



شبیه‌سازی عددی برخورد دو قطره در داخل میدان دو فاز با استفاده از روش بولتزمن شبکه‌ای دوفازی

محمد علی بیجارچی^۱، محمد حسن رحیمیان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، کد پستی ۱۴۳۷۸۳۴۴۱۱، rahimyan@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۲ فروردین ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۱ خرداد ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

برخورد دو قطره

روش شبکه‌ای بولتزمن دو فاز

نسبت چگالی بالا

محیط دوفازی

در این تحقیق برخورد دو قطره، به صورت عددی با استفاده از روش شبکه‌ای بولتزمن در محیط دو فاز، بررسی شده است. شبیه‌سازی برای سیالات دوگانه تراکم‌ناپذیر بر اساس مدل ارائه شده توسط لی، انجام گرفته است. ویژگی بارز این مدل، شبیه‌سازی سیالات با نسبت چگالی بالا بوده و به راحتی با نتایج تجربی مقایسه شده و صحت آن بررسی شده است. با استفاده از این شبیه‌سازی، تغییرات اعداد بی بعد ویر، رینولدز، پارامتر برخورد، نسبت چگالی، نسبت لزجت سینماتیکی، نسبت قطر و نسبت سرعت برخورد دو قطره مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نحوه تغییرات دامنه نوسان، زمان رسیدن به تعادل، تعداد نوسان و نوع برخورد با افزایش اعداد بی بعد مؤثر در مساله بررسی شده است و نشان داده شده است که با افزایش عدد ویر، عدد رینولدز یا نسبت چگالی یا کاهش نسبت لزجت سینماتیکی دامنه نوسان و میزان تغییر شکل قطره حاصل بیشتر می‌شود.

Numerical simulation of droplet collision in the two phase flow using Lattice Boltzmann method

Mohamad Ali Bijarchi, Mohamad Hasan Rahimian*

School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 1437834411 Tehran, Iran. rahimyan@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 01 April 2013

Accepted 01 June 2013

Available Online 20 April 2014

Keywords:

Droplet Collision

Two Phase Lattice Boltzmann Method

High Density Ratio

Two Phase Flow

ABSTRACT

In this study, the collision of two drops using Lattice Boltzmann numerical method in two-phase flow has been investigated. The simulation for incompressible fluid is based on the model represented by Lee. The prominent feature of this model is to simulate fluids with high density ratios. Thus, the model has easily been compared with experimental results and its validity has been investigated. Using this simulation, the variation of non-dimensional parameters such as Weber number, Reynolds number, Impact parameter, density ratio, kinematic viscosity ratio, diameter ratio and velocity ratio of two drops were studied. Considering the results, it was shown that the density ratio and relative velocity ratio have no effect on separation or coalescence of drops collision; while the variation of Weber number, Impact Parameter and kinematic viscosity ratio results in separation or coalescence. Moreover, by increase in Weber number, Reynolds number or density ratio or decrease in kinematic viscosity, the number of oscillations and the time needed to reach equilibrium increases. Likewise, the amplitude of oscillation and the deformation of the drops increase when the Weber number, Reynolds number or density ratio rise or the kinematic viscosity lowers.

۱- مقدمه

و غیره، با موفقیت اعمال نمایند. استقبال صورت گرفته از این روش عمدتاً به علت ماهیت جنبشی^۳ این روش می‌باشد که به کارگیری آن را در مطالعه پدیده‌هایی که شامل برهمکنش در سطح مولکولی می‌باشند، ساده کرده است. در نتیجه، این روش در مقایسه با روش مبتنی بر معادلات ناویر-استوکس^۴ یا اوپلر، که با فرض محیط پیوسته به دست آمده‌اند، مفهوم فیزیکی

محققان در دو دهه اخیر توانسته‌اند روش بولتزمن شبکه‌ای^۱ را به عنوان شیوه‌ای برای شبیه‌سازی ریز مقیاسی^۲ و پلی مابین دینامیک مولکولی در سطح میکروسکوپی و روش‌های مرسوم عددی در سطح ماکروسکوپی، در زمینه‌های مختلف نظیر سیستم‌های چند فاز، دینامیک سیالات تراکم پذیر

3- Kinetic

4- Navier-Stokes Equations

1- Lattice Boltzmann Method

2- Mesoscopic

Please cite this article using:

M.A. Bijarchi, M.H. Rahimian, Numerical simulation of droplet collision in the two phase flow using Lattice Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol: 14, No. 2, pp. 85-96, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.sid.ir

می‌کند. پرمنا و آبراهام [۶] برخورد باینری قطرات با زمان رهاسازی متعدد^۳ را مدل‌سازی کردند. در این مطالعه تأثیر اعداد وبر، آنسرج، نسبت اندازه قطرات، چگالی محیط و لزجت آن بررسی شده است. اگرچه در شبیه‌سازی آن‌ها نسبت چگالی در بازه ۲ تا ۴ بود که از نسبت واقعی بسیار دور بود. از جدیدترین کارهای انجام شده می‌توان به برخورد سر به سر دو قطره در حالت تقارن توسط کای سون و همکارانش اشاره کرد [۷]. در این مقاله تأثیر تمامی اعداد بی بعد شامل عدد وبر در محدوده ۱۰ تا ۳۰، عدد رینولدز از ۵۰ تا ۱۵۰، پارامتر برخورد از ۰ تا ۰/۹، نسبت چگالی از ۱۰ تا ۶۶۶، نسبت لزجت سینماتیکی از ۱ تا ۱۵، نسبت قطر از ۱ تا ۱/۷۵ و نسبت سرعت برخورد از یک سوم تا یک پنجم در نظر گرفته شده است، درحالی‌که در کارهای اخیر همه اعداد بی بعد بررسی نشده است و تأثیر این اعداد بر روی همه پارامترهای فیزیکی دخیل در مسأله بررسی نشده است. به‌علاوه تأثیر برخورد غیر هم مرکز نیز بررسی شده است.

۲- روش عددی

جریان‌ها را می‌توان به ۴ دسته تک‌جزئی تک فاز، تک جزئی چند فاز (مثل آب و بخار آن)، چندجزئی تک فاز (مثل محلول آب و اتانول) و چند جزئی چند فاز (مثل آب و روغن) تقسیم کرد [۸]. در این مقاله به شبیه‌سازی برخورد دو قطره که جریانی دو جزئی و دو فاز است، پرداخته می‌شود. در این شبیه‌سازی از فرمول ارائه شده توسط لی^۴ [۹] که در شبیه‌سازی دو فاز با نسبت چگالی بالا توانمند است، استفاده شده است. لازم به ذکر است که مدل شان و چن^۵ [۸]، برای شبیه‌سازی سیالات تک جزئی چندفازی به‌کار می‌رود (همانند آب و بخار آب) در حالی که این مدل قادر به شبیه‌سازی سیالات دو جزئی دو فاز است به‌علاوه شان و چن از پتانسیل برهم کنش^۶ برای شبیه‌سازی نیروهای جاذب استفاده می‌کند، درحالی‌که در این مدل از گازهای غیر ایده‌آل استفاده شده است و نیازی به اضافه نمودن نیروهای جاذب به‌صورت روش شان و چن ندارد. در ضمن برخلاف روش شان و چن که محدود به نسبت چگالی پایین است، این مدل می‌تواند تا نسبت چگالی ۱۰۰۰ را هم شبیه‌سازی کند.

مدل لی بر توسعه روش هی^۷ و همکاران [۱۰] استوار است. در این روش روش جریان دو فازی توسط دو تابع توزیع احتمال مدل‌سازی شده است. یکی از این توابع میدان چگالی و دیگری میدان سرعت و فشار سیال را محاسبه می‌کند.

در این مدل برخلاف روش هی، در گسسته‌سازی معادله بولتزمن، فشار هیدرودینامیکی نیز علاوه بر فشار ترمودینامیکی در نظر گرفته می‌شود. پس از گسسته‌سازی و تغییر متغیر به منظور کاهش حجم محاسبات از \bar{h} برای توزیع چگالی و \bar{q} برای توزیع مومنتم و فشار از معادلات (۱ و ۲) استفاده می‌شود:

$$\bar{h}_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) - \bar{h}_\alpha(x, t) = -\frac{1}{\tau + 0.5} \times (\bar{h}_\alpha - \bar{h}_\alpha^{eq})(x, t) + \delta t(e_\alpha - u) \cdot \left\{ \nabla C - \frac{C}{\rho c_s^2} (\nabla p_1 + C \nabla \mu) \right\} \times \Gamma_\alpha(x, t) + \delta t \nabla \cdot (M \nabla \mu) \Gamma_\alpha(x, t) \quad (1)$$

$$\bar{q}_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) - \bar{q}_\alpha(x, t) = -\frac{1}{\tau + 0.5} \times (\bar{q}_\alpha - \bar{q}_\alpha^{eq})(x, t) + \delta t(e_\alpha - u) \cdot \left\{ \nabla \rho c_s^2 (\Gamma_\alpha - \Gamma_\alpha(0)) - (C \nabla \mu) \Gamma_\alpha \right\}(x, t) \quad (2)$$

بیشتری دارد. از طرف دیگر ماهیت خطی معادلات به دست آمده و نیز امکان به کارگیری پردازش موازی^۱ با بازه بالا در حل مسائل با این روش نیز به گسترش هر چه بیشتر روش بولتزمن شبکه‌ای بین محققان و دانشمندان کمک کرده است.

یکی از کاربردهای اساسی روش بولتزمن شبکه‌ای، بررسی سیستم‌های چند فازی از جمله قطره و حباب است که یکی از موضوعات مورد توجه فضاهای تحقیقاتی می‌باشد. به علاوه، این موضوع، نقش مهمی در فهم حرکت و تغییر شکل ذرات سیال و بسیاری از پدیده‌های طبیعی و عملیات صنعتی دارد. از کاربردهای اساسی این تحقیقات در زمینه انتقال مواد در صنایع شیمیایی، استخراج نفت و گاز، خنک‌سازی، رنگ و چاپ به وسیله افشانه‌ها و غیره می‌باشد.

در این تحقیق به بررسی برخورد دو قطره پرداخته می‌شود، که در فرایندهای طبیعی و صنعتی از قبیل تشکیل باران، برخورد دو قطره سوخت هنگامی که انژکتورها قطرات را پخش می‌کنند و یا برخورد قطرات در اسپری رنگ، اغلب دیده شده است. در موتورهای احتراق داخلی، برخورد قطرات در نوع مخلوط ایجاد شده و در پروسه احتراق به مقدار زیادی تأثیر می‌گذارند. از آن‌جا که سازمان‌دهی تشکیل مخلوط سوخت همواره مسیر مهمی برای بهینه کردن فرایند سوخت و در نتیجه بازدهی بالاتر بوده است، بنابراین مکانیزم برخورد قطرات مورد توجه زیادی قرار گرفته است.

پیچیدگی اساسی جریان‌های دوفازی، چه از لحاظ فیزیکی و چه از لحاظ عددی، چالش بزرگی را پیش روی توسعه دهندگان برنامه‌های رایانه‌ای تجاری برای تولید برنامه‌هایی جامع در این زمینه به وجود آورده است. پیچیدگی فرمول‌بندی ریاضی معادلات حاکم بر جریان‌های دو فازی و وابسته بودن آن به کمیت‌های مختلف از مهم‌ترین دلایل کمبود دانش کلی در مورد جریان‌های دو فازی است.

مطالعات تجربی فراوانی در زمینه برخورد دو قطره در دهه‌های اخیر انجام شده است. در ابتدا بیشتر آزمایش‌ها در مورد برخورد قطرات آب انجام می‌شد، در حالی‌که در سال‌های اخیر آزمایش‌های بیشتر در زمینه برخورد قطرات هیدروکربن که در احتراق کاربرد دارند، انجام می‌شود. با انجام این آزمایشات به این نتیجه رسیده شد که اندازه قطره، خواص آن، سرعت برخورد و شرایط محیط در برخورد دو قطره مؤثرند. این عوامل در مراجع [۱،۲] آورده شده است.

در مقایسه با مطالعات تجربی، بررسی عددی اطلاعات بیشتری را در اختیار قرار می‌دهد و پارامترهای مربوطه به راحتی می‌توانند تنظیم شوند. اینامورا و همکارانش [۳] با استفاده از روش شبکه‌ای بولتزمن چند فازی، برخورد دو قطره‌ی مساوی را با نسبت چگالی بالا شبیه‌سازی کردند. در این مدل از متد تصویرسازی^۲ برای حل استفاده شده و تنها تأثیر عدد وبر و پارامتر برخورد در جدایش یا بهم پیوستگی قطرات بررسی شده است و سایر اعداد بی‌بعد در نظر گرفته نشده است. در مدل دیگر برخورد دو قطره نامساوی بررسی شده است [۴]. محدودیت دیگر در این مدل این است که به دلیل حجم بالای محاسباتی نسبت چگالی برابر ۵۰ در نظر گرفته شده است. دای و اسمیت [۵] تأثیر لزجت را در بیشترین تغییر شکل برخورد سر به سر دو قطره با استفاده از روش حجم محدود با شبکه‌بندی متحرک بررسی کردند. با بررسی انجام شده به دست آمد که مقدار تغییر شکل با افزایش عدد رینولدز (مخصوصاً در اعداد رینولدز پایین) افزایش پیدا

3- Multiple Relaxation Time (MRT)

4- Lee

5- Shan and Chen

6- Interaction Potential

7- He

1- Parallel Processing

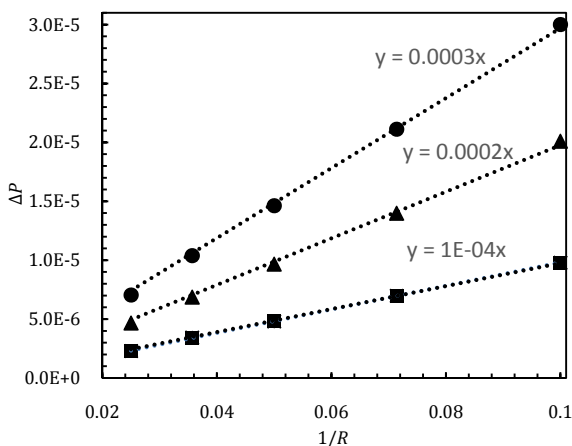
2- Projection Method

از قانون لاپلاس مشخص است شیب نمودار برابر با کشش سطحی است و هرچه مقدار کشش سطحی بیشتر می‌شود شیب بیشتر می‌شود. با مقایسه شیب‌های خط رگرسیون به‌دست آمده در شکل ۱ با مقدار کشش سطحی قرار داده شده در کد، ملاحظه می‌شود که تفاوت چندانی در این دو مقدار مشاهده نمی‌شود. از شرط جهش به عقب در مدل‌سازی استفاده شده است. برای قطره با قطر ۱۲۰ واحد شبکه، تغییرات C در طول شبکه در $\gamma = 150/2$ (پس از صدهزار تکرار) در شکل ۲ رسم شده است. مرز بین دو سیال با $C=0.5$ مشخص شده است.

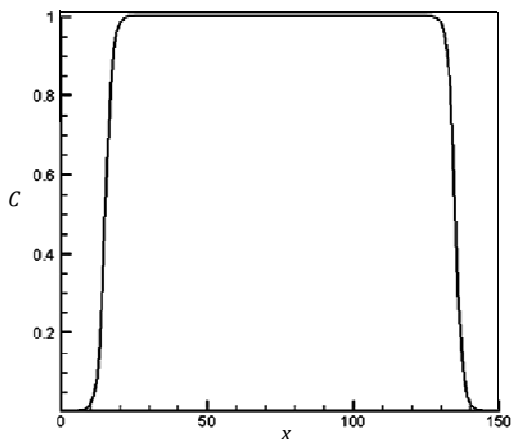
۴- نتایج

در این قسمت با استفاده از مدل‌سازی انجام شده به هدف اصلی تحقیق که برخورد دو قطره است، پرداخته شده است. در این نوع شبیه‌سازی یازده پارامتر، شامل سرعت حرکت قطره اول (U_1)، سرعت حرکت قطره دوم (U_2)، قطر قطره کوچک‌تر (D_1)، قطر قطره بزرگ‌تر (D_2)، کشش سطحی (σ)، چگالی قطره (ρ_d)، چگالی گاز اطراف (ρ_g)، لزجت سینماتیکی قطره (ν_d)، لزجت سینماتیکی گاز (ν_g)، فشار محیط و فاصله عمودی مراکز دو قطره در جهت عمود بر راستای سرعت (X) در مدل‌سازی مسأله مؤثرند. بنابراین هشت پارامتر بی بعد به‌دست می‌آیند:

- 1) $We = \frac{\rho_d U_{ref}^2 D_1}{\sigma}$ (عدد وبر)
- 2) $Re = \frac{U_{ref} D_s}{\nu_d}$ (عدد رینولدز)
- 3) $B = \frac{X}{D_1}$ (پارامتر برخورد)



شکل ۱ نمودار ΔP بر حسب معکوس شعاع



شکل ۲ تغییرات C در طول شبکه در $\gamma=150/2$

معادلات (۱) و (۲) مراحل جریان^۱ و برخورد^۲ را تماماً برای دو تابع توزیع \bar{h} (مربوط به غلظت) و \bar{g} (مربوط به مومنتم) نشان می‌دهند. در این معادله τ (زمان آرامش)، C (که در یک سیستم دوگانه برای سیال با چگالی بیشتر برابر یک و سیال با چگالی کمتر صفر فرض می‌شود)، p_1 فشار هیدروستاتیکی، μ پتانسیل شیمیایی و M ضریب تحرک (معیاری برای حرکت از غلظت بیشتر به کمتر) است. در این دو معادله برای محاسبه Γ_α ، \bar{h}_α^{eq} و \bar{g}_α^{eq} از معادلات (۳-۸) استفاده می‌شود.

$$\Gamma_\alpha(u) = \frac{f_\alpha^{eq}}{\rho} \quad (3)$$

$$f_\alpha^{eq} = t_\alpha \rho \left[1 + \frac{e_\alpha \cdot u}{c_s^2} + \frac{(e_\alpha \cdot u)^2}{2c_s^4} - \frac{u \cdot u}{2c_s^2} \right] \quad (4)$$

$$\bar{h}_\alpha^{eq}(x, t) = h_\alpha^{eq} - \frac{\delta t}{2} (e_\alpha - u) \cdot \left\{ \nabla C - \frac{C}{\rho c_s^2} (\nabla p_1 + C \nabla \mu) \right\} \times \Gamma_\alpha(x, t) - \frac{\delta t}{2} \nabla \cdot (M \nabla \mu) \Gamma_\alpha(x, t) \quad (5)$$

$$h_\alpha^{eq} = \frac{C}{\rho} f_\alpha^{eq} \quad (6)$$

$$g_\alpha^{eq}(x, t) = g_\alpha^{eq} - \frac{\delta t}{2} (e_\alpha - u) \cdot \left\{ \nabla \rho c_s^2 (\Gamma_\alpha - \Gamma_\alpha(0)) - (C \nabla \mu) \Gamma_\alpha \right\} \quad (7)$$

$$g_\alpha^{eq} = t_\alpha \left[p_1 + \rho c_s^2 \left(\frac{e_\alpha \cdot u}{c_s^2} + \frac{(e_\alpha \cdot u)^2}{2c_s^4} - \frac{u \cdot u}{2c_s^2} \right) \right] \quad (8)$$

در این مدل از ساختار شبکه D2Q9 استفاده شده است. برای محاسبه مقادیر ماکروسکوپیک شامل C ، سرعت و فشار هیدروستاتیکی از معادلات (۹-۱۱) استفاده می‌شود:

$$C = \sum_\alpha \bar{h}_\alpha + \frac{\delta t}{2} \nabla \cdot (M \nabla \mu) \quad (9)$$

$$\rho u = \frac{1}{c_s^2} \sum_\alpha e_\alpha \bar{g}_\alpha - \frac{\delta t}{2} C \nabla \mu \quad (10)$$

$$p_1 = \sum_\alpha \bar{g}_\alpha + \frac{\delta t}{2} u \cdot \nabla \rho c_s^2 \quad (11)$$

در لحظه شروع تغییر ناگهانی C در مرز بین دو سیال باعث ایجاد ناپایداری می‌شود. بنابراین در حالت تعادلی پروفیل زیر برای مرز مشترک (که در همان تکرار اول برای مقدار دهی اولیه استفاده شده است) پیشنهاد می‌شود.

$$C(z) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{R-z}{D}\right) \quad (12)$$

که در آن z فاصله از مرکز قطره، R شعاع قطره و D ضخامت مرز مشترک است. همچنین با معلوم بودن D (ضخامت عددی مرز مشترک دو فاز) و β که مقداری ثابت است (مقدار $M\beta$ طوری تعیین می‌شود که منجر به همگرا شدن شود)، برای محاسبه کشش سطحی از رابطه (۱۳) استفاده می‌شود.

$$\sigma = \frac{\sqrt{2k\beta}}{6}, k = \frac{\beta D^2}{8} \quad (13)$$

۳- صحنه‌گذاری نتایج

برای صحنه‌گذاری، قطره‌های با شعاع مشخص در داخل یک میدان ساکن قرار داده شده است، قانون لاپلاس برای این قطره به‌صورت معادله (۱۴) باید برقرار باشد.

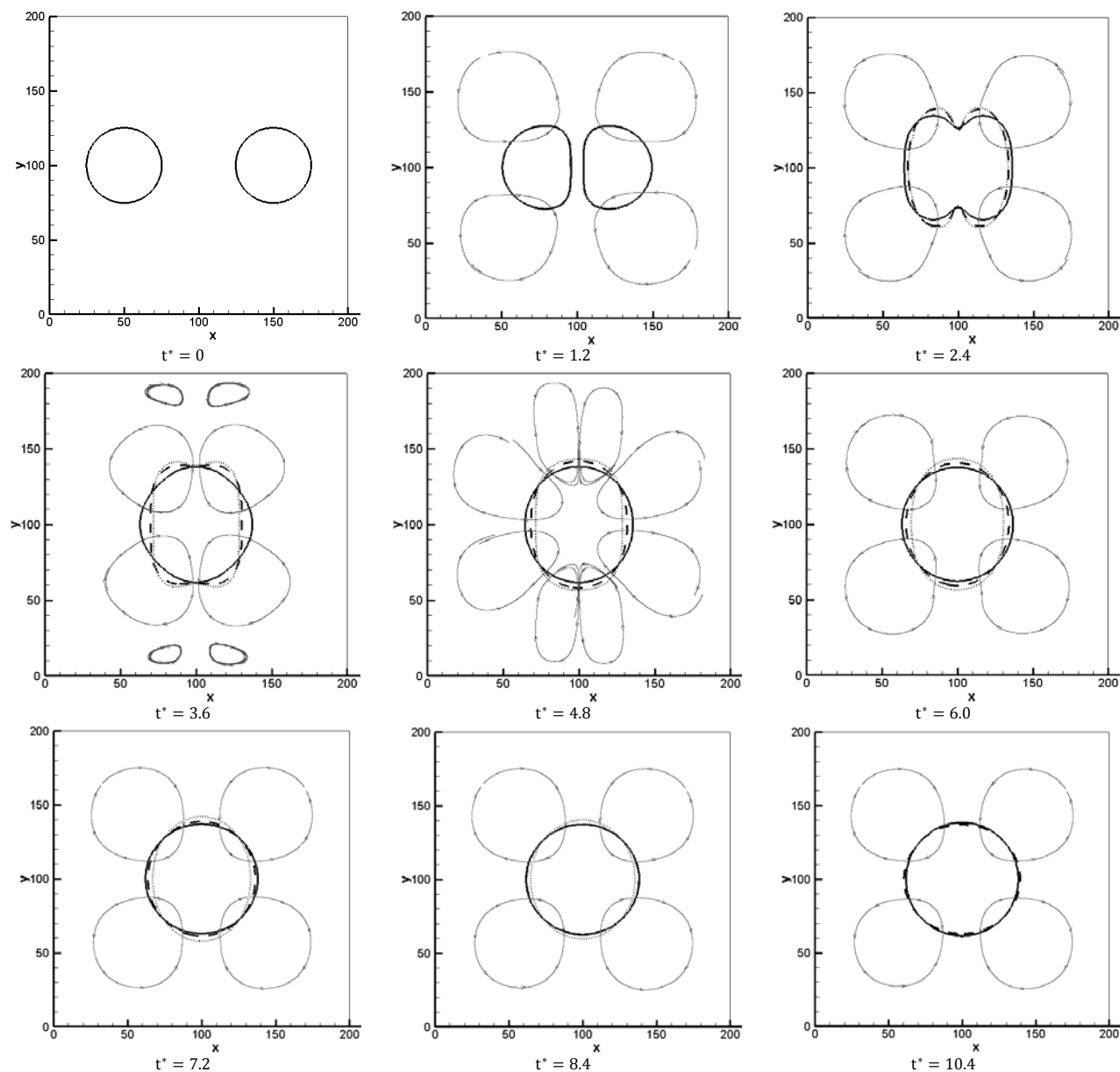
$$\Delta P = \frac{\sigma}{R} \quad (14)$$

در یک شبکه قطره‌هایی با شعاع ۱۰، ۱۴، ۲۰، ۲۸، ۴۰ و واحد شبکه قرار داده شده است. نسبت لزجت سینماتیکی و نسبت چگالی ۱۰ در نظر گرفته شده است. پس از تکرار کافی، فشار کل به‌صورت میانگین در داخل و خارج قطره محاسبه شده و اختلاف این دو مقدار که سمت چپ معادله لاپلاس است، را به‌دست می‌دهد. نتایج حاصله در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که

1- Stream
2- Collision

جدول ۱ حالت‌های بررسی شده

U_1/U_{ref}	D_2/D_1	v_g/v_d	ρ_d/ρ_g	B	Re	We	ردیف
۰/۵	۱	۱۵	۸۳۲	۰	۳۰	۵۰، ۳۰، ۱۰	۱
۰/۵	۱	۵/۶	۶۶۶	۰	۱۵۰، ۱۰۰، ۵۰	۵۰	۲
۰/۵	۱	۵/۶	۶۶۶	۰/۱۹، ۰/۵، ۰/۱، ۰	۱۰۰	۶۰	۳
۰/۵	۱	۵/۶	۶۶۶، ۱۰۰، ۵۰، ۱۰	۰	۱۵۰	۷۵	۴
۰/۵	۱	۱۵، ۱۰، ۵/۶، ۱	۶۶۶	۰	۱۰۰	۵۰	۵
۰/۵	۱/۷۵، ۱/۵، ۱/۲۵، ۱	۵/۶	۶۶۶	۰	۳۰	۱۰	۶
۰/۳۳، ۰/۲۵، ۰/۱۲	۱	۵/۶	۶۶۶	۰	۳۰	۵۰	۷



شکل ۳ تأثیر تغییر عدد وبر (خط ممتد: $We=10$ ، خط چین: $We=30$ ، نقطه نقطه: $We=50$)

$$8) \frac{PD_1}{\sigma}$$

که در آن U_{ref} سرعت نسبی قطره دوم نسبت به قطره اول است. لازم به ذکر است که در بسیاری از مراجع برای بی بعد کردن لزجت به جای رینولدز از عدد آنسرج استفاده شده است. در صورت اضافه نمودن زمان، این کمیت به صورت معادله (۱۵) بی بعد می‌شود:

$$4) \frac{D_2}{D_1} \text{ (نسبت قطر)}$$

$$5) \frac{U_1}{U_{ref}} \text{ (نسبت سرعت کوچکتر به سرعت نسبی)}$$

$$6) \frac{\rho_d}{\rho_g} \text{ (نسبت چگالی)}$$

$$7) \frac{v_g}{v_d} \text{ (نسبت لزجت سینماتیکی)}$$

را انجام می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که قطره خط ممتد که رینولدز کمتری را دارد، زودتر به حالت پایا رسیده است.

بنابراین با افزایش عدد رینولدز میزان تغییر شکل قطره و تعداد نوسانات بیشتر شده و زمان رسیدن به حالت پایا افزایش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به مرجع [۲] این عدد تأثیری در جدایش و یا بهم‌آمیختگی قطرات ندارد.

بنابراین با افزایش عدد وبر میزان دامنه نوسانات قطره بیشتر شده و زمان رسیدن به حالت پایا و تعداد نوسان افزایش پیدا می‌کند.

۴-۳- بررسی تغییر پارامتر برخورد

برای بررسی تغییر پارامتر برخورد، اعداد بی بعد ردیف سوم جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند و نتایج در $\Delta t^* = 2$ (هر هزار و پانصد تکرار) رسم شده است. در میدان 400×400 برخورد دو قطره با قطر ۵۰ واحد شبکه بررسی شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش پارامتر برخورد، فاصله برخورد مراکز دو قطره بیشتر می‌شود. در شکل اول (بالا سمت چپ) قطره‌ها در حالت اولیه نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در $t^* = 10$ ، ابتدا قطره خط‌نقطه که دارای غیر هم‌مرکزی بیشتری است، از هم جدا می‌شوند. سپس در $t^* = 18$ ، قطره‌های نقطه‌نقطه بعد از زمان کوتاهی چرخش از هم جدا شده‌اند. اما قطره‌های خط ممتد و خط‌چین که دارای پارامتر برخورد کم‌تری هستند، از هم جدا نشده‌اند و یک قطره را تشکیل داده‌اند. در واقع در قطره‌های خط‌نقطه و نقطه‌نقطه که دارای غیر هم‌مرکزی بیشتری هستند، انرژی جنبشی ناشی از سرعت اولیه به‌صورت انرژی چرخشی درمی‌آید، اما به‌دلیل فاصله زیاد از محور چرخش و نازک شدن قطره، انرژی جنبشی بر نیروی چسبندگی بین ذرات قطره غلبه کرده و باعث جدا شدن قطرات می‌شود. اما در قطره‌های خط ممتد و خط‌چین قطره‌ها جدا نشده و انرژی جنبشی به‌صورت چرخشی در می‌آید و در نهایت به‌دلیل چرخش در محیط لزج متوقف می‌شود.

بنابراین در برخورد غیر هم‌مرکز، انرژی قطره‌ها پس از برخورد به‌صورت چرخش حول محور ظاهر می‌شود و با افزایش پارامتر برخورد مدت زمان چرخش تا رسیدن به حالت تعادل افزایش پیدا می‌کند. اگر پارامتر برخورد از 0.3 (برای عدد وبر 60) بیشتر شود باعث جدایش قطره‌ها می‌شود. این مقدار با نتایج تجربی مرجع [۲] مطابقت قابل قبولی دارد.

۴-۴- بررسی تغییر نسبت چگالی

برای بررسی تغییر نسبت چگالی، اعداد بی بعد ردیف چهارم جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند. شبیه‌سازی برای نسبت‌های چگالی 10 ، 50 ، 100 و 666 انجام شده است. نسبت لزجت در تمامی حالات ثابت و برابر یک در نظر گرفته شده است $(\nu_g/\nu_d=1)$ و نتایج در $\Delta t^* = 6$ (هر سه هزار تکرار) رسم شده است. در میدان 300×300 برخورد دو قطره با قطر ۵۰ واحد شبکه بررسی شده است.

با تحلیل شکل ۶ مشخص می‌شود که نسبت چگالی تأثیری در جدایش دو قطره از هم و یا بهم‌آمیختگی آن ندارد. این نتیجه از بررسی نسبت چگالی‌های دیگر نیز به‌دست آمده است. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت چگالی دامنه نوسان قطره نقطه‌نقطه بیشتر از خط‌چین و بیشتر از خط‌ممتد است. به‌علاوه تعداد نوسانات و زمان رسیدن به تعادل قطره‌های نقطه‌نقطه بیشتر از خط‌چین و خط‌چین بیشتر از خط ممتد است.

$$t^* = \frac{TU_{ref}}{D_1} \quad (15)$$

که در این معادله T تعداد تکرار است.

زمان آرامش (τ) در هر نقطه از شبکه به‌صورت معادله (۱۶) تعریف شده است.

$$\tau = C\tau_1 + (1 - C)\tau_2 \quad (16)$$

برای بررسی تأثیر اعداد بی بعد در هر قسمت عدد بی بعد مورد نظر تغییر داده شده و سایر اعداد بی بعد ثابت فرض شده‌اند. در بررسی عدد وبر قطره‌های آب در هوا ($\tau_1 = 0.1, \tau_2 = 1.5$) و در بررسی اعداد رینولدز، پارامتر برخورد، نسبت قطر و سرعت نسبی، قطره‌های تترادیکین ($C_{14}H_{30}$) در نیتروژن که در فرایند احتراق دیده می‌شود ($\tau_1 = 0.1, \tau_2 = 0.56$) و در بررسی نسبت لزجت سینماتیکی ($\tau_1 = 0.1, \tau_2 = 0.1, 0.56, 1, 1.5$) در نظر گرفته شده است. در زمان بی‌بعد یکسان، اعداد بی بعد مورد نظر با هم مقایسه شده‌اند. در تمامی حالت‌ها از شرط مرزی تناوبی استفاده شده است. در جدول ۱ اعداد بی‌بعد در نظر گرفته شده، آورده شده است. لازم به ذکر است که فشار گاز (محیط) در حالت اولیه برای تمامی حالات ثابت فرض شده است (به عنوان مثال قطره‌ها در فشار اتمسفر قرار داده شده‌اند) و فشار در فرایند برخورد تغییر می‌کند.

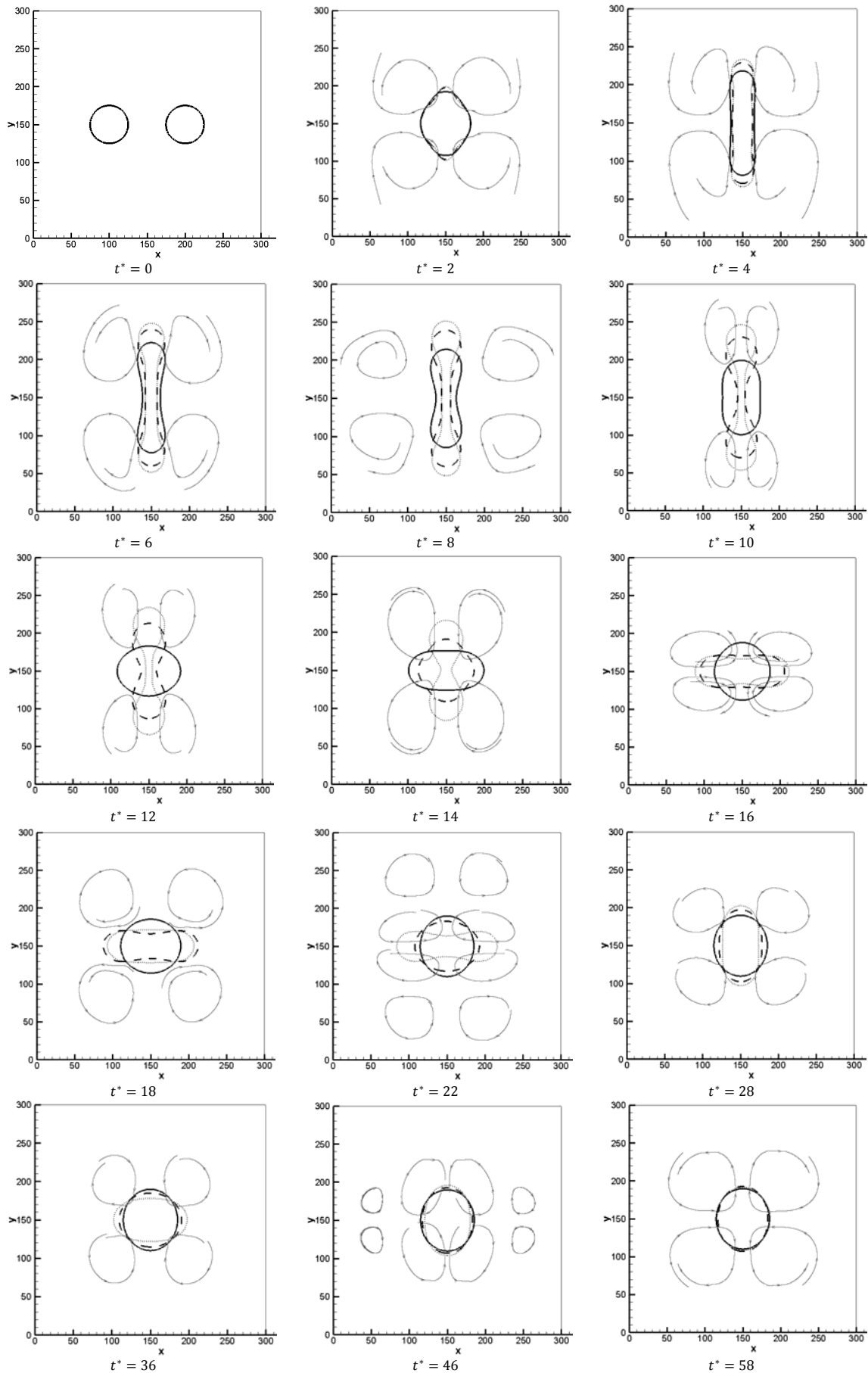
۴-۱- بررسی تغییر عدد وبر

برای بررسی تغییر عدد وبر، اعداد بی بعد ردیف اول جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند و نتایج در $\Delta t^* = 1/2$ (هر سه هزار تکرار) رسم شده است. در این محاسبات میدان 200×200 برخورد دو قطره با قطر ۵۰ واحد شبکه در نظر گرفته شده است.

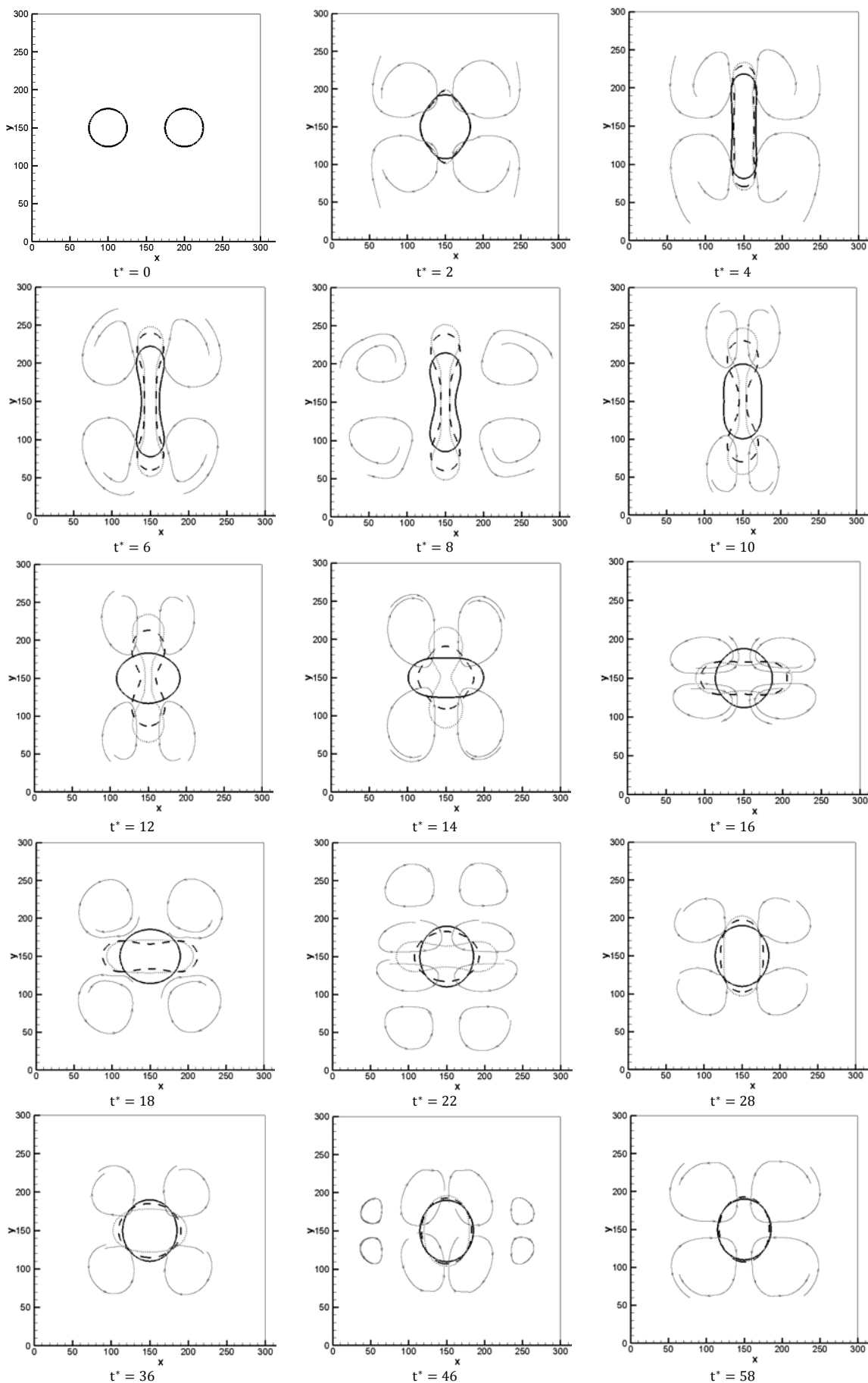
همان‌طور که مشخص است عدد وبر برابر نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی می‌باشد. بنابراین با افزایش این عدد، انرژی جنبشی مقدار بیشتری نسبت به کشش سطحی پیدا کرده و می‌تواند باعث تغییر بیشتر شکل قطره شود. همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشخص است، قطره خط ممتد که دارای عدد وبر کمتری است، دامنه تغییراتش کمتر از دو قطره دیگر است. در ضمن مشاهده می‌شود که این قطره زودتر به حالت پایایی‌رسد (در $t^* = 6/0$) و هرچه عدد وبر زیاد شده، زمان رسیدن به حالت پایا نیز افزایش پیدا کرده است. در شکل ۳ مشخص است که قطره نقطه‌نقطه که دارای عدد وبر بیشتری است، دیرتر به حالت تعادل رسیده است ($t^* = 10/4$). در ضمن مشاهده می‌شود که تعداد نوسان قطره نقطه‌نقطه بیشتر از خط‌چین و خط‌چین بیشتر از خط ممتد است.

۴-۲- بررسی تغییر عدد رینولدز

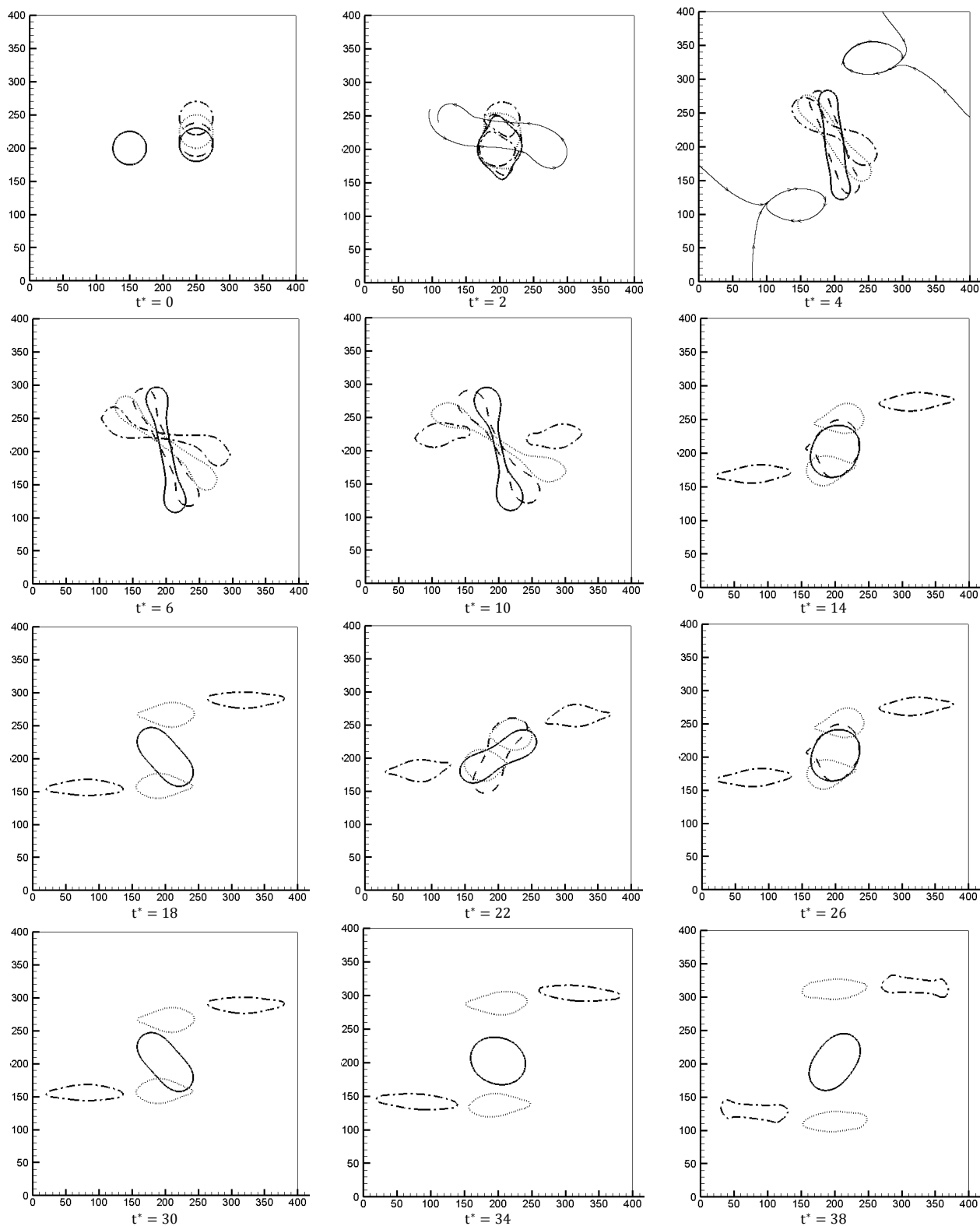
برای بررسی تغییر عدد رینولدز، اعداد بی بعد ردیف دوم جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند و نتایج در $\Delta t^* = 2$ (هر سه هزار تکرار برای $Re = 50$ ، هر هزار و پانصد تکرار برای $Re = 100$ و هر هزار تکرار برای $Re = 150$) رسم شده است. در میدان 300×300 ، برخورد دو قطره با قطر ۵۰ واحد شبکه بررسی شده است. همان‌طور که مشخص است عدد رینولدز برابر نسبت نیروی اینرسی به نیروی ناشی از لزجت می‌باشد. بنابراین با افزایش این عدد نیروی اینرسی قدرت بیشتری نسبت به نیروی لزج پیدا کرده و می‌تواند باعث تغییر بیشتر شکل قطره شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، قطره خط ممتد که دارای عدد رینولدز کمتری است، دامنه تغییراتش کمتر از دو قطره دیگر است. به‌علاوه ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد رینولدز به‌دلیل کم شدن اثر لزجت نوسان قطره بیشتر می‌شود. در شکل ۴ اثر نوسانی قطره نقطه‌نقطه دیرتر از دو قطره دیگر در داخل میدان گرفته می‌شود و تعداد نوسان بیشتری



شکل ۴ تأثیر تغییر عدد رینولدز (خط ممتد: $Re=50$ ، خط چین: $Re=100$ ، نقطه نقطه: $Re=150$)



شکل ۴ تاثیر تغییر عدد رینولدز (خط ممتد: $Re=50$, خط چین: $Re=100$, نقطه نقطه: $Re=150$)



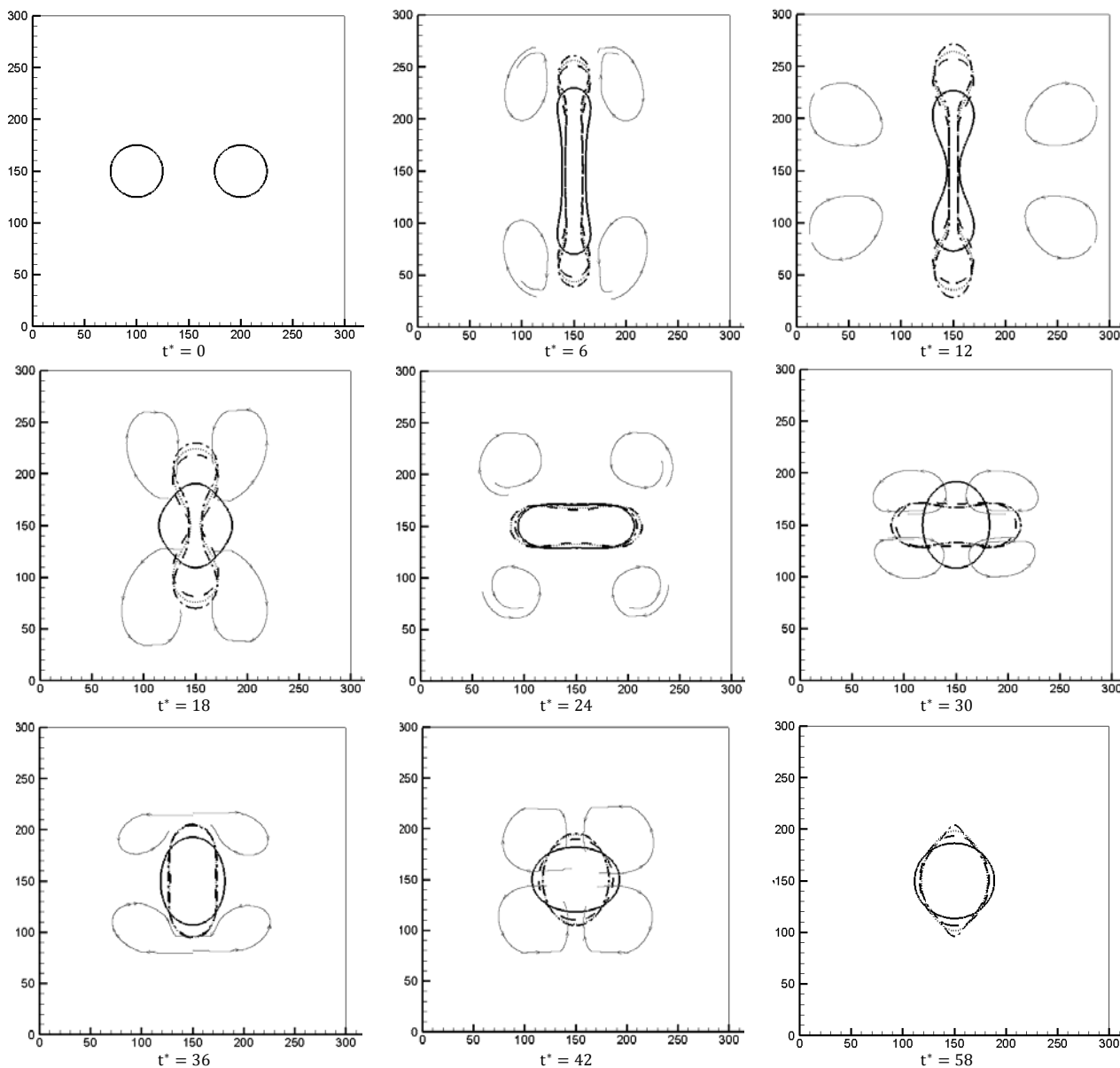
شکل ۵ تأثیر تغییر پارامتر برخورد (خط ممتد: $B=0$ ، خط چین: $B=0/1$ ، نقطه‌نقطه: $B=0/5$ ، خط نقطه: $B=0/9$)

۴-۵- بررسی تغییر نسبت لزجت سینماتیکی

بنابراین با افزایش نسبت چگالی دامنه نوسان، تعداد نوسانات و زمان رسیدن به تعادل افزایش می‌یابد، اما نسبت چگالی تأثیری در جدایی و یا بهم آمیختگی دو قطره ندارد.

برای بررسی تغییر نسبت لزجت سینماتیکی، اعداد بی بعد ردیف پنجم جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند و شبیه‌سازی برای نسبت لزجت سینماتیکی

قطره‌های تترادیکین ($C_{14}H_{30}$) در نیتروژن $v_g/v_d = 5/6$ ، نسبت لزجت سینماتیکی قطره‌های آب در هوا $v_g/v_d = 15$ و نسبت‌های ۱ و ۱۰ انجام شده است. نسبت چگالی در تمامی حالات ثابت و برابر نسبت چگالی تترادیکین به نیتروژن فرض شده است ($\rho_d/\rho_g = 666$). نتایج در $\Delta t^* = 4$ (هرسه هزار تکرار) رسم شده است. در میدان 30×30 برخورد دو قطره با قطر ۵۰ واحد شبکه بررسی شده است.



شکل ۶ تأثیر تغییر نسبت چگالی (خط ممتد: $\rho_d/\rho_g = 10$ ، خط چین: $\rho_d/\rho_g = 50$ ، نقطه نقطه: $\rho_d/\rho_g = 100$ ، نقطه خط: $\rho_d/\rho_g = 666$)

کاهش نسبت لزجت سینماتیکی باعث کاهش تنش برشی و در فاز گاز در مقابل حرکت رو به بالای قطره شده و بنابراین نقطه‌ای بحرانی مشاهده می‌شود که جلوی این سرعت عمودی قطره گرفته نمی‌شود و قطره از هم جدا می‌شود.

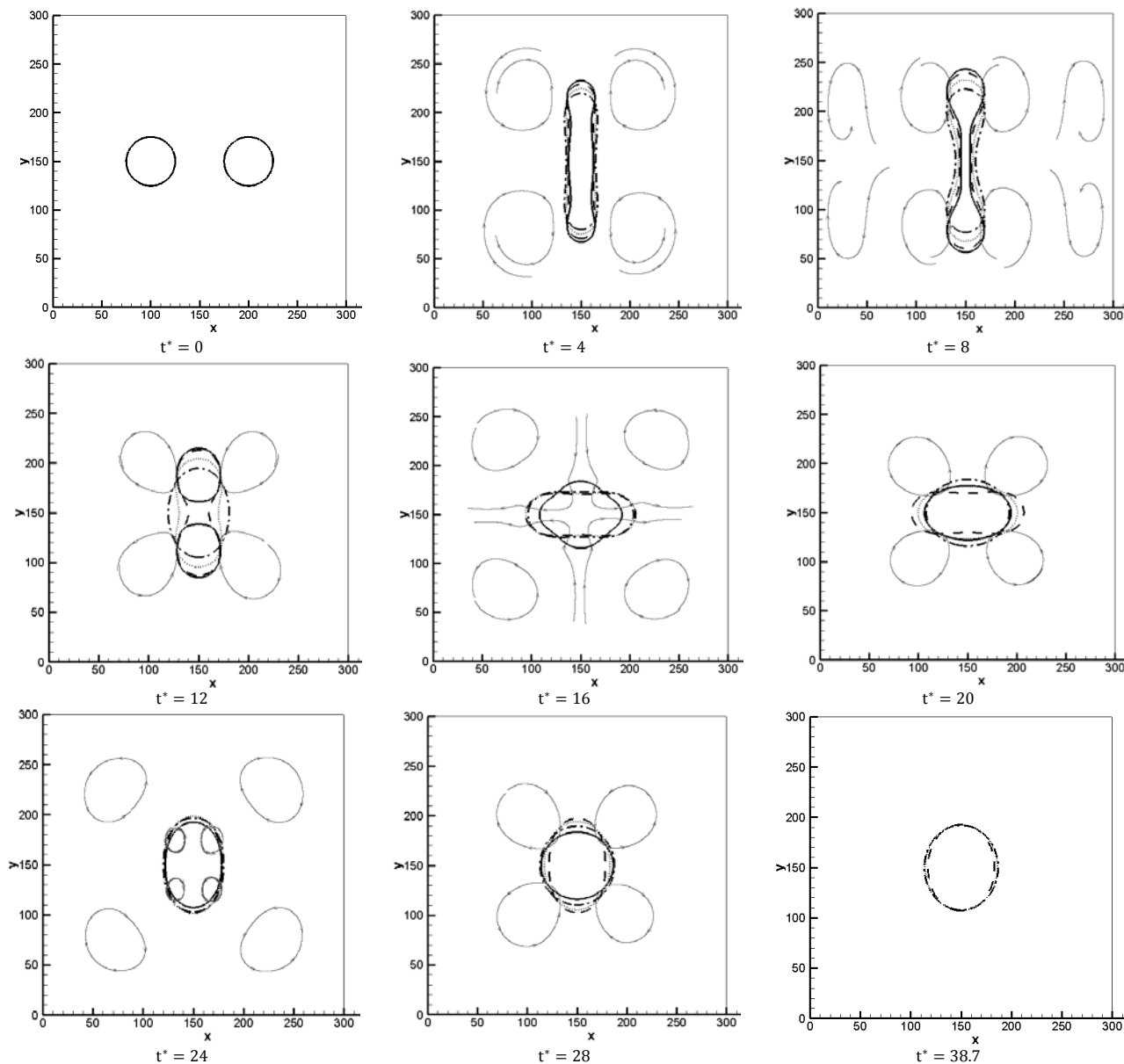
۴-۶- بررسی تغییر نسبت قطر

برای بررسی تغییر نسبت قطر، اعداد بی بعد ردیف ششم جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند و در شکل ۸، نتایج در $\Delta t^* = 1/2$ (هر سه هزار تکرار) رسم شده است. در میدان 400×400 برخورد دو قطره با قطر ۵۰، $62/5$ ، 75 ، $87/5$ واحد شبکه بررسی شده است.

با توجه به شکل ۸ ملاحظه می‌شود که با بزرگتر شدن نسبت قطر، میزان مومنتم قطره بیشتر شده و بنابراین می‌تواند قطره کوچک‌تر را بیشتر به سمت چپ منحرف سازد. قطره خط نقطه در زمان انتهایی بیشترین انحراف را از مرکز صفحه دارد.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت لزجت، میزان تغییر شکل قطرات کمتر می‌شود. در شکل اول (بالا سمت چپ) قطره‌ها در حالت اولیه نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در $t^* = 4$ ، قطره خط ممتد که دارای کمترین نسبت لزجت است، بیشترین تغییر شکل را دارد. این تغییر شکل بیشتر در زمان بعد نیز به وضوح قابل تشخیص است. در زمان $t^* = 12$ ، قطره‌های خط ممتد از هم جدا می‌شوند در حالی که در قطرات دیگر جدایش اتفاق نمی‌افتد. با مشاهده شکل ۷ تأثیر نسبت لزجت سینماتیکی در جدایش یا عدم جدایش دو قطره قابل ملاحظه است. در زمان‌های بعد مشاهده می‌شود که قطره‌های خط چین و نقطه نقطه که دارای نسبت لزجت (گاز اطراف به قطره) کم‌تری هستند، تا رسیدن حالت تعادل (دایره کامل) تعداد نوسان بیشتری نسبت به قطره نقطه خط می‌کنند و دیرتر به حات تعادل می‌رسند. زیرا قطره نقطه خط در $t^* = 28$ به حالت تعادل رسیده است، در حالی که این دو قطره در $t^* = 38/7$ به حالت پایا رسیده‌اند.

بنابراین مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت لزجت سینماتیکی، دامنه نوسان، تعداد نوسان و زمان رسیدن به حالت تعادل کم‌تر می‌شود. همچنین



شکل ۷ تأثیر تغییر نسبت لزجت سینماتیکی (خط ممتد: $\nu_g/\nu_d = 1$ ، خط چین: $\nu_g/\nu_d = 5/6$ ، نقطه نقطه: $\nu_g/\nu_d = 10$ ، خط نقطه: $\nu_g/\nu_d = 15$)

۴-۷- بررسی تغییر نسبت سرعت برخورد

برای بررسی تغییر نسبت سرعت برخورد، اعداد بی بعد زریف هفتم جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند و نتایج در $\Delta t^* = 1/2$ (هر سه هزار تکرار) رسم شده است. در میدان 300×300 برخورد دو قطره با قطر ۵۰ واحد شبکه بررسی شده است.

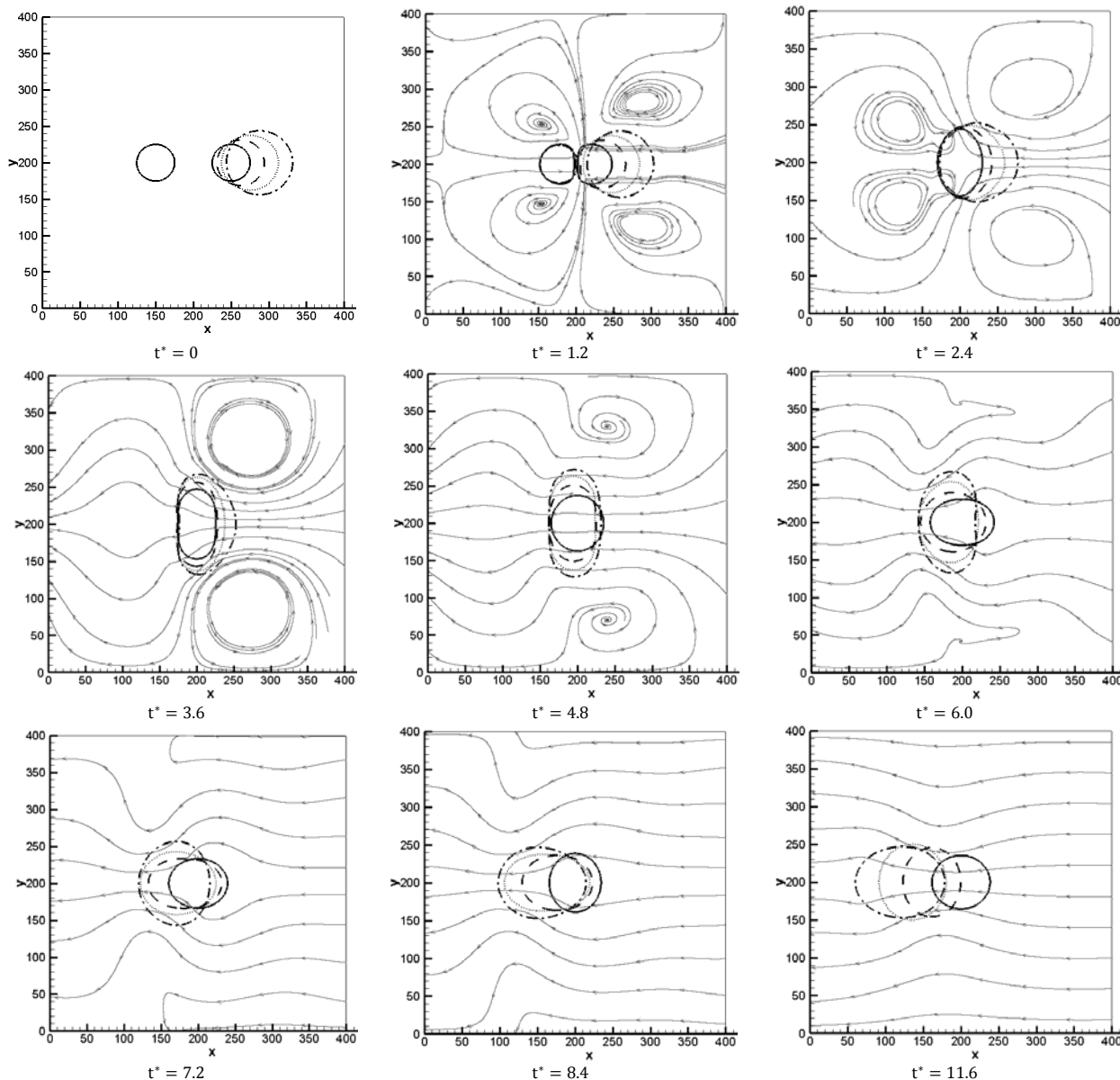
باتوجه به شکل ۹ ملاحظه می‌شود که با بزرگ‌تر شدن سرعت یک قطره نسبت به دیگری و با ثابت نگاه داشتن سرعت نسبی، تنها مکان برخورد تغییر می‌کند و تأخیری در قطره ایجاد شده ندارد. بنابراین در برخورد قطرات تنها میزان سرعت نسبی مهم می‌باشد.

در شکل‌های ۳ تا ۹ خطوط جریان برای آخرین قطره نشان داده شده است. در مواردی که سرعت اندک است، از جمله در زمان‌های انتهایی که به شرایط پایا رسیده است، از رسم خط جریان صرف‌نظر شده است. نتایج به‌صورت خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. در این جدول با افزایش اعداد بی‌بعد نحوه تغییرات دامنه نوسان در ستون اول، زمان رسیدن به تعادل در ستون دوم، تعداد نوسان در ستون سوم و نوع برخورد در ستون آخر نشان

داده شده است. در این جدول، علامت ضربدر به معنای عدم تأثیر و علامت (-) به این معنی است که نیاز به آزمایش‌های بیشتر وجود دارد و با این تعداد داده نمی‌توان نتیجه‌گیری کرد. لازم به ذکر است که نتایج جدول ۲ با مقالاتی که یک ستون از این جدول را بررسی نمودند، منطبق است و نتایج جدید نیز ذکر شده است.

جدول ۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی

نوع برخورد	تعداد نوسان	زمان رسیدن به تعادل	دامنه	
			نوسان	نوسان
جدایی	☐	☐	☐	☐
x	☐	☐	☐	☐
جدایی	☐	☐	☐	☐
x	☐	☐	☐	☐
عدم جدایی	↓	↓	↓	↓
x	-	-	-	-
x	x	x	x	x



شکل ۸ تأثیر تغییر نسبت قطر در برخورد دو قطره (خط ممتد: $D_2/D_1 = 1$ ، خط چین: $D_2/D_1 = 1/25$ ، نقطه نقطه: $D_2/D_1 = 1/5$ ، خط نقطه: $D_2/D_1 = 1/75$)

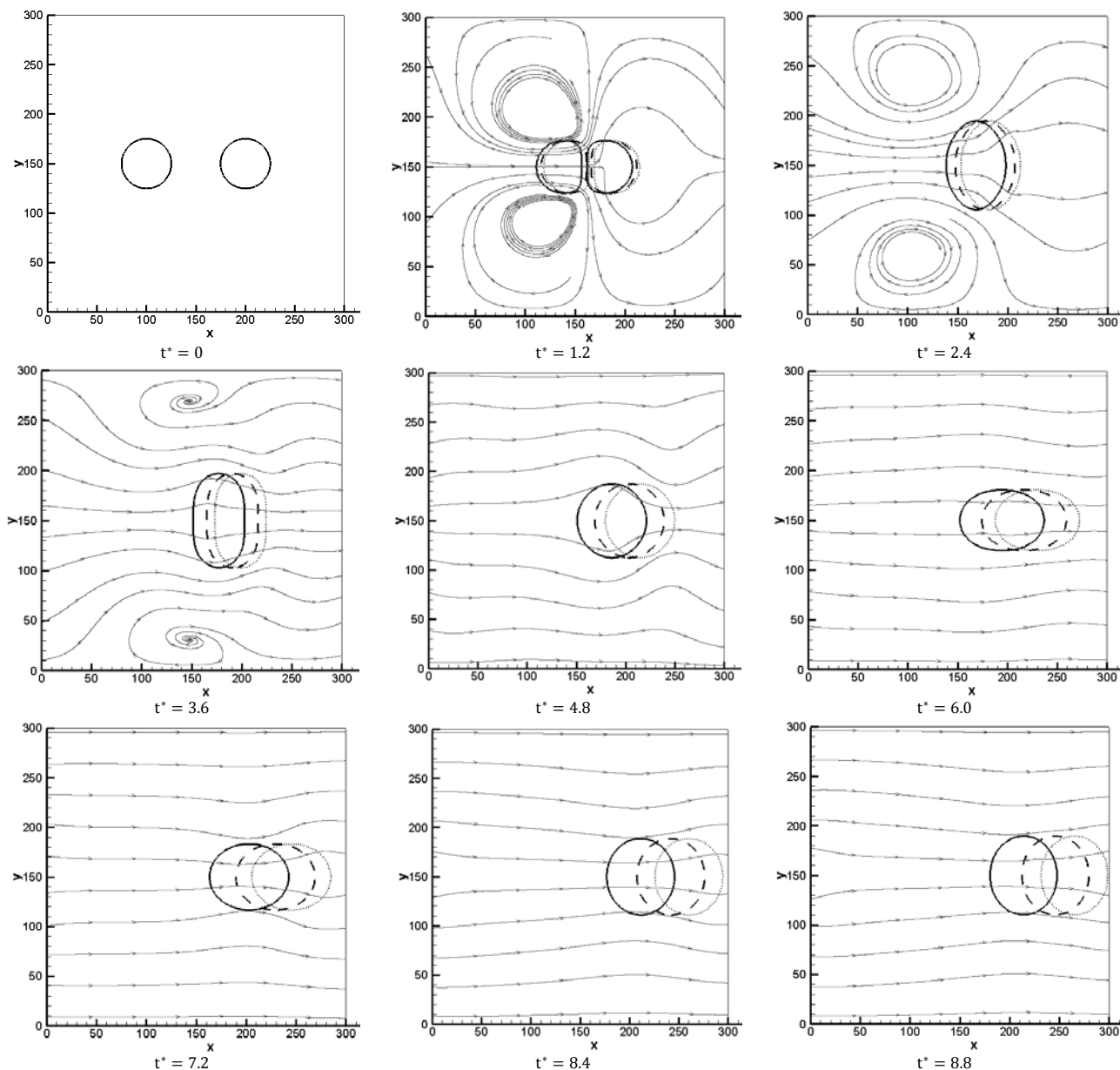
۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، به بررسی و حل عددی برخورد دو قطره در حالات مختلف پرداخته شد. شبیه‌سازی برای سیالات دوگانه تراکم‌ناپذیر بر اساس مدل ارائه شده توسط لی انجام گرفته است. ویژگی بارز این مدل شبیه‌سازی سیالات با نسبت چگالی بالا می‌باشد. در حالی که در مدل‌های قبلی نسبت چگالی، تا ده بیشتر بالا نمی‌رفت، این مدل می‌تواند تا نسبت چگالی هزار را هم شبیه‌سازی کند. در این تحقیق ابتدا روش شبکه‌ای بولتزمن معرفی شد و چگونگی اعمال این روش برای حالت چند فازی توضیح داده شد. پس از صحت‌گذاری این روش، مدل‌سازی برای برخورد دو قطره اعمال شد و نتایج ارائه شد.

با استفاده از این شبیه‌سازی، تغییرات اعداد بی‌بعد ویر، رینولدز، پارامتر برخورد، نسبت چگالی، نسبت لزجت سینماتیکی، نسبت قطر و نسبت سرعت برخورد دو قطره مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج حاصل، عدد رینولدز، نسبت چگالی و نسبت سرعت نسبی تأثیری در جداسدن یا بهم پیوستگی قطرات بعد از برخورد ندارند، در حالی که با تغییر عدد ویر، برخورد و نسبت لزجت سینماتیکی باعث جداسدن یا بهم‌پیوستگی قطرات می‌شوند.

به طوری که اگر دو قطره به هم بچسبند، با افزایش عدد ویر، افزایش پارامتر برخورد و کاهش نسبت لزجت سینماتیکی می‌تواند باعث جدایش آن‌ها از هم بعد از برخورد شود.

همچنین نتیجه می‌شود که افزایش عدد ویر، عدد رینولدز یا نسبت چگالی یا کاهش نسبت لزجت سینماتیکی تعداد نوسان و زمان رسیدن به تعادل را زیاد می‌کند. به علاوه با افزایش پارامتر برخورد تا قبل از جدایش میزان زمان حرکت چرخشی قطره حاصله زیاد می‌شود. در ضمن با توجه به نتایج قسمت قبل نتیجه می‌شود که افزایش عدد ویر، عدد رینولدز و نسبت چگالی و کاهش نسبت لزجت سینماتیکی دامنه نوسان و میزان تغییر شکل قطره حاصل را زیاد می‌کند. همچنین با مشاهده خطوط جریان ملاحظه می‌شود که در بررسی اعداد ویر، رینولدز، چگالی و نسبت لزجت سینماتیکی دارای دو محور تقارن است و در هر قسمت گردابه‌ای تشکیل شده است. در نسبت قطر و سرعت نسبی به دلیل اینرسی بیشتر یک قطره نسبت به دیگری قطرات به یک طرف هدایت می‌شوند و خطوط جریان نشان دهنده حرکت گاز است.



شکل ۹ تأثیر تغییر نسبت سرعت برخورد (خط ممتد: $U_1/U_{ref} = 1/3$ ، خط چین: $U_1/U_{ref} = 1/4$ ، خط نقطه: $U_1/U_{ref} = 1/5$)

۶- مراجع

[6] K.N. Premnath, J. Abraham, Simulations of binary drop collisions with a multiple-relaxation-time lattice-Boltzmann model, *Physics of Fluids*, Vol. 17, 2005, 122105.

[7] Kai Sun, Ming Jia, Tianyou Wang, Numerical investigation of head-on droplet collision with lattice Boltzmann method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, 2013, pp. 260-275

[8] MC Sukop, DT Thorne, Jr. Lattice Boltzmann modeling, an introduction for geoscientists and engineers. Berlin: Springer, 2005.

[9] T. Lee, Effects of incompressibility on the elimination of parasitic currents in the lattice Boltzmann equation method for binary fluids, *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 58, 2009, pp. 987-994.

[10] X. He, S. Chen, R. Zhang, A lattice Boltzmann scheme for incompressible multiphase flow and its application in simulation of Rayleigh-Taylor instability, *Journal of Computational Physics*, Vol. 152 (2), 1999, pp. 642-663.

[1] M. Orme, Experiments on droplet collisions, bounce, coalescence and disruption, *Prog. Energy Combust Journal. Sci.*, Vol. 23, 1997, pp. 65-79.

[2] Qian, C.K. Law, Regimes of coalescence and separation in droplet collision, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 331, 1997, pp. 59-80

[3] T. Inamuro, T. Ogata, S. Tajima, N. Konishi, A lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density differences, *Journal of Computational Physics*, Vol. 198, 2004, pp. 628-644.

[4] B.Sakakibara, T. Inamuro, Lattice Boltzmann simulation of collision dynamics of two unequal-size droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, 2008, pp. 3207-3216.

[5] M. Dai, D.P. Schmidt, Numerical simulation of head-on droplet collision: Effect of viscosity on maximum deformation, *Physics of Fluids*, Vol. 17, 2005, 041701.