

محمد بن عبد الله



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

خانم سحر جعفری نیلویی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان شبیه سازی اثرات میدان جریان در تغییر شکل قطره در حال سقوط در هوا. در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۸ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر محمدرضا انصاری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر قاسم حیدری نژاد	استاد	
استاد ناظر	دکتر مهدی معرفت	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمدکار حیمیان	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر مهدی معرفت	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه / رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما: محمد رضا انصاری

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عنوان پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می‌باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می‌باشد.

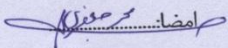
تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثر هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب سحر جعفری نیولویی دانشجوی رشته مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی ورودی سال تحصیلی ۱۳۹۰ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مکانیک متعهد می‌شوم کلیه نکات مندرج در آئین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته‌های علمی مستخرج از پایان‌نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین‌نامه فوق‌الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضاء: 

تاریخ: ۹۲/۱/۲۸

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

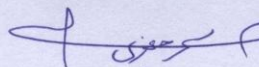
«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر محمدرضا انصاری، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر - و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر - از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب سحر جعفری نیلوبی دانشجوی رشته مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: 

تاریخ و امضا: ۹۴/۱۱/۲۸



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مکانیک - گروه تبدیل انرژی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

شیمی سازی اثرات میدان جریان در تغییر شکل قطره در حال سقوط در هوا

سحر جعفری نیولویی

استاد راهنما

دکتر محمد رضا انصاری

بهمن ۱۳۹۲

تقدیم بہ پدر و مادر مہربانم

تقدیر و تشکر:

در آغاز بر خود وظیفه می دانم از زحمات استاد راهنمای گرانقدرم، جناب آقای دکتر محمدرضا انصاری، که در مراحل مختلف تدوین و نگارش این پایان نامه مرا راهنمایی نموده‌اند، کمال تشکر و سپاسگزاری را داشته باشم.

و همچنین از زحمات و حمایت‌های بی‌دریغ خانواده‌ام به ویژه پدر و مادر مهربانم که در تمام مراحل تحصیلم، صبورانه مرا همراهی کرده‌اند، قدردانی می‌کنم.

چکیده

در تحقیق حاضر جریان دو فازی قطره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. جریان مورد مطالعه آرام و تراکم‌ناپذیر است. هدف اصلی این پژوهش مطالعه عددی الگوهای جریان ایجاد شده هنگام سقوط قطره در هوا و همچنین برخورد آن به سطوح مختلف است که به نوعی مدل‌سازی اسپری محسوب می‌شود.

شبهه‌سازی‌ها برای تسخیر سطح مشترک، با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم (نوشته شده توسط OpenFoamLtd)، در چارچوب دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، انجام شده است. روش عددی به کار گرفته شده، از روش حجم محدود استفاده می‌کند که با استفاده از الگوریتم پیروز، معادلات ناویر-استوکس حل شده و میدان سرعت و فشار بدست می‌آید. مدل تعقیب سطح مشترک به کار رفته در این نرم‌افزار مدل حجم سیال (VOF) است. نوآوری روش عددی به کار رفته در این نرم‌افزار، افزودن ترم جابجایی به معادله است. این ترم بعنوان ترم مصنوعی تراکمی در معادله انتگرالی است که برای خنثی کردن تاثیر دیفیوژن عددی اعمال می‌شود.

با توجه به مشخصات فیزیکی قطره و محیط پیوسته اطراف آن، تغییرشکل‌های گوناگونی در طول سقوط قطره ایجاد می‌شود. این تغییرشکل‌ها برای گستره وسیعی از اعداد بدون بعد اتووس و مورتون توصیف شده است. نتایج بدست آمده تطابق خوبی با کارهای تجربی در دسترس داشته‌اند.

یکی از پارامترهای مهم در حرکت قطره ضریب پسای وارد بر قطره است که تاثیر زیادی بر سرعت حرکت قطره دارد. بررسی‌ها نشان داد که افزایش قطر کاهش این ضریب را به همراه دارد.

از جمله مسائل مطرح در زمینه جریان قطره‌ای، وجود گرادیان فشار جهت متلاشی کردن قطره است. به همین جهت تغییرات فشار در مدت زمان متلاشی شدن قطره بررسی شد. علاوه بر این برخورد قطره به سطح و به لایه‌ای نازک از سیال هم‌جنس خود، بعنوان فرایندی که همواره در صنعت با آن مواجه می‌شویم، مورد توجه قرار گرفت. نشان داده شد ویسکوزیته سیال در تعیین نوع الگوی برخورد قطره

تأثیرگذار است. مدل‌های بسیاری جهت پیش‌بینی رفتار قطره هنگام برخورد به سطح وجود دارد. در این پژوهش با کدنویسی برخی از مدل‌های رایج در این زمینه، هر یک از این مدل‌ها بررسی شد. به طور کلی پدیده‌های کلی حاکم بر جریان به خوبی مدل‌سازی و پیش‌بینی‌های صحیحی در مقایسه با نتایج تجربی حاصل شد.

شبیه‌سازی‌های عددی جریان‌های مختلف مربوط به اسپری قطرات، به کمک روش‌های تئوری، درک جزئیات دینامیک جریان را امکان پذیر می‌سازد. مشخصاً نتایج عددی جزئیات جریان را که در آزمایش‌ها دور از دسترس هستند، آشکار می‌کند و داده‌هایی برای تعریف الگوهای جریان و تحلیل آنها بدست می‌آید.

واژگان کلیدی: جریان دوفازی قطره‌ای، تغییرشکل، اسپری، برخورد، زاویه تماس، *VOF*,

OpenFoam

ز	چکیده	_____
ط	فهرست مطالب	_____
ک	فهرست علائم و نشانه‌ها	_____
م	فهرست جدول‌ها	_____
ن	فهرست شکل‌ها	_____
<hr/>		
فصل ۱ مقدمه‌ای بر جریان‌های چندفازی _____		
۲	۱-۱- مقدمه	.....
۲	۲-۱- کاربرد جریان‌های دوفازی قطره‌ای	.....
۵	۳-۱- دینامیک سیالات محاسباتی	.....
۶	۴-۱- جمع‌بندی	.....
<hr/>		
فصل ۲ مروری بر تحقیقات پیشین _____		
۹	۱-۲- مقدمه	.....
۹	۲-۲- حرکت قطره در سیال بی‌نهایت	.....
۱۲	۳-۲- پدیده برخورد قطره	.....
۱۶	۲-۳-۲- مدل‌های زاویه تماس	_____
۲۰	۴-۲- جمع‌بندی	.....
<hr/>		
فصل ۳ الگوریتم حل عددی _____		
۲۳	۱-۳- مقدمه	.....
۲۳	۲-۳- روش‌های شبیه‌سازی جریان سطح آزاد	.....
۲۶	۲-۲-۳- روش حجم سیال (VOF)	_____
۳۱	۳-۳- مدل‌سازی دینامیک سطح آزاد	.....
۳۲	۴-۳- شرحی از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی اوپن‌فوم	.....
۳۳	۵-۳- روند حل	.....
۳۹	۶-۳- جمع‌بندی	.....
<hr/>		
فصل ۴ نتایج شبیه‌سازی تغییر شکل قطره _____		
۴۱	۱-۴- مقدمه	.....
۴۱	۲-۴- حرکت قطره در سیال بی‌نهایت	.....
۴۱	۱-۲-۴- طرح مسئله	_____
۴۲	۲-۲-۴- جزئیات شبیه‌سازی	_____
۴۵	۳-۲-۴- شرایط مرزی و اولیه	_____

۴۵	شبکه محاسباتی	۴-۲-۴
۴۶	اعتباربخشی	۵-۲-۴
۵۰	حرکت قطره و تغییر شکل آن	۶-۲-۴
۵۲	حرکت قطره و ضریب پسای وارد بر آن	۷-۲-۴
۵۵	بررسی اثرات گرادیان فشار	۳-۴
۵۸	بررسی پدیده برخورد قطره	۴-۴
۵۸	برخورد قطره به سطح جامد	۱-۴-۴
۶۱	مدل‌های زاویه تماس	۱-۱-۴-۴
۷۷	برخورد قطره به لایه‌ای از سیال	۲-۴-۴
۸۴	جمع‌بندی	۵-۴
فصل ۵ جمع‌بندی و پیشنهادات		
۸۹	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۱-۵
۹۱	پیشنهادات	۲-۵
۹۲	مراجع	

فهرست علائم و نشانه‌ها

C	تابع رنگ
C_d	ضریب پسا
C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت
d	قطر اولیه قطره
d_e	قطر معادل قطره
g	شتاب گرانشی
H	ارتفاع قطره از سطح
h	ضخامت فیلم
K	عدد سامرفیلد
M	عدد مورتون
p	فشار
Re	عدد رینولدز
r_{CL}	شعاع منطقه تر
t	زمان
U	سرعت نهایی قطره
u	بردار سرعت
U_c	سرعت معادل تراکم سطح مشترک
U_{CL}	سرعت خط برخورد
U_R	سرعت برخاست قطره
Ψ	فشار دینامیکی
We	عدد وبر
X	تابع نشانگر فاز
پایین نویسی	
c	فاز پیوسته
d	فاز گسسته
g	گاز
l	مایع
T	نهایی
علائم یونانی	
α	کسر حجمی
θ_a	زاویه پیش‌رو
θ_d	زاویه دینامیکی
θ_e	زاویه تعادلی
θ_r	زاویه پس‌رو
θ_s	زاویه استاتیکی

θ_w	زاویه دیواره
κ	انحنای سطح مشترک
μ	ویسکوزیته دینامیکی
ρ	چگالی
σ	کشش سطحی
φ	تابع فاصله

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان جدول
۴۷-----	جدول (۱-۴) مشخصات فیزیکی سیستم تولوئن/آب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
۴۹-----	جدول (۲-۴) مقایسه روش‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی مراجع [۱] و [۱۷]
۶۳-----	جدول (۳-۴) مشخصات فیزیکی سیال‌های شبیه‌سازی شده در دمای ۲۰ درجه سلسیوس
۷۲-----	جدول (۴-۴) مشخصات حالات شبیه‌سازی شده
۷۶-----	جدول (۵-۴) مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌های مختلف

- شکل (۱-۱) برخورد قطره به لایه نازکی از فیلم مایع و تشکیل تاج [۲]----- ۴
- شکل (۱-۲) الگوهای مختلف جریان در برخورد قطره به سطح [۲۰]----- ۱۴
- شکل (۱-۳) شکل شماتیک روش نشانگر و سلول (MAC) [۴۰]----- ۲۴
- شکل (۲-۳) شکل شماتیک روش‌های LS و VOF [۴۰]----- ۲۶
- شکل (۳-۳) طرحواره سطح مشترک در روش‌های بازسازی هندسی SLIC و PLIC [۴۰]----- ۲۸
- شکل (۱-۴) هندسه شماتیک مساله----- ۴۲
- شکل (۲-۴) نمودار سرعت قطره در شبکه‌های مختلف محاسباتی----- ۴۶
- شکل (۳-۴) نمای دو بعدی شبکه محاسباتی انتخاب شده----- ۴۶
- شکل (۴-۴) سرعت حد قطره تولون با قطرهای مختلف بر حسب زمان----- ۴۸
- شکل (۵-۴) سرعت نهایی قطره: مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در پژوهش حاضر با مراجع دیگر----- ۴۹
- شکل (۶-۴) نمودار گریس و همکاران [۱]؛ نقاط a, b, c, d, e و f انتخاب شده برای شبیه‌سازی----- ۵۰
- شکل (۷-۴) قطرات با اعداد مورتون و اتووس مختلف در حال حرکت هستند و تغییر شکل‌های حاصل با شبیه‌سازی‌های انجام شده با روش حجم سیال بدست آمده است. (a ، $Eo = 0.1, M = 10^{-8}$ (b ، $Eo = 0.9, M = 3 \times 10^{-10}$ (c ، $Eo = 72, M = 200$ ----- ۵۱
- شکل (۸-۴) تغییرات ضریب پسای قطره با نسبت ویسکوزیته $1/61$ بر حسب رینولدز: مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی انجام یافته با روابط مختلف----- ۵۴
- شکل (۹-۴) ضریب پسای قطره تولون در حال حرکت در آب بر حسب قطر آن----- ۵۵
- شکل (۱۰-۴) تغییرات فشار در مقطع ۱۴ میلی‌متری بر حسب زمان (کار حاضر)----- ۵۶
- شکل (۱۱-۴) نتایج شبیه‌سازی عددی متلاشی شدن قطره در حضور گرادیان فشار (کار حاضر)----- ۵۷
- شکل (۱۲-۴) تغییرات فشار در مقطع ۱۴ میلی‌متری از کف بر حسب زمان در حضور گرادیان فشار (کار حاضر)----- ۵۷
- شکل (۱۳-۴) کانتور فشار و کسر حجمی فشار در لحظه متلاشی شدن قطره در حضور گرادیان فشار (کار حاضر)----- ۵۸
- شکل (۱۴-۴) برخورد قطره به قطر $2/7\text{mm}$ با سرعت برخورد متفاوت؛ مقایسه نتایج عددی کار حاضر و تجربی مرجع [۵۹]----- ۶۰
- شکل (۱۵-۴) شبیه‌سازی سه بعدی برخورد قطره به قطر $2/7\text{mm}$ با سرعت برخورد متفاوت در زمان $t^* = 1/2$ ----- ۶۰

- شکل (۴-۱۶) شبیه‌سازی سه بعدی برخورد قطره به قطر $2/7\text{mm}$ با $Re=1412$ و $We=420$ در زمان $t^*=1/2$ ----- ۶۱
- شکل (۴-۱۷) برخورد قطرات $2/3$ میلی‌متری بر سطحی از جنس پارافیلیم M با سرعت برخورد 2m/s در زمان یکسان؛ (الف) آب، (ب) گلیسرین 0.50 ؛ (ج) گلیسرین 0.80 ----- ۶۳
- شکل (۴-۱۸) شماتیک برخورد قطره به سطح----- ۶۴
- شکل (۴-۱۹) تغییر ارتفاع بی‌بعد قطرات با ویسکوزیته‌های مختلف بر حسب زمان؛ قطر اولیه $2/3\text{mm}$ ، سرعت برخورد 2m/s ----- ۶۴
- شکل (۴-۲۰) تغییر ارتفاع بی‌بعد قطرات با ویسکوزیته‌های مختلف بر حسب زمان؛ قطر اولیه $2/3\text{mm}$ ، سرعت برخورد 2m/s ----- ۶۶
- شکل (۴-۲۱) زوایای پیشرو و پسرو در برخورد قطره با سطح جامد----- ۶۷
- شکل (۴-۲۲) مقایسه نتایج آزمایشگاهی مرجع [۳۲] و نتایج شبیه‌سازی مدل زاویه برخورد دینامیکی کار حاضر----- ۶۹
- شکل (۴-۲۳) نتایج شبیه‌سازی مدل زاویه برخورد دینامیکی یوکویی و همکاران [۳۲] در کار حاضر----- ۶۹
- شکل (۴-۲۴) مقایسه نتایج تجربی مرجع [۳۲] و نتایج شبیه‌سازی مدل زاویه برخورد استاتیکی 90 درجه کار حاضر----- ۷۰
- شکل (۴-۲۵) ارتفاع بی‌بعد قطره بر حسب زمان در مدل‌های مختلف زاویه تماس؛ حالت ۱----- ۷۲
- شکل (۴-۲۶) ارتفاع بی‌بعد قطره بر حسب زمان در مدل‌های مختلف زاویه تماس؛ حالت ۲----- ۷۳
- شکل (۴-۲۷) ارتفاع بی‌بعد قطره بر حسب زمان در مدل‌های مختلف زاویه تماس؛ حالت ۲----- ۷۵
- شکل (۴-۲۸) مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۶۲]----- ۷۷
- شکل (۴-۲۹) سه رژیم (الف): تاج متقارن، (ب): تاج با اسپایک متقارن، (ج): تاج بی‌قاعده در برخورد قطره به قطر $4/8\text{mm}$ به فیلم مایع----- ۷۸
- شکل (۴-۳۰) سه رژیم (الف): تاج متقارن، (ب): تاج با اسپایک متقارن، (ج): تاج بی‌قاعده [۹]----- ۷۹
- شکل (۴-۳۱) نتایج شبیه‌سازی میدان سرعت در کار حاضر؛ گردابه‌های تشکیل شده اطراف تاج----- ۸۰
- شکل (۴-۳۲) برخورد قطره بوتانول به فیلم مایع و تشکیل قطره ثانویه و برخاست آن----- ۸۱
- شکل (۴-۳۳) تغییرات رینولدز بر حسب وبر قطره در ضخامت‌های مختلف فیلم در نسبت ثابت قطر به ضخامت----- ۸۲
- شکل (۴-۳۴) تغییرات رینولدز بر حسب وبر قطره در ضخامت ثابت فیلم----- ۸۳
- شکل (۴-۳۵) منحنی برازش شده جهت توصیف روند تغییرات رینولدز بر حسب وبر----- ۸۳

فصل ۱

مقدمه‌ای بر جریان‌های چندفازی

۱-۱- مقدمه

دینامیک جریان چندفازی با ذرات گسسته معمولا در بسیاری از سیستم‌های مهندسی رایج است. بدین جهت، توصیف دقیق جریان چندفازی بعنوان دانشی که منجر به افزایش عملکرد و کاهش هزینه در سیستم‌های مهندسی می‌شود، مهم است. چهار حالت اصلی برای جریان چندفازی با ذرات گسسته وجود دارد که دربردارنده ذرات جامد در گاز، قطرات مایع در گاز، ذرات جامد در مایع و حباب‌های گازی در مایع است. در تحقیق حاضر به بررسی دینامیک جریان مایع در گاز، یعنی جریان قطره‌ای، می‌پردازیم.

۱-۲- کاربرد جریان‌های دوفازی قطره‌ای

جریان دوفازی قطره‌ای نوعی جریان دوفازی است که شامل فاز مایع بصورت قطره است که فضای اطراف آن را گاز احاطه کرده است. اساسا قطره به عنوان فاز گسسته، دارای قطری بین $0.5\mu m$ و 10 cm است که سطح مشترک آن را محیط اطراف جدا می‌کند. محیط اطراف، یعنی فاز گاز، فاز پیوسته نام می‌گیرد [۱].

تاثیر قطرات در بسیاری از فرایندهای صنعتی و طبیعی برای بسیاری از محققین شناخته شده است. در پروژه‌های صنعتی رفتار قطرات یکی از پارامترهای مهم در طراحی سیستم‌ها است و گستره وسیعی از جریان‌های چندفازی را دربرمی‌گیرد. برای مثال در احتراق موتورهای دیزلی، دانستن رفتار قطره تاثیر مهمی در پیش‌بینی زمان تاخیر احتراق و فرایندهای مرتبط با آن دارد. اگر بتوانیم زمان تبخیر کامل قطره را تخمین بزنیم، در فرایندهای احتراق با مشکل سوختن ناقص مواجه نخواهیم شد.



در توربین‌های بخار، رفتار دینامیکی قطراتی را که همراه با بخار، از بویلر با مومنتوم زیاد وارد توربین می‌شوند؛ قابل تحلیل است. چراکه این عامل باعث خوردگی پره‌های توربین می‌شود و خسارات زیادی به دنبال دارد.

در برج‌های خنک کننده آب گرم جهت خنک‌کاری، بصورت افشانه وارد سیستم می‌شود. عبور جریان هوای سرد باعث رانده شدن قسمت اعظمی از این قطرات به خارج از سیستم شده و در نتیجه آن قسمتی از آب جریان یافته در سیکل به هدر می‌رود. لذا لازم است قطر قطرات اسپری شده و همچنین سرعت هوای ورودی بهینه باشد تا به کم شدن هر چه بیشتر این تلفات کمک شود.

تشکیل قطرات و جدایش آن‌ها یکی از مسائل چالش برانگیز در سلول‌های سوختی الکترولیتی پلیمری^۱ (PEFCs) است. مدیریت آب، در بدست آوردن کارکرد بالای این سلول‌ها و نگهداشتن آن در حد مطلوب بسیار مهم است. لذا تحلیل رفتار دینامیکی قطرات آب در کانال PEFC برای مدیریت آب ضروری است.

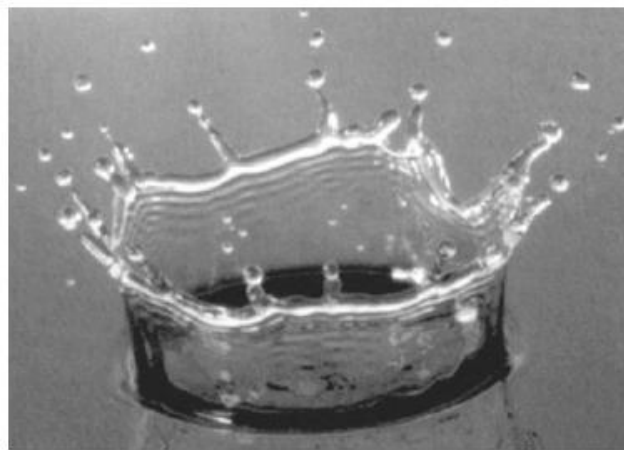
علاوه بر این، کاربرد قطره در میکروکانال‌ها نیز به طور وسیعی وجود دارد. قطرات اغلب به منظور بهبود قابل توجه کیفیت اختلاط استفاده می‌شوند و به اختلاط بیشتر فرایندهای شیمیایی کمک می‌کند. علاوه بر این در فرایندهای مربوط به انتقال دارو، با تولید و دستکاری قطره در ابعاد میکرو، می‌توان قطراتی که حامل مواد دارویی و نشانگرها هستند را با هم ترکیب یا از هم جدا کرد. این ترکیب، جدایش یا دسته بندی قطرات از طریق حرکت قطرات در درون دسته‌ای از میکروکانال‌ها صورت می‌گیرد.

در عملیات مربوط به استخراج مایع-مایع حضور قطرات مطرح است. استخراج مایع که به آن استخراج با حلال هم گفته می‌شود، فرآیندی است که در آن اجزای یک محلول مایع به وسیله تماس با یک حلال جدا می‌شود. حلال پس از جداسازی ماده مورد نظر از واحد خارج و ماده درون آن در واحدی دیگر خارج شده و به این ترتیب ماده مورد نظر با خلوص بالا به دست می‌آید. این فرایند جداسازی به وفور در

^۱ polymer electrolyte fuel cells

صنایع مختلف استفاده می‌شود. اطلاع از سرعت صعود قطره در این سیستم‌ها از اهمیت اساسی برخوردار است. چرا که زمان حضور قطره‌ها در ستون‌های استخراج، برای محاسبه میزان انتقال جرم در طول عملیات مهم است.

در راستای مطالعهٔ دینامیک جریان قطره‌ای، برخورد قطره به سطح نیز همواره از مباحث مورد توجه محققین بوده است. به عنوان نمونه، مرطوب کردن اجباری^۱ یکی از مکانسیم‌های مهم در فرایندهای پوشش است. در این فرایندها، لایه‌ای نازکی از مایع به طور مداوم روی سطح جامد در حال حرکت ته‌نشین می‌شود. این کار در ساخت کامپوزیت و طراحی فرایندهای قالب‌ریزی مهم است. به همین علت اطلاع از دینامیک برخورد قطره ضروری است. از طرفی، هنگامی که افشانه به سطح مورد نظر برخورد می‌کند، پدیده‌های مختلفی اتفاق می‌افتد. هر یک از قطرات با برخورد به فیلم مایع روی سطح، حفره‌هایی روی آن ایجاد می‌کنند که ممکن است اطراف آن برآمده شده و لایهٔ نازکی از مایع پیرامون آن بوجود آید. این پدیده اصطلاحاً تاج^۲ نام می‌گیرد. شکل (۱-۱) این الگو را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱) برخورد قطره به لایهٔ نازکی از فیلم مایع و تشکیل تاج [۲]

تاج‌های تشکیل شده به قطرات در حال سقوط برخورد می‌کنند و روی حرکت آنها اثر می‌گذارند. علاوه بر این ممکن است قطرات پیش از برخورد به سطح، با یکدیگر تصادم داشته باشند که بدین ترتیب

^۱ Forced wetting

^۲ crown



تبادل جرم، مومنتوم و انرژی اتفاق می‌افتد. به دلیل برخورد پیوسته قطرات و اندرکنش مابین قطرات در حال سقوط و فیلم مایع، سطح کاملاً ناپایدار است. در این فرایند، شرایط برخورد متفاوت و در راستای آن، نتایج متفاوت دیده می‌شود. تروپاً و رویسمن [۳] نشان دادند که مدل‌های برخورد قطره منفرد، می‌تواند به برخورد اسپری تُنک^۱ تعمیم داده شود، گرچه این تقریب در اسپری‌های متراکم سوال برانگیز است.

۱-۳- دینامیک سیالات محاسباتی

گرچه دوربین‌های سرعت بالا داده‌های اولیه‌ای را در دسترس قرار می‌دهند اما مقیاس‌های کوچک و سرعت‌های بالا، انجام آزمایش‌ها را دشوار می‌سازد. به همین دلیل شبیه‌سازی عددی این پدیده بسیار مورد توجه واقع شده است. از طرفی، شبیه‌سازی عددی مستقیم^۲ اسپری، فراتر از توانمندی محاسباتی حال حاضر است. زیرا حرکت قطرات و برخورد آنها به سطح، شامل محدوده گسترده‌ای از مقیاس‌های طولی و زمانی متفاوت است. در هر اسپری، قطرات دارای سرعت‌های و قطرهای مختلفی هستند که با برخورد به یکدیگر و برخورد به سطح پدیده بیش از پیش پیچیده می‌شود. ممکن است مقیاس طولی فیلم مایع ایجاد شده روی سطح، بسیار بزرگتر از قطر هر قطره باشد. همچنین این امکان وجود دارد که مقیاس زمانی نوسان فیلم مایع روی سطح، بسیار بزرگتر از مقیاس زمانی برخورد قطره به آن باشد. لذا روشی قطعی برای مدلسازی دینامیک اسپری با تحلیل رفتار تک‌تک قطرات آن امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین برای درک بهتر پدیده بعنوان گام اول می‌توان المان کوچکی را بعنوان نماینده استفاده کرد.

از سوی دیگر پیشرفت تکنولوژی و الگوریتم‌های حل عددی، استفاده از روش‌های محاسباتی را جهت تحلیل دینامیک جریان امکان‌پذیر می‌سازد. شبیه‌سازی‌های عددی نتایجی را ارائه می‌کند که نه تنها شامل جزئیاتی از تغییر شکل قطرات و چگونگی برخورد آنها به سطح می‌شود، بلکه تغییرات میدان‌های سرعت، فشار و دما را که دسترسی به آنها در طول آزمایش‌ها امکان‌پذیر نیست، گزارش می‌دهد. بدین

^۱ sparse

^۲ Direct Numerical Simulation (DNS)

منظور، به کمک علم دینامیک سیالات محاسباتی^۱ به عنوان ابزاری ضروری برای جمع کردن اطلاعات برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های سیالاتی، به بررسی اثرات میدان جریان روی تغییر شکل قطره در حال سقوط در هوا و دینامیک برخورد آن به سطح می‌پردازیم.

در کار حاضر برای شبیه‌سازی میدان جریان دوفازی از نرم افزار متن‌باز اوپن‌فوم^۲ استفاده شده‌است. روش عددی به کار گرفته شده، از روش حجم محدود^۳ استفاده می‌کند که با استفاده از الگوریتم پیزو^۴، معادلات ناویر-استوکس حل شده و میدان سرعت و فشار بدست می‌آید. تعقیب سطح مشترک دو فاز در هر لحظه با استفاده از روش حجم سیال^۵ صورت می‌گیرد. روش *VOF* که یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های محاسباتی برای تعقیب سطح مشترک دو فاز است، یک روش دنبال کردن حجم را ارائه می‌کند. ایده اصلی این روش در تعریف تابع حجم است که مقدار صفر را برای فاز اول، یک را برای فاز دوم و مقادیری بین صفر و یک را برای سلول‌های شامل سطح مشترک قرار می‌دهد. این روند باعث حفظ بقای جرم می‌شود و همچنین مدت زمان محاسباتی آن خیلی بالا نخواهد بود. به موجب این ویژگی‌ها استفاده از این روش رواج بیشتری داشته‌است. در واقع در روش *VOF* حرکت سطح مشترک دنبال نمی‌شود بلکه حجم هر فاز در هر سلول بدست می‌آید و به همین دلیل گاهی این روش را با نام روش تعقیب حجم بکار می‌برند [۴].

۴-۱- جمع‌بندی

در تحقیق حاضر، به بررسی جنبه‌های مختلف تغییر شکل قطره پرداخته شده‌است. علاوه بر سقوط قطره، برخورد قطره و در طی آن رژیم مختلف بوجود آمده مورد بررسی قرار گرفته‌است. شبیه‌سازی‌ها به کمک نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم بر پایه مدل حجم سیال (*VOF*) انجام گرفته‌است.

^۱ computational fluid dynamics (CFD)

^۲ OpenFoam

^۳ Finite Volume

^۴ Pressure implicit with splitting of operator

^۵ Volume Of Fluid



در ادامه، در فصل دوم، مروری کلی بر تحقیقات انجام شده در زمینه جریان قطره صورت گرفته و جایگاه تحقیق حاضر در میان تحقیقات قبلی معرفی شده است.

در فصل سوم، روش *VOF* معرفی شده است. همچنین مروری بر روش‌های رایج مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های عددی جریان دوفازی برای تعقیب سطح مشترک انجام شده است. علاوه بر این توضیح مختصری از الگوریتم حل معادلات در نرم‌افزار اوپن‌فوم ارائه شده است.

در فصل چهارم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است. در این فصل تاثیر پارامترهایی همچون قطر، دانسیته، سرعت اولیه، فشار روی جریان مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این برخورد قطره روی سطح جامد و روی سطح با لایه ای از سیال هم جنس خود بررسی شده و رژیم‌های مختلف بدست آمده است. ناپایداری سطح قطره هم مورد توجه قرار گرفته و با نتایجی ارائه شده است. تمامی نتایج با داده‌های تجربی صحت آزمایی و با نتایج مقالات دیگر مقایسه شده است.

فصل ۲

مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱- مقدمه

به دلیل پیچیدگی مساله و ارتباط آن با صنعت، در دهه‌های اخیر مطالعات بسیاری روی دینامیک قطره بصورت آزمایشگاهی، تئوری و عددی انجام گرفته‌است. از آنجایی که امکان بررسی تمام مطالعات صورت گرفته، وجود ندارد، به برخی از تحقیقاتی که بسیار مورد توجه بوده‌اند و مرتبط با کار حاضر هستند، اشاره می‌شود. پیشینه تحقیقات انجام گرفته، به دو دسته حرکت قطره در سیال بی‌نهایت و برخورد قطره به سطح تقسیم بندی شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

۲-۲- حرکت قطره در سیال بی‌نهایت

به دلیل پیچیدگی مساله، اولین تحقیقات گزارش شده در این زمینه تجربی بوده است. در سال ۱۹۷۱ گریس^۱ و همکاران [۱] تحقیق گسترده‌ای روی حرکت آزادانه قطرات در محیط با دانسیته‌های مختلف، به صورت تجربی انجام دادند. ایشان نشان دادند که برای قطرات در حال سقوط و حباب‌های در حال بالارفتن در محیط محدود، این امکان وجود دارد که بصورت گرافیکی رابطه‌ای بر حسب سه عدد بی‌بعد اتووس، مورتون و رینولدز برقرار کرد. نمودار ارائه شده، که به نمودار گریس مشهور است، تغییرشکل‌های مختلف در سرعت‌های متفاوت فاز گسسته را نشان می‌دهد.

در سال ۱۹۸۲ رایسکین^۲ و لیل^۳ [۵] حرکت قطره را برای چند مقدار اتووس و مورتون خاص که عدد رینولدز متناظر آن بالا بود، مورد مطالعه قرار دادند. همچنین حرکت قطره را در یک سیال با متحرک با سرعت بالا به صورت تجربی بررسی نمودند. نتایج ایشان نشان داد نمودار گریس برای حالت‌هایی که سیال

^۱ Grace

^۲ Ryskin

^۳ Leal

متحرک سرعت کمی دارد همچنان برقرار است اما برای حالتی که جریان سیال پیوسته سرعت بالایی دارد نمی‌توان از آن استفاده نمود.

باگا^۱ و وبر^۲ در سال ۱۹۸۱ [۶]، در ادامه کار گریس و همکاران حالت‌های بیشتری را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان با استفاده از نتایج آزمایشات خود و نتایج تجربی ارائه شده توسط دیگران، نمودار گریس را توسعه دادند. نمودار آنها علاوه بر اینکه نتایج گریس و همکاران را تایید می‌کرد، در برخی نواحی پیش‌بینی دقیق‌تری از شکل نهایی قطره داشت.

در اغلب مطالعات مربوط به تغییر شکل قطره، سرعت حد قطره نیز قابل تامل است. یکی از اولین محاسبات سرعت نهایی قطره، در سال ۱۹۵۵ توسط هو^۳ و کینتر^۴ [۷] انجام شد. ایشان رابطه‌ای را برای سقوط قطره در آب ارائه دادند. این رابطه برای سیستم‌های با کشش سطحی بالا گسترش داده شد.

یک سال بعد در سال ۱۹۵۶، کلی^۵ و تریبال^۶ [۸] رابطه‌ای قابل قبول برای سیستم‌های با کشش سطحی متوسط ارائه دادند. این تحقیقات در سیستم‌های شیمیایی غیرخالص استاندارد استفاده شدند.

در مطالعات دیگری [۹، ۱۰] خلوص سیستم‌های مورد بررسی بیشتر بوده است و سرعت‌های نهایی بزرگتری بدست آمدند. گاهی وجود ناخالصی باعث پایداری بیشتر می‌شود. منظور از پایداری، متلاشی نشدن^۷ قطره است. به طوری که حرکت قطره در مقایسه با نبود ناخالصی، با سرعت بیشتر و بدون شکست ادامه می‌یابد. این اختلاف مهم محسوب شد و به تاثیر ناخالصی که باعث تثبیت سطح مشترک و کاهش سیرکولاسیون داخلی است، نسبت داده شد [۱۱].

^۱ Bhaga

^۲ Weber

^۳ Hu

^۴ Kintner

^۵ Klee

^۶ Treybal

^۷ break up

در سال ۱۹۷۹ پیلهوفر^۱ و مؤس^۲ [۱۲] رابطه‌ای برای سرعت نهایی قطرات صلب گسترش دادند که از روابط رایج در محاسبه سرعت نهایی قطره است.

در سال ۱۹۹۴ گوردون^۳ و همکاران [۱۳] روابط مختلف را بر اساس اعداد مورتون مختلف پیشنهاد کردند. برای مورتون‌های کم ($M < 10^{-11}$)، قطرات را می‌توان بصورت کره‌های صلب در نظر گرفت و روابطی نظیر آنچه که پیلهوفر و مؤس ارائه کردند، بکار گرفت. برای اعداد مورتون در محدوده $(10^{-11} < M < 10^{-7})$ قانون ویگنس^۴ [۱۴] توصیه میشود در حالی که برای $(10^{-5} < M < 10^{-7})$ مدل کلی و تریبال [۸] پیشنهاد می‌شود. حتی برای $(M > 10^{-5})$ رابطه ضمنی گریس و همکاران باید استفاده شود.

در سال ۲۰۰۴ هنجکه^۵ [۱۵] رابطه‌ای را که ترکیبی از دو مدل است، ارائه کرد. مدل اول رفتار قطرات صلب در حال صعود را توصیف و دیگری رفتار نوسانات و تغییر شکل قطره را بیان می‌کند. این دو مدل به کمک یک تابع انتقال که شامل یک پارامتر قابل تنظیم برای تعیین رفتار قطره بعنوان یک جسم صلب یا در قطره حال نوسان است به هم مرتبط می‌شوند. کل مدل شامل دو پارامتر ثابت و سه پارامتر قابل تنظیم است که برای تخمین این پارامترها نیاز به داده‌های آزمایشگاهی است.

با پیشرفت علم دینامیک سیالات محاسباتی تلاش برای حل مسائل دوفازی به روش عددی، آغاز گردید. وجود سطح مشترک بین دو سیال سبب پیچیدگی حل مساله به روش عددی شده و محققین ناگزیر به ابداع روش‌های خاصی نمود که در آن‌ها علاوه بر حل معادلات جریان هر دو فاز، حرکت و تغییر شکل مرز مشترک بین دو سیال نیز تحلیل شود. روش حجم سیال و سطوح هم تراز^۶ از جمله روش‌های رایج در تعقیب سطح مشترک دو فاز هستند.

^۱ Pilhofer

^۲ Mewes

^۳ Gourdon

^۴ Vignes

^۵ Henschke

^۶ Level set

در سال ۲۰۰۶ دشیپند^۱ و زیمرمن^۲ [۱۵] با استفاده از روش LS به شبیه‌سازی عددی حرکت قطره پرداختند. ایشان تغییر شکل قطره را با تغییر اعداد بی بعد مورتون و اتووس بررسی کردند و ضریب انتقال جرم را در طول حرکت قطره در رینولدزهای پایین بدست آوردند.

در سال ۲۰۰۷ ساسمن^۳ و همکاران [۱۶] از روش ترکیبی حجم سیال و سطوح هم تراز ($CLSVOF$) برای مدلسازی حرکت حباب استفاده کردند. آنها حل خود را برای حباب‌هایی با حالت اولیه غیرکروی تعمیم دادند و نتیجه گرفتند که شکل نهایی حباب در اکثر نواحی نمودار گریس مستقل از شکل اولیه آن است.

در سال ۲۰۱۱ اسورث^۴ و همکاران [۱۷] حرکت قطره تولوئن در آب را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. شبیه‌سازی با استفاده از روش LS انجام شد و سرعت نهایی قطره و تغییر شکل آن برای قطرهای مختلف بدست آمد.

در همین سال، انصاری و نیموری [۱۸] با استفاده از روش LS به شبیه‌سازی حرکت حباب در سیال بی‌نهایت پرداختند. ایشان اثر ویسکوزیته را در سیرکولاسیون داخل قطره بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش نسبت ویسکوزیته موجب افزایش سیرکولاسیون داخلی قطره می‌شود.

علاوه بر این در سال ۲۰۱۲ انصاری و همکاران [۱۹] اثر جریان مغناطیسی را در حرکت حباب به روش LS مدلسازی کردند و به این نتیجه رسیدند که می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی حرکت حباب و تغییر شکل آن را کنترل کرد.

۲-۳- پدیده برخورد قطره

پدیده برخورد قطره به صفحه تاکنون موضوع مطالعه گسترده عددی، آزمایشگاهی و تئوری بوده است. برخورد قطره به صفحه را در دو دسته کلی: (۱) برخورد قطره به صفحه جامد (۲) برخورد قطره به

^۱ Deshpande

^۲ Zimmerman

^۳ Sussman

^۴ Eiswirth



لایه‌ای از سیال تقسیم می‌شود. در هر بخش شرایط ویژه‌ای که یک پدیده ایجاد می‌شود، مطرح است. در برخورد قطره به صفحه جامد موضوعاتی چون پخش^۱ سیال روی دیواره، چلپ و چلوب^۲ و بالا جستن^۳ آن از روی دیواره، و در برخورد قطره به سیال علاوه بر این موضوعات اتصال دو سیال، کویتاسیون یا به دام افتادن هوا در لایه سیال بحث شده‌است. علاوه بر این رژیم‌های مختلفی از جمله تاج متقارن^۴، تاج با اسپایک متقارن^۵ و تاج بی‌قاعده^۶ برای این پدیده تعریف شده‌است [۲].

در آزمایش‌هایی که در سال ۲۰۰۱ رایوبو^۷ و همکاران [۲۰] انجام دادند، نتایج متفاوتی از برخورد قطره را به سطح جامد گزارش شد. در شکل (۱-۲)، شش حالت مختلف برخورد قطره بر سطح جامد نشان داده شده است که الگوهای متفاوت جریان را با گذشت زمان نشان می‌دهد. هر یک از این الگوها بیانگر رژیم‌های مختلفی هستند.

^۱ Spreading

^۲ Splashing

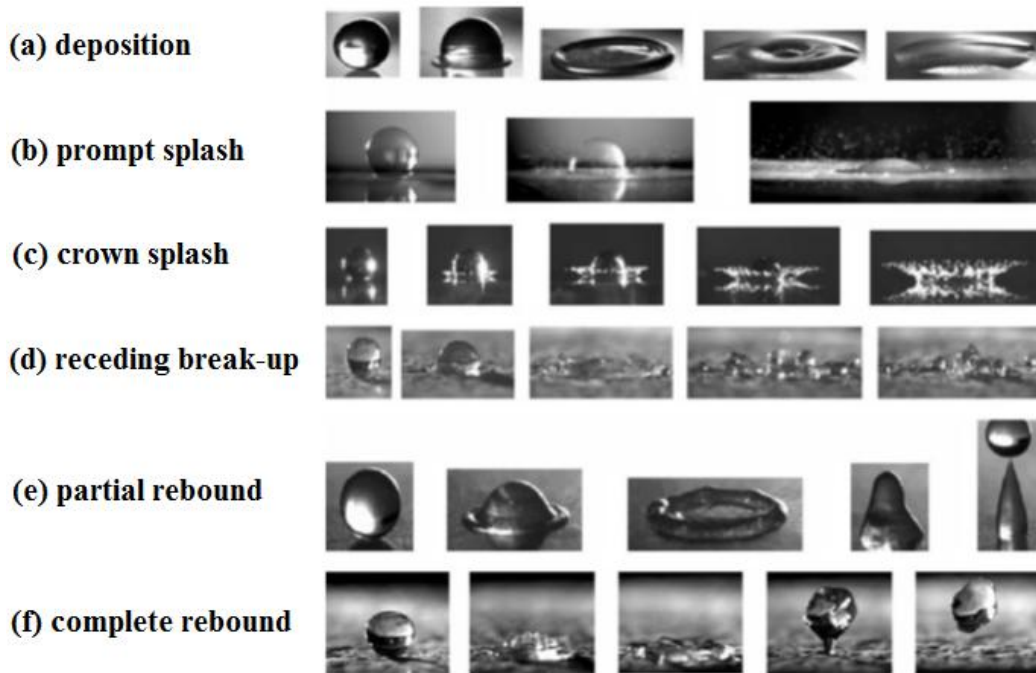
^۳ Bouncing

^۴ regular axisymmetric crown

^۵ regular crown with spikes

^۶ irregular crown

^۷ Rioboo



شکل (۱-۲) الگوهای مختلف جریان در برخورد قطره به سطح [۲۰]

در سال ۲۰۰۳ جوسیرند^۱ و زالسکی^۲ [۲۱] برای انتقال بین دو پدیده تجزیه^۳ و پخش، عدد بدون بعد سامرفلد $K = We^{1/2} Re^{1/4}$ را معرفی کردند که We و Re اعداد بی بعد رینولدز و وبر است. ایشان نشان دادند اگر سرعت قطره بسیار بالا باشد یا قطره به سطح جامد زبر برخورد کند، قطرات ثانویه خیلی سریع شکل می گیرند، اما در سرعت های پایین و در برخورد با سطح جامد هموار ممکن است قطرات ثانویه شکل نگرفته و قطره به آرامی بر روی سطح جامد پخش شود. برای مقادیر بزرگتر از سامرفلد بحرانی تجزیه و مقادیر کوچکتر از آن پخش روی می دهد. عدد سامرفلد بحرانی در حدود ۵۰ می باشد.

در سال ۲۰۰۷، نیکولوپولوس^۴ و همکاران [۲۲] پدیده چلپ چلوب ناشی از برخورد قطره به فیلم سیال را با روش تعقیب سطح حجم سیال و روش گسسته سازی حجم محدود شبیه سازی کردند. برای

^۱ Josserand

^۲ Zaleski

^۳ Deposition

^۴ Nikolopoulos

پیگیری دقیق سطح، روش پالایش محلی مش در نزدیکی سطح استفاده شد. در این مطالعه به دو عامل: (۱) ناپایداری ریلی، (۲) تنش سطحی در ایجاد قطرات ثانویه پس از برخورد قطره به دیواره، اشاره شده است. در سال ۲۰۰۹، بربرویک^۱ و همکاران [۲۳] در یک مطالعه عددی، تئوری و آزمایشگاهی به بررسی برخورد قطره به فیلم محدود سیال پرداختند. در این مطالعه، دینامیک برخورد قطره بر روی سطح مایع، شکل حفره ایجاد شده بر روی سطح فیلم سیال، تشکیل و انتشار موج‌های کاپیلاری^۲ و نیز ضخامت فیلم سیال روی دیواره شبیه‌سازی و بررسی شد. با استفاده از تصویربرداری با سرعت بالا تاثیر برخی از پارامترهایی همچون ضخامت فیلم سیال، سرعت قطره و ویژگی‌های فیزیکی دوفاز همچون ویسکوزیته و تنش سطحی بر روی تغییر شکل دهانه حفره مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی عددی در این مطالعه از مدل تعقیب سطح حجم سیال موجود در نرم افزار اوپن فوم استفاده شده است.

یکی از مسائل مرتبط با برخورد قطره به سطح، کاپیلاری سطح است که با زاویه تماس مشخص می‌شود. زاویه تماس، زاویه بین سطح جامد و قطره است. در بسیاری از فرایندهای صنعتی، سرعت برخورد قطره و یکنواختی تری^۳ سطح باید به نحوی کنترل شود تا بتوان الگوهای جریان را پیش‌بینی کرد. در سرعت‌های بالا، هنگامی که قطره به ماکزیمم نسبت پخش خود می‌رسد، کشش سطحی و تری سطح باعث به عقب رانده شدن قطره می‌شوند. براساس کاپیلاری صفحه جامد، این سطح می‌تواند آب‌دوست^۴ (زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه) یا آبگریز^۵ (زاویه تماس بیش از ۹۰ درجه) باشد. اگر سطح آبگریز باشد، الگوی جریان *receding break-up* گسترش می‌یابد. اندازه زاویه تماس به پارامترهای مختلفی، از جمله اعداد بدون بعد کاپیلاری و وبر، نسبت چگالی و ویسکوزیته دو سیال مایع و گاز، سرعت خط برخورد و جنس سطح وابسته است [۲۴].

^۱ Berberovic

^۲ capillary

^۳ wettability

^۴ hydrophilic

^۵ hydrophobic

خط برخورد (خط سه گانه) به معنی تقاطع بین دو فاز با سطح جامد است. زاویه ماکروسکوپی که بین سطح مشترک و سطح جامد ایجاد می شود، زاویه برخورد نام دارد. زاویه برخورد استاتیکی θ_s (زاویه تعادلی^۱) بطور ایده آل ویژگی واحد ماده است و مقدار آن از تعامل بین سه سطح مشترک تعیین می شود. در عمل زوایای پیشرو^۲ θ_a و پسرو^۳ θ_r به ترتیب بزرگترین و کوچکترین زوایای برخورد قابل دستیابی برای زمانی است که سرعت خط سه گانه به صفر می رسد. همچنین زاویه برخورد تجربی که خط برخورد نسبت به سطح جامد دارد، زاویه برخورد دینامیکی θ_d نام دارد. برخلاف زاویه برخورد استاتیکی، زاویه برخورد دینامیکی مشخصه ای از ماده نیست و روابط زیادی برای آن برحسب عدد موئینگی و سرعت خط برخورد پیشنهاد شده است. در محاسبات عددی اغلب زاویه برخورد دینامیکی طوری تنظیم می شود که بصورت تابعی از زاویه پسرو و پیشرو تغییر کند و سرعت خط برخورد بین محدوده $\pm U_{CL}$ باشد. بیش از این محدوده، زاویه تماس بسته به علامت سرعت خط برخورد، مقدار θ_a یا θ_r را خواهد داشت [۲۷-۲۵]. سرعت خط برخورد سرعت ماده نیست و به آسانی نمی تواند در میدان سرعت برون یابی شود. این سرعت از دیفرانسیل شعاع منطقه تر روی دیوار بدست می آید (رابطه ۲-۱).

$$U_{CL} = \frac{dr_{CL}}{dt} \quad (1-2)$$

۲-۳-۲ - مدل های زاویه تماس

مطالعات زیادی روی زاویه تماس دینامیکی انجام گرفته و مدل های بسیاری برای محاسبه این زاویه توسط محققین پیشنهاد شده است. در تمامی مدل ها این زاویه بصورت تابعی از سرعت خطی سه گانه است. در ادامه تعدادی از مدل های رایج معرفی می شوند.

^۱ equilibrium

^۲ advancing

^۳ receding

در سال ۱۹۸۶ یکی از نتایج مهم مربوط به سرعت پخش^۱ قطره روی سطح با زاویه دینامیکی، بصورت تحلیلی توسط کوکس^۲ [۲۸] ارائه شد.

$$Ca = \left(\ln(\varepsilon^{-1}) - \frac{Q_1}{f(\theta_d)} + \frac{Q_2}{f(\theta_w)} \right)^{-1} [g(\theta_d) - g(\theta_w)] + O\left(\frac{1}{\ln(\varepsilon^{-1})}\right)^3 \quad (2-2)$$

در این رابطه، θ_d زاویه برخورد دینامیکی، θ_w زاویه دیواره که معمولاً با زاویه تعادلی θ_e در ارتباط است، Q_1 و Q_2 اعداد ثابتی هستند که به جریان خارجی و میزان لغزش دیواره مربوط می‌شود، ε پارامتر بی‌بعد کوچک مربوط به خط برخورد است، $f(\bullet)$ و $g(\bullet)$ توابعی خاص هستند که توضیحات بیشتر مربوطه در مرجع [۲۸] وجود دارد.

تمامی مدل‌های ضمنی زاویه برخورد دینامیکی ساده شده رابطه (۲-۲) می‌باشند. یکی از روابطی که استفاده گسترده‌ای در مدلسازی‌ها دارد، زاویه برخورد بدست آمده از قانون هافمن^۳-ونیو^۴-تانر^۵ است که برای اعداد موئینگی کوچک بکار می‌رود.

$$\theta_d^3 - \theta_e^3 \cong c_T Ca \rightarrow \theta_d = (72Ca + \theta_e^3)^{1/3} \quad (3-2)$$

که $c_T \approx 72$ یک ثابت عددی است که در سال ۱۹۷۵ توسط هافمن [۲۹] معرفی شده است.

در سال ۱۹۷۹ جیانگ^۶ و همکاران [۳۰] یک رابطه تجربی که داده‌های آزمایشگاهی را به خوبی به هم ارتباط می‌دهد، ارائه کردند. در این مدل زاویه برخورد دینامیکی همراه با سرعت جریان افزایش یافته و برای اعداد موئینگی بالا بطور مجانبی به زاویه ۱۸۰ درجه می‌رسد.

spreading velocity^۱

Cox^۲

Hoffman^۳

Voinov^۴

Tanner^۵

Jiang^۶

$$\frac{\cos(\theta_e) - \cos(\theta_d)}{\cos(\theta_e) + 1} = \tanh(4.96Ca^{0.702}) \quad (4-2)$$

اخیرا در سال ۱۹۹۳ کیستلر رابطهٔ ضمنی برای محاسبهٔ زاویهٔ برخورد دینامیکی بصورت زیر تعریف کرد.

$$\theta_d = f_{Hoff} [Ca + f_{Hoff}^{-1}(\theta_e)] \quad (5-2)$$

که $f_{Hoff}^{-1}(\bullet)$ تابع معکوس تابع هافمن $f_{Hoff}(\bullet)$ است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_{Hoff}(x) = \cos^{-1} \left\{ 1 - 2 \tanh \left[5.16 \left(\frac{x}{1 + 1.31x^{0.99}} \right)^{0.706} \right] \right\} \quad (6-2)$$

همزمان در سال ۱۹۹۴ کالیاداسیس^۱ [۳۰] مدل دیگری برای زاویهٔ دینامیکی بصورت زیر ارائه کرد.

$$|\tan \theta_d| = 7.48Ca^{1/3} - 3.28\lambda^{0.04} Ca^{0.293} \quad (7-2)$$

که $\lambda = 10^{-8}$ است.

در سال ۲۰۰۹ مدلی توسط یوکویی^۲ و همکاران [۳۲] پیشنهاد داده شد. مدل ایشان ترکیبی از مدل هافمن-ونیو-تانر (رابطهٔ ۱-۲) و مدل رابطهٔ (۸-۲) است.

$$\theta(U_{CL}) = \begin{cases} \theta_a & \text{if } U_{CL} \geq 0 \\ \theta_r & \text{if } U_{CL} < 0 \end{cases} \quad (8-2)$$

در این مدل دو پارامتر ثابت وجود دارد که وابسته به داده‌های آزمایشگاهی است (k_r و k_a). این

مدل محدودیتی در استفاده از عدد موئینگی ندارد (رابطهٔ ۹-۲).

$$\theta(U_{CL}) = \begin{cases} \min \left[\theta_e + \left(\frac{Ca}{k_a} \right)^{1/3}, \theta_a \right] & \text{if } U_{CL} \geq 0 \\ \max \left[\theta_e + \left(\frac{Ca}{k_r} \right)^{1/3}, \theta_r \right] & \text{if } U_{CL} < 0 \end{cases} \quad (9-2)$$

^۱ Kalliadasis

^۲ Yokoi

با به کار گیری این مدل‌ها، شبیه‌سازی‌ها برای برخورد قطره انجام گرفت و جزئیات الگوهای جریان پیش بینی شد.

در سال ۱۹۹۵ فوکایی^۱ و همکاران [۳۳] با استفاده از یک روش المان محدود برخورد قطره روی سطح صاف را شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد. محدوده سرعت‌های برخورد در این تحقیق، ۱-۲ m/s بود. نتایج حاکی از این بود که در $U_{CL} = 0$ الحاق زوایای پیش‌رو و پس‌رو پیش‌بینی بهتری از پدیده دارند.

در سال ۱۹۹۶ پسندیده‌فرد^۲ و همکاران [۳۴] برخورد قطره با سطح را با استفاده از الگوریتم SOLA-VOF شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق زاویه برخورد در هر گام زمانی تغییر می‌کرد و نتایج با داده‌های تجربی ایشان تطابق خوبی نشان داد.

در سال ۲۰۰۰ بوسمن^۳ و همکاران [۳۵] به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی پدیده پخش قطره روی سطح پرداختند. ایشان از متوسط زاویه دیده شده در آزمایش‌ها برای انجام شبیه‌سازی استفاده و پدیده پخش را در سرعت‌های بالا (بیش از ۱/۵ m/s) مطالعه کردند.

در سال ۲۰۰۵ گونجال^۴ و همکاران [۳۶] برخورد قطره آب را بر روی تفلون و شیشه بصورت آزمایشگاهی و عددی بررسی نمودند. نتایج در محدوده رینولدز ۲۵۰-۵۵۰ و وبر ۲-۲۰، گزارش شد. روش عددی بکار رفته بر پایه روش حجم سیال بود. ایشان در شبیه‌سازی‌ها از متوسط زاویه دینامیکی دیده شده در آزمایش‌ها استفاده کردند. نتایج حاصل از مدلسازی هماهنگی خوبی با آزمایش‌ها داشت. همچنین در این تحقیق رژیم‌های مختلف مربوط به برخورد قطره دیده شد.

^۱Fukai

^۲ Pasandideh-Fard

^۳ Bussmann

^۴ Gunjal

در سال ۲۰۰۹ یوکویی و همکاران [۳۲] این پدیده را با استفاده از کوپلینگ روش حجم سیال و سطوح هم تراز (*CLSVOF*) شبیه‌سازی و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی خود مقایسه کردند. ایشان با ارائه رابطه ۱۰، این مدل را برای قطره آب با سرعت برخورد ۱m/s صحت سنجی کردند.

در سال ۲۰۱۲ گانسان^۱ [۳۷] تاثیر مدل‌های زاویه دینامیکی را در برخورد قطره روی سطح، مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که مدل‌های زاویه برخورد برای $\theta_e > 140^\circ$ ، تاثیر بر دینامیک جریان ندارند. در حالی که در دیگر زوایا، هر یک از مدل‌ها تاثیر متفاوتی را بخصوص در مرحله برگشت دارند. در نهایت، مدل زاویه تعادلی به عنوان ساده‌ترین مدل، برای انجام شبیه‌سازی‌ها پیشنهاد داده شد.

۲-۴- جمع‌بندی

در تحقیق حاضر، همانگونه که پیشتر بدان اشاره شد، تغییر شکل قطره در اثر میدان جریان مورد بررسی قرار گرفته و علاوه بر سقوط قطره، برخورد قطره و در طی آن رژیم مختلف بوجود آمده مدلسازی شده‌است. شبیه‌سازی‌ها برای تسخیر سطح مشترک، با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم (نوشته شده توسط OpenFoamLtd)، در چارچوب دینامیک سیالات محاسباتی (*CFD*)، انجام شده است. مدل تعقیب سطح مشترک به کار رفته در این نرم‌افزار مدل حجم سیال (*VOF*) است. نوآوری روش عددی به کار رفته در این نرم‌افزار، افزودن ترم جابجایی به معادله است. این ترم بعنوان ترم مصنوعی تراکمی در معادله انتگرالی است که برای خنثی کردن تاثیر دیفیوژن عددی اعمال می‌شود. جریان مورد مطالعه آرام و از روش حجم محدود استفاده شده‌است. بطور کلی کارهای انجام گرفته در این پژوهش بصورت زیر است.

- تحلیل حرکت قطره با دانسیته و قطرهای مختلف و در حال سقوط در هوا.
- بررسی سرعت حد قطره.

^۱ Ganesan

^۲ non-wetting



- محاسبه ضریب پسا^۱.
- متلاشی شدن قطره در فشار زیاد.
- برخورد قطره با سطح جامد و بررسی پدیده‌های مختلفی از جمله پخش شدن روی سطح^۲، نوسان^۳ و ریباندینگ^۴.

لازم به ذکر است در طول شبیه سازی‌ها، برای امکان بررسی مدل‌های ارائه شده توسط افراد دیگر کدنویسی انجام شد.

شبیه‌سازی‌های عددی جریان‌های مختلف مربوط به اسپری قطرات، به کمک روش‌های تئوری، درک جزئیات دینامیک جریان را امکان پذیر می‌سازد. مشخصاً نتایج عددی جزئیات جریان را که در آزمایش‌ها دور از دسترس هستند، آشکار می‌کند و داده‌هایی برای تعریف الگوهای جریان و تحلیل آنها بدست می‌آید.

^۱ Drag

^۲ Splashing

^۳ Oscillation

^۴ Rebounding

فصل ۳

الگوریتم حل عددی

۳-۱- مقدمه

به دلیل پیشرفت تکنولوژی و بهبود امکان محاسباتی، روش‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان در سطوح آزاد در قالب دینامیک سیالات محاسباتی بسیار مورد توجه واقع شده است. حتی پس از سه دهه مطالعه، شبیه‌سازی عددی جریان سطوح آزاد^۱ هنوز هم چالش برانگیز است. مسئله اصلی مربوط به زمان و مکان دقیق مدلسازی سطح آزاد است. همچنین وجود نسبت‌های دانسیته بالا در میدان جریان و محاسبات دقیق نیروهای کشش سطحی از مسائل مطرح در این زمینه است.

از این‌رو، در این فصل به معرفی برخی از روش‌های عددی رایج برای مدلسازی حرکت سطح مشترک می‌پردازیم.

۳-۲- روش‌های شبیه‌سازی جریان سطح آزاد

بر پایه متالوژی که برای تعقیب و تسخیر سطح آزاد استفاده می‌شود، دو روش اصلی برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد در دسترس است:

- تعقیب سطح مشترک^۲ (یا ردیابی پیشانی)
- تسخیر سطح مشترک^۳ (یا تعقیب حجم)

روش‌های تعقیب سطح، روش‌های لاگرانژی هستند که شبکه محاسباتی انتخاب شده، با حرکت سطح آزاد، حرکت می‌کند. این روش‌ها سطح آزاد را بصورت یک مرزی که روی آن شرایط مرزی دینامیکی

^۱ free-surface flows

^۲ interface tracking

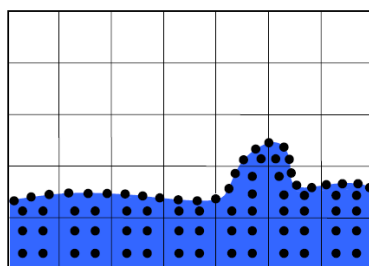
^۳ interface capturing

و سینماتیکی اعمال شده است، در نظر می‌گیرند [۳۸]. معمولاً تنها جریان مایع حل می‌شود و فشار گاز مجاور بعنوان شرط مرزی در طول سطح مشترک وارد می‌شود. گرچه این روش‌ها با تعریف یک سطح مشترک تیز به شبیه‌سازی جریان می‌پردازند، اما در حالت‌هایی که سطح مشترک تغییر شکل زیادی را دارد، با مشکلات مهمی مواجه می‌شوند. حتی ممکن است سطح مشترک کاملاً از بین برود.

از طرف دیگر روش‌های تسخیر سطح، از شبکه اوپلری ثابت استفاده می‌کند که محل سطح مشترک و حرکت آن بوسیله الگوریتم مشخصی بدست می‌آید. این الگوریتم از سه طریق قابل اجراست:

- بوسیله ذرات نشانگر
- بوسیله تعریف تابع سطوح هم تراز^۱
- بوسیله حجم‌های سیال با استفاده از یک تابع نشانگر

روش اول با نام روش نشانگر و سلول^۲ (MAC) توسط هارلو^۳ و ولج^۴ [۳۹] معرفی شده است. در این روش منطقه نزدیک سطح مشترک و یا کل منطقه شبکه‌بندی شده مربوط به یکی از فازها، دارای ذرات ردیاب بدون جرم هستند که میدان جریان موضعی را دنبال می‌کنند (شکل ۱-۳). گرچه این روش می‌تواند سطح مشترک زیر شبکه را تسخیر کند اما در جریان‌هایی با نسبت دانسیته بالا مناسب نیست [۴۰].



شکل (۱-۳) شکل شماتیک روش نشانگر و سلول (MAC) [۴۰]

^۱ Level Set (LS)

^۲ Marker and Cell (MAC)

^۳ Harlow

^۴ Welch

روش دوم، روش سطوح هم تراز (LS) است که توسط اوشر^۱ و ستیان^۲ [۴۱] معرفی شده است. در این روش، سطح مشترک از حل معادله انتقال برای یک تابع فاصله بدست می‌آید. این تابع بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$\varphi(x,t) = \begin{cases} < 0 & \bar{x} \in phase1 \\ 0 & \bar{x} \in interface \\ > 0 & \bar{x} \in phase2 \end{cases} \quad (1-3)$$

مقدار این تابع در هر مکان بیانگر کوتاه‌ترین فاصله از آن نقطه تا سطح مشترک می‌باشد. بعد از حل معادله انتقال، صفرهای این تابع مکان صحیح سطح مشترک را ارائه می‌کند اما دیگر این تابع بیانگر تابع فاصله نمی‌باشد. برای حفظ این تابع به عنوان تابع فاصله باید این تابع را در هر گام زمانی دوباره مقداردهی^۳ کرد. از مزایای این روش تیز نگاه داشتن سطح مشترک می‌باشد. از طرفی یکی از ضعف‌های روش سطوح هم تراز حفظ ضعیف پایستاری جرم است. البته نورگالیو^۴ [۴۲] نشان داد که می‌توان خطا در پایستاری جرم در روش سطوح هم تراز را با بکارگیری روش‌های گسسته‌سازی مرتبه بالا و پالایش مش نزدیک سطح مشترک کاهش داد.

یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های تسخیر سطح مشترک مربوط به دسته سوم، روش حجم سیال است که برای اولین بار توسط هرت^۵ و نیکولس^۶ [۴۳] پیشنهاد شد. در روش‌های مربوط به این دسته‌بندی، یک تابع علامت برای دنبال کردن حجم‌های مختلف سیال‌ها تعریف می‌شود که با حل معادله انتقال بدست می‌آید. مقادیر تابع علامت برای هر فاز صفر و یک می‌باشد اما در سطح مشترک مقادیری بین این دو عدد را

^۱ Osher

^۲ Sethian

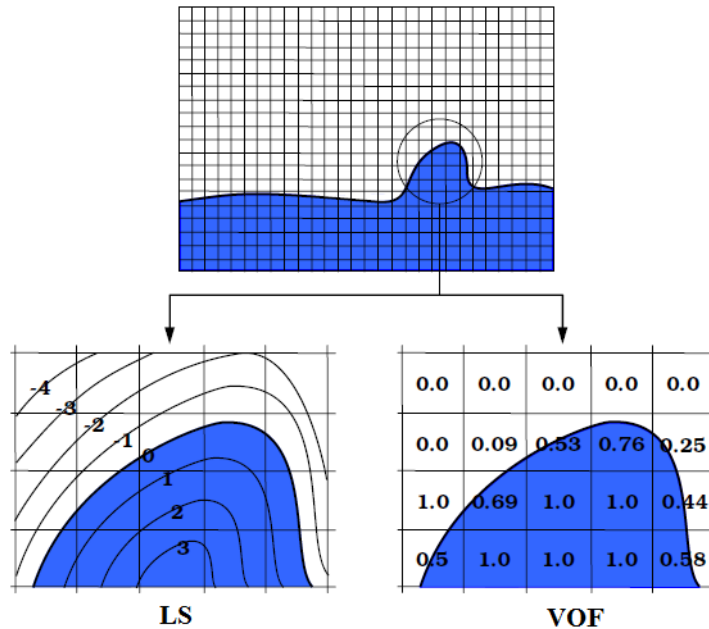
^۳ Re-initialization

^۴ Nourgaliev

^۵ Hirt

^۶ Nichols

دارد. در واقع سطح مشترک، تیز نیست و حالت گذار بین دو فاز وجود دارد. شکل (۲-۳) تفاوت بین دو روش عددی سطوح هم تراز و حجم سیال را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳) شکل شماتیک روش‌های LS و VOF [۴۰]

در نخستین تحقیقات انجام گرفته از جمله در مطالعه هرت و نیکولس [۴۳]، تابع مورد استفاده تنها برای نشان دادن دو دسته از سلول‌ها در نظر گرفته شد. بخشی از سلول‌ها شامل یکی از سیال‌ها و بخشی دیگر بدون سیال (سلول خالی) بود. در واقع یکی از فازها (مایع) حل و از حضور فاز دوم (گاز) صرف نظر می‌شد. در مطالعات اخیر مدل‌های محاسباتی توسعه داده شد و حضور هر دو فاز مطرح شد. از آنجایی که این روش، روش مورد استفاده در پژوهش حاضر می‌باشد، در ادامه به معرفی بیشتر این روش می‌پردازیم.

۲-۲-۳- روش حجم سیال (VOF)

یکی از مشکلات روش VOF عدم اطمینان از حرکت سطح مشترک تعریف شده بدون دیفیوژن عددی است. در این روش توزیع کسر حجمی در سطح آزاد، بصورت کانتور بوده و بصورت مشخص تعریف نشده است بلکه در بخشی از سلول‌های شبکه پخش شده است.

به منظور مرتفع نمودن این مشکل، برای پیگیری سطح مشترک دو روش کلی ارائه شده است:

- روش‌های هندسی بازسازی سطح مشترک و
- روش‌هایی که بر پایهٔ طرح‌های تفاضلی مرتبه بالا^۱ و بدون بازسازی سطح مشترک

اساساً روش‌های هندسی بازسازی سطح مشترک، برای هندسه‌های دو بعدی توسعه داده شده‌اند که سطح مشترک را بصورت دسته‌ای از خطوط مستقیم قطعه قطعه توصیف می‌کنند. در این حالت مسئله برای بدست آوردن بردارهای عمود بر سطح مشترک، با استفاده از توزیع کسر حجمی، حل می‌شود. خطوط مستقیمی که با مقادیر کسر حجمی در هر سلول حاوی سطح مشترک همخوانی کامل دارد، بازسازی می‌شود. در این راستا، چندین مدل پیشنهاد داده شده است که رایج‌ترین آن‌ها دو مدل $PLIC^2$ و $SLIC^3$ است.

در روش $SLIC$ از خطوط مستقیم موازی با یکی از محورهای مختصات برای مدلسازی سطح مشترک استفاده می‌شود. این روش از نوع الگوریتم تجزیهٔ عملگر^۴ می‌باشد. به عبارتی حل معادلهٔ انتقال در دو جهت مختصات به صورت جداگانه عملی می‌شود. در طی پیشروی در هر امتداد، فقط از اطلاعات سلول‌های همسایه در همان امتداد برای بازسازی سطح آزاد سلول استفاده می‌شود و سطح آزاد یک‌بار به صورت افقی و بار دیگر به صورت عمودی بازسازی می‌شود. شکلی که از این روش به دست می‌آید خام است، اما به دلیل سادگی اعمال و پیچیدگی سطح در جریان چند فازی (بالاتر از دو فاز) استفاده از آن معمول می‌باشد.

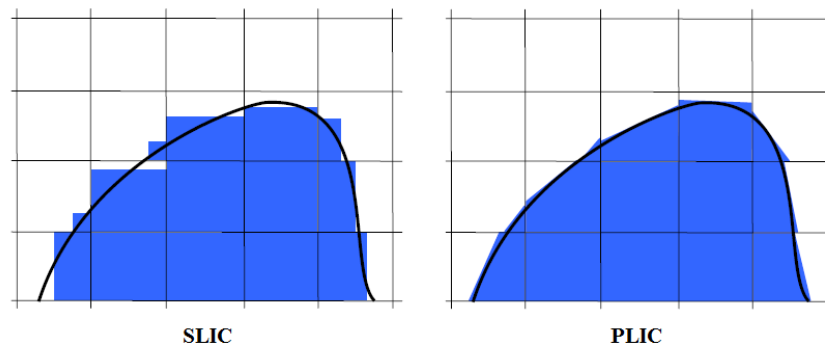
^۱ High Resolution Differencing Schemes

^۲ Piecewise Linear Interface Calculation

^۳ Simple Line Interface Calculation

^۴ Operator split

مهمترین تغییر در مدل کردن سطح مشترک توسط یانگز^۱ [۴۴] با ارائه روش موسوم به تقریب قطعه به قطعه خطی سطح مشترک عملی شد. تغییرات متعددی در روش یانگز؛ مانند اعمال روش‌های انتگرال‌گیری زمانی با دقت بالاتر در الگوریتم انتقال سطح تماس و ارائه روش‌های پایدار در مدل کردن سطوح سه‌بعدی، پس از ابداع آن انجام شده‌است، ولی همه این روش‌ها به طور کلی *PLIC* نامیده می‌شوند. در واقع در روش *PLIC* سطح مشترک با خطوط شیب دار قطعه قطعه پیوسته مدل می‌شود. شکل (۳-۳) طرحواره سطح مشترک را در هر دو روش نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳) طرحواره سطح مشترک در روش‌های بازسازی هندسی *PLIC* و *SLIC* [۴۰]

عیب روش‌های هندسی در پیچیده بودن بازسازی سطح مشترک بخصوص در سه‌بعد است. به همین دلیل مدل‌های تفاضلی مرتبه بالا، بدون نیاز به بازسازی سطح مشترک توسعه داده شدند. در مقابل روش‌های هندسی بازسازی سطح، در این روش‌ها سطح مشترک دارای ضخامت است. در روش‌های هندسی بازسازی، سطح مشترک تیز با توابع مشخصه X_+ و $X_- = I - X_+$ برای دوفاز، با مقدار یک برای فاز و صفر برای فاز دیگر تعریف می‌شود. اما در این روش‌ها، تابع رنگ C ، بعنوان تقریبی برای تابع کسر حجمی روش‌های کلاسیکی هندسی لحاظ می‌شود. بر این اساس C مقدار ۱ را برای فاز اول، صفر را برای فاز دوم و مقدار ۰/۵ را برای سطح مشترک در نظر می‌گیرد. در واقع C جایگزین تابع نشانگر فاز X_{\pm} است. معادله انتقال برای مدل کردن حرکت سطح مشترک بصورت معادله (۳-۲) است.

^۱ Youngs

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{DC}{Dt} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = 0 \quad (2-3)$$

این معادله با روش‌های مختلفی حل شده است. مسئله مهم این است که روش‌های بالادستی دیفیوژن عددی به سیستم تزریق می‌کنند و سریعاً سطح مشترک را به بیرون منتشر می‌دهند درحالی‌که مسائل پایین دستی سطح مشترک را تیز نگه می‌دارند اما ناپایداری و روش‌های مرکزی و مرتبه بالا یکنواختی و کران‌داری حل را حفظ نمی‌کنند. تلاش بر این است که طرحی برای ترکیب مناسب شارهای بالا و پایین دستی ارائه شود که نفوذ و ناپایداری هر یک از روش‌ها را از بین ببرد.

از جمله این روش‌ها توسط ولر^۱ [۴۵] پیشنهاد شده است که در نرم‌افزار اوپن‌فوم نیز بکار می‌رود. کد مورد استفاده، الگوریتم *MULES*^۲ را بکار می‌گیرد که توسط محصول شرکت تجاری *OpenCFD* توسعه داده شده است. این نرم‌افزار یک ترم مصنوعی برای خنثی کردن تاثیر دیفیوژن عددی به معادله توزیع کسر حجمی اضافه می‌کند. ترم اضافه شده تنها در ناحیه سطح مشترک اعمال می‌شود که برای فشرده کردن سطح مشترک و جلوگیری از تکه تکه شدن آن مناسب است [۴۵].

لازم به ذکر است، در سال‌های اخیر علاوه بر روش‌های تعقیب و تسخیر سطح مشترک، مدل‌های لتیس-بولتزمن^۳ برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴۶]. در این روش‌ها جریان سیال با حرکت ذراتی که هر کدام دارای جرم و مومنتوم متناظر با سیال اصلی هستند، مدل می‌شود. ذرات در طول شبکه با پیروی از قوانین برخورد، می‌توانند به هم برخورد کنند. بنابراین با روش‌های مولکولی میکروسکوپی، جریان سیال ماکروسکوپی توصیف می‌شود. از جمله افرادی که در این زمینه کار کرده‌اند می‌توان به کار فخاری و رحیمیان [۴۷] اشاره کرد که حرکت قطره بصورت دوبعدی برای اعداد اونسورگ^۴ و

^۱ Weller

^۲ Multidimensional Universal Limiter with Explicit Solution

^۳ Lattice-Boltzmann

^۴ Ohnesorge

اتووس مختلف شبیه‌سازی شده است. همچنین حقانی و همکاران [۴۸] با استفاده از این روش برخورد قطره به صفحهٔ سوراخ‌دار و چکه کردن از آن را مدل‌سازی کرده‌اند.

با توجه به گفته‌های پیشین، روش حجم سیال (*VOF*)، یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد است. مزایای این روش در مقایسه با روش‌های دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار است که به آنها اشاره می‌شود:

- این روش بقای جرم را به خوبی حفظ می‌کند (در مقابل روش *LS*).
- اعمال آن نسبتاً ساده است.
- تغییر شکل‌های گستردهٔ سطح مشترک را به خوبی کنترل می‌کند و توپولوژی سطوح مقیاس کوچک (مانند پخش قطره و باز به هم پیوستگی آن^۱) را به خوبی نشان می‌دهد (در مقابل روش ردیابی پیشانی).
- این روش موضعی است؛ بدین معنی که برای بدست آوردن کسر حجمی در یک سلول، فقط مقادیر سلول‌های همسایه مورد نیاز است.
- این روش قابل استفاده در شبیه‌سازی جریان بیش از دو فاز است.
- می‌تواند بصورت سه‌بعدی گسترش یابد و در شبکه‌بندی‌های بی‌ساختار در چارچوب روش حجم محدود استفاده شود (استفاده از فرمول جبری به جای بازسازی سطح مشترک).

بنابر دلایل ذکر شده، روش حجم سیال، روشی استاندارد برای شبیه‌سازی جریان سطوح آزاد است و در نرم‌افزارهای *CFD* کاربرد وسیعی دارد. به این دلیل، در تحقیق حاضر تسخیر سطح مشترک بر پایهٔ روش *VOF* انجام گرفته است.

^۱ reconnection

۳-۳- مدل سازی دینامیک سطح آزاد

سطح مشترکی که در دامنه محاسباتی دچار تغییر شکل و یا جنبش می شود، مشکلاتی در محاسبه عددی پدید می آورد. این مشکلات بیشتر به دلیل جفت شدن غیر خطی سیالات و پرش خصوصیات سیال در مرز است. در حالت کلی، فشار و تنش های لزجی، ناپیوستگی هایی در مرز مشترک نشان می دهند که به نیروی تنش سطحی و پرش ویژگی سیال مربوط می شود. محاسبه نیروی تنش سطحی یکی از مشکلاتی است که در شبیه سازی های مربوط به جریان آزاد وجود دارد. لازم است این نیرو به عنوان ترم چشمه ای که بصورت موضعی در سطح آزاد عمل می کند، در نظر گرفته شود. در همین راستا، مدل هایی برای محاسبه این نیرو ارائه شد. رایج ترین مدل مورد استفاده، مدل نیروی سطحی پیوسته^۱ ارائه شده توسط برکبیل^۲ و همکاران [۴۹] و مدل تنش سطحی پیوسته^۳ لافاری^۴ و همکاران [۵۰] می باشد. در این روش ها نیروی کشش سطحی در مرز مشترک دو فاز، به نیروی حجمی در ناحیه ای نزدیک مرز تبدیل می شود که می تواند در چارچوب حل روش حجم محدود برای انجام شبیه سازی ها باشد. در واقع این مدل ها کشش سطحی را به جای اینکه یک مقدار روی سطح مشترک در شرایط مرزی در نظر بگیرند، تاثیر آن را بصورت پیوسته و سه بعدی بر روی مرز اعمال می کنند [۴۹].

با وجود استفاده گسترده، هنگامی که نیروهای کشش سطحی غالب هستند، این مدل ها به تولید جریان غیر فیزیکی در نزدیکی مرز مشترک تمایل دارند. دلیل اصلی این جریان های غیر فیزیکی، عدم تعادل عددی نیروی کشش سطحی و گرادیان فشار مرتبط است. در زمینه حل دقیق مرز مشترک در روش هایی چون حجم سیال، پژوهش های متعددی برای کاهش چنین جریان هایی، از طریق بهبود تخمین شعاع انحنا یا بهبود الگوریتم میدان حل یا هر دو آنها، انجام گرفته است. روش GFM^5 که لیو^۱ و همکاران [۵۱] در سال

^۱ CSF

^۲ Brackbill

^۳ CSS

^۴ Lafaurie

^۵ Ghost Fluid Methods

۲۰۰۰ برای اعمال شرایط مرزی تیزتر در مرزهای ادغامی^۲ پیشنهاد دادند. با این وجود چنان که نتایج کار نشان می‌دهند، هنوز جریان‌های غیرفیزیکی در این روش وجود دارد [۵۱]. فرنسویس^۳ و همکاران [۵۲] با استفاده از روش حجم سیال الگوریتم نوینی را ارائه کردند که منجر به تعادل دقیق گرادین فشار و نیروی کشش سطحی می‌شود. همچنین ایشان با استفاده از این الگوریتم با مقایسه روش *GFM* به عنوان روش ارائه تیز کشش سطحی و روش *CSF*، دریافتند که روش نخست سبب پخش ناگهانی فشار در مرز می‌شود، در حالی که روش دوم انتقال هموارتری دارد. با وجود این، هر دو روش سرعت‌های غیرفیزیکی هم مرتبه‌ای ایجاد می‌کنند که تنها به دلیل خطا در انحناست. بنابراین استفاده از روش شناخته شده نیروی پیوسته با روش حجم سیال سازگار است. در این تحقیق نیز از مدل *CSF* بکار گرفته شده در نرم‌افزار اوپن‌فوم برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

۳-۴ - شرحی از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی اوپن‌فوم

کد متن باز اوپن‌فوم^۴ توسط شرکت تجاری *OpenCFD Ltd.* تحت مجوز عمومی گنو^۵ ایجاد شده و به صورت منبع باز و آزاد موجود است. فناوری هسته اوپن‌فوم انعطاف‌پذیر و کارآمد بوده و از مجموعه‌ای شامل ماژول‌های نوشته شده به زبان *C++* ایجاد شده است. این مجموعه‌ها در ایجاد حلگرهایی برای شبیه‌سازی مسایل مطرح در مهندسی مکانیک و برای اعمال پیش‌پردازش و پس‌پردازش، همچنین نوشتن کتابخانه‌هایی به منظور ایجاد جعبه‌ابزارهای قابل دسترسی در حلگرها و مدل‌های فیزیکی، مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم‌افزار با تعدادی حلگر و کتابخانه از پیش نوشته شده می‌تواند به عنوان یک بسته شبیه‌سازی معمولی مورد استفاده قرار گیرد. در عین حال با توجه به باز بودن کد منبع آن، قابلیت توسعه در ساختار و سلسله مراتب حلگرها و کتابخانه‌ها را داراست.

^۱ Liu

^۲ Embedded boundaries

^۳ Francois

^۴ Open Field Operation And Manipulation (OpenFOAM)

^۵ General Public Licence (GNU)

کاربرد اصلی اوپن فوم برای حل مسائل *CFD* است. نمونه‌ای از مسائل قابل مدل‌سازی توسط این نرم‌افزار مسائل مربوط به جریان‌های آرام و آشفته، انتقال حرارت، تک‌فاز و چندفاز، واکنش شیمیایی، الکترومغناطیس و مکانیک جامدات و حتی معادلات اقتصادی نظیر قیمت‌گذاری یا مسائل مالی می‌باشد. همچنین این حلگرها بدون نیاز به کد نویسی ویژه، برای پردازش موازی قابل توسعه می‌باشند. بدین صورت که در پردازش موازی، نرم‌افزار اوپن فوم محدوده حل را به تعدادی زیرمحدوده^۱ تقسیم کرده و هر یک را به یک پردازشگر مجزا اختصاص می‌دهد. در زمان اجرا، هر پردازشگر کپی کد را دریافت می‌کند و با استفاده از آن به حل مسئله برای زیرمحدوده مختص خود استفاده می‌کند.

این نرم‌افزار از روش عددی حجم محدود برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی که به هر شبکه با ساختار و یا بی‌ساختار نسبت داده شده، استفاده می‌کند. گسسته‌سازی‌های صورت گرفته برای ترم‌های زمانی، جابجایی، نفوذ و ترم‌های چشمه در این روش، شامل محدوده وسیعی از گسسته‌سازی‌های ممکن می‌باشد. تمامی طرح‌های عددی بدون وابستگی به هندسه مسائل مورد مطالعه قابل استفاده هستند. در این نرم‌افزار کوپلینگ بین معادلات بصورت مجزا کنترل می‌شود؛ به این طریق که معادلات برای هر متغیری بصورت جداگانه فرمول‌بندی و حل و روی سیستم معادلات تکرار می‌شود تا زمانی که حل همگرا شود.

۳-۵- روند حل

در این تحقیق، سیالاتی که برای بررسی میدان جریان مورد مطالعه قرار گرفتند، نیوتنی و غیرقابل تراکم فرض شده‌اند. در جریان تراکم‌ناپذیر معادله صریحی برای فشار وجود ندارد، بنابراین سرعت و فشار بطور مجزا از هم حل نمی‌شوند بلکه لازم است طی حل، این دو متغیر با استفاده از معادله مومنتوم و

^۱ subdomain

پیوستگی به هم کوپل شوند. برای کوپلینگ این دو متغیر، الگوریتم پیزو^۱ (معرفی شده توسط ایسا^۲ [۵۰]) بکار رفته است. این الگوریتم در سه مرحله خلاصه می‌شود:

- مرحله پیش‌بینی مومنتوم؛ که در آن آخرین مقدار فشار بدست آمده در حل معادله مومنتوم استفاده می‌شود تا اولین سرعت تقریبی بدست آید. در این مرحله بقای جرم ارضا نشده است.
- مرحله حل فشار؛ که در آن ماتریسی برای معادله فشار ایجاد و حل می‌شود تا مقدار جدید فشار تخمین زده شود.
- مرحله تصحیح سرعت؛ که در آن فشار بدست آمده، برای محاسبه شارهای حجمی جدید استفاده می‌شود و سرعت‌های حاصل از میدان فشار جدید، بدست می‌آید.

از آنجایی که سرعت علاوه بر اینکه به میدان فشار وابسته است، به توزیع سرعت‌های سلول‌های همسایه نیز بستگی دارد، دو مرحله پایانی، در هر حلقه، تا زمانی که تولورانس مورد نظر ارضا شود، تکرار می‌شوند. جزئیات این روش توسط روسچه^۳ [۵۳] ارائه شده است.

در مطالعه حاضر تاثیرات توربولانس در نظر گرفته نشده است. از آنجایی که سطح مشترک دو فاز، در تئوری بی‌نهایت کوچک است و در واقعیت ناحیه‌ای از فضا است که دارای پهنای زیرمیکروسکوپی است؛ بدین منظور، برای حل تیز سطح مشترک دو فاز شبکه‌بندی ریزی برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است. برای حصول اطمینان از کراندار بودن کسر حجمی و عدم وابستگی آن به نوع گسسته‌سازی‌های

^۱ Pressure Implicit with Splitting of Operators (PISO)

^۲ Issa

^۳ Rusche

عددی، از الگوریتم *MULES* استفاده شده است. در این روش در معادله انتقال ترم ضدپخش^۱ (یا تصحیح شار) با اضافه می‌شود.

۳-۵-۱- معادلات حاکم

برای جریان دوفازی تراکم‌ناپذیر سطوح آزاد با استفاده از روش *VOF*، معادله انتقال تابع علامت، به طور همزمان با معادلات مومنتوم و پیوستگی حل می‌شود.

معادله بقای جرم برای جریان تراکم‌ناپذیر در محدوده حل بصورت زیر خواهد بود:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3-3)$$

مشخصات دو فاز روی سطح مشترک از هم مستقل است. در روش حجم سیال، سطح مشترک یک مرز تیز نیست؛ بلکه تغییرات خواص فیزیکی دو فاز در سطح مشترک بصورت تابعی از خواص دو فاز تعریف می‌شود (رابطه‌های ۳-۴ و ۳-۵):

$$\rho(x, t) = \rho_g + (\rho_l - \rho_g)\alpha(x, t) \quad (4-3)$$

$$\mu(x, t) = \mu_g + (\mu_l - \mu_g)\alpha(x, t) \quad (5-3)$$

که α کسر حجمی است و بعنوان نسبت حجم هر فاز به حجم سلول تعریف می‌شود. در روش *VOF* از الگوی زیر پیروی می‌کند:

$$\begin{cases} \alpha = 1 & \text{phase 1} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{interface} \\ \alpha = 0 & \text{phase 2} \end{cases} \quad (6-3)$$

توزیع کسر حجمی در این روش با حل رابطه (۳-۷) بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{D\alpha}{Dt} = \frac{D\alpha}{Dt} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (7-3)$$

^۱Anti-diffusive

همانطور که پیشتر نیز بدان اشاره شد، یکی از مسائل بحرانی در شبیه‌سازی جریان سطوح آزاد بوسیله روش حجم سیال، تیزی سطح مشترک است، بطوریکه کران‌داری و بقاء کسر حجمی حفظ شود. از آنجایی که سطح مشترک بین دوفاز دارای ضخامت است و روی چند سلول محاسباتی قرار می‌گیرد، بدین دلیل نوع شبکه‌بندی در این روش از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. در جریان‌هایی با نسبت دانسیته بالا، حتی خطاهای کم در کسر حجمی ممکن است منجر به خطاهای مهمی در محاسبات نهایی شود. بنابراین محاسبه دقیق توزیع کسر حجمی برای بدست آوردن انحنای صحیح سطح، جهت تخمین نیروی کشش سطحی، ضروری است.

از طرفی سطح مشترک ممکن است به دلیل دیفیوژن عددی، بصورت مصنوعی روی سلول‌های محاسباتی پخش شود. از این‌رو گسسته‌سازی مناسب ترم جابجایی بسیار ضروری می‌نماید. در پژوهش حاضر روش بکار رفته توسط ولر [۴۵] استفاده شده است. در این روش یک ترم جابجایی به معادله توزیع کسر حجمی (رابطه ۳-۷) اضافه شده است.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\alpha) + \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha)U_c) = 0 \quad (۸-۳)$$

ترم جابجایی افزوده شده (ترم سوم سمت چپ معادله ۳-۸)، شبیه به ترم اضافه شده در مدل‌های احتراقی است که سرعت نسبی بین گازهای سوخته و نسوخته را به هم مرتبط می‌سازد [۵۴]. در واقع این سرعت نسبی در رابطه (۳-۸) با سرعت معادل تراکم سطح مشترک (U_c) جایگزین شده است. این ترم باعث فشردگی سطح مشترک می‌شود و کران‌داری و بقاء کسر حجمی را تضمین می‌کند [۴۵].

لازم به ذکر است که معادله (۳-۸) را می‌توان بطور جداگانه برای هر فاز در نظر گرفت. در این حالت معادلات کسر حجمی بصورت زیر خواهند بود:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_1 \alpha) = 0 \quad (۹-۳)$$

$$\frac{\partial(1-\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u}_g (1-\alpha)] = 0 \quad (10-3)$$

که در آن سرعت توده سیال با میانگین وزنی بصورت زیر تعریف می شود [۶۳]:

$$\mathbf{u} = \alpha \mathbf{u}_l + (1-\alpha) \mathbf{u}_g = 0 \quad (11-3)$$

معادله (۹-۳) را می توان به شکل معادله (۸-۳) بازنویسی کرد که این تغییرات برای کسر حجمی

فاز مایع اعمال می شود:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \alpha) + \nabla \cdot (\alpha (1-\alpha) \mathbf{U}_r) = 0 \quad (12-3)$$

در این رابطه $U_r = U_l - U_g$ بردار سرعت نسبی مایع-گاز است که همانند سرعت معادل تراکم (U_c)

مدل شده است. لازم به تذکر است که ترم تراکمی وارد شده، ارتباطی با جریان تراکم پذیر ندارد و صرفاً به معنای متراکم کردن سطح مشترک دوفاز است.

ترم تراکمی اضافه شده، توزیع α را در جهت عمود بر سطح مشترک اعمال می کند. بدین منظور

مدل های مختلفی برای مقدار سرعت معادل تراکمی پیشنهاد شده است که رایج ترین آن ها رابطه (۳-۱۳) است:

$$U_c = \min \left[C_\alpha |\mathbf{u}|, \max(|\mathbf{u}|) \right] \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|}, \quad 1 < C_\alpha < 4 \quad (13-3)$$

در این رابطه سرعت تراکمی بر پایه بیشینه سرعت در ناحیه سطح مشترک است. در واقع، U_c باید

به طریقی محدود شود [۴۵]. شدت تراکم سطح مشترک با مقدار ثابت C_α کنترل می شود و برای آن مقداری

در محدوده ۱ تا ۴ پیشنهاد شده است. [۵۵].

قابل ذکر است که گسسته سازی مناسب ترم تراکمی اضافه شده، به تیزتر شدن سطح مشترک

کمک می کند و استفاده از دیگر روش های عددی تراکمی ارائه شده برای بهبود سطح مشترک را (مانند

روش‌های *CICSAM* و *HRIC* منتفی می‌کند. گرچه این روش برای کاهش دیفیوژن عددی به کار می‌رود، اما باید توجه داشت که این ترم تنها در ناحیه سطح مشترک اعمال می‌شود.

معادله مومنتوم، یکی از معادلات دیگر برای حل جریان است. این معادله برای جریان تراکم‌ناپذیر طبق رابطه (۱۴-۳) است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T]) + \rho \mathbf{g} + F_s \quad (14-3)$$

در این رابطه ترم F_s ناشی از کشش سطحی است [۴۰]. همانطور که پیشتر نیز گفته شد، مدل کشش سطحی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها، مدل نیروی سطحی پیوسته (*CSF*) است. در این مدل نیروی حجمی وارده بصورت (۱۵-۳) محاسبه می‌شود.

$$F_s = \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (15-3)$$

کشش سطحی روی سطح مشترک محاسبه و در جهت عمود بر سطح در نظر گرفته می‌شود. انحنای سطح مشترک بصورت (۱۶-۳) بیان می‌شود:

$$\kappa = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \cdot \alpha}{|\nabla \cdot \alpha|} \right) \quad (16-3)$$

در سیستم‌های تک‌فشار، همانند روش بکار رفته در *VOF*، در یک دیوار غیرعمودی ساکن، با شرط عدم لغزش، باید مولفه عمودی گرادیان فشار برای هر فاز متفاوت باشد. به منظور ساده‌سازی در تعریف شرایط مرزی، عموماً فشار به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \quad (17-3)$$

گرادیان منفی فشار تعریف شده p_d شامل گرادیان فشار استاتیکی، نیروی حجمی ناشی از گرانش و ترم ایجاد شده توسط گرادیان چگالی است.

$$-\nabla p_d = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho \quad (18-3)$$

با جایگذاری رابطه (۳-۱۸) در معادله مومنتوم، ترم $-g \cdot x \nabla \rho$ به معادله مومنتوم افزوده می شود

[۵۳]. در نهایت معادله مومنتوم بصورت زیر خواهد بود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot \left(\mu \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right] \right) + \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (۳-۱۹)$$

روند حل مسائل گذرا در یک حلقه زمانی تکرار می شود. ابتدا، معادله کسر حجمی در گام زمانی جدید حل می شود. در حلقه پیرو که کوپلینگ فشار و سرعت در آن انجام می شود، مشخصات سیال به روزرسانی می شود. ابتدا معادله مومنتوم حل شده و شارهای حجمی از اولین تقریب سرعت های جدید بدست می آید. با استفاده از مقادیر بدست آمده، معادله فشار بازسازی و حل می شود. با استفاده از فشار جدید بدست آمده، شارهای حجمی تصحیح و سرعت های جدید بازسازی می شوند.

۳-۶- جمع بندی

در این فصل، ابتدا مقدمه ای از روش های عددی موجود برای شبیه سازی جریان های دوفازی آورده شد. از آنجایی که روش به کار رفته برای تعقیب سطح مشترک در تحقیق حاضر، روش حجم سیال است، به تفصیل به توضیح این روش پرداخته شده است. علاوه بر این، معادلات حاکم بر جریان سیال برای شبیه سازی اثرات میدان بر تغییر شکل قطره ارائه شد. با معرفی نرم افزار متن باز اوپن فوم، مدل های بکار رفته برای تصحیح روش مورد استفاده و معادلات و روش حل آنها، به طور کلی بیان گردید. در فصل بعد به نتایج شبیه سازی تغییر شکل قطره با استفاده از کد اوپن فوم پرداخته شده است.

فصل ۴

نتایج شبیه‌سازی تغییر شکل قطره

۴-۱- مقدمه

شبیه‌سازی تغییر شکل قطره بر اثر میدان جریان، با استفاده از نرم افزار متن‌باز اوپن‌فوم و بصورت موازی صورت گرفته است. در پژوهش حاضر بررسی‌ها به چهار دسته مجزا تقسیم شده‌اند، که عبارتند از:

۱. بررسی حرکت قطره در سیال بی‌نهایت

۲. بررسی سرعت حد قطره و ضریب پسای آن

۳. بررسی اثرات تغییر فشار

۴. بررسی پدیده برخورد قطره

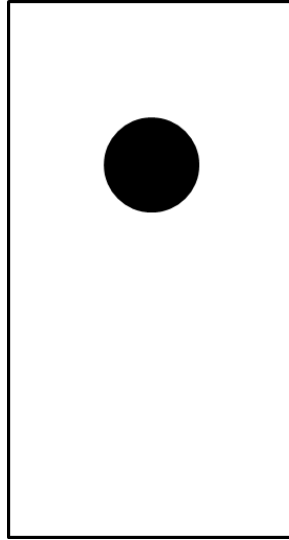
در مبحث حرکت قطره در سیال بی‌نهایت، تغییر شکل قطره با اعداد مورتون و اتووس مختلف مورد توجه قرار گرفته است. در این مرحله، نتایج با تطبیق نمودار گریس صحت‌سنجی شده و هندسه مناسب مسئله بدست آمده است. در گام بعدی، با بدست آوردن سرعت حد قطره با قطرهای مختلف، ضریب پسای وارد بر آن در هر حالت محاسبه شده است. پس از آن به بررسی اثرات فشار و تغییر آن در نحوه تغییر شکل قطره و تلاشی آن پرداخته شده است. در نهایت پدیده برخورد قطره به سطح و لایه نازکی از سیال بررسی شده است. در همین راستا رژیم‌های مختلفی براساس اعداد رینولدز و وبر گزارش شده است.

۴-۲- حرکت قطره در سیال بی‌نهایت

۴-۲-۱- طرح مسئله

برای انجام شبیه‌سازی‌ها، هر دو فاز مایع و گاز تراکم‌ناپذیر فرض شده‌اند. کانال عمودی و مستطیلی شکل که در آن قطره درون آن قرار دارد، به عنوان هندسه مسئله در نظر گرفته شده است. در تمامی

حالت‌های مختلف حل مساله، قطره بصورت دایروی می‌باشد. شکل شماتیک این هندسه در شکل (۱-۴) مشاهده می‌شود.



شکل (۱-۴) هندسه شماتیک مساله

برای اینکه بتوان از اثرات دیواره‌ها صرف‌نظر نمود بایستی فاصله مرکز قطره از دیواره‌ها حداقل سه برابر شعاع آن باشد [۱۸]. از این‌رو اندازه کانال مستطیلی در جهت افقی سه برابر قطر قطره در نظر گرفته شد. از طرف دیگر برای اینکه بتوان به حرکت پایای قطره دست یافت، حداقل ارتفاع آن در جهت عمودی، ده برابر قطر قطره در نظر گرفته شد.

۴-۲-۲- جزئیات شبیه‌سازی

اهمیت کشش سطحی سیال روی تغییر شکل قطره باعث می‌شود تا با فشار دینامیکی که قطره با آن روبروست قیاس شود. زیرا توزیع فشار سطح و کشش سطحی تغییر شکل را کنترل می‌کند. همچنین تغییر شکل به نسبت اینرسی وارده از فاز پیوسته (که باعث تغییر شکل شده و متناسب با فشار دینامیکی است) به کشش سطحی (که در مقابل تغییر شکل مقاومت می‌کند) بستگی دارد. این نسبت با عدد وبر تعریف می‌شود:

$$We = \rho U^2 d_e / \sigma \quad (1-4)$$

که σ کشش سطحی بین ذره و سیال اطراف است.

از آنجایی که شکل و نیروی پسای آنی با عدد وبر و رینولدز آنی تغییر می‌کند، بهتر است که شکل‌های پایا را در سرعت‌های نهایی در نظر بگیریم چراکه این وضعیت به خوبی تثبیت شده است. اما برای تعیین سرعت نهایی لازم است ضریب پسا معلوم باشد که این نیز دشوار است، زیرا ضریب پسا تابع پیچیده‌ای از شکل است. بنابراین استفاده از پارامترهای بدون بعدی که نیاز به دانستن نیروی پسا و سرعت نهایی ندارند، مناسب‌تر است. شکل و سرعت نهایی (بنابراین وبر و رینولدز نهایی) بوسیله قطر قطره، کشش سطحی سطح مشترک و گرانش به همراه چگالی و ویسکوزیته دو فاز، مشخص می‌شوند. از این دو پارامتر بی‌بعدی که شامل سرعت نیستند را مشخص کنیم: عدد اتووس^۱ (Eo) و عدد مورتون^۲ (M). عدد اتووس که عدد بوند^۳ نیز نامیده می‌شود، بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$Eo = g\Delta\rho d_e^2 / \sigma \quad (۲-۴)$$

این پارامتر نسبت نیروهای گرانشی را به نیروهای کشش سطحی نشان می‌دهد که متناسب با اختلاف دانسیته‌های دو فاز و شتاب گرانشی است. لازم به ذکر است که نیروی گرانشی خود به تنهایی باعث تغییر شکل نمی‌شود، برای مثال یک حباب که در سرعت صفر رها است کمی تغییر شکل خواهد داشت حتی اگر عدد اتووس بالا باشد. اما اگر همان حباب به سرعت نهایی برسد نیروهای گرانشی با نیروی پسا به تعادل رسیده و فشار دینامیکی همراه با آنها تغییر شکل نهایی را تعیین می‌کند. به این مفهوم، عدد اتووس بالا شبیه به عدد وبر بالا بر حسب تعاریف ذکر شده پیشین خواهد بود.

عدد مورتون نیز بعنوان تابعی از اختلاف دانسیته به همراه ویسکوزیته فاز پیوسته است. این پارامتر تفسیر فیزیکی مستقیمی ندارد و بصورت زیر تعریف می‌شود.

^۱ Eotvos number

^۲ Morton number

^۳ Bond number

$$M = g\mu^4 \Delta\rho / \rho^2 \sigma^3 \quad (3-4)$$

این دو پارامتر برای ارزیابی شرایط آزمایشگاهی بسیار مناسباند. برای مثال، می‌توان اندازه‌ها را با عدد مورتون ثابت با تغییر عدد اتووس (با تغییر قطر قطره) یا با ثابت نگه داشتن عدد اتووس و تغییر عدد مورتون (با تغییر ویسکوزیته سیال) اداره کرد. در حالی که تغییر دو عدد بی‌بعد رینولدز و وبر، دشوار است، چراکه با تغییر ویسکوزیته یا سرعت قطره، سرعت نسبی تغییر می‌کند. به این ترتیب پارامترهای استاتیکی مورتون و اتووس می‌توانند ساده‌تر باشند تا شرایط پایایی نهایی را مشخص کنند در حالیکه پارامترهای دینامیکی رینولدز و وبر برای توصیف شرایط غیر تعادلی بسیار مناسباند. باید توجه کرد که این پارامترها تنها در شرایط نهایی با هم رابطه دارند. در روابط اشاره شده، در این روابط Δp اختلاف چگالی دوفاز، ρ و μ به ترتیب چگالی و لزجت سیال محیط بر قطره است. σ کشش سطحی بین دوفاز، d_e قطر معادل قطره و U سرعت متوسط قطره در حالت پایاست.

حرکت قطره در سیال متأثر از نیروهای سطحی و حجمی است. این نیروها باعث تغییر شکل سطح مشترک هنگام حرکت می‌شود. مدل‌سازی دو بعدی مساله برای حالت‌های مختلفی از نمودار گریس انجام شد. این نمودار نتایج فشرده آزمایش‌های گریس و همکاران است که تغییر شکل قطره را به سه عدد بی‌بعد وابسته می‌سازد. براساس نتایج آزمایشگاهی تغییر قطره تابعی از سه عدد بدون بعد اتووس، مورتون و رینولدز است [۱].

در انجام مدل‌سازی‌ها رویه معمول بر این است که مقادیر دو عدد اتووس و مورتون مشخص بوده و عدد رینولدز که بیانگر سرعت نهایی قطره است، مجهول مسئله باشد. علاوه بر این روی نمودار شکل نهایی قطره برای مشخص است.

بدین ترتیب با انتخاب چند عدد اتووس و مورتون مختلف، شبیه‌سازی‌ها صورت گرفته و تغییر شکل و عدد رینولدز برای هر حالت از حل عددی محاسبه می‌گردد.

۴-۲-۳- شرایط مرزی و اولیه

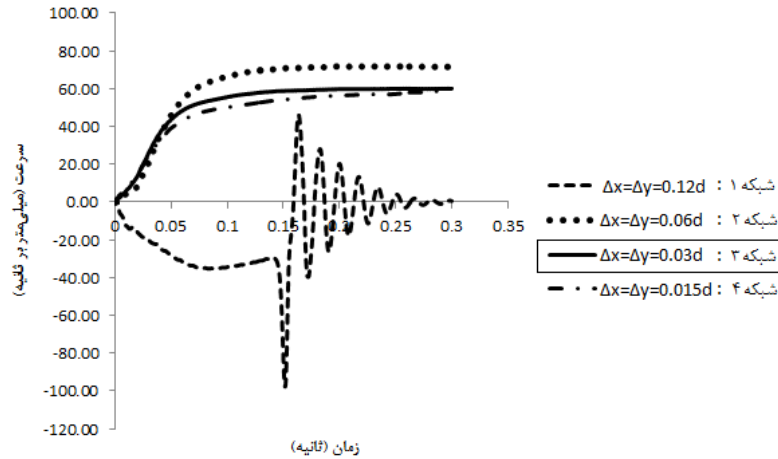
در پژوهش حاضر، شکل اولیه قطره کروی فرض می‌باشد. شرط مرزی با فرض عدم لغزش تمامی دیواره‌ها در نظر گرفته شده است. این امر باعث ارضای عدم ورود و خروج جرم از حجم معیار می‌شود، بنابراین می‌توان حرکت قطره را فقط به نیروی شناوری و گرانشی نسبت داد. در تمامی دیواره‌ها گرادیان فشار صفر منظور شده است، جز دیواره بالایی که دارای شرایط مرزی اتمسفریک است.

۴-۲-۴- شبکه محاسباتی

برای شبیه‌سازی مناسب تغییر شکل قطره در اثر میدان جریان، نیاز به تخمینی از ابعاد سلول‌های شبکه محاسباتی است تا پدیده‌های غالب نیز مدل‌سازی شوند. بدین منظور در تحقیق حاضر، برای انجام شبیه‌سازی‌ها از شبکه‌ای با ساختار منظم استفاده شده است. یکی از پارامترهای مهمی که در حرکت قطرات مطرح می‌شود، سرعت حد قطره در هنگام رسیدن به شرایط پایا است. بدین منظور این پارامتر، بعنوان معیاری برای بررسی استقلال حل از شبکه انتخاب شد.

شکل (۲-۴)، نمودار تغییرات سرعت برخاست قطره تولوئن در آب به در پنج شبکه‌بندی مختلف را نشان می‌دهد. قطره تولوئن در آب بعنوان نماینده‌ای از قطرات با کشش سطحی بالا در سیستم‌های آزمایشی بطور گسترده استفاده می‌شود. در این شرایط اعداد بی‌بعد و مورتون برابر $2/17 \times 10^{-11}$ و عدد اتووس مقداری برابر با $0/09$ خواهد بود. در چنین شرایطی قطره قطعاً کروی خواهد بود.

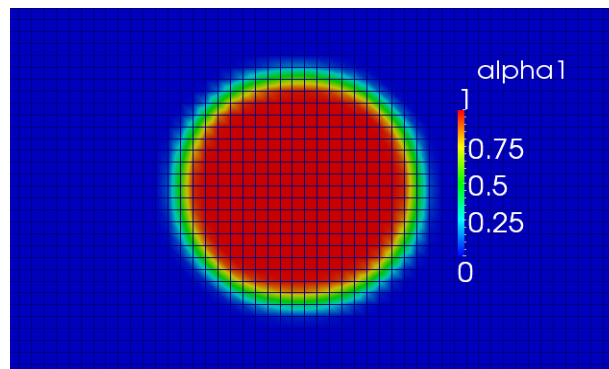
در این شکل محور عمودی مختصات سرعت حد قطره و محور افقی زمان حرکت آن را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۲-۴) مشاهده می‌شود، اختلاف نمودارهای تغییرات سرعت با افزایش تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی، کاهش یافته است. در این شکل نمودار تغییرات سرعت شبکه‌های ۲، ۳ و ۴ بسیار مشابه هستند. از سوی دیگر روند کاهش اختلاف نمودارهای تغییرات سرعت، نشان از استقلال شبکه ۳ از شبکه‌ی محاسباتی دارد.



شکل (۲-۴) نمودار سرعت قطره در شبکه های مختلف محاسباتی

بدین ترتیب اندازه سلول‌های محاسباتی ۰/۰۳ برابر قطر قطره در نظر گرفته شد. شبکه محاسباتی

انتخاب شده به صورت شکل (۳-۴) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۴) نمای دو بعدی شبکه محاسباتی انتخاب شده

همانگونه که در شکل نیز دیده می‌شود، سطح مشترک نه یک خط، بلکه یک ناحیه گذار بین دو فاز

است، که کسر حجمی دارای مقادیری بین ۰ و ۱ است.

۴-۲-۵- اعتباربخشی

به منظور اعتباربخشی شبیه‌سازی‌های انجام شده در پژوهش حاضر، نتایج عددی با نتایج تجربی

مراجع [۱] و [۱۷] مقایسه شده‌اند. نتایج این مقایسه در شکل (۴-۵) آورده شده است.



قطرات با قطرهای ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ میلی‌متر در کانال مستطیلی شکل که عرض کانال ۶ برابر و طول آن ۱۰ برابر قطر قطره در نظر گرفته شد. از آنجایی که چگالی تولوئن کمتر از آب است، قطره حرکت صعودی در طول کانال را خواهد داشت. جدول (۴-۱) مشخصات فیزیکی این دو سیال را نشان می‌دهد:

جدول (۴-۱) مشخصات فیزیکی سیستم تولوئن/آب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

نام متغیر	آب	تولوئن
چگالی (kg/m^3)	۹۹۷	۸۶۲/۳
ویسکوزیته ($kg/m.s$)	0.552×10^{-3}	0.189×10^{-3}
کشش سطحی (N/m)		$3/3 \times 10^{-2}$

قطره پس از رسیدن به سرعت حدی با همین سرعت به حرکت خود ادامه می‌دهد. سرعت صعود قطره در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته با رابطه زیر بدست آمده است:

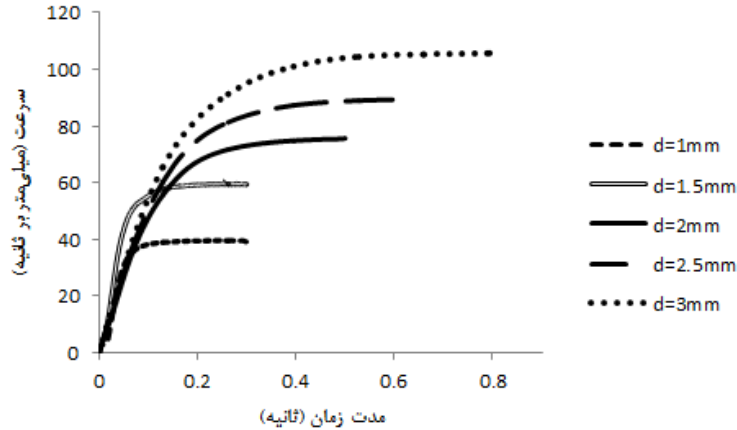
$$U_R = \frac{\int_{V_i} v dV}{\int_{V_i} dV} \quad (4-4)$$

در این رابطه U_R سرعت صعود قطره، v مولفه عمودی سرعت و V_i حجم اشغال شده توسط قطره را نشان می‌دهد.

سرعت نهایی بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی عددی، برای قطرهای مختلف قطره در مدت زمان‌های کوتاه ($t < 1$)، با نتایج کار عددی و آزمایشگاهی اسورث و همکارانش [۱۷] و همچنین نتایج حاصل از کار گریس و همکاران [۱] مقایسه شده است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که نتایج عددی حاصل، تطبیق خوبی با کار عددی و تجربی دیگر مراجع دارد (شکل (۴-۵)).

در لحظه شروع حرکت قطره، از آنجایی که میدان سرعت صفر است، و چگالی قطره از چگالی سیال محیط کمتر است، قطره بر اثر نیروهای شناوری شروع به حرکت می‌کند. با صعود قطره، سرعت رو به افزایش خواهد بود. در ادامه گرادیان‌های سرعت، سبب ایجاد نیروهای لزجی می‌شود که مانع از افزایش شتاب قطره شده و با حرکت صعودی آن مخالفت می‌کند. تقابل این نیروها همراه با کشش سطحی، در

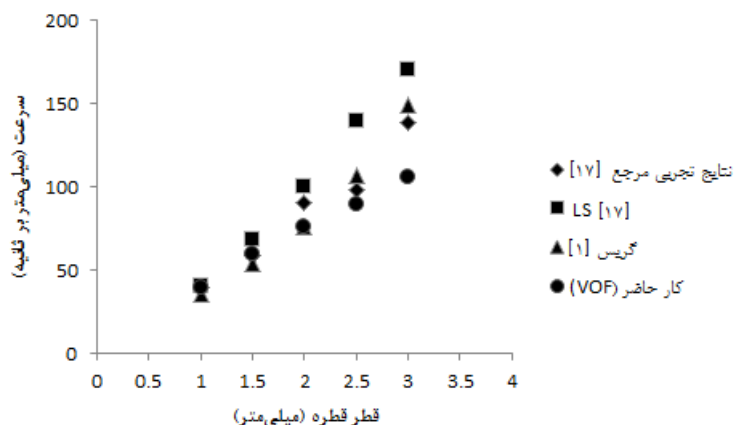
نهایت به ایجاد یک حالت پایا می‌انجامد که در آن سرعت قطره ثابت بوده و هیچ تغییر شکلی صورت نمی‌گیرد. شکل (۴-۴) روند افزایش سرعت هر یک از قطره‌ها را بر حسب زمان نشان می‌دهد.



شکل (۴-۴) سرعت حد قطره تولوئن با قطرهای مختلف بر حسب زمان

همانگونه که مشخص است، زمان رسیدن به حالت پایا در قطرهای مختلف قطره متفاوت است. قطره کوچک‌تر در زمان کوتاه‌تری به سرعت نهایی خود دست می‌یابد. علاوه بر این نتایج حاکی از آن است که با افزایش قطر قطره، سرعت حد آن نیز افزایش می‌یابد. قطره با قطر ۳ میلی‌متر دارای سرعتی نزدیک به 110 mm/s است و در مقایسه با آن، قطره با قطر ۱ میلی‌متر حداکثر به سرعت 39 mm/s می‌رسد.

با استفاده از نمودار گریس [۱] با داشتن اعداد مورتون و اتووس می‌توان رینولدز نهایی را تخمین زد و در نتیجه آن سرعت حد قطره از این طریق نیز حاصل می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی بدست آمده با آزمایش‌های گریس و همکاران هماهنگی خوبی را نشان می‌دهد. نتایج نتایج دارای خطایی در محدوده محدود $0.46-0.24\%$ است. علاوه بر این، نتایج بدست آمده با نتایج تجربی و عددی اسورث و همکاران [۱۷] نشان می‌دهد که روش حجم سیال بکار گرفته شده در این مطالعه نسبت به روش سطوح هم‌تراز نتایج بهتری ارائه می‌دهد. شکل (۴-۵) مقایسه‌ای از نتایج حاصل از کار حاضر با کار تجربی مراجع اشاره شده است.



شکل (۴-۵) سرعت نهایی قطره: مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در پژوهش حاضر با مراجع دیگر

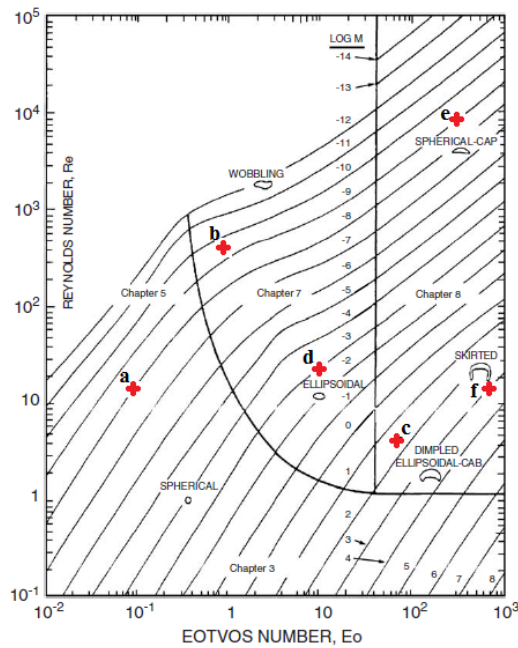
مدلسازی انجام شده در تحقیق حاضر در مقایسه با کار آزمایشگاهی اسورث و همکاران [۱۷]، سرعت حد برای قطره ۱ میلی‌متری، ۰/۳٪ خطا، برای قطره با قطر ۱/۵ میلی‌متر با خطای ۰/۵٪، برای قطره با قطر ۲ میلی‌متر با خطای ۱۵٪ و قطرات ۲/۵ و ۳ میلی‌متری به ترتیب خطایی در حدود ۹٪ و ۲۴٪ را دارد. مقایسه نتایج بدست آمده با روش سطوح هم‌تراز با نتایج آزمایشگاهی، برای همین قطر از قطره‌ها، به ترتیب بالا، ۲/۶، ۱۵٪، ۶۹٪، ۴۲٪ و ۲۲٪ است که اختلاف نسبتاً بیشتری را نشان می‌دهد. این اختلاف به نحوی برتری کامل روش مورد استفاده در تحقیق حاضر است. جدول (۴-۲) درصد خطاهای دو روش عددی انجام شده در کار حاضر (روش VOF) و کار اسورث و همکارانش [۱۷] را در مقایسه با دو مرجع مختلف را نشان می‌دهد:

جدول (۴-۲) مقایسه روش‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی مراجع [۱] و [۱۷]

درصد خطا با مقایسه با آزمایش‌های گریس [۱]		درصد خطا با مقایسه با آزمایش‌های اسورث [۱۷]		قطر قطره
روش LS مرجع [۱۷]	روش VOF (کار حاضر)	روش LS مرجع [۱۷]	روش VOF (کار حاضر)	
۱۲	۹/۲	۲/۶	۰/۳	۱
۲۷	۱۱	۱۵	۰/۵	۱/۵
۳۱	۰/۴۶	۶۹	۱۵	۲
۳۰	۱۶	۴۲	۸/۹	۲/۵
۱۴	۲۸	۲۲	۲۴	۳

۴-۲-۶- حرکت قطره و تغییر شکل آن

پس از صحت‌آزمایی نتایج، به بررسی تغییر شکل قطره در شرایط مختلف می‌پردازیم. بدین منظور نقاطی از نمودار گریس برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است. شکل (۴-۶) نقاط منتخب برای انجام شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. در انتخاب این نقاط سعی بر این بوده است تا کل محدوده نمودار پوشش داده شود.



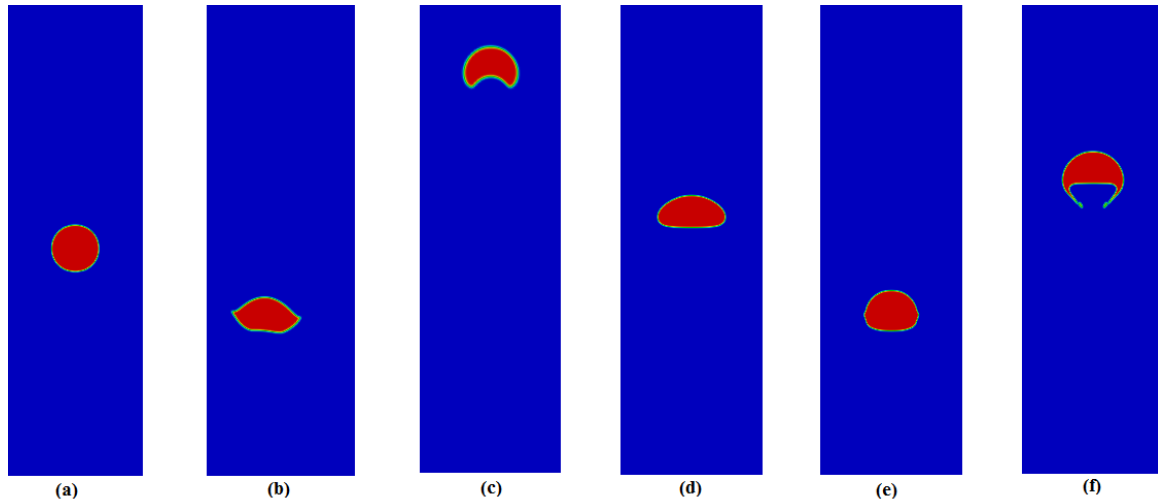
شکل (۴-۶) نمودار گریس و همکاران [۱]؛ نقاط a, b, c, d, e و f انتخاب شده برای شبیه‌سازی

در شکل (۴-۷) شکل نهایی قطره در حالت پایا مشخص شده است. نتایج بدست آمده منطبق بر پیش‌بینی نمودار گریس است.

برای نقطه a ، عدد اتووس برابر با 0.1 و عدد مورتون دارای مقدار 10^{-8} می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها شکل قطره را در شرایط پایا بصورت ^۱پیش‌بینی می‌کند. همچنان که این نقطه روی نمودار گریس نیز شکل قطره را ^۱پیش‌بینی می‌کند.

^۱ Spherical

نقطه b ، با عدد اتووس 0.9 و مورتون 3×10^{-10} مشخص است. شبیه‌سازی‌ها حرکت *Wobbling* را برای این قطره نشان می‌دهد. در این حالت، حرکت قطره بصورت زیگزاگی بوده و تغییر شکل نامشخصی دارد. این نوع حرکت در نمودار گریس نیز تایید شده است.



شکل (۴-۷) قطرات با اعداد مورتون و اتووس مختلف در حال حرکت هستند و تغییر شکل‌های حاصل با

شبیه‌سازی‌های انجام شده با روش حجم سیال بدست آمده است. (a) ، $Eo = 0.1, M = 10^{-8}$ (b) ،

(c) ، $Eo = 0.9, M = 3 \times 10^{-10}$ (d) ، $Eo = 72, M = 200$ (e) ، $Eo = 10, M = 10^{-2}$ (f) ، $Eo = 110, M = 10^{-9}$

$Eo = 0.1, M = 10^{-8}$

برای نقطه c ، عدد اتووس برابر با 72 و عدد مورتون دارای مقدار 200 می‌باشد. این نقطه در نمودار

گریس، در ناحیه کلاه- بیضوی پهن‌شده^۱ قرار دارد. شکل بدست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی نیز مؤید این نوع تغییر شکل است.

نقطه d ، که عدد اتووس آن برابر با 10 و عدد مورتون آن برابر 10^{-2} می‌باشد، روی نمودار گریس در

ناحیه بیضوی قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نیز این تغییر شکل را برای قطره پیش‌بینی کرده است. این

تطابق، تصدیقی بر نتایج عددی است.

^۱ Dimpled ellipsoidal- cap



با تغییر عدد اتووس به ۱۱۰ و عدد مورتون به 10^{-9} نقطه e بدست می‌آید. این نقطه به شکل کلاه-کروی^۱ است. در این شرایط عدد اتووس مقدار بزرگ است و در مقابل، عدد مورتون مقدار بسیار کوچکی دارد.

در نهایت نقطه f حالتی از شکل قطره را نشان می‌دهد که اصطلاحاً به آن شکل دامنی^۲ می‌گویند. در این حالت، عدد اتووس مقداری برابر با ۰/۱ دارد و مورتون برابر با 10^{-8} است. در این شرایط نیز نتایج عددی بدست آمده با نمودار گریس هماهنگی کاملی دارد.

از نتایج بدست آمده می‌توان گفت، اگر نیروهای لزجی بطور قابل ملاحظه‌ای بیش از نیروهای سطحی بیشتر باشند ($Eo > 10$ و $M \geq 100$)، جت سیال قدرت کافی برای هل دادن سطح پایینی قطره نخواهد داشت و تغییر شکل از حالت کروی اولیه ناچیز خواهد بود. در حالی که اگر نیروهای سطحی بر نیروهای لزجی غلبه کنند ($Eo > 10$ و $M \leq 1$)، فشار لزجت سیال از قسمت پایینی قطره افزایش می‌یابد. این فشار سیال، سطح مشترک پایینی حباب را به سمت کلاه بالایی حرکت می‌دهد و سبب تغییر شکل‌های زیادی در قطره می‌شود.

۴-۲-۷- حرکت قطره و ضریب پسای وارد بر آن

نیروهای وارد بر یک قطره منفرد در حال حرکت، در شرایط پایا، نیروهای پسا و شناوری در مقابل نیروی گرانشی است. رابطه (۴-۵) معادله تعادل بین این نیروها را نشان می‌دهد.

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_d}{2}\right)^3\rho_d g = C_d \frac{1}{2}\rho_d \Delta u^2 \frac{\pi d_d^2}{4} + \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_d}{2}\right)^3\rho_c g \quad (4-5)$$

در این رابطه Δu اختلاف سرعت قطره و محیط اطراف آن است. به کمک این رابطه ضریب پسا محاسبه می‌شود. در تحقیقات پیشین انجام گرفته برای تعیین ضریب پسا، روابطی بر پایه نسبت ویسکوزیته

^۱ Spherical-cap

^۲ Skirted



دو فاز ارائه شده است. این نسبت بصورت نسبت ویسکوزیته فاز گسسته به فاز پیوسته ($\mu^* = \frac{\mu_d}{\mu_c}$) تعریف می‌شود. این روابط در دو دسته قرار می‌گیرند. دسته اول برای نسبت ویسکوزیته‌های خیلی بالا، نزدیک به بی‌نهایت (مانند ذرات جامد) است که رابطه (۴-۶) توسط برائر^۱ و میوس^۲ [۵۶] این ضریب را بعنوان تابعی از عدد رینولدز ارائه کرد. دسته دوم مربوط به نسبت ویسکوزیته خیلی پایین، نزدیک به صفر (مانند حباب‌ها) است که با رابطه (۴-۷) ارائه شده توسط برائر [۵۷] توصیف می‌شود.

دسته اول (ذرات جامد) [۵۶]:

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{0.5}} + 0.4 \quad (۴-۶)$$

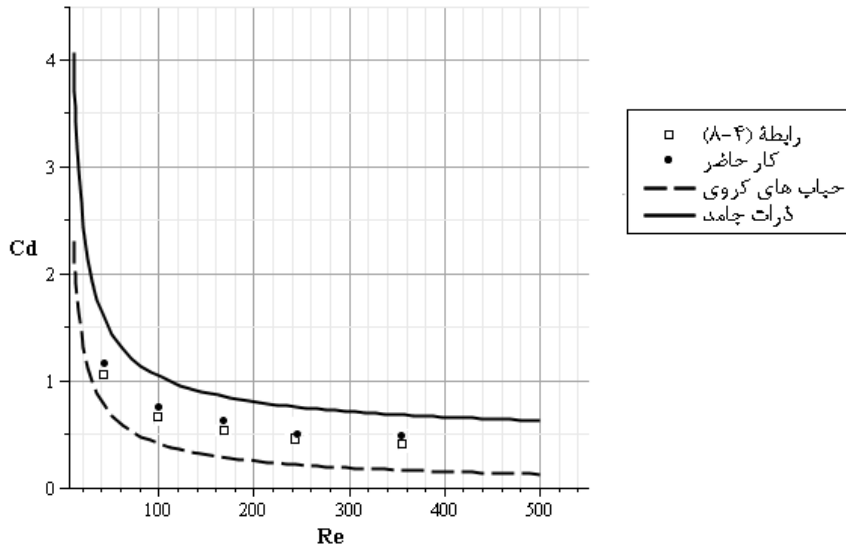
دسته دوم (حباب‌های کروی) [۵۷]:

$$C_d = \frac{16}{Re} + 14.9Re^{-0.78} \left(\frac{1}{1+10Re^{-0.6}} \right) \quad (۴-۷)$$

نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر به بررسی این مسئله نیز پرداخته است. شبیه‌سازی‌ها برای قطره‌ای با نسبت ویسکوزیته $\mu^* = 1/61$ ، نسبتی مابین صفر و بی‌نهایت، انجام گرفته است. شکل (۴-۸) ضریب پسای متناظر با سرعت نهایی هر قطره را بصورت تابعی از عدد رینولدز آن بصورت نمودار گرافیکی بیان می‌کند. از نمودار مشخص است که ضریب پسای بدست آمده در محدوده بین این دو دسته قرار می‌گیرد.

^۱ Brauer

^۲ Mewes



شکل (۸-۴) تغییرات ضریب پسای قطره با نسبت ویسکوزیته $1/61$ برحسب رینولدز: مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی انجام یافته با روابط مختلف

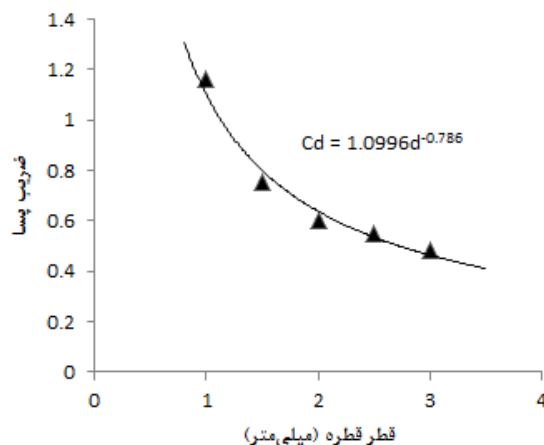
علاوه بر این عدد وبر و اتووس با رابطه (۸-۴) با ضریب پسای نهایی به هم مربوط می‌شوند [۵۸].

$$C_d = \frac{4Eo}{3We_T} \quad (۸-۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که در حباب‌ها و قطره‌ها، در رژیم بر پایه ضریب پسای نیوتنی^۱ (C_d ثابت) یک رابطه خطی بین وبر نهایی و اتووس وجود خواهد داشت. همانگونه که از نمودار (۸-۴) نیز مشخص است، نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها برای اعداد اتووس و وبر متناظر هر رینولدز، در این رابطه کاملاً صدق می‌کنند که این نشان از دقت بالای نتایج حاصل دارد.

از آنجایی که ضریب پسا، بصورت مشخصی به قطر قطره وابسته است، در ادامه به بررسی تاثیر افزایش قطر به آن می‌پردازیم. نمودار شکل (۹-۴) روند تغییرات ضریب پسا را با قطر نشان می‌دهد.

^۱ رژیمی که در آن قطره یا حباب (ذرات سیالی) به واسطه وجود نیروی پسا با ضریب پسای ثابت در حال حرکت هستند.



شکل (۴-۹) ضریب پسای قطره تولوئن در حال حرکت در آب برحسب قطر آن

همانگونه که از نمودار نیز برمی آید، نتایج عددی حاکی از آن است که با افزایش قطر قطره، ضریب پسا در حال کاهش است، اما این کاهش برای هر یک از قطرهای بررسی شده به یک نسبت نیست. چراکه ضریب پسا برای قطره ۳ میلی متری ۰/۹ برابر ضریب قطره ۲ میلی متری است در حالی که این اختلاف قطره‌های ۲ و ۱/۵ میلی متری به اندازه ۰/۶ برابر است.

جهت داشتن دید بهتری از پدیده، منحنی $C_d = 1.0996 \cdot d^{-0.786}$ را بر نقاط بدست آمده برازش شده است. منحنی برازش شده، رابطه بین قطر و ضریب پسا بصورت توانی معرفی می کند.

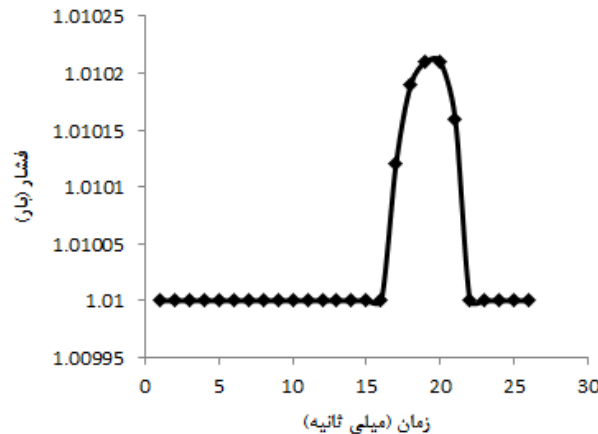
در نهایت می توان گفت که بزرگتر شدن قطره تاحدی باعث افزایش نیروی شناوری می شود که صعود آن را با سرعت بیشتر و ضریب پسای کمتر به همراه دارد.

۴-۳- بررسی اثرات گرادیان فشار

وجود گرادیان فشار به عنوان عاملی در متلاشی شدن قطره محسوب می شود. بعنوان مثال در سیستم‌های پاشش سوخت، قطره با خروج از نازل با تغییرات فشار بالایی مواجه می شود و به موجب آن قطره متلاشی شده و امکان احتراق بهینه فراهم می شود.

از آنجایی که استفاده از الگوریتم پیژو در این تحقیق امکان محاسبه پارامتر فشار را میسر می‌سازد، با قرار دادن قطره درون محفظه‌ای با فشار متغیر به بررسی تغییرات بوجود آمده می‌پردازیم. مسئله نمونه قطراتی را که تحت گرادیان فشار $1/5$ بار هستند، بررسی می‌کند.

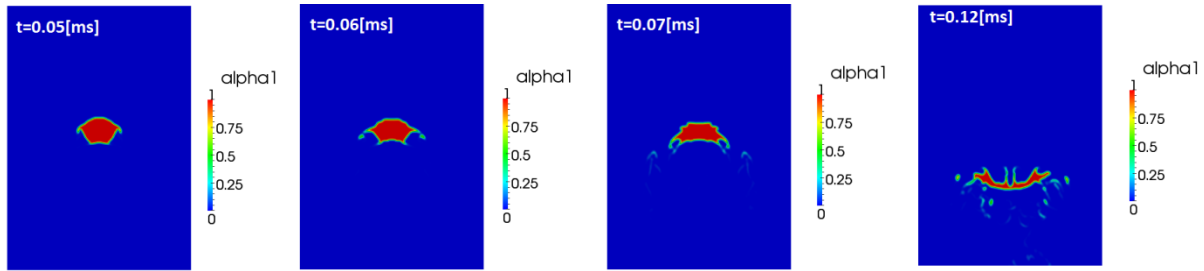
در شرایطی که قطره بدون اعمال گرادیان فشار، تحت گرانش سقوط می‌کند، فشار هیدرواستاتیکی داخل قطره در حال تغییر است در حالی که تغییرات فشار محیط در مقایسه با فشار داخل قطره قابل چشم‌پوشی است. در شبیه‌سازی‌ها نیز این پدیده دیده می‌شود. در شکل (۴-۱۰) تغییرات فشار با زمان، در مقطعی مقطعی با ارتفاع 14mm از کف را هنگام سقوط قطره از ارتفاع 20 میلی‌متری نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۰) تغییرات فشار در مقطع 14 میلی‌متری بر حسب زمان (کار حاضر)

تا قبل از عبور قطره از این مقطع، تغییر فشار بسیار ناچیز است، در حالی که در مدت زمان عبور قطره، تغییرات فشار آن به حداکثر مقدار $1/0.1021$ بار می‌رسد. با حرکت قطره به پایین، فشار رفته رفته کاهش یافته و بار دیگر به فشار اتمسفر می‌رسد. گرچه این تغییرات در مقاطع مختلف متفاوت می‌باشد.

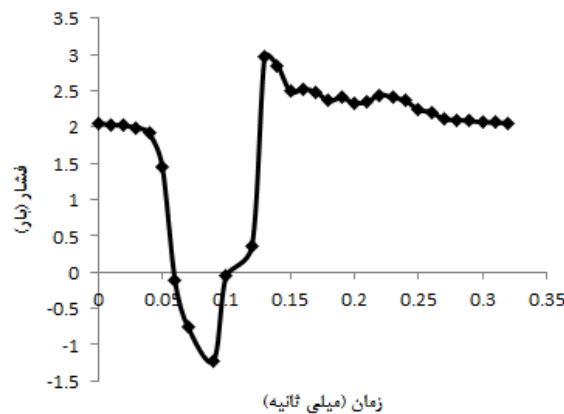
در حالتی که قطره تحت گرادیان فشار قرار می‌گیرد، پدیده متفاوتی دیده می‌شود. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی‌ها برای حالتی که فشار بطور خطی از $2/5$ بار به 1 بار در حال تغییر است، انجام گرفته شده است. در چنین شرایطی نتایج متلاشی شدن قطره را نشان می‌دهند. شکل (۴-۱۱) کانتور کسر حجمی را نشان می‌دهد که در آن قطره در حال متلاشی شدن است.



شکل (۴-۱۱) نتایج شبیه‌سازی عددی متلاشی شدن قطره در حضور گرادیان فشار (کار حاضر)

بدیهی است که هنگام متلاشی شدن قطره، میدان فشار هوای اطراف متاثر از رفتار قطره خواهد بود.

شکل (۴-۱۲) تغییرات فشار را برای مقطع متناظر با حالت قبل نشان می‌دهد. از آنجایی که فشار محفظه بطور خطی از بالا به پایین کاهش می‌یابد، مقطع انتخاب شده در ابتدا دارای فشاری برابر با ۲ بار است.



شکل (۴-۱۲) تغییرات فشار در مقطع ۱۴ میلی‌متری از کف بر حسب زمان در حضور گرادیان فشار (کار حاضر)

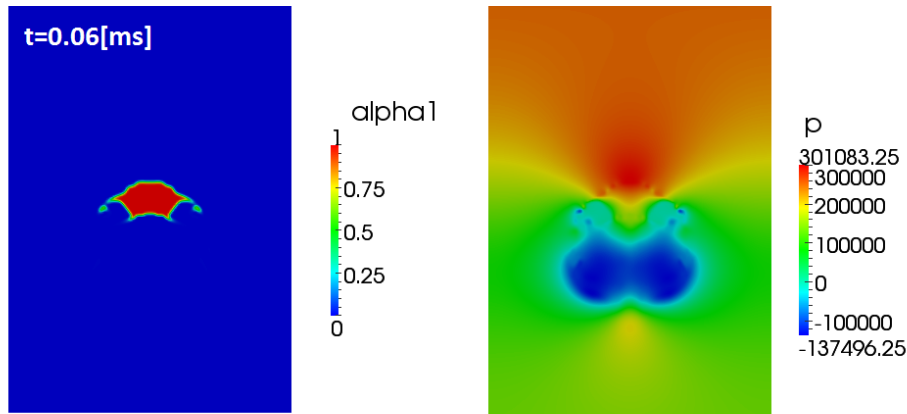
نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که با متلاشی شدن قطره، فشار نواحی نزدیک به قطره رو به

کاهش است. این افت تا اندازه‌ای ادامه می‌یابد که فشار خلا نسبی در اطراف قطره ایجاد شده و آن را به

سمت پایین حرکت (هل) می‌دهد. با حرکت قطره به پایین و متلاشی شدن آن، دوباره فشار افزایش یافته و

تا مقدار اولیه خود بازسازی می‌شود (فشار داخل محفظه ثابت فرض شده است). شکل (۴-۱۳) کانتور فشار

و کسر حجمی را در لحظه $0.07ms$ نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۳) کانتور فشار و کسر حجمی در لحظه متلاشی شدن قطره در حضور گرادیان فشار (کار حاضر)

۴-۴- بررسی پدیده برخورد قطره

همانگونه که در فصل‌های پیشین بدان اشاره شد، برخورد قطره به صفحه در دو دسته کلی برخورد قطره به صفحه جامد و برخورد قطره به لایه سیال قرار می‌گیرد. در هر بخش پدیده ویژه و رژیم‌های مختلفی وجود دارد. در ادامه به بررسی هر یک از این پدیده‌ها به کمک شبیه‌سازی‌های انجام گرفته خواهیم پرداخت.

۴-۴-۱- برخورد قطره به سطح جامد

مکانیک اسپری قطرات و برخورد آن‌ها به سطح یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در عملیات مهندسی مختلف، از جمله پوشش‌های نازک فیلمی^۱، اسپری رنگ، سیستم‌های تزریق سوخت و غیره دیده می‌شود. عوامل تاثیرگذار مختلفی بر دینامیک برخورد قطره وجود دارد که شامل مشخصات فیزیکی قطره، زاویه برخورد، مشخصات سطح و سرعت برخورد می‌باشد. بدین منظور، در تحقیق حاضر سعی بر این است با در نظر گرفتن عوامل متعدد به بررسی جامعی از این پدیده بپردازیم.

^۱ thin film coatings

به عنوان گام اول با شبیه سازی به بررسی برخورد قطرات با محدوده رینولدز $800 \leq Re \leq 1500$ و وبر $100 \leq We \leq 400$ می‌پردازیم. نتایج بدست آمده با کار تجربی پالاسیوس^۱ و همکاران [۵۹] مقایسه شده است. در این شبیه‌سازی‌ها قطره با قطر $2/7mm$ بصورت دوبعدی و با سرعت‌های برخورد مختلف در محدوده رینولدز و وبر اشاره شده، در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۱۴) روند تغییر شکل قطره و پخش آن را روی سطح را در مقایسه با [۵۹] نشان می‌دهد. در این شکل، روند تغییرات بر حسب زمان‌های بی‌بعد $t^* = tU/d$ گزارش شده است که U سرعت برخورد و d قطر اولیه قطره است.

نتایج حاکی از آن است که افزایش عدد رینولدز و وبر پاشش^۲ و پخش شدن^۳ قطره روی سطح می‌شود. شکل (۴-۱۴-الف) بازشدگی قطره را روی سطح نشان می‌دهد که این رژیم با نام *deposition* معرفی شده است. نتایج عددی نیز این رژیم را به خوبی نشان می‌دهند چراکه در این حالت قطرات کوچکتری از قطره اصلی جدا نشده است.

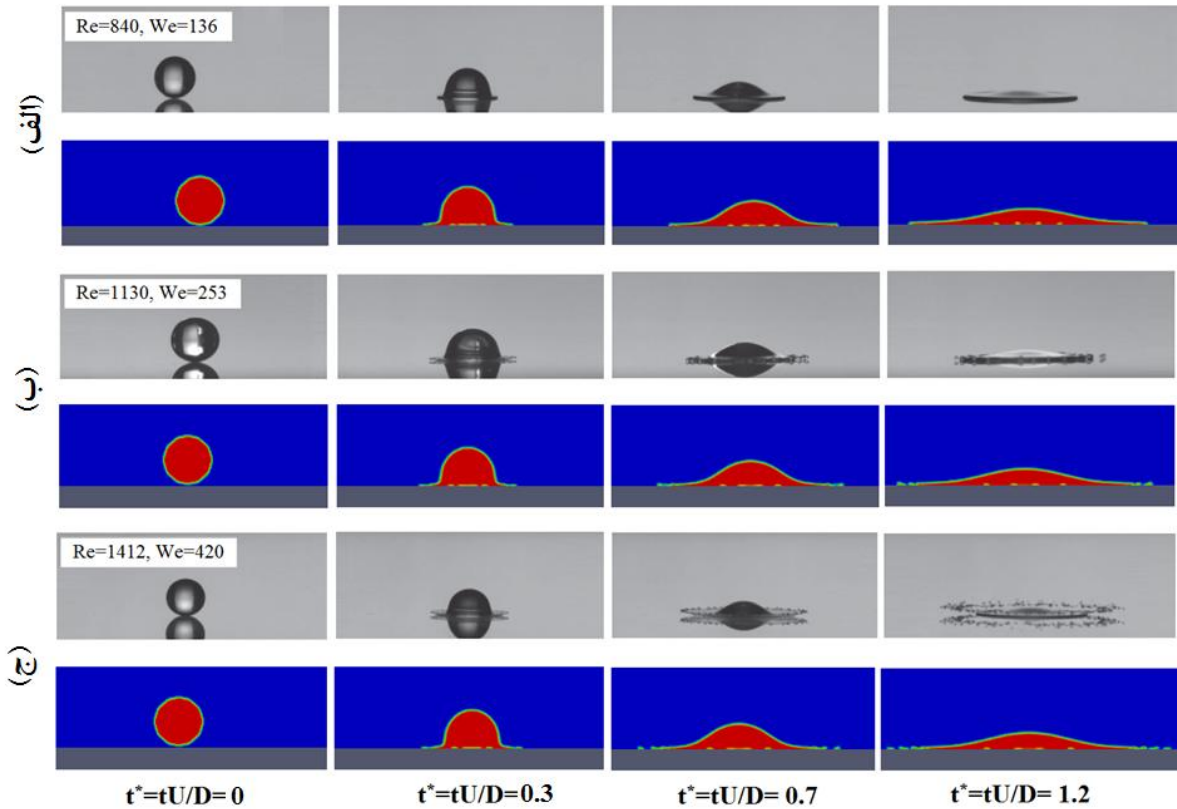
در شکل‌های (۴-۱۴-ب) و (۴-۱۴-ج) قطره با سرعت بیشتری به سطح برخورد می‌کند و به موجب قطره روی سطح پخش و قطرات ثانویه^۴ تشکیل می‌شوند. دامنه پخش قطرات ثانویه در شکل (۴-۱۴-ج) گسترده‌تر است. این قطرات در مقایسه با حالت (ب) در زمان زودتری جدا می‌شوند. چراکه در حالت (ب) در زمان $t^* = 1/2$ ، پخش قطره روی سطح دیده می‌شود، اما در حالت (ج) این پدیده در $t^* = 0/7$ مشخص است.

^۱ Palacios

^۲ splashing

^۳ Break up

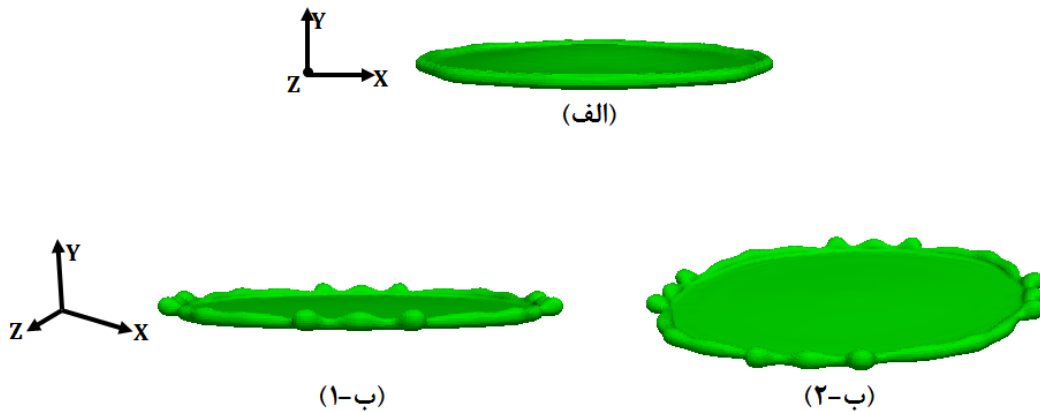
^۴ secondary droplets



شکل (۴-۱۴) برخورد قطره به قطر 27mm با سرعت برخورد متفاوت؛ مقایسه نتایج عددی کار حاضر و تجربی مرجع [۵۹]

جهت توصیف بهتر نتایج، شبیه‌سازی‌ها در سه بعد ادامه یافته است. برای حالت (الف) و (ب) در

زمان $t^* = 1/2$ ، نتایج زیر حاصل شد:



شکل (۴-۱۵) شبیه‌سازی سه بعدی برخورد قطره به قطر 27mm با سرعت برخورد متفاوت در زمان $t^* = 1/2$

همانگونه که از شکل (۴-۱۵) برمی‌آید، قطره در حالت الف، (با رینولدز و وبر به ترتیب ۸۴۰ و ۱۳۶) است، قطره روی سطح گسترش می‌یابد اما پخش نمی‌شود.

شکل‌های (ب-۱) و (ب-۲) هر دو بیانگر یک حالت از برخورد قطره است که از دو زاویه مختلف نشان داده شده‌اند. این حالت برای رینولدز و وبر به ترتیب ۱۱۳۰ و ۲۵۳ است که مطابق انتظار قطره‌های ثانویه شروع به تشکیل شدن در لبه‌های قطره اصلی می‌کنند.

مقایسه نتایج دوبعدی و سه‌بعدی، برتری حل مسئله را در سه‌بعدی، از نظر نحوه نمایش پدیده نشان می‌دهد. اما به دلیل حافظه محاسباتی پایین سیستم مورد استفاده، قادر نبودیم شبیه‌سازی‌ها را برای حالت (ج) انجام دهیم. زیرا به دلیل رینولدز بالا جدایش قطرات در اولین لحظات برخورد اتفاق می‌افتد و شبکه‌بندی به اندازه کافی ریز نبود تا پدیده را به خوبی دنبال کند. شکل (۴-۱۶) نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی حالت (ج) را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۶) شبیه‌سازی سه‌بعدی برخورد قطره به قطر $2/7\text{mm}$ با $Re=1412$ و $We=420$ در زمان $t^*=1/2$

در این حالت قطره‌های ثانویه بصورت لایه‌ای از قطره اصلی جدا شده‌اند و شبکه‌بندی به اندازه کافی ریز نبوده که تک تک قطرات جدا شده را نمایش دهد.

۴-۱-۱-۴-۴ مدل‌های زاویه تماس

نتایج بدست آمده در زمینه برخورد قطره، تاکنون بدون در نظر گرفتن کاپیلاری سطح و بدون استفاده از مدل‌های زاویه تماس بدست آمده است. در واقع زاویه تماس، زاویه بین سطح جامد و قطره است



که نوع سطح، تعیین کننده آن می‌باشد. بر همین اساس ممکن است الگوهای متفاوتی از برخورد قطره در شرایط کاملا یکسان، در سطوح مختلف بدست آید. همواره سعی بر این بوده است با ارائه مدل‌هایی بتوان پیش‌بینی درستی از پدیده داشت. در فصل دوم به تفصیل به کارهای محققین پیشین در این زمینه اشاره شد. در ادامه، در این فصل سعی بر این است با بکارگیری برخی از مدل‌های رایج به پیش‌بینی دقیق‌تر مسئله پرداخت و به نحوی با مقایسه هر یک از این مدل‌ها، تفاوت‌ها و برتری‌های روش‌های مختلف را نسبت به یکدیگر مشخص کرد.

۴-۱-۱-۴ زاویه برخورد استاتیکی

یکی از ساده‌ترین و رایج‌ترین مدل‌ها، مدل زاویه برخورد استاتیکی θ_s (زاویه تعادلی^۱) است. این مدل زاویه قطره روی خط سه‌گانه را در طول برخورد آن ثابت در نظر می‌گیرد. در واقع این زاویه، متوسط زوایایی است که قطره در حین برخورد با سطح دارد و مقدار آن از تعامل بین سه سطح مشترک تعیین می‌شود.

در سال ۲۰۰۱، کروکس^۲ و همکاران [۶۰] بصورت آزمایشگاهی به بررسی برخورد قطرات مختلف بر سطوح مختلف پرداختند. ایشان در آزمایش‌های خود زاویه تماس متوسطی را برای سطوح مختلف، به عنوان زاویه استاتیکی گزارش دادند. در کار حاضر به منظور صحت‌آزمایی نتایج عددی بدست آمده از مدل استاتیکی بکار رفته، برخی نتایج آزمایشگاهی ایشان مورد استفاده قرار گرفته است.

بررسی‌ها برای چهار نوع سیال آب، گلیسیرین ۸۰٪، ۵۰٪ و ۲۶٪ انجام گرفته است که هر سه به سطحی از جنس پارافیلیم نوع M با زاویه تماس ۱۰۶ درجه، برخورد می‌کنند. مشخصات فیزیکی این سه سیال در جدول (۳-۴) آورده شده است.

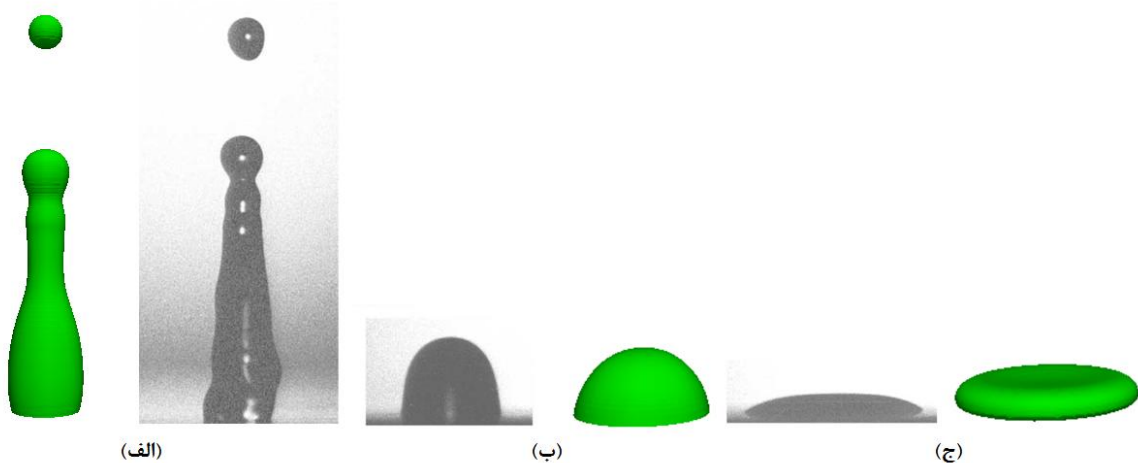
^۱ equilibrium

^۲ Crooks

جدول (۳-۴) مشخصات فیزیکی سیال‌های شبیه‌سازی شده در دمای ۲۰ درجه سلسیوس

نام متغیر	آب	گلیسرین ۲۶٪	گلیسرین ۵۰٪	گلیسرین ۸۰٪
چگالی (kg/m^3)	۹۹۸	۱۰۶۱	۱۱۲۶	۱۲۱۲/۸
ویسکوزیته ($kg/m.s$)	10^{-3}	$2/2 \times 10^{-3}$	$5/9 \times 10^{-3}$	64×10^{-3}
کشش سطحی (N/m)	$7/25 \times 10^{-2}$	$7/16 \times 10^{-2}$	7×10^{-2}	$6/37 \times 10^{-2}$

نتایج نشان می‌دهد در شرایط کاملا یکسان، هر کدام از این قطرات رفتار متفاوت و مختص خود را دارد. علاوه بر این، هر یک از قطرات رژیم‌های متفاوتی را بوجود آوردند. شکل (۴-۱۷) نتایج شبیه‌سازی‌های دوبعدی کار حاضر را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کروکس و همکاران [۶۰] نشان می‌دهد. در این شکل، سه قطره آب، گلیسرین ۵۰٪ و ۸۰٪ با قطر $d=2/3mm$ را پس از برخورد و در لحظه $t=18ms$ نشان می‌دهد. سرعت برخورد این قطره‌ها $2m/s$ بوده است.



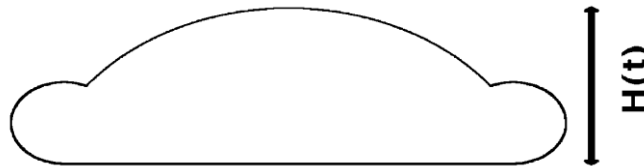
شکل (۴-۱۷) برخورد قطرات $2/3$ میلی‌متری بر سطحی از جنس پارافیلیم M با سرعت برخورد $2m/s$ در زمان یکسان؛ (الف) آب، (ب) گلیسرین ۵۰٪، (ج) گلیسرین ۸۰٪

همانگونه که از شکل (۴-۱۷) برمی‌آید، تغییر شکل‌های دیده شده در شبیه‌سازی‌ها به خوبی بر نتایج تجربی منطبق است و توصیف کاملی از پدیده را نشان می‌دهد.

در سرعت‌های برخورد یکسان، قطره آب با انرژی زیادی از روی سطح بلند می‌شود (مطابق شکل ۴-۱۷-الف) و رژیم ریباندینگ اتفاق می‌افتد. در حالیکه در همین لحظه، قطره گلیسرین ۵۰٪ با ویسکوزیته بزرگتر ($5/9 \times 10^{-3}$) روی سطح باقی می‌ماند. قطره گلیسرین ۸۰٪ که ویسکوزیته آن به نسبت بیشتری از

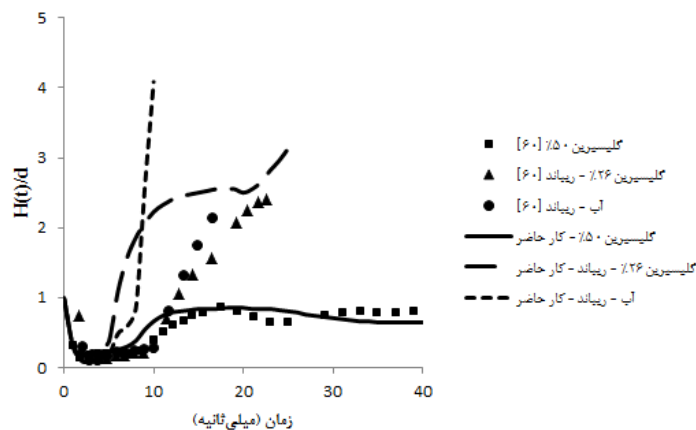
ویسکوزیته دو قطره دیگر بزرگتر است، پس از ۱۸ میلی ثانیه از لحظه برخورد، با ارتفاع کمتری روی سطح باقی می ماند و الگوی *deposition* را ایجاد می کند. در واقع هر چه ویسکوزیته سیال افزایش می یابد، قطره روی سطح باقی می ماند و امکان بلند شدن آن از روی سطح (اصطلاحاً ریباندینگ قطره) کاهش می یابد.

در ادامه تغییر شکل قطره های آب، گلیسیرین ۵۰٪ و ۲۶٪ را در برخورد با سطح از جنس پارافیلیم *M* مورد مطالعه قرار می گیرد. پارامتر مورد بررسی ارتفاع قطره است که نسبت به قطر اولیه آن بی بعد شده است. این پارامتر تابعی از زمان است که تغییرات آن از لحظه صفر برخورد قطره به سطح آغاز می شود. شکل (۴-۱۸).



شکل (۴-۱۸) شماتیک برخورد قطره به سطح

شکل (۴-۱۹) تغییر ارتفاع بی بعد قطرات آب، گلیسیرین ۵۰٪ و ۲۶٪ را بر حسب زمان نشان می دهد. در شرایط کاملاً یکسان، این قطرات با قطر $2/3\text{mm}$ و با سرعت 2m/s به سطح برخورد کرده اند.



شکل (۴-۱۹) تغییر ارتفاع بی بعد قطرات با ویسکوزیته های مختلف بر حسب زمان؛ قطر اولیه $2/3\text{mm}$ ، سرعت برخورد 2m/s

نتایج نشان می‌دهد که به جز قطره گلیسیرین ۵۰٪، دو قطره دیگر از سطح بلند می‌شوند و رژیم ریپاندینگ اتفاق می‌افتد. هنگامی که قطره به سطح برخورد می‌کند، تحت تاثیر اینرسی، شروع به پخش شدن^۱ روی سطح می‌کند. در نتیجه ارتفاع بی‌بعد آن کاهش می‌یابد. همانگونه که از نمودار شکل (۴-۱۹) برمی‌آید، این کاهش ارتفاع تا زمان ۵ms ادامه دارد طوریکه به کمترین فاصله خود از سطح می‌رسد.

پس از آن قطره شروع به بازگشت به حالت قبلی^۲ خود می‌کند و در پی آن ارتفاع بی‌بعد افزایش می‌یابد. این بازگشت تا زمانی ادامه می‌یابد که ارتفاع بی‌بعد قطره به حداکثر مقدار خود برسد. در مسئله حاضر، این افزایش ارتفاع در مورد قطرات آب و گلیسیرین ۲۶٪ حدی ندارد، چراکه در این شرایط این قطرات به دلیل انرژی بالایشان از سطح جدا می‌شوند. در حالی که قطره گلیسیرین ۵۰٪ تا ارتفاع ماکزیمم ۰/۹ در لحظه ۱۸ms می‌رسد و پس از آن در این ارتفاع به حالت پایا باقی می‌ماند. در واقع در این شرایط قطره اصطلاحاً به حالت قبلی باز می‌گردد و سرعت برخورد آن، سرعت بازگشت به حالت قبلی^۳ است و حداکثر ارتفاع آن، حداکثر ارتفاع بازگشت است.

از نتایج بدست آمده می‌توان گفت که افزایش ویسکوزیته منجر به کاهش انرژی لازم برای برخاست از سطح می‌شود و قطره با ویسکوزیته بالا، تمایل دارد روی سطح باقی بماند. قطره آب که در بین دو قطره دیگر ویسکوزیته پایین‌تری داشت، با شدت بیشتری از سطح جدا شده و تغییر ارتفاع بزرگتری را تجربه کرد. حداکثر ارتفاع بازگشت و سرعت بازگشت بیانگر تمایل قطره برای رسیدن به شرایط ریپاندینگ است. بدین معنی که افزایش مقادیر این پارامترها منجر به برخاست قطره از سطح می‌شوند و انرژی کافی برای ریپاندینگ قطره را فراهم می‌کنند.

در شکل (۴-۱۹) نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. مقادیر بدست آمده برای قطرات جدا شده از اختلاف بیشتری را نسبت به قطره گلیسیرین ۵۰٪ نشان می‌دهد که در لحظه جدا شدن قطره از

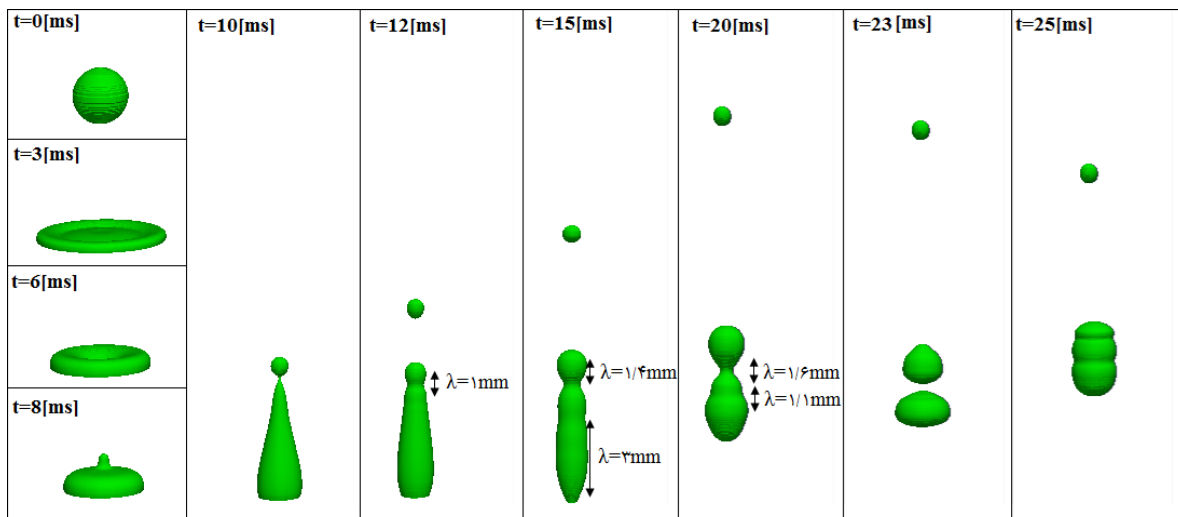
^۱ spreading

^۲ recoil

^۳ Velocity of recoil

سطح ظاهر می‌شود. این تفاوت را می‌توان ناشی از شرایط پیچیده آزمایشگاهی دانست که شبیه‌سازی عددی قادر نیست شرایط آزمون را بطور کامل فراهم نماید. چراکه در عمل برخاست قطره از سطح و حرکت آن در هوا محتمل نیروهای جانبی وارده از محیط است که امکان شبیه‌سازی دقیق این نیروها وجود ندارد.

در هنگام برخورد و جدایش قطره، ناپایداری کلوین هلمهولتز^۱ باعث تشکیل امواجی روی سطح مشترک با طول موج‌های متفاوت می‌شود. وجود این امواج به دلیل اختلاف سرعت بین دو فاز و در واقع شتاب سطح مشترک است [۶۱]. در شبیه‌سازی‌ها نیز این ناپایداری دیده می‌شود. شکل (۴-۲۰) طول موج و اندازه آن‌ها را نشان می‌دهد.



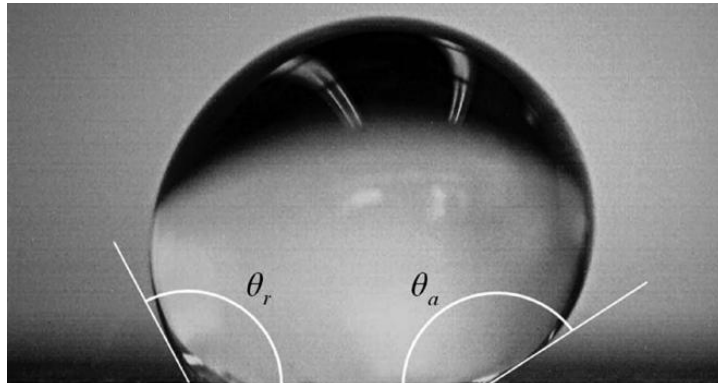
شکل (۴-۲۰) تغییر ارتفاع بی‌بعد قطرات با ویسکوزیته‌های مختلف بر حسب زمان؛ قطر اولیه $2/3\text{mm}$ ، سرعت برخورد 2m/s

۴-۱-۱-۲ زاویه برخورد دینامیکی

همانگونه که پیشتر بدان اشاره شد، زاویه برخورد از تعامل بین سه سطح مشترک تعیین می‌شود. در عمل، زاویه برخورد تجربی که خط برخورد نسبت به سطح جامد دارد، زاویه برخورد دینامیکی θ_d نام دارد. برخلاف زاویه برخورد استاتیکی، زاویه برخورد دینامیکی مشخصه‌ای از ماده نیست و روابط زیادی برای

^۱ Kelvin-Helmholtz

آن برحسب عدد موئینگی و سرعت خط برخورد پیشنهاد شده است. در محاسبات عددی اغلب زاویه برخورد دینامیکی طوری تنظیم می‌شود که بصورت تابعی از زاویه پسرو و پیشرو تغییر کند و سرعت خط برخورد بین محدوده $\pm U_{CL}$ باشد. بیش از این محدوده، زاویه تماس بسته به علامت سرعت خط برخورد، مقدار θ_a یا θ_r را خواهد داشت. شکل (۴-۲۱) زوایای برخورد پسرو و پیشرو را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۱) زوایای پیشرو و پسرو در برخورد قطره با سطح جامد

نرم‌افزار اوپن فوم مدل زاویه برخورد دینامیکی را در کتابخانه خود دارد و با اعمال شرط مرزی مربوط به آن می‌توان این مدل را برای شبیه‌سازی عددی بکار گرفت. مدل بکار رفته در این نرم‌افزار از رابطه زیر استفاده می‌کند:

$$\theta_d = \theta_0 + (\theta_a - \theta_r) \cdot \tanh\left(\frac{U_{wall|t}}{U_{theta}}\right) \quad (۹-۴)$$

θ_0 زاویه تعادلی قطره، θ_r و θ_a به ترتیب زوایای پیشرو و پسرو، $U_{wall|t}$ سرعت مماسی میدان بر روی فصل مشترک است. U_{theta} مقدار ثابتی است که به عنوان ورودی مسئله در شرایط مرزی اعمال می‌شود. هدف این است که با معلوم بودن θ_0 ، θ_a ، θ_r و U_{theta} ، با محاسبه $U_{wall|t}$ ، اندازه زاویه دینامیکی θ_d بدست آید. از آنجایی که متاسفانه مرجعی معتبر برای توضیح بیشتر این رابطه یافت نشد، در کار حاضر با جزئیات بیشتری به بررسی این رابطه پرداخته شده است.

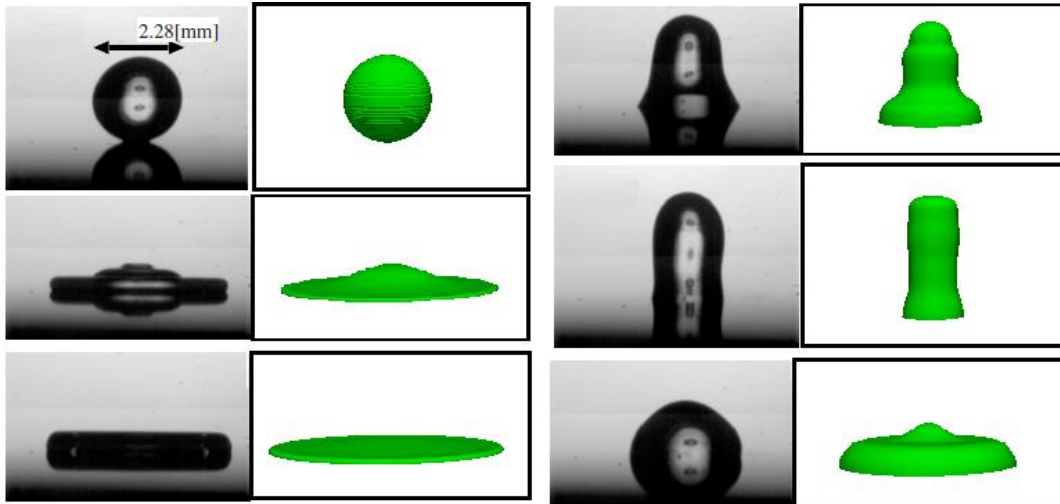
در سال ۲۰۰۸ یوکویی و همکاران [۳۲] بصورت عددی و آزمایشگاهی تاثیر زاویه برخورد دینامیکی را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در آزمایش‌های خود برخورد قطره آب به قطر $2/28mm$ را با سرعت $1m/s$ مورد مطالعه قرار دادند. در آزمایش‌های ایشان، زاویه پیشرو و پسرو به ترتیب ۱۱۴ و ۵۲ درجه و زاویه تعادلی ۹۰ درجه گزارش شدند. علاوه بر این ایشان به کمک نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، و با استفاده از شبیه‌سازی عددی به روش $CLSVOF$ مدلی را برای پیش‌بینی زاویه دینامیکی مطابق با رابطه (۴-۱۰) ارائه کردند.

$$\theta(U_{CL}) = \begin{cases} \min \left[\theta_e + \left(\frac{Ca}{k_a} \right)^{1/3}, \theta_a \right] & \text{if } U_{CL} \geq 0 \\ \max \left[\theta_e + \left(\frac{Ca}{k_r} \right)^{1/3}, \theta_r \right] & \text{if } U_{CL} < 0 \end{cases} \quad (4-10)$$

در این رابطه k_a و k_r دو پارامتر ثابت هستند که مقادیر آنها از طریق کوپلینگ نتایج عددی و آزمایشگاهی بدست می‌آید. این پارامترها در شرایط مختلف، مقادیر متفاوتی دارند که برآورد آن، تنها از طریق انجام آزمایش امکان‌پذیر است. در مقاله این افراد، مقادیر این دو پارامتر برای شرایط برخورد اشاره شده در بالا برابر با $k_a = 9 \times 10^{-9}$ و $k_r = 9 \times 10^{-8}$ گزارش شده است.

نتایج آزمایشگاهی مرجع [۳۲] برخورد قطره را در شرایط خاص اشاره شده در بالا، بدون ریباندینگ و جدایش از سطح نشان می‌دهند. در کار حاضر با کدنویسی مدل یوکویی و همکاران، به مقایسه نتایج این مدل و مدل زاویه برخورد دینامیکی مورد استفاده در اوپن‌فوم پرداخته شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل بکار رفته در نرم‌افزار اوپن‌فوم، پاسخ مناسبی از رفتار قطره پس از برخورد به سطح را دارد. شکل (۴-۲۲) مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی است.



شکل (۴-۲۲) مقایسه نتایج آزمایشگاهی مرجع [۳۲] و نتایج شبیه‌سازی مدل زاویه برخورد دینامیکی کار حاضر

همانگونه که مشخص است، نتایج مدل عددی مورد استفاده، تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی

مرجع [۳۲] دارد.

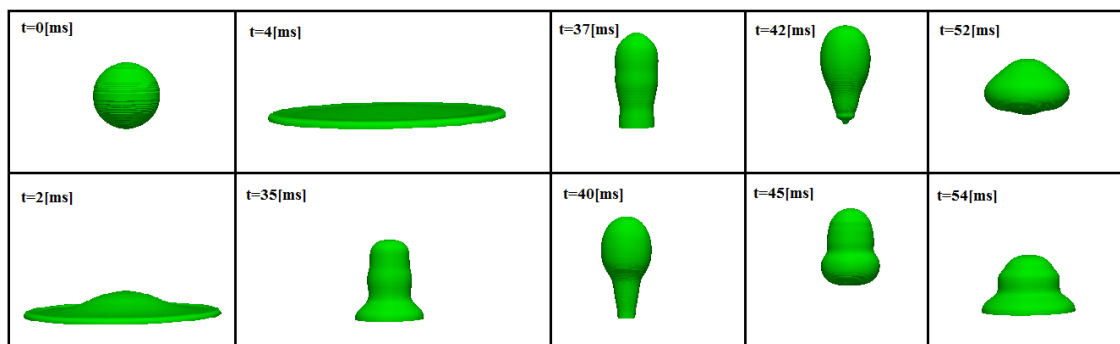
از طرف دیگر نتایج بدست آمده از کد نوشته شده، نشان می‌دهد که مدل یوکویی و همکاران

پیش‌بینی درستی از رفتار قطره ندارد و لازم است دو پارامتر k_a و k_r مطابق با روش مورد استفاده در کار

حاضر (VOF) تصحیح شود. طبق نتایج این مدل، قطره پس از برخورد، در لحظه $42ms$ شروع به جدا شدن

از سطح می‌کند و پس از حدود $10ms$ دوباره روی سطح می‌افتد. شکل (۴-۲۳) نتایج مدل‌سازی را در

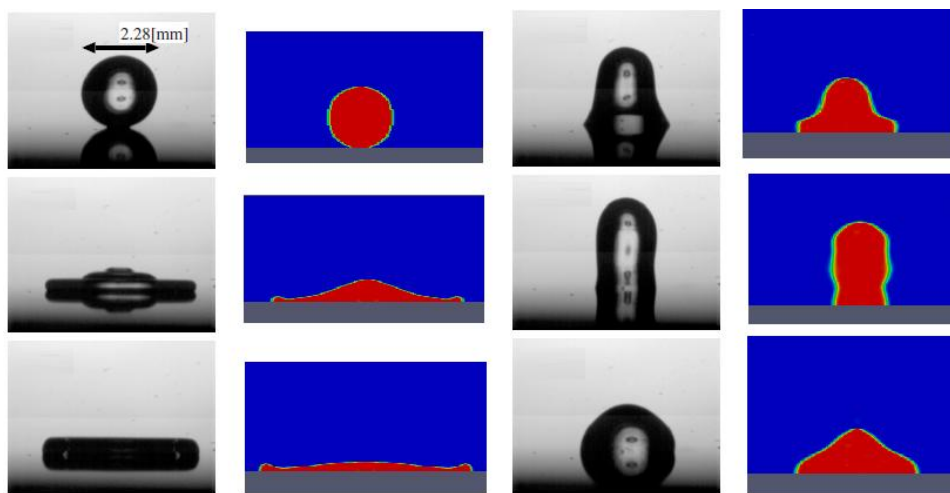
لحظات مختلف نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۳) نتایج شبیه‌سازی مدل زاویه برخورد دینامیکی یوکویی و همکاران [۳۲] در کار حاضر

لذا مدل یوکویی و همکاران به علت ضعف در پیش‌بینی صحیح پدیده در روش VOF توصیه نمی‌شود. علاوه بر این، دو پارامتر موجود در رابطه ارائه شده این افراد تنها برای شرایط خاصی از برخورد قطره (قطره آب، قطر $2/28\text{mm}$ ، سرعت برخورد 1m/s ، زاویه پیشرو و پسرو به ترتیب 114 و 52 درجه و زاویه تعادلی 90) می‌باشد.

از آنجایی که مدل زاویه استاتیکی به عنوان یکی از ساده‌ترین مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها مطرح است، این روش نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۴-۲۴) مقایسه‌ای را از نتایج این مدل با نتایج تجربی موجود نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۴) مقایسه نتایج تجربی مرجع [۳۲] و نتایج شبیه‌سازی مدل زاویه برخورد استاتیکی 90 درجه کار حاضر

مطابق شکل، نتایج عددی هماهنگی بسیار خوبی را با نتایج تجربی نشان داده است و این حاکی از توانمندی بالای مدل زاویه استاتیکی در پیش‌بینی پدیده است. از طرفی مدل زاویه برخورد استاتیکی یکی از ساده‌ترین مدل‌ها در کدنویسی است که به عنوان مزیت این مدل تلقی می‌شود. لذا بکارگیری این مدل پیشنهاد بهتری برای شبیه‌سازی‌ها خواهد بود. در ادامه برای بررسی بهتر این دو مدل (زاویه استاتیکی و زاویه دینامیکی مورد استفاده در نرم‌افزار اوپن‌فوم) به مقایسه آن‌ها با مدل‌های دیگر رایج نیز خواهیم پرداخت.

در سال ۲۰۰۵ گونجال و همکاران [۳۶] به بررسی آزمایشگاهی و عددی برخورد قطره با زوایای تماس مختلف پرداختند. ایشان در آزمایش‌های خود، برخورد قطرات آب با قطره‌های مختلف را روی سطوح متفاوت مورد مطالعه قرار دادند و زاویه پیشرو و پسرو را برای سطوح مختلف گزارش کردند. ایشان همچنین با استفاده از روش حجم سیال، با ساده‌سازی مسئله از طریق متوسط‌گیری از زاویه تماس دینامیکی به شبیه‌سازی‌ها این پدیده پرداختند. در تحقیق حاضر، با در دست داشتن نتایج تجربی مرجع [۳۶] به بررسی مدل‌های مختلف ارائه شده در این زمینه می‌پردازیم.

شبیه‌سازی‌ها براساس پنج مدل مختلف انجام شده است. مدل اول، مدل زاویه برخورد دینامیکی بکار رفته در نرم افزار اوپن‌فوم است که پیشتر به جزئیات آن اشاره شد. مدل دوم از زاویه برخورد استاتیکی (که همان متوسط زوایای اندازه‌گیری شده در کار مرجع [۳۶] است) استفاده می‌کند. مدل سوم از زاویه تعادلی ۹۰ درجه استفاده می‌کند. مدل چهارم و پنجم در نرم‌افزار کدنویسی شده‌اند که روابط زیر را اجرا می‌کنند:

مدل چهارم از جمله روابطی است که کاربرد گسترده‌ای دارد و به قانون هافمن-ونیو-تانر مشهور است.

$$\theta_d^3 - \theta_e^3 \cong c_T Ca \rightarrow \theta_d = (72Ca + \theta_e^3)^{1/3} \quad (11-4)$$

مدل پنجم از اندازه سرعت خط برخورد زاویه را بصورت زیر پیش‌بینی می‌کند:

$$\theta(U_{CL}) = \begin{cases} \theta_a & \text{if } U_{CL} \geq 0 \\ \theta_r & \text{if } U_{CL} < 0 \end{cases} \quad (12-4)$$

سرعت خط برخورد از دیفرانسیل شعاع منطقه تر (r_{CL}) روی دیوار بدست می‌آید:

$$U_{CL} = \frac{dr_{CL}}{dt} \quad (13-4)$$

مشخصات هر یک از حالات مورد بررسی در جدول (۴-۴) آورده شده است. در کنار بررسی

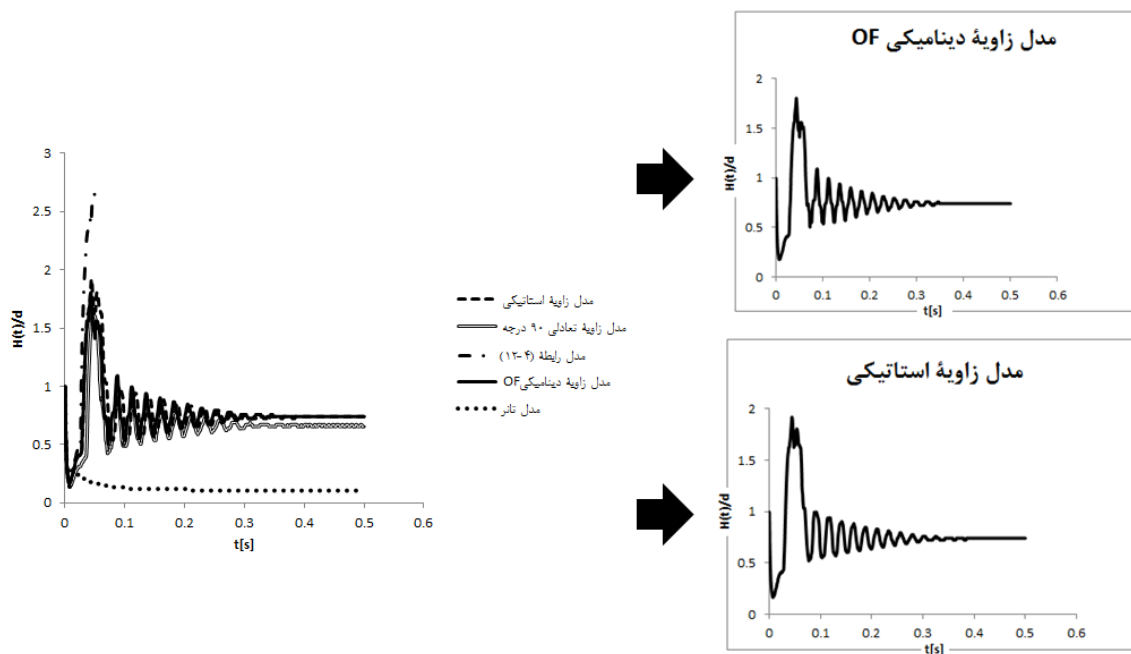
مدل‌های زاویه دینامیکی، رژیم‌های مختلف ایجاد شده در حالات مختلف نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

جدول (۴-۴) مشخصات حالات شبیه‌سازی شده

حالت	مایع-سطح	سرعت برخورد (m/s)	قطر (mm)	زاویه پیشرو (°)	زاویه پسرو (°)	زاویه استاتیکی (°)
۱	آب-تفلون	۱	۲/۵	۱۲۵	۱۱۰	۱۱۰
۲	آب-شیشه	۰/۳	۲/۵	۴۲	۳۷	۳۵
۳	آب-شیشه	۰/۲۲	۴/۲	۷۵	۴۰	۵۰

در حالت ۱، قطره آب به قطر ۲/۵mm با سرعت ۱m/s به سطحی از جنس تفلون برخورد می‌کند.

شبیه‌سازی‌ها برای مدل‌های مختلف مطابق با شکل (۴-۲۵) است. نتایج آزمایشگاهی مرجع [۳۶] نشان می‌دهد، در این شرایط، قطره پس از برخورد، روی سطح پخش شده^۱، سپس جمع می‌شود^۲. در این مرحله قطره برای لحظاتی از روی سطح بلند می‌شود و سپس دوباره به روی آن می‌افتد^۳. پس از آن برای مدتی نوسان می‌کند و در نهایت ثابت می‌ماند.



شکل (۴-۲۵) ارتفاع بی‌بعد قطره بر حسب زمان در مدل‌های مختلف زاویه تماس؛ حالت ۱

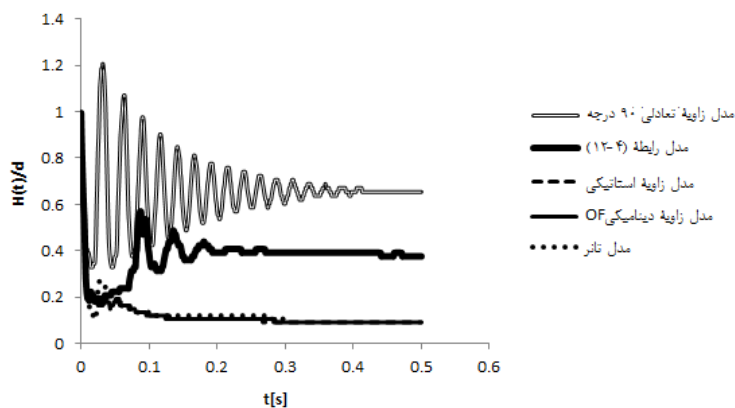
- ^۱ spreading
- ^۲ recoiling
- ^۳ rebounding

همانگونه که از شکل (۴-۲۵) برمی‌آید، مدل‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی را نشان می‌دهد. مطابق نتایج حاصل، مدل تانر، قادر به پیش‌بینی این حالت از برخورد قطره نیست. این مدل، نتوانست مرحله جمع شده‌گی قطره را مدل‌سازی کند و قطره روی سطح پخش و تقریباً ساکن شد.

در مدل رابطه (۴-۱۲) قطره پس از جدایش از سطح، با حرکت صعودی از محدوده محاسباتی خارج شد. این مدل نتوانست بازگشت قطره را به سطح اولیه خود پیش‌بینی کند.

اما مدل‌های زاویه تماس استاتیکی و دینامیکی و همچنین مدل زاویه تعادلی ۹۰ درجه نتایج تقریباً یکسانی را نشان دادند. روند برخورد و تغییر شکل قطره در این مدل‌ها، مطابق با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. تفاوت تنها در مقدار حداکثر ارتفاع بی‌بعد می‌باشد. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که در این شرایط حداکثر ارتفاع بی‌بعد قطره ۲/۲۶۴ خواهد بود. نتایج عددی هر یک از مدل‌های ارائه شده، با خطای قابل قبولی حداکثر ارتفاع بی‌بعد را پیش‌بینی کرده است. برای این حالت، مدل زاویه برخورد استاتیکی با ۱۵٪ خطا نسبت به دیگر مدل‌ها پیش‌بینی بهتری دارد. جدول (۴-۵) نتایج مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد.

در حالت ۲، با کاهش سرعت برخورد، قطره ۲/۵ میلی‌متری با سرعت 0.3 m/s به سطحی از جنس شیشه برخورد می‌کند. شبیه‌سازی‌ها برای مدل‌های مختلف مطابق با شکل (۴-۲۶) است. طبق نتایج آزمایشگاهی، در این شرایط آب مدتی پس از حرکت نوسانی روی سطح، ثابت باقی می‌ماند.



شکل (۴-۲۶) ارتفاع بی‌بعد قطره بر حسب زمان در مدل‌های مختلف زاویه تماس؛ حالت ۲



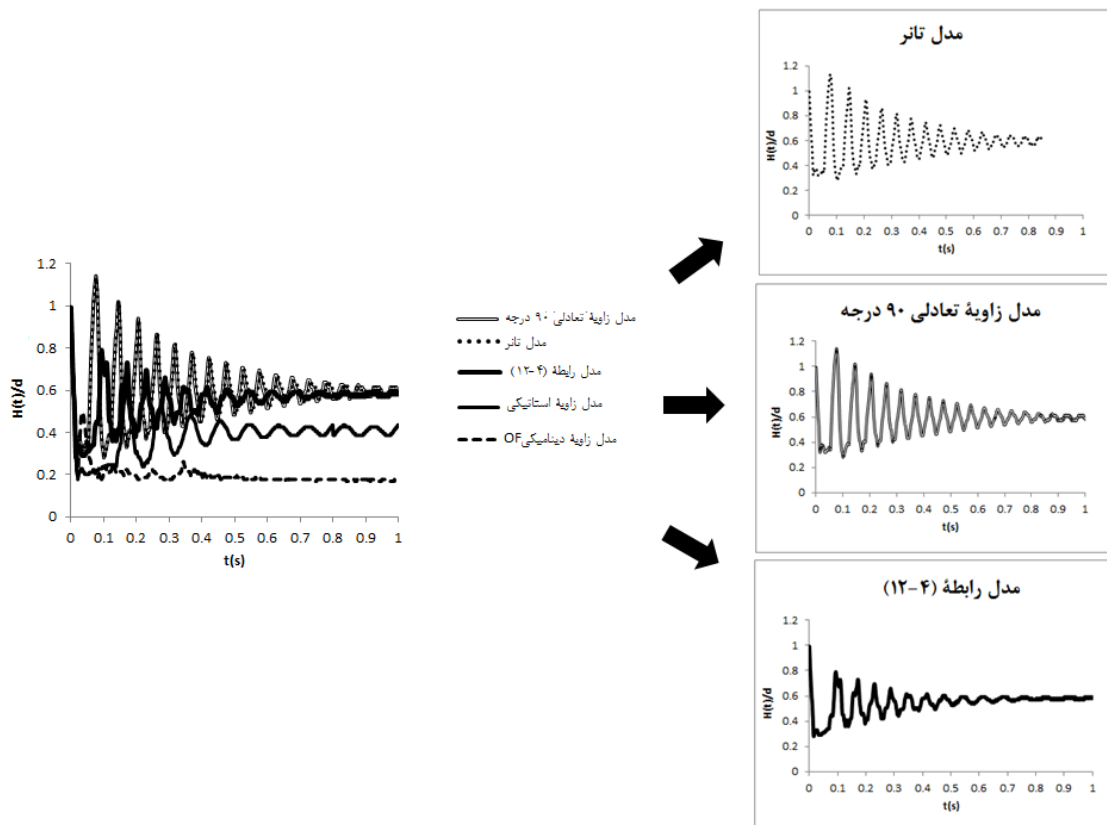
از نتایج بدست آمده دیده می‌شود که مدل زاویه تعادلی ۹۰ درجه و مدل رابطه (۴-۱۲) نسبت به مدل‌های دیگر نتایج بهتری را نشان می‌دهند. در این حالت مدل‌های زاویه استاتیکی و دینامیکی و همچنین مدل تانر قادر به پیش‌بینی مرحله جمع شده‌گی قطره نیستند. چراکه در کانتورهای حجمی بدست آمده قطره کاملاً روی سطح باز و بصورت لایه‌ای از سیال روی سطح ساکن می‌شود (همانند مدل تانر در پیش‌بینی حالت ۱). گرچه دو مدل زاویه تعادلی ۹۰ درجه و مدل رابطه (۴-۱۲) پیش‌بینی صحیحی از رفتار قطره در برخورد به سطح دارند، اما تفاوت‌هایی در تغییر ارتفاع و نوسان قطره نشان می‌دهند. مبنای سنجش نتایج در این بخش ارتفاع نهایی قطره در هنگام ثابت ماندن روی سطح است. نتایج آزمایشگاهی ارتفاع معادل را برابر با 0.94mm ذکر کرده‌اند. این ارتفاع متناظر با ارتفاع بی‌بعد 0.376 است. همانگونه که از نمودار (۴-۲۶) برمی‌آید، نتایج عددی مدل رابطه (۴-۱۲) به دقت بسیار بالایی این مقدار را پیش‌بینی کرده است در حالی که مدل زاویه تعادلی ۹۰ درجه با اختلاف زیادی با نتایج تجربی دارد. در نهایت می‌توان گفت برای این حالت استفاده از مدل رابطه (۴-۱۲) پیشنهاد می‌شود.

عمده تفاوت حالت ۱ و ۲ در سرعت برخورد قطره و زاویه تماس است که در نتیجه آن دو رژیم مختلف دیده شد. به منظور بررسی دقیق‌تر مسئله و یافتن علت تفاوت پاسخ هر یک از مدل‌ها، حالت ۳ مورد مطالعه قرار گرفت. در این حالت سرعت برخورد کاهش و قطر و زاویه تماس افزایش یافته است. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در این شرایط، قطره پس از مدتی نوسان، روی سطح ثابت باقی می‌ماند. نتایج شبیه‌سازی بصورت شکل (۴-۲۷) بدست آمده است.

در این حالت، تمامی مدل‌ها جز مدل زاویه دینامیکی، قادر به پیش‌بینی رفتار قطره شدند. مدل زاویه دینامیکی همانند حالت ۲ نتوانست مرحله جمع شده‌گی قطره را مدل‌سازی کند. از طرفی مدل تانر کاملاً منطبق بر مدل زاویه تعادلی ۹۰ درجه می‌باشد. این امر ناشی از عدد موئینگی بسیار کوچک قطره است که در رابطه مدل تانر تاثیر چندانی ندارد و این مدل همانند مدل زاویه تعادلی ۹۰ درجه رفتار می‌کند.

عدد موئینگی ($Ca = \mu U / \sigma$) برای این حالت داری مقداری در حدود 1×10^{-4} می باشد. بنابراین می توان گفت برای $Ca \leq 1 \times 10^{-4}$ به جای مدل تانر می توان از مدل زاویه تعادلی 90° درجه بهره جست.

مدل رابطه (۴-۱۲) در مقایسه با دو مدل تانر و زاویه تعادلی 90° درجه، تغییرات ارتفاع قطره را هنگام نوسان کمتر نشان می دهد، اما ارتفاع نهایی بدست آمده بسیار نزدیک به پیش بینی این دو مدل است. مدل رابطه (۴-۱۲) ارتفاع بی بعد معادل را $0/58$ و دو مدل دیگر این ارتفاع را $0/61$ تخمین می زنند. از طرفی در نتایج آزمایشگاهی ارتفاع متناظر $0/376$ می باشد. بنابراین این سه مدل درصد خطای بالایی را دارند.



شکل (۴-۲۷) ارتفاع بی بعد قطره بر حسب زمان در مدل های مختلف زاویه تماس؛ حالت ۳

در نهایت مدل زاویه استاتیکی مورد بررسی واقع شد. این مدل بر خلاف مدل های دیگر بخوبی رفتار قطره را پیش بینی می کند، بطوریکه درصد خطای آن برای تقریب ارتفاع بی بعد معادل 8% می باشد. جدول (۴-۵) مقایسه نتایج هر یک از مدل ها و خطای نسبی در هر حالت است.



جدول (۴-۵) مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌های مختلف

حالت	مدل زاویه دینامیکی	مدل زاویه استاتیکی	مدل زاویه تعادلی ۹۰	مدل تانر	رابطه (۴-۱۲)
۱	۱/۸۰	۱/۹۱	۱/۶۰	-	-
خطای نسبی (%)	۲۰	۱۵	۲۹	-	-
۲	-	-	۱/۲	-	۰/۳۷۵۹
خطای نسبی (%)	-	-	۳۲	-	۰/۰۱
۳	-	۰/۳۴	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۵۸
خطای نسبی (%)	-	۸	۶۶	۶۶	۵۹

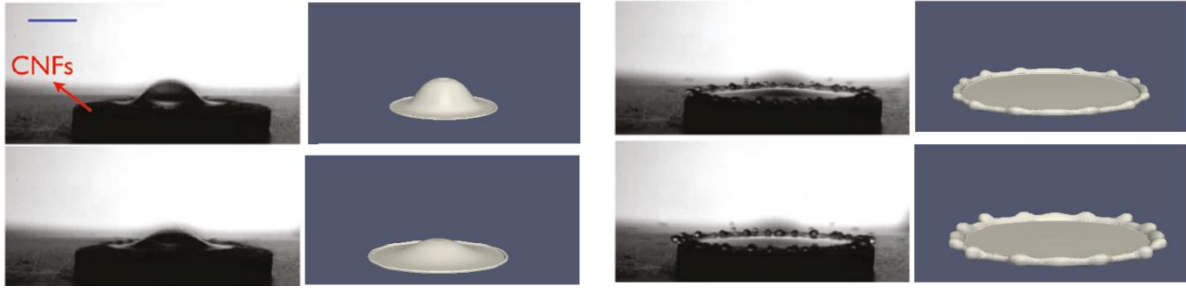
نتایج حاکی از آن است که مدل زاویه تعادلی ۹۰ درجه می‌تواند رفتار کلی قطره را پیش‌بینی کند، اما جزئیات رفتار قطره روی سطح را نمی‌تواند بخوبی تفسیر کند و شکل نهایی آن را با خطای زیادی نشان می‌دهد.

از طرفی مدل زاویه دینامیکی در سرعت‌های برخورد بالا که منجر به جدایش قطره از سطح می‌شود، پیش‌بینی قابل قبولی را از حرکت قطره دارد، گرچه زاویه استاتیکی نتیجه بهتری را نشان می‌دهد.

مدل تانر یکی از قدیمی‌ترین مدل‌هایی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد مدل‌های ارائه شده در سال‌های اخیر، رفتار قطره را به خوبی تخمین می‌زنند. در شرایط مشابه این مدل نتوانست نتایج خوبی را نشان دهد. لذا استفاده از این مدل برای انجام شبیه‌سازی‌ها پیشنهاد نمی‌شود.

مدل زاویه استاتیکی یکی از برترین مدل‌ها برای پیش‌بینی رفتار قطره می‌باشد، جز در شرایطی که زاویه تماس کوچک (کمتر از ۵۰ درجه) و سرعت برخورد تا اندازه‌ای باشد که قطره از سطح جدا نشود. در این حالت استفاده از مدل رابطه (۴-۱۲) توصیه می‌شود که با دقت بسیار زیادی تغییر شکل قطره را دنبال می‌کند. در ادامه مسئله نمونه‌ای که سای^۱ و همکاران [۶۲] برخورد قطره با زاویه استاتیکی ۱۶۳ درجه را با جزئیات بیشتر بررسی نموده‌اند، شبیه‌سازی شده است. شکل (۴-۲۸) نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی در مقایسه با مرجع [۶۲] به کمک مدل زاویه استاتیکی است.

^۱ Tsai



شکل (۴-۲۸) مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۶۲]

همانگونه که از شکل برمی‌آید، مدل زاویه استاتیکی به خوبی رفتار قطره را پیش‌بینی کرده است.

۴-۴-۲- برخورد قطره به لایه‌ای از سیال

همانگونه که در فصول پیشین گفته شد، در برخورد قطره به لایه‌ای از سیال مسائلی همچون اتصال دو سیال، کویتاسیون یا به دام افتادن هوا در لایه سیال نیز بحث شده‌است. علاوه بر این رژیم‌های مختلفی از برای این پدیده تعریف شده‌است. در ادامه به کمک شبیه‌سازی عددی به پیش‌بینی رفتار قطرات در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز و وبر خواهیم پرداخت.

به عنوان گام اول، به بررسی رژیم‌های جریان در این پدیده می‌پردازیم. در سال ۲۰۰۸ کرچنیکو^۱ و هومسی^۲ [۲] با انجام آزمایش‌هایی، رژیم‌های تاج متقارن، تاج با اسپایک متقارن و تاج بی‌قاعده را برای وبرهای متفاوت قطره و فیلم مایع تعریف کردند. همچنین ایشان با ارائه نموداری محدوده الگوهای ایجاد شده را برای وبرهای مختلف مشخص کردند. این نمودار محدوده وبر فیلم مایع را بین ۳۰/۹-۲۲۴/۶ در نظر می‌گیرد. وبر فیلم مایع، براساس نسبت قطر قطره به ضخامت فیلم (r) بصورت رابطه (۴-۱۴) تعریف می‌شود.

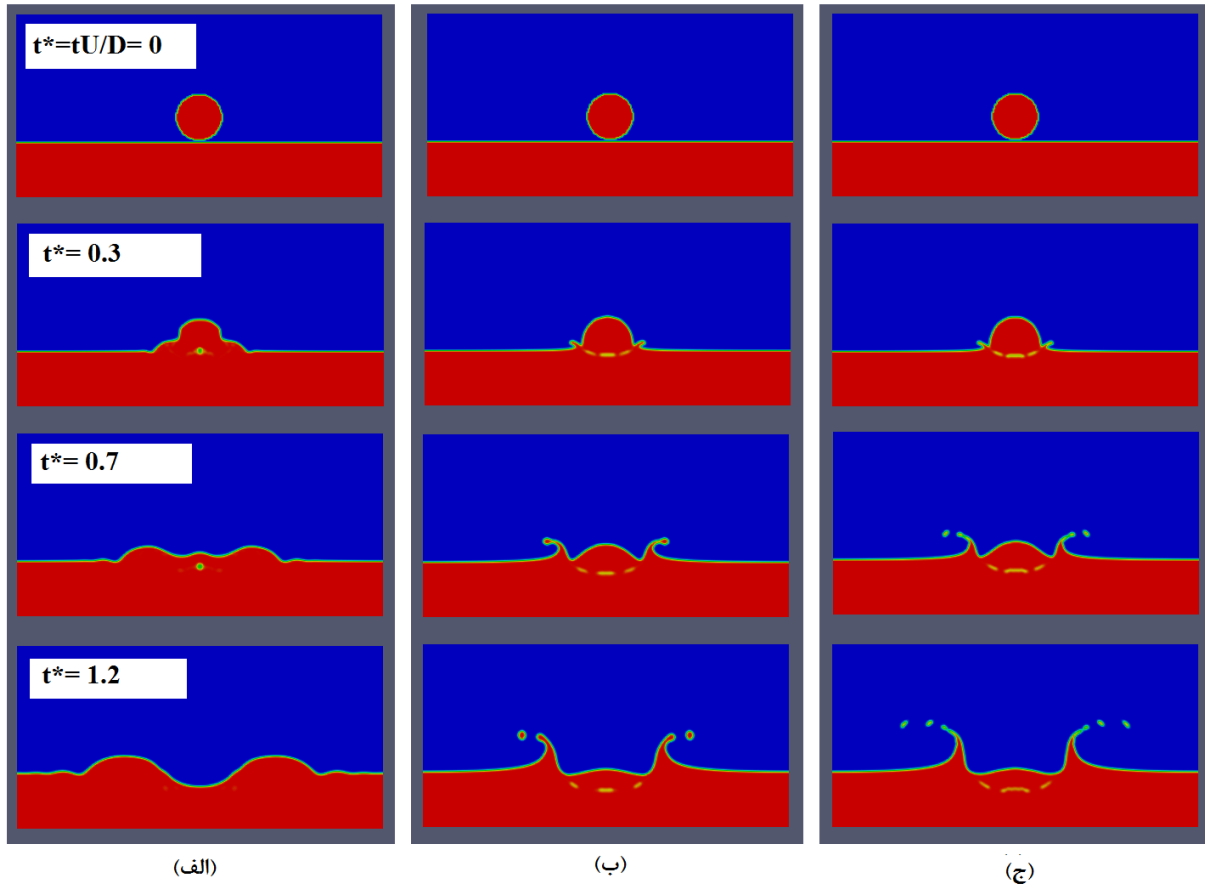
$$r = d / h \quad (۴-۱۴)$$

$$We_{film} = r^{-1} \cdot We_l$$

^۱ Krechetnikov

^۲ Homsy

در تحقیق حاضر این مسئله بصورت دوبعدی و سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. قطره بوتانول به قطر $217\mu m$ به فیلمی از مایع به ضخامت 3mm برخورد می‌کند. سرعت‌های برخورد روند افزایشی دارد. شکل (۴-۲۹) نتایج حل عددی دوبعدی برای اعداد وبر ۴، ۳۰۰ و ۲۰۰۰ است که برحسب زمان بی‌بعد ارائه شده‌اند.

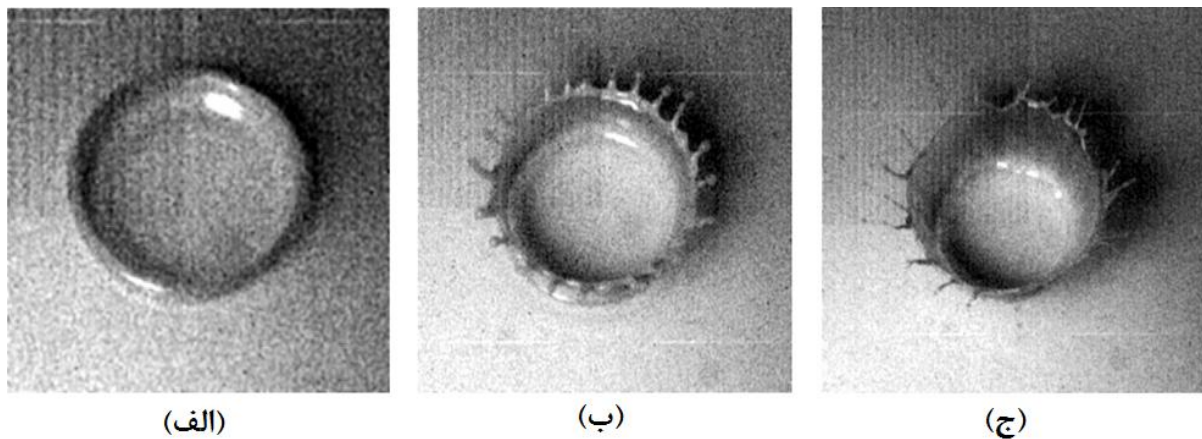


شکل (۴-۲۹) سه رژیم (الف): تاج متقارن، (ب): تاج با اسپایک متقارن، (ج): تاج بی‌قاعده در برخورد قطره به قطر $4\mu m$ به فیلم مایع

در حالت الف، قطره با سرعت پایین و با $We=4$ به فیلمی از سیال از جنس خود برخورد می‌کند. در این شرایط، قطره به آرامی به سیال برخورد می‌کند به طوری که تنها امواجی روی آن تشکیل می‌شود و سطح سیال شروع به حرکت می‌کند. اصطلاحاً به این الگو، الگوی تاج متقارن می‌گویند. از طرفی با افزایش سرعت برخورد و وبر به ۳۰۰، برخورد قطره منجر به تشکیل قطرات ثانویه در حین برخورد می‌شود. در این

شرایط اصطلاحاً الگوی ایجاد شده، تاج با اسپایک متقارن نام می‌گیرد. اسپایک‌ها همان قطرات ثانویه‌ای هستند که بصورت متقارن در اطراف تاج تشکیل شده و با گذشت زمان از بدنه قطره جدا می‌شوند.

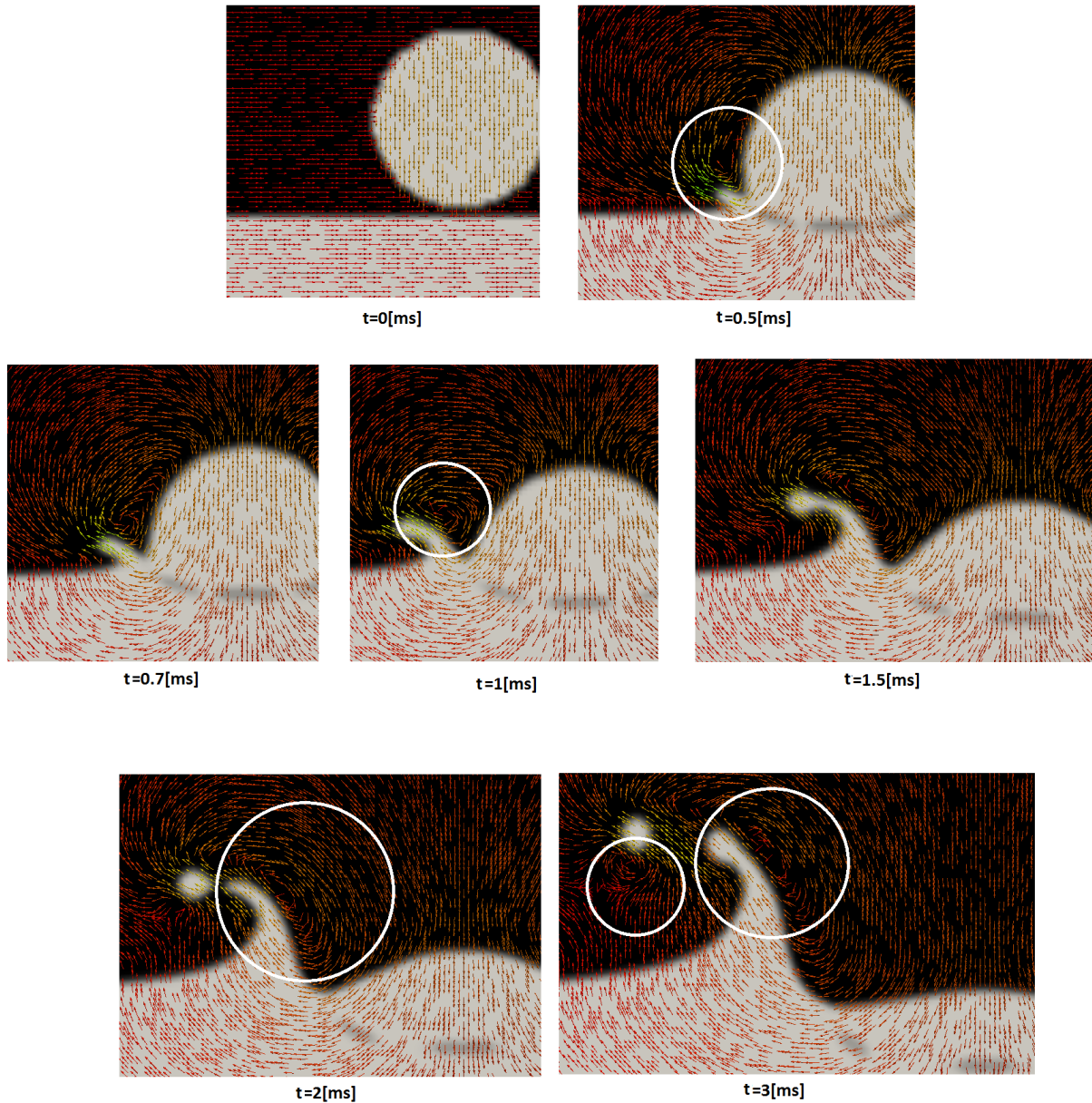
افزایش هرچه بیشتر سرعت، منجر به افزایش اسپایک‌ها می‌شود. این اسپایک‌ها تمایل دارند بلافاصله از لبه مایع جدا می‌شوند. این روند تا رسیدن قطره به سطح مایع ادامه می‌یابد و همواره قطرات ثانویه به محیط اطراف پخش می‌شوند و اصطلاحاً تاج بی‌قاعده تشکیل می‌شود. این الگو در وبرهای بیش از ۱۰۰۰، حتماً اتفاق می‌افتد [۲]. در شبیه‌سازی‌ها نیز برای بررسی این حالت برخورد قطره با وبر ۲۰۰۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. مطابق با حالت (ج) در شکل (۴-۲۹)، اسپایک‌ها در همان لحظات اولیه تشکیل و شروع به جدا شدن از لبه‌های مایع می‌شوند. این روند کاملاً با آنچه که در عمل اتفاق می‌افتد هماهنگی دارد. شکل (۴-۳۰) انواع تاج را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۳۰) سه رژیم (الف): تاج متقارن، (ب): تاج با اسپایک متقارن، (ج): تاج بی‌قاعده [۹]

در مراحل اولیه برخورد، میدان سرعت القا شده به فاز گاز، با گردابه‌هایی نزدیک به لبه‌های تاج مشخص می‌شود. شکل (۴-۳۱) میدان سرعت شبیه‌سازی شده در کار حاضر را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. در لحظه $t=0$ ، قطره دارای سرعت بوده و محیط اطراف ساکن است. با برخورد قطره و بالا آمدن فیلم مایع، فاز گاز شروع به حرکت می‌کند و در همان زمان‌های اولیه، ورتیسیت‌هایی در اطراف تاج تشکیل می‌شوند ($t=0/\Delta ms$). وجود حلقه‌های ورتیسته در نزدیکی لبه‌های انتهایی تاج به جدا شدن قطرات ثانویه از

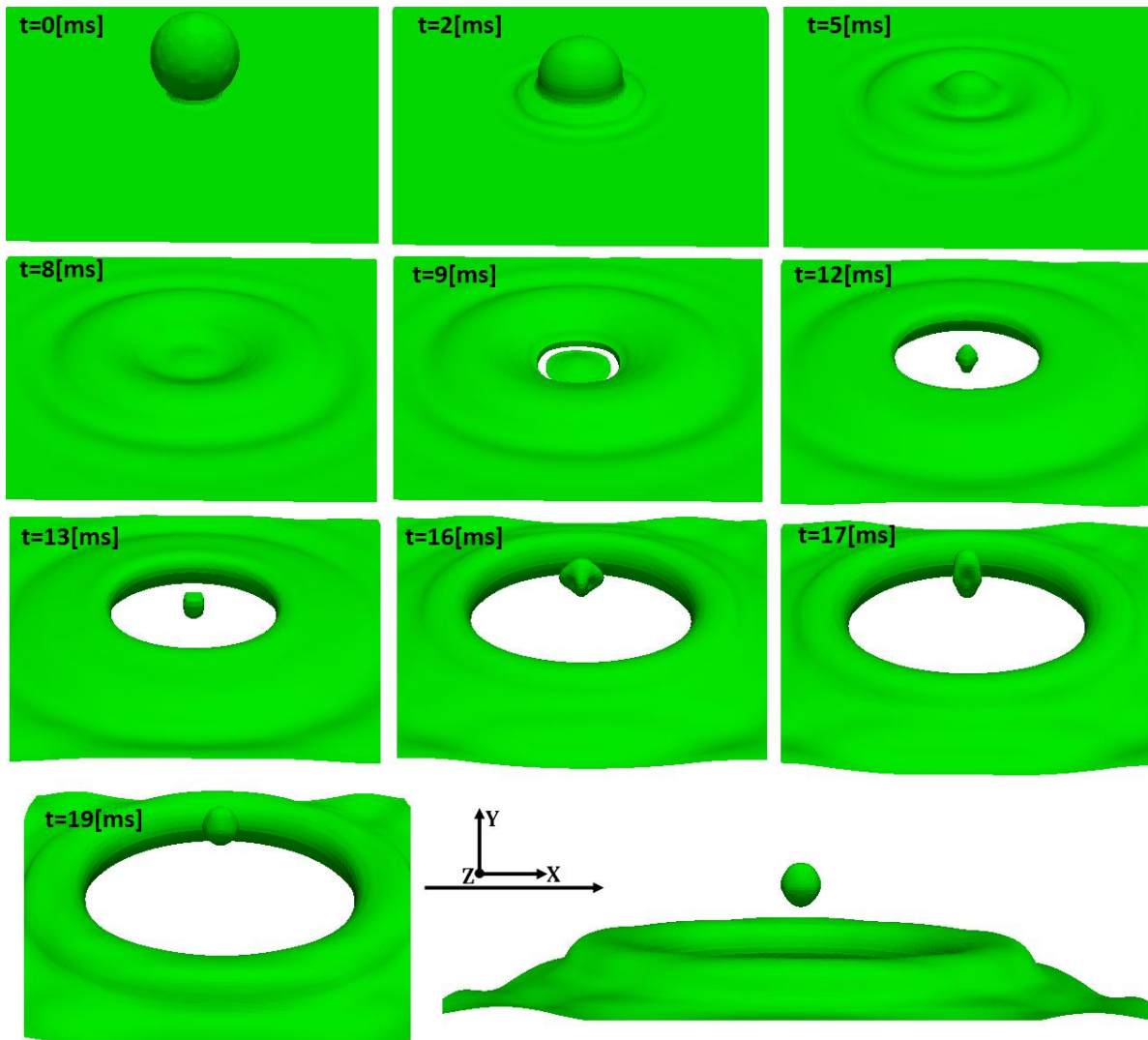
لبه‌ها کمک می‌کند. با جدایش قطرات ثانویه، این حلقه‌ها گسترش یافته و در اطراف قطره ثانویه نیز ناحیه از این گردابه‌های چرخشی بوجود می‌آید ($t=3ms$). روند گسترش میدان سرعت محیط اطراف با مرجع [۲۲] هماهنگی کاملی دارد.



شکل (۴-۳۱) نتایج شبیه‌سازی میدان سرعت در کار حاضر؛ گردابه‌های تشکیل شده اطراف تاج

از آنجایی که شبیه‌سازی در سه بعد امکان پیش‌بینی بهتر و دقیق‌تر پدیده‌های ممکن را می‌دهد، بدین جهت در تحقیق حاضر به مطالعه سه‌بعدی برخورد قطره به فیلم مایع پرداخته شد. نتایج منجر به

پیش‌بینی رژیم‌های شد که در مدل‌سازی دو بعدی جزئیات این رژیم دیده نشد. قطره بوتانول به قطر $2/5\text{mm}$ و بر 200 ، در برخورد به سطح، رژیم تاج متقارن را نشان می‌دهد. اما در این حالت شدت برخورد قطره به سطحی به حدی است که قطره ثانویه‌ای از میان مایع بلند شده و به بالا پرتاب می‌شود. شکل (۴-۳۲) روند تغییر شکل‌های دیده شده را نشان می‌دهد.

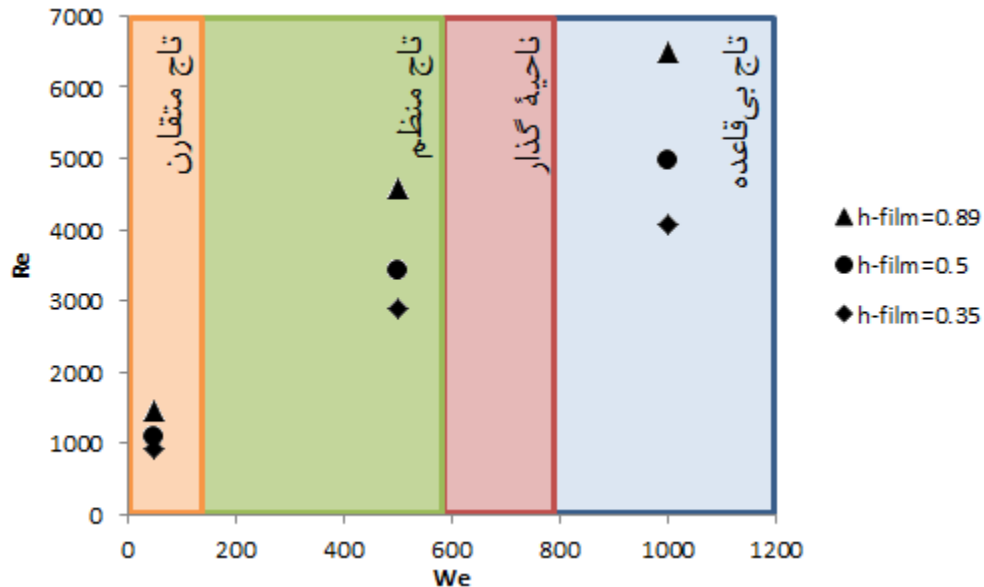


شکل (۴-۳۲) برخورد قطره بوتانول به فیلم مایع و تشکیل قطره ثانویه و برخاست آن

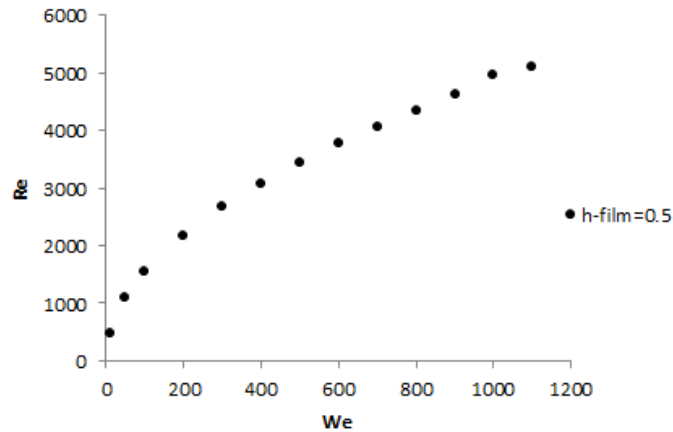
این حالت یکی از معدود مواردی است که در شبیه‌سازی‌ها گزارش شده است که در تحقیق حاضر

به آن اشاره شد.

رژیم‌های تشکیل شده، را می‌توان در محدوده اعداد وبر و رینولدز متفاوتی مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایشگاهی، محدوده عدد وبر قطره را بصورت نواحی مشخص شده در شکل (۴-۳۳) گزارش داده‌اند. این نتایج برای $30/9 \leq We_{film} \leq 224/6$ برقرار است. برای بررسی تغییرات رینولدز بر حسب وبر در هر ناحیه، با ثابت نگه داشتن نسبت قطر قطره به ضخامت فیلم، شبیه‌سازی‌ها انجام و نتایج زیر حاصل شده‌است.

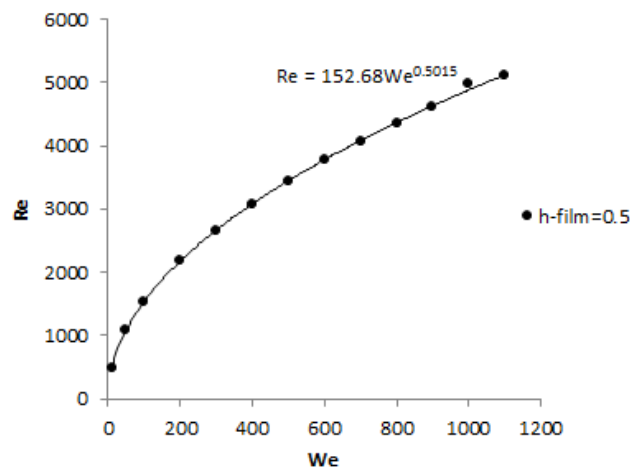


شکل (۴-۳۳) تغییرات رینولدز بر حسب وبر قطره در ضخامت‌های مختلف فیلم در نسبت ثابت قطر به ضخامت همانگونه که مشخص است، در نواحی مربوط به تاج‌های منظم و بی‌قاعده، با افزایش ضخامت فیلم پدیده در رینولدزهای بزرگتری اتفاق می‌افتد. در واقع با افزایش ضخامت فیلم، سرعت‌های برخورد بزرگتری لازم است تا شرایط برای تشکیل اسپایک و در نتیجه آن، تشکیل قطرات ثانویه، فراهم شود. در حالی که در وبرهای پایین که امکان تشکیل اسپایک وجود ندارد، افزایش ضخامت تاثیر چندانی در افزایش رینولدز نخواهد داشت. علاوه بر این، نحوه افزایش رینولدز بر حسب وبر در ضخامت ثابت فیلم، مطابق شکل (۴-۳۴) بدست آمده است.



شکل (۴-۳۴) تغییرات رینولدز بر حسب وبر قطره در ضخامت ثابت فیلم

نتایج نشان می‌دهد که تغییرات رینولدز با وبر بصورت خطی نیست. بدین منظور برای یافتن رابطه رینولدز و وبر به کمک برازش منحنی روی نقاط در دسترس، معادله حاکم بر این دو پارامتر مطابق شکل (۴-۳۵) بدست می‌آید.



شکل (۴-۳۵) منحنی برازش شده جهت توصیف روند تغییرات رینولدز بر حسب وبر

نتایج نشان می‌دهد، روند افزایش رینولدز در نواحی مختلف تشکیل تاج با افزایش وبر نسبت مستقیم ندارد، بلکه متناسب با $We^{1/5}$ خواهد بود. لذا با داشتن رینولدز امکان تقریب وبر و در نتیجه آن پیش‌بینی رژیم فراهم می‌آید.

۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل با شبیه‌سازی قطره در میدان جریان، تغییر شکل آن بررسی شد. با توجه به مشخصات فیزیکی قطره و محیط پیوسته اطراف آن، تغییر شکل‌های گوناگونی در طول سقوط قطره ایجاد می‌شود. این تغییر شکل‌ها برای گستره وسیعی از اعداد بدون بعد اتووس و مورتون تحلیل شد.

علاوه بر این ضریب پسای وارد بر قطره در طول حرکت آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش قطر کاهش این ضریب را به همراه دارد.

از آنجایی که وجود گرادیان فشار بعنوان عاملی برای متلاشی شدن قطره است، لذا تغییرات فشار در مدت زمان متلاشی شدن قطره بررسی شد. همچنین برخورد قطره به سطح، شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از این بود که ویسکوزیته سیال در تعیین نوع الگوی برخورد قطره تاثیرگذار است.

در ادامه با کدنویسی برخی از مدل‌های رایج در زمینه برخورد قطره به سطح، هر یک از این مدل‌ها بررسی شد. مطابق نتایج حاصل، استفاده از مدل زاویه استاتیکی در مدل‌سازی برخورد قطره به سطح پیشنهاد شد. همچنین در برخورد قطره به فیلم مایع هم‌جنس خود، جزئیات میدان جریان بدست آمد و رابطه‌ای بین عدد رینولدز و وبر استخراج شد.

فصل ۵

جمع‌بندی و پیشنهادات

۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه جریان دوفازی قطره‌ای با استفاده از روش حجم سیال (VOF) شبیه‌سازی شده است. نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم، برای حل معادلات ناویر-استوکس به کار رفته و با استفاده از الگوریتم پیزو میدان فشار محاسبه شده است.

نتایج بدست آمده، تغییرشکل قطرات با مشخصات فیزیکی متفاوت را نشان می‌دهد. همچنین سرعت حد قطراتی با قطرهای مختلف محاسبه شد و نتایج هماهنگی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. علاوه بر این رابطه‌ای نسبی بین ضریب پسا و قطر قطره بدست آمد که به کمک آن می‌توان تغییرات این ضریب را با قطر قطره تخمین زد.

محاسبه تغییرات فشار در هنگام سقوط آزاد قطره از جمله کارهای انجام شده در این تحقیق به شمار می‌رود. علاوه بر این متلاشی شدن قطره بر اثر وجود گرادیان فشار مورد بررسی قرار گرفت.

پدیده برخورد قطره به سطح جامد و به لایه‌ای از سیال هم‌جنس خود، از دیگر مسائلی است که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفت. بررسی جزئیات این پدیده نتایج مهمی را دربرداشت. خلاصه نتایج بدست آمده در این پایان‌نامه به صورت زیر است:

- ✓ افزایش قطر قطره، منجر به افزایش سرعت حرکت آن می‌شود و در نتیجه افزایش سرعت نهایی آن را به همراه دارد.
- ✓ ضریب پسا با افزایش رینولدز و قطر قطره کاهش می‌یابد. این ضریب با توان 0.7 قطر کاهش می‌یابد.



- ✓ هنگام متلاشی شدن قطره در اثر گرادیان فشار، میدان فشار هوای اطراف متاثر از متلاشی شدن قطره، به شدت افت می‌کند. پس از متلاشی شدن قطره، فشار به مقدار اولیه خود بازسازی می‌شود.
- ✓ اندازه اعداد رینولدز و وبر تعیین کننده الگوی جریان در برخورد به سطح می‌باشد.
- ✓ افزایش ویسکوزیته منجر به کاهش انرژی لازم برای برخاست از سطح (اصطلاحاً ریباندینگ قطره) می‌شود و قطره با ویسکوزیته بالا، تمایل دارد روی سطح باقی بماند.
- ✓ وجود اختلاف سرعت بین دو فاز باعث ایجاد ناپایداری کلوین-هلمهولتز، بصورت امواجی روی سطح قطره می‌شود. این امواج در زمان حرکت قطره، طول موج‌های متغیری دارند.
- ✓ نتایج حاصل از کدنویسی مدل جدید یوکویی و همکاران، نشان می‌دهد که پارامترهای ثابت ارائه شده، لازم است در روش عددی حاضر (VOF) تصحیح شوند. در مقایسه این مدل با مدل بکار رفته در نرم‌افزار اوپن‌فوم، برتری مدل زاویه برخورد دینامیکی نرم‌افزار واضح است. زیرا بدون نیاز به پارامتر ثابت آزمایشگاهی پیش‌بینی مناسبی از رفتار قطره دارد.
- ✓ در بین مدل‌های زاویه تماس، مدل زاویه استاتیکی بعنوان یکی از ساده‌ترین مدل‌ها، برای انجام شبیه‌سازی‌های مرتبط با برخورد قطره به سطح توصیه می‌شود. نتایج بدست آمده از این مدل، با درصد خطای پایینی قابل اطمینان است.
- ✓ در برخورد قطره به فیلم سیال هم‌جنس خود، افزایش ضخامت فیلم مایع، منجر به افزایش رینولدز می‌شود.
- ✓ در ضخامت ثابت فیلم، با افزایش عدد وبر، عدد رینولدز متناسب با $We^{-1/5}$ تغییر می‌کند.



۵-۲- پیشنهادات

با توجه به صحت نتایج کسب شده، برای تحقیقات بعدی پیشنهادات زیر توصیه می‌گردد:

- از آنجایی که در این تحقیق هر دو فاز تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده‌اند، پیشنهاد می‌شود در ادامه با تراکم‌پذیر در نظر گرفتن سیال‌ها، مسئله را برای ماخ‌های بالا مورد بررسی قرار داد و پدیده‌های ناشی از جریان تراکم‌پذیر را تحلیل کرد.
- برخورد قطره به سطح گرم شده یکی از مسائل مهمی است که در بسیاری از فرایندهای صنعتی به چشم می‌خورد. توصیه می‌شود با گسترش کد اوپن فوم این مسئله مورد توجه قرار گیرد.
- شبیه‌سازی تبخیر قطره در محفظه‌ای با دمای بالا با بکارگیری مدل‌های جریان دوفازی و مقایسه آن با مدل‌های رایج در این زمینه، جهت برگزیدن روشی با پیچیدگی کم‌تر و نتایج بهتر، از دیگر مواردی است که انجام آن پیشنهاد می‌شود.

مراج

- [۱] R. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber, "Bubbles Drops and Particles", Academic Press. London, 1978.
- [۲] R. Krechetnikov, G. M. Homsy, "Crown-forming instability phenomena in the drop splash problem", *Journal of Colloid and Interface Science*, 331 (2009) 555–559.
- [۳] C. Tropea, I .V. Roisman, "Modeling of spray impact on solid surfaceC. Atomisation and Sprays", 10 (2000) 387–408.
- [۴] W. J. Rider, B. D. Kothe, "Reconstructing volume tracking", *Journal of Computational Physics*, 141 (1998) 112–152.
- [۵] G. Ryskin, L. G. Leal, "Bubble Shapes in Steady Axisymmetric Flows at Intermediate Reynolds Number", *Proc. of the Second International Colloquium on Bubbles and Drops, NASA-JPL Publication*, 82 (1982) 151-156.
- [۶] D. Bhaga, M. E. Weber, "Bubbles in viscous liquids: shapes, wakes and velocities", *Journal of Fluid Mech*, 105 (1981) 61–85.
- [۷] S. Hu, R. C. Kintner, "The fall of single liquid drops through water", *Journal of AIChE*, 1 (1955) 42–48.
- [۸] A. J. Klee, R. E. Treybal, "The fall of single liquid drops through water", *Journal of AIChE*, 2 (1956) 444–447.
- [۹] G. Torsen, S. G. Stordalen, "On the terminal velocity of circulating and oscillating liquid drops", *Journal of Chemical Engineering Science*, 23 (1968) 413–426.
- [۱۰] S. Winnikow, B. T. Chao, "Droplet motion in purified systems", *Journal of Physics of fluids*, 9 (1966) 50–61.
- [۱۱] S. M. Rajan, W. J. Heidegger, "Droplet formation mas transfer", *Journal of AIChE*, 17 (1971) 202–206.
- [۱۲] T. Pilhofer, D. Mewes, "Prediction of Fluid-Dynamic Properties of Unpulsed Sieves-plate Extraction Columns", *Ger. Chem Eng*, 2 (1979) 69–76.
- [۱۳] C. Gourdon, G. Casamatta, G. Muratet, "Population balance based modelling of solvent extraction columns", *John Wiley & Sons, New York*, 1994.
- [۱۴] A. Vignes, "Hydrodynamique des dispersions", *Chim. Ind. Gen. Chim.* 93 (1965) 129–142.
- [۱۵] K. B. Deshpande, W. B. Zimmerman, "Simulation of interfacial mass transfer by droplet dynamics using the level set method", *Journal of Chemical Engineering Science*, 61 (1971) 6486–6498.
- [۱۶] M. Sussman, K. M. Smith, M. Y. Hussaini, M. Ohta, R. Zhi-Wei, "A sharp interface method for incompressible two-phase flows", *Journal of Computational Physics*, 221 (2007) 469–505.
- [۱۷] R. T. Eiswirth, H. J. Bart, T. Atmakidis, E. Y. Kenig, "Experimental and numerical investigation of a free rising droplet", *Journal of Chemical Engineering and Processing*, 50 (2011) 718–727.
- [۱۸] M.R. Ansari, M.E. Nimvari, "Bubble viscosity effect on internal circulation within the bubble rising dueto buoyancy using the level set method", *Journal of Annals of Nuclear Energy*, 38 (2011) 2770–2778
- [۱۹] M. R. Ansari, A. Hadidi, M. E. Nimvari, "Effect of a uniform magnetic field on dielectric two-phase bubbly flows using the levelset method", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324 (2012) 4094–410138.

- [۲۰] R. Rioboo, M. Marengo, C. Tropea, “Outcomes from a drop impact on solid surfaces”, *Journal of Atomization and Sprays*, 11 (2001) 155–165.
- [۲۱] C. Josserand, S. Zaleski, “Droplet splashing on a thin liquid film”, *Journal of Fluid Mechanics*, 451 (2002) 373–381.
- [۲۲] N. Nikolopoulos, A. Theodorakakos, G. Bergeles, “Three-dimensional numerical investigation of a droplet impinging normally onto a wall film”, *Journal of Computational Physics*, 227 (2007) 1428–1469.
- [۲۳] E. Berberovic, N.P.van. Hinsberg, S. Jakirlic, “Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: dynamics of the cavity evolution”, *Journal of physics review*, 79 (2009) 036306.
- [۲۴] S. Sikalo, H. D. Wilhelm, I. V. Roisman, S. Jakirlic, C. Tropea, “Dynamic contact angle of spreading droplets: Experiments and simulations”, *Journal of Physics of Fluids*, 17 (2005) 1–13.
- [۲۵] M. Francois, W. Shyy, “Computations of drop dynamics with the immersed boundary method, Part 2: drop impact and heat transfer”, *Journal of Numerical Heat Transfer*, 44 (2003) 119–143.
- [۲۶] H. Huang, D. Liang, B. Wetton, “Computation of a moving droplbubble on a solid surface using a front-tracking method”, *Journal of Communications in Mathematical Sciences*, 4 (2004) 535–552.
- [۲۷] Y. Chen, R. Kulenovic, R. Mertz, “Numerical study on the formation of Taylor bubbles in capillary tubes”, *International Journal of Thermal Sciences*, 48 (2009) 234–242.
- [۲۸] R. G. Cox, “The dynamics of the spreading of liquids on a solid surface. Part 1. Viscous flow,” *Journal of Fluid Mechanics*, 168 (1986) 169–194.
- [۲۹] R. L. Hoffman, “A study of the advancing interface. I. Interface shape in liquid–gas systems,” *Journal of Colloid and Interface Science*, 50 (1974) 228–241.
- [۳۰] T. Jiang, S. Oh, J. C. Slattery, “Correlation for dynamic contact angle”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 69 (1979) 74–77.
- [۳۱] S. Kalliadasis, H. C. Chang, “Apparent Dynamic Contact Angle of an Advancing Gas-Liquid Meniscus”, *Journal of Physics of Fluids*, 6 (1994) 12–23.
- [۳۲] K. Yokoi, D. Vadillo, J. Hinch, L. Hutchings, “Numerical studies of the influence of the dynamic contact angle on a droplet impacting on a dry surface”, *Journal of Physics of Fluids*, 21 (2009) 072102–072112.
- [۳۳] J. Fukai, Y. Shiiba, T. Yamamoto, O. Miyatake, D. Poulikakos, C. M. Megaridis, Z. Zhao, “Wetting Effects on the Spreading of a Liquid Droplet Colliding with a Flat Surface: Experiment and Modeling”, *Journal of Physics of Fluids*, 7 (1995) 236–247.
- [۳۴] M. Pasandideh-Fard, Y. M. Qiao, S. Chandra, J. Mostaghimi, “Capillary Effect during Droplet Impact on a Solid Surface”, *Journal of Physics of Fluids*, 8 (1996) 650–659.
- [۳۵] M. Bussmann, S. Chandra, J. Mostaghimi, “Modeling of a Droplet Impacting on Solid Surface”, *Journal of Physics of Fluids*, 12 (2000) 3121–3132.
- [۳۶] P. R. Gunjal, V. V. Ranade, R. V. Chaudhari, “Dynamics of Drop Impact on Solid Surface: Experiments and VOF Simulations”, *Journal of AIChE*, 51 (2005) 59–78.
- [۳۷] S. Ganesan, “On the dynamic contact angle in simulation of impinging droplets with sharp interface methods”, *Journal of Microfluid Nanofluid*, 14 (2012) 615–625.

- [۳۸] J. H. Ferziger, M. Peric “Computational methods for fluid dynamic”, Springer-Verlag, Berlin, third edition, 2002.
- [۳۹] F. H. Harlow, J. E. Welch “Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface”, *Journal of Physics of Fluids*, 8 (1965) 2182–2189.
- [۴۰] E. Berberovic, “Investigation of Free-surface Flow Associated with Drop Impact: Numerical Simulations and Theoretical Modeling”, PhD. Thesis, Darmstadt University of Technology, Germany, 2010.
- [۴۱] S. Osher, J. A. Sethian, “Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations”, *Journal of Computational Physics*, 79 (1988) 12–49.
- [۴۲] R. R. Nourgaliev, S. Wiri, N. T. Dinh, T. G. Theofanous, “On improving mass conservation of level set by reducing spatial discretization errors”, *International Journal of Multiphase Flow*, 31 (2005) 1329–1336.
- [۴۳] C. W. Hirt, B. D. Nichols, “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”, *Journal of Computational Physics*, 39 (1981) 201–225.
- [۴۴] D. L. Youngs, “Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion, in *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, K.W. Morton and M.J. Baines”, Academic Press New York, (1982) 273–285.
- [۴۵] H. G. Weller, “A new approach to VOF-based interface capturing methods for incompressible and compressible flow”, Tech. Rep. TR/HGW/07, OpenCFD Ltd.
- [۴۶] S. Mukherjee, J. Abraham, “Investigations of drop impact on dry walls with a lattice-Boltzmann model”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 312 (2007) 341–354.
- [۴۷] A. Fakhari, M. H. Rahimian, “Simulation of falling droplet by lattice Boltzmann method” *Journal of Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14 (2009) 3046–3055.
- [۴۸] R. Haghani, M. H. Rahimian, M. Taghilou, “LBM Simulation of a Droplet Dripping Down a Hole” *Journal of Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 7 (2013) 3046–3055.
- [۴۹] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, C. Zemach, “A continuum method for modeling surface tension” *Journal of Computational Physics*, 100 (1992) 335–354.
- [۵۰] B. Lafaurie, C. Nardone, R. Scardovelli, S. Zaleski, G. Zanetti, “Modelling merging and fragmentation in multiphase flows with SURFER” *Journal of Computational Physics*, 113 (1994) 134–147.
- [۵۱] X. -D. Liu, R. Fedkiw, M. Kang, “A Boundary Condition Capturing Method for Poisson's Equation on Irregular Domains” *Journal of Computational Physics*, 160 (2000) 151–178.
- [۵۲] M. M. Francois, J. S. Cummins, E. D. Dendy, D. B. Kothe, J. M. Sicilian, M. W. Williams, “A balanced-force algorithm for continuous and sharp interfacial surface tension models within a volume tracking framework” *Journal of Computational Physics*, 213 (2006) 141–173
- [۵۳] H. Rusche, “Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions” PhD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 2002.
- [۵۴] D. Veynante, A. Trounev, K. N. C. Bray, T. Mantel, “Gradient and counter-gradient scalar transport in turbulent premixed flames” *Journal of Fluid Mechanics*, 332 (1997) 263–293.
- [۵۵] M. Wörner, “Numerical modeling of multiphase flows in microfluidics and micro

- process engineering”, a review of methods and applications, *Journal of Microfluid Nanofluid*, 12 (2012) 841–886.
- [۵۶] H. Brauer, D. Mewes, “Strömungswiderstand sowie stationärer und instationärer Stoff- und Wärmeübergang an Kugeln” *Journal of Chemical engineering*, 44 (1972) 865–868.
- [۵۷] H. Brauer, “Particle/fluid transport processes” *Journal of Fortschritte der Verfahrenstechnik*, 17 (1979) 61–99.
- [۵۸] E. Loth, “Computational dynamics for particles drops and bubbles” in preparation for Cambridge University Press, London, 2011.
- [۵۹] J. Palacios, J. Hernández, P. Gómez, C. Zanzi, J. López, “Experimental study of splashing patterns and the splashing/deposition threshold in drop impacts onto dry smooth solid surfaces” *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*, 44 (2013) 571–582.
- [۶۰] R. Crooks, J. Cooper-White, D. V. Boger, “The role of dynamic surface tension and elasticity on the dynamics of drop impact” *Journal of Chemical Engineering Science*, 56 (2001) 5575–5592.
- [۶۱] S. S. Yoon, R. A. Jepsen, S. C. James, J. Liu, A. Guillermo, “Are Drop-impact Phenomena Described by Rayleigh-Taylor or Kelvin-Helmholtz Theory?” *Journal of Drying Technology*, 27 (2009) 316–321.
- [۶۲] P. Tsai, S. Pacheco, C. Pirat, L. Lefferts, D. Lohse, “Drop impact upon micro- and nanostructured superhydrophobic surfaces”, *Journal of Langmuir* 25 (2009) 12293–12298.

Abstract

This work is devoted to investigation of free-surface flow associated with drop fall. The main goal of the work is the computational and the theoretical study of the flow generated by drop falling and drop impact onto different surfaces, with relevance for spray impingement.

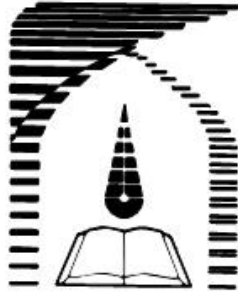
The considered flow configurations include drop impact onto a shallow liquid layer, binary drop collision, drop impact onto a dry wall, nonisothermal drop impact onto a heated wall with the accompanying simultaneous heat transfer within the wall, and drop impact onto a porous substrate.

The potential of the new interface capturing methodology developed by OpenCFD Ltd and based on the volume-of-fluid (VOF) model within the framework of Computational Fluid Dynamics (CFD) is evaluated by contrasting the results of numerical simulations to the in-house experimental results and the existing experimental and numerical result databases. The flows studied are treated as being laminar and computed in the framework of the finite-volume numerical method.

In general, the numerical model and the computational procedure demonstrate good predictive capabilities by reproducing correctly the studied flows mentioned above, both qualitatively and quantitatively. All important effects observed in the experiments are reproduced and particularly some distinctive features of the flow are properly captured.

The numerical simulations of the different flow configurations pertinent to spray impact provide a detailed insight into the dynamics of the flow and enable analytical modeling using simplified theoretical approaches. In particular the computational results provide all the flow details which are inaccessible by present experimental techniques, they are used to prove the theoretical assumptions and yield the required database for defining new flow patterns and their analytical modeling.

Keywords: droplet, deformation, spray, drop impact, contact angle, VOF .OpenFoam



Tarbiat Modares University

A thesis submitted to the

Faculty of Graduate Studies and Research

In partial fulfillment of the requirements for the degree of

Master of Science in Mechanical Engineering

Droplet deformation simulation due to flow field during droplet fall in the air.

By:

Sahar Jafari nivloui

Supervisor:

Prof. Mohammad Reza Ansari

January 2014