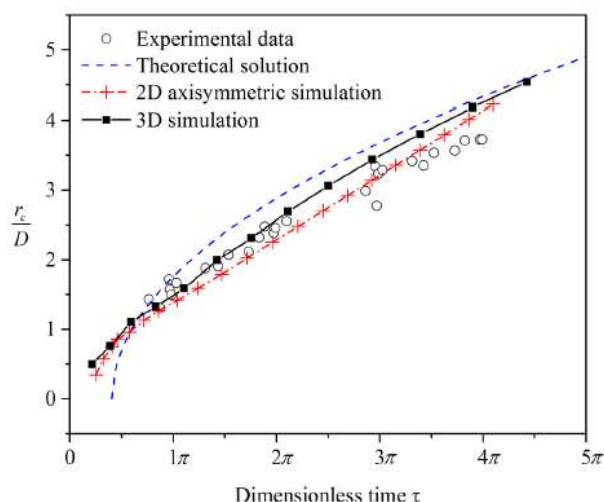
(الف)



(ب)

شکل ۱-۹: تأثیر هوا محیط بر پدیده برخورد [۱۳]. (الف) مقایسه برخورد قطره بر روی لایه سیال به ازای چگالی مختلف هوا، (ب) مقایسه شعاع پایه تاج برای چگالی‌های مختلف هوا با نتایج تئوری.

متغیر فشار حل شده است. در این تحقیق اشاره شده است که هوای محیط تأثیر به سزایی بر پدیده پاشش بر روی سطح تر ندارد (مطابق شکل ۹-۱). همچنین در این مطالعه برای برخورد قطره اتانول بر لایه‌ای از همان سیال، تغییرات شعاع لبه تاج با زمان آورده شده است. مطابق شکل ۱۰-۱ نتایج حاصل از مطالعه عددی برای



شکل ۱۰-۱: مقایسه شعاع لبه تاج در برخورد قطره اتانول بر لایه سیال [۱۳]

تحلیل سه بعدی و دوبعدی تقارن محوری با نتایج تئوری و داده‌های آزمایشگاهی مطابقت قابل قبولی دارد. در سال‌های اخیر با توجه به رشد روش‌های عددی، مطالعات فراوانی در زمینه پدیده برخورد صورت گرفته است که در ادامه به معرفی این پژوهش‌ها پرداخته می‌شود.

یوان و همکاران [۴۹] توسط روش شبکه بولتزمن به صورت سه بعدی پدیده برخورد قطره بر روی لایه سیال را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه از روش شبکه بولتزمن تک فاز برای مدل‌سازی جریان مایع با سطح آزاد غیر قابل امتزاج استفاده شده است که در این روش حرکت فاز گازی قابل چشم پوشی است و مرز بین فازهای گاز-مایع توسط روش‌های محاسباتی پربازده و پایدار ردگیری می‌شود. در این مطالعه هر یک از رژیم‌ها جذب شدن، تشکیل تاج و پاشش بدست آمده و نتایج حاصله دقت قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی گذشته داشته است. در مطالعات دیگر [۵۵-۵۰] با استفاده از روش شبکه بولتزمن دینامیک برخورد قطره (یا

قطرات) بر روی لایه سیال در میدان دوبعدی مورد ارزیابی قرار داده شده است که نتایج این مطالعات به ازای زمان‌های اولیه برخورد با نتایج مطالعات گذشته سازگار است.

زی و همکاران [۵۶] مدل‌سازی برخورد یک قطره بر روی لایه سیال را توسط روش شبه ضمنی ذرات متحرک (MPS) انجام داده‌اند. این تحلیل به صورت دوبعدی و اثرات جاذبه، ویسکوزیته و کشش سطحی در معادلات لحاظ شده است. نتایج برای محلول آب- گلیسرین و به ازای ضخامت‌های نازک و ضخیم لایه سیال و همچنین اعداد وبر مختلف ارائه شده است که نشان دهنده وابستگی شدید دینامیک برخورد به ضخامت لایه سیال و سرعت اولیه قطره است. همانند مطالعه یارین و ویس [۲۷]، در این تحلیل تغییرات شعاع تاج با زمان دارای یک رابطه توانی شبیه به رابطه (۱-۸) است. جیانگ و همکاران [۵۷] کلیه فرایندهای دینامیکی برخورد قطره بر روی لایه سیال، از جمله توالی تشکیل تاج را به صورت عددی توسط روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) مدل‌سازی کردند. در این تحلیل دوبعدی اثرات جاذبه، ویسکوزیته و کشش سطحی در نظر گرفته شده است و نتایج حاصل از این روش ذره محور انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی قبل دارد و همانند مطالعه دیویدسون [۴۲] بیان شده است که دینامیک کلی این پدیده به شدت به عمق لایه سیال و سرعت اولیه قطره بستگی دارد. در تحقیقی دیگر توسط یانگ و همکاران [۵۸] برخورد هر یک از قطرات از جنس اتانول، سوخت دیزل و آب بر روی سطوح خشک و تر را نیز توسط روش هیدرودینامیک ذرات هموار مدل‌سازی کردند. در این مطالعه نشان داده شده است که نتایج حاصله از این روش عددی انطباق قابل قبولی با مطالعات گذشته دارد و همچنین نتایج دربردارنده این موضوع است که با افزایش سرعت برخورد هر یک از متغیرهای بیشینه ارتفاع تاج و زمان تا رسیدن به بیشینه ارتفاع تاج افزایش می‌یابد.

در برخورد قطره بر روی سطوح مایل (یا برخورد مایل قطره به سطح)، برخورد قطره بر روی سیال جاری، سطوح منحنی شکل مطالعات زیر صورت گرفته شده است. لیانگ و همکاران [۵۹] با استفاده از روش‌های تجربی و تکنیک‌های عکس‌برداری سرعت بالا پدیده برخورد قطره بر روی دیواره مایل دارای لایه سیال را مورد

مطالعه قرار دادند و هر یک از فرایندهای پخش و پاشش را مشاهده نمودند. در این تحلیل زاویه برخورد قطره بین ۲۸ تا ۷۴/۷ درجه در نظر گرفته شده است و از محلول ۳۰٪ حجمی گلیسرین در آب، بوتانول و هپتان به عنوان سیال آزمایش استفاده شده است. چنگ و لو [۱۴] به صورت عددی برخورد قطره مایل بر دیواره تر دارای حرکت را به صورت سه بعدی و توسط روش شبکه بولتزمن مدل سازی کردند. در این مطالعه اثر زاویه برخورد بر تشکیل تاج و توسعه آن ارزیابی شد و نتایج بیانگر این است که به ازای زوایای بزرگتر از صفر برخورد پدیده پاشش غیرمستقر است. برامبیل و گواردون [۶۰] در یک تحلیل عددی همانند مطالعه برامبیل و همکاران [۴۸] از روش اصلاح تطبیقی شبکه در روش حجم سیال برای مدل سازی برخورد قطره مایل بر لایه سیال استفاده کردند. لیو و همکاران [۶۱] برخورد قطره دارای سرعت افقی بر روی لایه سیال را مورد مطالعه قرار دادند. این تحلیل عددی توسط روش شبکه بولتزمن و به صورت دوبعدی مدل سازی شده است و قطره تحت نیروی گرانش به لایه سیال برخورد می کند. نتایج این مطالعه به ازای اعداد وبر و بوند^۱ ($Bo = \rho g D^2 / \sigma$) مختلف و ضخامت های مختلف لایه سیال ارائه شده است.

مینگ و جینگ [۶۲] توسط روش شبکه بولتزمن دوفازی و به صورت سه بعدی مسئله برخورد قطره بر روی دیواره دارای حرکت را مدل سازی کردند. رامن و همکاران [۶۳] در مطالعه دیگر توسط روش شبکه بولتزمن، به صورت دوبعدی دینامیک ساختار تاج بر اثر برخورد دو قطره بر لایه ساکن و دارای حرکت سیال را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحلیل ها ذکر شده است که حرکت دیواره می تواند سبب بهبود یا غلبه بر پدیده پاشش می شود. ژائو و لی [۶۴] به صورت تجربی و تئوری برخورد قطره بر روی لایه سیال جاری بر روی سطح را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه مدل هایی تئوری برای پیش بینی رشد پایه تاج و نرخ رشد صفحه تاج ارائه شده است و همچنین متغیری بر حسب عدد رینولدز و وبر جهت پیش بینی مرز بین پدیده پاشش و غیر پاشش ارائه شده است.

¹ Bond

تأثیر انحنای لایه سیال بر پدیده تشکیل تاج و بازگشت قطره توسط لیانگ و همکاران [۶۵] به صورت تئوری و تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. با کاهش نسبت انحنای سطح به قطره، در ابتدا قطر تاج افزایش و سپس ثابت باقی می‌ماند. همچنین در این پژوهش آمده است که بازگشت قطره به ازای سرعت‌های پایین رخ می‌دهد و با توجه به پایداری انرژی فرایند بازگشت به صورت نظری بدست آمده است.

۱-۲-۲- مطالعات در زمینه سیالات غیرنیوتنی

در زمینه برخورد قطره غیرنیوتنی غیر الاستیک بر روی سطوح جامد مطالعات فراوانی صورت گرفته است [۶۶-۷۰]. همچنین در مطالعاتی اثر خواص الاستیک بر پدیده برخورد بر روی سطوح جامد مورد ارزیابی قرار گرفته شده است [۷۱-۷۳]. از طرف مقابل مطالعات اندکی در زمینه برخورد قطرات غیرنیوتنی بر روی سطح سیال موجود است که در ادامه این پژوهش‌ها آورده شده است.

چنی و والتر [۷۴] به صورت تجربی برخورد کره جامد و قطره بر روی استخری از سیال غیرنیوتنی را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش اثر افزودن غلظت کمی از پلیمرهایی با وزن مولکولی بالا همچون پلی‌اکریل-آمید^۱، صمغ زانتان^۲ و فیبر کربن به حلال آب بر روی پدیده برخورد مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. با توجه به نتایج این مطالعه، افزودنی‌های فوق سبب نفوذ کمتر گردابه‌های تشکیل شده ناشی از برخورد به لایه‌های پایینی از سیال می‌شود.

برخورد قطره بر روی لایه محلول سیال ویسکوالاستیک wormlike micelle به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از دوربین‌های عکس‌برداری سرعت بالا توسط لامپ و همکاران [۷۵] صورت پذیرفته است. در این مرجع اثر رئولوژیکی و ضخامت لایه سیال بر روی تشکیل و رشد تاج، تشکیل قطرات ثانویه و جت ورتینگتون مورد مطالعه قرار گرفته شده است. در این تحقیق با تغییر اندازه و سرعت قطره برخوردی، اهمیت نسبی اعداد

^۱ Polyacrylamide

^۲ Xanthan gum

بدون بعد و بر، اوهنسرگ و دبورا^۱ بر دینامیک برخورد مورد مطالعه قرار داده شده است. افزودن الاستیسیته لایه نازک سیال سبب جلوگیری از رشد تاج و تشکیل قطرات ثانویه می‌شود. آن‌ها همچنین برای ضخامت‌های بزرگ لایه سیال رابطه‌ای برای شروع پدیده پاشش معرفی کردند.

$$K = Oh^{-0.37} \cdot We \cdot De^{-1} \quad (10-1)$$

که به ازای ضخامت‌های بزرگ لایه سیال ($H > 1$)، مقدار این پارامتر $K \approx 21$ است.

با توجه به پیچیدگی مدل‌سازی جریان‌های دوفازی سیالات ویسکوالاستیک مطالعات اندکی در این زمینه صورت گرفته است که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها اشاره شده است.

تام و همکاران [۷۶] یک روش عددی جهت مدل‌سازی جریان‌های سطح آزاد ویسکوالاستیک دارای تقارن محوری برای سیال اولدریوید-بی^۲ ارائه نمودند. معادلات حاکم توسط روش اختلاف محدود بر روی شبکه از نوع نشانه و سلول^۳ حل شده است. اعتبارسنجی روش عددی حاضر توسط مسئله جریان در لوله، تزریق پلاستیک و سقوط قطره بر سطح سیال صورت پذیرفته است. تام و همکاران [۷۶] با مطالعه تأثیر اعداد رینولدز و وایزنبرگ مختلف (و صرف‌نظر از اثرات کشش سطحی) بر ارتفاع پاشش در اثر سقوط قطره نشان دادند که ارتفاع پاشش با افزایش رفتار ویسکوالاستیک کاهش می‌یابد. والتر و همکاران [۷۷] و همچنین تام و همکاران [۷۸] در یک مطالعه عددی دیگر تأثیر توابع رئومتریک در سیالات باگر بر روی خصوصیات برخورد قطره بر روی استخری از سیال را مورد مطالعه قرار دادند (با صرف‌نظر از اثرات کشش سطحی). در این مطالعات اظهار شده است که مقدار اندک خاصیت ویسکوالاستیک توانایی تأثیر فراوان بر رفتار جریان دارد و همچنین ویسکوزیته کشسانی بالا در محلول‌های پلیمری رقیق سبب کاهش در ارتفاع جت ورتینگتون می‌شود.

¹ Deborah

² Oldroyd-B

³ Marker-and-cell

ایزاساروو و همکاران [۷۹] یک حلگر سه بعدی برای سوسپانسیون‌های^۱ ذرات صلب، تغییر شکل پذیر و قطرات برای سیالات ویسکوالاستیک و الاستوویسکوپلاستیک^۲ ارائه کردند که با بهره‌گیری از روش‌های مختلف حد فاصل بین مرزهای مختلف را تعیین کردند. این حلگر برای حالات مختلف جریان تک فاز و دو فاز سیالات غیرنیوتنی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت.

محمد کریم [۸۰] دینامیک برخورد قطرات ویسکوالاستیک و نیوتنی غیرالاستیک بر سطح سیال غیرقابل امتزاج را به صورت آزمایشگاهی و توسط روش آشکارسازی سرعت بالا مورد مطالعه قرار داد. با توجه به نتایج این مطالعه مکانیزم برخورد قطرات غیرالاستیک و الاستیک متفاوت است. ناپایداری‌های محیطی در طول مرز تاج که در برخورد در سیالات غیرالاستیک مشهود است در سیالات الاستیک قابل مشاهده نیست. در این مطالعه تاثیر پارامترهای فیزیکی همچون عدد وبر بر رشد ناپایداری‌ها ارزیابی شده است. همچنین در این تحلیل نقش پایدارکنندگی الاستیسته در برخورد قطره با استفاده از عدد الاستوکپیلاری^۳ ($Ec = \lambda\sigma / \mu L$) بررسی شده است که این عدد برای سیالات غیرالاستیک ناچیز بوده و هر گونه اغتشاشات توانایی رشد و ناپایدار کردن سیال را دارند و از طرف مقابل این پارامتر برای سیالات ویسکوالاستیک چشمگیر بوده و سبب جلوگیری از هر گونه اغتشاش در سیال می‌شود. رضائی و همکاران [۸۱] تاثیر سیالات ویسکوالاستیک غیرخطی بر برخورد قائم قطره بر لایه سیال را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه با استفاده از روش حجم سیال و به کارگیری معادله ساختاری غیر خطی گزیکس برای سیال ویسکوالاستیک، تاثیر خواص الاستیک سیال بر دینامیک تشکیل و رشد تاج را بررسی کردند. نتایج بیانگر تاثیر مثبت الاستیسته سیال بر رشد هندسه تاج دارد.

¹ Suspension

² Elastoviscoplasti

³ Elastocapillary

۱-۳- جمع‌بندی

در بخش قبل مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل تجربی و مدل‌سازی عددی پدیده برخورد قطره بر سطح سیال در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی ارائه شد. جمع‌بندی تحقیقات صورت گرفته بیانگر این است که بررسی‌های تئوری، آزمایشگاهی و عددی قابل توجه‌ای برای سیالات نیوتنی در این زمینه صورت پذیرفته است و از طرف مقابل مطالعات آزمایشگاهی و عددی اندکی در زمینه برخورد بر سطوح سیال در شاخه سیالات غیر نیوتنی انجام شده است و همچنین با توجه به پیچیدگی‌های موجود در این نوع سیالات، ارائه حل دقیق تحلیلی نیز امکان‌پذیر نبوده است.

در نتیجه با مرور بر مطالعات موجود در این بخش، درک ضرورت مطالعه بیشتر این پدیده در حوزه سیالات غیر نیوتنی آشکار می‌شود. همچنین اندک مطالعات تجربی و آزمایشگاهی صورت گرفته در این زمینه و در شاخه سیالات ویسکوالاستیک، مربوط به حالات خاص و کاربردهای بسیار محدودی است و از طرف دیگر در مطالعات عددی صورت گرفته برای سیالات غیر نیوتنی نیز از اثرات کشش سطحی صرف‌نظر و تأثیر ضخامت لایه نازک سیال بر دینامیک برخورد قطره بر سطح آن بررسی نشده است. با توجه به مطالعات پیشین، بررسی تأثیر اعداد بدون بعد مختلف مربوطه و توابع رئولوژیک از جمله اختلاف تنش‌های نرمال نیازمند مطالعه بیشتر بوده و در این مطالعات عددی صرفاً استفاده از مدل‌های شبه‌خطی (اولدروید-بی) برای سیالات ویسکوالاستیک مورد توجه بوده است که ضرورت استفاده از مدل‌های غیرخطی پیچیده‌تری همچون گزیکس^۱ احساس می‌شود.

۱-۴- اهمیت و جایگاه پژوهش

بسیاری از سیالات موجود در صنعت و طبیعت دارای خواص غیر نیوتنی می‌باشند که از آن جمله می‌توان به رنگ‌ها، جوهرها، روغن‌ها، سوخت‌ها، مواد شوینده، داروها و به طور کلی محلول‌های پلیمری اشاره کرد. در این نوع مواد به علت وجود رابطه‌ی پیچیده بین تنش و نرخ برش، امکان بروز رفتارهای متفاوت قابل پیش‌بینی

¹ Giesekus

است. به همین دلیل بررسی رفتار این نوع از سیالات در جریان‌های دوفازی علی‌الخصوص پدیده برخورد از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

در موارد مختلفی همچون برخورد جوهر با سطوح، رنگ‌زنی یا پوشش‌دهی با اسپری و خنک‌کاری سطوح می‌توان شاهد ریزش و برخورد قطره روی سطوح جامد و سیال بود. در اثر افزودن مقدار اندکی سورفاکتانت زاویه تماس قطره و کشش سطحی تغییر کرده و می‌توان شاهد بروز رفتار غیر نیوتنی (ویسکوالاستیک) در سیالات در اثر افزودن سورفاکتانت‌ها باشیم. همچنین قابل ذکر است که مطالعه رفتار قطره حاوی سورفاکتانت در کنترل کیفیت هر یک از این فرایندها و افزایش راندمان آن‌ها مؤثر خواهد بود. به عنوان مثال در فرایند رنگ‌زنی می‌توان با اضافه کردن افزودنی‌هایی به رنگ میزان پاشش رنگ را کنترل نمود و از پاشش قطرات اضافی و ایجاد قطرات ثانویه که موجب کاهش کیفیت رنگ می‌شوند، جلوگیری نمود و همچنین زمان فرایند رنگ زدن را کاهش داد. در سیالات ویسکوالاستیک به علت وجود رفتار الاستیک در کنار خواص ویسکوز سیال شاهد بروز رفتارهای پیچیده و بعضاً متضادی خواهیم بود. این رفتار سبب کنترل پدیده پاشش در برخورد قطره می‌شوند که بررسی و مطالعه آن سبب کشف ارتباط بین الاستیسته سیال و پدیده برخورد می‌شود. به همین منظور اهمیت تحلیل عددی و آزمایشگاهی خواص الاستیک سیال بر برخورد قطره مهم ارزیابی می‌شود.

۱-۵- معرفی پژوهش حاضر

با توجه به موارد فوق، الاستیسته سیال توانایی اثرگذاری شگرفی بر مسائل و پدیده طبیعی و صنعتی را خواهد داشت که این خاصیت در کنار متغیرهای دیگری همچون ابعاد و سرعت حرکت قطره، کشش سطحی میان فازها و ضخامت لایه سیال بر دینامیک برخورد و تشکیل و رشد تاج مهم ارزیابی می‌شود. لذا با توجه به اهمیت این موضوع، در مطالعه حاضر تاثیرات خاصیت الاستیک سیال بر دینامیک تشکیل و رشد تاج به صورت عددی و آزمایشگاهی در رژیم غیرپاشش مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. پژوهش حاضر در دو فاز مطالعاتی انجام شده است.

• مطالعه آزمایشگاهی دینامیک برخورد قطره بر لایه سیال

در این بخش مطالعاتی دینامیک برخورد قطره بر لایه سیال به ازای سیالات نیوتنی و ویسکوالاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. برای این منظور از سیال ویسکوالاستیک باگر به عنوان سیال دارای خواص الاستیک استفاده شده است که دارای ویسکوزیته ثابت است و به صورت متناظر از سیال نیوتنی غیرالاستیک با ویسکوزیته معادل با سیال باگر نیز استفاده شده است. سیال باگر مورد استفاده در پژوهش حاضر از محلول آب-گلیسرین و پودر پلی اکریل آمید سنتز شده است و محلول نیوتنی صرفاً از مخلوط آب-گلیسرین با درصدهای جرمی مشخص بدست آمده است. به ازای پارامترهای مختلفی همچون اندازه قطره، ضخامت لایه سیال و سرعت‌های مختلف برخورد، مطالعات صورت گرفته و همچنین در پارامترهای یکسان اثر نیوتنی بودن و ویسکوالاستیک بودن سیال در مسئله حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته است که مهمترین نوآوری این بخش از مطالعه تجربی به شمار می‌رود.

• مطالعه عددی دینامیک برخورد قطره بر لایه سیال

در این مرحله از پژوهش مدلسازی عددی پدیده برخورد با استفاده از روش حجم محدود به منظور تکمیل نتایج تجربی و بررسی محدوده بیشتری از متغیرهای موجود صورت گرفته است. حل معادلات مربوط به جریان توسط نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم OpenFOAM و حلگر viscoelasticInterFoam انجام شده است. در تحلیل عددی مدلسازی در دو حالت دوبعدی صفحه‌ای و دوبعدی تقارن محوری صورت گرفته است که نتایج برای این دو حالت به تفصیل ارائه شده است. در تحلیل عددی حاضر تاثیرات پارامترهای بدون بعد وایزنبرگ، وبر، ضخامت لایه سیال و نسبت ویسکوزیته سیال بر هندسه تاج تشکیل شده مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. در مدلسازی عددی الگوها و روندهای رفتاری تاج تشکیل شده از برخورد قطره، به ازای پارامترهای بدون بعد ذکر شده ارائه و بررسی شده است که از نتایج مهم این فاز مطالعاتی به شمار می‌رود.

۱-۶- نوآوری

با توجه به بخش ۱-۲-۲ اندک مطالعات صورت گرفته در جریان‌های دوفازی برای این نوع از سیالات همراه با فرض‌های ساده کننده‌ای بوده که دربردارنده فیزیک پیچیده (وابستگی این پدیده به متغیرهای گوناگون همچون کشش سطحی، ضخامت لایه سیال و خواص الاستیک سیال) این مسئله نیست. به علت پیچیدگی شبیه‌سازی عددی جریان‌های دوفازی سیالات ویسکوالاستیک حل عددی این‌گونه مسائل با محدودیت‌های بسیاری روبرو است و از طرفی به علت حضور این نوع از جریان در کاربردهای متعدد توجه به این موضوع با اهمیت است. همچنین به علت لزوم تجهیزات آزمایشگاهی جدید و روزآمد، تحلیل آزمایشگاهی این پدیده مفید و ارزشمند است.

در همین راستا در تحقیق حاضر تاثیر برخورد قطره بر لایه نازک سیال در سیالات ویسکوالاستیک و متعاقباً تاثیر آن بر دینامیک تشکیل و رشد تاج به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است.

- برخلاف مطالعات گذشته در این تحلیل اثر نیروی کشش سطحی در کنار نیروی الاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است.

- در تحلیل آزمایشگاهی با ساخت سیال ویسکوالاستیک و سیال معادل نیوتنی آن تاثیر الاستیسیته سیال بر مسئله به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده شده است.

- با وجود تحقیقات عددی گسترده بر روی این پدیده در سیالات نیوتنی، مدل‌سازی عددی تاثیر لایه نازک سیال در پدیده برخورد برای سیالات ویسکوالاستیک برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته شده است.

- در مطالعه عددی از معادلات ساختاری غیرخطی جهت مدل‌سازی مسئله استفاده شده است.

- در مطالعه عددی تاثیر متغیرهای مدل همچون نسبت ویسکوزیته و ضریب تحرک بر دینامیک برخورد مورد مطالعه قرار گرفته است.
- تاثیر ضخامت لایه سیال در الاستیسیته‌های مختلف سیال بر دینامیک برخورد مورد بررسی قرار داده شده است.
- تمایز مدل‌سازی عددی دوبعدی صفحه‌ای و تقارن محوری مورد بررسی قرار گرفته است.
- اعتبار نتایج مدل‌سازی عددی با کمک نتایج مطالعه تجربی ارزیابی شده است.

فصل ۲: مبانی مدل سازی عددی و تحلیل آزمایشگاهی

در این بخش معادلات حاکم بر هیدرودینامیک جریان سیالات ویسکوالاستیک در حالت دوفازی آورده شده است. همچنین در ادامه این فصل ضمن معرفی مبانی تحلیل عددی و نحوه مدل سازی جریان های دوفازی در سیالات ویسکوالاستیک، تحلیل آزمایشگاهی مربوطه شرح داده شده است.

۲-۱- مدل سازی عددی

علم رئولوژی محاسباتی متشکل از ایجاد و بهینه سازی الگوریتم های عددی است که توانایی کمی و کیفی بالایی در پیش بینی مشاهدات تجربی موجود در جریان سیالات ویسکوالاستیک را دارا باشند. پیشرفت های فراوانی در ایجاد تکنیک های عددی و مدل های ساختاری بر پایه روش های میکروسکوپی و ماکروسکوپی حاصل شده است. دو گام اساسی ۱- گسسته سازی و ۲- حل معادلات توسط یک رویه مناسب؛ جهت حل مدل های ماکروسکوپی در جریان سیالات ویسکوالاستیک وجود دارد. روش های متعددی همچون روش حجم محدود، روش اجزای محدود، اختلاف محدود و روش های طیفی جهت حل معادلات برای سیالات ویسکوالاستیک موجود است.

در دهه گذشته پیشرفت های فراوانی جهت حل های عددی پایدار و دقیق برای مسائل موجود در جریان های چندفازی سیالات ویسکوالاستیک حاصل شده است. در اغلب مطالعات گذشته، محققان فراوانی روش های استاندارد تفاضل محدود، اجزای محدود و حجم محدود را مورد استفاده قرار داده اند [۸۲-۸۴]. امروزه روش حجم محدود (FVM) نسبت به دیگر روش ها در بسیاری از کدهای دینامیک سیالات محاسباتی به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. این روش با توجه به هزینه کم محاسبات، دقت و قدرت بالا مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته شده است.

از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مراحل در مدل‌سازی عددی سیستم‌های دو یا چند فازی، تعیین و ردیابی مرز مشترک دو فاز است. روش‌های عددی متنوعی جهت تعیین موقعیت مرز میان دوفاز ارائه گردیده است که می‌توان آن‌ها را به دو دیدگاه لاگرانژی و اویلری دسته‌بندی نمود (شکل ۳-۱). در دیدگاه لاگرانژی شبکه‌بندی به صورت کامل بر مرز منطبق است و از روش شبکه متحرک برای ردگیری مرز بین دو فاز استفاده می‌شود. روش شبکه‌بندی متحرک دارای الگوریتم پیچیده و پر هزینه‌ای است و توانایی شبیه‌سازی تغییر شکل‌های زیاد و از هم جدا شدن مرز میانی را ندارد. از طرف مقابل این روش توصیف دقیقی از انحناي مرز میانی دو فاز ارائه می‌کند و محاسبات مربوط به کشش سطحی از دقت بالایی برخوردار است و همچنین این روش بقای جرم را تضمین می‌کند. از طرفی دیدگاه اویلری از یک شبکه‌بندی ثابت استفاده می‌کند و مرز میانی به راحتی شبیه‌سازی می‌شود و از نقطه نظر محاسباتی و کاربردی بیشتر مورد پسند واقع شده است. از معایب ردگیری مرز به روش اویلری می‌توان به عدم دقت کافی در تعیین مرز میانی اشاره کرد که به لزوم استفاده از شبکه ریزتر در مرز مشترک منتج می‌شود. تعیین مرز میانی به کمک دیدگاه اویلری توسط دو روش گرفتن مرز میانی^۱ و ردگیری مرز میانی^۲ امکان‌پذیر است. در حالت کلی در روش گرفتن مرز مشترک ناحیه حد فاصل دو فاز آسان‌تر و سریع‌تر قابل پیش‌بینی است و در حالی که در روش‌های ردیابی مرز مشترک به دلیل طبیعت لاگرانژی امکان مکان‌یابی سطح مشترک دقیق‌تر است. روش‌های بسیار دیگری نیز همانند، انتگرال مرزی، تناسب سطح مشترک و روش‌های لاگرانژی- اویلری خواهد بود. در ادامه روش حجم سیال و چگونگی اعمال آن برای شبیه‌سازی مرز میانی به عنوان روش مورد استفاده آورده شده است.

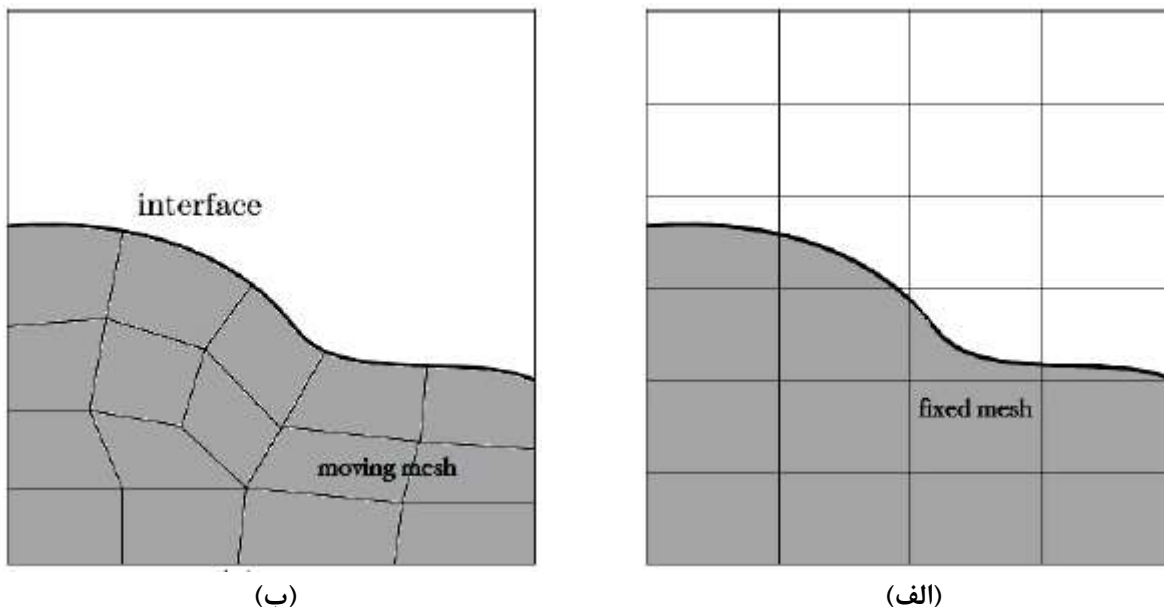
در این مطالعه جریان دوفازی سیال ویسکوالاستیک غیر قابل امتزاج^۳، هم‌دما و غیرقابل تراکم در نظر گرفته شده است. جهت ردگیری مرز بین دو فاز از روش حجم سیال (VOF) استفاده شده است. از تابع اسکالر ϕ (کسر حجمی) که دارای مقادیر بین صفر و یک است جهت تشخیص دو سیال استفاده می‌شود. این تابع برای

¹ Capturing method

² Tracking method

³ Immiscible

سلول‌هایی که شامل مرز بین دو فاز می‌شود مقادیر بین صفر و یک ($\phi \in (0,1)$) و در حالی که مقادیر $\phi = 0$ و $\phi = 1$ به ترتیب دلالت بر این دارد که حجم کنترل تنها توسط فاز پیوسته و گسسته پر شده است.



شکل ۱-۲: دیدگاه‌های مختلف در تعیین مرز مشترک [۸۵]، (الف) دیدگاه اویلری، (ب) دیدگاه لاگرانژی

در نواحی مرزی بین دو سیال، شکل و موقعیت سطح آزاد بر حسب زمان از طریق معادله زیر مشخص می‌شود [۸۶].

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \phi) + \nabla \cdot (\phi(1-\phi) \mathbf{v}_c) = 0 \quad (1-2)$$

که $\mathbf{v}_c$ بیانگر اختلاف سرعت بین فازهای مختلف است و جمله‌ی انتهایی در رابطه فوق تنها در نواحی مرزی فعال است.

در روش حجم سیال محاسبات جریان برای دو سیال مختلف مخلوط نشدنی به صورت جداگانه صورت می‌گیرد. به بیان دیگر معادلات حاکم بر جریان هر دو سیال یکسان بوده و تنها تفاوت در خواص فیزیکی و رئولوژیکی به کار رفته برای هر یک از دو سیال است. در واقع روش حجم سیال با به کار بردن خواص فیزیکی و

رئولوژیکی در هر حجم کنترل از دامنه حل متناسب با کسر حجمی سیال مسئله را حل می‌کند. خواص فیزیکی سیالات مورد استفاده در معادلات به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\zeta = \phi \zeta_d + (1 - \phi) \zeta_c \quad (2-2)$$

که ζ_c و ζ_d به ترتیب نشان دهنده خواص کلی فازهای گسسته و پیوسته است. در مطالعه حاضر از طرح هندسی^۱ معرفی شده توسط هرت و نیکولز [۸۷] استفاده شده است. در این روش مرز مشترک بین دو فاز از مجموعه‌ای از پاره‌خط‌هایی تشکیل شده است که با ریزتر کردن شبکه محاسباتی شکل مرز بین دو فاز بهتر نمایش داده می‌شود. یکی از رویکردهای دقیق در تعیین مرز مشترک بین دو سیال استفاده از روش^۲ PLIC است که دقت و کارایی بالایی نسبت به دیگر روش‌ها دارد. در این روش سطح مشترک بین دو فاز را با یک خط شیبدار تقریب می‌زنند و شیب این خط توسط داده‌های به دست آمده از سلول‌های مجاور تعیین می‌گردد. از مهمترین مزیت‌های روش حجم سیال نسبت به سایر روش‌ها، می‌توان به ارضا قانون بقای جرم و کمترین میزان اطلاعات ذخیره شده اشاره کرد. از دیگر مزایای این روش نسبت به سایر روش‌ها مدلسازی مسئله برخورد قطره سیال و تشکیل قطرات ثانویه است.

معادلات بقای جرم و اندازه حرکت برای سیالات به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_s \quad (4-2)$$

که در این رابطه $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_s + \boldsymbol{\tau}_p$ تانسور تنش است و $\boldsymbol{\tau}_s$ سهم تنش محلول بوده که از قانون لزجت نیوتن پیروی می‌کند.

$$\boldsymbol{\tau}_s = 2\eta_s \mathbf{D} \quad (5-2)$$

¹ Geometric scheme

² Piecewise Linear Interface Calculation

که η_s معرف ویسکوزیته سیال حلال و $\mathbf{D}$ تانسور نرخ برش است و به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T \right) \quad (۶-۲)$$

همچنین $\boldsymbol{\tau}_p$ سهم تنش پلیمری بوده که می‌تواند توسط هر یک از معادلات ساختاری شرح داده شده در بخش بعد بیان شود. همچنین در رابطه ۴-۲ به ترتیب متغیرهای p و $\mathbf{g}$ نشان دهنده میدان فشار و شتاب جاذبه می‌باشند.

در رابطه ۴-۲ نیروی حجمی $\mathbf{F}_s$ جهت اعمال نیروی کشش سطحی در معادلات اندازه حرکت ظاهر شده است. این جمله با توجه به روش نیروی پیوسته سطح^۱ به صورت زیر تعریف می‌شود [۸۸].

$$\mathbf{F}_s = \sigma \kappa \nabla \phi \quad (۷-۲)$$

که در این رابطه σ کشش سطحی و κ انحنای مرز بین دو فاز است و این متغیر به صورت رابطه زیر بیان می‌شود.

$$\kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \quad (۸-۲)$$

از رویکردهای اساسی در تعیین مرز مشترک بین دو سیال می‌توان به روش‌های SLIC^۲ و PLIC^۳ اشاره کرد. روش SLIC به دلیل دقت کم و توانایی بسیار محدود در ارائه شکل دقیق مرز مشترک از مقبولیت کافی برخوردار نیست. از طرف مقابل روش PLIC از دقت و کارایی بالایی نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است. به همین جهت در مطالعه حاضر از روش PLIC جهت تعیین مرز مشترک میان دو فاز سیال استفاده شده است. پس از انتخاب روش عددی مورد نظر، معادلات حاکم و شبکه محاسباتی گسسته‌سازی می‌شود و با توجه ماهیت گذرا بودن جریان، مسئله در هر گام زمانی تا ارضاء شرط همگرایی حل می‌گردد.

^۱ Continuous-Surface-Force (CSF)

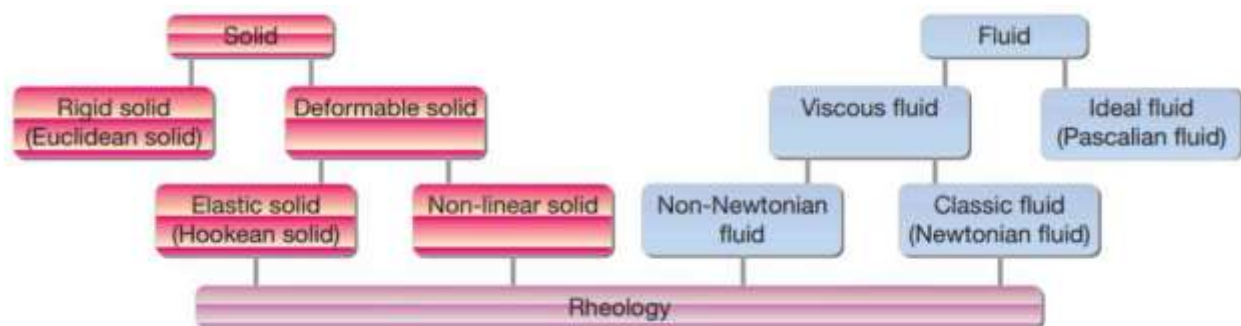
^۲ Simple Line Interface Construction

^۳ Piecewise Linear Interface Calculation

۲-۱-۱- مدل‌های ساختاری سیال

پیدایش فناوری‌های جدید موجب مواجهه دانشمندان با پدیده‌های جدیدی در برخی مواد شده که رفتار آن‌ها در قبال اعمال تنش برشی با آنچه نیوتن به عنوان معادله ساختاری معرفی کرده، متفاوت است. بروز این تفاوت‌ها در جریان‌های برشی عبارت است از تغییر لزجت سیال با زمان یا با نرخ برش، وجود تنش تسلیم و یا حتی خاصیت الاستیک در ماده که ماهیتاً به خاطر نوع مولکول‌های سازنده این مواد می‌باشند. پلیمرها از جمله این مواد به شمار می‌آیند که کاربردهای فراوان این مواد در صنعت و حتی در مسائل زیست محیطی و پزشکی دانشمندان را بر آن داشته است تا مطالعه دقیق‌تری بر روی رفتار فیزیکی آن‌ها داشته باشند. محققین به عنوان یکی از نتایج اولیه دریافته‌اند که موادی همانند پلیمرها (در حالت مذاب یا محلول) با وزن مولکولی بیش از ۱۰۰۰ که دارای مولکول‌های درشت هستند، از قانون لزجت نیوتن تبعیت نمی‌کنند. این در حالی است که رفتار موادی مانند آب و هوا که ریز مولکول به شمار می‌روند به خوبی با قانون لزجت نیوتن قابل توجیه هستند.

در این بین رفتار الاستیک در فاز سیال برخی پلیمرهای پرکاربرد موجب بروز تلاش‌های فراوان توسط دانشمندان علم مکانیک سیالات جهت یافتن روابطی به عنوان معادله ساختاری برای این مواد باشند. آنچه از آزمایش‌های نیوتن و هوک (معادلات ساختاری سیالات و جامدات) به دست آمد موجب به تعریف سیال نیوتنی ایده‌آل و جامد الاستیک ایده‌آل شده است. آزمایش‌ها بیانگر این موضوع است که یک ماده جامد به تنهایی دارای خاصیت الاستیک نیست و دارای درصد کمی از خاصیت لزجی (سیال گون) نیز است. این گفته در مورد سیال نیز صادق است؛ به طوری که یک سیال علاوه بر لزجت می‌تواند خاصیت الاستیک نیز داشته باشد. این واقعیت که هر سیال واقعی علاوه بر رفتار سیال گونه، رفتار الاستیک نیز داشته باشد و هر جامد واقعی علاوه بر رفتار جامد گونه رفتار ویسکوز نیز داشته باشد، این نتیجه را به دست می‌دهد که مواد در حالت معمول می‌توانند به صورت توأمان هر دو رفتار الاستیک و لزج را از خود بروز دهند. لذا می‌توان مواد در فازهای مایع و جامد را در



شکل ۲-۲: محدوده کاربرد علم رئولوژی [۸۹]

حالت کلی ویسکوالاستیک نامید. اینکه در چه زمان و در چه پدیده‌ای چنین رفتارهایی امکان بروز پیدا کنند نیازمند تعریف چندین کمیت و عدد بدون بعد است. شکل ۲-۲ طبقه‌بندی‌های مختلف موجود در علوم رئولوژی^۱ را بیان می‌کند.

محلول‌های پلیمری متشکل از زنجیره‌های مولکولی در هم تنیده‌ای می‌باشند که توسط یک الگوی تصادفی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. میان خواص الاستیک سیالات پلیمری و هر یک از رفتارهای مولکول‌های آن همچون حرکات تصادفی مولکول‌ها و انبساط و گسترش زنجیره‌های پلیمری یک تناظر موجود است. همچنین در حالت سکون در این نوع سیالات حرکت بروانی زنجیره‌های پلیمری سبب ممانعت از هم‌راستایی ساختار زنجیرها می‌شود. از سوی دیگر اگر این مواد تحت هر تغییر شکلی قرار گیرند آرایش مولکولی آن‌ها تغییر می‌کند که در نتیجه آن خواص ماده تغییر خواهد کرد. در ساختار مولکولی این مواد نیروهای بین اتمی همانند فنرهایی عمل می‌نمایند که منشاء رفتار الاستیک در حین تغییر آرایش ماده را سبب می‌شوند؛ به عبارت دیگر ماده از خود رفتار ویسکوالاستیک نشان می‌دهد.

در صورتی که یک سیال تحت تغییر شکل قرار گیرد، تغییر طول در مولکول‌ها قابل مشاهده است و همچنین تنش‌های لزجی ایجاد شده از میزان تولید شده بر اثر حرکت تصادفی زنجیره‌ها بیشتر است. به محض حذف نیروهای اعمالی، تغییر شکل در سیالات نیوتنی بلافاصله متوقف می‌شود. در صورتی که برای سیالات

¹ Rheology

ویسکوالاستیک تغییر شکل کماکان ادامه خواهد داشت. به طور معمول توانایی ساختار داخلی سیالات ویسکوالاستیک در حفظ تنش برای یک دوره زمانی کوتاه، زمان آسودگی^۱ نامیده می‌شود. در حالت کلی میزان خواص الاستیک موجود در سیالات پلیمری توسط زمان آسودگی ارزیابی می‌شود.

بررسی سیالات پلیمری از نقطه نظر علم رئولوژی یکی از چالش برانگیزترین موضوعات موجود در علم مکانیک سیالات است. اولین گام جهت به دست آوردن اطلاعات کمی از جریان سیال استفاده عدد بدون بعد دبورا^۲ (De) است که به صورت زیر به دست می‌آید.

$$De = \frac{\lambda}{t} \quad (9-2)$$

که λ بیانگر مشخصه زمان آسودگی ماده و t زمان مشخصه جریان (زمان مشاهده) است. به طور کلی در صورتی که این عدد کوچکتر از یک ($De < 1$) باشد، مبانی رئولوژی خطی صادق و برای $De \leq O(1)$ ماده شبه سیال در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر هنگامی که $De \gg 1$ باشد ماده رفتار جامد گون از خود نشان می‌دهد. از طرفی مقدار عدد دبورا بحرانی به نوع جریان سیال بستگی دارد.

دیگر عدد بدون بعد مهم در تعیین رفتار یک ماده عدد وایزنبرگ^۳ است. این عدد براساس نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک به نیروی حاصل از لزجت تعریف می‌شود. این عدد براساس روابط مختلفی تعریف شده است که رابطه زیر متداول‌ترین شکل بیان آن است.

$$Wi = \lambda \dot{\gamma} \quad (10-2)$$

که در این رابطه $\dot{\gamma}$ بیانگر نرخ برش است. در یک سیال بالا بودن عدد وایزنبرگ به معنای رفتار غیر نیوتنی شدید در سیال است. پرواضح است که کوچک بودن عدد وایزنبرگ و دبورا در یک ماده مشخص احتمال جریان یافتن ماده را افزایش می‌دهد.

¹ Relaxation time

² Deborah

³ Weissenberg

بدون هیچ تردیدی درک نظریه ویسکوالاستیک وابستگی عمیقی به ارتباط زمانی بین مشخصه‌های تنش و کرنش دارد. در سالیان اخیر اکثر پژوهش‌ها در بهبود مدل‌های ساختاری موجود جهت تقریب بهتر پاسخ مکانیکی مواد تحت شرایط متفاوت، متمرکز شده است.

در حالت کلی، مدل‌های ساختاری وابسته به مواد و با توجه به شواهد تجربی به دست آمده‌اند. این مدل‌ها بدون در نظر گرفتن دستگاه مرجع مختصات در نظر گرفته می‌شوند. در عمل این مدل‌ها با دیگر قوانین فیزیکی جهت حل مسائل موجود به کار گرفته می‌شوند. جهت بیان خواص غیر همسانگرد موجود در مواد از متغیرهای تانسوری به جای متغیر اسکالر استفاده می‌شود. در ادامه مدل‌های ویسکوالاستیک مورد استفاده در تحقیق حاضر شرح داده می‌شود.

باگر^۱ [۹۰] سیالات با ویسکوزیته ثابت که به شدت دارای رفتار الاستیک و ویسکوز می‌باشند را برای اولین بار معرفی کرد که این نوع از سیالات به سیالات باگر موسوم هستند. سیال باگر توسط حل کردن مقدار کمی پلیمر در یک محلول با ویسکوزیته بالا تولید کرد. به عنوان مثال، محلول مایع که حاوی مقدار کمی از پلی-اکریل‌آمید^۲ حل شده در محلول آب گلیسیرین رفتار سیال باگر از خود نشان می‌دهد. در یک تست ویسکومتری^۳ برای مواد ویسکوالاستیک، سودمندی سیالات باگر در توانایی تفکیک خواص ویسکوز و الاستیک نهفته شده است. هنگامی که یک سیال باگر و یک سیال نیوتنی با ویسکوزیته یکسان تحت یک نرخ کرنش یکسان قرار گیرند، هر گونه تغییر مشاهده شده میان دو سیال ناشی از رفتار الاستیک است که این موضوع در یک آزمایش بر روی سیالات غیر نیوتنی بسیار مفید واقع می‌شود که رفتار غیر نیوتنی موجود ناشی از الاستیسیته یا رفتار باریک شوندگی است.

¹ Boger

² Polyacrylamide

³ Viscometric

مدل‌های ساختاری فراوانی توانایی انطباق دقیق بر داده‌های آزمایشگاهی دارند. یکی از این مدل‌ها، مدل ساختاری اولدروید-بی^۱ است که در بسیاری از حالات مختلف دقت قابل قبولی دارد و به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\boldsymbol{\tau} + \lambda \nabla \boldsymbol{\tau} = 2\eta_0 \left(\mathbf{D} + \lambda_r \nabla \mathbf{D} \right) \quad (۱۱-۲)$$

که در این رابطه λ زمان آسودگی و λ_r زمان تأخیر است. رابطه (۱۱-۲) توسط ترکیب سهم هر یک از تنش-های ناشی از حلال نیوتنی $\boldsymbol{\tau}_s$ و پلیمر $\boldsymbol{\tau}_p$ (با استفاده از مدل UCM) نیز قابل بیان است. تنش حلال و پلیمر توسط رابطه (۱۲-۲) حاصل می‌شود.

$$\boldsymbol{\tau}_s = 2\eta_s \mathbf{D} \quad (۱۲-۲ \text{ الف})$$

$$\boldsymbol{\tau}_p + \lambda \nabla \boldsymbol{\tau}_p = 2\eta_p \mathbf{D} \quad (۱۲-۲ \text{ ب})$$

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_s + \boldsymbol{\tau}_p \quad (۱۲-۲ \text{ ج})$$

که در این رابطه η_s و η_p به ترتیب بیانگر ویسکوزیته حلال و پلیمر می‌باشند. $\nabla \boldsymbol{\tau}_p$ نشان دهنده مشتق فوق همرفتی تانسور تنش پلیمری است و به صورت رابطه‌ی ۱۳-۲ بیان می‌شود.

$$\nabla \boldsymbol{\tau}_p \equiv \frac{\partial \boldsymbol{\tau}_p}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \boldsymbol{\tau}_p - (\nabla \mathbf{v})^T \cdot \boldsymbol{\tau}_p - \boldsymbol{\tau}_p \cdot \nabla \mathbf{v} \quad (۱۳-۲)$$

در روابط فوق $\mathbf{v}$ نمایانگر بردار سرعت است.

در جریان برشی پایا برای سیال اولدروید-بی، ویسکوزیته و اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم به ترتیب به صورت زیر حاصل می‌شود و همچنین توسط جریان کشسان پایا ویسکوزیته کشسان نیز توسط رابطه (۱۴-۲) بیان می‌شود [۹۱].

¹ Oldroyd-B

$$\eta = \eta_0 \quad (2-14 \text{ الف})$$

$$\Psi_1 = 2\eta_0 (\lambda - \lambda_r) \quad (2-14 \text{ ب})$$

$$\Psi_2 = 0 \quad (2-14 \text{ ج})$$

$$\eta_e = 3\eta_0 \frac{1 - \lambda_r \dot{\varepsilon} - 2\lambda\lambda_r \dot{\varepsilon}^2}{(1 + \lambda \dot{\varepsilon})(1 - 2\lambda \dot{\varepsilon})} \quad (2-14 \text{ د})$$

که $\eta_0 = \eta_s + \eta_p$ و $\lambda_r = \lambda \eta_s / (\eta_s + \eta_p)$ است. سیال اولدریود- بی فقط اختلاف تنش نرمال اول را پیش‌بینی کرده و همچنین رفتار باریک شوندگی توسط این مدل قابل مشاهده نیست.

یکی از مهمترین و پرکاربردترین مدل‌های موجود در سیالات ویسکوالاستیک، مدل گزیکس می‌باشد. این مدل به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\tau_s = 2\eta_s \mathbf{D} \quad (2-15 \text{ الف})$$

$$\tau_p + \lambda \tau_p^\nabla + \alpha \frac{\lambda}{\eta_p} (\tau_p \cdot \tau_p) = 2\eta_p \mathbf{D} \quad (2-15 \text{ ب})$$

$$\tau = \tau_s + \tau_p \quad (2-15 \text{ ج})$$

در جریان برشی پایا، حل دقیق برای ویسکوزیته برشی (η) و ضریب اختلاف تنش نرمال اول و دوم (Ψ_1) و Ψ_2 برای مدل گزیکس^۱ به ترتیب توسط روابط زیر حاصل می‌شود [۹۱] (توابع در پیوست ترسیم شده است).

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{\lambda_r}{\lambda} + \left(1 - \frac{\lambda_r}{\lambda} \right) \frac{(1-f)^2}{1 + (1-2\alpha)f} \right) \quad (2-16 \text{ الف})$$

$$\Psi_1 = 2\eta_0 (\lambda - \lambda_r) \frac{f(1-\alpha f)}{(\lambda \dot{\gamma})^2 \alpha (1-f)} \quad (2-16 \text{ ب})$$

$$\Psi_2 = \eta_0 (\lambda - \lambda_r) \frac{-f}{(\lambda \dot{\gamma})^2} \quad (2-16 \text{ ج})$$

¹ Giesekus

که در این روابط متغیر f به صورت زیر است.

$$f = \frac{1-\chi}{1+(1-2\alpha)\chi} \quad (۱۷-۲الف)$$

$$\chi^2 = \frac{\left(1+16\alpha(1-\alpha)(\lambda\dot{\gamma})^2\right)^{\frac{1}{2}}-1}{8\alpha(1-\alpha)(\lambda\dot{\gamma})^2} \quad (۱۷-۲ب)$$

در روابط (۱۶-۲) و (۱۷-۲)، $\dot{\gamma}$ بیانگر نرخ برش و α ضریب تحرک^۱ است که در جریان سیالات پلیمری، غیر همسانگردی نیروی درگ بر روی مولکول‌های پلیمری را مشخص می‌کند. همچنین در مدل گزیکس، ویسکوزیته کشسان در جریان کشسان پایا به صورت رابطه (۱۸-۲) بیان می‌شود.

$$\frac{\eta_e}{3\eta_0} = \frac{\lambda_r}{\lambda} + \left(1 - \frac{\lambda_r}{\lambda}\right) \frac{1}{6\alpha} \left[3 + \frac{1}{\lambda\dot{\epsilon}} \left\{ \left[1 - 4(1-2\alpha)\lambda\dot{\epsilon} + 4\lambda^2\dot{\epsilon}^2 \right]^{1/2} - \left[1 + 2(1-2\alpha)\lambda\dot{\epsilon} + \lambda^2\dot{\epsilon}^2 \right]^{1/2} \right\} \right] \quad (۱۸-۲)$$

که $\lambda_r = \lambda\eta_s / \eta_p$ و $\eta_0 = \eta_s + \eta_p$ است.

قابل ذکر است که اعداد بدون مربوط به تحلیل عددی حاضر به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho U_0 D}{\eta_0}, \quad We = \frac{\rho U_0^2 D}{\sigma}, \quad Bo = \frac{\rho g D^2}{\sigma}, \quad Wi = \lambda \dot{\gamma} = \frac{\lambda U_0}{D}, \\ \beta &= \frac{\eta_p}{\eta_0} = \frac{\eta_p}{\eta_p + \eta_s}, \quad H = \frac{h}{D}, \quad \psi^* = \frac{\psi U_0}{D \eta_0}, \quad t^* = \frac{U_0 t}{D}, \\ \mathbf{v}^* &= \frac{\mathbf{v}}{U_0}, \quad p^* = \frac{1}{\rho U_0^2} p, \quad \boldsymbol{\tau}^* = \frac{1}{\rho U_0^2} \boldsymbol{\tau}, \\ \nabla^* &= D \nabla, \quad \mathbf{D}^* = \frac{D}{U_0} \mathbf{D}. \end{aligned} \quad (۱۹-۲)$$

که در عبارات فوق Re عدد رینولدز و بیانگر نسبت نیروهای اینرسی به ویسکوز است، We عدد وبر و نشان دهنده نسبت نیروهای اینرسی به کشش سطحی است، Bo عدد بوند گرانشی و معرف نسبت نیروهای گرانشی به کشش سطحی است و Wi عدد وایزنبرگ است که نشان دهنده نسبت نیروهای الاستیک به نیروهای

^۱ Mobility factor

ویسکوز است. همچنین β متغیر نسبت ویسکوزیته است، H ضخامت بدون بعد لایه سیال، ψ^* ثابت اختلاف تنش نرمال اول بدون بعد و t^* زمان بدون بعد است. همچنین قابل ذکر است جهت تغییر اعداد بدون عدد رینولدز، وبر، بوند، وایزنبرگ، نسبت ویسکوزیته و ضخامت بدون بعد لایه سیال به ترتیب سرعت برخورد قطره U_0 ، کشش سطحی σ ، شتاب گرانش g ، زمان رهایی از تنش λ ، ویسکوزیته‌های η_p و η_s و ضخامت لایه سیال h تغییر می‌کند. در نهایت شکل بدون بعد معادلات حاکم به همراه معادله ساختاری گزیکس به صورت زیر خواهد بود.

$$\nabla^* \cdot \mathbf{v}^* = 0, \quad (20-2)$$

$$\frac{\partial(\mathbf{v}^*)}{\partial t^*} + \nabla^* \cdot (\mathbf{v}^* \mathbf{v}^*) = -\nabla^* p^* + \nabla^* \cdot \boldsymbol{\tau}^* + \frac{Bo}{We} \hat{\mathbf{e}}_z, \quad (21-2)$$

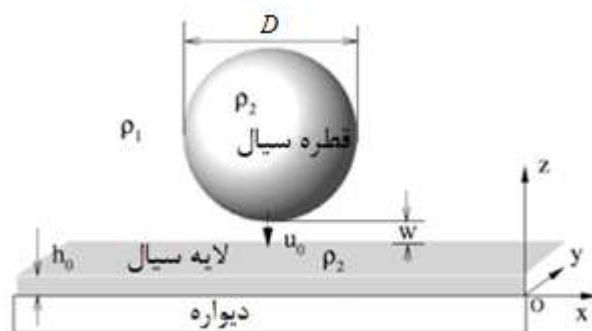
$$\boldsymbol{\tau}_s^* = \frac{2}{Re}(1-\beta)\mathbf{D}^*, \quad \boldsymbol{\tau}_p^* + Wi \boldsymbol{\tau}_p^{*\nabla} + \frac{\alpha}{\beta} Re Wi (\boldsymbol{\tau}_p^* \cdot \boldsymbol{\tau}_p^*) = 2 \frac{\beta}{Re} \mathbf{D}^*. \quad (22-2)$$

۲-۱-۲- شرایط اولیه و مرزی

در مطالعه عددی حاضر طرحواره برخورد قطره بر لایه سیال در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است. دامنه محاسباتی به صورت مستطیلی و به ابعاد $2.5D \times 10D$ است که D اندازه قطر قطره و h ارتفاع لایه سیال است. قابل ذکر است که در برخورد قائم قطره بر لایه سیال میدان جریان متقارن بوده و متعاقباً نیمی از دامنه حل نشان داده شده در شکل ۲-۳ حل می‌شود و مرز تقارن در میانه دامنه در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این شکل قطره و لایه سیال یکسان و از نوع ویسکوالاستیک و هوا پیرامون نیز سیال نیوتنی است.

در لحظه اولیه در حالت تماس قطره با لایه سیال سرعت قطره برابر U_0 و به سمت لایه سیال ساکن است و سیال محیط در سکون است و شرط عدم لغزش در دیواره‌های جانبی و پایین برقرار است و سرعت سیالات در لحظه اولیه صفر است.

گرادیان‌های کسر حجمی سیال، تنش و فشار در جهت عمود بر دیواره برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در مرز تقارن گرادیان متغیرهای اسکالر برابر صفر است. در مرز بالا شرایط اتمسفریک برقرار است و این شرط به این معنی است که برای جریان خروجی از این مرز گرادیان متغیرها برابر صفر و برای جریان ورودی به این مرز مقادیر متغیرها برابر مقادیر شرایط اتمسفریک است. مقادیر شرایط اولیه و مرزی در مسئله حاضر به ترتیب به صورت روابط (۲۳-۲) و (۲۴-۲) آورده شده است.



شکل ۲-۳: طرحواره برخورد قطره بر لایه سیال

$$\rho = \rho_2, y > h \rightarrow \begin{cases} \mathbf{v} = -U_0 \hat{j} \\ p = 0 \\ \boldsymbol{\tau} = 0 \\ \phi = 1 \end{cases}, \quad \rho = \rho_2, y \leq h \rightarrow \begin{cases} \mathbf{v} = 0 \\ p = 0 \\ \boldsymbol{\tau} = 0 \\ \phi = 1 \end{cases},$$

$$\rho = \rho_1 \rightarrow \begin{cases} \mathbf{v} = 0 \\ p = 0 \\ \boldsymbol{\tau} = 0 \\ \phi = 0 \end{cases}$$

(۲۳-۲)

$$\begin{cases} \nabla p \cdot \mathbf{n} = 0 & \nabla \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} = 0, \\ \mathbf{v} = 0, & \nabla \phi \cdot \mathbf{n} = 0. \end{cases}$$

دیواره‌ها

(۲۴-۲)

$$\begin{cases} \nabla p \cdot \mathbf{n} = 0, & \partial \tau_{xx} / \partial x = \partial \tau_{yy} / \partial x = 0, & \tau_{xy} = \tau_{yx} = 0, \\ \nabla \phi \cdot \mathbf{n} = 0, & \partial v_y / \partial x = 0, & v_x = 0. \end{cases} \quad \text{مرز تقارن قائم}$$

$$\begin{cases} p = 0, & \boldsymbol{\tau} = 0, \\ \mathbf{v} = 0, & \phi = 0. \end{cases} \quad \text{ورودی}$$

$$\begin{cases} \nabla p \cdot \mathbf{n} = 0, & \nabla \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} = 0, \\ \nabla \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0, & \nabla \phi \cdot \mathbf{n} = 0. \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{مرز بالا} \\ \text{خروجی} \end{matrix}$$

۲-۱-۲- روش عددی

در مطالعه حاضر از روش حجم محدود جهت حل معادلات حاکم استفاده شده است. از نرم‌افزار OpenFOAM جهت گسسته‌سازی و حل معادلات حاکم بهره برده شده است. گسسته‌سازی جملات زمانی بر پایه طرح اویلر^۱ و از طرح خطی گوس^۲ جهت گسسته‌سازی جملات سرعت و کسر حجمی استفاده شده است. جملات لاپلاسیان^۳ توسط طرح اصلاح شده خطی گوس گسسته‌سازی شده است. در مدل‌سازی عددی حاضر جمله $\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v})$ در معادله مومنتوم از طرح اختلافی خطی گوس (TVD)^۴ و از طرح اختلاف بالادستی گوس جهت جملات $\nabla \cdot (\mathbf{v} \boldsymbol{\tau})$ استفاده شده است. همچنین برای دیورژانس تانسور تنش $(\nabla \cdot \boldsymbol{\tau})$ از طرح اختلاف خطی گوس استفاده شده است. دستگاه معادلات خطی بدست آمده از روش حجم محدود، توسط روش گرادیان مزدوج (CG) حل شده است.

رویه حل کلی در روش حجم محدود برای جریان دوفاز همدما سیال ویسکوالاستیک بر پایه الگوریتم PISO است. این الگوریتم برای جریان‌های گذرا به ویژه اگر از گام زمانی بزرگتر استفاده شود مد نظر است. به طور خلاصه به صورت زیر بیان می‌شود:

¹ Euler

² Gauss

³ Laplacian

⁴ Total Variable Diminishing

۱- با توجه به مقادیر اولیه کسر حجمی (ϕ) و میدان سرعت، معادله مربوط به کسر حجمی (رابطه ۳-۱) حل شده و مقدار جدید برای کسر حجمی حاصل می‌شود که از آن جهت محاسبه خواص فیزیکی و رئولوژیکی سیال استفاده می‌گردد.

۲- با استفاده از مقادیر اولیه سرعت، فشار و تنش معادلات اندازه حرکت حل و در نهایت میدان سرعت جدید حاصل می‌شود.

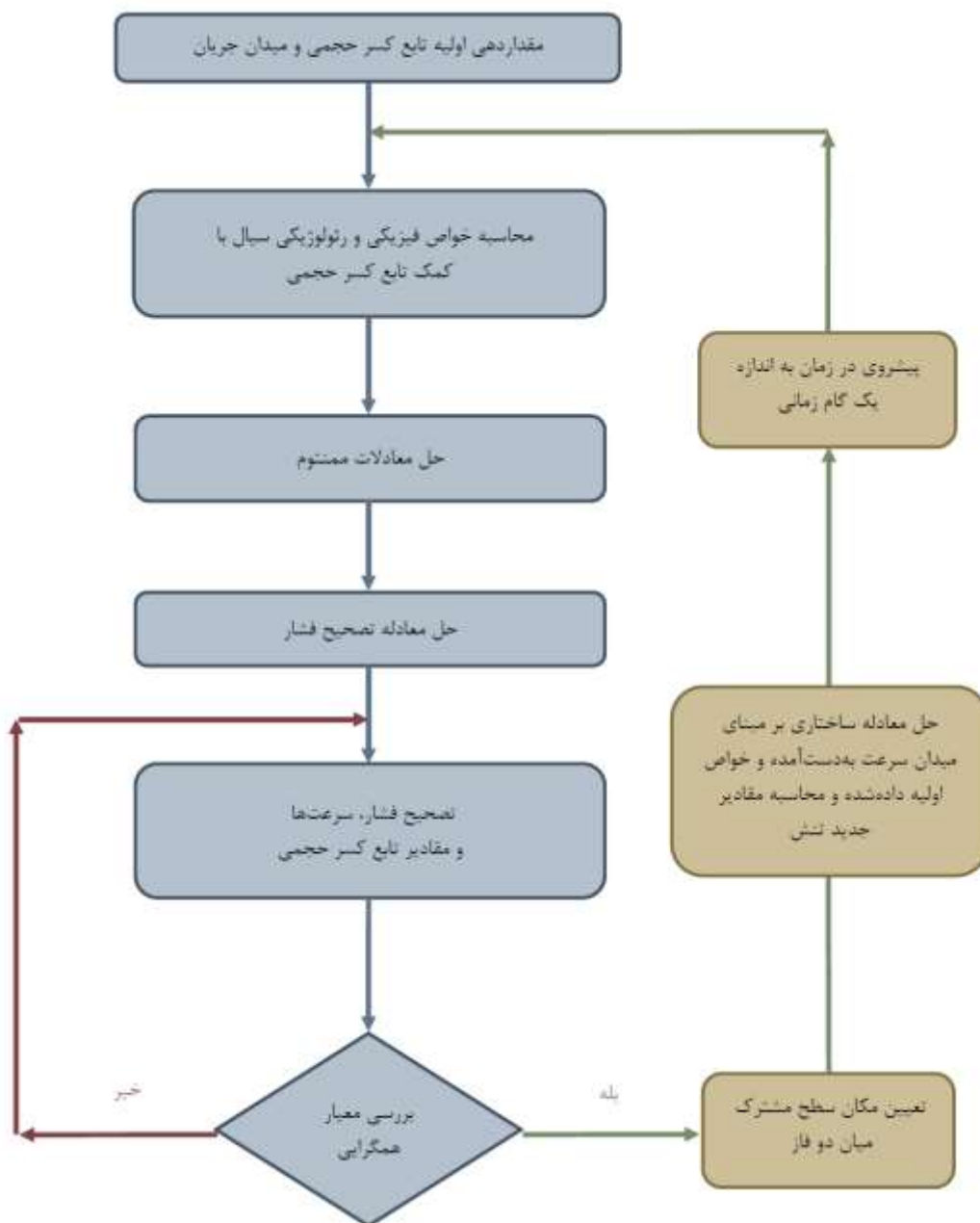
۳- با توجه به الگوریتم‌های موجود جهت ارتباط بین سرعت و فشار، مقادیر جدید میدان فشار و همچنین سرعت اصلاح شده محاسبه می‌شود.

۴- مقدار جدید میدان تنش با توجه به معادله ساختاری سیال ویسکوالاستیک و سرعت اصلاح شده حاصل می‌گردد.

۵- چهار مرحله قبل جهت حصول حل دقیق تا رسیدن به همگرایی مدنظر تکرار می‌شود. در نهایت مقادیر جدید برای کسر حجمی، سرعت، فشار و تنش جهت محاسبات استفاده می‌گردد.

با توجه به موارد ذکر شده، در تحقیق پیش‌رو از روش حجم محدود جهت گسسته‌سازی و حل معادلات حاکم بهره برده خواهد شد و این کار توسط نرم‌افزار متن باز اپن فوم^۱ صورت خواهد گرفت. در شکل ۲-۴ طرحواره رویه حل مسئله آورده شده است.

¹ OpenFOAM

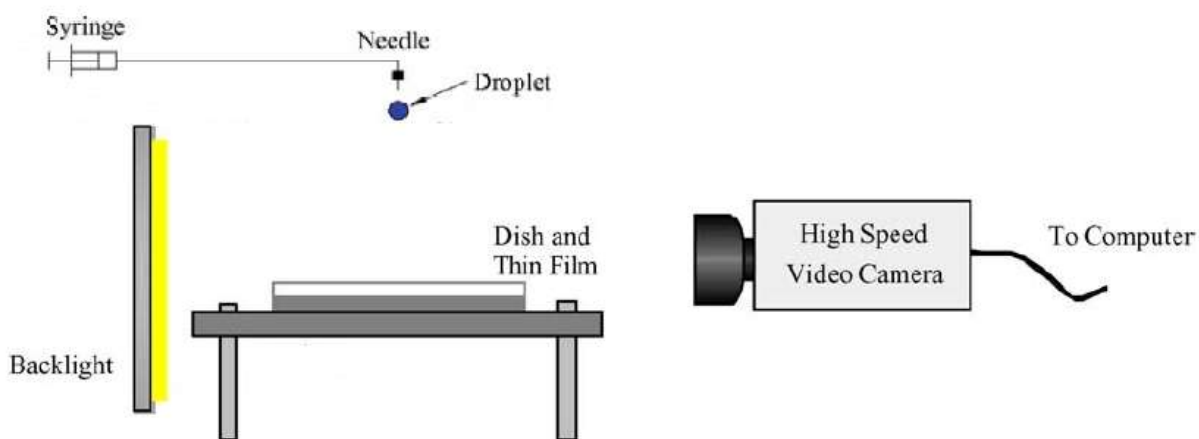


شکل ۲-۴: طرحواره رویه حل عددی مسئله

۲-۲- تحلیل آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر آزمایشاتی به منظور مقایسه و مطالعه کمی تشکیل و رشد تاج ناشی از برخورد قطره بر لایه سیال برای سیالات ویسکوالاستیک در شرایط محیطی یکسان طراحی شده است و اثرات افزودن درصد جرمی‌های متفاوت پلیمر به سیال پایه نیوتنی بر رفتار این پدیده مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین از نتایج حاصل شده به منظور اعتبارسنجی روش محاسباتی و الگوریتم عددی استفاده شده است. به منظور بررسی اثرات الاستیسته سیال ویسکوالاستیک باگر، سیال نیوتنی معادل (از نظر ویسکوزیته) با سیال ویسکوالاستیک ذکر شده نیز در آزمایشات در نظر گرفته شده است.

طرحواره‌ای از تجهیزات آزمایش مورد استفاده در تحقیق پیشرو در شکل ۲-۵ آورده شده است. قابل ذکر است تجهیزات آزمایش در پیوست ب آورده شده است.



شکل ۲-۵: طرحواره‌ای از تجهیزات آزمایش

۲-۲-۱- سیالات مورد استفاده

در آزمایشات مربوط به تحلیل آزمایشگاهی، از ترکیب آب و گلیسرین به عنوان سیال پایه نیوتنی و پودر پلیمر پلی اکریل آمید با درصد جرمی‌های متفاوت جهت ساخت محلول‌های پلیمری با غلظت‌های پایین استفاده شده است. با حل کردن پودر پلی اکریل آمید در درصدهای جرمی ۰.۰۵٪ (۵۰ ppm) و ۰.۱٪ (۱۰۰ ppm) در

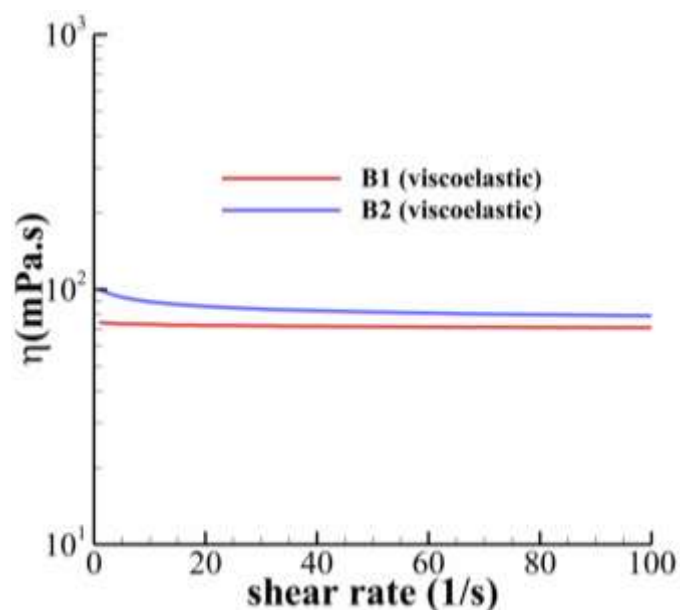
حلال آب- گلیسرین (با نسبت حجمی ۲۰ - ۸۰) و در دمای 25°C می‌توان سیال باگر با ویسکوزیته ثابت تولید نمود. به منظور حذف اثرات لزجت و بررسی پارامترهای ناشی از الاستیسیته سیال، محلول‌های نیوتنی مختلف در نظر گرفته شده است؛ به صورتی که دارای لزجت برابری با لزجت سیالات ویسکوالاستیک باگر هستند. در مطالعه حاضر پودر پلی اکریل آمید مورد استفاده دارای جرم مولکولی $5 \times 10^6 \text{ gr/mole}$ است. با توجه به غلظت مورد نظر پلیمر در کلیه آزمایش‌ها جهت ساخت سیال ویسکوالاستیک، پودر پلی اکریل آمید را به آب مقطر اضافه کرده و پس از اختلاط کامل پلیمر در آب به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، مقدار گلیسرین مورد نظر به آن محلول اضافه می‌گردد و در نهایت محلول مجموعاً به مدت ۳۶ ساعت با سرعت ۸۰ دور بر دقیقه توسط هات‌پلیت^۱ هم زده می‌شود. قبل از تست رئومتری، به محلول جهت رسیدن به تعادل ترمودینامیکی به مدت ۴۸ ساعت استراحت داده می‌شود.

در تست رئومتری از اسپیندل استوانه‌ای با قطر سیلندر ۲۷ میلی‌متر استفاده شده است. دامنه کرنش در تست جاروبی فرکانس برای سیال باگر ۱ مقدار ۵٪ و برای سیال باگر ۲ مقدار ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. در تفسیر تست رئومتری، فقط از نتایج مربوط به بازه فرکانسی استفاده شده که در آن منحنی مدول ذخیره (G') صعودی است. همواره در فرکانس‌های بالا، اثر اینرسی اسپیندل سبب افت منحنی G' و یا رفتار نامتعارف منحنی در محلول‌های رقیق پلیمری می‌شود و لذا داده‌های مربوط به این فرکانس‌های بالا برای تفسیر مناسب نیست و در نظر گرفته نمی‌شوند.

در شکل ۲-۶ نتیجه آزمون لزجت سیالات باگر اول (B1)، دوم (B2) و مخلوط گلیسرین و آب با نسبت حجمی ۲۰ - ۸۰ نشان داده شده است. همچنین در این تحلیل سیال نیوتنی (WG1) معادل با سیال باگر اول (B1) به ازای نسبت درصد حجمی ۲۲-۷۸ گلیسرین-آب سنتز شده است. برای سیال نیوتنی (WG2) معادل با سیال باگر دوم (B2) این نسبت برابر ۸۲-۱۸ است. در این مطالعه سیال نیوتنی (WG3) دیگری خواهیم

¹ Hot plate stirrer

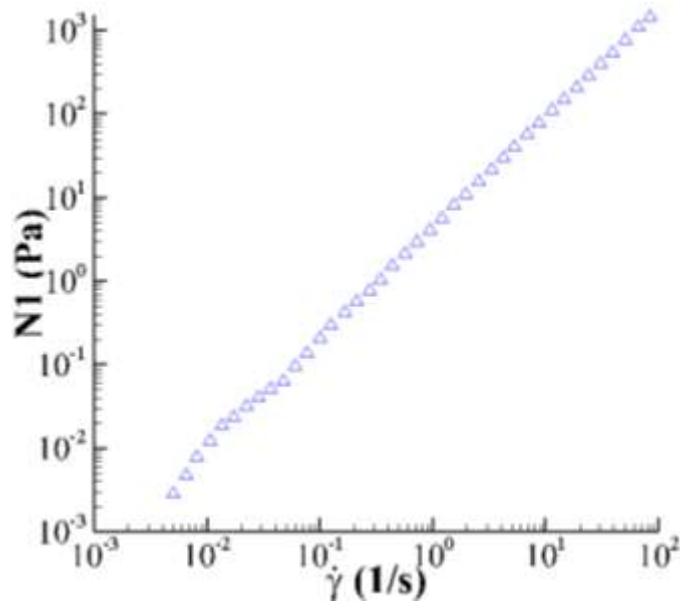
داشت که نسبت درصد حجمی ۲۰-۸۰ گلیسرین-آب خواهد بود. در جدول ۱-۲ خواص فیزیکی سیالات ذکر شده آورده شده است. اختلاف تنش نرمال اول برای سیال ویسکوالاستیک در شکل ۲-۷ آورده شده است.



شکل ۲-۶: ویسکوزیته سیالات باگر

جدول ۱-۲: خواص فیزیکی سیالات

سیال	ρ [kg / m ³]	$\sigma \times 10^{-3}$ [N / m]	$\bar{\eta}$ [mPa.s]
WG1	۱۱۹۶	۶۵	۷۹/۱
WG2	۱۲۱۰	۶۴/۵	۱۰۱/۹
WG3	۱۱۹۹	۶۴/۵	۶۷/۵
B1	۱۱۹۹	۶۴	۷۹/۵
B2	۱۱۹۹	۶۴	۱۰۲/۵



شکل ۲-۷: اختلاف تنش نرمال اول برای سیال ویسکوالاستیک

یکی از متغیرهای موثر بر سقوط قطره در سیالات ویسکوالاستیک، زمان رهایی از تنش^۱ است. زمان رهایی از تنش معرف مدت زمان لازم برای صفر شدن تنش برشی بعد از برداشتن تغییر شکل از روی سیال است. در سیالات ویسکوالاستیک مدول ذخیره شده^۲ (G') و مدول استهلاکی^۳ (G'') که به ترتیب معرف بخش الاستیک و ویسکوز ماده است و توسط روابط (۲۵-۲) و (۲۶-۲) بیان می‌شود. این روابط از مدل تعمیم یافته ماکسول^۴ بدست می‌آید.

$$G' = \sum_{i=0}^n \frac{\eta_i \lambda_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (25-2)$$

$$G'' = \sum_{i=0}^n \frac{\eta_i \omega}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (26-2)$$

در این روابط η_i ، λ_i ، و n به ترتیب بیانگر لزجت سیال، زمان رهایی از تنش، فرکانس زاویه‌ای و تعداد شاخه‌های مدل است. مقادیر G' و G'' توسط تست نوسان مشخص می‌شود به این ترتیب که به ازای سرعت

1 Relaxation time
2 Loss module
3 Storage module
4 Generalized Maxwell

زاویه‌های مختلف، مقادیر این مدول‌ها توسط دستگاه رنومتر بدست آمده و سپس به کمک برازش منحنی مقادیر حاصله بر روی روابط (۲۵-۲) و (۲۶-۲) و همچنین کمینه کردن تابع خطای (f) موجود در رابطه (۲۷-۲) به کمک الگوریتم ژنتیک مقادیر لزجت و زمان رهایی از تنش محاسبه می‌شود.

$$f = \sum_{j=1}^N \left\{ \left[\frac{G'_{jModel}}{G'_{jData}} - 1 \right]^2 + \left[\frac{G''_{jModel}}{G''_{jData}} - 1 \right]^2 \right\} \quad (27-2)$$

در این رابطه N تعداد داده‌های آزمایشگاهی است. همچنین در مدل تعمیم یافته ماکسول جهت محاسبه مقدار متوسط زمان رهایی از تنش از رابطه (۲۸-۲) استفاده می‌شود.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \eta_i} \quad (28-2)$$

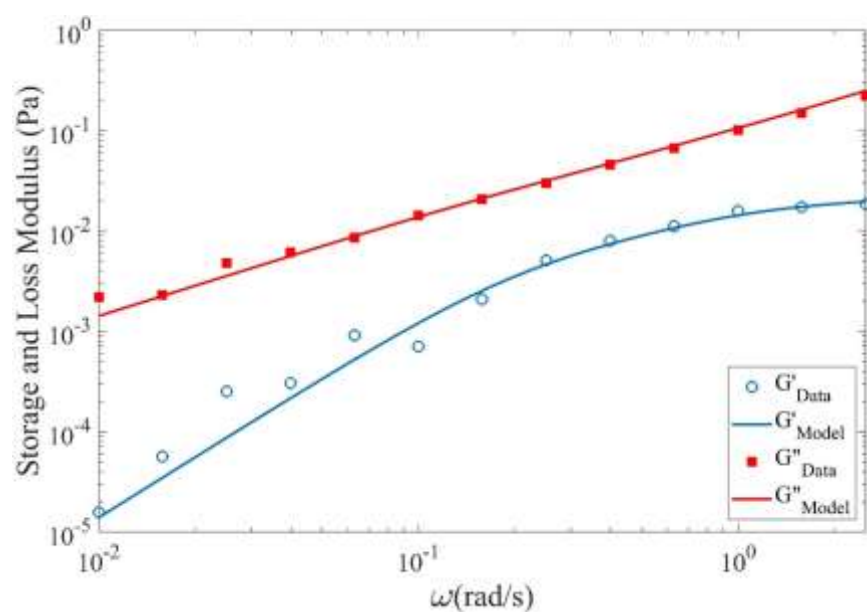
در شکل ۸-۲ و ۹-۲ تغییرات مدول G' و G'' برای فرکانس‌های زاویه‌ای مختلف آورده شده است.

در این مطالعه از مدل ماکسول تعمیم یافته چهار شاخه استفاده شده است ($n=4$) در روابط (۲۵-۲) و (۲۶-۲). با توجه به برازش روابط (۲۵-۲) و (۲۶-۲) بر روی نتایج موجود در شکل ۸-۲ و ۹-۲، دسته η_i و λ_i برای هر شاخه بدست می‌آید که این مقادیر در جدول ۲-۲ آورده شده است. با توجه به جدول ۲-۲ مقادیر متوسط زمان رهایی از تنش برای سیال B1 و B2 به ترتیب برابر $1/8223s$ و $3/7002s$ است. همچنین نسبت ویسکوزیته برای سیال B1 و B2 به ترتیب برابر $0/22$ و $0/57$ است.

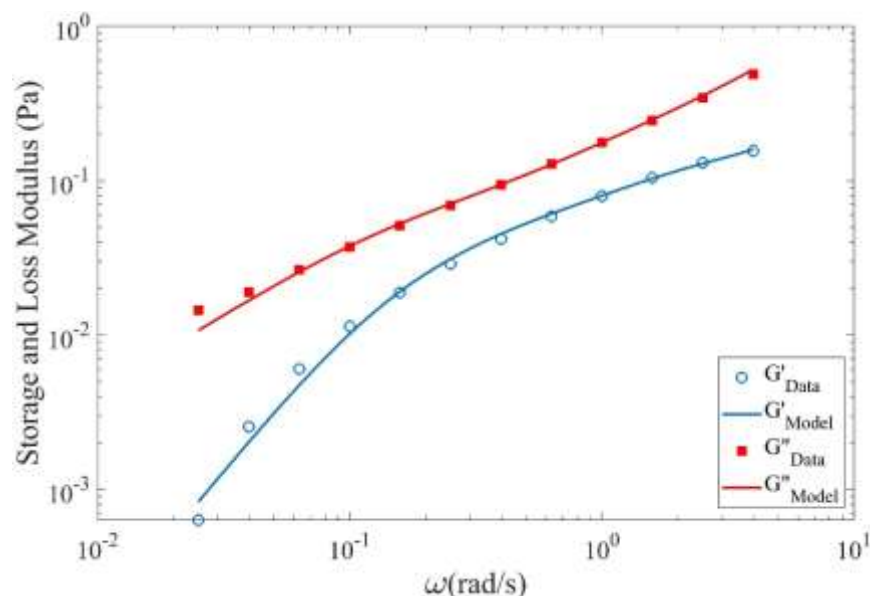
جدول ۲-۲: طیف زمان‌های رهایی از تنش و ویسکوزیته برای سیالات ویسکوالاستیک

B2 و B1

B2		B1		i
$\lambda_i [s]$	$\eta_i [Pa \cdot s]$	$\lambda_i [s]$	$\eta_i [Pa \cdot s]$	
–	۰/۰۶۷۳	–	۰/۰۶۶۸	۰
۰/۰۳۲۹	۰/۰۵۷۳	۰/۰۰۱۸	۰/۰۱۴۵	۱
۰/۶۳۰۳	۰/۰۵۰۹	۰/۰۰۴۷	۰/۰۱۶۱	۲
۲/۴۸۵۰	۰/۰۸۰۷	۱/۱۵۳۹	۰/۰۱۵۸	۳
۶/۳۳۶۰	۰/۱۷۶۲	۴/۲۳۲۸	۰/۰۲۸۴	۴



شکل ۲-۸: تغییرات مدول G' و G'' با فرکانس زاویه‌ای برای سیال B1



شکل ۲-۹: تغییرات مدول G' و G'' با فرکانس زاویه‌ای برای سیال B2

۲-۲-۲- تحلیل خطا و تکرارپذیری

در تحلیل مطالعات تجربی و آزمایشگاهی تعیین میزان خطا و اعتبار نتایج آزمایشگاهی حائز اهمیت است. به صورت کلی دقت تجهیزات اندازه‌گیری بر روی عدم قطعیت کمیت‌های اندازه‌گیری شده اثرگذار است. یکی از روش‌های موجود در تخمین میزان عدم قطعیت کمیت‌های اندازه‌گیری شده، روش کلاین و مک‌کلین‌تاک^۱ است [۹۲]. در این روش کمیت R تابعی از متغیرهای مستقل $x_1, x_2, \dots, x_n$ بوده و عدم قطعیت این کمیت برابر:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-28)$$

که در این رابطه $w_1, w_2, \dots, w_n$ بیانگر عدم قطعیت متغیرهای مستقل هستند. همچنین می‌توان کمیت R را به صورت حاصل ضرب متغیرهای مستقل بیان کرد.

¹ Kline and McClintock

$$R = x_1^{a_1} x_2^{a_2} \dots x_n^{a_n} \quad (29-2)$$

که تغییرات کمیت R نسبت به متغیر x_i برابر است با:

$$\frac{\partial R}{\partial x_i} = x_1^{a_1} x_2^{a_2} \dots (a_i x_i^{a_i-1}) \dots x_n^{a_n} \quad (30-2)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} = \frac{a_i}{x_i}$$

با جایگذاری رابطه (30-2) در رابطه (28-2) داریم:

$$\frac{w_R}{R} = \left[\sum \left(\frac{a_i w_{x_i}}{x_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (31-2)$$

در تحلیل آزمایشگاهی موجود در مطالعه حاضر، ضخامت لایه سیال به عنوان کمیت مستقل مسئله است که به حجم تزریق شده توسط پمپ سرنگی وابسته است. با توجه به اینکه دقت پمپ سرنگی مورد استفاده کمتر از ۰/۵٪ است، عدم قطعیت برای متغیر ضخامت لایه سیال نیز کمتر از ۰/۵٪ خواهد بود. قطر معادل قطره ($U_0 = \Delta x / \Delta t$ در لحظه قبل برخورد و سرعت برخورد d_v قطر افقی و d_h قطر قائم قطره) و $d_0 = \sqrt[3]{d_h^2 d_v}$ که فاصله مرکز قطره در دو فریم^۱ متوالی و Δt فاصله زمانی میان دو فریم است، با توجه به اینکه سرعت تصویر برداری ۸۰۰۰ fps در نظر گرفته شده است، Δt برابر ۰/۱۲۵ میلی ثانیه است.) کمیت‌های وابسته‌ای هستند که عدم قطعیت این متغیرها به صورت زیر بدست می‌آید.

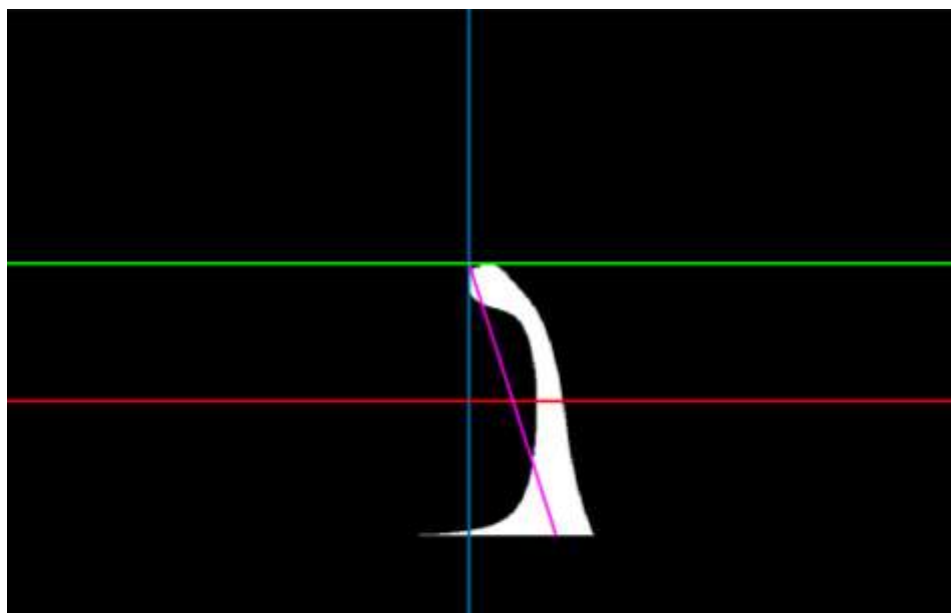
$$\frac{w_{d_0}}{d_0} = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{w_{d_v}}{d_v} \right)^2 + \left(\frac{2w_{d_h}}{d_h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (32-2)$$

$$\frac{w_{U_0}}{U_0} = \left[\left(\frac{w_{\Delta x}}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta t}}{\Delta t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (33-2)$$

¹ Frame

با توجه به مقادیر قطر افقی و قائم قطره، فاصله مکانی و زمانی قطره بین دو فریم، بیشترین مقدار عدم قطعیت موجود در آزمایشات کمتر از ۱٪ خواهد بود. با توجه به عدم قطعیت بدست آمده، خطای اندازه‌گیری بر دقت نتایج تاثیر چندانی نخواهد گذاشت.

در آزمایش حاضر با تزریق سرنگ حاوی سیال، قطره سیال از نوک سوزن رها شده و لایه سیال ساکن برخورد می‌کند. در این هنگام دوربین پرسرعت تصاویر برخورد را ثبت کرده و سپس این تصاویر مورد تحلیل قرار می‌گیرد. پارامترهای مربوط به ابعاد قطره، سرعت برخورد و ابعاد تاج با استفاده از پردازش تصاویر به کمک برنامه نویسی در نرم‌افزار متلب^۱ (پیوست ب) مشخص شده‌اند.

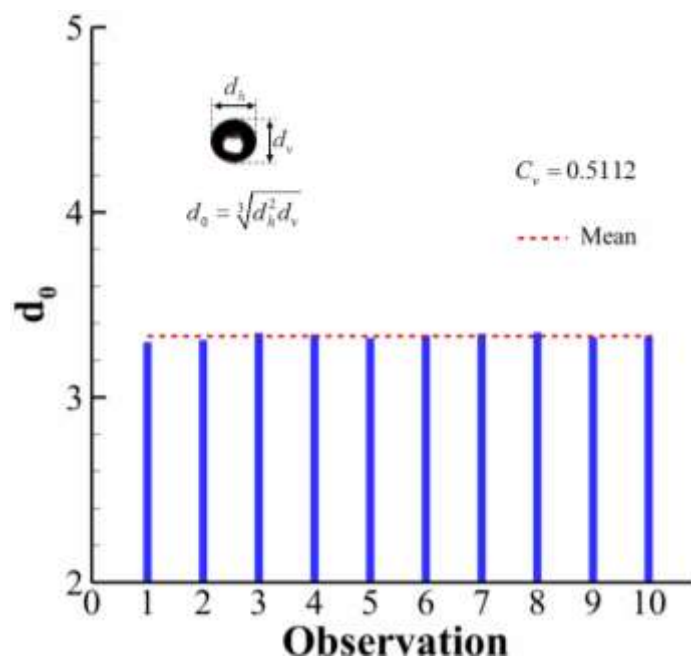


شکل ۲-۱۰: نمونه‌ای از تصاویر در پردازش تصویر

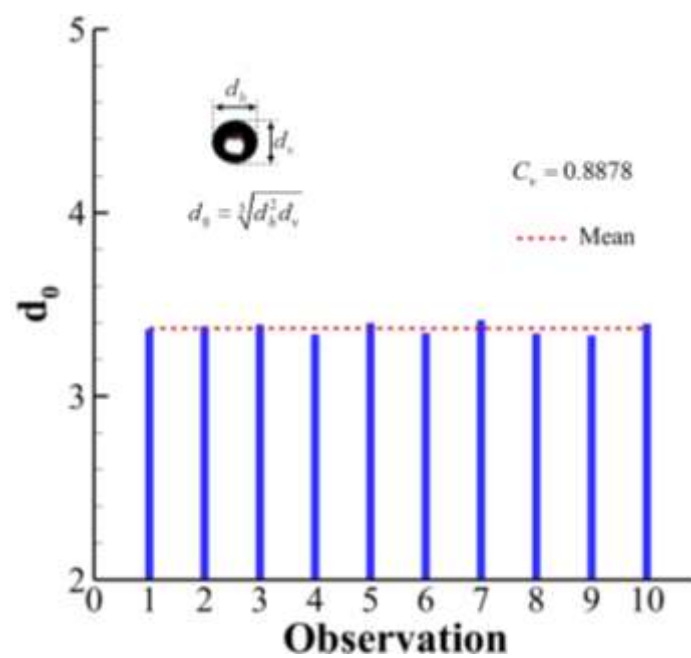
نمونه‌ای از تصاویری که در نرم‌افزار متلب بر روی آن پردازش تصویر شده و پارامترهای مهم از آن استخراج شده است در شکل ۲-۱۰ آورده شده است. در این شکل خط آبی رنگ معرف قطر تاج، خط سبز معرف ارتفاع تاج، خط قرمز معرف خط میانه تاج و خط صورتی بیانگر زاویه تاج با محور قائم است.

^۱ Matlab

جهت بررسی تکرارپذیری آزمایشات، به عنوان نمونه نتایج مربوط به اندازه قطره قبل از برخورد را در ۱۰ آزمایش اندازه‌گیری می‌کنیم. در شکل ۲-۱۱ اندازه قطره در لحظه برخورد به ازای سرعت‌های مختلف برخورد نشان داده شده است. همچنین در این مطالعه پارامتر ضریب تغییرات (C_v) که برابر تقسیم انحراف استاندارد بر میانگین است، آورده شده است. با توجه به شکل ۲-۱۱ ضریب تغییرات برای اندازه قطره در سرعت برخورد $3/92 \text{ m/s}$ برابر $0/5112\%$ و برای سرعت برخورد $4/41 \text{ m/s}$ برابر $0/8878\%$ خواهد بود. این متغیر نشان دهنده این است که برای سرعت‌های بالاتر میزان ضریب تغییرات بالاتر بوده و انحراف نتایج از مقدار میانگین بیشتر می‌شود. با توجه به این شکل حداکثر مقدار ضریب تغییرات کمتر از 1% بوده و در نتیجه می‌توان از تکرارپذیری آزمایشات صورت گرفته توسط تجهیزات اطمینان حاصل کرد.



(الف)

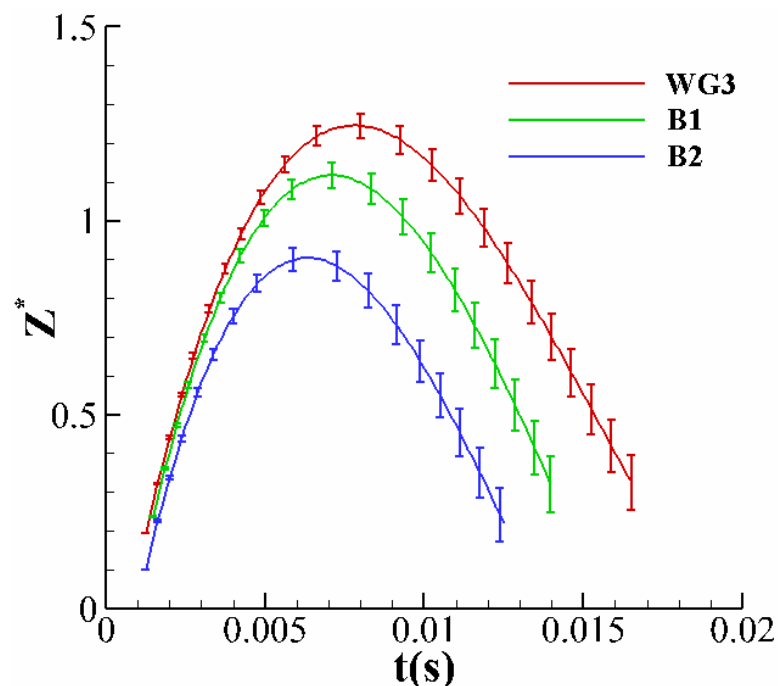


(ب)

شکل ۲-۱۱: نمودار میله‌ای تغییرات اندازه قطره در هر آزمایش در سرعت برخورد، الف) $U_0 = 3/92 \text{ m/s}$ و ب)

$U_0 = 4/41 \text{ m/s}$

در مطالعه حاضر تکرارپذیری نتایج مربوط به تغییرات ارتفاع تاج با زمان نیز آورده شده است. در این تحلیل نتایج به ازای سه تکرار ارائه شده است. شکل ۲-۱۲ تغییرات متغیر تاج به ازای سیالات مختلف را نمایش می-دهد. با توجه به این شکل بیشینه اختلاف نتایج با مقدار میانگین برای حالات مختلف کمتر از ۵٪ است. این موضوع نشان دهنده این است که تکرارپذیری آزمایش‌ها در ارائه نتایج نهائی اهمیت ویژه‌ای دارد. به همین جهت نتایج در مطالعه حاضر به ازای سه بار تکرار در آزمایش ارائه شده است.



شکل ۲-۱۲: تحلیل تکرارپذیری آزمایش‌ها برای سه سیال مختلف $D = 2/91 \text{ mm}$ و $V = 3/92 \text{ m/s}$ ، $h = 1 \text{ mm}$

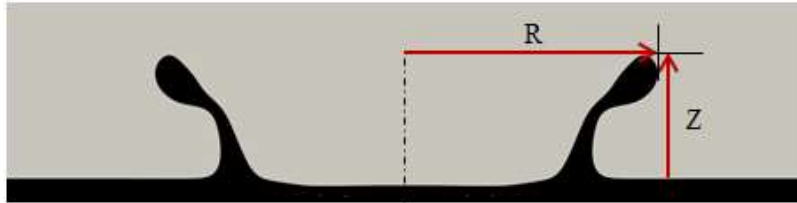
فصل ۳: بحث و بررسی نتایج

برخورد قطرات بر روی لایه نازکی از سیال در بسیاری از کاربردها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و از جمله موضوعات جذاب و چالش‌برانگیز در علم مکانیک سیالات به شمار می‌رود. در این میان تأثیر سیالات ویسکوالاستیک بر روی پدیده برخورد به دلیل کاربرد در صنایعی همچون رنگ و پوشش‌دهی از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. شناخت بهتر فیزیک برخورد قطرات بر لایه سیال در سیالات ویسکوالاستیک و آشنایی با عوامل مؤثر در رفتار آن‌ها، موجب بهبود و افزایش عملکرد فرآیندهای مرتبط می‌شود. به همین جهت، با توجه به لزوم مطالعه بهتر دینامیک برخورد در حضور سیالات الاستیک، پژوهش حاضر در سه فاز متفاوت، بررسی آزمایشگاهی دینامیک برخورد برای سیال باگر در رژیم غیرپاشش، مدلسازی عددی دو- بعدی برخورد قائم و مایل قطره سیال ویسکوالاستیک بر لایه‌ای از همان سیال، مدلسازی عددی تقارن- محوری برخورد قائم قطره بر لایه سیال در سیالات ویسکوالاستیک انجام شده است. در این بخش نتایج مربوط به هر فاز مطالعاتی گزارش شده است.

۳-۱: بررسی آزمایشگاهی دینامیک برخورد در سیالات باگر

در این بخش با توجه به اهمیت نقش سیال در دینامیک برخورد و رشد تاج، تأثیر سیالات نیوتنی (آب- گلیسرین) و ویسکوالاستیک (باگر) در این مسئله مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. اثرات میزان پارامترهای همچون غلظت پلیمر در سیال پایه، سرعت برخورد، اندازه قطره و ضخامت لایه سیال بر دینامیک برخورد و رشد تاج به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. جهت کاهش خطا در اندازه‌گیری پارامترها، تکرارپذیری هر آزمایش ۳ بار صورت گرفته و میانگین نتایج ارائه گردیده است.

در این تحلیل تجربی، قطره توسط نیروی وزن خود از سوزن جدا شده و به صورت قائم بر روی سطح سیال برخورد صورت می‌گیرد و در این هنگام دوربین پرسرعت توالی برخورد قطره بر لایه سیال را ثبت می‌کند. در



شکل ۳-۱: طرحواره‌ای از متغیرهای هندسی تاج

این مطالعه سعی بر این است که دمای محیط آزمایشگاه در دمای $25^{\circ}C$ ثابت نگه داشته شود. در این مطالعه نتایج برای متغیرهای ارتفاع و قطر بدون بعد تاج سیال ارائه شده است. با توجه به شکل ۳-۱، متغیرهای مربوط به هندسه تاج (شعاع و ارتفاع تاج) در حالت بدون بعد به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$R^* = \frac{R}{D}, \quad (۱-۳)$$

$$Z^* = \frac{Z}{D}. \quad (۲-۳)$$

که در این رابطه R شعاع تاج، Z ارتفاع تاج و D قطر قطره است.

در ادامه اثر متغیرهای ذکر شده در برخورد قطره بر لایه سیال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و تاثیر متغیرهای مختلف بر روی تشکیل و رشد تاج از لحظه برخورد مطالعه می‌شود. در این مطالعه قطر قطره دارای مقادیر $2/61$ ، $2/91$ و $3/92$ mm و همچنین سرعت برخورد به ترتیب برای قطرهای ذکر شده برابر مقادیر $3/92$ m/s و $4/41$ m/s است. در این قسمت تغییرات پارامترهای موجود در تصاویر توسط تکنیک پردازش تصویر استخراج شده است. در شکل ۳-۲ توالی زمانی برخورد قطره بر لایه سیال را شاهد هستیم. با توجه به این شکل در لحظه تماس قطره بر لایه سیال مقیاس زمانی صفر در نظر گرفته می‌شود و با برخورد قطره بر لایه سیال جتی از سیال از حدفصل قطره و لایه سیال تشکیل شده و با گذشت زمان رشد پیدا می‌کند و با رسیدن به بیشینه ارتفاع خود، روندی معکوس را در پیش می‌گیرد. نتایج آزمایشگاهی ارائه شده میانگین سه آزمایش صورت گرفته است.



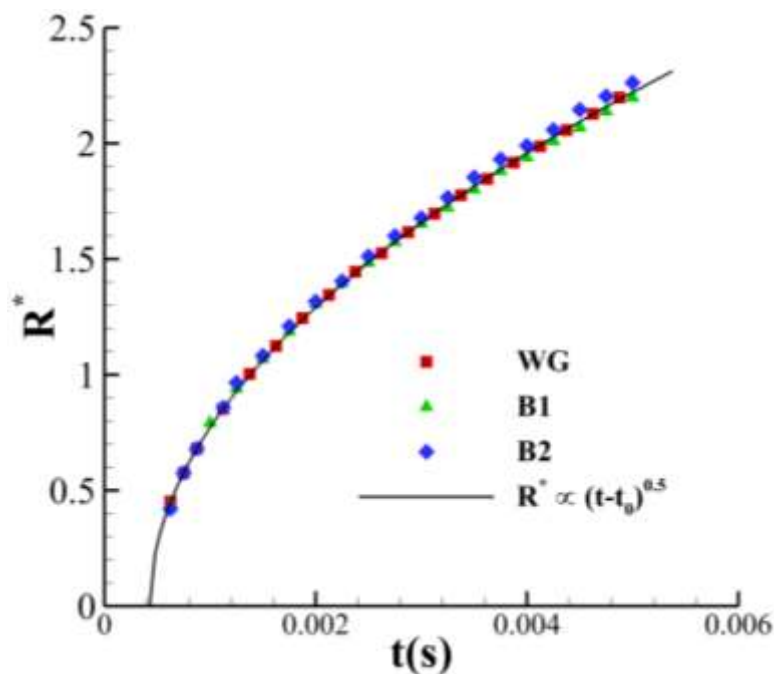
شکل ۳-۲: توالی برخورد قطره بر لایه سیال، سیال WG3

در شکل ۳-۳ تغییرات شعاع تاج با زمان را در لحظات اولیه برخورد نشان می‌دهد. با توجه به این شکل تغییرات زمانی متغیر تاج به صورت یک تابع توانی است. در مسئله برخورد قطره بر لایه سیال، تغییرات شعاع تاج یکی از پارامترهای موجود در هنگام تشکیل تاج است. طبق مطالعات تئوری یارین و ویس [۲۷]، در سیالات نیوتنی در لحظات ابتدایی برخورد تغییر این متغیر با ریشه دوم متغیر زمان متناسب است. این رابطه توانی به صورت زیر بیان می‌شود.

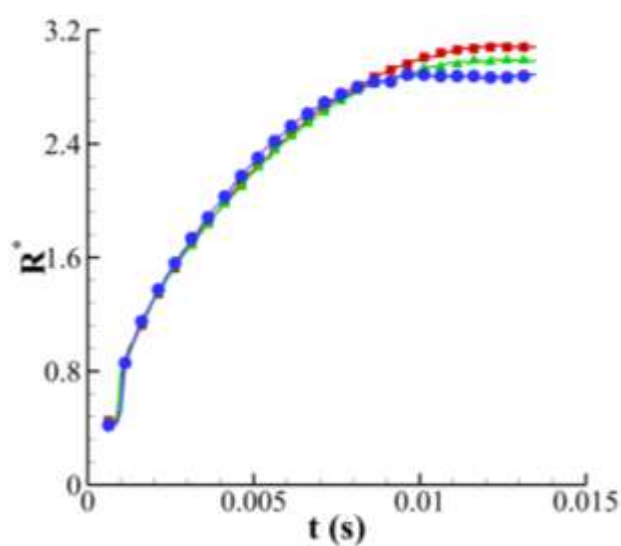
$$R^* \propto (t - t_0)^{0.5} \quad (3-3)$$

برازش نتایج حاصل از مطالعه حاضر در لحظات اولیه برخورد با این قانون منطبق است. با افزایش متغیر زمان قابل مشاهده است که اختلاف نتایج با رابطه بیشتر خواهد شد. از نمودار موجود در شکل ۳-۳ نتیجه می‌شود که قانون توانی علاوه بر سیالات نیوتنی برای سیالات ویسکوالاستیک نیز برقرار است و رابطه هندسی ذکر شده برای شعاع تاج فارغ از خواص الاستیک سیال است. به عبارت دیگر در لحظات اولیه برخورد الاستیسیته سیال هم همانند ویسکوزیته تاثیر بر تغییرات شعاع تاج ندارد و با توجه به نتایج پیش رو تاثیر الاستیسیته سیال بیشتر بر روی ارتفاع تاج است. بنابراین از این شکل نتیجه می‌شود که اعتبار تحلیل آزمایشگاهی حاضر نسبت به تحلیل تئوری موجود منطبق است.

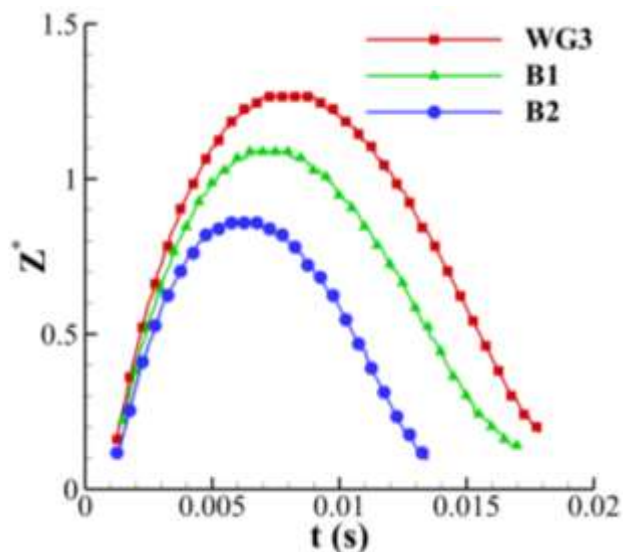
شکل ۳-۴ تاثیر سیالات مختلف بر روی ارتفاع و قطر تاج را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۳-۴(الف) بیشینه ارتفاع تاج مربوط به سیال نیوتنی ($WG3$) است و با افزایش درصد جرمی پلیمر برای سیالات با گر ۱ ($B1$) و با گر ۲ ($B2$) میزان ارتفاع تاج در زمان‌های کوتاه‌تری افت پیدا می‌کند. ویسکوزیته بالا در سیالات ویسکوالاستیک سبب جلوگیری از رشد تاج می‌شود. شکل ۳-۴(ب) تغییرات شعاع تاج نسبت به زمان را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل در زمان‌های کمتر از ۱۰ میلی ثانیه تغییرات ملموسی بین نتایج قابل مشاهده نیست و ظهور اختلافات در محدوده زمانی ۱۰ میلی ثانیه به بعد رخ می‌دهد که شاهد کاهش شعاع تاج با افزایش کسر حجمی پلیمر در سیال هستیم. خاصیت الاستیک و ویسکوز سیال نیز در تغییرات اندازه شعاع تاج قابل پیشبینی است. در زمان‌های بزرگ به علت رشد و نازکتر شدن لبه تاج ویسکوزیته سیال نقش چشمگیری در کنترل لبه تاج دارد و به همین علت با افزایش درصد جرمی پلیمر در سیال در زمان‌های بزرگ، شعاع تاج کوچکتر می‌شود. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد جرمی پلیمر در سیال روند تشکیل و رشد



شکل ۳-۳: تغییرات متغیر شعاع تاج با زمان



(ب)



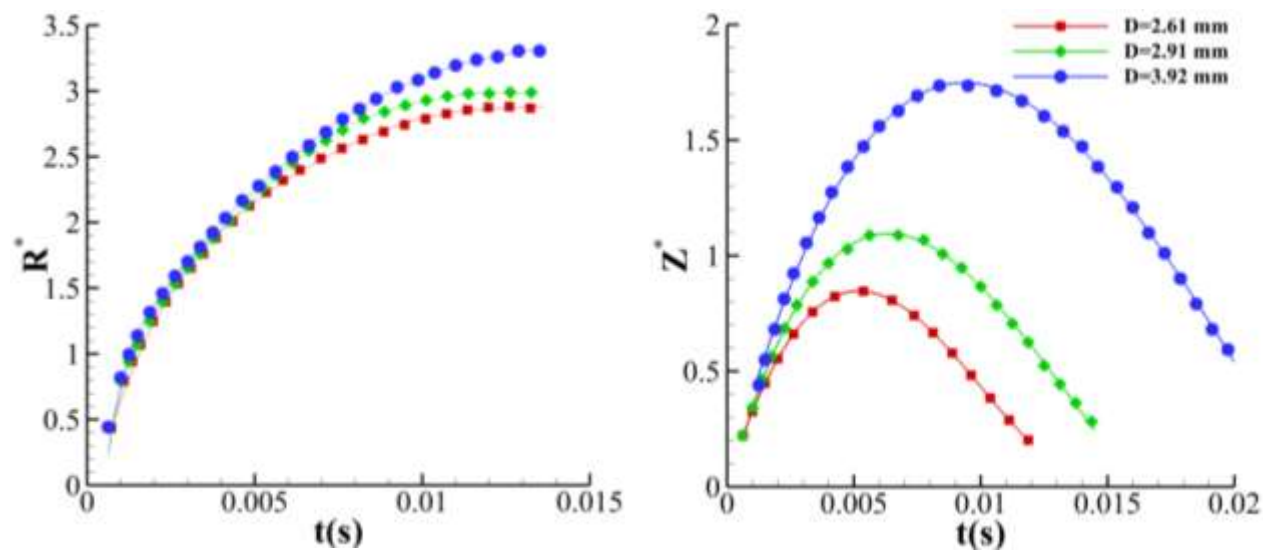
(الف)

شکل ۳-۴: تغییرات (الف) ارتفاع تاج (Z^*), (ب) شعاع تاج (R^*), با زمان برای سیالات نیوتنی (WG3) و

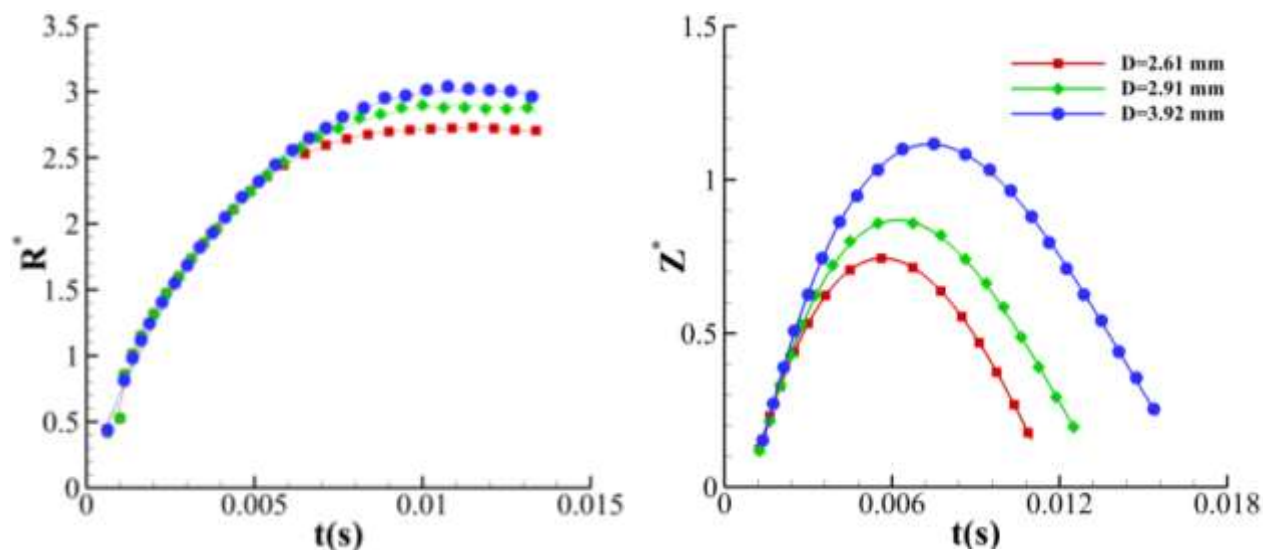
ویسکوالاستیک (B2 و B1), $h = 1 \text{ mm}$, $V = 3/92 \text{ m/s}$ و $D = 2/91 \text{ mm}$

تاج کنترل می‌شود و به همین جهت تغییرات قطر و ارتفاع تاج با زمان، با افزایش درصد جرمی پلیمر در سیال روندی نزولی به خود می‌گیرد. به این ترتیب که بیشینه ارتفاع تاج برای سیال B1 ۱۴٪ و برای سیال B2 ۳۲٪ نسبت به سیال نیوتنی (WG3) کاهش می‌یابد. برخلاف ارتفاع تاج، رشد نزولی قطر تاج با افزایش درصد جرمی پلیمر در سیال کمتر بوده و تغییرات آن کوچک است.

تاثیر اندازه قطره بر دینامیک تاج در شکل ۵-۳ نمایش داده شده است. شکل ۵-۳(الف) بیانگر این موضوع است که با افزایش قطر قطره رشد تاج تسریع می‌یابد و با کاهش اندازه قطره بیشینه ارتفاع تاج کاهش می‌یابد و همچنین با توجه به شکل ۵-۳(ب) تاثیر اندازه قطره روند صعودی بر شعاع تاج دارد. با افزایش اندازه قطره اینرسی قطره افزایش یافته و سبب افزایش انرژی جنبشی آن و در پی آن نفوذ و پاشش بیشتر لایه سیال می‌شود. از شکل ۵-۳ همچنین می‌توان دریافت که بزرگتر شدن اندازه قطره برای سیال با درصد جرمی پلیمر کمتر (B1) سبب افزایش چشمگیر ارتفاع نسبت به سیال با درصد جرمی پلیمر بیشتر (B2) است. همچنین برای شعاع تاج نیز چنین روندی در زمان‌های بزرگتر از ۷ ms قابل مشاهده است. از شکل ۵-۳ به صورت کمی قابل مشاهده است که بیشینه ارتفاع تاج برای سیال B1 و B2 با افزایش اندازه قطره به ترتیب ۶۰٪ و ۳۰٪ افزوده می‌شود. برای اندازه‌های مختلف قطره خاصیت پلیمری سیال همانند قبل سبب جلوگیری از رشد ارتفاع و شعاع تاج می‌شود. در شکل ۶-۳ شاهد روند ارائه شده در شکل ۵-۳ هستیم به طوری که ارتفاع تاج در زمان‌های متوالی برای قطره با قطر ۳/۹۲ mm بیشتر از قطره با اندازه قطر ۲/۶۱ mm است.



الف) سیال B1



ب) سیال B2

شکل ۳-۵: تغییرات الف) ارتفاع تاج (Z^*)، ب) شعاع تاج (R^*)، با زمان برای سیالات ویسکوالاستیک B1 و B2،
 $V = 3/92 \text{ m/s}$ ، $h = 1 \text{ mm}$



$2/5\text{ ms}$



5 ms



10 ms

$D = 2/61\text{ mm}$

$D = 2/91\text{ mm}$

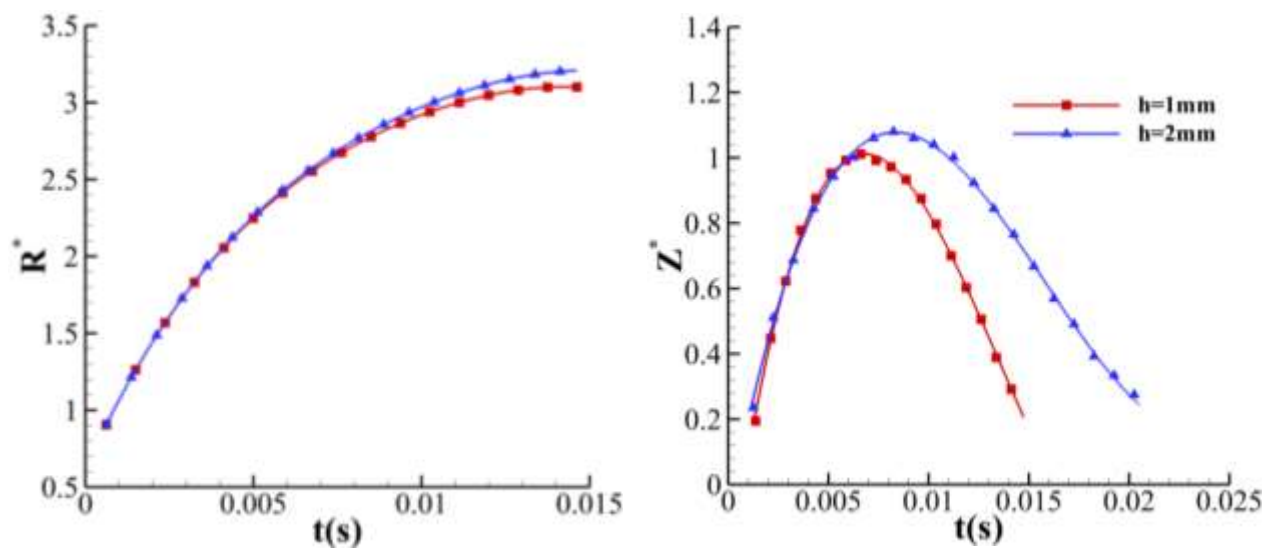
$D = 3/92\text{ mm}$

شکل ۳-۶: تاثیر اندازه قطره بر رشد تاج، سیال B2

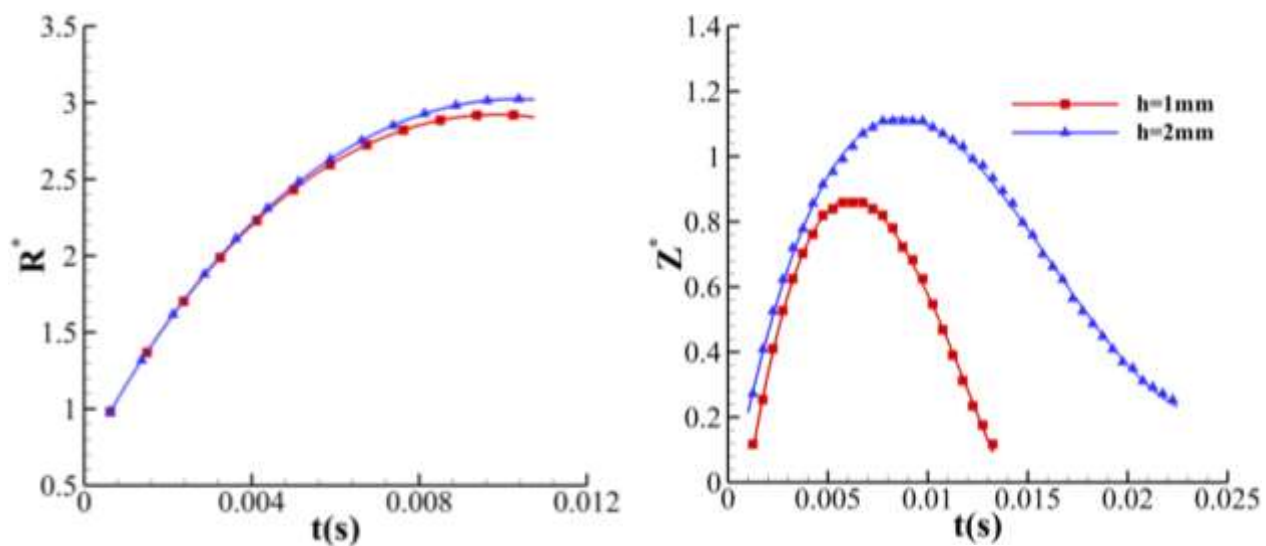
از دیگر متغیرهای موجود در مسئله حاضر ضخامت لایه سیال است. تاثیر ضخامت لایه سیال بر هندسه تاج در شکل ۳-۷ آورده شده است. با توجه به این شکل با افزایش ضخامت لایه سیال متغیر ارتفاع تاج برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی افزایش پیدا می‌کند. در حالی که تغییرات ضخامت لایه سیال تاثیر شگرفی بر شعاع هندسه تاج ندارد. در لایه سیال با ضخامت بیشتر، انرژی جنبشی قطره در حال سقوط قدرت نفوذ بیشتری در سیال داشته و سبب ایجاد حفره‌ای عمیق‌تر در آن می‌گردد. به همین سبب حجم بیشتری از سیال به صورت جت از لایه سیال خارج شده که سبب افزایش ارتفاع هندسه تاج می‌گردد. همچنین در این شکل قابل مشاهده است که در لایه‌های سیال با ضخامت کمتر فروپاشی تاج سریعتر اتفاق می‌افتد. این روند برای سیال نیوتنی (WG3) و سیال ویکسوالاستیک (B2) یکسان است. با توجه به این شکل، برای سیال ویکسوالاستیک اثر تغییرات ضخامت

لایه سیال بر هندسه تاج بیشتر است. به صورتی که با افزایش ضخامت لایه سیال بیشینه ارتفاع تاج در سیال ویسکوالاستیک با گر (B2) ۲۹٪ و در سیال نیوتنی (WG3) ۶/۸٪ افزایش پیدا می‌کند. علت این رفتار در این است که در سیالات ویسکوالاستیک لایه سیال همانند یک جاذب انرژی رفتار کرده و انرژی جنبشی قطره را در حین برخورد در خود ذخیره می‌کند و در مرحله پخش این انرژی آزاد می‌گردد. با افزایش این ضخامت، قابلیت ذخیره انرژی در لایه سیال افزوده شده و در فاز پخش دیواره تاج رشد بیشتری را تجربه می‌کند. از طرف مقابل در سیالات نیوتنی (WG) به دلیل وجود اتلافات ویسکوز، قسمتی از انرژی جنبشی قطره از بین رفته و در مرحله پخش شاهد رشد کمتری از تاج هستیم. با توجه به شکل ۳-۷ ب ضخامت لایه سیال نیز همانند دیگر متغیرها تاثیر کوچکتری بر شعاع تاج دارد. در شکل ۳-۸ نیز هندسه تاج به ازای ضخامت مختلف لایه سیال را در زمان‌های مختلف شاهد هستیم.

تاثیر عدد بدون بعد وبر (We) بر هندسه تاج در شکل ۳-۹ آورده شده است. با توجه به این شکل در مراحل ابتدایی برخورد (تا زمان‌های کمتر از ۵ ms) رشد ابعاد تاج به ازای اعداد وبر مختلف برخورد یکسان است و با گذر زمان شاهد هستیم که با افزایش عدد وبر قطره، ابعاد تاج افزایش می‌یابد. با افزایش وبر، نسبت نیروهای اینرسی و به عبارت دیگر انرژی جنبشی قطره نسبت به نیروهای کشش سطحی افزایش یافته و سبب افزایش رشد تاج به اطراف می‌گردد. همچنین در این شکل قابل مشاهده است که در زمان‌های بزرگتر از ۱۰ ms تغییرات عدد وبر تاثیر به نسبت بزرگتری بر روی شعاع تاج دارد.



(الف) سیال WG3



(ب) سیال B2

شکل ۳-۷: تغییرات (الف) ارتفاع تاج (Z^*)، (ب) شعاع تاج (R^*)، با زمان به ازای ضخامت‌های مختلف لایه سیال

برای سیالات WG3 و B2. $V = 3/92 \text{ m/s}$ و $D = 2/91 \text{ mm}$



$2/\Delta ms$



$5\Delta ms$

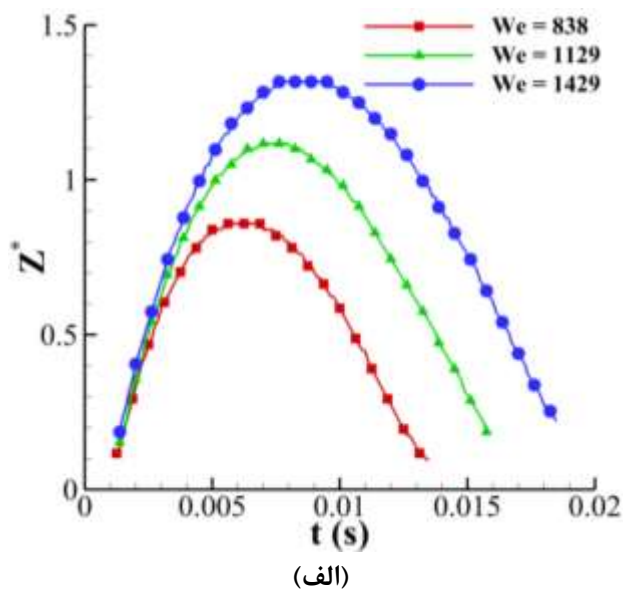
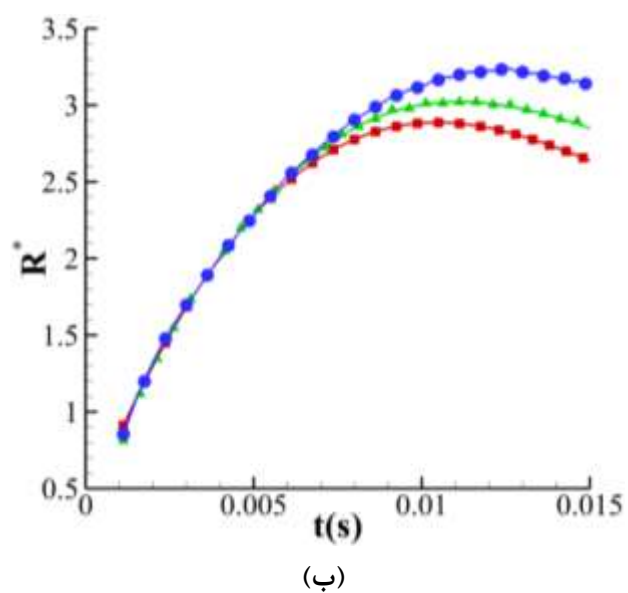


$10\Delta ms$

$h = 2\text{ mm}$

$h = 1\text{ mm}$

شکل ۳-۸: تاثیر ضخامت لایه سیال بر رشد تاج، سیال B2

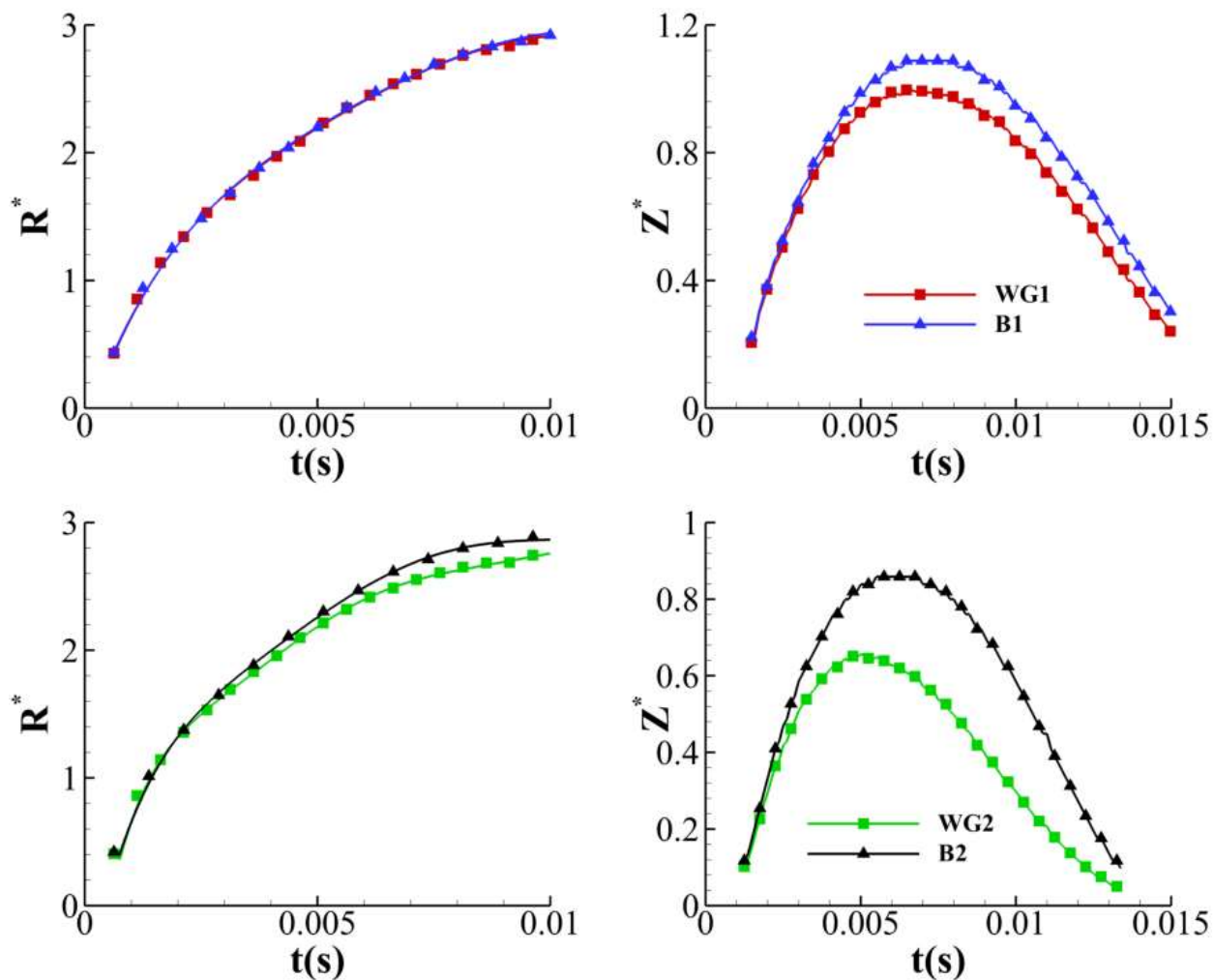


شکل ۳-۹: تغییرات (الف) ارتفاع تاج (Z^*), (ب) شعاع تاج (R^*), با زمان به ازای اعداد وبر مختلف، سیال B2 و

$h = 1\text{ mm}$

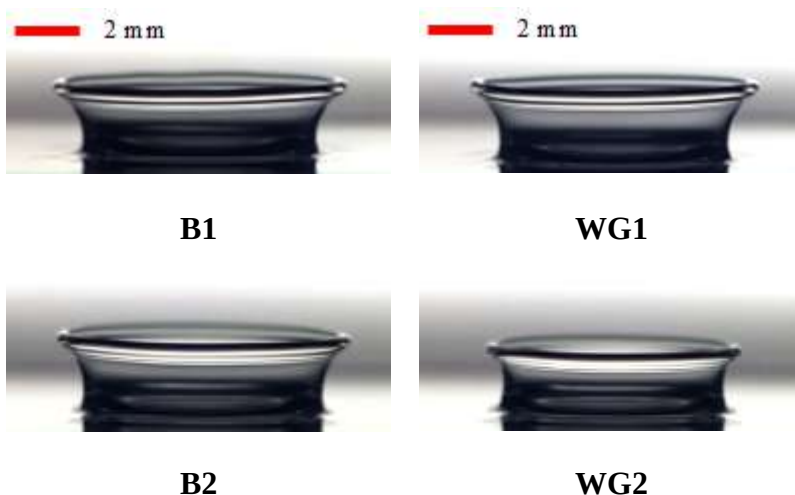
در سیالات ویسکوالاستیک خواص الاستیک نقش مهمی در جریان سیال دارد. به همین جهت در تحلیل عددی حاضر اثر خواص الاستیک سیال بر برخورد مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به اینکه در سیالات ویسکوالاستیک با گر ویسکوزیته تابع خطی از نرخ برش است و به عبارت دیگر در نرخ برش‌های مختلف مقدار ویسکوزیته ثابت است، در این سیالات از این ویژگی استفاده شده است تا اثر الاستیسیته سیال بر برخورد قطره بر لایه سیال بررسی گردد. برای این منظور سیالات نیوتنی مختلف با ویسکوزیته یکسان با هر یک از سیالات ویسکوالاستیک با گر B1 و B2 ساخته شده است که در جدول ۲-۲ خواص این سیالات ارائه شده است که سیالات نیوتنی با ویسکوزیته معادل با سیال ویسکوالاستیک B1 و B2 به ترتیب تحت عنوان WG1 و WG2 معرفی شده است.

در شکل ۳-۱۰ تاثیر خواص الاستیک سیال بر تغییرات ارتفاع (Z^*) و شعاع (R^*) تاج آورده شده است. با توجه به این شکل در محدوده پارامترهای ذکر شده در صورت استفاده از سیال ویسکوالاستیک به جای سیال نیوتنی با ویسکوزیته معادل در مسئله برخورد، ابعاد تاج (ارتفاع و شعاع) افزایش خواهد یافت. میزان افزایش در اثر استفاده از سیال ویسکوالاستیک برای متغیر ارتفاع تاج بیشتر از شعاع تاج خواهد بود. همچنین در این شکل به وضوح قابل مشاهده است که با افزایش خاصیت الاستیک سیال (استفاده از سیال B2 به جای سیال B1) میزان تغییرات متغیرهای ارتفاع و شعاع تاج افزایش خواهد یافت. به عبارت دیگر با تغییر سیال از WG1 به B1 میزان افزایش در بیشینه ارتفاع تاج ۹/۱٪ و با تغییر سیال از WG2 به B2 میزان افزایش در بیشینه ارتفاع تاج ۳۰/۹٪ می‌شود. علت گسترش ابعاد تاج با استفاده از سیال ویسکوالاستیک در این است که در سیال ویسکوالاستیک لایه سیال نقش یک ذخیره کننده انرژی را ایفا کرده و قسمتی از انرژی جنبشی قطره برخوردی در لایه سیال ذخیره شده و در مرحله گسترش این میزان انرژی ذخیره شده آزاد شده و سبب گسترش ابعاد تاج می‌گردد. از طرف دیگر با افزایش الاستیسیته سیال، نقش اتلافات ویسکوز در لایه سیال تقلیل یافته و این موضوع هم در گسترش ابعاد تاج



شکل ۳-۱۰: تاثیر الاستیسیته سیال بر تغییرات ارتفاع (Z^*) و شعاع (R^*) تاج برای $h = 1 \text{ mm}$ و $V = 3/92 \text{ m/s}$ و $D = 3/92 \text{ mm}$

نیز تاثیر گذار است. در شکل ۳-۱۱ نیز هندسه تاج به ازای ضخامت مختلف لایه سیال را در زمان‌های مختلف شاهد هستیم.



شکل ۳-۱۱: تاثیر خواص الاستیک سیال بر شکل تاج در $t = 5 \text{ ms}$

نتایج ارائه شده در فوق برای هندسه تاج به صورت تقارن محوری است. جهت استفاده از نتایج فوق در تحلیل عددی، لزوم تعیین محدوده پارامترها به ازای آنکه هندسه تاج تقارن محوری باشد ضروری است. در صورت افزایش اینرسی قطره در هنگام برخورد به علت بروز ناپایداری‌هایی همچون رایلی-پلاتو^۱ و ریچمیر-مشکوف^۲ شکل تقارن محوری دیواره تاج به هم خورده و تشکیل قطرات ثانویه و شروع رژیم پاشش را سبب می‌شود. در حالت کلی در مشاهدات تجربی دو نوع رژیم پاشش قابل مشاهده است، ۱- پاشش سریع و ۲- پاشش کند [۱۲]، در پاشش کند که در لحظات طولانی‌تری پس از برخورد رخ می‌دهد ناپایداری رایلی-پلاتو اثرگذار است. در صورتی که پاشش سریع در لحظات اولیه برخورد و در سرعت‌های بسیار بالا برخورد شکل می‌گیرد و ناپایداری ریچمیر - مشکوف در آن اثرگذار است که سبب تشکیل قطرات ثانویه و الگوهای پیچیده در برخورد می‌شود. در این ناپایداری تقابل میان شتاب‌های بزرگ لایه سیال جدا شده و امواج شوک سبب ناپایداری می‌شود.

از نظر فیزیکی در سرعت‌های پایین برخورد به هنگام برخورد قطره بر لایه سیال جتی از سیال به صورت ورقه استوانه‌ای شکل به سمت بیرون و بالای لایه سیال پرتاب می‌شود. لبه این جت متاثر از نیروهای کشش سطحی

¹ Plateau-Rayleigh

² Richtmyer-Meshkov

و الاستیک قرار دارد و قطر این لبه بر اثر ورود سیال از لایه سیال رشد پیدا خواهد کرد. لبه تاج به علت بروز ناپایداری‌ها حالت تقارن محوری خود را از دست داده و موجی در این لبه ایجاد می‌گردد. در ادامه با توجه به اینرسی حرکت دیواره تاج و خواص کشش سطحی و الاستیک سیال امکان تشکیل و جدایش قطرات ثانویه و در نهایت ظهور رژیم پاشش وجود خواهد داشت. لازم به ذکر است که اغتشاشات محیطی در بروز این نوع از ناپایداری که تحت عنوان ناپایداری رایلی- پلاتو است، تاثیر فراوانی دارد و سبب شکست هندسه تقارن محوری لبه تاج و تبدیل آن به حالت لبه موجدار می‌شود. بدین منظور آزمایشات به منظور یافتن سرعتی که به ازای آن رژیم تقارن محوری از بین رفته صورت گرفته است. ارتفاع اولیه رهایی قطره جهت تغییرات سرعت برخورد در نظر گرفته شده است.

در شکل ۳-۱۲ بروز این نوع از ناپایداری و در پی آن تشکیل لبه موجدار دیواره تاج نمایش داده شده است. همانطور که در شکل قابل مشاهده است شروع این نوع از ناپایداری در محدوده‌ای از سرعت‌های برخوردی قطره امکان وقوع دارد که یافتن این محدوده برای سیالات مختلف مورد استفاده در آزمایش، کمک شایانی به یافتن محدوده تقارن محوری پدیده برخورد قطره بر لایه سیال می‌کند. با توجه به اینکه مطالعه عددی به حالت تقارن محوری است، از محدوده نتایج گزارش شده در این بخش استفاده می‌شود. همچنین در شکل ۳-۱۳ شکل تاج در زمان پایان رژیم تقارن محوری به ازای سیالات مختلف آورده شده است.



تشکیل قطرات ثانویه

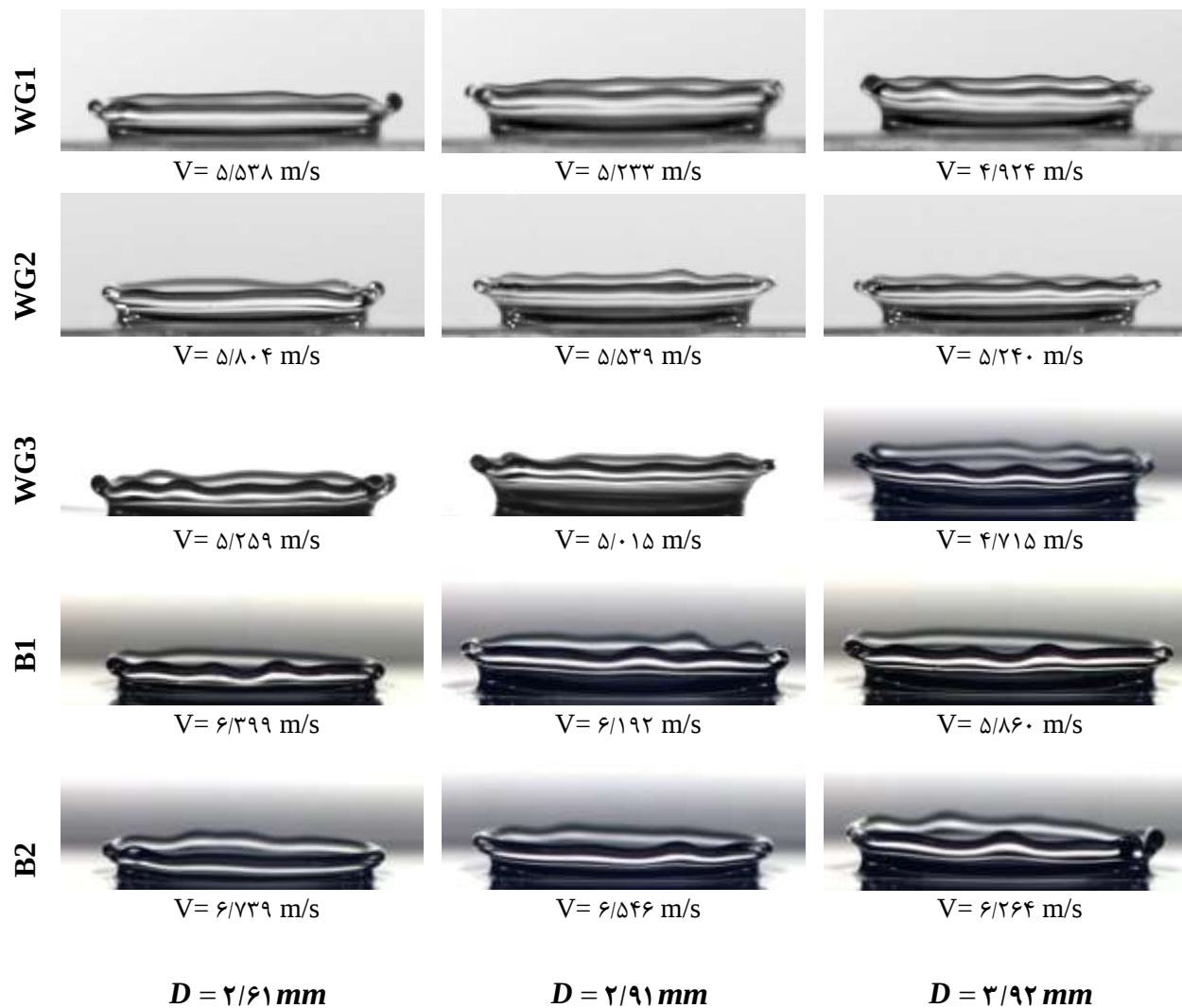


عدم تقارن محوری



تقارن محوری

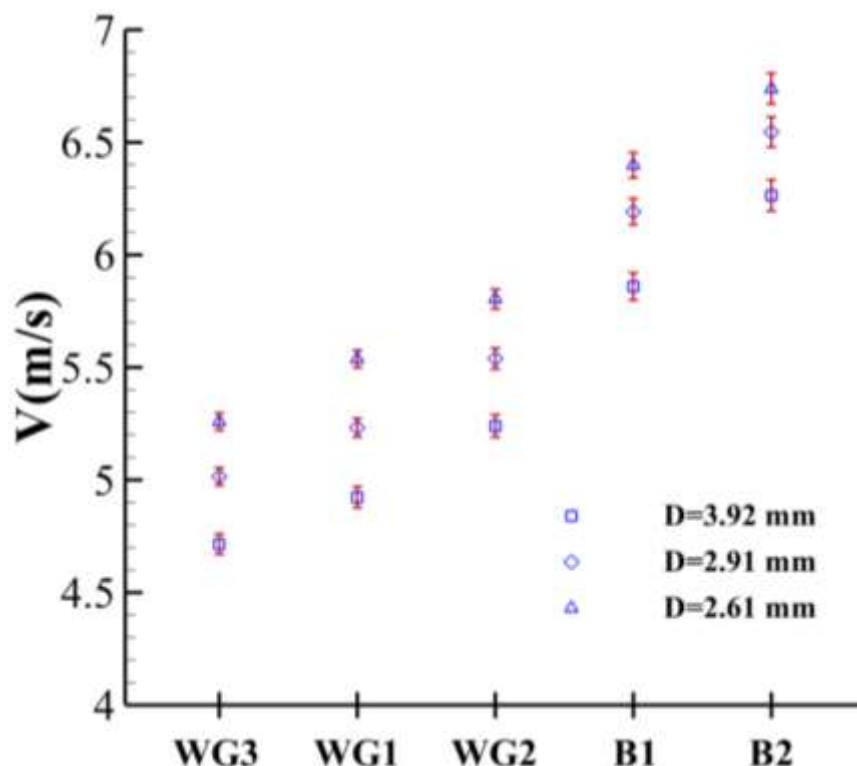
شکل ۳-۱۲: رژیم‌های مختلف در برخورد



شکل ۳-۱۳: شکل تاج به هنگام برهم خوردن شکل تقارن محوری برای سیالات مختلف در $h = 1 \text{ mm}$

در شکل ۳-۱۴ آستانه پایان رژیم تقارن محوری به ازای سیالات مختلف نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، برای سیالات ویسکوالاستیک باگر (B1 و B2) با افزایش درصد جرمی پلیمر آستانه تغییر رژیم از تقارن محوری به عدم تقارن محوری به تعویق می‌افتد. همچنین در سیالات نیوتنی (WG1, WG2, WG3) با افزایش ویسکوزیته سیال، تغییر رژیم در سرعت‌های برخورد بالاتر اتفاق می‌افتد. در حالت کلی به صورت تقریبی پایان رژیم تقارن محوری برای سیالات نیوتنی WG1، WG2 و WG3 برابر $Re \approx 230$ ، برای سیال

ویسکوالاستیک B1 برابر $Re \approx 250$ و برای سیال ویسکوالاستیک B2 برابر $Re \approx 280$ است. همچنین جهت رژیم تقارن محوری عدد وایزنبرگ بحرانی به صورت تقریبی برابر $Wi \approx 2800$ خواهد بود.



شکل ۳-۱۴: آستانه برهم خوردن رژیم تقارن محوری برای سیالات مختلف در $h = 1 \text{ mm}$

۳-۲: بررسی عددی دینامیک برخورد در سیالات ویسکوالاستیک

با توجه به اهمیت مسئله برخورد قطره بر لایه سیال، مطالعات گسترده‌ای در این زمینه برای سیالات نیوتنی شده است. بررسی این پدیده برای محدوده وسیعی از پارامترهای مربوط به ویسکوالاستیسیته، کشش سطحی و ضخامت لایه سیال از محدودیت‌های این مسئله است. به همین جهت در طیف وسیعی از پارامترهای ذکر شده، استفاده از روش‌های عددی کمک شایانی به مطالعه مسئله حاضر می‌کند و محدودیت‌های آزمایش را برطرف می‌نماید. در این بخش به کمک روش حجم محدود (FVM) معادلات موجود در مسئله حاضر گسسته سازی شده و جهت مدلسازی مرز میان سیالات از روش حجم سیال (VOF) بهره برده شده است. از مدل اولدروید-

بی (Oldroyd-B) و گزیکس (Giesekus) به عنوان معادلات ساختاری در سیال ویسکوالاستیک استفاده شده است. همچنین در این بخش پدیده برخورد به صورت دو- بعدی صفحه‌ای و تقارن محوری مدلسازی شده است و نتایج به ازای این دو حالت مقایسه شده است. در این بخش اثر پارامترهای مختلف همچون عدد وایزنبرگ (Wi)، عدد وبر (We)، ضخامت بدون بعد لایه سیال (H)، عدد رینولدز (Re)، عدد بوند (Bo)، پارامترهای معادلات ساختاری سیال ویسکوالاستیک و زاویه برخورد قطره (θ) بر دینامیک تشکیل و رشد تاج در این پدیده در حالت‌های دوبعدی و تقارن محوری مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

در ابتدا برای مسئله حاضر تحلیل استقلال حل از ابعاد دامنه محاسباتی و تحلیل شبکه برای حالت‌های دو- بعدی و تقارن محوری صورت خواهد گرفت. در ادامه اعتبارسنجی مسئله حاضر در چهار بخش بررسی قانونی توانی در رشد شعاع تاج، تغییر شکل قطره در جریان برشی، برخورد قطره ویسکوالاستیک بر سطح خشک و مدل‌سازی برخورد قطره B1 و B2 با لایه سیال انجام پذیرفته است.

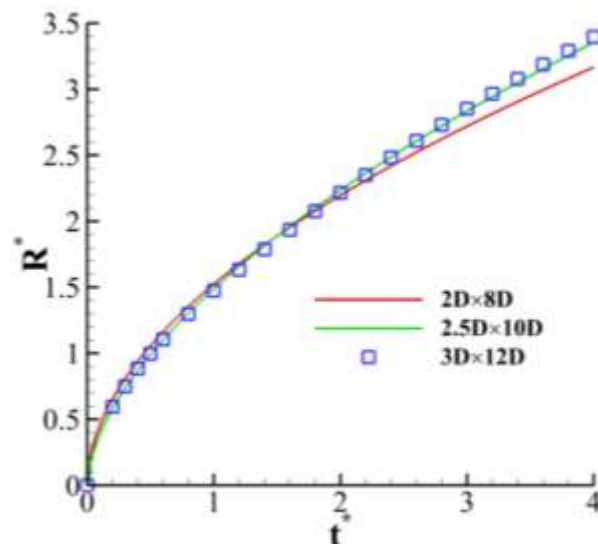
۳-۲-۱- تحلیل اندازه دامنه محاسباتی و شبکه

به منظور جلوگیری از تاثیر عوامل محیطی و مرزها بر روی مسئله، مدل‌سازی عددی برای سه دامنه حل به اندازه‌های $2D \times 8D$ ، $2.5D \times 10D$ و $3D \times 12D$ انجام شده است. شکل ۳-۱۵ بیانگر این است که اختلاف نتایج حاصل شده از دامنه محاسباتی با اندازه $2.5D \times 10D$ با دامنه محاسباتی با اندازه $3D \times 12D$ ناچیز است. جهت اطمینان از دقت نتایج حاصل شده از شبکه محاسباتی، مطالعه شبکه از نظر تعداد و اندازه سلول‌های محاسباتی صورت می‌گیرد. در شکل ۳-۱۶ یک نمونه از شبکه محاسباتی آورده شده است. با توجه به این شکل در نواحی حضور و برخورد قطره تراکم شبکه بیشتر است. به همین جهت از تغییرات شعاع تاج (R^*) با زمان به عنوان متغیر مقایسه‌ای استفاده شده است و سه شبکه با اندازه‌های مختلف 400×800 ، 800×1600 و 1600×3200 برای این تحلیل در نظر گرفته شده است. در جدول ۳-۱ تغییرات مولفه‌های تنش را به ازای شبکه‌های مختلف نمایش می‌دهد. با توجه به این جدول حداکثر درصد اختلاف مولفه‌های تنش شبکه سوم

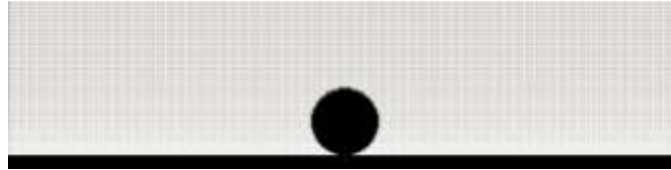
نسبت به شبکه دوم کمتر از ۰.۶٪ است. همچنین در شکل ۳-۱۷ تغییرات شعاع تاج با زمان را به ازای شبکه‌های مختلف نمایش داده شده است. با توجه به این شکل و جدول ۳-۱، شبکه با اندازه ۸۰۰×۱۶۰۰ از نظر تعداد و اندازه، دقت نتایج محاسباتی را تضمین می‌کند.

جدول ۳-۱ مولفه‌های تنش (Pa) برای شبکه‌های مختلف در $t^* = 3/6$ برای مسئله دو-بعدی صفحه‌ای

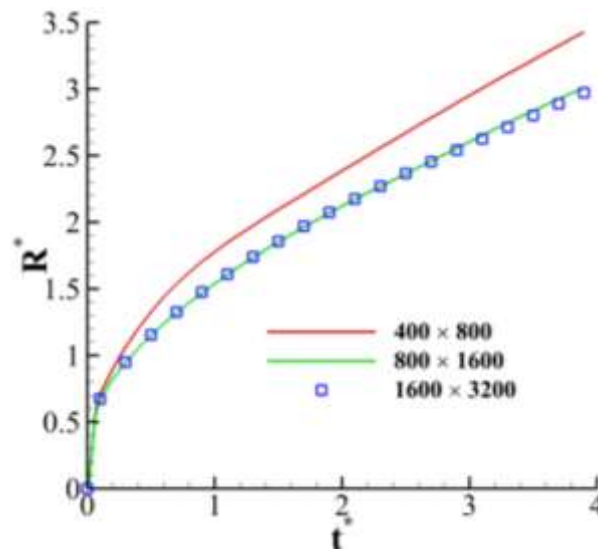
τ_{xy}		τ_{yy}		τ_{xx}		زمان حل (s)	اندازه شبکه
خطا %		خطا %		خطا %			
۸۵	۸۵۹	۵۶	۷۱۱	۳۳	۲۰۹۴	۶۲۵۰.۲	۴۰۰×۸۰۰
۶	۱۵۹۳	۵/۱	۱۱۱۳	۴/۸	۲۷۹۵	۱۷۵۲۵۹	۸۰۰×۱۶۰۰
-	۱۶۸۹	-	۱۱۷۰	-	۲۶۵۹	۸۹۵۲۰.۱	۱۶۰۰×۳۲۰۰



شکل ۳-۱۵: تحلیل الف) اندازه دامنه محاسباتی و ب) تعداد شبکه محاسباتی برای مسئله دو-بعدی صفحه‌ای در 0.2
 $Bo = 1/6$ و $\beta = 0.1$ ، $Wi = 1000$ ، $\theta = 0$ ، $H =$

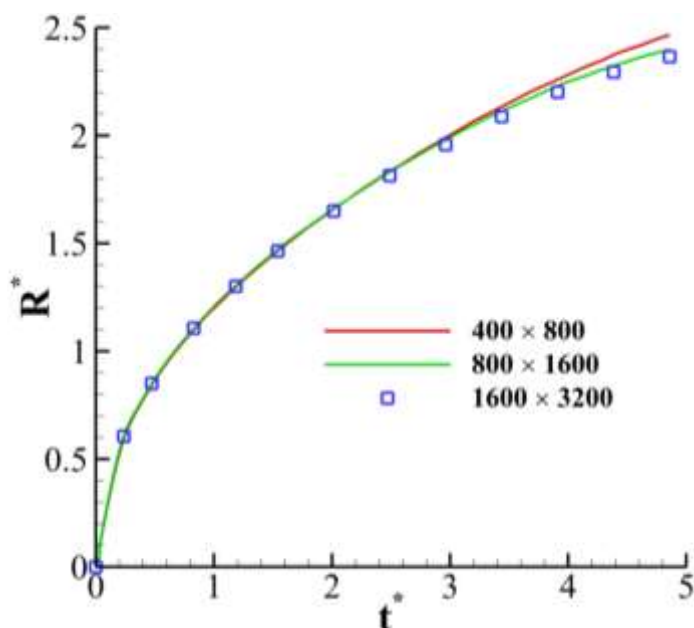


شکل ۳-۱۶: یک نمونه از شبکه محاسباتی



شکل ۳-۱۷: تحلیل تعداد شبکه محاسباتی برای مسئله دو- بعدی صفحه‌ای در $H=0.5$ ، $\theta=0$ ، $W=1000$ ، $\beta=0.1$ و $Bo=1/6$

در یکی از تحلیل‌های موجود در مطالعه حاضر، مسئله به صورت تقارن محوری مدلسازی شده است. به همین جهت تحلیل شبکه برای این حالت از مدلسازی ضرورت پیدا می‌کند. در شکل ۳-۱۸ تغییرات شعاع تاج به ازای اندازه شبکه‌های مختلف آورده شده است. با توجه به این نمودار، با افزایش تعداد شبکه‌های موجود در دامنه محاسباتی دقت نتایج افزایش یافته و با تغییر اندازه شبکه از 800×1600 به 1600×3200 اختلاف نتایج کمتر از $2/6\%$ می‌شود. به همین جهت شبکه با اندازه 800×1600 به عنوان شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده است. در جدول ۳-۲ نیز توزیع اندازه تنش به ازای شبکه‌های مختلف نشان دهنده آن است که اختلاف بیشینه تنش میان شبکه 800×1600 و 1600×3200 کمتر از $2/5\%$ است.



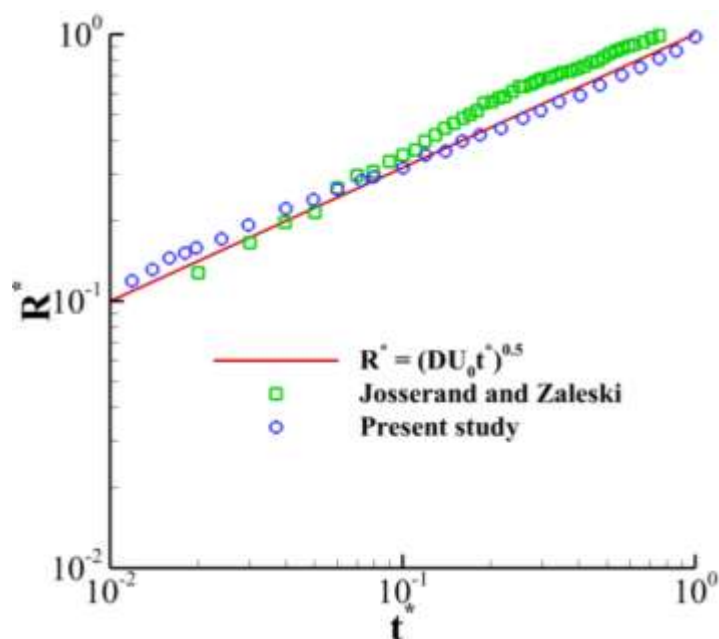
شکل ۳-۱۸: تحلیل شبکه محاسباتی برای مسئله دو- بعدی تقارن محوری در $H = 0.2$, $Wi = 100$, $\beta = 0.1$ و $1/6$
 $Bo =$

جدول ۳-۲ اندازه تنش (Pa) برای شبکه‌های مختلف در $t^* = 3/2$ برای مسئله دو- بعدی تقارن محوری			
اندازه شبکه			
۱۶۰۰×۳۲۰۰	۸۰۰×۱۶۰۰	۴۰۰×۸۰۰	
۳/۷۳۹	۳/۶۴۲	۲/۸۲۵	$ \tau_{max} $
۲/۶	۲۲	-	خطا %

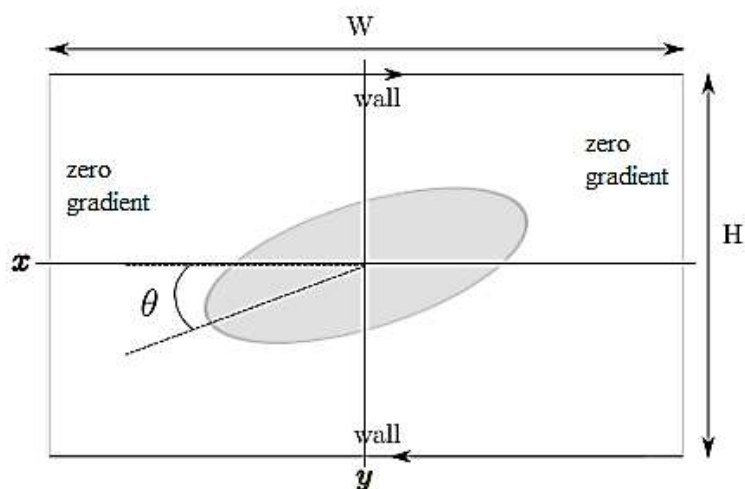
۳-۲-۲- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی حل حاضر، نتایج حاصل از برخورد قائم قطره بر لایه سیال نیوتنی با مطالعات گذشته مقایسه می‌شود. در لحظات اولیه برخورد قطره بر لایه سیال، در شکل ۳-۱۹ تغییرات شعاع تاج (R^*) بر حسب زمان بدون بعد با رابطه قانون توانی [۳۸, ۲۷] و نتایج مطالعه عددی جزرالد و زالسکی [۲۹] مقایسه می‌شود. قانون توانی بیانگر آن است که در لحظات اولیه برخورد شعاع بدون بعد تاج متناسب با جذر زمان بدون بعد است. با توجه به شکل ۳-۱۹ نتایج مطالعه عددی حاضر انطباق قابل قبولی با قانون توانی و نتایج مطالعات گذشته دارد. در این اعتبارسنجی بیشینه خطا نسبت به قانون توانی برابر ۱۳٪ که در زمان $t^* = 0.18$ است.

برای دومین حالت اعتبارسنجی، تغییر شکل قطره ویسکوالاستیک در فاز پیوسته نیوتنی تحت جریان برشی در نظر گرفته شده است (مطابق شکل ۳-۲۰). در این حالت یک قطره ویسکوالاستیک تحت تنش برشی قبل از شکستن به قطرات ثانویه تحت کشش قرار می‌گیرد. برای فاز قطره مدل اولدریود-بی و برای فاز پیوسته سیال از مدل سیال نیوتنی استفاده شده است (مطالعات [۹۳، ۹۴]). چگالی و ویسکوزیته فاز سیال نیوتنی به ترتیب



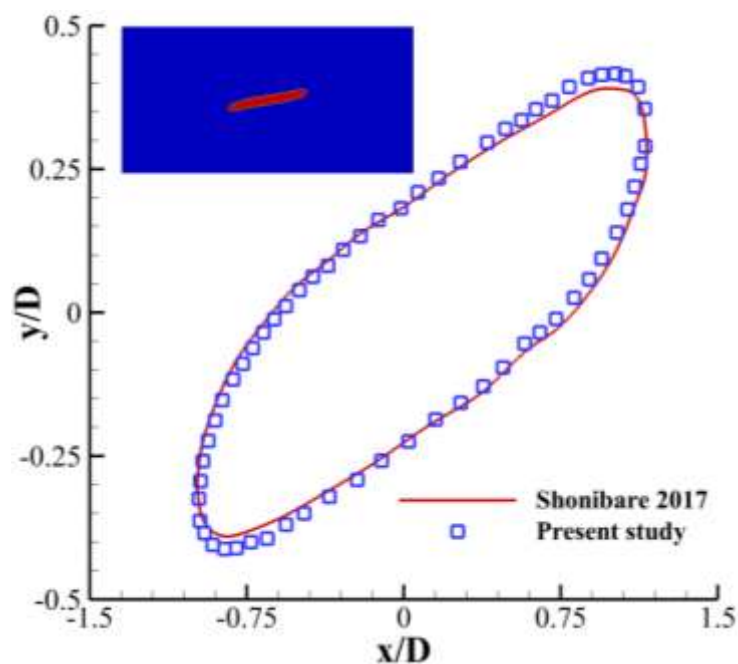
شکل ۳-۱۹: تغییرات شعاع بدون بعد تاج با زمان در لحظات اولیه برخورد ($Wi = 0$)



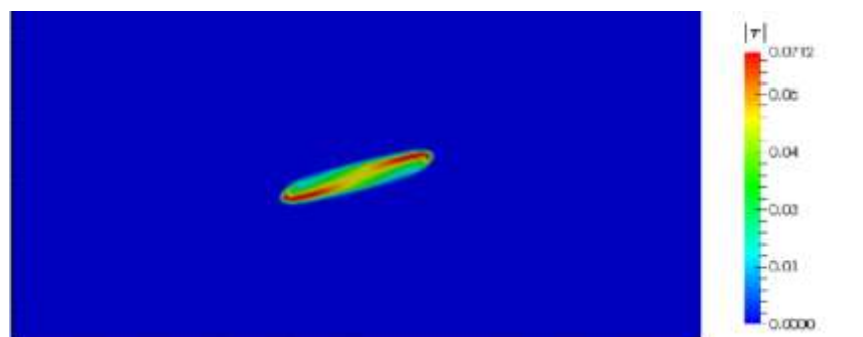
شکل ۳-۲۰: طرحواره مسئله قطره در جریان برشی

984 kg/m^3 و $69/5 \text{ mPa.s}$ است. همچنین برای فاز قطره چگالی، زمان رهایی از تنش، ویسکوزیته حلال و ویسکوزیته پلیمری به ترتیب 1000 kg/m^3 ، $0/25 \text{ s}$ ، $6/05 \text{ mPa.s}$ و $6/05 \text{ mPa.s}$ است. قطره‌ای با قطر اولیه $D = 1 \text{ mm}$ در میانه یک دامنه مستطیلی به ابعاد $5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ قرار می‌گیرد که دیواره بالایی و پایینی دامنه به ترتیب دارای سرعت 5 mm/s و -5 mm/s است و همچنین برای مرزهای موجود در غرب و شرق دامنه محاسباتی شرط مرزی تغییرات صفر در نظر گرفته شده است. در شکل ۳-۲۱ نتایج مطالعه حاضر با نتایج موجود در مطالعه شونیر [۹۳] ۲۰ ثانیه پس از اعمال برش را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، در زمان مذکور هندسه قطره به صورت کیفی انطباق قابل قبولی با نتایج موجود در مطالعه شونیر دارد. در شکل ۳-۲۲ توزیع اندازه تنش ($|T|$) درون قطره ویسکوالاستیک در جریان برشی را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل الگوی توزیع تنش در قطره از نظر کمی مطابق نتایج مطالعه [۹۳] دارد و میزان خطای نسبی برای حداکثر مقدار اندازه تنش کمتر از ۱٪ است.

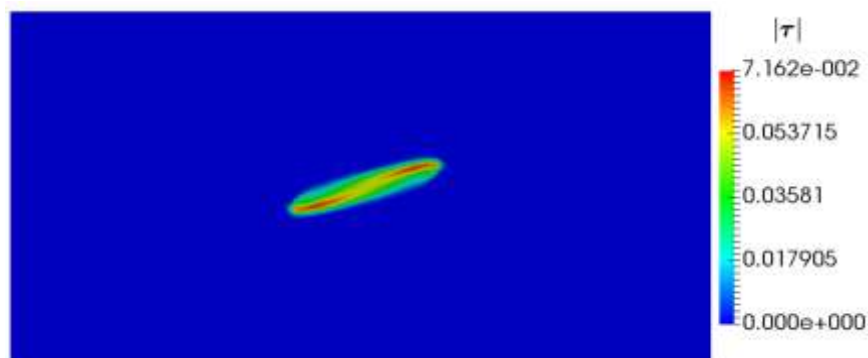
در اعتبارسنجی دیگر برای مسئله حاضر، برخورد قطره ویسکوالاستیک به سطح خشک مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. در شکل ۳-۲۳ طرحواره مسئله مورد نظر آورده شده است. نتایج حاصل از حلگر عددی حاضر با نتایج مطالعات گذشته [۹۵، ۹۶] در شکل ۳-۲۴ مقایسه شده است.



شکل ۳-۲۱: مقایسه شکل قطره در جریان برشی در $t = 20 \text{ s}$ بین مطالعه حاضر و شونیبار [۹۳]



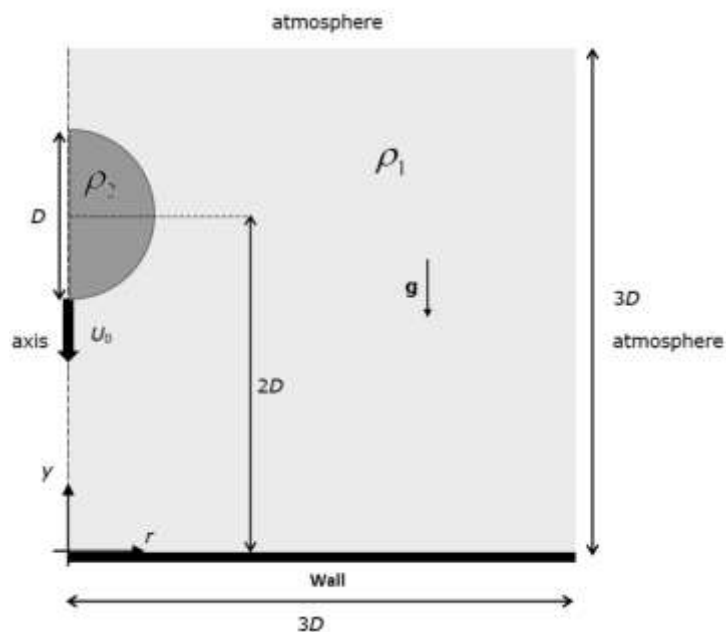
(الف)



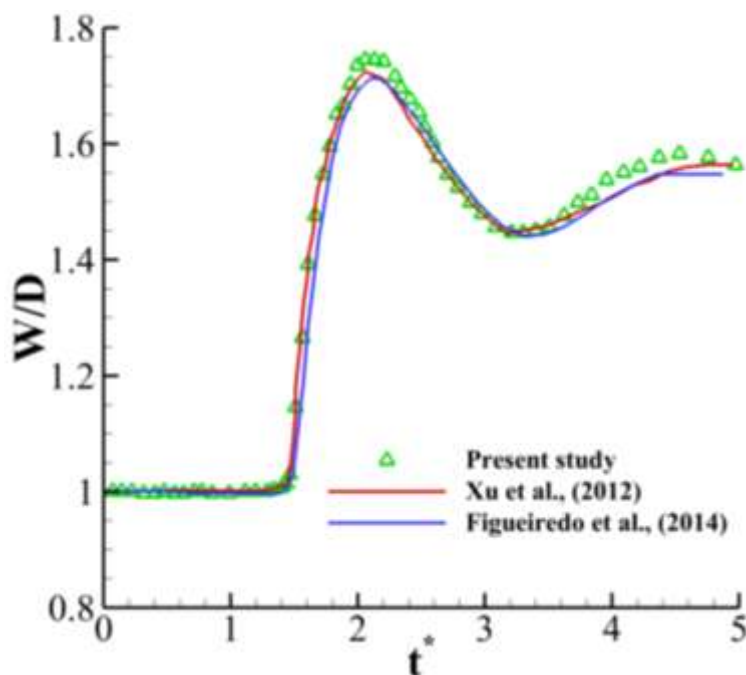
(ب)

شکل ۳-۲۲: توزیع تنش در تغییر شکل قطره در جریان برشی در $t = 20 \text{ s}$ ، (الف) شونیبار [۹۳] و (ب) مطالعه حاضر

در این شکل پهنای قطره به ازای زمان‌های مختلف آورده شده است. با توجه به این شکل تا لحظه $t^* = 1/5$ قطره در حال سقوط بوده و ابعاد آن ثابت است. به محض برخورد با سطح دیواره، پهنای قطره افزایش می‌یابد.

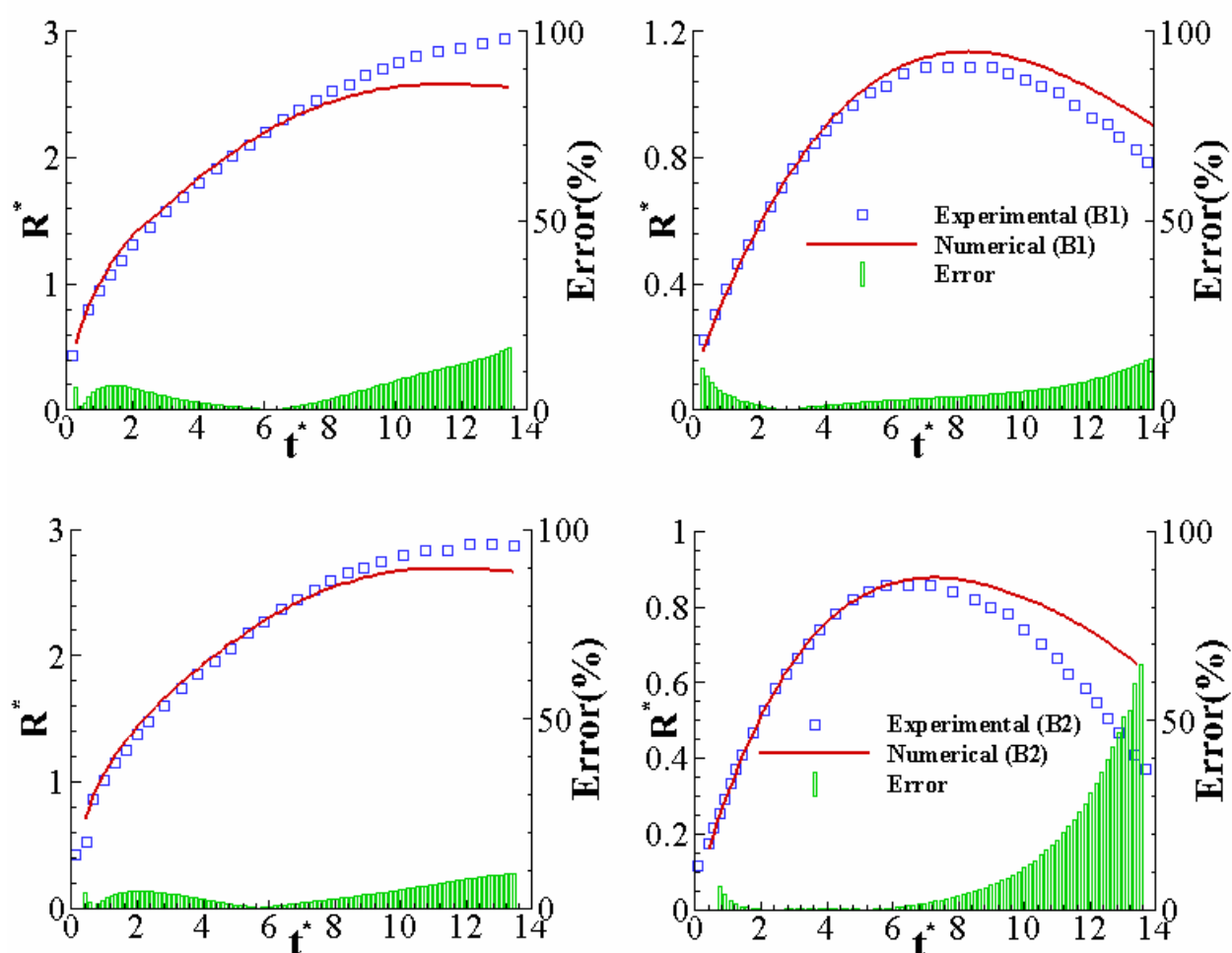


شکل ۳-۲۳: طرحواره مسئله برخورد قطره بر سطح خشک



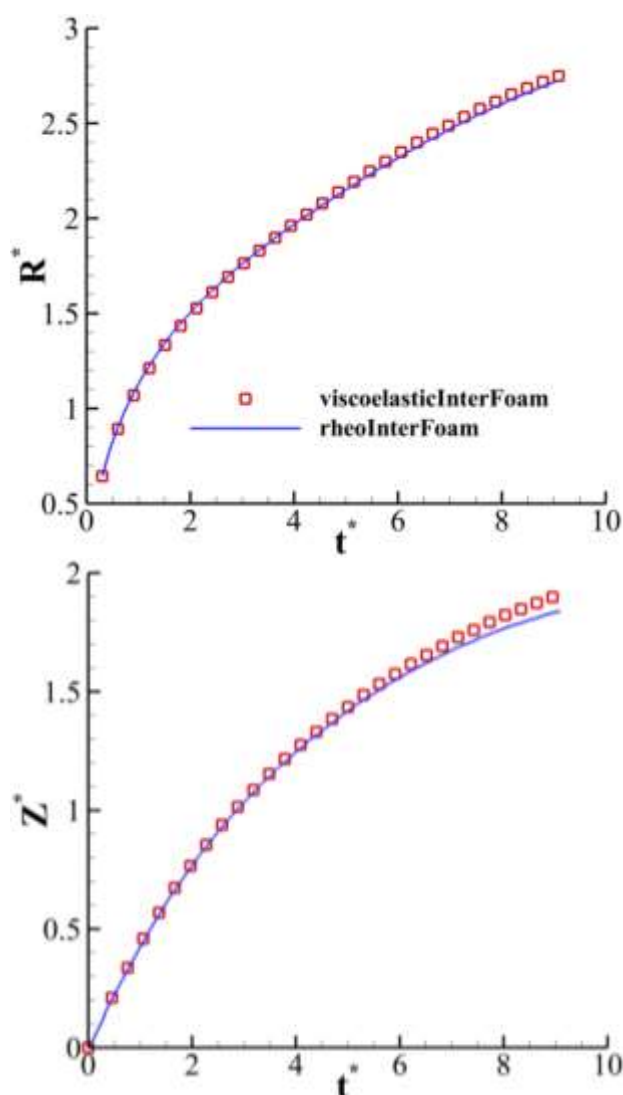
شکل ۳-۲۴: مقایسه تغییرات زمانی پهنای قطره با مطالعات گذشته

در مرحله آخر، اعتبارسنجی مسئله عددی حاضر با تحلیل آزمایشگاهی صورت گرفته انجام شده است که در شکل ۳-۲۵ نمایش داده شده است. در اعتبارسنجی خواص اندازه‌گیری شده سیال همچون ویسکوزیته، زمان رهایی از تنش، کشش سطحی و چگالی سیال به عنوان ورودی در مدلسازی عددی استفاده شده است. در این اعتبارسنجی شعاع (R^*) و ارتفاع (Z^*) بدون بعد تاج برای دو سیال B1 و B2 به عنوان متغیر مقایسه‌ای استفاده شده است و روند تغییرات این دو متغیر به ازای زمان در شکل زیر قابل مشاهده است. با توجه به این شکل تطابق نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی قابل قبول است. با توجه به این شکل بیشینه خطا در زمان‌های بزرگ رخ خواهد داد. اختلاف نتایج در متغیر ارتفاع تاج بیشتر از متغیر شعاع تاج است. این میزان اختلاف برای سیال B2 بیشتر خواهد بود.



شکل ۳-۲۵: مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی

به علت بیشتر شدن خواص الاستیک در سیال B2، مدل ساختاری سیال ویسکوالاستیک خطای بیشتری را پیشبینی می‌کند. جهت بررسی اعتبار نتایج حل عددی حاصل شده از حلگر viscoelasticIterFoam، نتایج با حلگر rheoInterFoam نیز مقایسه شده است. شکل ۳-۲۶ نتایج را به ازای دو حلگر ذکر شده نمایش می‌دهد. همانطور که در این شکل نمایان است، اختلاف نتایج برای این دو حلگر کوچک است و با توجه به انتشار مطالعات فراوان با استفاده از حلگر viscoelasticInterFoam و تحت مطالعه و توسعه بودن حلگر rheoInterFoam، در مطالعه حاضر از حلگر viscoelasticInterFoam استفاده شده است.

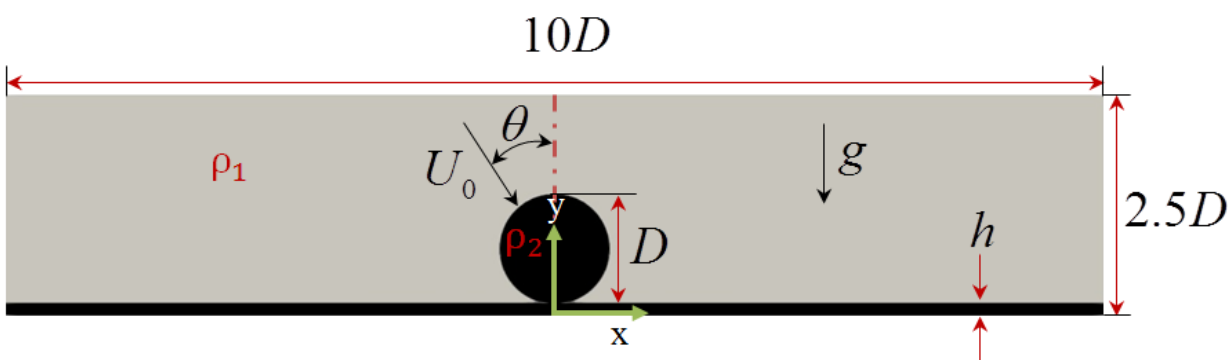


شکل ۳-۲۶: مقایسه نتایج بین حلگرهای viscoelasticInterFoam و rheoInterFoam

۳-۲-۳- مطالعه عددی برخورد قائم و مایل در حالت دو- بعدی

در این بخش مطالعه عددی برخورد قائم و مایل قطره بر لایه سیال در سیالات ویسکوالاستیک صورت خواهد گرفت. تحلیل عددی مسئله به صورت دو - بعدی (2D) کمک شایانی به درک کیفی از مسئله حاضر را بر ما آشکار می‌سازد. در این مدل‌سازی با کمک روش حجم محدود (FVM) و روش حجم سیال (VOF) معادلات حاکم حل می‌شوند و از مدل گزیکس (Giesekus) به عنوان معادله ساختاری برای فاز سیال ویسکوالاستیک استفاده شده است و سیال پیرامونی هوا به صورت نیوتنی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه اثرات متغیرهای مهمی همچون عدد وایزنبرگ، نسبت ویسکوزیته، ضخامت لایه سیال، زاویه برخورد و عدد وبر بر روی ایجاد، رشد و توسعه تاج بررسی می‌شود. در مطالعه عددی حاضر طرحواره برخورد قطره بر لایه سیال در شکل ۲۷-۳ نمایش داده شده است.

در شکل ۲۸-۳ طرحواره متغیرهای ابعاد تاج آورده شده است. با توجه به این شکل، در صورت برخورد مایل قطره بر لایه سیال متغیر ارتفاع بدون بعد تاج برای دیواره چپ و راست متفاوت و طول بدون بعد پخش نیز فاصله بین دو تاج خواهد بود که هر یک از این متغیرها به صورت تعریف خواهند شد.

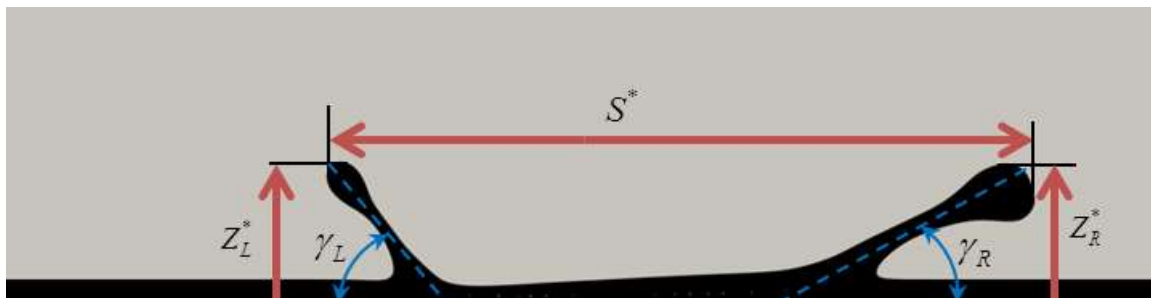


شکل ۲۷-۳: طرحواره برخورد مایل قطره بر لایه سیال

$$S^* = \frac{S}{D} \quad (۴-۳)$$

$$Z^* = \frac{Z}{D} \quad (۵-۳)$$

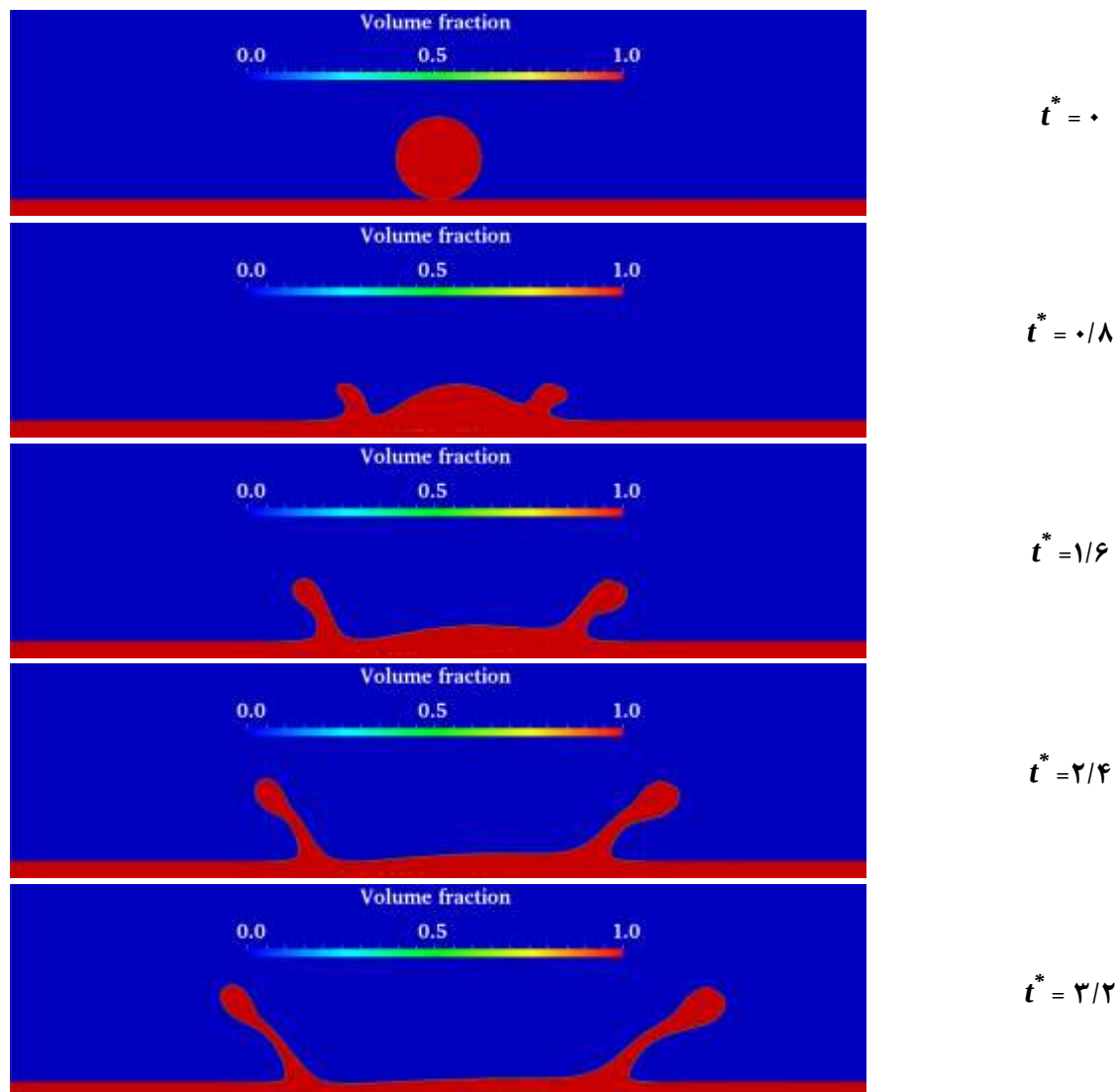
که در این رابطه S بیانگر طول پخش، Z بیانگر ارتفاع تاج و D نشان دهنده قطر قطره است. در شکل ۳-۳، γ ، ۲۸ بیانگر زاویه تاج و زیرنویس L و R به ترتیب بیانگر جت تشکیل شده در سمت چپ و راست محل برخورد است. قابل ذکر است در صورتی که برخورد به صورت قائم (زاویه برخورد قطره با خط عمود بر لایه سیال صفر باشد) بر لایه سیال صورت گیرد متغیر ارتفاع تاج در سمت چپ و راست یکسان بوده و همچنین می‌توان به جای استفاده از متغیر S^* از متغیر R^* استفاده خواهد شد که ارتباط این دو متغیر به صورت $S^* = 2R^*$ خواهد بود.



شکل ۳-۲۸: طرحواره متغیرهای ابعاد تاج در برخورد مایل

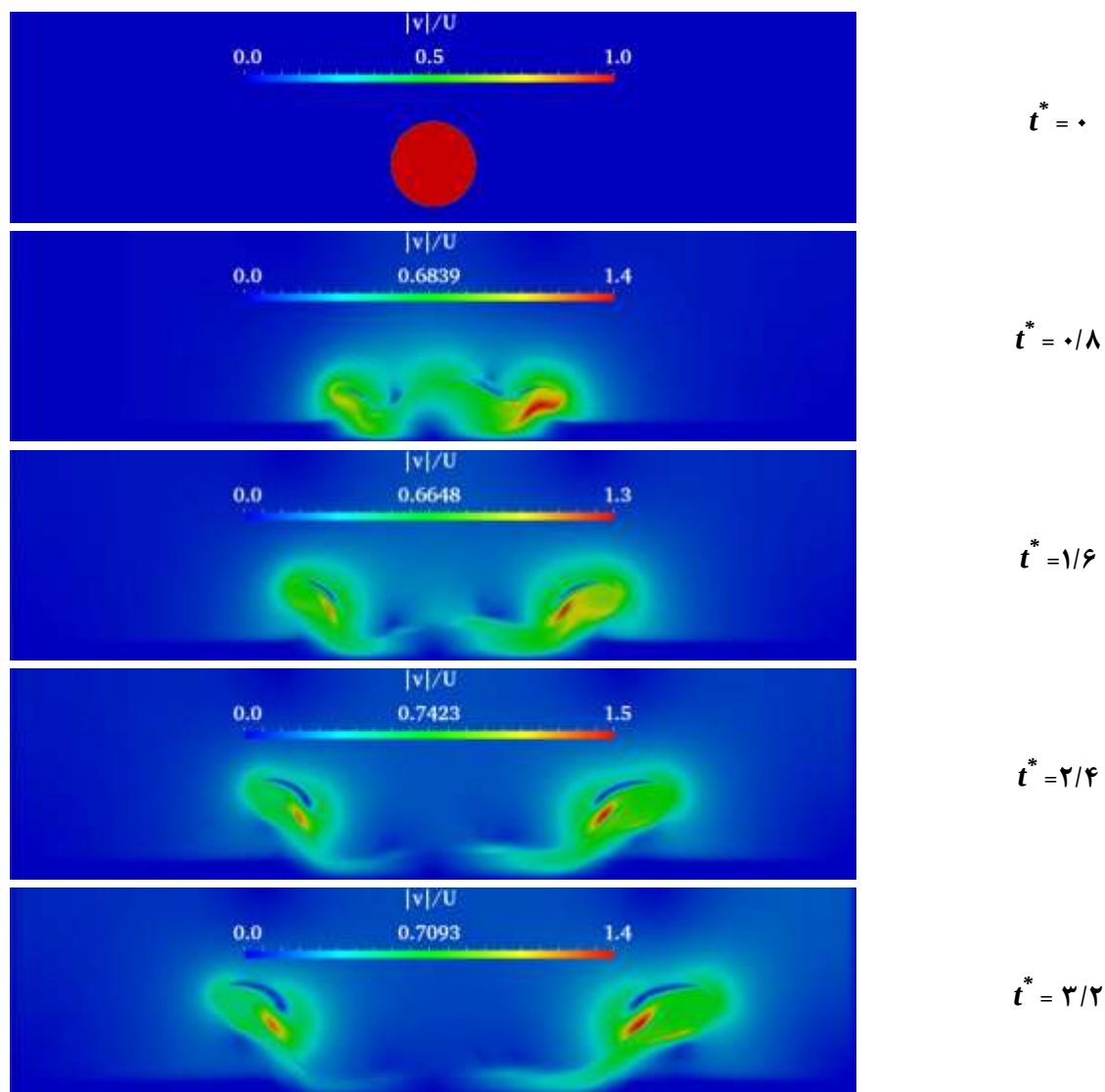
در شکل ۳-۲۹ و ۳-۳۰ توالی برخورد قطره بر لایه سیال در زمان‌های مختلف آورده شده است. در لحظه تماس قطره بر لایه سیال زمان صفر در نظر گرفته شده است و با گذشت زمان قطره تحت سرعت اولیه و نیروی گرانش به لایه سیال برخورد می‌کند. با توجه به این شکل‌ها در لحظات اولیه برخورد، لایه‌ای از سیال به صورت جت از طرفین محل برخورد تحت زاویه‌ای خاص به خارج از لایه پرتاب می‌شود. با گذشت زمان ابعاد این جت‌ها افزوده می‌شود و با توجه به برخورد مایل قطره بر لایه سیال، تقارن در رشد جت‌ها قابل مشاهده نیست.

در شکل ۳-۳۱ تغییرات شعاع (R^*) و ارتفاع (Z^*) بدون بعد تاج با زمان در اعداد وایزنبرگ مختلف آورده شده است. مطابق این شکل، با افزایش خواص الاستیک سیال هر یک از متغیرهای هندسی تاج رشد می‌کند و میزان



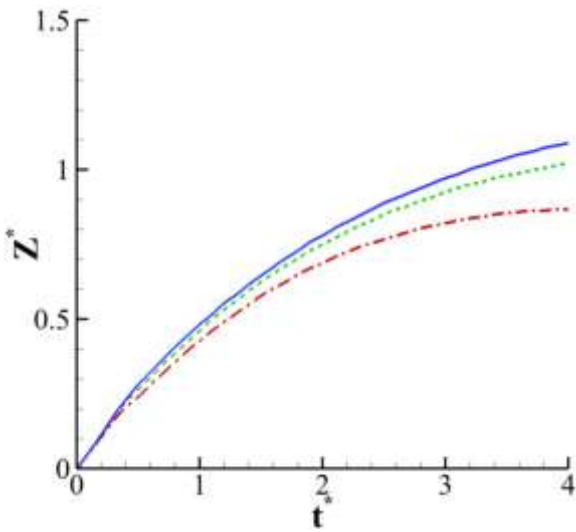
شکل ۳-۲۹: تغییرات شکل تاج در لحظات مختلف به ازای $Wi = 1000$ و $\theta = 15^\circ$ ، $We = 400$ ، $\beta = 0.1$ ، $H = 0.2$

این در زمان‌های بزرگتر بیشتر خواهد بود. به علاوه می‌توان دریافت که تاثیر الاستیسیته سیال بر ارتفاع تاج بیشتر از شعاع تاج است که این رفتار در تحلیل آزمایشگاهی قبل نیز مشاهده شده است. از لحاظ کمی در لحظه $t^* = 4$ ، با تغییرات عدد وایزنبرگ از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ ارتفاع بدون بعد تاج $0.25/6$ و شعاع بدون بعد تاج $0.7/8$ رشد پیدا می‌کند. بدون شک در لحظات اولیه برخورد، الاستیسیته لایه سیال همچون فنری انرژی جنبشی قطره را به صورت انرژی پتانسیل در خود ذخیره کرده و در مرحله پخش این انرژی آزاد سازی می‌شود. با افزایش عدد

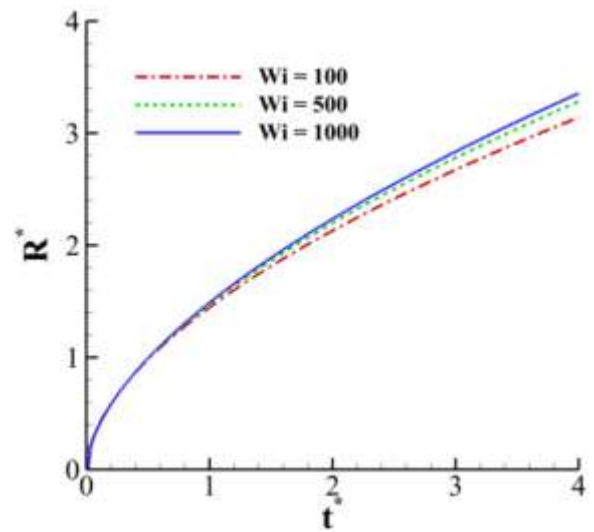


شکل ۳-۳: توزیع سرعت در لحظات مختلف به ازای $H = 0.2$, $\beta = 0.1$, $We = 400$, $\theta = 15^\circ$ و $Wi = 1000$

وایزنبرگ ذخیره‌سازی انرژی به صورت انرژی پتانسیل در لایه سیال افزوده شده و در مرحله پخش این انرژی آزاد شده سبب افزایش ابعاد تاج می‌گردد. در شکل ۳-۳۲ تاثیر عدد وایزنبرگ بر هندسه تاج در لحظه $t^* = 4$ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل با افزایش عدد وایزنبرگ ضخامت دیواره تاج کمتر می‌شود. همچنین در این شکل توزیع سرعت در دیواره تاج و سیال پیرامونی نمایش داده شده است. به علت تقابل میان تاج و سیال محیطی، یک گردابه در نزدیکی نوک تاج تشکیل می‌شود. با توجه به این شکل گردابه تشکیل شده در اعداد وایزنبرگ بزرگتر دارای سرعت بیشتری خواهد بود.

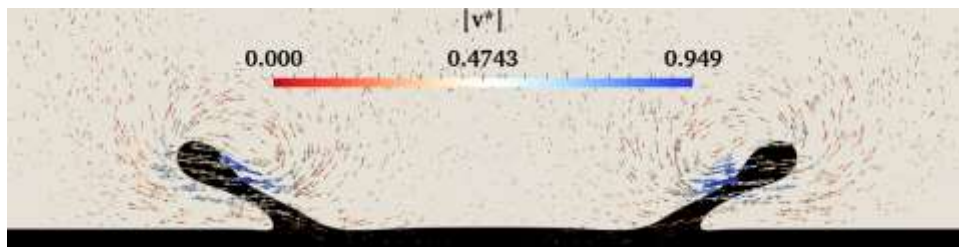


(ب)

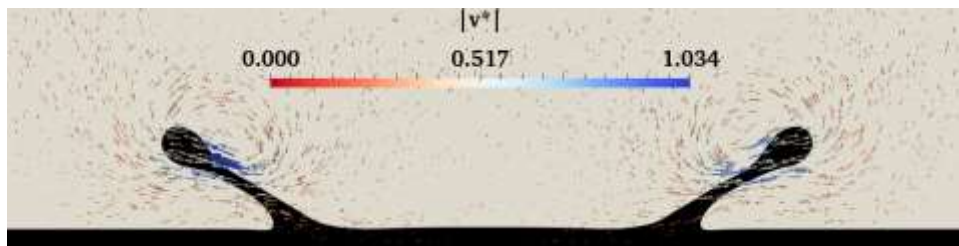


(الف)

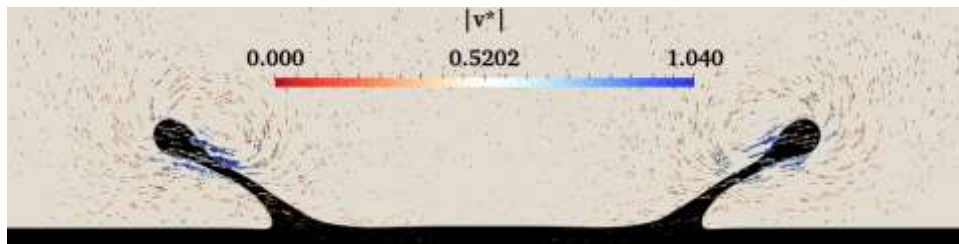
شکل ۳-۳۱: تغییرات زمانی (الف) شعاع تاج (R^*)، (ب) ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف، $\theta = 0$ ، $We = 224$ و $Bo = 1/6$ ، $\alpha = 0$ ، $\beta = 0.1$ ، $H = 0.2$



(الف)



(ب)



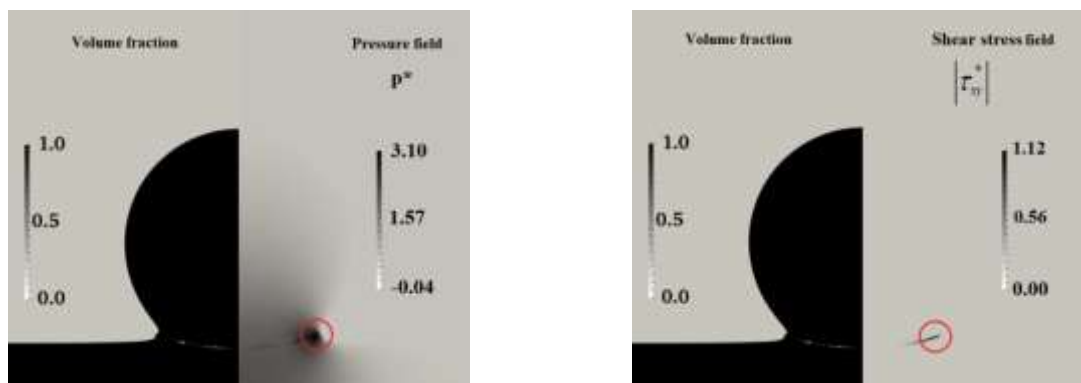
(ج)

شکل ۳-۳۲: شکل تاج در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 4$ برای $Bo = 1/6$ ، $\alpha = 0$ ، $\beta = 0.1$ ، $H = 0.2$ ، $\theta = 0$ و $We = 224$ (الف)، $Wi = 100$ (ب)، $Wi = 500$ (ج) و $Wi = 1000$

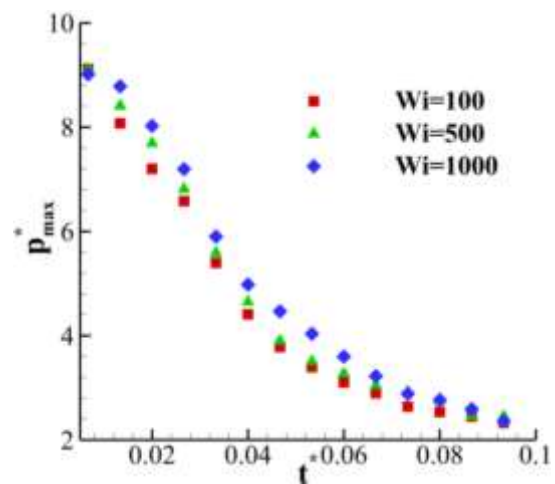
مطابق شکل ۳-۳۳، مقادیر بیشینه تنش برشی و فشار در نزدیکی خط تماس قطره بر لایه قرار دارد. با برخورد قطره بر لایه سیال، جتی از سیال در کنار تقابل نیروهای اینرسی و کشش سطحی از سطح سیال جدا می‌شود. در لحظه جدایش فشار در ناحیه جت تشکیل شده بیشینه مقدار خود را دارد و همین موضوع کمک به رشد جت و تشکیل دیواره می‌کند. تاثیر عدد وایزنبرگ بر بیشینه فشار و تنش برشی در لحظات اولیه برخورد در شکل ۳-۳۴ آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که فشار بیشینه در نوک تاج با گذشت زمان روند کاهشی دارد. از طرف مقابل در لحظات اولیه برخورد اندازه تنش برشی به صورت شدید رشد کرده و سپس به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. همچنین در این شکل شاهد هستیم که فشار بیشینه در ناحیه گلویی با اعداد وایزنبرگ بزرگتر می‌شود. با این وجود روند تغییرات تنش برشی در نوک جت سیال با عدد وایزنبرگ وابستگی به زمان دارد. در لحظات اولیه برخورد مقادیر بیشینه تنش برشی با افزایش عدد وایزنبرگ کاهش می‌یابد و از طرف مقابل این روند در لحظات میانی برعکس می‌باشد. مطابق رابطه زیر همواره می‌دانیم که اتلافات ویسکوز برابر با حاصل ضرب تنش برشی در نرخ برش است.

$$\Phi = \tau_{xy} \mathbf{D} \quad (۳-۶)$$

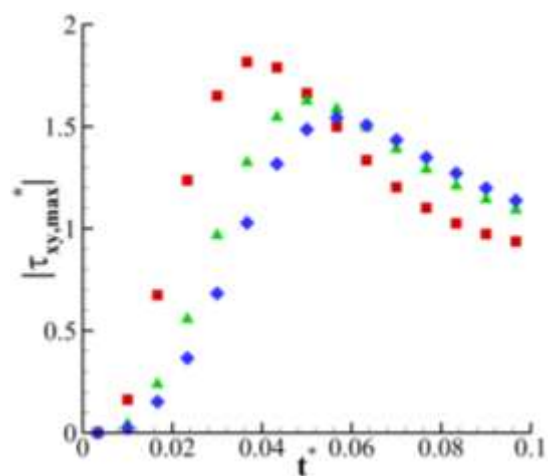
با توجه به رابطه ۳-۶ اتلافات ویسکوز رابطه مستقیم با تنش برشی دارد. بنابراین از لحاظ تئوری در شکل ۳-۳۲ شاهد هستیم که با کاهش عدد وایزنبرگ خاصیت الاستیک سیال کاهش یافته و اتلافات ویسکوز در سیال روند افزایشی می‌گیرد.



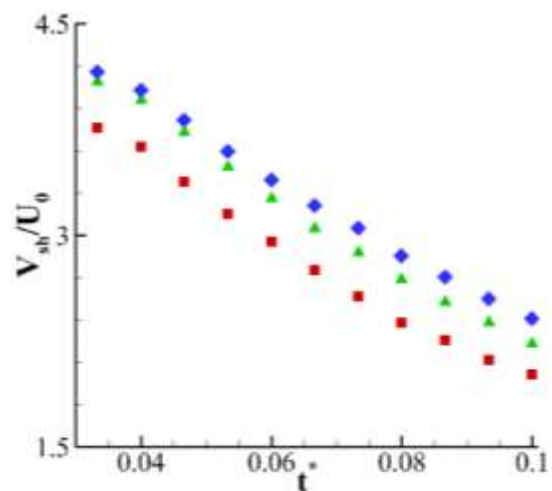
شکل ۳-۳۳: اندازه فشار و تنش برشی در نزدیکی گلویی برخورد در $t^* = 0.08$ (مقادیر بیشینه در دایره قرمز رنگ)



(الف)



(ب)

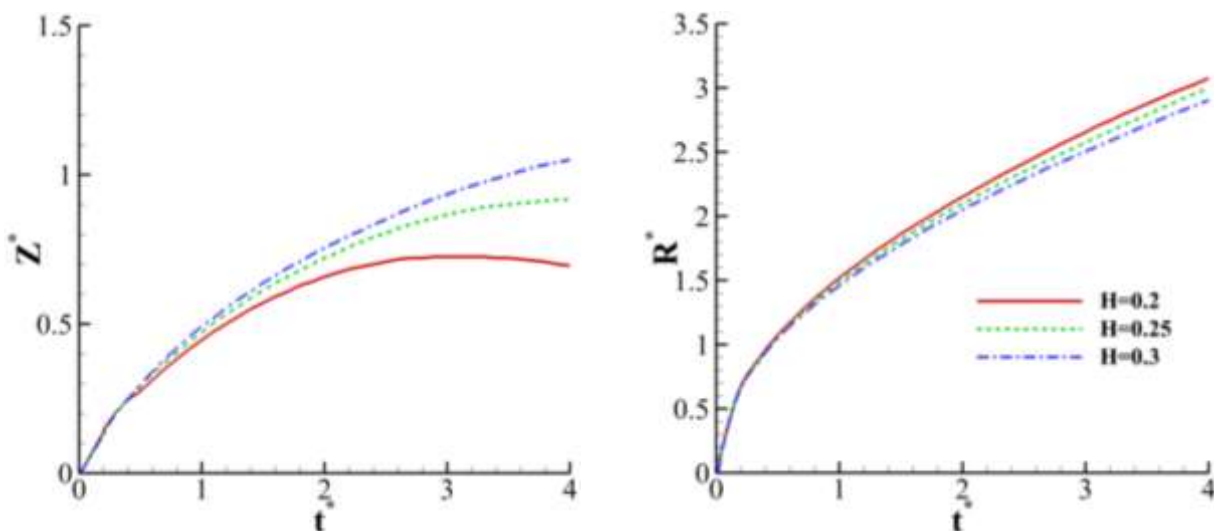


(ج)

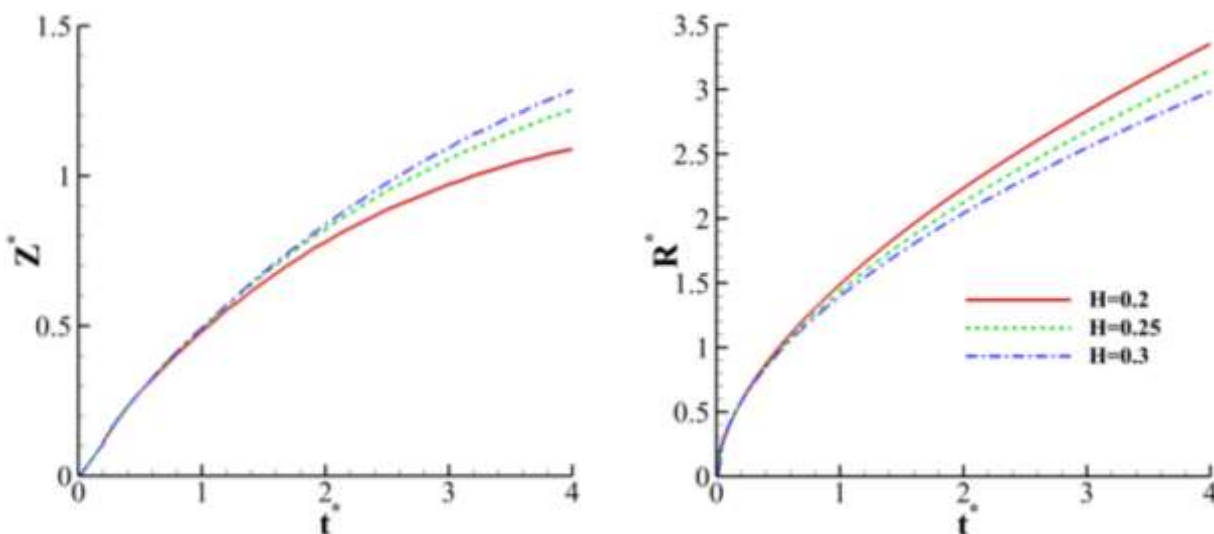
شکل ۳-۳۴: تغییرات زمانی (الف) بیشینه فشار، (ب) بیشینه اندازه تنش برشی و (ج) سرعت جت خارج شده، با عدد وایزنبرگ در $\theta = 0$ ، $H = 0.2$ ، $\beta = 0.5$ ، $\alpha = 0$ ، $Bo = 1/6$ و $We = 224$.

در پدیده برخورد قطره بر لایه سیال، تشکیل هندسه تاج ناشی از جدا شدن سیال از قطره و لایه سیال است. به همین جهت تاثیر ضخامت این لایه مهم ارزیابی می‌شود. در مطالعه حاضر تاثیر تغییر ضخامت لایه سیال بر هندسه تاج در سیالات ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار گرفته شده است. در شکل ۳-۳۵ تغییرات زمانی ارتفاع و شعاع بدون بعد تاج در ضخامت‌های مختلف لایه سیال برای اعداد وایزنبرگ مختلف آورده شده است. با توجه به این شکل با افزایش ضخامت لایه سیال، شعاع تاج کاهش می‌یابد. از طرف مقابل تغییرات ارتفاع بدون بعد تاج با ضخامت لایه سیال ارتباط مستقیمی دارد. با افزایش ضخامت لایه سیال، انرژی جنبشی قطره صرف نفوذ به لایه ضخیم سیال می‌شود و سیال بیشتری از لایه برای رشد تاج خارج می‌گردد و ارتفاع تاج رشد پیدا می‌کند. با افزایش ضخامت لایه سیال، اتلافات ویسکوز اثر کاهشی بر مومنتوم موجود در لایه سیال دارد که حرکت شعاعی سیال با مقاومت روبرو شده و در نتیجه آن رشد شعاعی تاج کندتر می‌گردد و متعاقباً ضخامت دیواره تاج افزایش پیدا می‌کند. همچنین برای لایه نازک سیال، ضخامت دیواره نازک‌تر شده و تمایل انحراف به طرفین دارد که کوچک شدن ارتفاع تاج را نیز سبب می‌شود. قابل ذکر است که تغییرات هندسه تاج برای اعداد وایزنبرگ بزرگتر نیز به همین صورت است. از طرفی در اعداد وایزنبرگ بزرگتر به علت افزایش خواص الاستیک سیال، اتلافات ویسکوز در لایه سیال کمتر شده و قابلیت ذخیره انرژی توسط لایه سیال بیشتر می‌شود و به همین جهت رشد ارتفاع و شعاعی تاج قابل ملاحظه‌تر است.

در لحظه $t^* = 4$ تاثیر ضخامت لایه سیال بر شکل تاج و میدان سرعت در شکل ۳-۳۶ آورده شده است. با توجه به این شکل ضخامت دیواره تاج با افزایش ضخامت لایه سیال بیشتر می‌شود. همچنین با توجه به بردارهای سرعت موجود در این شکل، برای ضخامت‌های کوچک لایه سیال ذرات سیال غالباً تمایل به حرکت در جهت شعاعی دارند و از طرف دیگر برای ضخامت‌های بزرگتر لایه سیال، بردارهای سرعت زاویه بیشتری نسبت به لایه سیال پیدا خواهند کرد. همچنین در این شکل قابل مشاهده است که با افزایش ضخامت لایه سیال بیشینه اندازه سرعت در میدان جریان بزرگتر خواهد شد.



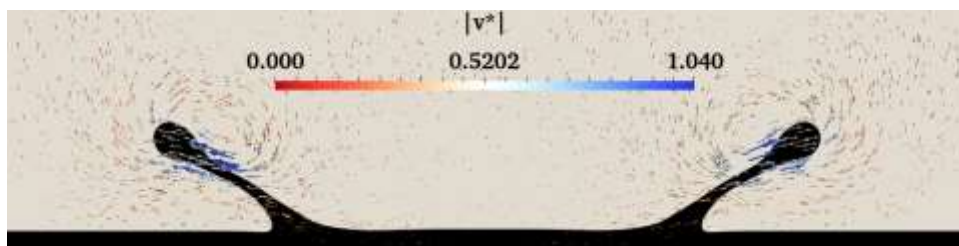
(الف)



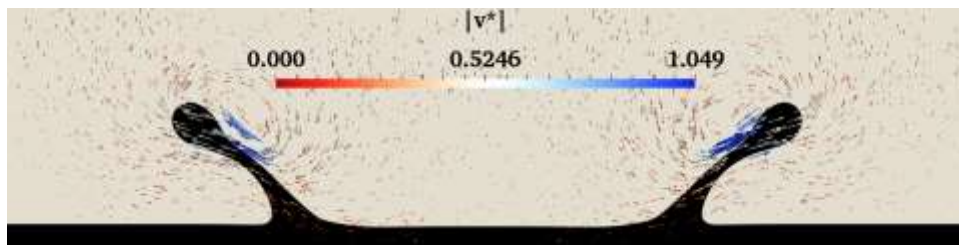
(ب)

شکل ۳-۵: تغییرات زمانی شعاع تاج (R^*) و ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای ضخامت‌های مختلف لایه سیال، $\theta = 0$ ، $Bo = 1/6$ ، $We = 224$ و $\alpha = 0$ ، $\beta = 0/1$ (الف) $Wi = 100$ و (ب) $Wi = 1000$

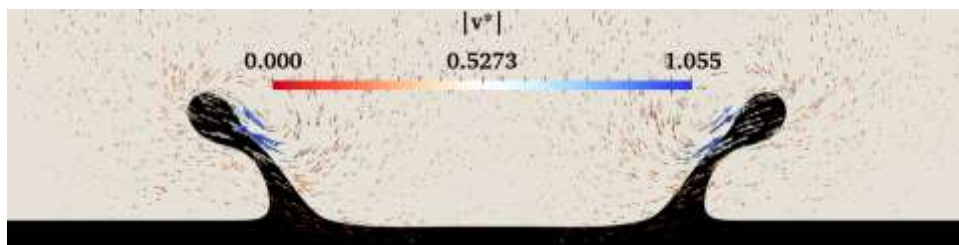
تأثیر ضخامت لایه سیال بر زاویه تاج نسبت به خط افق در شکل ۳-۳۷ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل در ضخامت‌های مختلف لایه سیال تغییرات زاویه تاج با زمان به صورت تابعی نزولی است. این شکل بیانگر آن است که در لحظات اولیه برخورد تاج با زوایای نزدیک به ۹۰ درجه شروع به تشکیل می‌شود و با گذشت زمان و رشد تاج، این زاویه به صورت تدریجی کاسته می‌شود. با توجه به این نمودار روند نزولی زاویه تاج به



(الف)

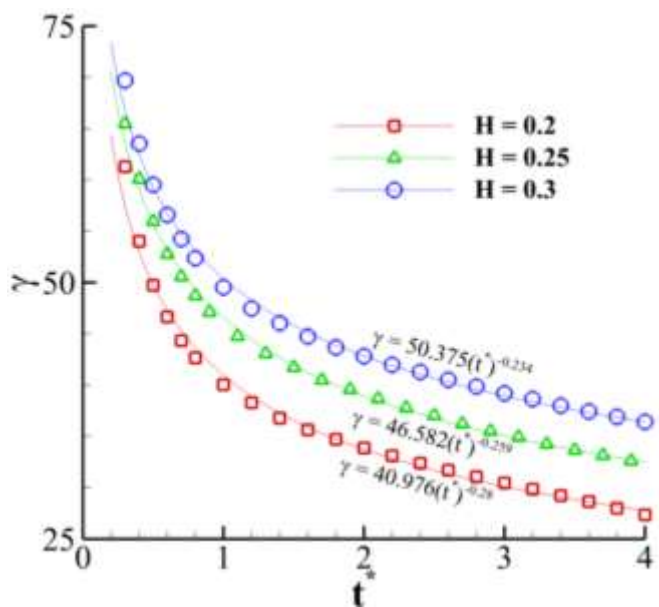


(ب)



(ج)

شکل ۳-۳۶: شکل تاج در ضخامت‌های مختلف لایه سیال در $t^* = 4$ برای $\theta = 0$, $Wi = 1000$, $\beta = 0.1$, $\alpha = 0$, $Bo = 1/6$, $We = 224$ (الف) $H = 0.2$ (ب) $H = 0.25$ (ج) و $H = 0.3$



شکل ۳-۳۷: تاثیر ضخامت لایه سیال بر زاویه تاج $\theta = 0$, $Wi = 1000$, $\beta = 0.1$, $\alpha = 0$, $Bo = 1/6$ و $We = 224$

صورت یک تابع توانی برازش شده است. همچنین این شکل نشان دهنده آن است که برای ضخامت‌های بزرگتر لایه سیال، زاویه انحراف تاج نسبت به افق بیشتر خواهد بود که این رفتار نیز در شکل ۳-۳۶ قابل مشاهده است. در شکل ۳-۳۸ شکل تاج در لحظه‌ی $t^* = 4$ برای نسبت ویسکوزیته‌های (β) مختلف آورده شده است و همچنین تاثیر متغیر نسبت ویسکوزیته بر دینامیک رشد تاج در شکل ۳-۳۹ ارائه شده است. نسبت ویسکوزیته برابر نسبت ویسکوزیته بخش پلیمری سیال به ویسکوزیته محلول در نرخ برش صفر می‌باشد. با توجه به شکل ۳-۳۷ (الف) نسبت ویسکوزیته بر روی شعاع تاج تاثیر اندکی دارد. در سیالات نیوتنی تروگیلو و لی [۳۶] به صورت نظری عدم وابستگی تشکیل و رشد متغیر شعاع به ویسکوزیته سیال را تایید کردند. از طرف مقابل شکل



(الف)

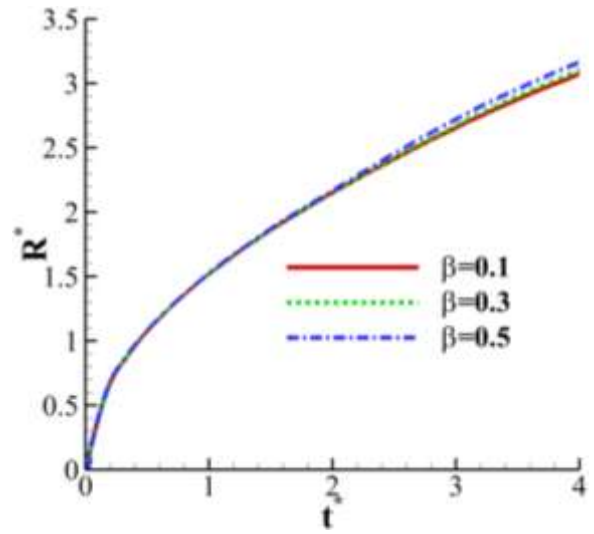
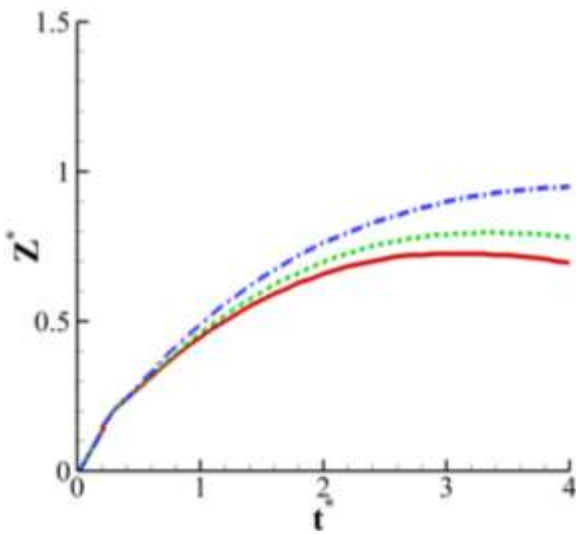


(ب)

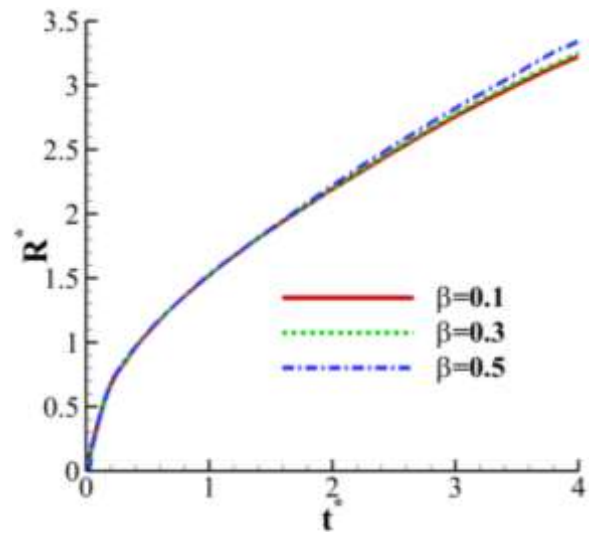
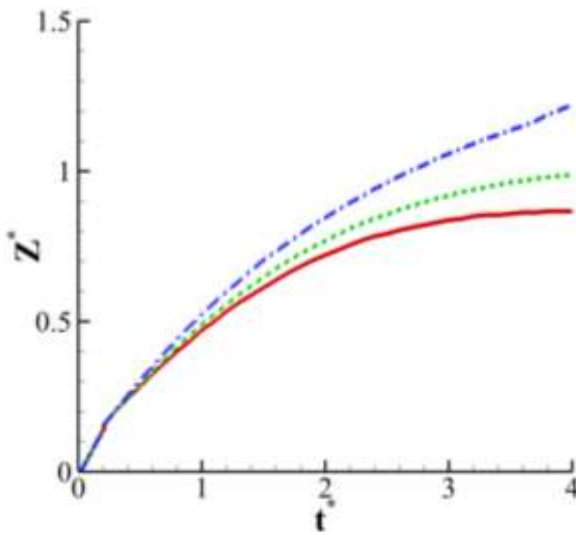


(ج)

شکل ۳-۳۸: شکل تاج در نسبت ویسکوزیته‌های مختلف در $t^* = 4$ برای $\theta = 0$, $Wi = 1000$, $H = 0.2$, $\alpha = 0.1$, $\beta = 0.1$ (الف), $\beta = 0.3$ (ب) و $\beta = 0.5$ (ج), $We = 224$ و $Bo =$



(الف)



(ب)

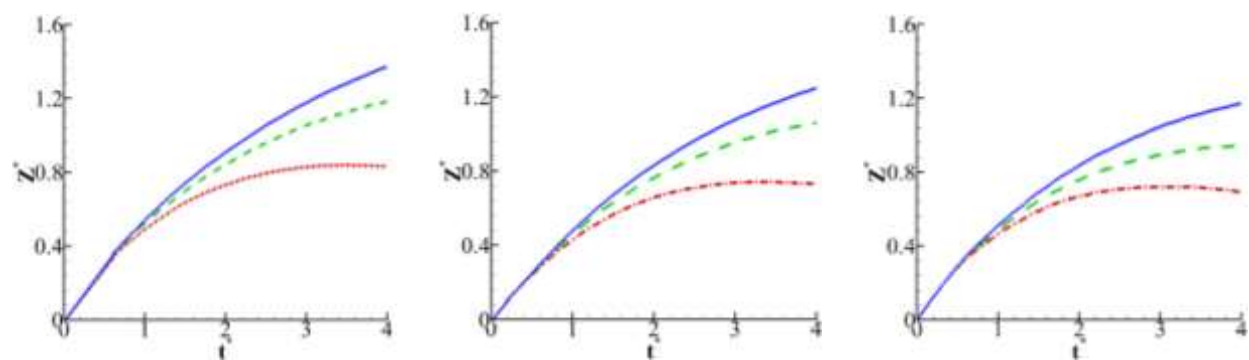
شکل ۳-۳۹: تغییرات زمانی شعاع تاج (R^*) و ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای نسبت ویسکوزیته‌های مختلف، $\theta = 0$.

$Wi = 1000$ (ب) و $Wi = 100$ (الف) $We = 224$ و $Bo = 1/6$ ، $\alpha = 0$ ، $H = 0.2$

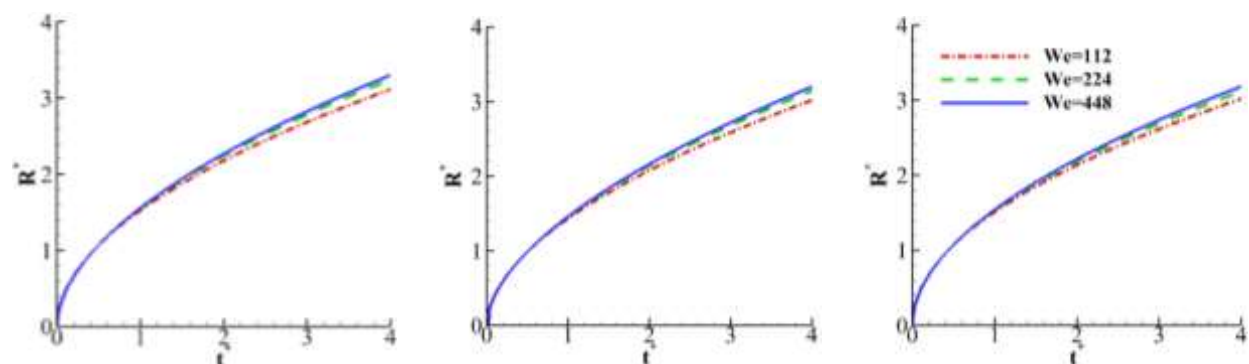
۳-۳۹ (ب) نشان دهنده وابستگی ارتفاع تاج به تغییرات نسبت ویسکوزیته سیال است. در لحظات مختلف با افزایش نسبت ویسکوزیته ارتفاع تاج افزایش پیدا می‌کند. با افزایش نسبت ویسکوزیته سهم ویسکوزیته پلیمری در محلول ویسکوالاستیک افزایش یافته و با این تغییر خاصیت الاستیک سیال افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر تاثیر نسبت ویسکوزیته بر ارتفاع تاج مشابه عدد وایزنبرگ است.

با توجه به تعریف عدد وبر، این عدد یکی از مهمترین متغیرهای موجود در مسائل چند فازی است. این عدد بیانگر نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای کشش سطحی است. در حالی که سایر متغیرها ثابت نگه داشته شده است، مدل سازی پدیده برخورد برای محدوده اعداد وبر بین ۱۱۲ تا ۴۴۸ در اعداد وایزنبرگ مختلف انجام گرفته است. شکل ۳-۴۰ تغییرات متغیرهای هندسه تاج به ازای اعداد وبر و وایزنبرگ را نمایش می دهد. همچنین در شکل ۳-۳۹ تغییر شکل تاج به ازای اعداد وبر و وایزنبرگ مختلف به صورت کیفی در لحظه $t^* = 4$ نمایش داده شده است. با افزایش عدد وبر اندازه متغیرهای Z^* و R^* افزایش می یابد. همچنین شکل ۳-۴۰ بیانگر آن است که تاثیر عدد وبر بر ارتفاع تاج بیش از شعاع تاج است. در حالت کلی این دو شکل وابستگی شدید دینامیک برخورد را به عدد وبر نشان می دهد. برای اعداد وبر بزرگ ($We = 448$)، دیواره تاج نازک تر و برای اعداد وبر کوچک ($We = 112$) نیروی کشش سطحی در برابر رشد تاج مقاومت کرده و سبب ضخیم تر شدن دیواره تاج می گردد. همچنین با توجه به شکل ۳-۴۱، در لحظه $t^* = 4$ با افزایش عدد وبر از ۱۱۲ تا ۴۴۸ ارتفاع بدون بعد تاج برای اعداد وایزنبرگ ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب ۷۰٪، ۶۹٪ و ۶۵٪ رشد خواهد کرد. با توجه به این مقادیر در اعداد وایزنبرگ کوچکتر تاثیر عدد وبر بیشتر است و می توان نتیجه گرفت که افزایش نیروهای الاستیک همانند کاهش نیروهای کشش سطحی سبب گسترش ابعاد تاج می گردد. همانطور که قبل تر ذکر شد با افزایش عدد وایزنبرگ اینرسی سیال موجود در تاج افزایش می یابد که در واقع توانایی تاج برای غلبه بر نیروهای کشش سطحی را افزایش می دهد. از نکات مهم قابل حصول دیگر می توان به این موضوع اشاره کرد که در لحظات اولیه برخورد، خاصیت کشش سطحی همانند ویسکوزیته سیال نقش تعیین کننده ای بر دینامیک مسئله ندارد و با گذشت زمان شاهد تقویت اثر کشش سطحی بر دینامیک تاج خواهیم بود.

تاثیر عدد وبر بر زاویه دیواره تاج در شکل ۳-۴۲ آورده شده است. با توجه به این شکل در کلیه اعداد وایزنبرگ با افزایش عدد وبر زاویه تاج بیشتر می شود. در این شکل قابل مشاهده است که رفتار تغییرات زاویه تاج به زمان به صورت یک تابع توانی ($\gamma = a(t^*)^b$) نیز خواهد بود.



(الف)



(ب)

$$Wi = 1000$$

$$Wi = 500$$

$$Wi = 100$$

شکل ۳-۴: تغییرات زمانی (الف) شعاع تاج (R^*) و (ب) ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای اعداد وبر مختلف، $\theta = 0$ ، $H = 0.5$ ، $\alpha = 0$ ، $\beta = 0.5$ و $Bo = 1/6$

$$Bo = 1/6 \text{ و } \beta = 0.5, \alpha = 0, H = 0.5$$



(الف)



(ب)



(ج)

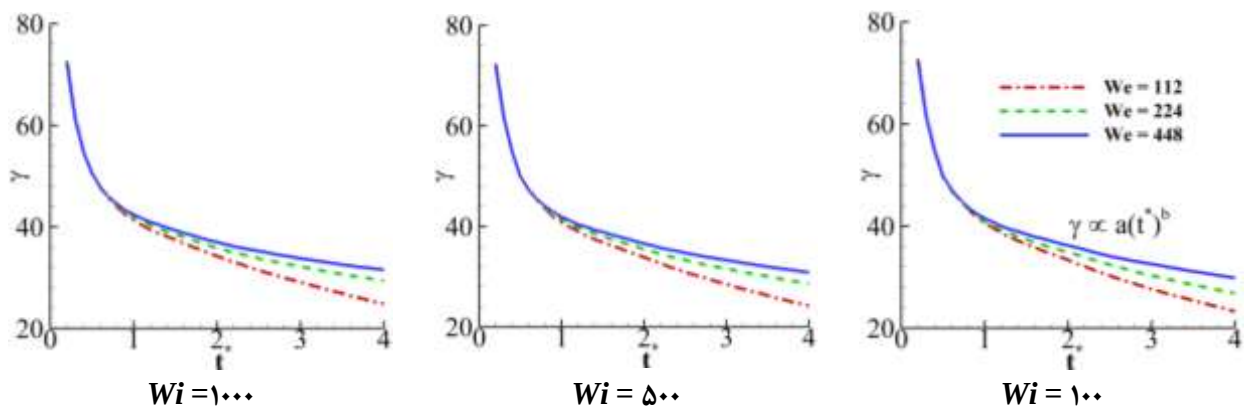
$$Wi = 1000$$

$$Wi = 500$$

$$Wi = 100$$

شکل ۳-۴۱: شکل تاج در اعداد وبر مختلف در $t^* = 4$ برای $\theta = 0$ ، $H = 0.5$ ، $\alpha = 0$ ، $\beta = 0.5$ و $Bo = 1/6$.

(الف) $We = 112$ ، (ب) $We = 224$ و (ج) $We = 448$



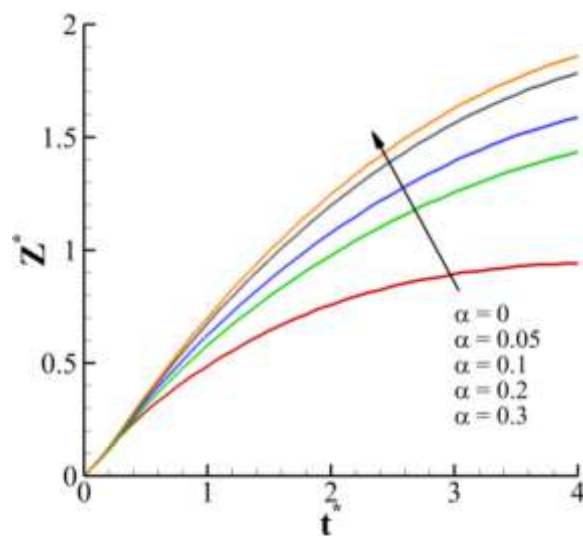
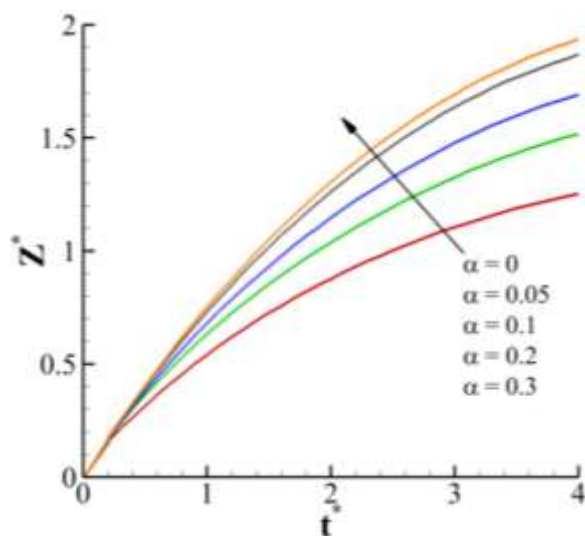
شکل ۳-۴۲: تاثیر ضخامت لایه سیال بر زاویه تاج $\theta = 0$, $H = 0.2$, $\alpha = 0$, $\beta = 0.5$ و $Bo = 1/6$

در مدل ساختاری گریکس در سیالات ویسکوالاستیک غیرخطی، متغیر ضریب تحرک (α) میزان غیرخطی بودن مدل را کنترل می‌کند. این متغیر یکی از مهمترین متغیرهایی است که تاثیر بزرگی بر دینامیک تاج دارد. با افزایش این ضریب، رفتار باریک‌شوندگی^۱ سیال افزایش می‌یابد. شکل ۳-۴۳ تغییرات زمانی ارتفاع (Z^*) و شعاع (R^*) بدون بعد تاج را بر حسب ضرایب تحرک مختلف نمایش می‌دهد. این شکل به وضوح بیانگر آن است که افزایش این ضریب به گسترش ابعاد تاج منجر می‌شود. با افزایش ضریب تحرک خاصیت کشسانی در دیواره تاج کاهش یافته که سبب رشد سریع‌تر نوک تاج می‌گردد. به عبارت دیگر با افزایش ضریب تحرک مقاومت در برابر کشش تاج کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش باریک‌شوندگی سیال، ویسکوزیته سیال کاسته شده و به همین جهت اتلافات ویسکوز در حین برخورد قطره بر لایه سیال کوچکتر شده و انرژی جنبشی برخورد در رشد بیشتر تاج کمک می‌کند.

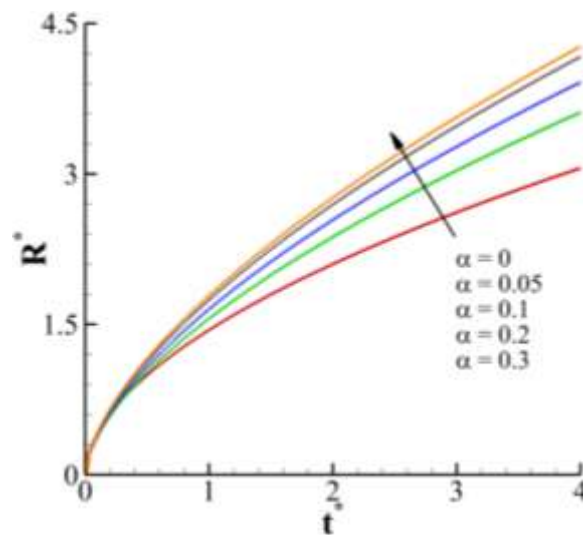
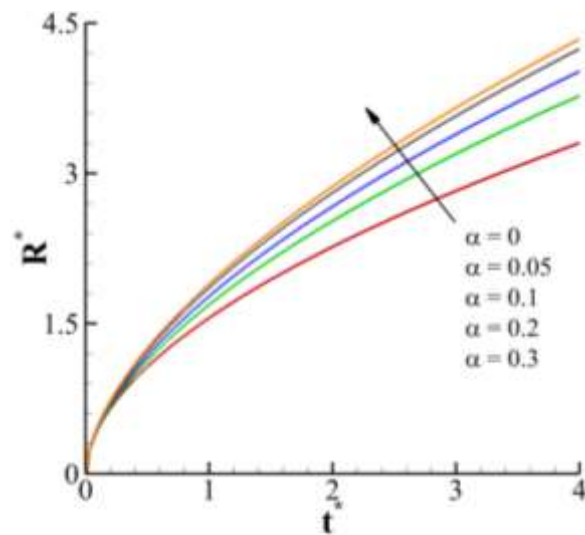
همانطور که در شکل ۳-۴۳ مشاهده می‌شود، در لحظه $t^* = 4$ با افزایش ضریب تحرک از ۰ تا 0.3 ارتفاع و شعاع تاج به ترتیب ۲ و $1/5$ برابر می‌شود که میزان تغییرات در هندسه تاج به ازای این متغیر نسبت به متغیرهای دیگر قابل ملاحظه است. همچنین از این شکل نتیجه می‌شود که تاثیر ضریب تحرک بر ارتفاع تاج بیش از شعاع تاج خواهد بود. برای مقادیر بزرگتر ضریب تحرک، نتایج بیانگر آن است که نرخ تغییرات در هندسه تاج کاهش محسوسی دارد. با مقایسه نتایج در اعداد وایزنبرگ مختلف شاهد هستیم که تاثیر متغیر

¹ Shear-thinning

ضریب تحرک در اعداد وایزنبرگ بزرگتر بیشتر خواهد بود. با توجه به معادله ساختاری گزیکس، در اعداد وایزنبرگ بزرگ به علت افزایش خواص الاستیک اثر پذیری متغیر ضریب تحرک بر میدان تنش سیال بیشتر شده و رفتار باریک شوندگی سیال در وایزنبرگ‌های بزرگتر تقویت می‌شود. در شکل ۳-۴۴ به صورت گرافیکی



(الف)



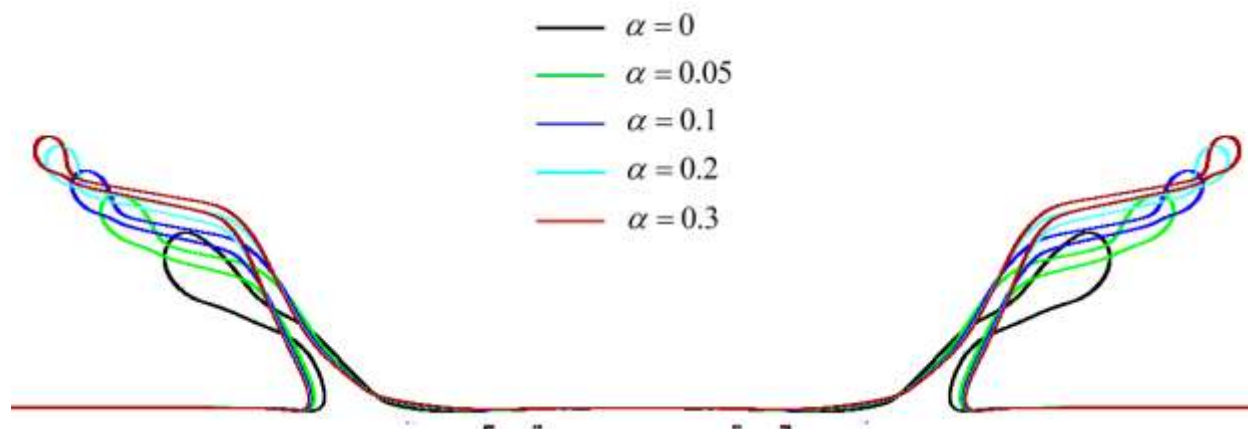
(ب)

$$Wi = 1000$$

$$Wi = 100$$

شکل ۳-۴۳: تغییرات زمانی (الف) شعاع تاج (R^*) و (ب) ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای اعداد ضرایب تحرک مختلف،

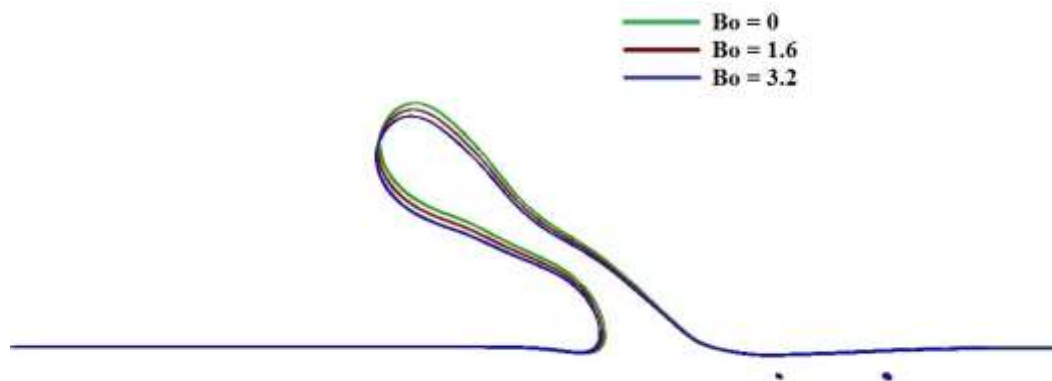
$$Bo = 1/6 \text{ و } \beta = 0.5, We = 224, H = 0.2, \theta = 0$$



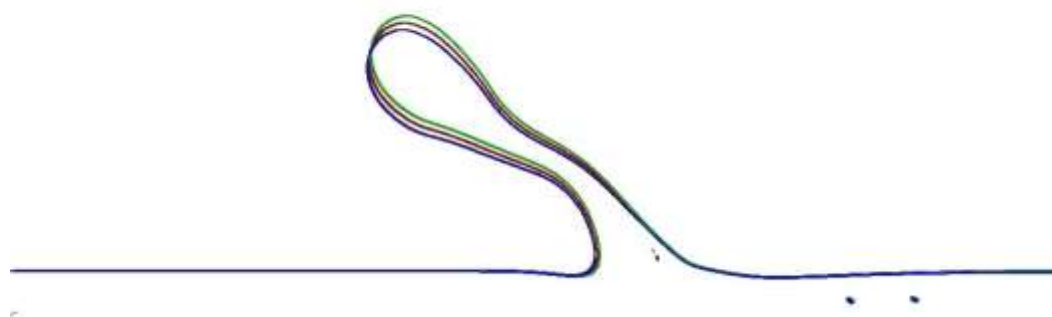
شکل ۳-۴۴: شکل تاج در ضرایب تحرک مختلف در $t^* = 4$ برای $\theta = 0$ ، $H = 0.2$ ، $We = 224$ ، $\beta = 0.5$ و $Bo = 1/6$

هندسه تاج را به ازای ضرایب تحرک مختلف نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، ضخامت دیواره تاج با ضریب تحرک کاهش می‌یابد و نوک تاج منحرف و تحت زاویه‌ای نسبت به دیواره تاج به طرفین کشیده می‌شود. این تغییرات به دلیل افزایش خاصیت باریک‌شوندگی سیال و افزایش اینرسی است. در نهایت قابل ذکر است که افزایش ضریب تحرک کمک به تسریع شروع پدیده پاشش و تشکیل قطرات ثانویه می‌کند.

با توجه به اینکه نیروی گرانش نیز در برخورد قطره بر لایه سیال تاثیر گذار است، در این قسمت تغییرات عدد بدون بعد بوند بر هندسه تاج مورد بررسی قرار گرفته شده است. در شکل ۳-۴۵ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد بوند زاویه تاج نسبت به لایه سیال کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش نیروی جاذبه ارتفاع تاج کاهش یافته و در حالی که تاثیر آن بر تغییرات شعاع تاج چشمگیر نیست. با افزایش عدد بوند، گرانش در مقابل گسترش قائم تاج مقاومت می‌کند. از لحاظ کمی، در لحظه $t^* = 4$ با افزایش عدد بوند از ۰ تا $3/2$ ، ارتفاع بدون بعد تاج برای اعداد وایزنبرگ ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب به میزان $4/5\%$ ، $7/5\%$ و $8/5\%$ کاهش می‌یابد. به توجه به این تغییرات، تاثیر گرانش در اعداد وایزنبرگ بزرگتر بیشتر است. در حالت کلی می‌توان دریافت که در سیالات ویسکوالاستیک نیز همانند سیالات نیوتنی، گرانش نقش مقاوم در برابر رشد تاج دارد.



(الف)



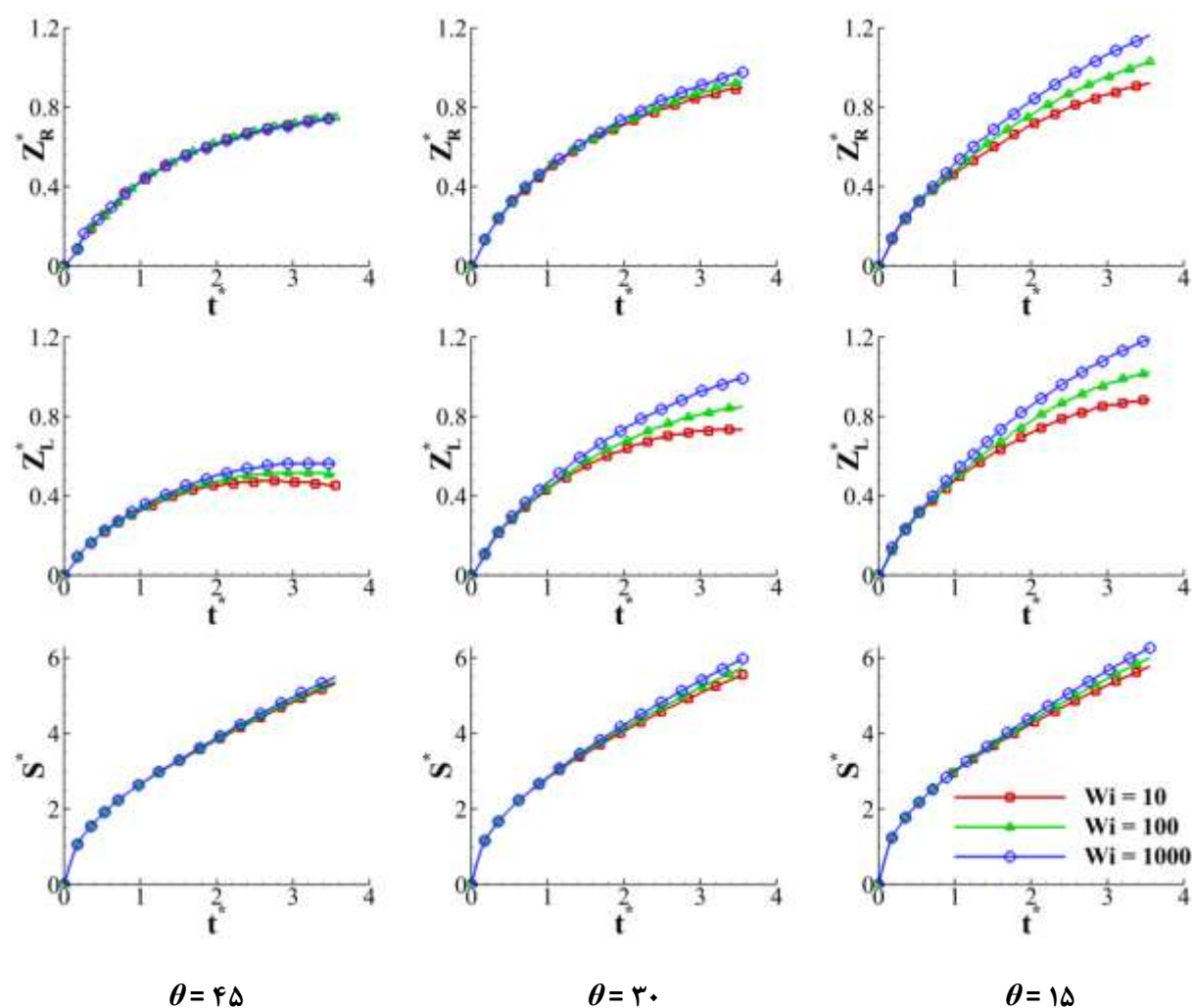
(ب)

شکل ۳-۴۵: شکل تاج در اعداد بوند مختلف در $t^* = 4$ برای $\theta = 0$ ، $\beta = 0.5$ ، $H = 0.2$ ، $\alpha = 0$ و $We = 224$ (الف) و $Wi = 100$ و $Wi = 1000$ (ب)

با توجه به نتایج فوق، در این بخش یک تحلیل عددی دو بعدی برای مسئله برخورد قائم قطره بر لایه سیال در سیالات ویسکوالاستیک ارائه شد و مطالعه‌ای بر روی اثر متغیرهای موجود بر این پدیده انجام گردید. در ادامه تاثیر برخورد مایل قطره بر لایه سیال در سیالات ویسکوالاستیک به صورت دو بعدی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

تغییرات شعاع و ارتفاع بدون بعد تاج بر حسب زمان برای اعداد وایزنبرگ مختلف و زوایای مختلف برخورد در شکل ۳-۴۶ نمایش داده شده است. مطابق این شکل در زوایای کوچک تاثیر الاستیسیته سیال بر ارتفاع تاج (Z^*) بیشتر از تاثیر آن بر طول پخش (S^*) است. علاوه بر آن این شکل بیانگر این است که در هر لحظه الاستیسیته سیال سبب رشد ابعاد تاج می‌شود و همچنین رشد تاج در اثر افزایش خاصیت الاستیک سیال برای

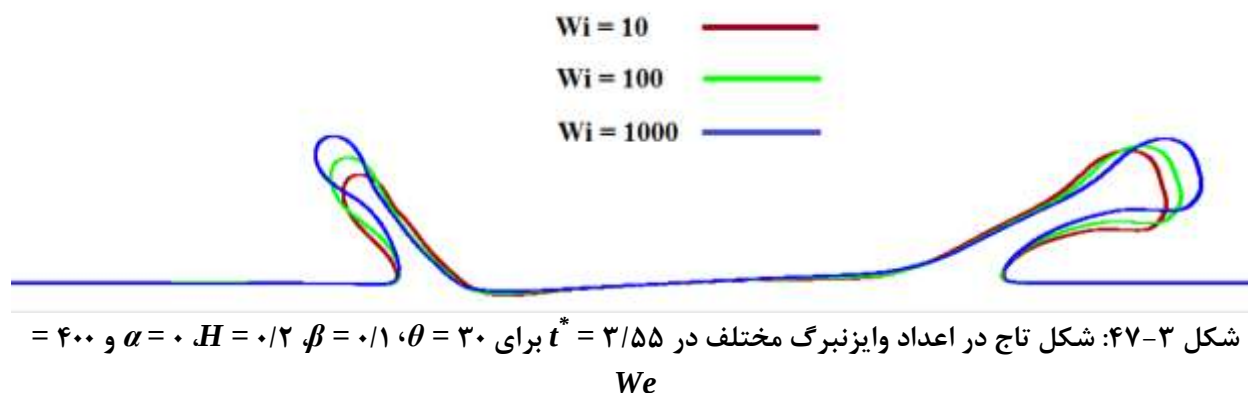
زمان‌های بزرگتر از ۱ چشمگیرتر است. با توجه به اینکه سهم الاستیک سیال در سیالات ویسکوالاستیک با افزایش عدد وایزنبرگ بیشتر می‌شود؛ در لحظات اولیه برخورد قطره، اینرسی قطره توسط لایه سیال جذب و ذخیره شده و میزان اتلافات انرژی بر اثر تنش برشی کاسته می‌شود و در مرحله پخش و رشد تاج، انرژی ذخیره شده توسط الاستیسیته سیال آزاد می‌گردد. بنابراین با افزایش عدد وایزنبرگ و رشد سهم الاستیک سیال، تاثیر مثبتی بر افزایش ابعاد تاج را شاهد خواهیم بود. از طرفی می‌دانیم که با افزایش عدد وایزنبرگ

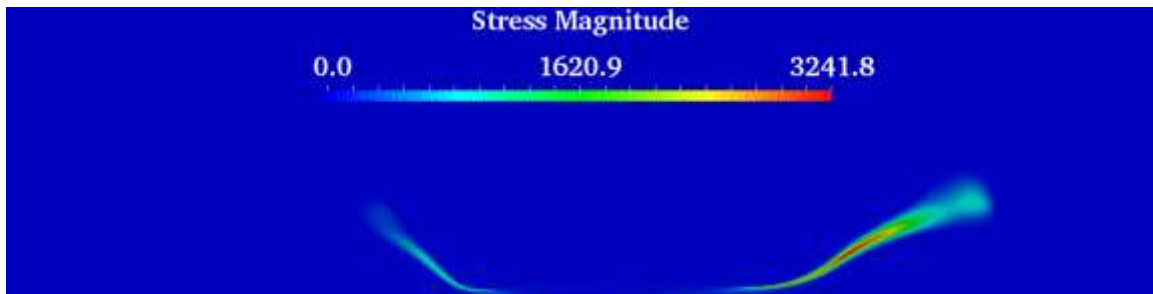


شکل ۳-۴۶: تغییرات زمانی متغیرهای تاج با عدد وایزنبرگ به ازای $H = 0.2$ ، $\beta = 0.1$ و $We = 400$

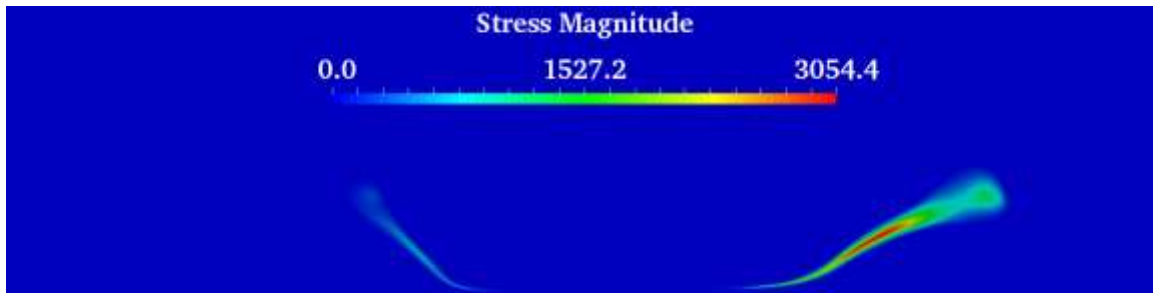
خاصیت کشسان در سیال افزایش می‌یابد و این خاصیت در رشد دیواره تاج مقاومت ایجاد می‌کند. افزایش خاصیت کشسان در مقابل افزایش قابلیت الاستیک لایه سیال (قابلیت ذخیره انرژی) در محدوده اعداد وایزنبرگ ۱۰ تا ۱۰۰۰ کوچکتر است. به همین جهت شاهد هستیم که با افزایش عدد وایزنبرگ در این محدوده ابعاد تاج گسترش می‌یابد. همچنین از شکل ۳-۴۶ نتیجه می‌شود که با افزایش زاویه برخورد قطره، تاثیر الاستیسیته سیال بر هندسه تاج کاهش پیدا می‌کند. با افزایش زاویه برخورد، مومنتوم بیشتری در راستای افقی به لایه سیال وارد می‌شود که سبب افزایش تنش‌های برشی در لایه سیال و به تبع آن افزایش اتلافات ویسکوز در این لایه را سبب می‌گردد که درصدی از ذخیره انرژی توسط این لایه کاسته می‌شود. به همین جهت در زاویای بزرگتر برخورد، رشد تاج کاسته می‌شود.

تاثیر عدد وایزنبرگ بر شکل تاج در لحظه $t^* = 3/55$ در شکل ۳-۴۷ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل در اعداد وایزنبرگ بزرگتر انرژی آزاد شده از لایه سیال بیشتر بوده و سبب گسترش بیشتر تاج می‌گردد و همچنین تغییری در زوایای دیواره تاج مشاهده نمی‌شود. از طرفی به دلیل رشد ابعاد هندسی تاج ضخامت دیواره تاج کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۳-۴۶ اندازه تانسور تنش در دیواره‌های تاج کاهش می‌یابد. در هنگام

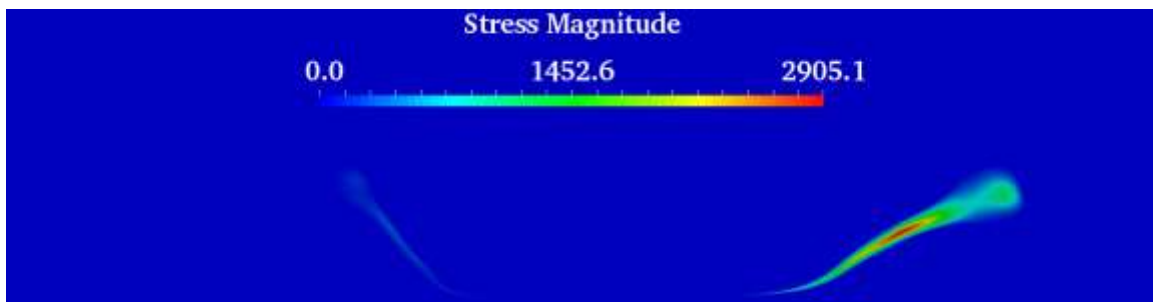




(الف)



(ب)



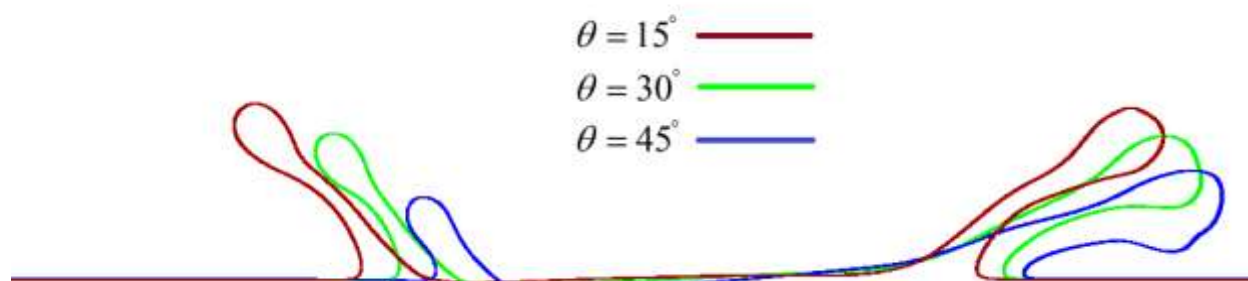
(ج)

شکل ۳-۴۸: توزیع تنش در تاج در لحظه $t^* = ۳/۵۵$ برای $H = ۰/۲$ ، $\beta = ۰/۱$ ، $We = ۴۰۰$ و $\theta = ۳۰$ (الف) $Wi = ۱۰$ ، $Wi = ۱۰۰$ (ب) و $Wi = ۱۰۰۰$ (ج)

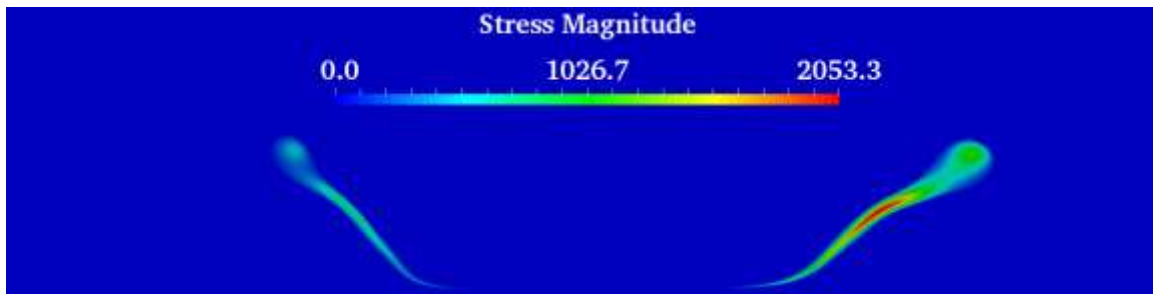
رشد تاج بر اثر نیروهای اینرسی، تنش‌ها در دیواره تاج افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش الاستیسیته سیال خواص پلیمری سیال موجود در تاج افزایش یافته که با رشد تاج این رشته‌های پلیمری در راستای جریان قرار گرفته و سبب آزاد شدن تنش‌ها در این راستا می‌گردد و به همین جهت شاهد هستیم که مقادیر بیشینه تنش در میدان جریان با افزایش عدد وایزنبرگ روند کاهشی می‌گیرد.

در شکل ۳-۴۹ تاثیر زاویه برخورد بر هندسه تاج در زمان $t^* = 3/55$ نمایش داده شده است. در این شکل به وضوح قابل مشاهده است که با افزایش زاویه برخورد قطره بر لایه سیال، زاویه تاج سمت راست نسبت به افق کوچکتر شده و به سمت لایه سیال متمایل می‌شود و از طرف مقابل زاویه تاج سمت چپ تغییر چندانی نکرده و تنها ارتفاع آن کاسته شده است و این دیواره به سمت راست جابجا می‌شود. با افزایش زاویه برخورد، اینرسی قطره در راستای افق (به سمت راست) افزایش یافته و در این راستا افزایش مومنتوم سیال سبب رشد شعاعی تاج می‌گردد. از طرفی با افزایش زاویه برخورد اندازه حرکت در دیواره تاج‌ها در راستای قائم کوچکتر شده و رشد تاج در این راستای کمتر می‌شود.

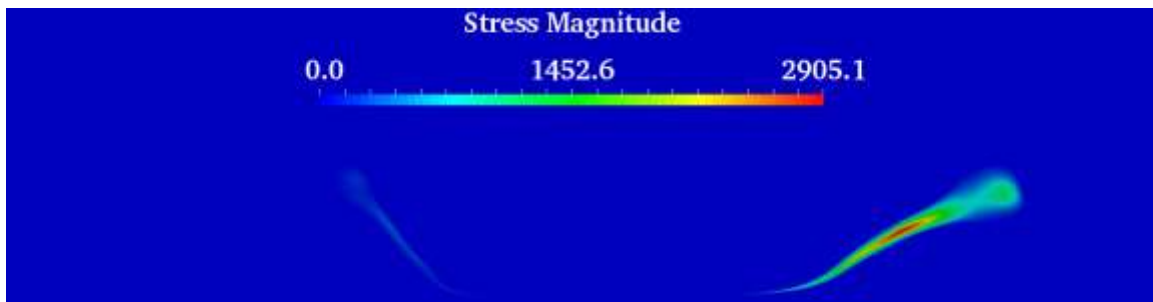
شکل ۳-۵۰ تاثیر زاویه برخورد بر توزیع تنش در تاج را نمایش می‌دهد که با توجه به این شکل، افزایش زاویه برخورد سبب افزایش اندازه ماکزیمم تنش در دیواره تاج می‌شود. با افزایش این زاویه مقدار بیشتری از سیال از سطح سیال جدا شده و دیواره سمت راست رشد بیشتری را در جهت شعاعی تجربه می‌کند. همانطور که در بالا ذکر شد، با افزایش زاویه برخورد قطره بر لایه سیال، مومنتوم سیال در راستای افقی (به سمت راست) بیشتر شده و به همین جهت در دیواره سمت راست شاهد افزایش تنش و در دیواره سمت چپ اندازه تنش کاهش می‌یابد.



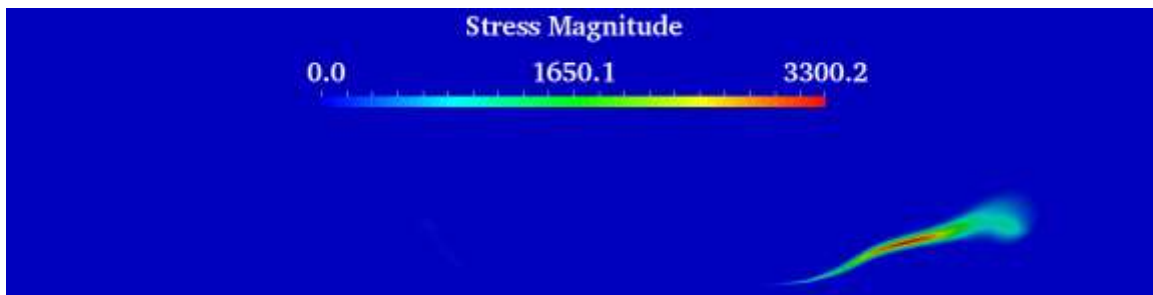
شکل ۳-۴۹: شکل تاج در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 3/55$ برای $\theta = 30^\circ$, $\beta = 0.1$, $H = 0.2$, $\alpha = 0$ و $400 = We$



(الف)



(ب)

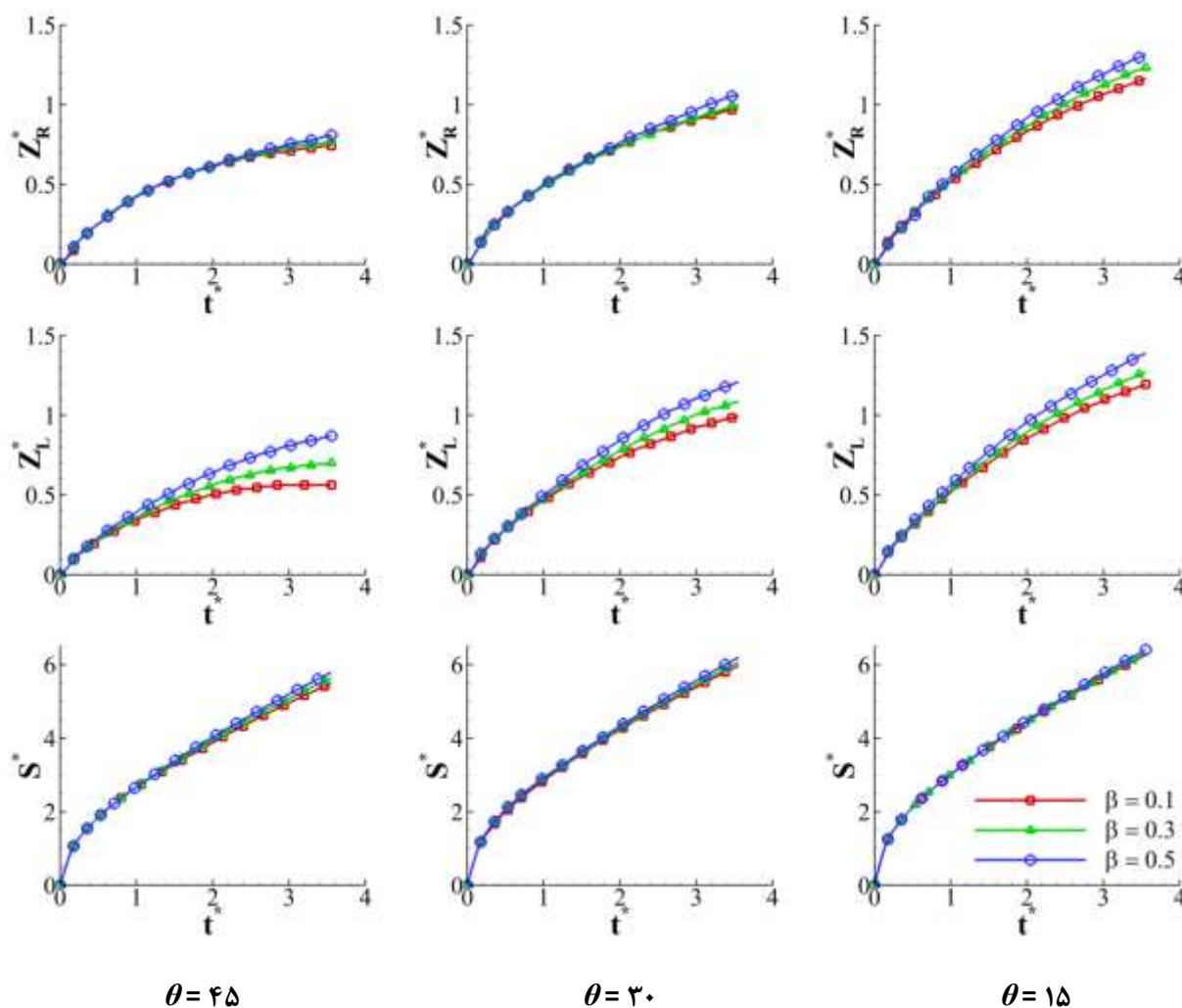


(ج)

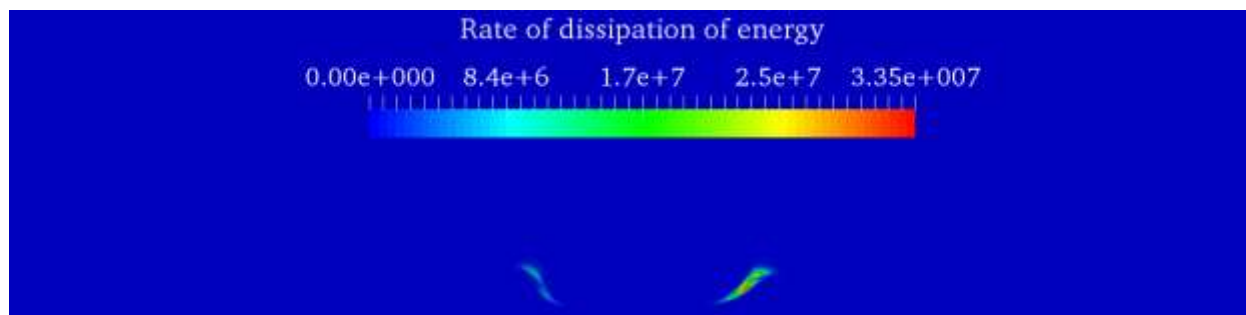
شکل ۳-۵۰: توزیع تنش در تاج در لحظه $t^* = ۳/۵۵$ برای $Wi = ۱۰۰۰$ ، $\beta = ۰/۱$ ، $We = ۴۰۰$ و $H = ۰/۲$ (الف) ۱۵ = θ ، (ب) $\theta = ۳۰$ و (ج) $\theta = ۴۵$

تأثیر نسبت ویسکوزیته بر دینامیک تشکیل تاج در شکل ۳-۴۹ نمایش داده شده است. نسبت ویسکوزیته بیانگر نسبت سهم ویسکوزیته پلیمری به ویسکوزیته محلول در نرخ برش صفر است. با توجه به شکل ۳-۵۱ تأثیر نسبت ویسکوزیته بر طول پخش (S^*) تاج ناچیز است و در برخورد مایل قطره بر لایه سیال عدم وابستگی شعاع تاج به تغییرات نسبت ویسکوزیته در زوایای مختلف برخورد نیز برقرار است [۳۶]. از طرف دیگر شکل ۳-۵۱ نشان دهنده افزایش ارتفاع تاج با افزایش نسبت ویسکوزیته است. با افزایش نسبت ویسکوزیته سهم ویسکوزیته پلیمری در محلول ویسکوالاستیک افزوده می‌شود که این افزایش سبب افزایش خواص الاستیک سیال ویسکوالاستیک می‌گردد. همچنین از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر تغییرات نسبت ویسکوزیته

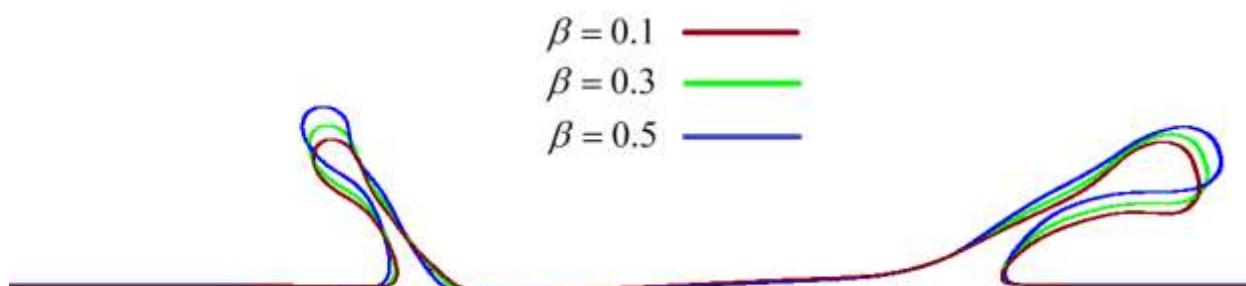
بر ارتفاع دیواره سمت چپ (Z_L^*) بیشتر از تاثیر آن بر دیواره سمت راست (Z_R^*) است و این رفتار در هندسه تاج در زوایای برخورد مختلف نیز یکسان است. با توجه به شکل ۳-۵۲، در دیواره سمت راست به علت بیشتر بودن اتلافات ویسکوز (رابطه ۳-۶) نسبت به دیواره سمت چپ، افزایش خواص الاستیک سیال (افزایش عدد وایزنبرگ و نسبت ویسکوزیته) تاثیر کمتری بر روی رشد متغیر Z_L^* نسبت به Z_R^* دارد.



شکل ۳-۵۱: تغییرات زمانی متغیرهای تاج با نسبت ویسکوزیته (β) به ازای $Wi = 1000$ ، $H = 0.2$ ، $We = 400$ و $\alpha = 0$



شکل ۳-۵۲: توزیع اتلافات ویسکوز (Φ) در لحظه $t^* = 0.53$ به ازای $Wi = 1000$ ، $H = 0.2$ ، $We = 400$ و $\theta = 15$

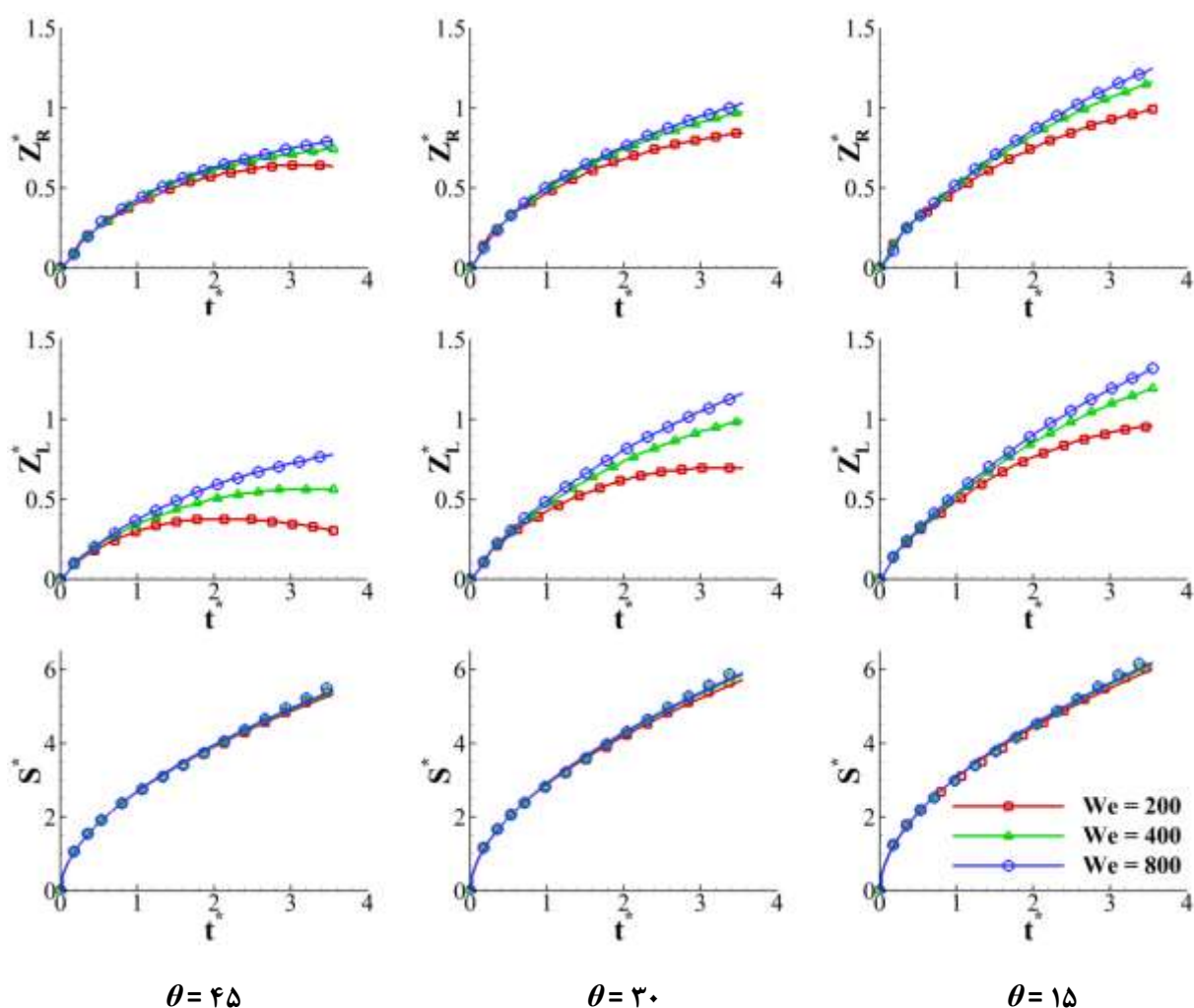


شکل ۳-۵۳: اثر نسبت ویسکوزیته (β) بر شکل تاج در لحظه $t^* = 3.55$ به ازای $Wi = 1000$ ، $H = 0.2$ ، $We = 400$ و $\theta = 30$

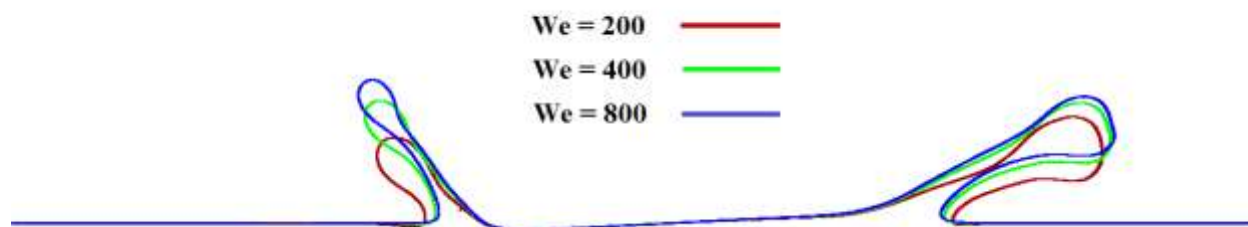
جهت مشاهده شکل تاج در نسبت ویسکوزیته‌های مختلف، شکل ۳-۵۳ تاثیر این متغیر بر روی شکل تاج را در لحظه $t^* = 3.55$ نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل با افزایش نسبت ویسکوزیته ضخامت دیواره تاج کاهش یافته و همچنین میزان کشیدگی طول تاج افزایش می‌یابد.

در مطالعه حاضر، مدلسازی عددی برخورد مایل قطره بر لایه سیال برای محدوده اعداد وبر $We = 200$ تا $We = 800$ نیز صورت گرفته شده است و نتایج به ازای زوایای برخورد مختلف در شکل ۳-۵۴ ارائه شده است. نتایج به وضوح تاثیر شگرف عدد وبر و زاویه برخورد بر دینامیک تشکیل و رشد تاج را بیان می‌کند. شکل ۳-۵۴ به صورت کمی بیانگر افزایش ابعاد تاج با افزایش عدد وبر است. به عبارت دیگر در هر لحظه با افزایش عدد وبر طول پخش (S^*) و ارتفاع (Z^*) تاج افزایش می‌یابد. همچنین این شکل بیانگر این موضوع است که تاثیر عدد وبر بر ارتفاع تاج بیشتر از طول پخش دیواره تاج است. همچنین از این شکل می‌توان نتیجه گرفت تاثیر تغییرات

عدد وبر بر دیواره سمت چپ بیشتر از دیواره سمت راست است. شکل ۳-۵۵ قطر در لحظه $t^* = ۳/۵۵$ را به ازای اعداد وبر مختلف نمایش می‌دهد. به ازای اعداد وبر بزرگ ($We = ۸۰۰$) نیروی کشش سطحی در مقابل نیروهای اینرسی کوچکتر بوده و دیواره تاج تمایل به کشش و نازک‌تر شدن دارد، در حالی که در اعداد وبر کوچک ($We = ۲۰۰$) نیروی کشش سطحی قوی‌تر ظاهر شده و از رشد دیواره تاج جلوگیری می‌کند و در نتیجه آن دیواره تاج ضخامت بیشتری پیدا می‌کند. با توجه به این نتایج در لحظه $t^* = ۳/۵۵$ ، با افزایش عدد وبر از ۲۰۰

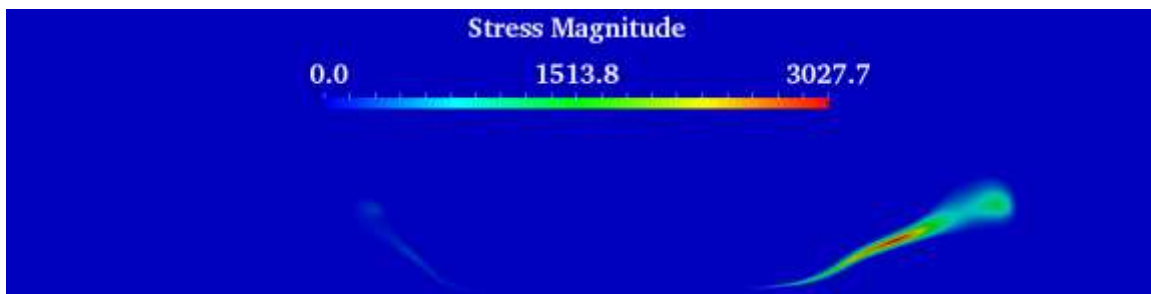


شکل ۳-۵۴: تغییرات زمانی متغیرهای تاج با عدد وبر به ازای $H = ۰/۲$ ، $\beta = ۰/۱$ و $Wi = ۱۰۰۰$ و $\alpha = ۰$

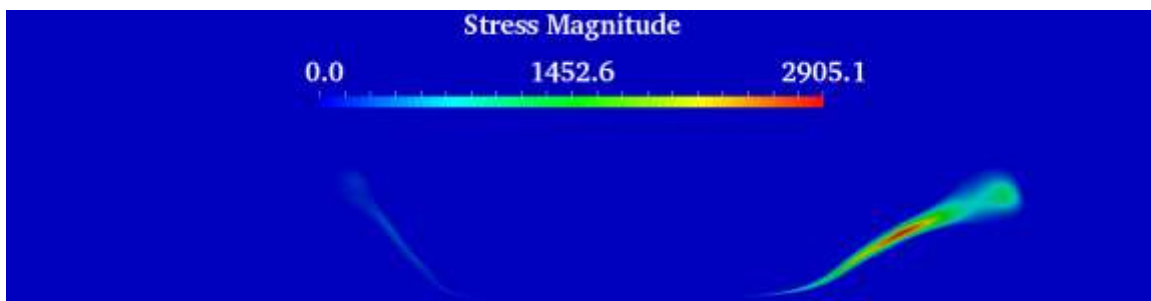


شکل ۳-۵۵: اثر عدد وبر (We) بر شکل تاج در لحظه $t^* = 3/55$ به ازای $Wi = 1000$ ، $H = 0.2$ ، $\beta = 0.1$ و $\theta = 30^\circ$ تا ۸۰۰ متغیر Z_L^* برای زوایای مختلف برخورد ۱۵، ۳۰ و ۴۵ به ترتیب ۰.۱۶، ۰.۲۲ و ۰.۵۵٪ افزایش می‌یابد و همچنین متغیر Z_R^* برای زوایای مختلف برخورد ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه به ترتیب ۰.۱۳، ۰.۹ و ۰.۹٪ افزایش می‌یابد. به علاوه تغییرات طول پخش بدون بعد تاج (S^*) به ازای تغییرات عدد وبر از ۲۰۰ تا ۸۰۰ برای زوایای مختلف برخورد ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه به ترتیب برابر ۰.۲/۲، ۰.۳/۶ و ۰.۵/۲٪ است. بنابراین بیشترین تاثیر عدد وبر بر ارتفاع دیواره چپ در زاویه ۴۵ درجه است و بیشترین تاثیر آن بر طول پخش نیز در زاویه ۴۵ درجه است.

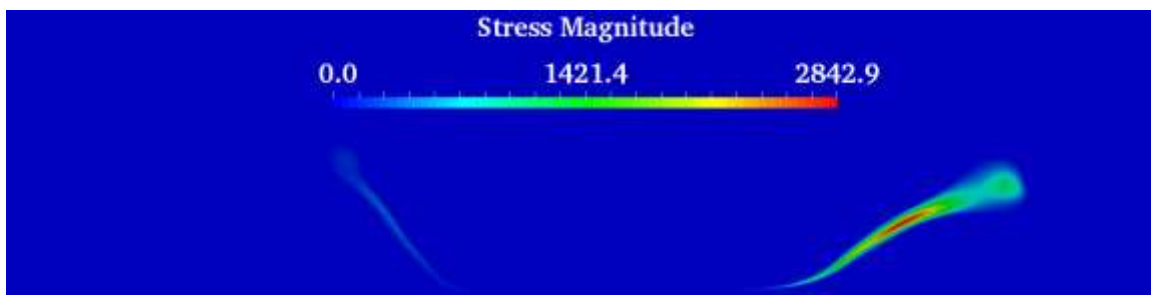
شکل ۳-۵۶: توزیع تنش در دیواره تاج را در لحظه $t^* = 3/55$ نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل با افزایش عدد وبر میزان تنش در دیواره تاج کاسته می‌شود. در واقع با افزایش عدد وبر نیروی کشش سطحی در دیواره کاهش یافته و از طرف مقابل اینرسی تاج جهت گسترش افزایش می‌یابد. با کاهش نیروی مقاوم کشش سطحی در دیواره تاج، اندازه تنش‌ها در دیواره روند کاهشی می‌گیرد. از طرفی در این شکل قابل مشاهده است که اندازه تنش در دیواره سمت راست بیش از دیواره سمت چپ است. همانطور که در قبل بیان شد، انتقال مومنتوم قطره به دیواره سمت راست بیشتر بوده و در این دیواره شاهد اینرسی بالاتر جت خارج شده از لایه سیال هستیم. به همین جهت در این دیواره اندازه تنش‌ها مقادیر بیشتری نسبت به دیواره سمت چپ دارند.



(الف)



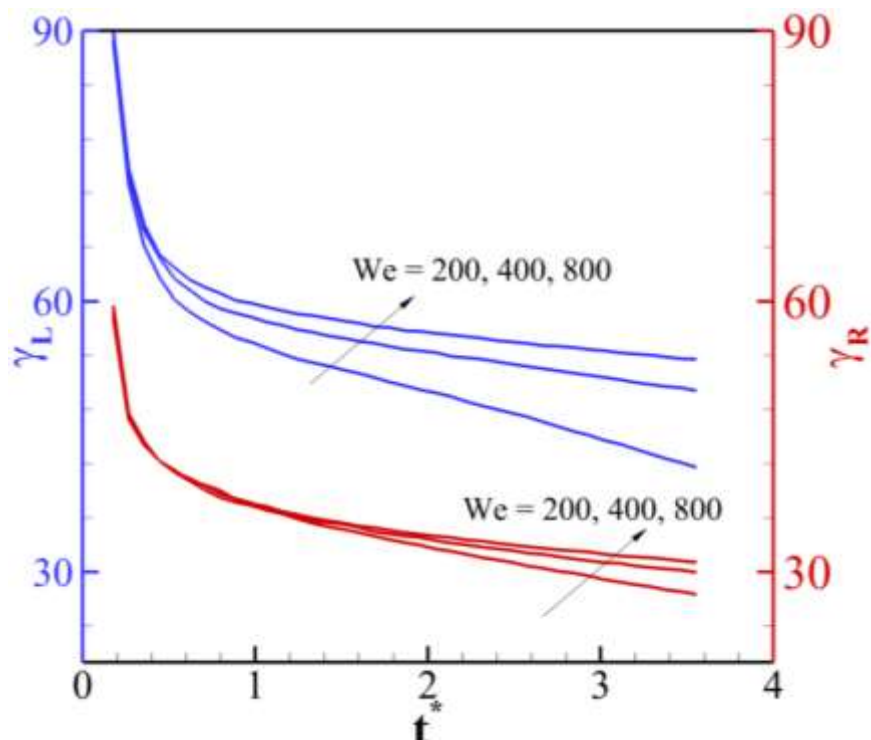
(ب)



(ج)

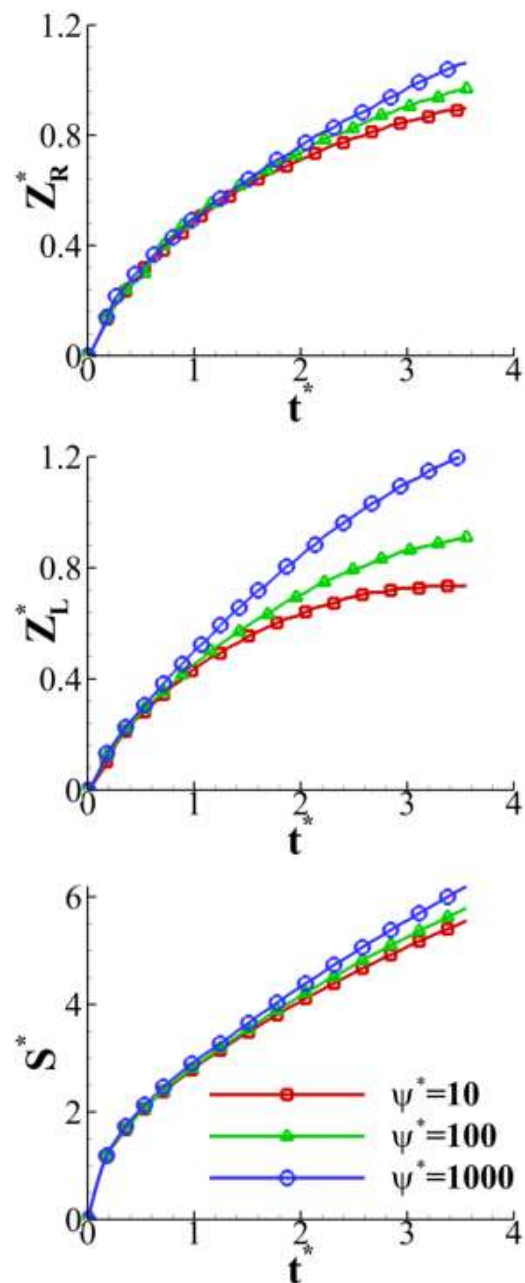
شکل ۳-۵۶: توزیع تنش در تاج در لحظه $t^* = 3/55$ برای $Wi = 1000$ ، $\beta = 0/1$ ، $\theta = 30^\circ$ و $H = 0/2$ (الف) $We = 200$ ، $We = 400$ (ب) و $We = 800$ (ج)

تأثیر عدد وبر بر زاویه دیواره‌های تاج در شکل ۳-۵۷ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل در هر عدد وبر زاویه دیواره راست کوچکتر از زاویه دیواره چپ است. همچنین این شکل بیانگر آن است که با افزایش عدد وبر زاویه دیواره‌ها نسبت به افق افزایش می‌یابد و حساسیت دیواره چپ نسبت به تغییر عدد وبر بیشتر از دیواره راست است. همانطور که در قبل ذکر شد، تغییرات زاویه تاج با زمان به صورت یک رابطه توانی است.



شکل ۳-۵۷: تاثیر عدد وبر بر زاویه دیواره‌های تاج $\theta = 30^\circ$, $H = 0.2$, $\alpha = 0$, $Wi = 1000$, $\beta = 0.1$ و $Bo = 1/6$

تاثیر ثابت اختلاف تنش نرمال اول (Ψ_1) بر برخورد قطره بر لایه سیال نیز مورد مطالعه قرار داده شده است. با توجه به شکل ۳-۵۸ با افزایش ثابت اختلاف تنش نرمال اول ابعاد تاج گسترش یافته و در نتیجه پخش سیال در اثر برخورد افزایش می‌یابد. برخلاف سیالات نیوتنی، در سیالات ویسکوالاستیک اختلاف تنش نرمال اول مخالف صفر است و علت بروز رفتارهای متضاد و بعضاً پیچیده در سیالات ویسکوالاستیک در اختلاف تنش‌های نرمال نهفته است. همچنین قابل ذکر است که با افزایش اختلاف تنش نرمال اول خواص الاستیک سیال افزوده شده و شاهد کاهش اتلافات ویسکوز در لایه سیال هستیم و در نتیجه این لایه شبیه به یک ذخیره کننده انرژی، انرژی جنبشی ناشی از برخورد را صرف رشد تاج‌ها می‌کند. از سویی دیگر، با توجه به شکل ۳-۵۸، تاثیر تغییرات اختلاف تنش نرمال اول بر ارتفاع تاج (Z^*) بیشتر از طول پخش (S^*) است. با توجه به اختلاف تنش‌های نرمال اول ($\sigma_x - \sigma_y$)، با افزایش این پارامتر تنش‌ها در راستای محور X نسبت محور Y بیشتر شده و رشد تاج در راستای Xها نسبت راستای Yها کندتر صورت می‌گیرد.

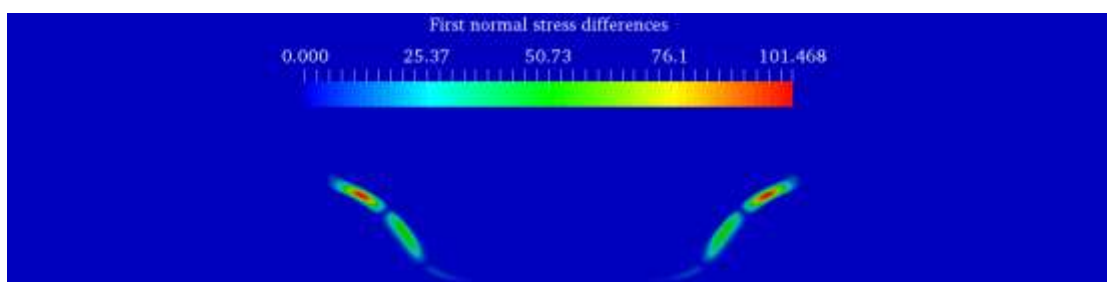


شکل ۳-۵۸: تغییرات زمانی متغیرهای تاج با ثابت اختلاف تنش نرمال اول به ازای $H = 0.2$ ، $We = 400$ و $\theta = 30^\circ$

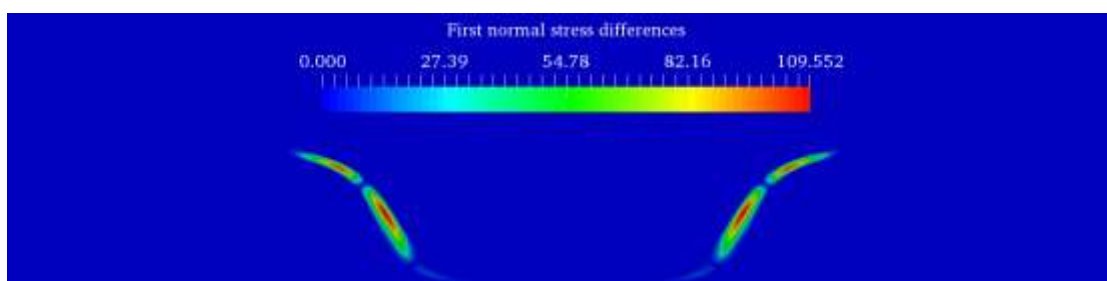
در سیالات ویسکوالاستیک نسبت نیروی الاستیک به نیروی اینرسی توسط عدد بدون بعد الاستیسیته بیان می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$El = \frac{Wi}{Re} = \frac{\eta_0 \lambda}{\rho D^2} \quad (3-7)$$

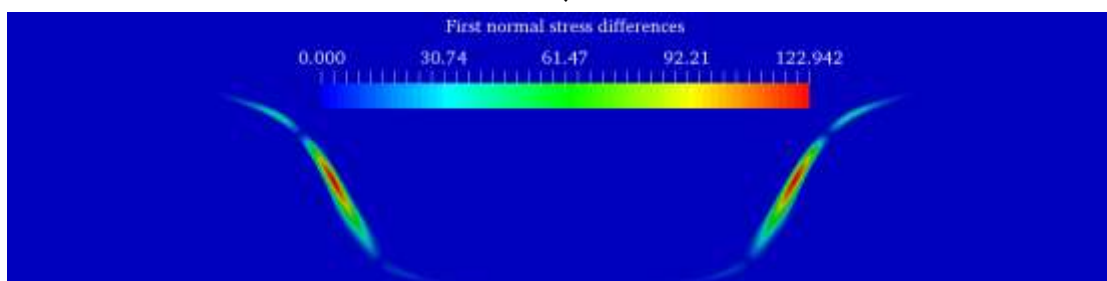
با توجه به این رابطه، در یک عدد الاستیسیته ثابت ($El = 6/66$) با افزایش عدد رینولدز اثرات نیروهای الاستیک نیز باید بیشتر می‌شود. در شکل ۳-۵۹ نیز می‌توان به وضوح این مورد را مشاهده کرد که با افزایش عدد رینولدز اندازه اختلاف تنش‌های نرمال اول ($\sigma_x - \sigma_y$) افزایش می‌یابد. اختلاف تنش نرمال اول رابطه مستقیم با خواص الاستیک سیال دارد.



(الف)



(ب)



(ج)

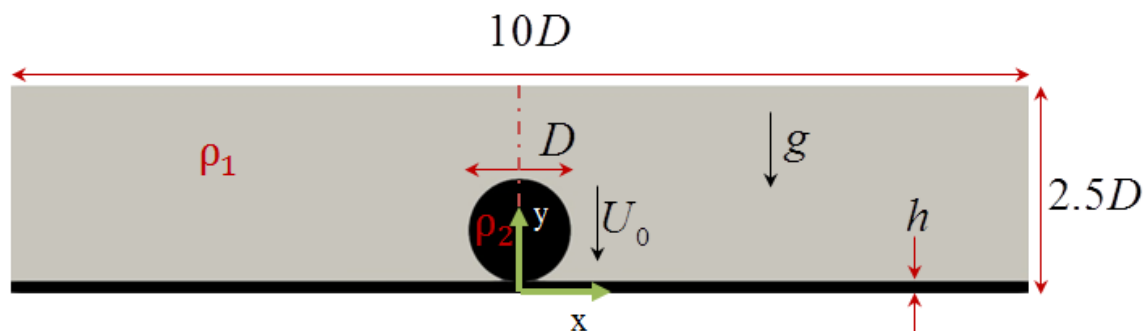
شکل ۳-۵۹: توزیع اندازه اختلاف تنش نرمال اول برای $\beta = 0.1$ ، $\theta = 0$ و $H = 0.2$ ، $We = 400$ (الف) $Re = 100$ ،
(ب) $Re = 150$ و (ج) $Re = 200$

در این بخش، مطالعه عددی برخورد قائم و مایل قطره بر دیواره سیال به صورت دو - بعدی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت و نتایج به ازای پارامترهای مختلف ارائه گردید. نتایج نشان دهنده افزایش رشد ابعاد تاج با افزایش خواص الاستیک (عدد وایزنبرگ) سیال است. از پارامترهای مربوط به مدل ساختاری می‌توان به نسبت ویسکوزیته (β) و ضریب تحرک (α) اشاره کرد که تاثیر این پارامترها بر دینامیک مسئله مورد بررسی قرار گرفت. در هر لحظه با افزایش نسبت ویسکوزیته سیال (β) ارتفاع تاج افزایش می‌یابد در حالی که این متغیر بر تغییرات شعاعی تاج بی تاثیر است. همچنین نتایج به ازای تغییرات ضریب تحرک نشان دهنده تاثیر مثبت این متغیر بر ابعاد تاج دارد. نتایج به ازای زوایای مختلف برخورد حاکی از آن است که افزایش زاویه برخورد بر میزان رشد ارتفاع تاج اثر بیشتری دارد. در زمان‌های مختلف نتایج نشان از کاهش طول پخش تاج و افزایش ارتفاع دیواره‌های تاج با ضخیم‌تر شدن لایه سیال را دارد. قابل ذکر است که اثر اختلاف تنش نرمال اول بر روی این مسئله همانند عدد وایزنبرگ است. علاوه بر موارد فوق، نتایج مطالعه حاضر نشان از تاثیر شگرف عدد وبر بر دینامیک تشکیل و رشد تاج دارد؛ به صورتی که با کاهش عدد وبر، کشش سطحی بین دو سیال افزایش و سبب کنترل رشد تاج می‌گردد و از طرف مقابل عدد بوند گرانشی تاثیر ناچیزی بر دینامیک تشکیل و رشد تاج دارد.

۳-۲-۴- مطالعه عددی دینامیک برخورد در حالت تقارن محوری

در این بخش مطالعه عددی برخورد قائم قطره بر لایه سیال در سیالات ویسکوالاستیک صورت تقارن محوری (Axisymmetric) صورت خواهد گرفت. تحلیل این مسئله به صورت تقارن محوری منطبق بر واقعیت بوده و از نظر کمی نتایج حاصل شده در زمان‌های میانی و پایانی برخورد قطره دقیق‌تر خواهد بود. در این مدل‌سازی نیز با کمک روش حجم محدود (FVM) و روش حجم سیال (VOF) معادلات حاکم حل می‌شوند و از مدل اولدروید-بی (Oldroyd-B) به عنوان معادله ساختاری برای فاز سیال ویسکوالاستیک استفاده شده است و سیال پیرامونی هوا به صورت نیوتنی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه اثرات متغیرهای مهمی همچون عدد وایزنبرگ، عدد رینولدز، نسبت ویسکوزیته، ضخامت لایه سیال، زاویه برخورد و عدد وبر بر روی ایجاد، رشد و توسعه تاج بررسی می‌شود. در این مطالعه نیز طرحواره برخورد قطره بر لایه سیال مطابق شکل ۳-۶۰ است. در این تحلیل با توجه به خط تقارن محوری موجود در شکل، تنها نیمی از دامنه حل موجود در شکل زیر حل خواهد شد و همچنین متغیرهای هندسی تاج همانند مسئله دو-بعدی خواهد بود با این تفاوت که با توجه به تقارن مسئله متغیرهای موجود در شکل ۳-۲۸ برای تاج چپ و راست یکسان خواهد بود.

در کلیه تحلیل‌های صورت گرفته قطر قطره برابر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته و قطره تحت نیروهای اینرسی و ثقلی به لایه ساکن سیال برخورد می‌کند. در تحلیل عددی حاضر عدد رینولدز ($Re = 150, 175, 200$)، عدد

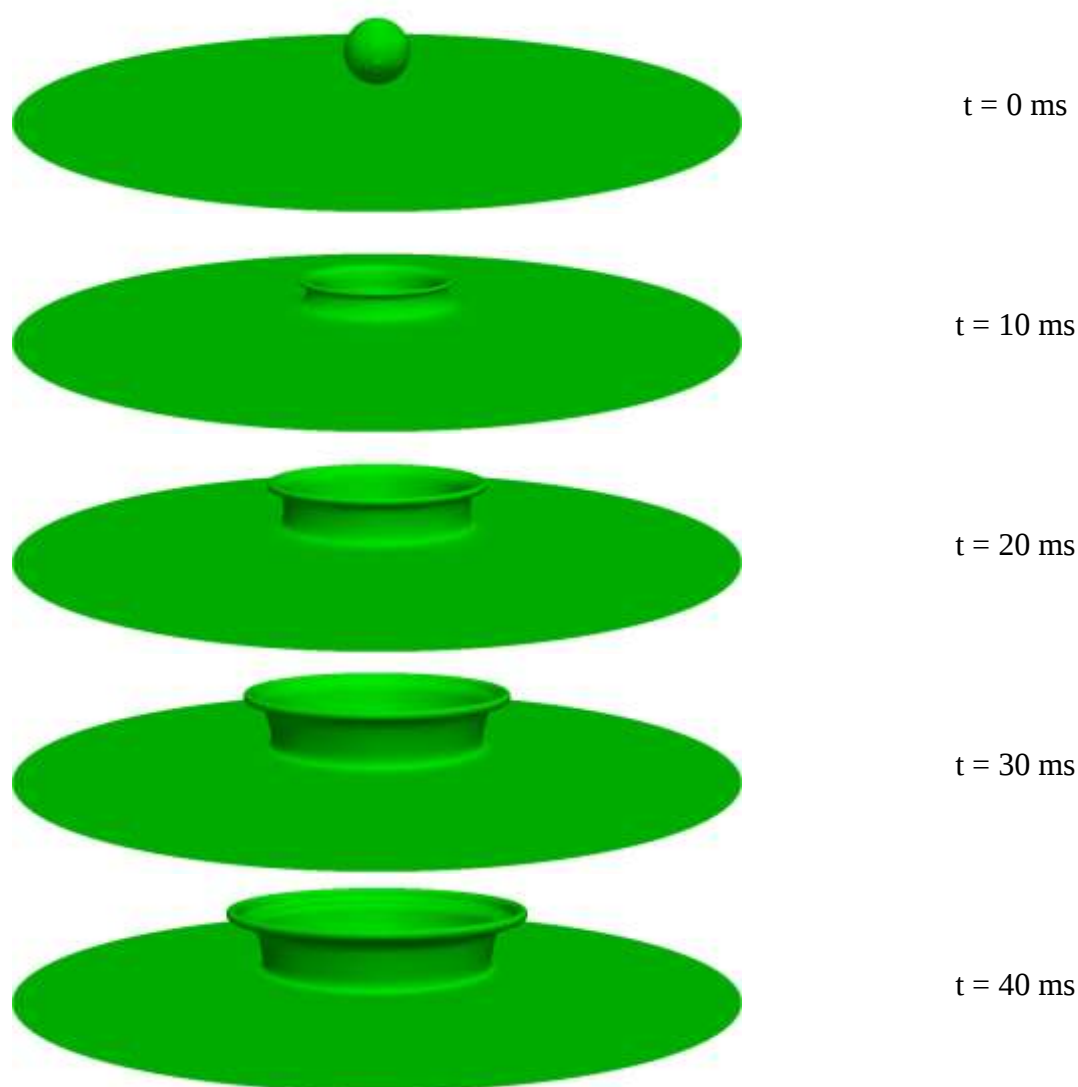


شکل ۳-۶۰: طرحواره برخورد قطره بر لایه سیال در حالت تقارن محوری

وايزنبرگ ($Wi = 1, 10, 100$)، عدد وبر ($We = 200, 400, 800$)، ضخامت بدون بعد لایه سیال ($0/25, 0/3$)،

و نسبت ویسکوزیته ($H = 0/2$) به عنوان متغیرهای مسئله در نظر گرفته شده است.

در شکل ۳-۶۱ توالی برخورد قطره بر لایه سیال در زمان‌های مختلف را در حالت سه بعدی نمایش می‌دهد. در لحظه تماس قطره بر لایه سیال زمان صفر در نظر گرفته شده است و با گذشت زمان قطره تحت سرعت اولیه و نیروی گرانش به لایه سیال برخورد می‌کند.

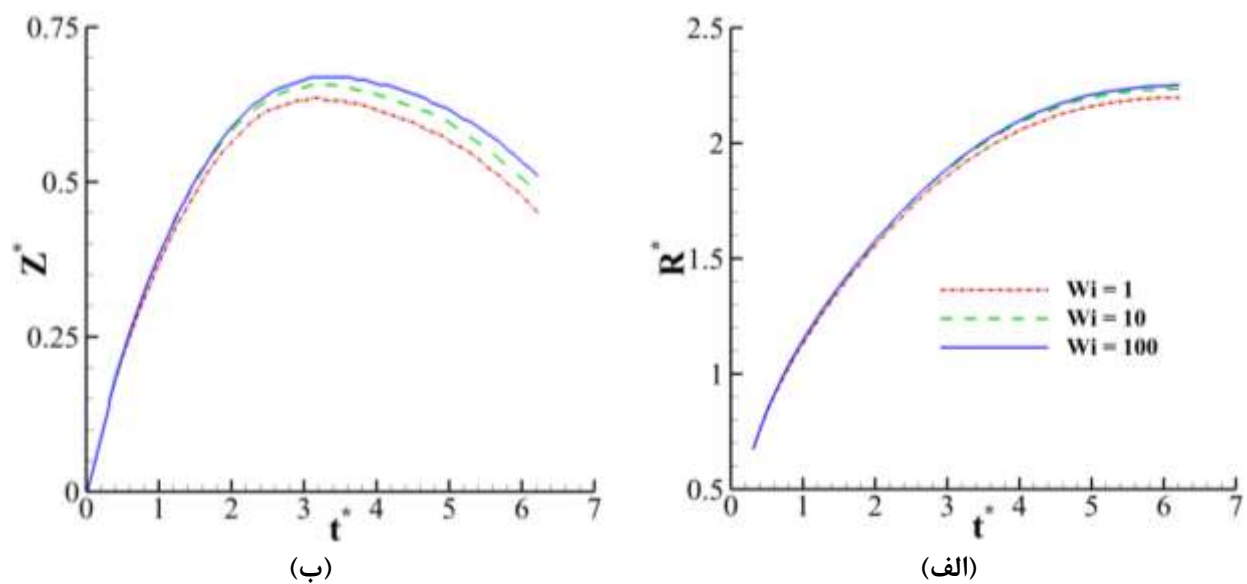


شکل ۳-۶۱ تغییرات شکل تاج در لحظات مختلف در مدلسازی تقارن محوری

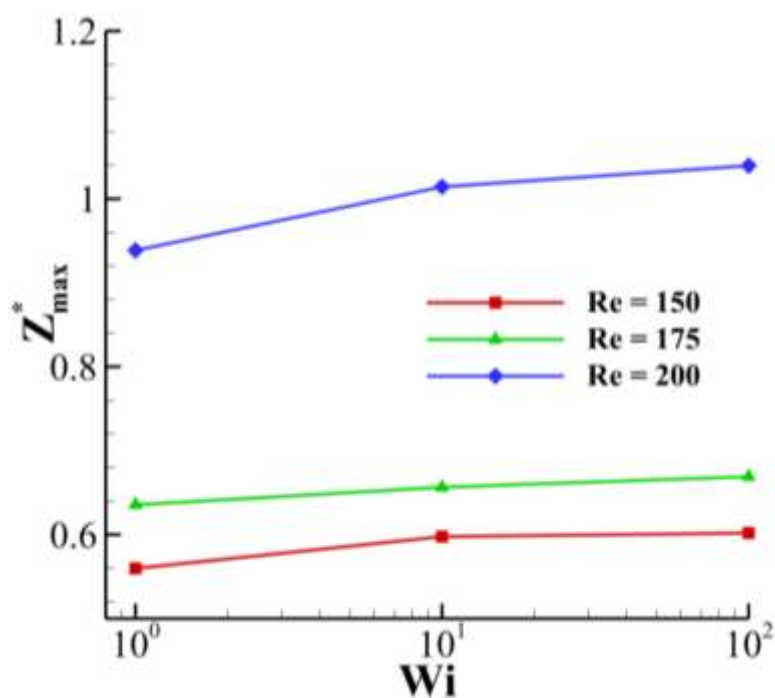
تأثیر عدد وایزنبرگ بر دینامیک برخورد و رشد تاج در شکل ۳-۶۲ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل تغییرات متغیرهای تاج به گونه‌ای است که در هر لحظه با افزایش عدد وایزنبرگ ابعاد تاج بزرگتر می‌شود. این روند در مدلسازی مسئله در حالت دو- بعدی نیز قابل مشاهده بود. با توجه به روند تغییرات متغیر شعاع بدون بعد (R^*)، تأثیر الاستیسیته سیال بر شعاع تاج ناچیز است و همچنین با افزایش عدد وایزنبرگ حساسیت شعاع تاج به این متغیر کمتر می‌شود. در شکل ۳-۶۲ (ب) شاهد هستیم که با افزایش عدد وایزنبرگ بیشینه ارتفاع تاج افزایش می‌یابد. همانطور که در مدلسازی دو- بعدی صفحه‌ای نیز شاهد بودیم، در واقع با افزایش عدد وایزنبرگ میزان جذب انرژی توسط لایه سیال بیشتر شده و از طرف مقابل میزان اتلافات ویسکوز در هنگام برخورد کاسته می‌شود و پایستار بودن انرژی جنبشی قطره سبب کمک به افزایش ابعاد تاج می‌گردد. در نتیجه شاهد افزایش رشد تاج با افزایش عدد وایزنبرگ هستیم.

در شکل ۳-۶۳ بیشینه ارتفاع تاج به ازای اعداد وایزنبرگ و رینولدز مختلف را شاهد هستیم. همانطور که ذکر شد با افزایش خواص الاستیک سیال ابعاد تاج رشد پیدا می‌کند که در این شکل نیز شاهد هستیم که با افزایش عدد وایزنبرگ بیشینه ارتفاع تاج بزرگتر می‌شود. همچنین در این شکل قابل مشاهده است که با افزایش عدد رینولدز نیز بیشینه ارتفاع تاج نیز افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز انرژی جنبشی قطره افزایش یافته که با برخورد آن به لایه سیال سبب پخش بیشتر سیال می‌گردد.

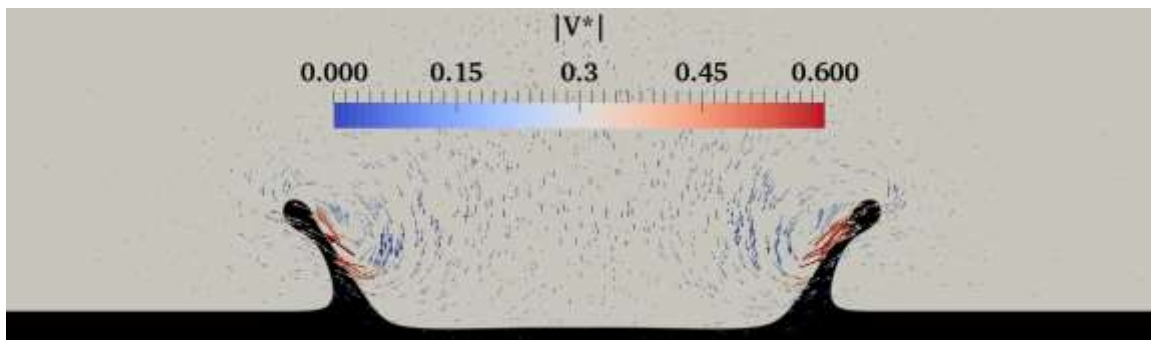
در شکل ۳-۶۴ شکل هندسه تاج و توزیع سرعت در دامنه حل در لحظه $t^* = 2/8$ را نمایش داده شده است. با توجه به این شکل با افزایش عدد وایزنبرگ دیواره تاج نازک‌تر شده و میزان کشیدگی آن و در نهایت میزان ارتفاع آن افزایش می‌یابد. همچنین در این شکل مشهود است که در نواحی گلویی تاج گردابه‌هایی تشکیل می‌شود و بیشینه سرعت سیال در نزدیکی دیواره مربوط به سیال محیط است.



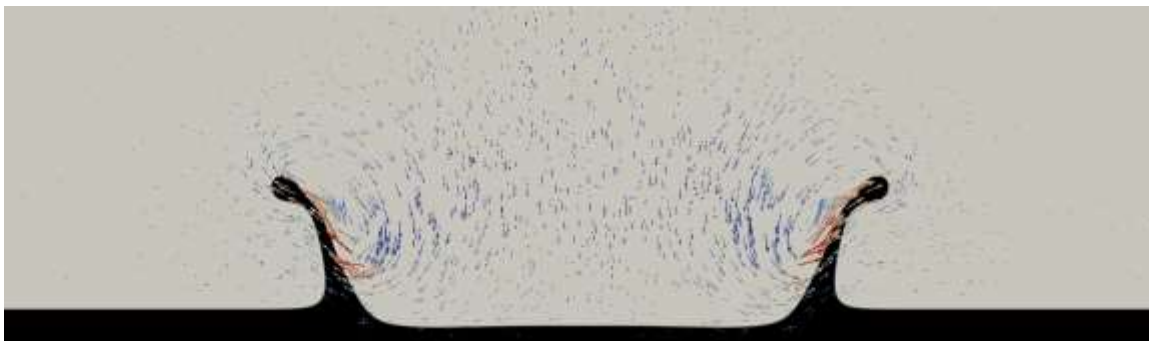
شکل ۳-۶: تغییرات زمانی (الف) شعاع تاج (R^*)، (ب) ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف، $We = 400$ و $Bo = 1/6$ ، $\beta = 0.1$ ، $H = 0.2$ ، $Re = 175$



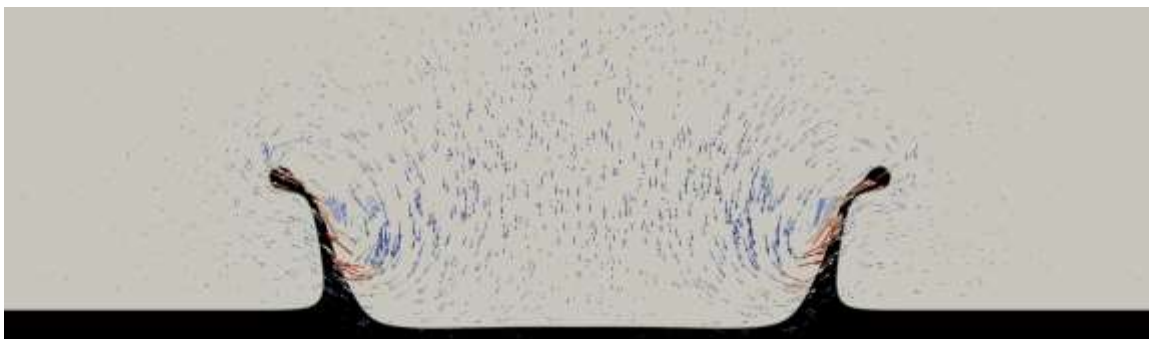
شکل ۳-۶: تغییرات بیشینه ارتفاع تاج با عدد وایزنبرگ $We = 400$ و $Bo = 1/6$ ، $\beta = 0.1$ ، $H = 0.2$ ، $Re = 175$



(الف)



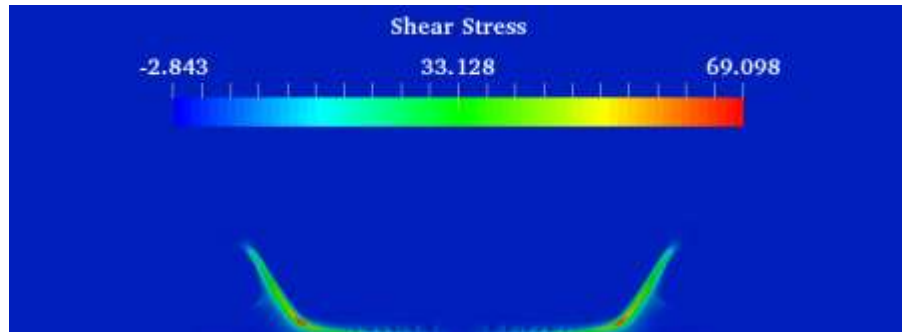
(ب)



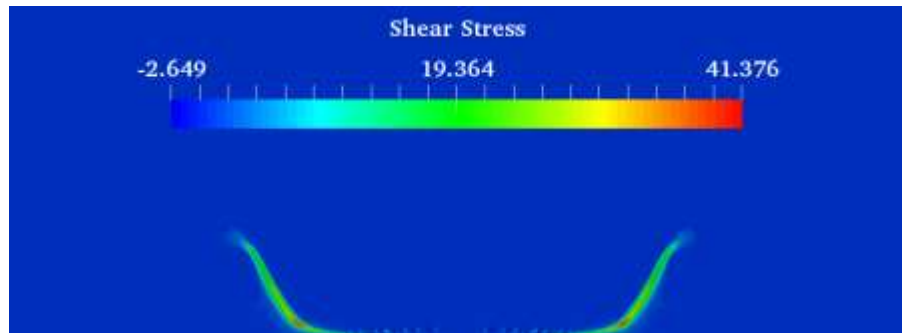
(ج)

شکل ۳-۶۴: شکل تاج در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 2/8$ برای $Re = 175$ ، $H = 0.2$ ، $\beta = 0.3$ ، $Bo = 1/6$ و $We = 400$ ، (الف) $Wi = 1$ ، (ب) $Wi = 10$ و (ج) $Wi = 100$.

در شکل ۳-۶۵ تاثیر عدد وایزنبرگ بر تنش برشی در لحظه $t^* = 2/8$ قابل مشاهده است. با توجه به این شکل با افزایش عدد وایزنبرگ محدوده تغییرات تنش برشی کاهش می‌یابد. با افزایش عدد وایزنبرگ میزان اتلافات ویسکوز ناشی از تنش‌های برشی کاسته و ذخیره‌سازی انرژی جنبشی برخورد در لایه سیال به علت خواص الاستیک این لایه بیشتر می‌شود که به همین جهت با افزایش عدد وایزنبرگ گسترش ابعاد تاج سبب می‌شود.



(الف)



(ب)

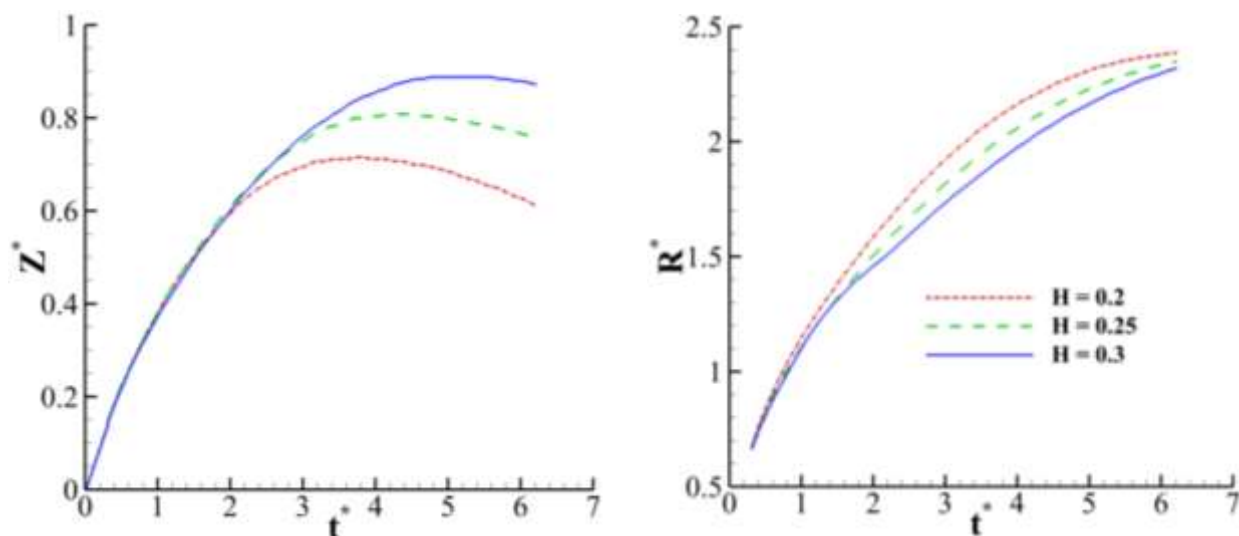


(ج)

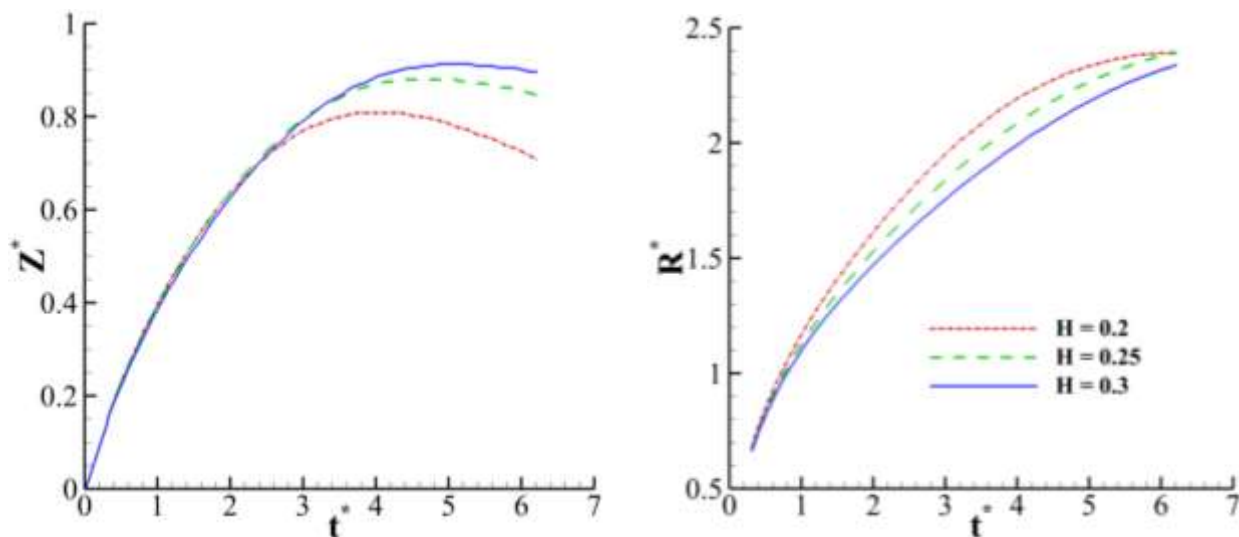
شکل ۳-۶۵: توزیع تنش برشی در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 2/8$ برای $Re = 175$ ، $H = 0.2$ ، $\beta = 0.1$ ، $\gamma = 1/6$ و Bo و $We = 400$ ، (الف) $Wi = 1$ ، (ب) $Wi = 10$ و (ج) $Wi = 100$

با توجه به شکل ۳-۶۵، بیشینه تنش برشی در پایه تاج قرار می گیرد. به هنگام تشکیل جت سیال خروجی از لایه سیال، اختلاف سرعت موجود بین جت خروجی و لایه سیال ساکن سبب افزایش تنش برشی در این ناحیه می شود و این مقدار بیشینه با افزایش عدد وایزنبرگ کوچکتر خواهد شد.

در حالت مدلسازی تقارن محوری، تاثیر ضخامت لایه سیال بر دینامیک تاج در شکل ۳-۶۶ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل در اعداد وایزنبرگ مختلف تاثیر ضخامت لایه سیال بر شعاع تاج ناچیز است. از طرف مقابل تغییرات ارتفاع تاج با ضخامت لایه سیال قابل ملاحظه است. همانند حالت دو بعدی، در مدلسازی تقارن



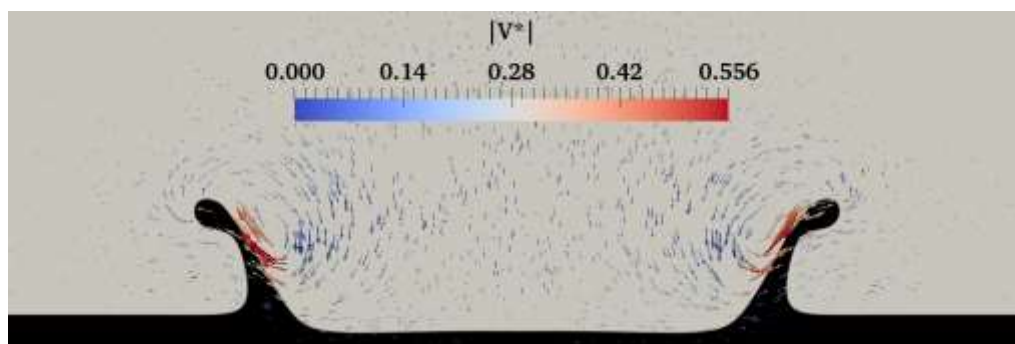
(الف)



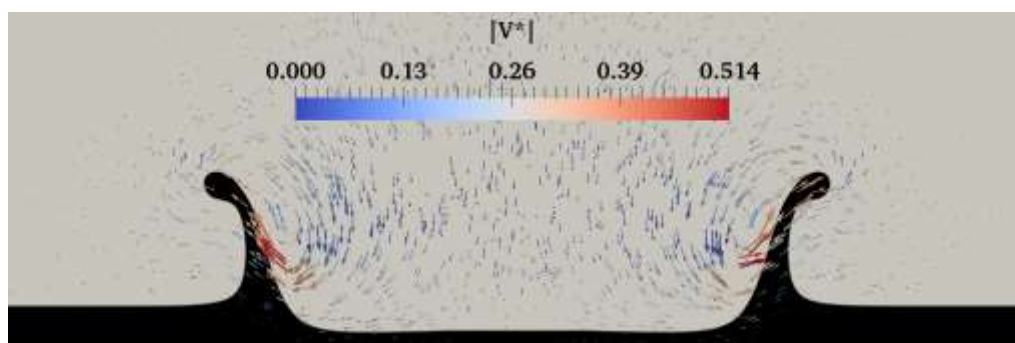
(ب)

شکل ۳-۶۶: تغییرات زمانی شعاع (R^*) و ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای ضخامت‌های مختلف لایه سیال، $Re = 175$ ، $\beta = 1/6$ و $Bo = 544$ و $We = 1$ (الف)، $Wi = 100$ (ب).

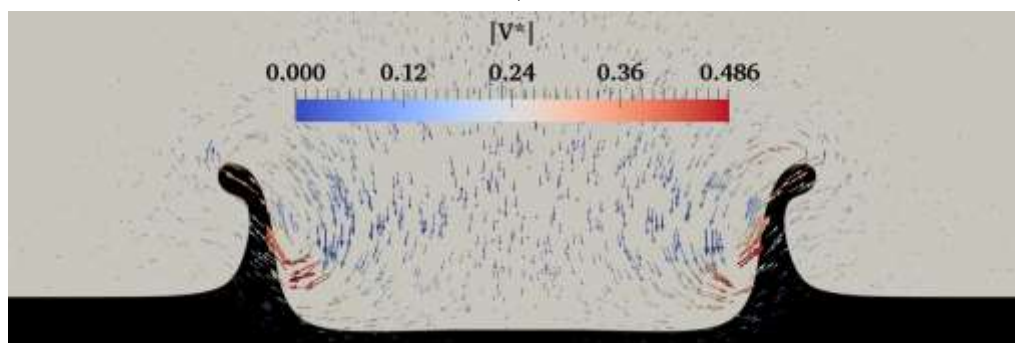
محوری نیز با افزایش ضخامت لایه سیال ارتفاع تاج افزوده می‌شود. در واقع با افزایش ضخامت H ، لایه سیال توانایی ذخیره انرژی بیشتری پیدا کرده که در مرحله پخش این مقدار انرژی بیشتر صرف گسترش بیشتر ارتفاع تاج می‌گردد. در شکل ۳-۶۷ شکل تاج و توزیع سرعت در میدان حل آورده شده است. با توجه به این شکل با افزایش ضخامت لایه سیال زاویه دیواره تاج بزرگتر شده و همچنین بیشینه سرعت در میدان حل کاهش می‌یابد.



(الف)



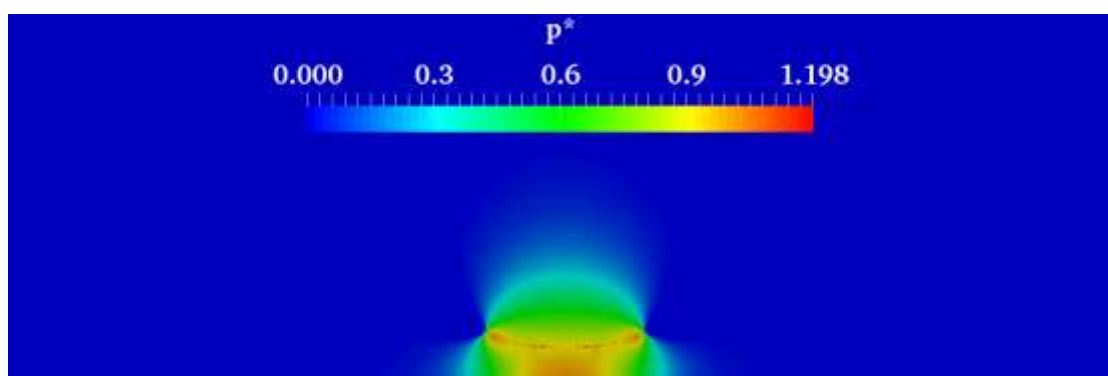
(ب)



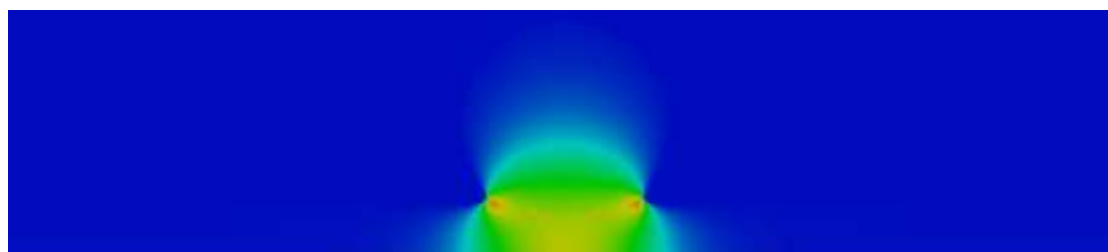
(ج)

شکل ۳-۶۷: شکل تاج و توزیع سرعت در ضخامت‌های مختلف لایه سیال در $t^* = 2/8$ برای $Re = 175$ ، $Wi = 100$ ، $Bo = 1/6$ ، $\beta = 0/3$ و $We = 544$ ، $H = 0/2$ (الف)، $H = 0/25$ (ب) و $H = 0/3$ (ج)

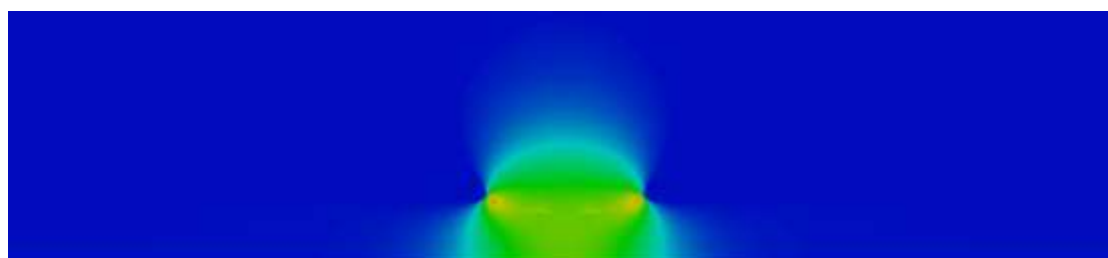
در شکل ۳-۶۸ توزیع فشار بدون بعد در محل برخورد را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل با افزایش ضخامت لایه سیال فشار در لایه سیال و در زیر محل برخورد کاهش می‌یابد. همچنین در این شکل قابل مشاهده است که در حداصل محل برخورد قطره و لایه سیال حباب‌های هوای به دام افتاده فشار زیادی پیدا می‌کنند. در نواحی خروج جت تشکیل دهنده تاج، فشار بیشینه مقدار خود را دارد. این مقدار بیشینه با افزایش ضخامت لایه سیال کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش ضخامت لایه سیال نفوذ قطره به لایه سیال دشوارتر شده و در نهایت فشار ایجاد شده در محل برخورد کمتر می‌شود.



(الف)



(ب)



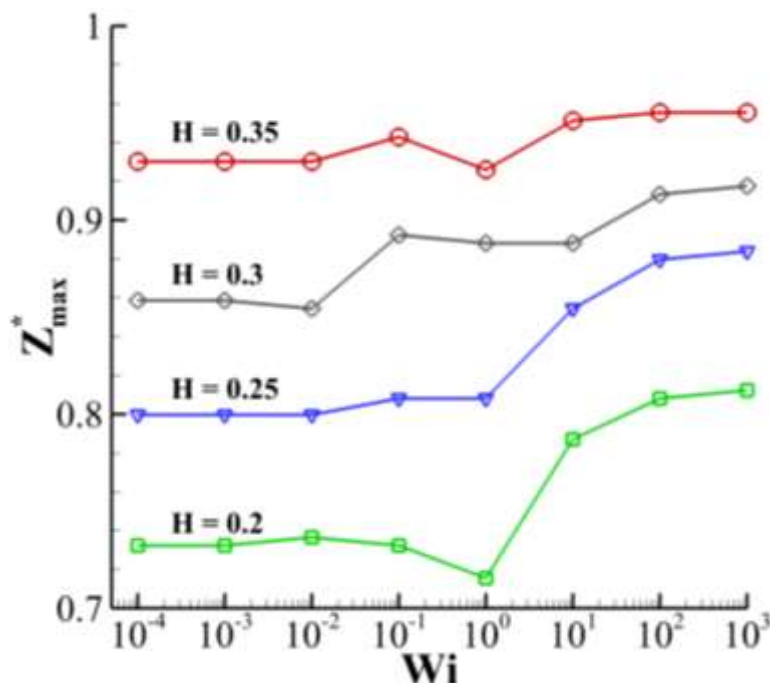
(ج)

شکل ۳-۶۸: توزیع فشار در ضخامت‌های مختلف لایه سیال در $t^* = 0.1$ برای $Re = 175$ ، $Wi = 100$ ، $\beta = 0.3$ ، $\theta = 1/6$

$Bo = 400$ و $We = 0.2$ (الف)، $H = 0.25$ (ب) و $H = 0.3$ (ج)

در مطالعه حاضر، تاثیر توامان ضخامت لایه سیال و عدد وایزنبرگ بر بیشینه ارتفاع تاج بسیار مهم ارزیابی می‌شود که در شکل ۳-۶۹ تغییرات آن ارائه گردیده است. با توجه به این شکل، در کلیه اعداد وایزنبرگ با افزایش ضخامت لایه سیال بیشینه ارتفاع تاج افزایش می‌یابد. روند کلی تغییر بیشینه ارتفاع با افزایش عدد وایزنبرگ از 10^{-4} (سیال نیوتنی) تا محدوده‌های بزرگی از اعداد وایزنبرگ (10^3)، افزایشی است و با افزایش ضخامت لایه سیال تاثیر الاستیسیته سیال بر هندسه تاج کمتر می‌گردد. از طرفی در ضخامت‌های کوچک لایه سیال ($H = 0.2$) در ابتدا روند نزولی و سپس یک روند صعودی در بیشینه ارتفاع تاج وجود دارد. به عبارت دیگر در محدوده $Wi = 1$ رفتار تغییرات ارتفاع تاج پیچیده می‌شود. در جریان‌های ویسکوالاستیک شکل بدون بعد ویسکوزیته کشسان (نسبت تروتون^۱) به صورت زیر تعریف می‌شود.

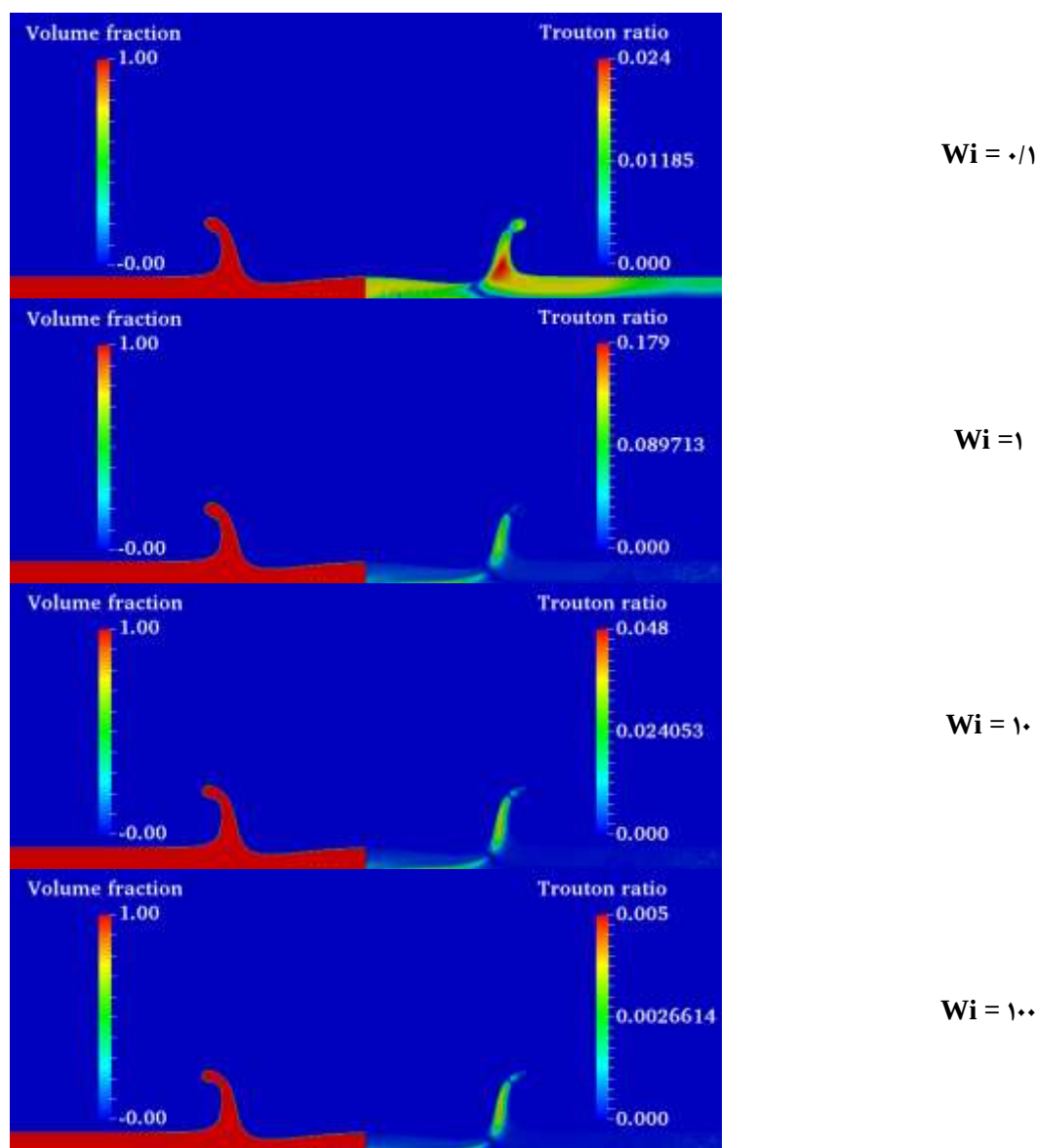
$$\frac{\bar{\eta}}{\eta_0} = \frac{\tau_{xx} - \tau_{yy}}{\eta_0 \dot{\epsilon}} \quad (۸-۳)$$



شکل ۳-۶۹: تغییرات بیشینه ارتفاع تاج با عدد وایزنبرگ و ضخامت لایه سیال $Re = 175$, $\beta = 0.1$, $Bo = 1/6$ و 544
 $We =$

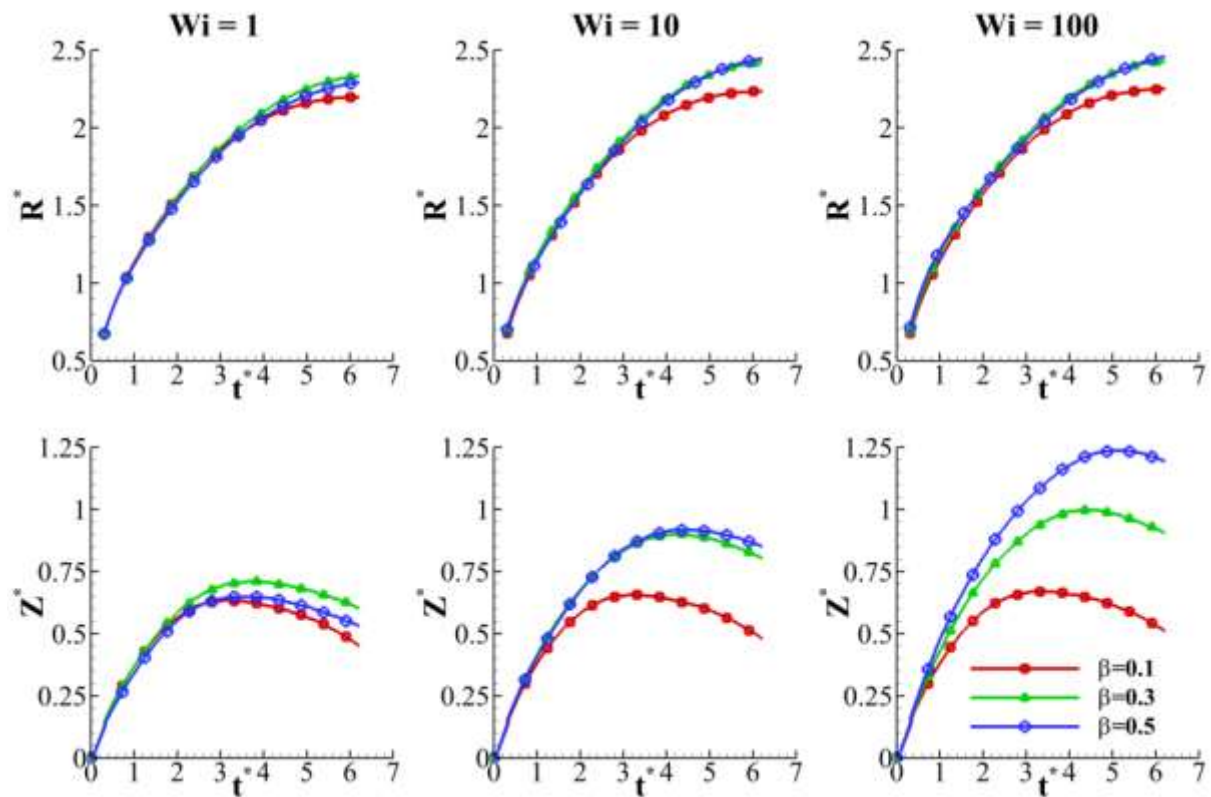
¹ Trouton ratio

مطابق شکل ۳-۷۰، مقدار بیشینه نسبت تروتون در دیواره تاج قرار دارد. در $Wi \approx 1$ ویسکوزیته کشسان مقدار بیشینه خود را نسبت به دیگر اعداد وایزنبرگ دارد. به همین علت در اعداد وایزنبرگ میانی ($Wi \approx 0.1 \dots 1$) نیروهای کشسان از رشد ارتفاع تاج جلوگیری می‌کند. از طرف مقابل با افزایش عدد وایزنبرگ تا ۱۰۰۰، لایه سیال توانایی حفظ و پایداری قسمت بیشتری از انرژی برخورد را دارد. انرژی الاستیک بازیابی شده توسط لایه سیال سبب رشد ارتفاع بیشینه تاج می‌گردد.

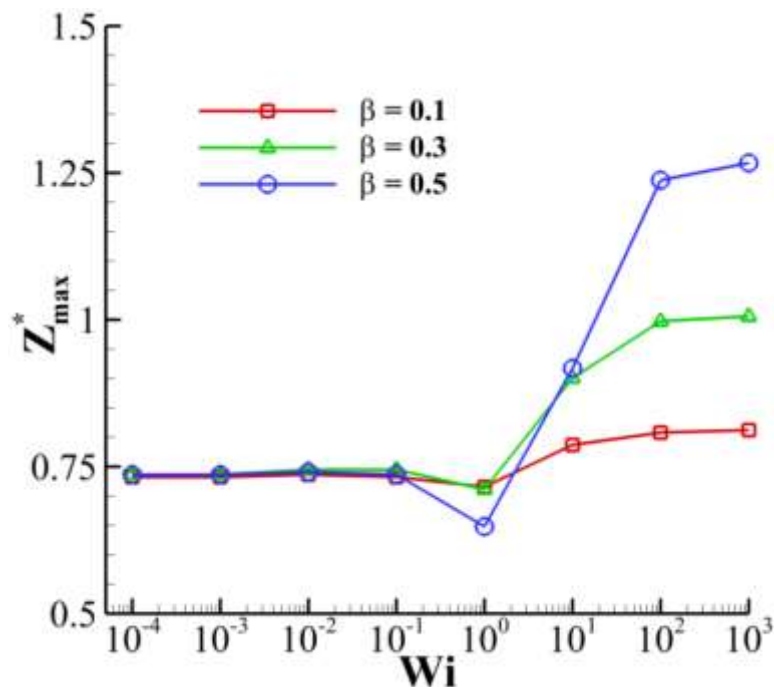


شکل ۳-۷۰: توزیع کسر حجمی سیال و نسبت تروتون در اعداد وایزنبرگ مختلف در $t^* = 1/6$ به ازای $Re = 175$.
 $We = 400$ و $Bo = 1/6$, $\beta = 0.1$

در مطالعه برخورد قطره بر لایه سیال در حضور سیالات ویسکوالاستیک، بررسی تاثیر نسبت ویسکوزیته سیال بر دینامیک تاج بسیار مهم ارزیابی می‌شود. در شکل ۳-۷۱ تغییرات هندسه تاج با نسبت ویسکوزیته به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف آورده شده است. با توجه به این شکل در اعداد وایزنبرگ بزرگ تاثیر نسبت ویسکوزیته قابل توجه است. با توجه به اینکه نسبت ویسکوزیته متغیری است که در سیالات ویسکوالاستیک تعریف می‌شود، به همین جهت اثرگذاری این متغیر بر مسئله در اعداد وایزنبرگ بزرگ بیشتر است. با کاهش عدد وایزنبرگ اختلاف نتایج کوچکتر شده و وابستگی هندسه تاج به تغییرات نسبت ویسکوزیته کمتر می‌شود. در اعداد وایزنبرگ بزرگ ($Wi = 10, 100$) با افزایش نسبت ویسکوزیته ابعاد هندسه تاج بزرگتر می‌شود. از طرف مقابل با کوچکتر شدن عدد وایزنبرگ تغییرات ابعاد تاج با نسبت ویسکوزیته کوچک می‌شود. به عبارت دیگر با کاهش خاصیت الاستیک سیال، نقش نسبت ویسکوزیته در مسئله کوچک می‌شود و به صورتی که در $Wi = 0.1$ منحنی‌ها بر روی هم قرار می‌گیرند. برای $Wi = 1$ شاهد هستیم که با افزایش نسبت ویسکوزیته از 0.3 تا 0.5 ابعاد تاج کوچکتر می‌شود که برخلاف رویه مربوط به اعداد وایزنبرگ بزرگتر است. در اعداد وایزنبرگ کوچک خاصیت الاستیک در لایه سیال نسبت به دیواره‌های تاج کوچکتر است. به عبارت دیگر در این عدد وایزنبرگ جذب انرژی توسط لایه سیال کوچکتر شده و از طرفی خاصیت کشسان موجود در دیواره تاج افزایش می‌یابد. به همین جهت شاهد هستیم که ابعاد تاج در بازه ذکر شده برای نسبت ویسکوزیته کوچک می‌شود. در شکل ۳-۷۲ تغییرات ارتفاع بیشینه تاج با عدد وایزنبرگ به ازای نسبت ویسکوزیته‌های مختلف را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل تاثیر نسبت ویسکوزیته در اعداد وایزنبرگ بزرگ بیشتر است. به عبارت دیگر در اعداد وایزنبرگ بزرگ ($Wi = 100$) روند تغییرات ارتفاع بیشینه تاج با نسبت ویسکوزیته صعودی است و در اعداد وایزنبرگ کوچکتر ($Wi < 10^{-1}$) تغییرات ارتفاع بیشینه تاج با نسبت ویسکوزیته ناچیز است. در روند افزایش عدد وایزنبرگ در نسبت ویسکوزیته‌های مختلف، در ابتدا خاصیت کشسانی سیال سبب مقاومت در برابر رشد تاج کرده و در ادامه با افزایش بیشتر خواص الاستیک سیال (در حوالی $Wi=1$) اتلافات ویسکوز در لایه سیال کوچکتر شده و قابلیت جذب انرژی توسط این لایه افزایش می‌یابد که سبب رشد بیشینه ارتفاع تاج می‌شود.



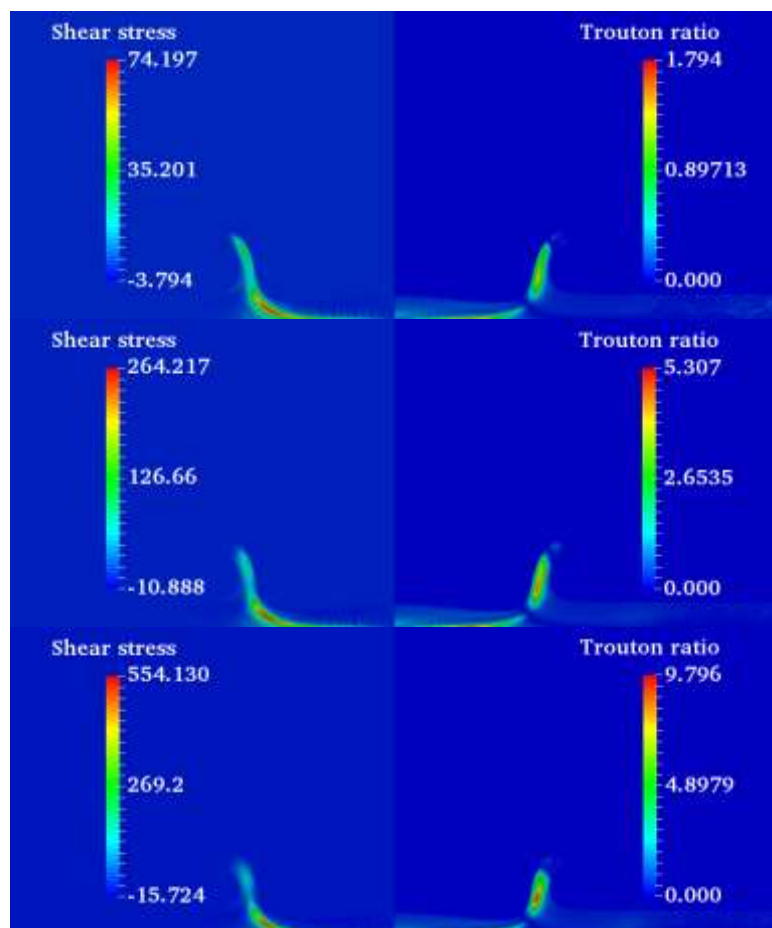
شکل ۳-۷۱: تغییرات زمانی شعاع (R^*) و ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای تغییرات نسبت ویسکوزیته، $Re = 175$ ، $\beta = 1/6$ ، Bo و $We = 400$



شکل ۳-۷۲: تغییرات بیشینه ارتفاع تاج با نسبت ویسکوزیته $Re = ۱۷۵$ ، $H = ۰/۲$ ، $Bo = ۱/۶$ و $We = ۴۰۰$

مطابق شکل ۳-۷۳ با افزایش نسبت ویسکوزیته، الاستیسیته سیال و نیروهای کشسان در دیواره تاج بزرگتر می-شوند که سبب کنترل رشد تاج می-گردد. از طرفی در محدوده اعداد وایزنبرگ $Wi \approx ۱$ به علت بزرگتر بودن تنش‌های برشی نسبت به اعداد وایزنبرگ بزرگتر، مقدار بیشتری از انرژی برخورد توسط لایه سیال مستهلک می-شود. بنابراین به وضوح قابل مشاهده است که در اعداد وایزنبرگ میانی ($Wi \approx ۱$)، با بزرگتر شدن نسبت ویسکوزیته گسترش ابعاد تاج با مقاومت روبرو می-شود.

در شکل ۳-۷۴ شکل تاج را در لحظه $t^* = ۲/۸$ شاهد هستیم. با توجه به این شکل با افزایش نسبت ویسکوزیته در عدد وایزنبرگ ۱۰۰ ارتفاع تاج افزوده می-شود و از طرف مقابل ضخامت دیواره تاج با افزایش نسبت ویسکوزیته نازکتر خواهد شد. لازم به ذکر است در حالت تقارن محوری قدرت نفوذ قطره به داخل لایه سیال به دلیل مقاومت محوری لایه سیال نسبت به حالت دوبعدی صفحه‌ای کوچکتر است و به همین جهت رشد شعاعی تاج نسبت به حالت دوبعدی صفحه‌ای کوچکتر است (مطابق شکل ۳-۳۹).

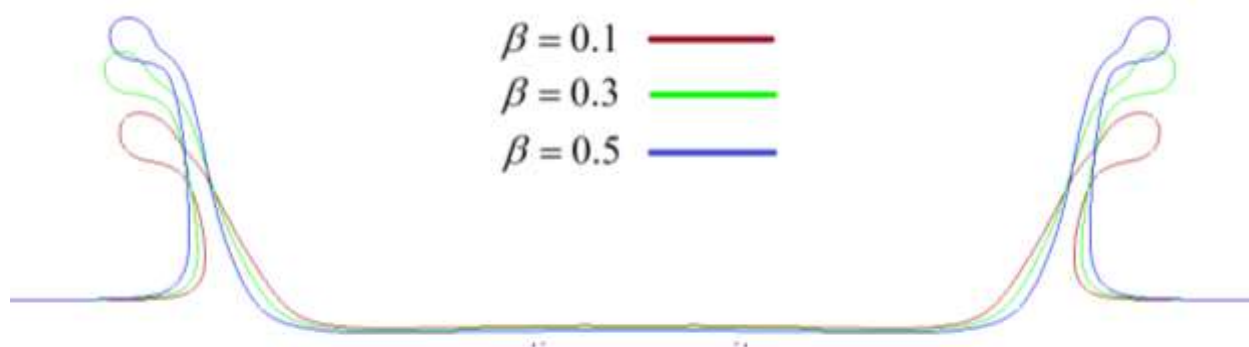


$$\beta = 0.1$$

$$\beta = 0.3$$

$$\beta = 0.5$$

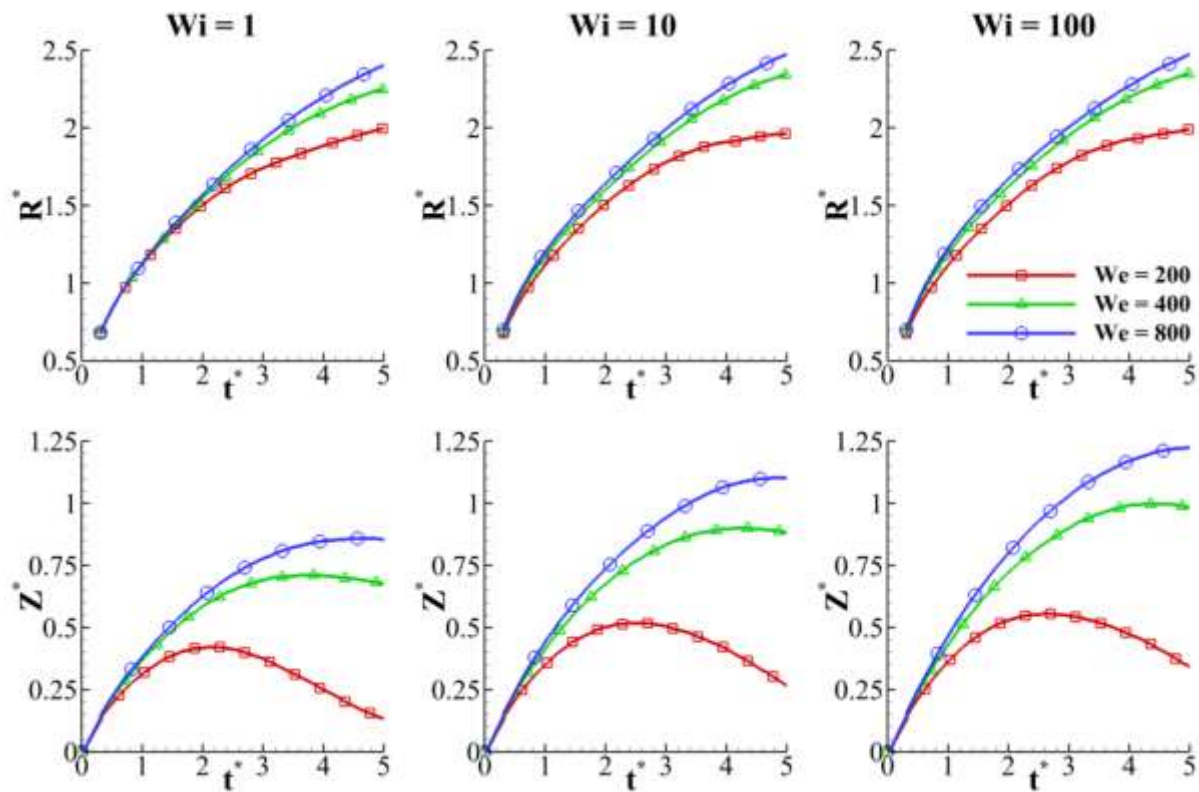
شکل ۳-۷۳: توزیع تنش برشی و نسبت تروتون در نسبت ویسکوزیته مختلف در $t^* = 1/6$ به ازای، $Wi = 1$ ، $H = 0.2$ و $We = 400$ و $Bo = 1/6$



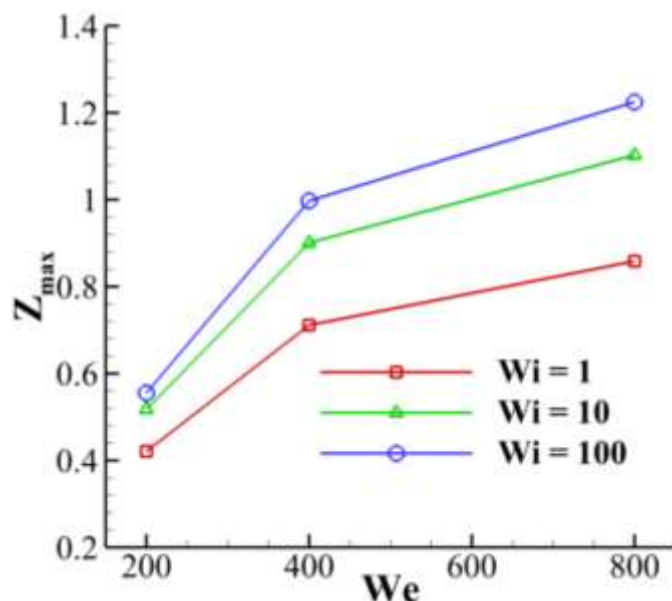
شکل ۳-۷۴: اثر نسبت ویسکوزیته (β) بر شکل تاج در لحظه $t^* = 2/8$ به ازای $Wi = 100$ ، $H = 0.2$ و $We = 400$

همانطور که در حالت دوبعدی صفحه‌ای ذکر شد، عدد وبر بر دینامیک برخورد اثر قابل ملاحظه‌ای دارد. به همین جهت اثر گذاری عدد وبر بر دینامیک رشد تاج در اعداد وایزنبرگ مختلف در شکل ۳-۷۵ در حالت مدلسازی تقارن محوری آورده شده است. با توجه به این شکل در زمان‌های مختلف، با افزایش عدد وبر اندازه‌های شعاع و ارتفاع تاج رشد پیدا می‌کند. با افزایش عدد وبر نیروهای کشش سطحی کاهش می‌یابد و به همین جهت رشد هندسه تاج تقویت می‌گردد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است تاثیر عدد وبر بر تغییرات ارتفاع تاج بیشتر از تاثیر آن بر شعاع تاج است. در لحظات اولیه برخورد دیواره تاج با زوایای بزرگ و نزدیک به ۹۰ درجه از حد فاصل لایه سیال و قطره تشکیل شده و به همین جهت رشد ارتفاع تاج در لحظات اولیه برخورد بزرگتر است. به همین جهت در این فاصله زمانی، تاثیر پذیری نیروهای کشش سطحی در راستای قائم بر ارتفاع تاج بیشتر بوده و در نهایت سبب تغییرات بیشتر در هندسه تاج در این راستا می‌شود. همچنین از شکل ۳-۷۵ قابل مشاهده است که با افزایش خواص الاستیک سیال (عدد وایزنبرگ) اثر کشش سطحی بر هندسه تاج کمتر خواهد شد. به طوری که در لحظه $t^* = 5$ برای اعداد وایزنبرگ ۱، ۱۰ و ۱۰۰ با افزایش عدد وبر از ۲۰۰ تا ۸۰۰ میزان افزایش ارتفاع تاج به ترتیب ۵۵۵٪، ۳۲۸٪ و ۲۷۳٪ می‌شود. با افزایش عدد وایزنبرگ میزان خاصیت کشسانی سیال افزایش می‌یابد به همین جهت در اعداد وایزنبرگ بزرگتر خاصیت کشسانی سیال از رشد دیواره تاج جلوگیری می‌کند و علی رغم افزایش عدد وبر میزان افزایش ارتفاع تاج با بزرگتر شدن عدد وایزنبرگ کمتر می‌شود.

در شکل ۳-۷۶ تغییرات ارتفاع بیشینه تاج با عدد وبر را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل در هر عدد وایزنبرگ با افزایش عدد وبر میزان بیشینه ارتفاع تاج افزایش می‌یابد. چنانچه که در شکل ۳-۷۴ قابل مشاهده است، ارتفاع بیشینه در اعداد وبر کوچکتر در زمان‌های کوچکتری رخ می‌دهد و برعکس با افزایش عدد وبر ارتفاع بیشینه در زمان‌های بزرگتری رخ می‌دهد.



شکل ۳-۷۵: تغییرات زمانی شعاع (R^*) و ارتفاع تاج (Z^*)، به ازای اعداد وبر مختلف، $Re = 175$ ، $Bo = 1/6$ و $\beta = 0/3$



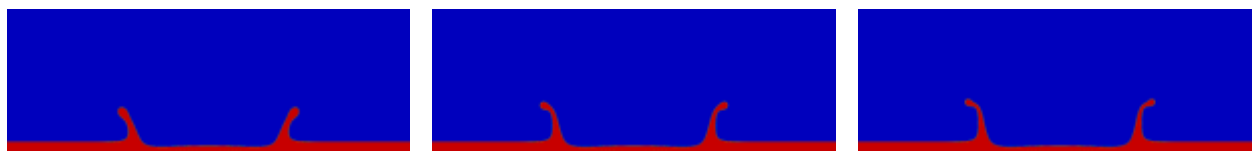
شکل ۳-۷۶: تغییرات بیشینه ارتفاع تاج با عدد وبر $We = 400$ و $Bo = 1/6$ ، $H = 0.2$ ، $Re = 175$

در شکل ۳-۷۷ شکل تاج را در لحظه $t^* = 2/8$ آورده شده است. با توجه به این شکل با افزایش عدد وبر رشد تاج گسترش یافته و در نتیجه آن ضخامت دیواره تاج کوچکتر می‌شود. در واقع با افزایش عدد وبر، کشش سطحی در تاج کاهش یافته و نیروهای مقاوم در مقابل رشد تاج کمتر می‌شود و به همین جهت است که با افزایش عدد وبر تنش‌های موجود در دیواره تاج کمتر شده و ابعاد تاج گسترش می‌یابد.

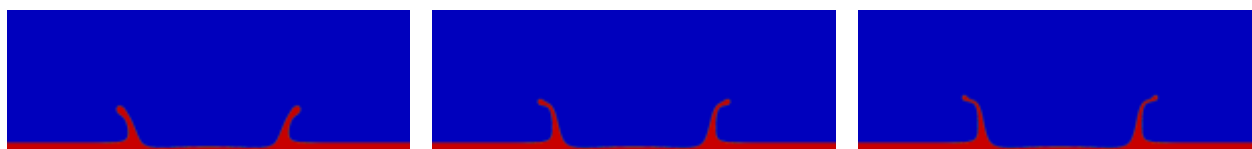
است، تمایز مدلسازی در این دو حالت در شکل ۳-۷۸ به ازای پارامترهای یکسان آورده شده است. با توجه به این شکل تمایز قابل توجه‌ای میان دو حالت مدلسازی وجود دارد و نتایج مدلسازی دوبعدی تقارن محوری به نتایج تجربی نزدیکتر است. در حالت مدلسازی دوبعدی صفحه‌ای، شکل قطره به صورت استوانه و در حالت تقارن محوری شکل قطره به صورت کروی است. با توجه به اینکه حجم قطره در حالت دوبعدی صفحه‌ای بیشتر از حالت دوبعدی تقارن محوری است، گسترش تاج و همچنین حجم سیال جدا شده از لایه سیال بیشتر است. در مطالعه حاضر با توجه به اینکه مدلسازی عددی در دو حالت دوبعدی صفحه‌ای و تقارن محوری صورت گرفته به همین جهت شاهد رشد سریعتر متغیرهای تاج در حالت دوبعدی صفحه‌ای هستیم. از طرفی استفاده از مدلسازی دوبعدی صفحه‌ای می‌تواند در پدیده‌شناسی به کار گرفته شود.



(الف)



(ب)



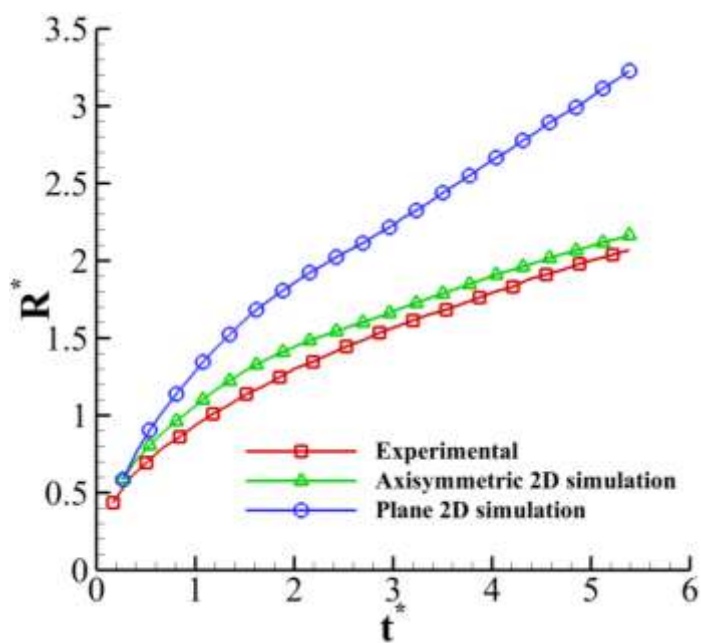
(ج)

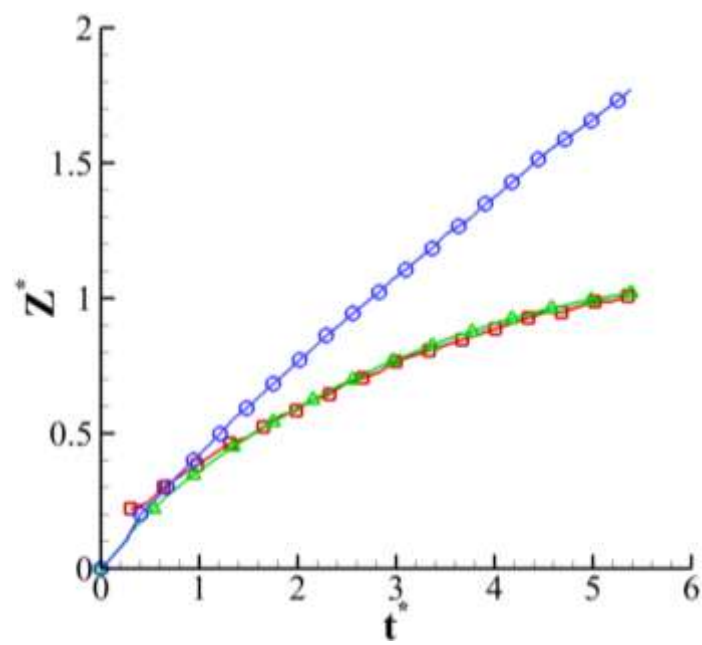
$Wi = 1$

$Wi = 10$

$Wi = 100$

شکل ۳-۷۷: اثر عدد وبر بر شکل تاج در لحظه $t^* = 2/8$ به ازای $Wi = 100$ ، $H = 0.2$ و $\beta = 0.3$ (الف) $We = 200$ ،
(ب) $We = 400$ و $We = 800$





شکل ۳-۷۸: مقایسه نتایج در حالات مختلف مدل سازی عددی و تجربی

فصل ۴: نتیجه گیری

برخورد قطرات بر لایه سیال در بسیاری از پدیده‌های طبیعی پیرامونی و فرآیندهای صنعتی نظیر پاشش رنگ و پوشش دهی سطوح قابل مشاهده است. الاستیسیته سیال، سرعت حرکت قطره و ضخامت لایه سیال از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در پدیده برخورد است که حضور سیال ویسکوالاستیک در این پدیده، دینامیک برخورد را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. سیالات ویسکوالاستیک به دلیل داشتن خواص توانمان الاستیک و ویسکوز، سبب بروز رفتارهای گاهاً پیچیده در جریان سیال می‌شوند و دلیل بروز این رفتارها، رشته‌های پلیمری موجود در سیال ویسکوالاستیک بوده که خواصی همچون کشسانی و قابلیت ذخیره انرژی در سیال را سبب می‌شود. به همین منظور شناخت بهتر فیزیک مسئله در حضور سیالات ویسکوالاستیک موجب بهبود و افزایش بازدهی فرآیندهای صنعتی مرتبط می‌شوند. از این رو در پژوهش حاضر تاثیرات حضور سیال ویسکوالاستیک بر دینامیک برخورد به روش‌های آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. در این فصل خلاصه‌ای از مهمترین نتایج حاصل شده از تحقیق حاضر ارائه شده است.

در ابتدا با توجه به اهمیت و اعتبار مطالعه تجربی، پدیده برخورد قطره بر لایه سیال به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده شده است. در این مطالعه برخورد قطره بر لایه سیال برای سیال نیوتنی و سیال ویسکوالاستیک باگر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و اثرات دیگر پارامترهایی همچون اندازه قطره، ضخامت لایه سیال و سرعت برخورد نیز بر این پدیده ارزیابی شده است. سیال نیوتنی از مخلوط سیالات آب و گلیسرین ساخته شده است و همچنین سیال ویسکوالاستیک باگر نیز با افزودن پودر پلیمر پلی‌اکریل‌آمید به محلول فوق قابل تولید است.

نتایج آزمایشات نشان دهنده این موضوع است که در مراحل اولیه تشکیل دیواره تاج، الاستیسیته سیال نقشی در رشد شعاعی تاج ندارد و به عبارت کلی در لحظات اولیه پس از تماس قطره با لایه سیال، الاستیسیته

سیال همانند ویسکوزیته تاثیر اندکی بر گسترش شعاعی تاج دارد. به همین جهت در لحظات اولیه برخورد قانون توانی برای رشد تاج با زمان $(R^* \propto (t - t_0)^{0.5})$ برای سیالات ویسکوالاستیک نیز برقرار است و این الگو توانی با گذشت زمان و رسیدن به لحظات میانی پس از برخورد (در حدود ۱۰ میلی ثانیه) از اعتبار ساقط شده و اختلاف نتایج به ازای وایزنبرگ‌های مختلف افزایش پیدا می‌کند. از طرف مقابل گسترش تاج در جهت قائم اثرپذیری بالایی از الاستیسیته سیال دارد. در واقع غالب انرژی برخوردی قطره در راستای قائم به لایه سیال وارد شده و عکس‌العمل لایه سیال در این راستا بیشتر است. به همین جهت تغییرات خواص سیال (همچون الاستیسیته) در راستا اثرگذاری بیشتری بر دینامیک رشد تاج خواهد داشت.

در گام نخست برای مطالعه تجربی حاضر، دینامیک تاج با افزودن پودر پلیمری پلی‌اکریل‌آمید در درصدی جرمی مختلف تحت تاثیر قرار می‌گیرد و رشد پارامترهای هندسی تاج نسبت به حالت نیوتنی کنترل می‌شود. میزان اثرگذاری این افزودنی پلیمری برای ارتفاع تاج چشمگیرتر و از طرف مقابل میزان تاثیر آن بر شعاع تاج ناچیز است. در مطالعه حاضر، اندازه قطره بر دینامیک برخورد نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. با بزرگتر شدن اندازه قطره میزان رشد پارامترهای تاج افزایش می‌یابد. به صورتی که برای سیال با گر B1 میزان رشد بزرگتر از حالتی است که مسئله برخورد با سیال با گر B2 صورت می‌گیرد. اندازه قطره در دینامیک برخورد سبب بزرگتر شدن انرژی جنبشی قطره می‌شود که در هنگام برخورد آن به لایه سیال حجم بیشتری از لایه سیال خارج شده که در نهایت گسترش ابعاد هندسی تاج را حاصل می‌شود.

بررسی میزان اثرگذاری ضخامت لایه سیال بر دینامیک برخورد از جمله نقاط برجسته این مطالعه به شمار می‌رود. طبق داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده، با افزایش ضخامت لایه سیال میزان رشد هندسی تاج بیشتر شده و میزان این تغییرات نیز برای ارتفاع تاج بزرگتر است. تحلیل اثر ضخامت لایه سیال بر دینامیک برخورد برای سیالات نیوتنی و ویسکوالاستیک نشان دهنده این است که اثر افزایش ضخامت لایه سیال بر هندسه تاج در سیال ویسکوالاستیک بیشتر از حالتی است که از سیال نیوتنی استفاده شده است. به عبارت دیگر در سیالات

ویسکوالاستیک، خواص الاستیک لایه سیال همچون یک جاذب و ذخیره کننده انرژی کمک شایانی به رشد ابعاد تاج می‌کند. از طرف مقابل در سیال نیوتنی به علت بزرگتر بودن اتلافات ویسکوز میزان رشد ابعاد هندسی تاج کوچکتر از حالت قبل است.

بررسی اثر عدد بدون بعد وبر در جریان‌های چندفازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به تعریف عدد بدون بعد وبر، نیروهای اینرسی (به عبارت دیگر سرعت حرکت قطره) و کشش سطحی بین دو فاز در این عدد اثرگذار است. در تحلیل حاضر به دلیل محدودیت در تغییر کشش سطحی، تنها سرعت سیال به عنوان پارامتر کنترلی در تعریف عدد وبر در نظر گرفته شده است. در تحلیل تجربی به وضوح قابل مشاهده است که با افزایش عدد وبر ابعاد هندسی تاج (ارتفاع و شعاع تاج) بزرگتر می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش عدد وبر، اینرسی قطره افزایش یا کشش سطحی میان فازها کاهش می‌یابد که به ترتیب سبب بزرگتر شدن انرژی برخورد و کاهش نیروی مقاوم در برابر رشد تاج می‌گردد و به تبع رشد تاج را سبب می‌گردد.

در این پژوهش جهت بررسی اثر الاستیک بر پدیده برخورد، از سیال نیوتنی دارای ویسکوزیته برشی یکسان با سیال باگر استفاده شده است که در این صورت اثر تفاوت ویسکوزیته در تحلیل حذف شده و اثر الاستیسیته به تنهایی بررسی می‌شود. نتایج آزمایشات برای سیال ویسکوالاستیک باگر و سیال نیوتنی معادل (از نظر ویسکوزیته) بیانگر آن است که الاستیسیته سیال باگر در محدوده پارامترهای ذکر شده سبب گسترش تاج نسبت به سیال نیوتنی معادل می‌گردد. نتایج مطالعه تجربی بیانگر آن است که افزایش خواص الاستیک سیال سبب رشد ابعاد تاج می‌گردد. قابل ذکر است که ارتفاع تاج، متاثر از الاستیسیته سیال رشد بیشتری را نسبت به شعاع تاج پیدا خواهد کرد. به صورتی که میزان افزایش ابعاد تاج برای استفاده از سیال ویسکوالاستیک B2 به جای سیال نیوتنی WG2 بزرگتر از حالتی است که از سیال ویسکوالاستیک B1 به جای سیال نیوتنی WG1 استفاده شود. در واقع الاستیسیته لایه سیال همچون یک جاذب انرژی جنبشی قطره را در خود ذخیره کرده و در مرحله رشد و گسترش تاج این انرژی صرف رشد هندسه تاج می‌گردد.

به عنوان گام نهایی در پژوهش حاضر، به دلیل پیچیدگی‌های پدیده برخورد و محدودیت‌های مطالعات آزمایشگاهی، با بهره‌گیری از مدلسازی عددی به کمک نرم‌افزار متن‌باز OpenFoam و حلگر viscoelasticInterFoam، به مطالعه دینامیک برخورد قطره بر لایه سیال در سیالات ویسکوالاستیک پرداخته شده است. تحلیل عددی در دو حالت دوبعدی صفحه‌ای و دوبعدی تقارن محوری صورت گرفته است و نتایج به ازای پارامترهای مرتبط ارائه گردیده است. در ابتدا پژوهش عددی، مطالعه شبکه و اعتبارسنجی حل در نظر گرفته شده است. نتایج انطباق قابل قبولی با مطالعات عددی گذشته و مطالعه آزمایشگاهی حاضر داشته و همچنین با مقایسه تحلیل عددی به ازای دو حلگر مختلف، مدلسازی به کمک حلگر viscoelasticInterFoam نتایج دقیقی را نشان می‌دهد.

مدلسازی عددی دینامیک برخورد در هر دو حالت دوبعدی صفحه‌ای و تقارن محوری نشان دهنده آن است که با افزایش خواص الاستیک سیال پخش دیواره تاج نیز افزایش می‌یابد. در مرحله اولیه تشکیل تاج $t^* < 0.1$ ، نتایج بیانگر آن است بیشینه فشار در محل تشکیل جت‌های خروجی از لایه سیال رخ می‌دهد و این مقدار با گذر زمان روند کاهش خواهد داشت. از طرفی الاستیسیته سیال سبب افزایش فشار در پایه تاج می‌گردد که این افزایش فشار کمک به تشکیل جت خروجی قدرتمندی می‌کند. به همین جهت با افزایش عدد وایزنبرگ بیشینه فشار در میدان حل افزایش می‌یابد. مطالعه عددی همچنین در مرحله تشکیل تاج بیانگر آن است که بیشینه تنش برشی در لحظات اولیه برخورد به علت ظهور اتلافات ویسکوز افزایش یافته و سپس با گذر زمان روند کاهشی به خود می‌گیرد. از طرفی با تقویت خواص الاستیک سیال (افزایش عدد وایزنبرگ) میزان اتلافات ویسکوز کاهش یافته و در نهایت سبب کاهش تنش برشی در محل تشکیل تاج می‌گردد. در مرحله تشکیل تاج به وضوح قابل مشاهده است که با گذر زمان سرعت جت خروجی تشکیل شده در حدفصل قطره و لایه سیال روند کاهشی دارد و همچنین این روند در اعداد وایزنبرگ مختلف نیز قابل مشاهده است و با افزایش خواص

الاستیک سیال، سرعت جت خروجی سیال افزایش می‌یابد. در اثر افزایش عدد رینولدز برخورد، اینرسی قطره افزایش یافته که در نهایت با بزرگتر شدن ابعاد تاج همراه است.

همانطور که در مطالعه تجربی مشاهده شد، در مطالعه عددی نیز قابل مشاهده است که با افزایش ضخامت لایه سیال تاج تشکیل شده از برخورد رشد پیدا می‌کند. در ضخامت‌های مختلف لایه سیال، با افزایش عدد وایزنبرگ از صفر تا مقادیر بسیار بزرگ ابعاد هندسی تاج گسترش می‌یابد. در حالی که در ضخامت‌های بزرگ لایه سیال ($H > 0.3$)، اثرپذیری هندسه تاج از عدد وایزنبرگ کوچکتر می‌شود. از طرفی در ضخامت‌های کوچک لایه سیال ($H = 0.2$) تغییرات هندسه تاج به شدت وابسته به خواص الاستیک سیال است. زاویه تاج به ازای افزایش ضخامت لایه سیال افزایش می‌یابد و این بدین معنی است که با افزایش ضخامت لایه سیال ارتفاع تاج افزایش و شعاع تاج کاهش می‌یابد.

در مدل‌های خطی و غیرخطی سیالات ویسکوالاستیک ضریب نسبت ویسکوزیته از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پارامتر بر دینامیک تاج نیز اثرگذار است. به گونه‌ای که با افزایش این ضریب، سهم ویسکوزیته پلیمری سیال در محلول پلیمری افزایش می‌یابد. از نتایج حاصل شده در حالت دوبعدی صفحه‌ای و تقارن محوری نتیجه می‌شود که در برخوردهای با وایزنبرگ‌های بزرگ، اثر تغییرات نسبت ویسکوزیته بر هندسه تاج بیشتر است و ارتفاع تاج با این ضریب رشد کرده و اثر این ضریب بر شعاع تاج کوچکتر است. از طرف مقابل در اعداد وایزنبرگ کوچک (خواص الاستیک کوچک) با توجه به ماهیت این ضریب در معادلات ساختاری، اثر تغییرات این نسبت بر دینامیک برخورد ناچیز می‌شود.

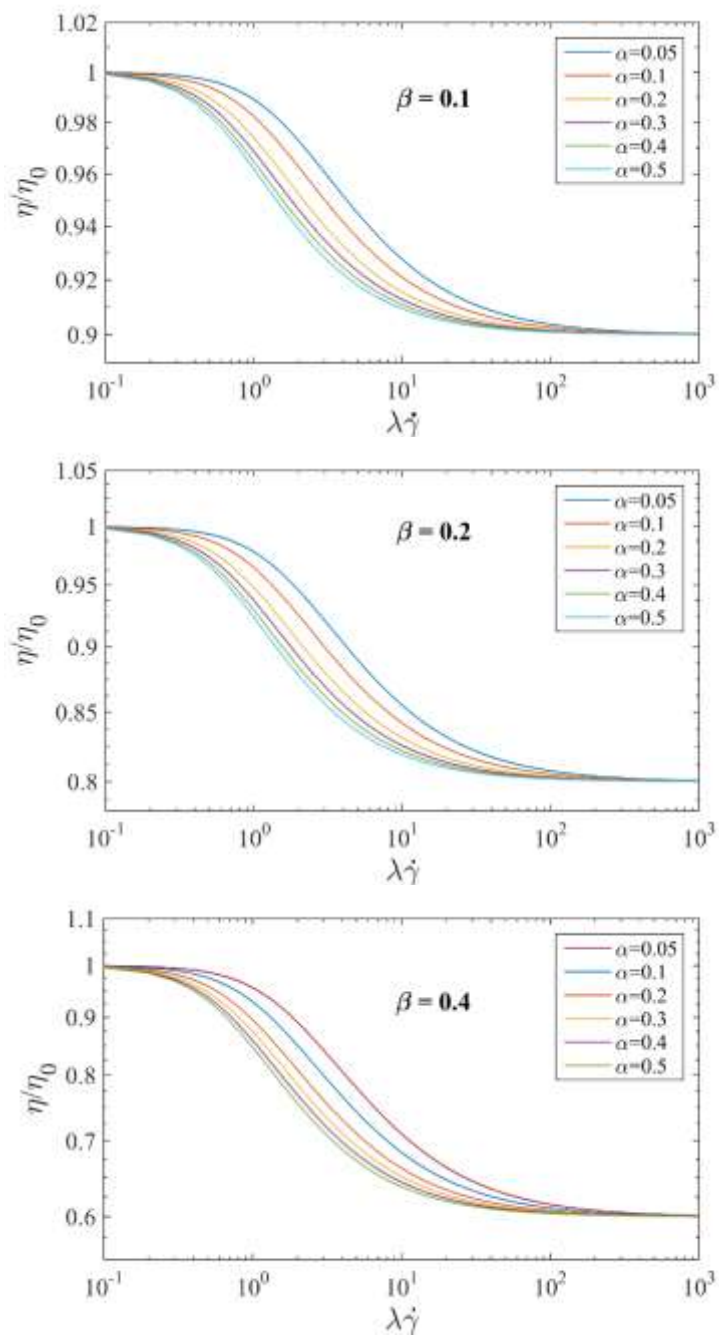
با توجه به اهمیت عدد وبر در جریان‌های چندفازی، در این مطالعه اثر این پارامتر در کنار خواص ویسکوالاستیک نیز بررسی شده است. افزایش عدد وبر در اعداد وایزنبرگ مختلف سبب رشد ابعاد تاج می‌گردد. در حالی که اثر این پارامتر بر ارتفاع تاج بیشتر از شعاع آن است. همچنین نتایج بیانگر آن است که افزایش عدد وبر سبب کشیدگی و نازک‌تر شدن تاج شده و زاویه دیواره تاج نسبت به افق بیشتر می‌گردد. به علت ارتباط

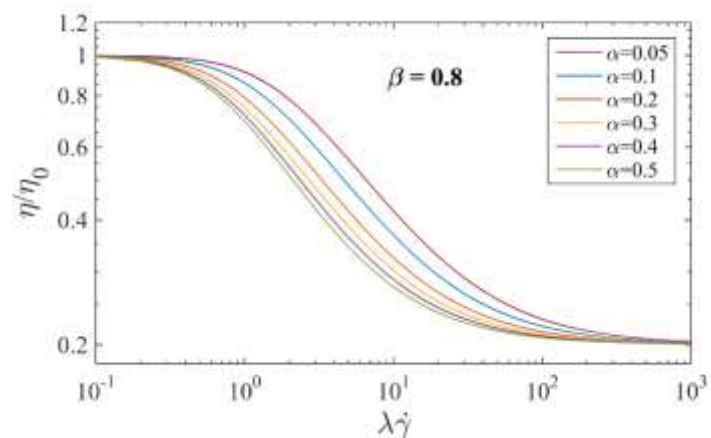
معکوس عدد و بر با کشش سطحی، با افزایش عدد و بر نیروهای کشش سطحی در دیواره تاج کاسته شده و به همین جهت اندازه بیشینه تنش به علت کوچک شدن نیروی مقاوم کشش سطحی، کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج مهم در مطالعه حاضر تاثیر اندک عدد بوند گرانشی بر دینامیک برخورد است.

در این مطالعه اثر زاویه برخورد قطره در حالت دوبعدی صفحه‌ای نیز مورد ارزیابی قرار گرفته شده است و الگوهای پیشبینی شده به ازای پارامترهای مختلف در حالت برخورد قائم، برای برخورد مایل نیز برقرار است. در صورت زاویه دار بودن برخورد، تقارن موجود در تشکیل تاج‌ها از بین رفته و هر یک از دیواره‌های راست و چپ تاج الگوهای متفاوتی در رشد خواهند داشت. از نتایج قابل مشاهده است که با افزایش زاویه برخورد قطره بر لایه سیال، ابعاد هندسی تاج کوچکتر می‌شود و تاثیر الاستیسیته سیال بر هندسه تاج با افزایش زاویه برخورد کاهش می‌یابد. نتایج در برخورد مایل نشان دهنده آن است که به ازای پارامترهای مختلف اندازه تنش در دیواره راست بیشتر از دیواره چپ است.

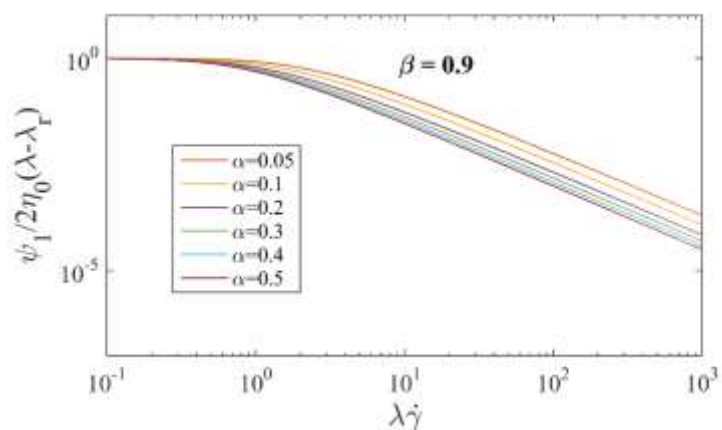
پیوست الف:

توابع ویسکومتریکی مدل ساختاری گزیکس به صورت زیر است.

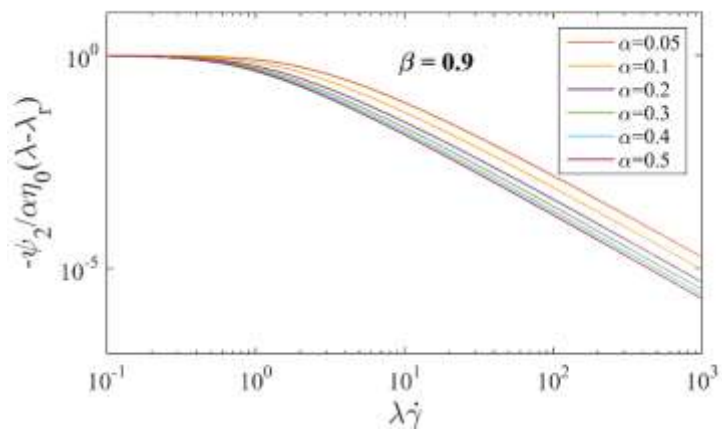




شکل الف-۱: تابع ویسکوزیته



شکل الف-۲: ثابت اختلاف تنش نرمال اول



شکل الف-۳: ثابت اختلاف تنش نرمال دوم

پیوست ب (تجهیزات آزمایش):

یکی از مهم‌ترین نیازهای اساسی در انجام هر چه بهتر و دقیق‌تر مطالعات آزمایشگاهی، تجهیزات مناسب و روزآمد است. دقت بالا و قابلیت انعطاف پذیری این تجهیزات موجب کوتاه شدن زمان انجام آزمایش‌ها می‌گردد. از ابزارهای نوینی که زمینه مطالعات جدیدی را فراهم نموده و در بهبود نتایج آزمایشگاهی پیشین نقش بسزایی داشته است، دوربین‌های پرسرعت و دستگاه اندازه‌گیری خواص سیالات غیر نیوتنی (رئومتر)^۱ هستند. با استفاده از این دوربین‌های پرسرعت می‌توان پدیده‌هایی را که وقوع آن‌ها در مدت زمان بسیار کوتاهی رخ می‌دهند، ثبت نموده و مورد مطالعه قرار داد؛ که امروزه روش‌های پردازش تصاویر کمک شایانی به شناخت و مطالعه هر چه بهتر این دسته از پدیده‌ها نموده است. به منظور بررسی آزمایشگاهی دینامیک برخورد قطرات سیال غیر نیوتنی بر لایه سیال، از یک دوربین پرسرعت PCO. Dimax S1 استفاده خواهد شد که در بالاترین سرعت توانایی ثبت ۱۵۰۰۰۰ تصویر بر ثانیه را داراست. این دوربین از فناوری نیمه هادی مکمل اکسید فلز^۲ جهت تصویربرداری استفاده می‌کند. همچنین وضوح عکس‌برداری این دوربین از ۱۶×۲۴۰ تا ۸۰۰×۱۰۰۸ قابل تغییر بوده که با افزایش سرعت تصویربرداری به دلیل محدودیت‌های حافظه، به صورت طبیعی وضوح آن کاهش می‌یابد و در جدول ۱-۲ تغییرات وضوح تصویر با تعداد تصویر بر ثانیه آورده شده است. ابعاد هر پیکسل در این دوربین برابر $۱۱ \mu m \times ۱۱ \mu m$ است و با توجه به ابعاد قطره در مسئله‌ی حاضر از دقت بالایی برخوردار است و همچنین این دوربین دارای محدوده زمانی شاتر^۳ $۱/۵ \mu s$ تا $۴۰ \mu s$ است. جهت ذخیره تصاویر، دوربین دارای حافظه داخلی ۳۶GB است. در شکل ۲-۶ نمایی از دوربین با مشخصات ذکر شده آورده شده است.

^۱ Rheometer

^۲ Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS)

^۳ Shutter



شکل ب-۱: دوربین سرعت بالا

از نکات قابل توجه در عکس‌برداری استفاده از نورپردازی مناسب است. در تجهیزات آزمایشگاهی حاضر از دو نورافکن ۱۰۰۰ واتی جهت نورپردازی از پدیده برخورد استفاده شد. تعیین مرزهای موجود بین دو فاز یکی از مهم‌ترین مواردی است که به هنگام استفاده از دوربین و پردازش تصویر باید در نظر گرفت. به همین

جدول ب-۱: تغییرات وضوح تصویر با تعداد تصویر بر ثانیه

تعداد تصاویر ذخیره شده در حافظه ۳۶GB	تعداد تصاویر بر ثانیه (fps)	تعداد پیکسل
۲۵۰۳۷	۴۴۶۷	۱۰۰۸×۱۰۰۸
۹۱۲۰۸	۱۲۹۳۲	۵۲۸×۵۲۸
۲۲۲۵۱۸	۲۷۶۴۲	۴۸۰×۲۴۰
۶۶۷۵۵۴۲	۱۵۲۸۱۱	۲۴۰×۱۶

جهت در تأمین روشنایی مورد نیاز باید به این نکته توجه داشت که نورپردازی به گونه‌ای باشد که مرزهای سیال از فضای اطراف آن به صورت کامل قابل تفکیک باشند. در غیر این صورت تشخیص خطوط در مرز بین دو سیال دشوار خواهد و حصول نتایج دقیق امکان‌پذیر نیست.

به همراه دوربین از یک عدسی Nikon مدل AF-S Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED VR برای آزمایش‌ها استفاده خواهد شد. این عدسی ماکرو مخصوص عکاسی و فیلم‌برداری از نزدیک است. عدسی

مذکور دارای قابلیت در اختیار گذاشتن تصویری واضح به هنگام نزدیک شدن دوربین به پدیده‌ی مورد نظر را دارد. شکل ۲-۷ عدسی مورد استفاده در تحقیق پیش‌رو و نمای داخلی آن را نمایش می‌دهد.

دستگاه اندازه‌گیری خواص سیالات غیر نیوتنی (رئومتر) از دیگر تجهیزات مدرن در اندازه‌گیری خواص سیالات ویسکوالاستیک است. این تجهیز آزمایشگاهی رفتار جریان سیالات، محلول‌ها یا محلول‌های آبی در برابر نیروهای اعمالی را اندازه‌گیری می‌کند. همچنین این دستگاه برای سیالاتی که معرفی و شناخت آن‌ها به تنهایی توسط ویسکوزیته امکان پذیر نیست، قابل استفاده است. در تحقیق پیش‌رو از دستگاه رئومتر Anton Paar MCR 302 به همراه یاتاقان‌های گازی استفاده شده است. نمایی از این دستگاه در شکل ۲-۸ آورده شده است. سادگی و سازگاری این دستگاه به نمونه‌ها از ویژگی‌های منحصر به فرد این رئومتر می‌باشد و همچنین از این دستگاه به علت کنترل دقیق کرنش‌ها و کنترل دمایی نمونه‌ها جهت استفاده برای سیالات پیچیده‌ای



شکل ب-۲: عدسی مورد استفاده به همراه دوربین و نمای داخلی آن

همچون امولسیون‌ها، ژل‌ها، سوسپانسیون‌ها، کلوئیدها، روان کارها و کف‌ها در محدوده دمایی ۱۵۰- تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کاربردهای دستگاه رئومتر Anton Paar MCR 302 می‌توان به اندازه‌گیری ویسکوزیته انواع سیالات نیوتنی، پلیمرها، مواد ویسکوالاستیک و رنگ‌ها؛ اندازه‌گیری مشخصات رئولوژیکی سیالات غیر نیوتنی اعم از محاسبه زمان رهایی (Relaxation time)، اندازه‌گیری زمان تأخیر (Retardation time)، اختلاف تنش نرمال و ضرایب مربوطه، Storage and loss modules؛ انجام انواع تست‌های رئولوژیکی مواد اعم از تست رهایی از تنش، تست خزش، انواع تست‌های متغیر با دما، تست هیستریزس، محاسبه تنش تسلیم و ... اشاره کرد.

در مطالعه پیش‌رو جهت تزریق قطره سیال از یک دستگاه پمپ سرنگی^۱ استفاده خواهد شد (مطابق شکل ۹-۲). دستگاه پمپ سرنگی جهت به‌کارگیری از انواع سرنگ‌ها طراحی شده است و این دستگاه با توجه به ابعاد سرنگ استفاده شده، قابلیت تزریق مقدار معینی محلول با سرعت‌های مختلف را دارا است. به طور کلی این سیستم در تمامی مواردی که نیاز به تزریق کم و کنترل شده محلول است، کاربرد دارد. استفاده از این پمپ در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی به منظور تحقیق بر روی موضوعات مختلف از جمله صنایع نفت و گاز، مواد شیمیایی، رنگ‌ها و کلیه آزمایش‌ها مرتبط با تشکیل و تزریق قطره می‌توان استفاده نمود.

¹ Syringe pump



شکل ب-۳: دستگاه رئومتر Anton Paar MCR 302



شکل ب-۴: دستگاه پمپ تزریق سرنگی JMS

همچنین در مطالعه حاضر از ترازو با دقت بالا جهت توزین مواد، همزن هات پلیت^۱ جهت تولید و همگن سازی محلول پلیمری و دستگاه اندازه گیری کشش سطحی (تَنسیومتر^۲) جهت اندازه گیری کشش سطحی استفاده خواهد شد. همچنین در مطالعه پیشرو جهت تغییر اندازه قطره از سوزن های با قطرهای مختلف استفاده خواهد شد.

¹ Hot plate stirrer

² Tensiometer

دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی (تنسیومتر) در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. این دستگاه به کمک روش ویل‌هلمی^۱ کشش سطحی سیال را محاسبه می‌کند. همچنین این شکل یک نمونه از تست کشش سطحی برای قطره را نمایش می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ب-۵: (الف) دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی و (ب) قطره در حال سقوط در تست کشش سطحی

در طبیعت سیالات ویسکوالاستیک فراوانی وجود دارند. اما ساختار آن‌ها دارای پیچیدگی‌های فراوانی است. لذا استفاده از پلیمرهای سنتزی به منظور ساخت سیالات ویسکوالاستیک باعث کنترل خواص توسط سازنده می‌شود. در این مطالعه از آب و گلیسرین به عنوان سیال پایه نیوتنی و از پلیمر پلی‌اکریل آمید^۲ جهت تولید محلول‌های پلیمری با غلظت‌های دلخواه بهره برده خواهد شد.

^۱ Wilhelmy

^۲ polyacrylamide

پیوست ج:

در مطالعه حاضر، برنامه متلب مورد استفاده در پردازش تصویر به صورت زیر است.

```
clc ;
clear all ;
dt=0.00015;

srcFiles = dir('C:\*.tif');
im1 = strcat('C:\',srcFiles(1).name);

    im2=imread(im1);

    im3 = im2bw(im2,0.6);

    im4 = 1 - (im3);
    im5 = imfill (im4);

    im6 = bwlabel (im5);

    Dia=244*0.4;

    length(srcFiles)

    tim(2)=2*dt;
    for k=3:length(srcFiles)+1
        tim(k)=tim(k-1)+dt;
    end
    %Height
    im1 = strcat('C:\',srcFiles(1).name);

    im2=imread(im1);

    im3 = im2bw(im2,0.6);

    im4 = 1 - (im3);
    im5 = imfill (im4);

    for ii=1:244
        if im5(ii,20)==1
            zeroH=244-ii;
            break;
        end
    end

for i = 1 : length(srcFiles)
    im0 = strcat('C:\',srcFiles(i).name);
```

```

im1=imread(im0);

im2= rgb2gray(im1);
im2=medfilt2(im2,[2 2],'symmetric');

im3 = im2bw(im2,0.6);

im4 = 1 - (im3);
im5 = imfill(im4);

for ii=1:244
    for jj=1:1194
        if ii>=(598-zeroH-20)
            im5(ii,jj)=0;
        end
    end
end
figure;
imshow(im5)

%Rim Dia calculation
id=1;
for ii=1:(598-zeroH-20)
    for jj=1:(1194-140)
        if im5(ii,jj)==1
            ss(id).y=ii;
            ss(id).x=jj;
            mat_yy(id)=ii;
            mat_xx(id)=jj;
            id=id+1;
        end
    end
end

[min_y,I_y] = min(mat_yy(:));

[min_x,I_x] = min(mat_xx(:));

height(i+1)=(586-ss(I_y).y-zeroH)/Dia;
radius(i+1)=(1175-ss(I_x).x)/Dia;

end

```

- [1] A.M. Worthington, XXVIII. On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate, *Proceedings of the Royal Society of London*, 25(171-178) (1877) 261-272.
- [2] H.E. Edgerton, J.R. Killian, *Flash! Seeing the unseen by ultra high-speed photography*, Hale, Cushman & Flint, Boston, 1939.
- [3] S.T. Thoroddsen, J. Sakakibara, Evolution of the fingering pattern of an impacting drop, *Physics of Fluids*, 10(6) (1998) 1359-1374.
- [4] S.T. Thoroddsen, T.G. Etoh, K. Takehara, High-Speed Imaging of Drops and Bubbles, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40(1) (2008) 257-285.
- [5] B. Ching, M.W. Golay, T.J. Johnson, Droplet Impacts Upon Liquid Surfaces, *Science*, 226(4674) (1984) 535.
- [6] G.E. Cossali, A. Coghe, M. Marengo, The impact of a single drop on a wetted solid surface, *Experiments in Fluids*, 22(6) (1997) 463-472.
- [7] A.-B. Wang, C.-C. Chen, Splashing impact of a single drop onto very thin liquid films, *Physics of Fluids*, 12(9) (2000) 2155-2158.
- [8] R. Rioboo, C. Bauthier, J. Conti, M. Voué, J. De Coninck, Experimental investigation of splash and crown formation during single drop impact on wetted surfaces, *Experiments in Fluids*, 35(6) (2003) 648-652.
- [9] S.K. Alghoul, C.N. Eastwick, D.B. Hann, Normal droplet impact on horizontal moving films: an investigation of impact behaviour and regimes, *Experiments in Fluids*, 50(5) (2011) 1305-1316.
- [10] T. Okawa, T. Shiraishi, T. Mori, Effect of impingement angle on the outcome of single water drop impact onto a plane water surface, *Experiments in Fluids*, 44(2) (2008) 331-339.
- [11] R. Krechetnikov, G.M. Homsy, Crown-forming instability phenomena in the drop splash problem, *Journal of Colloid and Interface Science*, 331(2) (2009) 555-559.
- [12] R.L. Vander Wal, G.M. Berger, S.D. Mozes, Droplets splashing upon films of the same fluid of various depths, *Experiments in Fluids*, 40(1) (2006) 33-52.
- [13] Y. Guo, Y. Lian, M. Sussman, Investigation of drop impact on dry and wet surfaces with consideration of surrounding air, *Physics of Fluids*, 28(7) (2016) 07330.۳
- [14] M. Cheng, J. Lou, A numerical study on splash of oblique drop impact on wet walls, *Computers & Fluids*, 115 (2015) 11-24.
- [15] G.E. Cossali, M. Marengo, A. Coghe, S. Zhdanov, The role of time in single drop splash on thin film, *Experiments in Fluids*, 36(6) (2004) 888-900.
- [16] A.M. Worthington, *A Study of Splashes*, Longmans, Green, and Company, 1908.
- [17] O.W. Jayaratne, B.J. Mason, The coalescence and bouncing of water drops at an air/water interface, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 280(1383) (1964) 545-565.
- [18] C.D. Stow, M.G. Hadfield, An experimental investigation of fluid flow resulting from the impact of a water drop with an unyielding dry surface, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 373(1755) (1981) 419.
- [19] R. Martin, Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces, *Fluid Dynamics Research*, 12(2) (1993) 61.

- [20] D.W. Stanton, C.J. Rutland, Multi-dimensional modeling of thin liquid films and spray-wall interactions resulting from impinging sprays, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(20) (1998) 3037-3054.
- [21] S.L. Manzello, J.C. Yang, An experimental study of a water droplet impinging on a liquid surface, *Experiments in Fluids*, 32(5) (2002) 580-589.
- [22] F.H. Harlow, J.P. Shannon, The Splash of a Liquid Drop, *Journal of Applied Physics*, 38(10) (1967) 3855-3866.
- [23] F. Rodriguez, R. Mesler, Some drops don't splash, *Journal of Colloid and Interface Science*, 160(2) (1985) 347-352.
- [24] K.L. Pan, C.K. Law, Dynamics of droplet–film collision, *Journal of Fluid Mechanics*, 587 (2007) 1-22.
- [25] X. Tang, A. Saha, C.K. Law, C. Sun, Nonmonotonic response of drop impacting on liquid film: mechanism and scaling, *Soft Matter*, 12(20) (2016) 4521-4529.
- [26] X. Tang, A. Saha, C.K. Law, C. Sun, Bouncing-to-Merging Transition in Drop Impact on Liquid Film: Role of Liquid Viscosity, *Langmuir*, 34(8) (2018) 2654-2662.
- [27] A.L. Yarin, D.A. Weiss, Impact of drops on solid surfaces: self-similar capillary waves, and splashing as a new type of kinematic discontinuity, *Journal of Fluid Mechanics*, 283 (2006) 141-173.
- [28] C. Mundo, M. Sommerfeld, C. Tropea, Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process, *International Journal of Multiphase Flow*, 21(2) (1995) 151-173.
- [29] C. Josserand, S. Zaleski, Droplet splashing on a thin liquid film, *Physics of Fluids*, 15(6) (2003) 1650-1657.
- [30] A.L. Yarin, DROP IMPACT DYNAMICS: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing..., *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38(1) (2005) 159-192.
- [31] S. Asadi, M. Passandideh Fard, A Computational Study of Droplet Impingement onto a Thin Liquid Film, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (2009).
- [32] K.-L. Pan, C.-Y. Hung, Droplet impact upon a wet surface with varied fluid and surface properties, *Journal of Colloid and Interface Science*, 352(1) (2010) 186-193.
- [33] H.N. Oguz, A. Prosperetti, Bubble entrainment by the impact of drops on liquid surfaces, *Journal of Fluid Mechanics*, 219 (2006) 143-179.
- [34] S. Mukherjee, J. Abraham, Crown behavior in drop impact on wet walls, *Physics of Fluids*, 19(5) (2007) 052103.
- [35] Z. Levin, P.V. Hobbs, Splashing of water drops on solid and wetted surfaces: hydrodynamics and charge separation, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 269(1200) (1971) 555.
- [36] M.F. Trujillo, C.F. Lee, Modeling crown formation due to the splashing of a droplet, *Physics of Fluids*, 13(9) (2001) 2503-2516.
- [37] I.V. Roisman, C. Tropea, Impact of a drop onto a wetted wall: description of crown formation and propagation, *Journal of Fluid Mechanics*, 472 (2002) 373-397.
- [38] D.A. Weiss, A.L. Yarin, Single drop impact onto liquid films: neck distortion, jetting, tiny bubble entrainment, and crown formation, *Journal of Fluid Mechanics*, 385 (1999) 229-254.
- [39] M. Rieber, A. Frohn, A numerical study on the mechanism of splashing, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20(5) (1999) 455-461.

- [40] N. Nikolopoulos, A. Theodorakakos, G. Bergeles, Normal impingement of a droplet onto a wall film: a numerical investigation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26(1) (2005) 119-132.
- [41] H. Fujimoto, T. Ogino, H. Takuda, N. Hatta, Collision of a droplet with a hemispherical static droplet on a solid, *International Journal of Multiphase Flow*, 27(7) (2001) 1227-1245.
- [42] M. R. Davidson, Spreading of an inviscid drop impacting on a liquid film, *Chemical Engineering Science*, 57(17) (2002) 3639-3647.
- [43] C. Motzkus, F. Gensdarmes, E. Géhin, Parameter study of microdroplet formation by impact of millimetre-size droplets onto a liquid film, *Journal of Aerosol Science*, 40(8) (2009) 680-692.
- [44] S. Asadi, H. Panahi, A Numerical Study of a Droplet Impinging on a Liquid Surface, *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*, 5 (2011) 963-968.
- [45] G. Coppola, G. Rocco, L. de Luca, Insights on the impact of a plane drop on a thin liquid film, *Physics of Fluids*, 23(2) (2011) 022105.
- [46] S.H. Lee, N. Hur, S. Kang, A numerical analysis of drop impact on liquid film by using a level set method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(10) (2011) 2567.
- [47] Y. Guo, L. Wei, G. Liang, S. Shen, Simulation of droplet impact on liquid film with CLSVOF, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 53 (2014) 26-33.
- [48] P. Brambilla, P. Brivio, A. Guardone, G. Romanelli, Grid convergence assessment for adaptive grid simulations of normal drop impacts onto liquid films in axi-symmetric and three-dimensional geometries, *Applied Mathematics and Computation*, 267 (2015) 487-497.
- [49] Z.-y. Shi, Y.-h. Yan, F. Yang, Y.-h. Qian, G.-h. Hu, A lattice boltzmann method for simulation of a three-dimensional drop impact on a liquid film, *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 20(3) (2008) 267-272.
- [50] C.-m. Zhang, X.-y. Wang, J.-h. Guo, Simulation of two-phase flows of a droplet impacting on a liquid film with an improved lattice Boltzmann model, *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 15(6) (2011) 506-509.
- [51] J. Wu, C. Liu, N. Zhao, Dynamics of falling droplets impact on a liquid film: Hybrid lattice Boltzmann simulation, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 472 (2015) 92-100.
- [52] L. Li, X. Jia, Y. Liu, M. Su, Simulation of double droplets impact on liquid film by a simplified lattice Boltzmann model, *Applied Thermal Engineering*, 98 (2016) 656-669.
- [53] S. Fallah Kharmiani, M. Passandideh-Fard, H. Niazmand, Simulation of a single droplet impact onto a thin liquid film using the lattice Boltzmann method, *Journal of Molecular Liquids*, 222 (2016) 1172-1182.
- [54] T. Lee, C.-L. Lin, A stable discretization of the lattice Boltzmann equation for simulation of incompressible two-phase flows at high density ratio, *Journal of Computational Physics*, 206(1) (2005) 16-47.
- [55] A.R. Rahmati, A. Zarareh, Application of a modified pseudopotential lattice Boltzmann model for simulation of splashing phenomenon, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 70 (2018) 19-35.
- [56] H. Xie, S. Koshizuka, Y. Oka, Modelling of a single drop impact onto liquid film using particle method, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 45(9) (2004) 1009-1023.

- [57] T. Jiang, J. Ouyang, X. Li, J. Ren, X. Wang, Numerical study of a single drop impact onto a liquid film up to the consequent formation of a crown, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 54(5) (2013) 720-728.
- [58] X. Yang, L. Dai, S.-C. Kong, Simulation of liquid drop impact on dry and wet surfaces using SPH method, *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(2) (2017) 2393-2399.
- [59] G. Liang, Y. Guo, Y. Yang, N. Zhen, S. Shen, Spreading and splashing during a single drop impact on an inclined wetted surface, *Acta Mechanica*, 224(12) (2013) 2993-3004.
- [60] P. Brambilla, A. Guardone, Assessment of dynamic adaptive grids in Volume-Of-Fluid simulations of oblique drop impacts onto liquid films, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 281 (2015) 277-283.
- [61] C. Liu, M. Shen, J. Wu, Investigation of a single droplet impact onto a liquid film with given horizontal velocity, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 67 (2018) 269-279.
- [62] C. Ming, L. Jing, Lattice Boltzmann simulation of a drop impact on a moving wall with a liquid film, *Computers & Mathematics with Applications*, 67(2) (2014) 307-317.
- [63] K.A. Raman, R.K. Jaiman, T.S. Lee, H.T. Low, On the dynamics of crown structure in simultaneous two droplets impact onto stationary and moving liquid film, *Computers & Fluids*, 107 (2015) 285-300.
- [64] X. Gao, R. Li, Impact of a single drop on a flowing liquid film, *Physical Review E*, 92(5) (2015) 053005.
- [65] G. Liang, X. Mu, Y. Guo, S. Shen, Crown and drop rebound on thin curved liquid films, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 98 (2016) 455-461.
- [66] L.-H. Luu, Y. Forterre, Drop impact of yield-stress fluids, *Journal of Fluid Mechanics*, 632 (2009) 301-327.
- [67] G. German, V. Bertola, Impact of shear-thinning and yield-stress drops on solid substrates, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21(37) (2009) 375111.
- [68] A. Saïdi, C. Martin, A. Magnin, Influence of yield stress on the fluid droplet impact control, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 165(11) (2010) 596-606.
- [69] E. Kim, J. Baek, Numerical study of the parameters governing the impact dynamics of yield-stress fluid droplets on a solid surface, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 173-174 (2012) 62-71.
- [70] A.S. Moita, D. Herrmann, A.L.N. Moreira, Fluid dynamic and heat transfer processes between solid surfaces and non-Newtonian liquid droplets, *Applied Thermal Engineering*, 88 (2015) 33-46.
- [71] J.J. Cooper-White, R.C. Crooks, D.V. Boger, A drop impact study of worm-like viscoelastic surfactant solutions, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 210(1) (2002) 105-123.
- [72] T. Jiang, J. Ouyang, B. Yang, J. Ren, The SPH method for simulating a viscoelastic drop impact and spreading on an inclined plate, *Computational Mechanics*, 45(6) (2010) 573-583.
- [73] Y. Wang, M. Do-Quang, G. Amberg, Impact of viscoelastic droplets, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 243 (2017) 38-46.
- [74] J.M. Cheny, K. Walters, Rheological influences on the splashing experiment, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 86(1) (1999) 185-210.
- [75] J. Lampe, R. DiLalla, J. Grimaldi, J.P. Rothstein, Impact dynamics of drops on thin films of viscoelastic wormlike micelle solutions, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 125(1) (2005) 11-23.

- [76] M.F. Tomé, L. Grossi, A. Castelo, J.A. Cuminato, S. McKee, K. Walters, Die-swell, splashing drop and a numerical technique for solving the Oldroyd B model for axisymmetric free surface flows, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 141(2) (2007) 148-166.
- [77] K. Walters, H.R. Tamaddon-Jahromi, M.F. Webster, M.F. Tome, S. McKee, The competing roles of extensional viscosity and normal stress differences in complex flows of elastic liquids, *Korea-Aust. Rheol. J.*, 21(4) (2009) 225-233.
- [78] M.F. Tomé, S. McKee, K. Walters, A computational study of some rheological influences on the “splashing experiment”, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 165(19) (2010) 1258-1264.
- [79] D. Izbassarov, M.E. Rosti, M.N. Ardekani, M. Sarabian, S. Hormozi, L. Brandt, O. Tammisola, Computational modeling of multiphase viscoelastic and elastoviscoplastic flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 88(12) (2018) 521-543.
- [80] A.M. Karim, Experimental dynamics of Newtonian non-elastic and viscoelastic droplets impacting immiscible liquid surface, *AIP Advances*, 9(12) (2019) 125141.
- [81] M.R. Rezaie, M. Norouzi, M.H. Kayhani, S.M. Taghavi, Numerical analysis of the drop impact onto a liquid film of non-linear viscoelastic fluids, *Meccanica*, 56(8) (2021) 2021-2038.
- [82] M.G.N. Perera, K. Walters, Long-range memory effects in flows involving abrupt changes in geometry: Part I: flows associated with I-shaped and T-shaped geometries, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2(1) (1977) 49-81.
- [83] R. Guénette, M. Fortin, A new mixed finite element method for computing viscoelastic flows, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 60(1) (1995) 27-52.
- [84] R.G. Owens, T.N. Phillips, *Computational Rheology*, Imperial College Press, 2002.
- [85] A. Caboussat, Numerical simulation of two-phase free surface flows, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 12(2) (2005) 165-224.
- [86] A. Komeili Birjandi, M. Norouzi, M.H. Kayhani, A numerical study on drop formation of viscoelastic liquids using a nonlinear constitutive equation, *Meccanica*, 52(15) (2017) 3593-3613.
- [87] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39(1) (1981) 201-225.
- [88] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach, A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, 100(2) (1992) 335-354.
- [89] R.I. Tanner, *Engineering rheology* / Roger I. Tanner, Oxford University Press, New York, 2000.
- [90] D.V. Boger, A highly elastic constant-viscosity fluid, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 3(1) (1977) 87-91.
- [91] R.B. Bird, R.B. Bird, R.C. Armstrong, O. Hassager, *Dynamics of Polymeric Liquids, Volume 1: Fluid Mechanics*, Wiley, 1987.
- [92] J.P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, 1971.
- [93] O. Shonibare, Numerical Simulation of Viscoelastic Multiphase Flows Using an Improved Two-phase Flow Solver, in, 2017.
- [94] T. Chinyoka, Y.Y. Renardy, M. Renardy, D.B. Khismatullin, Two-dimensional study of drop deformation under simple shear for Oldroyd-B liquids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 130(1) (2005) 45-56.
- [95] X. Xu, J. Ouyang, T. Jiang, Q. Li, Numerical simulation of 3D-unsteady viscoelastic free surface flows by improved smoothed particle hydrodynamics method, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 177-178 (2012) 109-120.

[96] R.A. Figueiredo, C.M. Oishi, A.M. Afonso, I.V.M. Tasso, J.A. Cuminato, A two-phase solver for complex fluids: Studies of the Weissenberg effect, *International Journal of Multiphase Flow*, 84 (2016) 98-115.

Abstract

The drop impact onto liquid film is an interesting phenomenon in fluid mechanics and industrial applications, including spray coating, cooling processes, and inkjet printing. The impact of a drop on a liquid film surface creates an interaction between the drop, the fluid, and the surface. Therefore, understanding this interaction is very important. Although many investigations have studied the case of Newtonian fluids, the effects of the fluid rheological properties, especially the elasticity, fluid film thickness, and the nonlinear viscometric functions, have been less considered in the literature. In this study, the impact of a drop onto the same liquid film is investigated numerically and experimentally.

The Boger fluid is considered as viscoelastic fluid in all experiment cases. In the experimental study, the different viscoelastic Boger solutions were made by dissolving polyacrylamide powder in a water/glycerin solution. The impact of a drop on fluid film is recorded using a high-speed camera. Numerical simulations can complete the previous studies and the present experimental observations. By using the finite volume method (FVM) and the volume of fluid (VOF) technique, the governing equations are solved numerically. In this study, the Oldroyd-B and Giesekus model are used as the constitutive equation for the viscoelastic phase. The effects of flow parameters, including the Weissenberg number, Reynolds number, the film thickness, the Bond number, and the Weber number on the evolution of the crown are investigated.

The results indicate that the fluid elasticity and surface tension forces have a significant effect on crown dimensions. The fluid's elasticity can increase the crown dimensions for large values of the Weissenberg number. Whereas, at lower values of the Weissenberg number the crown dynamics can be complex. The effect of fluid film thickness on the crown dynamics depends on the Weissenberg number. The impacts of viscosity ratio and mobility factor on crown dynamics are also considered.

Keywords: Impact problem, Viscoelastic fluid, Numerical and experimental investigation, Fluid film, Surface tension.



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

Ph.D. Thesis in Energy Conversion Engineering

Numerical and experimental investigation on the impact of drop onto the fluid film in viscoelastic fluids

By: Mohammadreza Rezaie

Supervisors:

Dr. Mahmood Norouzi

Advisors:

Dr. Mohammad Hassan Kayhani

Dr. Seyed Mohammad Taghavi

February 2022