



بررسی اثرات نسبت چگالی بر عملکرد مدل شبه پتانسیل در شبیه سازی جریان های چندفازی

سید میثم خاتون آبادی، محمود اشرفی زاده*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۵ آبان ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۲ اسفند ۱۳۹۴
پذیرش: ۲۳ فروردین ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۳ شهریور ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

مدل شان-چن
مدل شبه پتانسیل
جریان های چندفازی
نسبت چگالی
نوسانات سطح مشترک

چکیده: در این پژوهش، قابلیت و عملکرد مدل توسعه یافته شبه پتانسیل شان - چن برای شبیه سازی جریان های چندفازی در نسبت چگالی بالا مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مدل در نرم افزار آزاد و متن باز پالابوس که جریان سیال را با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه سازی می کند پیاده سازی شده است. برای این منظور چندین مسئله رایج از جمله آزمون لاپلاس، جدایی فازها، به هم آمیختگی دو حباب، برخورد قطره با سطح جامد و مایع مورد تحقیق قرار گرفته اند. بر اساس آزمون لاپلاس این مدل قابلیت تعیین مقادیر مختلف کشش سطحی در نسبت چگالی های مختلف را دارد. همچنین این مدل می تواند جدایی خودکار فازها و شکل سطح مشترک را به خوبی پیش بینی نماید. البته سرعت همگرایی حل با افزایش نسبت چگالی کاهش می یابد. شبیه سازی اختلاط دو حباب دو مورد از ضعف های عمده این مدل که جریان پارازیته بزرگ و نوسانات سطح مشترک در نسبت چگالی بالا است را آشکار می سازد. در شبیه سازی برخورد قطره با سطح جامد، تأثیر نسبت چگالی که باعث تغییر در عدد وبر نیز می شود بررسی شده است. با کاهش کشش سطحی و افزایش عدد وبر (در اعداد رینولدز یکسان) مقدار بیشینه پخش قطره بر روی سطح بیشتر ولی حرکت نوسانی آن کاهش می یابد. در نهایت نتایج شبیه سازی فرایند پاشش نشان می دهند که عدد وبر اثرات قابل توجهی در جدایی بخشی از لایه تاجی شکل دارد.

۱- مقدمه

روش شبکه بولتزمن برای شبیه سازی سیالات واقعی در دهه های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [۱]. جریان های چندفازی به عنوان یکی از پیچیده ترین پدیده هایی که کاربرد وسیعی در صنایع نفت و گاز، آب و فلزات مذاب دارند، شناخته می شوند. به دلیل کاربردهای گسترده جریان های چندفازی و دشواری انجام آزمایش های تجربی شبیه سازی آنها از اهمیت بالایی برخوردار بوده و البته با چالش های بسیاری نیز همراه است. جهت شبیه سازی جریان های چندفازی به طور گسترده از روش شبکه بولتزمن استفاده شده است. اگرچه مدل های موجود در این روش بسیار جدید و دچار نواقصی می باشند ولی محققان زیادی با انجام برخی اصلاحات لازم از این مدل ها بهره گرفته اند.

برای اولین بار گانگستن و همکاران [۲] مدل گرادیان رنگ که بر اساس مدل شبکه گاز روتمن و کلر [۳] بود را معرفی نمودند. پس از آن شان و چن [۴] بر پایه ی پتانسیل فعل و انفعالی بین مولکولی مدلی را پیشنهاد کردند که بتواند وابستگی اپراتور برخورد را به کشش سطحی بهبود بخشد. در این مدل جدایی فاز به صورت خودکار و طبیعی اتفاق می افتد. سپس سوئیفت و همکاران [۵] مدل انرژی آزاد خود را ارائه کردند. در این مدل تابع توزیع تعادلی بر اساس سازگاری ترمودینامیکی تعریف شده است. در بین این مدل ها، مدل شان - چن با وجود ضعف موجود در اساس فیزیکی، به دلیل

سادگی برای اهداف عددی بسیار رایج است و در دهه اخیر توسعه چشمگیری یافته است.

زیربنای مدل اصلی شان-چن دچار نواقصی از جمله ایجاد جریان های پارازیته بزرگ و محدود بودن به نسبت چگالی پایین می باشد. در نتیجه یوان و شافر [۶] تغییرات اندکی در تابع شبه پتانسیل به وجود آوردند و دقت مدل را برای نسبت چگالی بالاتری بهبود بخشیدند ولی همچنان مشکلاتی وجود داشت. کوپراشتوخ و همکاران [۷] مدل اختلاف دقیق را برای توسعه نسبت چگالی و افزایش دقت مدل پیشنهاد نمودند. آنها همچنین برخورد قطره با سطح جامد را بدون لحاظ نمودن جزئیات مورد شبیه سازی قرار دادند. پس از آن تقریباً بیشتر کارهای انجام گرفته با استفاده از مدل اختلاف دقیق صورت گرفته است و محققان بسیاری تمرکز خود را بر روی این مدل معطوف نموده اند. گانگ و چنگ [۸] استفاده از پارامتر وزنی β را در مدل اختلاف دقیق توصیه کردند. آنها از مدل تک جزئی - دوفازی شان - چن برای مطالعه قطره سه بعدی و به هم آمیختگی آنها استفاده نموده اند ولی بررسی آنها معمولاً به نسبت چگالی های کوچک محدود بوده است. شبیه سازی ها با استفاده از این مدل بسیار گسترده بوده است و مسائل مختلفی را شامل می شود. استفاده از روش شبکه بولتزمن در سال های اخیر رشد فراوانی داشته است و مسائل مختلفی به کمک این روش شبیه سازی شده اند. البته به دلیل اساس فیزیکی متفاوت این مدل با سایر مدل های عددی موجود، در نظر گرفتن ابعاد مختلف آن همچنان مورد بحث می باشد. از بین مثال های مورد بررسی

و نوسانات سطح مشترک که از جمله مهمترین موارد چالشی در شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی است ارزیابی کردند. همچنین دو مسئله برخورد قطره با سطح جامد و فیلم مایع نیز مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است که نشان‌دهنده قابلیت این مدل برای استفاده در مسائل پیچیده است.

۲- مدل شبه پتانسیل شان-چن

ایده اصلی روش شبکه بولتزن حل معادله‌ای واحد برای محاسبه تابع توزیع ذرات است زیرا در این روش خواص به وسیله تابع توزیع ذرات توصیف می‌شوند. روش شبکه بولتزن برای جریان همدمای سیالات با اپراتور برخورد رایج باهتکار - گروس-کروک [۱۶] و ترم نیروهای خارجی به صورت زیر بیان می‌شود.

$$f_i(x + e_i \delta t, t + \delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] + \Delta F_i(x, t) \quad (1)$$

که f تابع توزیع ذرات در یک مکان و زمان مشخص است، τ زمان آسایش، ΔF_i نیروی حجمی و f^{eq} تابع توزیع تعادلی می‌باشند که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$f_i^{eq}(x, t) = w_i \rho(x, t) \left[1 + \frac{e_i u^{eq}}{c_s^2} + \frac{(e_i u^{eq})^2}{2c_s^4} + \frac{u^{eq 2}}{2c_s^2} \right] \quad (2)$$

که C_s سرعت صوت شبکه، w فاکتورهای وزنی و e_i سرعت‌ها در جهت‌های مختلف است. برای شبکه $D2Q6$ ، $C_s = 1/\sqrt{3}$ است. همچنین در مدل اختلاف دقیق مقادیر سرعت‌های ذکر شده و فاکتور وزنی هر گره به صورت زیر لحاظ می‌شوند.

$$e_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\omega_i = \begin{cases} 4/9 & i = 0 \\ 1/9 & i = 1, 2, 3, 4 \\ 1/36 & i = 5, 6, 7, 8 \end{cases}$$

در این روش چگالی و مومنتوم نیز در هر تکرار به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\rho = \sum_i f_i = \sum_i f_i^{eq} \quad (4)$$

$$\rho u^{eq} = \sum_i e_i f_i = \sum_i e_i f_i^{eq} \quad (5)$$

در روش شبکه بولتزن برای تعیین ویسکوزیته از پارامتر زمان آسایش استفاده می‌شود که به صورت $\nu = (\tau - 0.5)/3$ یا یکدیگر در رابطه هستند. در مدل اختلاف دقیق ترم نیروی حجمی به صورت معادله (۶) در نظر

مسائل جدایی خودکار فازها و آزمون لاپلاس به عنوان دو مورد اساسی شناخته می‌شود زیرا به کمک این دو شبیه‌سازی می‌توان به قابلیت تشخیص خودکار سطح مشترک و تعیین مقدار دقیق چگالی و کشش سطحی پی برد [۹]. به هم آمیختگی دو حباب نیز نقاط قوت و ضعف این مدل را به خوبی نشان می‌دهد این فرایند به خصوص در نسبت چگالی بالا، کاونتاسیون و نوسانات سطح مشترک را پوشش می‌دهد. جهت بررسی قابلیت دینامیکی این مدل نیز شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام گرفته است ولی به علت پیچیدگی پیش‌بینی رفتار سطح مشترک دو سیال و همچنین سیال و جامد، برخورد قطره با سطح جامد و مایع می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی مدل باشد. البته شبیه‌سازی این‌گونه پدیده‌ها به کمک این مدل به طور محدود صورت گرفته است؛ به عنوان نمونه گوپتا و کومار [۱۰] فرایند برخورد قطره با سطح جامد را مدل‌سازی نمودند و شرایط لازم جهت جدا شدن بخشی از لایه قطره هنگام پخش را ارزیابی کردند. آنها با ارائه یک رابطه تحلیلی شرایط تجزیه قطره به دو یا سه قطره کوچکتر پس از برخورد با سطح جامد را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که احتمال مشاهده این پدیده در نسبت چگالی پایین بیشتر است و در نسبت چگالی بالا، وقوع این پدیده غیر محتمل می‌باشد. ژانگ و همکاران [۱۱] برخورد قطره با سطح تخت و کروی را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه آنها از روش سرعت انتقالی که توسط یوان و شافر [۶] پیشنهاد شده بود، بهره گرفتند. نتایج شبیه‌سازی‌ها دقت قابل قبولی داشت ولی بیشینه نسبت چگالی شبیه‌سازی‌ها کمتر از ۳۰۰ بود. بنابراین این مدل نمی‌تواند برای شبیه‌سازی بسیاری از مسائل واقعی کاربرد داشته باشد. همچنین در مقاله دیگری که به کمک مدل چند زمان آسایش انجام گرفت، رفتار نوسانی قطره پس از پخش بر روی سطح جامد را بررسی نمودند [۱۲]. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار نوسانات قطره پیش از حالت تعادلی نهایی آن تابع زاویه تماس سطح است به طوری که با افزایش این زاویه مقدار نوسان افزایش می‌یابد. در مطالعات دیگری برخورد قطره با سطح مایع توسط لی و لو [۱۳] به کمک مدل توسعه یافته خود مورد شبیه‌سازی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. در این مقاله جدا شدن قطره از سر تاج در نسبت چگالی ۵۰۰ بدون لحاظ نمودن جزئیات مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و پارامترهایی از جمله شعاع و ارتفاع تاج مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. متأسفانه به علت برخی از معایب مدل شان-چن مطالعات کافی برای بسیاری از مسائل انجام نگرفته است. مطالعاتی نیز که تاکنون در مورد شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی به کمک روش شبکه بولتزن انجام گرفته‌اند بسیار محدود هستند و معمولاً از مدل انرژی آزاد جهت شبیه‌سازی آنها استفاده شده است [۱۴ و ۱۵].

در این مطالعه، با اعمال مدل اختلاف دقیق گانگ و چنگ در نرم‌افزار متن‌باز پالابوس [۹] برخی از مهم‌ترین مسائل دوفازی از جمله آزمون لاپلاس، جدایی خودکار فازها، به هم آمیختگی دو حباب مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا بتوان قابلیت و عملکرد این مدل در نسبت چگالی بالا را مورد بررسی جامع‌تری قرار داد. در این راستا باید پایداری روش، سرعت همگرایی

گرفته می‌شود.

در یک دمای مشخص به دست می‌آید و برای هر معادله حالت متفاوت است. β مقدار G_i برای گره‌های نزدیک ($i=1,2,3,4$) برابر $g/2$ و برای سایر گره‌ها ($i=5,6,7,8$) $g/2$ است.

معادلات حالت فراوانی برای پیش‌بینی چگالی یک سیال در دماهای مختلف وجود دارند. دقت هرکدام از این معادلات حالت برای هر سیال متفاوت است. بنابراین لزوماً چگالی‌های به دست‌آمده توسط معادلات حالت با مقادیر گزارش‌شده در جداول ترمودینامیکی سیال مورد نظر یکسان نیستند که این عدم دقت از نوع معادله حالت ناشی می‌شود و موارد ذکرشده در مورد دقت مدل مربوط در این مقاله به مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی نسبت به مقادیر تئوری به دست آمده از معادله حالت اشاره دارد [۸]. در این پژوهش از معادله حالت کارناهان - استارلینگ استفاده شده است که نسبت به سایر معادلات حالت قابلیت استفاده برای نسبت چگالی بالاتر را دارد و مقدار سرعت پارازیتی کمتری به وجود می‌آورد. این معادله حالت به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$p = \frac{\rho RT (1 + b\rho + (b\rho)^2 - b\rho^3)}{(1 - b\rho)^3} - a\rho^2 \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، T دما و ρ چگالی سیال موردنظر است. سیال مورد استفاده برای تمام شبیه‌سازی‌ها مایع و بخار آب می‌باشند و مقادیر a و b به ترتیب ۱، ۰/۲۵ و مقدار R نیز برابر ۱ در نظر گرفته شده است. مقادیر دقیق چگالی مایع و بخار نیز در هر دما به کمک نمودار فازی آب که از معادله حالت مورد نظر به دست می‌آید قابل محاسبه هستند [۸].

از آنجاکه در تمام شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته قطره و یا حباب مدنظر است در نتیجه از رابطه (۱۱) برای مقداردهی اولیه در روی سطح مشترک قطره یا حباب استفاده شده است در حالی که مقدار چگالی در سایر نقاط به صورت صریح تعریف می‌شود. همان‌طور که اسپراگالیا و همکاران [۱۸] در مطالعه خود اشاره کردند، استفاده از این رابطه به کاربر امکان تنظیم ضخامت سطح مشترک را می‌دهد. همچنین به دلیل غیریکنواخت بودن توزیع اولیه چگالی در سطح مشترک قطره (حباب) این امر باعث افزایش پایداری و کاهش نوسانات سطح مشترک می‌شود.

$$\rho(i, j) = \frac{\rho_{liquid} + \rho_{vapor}}{2} - \frac{\rho_{liquid} - \rho_{vapor}}{2} \times \tanh \left[\frac{2 \times \sqrt{(i - i_{center})^2 + (j - j_{center})^2} - r_0}{W} \right] \quad (11)$$

در معادله (۱۱)، w ضخامت سطح مشترک است و معمولاً بین ۳ الی ۵ در نظر گرفته می‌شود. r_0 شعاع قطره (حباب) موردنظر، i و j گره‌های شبکه و i_{center} و j_{center} مختصات مرکز قطره (حباب) است.

تمام مسائلی که تاکنون ذکر شد مربوط به برهم کنش دو سیال است. در صورتی که در ناحیه‌ای از حل، قطره و یا حباب با سطح جامد تماس پیدا کند باید اثر آن به وسیله یک نیروی اضافی وارد معادله (۹) گردد [۱۹]. برای این

$$\Delta F_i(x, t) = f_i^{eq} \left(\rho, u^{eq} + \frac{F_i(x, t) \delta t}{\rho} \right) - f_i^{eq}(\rho, u^{eq}) \quad (6)$$

ترم نیرو در این مدل حائز اهمیت است و نقش مهمی ایفا می‌کند. در روش اختلاف دقیق برخلاف سایر روش‌های نیرویی نیروی اعمالی به صورت صریح در معادله اصلی بولتزمن وارد می‌شود (رابطه (۱)). مقدار این نیرو نیز به اختلاف توابع توزیع تعادلی وابسته است. شکل اولیه نیرو در مدل اصلی شان - چن به صورت معادله (۷) می‌باشد [۳].

$$F_i(x, t) = -\psi(x) \sum_i G_i(x, x') \psi(x') e_i \quad (7)$$

در این رابطه $\psi(x)$ تابع شبه‌پتانسیل یا جرم مؤثر نامیده می‌شود که تابعی از چگالی است. به دلیل تغییر چگالی نقاط در طول حل، مقدار این تابع نیز با تغییراتی همراه است. این تابع همچون یک نگاشت عمل می‌کند که به جای ارتباط مستقیم بین نیرو و چگالی گره‌ها، مقدار نیرو را به اختلاف مقدار تابع جرم مؤثر گره‌ها مرتبط می‌سازد و در نتیجه باعث افزایش قابلیت مدل برای شبیه‌سازی جریان‌هایی با نسبت چگالی بالاتر شود. همچنین $G(x, x')$ تابع گرین نامیده می‌شود که مقدار نیروی اندرکنش بین ذرات در همسایگی یکدیگر را وارد نیرو می‌کند. در مدل اصلی شان - چن این تابع اهمیت فراوانی دارد زیرا با تغییر آن نسبت چگالی حاصل تغییر می‌کند [۱۷] ولی با وارد کردن معادله حالت در تابع شبه‌پتانسیل که برای اولین بار توسط یوان و شافر [۶] پیشنهاد شد، اثر این پارامتر از بین می‌رود و تنها کافی است که از مقدار مشخصی بیشتر باشد تا بتواند دو فاز را از هم جدا نماید و مانع اختلاط آنها شود. به همین دلیل مقدار عددی آن برابر g در نظر گرفته می‌شود. مقدار G_i برای گره‌های نزدیک ($i=1,2,3,4$) برابر $g/2$ و برای گره‌های دورتر ($i=5,6,7,8$) $g/2$ است.

گانگ و چنگ [۸] تابع شبه‌پتانسیل را به همان شکل که توسط یوان و شافر مورد استفاده قرار گرفته بود به صورت رابطه (۸) استفاده نمودند.

$$\psi = \sqrt{2(p - \rho c_s^2) / c_0 g} \quad (8)$$

در این رابطه $c_0 = 6$ و p به وسیله معادله حالت موردنظر جایگزین می‌گردد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

استفاده از شکل نیرویی معادله (۷) با خطاهایی در پیش‌بینی مقدار چگالی همراه است. به همین دلیل در مدل اختلاف دقیق از ضرایب وزنی مطابق معادله (۹) استفاده می‌شود که باعث افزایش قابل توجه دقت نتایج می‌گردد.

$$F_i(x, t) = (-\beta \psi(x) \sum_i (G_i(x, x') \psi(x, x')) e_i + \left(\frac{1 - \beta}{2} \right) \sum_i (G_i(x, x') \psi^2(x, x')) e_i) \quad (9)$$

در رابطه (۹)، مقادیر β بهینه برای هر معادله حالت به کمک شبیه‌سازی

و مقدار کشش سطحی به دست آمده برای نسبت چگالی ۱۱۰ در هر کدام گزارش شده است. با توجه به نتایج به دست آمده شبکه 120×120 با مرزهای پریودیک برای شبیه سازی انتخاب شده است.

جدول ۱: مقدار کشش سطحی در شبکه های مختلف

Table 1. Surface tension value at different lattice resolutions

کشش سطحی	شبکه
۰/۰۰۹۵	۸۰×۸۰
۰/۰۱۰۴	۱۰۰×۱۰۰
۰/۰۱۱۹	۱۲۰×۱۲۰
۰/۰۱۲۱	۱۵۰×۱۵۰

شکل ۱، نتایج مربوط به شبیه سازی در سه دمای بدون بعد (T_r) ۰/۷ و ۰/۶ و ۰/۵ که به ترتیب دارای نسبت چگالی ۱۱۰، ۸۰۰ و ۸۳۰۰ می باشند را نشان می دهد. همان طور که در مراجع مختلف اشاره شده است نتایج حاصل یک خط راست و شیب آن نیز کشش سطحی است. کشش سطحی آب با کاهش دما افزایش می یابد. شیب نمودارهای به دست آمده نیز صحت نتایج حاصل را تایید می کنند زیرا با کاهش دما و افزایش نسبت چگالی، شیب نمودار افزایش یافته است.

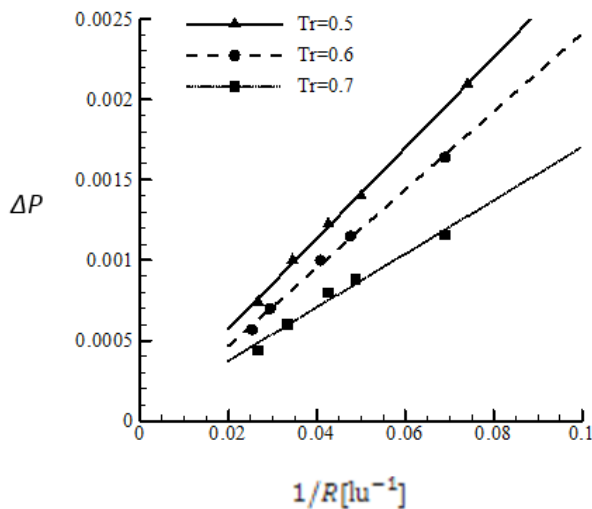


Fig. 1. Variation of pressure difference with invert radius (Laplace law)
شکل ۱: تغییرات اختلاف فشار و معکوس شعاع قطره (قانون لاپلاس)

۳-۲- جدایی فاز

یکی از مقدماتی ترین مثال های مورد استفاده جهت بررسی قابلیت مدل های چندفازی روش شبکه بولتزمن، فرایند جدایی خودکار فازها می باشد. با توجه این ویژگی خاص مدل شان-چن بوسیله این شبیه سازی مورد ارزیابی قرار می گیرد [۴].

حالت تعادلی نهایی به نوع دافعه و یا جاذبه نیروی در نظر گرفته شده بستگی دارد. این ویژگی مدل شان-چن جهت شبیه سازی رژیم جریان پر

منظور نیروی دیگری به شکل معادله (۱۲) در نظر گرفته می شود.

$$F_i(x, t) = -g_w \psi(x) \sum_x w(|e_i|^2) \psi(\rho_w) s(x, x') e_i \quad (12)$$

همان طور که مشخص است شکل کلی این نیرو مشابه معادله (۷) است. در رابطه (۱۲)، ρ_w و g_w برای تعیین میزان ترشوندگی سطح جامد استفاده می شوند. به عبارت دیگر میزان آب دوست بودن سطح بر اساس رابطه (۱۲) تعیین می شود. مدل های مختلفی برای وارد کردن این خاصیت وجود دارد که در این مطالعه مقدار g_w ثابت و با تغییر مقدار ρ_w زاویه های تماس مختلفی حاصل می شود. همچنین تابع s نیز نشانگر نامیده می شود و برای گره های مرز جامد برابر ۱ و برای گره های سیال صفر جایگزین می گردد.

در ادامه چندین مسئله دوفازی رایج در نسبت چگالی های مختلف مورد شبیه سازی و مقایسه قرار می گیرند. به علاوه از آنجایی که مدل تک جزئی - دوفازی مورد استفاده قرار گرفته است با توجه به ارتباط بین دما و نسبت چگالی در خواص سیالات مانند آب، برای حصول نسبت چگالی های مختلف باید دما تغییر نماید تا مطابق جداول ترمودینامیکی آب نسبت چگالی مختلفی بین بخار و مایع به وجود آید. البته لازم به ذکر است که در تمام شبیه سازی ها، دما ثابت است و انتقال حرارتی بین دو فاز وجود ندارد و دمای اشاره شده برای تمام ناحیه حل یکسان می باشد. برای سادگی دمای بدون بعد به صورت تقسیم دما بر دمای بحرانی آب $(T_r = T/T_{cr})$ بیان می گردد. بر اساس خواص فیزیکی آب با کاهش دما نسبت چگالی افزایش می یابد به عنوان نمونه در دمای بدون بعد ۰/۶ نسبت چگالی حاصل حدود ۸۰۰ می باشد. مقدار زمان آسایش نیز برابر یک در نظر گرفته شده است.

۳- شبیه سازی

۳-۱- آزمون لاپلاس

بر اساس قانون لاپلاس، برای یک قطره مایع دایره ای شکل با شعاع R که در یک سیال دیگر در حال تعادل قرار دارد، اختلاف فشار (ΔP) در داخل و خارج قطره با شعاع آن به صورت زیر رابطه دارد.

$$P = P_{in} - P_{out} = \frac{\sigma}{R} \quad (13)$$

در این رابطه σ کشش سطحی است. از آنجایی که کشش سطحی در این مدل برخلاف سایر مدل ها به صورت مقادیر اولیه تعیین نمی شود و باید در نهایت محاسبه گردد، این آزمون از اهمیت بالایی برای اعتبار سنجی نتایج برخوردار است. طبق قانون لاپلاس شیب نمودار اختلاف فشار بر حسب معکوس شعاع باید یک خط راست باشد که شیب این خط مقدار کشش سطحی را بیان می کند. بنابراین شبیه سازی برای قطرهایی با شعاع های اولیه و دما (نسبت چگالی) های مختلف انجام گرفته است و فشار و شعاع نهایی برای هر مورد در حالت تعادلی محاسبه شده است. پیش از شبیه سازی نسبت چگالی های مختلف لازم است استقلال از شبکه مورد بررسی قرار گیرد. در نتیجه چند شبکه با ابعاد مختلف مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده اند

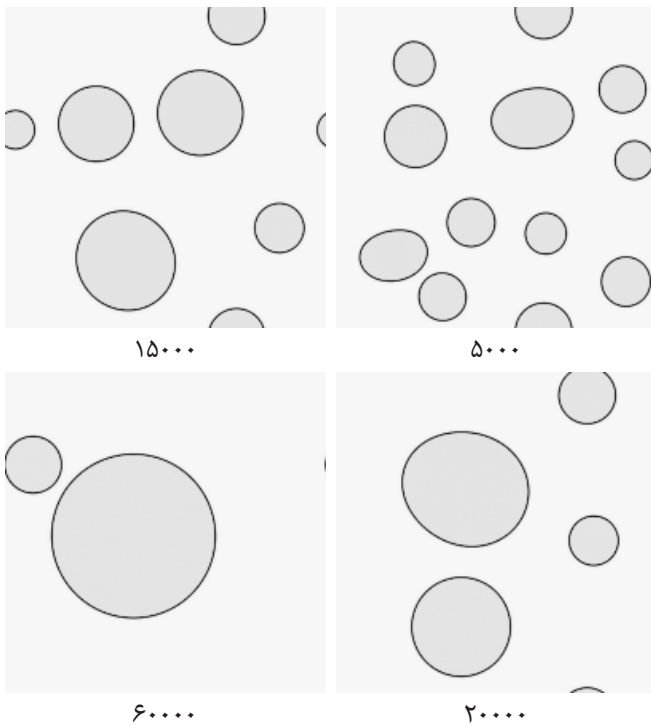


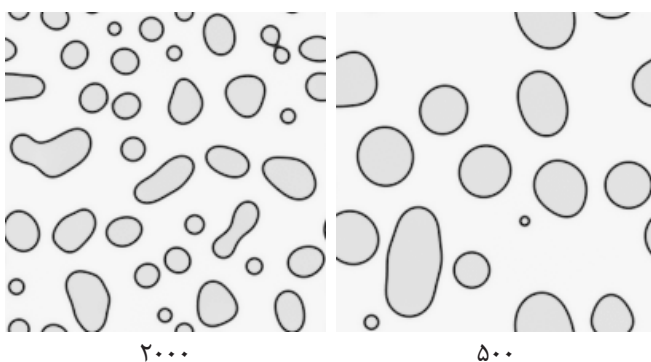
Fig. 2. Segregation of two phases in density ratio 8300

شکل ۲: نتایج جدایی فاز در نسبت چگالی ۸۳۰۰

حاصل می‌شود باعث پدیده بارش می‌گردد. در این قسمت سعی می‌شود با شبیه‌سازی اثرات نسبت چگالی در نحوه اختلاط حباب‌ها مزایا و معایب این مدل بررسی گردد.

برای این منظور دو حباب بخار آب ساکن با فاصله d از یکدیگر در یک شبکه 200×200 قرار گرفته‌اند و شرایط مرزی پریودیک برای تمام مرزها اعمال شده است. برای مقاردهی اولیه از رابطه (۱۱) استفاده شده است که قابلیت تعیین ضخامت سطح مشترک را در این مدل به وجود می‌آورد. به علت تأثیر مقدار w در نوسانات سطح مشترک از مقدار برابر با ۴ برای تمام شبیه‌سازی‌های استفاده شده است.

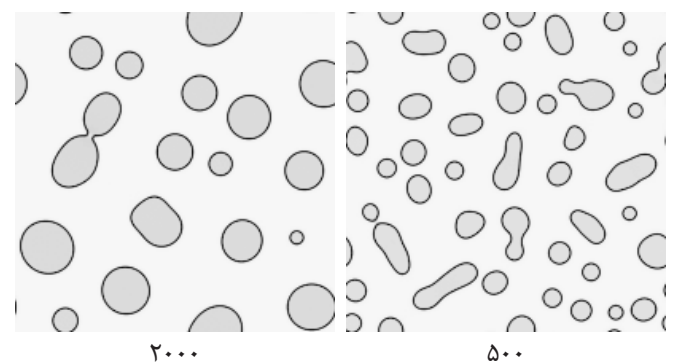
پیش از شبیه‌سازی اختلاط دو حباب در دما (نسبت چگالی) های مختلف، نتایج حاصل در دمای بدون بعد 0.7 با موارد آزمایشگاهی وردیر [۲۱] در شکل ۴ مقایسه شده است. مقدار نهایی شعاع حباب مورد نظر از رابطه $R_e^3 = (R_1^3 + R_2^3)$ محاسبه می‌گردد که R_e شعاع حباب نهایی و R_1, R_2 شعاع



حباب کاربرد دارد [۱۰]. در صورتی که از نیروی جاذبه بین ذرات سیال استفاده گردد در حالت تعادل نهایی یک قطره و یا حباب به وجود می‌آید. بنابراین یک توزیع تصادفی برای چگالی به‌عنوان مقادیر اولیه لحاظ می‌شود. در یک شبکه 300×300 شرایط مرزی در تمام جهات پریودیک بوده و هیچ‌گونه نیرو و یا سرعت خارجی به سیال اعمال نمی‌شود. مقادیر پارامتر $g = -0.28$ در نظر گرفته شده است. اگرچه مقدار این پارامتر بر روی نتایج تأثیری ندارد ولی باید مقدار منفی داشته باشد تا مقدار عبارت زیر رادیکال در رابطه (۸) مثبت گردد. همچنین مقدار آن نباید بسیار کوچک باشد تا بتواند از اختلاط فازها جلوگیری نماید. جهت بررسی اثرات چگالی، به علت وجود رابطه بین دما و چگالی دو فاز، دماهای بدون بعد 0.7 و 0.5 منظور شده‌اند که به ترتیب دارای نسبت چگالی مایع و بخار ۱۱۰ و ۸۳۰۰ می‌باشند تا بتوان تفاوت احتمالی بین نتایج را مشاهده نمود. به‌عبارت‌دیگر با کاهش دمای آب، نسبت چگالی دو فاز همان‌طور که از جداول ترمودینامیکی آب نیز قابل‌محاسبه است افزایش می‌یابد. شکل‌های ۲ و ۳ نحوه فرآیند جدایی فازها را در دو نسبت چگالی نشان می‌دهند. در لحظه اولیه به دلیل مقادیر اولیه تصادفی هر نقطه چگالی متفاوتی دارد که این مقادیر لزوماً با مقدار چگالی که نهایت به دست می‌آید برابر نیست. این فرآیند با گذشت زمان قطره‌های کوچک به هم متصل می‌شوند و قطره‌های بزرگتری را شکل می‌دهند. همچنین مقادیر چگالی دو سیال نیز به مقادیر مشخصی که همان چگالی‌های قابل‌محاسبه از طریق معادله حالت در دمای مورد نظر است همگرا می‌شوند. همان‌طور که مشخص است با افزایش نسبت چگالی تعادل نهایی که همان تشکیل یک قطره می‌باشد با سرعت کم‌تری انجام می‌گیرد. لذا سرعت همگرایی با افزایش نسبت چگالی کاهش می‌یابد. علاوه بر این از لحاظ فیزیکی قطره (حباب) تمایل دارد در حالت تعادلی خود کمترین سطح مشترک با فاز دیگر را داشته باشد، این امر هنگامی که سطح مشترک دایره‌ای شکل باشد حاصل می‌گردد. مطابقت نتایج حاصل با سایر مراجع [۴] نشان‌دهنده قابلیت این مدل در پیش‌بینی مناسب سطح مشترک در نسبت چگالی‌های مختلف است.

۳-۳- آمیختگی دو حباب

فرآیند آمیختگی دو قطره (حباب) یا ذرات به یکدیگر در طول تماس در علوم هواشناسی، پلیمر و فیزیک نجومی کاربرد دارد [۲۰]. به‌طورمثال شکل‌گیری یک قطره بزرگتر که از ترکیب دو قطره کوچک‌تر در یک ابر



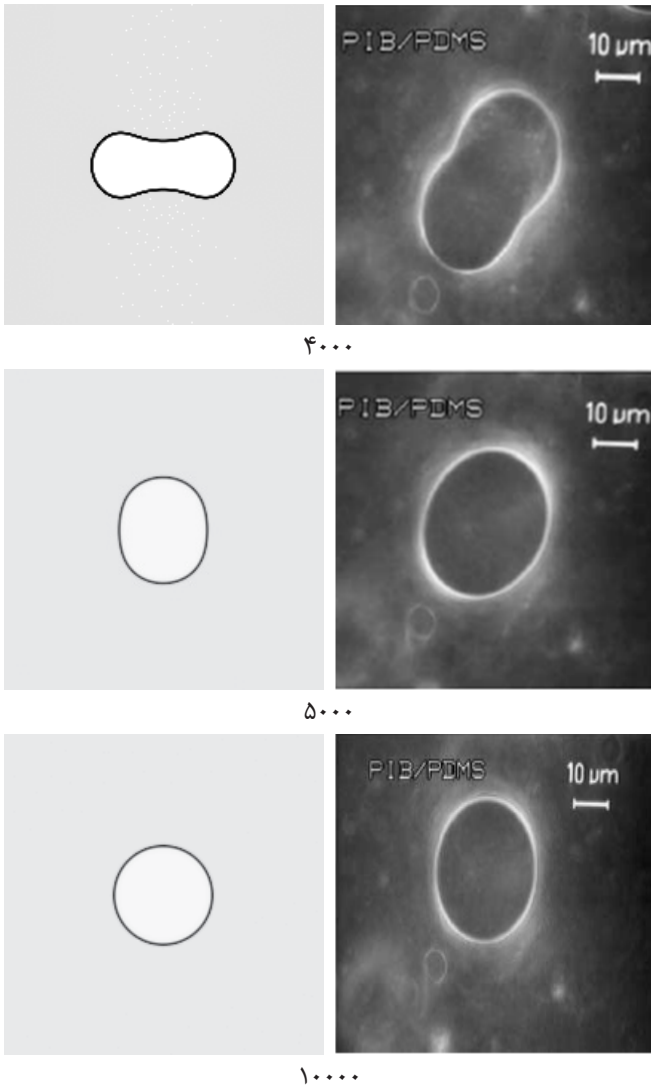


Fig. 4. Comparison of experimental results [19] and present simulation result at density ratio 110

شکل ۴: مقایسه نتایج تجربی [۲۱] و شبیه‌سازی حاصل در نسبت چگالی ۱۱۰

در نهایت به شکل تعادلی خود با کمترین سطح مشترک تبدیل می‌گردند. با مقایسه نتایج حاصل قابل مشاهده است که در نسبت چگالی ۱۱۰ دو حباب با نوسان اندکی بین شکل دایره و بیضی در هر ادغام شده و به حالت تعادل می‌رسد (شکل‌های ۵ و ۶). این در حالی است که در نسبت چگالی ۱۰۰۰ دو حباب برای ادغام شدن در یکدیگر و رسیدن به حالت تعادل بین شکل بیضی و دایره نوسان بیشتری دارد. این نوسانات سطح مشترک و تغییر شکل به بیضی افقی و عمودی با افزایش نسبت چگالی به تعداد بیشتری اتفاق می‌افتد. نوسانات سطح مشترک در این مدل با افزایش نسبت چگالی بیشتر می‌شود که این نوسانات برای شبیه‌سازی حباب نسبت به قطره بسیار بیشتر از قطره است. بنابراین برای شبیه‌سازی حباب‌ها این نوسانات سطح حائز اهمیت می‌باشد. نتیجه دیگری که می‌توان گرفت این است که با افزایش نسبت چگالی سرعت ادغام شدن حباب‌ها در یکدیگر کاهش و در نتیجه زمان رسیدن به حالت تعادل افزایش می‌یابد. زیرا همانطور که در

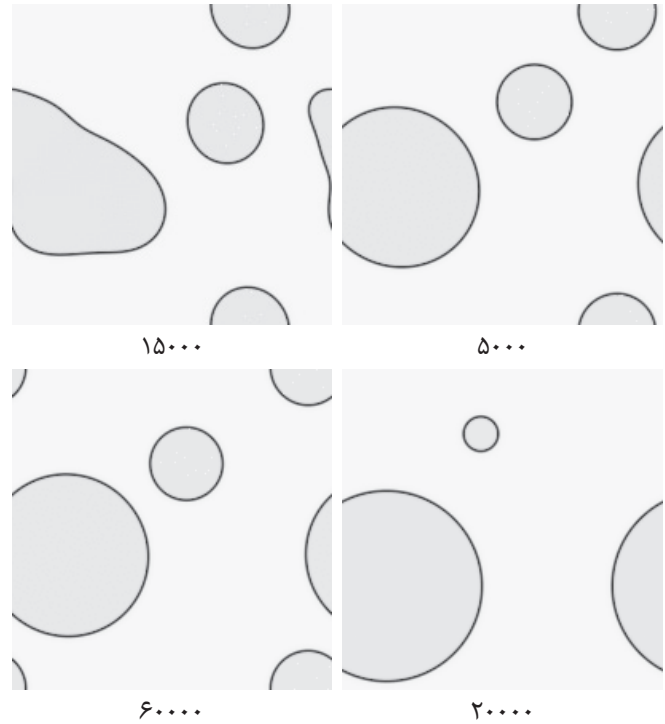


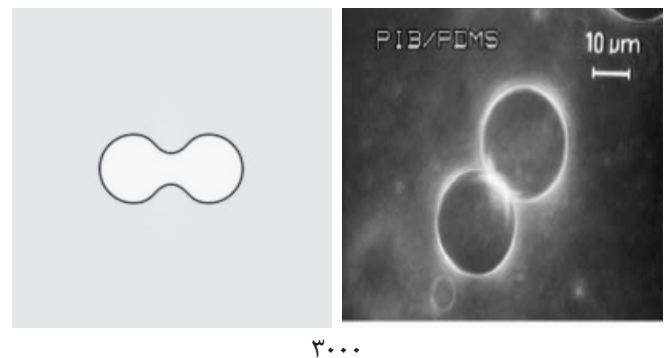
Fig. 3. Segregation of two phases in density ratio 110

شکل ۳: نتایج جدایی فاز در نسبت چگالی ۱۱۰

اولیه دو حباب می‌باشند. بنابراین مقدار شعاع نهایی حباب از شبیه‌سازی برابر ۴۷۱۰ است در حالیکه مقدار تئوری به دست آمده برابر ۴۵۱۰ است. علاوه بر بررسی‌های تجربی، شبیه‌سازی‌های بسیاری نیز برای بررسی مدل چندفازی مورد استفاده انجام گرفته است. به عنوان مثال ستاری و همکاران [۲۲] این فرایند را در دو نسبت چگالی ۵۰ و ۱۰۰۰ مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که سرعت حل با افزایش نسبت چگالی کاهش می‌یابد.

حال با توجه به مطابقت قابل قبول نتایج با موارد تجربی، شبیه‌سازی‌ها برای دماهای متفاوتی انجام گرفته است. شکل‌های ۵ و ۶ فرایند بهم آمیختگی دو حباب را به ترتیب در نسبت چگالی ۱۱۰ و ۱۰۰۰ در یک ناحیه حل مربعی ۳۰۰×۳۰۰ نشان می‌دهد.

از نقطه نظر فیزیکی هنگامی که دو حباب به هم نزدیک می‌شوند به وسیله نیروی واندروالس به طرف هم کشیده می‌شوند. سپس به علت نیروی کشش سطحی مرز اختلاط دو حباب با یکدیگر به سرعت بیشتر می‌شود و



۳۰۰۰

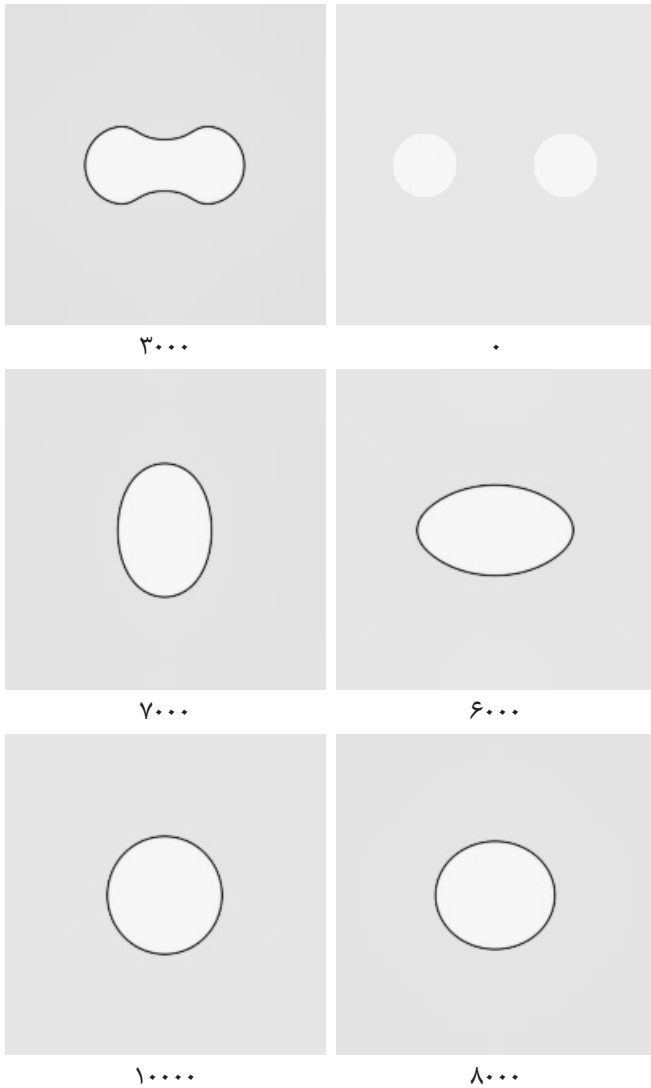


Fig. 6. Bubble formation at density ratio 1000

شکل ۶: نتایج تشکیل حباب در نسبت چگالی ۱۰۰۰

با توجه به جدول ۲ با افزایش نسبت چگالی حداقل فاصله مورد نیاز برای جلوگیری از اختلاط دو حباب افزایش می‌یابد. از لحاظ فیزیکی پدیده اختلاط انرژی‌های سطحی مطرح می‌گردد ولی دلیل آن را می‌توان در روش‌های عددی شبکه بولتزمن به سه عامل منوط دانست. دلیل اولیه آن نوسانات سطح مشترک دو حباب است که در تمام مدل‌های چندفازی شبکه بولتزمن وجود دارد. این نوسانات که در گام‌های اولیه به دلیل تغییر اندک در چگالی سیال مشاهده می‌شود کمتر از ۵ lu است. به دلیل وابستگی فشار به چگالی سیال با تغییر اندک چگالی هر فاز فشار نیز تغییر می‌کند و حباب برای حفظ بالانس نیرویی باید این نیرو را به کمک تغییر اندک شعاع (بر اساس قانون لاپلاس) تامین نماید. این نوسانات در دمای بالا (نسبت چگالی پایین) بسیار اندک است ولی با افزایش نسبت چگالی این نوسانات افزایش می‌یابد. عامل دوم وجود جریان پارازیتی اطراف سطح مشترک است که در بین دو حباب این میدان‌ها همدیگر را تقویت کرده و ناحیه کم فشاری به وجود می‌آورد که با افزایش نسبت چگالی

گام زمانی ۸۰۰۰ مشخص است، شکل سطح مشترک تغییرات قابل توجهی پیدا نمی‌کند ولی در همین گام زمانی در نسبت چگالی ۱۰۰۰ حباب مجدداً به صورت افقی تبدیل می‌شود. برای دو حباب ساکن بدون هیچ برخورد نتیجه پیش رو به دست آمد، متغیرهای اساسی در تعیین اینکه حباب‌ها در هم ادغام می‌شوند یا خیر؛ فاصله بین دو حباب، عرض سطح مشترک و نسبت چگالی است که در جدول ۲ کمینه فاصله مورد نیاز برای جلوگیری از اختلاط دو حباب نشان داده شده است.

جدول ۲: تأثیر نسبت چگالی بر روی حداقل فاصله بین دو حباب جهت عدم اختلاط

Table 2. The influence of density ratio on the minimum gap between two bubbles without coalescence

شماره	نسبت چگالی	d_{min} (lu)
۱	۱۱۰	۳۷
۲	۱۰۰۰	۹۷
۳	۸۳۰۰	۱۲۷

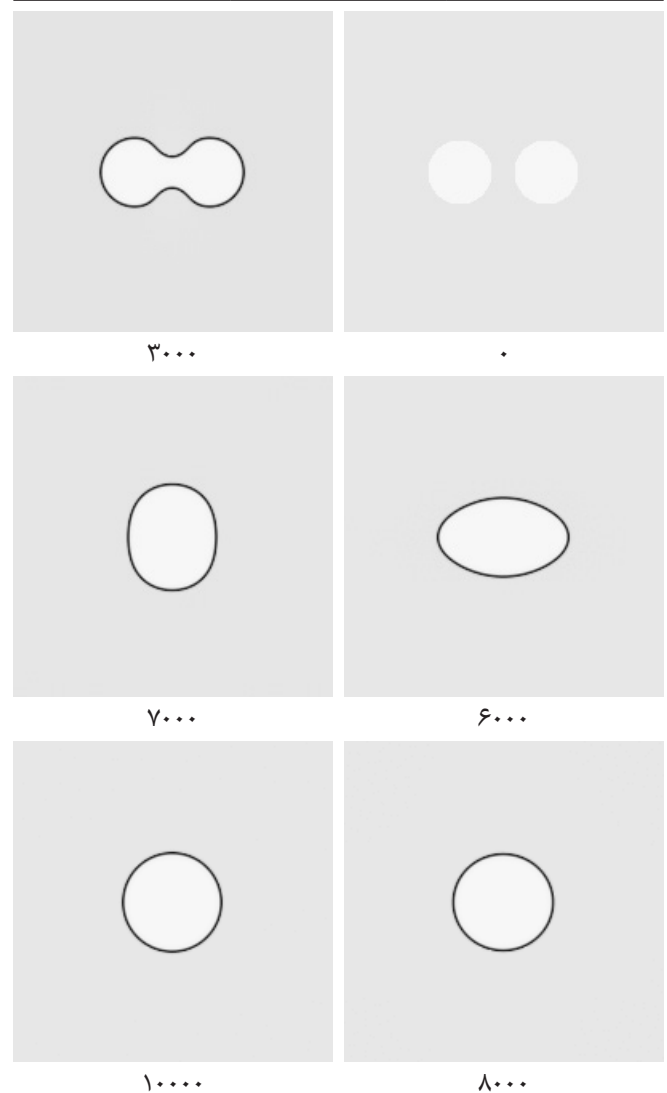


Fig. 5. Bubble formation at density ratio 110

شکل ۵: نتایج تشکیل حباب در نسبت چگالی ۱۱۰

۰/۰۵ و ۰/۲۳ لحاظ شده‌اند. همچنین زمان بی‌بعد $t^* = t \times U/D_0$ محاسبه می‌گردد که U سرعت برخورد قطره با سطح است. ابتدا برای دمای مشخصی نتایج حاصل با نتایج بدست‌آمده از سایر محققان اعتبارسنجی می‌گردد. شکل ۷ نتایج مربوط به شبیه‌سازی کوان و همکاران [۲۶] و نتایج شبیه‌سازی به دست‌آمده از برنامه عددی موجود در اعداد رینولدز ۳۰ و ۹۰ را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج حاصل می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته نتایج مشابهی را نشان می‌دهند. برای مقایسه نحوه و میزان پخش قطره، نمودار فاکتور پخش برای دو نسبت چگالی ۴۲۰ و ۸۰۰ در شکل ۸ رسم شده‌اند. عدد رینولدز برای هر دو ۶۹ و عدد وبر به ترتیب ۵۰۵ و ۴۰۹ محاسبه شده‌است. با توجه به نتایج به دست‌آمده به علت کشش سطحی بیشتر (عدد وبر کمتر) در نسبت چگالی ۸۰۰ بیشینه مقدار فاکتور پخش و مقدار نهایی آن کمتر از فاکتور پخش نسبت چگالی ۴۲۰ است.

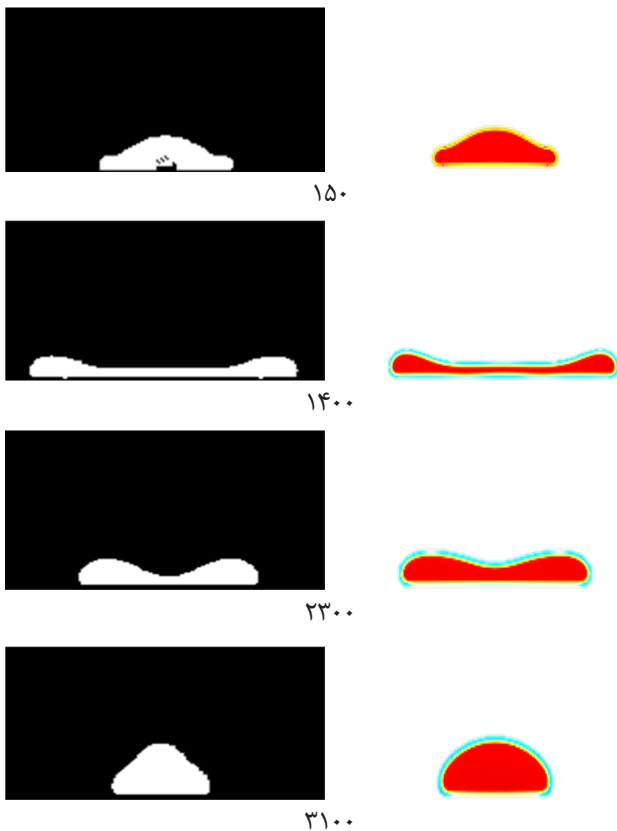


Fig. 7. Comparison of present results and the reference [24] at $We=90$ and $Re=30$

شکل ۷: مقایسه نتایج کار حاضر (راست) و مرجع [۲۶] (چپ) در $Re = 30$ و $We = 90$

همچنین در نسبت چگالی بالاتر، قطره پس از رسیدن به حداقل قطر خود، مجدداً مقدار اندکی بر روی سطح پخش می‌شود (حالت نوسانی) و در نهایت در یک حالت تعادلی قرار می‌گیرد در حالی که برای نسبت چگالی پایین این نوسان‌ها بسیار کمتر است. حرکت نوسانی قطره به علت بالانس نیرویی بین نیروهای کشش سطحی و لزجت است. برای همین منظور نیز

مقدار جریان پارازیتی بیشتر می‌شود و فاصله بیشتری برای جلوگیری از بهم‌آمیختگی دو حباب مورد نیاز است. علاوه بر موارد ذکر شده، پدیده رشد حباب در جریان‌های چندفازی توسط چندین محقق بررسی شده است. سانگ و همکاران [۲۳] در تحقیق خود با ارائه روشی بر پایه مدل شبه‌پتانسیل و تعریف ضریب k سعی نمودند میزان کشش سطحی را در این مدل تنظیم نمایند و اثرات این ضریب را بر روی رشد حباب بدون لحاظ نمودن جزئیات بررسی کردند. چن و همکاران [۲۴] نیز به کمک روش اختلاف دقیق میزان رشد حباب را در شرایط مختلف با معادله رایلی پلاست مقایسه نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که این روش دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج تئوری معادله رایلی پلاست دارد. این تغییر قطر در نسبت چگالی‌های بالا به‌طور قابل‌توجهی روی می‌دهد. این رشد نیز همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است باعث نزدیک شدن فصل مشترک سطوح نسبت به حالت اولیه می‌باشد.

۳-۴- برخورد قطره با سطح جامد

در این بخش فرایند برخورد قطره با سطح جامد با سرعت اولیه مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد که در چاپگرها، محافظه احتراق و خنک‌کاری سطوح داغ به‌وسیله پاشش کاربرد فراوانی دارد [۱۲]. پارامترهایی از قبیل قطر قطره، سرعت مؤثر (سرعت قطره هنگام برخورد با سطح جامد)، نوع سیال، زبری سطح، کشش سطحی، زاویه تماس و فشار سیال دوم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در حالت کلی سه پدیده پس از برخورد با سطح برای قطره اتفاق می‌افتد که جهش، ریزش و پخش نامیده می‌شوند [۲۵]. در این مقاله فرایند پخش قطره در نسبت چگالی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. از نقطه نظر فیزیکی قطره به علت وجود نیروی اینرسی بر روی سطح پخش می‌شود در حالی که نیروهای لزجت و کپیلاری در جهت مخالف این حرکت بر قطره اعمال می‌شوند. این برهم‌کنش نیروها تا جایی ادامه پیدا می‌کند که پخش قطره بر روی سطح متوقف می‌شود و پس از آن نیروی کپیلاری غالب می‌گردد و این نیرو باعث جمع شدن قطره می‌گردد. پس از آن نیز تعادل نیرویی بین نیروهای کشش سطحی و لزجت باعث تغییر شکل قطره می‌گردد. در نتیجه اثرات این سه نیرو به‌وسیله اعداد بدون بعد رینولدز و وبر مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

برای شبیه‌سازی یک قطره در شرایط اولیه در مرکز ناحیه 600×400 در نظر گرفته شده است که با سرعت اولیه 0.09 u.t.s^{-1} بر روی سطح صیقلی سقوط می‌کند. خواص سیال مورد نظر (آب) با تغییر نسبت چگالی (تغییر دما) تغییر می‌کند در نتیجه با ثابت در نظر گرفتن عدد رینولدز، عدد وبر مختلفی برای نسبت چگالی‌های مختلف به دست می‌آید. عدد رینولدز به صورت $Re = VD_0/\nu$ و عدد وبر نیز به صورت $We = \rho U^2 D_0 / \sigma$ تعریف می‌شوند. قطر قطره پیش از برخورد D_0 ، در هنگام پخش بر روی سطح D و نسبت این دو پارامتر $(D^* = D/D_0)$ فاکتور پخش نامیده می‌شود. زاویه تماس سطح برای تمام موارد ۱۵۳ درجه لحاظ شده و برای این منظور مقدار g_w و ρ_w به ترتیب

است؛ به طور مثال برخورد قطره باران با سطح آب و یا برخورد قطرات سوخت با فیلم سوخت موجود در محفظه احتراق نمونه‌ای از کاربردهای آن است. پارامترهای کلیدی در بررسی این پدیده عدد رینولدز و وبر هستند که نحوه تشکیل و تغییر شکل لایه تاج شکل به مقدار زیادی به آنها وابسته است [۲۷].

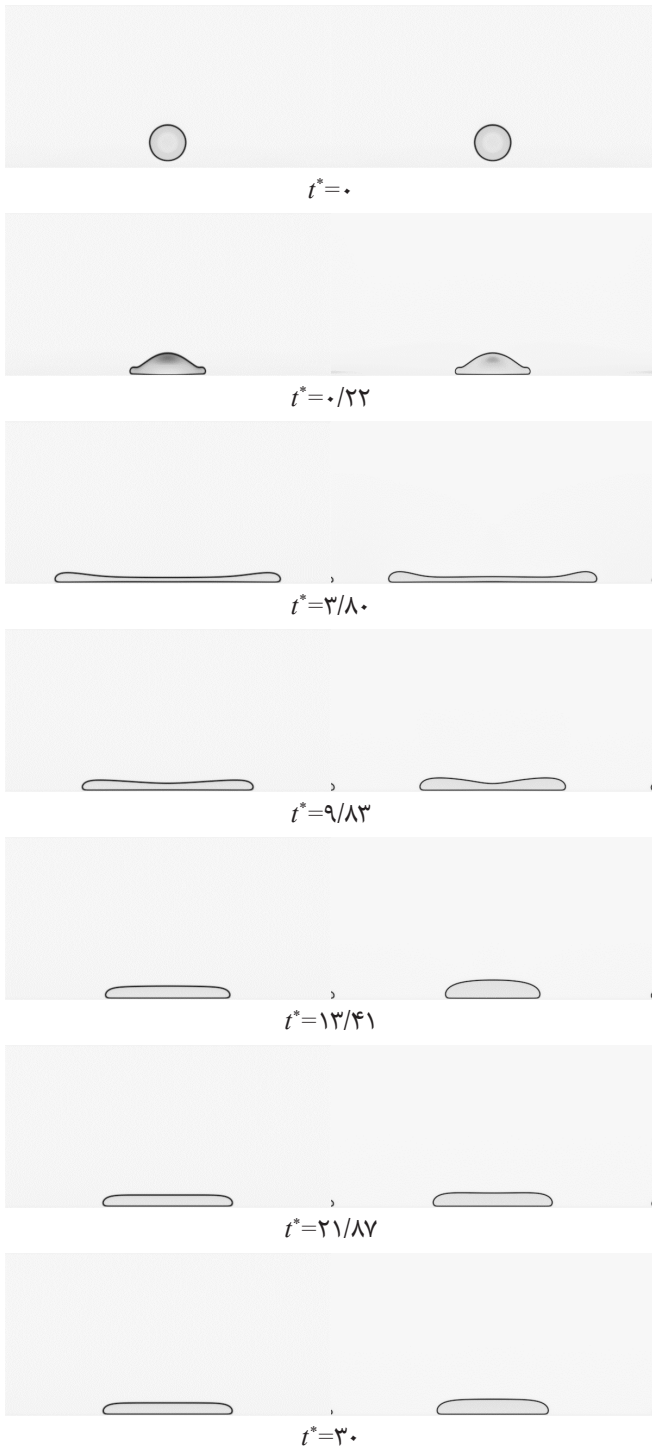


Fig. 9. Droplet deformation after an impact with solid surface at two different density ratios 420 (left) and 800 (right)

شکل ۹: تغییر شکل قطره پس از برخورد با سطح جامد در $Re=69$ و نسبت چگالی‌های مختلف ۴۲۰ (چپ) و ۸۰۰ (راست)

عدد رینولدز در هر دو حالت یکسان در نظر گرفته شده است تا فقط اثر تغییر کشش سطحی که باعث تغییر در عدد وبر می‌گردد مشاهده شود.

شکل ۹، نتایج تغییر شکل قطره را در طی زمان‌های مختلف برای دو نسبت چگالی ۴۲۰ و ۸۰۰ نشان می‌دهند. علاوه بر موارد ذکر شده، ارزیابی نحوه تغییر شکل قطره به کمک این شکل آسان‌تر می‌باشد. در زمان بدون بعد ۰/۲۲ به علت اعداد رینولدز یکسان شکل قطره پس از زمان کوتاهی از برخورد با سطح در دو نسبت چگالی یکسان است. با پخش قطره بر روی سطح اختلاف‌های بیشتری در شکل قطره مشاهده می‌شود. به عنوان نمونه برای نسبت چگالی پایین در بیشتر زمانها ضخامت قطره پخش شده کمتر از موارد مشابه در نسبت چگالی بالاتر می‌باشد.

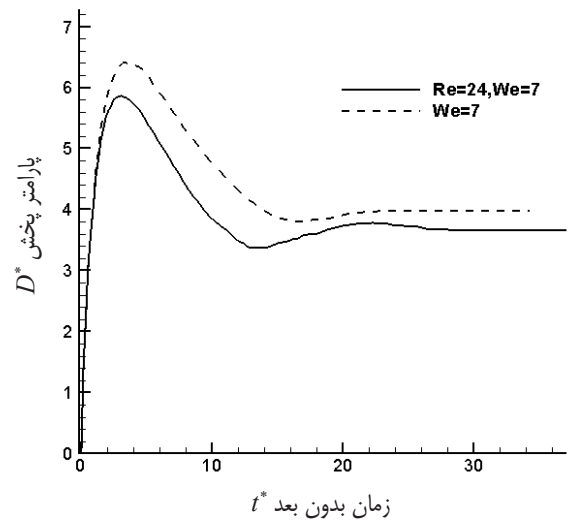


Fig. 8. Variation of spread factor with time at two density ratios ($We=409$) 800 and ($We=505$) 420

شکل ۸: تغییرات زمانی پارامتر پخش در دو نسبت چگالی ۴۲۰ ($We=505$) و ۸۰۰ ($We=409$)

علاوه، همانطور که در شکل ۸ نیز قابل مشاهده است، شعاع قطره در نسبت چگالی بالاتر نوسانات بیشتری نشان می‌دهد. این در حالی است که در نسبت چگالی پایین تغییرات شکل قطره پس از زمان بدون بعد ۱۶ بسیار کم است.

در نتیجه علاوه بر زاویه سطح تماس، تغییرات نسبت چگالی که منجر به اعداد وبر مختلف می‌شود نیز باعث تغییرات نوسانی شکل قطره می‌گردد. البته لازم به ذکر است که با کاهش نسبت چگالی همواره تغییر شکل به صورت پیوسته انجام نمی‌شود و در دماهای بالا (نسبت چگالی پایین) امکان شکاف قطره پس از برخورد با سطح جامد و تبدیل به چند قطره کوچکتر افزایش می‌یابد. همانطور که گوپتا و کومار [۱۰] اشاره کردند، با افزایش نسبت چگالی احتمال این پدیده کاهش می‌یابد.

۳-۵- برخورد قطره با فیلم مایع

فرایند برخورد قطره با فیلمی از مایع یک پدیده مهم در طبیعت و صنعت

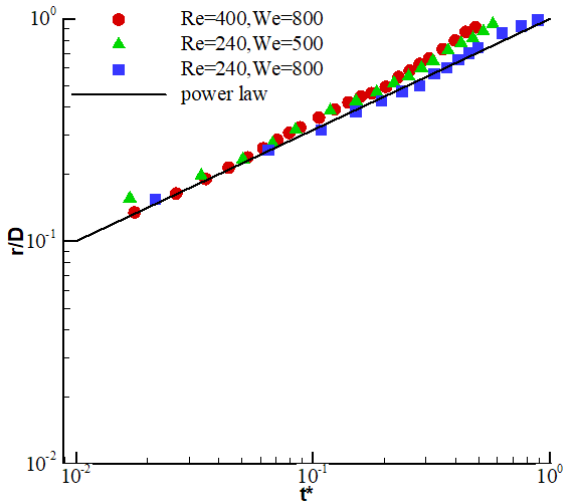


Fig. 11. Variation of dimensionless radius of crown at slight dimensionless time and comparison with power law

شکل ۱۱: تغییرات شعاع بدون بعد قسمت تاج شکل در زمان بدون بعد کوچک و مقایسه با قانون توانی

همان طور که مشخص است اعداد رینولدز و وبر تنها در زمانهای بدون بعد نزدیک ۱ باعث انحراف نتایج از یکدیگر می شود و در زمانهای اولیه تغییرات برای اعداد رینولدز و وبر مختلف بسیار به هم نزدیک است. البته تأثیر بسیار کم عدد رینولدز در تغییرات شعاع در زمانهای کوچک پیش از این نیز توسط لی و لین [۳۱] به کمک شبیه سازی نشان داده شده است. علاوه بر موارد ذکر شده نحوه تغییرات قسمت تاج شکل نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. شکل ۱۲ ایجاد لایه مایع و جدا شدن از سطح فیلم مایع را برای موارد دوم و سوم نشان می دهد. پس از برخورد قطره (شکل ۱۲(ب)) لایه سیال جدا شده از سطح با گذشت زمان بالاتر می رود (شکل ۱۲(ج)) و در این بازه زمانی سر قسمت تاجی شکل ضخیم تر از سایر نواحی آن می شود (شکل ۱۲(د)). در هر دو مورد ضخامت قسمت بالایی تاج (گردن تاج) به تدریج نازک می شود با گذشت زمان که قطر سر تاج افزایش می یابد ضخامت گردن تاج بسیار کمتر از مورد دوم است (شکل های ۱۲(ه) و (و)). در حالی که در مورد دوم نیروی اینرسی موجود نمی تواند به کشش سطحی غلبه نماید و قسمت تاجی شکل بدون جدا شدن انرژی خود را از دست می دهد و ارتفاع آن نیز کاهش می یابد (شکل ۱۲(ز)). لذا با افزایش عدد وبر احتمال جدا شدن بخشی از لایه مایع افزایش می یابد.

با ترسیم تغییرات شعاع بر حسب زمان می توان سرعت افقی لایه سیال را نیز در اعداد رینولدز و وبر مختلف مقایسه نمود. شکل ۱۳ نتایج حاصل از شبیه سازی را برای شرایط مختلف نشان می دهد. با مقایسه اعداد بدون بعد مختلف می توان نتیجه گرفت که افزایش عدد رینولدز و کاهش عدد وبر باعث افزایش شعاع تاج می گردد. از آنجا که دو عدد به طور همزمان بر روی این پارامتر تأثیر دارند لازم است عدد بدون بعد دیگری استفاده شود تا بیان کلی تری از تأثیر این پارامترها ارائه دهد. بر اساس تعریف عدد انسرچ که به صورت $oh = \sqrt{We}/Re$ است مقدار انسرچ به ترتیب ۰/۰۷۱ و ۰/۰۹۳ و ۰/۱۱۸

مشابه مسئله قبل، پس از برخورد قطره با لایه مایع نیز امکان مشاهده حالت های مختلفی وجود دارد. که زو و همکاران [۲۸] یکی از جدیدترین بررسی های تجربی در این زمینه را انجام داده اند. در این قسمت تمرکز بررسی ها بر روی قسمت تاجی شکل لایه سیال است که معمولاً در محدوده بهم آمیختگی و پاشش قابل مشاهده است [۲۵ و ۲۸] و در بیشتر پژوهش ها مورد توجه قرار گرفته است.

به طور کلی بررسی های انجام گرفته را می توان بر اساس ضخامت فیلم مایع به دو دسته فیلم نازک مایع و فیلم ضخیم تقسیم بندی نمود. به عنوان مثال شکل ۱۰ نتایج آزمایشگاهی ژانگ و همکاران [۲۹] را در بررسی اثر فیلم نازک سیال نشان می دهد. جهت بررسی ضخامت نازک معمولاً از ضخامت فیلم ۰/۲ قطر قطره استفاده می شود. البته مقدار این ضخامت نیز در شکل قسمت تاجی شکل اهمیت فراوانی دارد. علاوه بر این پارامترهای مختلف نیز به کمک قطر قطره و سرعت موثر قطره درست قبل از برخورد با سطح سنجیده می شود. همچنین بر اساس آنالیز ابعادی جزرلاند و زالسکی [۳۰] از اثرات گرانش می توان صرف نظر نمود.

قطر قطره پیش از برخورد D ، شعاع قسمت تاج شکل r^* ، همچنین زمان بی بعد به صورت $t^* = t \times U/D_0$ محاسبه می گردد که U سرعت برخورد قطره با سطح مایع است.

برای شبیه سازی برخورد قطره با سطح مایع ناحیه حل 2100×600 در نظر گرفته شده که در کف آن فیلم مایع با ارتفاع ۰/۲ قطر قطره قرار دارد و قطره مایع از ارتفاع مشخصی در درون آن سقوط می کند. برای مقایسه اثر اعداد بدون بعد، شبیه سازی در نسبت چگالی ۱۰۰۰ انجام گرفته است. سه مسئله با اعداد رینولدز و وبر $Re=400$ و $We=800$ و $Re=240$ و $We=500$ و $Re=240$ و $We=800$ مورد شبیه سازی قرار گرفته است.

یکی از مهمترین پارامترها تغییرات شعاع تاج در لحظات اولیه پس از برخورد است. همانطور که جوزراند و زالسکی [۳۰] در تحقیقات خود نشان دادند، تغییرات این پارامتر بر حسب شعاع با معادله $r/D = \sqrt{DUt}$ ارتباط دارد که به آن قانون توانی می گویند. در صورتی که این منحنی در مقیاس لگاریتمی ترسیم گردد خطی با شیب ثابت حاصل می شود که بر اساس بررسی های صورت گرفته از لحظه شروع تا زمان بدون بعد ۱، تغییرات شعاع با این خط متناسب است. شکل ۱۱ نتایج مربوط به تغییرات شعاع در اعداد رینولدز و وبر مختلف را در زمان های کمتر از ۱ نشان می دهد.



Fig. 10. Crown formation after droplet impact with liquid film

شکل ۱۰: تشکیل قسمت تاج شکل پس از برخورد قطره با فیلم مایع [۲۹]

با مقایسه شکل تاج وجود آمده در زمان بدون بعد کمتر از یک، می‌توان نتیجه گرفت که از لحاظ زمانی نیز فرایند با کاهش عدد وبر سریع‌تر رخ می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در کار حاضر، پس از معرفی مدل توسعه‌یافته شبه‌پتانسیل شان-چن به شبیه‌سازی جریان سیال چندفازی با نسبت چگالی بالا پرداخته شده است. این مدل در شبیه‌سازی قطره ساکن (قانون لاپلاس)، جدایی خودکار فازها، آمیختگی دو حباب، برخورد قطره به سطح جامد و سقوط قطره بر روی غشاء مایع (پاشش) به کار بسته شده و توانایی مدل در این شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر تغییرات دما که باعث تغییرات چگالی دو فاز می‌گردد نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. به طور کلی افزایش نسبت چگالی (بالاتر از ۸۰۰) باعث افزایش زمان حل و ناپایداری مدل می‌گردد. همانطور که در شبیه‌سازی به هم آمیختگی دو حباب بررسی شد، یکی از معایب اصلی این مدل وجود جریان پارازیتی اطراف سطح مشترک است که می‌تواند در سرعت قطرات و حباب‌ها در هنگام برخورد تأثیر داشته باشد. همچنین نوسانات سطح مشترک حباب در نسبت چگالی در مرتبه ۱۰۰۰ بیشتر از نسبت چگالی‌های کمتر از ۱۰۰ می‌باشد. در فرایند برخورد قطره با سطح جامد با افزایش دما و کاهش کشش سطحی تغییرات شکل قطره با نوسان کمتری همراه است. همچنین مقدار بیشینه و نهایی فاکتور پخش بر روی سطح نیز تغییر می‌کند. ضعف این مدل در شبیه‌سازی سطوح با تشروندگی بالا (زاویه تماس کمتر از ۳۰ درجه) است که مستلزم بررسی‌های بیشتر می‌باشد. شبیه‌سازی پاشش قطره بر روی غشاء نازک مایع نیز نشان می‌دهد که عدد وبر تأثیر بسیاری بر نحوه تشکیل قسمت تاج شکل و جدایی بخشی از آن ایفا می‌کند به طور کلی نتایج حاصل نشان می‌دهد که دقت مدل شان-چن در شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی حتی در نسبت‌های چگالی بالا (بیشتر از ۱۰۰۰) در سطح قابل قبولی قرار دارد. علاوه بر این، رفتار سطح مشترک دو فاز در اکثر شبیه‌سازی‌ها تطابق بسیار خوبی با مدل‌های عددی چندفازی و نتایج تجربی دیگر دارد. بنابراین از این مدل جدید می‌توان برای شبیه‌سازی گسترده وسیعی از مسائل استفاده نمود.

در بررسی‌های آینده لازم است پارامترهای مختلفی از جمله شتاب گرانش، زاویه سطح تماس، نسبت چگالی و ضخامت فیلم مایع به صورت مشخص به کمک روش نیرویی اختلاف دقیق مورد مطالعه قرار گیرند.

منابع

- [1] G.R. McNamara, G. Zanetti, Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata, *Physical review letters*, 61(20) (1988) 2332.
- [2] A.K. Gunstensen, D.H. Rothman, S.e. Zaleski, G. Zanetti, Lattice Boltzmann model of immiscible fluids, *Phys. Rev. A*, 43 (1991) 4320-4327.

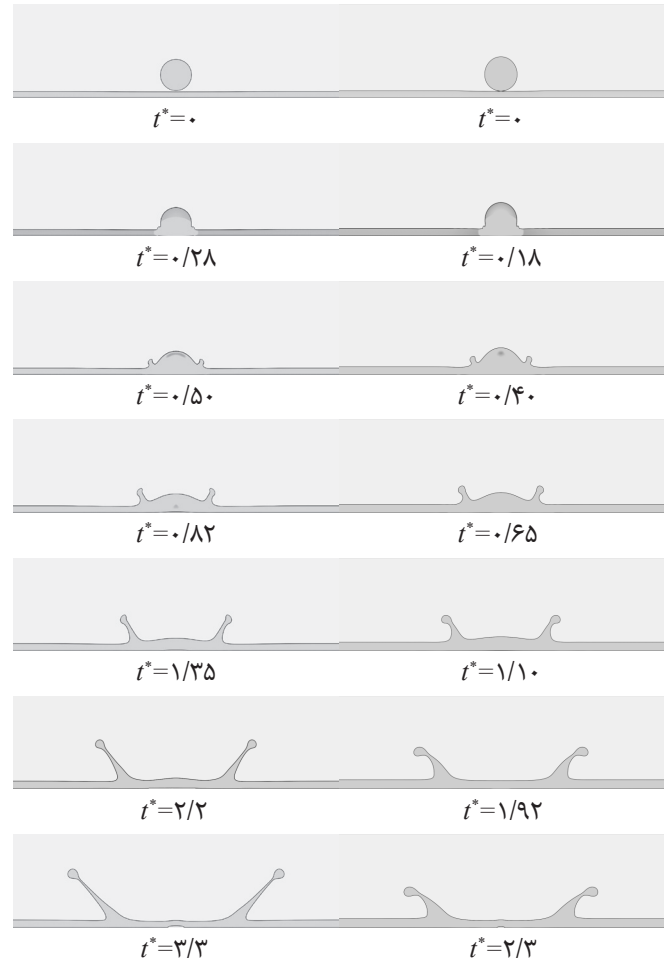


Fig. 12. Variation of dimensionless radius of crown at slight dimensionless time and at different Reynolds and Weber numbers

شکل ۱۲: برخورد با غشاء نازک مایع در عدد رینولدز $We=800$ و $We=240$ (چپ) و $We=500$ (راست)

است. در نتیجه، شعاع تاج با افزایش عدد انسرژ کاهش می‌یابد.

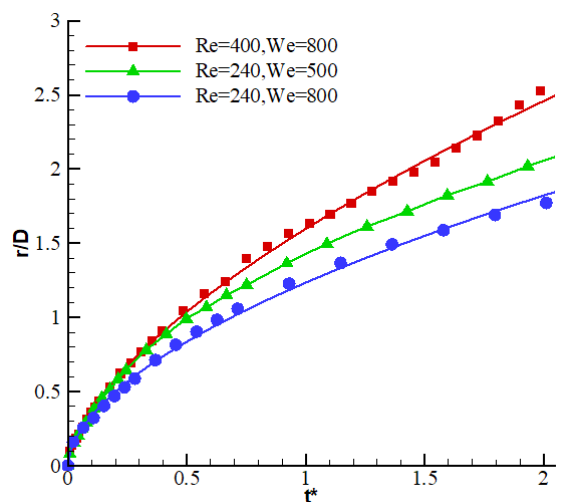


Fig. 13. Droplet impact on thin liquid film at the same Reynolds number 240 and $We=800$ (left) and $We=500$ (right)

شکل ۱۳: تغییرات شعاع بدون بعد قسمت تاج شکل در زمان بدون بعد در اعداد رینولدز و وبر مختلف

- dynamics and beyond*, Oxford university press, 2001.
- [16] M. Sbragaglia, R. Benzi, L. Biferale, S. Succi, K. Sugiyama, F. Toschi, Generalized lattice Boltzmann method with multirange pseudopotential, *Physical Review E*, 75(2) (2007) 026702.
- [17] R. Benzi, L. Biferale, M. Sbragaglia, S. Succi, F. Toschi, Mesoscopic modeling of a two-phase flow in the presence of boundaries: The contact angle, *PHYSICAL REVIEW E*, 74 (2006) 021509.
- [18] P. Yue, J.J. Feng, C. Liu, J. Shen, Diffuse-interface simulations of drop coalescence and retraction in viscoelastic fluids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 129(3) (2005) 163 - 176.
- [19] C. Verdier, The influence of the viscosity ratio on polymer droplet collision in quiescent blends, *Polymer*, 42(16) (2001) 6999 - 7007.
- [20] E. Sattari, M. Aghajani Delavar, K. Sedighi, others, Investigation of two bubble coalescence with large density differences with Lattice Boltzmann Method, *Modares Mechanical Engineering*, 14(10) (2015).
- [21] S. Bao-Wei, R. Feng, H. Hai-Bao, H. Qiao-Gao, Lattice Boltzmann simulation of liquid--vapor system by incorporating a surface tension term, *Chinese Physics B*, 24(1) (2015) 014703.
- [22] X.-P. Chen, C.-W. Zhong, X.-L. Yuan, Lattice Boltzmann simulation of cavitating bubble growth with large density ratio, *Computers & Mathematics with Applications*, 61(12) (2011) 3577 - 3584.
- [23] R. Rioboo, C. Tropea, M. Marengo, Outcomes from a drop impact on solid surfaces, *Atomization and Sprays*, 11(2) (2001).
- [24] S. Quan, W. Li, S. Shen, Y. Guo, Simulation of Droplet Impact onto Horizontal and Inclined Solid Surfaces with Lattice-Boltzmann Method, *Journal of Harbin Institute of Technology*, 6 (2013) 014.
- [25] R. Purvis, F.T. Smith, Droplet impact on water layers: post-impact analysis and computations, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, *Physical and Engineering Sciences*, 363(1830) (2005) 1209-1221.
- [26] J. Zou, Y. Ren, C. Ji, X. Ruan, X. Fu, Phenomena of a drop impact on a restricted liquid surface, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51 (2013) 332-341.
- [27] L.V. Zhang, P. Brunet, J. Eggers, R.D. Deegan, Wavelength selection in the crown splash, *Physics of Fluids*, 22(12) (2010) 122105.
- [3] D.H. Rothman, J.M. Keller, Immiscible cellular-automaton fluids, *Journal of Statistical Physics*, 52(3) (1988) 1119-1127.
- [4] X. Shan, H. Chen, Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components, *Physical Review E*, 47(3) (1993) 1815.
- [5] M.R. Swift, W.R. Osborn, J.M. Yeomans, Lattice Boltzmann Simulation of Nonideal Fluids, *Phys. Rev. Lett.*, 75 (1995) 830-833.
- [6] P. Yuan, L. Schaefer, Equations of state in a lattice Boltzmann model, *Physics of Fluids*, 18(4) (2006) 042101.
- [7] A.L. Kupershtokh, D.A. Medvedev, D.I. Karpov, On equations of state in a lattice Boltzmann method, *Computers & Mathematics with Applications*, 58(5) (2009) 965-974.
- [8] S. Gong, P. Cheng, Numerical investigation of droplet motion and coalescence by an improved lattice Boltzmann model for phase transitions and multiphase flows, *Computers and Fluids*, 53 (2012) 93-104.
- [9] L. Chen, Q. Kang, Y. Mu, Y.-L. He, W.-Q. Tao, A critical review of the pseudopotential multiphase lattice Boltzmann model: Methods and applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 76 (2014) 210-236.
- [10] A. Gupta, R. Kumar, Droplet impingement and breakup on a dry surface, *Computers & Fluids*, 39(9) (2010) 1696 - 1703.
- [11] D. Zhang, K. Papadikis, S. Gu, Application of a high density ratio lattice-Boltzmann model for the droplet impingement on flat and spherical surfaces, *International Journal of Thermal Sciences*, 84(Supplement C) (2014) 75 - 85.
- [12] D. Zhang, K. Papadikis, S. Gu, Three-dimensional multi-relaxation time lattice-Boltzmann model for the drop impact on a dry surface at large density ratio, *International Journal of Multiphase Flow*, 64(Supplement C) (2014) 11 - 18.
- [13] Q. Li, K.H. Luo, Thermodynamic consistency of the pseudopotential lattice Boltzmann model for simulating liquid-vapor flows, *Applied Thermal Engineering*, 72(1) (2014) 56 - 61.
- [14] P.L. Bhatnagar, E.P. Gross, M. Krook, A Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems, *Physical Review*, 94(1--12) (1954) 511-525.
- [15] S. Succi, *The lattice Boltzmann equation: for fluid*

[29] T. Lee, C.-L. Lin, A stable discretization of the lattice Boltzmann equation for simulation of incompressible two-phase flows at high density ratio, *Journal of Computational Physics*, 206(1) (2005) 16-47.

[28] C. Josserand, S.e. Zaleski, phane, Droplet splashing on a thin liquid film, *Physics of fluids*, 15(6) (2003) 1650-1657.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. M. Khatoonabadi and M. Ashrafizaadeh, Investigation of Density Ratio Effects on Performance of Pseudo-Potential Model in Multiphase Flows Simulation, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(3) (2017) 507-520.
DOI: 10.22060/mej.2016.785



