



تحلیل تاثیر تغییرات شیب سطح بر روی رشد، حرکت و ادغام قطرات در چگالش قطره ای

امید جباری فرا^۱، احسان امینیان^۲ و حمید صفاری^{۳*}^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۲

چکیده

ادغام و یا چسبندگی قطرات زمانی رخ می دهد که قطرات آب به یکدیگر متصل شده و تشکیل یک قطره منفرد را می دهند. در این مقاله به کمک شبیه سازی عددی، رفتار دینامیکی ادغام دو قطره با اندازه برابر و نابرابر بر روی سطح شیبدار مطالعه شده است. اثر شیب سطح و قطر قطرات بر دینامیک رفتاری پل مایع و خط تماس سه فازی قطره ادغام شده بررسی شده است. در جریان حل، پیوسته شاهد غلبه نیروهای گرانش و کشش سطحی بر جریان سیال می باشیم. نتایج بدست آمده نشان می دهد، که در ادغام قطرات کوچک نوسانات شدید تری در ناحیه پل مایع و جابجایی خط سه فاز، نسبت به قطرات بزرگتر رخ می دهد. در قطرات کوچک با افزایش شیب سطح، نوسانات در جابجایی نقاط ابتدایی و انتهایی خط سه فاز شدت می یابد، که این مساله باعث تضعیف نوسانات فرکانس بالا در ناحیه پل مایع می شود. برای ادغام قطرات بزرگ، جابجایی‌های انتهایی جلویی و انتهایی عقبی قطره، به طور یکنواخت افزایش می یابد. نتایج حاصل از ادغام قطرات نابرابر نشان می دهد که، سرعت تشکیل پل مایع در این حالت نسبت به ادغام قطرات متقارن بیشتر بوده که منجر به ایجاد نوسانات بیشتر با دامنه نوسانات پایین و فرکانس نوسانی بالا می شود.

کلمات کلیدی: ادغام قطرات؛ روش تنظیم سطح؛ سطح شیبدار؛ چگالش قطره ای؛ پیوند قطرات.

Analysis of the effect of surface slope changes on the growth, motion, and coalescence of droplets in dropwise condensation.

O. Jabbarifar¹, E. Aminian², H. Saffari^{3,*}¹ M.Sc., Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.² Ph.D. Student, Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.³ Assoc. Prof., Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

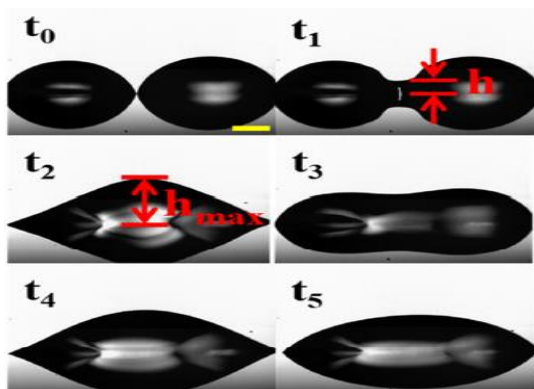
Abstract

Droplet coalescence or adhesion occurs when water droplets attach to a bond and form a single drop. In this paper, using numerical simulations, the dynamic behavior of merging two drops of equal and unequal size on a inclined surface is studied. The effect of surface slope and droplet diameter on the behavioral dynamics of the liquid bridge and the three-phase droplet contact line is integrated. During the solution, we constantly see the dominance of gravity and surface tension forces over the fluid flow. The results show that in the integration of small droplets, more intense oscillations occur in the area of the liquid bridge and the displacement of the three-phase line, compared to the larger droplets. In small droplets, with increasing slope level, the fluctuations in the displacement of the beginning and end points of the three-phase line become severe, which weakens the high-frequency oscillations in the liquid bridge area. For merging large droplets, the forward and rear end displacements of the droplet increase uniformly. The results of merging unequal droplets show that the speed of liquid bridge formation in this case is higher than the merger of symmetric droplets, which leads to more oscillations with low oscillation amplitude and high oscillation frequency.

Keywords: Droplets coalescence; Level-set; inclined surface; Dropwise condensation; Droplets merging.

۱- مقدمه

استفاده قرار می گیرد. افزایش نرخ های انتقال حرارت به سیستم های ذکر شده این امکان را می دهد که بدون از دست دادن عملکردشان اندازه سیستم کاهش یابد یا همان اندازه باقی بمانند، در حالی که عملکردشان افزایش می یابد [۴]. پدیده ادغام باعث شتاب بخشیدن به حرکت قطرات مایع بر روی سطح جامد شده و همچنین نرخ جدایش قطرات از روی سطح را ارتقا می بخشد و باعث افزایش انتقال حرارت به خصوص در سیستم های تبرید خواهد شد. در این مقاله به فرآیند ادغام قطرات ساکن چسبیده بر روی سطح جامد پرداخته شده است. که اساس اصلی آن تغییرات هندسی و اثر آن بر روی فرآیند پیوند می باشد. محققان مراحل پیوند در این حالت را به سه بخش کلی تقسیم می کنند [۵-۸]. در مرحله اولیه خط تماس سه فاز تغییر چندانی نداشته و پس از آنکه دو قطره اولیه به یکدیگر نزدیک می شوند پل مایع مابین دو قطره جوانه زده و در طول زمان به صورت خطی شروع به رشد می کند. در مرحله میانی خط تماس شروع به حرکت می کند و در آن پل مایع بصورت تصاعدی دچار نوسان می شود و شعاع پل مایع به حداکثر مقدار خود می رسد. در مرحله آخر حرکت خط تماس سه فاز محدود شده، نوسانات ایجاد شده میرا می شود و قطره به آرامی به شکل اصلی و پایدار خود می رسد. در شکل ۱ می توان تمامی مراحل ذکر شده از زمان شروع ادغام تا لحظه شکل گیری قطره نهایی آب را بر روی سطح مشاهده کرد.



شکل ۱- مراحل پیوند قطرات ساکن بر روی سطح جامد [۹]

ادغام^۱ و یا چسبندگی قطرات در حالت کلی زمانی رخ می دهد که قطرات به یکدیگر متصل شده و تشکیل یک قطره منفرد را می دهند. دو قطره ی مجزا، تحت شرایط و در محیط های مختلف ممکن است ادغام شوند. ادغام قطرات بر روی سطح جامد، ادغام قطرات معلق در داخل سیال پیوسته ، ادغام قطرات بر اثر برخورد و همچنین ادغام قطرات به علت سقوط قطره بر روی سطح جامد حالت هایی از ادغام در شرایط مشخصی می باشد، که همواره مورد مطالعه محققین بوده است [۱]. قطرات گاهی دارای سرعت اولیه بوده و یا اینکه نیروی خارجی بر آنها اثر می کند که در این صورت ادغام در اثر برخورد صورت می گیرد. در حالت دیگر قطرات بر روی سطح به صورت ساکن چسبیده و یا در داخل سیال دیگر به صورت معلق بدون سرعت اولیه می باشند که در این صورت نیز ادغام می تواند شکل بگیرد. پدیده ادغام ویا چسبندگی قطرات به دلیل وابستگی آن به خواص فیزیکی سیال و سطح همچون کشش سطحی ، چگالی و لزجت سیال، فرآیند پیچیده ای است. به طور کلی در فرآیند ادغام، نیروهای اینرسی، لزجت و کشش سطحی نقش اصلی را بر عهده دارند. شروع پیوند در فرآیند ادغام قطرات بدون سرعت اولیه، در محیط گازی و روی سطح جامد ، با شکل گیری پل مایع با حداقل شعاع مابین قطرات نمایان می شود. شعاع پل مایع ایجاد شده با گذشت زمان افزایش یافته و بر روی سطح گسترده می شود. ایجاد شعاع پل مایع مابین دو قطره باعث حرکت دو قطره به سمت یکدیگر می شود. در نهایت باعث شکل گیری قطره ای با سطح مقطع کوچکتر و حجم بیشتر بر روی سطح می شود. ادغام قطرات یک پدیده رایج در طبیعت است و در زمینه های مختلفی کاربرد دارد از جمله ترکیب خوشه های مولکولی برای تشکیل قطرات باران در ابرها، فرآیند های انتقال در صنایع شیمیایی، مهندسی محیط زیست، سیستم های انرژی، تصفیه زباله، تکنولوژی های مرتبط با میکروسیالات و غیره کاربرد فراوانی دارد [۱-۳].

چسبندگی قطرات نقش مهمی را در فرآیند چگالش قطره ای ایفا می کند. این پدیده در برخی از سیستم ها از جمله لوله های حرارتی، نیروگاه های حرارتی و نمک زدایی از آب مورد

^۱ Coalescence

محفظه چگالش رشد کرده و پس از آنها به یکدیگر نزدیک می شوند ادغام صورت می گیرد. (۲) در حالتی که دو قطره اولیه بر روی سطح قرار داشته و بر روی یکی از قطرات با استفاده از سرنگ قطره کوچکی قرار داده می شود. (۳) قطره منفرد بر روی سطح قرار داشته و با استفاده از سرنگ قطره کوچک دیگری برای بررسی گستردگی آن در حالت مورد نظر، قرار داده می شود. نتایج آنها نشان داد که زمان واهلش^۱ به اندازه قطره، شرایط اولیه ادغام و مشخصات سطح همچون زاویه تماس و زبری بستگی زیادی دارد. افزودن قطره با سرنگ باعث ایجاد نوسانات بیشتری در قطرات در حال ادغام شد. زمان واهلش پیوند ناشی از رسوب سرنگ با ضریب ۱۰-۱۰۰ در مقایسه با چگالش مستقیم بیشتر بود. ریستنتک و همکاران [۱۵] دینامیک پیوند زمانی اولیه دو قطره روغن سیلیکون ویسکوز در حال گسترش را بر روی یک زیرلایه کاملاً مرطوب بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که عرض پل مویبگی در حال رشد بین این دو قطره با جذر زمان رشد می کند. علاوه بر این نشان دادند که نرخ رشد به شدت به شعاع و ارتفاع قطرات در تماس وابسته است و مقیاس آن به صورت $h_0^{3/2}/R_0$ می باشد. لیائو و همکاران [۱۶]، در یک کار آزمایشگاهی پدیده ائتلاف قطرات آب و قطرات اتیلن گلیکول با اندازه‌های مختلف را بر روی سطح افقی و سطح شیبدار جامد بررسی کردند. تجارب آنها نشان می‌دهد که تغییرات پل مایع و زاویه تماس قطره ادغام شده بر روی سطح افقی و سطح شیبدار با زمان، به طور کلی به عنوان یک نوسان میرا شده رفتار می‌کند. کاپور و گاسکول [۱۷] مورفولوژی و دینامیک ادغام قطرات آب را بر روی یک سطح غیرمتخلخل به صورت تجربی مطالعه کردند. آنها تغییرات عرضی شعاع پل مایع ایجاد شده مابین قطرات را نسبت به زمان با رابطه t^α تخمین زدند که در این رابطه α از مقدار ۰/۴۲ تا ۰/۵۷ متغیر بود.

بلانچته [۱۸]، فرآیند ادغام قطرات ساکن که از ابتدا در تماس با هم هستند را به صورت عددی بررسی کرد و نشان داد که اگر کشش سطحی یک قطره با سیال اطراف، نسبت به قطره ی دیگر افزایش پیدا کند، قطره ای که دارای کشش سطحی بیشتر است، به مراتب نفوذ بیشتری به داخل قطره ی دیگر دارد. همچنین، این فرآیند با سرعت بیشتری صورت می

برای درک رفتارهای دینامیکی و مکانیسم های فیزیکی ادغام قطرات، طیف وسیعی از کارهای تجربی و نظری با تمرکز بر تأثیرات بین قطرات با سطوح جامد، فیلم های مایع یا سایر قطرات انجام شده است. تمرکز اصلی این مقالات بر روی قطراتی است که به صفحات تخت جامد و سطوح مایع برخورد می کنند [۱۰-۱۲]. مطالعات اولیه درحوزه فرآیند برخورد و ادغام قطرات به اواخر قرن نوزدهم برمی گردد که در آن اگرز [۱۳]، با استفاده از مفاهیم تئوری و شبیه سازی عددی پیوند دو کره مایع را مورد مطالعه قرار داد و مشاهده کرد که مساحت سطح کره های در حال ادغام مایع به طور مداوم با زمان کاهش می یابد. همچنین حرکت سریع پل مایع مابین قطرات به دلیل مقادیر زیاد انحنای سطحی موجود در ناحیه تماس دو کره مشاهده شد. تغییرات شعاع پل مایع در ابتدای مراحل پیوند در ابتدا به صورت خطی با زمان مقیاس گذاری شد.

پس از آن مطالعات گسترده ای بر روی رفتار قطرات در شرایط مختلف انجام شده است. به ویژه ظهور ایده ها و روش های تحقیقاتی جدید در دهه گذشته باعث شده است که پدیده ادغام قطرات به طور فعال مورد مطالعه قرار گیرد. منچکا روچا و همکاران [۱۴]، در یک کار آزمایشگاهی و شبیه سازی به بررسی ائتلاف دو قطره جیوه بر روی یک سطح شیشه ای زبر به صورت افقی پرداختند. آنها با استفاده از نتایج بدست آمده به این نتیجه رسیدند که میزان تغییرات شعاع پل مایع با جذر زمان ($R \sim \sqrt{t}$) رابطه مستقیم دارد. اندریو و همکارانش [۵] به صورت عددی و آزمایشگاهی سینتیک ادغام دو قطره آب ساکن بر روی سطح جامد افقی را بررسی کردند. این قطرات در اتاقی پر از نیتروژن که با آب اشباع شده بود قرار داشتند. قطرات از طریق فرآیند چگالش رشد کرده و در نهایت به یکدیگر برخورد و با یکدیگر ادغام شدند. آنها زمان مورد نیاز برای پیوند کامل قطرات و همچنین پایداری شعاع پل مایع را مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که زمان به تعادل رسیدن پل مایع برای زوایای تماس کوچک تر نسبت به زوایای بزرگتر کمتر می باشد. نارمه و همکاران [۶] رفتار دینامیکی پیوند دو قطره ساکن آب در مقایسه با دینامیک گسترش یک قطره منفرد در یک رژیم نسبتاً تر پرداختند. آنها آزمایشات خود را در سه حالت برای قطره پی گرفتند: (۱) در حالتی که قطرات اولیه در داخل یک

^۱ Relaxation

از یک مایع با استفاده از روش ترکیبی تنظیم سطح و حجم سیال بررسی کردند. آنها طیف وسیعی از خواص سیال را در نظر گرفته و مشاهده شد که در طول تشکیل قطره نهایی ممکن است قطرات کوچکتر دیگری ناشی از جدایش ایجاد شود. یک مطالعه جدید توسط چپروکس و همکاران [۲۴] نشان داد که پل مایع متحمل نوسانات ضعیف میرایی می‌شود تا زمانی که به شکل تعادل خود بعد از انعقاد دو قطره غیر لزج برسد. همچنین این محققان چهار حالت را از نوسانات با پردازش تصاویر دیجیتال سریع استخراج کردند و مشاهده شد که فرکانس و نرخ میرایی هر مد مستقل از شرایط اولیه است. دیان جی و همکاران [۲۵] با استفاده از روش شبکه بولتزمن به بررسی زمان تماس و ادغام جفت قطرات همسان بر روی سطح ابرآب گریز با سه هندسه مختلف پرداختند. آنها اثرات پارامترهای هندسی و فاصله قطرات بر روی زمان تماس را بررسی کردند و به رژیمی دست یافتند که باعث کاهش ۴۱ درصدی زمان تماس اولیه قطرات شد.

با بررسی پژوهش‌های مرتبط با موضوع اصلی این مطالعه به خوبی می‌توان فهمید که اکثر کارهای انجام شده چه به صورت آزمایشگاهی و چه عددی، به صورت ادغام قطرات بر روی سطح افقی بوده و پارامترهایی همچون تغییرات شعاع پل مایع و زوایای تماس را تنها در این حالت بررسی کرده اند و یا با در نظر گرفتن گرادیانی مشخص فرآیند ادغام را مطالعه کرده اند. شیدار کردن سطوح روشی کم هزینه و کاربردی جهت بالا بردن راندمان سیستم‌های انرژی در فرآیند چگالش است که تحقیق‌های انجام شده، کمتر به این مساله پرداخته اند. از این رو جهت بررسی اهمیت این موضوع، در این تحقیق به صورت عددی فرآیند ادغام قطرات، بدون در نظر گرفتن هیچگونه گرادیانی مابین سیالات و سطح جامد و تنها با مطالعه تأثیر نیروی کشش سطحی و گرانش بر روی سطح شیب‌دار بررسی شده است. همچنین بررسی ادغام دو قطره نابرابر بدون در نظر گرفتن هیچگونه گرادیانی نیز مطالعه شده است، که تاکنون به صورت عددی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا اعتبار سنجی روش حل بر روی سطح افقی انجام شده است، سپس رفتار دینامیکی ادغام قطرات با اندازه‌های برابر و نابرابر بر روی سطح جامد مطالعه شده است. برای شبیه سازی فرآیند ادغام قطرات از نرم افزار المان محدود

گیرد. لای و همکاران [۱۹]، دینامیک فرآیند ادغام از طریق برخورد را مابین یک قطره در حال حرکت و یک قطره ساکن بر روی یک سطح با گرادیان ترشوندگی (نصف سطح آبدوست نصف دیگر آبگریز) را بررسی کردند. به این صورت که یک قطره ساکن در ناحیه آبدوست قرار داده شده و قطره دیگر را از قسمت آبگریز سطح رها کردند. کشش سطحی و گرادیان سطح باعث نزدیک شدن قطره در حال حرکت و قطره ساکن شد. نتایج آنها نشان داد، زمانیکه قطره ساکن نزدیک به قطره محرک قرار می‌گیرد انرژی سطح آزاد شده باعث ایجاد جریان داخلی در قطره ادغام شده می‌شود، در حالی اگر با افزایش فاصله قطرات انرژی سطحی آزاد شده باعث ایجاد نوسان خواهد شد.

لی و همکاران [۲۰] به بررسی ادغام جفت قطره هم اندازه بر روی سطح نیمه ترشونده با زوایای تماس ۲۴، ۱۰، ۲۷ و ۵۶ درجه پرداختند. اندازه قطرات بسیار کوچک انتخاب شده بود. فرآیند ادغام به طور کامل تحت کنترل نیروهای ویسکوز بودند. آنها روابطی را برای تغییرات شعاع پل مایع برای زوایای مختلف به طور مستقل ارائه دادند. ژبین وانگ و همکاران [۲۱] در یک تحقیق عددی به بررسی ادغام دو قطره آب در داخل سیال روغن به کمک روش حجم سیال پرداختند. نتایج نشان داد که انعقاد دو قطره با دماهای مختلف منجر به مهاجرت خود به خودی قطره ادغام یافته، ناشی از تفاوت فشار ناشی از اختلاف دما و جریان ترمومویرگی می‌شود. علاوه بر این، جهت مهاجرت ممکن است تغییر کند زیرا منطقه گرم از یک انتها به انتهای دیگر با توجه به جریان ترموکاپیلاری^۱ مهاجرت می‌کند که باعث تغییر منطقه دمای بالا می‌شود. لی ژینگ و همکاران [۲۲] به صورت عددی و آزمایشگاهی به بررسی دینامیک ادغام قطرات در اثر برخورد بر روی سطح با گرادیان ترشوندگی پرداختند. آنها با استفاده از روش ترکیبی تنظیم سطح و حجم سیال ادغام قطرات را بر روی سطح جامد شبیه سازی کرده و با نتایج آزمایشگاهی خود مقایسه کردند. آنها قطرات را با اعداد مختلف و بر مقایسه کردند که روی سطوح جامد دارای رطوبت پذیری و زوایای تماس مختلف به هم می‌پیوندند. نتیجه یک نمودار تقسیم منطقه ای است که عدد وبر و زاویه تماس را بر اساس پدیده‌های مختلف ادغام مرتبط می‌کند. دکا و همکاران [۲۳] دینامیک ادغام دو قطره با اندازه نابرابر

^۱ Thermocapillary

مشخص می شود. روش های تسخیر کننده سطح، ماهیتی اویلری دارند در این روش ها شبکه حل، ثابت در نظر گرفته می شود. یعنی برای کل ناحیه دستگاه معادلات حاکم حل می شود و سطح مشترک نیز جزء ناحیه حل خواهد بود. در معادلات مومنتم برای ناحیه ای که سطح مشترک وجود دارد، نیروی کشش سطح وارد شود. در این روش ها، سطح مشترک متحرک خواهد بود و برای تعیین موقعیت سطح مشترک روش های مختلفی وجود دارد. معیار اکثر روش ها استفاده از دو تابع است یکی تابع فاصله و دیگری تابع کسر حجمی ϕ که به اختصار در ادامه بیان می شود. ϕ یا تابع مشخص کننده فاز، تابعی است که برای هر فاز سیال یک مقدار تعیین می شود. معمولاً برای یک فاز مقدار ۱ و برای فاز دیگر مقدار صفر دارد، از نظر فیزیکی مقدار ϕ برای هر نقطه، فقط صفر یا یک است. ولی از نظر عددی به دلیل وجود سطح مشترک و تفاوت مقدار هر فاز در هر سلول محاسباتی این تابع دارای مقدارهای مختلفی بین صفر و یک است. بنابراین دامنه تغییرات ϕ عبارت است از $0 \leq \phi \leq 1$ که انتخاب مقدار یک یا صفر برای هر فاز اختیاری است. اما ϕ خاصیتی از سیال است که مقدار آن برای یک ذره سیال همیشه ثابت است و بستگی به جریان ندارد. در تحقیق حاضر با توجه به قدرت دقیق روش تنظیم سطح جهت ردیابی فصل مشترک دوسیال و همچنین عدم نیاز به شبکه بندی متحرک و پایین بودن حجم محاسبات از این روش استفاده شده است. در ادامه با معرفی کلی روش تنظیم سطح به بیان معادلات حاکم بر مساله بیان می شود.

۲-۱- معرفی روش تنظیم سطح

این روش برای اولین بار توسط اوشر و ستیان در سال ۱۹۸۸ معرفی گردید. مرجع اصلی این روش در به کار گیری مفهوم استفاده از نمایش مرز مشترک با استفاده از یک تابع ضمنی با یک بعد بالاتر است. مزیت روش تنظیم سطح آن است که به صورت خودکار تغییرات هندسه ای را اعمال می کند و در حالت کلی دستیابی به دقت بالاتر در آن آسان است. یکی از عیوب روش تنظیم سطح این است که پایستار نیست و در صورت استفاده از آن، چشمه و چاه غیرواقعی برای جرم ایجاد می شود که از نظر فیزیکی قابل قبول نیست. در واقع این روش یک تکنیک برای نمایش واسط ها یا مرزهای متحرک با استفاده از یک مش ثابت است و برای

کامسول (COMSOL Multiphysics) استفاده شده است و برای ردیابی فصل مشترک سیال روش تنظیم سطح (Level set Method) بکار گرفته شده است.

۲- معرفی روش های کلی ردیابی سطح مشترک

روش های ردیابی سطح مشترک به کار گرفته می شوند تا حرکت و تغییر شکل سطوح یا منحنی هایی که انواع مختلفی از مرزهای داخلی و سطوح مشترک را تشکیل می دهند توصیف و تعقیب کنند. قوانین حرکت این سطوح ممکن است به صورت مستقیم به شکل آنها وابسته باشد. سطوح مشترک با تشخیص مکان های جدایی دو سیال در هر لحظه تشکیل می شوند. این جداسازی می تواند در شبکه های اویلری و یا لاگرانژی باشد که تابع نوع روش استفاده شده برای تعیین سطح مشترک است. در سال های اخیر نیز روش های جدیدتری نیز به کار گرفته شده که در آنها سعی بر این است تا از مزایای هر دو نوع شبکه لاگرانژی و اویلری به طور همزمان استفاده شود [۲۶].

در شبیه سازی جریان های چندفازی غیر اختلاطی، باید توجه داشت که شکل و چگونگی حرکت سطح مشترک دو سیال به شدت به فیزیک مساله وابسته است. نیروهای کشش سطحی در هر دو طرف سطح مشترک عمل می کنند. مقدار این نیروها در هر نقطه با انحنای شکل سطح مشترک در آن نقطه متناسب است. دو سیال که در دو سمت سطح مشترک قرار دارند در حالت کلی دارای لزجت و چگالی متفاوتی می باشند و مقادیر این کمیت ها در عبور از سطح مشترک ناپیوستگی دارد. هر روشی که برای این نوع مسایل استفاده می شود باید الگوریتمی برای محاسبه نیروهای کشش سطحی داشته باشد و همچنین، ناپیوستگی میدان های چگالی و لزجت را نیز، در نظر بگیرد [۲۷].

برای ردیابی سطوح تماس دو دسته بندی کلی وجود دارد روش های دنبال کننده سطح و روش های تسخیر کننده سطح. روشهای دنبال کننده سطح [۲۸-۳۰]، ماهیتی لاگرانژی دارند و در آنها شبکه حل متحرک و برای هر سیال یک شبکه در نظر گرفته می شود. سطح مشترک، مرز بین دو ناحیه حل خواهد بود. در این حالت، مرز شبکه روی سطح مشترک بوده و با در نظر گرفتن چند نقطه روی سطح مشترک و ردیابی این نقاط، سطح مشترک ردیابی و موقعیت جدید در شبکه حل

استوکس به صورت وابسته به زمان همزمان حل می شوند. فرم کلی معادلات حاکم بر مطالعه حاضر به صورت زیر است [۳۱]:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla \right) u = \nabla \cdot [-PI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + \rho g + F \quad (2)$$

در روابط بالا ρ چگالی سیال، u بردار سرعت سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال و t زمان می باشد. معادله ۱ بیانگر معادله بقای جرم و معادله ۲ معادله مومنتوم و یا اندازه حرکت می باشد که در این رابطه p فشار استاتیکی سیال و g بیانگر شتاب گرانش می باشد. F در معادله مومنتوم به صورت نیروهای حجمی وارد بر سیال معرفی می شود که در حالت کلی می تواند شامل نیروهای حجمی شامل کشش سطحی، نیروی ناشی از وزن، نیروی شناوری، نیروی درگ و همچنین نیروی خارجی وارد بر سیال همچون میدان الکتریکی و مغناطیسی می باشد. در مساله حاضر از آنجایی که هیچگونه نیروی خارجی بر سیالات اعمال نمی شود به این دلیل نیروی F تنها شامل نیروی کشش سطحی و نیروی وزن خواهد بود.

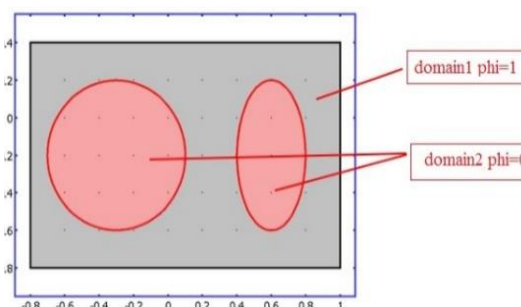
$$F = F_{st} + F_g \quad (3)$$

$$F_{st} = \nabla \cdot ((\sigma(I - nn^T))\delta) \quad (4)$$

در رابطه بالا F_{st} نیروی کشش سطحی و F_g نیروی وزن می باشد. همچنین T تانسور تنش می باشد که در تحلیل حاضر تنش های ناشی از لزجت سیال مدنظر می باشد. I در روابط به صورت ماتریس همانی و یا ماتریس واحد تعریف می شود. n بردار عمود بر فصل مشترک دو سیال و δ تابع دیراک دلتا می باشد. برای محاسبه نیروی کشش سطحی در داخل نرم افزار کامسول از روش CSS استفاده شده است. زمانیکه اختلاف دانسیته بین سیالات زیاد باشد جریان هایی به اصطلاح پارازیتی باعث پایین آمدن دقت شبیه سازی فصل مشترک سیالات می شود در این روش از آنجایی که ماکزیمم سرعت جریان از مرتبه $0.1 \frac{\sigma}{\mu}$ می باشد به همین دلیل مقادیر σ و μ در این روش به گونه ای می توان انتخاب کرد که شدت این جریان ها تا حد ممکن کم شود [۳۲]. تابع تنظیم سطح به صورت زیر تعریف می شود [۳۱]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot (\varepsilon \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}) \quad (5)$$

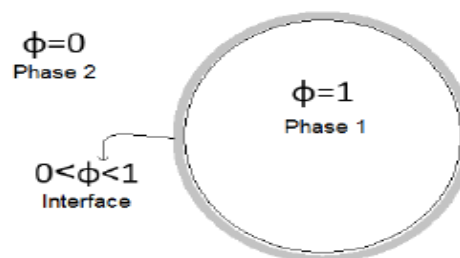
مسائلی که در آن ها دامنه محاسباتی می تواند به دو دامنه جدا شده توسط یک رابط تقسیم شود، مفید است. هر یک از دو دامنه می تواند شامل چندین قسمت باشد شکل ۲ مثالی را نشان می دهد که در آن یکی از حوزه ها از دو بخش مجزا تشکیل شده است.



شکل ۲- نمونه ای از دو دامنه تقسیم شده توسط یک

رابط [۳۱]

در این روش و در داخل نرم افزار کامسول یک تابع تنظیم سطح (ϕ) تعریف می شود. مقدار این تابع برای یک سیال صفر و برای سیال دیگر یک است. برای مرز بین دو سیال نیز به صورت یکنواخت از صفر تا یک تغییر می کند. شکل ۳ بیانگر این موضوع است [۳۱]. به عبارت دیگر در سراسر رابط، یک انتقال هموار از صفر به یک وجود دارد. فصل مشترک مابین دو سیال با خطوط هم تراز و یا تابع تنظیم سطح با مقدار 0.5 مشخص می شود.



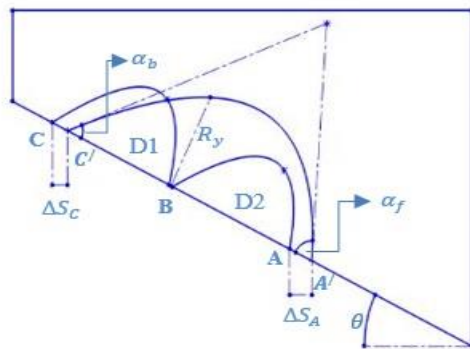
شکل ۳- تغییرات تابع تنظیم سطح [۳۱]

۳- معادلات حاکم

با فرض جریان سیال تراکم ناپذیر و آرام برای بدست آوردن مشخصات جریان همچون سرعت و میدان فشار معادلات نویر

و به کمک نرم افزار کامسول انجام شده است. برای شبیه سازی این فرآیند یک مستطیل به عنوان دامنه محاسباتی با فاز پیوسته هوا در نظر گرفته شده که قطرات آب در داخل این دامنه و واقع بر سطح حضور دارند.

قطرات اولیه واقع بر روی سطح شیبدار زاوایای پیشرو و پسروی ثابتی داشته و به ترتیب برابر با $75/8$ و $54/3$ درجه در نظر گرفته شده است [۱۶]. قطرات دارای زاویه هیستریزس $21/5$ درجه دارند. برای شروع فرآیند ادغام و به عنوان یک شرط اولیه در مساله فاصله قطرات بسیار کم و در حدود 0.3 میلیمتر در تمامی حالت های بررسی شده در سطح شیبدار در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ پارامترهای هندسی قطرات مشخص شده است. $\Delta S_A = X_{A'} - X_A$ مقدار جابجایی نقطه پیشرو و یا انتهای نقطه جلویی خط سه فاز می باشد. $\Delta S_C = X_{C'} - X_C$ مقدار جابجایی نقطه پسرو را می دهد. مقادیر منفی برای این پارامترها نشان دهنده حرکت قطره به سمت بالا بر روی سطح شیبدار می باشد. R_y نشان دهنده شعاع پل مایع و زاویه شیب سطح را نشان می دهد. $D1$ و $D2$ دو قطره آب با قطر یکسان می باشد. و همچنین α_b و α_f به ترتیب نمایانگر زاوایای پیشرو و پسرو می باشد که در محاسبات به ترتیب با مقادیر مشخصه $75/8$ و $54/3$ درجه در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- تعریف پارامترهای در تحلیل و شبیه سازی عددی [۱۶]

۵- اعتبار سنجی

به منظور اعتبار دهی به کار حاضر و همچنین فیزیک حل انتخاب شده در نرم افزار ابتدا به ادغام قطرات بر روی سطح

در تابع تنظیم سطح، \emptyset بیانگر کسر حجمی سیال بوده و به صورت $0 \leq \emptyset \leq 1$ در طول سطح سیالات تعریف می شود. در مساله حاضر مقدار کسر حجمی برای سیال هوا برابر صفر و برای قطرات آب یک می باشد. همچنین در مرز بین دوسیال مقدار \emptyset برابر با 0.5 می باشد.

در لایه ی مابین دوسیال که \emptyset از صفر تا ۱ در حال تغییر می باشد، ϵ بیانگر ضخامت فصل مشترک و معمولاً به صورت رابطه ۶ تعریف می شود [۳۱].

$$\epsilon = \frac{h_{max}}{2} \quad (6)$$

در رابطه بالا h_{max} حداکثر ارتفاع المان موجود در مساله می باشد. γ پارامتر پایدار ساز در مساله می باشد و طبق مراجع در دسترس مقدار آن برابر با حداکثر سرعت قابل پیش بینی در مساله مورد نظر می باشد. در تابع لول ست مقادیر چگالی و ویسکوزیته دینامیکی سیال در ناحیه فصل مشترک به صورت زیر تعریف می شود [۳۱]:

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)\emptyset \quad (7)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)\emptyset \quad (8)$$

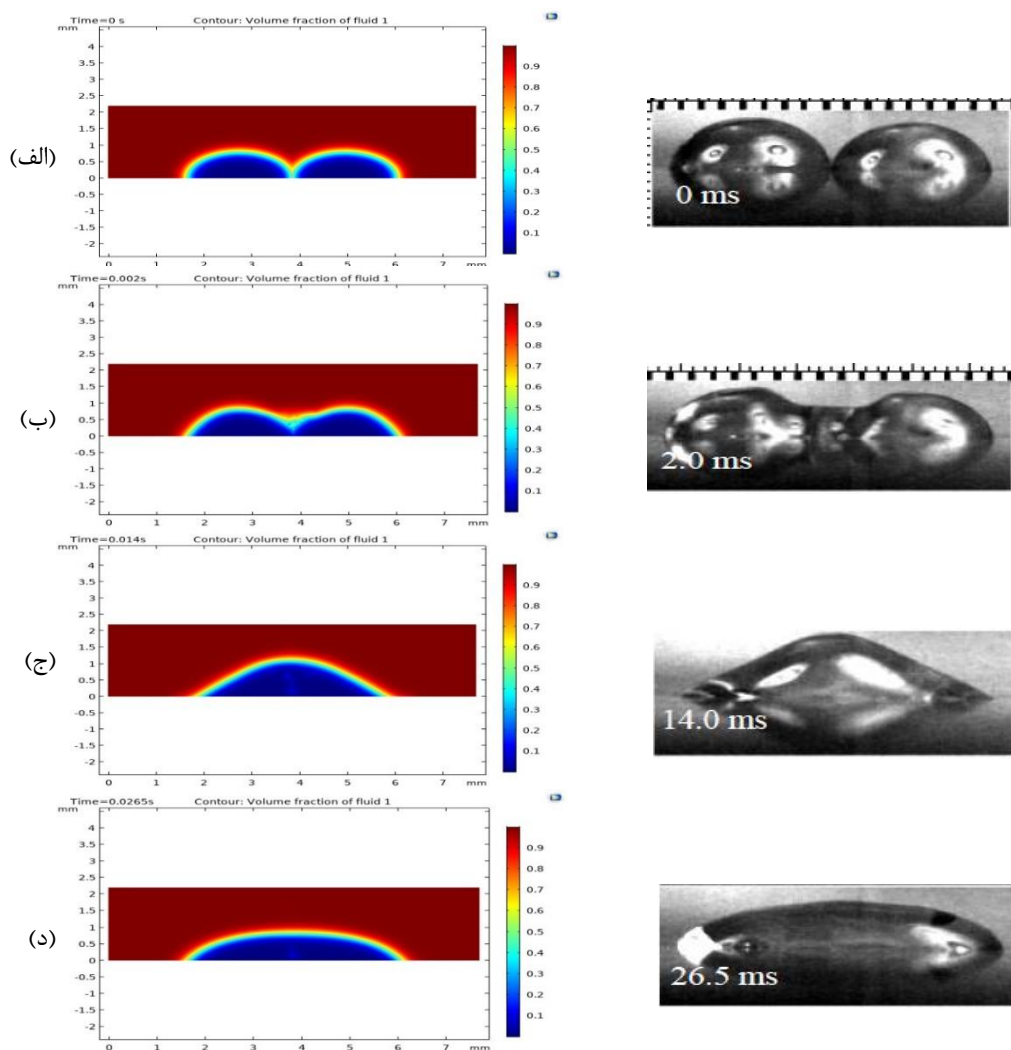
در معادلات بالا پارامترهای ρ_1 و ρ_2 و همچنین μ_1 و μ_2 به ترتیب بیانگر چگالی و ویسکوزیته هوا و آب می باشند.

۴- شبیه سازی عددی و هندسی قطرات

همانگونه که ذکر شد در مطالعه حاضر رفتار دینامیکی ادغام قطرات همسان و ناهمسان آب بر روی سطح شیبدار و تاثیر شیب سطح بر روی این فرآیند بررسی شده است. سیال های فعال در مساله تراکم ناپذیر بوده و از آنجایی که دو قطره واقع بر روی سطح بدون سرعت اولیه بوده و در کل مساله سرعت حرکت قطرات پایین می باشد، جریان آرام در نظر گرفته شده است. هیچگونه گرادیانی در شرایط اولیه مساله وجود نداشته و ادغام تنها به دلیل نیروی کشش سطحی و گرانش به صورت خود به خودی صورت می گیرد. چگالی و ویسکوزیته برای هر دو سیال آب و هوا ثابت در نظر گرفته شده است. سطح جامد از جنس پلکسی انتخاب شده و مقادیر و مشخصات فیزیکی آن همچون تخلخل، نفوذ پذیری و چگالی سطح و نیز زاوایای تماس پیشرو و پسرو از مراجع موجود استخراج شده است. طراحی هندسه قطرات و دامنه محاسباتی به صورت دو بعدی

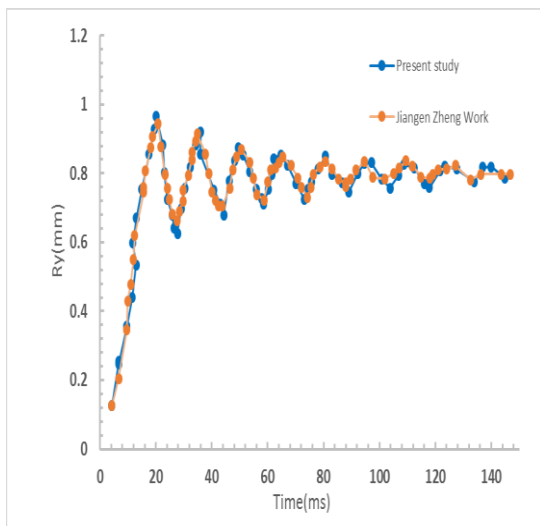
قطره هم اندازه آب بر روی سطح صاف با نرم افزار کامسول در مقایسه با پژوهش لیائو و همکاران [۱۶]، نشان می دهد. با توجه به وجود انرژی آزاد سطحی زیاد و همچنین کشش سطحی دو قطره اولیه به یکدیگر پیوسته و پل مایع با حداقل شعاع در فصل مشترک آن دو ایجاد می شود. با تشکیل پل مایع در زمان 0.002 ثانیه (شکل ۵-ب)، شاهد گرادیان فشار استاتیکی در داخل قطرات و پل مایع می باشیم که باعث ایجاد گرادیان کشش سطحی است. در نتیجه شعاع پل مایع با گذشت زمان پیوسته افزایش یافته،

صاف شبیه سازی و با نتایج بدست آمده از تحقیق لیائو و همکاران [۱۶]، مقایسه شد. لیائو و همکاران در یک تحقیق آزمایشگاهی ادغام قطرات بر روی سطح جامد تحت شرایط اتمسفر، بدون انتقال حرارت و چگالش بررسی کردند. آنها دو جنس سیال آب و اتیلن گلیکول را برای بررسی شعاع پل مایع و و زوایای تماس بر روی سطح مسی بکار گرفتند. شعاع اولیه قطرات 4 میلیمتر و زاویه تماس استاتیکی اولیه بر روی سطح مسی 78 درجه و همچنین فرآیند ادغام در شرایط اتمسفر صورت می گیرد. شکل ۵ شماتیک شبیه سازی فرآیند ادغام دو



شکل ۵- مقایسه تصویری نحوه ادغام دو قطره هم اندازه بر روی سطح صاف در کار عددی حاضر و کار تجربی لیائو [۱۶]

سطح برای ردیابی فصل مشترک، بصورت عددی بررسی کردند. با مقایسه نتایج بدست آمده، بین دو نمودار می توان نزدیکی قابل قبولی را مشاهده کرد.

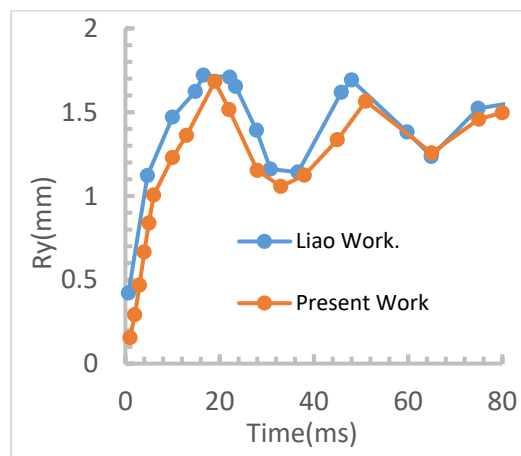


شکل ۷- مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج کار ژیانگ و همکاران [۹]

جهت بررسی استقلال نتایج بدست آمده از تعداد المان موجود در شبکه، تغییرات شعاع پل مایع برای زاویه شیب سطح ۳۰ درجه و قطر پایه ۴/۸ میلیمتر برای قطره محاسبه شده است. مطابق شکل ۸ نتایج بدست آمده حاکی از ثابت شدن مقدار تغییرات شعاع پل مایع از تعداد المان ۴۹۶۵۲ دارد، به همین دلیل در این مورد شبکه بندی با این تعداد المان در محاسبات استفاده شده است. در شبکه بندی نمونه های مساله حاضر همواره سعی شده است که ناحیه مربوط به فصل مشترک، به دلیل بالا بردن دقت ردیابی سطح، دارای شبکه بندی ریزتری باشد.

تا اینکه در زمان ۰/۰۱۴ ثانیه (شکل ۵-d) به بیشترین مقدار خود می رسد. پس از رسیدن شعاع پل مایع به بیشترین مقدار خود به علت وجود گرادیان فشار استاتیکی و انرژی آزاد سطحی، کاهش می یابد. تا زمان رسیدن قطره به حالت پایای خود نوسانات میرایی را می توان مشاهده کرد. در نهایت با از بین رفتن انرژی آزاد سطحی، نوسانات پل مایع میرا می شود و قطره ایجاد شده به حالت پایدار خود رسیده و سطح مقطع کوچکتری نسبت به دو قطره اولیه خواهد داشت. با توجه به اینکه دو قطره اولیه هم اندازه می باشد، مرکز جرم پل مایع تغییر نمی کند و با نسبت خطای بسیار کمی می توان مرکز جرم آن را میانگین دو قطره اولیه در نظر گرفت.

شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه سازی برای تغییرات شعاع پل مایع و همچنین نتایج کار تجربی لیائو و همکاران [۱۶] را نشان می دهد. مقایسه دو نمودار نشان می دهد که مدل حل انتخاب شده، نزدیکی قابل قبولی به کار تجربی لیائو داشته است. در نقاطی از نمودار شاهد درصد خطای محسوسی می باشیم که این مساله ناشی از اختلاف در شرایط ترموفیزیکی سطح انتخاب شده در محیط آزمایشگاهی و شبیه سازی می باشد.

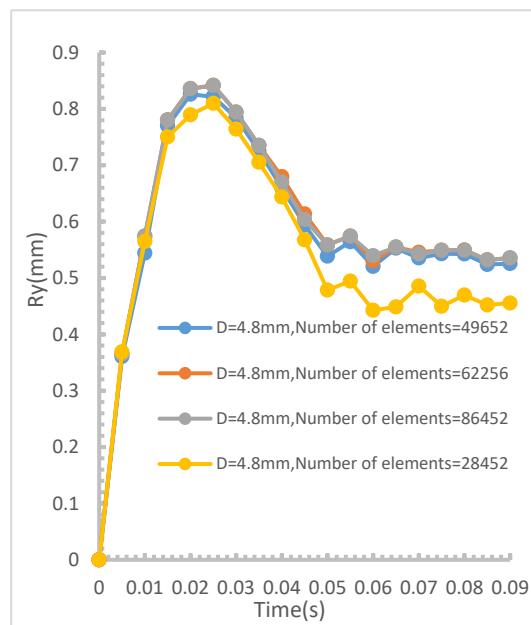


شکل ۶- مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج کار لیائو و همکاران [۱۶]

همچنین جهت تقویت اعتبارسنجی، نتایج حاصل با نتایج تحلیل عددی ژیانگ و همکاران [۹] مقایسه و در شکل ۷ ارائه شده است. ایشان تغییرات شعاع پل مایع دو قطره همسان چسبیده بر روی سطح شیشه ای را با استفاده از روش تنظیم

شروع اولیه پیوند مابین قطرات نیروی گرانش می باشد. به دلیل وجود اختلاف فشار استاتیکی، گرادیان کشش سطحی شکل می گیرد. نیروی گرانش مانع از حرکت نقطه جلویی قطره به سمت محل تماس دو قطره می شود. در حالیکه سیال از قطره عقبی روی سطح به سوی فصل مشترک مابین قطرات سرازیر می شود، که این پدیده باعث افزایش شعاع پل مایع مابین قطرات می شود. در نتیجه به دلیل اینکه حجم زیادی از سیال به سمت پایین سرازیر می شود زاویه پیشرو قطره افزایش می یابد. شکل (۹-الف) دو قطره اولیه را در زمان $t=0.05s$ را نشان می دهد. با گذشت زمان و پس از آنکه دو قطره اولیه تماس اولیه برقرار می کنند، نقطه پیشرو قطره در زمان $t=0.05s/0.005s$ (شکل ۹-ب) دچار یک جابجایی منفی کوچکی شده ولی سریعاً به دلیل نفوذ حجم زیادی سیال از قطره بالایی به داخل آن و افزایش نیروی ثقل، تغییر جهت داده و به سمت پایین سرازیر و جابجایی مثبت دارد. در زمان $t=0.02s/0.002s$ (شکل ۹-ج) شعاع پل مایع به ماکزیمم مقدار خود می رسد و سپس به تدریج کاهش می یابد. در این مورد شاهد نوسانات کمتری نسبت به قطرات کوچک تر هستیم. به علت بیشتر بودن حجم مایع و نیروی اینرسی نوسانات سریعاً میرا شده و انرژی آزاد سطحی از بین می رود و در نتیجه پل مایع به حالت پایدار خود می رسد.

شکل ۱۰ تغییرات شعاع پل مایع برای قطرات با اندازه های مختلف را نشان می دهد. همانگونه که از روی نمودار مشخص است رفتار تغییرات شعاع پل مایع در قطره کوچک تر کاملاً متفاوت با قطره بزرگتر می باشد. در منحنی مربوط به قطره کوچک شاهد نوسانات فرکانس بالا و با دامنه بزرگتر و همچنین زمان طولانی تر می باشیم که کاملاً متفاوت با منحنی بدست آمده مربوط به قطره ی بزرگتر می باشد در پیوند قطرات با سایز بزرگتر حجم زیادی از سیال از انتهای عقبی قطره بالاتر به سمت قطره جلویی سرازیر شده و باعث افزایش شعاع پل مایع می شود. در اثر این پدیده مقدار زیادی انرژی پتانسیل گرانشی و نیروی کشش سطحی آزاد می شود و قطره شکل گرفته شده شروع به حرکت می کند. در این صورت بیشتر انرژی آزاد شده توسط قطره ادغام شده گرفته شده و باعث کاهش نوسانات می شود.



شکل ۸- نتایج حاصل از افزایش تعداد المان ها بر روی تغییرات شعاع پل مایع بر روی سطح شیبدار با زاویه 30°

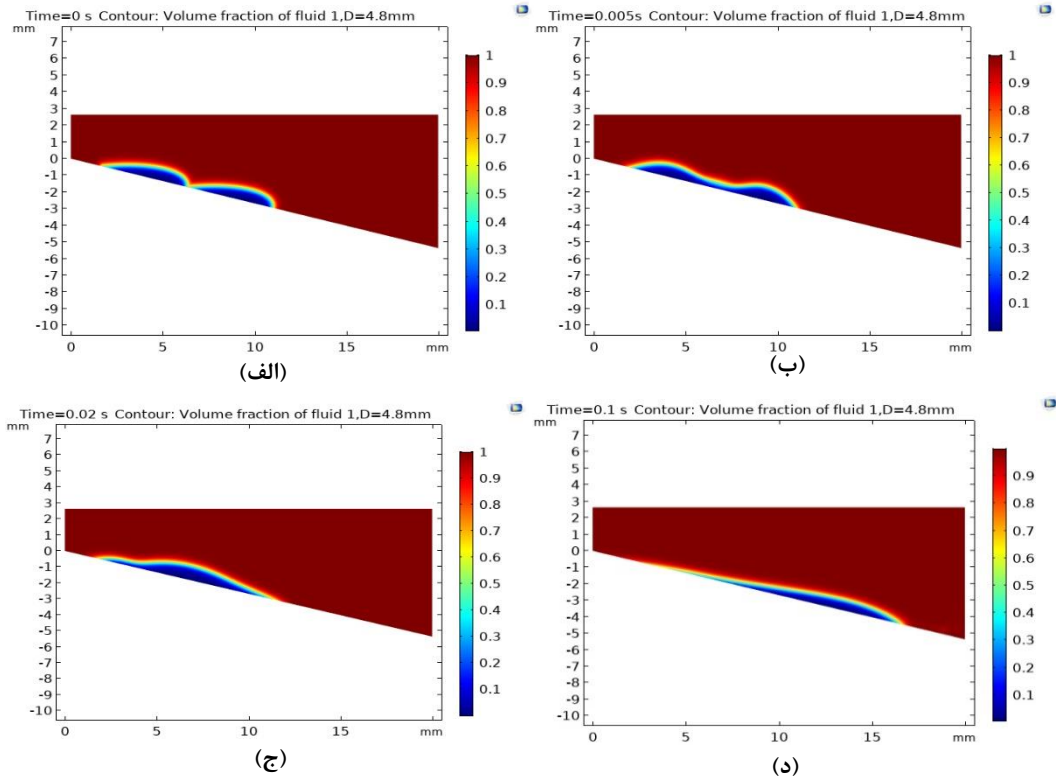
۶- نتایج

همانطور که ذکر شد هدف اصلی این مقاله بررسی رفتار دینامیکی قطره در طول فرآیند ادغام جفت قطرات همسان و ناهمسان آب بر روی سطح جامد می باشد. پس از شبیه سازی های صورت گرفته و اعتبار سنجی مطالعه حاضر، در این بخش به ارائه نتایج حاصل و همچنین تاثیر شیب سطح و اندازه قطر قطرات بر روی فرآیند ادغام می پردازیم.

۶-۱- شرح شماتیکی و تحلیلی فرآیند ادغام دو قطره

هم سایز بر روی سطح شیبدار

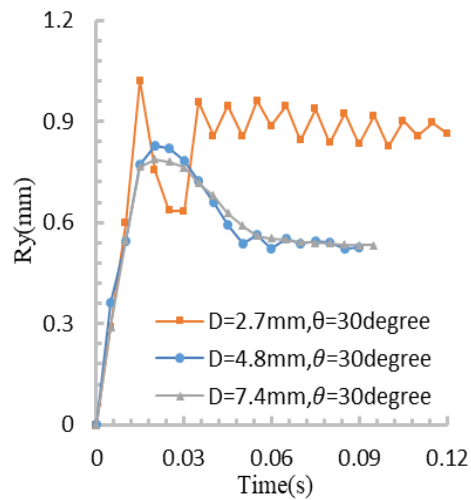
شکل ۹ تغییر و تحولات شماتیکی مربوط به ادغام قطرات با قطر پایه $D=4mm$ و شیب 30° درجه را نشان می دهد. نتایج بدست آمده نشان داد که رفتار دینامیکی قطرات بزرگتر در طول فرآیند ادغام متفاوت تر از قطرات کوچکتر می باشد. نیروی گرانش نقش مهمتری را در ادغام قطرات مایع با قطر پایه بزرگتر، به دلیل بالا بودن حجم مایع ایفا می کند. با توجه به شکل ۹ می توان مشاهده شد که ادغام قطرات با قطر اولیه بزرگتر نسبت به قطرات کوچکتر دارای شماتیک نامتقارن تری در آغاز شروع پیوند می باشند. عامل اصلی اختلاف در نحوه



شکل ۹- تغییر و تحولات شماتیکی دو قطره هم اندازه آب با قطر $D=4.8\text{mm}$ بر روی سطح شیبدار با زاویه $\theta = 30^\circ$ در طول فرآیند ادغام

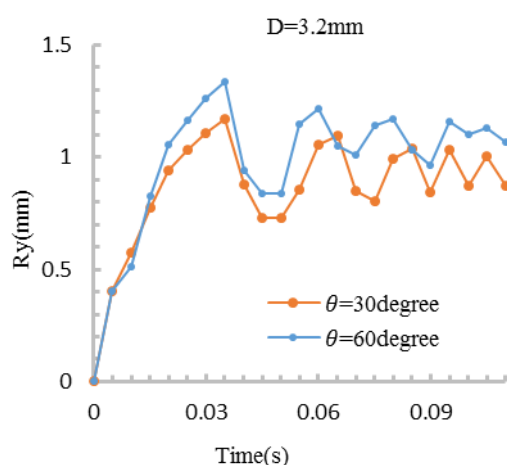
۶-۲- اثرات شیب سطح بر روی فرآیند ادغام

شکل ۱۱ میزان جابجایی نقاط ابتدایی و انتهایی خط سه فاز را برای قطره با قطر پایه $D=3\text{mm}$ و زاویه شیب سطح 30° و 60° درجه نشان می دهد. همانطور که از روی نمودار می توان فهمید قطره ها در تمام حالت ها یک فرآیند نوسانی منبسط و منقبضی را طی می کنند تا اینکه به شرایط پایای خود برسند. دلیل اصلی این نوسانات را به صورت برهم کنش میان نیروهای گرانش، کشش سطحی و اینرسی می توان توجیه کرد. برای حالت $\theta=30^\circ$ ، ΔS_A به مقدار زیر صفر رسیده و تا زمانی که قطره ادغام شده به حالت پایدار نرسیده است، منفی باقی می ماند. در حالیکه مقدار ΔS_C به مقادیر بزرگتر از صفر افزایش یافته و در طول فرآیند پیوند مثبت باقی می ماند. این بدان معنا می باشد که نقطه جلویی انتهای خط سه فاز در جایگاه کشش سطحی بر نیروی گرانش غالب می باشد به سمت بالا



شکل ۱۰- تغییرات شعاع پل مایع برای قطرات با اندازه های مختلف با زاویه شیب $\theta = 30^\circ$

شکل ۱۲ تغییرات شعاع پل مایع را برای قطرات با اندازه های مختلف و شیب سطح های متفاوت را نشان می دهد. با توجه به منحنی های بدست آمده می توان به این نتیجه رسید که در ابتدای شروع پیوند در تمام حالت ها، شعاع پل مایع به طور قابل توجهی افزایش می یابد و سپس فرآیند نوسانی میراشونده پریودیک را طی می کند تا به حالت پایا برسد. با مقایسه شیب سطح های مختلف می توان مشاهده کرد که شعاع پل مایع در شیب های بیشتر دارای فرکانس نوسانی بالا، دامنه نوسانات کم و میرایی سریع در زمان کوتاه می باشد.



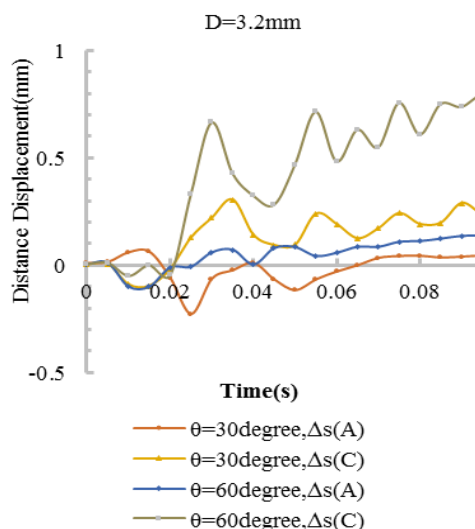
شکل ۱۲- اثر تغییرات شیب سطح بر روی شعاع پل قطره ادغام شده ($\theta = 60, 30$)

۳-۶- اثرات اندازه قطرات بر روی فرآیند ادغام

شکل ۱۳ تحولات ΔS_A و ΔS_C را در طول فرآیند پیوند قطرات برای قطرات با قطر پایه $2/7$ و $4/8$ میلیمتر را بر روی سطح با شیب ۳۰ درجه را در مقایسه با یکدیگر نشان می دهد. در منحنی مربوط به قطره بزرگتر می توان مشاهده کرد که در این حالت تجربه نوسانات میرا شده شدیدی نسبت به قطره کوچکتر وجود ندارد. افزایش کوچک در مقدار ΔS_C برای حالت $D=4\text{mm}/4$ را با لایه نازک سیال کشیده شده بر پشت قطره و متصل به آن در طول مسیر حرکت قطره می توان شرح داد. در جریان پیوند قطرات بزرگ در طول مسیر حرکت قطره نهایی شاهد لایه نازک متصل به بنده اصلی می توان شد که

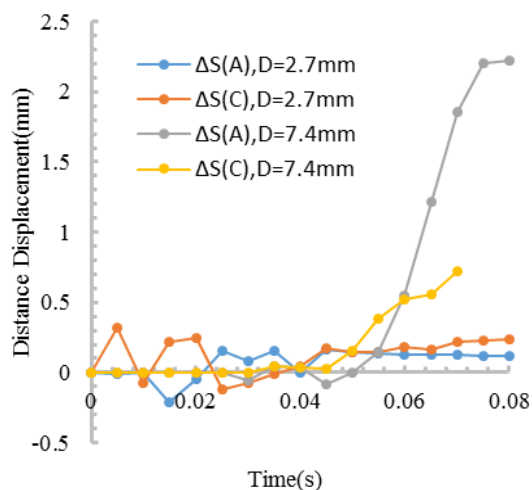
حرکت می کند. در حالیکه نقطه انتهای عقب خط سه فاز به دلیل اثر غالب گرانش بر نیروی کشش سطحی به سمت پایین حرکت کرده است. همواره ΔS_C و ΔS_A نوسانات میرایی پریودیک با فرکانس و دامنه تقریباً برابر ولی با فاز معکوس را نشان می دهند. در این حالت اندازه ΔS_C از ΔS_A بزرگتر می باشد که نشان دهنده سقوط مرکز ثقل قطره ادغام شده می باشد.

بر روی سطح شیبدار با زاویه ۶۰ درجه همواره قطره اولیه عقبی به دلیل نیروی گرانش و جریان داخلی که در آن شکل می گیرد به پایین سرازیر شده و به سوی قطره جلو هدایت می شود. زمانی که نیروی گرانش و کشش سطحی در تعادل با یکدیگر می باشند قطره ادغام شده هیچگونه حرکتی بر روی سطح شیبدار نخواهد داشت. همانطور که از روی منحنی مشخص می باشد، مقادیر ΔS_C و ΔS_A برای زوایای شیب سطح با زاویه بزرگتر همواره بیشتر از سطح با شیب کمتر می باشد. مقدار جابجایی قطرات بر روی سطح با شیب بیشتر، بزرگتر بوده و سرعت حرکت قطرات نیز بالطبع بیشتر است. شیب سطح بزرگتر باعث نوسانات شدیدتر برای ΔS_C می شود، در حالی که نوسانات برای فرکانس بالاتر، دامنه کوچکتر و زمان کوتاه برای ΔS_A را تضعیف می کند.



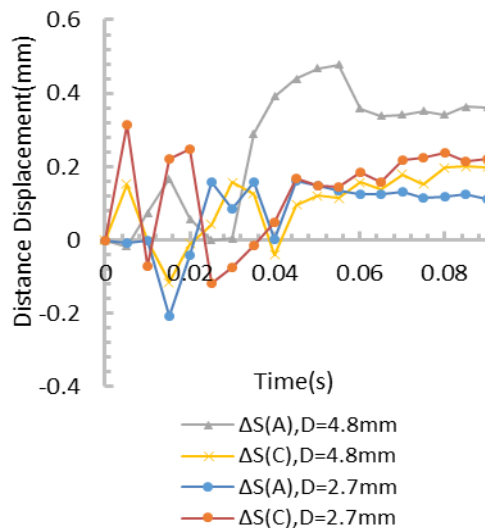
شکل ۱۱- اثر تغییرات شیب سطح بر روی جابجایی قطره ادغام شده ($\theta = 60, 30$)

می ماند و سپس با گذشت زمان به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. غیرمتحرک بودن نقاط پیشرو و پسرو قطره ادغام شده به دلیل جریان سیال داخلی از سمت قطره عقبی به سوی قطره جلویی، قبل از به حرکت در آمدن قطره و یا قبل از رسیدن زاویه تماس پیشرو دینامیکی قطره به حداکثر مقدار خود می باشد. همانطور که از نتایج بدست آمده می توان فهمید مقدار تغییرات ΔS_A در مقایسه با ΔS_C در قطرات با اندازه بزرگتر، بیشتر می باشد. که این نشان دهنده آن است که قطره ادغام شده در طول سطح شیبدار به سمت پایین حرکت می کند.



شکل ۱۴- اثر اندازه قطرات اولیه بر روی جابجایی دینامیکی قطره ادغام شده، $D=7.4/7.4mm$ ($\theta = 30^\circ$)

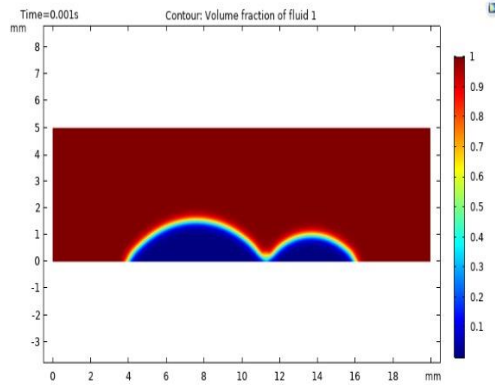
تمایل به جا شدن دارد و سرعت قطره در آن لحظه افزایش خواهد یافت. این پدیده را می توان از طریق اثر غالب نیروی گرانش بر کشش سطحی توصیف کرد. همچنین افزایش یکنواخت ΔS_C ناشی از حرکت جریان سیال به سمت پایین می باشد، که در آن نیروی گرانش بر نیروی کشش سطحی غالب می باشد. این مساله نسبت به حالت $D=7mm/2$ متفاوت می باشد، جایکه نیروی گرانش و کشش سطحی به طور متناوب بر جریان غالب می باشند. با توجه به نمودار، پس از آنکه دو قطره با سایزهای مختلف به حالت پایدار خود می رسند، تغییرات ΔS_C برای هر دو حالت تقریباً یکسان می شود.



شکل ۱۳- اثر اندازه قطرات اولیه بر روی جابجایی دینامیکی قطره ادغام شده، $D=7.4/4.8mm$ ($\theta = 30^\circ$)

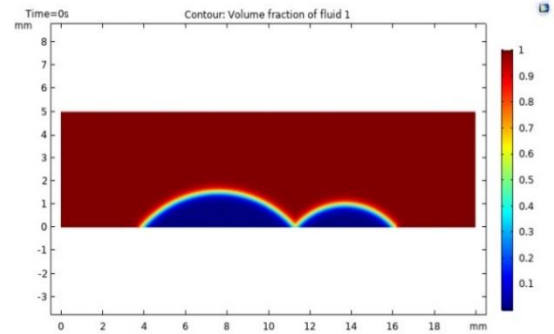
۶-۴- بررسی رفتار دینامیکی قطرات نابرابر بر روی سطح صاف و شیبدار در فرآیند ادغام
بررسی فرآیند ادغام قطرات ناهمسان بر روی سطح صاف و شیبدار انجام شد. تغییرات شعاع پل مایع در طول شکل گیری قطره ادغام شده مورد بررسی قرار گرفت و با ادغام قطرات در حالت متقارن مقایسه گردید. پیوند نامتقارن می تواند به دلیل پیوند دو قطره با اندازه نابرابر یا پیوند دو قطره با زوایای تماس مختلف با سطح به دلیل یک گرادیان پله ای در ترشوندگی سطح جامد ایجاد شود. شکل ۱۵ دو قطره نابرابر با زاویه تماس استاتیکی ۴۵ درجه بر روی سطح جامد را نشان می دهد. قطره

شکل ۱۴ تحولات ΔS_C و ΔS_A را در فرآیند ادغام قطرات برای حالات $D=7mm/4mm$ و $D=7mm/7mm$ را با زاویه شیب سطح ۳۰ درجه نشان می دهد. با توجه به شکل می توان دریافت که در قطرات کوچک هر دو مقدار ΔS_C و ΔS_A رفتار نوسانی میراشده با دامنه کم ناشی از برهم کنش متناوب نیروی گرانش و کشش سطحی، دارند. مقدار ΔS_C در طول زمان همواره بزرگتر از ΔS_A برای قطره با قطر پایه $D=7mm/2$ می باشد. این مساله نشان می دهد که خط تماس سه فاز با پایین آمدن مرکز جرم قطره، کاهش می یابد. در حالت $D=7mm/4mm$ مقدار ΔS_C و ΔS_A در زمان های اولیه پیوند ثابت و حدوداً صفر باقی



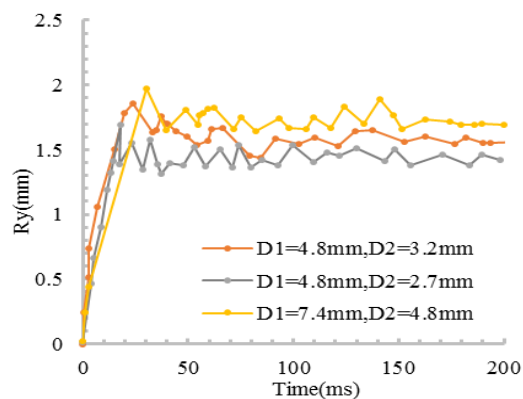
شکل ۱۶- مراحل اولیه آغاز پیوند مابین جفت قطرات
 نابرابر، $(\theta=0^\circ) \text{ } 8\text{mm}/4=D2, 4\text{ mm } /7=D1$

بزرگ با قطر $7/4$ میلیمتر و قطره کوچکتر با قطر $4/8$ بر روی سطح با فاصله $0/005$ میلیمتر از قطره بزرگتر قرار گرفته است.



شکل ۱۵- قرار گیری دو قطره نابرابر با زاویه تماس 45°
 درجه بر روی سطح قبل از آغاز پیوند

شکل ۱۷ تغییرات شعاع پل مایع بر حسب زمان برای ادغام قطرات با چند شعاع متفاوت را نشان می دهد. در ابتدای شروع پیوند همانند ادغام قطرات با اندازه برابر شعاع پل مایع به حداکثر مقدار خود رسیده و سپس کاهش می یابد. با گذشت زمان پل رابط نوسانات میرایی را طی کرده و در نهایت به حالت پایدار خود می رسد. با مقایسه منحنی های مربوطه می توان به این نتیجه رسید که قطرات با شعاع کوچکتر نوسانات با دامنه کوچکتر و فرکانس بالایی را نسبت به قطرات بزرگتر تجربه می کنند. این مساله را می توان با اثر غالب ویسکوزیته در میرا شونده گی نوسانات در قطرات بزرگ تشریح کرد.



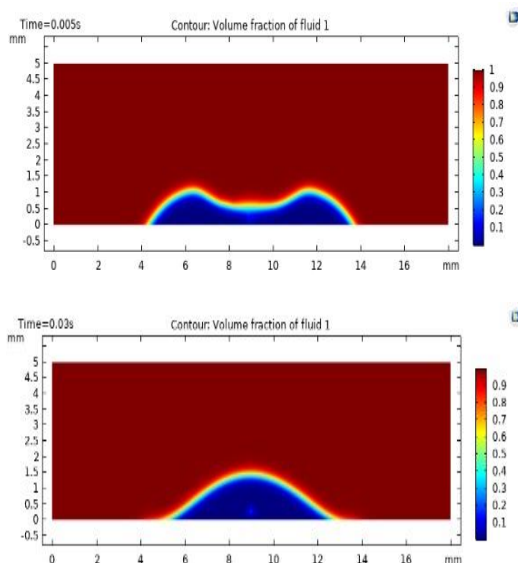
شکل ۱۷- اثر اندازه قطرات بر روی تغییرات شعاع پل مایع
 در فرآیند ادغام قطرات با اندازه نابرابر

شکل ۱۶، شکل گیری پل مایع مابین دو قطره آب نابرابر را در را نشان می دهد. همانند ادغام قطرات همسان پس از آنکه دو قطره به دلیل نیروی کشش سطحی به یکدیگر نزدیک شده و با هم تماس پیدا می کنند، پل مایعی با شعاع کم مابین دو قطره تشکیل می شود. فرآیند ادغام قطرات نابرابر به دلیل شکل موینگی قطرات نامتقارن، متفاوت از فرآیند ادغام قطرات با اندازه برابر است. همانند قطرات همسان، در این حالت نیز با تماس اولیه قطرات و شکل گیری پل رابط گرادیان فشار موینگی ناشی از انحنای فصل مشترک مابین قطرات اولیه و پل مایع ایجاد می شود. در این حالت اختلاف فشار ناشی از کشش سطحی مابین قطره کوچک و شعاع پل مایع (Δp_1) بیشتر از اختلاف فشار موینگی مابین قطره بزرگتر و شعاع پل مایع (Δp_2) می باشد.

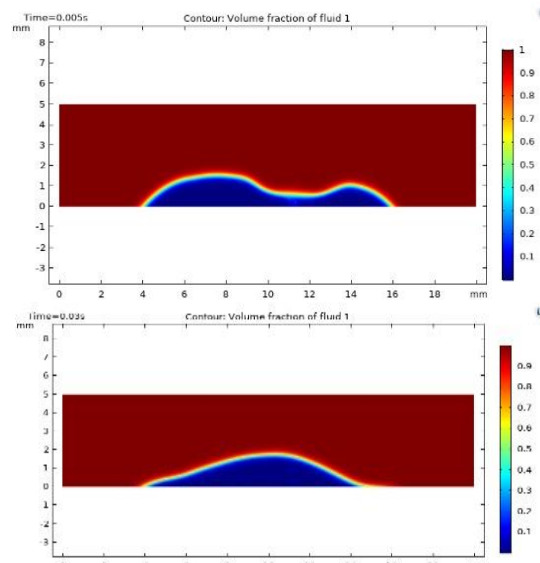
با اندازه برابر کمتر از اختلاف فشار در حالت ادغام قطرات نابرابر می باشد. از این رو سرعت تشکیل پل مایع در حالت ادغام با اندازه نابرابر بیشتر بوده و نوسانات بیشتری با دامنه نوسانات پایین و فرکانس نوسانی بالایی را

در شکل ۱۸ شماتیکی از تغییر و تحولات ادغام قطرات نسبت به زمان با اندازه برابر و نابرابر با زاویه تماس ۴۵ درجه نمایش داده شده است. تمامی شرایط برای شبیه سازی این دو حالت یکسان در نظر گرفته شده است. اختلاف فشار در قطرات

قطرات با قطر برابر



قطرات با قطر نابرابر



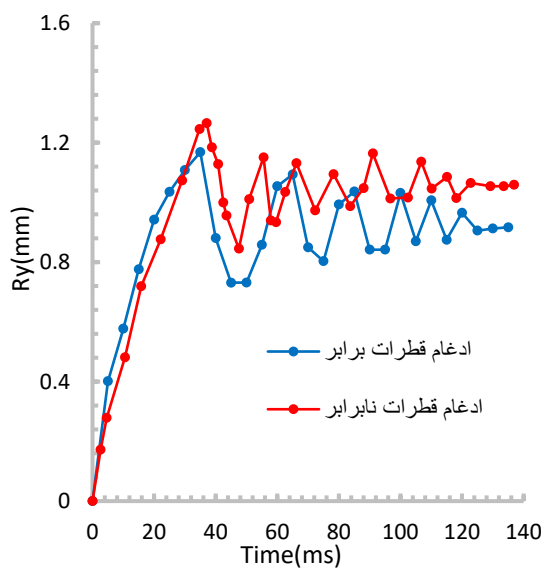
شکل ۱۸- تغییر و تحولات شماتیکی ادغام قطرات با اندازه برابر و نابرابر در طول زمان بر روی سطح صاف

ترتیب ۷۵/۸ و ۵۴/۳ درجه می باشد. در ابتدای آغاز پیوند به دلیل اختلاف فشار زیاد موجود بین قطره کوچک و بزرگ با شعاع پل مایع، و در نتیجه گرادبان کشش سطحی بالاتر نسبت به ادغام قطرات با اندازه برابر، سیال مایع از قطره کوچکتر با سرعت بیشتری به سمت پل مایع روانه می گردد. به طوریکه در زمان ۰/۰۱ ثانیه با تشکیل پل مایع شاهد حالتی همچون برخورد دو سیال با یکدیگر می باشیم که منجر به نوسانات شدید تری نسبت به حالت نخست می شود. با توجه به نتایج بدست آمده می توان مشاهده کرد که در زمان ۰/۰۱۵ ثانیه قطره کوچکتر به داخل قطره بزرگتر نفوذ کرده و در نتیجه شاهد جابجایی منفی در خط تماس سه گانه قطره کوچک می باشیم. البته نوسانات ایجاد شده به دلیل نیروی گرانش و همچنین روانه شدن حجم زیاد سیال از قطره بزرگتر به سمت پل رابط دمپ شده و قطره ایجاد شده شروع به حرکت

شاهد می باشیم. با مقایسه شماتیکی مراحل تشکیل قطره در هر دو حالت می توان مشاهده کرد که در حالت اندازه برابر مرکز جرم پل مایع ایجاد شده وسط دو قطره اولیه بوده و حتی می توان به دلیل شکل متقارن مساله مرکز جرم پل رابط را، متوسط مرکز جرم قطرات اولیه در نظر گرفت. اما در حالت پیوند قطرات با اندازه متفاوت پل مایع و قطره نهایی به دلیل وجود اختلاف فشار نابرابر و سرعت تشکیل بالاتر، حالت متقارنی نداشته و الزاما مرکز جرم پل رابط متوسط مرکز جرم قطرات اولیه نمی باشد.

بررسی دینامیک فرآیند ادغام قطرات نابرابر بر روی سطح شیبدار نیز جهت آنالیز تغییرات شعاع پل مایع در طول زمان انجام شد. در شکل ۱۹ قطره بزرگ با قطر ۴/۸ میلیمتر و قطره کوچکتر با قطر ۳/۲ میلیمتر بر روی سطح با شیب ۳۰ درجه قرار گرفته اند. زاویای پیشرو و پسرو جفت قطرات یکسان و به

شدید تر می باشد. در حالیکه از زمان $0/1$ ثانیه به بعد تقریباً رفتار شعاع پل مایع در هر دو حالت یکسان بوده و نوسانات دمپ می شود که سرعت میراشوندگی در حالت نابرابر به دلیل بیشتر بودن حجم قطره و تأثیر اثر ویسکوزیته و نیروی گرانش، تا حدودی بیشتر می باشد.



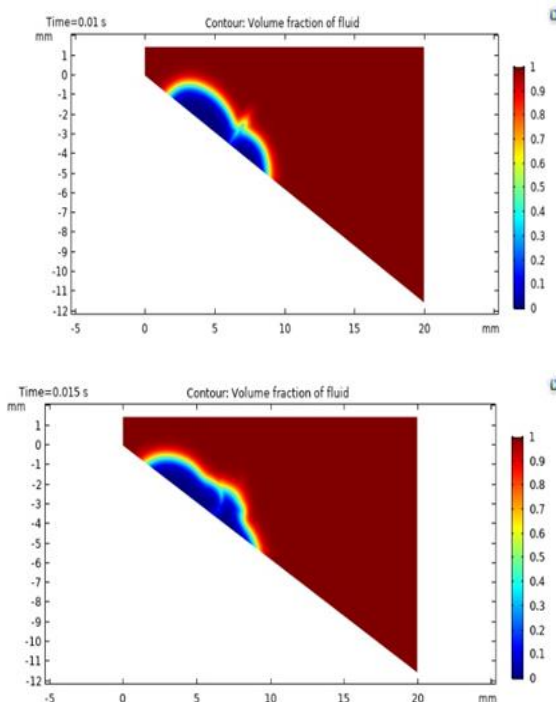
شکل ۲۰- مقایسه تغییرات شعاع پل مایع در ادغام قطرات برابر و نابرابر بر روی سطح شیبدار

۶-۵- جمع بندی

در این کار به منظور بررسی رفتار دینامیکی قطرات و تغییرات خط سه فاز و همچنین تغییرات شعاع پل مایع در فرآیند ادغام، به شبیه سازی این فرآیند خاص در داخل نرم افزار کامسول پرداخته شد. اثرات تغییرات شیب سطح و اندازه قطرات بر روی پارامترهای ذکر شده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده را در حالت کلی به صورت زیر می توان خلاصه کرد:

- در مراحل اولیه آغاز پیوند در تمام حالت ها تعادل نیروهای اولیه با تشکیل پل مایع شکسته شده، و باعث شکل گیری سطح مشترک مقعر در پل مایع می شود. این مساله باعث ایجاد گرادیان کشش سطحی برای ایجاد جریان مایع داخلی می شود. با جریان یافتن سیال داخلی و جریان یافتن سیال به

می کند. در ادامه حرکت قطره پیوسته شاهد افزایش سرعت حرکت در طول مسیر به دلیل تأثیر غالب نیروی گرانش بر بر روی رفتار قطره می باشیم.



شکل ۱۹- تغییر و تحولات شماتیکی ادغام قطرات با اندازه نابرابر در طول زمان بر روی سطح شیبدار، $(\theta=30^\circ)$ $2\text{mm}/3=D2, 8\text{mm}/4=D1$

شکل ۲۰ تغییرات شعاع پل مایع را برای ادغام قطرات با اندازه برابر با قطر پایه $3/2$ میلیمتر و ادغام قطرات با اندازه نابرابر با قطر پایه کوچک $3/2$ و قطر قطره بزرگتر $4/8$ میلیمتر را بر روی سطح با شیب 30° درجه را نشان می دهد. با مقایسه دو منحنی بدست آمده می توان مشاهده کرد که در هر دو حالت شعاع پل مایع با گذشت زمان تا رسیدن به نقطه ماکزیمم خود سیر صعودی را طی می کند. در حالیکه پس از عبور از این نقطه نوسانات ایجاد شده به دلیل نفوذ قطره کوچکتر در قطره بزرگتر شدت بیشتری پیدا می کنند. در حالت ادغام قطرات با اندازه نابرابر به دلیل وجود گرادیان فشار بیشتر و همچنین گرادیان کشش سطحی در ناحیه فصل مشترک سیال در ابتدای حرکت، قطره ادغام شده، نوسانات

بیشتر بوده که منجر به ایجاد نوسانات بیشتر با دامنه نوسانات پایین و فرکانس نوسانی بالا می شود.

۷- علائم، نشانه‌ها و ارقام

سرعت سیال، m/s	V
شتاب گرانش، m/s^2	g
چگالی، kg/m^3	ρ
عدد رینولدز	Re
قطر قطرات، mm	D
شعاع قطرات، mm	R
ویسکوزیته، kg/m.s	μ
کسر حجمی	ϕ
نیروی کشش سطحی، N	F_e
نیروی وزن، N	F_g
تابع دیراک دلتا	δ
زاویه شیب سطح، deg	θ
زاویه پیشرو، deg	α_f
زاویه پسرو، deg	α_b
جابجایی، mm	Δs
فشار استاتیکی، pa	p

۸- مراجع

- [1] B. S. Sikarwar, S. Khandekar, and K. Muralidhar, (2012) "Coalescence of Pendant Droplets on an Inclined Super-hydrophobic Substrate," no. October, pp. 26-30.
- [2] Z. Hu and R. C. Srivastava, (1995) "Evolution of raindrop size distribution by coalescence, breakup, and evaporation: Theory and observations," J. Atmos. Sci., vol. 52, no. 10, pp. 1761-1783.
- [3] M. Gross, I. Steinbach, D. Raabe, and F. Varnik, (2013) "Viscous coalescence of droplets: A lattice Boltzmann study," Phys. Fluids, vol. 25, no. 5, p. 52101.
- [4] محمد پور، لقمان، امینیان، احسان، صفاری، حمید. (۱۳۹۹). بررسی اثر پدیده مارانگونی در چگالش تک قطره بر روی ساختارهای وزنل و کیسی. مجله مکانیک سازه ها و شاره ها ۳۹۸۸-۳۸۷۰(۴):۱۰.

نقطه فصل مشترک به علت وجود گرادیان فشار استاتیکی و کشش سطحی شعاع پل مایع به حداکثر مقدار خود رسیده و پس از طی کردن نوسانات میرایی دوره ای در نهایت ارتفاع آن کاهش یافته و به حالت پایدار خود می رسد.

(۲) در فرآیند ادغام مربوط به قطرات با سایز کوچکتر شاهد نوسانات پریودیک فرکانس بالا، همراه با دامنه بزرگتر و زمان طولانی ناشی از برهم کنش نیروهای گرانش، کشش سطحی و اینرسی می باشیم. افزایش شیب سطح تماس در فرآیند ادغام قطرات کوچک باعث ایجاد نوسانات شدیدتر برای Δs_C شده و نوسانات دامنه بالای Δs_A کاهش می دهد. شعاع پل مایع R_p در شیب های بیشتر دارای فرکانس نوسانی بالا، دامنه نوسانات کم و میرایی سریع در زمان کوتاه می باشد.

(۳) برای انعقاد قطرات بزرگ بر روی سطح شیب دار، خط تماس سه فازی یک حرکت سریع در سراسری سطح داشت که متناظر با افزایش یکنواخت در Δs_A و Δs_C بود، این در حالی بود که نقاط پیشرو و پسرو قطره در این حالت برای مدت کوتاهی بی حرکت باقی مانده و هیچگونه جابجایی را در طول سطح شاهد نبودیم. در ادغام قطرات با قطر پایه بزرگتر شعاع پل مایع به سرعت بدون نوسان پس از عبور از یک مقدار اوج منحصر به فرد کاهش یافت. در کل در این حالت شاهد نوسانات دوره ای کمتری نسبت به قطرات کوچکتر بودیم که دلیل مهم آن تاثیر قابل توجه و بیشتر بودن نیروی اینرسی در این حالت نسبت به قطرات کوچکتر می باشد. با افزایش شیب سطح در این حالت مقدار جابجایی نقاط پیشرو و پسرو قطره ادغام شده بیشتر شده و همواره موجب افزایش محسوس نوسانات شد.

(۴) نتایج حاصل از ادغام قطرات نابرابر بر روی سطح شیب دار و سطح صاف نشان می دهد، دینامیک رفتاری فرآیند ادغام در حالت کلی مشابه با ادغام قطرات با اندازه برابر می باشد. سرعت تشکیل پل مایع در این حالت نسبت به ادغام قطرات متقارن

- coalescence on a surface with a wettability gradient,” *Lab Chip*, vol. 10, no. 22, pp. 3149–3156.
- [20] M. W. Lee, D. K. Kang, S. S. Yoon, and A. L. Yarin, (2012) “Coalescence of two drops on partially wettable substrates,” *Langmuir*, vol. 28, no. 8, pp. 3791–3798.
- [21] Z. Wang et al., (2018) “Dynamic behaviors of the coalescence between two droplets with different temperatures simulated by the VOF method,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 131, pp. 132–140.
- [22] Xing, A. Lei, et al. (2022) "Simulation of coalescence dynamics of droplets on surfaces with different wettabilities." *Phys. Fluids* 34.7: 072114.
- [23] Hiranya Deka, Gautam Biswas, Suman Chakraborty, and Amaresh Dalal, (2019) "Coalescence dynamics of unequal sized drops", *Phys. Fluids* 31, 012105.
- [24] V. Chireux, D. Fabre, F. Risso, and P. Tordjeman, (2015) “Oscillations of a liquid bridge resulting from the coalescence of two droplets,” *Phys. Fluids*, vol. 27, no. 6, p. 62103.
- [25] Lin, Dian-Ji et al. (2020) “Contact Time of Double-Droplet Impacting Superhydrophobic Surfaces with Different Macrottextures.” *Processes*: n. pag.
- [26] I. V Roisman, B. Prunet-Foch, C. Tropea, and M. Vignes-Adler, (2002) “Multiple drop impact onto a dry solid substrate,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 256, no. 2, pp. 396–410.
- [27] R. V Garimella, V. Dyadechko, B. K. Swartz, and M. J. Shashkov, (2005) “Interface reconstruction in multi-fluid, multi-phase flow simulations,” in *Proceedings of the 14th International Meshing Roundtable*, pp. 19–32.
- [28] S. O. Unverdi and G. Tryggvason, (1992) “A front-tracking method for viscous, incompressible, multi-fluid flows,” *J. Comput. Phys.*, vol. 100, no. 1, pp. 25–37.
- [29] H. S. Udaykumar, W. Shyy, and M. M. Rao, (1996) “Elafint: a mixed Eulerian–Lagrangian method for fluid flows with complex and moving boundaries,” *Int. J. Numer. methods fluids*, vol. 22, no. 8, pp. 691–712.
- [30] T. Ye, W. Shyy, and J. N. Chung, (2001) “A fixed-grid, sharp-interface method for bubble dynamics and phase change,” *J. Comput. Phys.*, vol. 174, no. 2, pp. 781–815.
- [31] COMSOL, “The CFD Module User’s Guide.” .
- [32] Bruno Lafaurie, Carlo Nardone, Ruben Scardovelli, Stéphane Zaleski, Gianluigi Zanetti (1994) "Modelling Merging and Fragmentation in Multiphase Flows with SURFER" *J. Comput. Phys.*, Volume 113, Issue 1, Pages 134-147.
- [5] C. ANDRIEU, D. A. BEYSENS, V. S. NIKOLAYEV, and Y. POMEAU, (2002) “Coalescence of sessile drops,” *J. Fluid Mech.*, vol. 453, pp. 427–438.
- [6] R. Narhe, D. Beysens, and V. S. Nikolayev, (2004) “Contact line dynamics in drop coalescence and spreading,” *Langmuir*, vol. 20, no. 4, pp. 1213–1221, Feb.
- [7] R. Narhe, D. Beysens, and V. S. Nikolayev, (2005) “Dynamics of Drop Coalescence on a Surface: The Role of Initial Conditions and Surface Properties,” *Int. J. Thermophys.*, vol. 26, no. 6, pp. 1743–1757.
- [8] R. D. Narhe, D. A. Beysens, and Y. Pomeau, (2008) “Dynamic drying in the early-stage coalescence of droplets sitting on a plate,” *EPL.*, vol. 81, no. 4, p. 46002.
- [9] J. Zheng et al., (2016) “Relaxation of liquid bridge after droplets coalescence,” vol. 115115, no. November.
- [10] J. J. Thomson and H. F. Newall, (1886) “V. On the formation of vortex rings by drops falling into liquids, and some allied phenomena,” *Proc. R. Soc. London*, vol. 39, no. 239–241, pp. 417–436.
- [11] A. M. Worthington, (1877) “XXVIII. On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate,” *Proc. R. Soc. London*, vol. 25, no. 171–178, pp. 261–272.
- [12] A. M. Worthington, (1883) “On impact with a liquid surface,” *Proc. R. Soc. London*, vol. 34, no. 220–223, pp. 217–230.
- [13] J. Eggers, (1998) “Coalescence of spheres by surface diffusion,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 12, p. 2634.
- [14] A. Menchaca-Rocha, A. Martínez-Dávalos, R. Nunez, S. Popinet, and S. Zaleski, (2001) “Coalescence of liquid drops by surface tension,” *Phys. Rev. E*, vol. 63, no. 4, p. 46309.
- [15] W. D. Ristenpart, P. M. McCalla, R. V Roy, and H. A. Stone, (2006) “Coalescence of spreading droplets on a wettable substrate,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, no. 6, p. 64501.
- [16] Q. Liao, S. Xing, and X. Zhu, (2006) “Experimental investigation on coalescence of liquid drops on homogeneous surfaces,” in *9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, p. 3407.
- [17] N. Kapur and P. H. Gaskell, (2007) “Morphology and dynamics of droplet coalescence on a surface,” *Phys. Rev. E*, vol. 75, no. 5, p. 56315.
- [18] F. Blanchette, (2010) “Simulation of mixing within drops due to surface tension variations,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, no. 7, p. 74501.
- [19] Y.-H. Lai, M.-H. Hsu, and J.-T. Yang, (2010) “Enhanced mixing of droplets during