

شبیه‌سازی عددی سقوط و فروپاشی یک قطره منفرد به وسیله مدل چندفازی میدان فازی بقایی روش شبکه بولتزمن

یاسر جعفری^{۱*}، محمد طیبی رهنی^۲، محمدرضا سلیمی^۳، رینهارد میلر^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران

۴- استاد، گروه بیوفیزیک ماده نرم، دانشگاه صنعتی دامشتارت، آلمان

*نویسنده مخاطب

چکیده

در این مقاله سقوط و فروپاشی یک قطره منفرد به وسیله مدل چندفازی میدان فازی بقایی روش شبکه بولتزمن شبیه‌سازی شده است. ابتدا مدل میدان فازی بقایی در روش شبکه بولتزمن به طور مختصر توضیح داده شده است. سپس، کد توسعه داده شده در این مطالعه با استفاده از نتایج پژوهش‌های قبلی مقایسه شده که نتایج عملکرد مطلوب این مدل برای شبیه‌سازی مسئله حاضر را نشان می‌دهد. در پایان، تاثیر عوامل و متغیرهای مختلف مانند خواص سیال و عوامل محیطی بر سقوط و فروپاشی یک قطره منفرد گزارش نشان می‌دهد. با استفاده از این نتایج می‌توان در مورد نحوه سقوط و فروپاشی قطره در کاربردهای صنعتی تصمیم گرفت و شرایط مناسب را انتخاب کرد.

واژه‌های کلیدی: میدان فازی بقایی - روش شبکه بولتزمن - سقوط قطره - قطرات اقماری

۱- مقدمه

این با توجه به کاربرد گسترده جریان‌های چند فازی و به ویژه جریان‌های دو فازی در علم و صنعت، دانش عمیق فیزیک و دینامیک این پدیده از اهمیت حیاتی برخوردار است. این کاربردها اتمیزه کردن در محفظه‌های احتراق، موتورهای پیل سوختی، میکروسیالات، چاپگرهای جوهر افشان و غیره است [۱]. سیستم‌های میکروسیالات قطره‌ای به دلیل کاربردهای بی‌شماری که در میکروسیالات‌های زیست پزشکی و پلتفرم‌های کشف/تحويل دارو دارند، حجم زیادی از تحقیقات را به خود جلب کرده‌اند [۲]. یکی از مهم‌ترین مشکلات در چنین سیستم‌هایی بررسی تغییر شکل، ادغام و شکسته شدن قطرات درون کانال است.

شبیه‌سازی عددی جریان‌های چند فازی، بخش مهمی از مطالعه سیستم‌های مهندسی است. روش سنتی برای مدل‌سازی چنین جریان‌هایی، گسسته‌سازی معادلات ناویر-استوکس و استفاده از یک تکنیک مناسب برای مدل‌سازی مرز مشترک بین فازهای مختلف است. این روش‌ها شامل دو دسته روش‌های ردیابی سطح مشترک (Interface Tracking) و روش‌های صید سطح مشترک (Interface Capturing) می‌باشد [۳]. روش دیگری که در سال‌های اخیر رایج شده است، روش بولتزمن شبکه (LBM) است که یک

مدل جنبشی مرتبه کاهش یافته است و معادلات جنبشی مزوسکوپی را در ساختار شبکه حل می‌کند. از این‌رو، روش شبکه بولتزمن یک روش شبیه‌سازی مناسب برای جریان‌های چندفازی به حساب می‌آید. مزیت اصلی روش شبکه بولتزمن در شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی این است که ردیابی و جابجایی سطح مشترک صریح دو فاز ضروری نیست و توپولوژی‌های سطحی پیچیده در جریان‌های بسیار پیچیده را قابل ترمیم می‌کند [۴]. مدل‌های معروف و پرکاربرد چند فازی پیشنهاد شده‌اند که می‌توانند به چهار دسته اصلی طبقه‌بندی شوند: مدل گرادیان رنگ، مدل مبتنی بر مدل پتانسیل بین‌ذره‌ای (شبه پتانسیل)، انرژی آزاد و مدل تئوری جنبشی [۵].

یکی از مدل‌های معروف در خانواده انرژی آزاد، مدل میدان فازی است. در یک مدل میدان فاز، انرژی آزاد نه تنها خواص تعادل را تعیین می‌کند، بلکه به شدت بر دینامیک سیستم چند فازی تأثیر می‌گذارد. انتقال مقادیر فیزیکی را می‌توان با یک نظریه هیدرودینامیکی تعمیم یافته به انرژی آزاد مرتبط کرد. از این‌رو، مدل‌های میدان فاز یک مبنای فیزیکی محکم برای جریان‌های چند فازی دارند، که در تضاد با روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی سنتی است [۶]. دو روش شناخته شده برای صید مرز مشترک در این مدل یعنی معادله کان-هلیارد (Cahn-Hilliard) و معادله آلن - کان (Allen-Cahn) وجود دارد. برای معادله کان-هلیارد صرفنظر از خاصیت بقای جرم آن، باید عبارت مشتق مرتبه چهارم گسسته‌سازی شود که نیازمند بررسی دقیق است. درحالی‌که، معادله آلن-کان فقط شامل عبارات مشتق مرتبه دوم است. به طرز جالب توجهی، چيو و لین (Chiu & Lin) هر دو مزیت معادلات کان-هلیارد و آلن-کان را با هم ترکیب کردند [۷]. بر همین اساس، فخاری و همکاران [۸] یک روش شبکه بولتزمن ساده و کارآمد برای جریان‌های چندفازی غیر محلول در هم ارائه دادند که توانایی مدل کردن سیستم‌های با نسبت چگالی و لزجت بالا را دارد. این مدل بر مبنای مرز مشترک پخش (Diffuse Interface) در مدل میدان فازی استوار است. این مدل علاوه بر پایداری و استحکام، روشی ساده است و از حل معادله بواسون فشار و محاسبه مشتق چهارم چگالی در معادله کاهن-هیلیارد بی‌نیاز است. در واقع این مدل با معرفی معادله بقایی برای میدان فازی به سادگی مرز مشترک فازها را ردیابی می‌کند. این مدل علاوه بر دو تابع توزیع غیرموضعی که در اکثر مدل‌های چندفازی روش شبکه بولتزمن

$$\Theta = -\sqrt{\frac{2\beta}{\kappa}} \cos \theta, \quad (5)$$

$$\kappa = 3\sigma \frac{W}{2},$$

$$\beta = \frac{12\sigma}{W},$$

که در آن σ کشش سطحی است.

۲-۲- معادلات هیدرودینامیکی

برای یک جریان چندفازی همدمای تراکم‌ناپذیر، معادلات ناویر-استوکس عبارتند از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0, \quad (6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right] \right) + \mathbf{F}, \quad (7)$$

که در آن چگالی موضعی مایع، μ ویسکوزیته موضعی مایع و p فشار ماکروسکوپی است. همچنین، \mathbf{F} نیروی خارجی است که به سیال وارد می‌شود. در این مطالعه، نیرو از دو قسمت تشکیل شده است:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_b, \quad (8)$$

که در آن \mathbf{F}_b نیروی حجمی و \mathbf{F}_s نیروی کشش سطحی است. ژاکمین رابطه زیر را برای نیروی کشش سطحی پیشنهاد کرد:

$$\mathbf{F}_s = \mu_\phi \nabla \phi, \quad (9)$$

$$\mu_\phi = 4\beta\phi(\phi-1)(\phi-1/2) - \kappa \nabla^2 \phi.$$

\mathbf{F}_b به صورت زیر است:

$$\mathbf{F}_b = (\rho_H - \rho_L) \mathbf{G}, \quad (10)$$

که در آن \mathbf{G} شتاب گرانش، ρ_H و ρ_L به ترتیب چگالی فاز سنگین تر و سبک تر هستند. توجه داشته باشید که چگالی‌ها و نیروها موضعی هستند. بود.

۲-۳- روش عددی

در اینجا ما از روش شبکه بولتزنن ارایه شده برای میدان فازی بقای پیشنهاد شده توسط فخاری و همکاران استفاده کردیم. برای حل معادلات تعقیب مرز مشترک و هیدرودینامیک. ثابت می‌شود که معادله شبکه بولتزنن زیر می‌تواند معادله (۱) را برای میدان فازی بقایی را بازیابی کند که عبارت است از:

$$h_\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{e}_\alpha \Delta t, t + \Delta t) = h_\alpha(\mathbf{x}, t) - \frac{h_\alpha(\mathbf{x}, t) - h_\alpha^{eq}(\mathbf{x}, t)}{\tau_\phi + 1/2}, \quad (11)$$

که در آن τ_ϕ زمان آرامش فاز مورد نظر، h_α تابع توزیع میدان فاز و e_α مجموعه سرعت ماکروسکوپی است. α مربوط به جهت سرعت‌های شبکه می‌باشد که در این مطالعه بر حسب شبکه D2Q9 تعریف شده است. در این مدل، تابع توزیع تعادل برای میدان فاز عبارت است از:

$$h_\alpha^{eq} = \phi \Gamma_\alpha + w_\alpha \frac{M}{c_s^2} \left[\frac{4}{w} \phi(1-\phi) \right] (\mathbf{e}_\alpha \cdot \hat{\mathbf{n}}), \quad (12)$$

که در آن:

$$\Gamma_\alpha = w_\alpha \left[1 + \frac{\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})^2}{c_s^4} - \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}}{2c_s^2} \right], \quad (13)$$

و $c_s = C / -3$ سرعت صدا، w_α ضرایب وزنی و M تحرک سیستم است که به زمان آرامش به صورت زیر مرتبط می‌شود:

$$M = \tau_\phi c_s^2 \Delta t. \quad (14)$$

معادله (۱۱) در دو مرحله حل می‌شود: برخورد و انتشار. پس از مرحله انتشار، میدان فاز به صورت زیر به روز می‌شود:

وجود دارد، فقط یک متغیر غیر موضعی (متغیر میدان فازی) دارد. این در صورتی است که در سایر مدل‌ها سه یا چهار متغیر غیر موضعی وجود دارد. همچنین، تمام گسسته‌سازی‌ها از نوع معمولی بوده نیازی برای استفاده از گسسته‌سازی‌های جهت‌دار و مخلوط برای پایدار نمودن سیستم نیست [۹].

در مطالعه حاضر، با استفاده از مدل میدان فازی بقایی بکار گرفته شده توسط فخاری و همکاران [۸] سقوط یک قطره تحت نیروی جاذبه و نحوه فروپاشی آن در شرایط مختلف بررسی شده است. برای این کار یک قطره تحت اثر نیروی جاذبه در یک محفظه مستطیلی دوبعدی با شرایط مرزی دیواره جامد در بالا و پایین و مرزهای متناوبی (پریودیک) در دیواره‌های کناری در نظر گرفته شده است. جزئیات نحوه فروپاشی و روند تغییرات سرعت و مرکز جرم قطره براساس اعداد بی بعد مربوطه مطالعه خواهد شد.

۲- مدل‌سازی عددی

در دو دهه گذشته، بسیاری از تحقیقات بر روی دینامیک قطره با استفاده از روش شبکه بولتزنن انجام شده است. در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷، فخاری و همکاران [۱۰-۱۳] یک مدل مناسب برای جریانهای چند فازی به نام مدل میدان فاز بقایی، که به طور کامل دینامیک قطره را در بر می‌گیرد، ایجاد کردند. در این بخش، ابتدا جهت شناخت درست روش میدان فازی بقایی توضیح مختصری درباره روابط و معادلات تسخیر مرز مشترک و هیدرودینامیکی مورد استفاده در این مدل در حالت حل‌های عددی بر پایه معادلات ناویر ارائه شده است. سپس، نحوه اعمال این مدل در روش شبکه بولتزنن توضیح داده شده است.

۲-۱- معادلات تسخیر مرز مشترک

برای دو روش شناخته شده برای استخراج روابط وجود دارد که عبارتند از معادله کاهن-هلیارد و معادله آلن-کاهن. در مدل بقایی که توسط مرجع [۱۳] برای سیستمی حاوی سیال دوجزئی غیرقابل تراکم معرفی شده است، معادله حاکم برای تعقیب جبهه به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left[M \left(\nabla \phi - \frac{4}{W} \phi(1-\phi) \hat{\mathbf{n}} \right) \right], \quad (1)$$

که ϕ متغیر میدان فاز مرز پخش با مقدار صفر در فاز سبک تر و یک در فاز سنگین تر است، \mathbf{u} بردار سرعت ماکروسکوپی است، t زمان است، W ضخامت رابط است، M تحرک، و $\hat{\mathbf{n}}$ بردار یکه عمود بر مرز مشترک است که جهت مثبت آن به سمت فاز سنگین تر باشد. بنابراین:

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}, \quad (2)$$

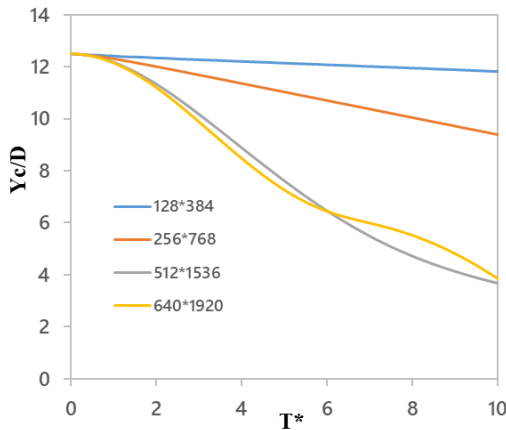
همچنین فرض می‌شود که $\phi(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \left[1 - \tanh \left(\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0|}{W/2} \right) \right], \quad (3)$$

که در آن مشخصات میدان فاز تعادل در \mathbf{x}_0 واقع شده است و به عنوان یک شرط اولیه برای ϕ حاصل از به حداقل رساندن انرژی \mathcal{E} ; سیستم استفاده می‌شود. ژاکمین (Jacqmin) برای اعمال زاویه تماس، θ ، در یک مرز جامد، شرایط تر شدن را پیشنهاد کرد. توجه داشته باشید ϕ_w میدان فاز در دیواره است، و $\hat{\mathbf{n}}_w$ بردار یکه دیوار است، یعنی:

$$\hat{\mathbf{n}}_w \cdot \nabla \phi \Big|_{\text{w}} = \Theta \phi_w (1 - \phi_w), \quad (4)$$

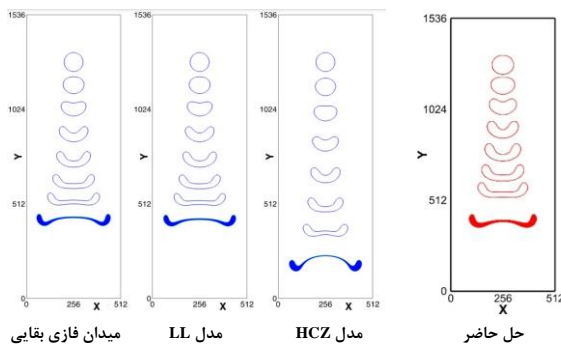
شبیه‌سازی این مسئله است. البته اختلافاتی با بالا رفتن زمان بی بعد در شبکه انتخابی و شبکه ریزتر دیده می‌شود که دلیل آن پخش شدگی سیال و رفتار متفاوت قطرات اقماری یا تکه‌های در حال جدا شدن از قطره اصلی است که به دلیل اندازه کوچک آنها می‌توانند از اندازه شبکه تاثیر پذیر باشند و هر چه شبکه ریزتر شود، باز هم این اختلافات قابل رویت است.



شکل ۱- بررسی استقلال حل از شبکه

۲-۶- اعتبار سنجی

در مرجع [۱۲] مسئله مشابه با مسئله این پژوهش با استفاده از مدل مختلف شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار گرفته است. این ۳ مدل عبارتند از: هی، چن و ژانگ (He, Chen, and Zhang) که به اختصار HCZ نامیده شده، لی و لیو (Lee and Liu) که به اختصار LL نامیده شده و مدل میدان فازی بقای مشابه با مدل بکار گرفته شده در این پژوهش. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر برای مسئله سقوط قطره برای دو حالت مختلف از اعداد بی بعد کاملاً با حل‌های موجود در مرجع [۱۲] منطبق می‌باشد (شکل ۲ و ۳). از این رو، کد توسعه داده شده برای حل مسئله مورد نظر نتایج معتبری را بدست خواهد آورد.



شکل ۲- اعتبار سنجی مسئله سقوط قطره با شرایط $Re_H=20$, $Eo=100$ و $Re_l=10$

$$\varphi = \sum_{\alpha} h_{\alpha}. \quad (15)$$

چگالی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho = \rho_L + \varphi(\rho_H - \rho_L). \quad (16)$$

برای یک جریان چند فازی تقریباً غیرقابل تراکم، معادله شبکه بولتزمن [۴۵] عبارت است از:

$$\bar{g}_{\alpha}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_{\alpha} \Delta t, t + \Delta t) = \bar{g}_{\alpha}(\mathbf{x}, t) + \Omega_{\alpha}(\mathbf{x}, t) + F_{\alpha}(\mathbf{x}, t), \quad (17)$$

که در آن \bar{g}_{α} تابع توزیع هیدرودینامیکی است و Ω_{α} یک عملگر برخورد است. باز هم، این معادله را می‌توان با استفاده از رویکرد جریان-برخورد حل کرد. در معادله (۱۷)، جمله نیرویی است که برابر است با:

$$F_{\alpha} = \Delta t \left[(\Gamma_{\alpha} - w_{\alpha}) (\rho_H - \rho_L) c_s^2 + \Gamma_{\alpha} \mu_p \right] \quad (18)$$

$$(\mathbf{e}_{\alpha} - \mathbf{u}) \cdot \Delta \varphi + \Delta t \Gamma_{\alpha} (\mathbf{e}_{\alpha} - \mathbf{u}) \cdot \mathbf{F}.$$

با استفاده از مدل زمان آرامش چندگانه برای عملگر برخورد، Ω_{α} عبارت است از:

$$\Omega_{\alpha} = -\mathbf{M}^{-1} \hat{\mathbf{S}} \mathbf{M} (\bar{g}_{\alpha} - \bar{g}_{\alpha}^{eq}), \quad (19)$$

که در آن:

$$\bar{g}_{\alpha}^{eq} = g_{\alpha}^{eq} - \frac{F_{\alpha}}{2}, \quad (20)$$

$$g_{\alpha}^{eq} = p w_{\alpha} + \rho c_s^2 (\Gamma_{\alpha} - w_{\alpha}). \quad (21)$$

که در آن \mathbf{M} یک نگاشت متعامد است که فضای فیزیکی را بر روی فضای ممنوم می‌نگارد و $\hat{\mathbf{S}}$ ماتریس قطری آرامش است. پس از حل معادله (۱۷) و با به دست آوردن \bar{g}_{α} می‌توان خواص هیدرودینامیکی را با استفاده از معادلات زیر محاسبه کرد:

$$\mathbf{u} = \frac{1}{\rho c_s^2} \sum_{\alpha} \bar{g}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha} + \frac{\Delta t}{2\rho} (\mathbf{F}_a + \mathbf{F}_b), \quad (22)$$

$$p = \sum_{\alpha} \bar{g}_{\alpha} + \frac{\Delta t}{2} (\rho_H - \rho_L) c_s^2 \mathbf{u} \cdot \Delta \varphi. \quad (23)$$

۲-۴- اعداد بی بعد

در این نوع از مسائل نسبت چگالی، نسبت ویسکوزیته و اعداد رینولدز و باند (Bond) یا اتووس (Eötvös) دارای اهمیت هستند. از طرفی، با ترکیب این اعداد می‌توان به جای این نسبت ویسکوزیته و یک عدد رینولدز، از دو عدد رینولدز برای سیال سنگین (قطره) و سیال سبک (محیط اطراف) برای بررسی مسئله استفاده نمود. از این رو، اعداد بی بعد بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\rho^* = \frac{\rho_h}{\rho_l} \quad (24)$$

$$Eo(Bo) = \frac{G_y (\rho_h - \rho_l) D^2}{\sigma} \quad (25)$$

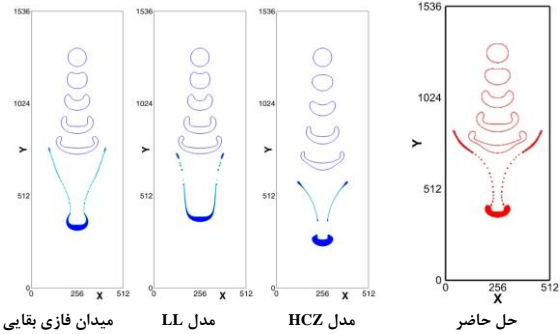
$$Re_h = \frac{\sqrt{G_y \rho_h (\rho_h - \rho_l) D^3}}{\sigma} \quad (26)$$

$$Re_l = \frac{\sqrt{G_y \rho_l (\rho_h - \rho_l) D^3}}{\sigma} \quad (27)$$

۲-۵- استقلال حل از شبکه

در شکل ۱ رفتار مرکز جرم قطره در حال سقوط در ۴ شبکه 128×384 ، 256×768 ، 512×1536 و 640×1920 با نسبت چگالی ۱۰ و در $Re_H=20$ ، $Eo=100$ و $Re_l=10$ مشاهده می‌شود. همانطور که از این شکل مشخص است، شبکه با اندازه 512×1536 شبکه مناسبی برای این

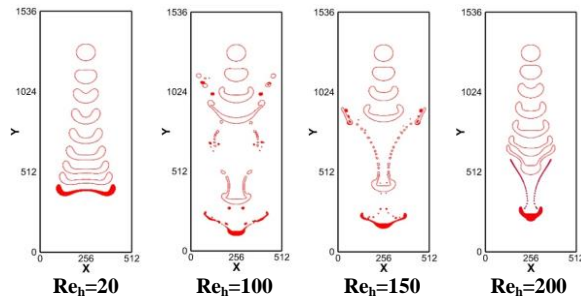
در شکل های ۶ و ۷ نحوه تغییر فیزیک این مسئله بر حسب افزایش عدد رینولدز سیال سنگین (قطره) مشاهده می شود. با افزایش این عدد زمان فروپاشی ابتدا کاهش می یابد زیرا قطرات اقماری جدا می شوند و تکه های کوچک سیال مقاومت کمتری در برابر سقوط و ادامه روند فروپاشی نشان می دهند. با ادامه روند افزایش، قطره اصلی به دلیل متمرکز شدن و قطرات اقماری کوچکتر جدا شده، اگرچه شکل قطره با رینولدزهای کوچک متفاوت است اما سرعت مرکز جرم آن مشابه حالت عدد رینولدز پایین است. با این حال از زمانی که هر گونه جدایشی از قطره و تشکیل قطرات کوچکتر سرعت افزایش می یابد. نکته جالب رفتار کمتر غیر خطی سرعت مرکز جرم قطرات در مقایسه با حالت افزایش عدد رینولدز فاز سبک است. این امر بدان معنی است که در کاربردهایی که هدف فروپاشی بیشتر قطره مانند کاربردهای صنعتی اسپری تغییرات بر روی سیال محیط موثرتر خواهد بود.



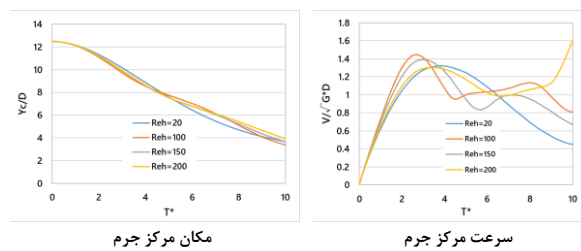
شکل ۳- اعتبارسنجی مسئله سقوط قطره با شرایط $Re_h=200, Eo=100$ و $Re_l=15$

۳- نتایج و بحث

برای بررسی مسئله سقوط قطره و تاثیر عوامی مختلف از تغییر اعداد بی بعد استفاده می شود. در شکل ۴ نحوه تغییر فیزیک این مسئله بر حسب افزایش عدد رینولدز سیال سبک مشاهده می شود. با افزایش این عدد زمان فروپاشی کاهش می یابد و قطرات اقماری تولید شده کوچکتر و با گستردگی توزیع مکانی اتفاق می افتد. در شکل ۵ مرکز جرم قطره و سرعت بی بعد آن قطره در حال سقوط و فروپاشی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود افزایش عدد رینولدز محیط تا قبل از فروپاشی و جدایش قطرات اقماری سرعت افزایش می یابد ولی با شروع فروپاشی به دلیل اندازه متفاوت قطرات اقماری جدا شده و کوچک شدن قطره اصل سرعت کاهش می یابد، اما این کاهش روند یکنواخت ندارد و با ادامه حرکت به دلایل مختلف از جمله جدا شدن قطرات با اندازه مختلف و برخورد احتمالی آنها سرعت حالت آشوبناکی دارد. مرکز جرم نیز بعد از فروپاشی رفتاری متفاوت دارد.

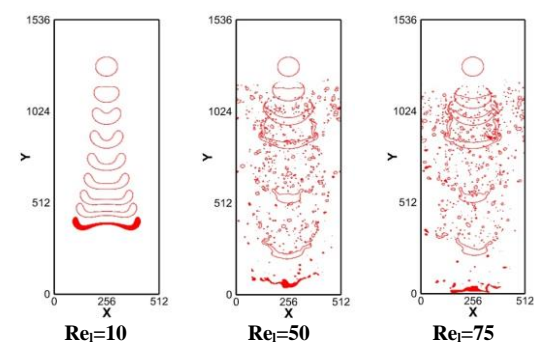


شکل ۶- تاثیر افزایش عدد رینولدز فاز سنگین (قطره) بر نحوه سقوط و فروپاشی قطره با شرایط $Re_l=10$ و $Eo=100$

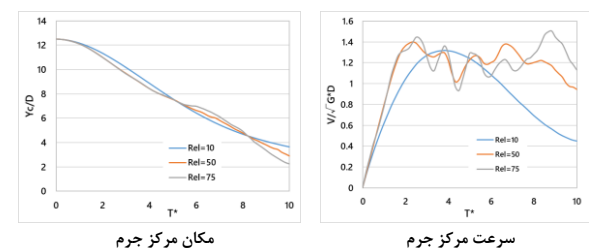


شکل ۷- تاثیر افزایش عدد رینولدز فاز سنگین (قطره) بر نحوه سقوط و فروپاشی قطره با شرایط $Re_l=10$ و $Eo=100$

در شکل های ۸ و ۹ نحوه تغییر فیزیک این مسئله بر حسب افزایش عدد اتووس مشاهده می شود. با افزایش این عدد زمان فروپاشی تقریباً تغییری نمی کند. تغییر در این حالت مربوط به افزایش اندازه قطرات اقماری و تکه های جدا شده با افزایش عدد اتووس است. این امر باعث می شود با افزایش عدد اتووس بعد از فروپاشی قطره اصلی کوچکتر و متمرکزتری می شود که باعث افزایش سرعت مرکز جرم خواهد شد. این حالت برای تغییر قابل کنترل سرعت و مکان مرکز جرم مناسبتر از دو حالت قبلی است.

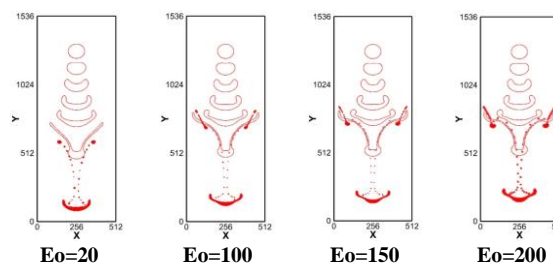


شکل ۴- تاثیر افزایش عدد رینولدز فاز سبک بر نحوه سقوط و فروپاشی قطره با شرایط $Re_h=20$ و $Eo=100$

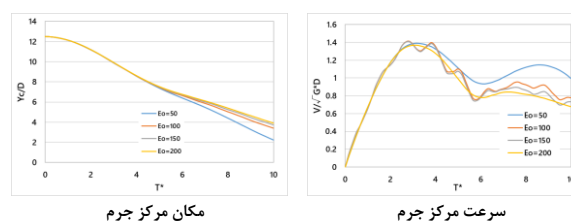


شکل ۵- تاثیر افزایش عدد رینولدز فاز سبک بر سرعت و مکان قطره در حال سقوط با شرایط $Re_h=20$ و $Eo=100$

- [8] A., Fakhari, and D., Bolster, "Diffuse Interface Modeling of Three-phase Contact Line Dynamics on Curved Boundaries: A Lattice Boltzmann Model for Large Density and Viscosity Ratios", *Journal of Computational Physics*, Vol. 334, pp. 620-638, 2017.
- [9] T. Lee, and 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*, Vol. 206, No. 1, pp. 16-47, 2005.
- [10] A. Fakhari and T. Lee, "Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method for immiscible fluids at high Reynolds numbers", *Phys. Rev. E - Stat Nonlinear, Soft Matter Phys.*, 87, pp. 023304, 2013.
- [11] M. Geier, A. Fakhari, and T. Lee, "Conservative phase-field lattice Boltzmann model for interface tracking equation", *Phys. Rev. E - Stat Nonlinear, Soft Matter Phys.*, 91, 2015.
- [12] A. Fakhari, M. Geier, and T. Lee, "A mass-conserving lattice Boltzmann method with dynamic grid refinement for immiscible two-phase flows", *J. Comput. Phys.*, 315, pp. 434-57, 2016.
- [13] Fakhari A., "Bolster D. Diffuse interface modeling of three-phase contact line dynamics on curved boundaries: A lattice Boltzmann model for large density and viscosity ratios", *J. Comput. Phys.*, 334, pp. 620-38, 2017.



شکل ۶- تاثیر افزایش عدد اتووس بر نحوه سقوط و فروپاشی قطره با شرایط $Re_l=10$ و $Re_n=20$



شکل ۷- تاثیر افزایش عدد اتووس بر نحوه سقوط و فروپاشی قطره با شرایط $Re_l=10$ و $Re_n=20$

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش سقوط و فروپاشی یک قطره منفرد به وسیله مدل چندفازی میدان فازی بقای از خانواده مدل های انرژی آزاد مربوط به روش شبکه بولتزمن شبیه سازی شد. نتایج این شبیه سازی نشان می دهد که با استفاده از تغییر خواص قطره و محیط اطراف چگونه می توان به نتیجه مطلوب در کاربردهای صنعتی شامل این فیزیک شد. بطور مثال اگر قصد از این سقوط، فروپاشی کامل قطره و اختلاط باشد بهتر است روی متغیرهای محیط اطراف و در نتیجه افزایش عدد رینولدز مربوط به آن تمرکز کرد.

۵- مراجع

- [1] M. Hosseini, H. Arasteh, H. Hassanzadeh Afrouzi, D. Toghraie, "Numerical simulation of a falling droplet surrounding by air under electric field using VOF method: A CFD study", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 28, no. 12, pp. 2977-2984, 2020.
- [2] A. Merdasi, S. Ebrahimi, A. Moosavi, M.B. Shafii, F. Kowsary, "Simulation of a falling droplet in a vertical channel with rectangular obstacles", *European Journal of Mechanics / B Fluids*, 2017.
- [3] G. Soligo, A. Roccon, and A. Soldatia, "Coalescence of surfactant-laden drops by Phase Field Method," *Journal of Computational Physics*, vol. 376, pp. 1292-1311, 2019.
- [4] N. Davea and T. Joshi, "A concise review on surfactants and its significance," *International Journal of Applied Chemistry*, vol. 13, no. 3, pp. 663-672, 2017.
- [5] T. Sudhakar and A.K. Das, "Evolution of Multiphase Lattice Boltzmann Method: A Review," *J. Inst. Eng. India Ser. C*, vol. 101, pp. 711-719, 2020.
- [6] H. Liu and Y. Zhang, "Phase-field modeling droplet dynamics with soluble surfactants", *Journal of Computational Physics*, vol. 229, pp. 9166-9187, 2010.
- [7] P.-H. Chiu and Y.-T. Lin, "A Conservative Phase Field Method for Solving Incompressible Two-phase Flows", *Journal of Computational Physics*, Vol. 230, No. 1, pp. 185-204, 2011.