



شبیه سازی برخورد قطره با فیلم نازک مایع به کمک مدل چندفازی شبه پتانسیل

سید میثم خاتون آبادی¹، محمود اشرفی زاده^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 841568311، cc.iut.ac.ir، mahmud@

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 دی 1394

پذیرش: 16 بهمن 1394

ارائه در سایت: 03 اسفند 1394

کلید واژگان:

برخورد قطره

دوفازی

شبیه پتانسیل

لایه ی تاج شکل

چکیده

در این پژوهش استفاده از روش نیرویی اختلاف دقیق در مدل دوفازی شبه پتانسیل برای شبیه سازی پدیده برخورد قطره با فیلم نازک مایع در نسبت چگالی 1000 پیشنهاد شده است و اثرات نیروهای اینرسی، کشش سطحی و گرانش بوسیله اعداد بدون بعد رینولدز، وبر و باند به طور دقیق بررسی شده اند. برای این منظور نرم افزار متن باز پالابوس توسعه داده شده و روش اختلاف دقیق در آن اعمال شده است. نتایج شبیه سازی در اعداد رینولدز و وبر مختلف نشان می دهد که عدد وبر تاثیر بسیار کمی بر روی شعاع لایه تاج شکل دارد، در حالی که عدد رینولدز با شعاع تاج رابطه مستقیم دارد. ارتفاع تاج نیز با افزایش اعداد بدون بعد رینولدز و وبر افزایش پیدا می کند. بعلاوه مقایسه نتایج شبیه سازی حاصل از مدل شبه پتانسیل با مدل انرژی آزاد نشان می دهد که شکل تاج علاوه بر اعداد بدون بعد به مقدار کشش سطحی نیز وابسته است به طوری که با افزایش قابل توجه کشش سطحی و مقادیر اعداد بدون بعد یکسان ضخامت سر تاج افزایش می یابد. اثرات نیروی گرانش بوسیله عدد باند مورد تحقیق قرار می گیرد. براساس نتایج حاضر ارتفاع تاج بصورت قابل توجهی تحت تاثیر عدد باند قرار می گیرد. هنگامی که عدد باند کم می شود، شعاع و ارتفاع تاج افزایش می یابد. در نتیجه مدل پیشنهاد شده که قابلیت استفاده در نسبت چگالی بالا را داشته و در عین حال جریان پارازیتی کمی تولید می کند، می تواند برای بسیاری از مسائل دوفازی دیگر نیز مورد استفاده قرار گیرد.

Simulation of Droplet Impact on a Thin Liquid Film Using the Pseudo-potential Multiphase Model

Seyyed Meysam Khatoonabadi, Mahmud Ashrafizaadeh*

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* P.O.B. 841568311 Isfahan, Iran, mahmud@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 January 2016
Accepted 05 February 2016
Available Online 22 February 2016

Keywords:

Droplet impact
Multiphase
Pseudo-potential
Crown layer

ABSTRACT

In this research, the use of the exact difference method forcing scheme in the pseudo-potential multiphase model is suggested for the simulation of a droplet impact on a thin liquid film at a density ratio of 1000, and the effect of inertia, surface tension, and gravity forces are considered by means of their corresponding non-dimensional numbers (i.e. the Reynolds, Weber, and Bond numbers). For this reason, the Palabos open source software is modified by implementing the exact difference method in it. The results of our simulations in different Reynolds and Weber numbers show that the Weber number has a slight influence on the crown layer radius, meanwhile, the Reynolds number has a direct effect on the crown radius. The crown height is increased with an increase in the Reynolds and Weber numbers. Furthermore, the comparison between the pseudopotential model simulations and the free-energy model show that the crown shape is related to the surface tension; in addition to the non-dimensional numbers and with a noticeable increase in surface tension the crown tip becomes bigger. The influence of the gravity force is investigated through the Bond number. According to the results, the crown height is noticeably affected by the Bond number. When the Bond number decreases, the crown radius and height increase. Therefore, the proposed model with the potential of being used for multiphase problems with large density ratios while producing a low spurious current could be utilized for a wide variety of other multiphase problems as well.

1- مقدمه

ورتینگتون [1] را می توان یکی از اولین افرادی دانست که به صورت دقیق دینامیک برخورد قطره را مورد تحلیل قرار داد. پس از آن مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده است ولی به دلیل گستردگی پارامترهای موثر در این پدیده همواره به عنوان یک موضوع چالشی توجه بسیاری را به خود معطوف ساخته است. بیشتر تحقیقات انجام گرفته در مورد برخورد قطره با سطح جامد بوده است [2-4].

در حالت کلی پس از برخورد قطره با سطح مایع سه پدیده برگشت به

پدیده برخورد قطره با سطح جامد و مایع علاوه بر طبیعت در صنعت نیز کاربرد فراوانی دارد. به عنوان نمونه برخورد قطره با پره های توربین که باعث خوردگی آن ها می شود، تزریق سوخت به صورت پاشش اسپری در محفظه احتراق و جت جوهر در چاپگرها نمونه های مختلفی هستند که این پدیده در آن ها قابل مشاهده است. در تمام این موارد جریان دو فازی و یا دو جزئی وجود دارد که بررسی و تحلیل آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

Please cite this article using:

S. M. Khatoonabadi, M. Ashrafizaadeh, Simulation of Droplet Impact on a Thin Liquid Film Using the Pseudo-potential Multiphase Model, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 8-16, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بالا¹، آمیختگی² و پاشش³ قابل مشاهده هستند [5]. در مطالعه‌های پیشین عوامل موثر مختلفی از جمله قطر و سرعت قطره هنگام برخورد با سطح مایع و ضخامت لایه فیلم در مشاهده هرکدام از این سه پدیده بطور گسترده بررسی شده‌اند [3,2]. یکی از مراجع اصلی در این زمینه پژوهش یارین و ویس [6] است. آن‌ها در بررسی‌های خود اثرات کشش سطحی و گرانش را بررسی نمودند در حالی که اثرات ویسکوزیته و تراکم ناپذیری صرف نظر شده‌اند. فرهم و ربیر [7] پایداری لبه ایجاد شده در لایه تاج شکل را مورد تحلیل قرار دادند. مطالعات رویسمن و تراپی [8] بر روی لحظات اولیه پس از برخورد معطوف شده است. آن‌ها نشان دادند که تغییرات شعاع در زمان‌های کوچک با قانون توانی رابطه دارد و وابستگی خاصی با ویسکوزیته و عدد رینولدز مشاهده نشده است. در تحقیقات جزراند و زالسکی [9] که به کمک روش حجم سیال صورت گرفته است، علاوه بر بررسی تغییرات اولیه شعاع پس از برخورد، مقدار بحرانی پارامتر سامرفیلد برای تعیین مرز بین پاشش و پخش تعیین شده است. البته مدل دوفازی مورد استفاده توسط آن‌ها برای نسبت چگالی کمتر از 500 قابل استفاده بود و آن‌ها بیان کردند که در نسبت چگالی بالا به علت وجود جریان پارازیتی فرایند حل ناپایدار می‌شود. دگان و همکاران [10] با صرف نظر نمودن از اثرات گرانش در شرایط خاص مطالعه -های خود را پیرامون لایه تاج شکل انجام دادند. در این مطالعه با انجام آزمایش تجربی قطرات با اعداد رینولدز و وبر مختلف سعی شده است که نموداری برای تعیین امکان و یا عدم امکان فرایند پاشش برای لایه‌ی فیلم نازک ترسیم گردد.

روش شبکه بولتزمن برای شبیه‌سازی سیالات مختلف در دهه‌های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [11]. جهت شبیه‌سازی جریان‌های چند فازی به‌طور گسترده از روش شبکه بولتزمن استفاده شده است. سه مدل دوفازی اصلی گردایان رنگ، شان - چن و انرژي آزاد هستند که در بین این سه مدل مدل انرژي آزاد تاکنون بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه مدل‌های موجود در این روش بسیار جدید و دچار نواقصی می‌باشند ولی برخی محققان با انجام برخی اصلاحات لازم از این مدل‌ها بهره گرفته‌اند.

برای اولین بار شان و چن [12] بر پایه 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 می‌افتد. زیربنای مدل اصلی شان - چن دچار نواقصی از جمله جریان پارازیتی بزرگ و نسبت چگالی پایین می‌باشد. در نتیجه محققان بسیاری جهت کاهش این نواقص مدل‌های مختلفی را پیشنهاد نمودند.

یوان و شافر [13] تغییرات اندکی در تابع شبه پتانسیل به وجود آوردند و دقت روش را برای محدوده وسیع تری از دما بهبود بخشیدند ولی همچنان مشکلاتی وجود داشت. کوپراشتوخ و همکاران [14] روش اختلاف دقیق⁴ برای توسعه نسبت چگالی و افزایش دقت مدل پیشنهاد نمودند. بررسی آن‌ها تنها به بیشینه نسبت چگالی قابل دستیابی براساس نمودار فازی محدود می‌شود. به عبارت دیگر این بررسی تنها مربوط به مسائل استاتیکی می‌شود و مساله دو فازی مشخصی با جزئیات مورد شبیه‌سازی قرار نگرفته است. پس از آن تقریباً بیشتر کارهای انجام گرفته با استفاده از روش اختلاف دقیق صورت گرفته است و پژوهشگران بسیاری تمرکز خود را بر روی این روش

معطوف نموده‌اند. متأسفانه به علت جدید بودن مدل ارائه شده چندفازی و برخی محدودیت‌ها در تغییر چگالی و کشش سطحی سیالات از این مدل بطور گسترده برای شبیه‌سازی مسائل مختلف از جمله برخورد قطره با فیلم مایع استفاده نشده است و این امر مستلزم بررسی‌های بیشتر است. یکی از کامل‌ترین بررسی‌ها در مورد این مدل توسط چن و همکاران [15] در مقاله مروری انجام گرفته است که جنبه‌های مختلف این مدل مورد ارزیابی و کنکاش واقع شده است.

شبیه‌سازی پدیده برخورد قطره با فیلم نازک مایع به ندرت بوسیله روش شبکه بولتزمن انجام گرفته است و بیشتر مطالعات نیز به کمک مدل انرژي آزاد انجام شده‌اند. در سال 2005 لی و لین [16] در مطالعات خود با در نظر گرفتن اعداد رینولدز کمتر از 500 و عدد وبر 8000 تغییرات شعاع در لحظات اولیه را بررسی نمودند و نشان دادند که تغییرات عدد رینولدز تاثیر قابل توجهی بر تغییرات شعاع در زمان‌های کوچک ندارد. آن‌ها در شبیه‌سازی از مدل نیرویی خود که مشابه مدل شبه پتانسیل است استفاده نمودند. اسدی و همکاران [17] در مورد تغییرات ارتفاع لایه‌ی تاج شکل در اعداد وبر مختلف با ضخامت فیلم مایع متفاوت به کمک مدل حجم سیال در روش شبکه بولتزمن تحقیق کردند. اثرات نسبت چگالی نیز در سال‌های اخیر مورد توجه برخی محققان قرار گرفته است. گو و وانگ [18] با شبیه‌سازی نسبت چگالی -های مختلف به کمک مدل انرژي آزاد به این نتیجه رسیدند که در نسبت‌های چگالی بسیار کمتر از 100 لبه لایه تاج شکل به سمت داخل خم می‌شود. همچنین شعاع نیز با کاهش نسبت چگالی کاهش می‌یابد. مینگ و جینگ [19] فرایند پاشش را برای فیلم نازک مایع متحرک به کمک مدل انرژي آزاد شبیه‌سازی نمودند. یکی از محدود پژوهش‌هایی که بوسیله‌ی مدل شبه -پتانسیل در این زمینه انجام شده توسط لی و لو [20] صورت گرفته است. در این مقاله با اعمال اصلاحات اندکی فرایند برخورد قطره در نسبت چگالی 500 شبیه‌سازی شده است. بررسی لی و لو بصورت کیفی بوده است و اثرات پارامترهای مختلف در نظر گرفته نشده است. اخیراً خاتون آبادی [21] در یک بررسی کلی از روش نیرویی پیشنهاد شده توسط گانگ و چنگ در مدل شبه -پتانسیل برای شبیه‌سازی چند مساله رایج بهره برده‌اند. براساس نتایج بدست -آمده، جریان پارازیتی و نوسانات سطح مشترک در نسبت چگالی بالا ضعف -های اصلی این مدل هستند. در نهایت ویو و همکاران [22] با استفاده از روش شبکه بولتزمن اثرات گرانش و نسبت چگالی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها تا حدود زیادی با نتایج گو و وانگ [18] مطابقت دارد. البته اثرات سایر پارامترها بصورت مشخص ارزیابی نشده‌اند.

در این مطالعه، برای نخستین بار روش نیرویی اختلاف دقیق در مدل شبه پتانسیل برای شبیه‌سازی پدیده برخورد قطره با سطح مایع پیشنهاد شده است. هدف اصلی ارزیابی عملکرد این مدل دوفازی در تحلیل رفتار لایه تاج ایجاد شده است. همچنین اثرات اعداد بدون بعد رینولدز، وبر و باند بر روی شعاع و ارتفاع لایه تاج شکل به طور کامل مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته‌اند. بعلاوه تغییرات شعاع در لحظات اولیه پس از برخورد قطره با سطح مایع با قانون توانی در هریک از موارد مقایسه شده است.

2- مدل شبه پتانسیل شان - چن

معادلات اصلی روش شبکه بولتزمن براساس حل دو معادله مشخص برای محاسبه پارامتر تابع توزیع f شکل گرفته است. این دو معادله شامل معادله برخورد و انتشار می‌باشند که معمولاً برای سادگی در یک معادله واحد نوشته می‌شوند. روش شبکه بولتزمن برای جریان همدمای سیالات با عملکرد برخورد

1- Bouncing
2- Coalescence
3- Splashing
4- Exact Difference Method (EDM)

عددی آن برابر ثابتی به نام g در نظر گرفته می شود. در این پژوهش تابع گرین به شکل معادله ی (8) در نظر گرفته شده است.

$$G(x, x') = \begin{cases} 2g & |x - x'| = 1 \\ \frac{g}{2} & |x - x'| = \sqrt{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

کوپراشتوخ [14] تابع شبه پتانسیلی با یک ضریب k که قابلیت استفاده از معادله حالت را برای نسبت چگالی بالاتر در اختیار قرار دهد را به صورت رابطه (9) پیشنهاد کرد.

$$\psi = \sqrt{(k\tilde{p} - \tilde{p}c_s^2)} \quad (9)$$

در این رابطه k به صورت $k = P_{cr}\Delta t^2/\rho_{cr}h^2$ است و برای سیالات مختلف حدود 0.01 به دست می آید [14]. P_{cr} و ρ_{cr} به ترتیب فشار و چگالی بحرانی معادله حالت مورد نظر هستند. همچنین \tilde{p} به وسیله ی معادله حالت مورد نظر جایگزین می گردد که در ادامه به آن اشاره می شود.

استفاده از شکل نیرویی معادله (7) با خطاهایی در پیش بینی مقدار چگالی فاز بخار همراه است. به همین دلیل در روش اختلاف دقیق کوپراشتوخ از ضرایب وزنی A مطابق معادله ی (10) استفاده می شود که باعث افزایش قابل توجه دقت نتایج می گردد.

$$F_i(x, t) = \frac{A\psi(x) \sum_i \left(\frac{G_i(x, x')}{G_1(x, x')} \psi(x, x') \right) e_i}{(1 - 2A) \sum_i \left(\frac{G_i(x, x')}{G_1(x, x')} \psi^2(x, x') \right) e_i} + \frac{ah}{ah} \quad (10)$$

در رابطه (10)، α برای شبکه دوبعدی با نه گره برابر 1.5 و مقادیر A بهینه برای هر معادله حالت به کمک شبیه سازی در یک دمای مشخص به دست می آید و برای هر معادله حالت متفاوت است. با توجه به جریان پارازیتی کمتر این روش و محدوده وسیع تر نسبت چگالی قابل استفاده می توان این روش نیرویی را برای شبیه سازی بسیاری از مسائل استفاده نمود. به دلیل جدید بودن این روش نیرویی در مدل شبه پتانسیل تاکنون بررسی های بسیاری بر روی آن انجام نگرفته است. البته این مدل نیز مانند سایر مدل های دوفازی دارای نواقصی می باشد که ناپایداری در سرعت های بسیار بالا از جمله مهمترین معایب آن است.

معادلات حالت فراوانی برای پیش بینی چگالی یک سیال در دماهای مختلف وجود دارند. 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 می آورد [21]. این معادله ی حالت به صورت رابطه ی (11) تعریف می شود.

$$\tilde{p} = \frac{c\tilde{p}RT(1 + b\tilde{p} + (b\tilde{p})^2 - (b\tilde{p})^3)}{(1 - b\tilde{p})^3} - a\tilde{p}^2 \quad (11)$$

در رابطه (11)، \tilde{T} دما و \tilde{p} چگالی بدون بعد سیال مورد نظر است. سیالات مورد استفاده برای تمام شبیه سازی ها مایع و بخار آب می باشند و مقادیر a و b و c به ترتیب 3.852462257، 0.130443884 و 2.785855166 در نظر گرفته شده است.

شتاب گرانش در شبکه بولتزمن به روش های مختلفی وارد مساله می گردد [15]. در ادامه از شکل ساده آن که در معادله (12) ارائه شده استفاده می گردد.

$$F_g = g \times \rho(x) \quad (12)$$

در معادله (12)، g شتاب گرانش است. در نتیجه اثرات گرانش برای

رایج باهاتنگار - گروس - کروک [23] و ترم نیروهای خارجی به صورت رابطه (1) بیان می شود.

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

که f تابع توزیع ذرات در یک مکان و زمان مشخص است. τ زمان آسایش، ΔF نیروی حجمی و f^{eq} تابع توزیع تعادلی می باشند که به صورت زیر محاسبه می شود.

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

در معادله ی (2)، c_s سرعت صوت شبکه، w_i ضرایب وزنی و e_i سرعت های گسسته در جهت های مختلف است. متغیرهای u و ρ سرعت و چگالی در گره مورد نظر هستند. در این معادله c_s سرعت صوت در شبکه بولتزمن است. مقدار سرعت صوت از رابطه $c_s = c/\sqrt{3}$ برای شبکه D2Q9 بدست می آید. که $c = \delta x/\delta t = 1$ با انتخاب $\delta x = c$ ، $\delta t = 1$ برای یک می شود. به عنوان مثال برای شبکه ی دوبعدی با نه گره و در روش اختلاف دقیق مقادیر سرعت های ذکر شده و ضریب وزنی هر گره به صورت رابطه ی (3) لحاظ می شوند.

$$e_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

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

در این مدل چگالی و مومنتوم نیز در هر تکرار بصورت زیر محاسبه می شوند.

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

$$\rho u = \sum_i e_i f_i + \frac{F\Delta t}{2} \quad (5)$$

ویسکوزیته در روش شبکه بولتزمن D2Q9 به صورت $\nu = (\tau - 0.5)/3$ به پارامتر زمان آسایش مرتبط می شود.

در روش اختلاف دقیق ترم نیروی حجمی به صورت معادله (6) در نظر گرفته می شود.

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

ترم نیرو در این مدل حائز اهمیت است و نقش مهمی ایفا می کند. شکل اولیه نیرو در مدل اصلی شان - چن به صورت معادله (7) است [4].

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

در این رابطه $\psi(x)$ تابع شبه پتانسیل یا جرم مؤثر نامیده می شود. در معادله (7)، x' گره نزدیک به گره ای است که محاسبات برای آن انجام می شود. همچنین $G(x, x')$ تابع گرین است که مقدار نیروی کنش و اندرکنش بین ذرات در همسایگی یکدیگر را وارد نیرو می کند. در مدل اصلی شان - چن این تابع اهمیت فراوانی دارد زیرا با تغییر آن نسبت چگالی حاصل تغییر می کند [12] ولی با وارد کردن معادله ی حالت در تابع شبه پتانسیل که برای اولین بار توسط یوان و شافتر [13] پیشنهاد شد، اثر این پارامتر از بین می رود و تنها کافی است که مقدار تابع گرین از مقدار مشخصی بیشتر باشد تا بتواند دو فاز را از هم جدا نماید و مانع اختلاط آن ها شود. به همین دلیل مقدار

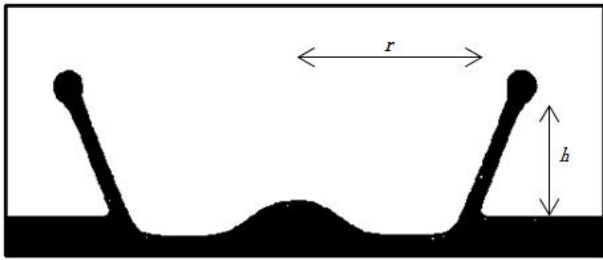


Fig. 1 Schematic crown shape

شکل 1 شکل شماتیک شکل تاج

همان طور که در شکل شماتیک 1 نشان داده شده است مقادیر شعاع مورد نظر r در هر لحظه براساس حداثی بین محلی که لایه از سطح فیلم جدا شده (شعاع خارجی آن) تا مرکز تاج و ارتفاع h نیز از سطح فیلم مایع تا بالاترین ناحیه ای که قبل از برآمدگی سر لایه ای تاج شکل (گردن لایه²) است محاسبه می گردند. شرایط مرزی در دیواره های سمت چپ و راست پیرویدیک بوده و دیواره بالا و پایین نیز دیواره جامد هستند لذا شرط مرزی عدم لغزش برای آن ها اعمال شده است شرایط مرزی دیواره های چپ و راست بصورت پیرویدیک هستند [20,18]. نسبت چگالی در تمام شبیه سازی ها برابر 1000 است و زمان آسایش نیز برابر یک می باشد.

4- اعتبارسنجی

در مدل شبه پتانسیل شان-چن کشش سطحی به طور مستقیم توسط کاربر وارد مسئله نمی شود و می بایست محاسبه گردد. کشش سطحی مشابه چگالی فازها به دمایی که در آن شبیه سازی انجام می گیرد بستگی دارد. لذا یکی از روش های اعتبارسنجی مدل چندفازی شبکه بولتزمن استفاده از آزمون لاپلاس است [25]. قانون لاپلاس بیان می کند که برای یک قطره مایع دایره ای شکل با شعاع R که در یک فاز دیگر در حال تعادل قرار دارد، اختلاف فشار (ΔP) در داخل و خارج قطره با شعاع آن به صورت زیر رابطه دارد.

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

در این رابطه σ کشش سطحی است. در نتیجه اگر قطرات ساکن با شعاع اولیه متفاوت در داخل بخار در دمای یکسان مورد شبیه سازی قرار گیرند و نمودار اختلاف فشار حاصل و معکوس شعاع آن ها ترسیم گردد می بایست یک خط مستقیم بدست آید. طبق قانون لاپلاس شیب خط اختلاف فشار برحسب معکوس شعاع 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. فشار و شعاع نهایی برای هر مورد در حالت تعادلی محاسبه شده است. برای این منظور یک قطره ساکن در شبکه 120×120 با مرزهای پیرویدیک شبیه سازی شده است.

شکل 2، نتایج مربوط به شبیه سازی در دماهای بدون بعد (T_r) 0.7 و 0.59 که به ترتیب دارای نسبت چگالی 110، 1000 می باشند را نشان می دهد. محور افقی مقادیر معکوس شعاع و محور عمودی اختلاف فشار داخل و خارج قطره را در واحد شبکه بولتزمن مشخص می کند. 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 بدست آمده نیز صحت نتایج حاصل را تایید می کنند زیرا با کاهش دما و افزایش نسبت چگالی، شیب نمودار افزایش یافته است. بطوری

چگالی مایع که 1000 برابر چگالی بخار است به همان مقدار بیشتر است. برای وارد نمودن اثرات گرانش می بایست ترم نیرویی دیگری به معادله بولتزمن افزوده گردد که برای این منظور نیروی گرانش مشابه معادله (7) به نیروی اندرکنش بین ذرات دو سیال که همان معادله (10) است افزوده می گردد.

با مقایسه ی معادلات مدل شبه پتانسیل با سایر مدل های مورد استفاده در بکه بولتزمن که جهت شبیه سازی مسائل دوفازی مورد استفاده قرار می گیرد، می توان به وضوح به سادگی اعمال آن در برنامه ی عددی پی برد. بعلاوه به دلیل تعداد معادلات کمتر سرعت حل در این مدل بسیار بیشتر از سایر مدل ها می باشد. که از مزایای مدل شبه پتانسیل است.

لازم به ذکر است که مقدار بهینه ضریب وزنی A در معادله (10) برای آب در معادله کارناهان - استارلینگ برابر 0.01 به دست آمده است. بعلاوه از آنجایی که مدل تک جزئی - دوفازی مورد استفاده قرار گرفته است در نتیجه برای حصول نسبت چگالی های مختلف می بایست دما تغییر نماید تا مطابق جدول ترمودینامیکی آب نسبت چگالی مختلفی بین بخار و مایع به وجود آید. برای سادگی دمای بدون بعد به صورت تقسیم دما بر دمای بحرانی آب $(T_r = T/T_{cr})$ بیان می گردد. براساس خواص فیزیکی آب با کاهش دما نسبت چگالی افزایش می یابد. از آنجا که در این پژوهش هدف بررسی پدیده برخورد قطره با فیلم مایع در نسبت چگالی 1000 است، بنابراین می بایست دما $T_r = 0.59$ در نظر گرفته شود.

برای شبیه سازی از برنامه ی متن باز پالابوس¹ استفاده شده و کد عددی آن جهت اعمال روش نیرویی اختلاف دقیق و معادله ی حالت کارناهان - استارلینگ توسعه داده شده است.

3- تعریف مسئله

در شبیه سازی فرایند برخورد قطره همان طور که زو و همکارانش [24] در بررسی های تجربی خود نشان دادند، برای جلوگیری از ورود اثرات دیواره باید طول ناحیه حل بیشتر از 5 برابر قطر قطره باشد. لذا برای تمام شبیه سازی ها طول ناحیه حل هشت برابر قطر قطره در نظر گرفته شده است تا بتوان علاوه بر جلوگیری از ورود اثرات دیواره تغییرات شعاع تاج تشکیل شده را اندازه گیری نمود. علاوه بر این، قطره با سرعت اولیه مشخص با فیلم نازک مایع در پایین ناحیه حل برخورد می کند (شکل 1). در این فرایند پارامترهای مختلفی از جمله قطر قطره D ، سرعت موثر قطره (سرعت قطره هنگام برخورد با سطح مایع) U ، چگالی و ویسکوزیته ی دو سیال ρ و μ ، کشش سطحی σ و ضخامت لایه فیلم H در نتایج حاصل موثر می باشند. برای لحاظ نمودن این پارامترها در بیشتر پژوهش های صورت گرفته از اعداد بدون بعد رینولدز (Re) و وبر (We) استفاده می شود که به ترتیب بصورت $Re = \rho U D / \mu$ و $We = \rho U^2 D / \sigma$ تعریف می شوند. همچنین عدد باند که نسبت نیروی گرانش به کشش سطحی است نیز $Bo = \rho D^2 g / \sigma$ تعریف می گردد. ضخامت بدون بعد لایه فیلم نیز بصورت تقسیم مقدار ضخامت به قطر قطره $(H^* = H/D)$ تعریف می گردد که در تمام شبیه سازی ها برابر 0.2 است. زمان بدون بعد نیز به کمک سرعت و قطر قطره به شکل $t^* = t \times U/D$ محاسبه می گردد. زمان شروع فرایند نیز از لحظه برخورد قطره با سطح مایع $t = 0$ سببه می گردد [19,16]. شعاع و ارتفاع بی بعد نیز به ترتیب h/D و r/D تعریف می شوند. که D و U قطر و سرعت قطره درست هنگام برخورد با سطح مایع است.

5- نتایج

در مطالعات قبلی اثرات پارامترهای مختلفی مورد تحقیق واقع شده است. اغلب نتایج موجود بر روی تاثیر یکی از این اعداد بدون بعد بر احتمال فرایند پاشش تمرکز کرده اند و رسم نمودارهای تغییرات شعاع و ارتفاع تاج در پژوهش های اندکی مورد ارزیابی قرار گرفته اند. در ادامه در قسمت اول اثر اعداد بدون بعد رینولدز و وبر بدون وجود شتاب گرانش بر تغییرات شعاع و ارتفاع لایه سیال جدا شده از سطح مورد بررسی قرار گرفته اند. در قسمت دوم تاثیر کشش سطحی بر روی شکل تاج بررسی می شود. علاوه تغییرات شعاع در اعداد بدون بعد در زمان های کم با قانون توانی مقایسه شده اند. در قسمت سوم با اعمال نیروی گرانش و ثابت قرار دادن اعداد رینولدز و وبر اثرات این نیرو به وسیله اعداد باند متفاوت در تغییرات شعاع و ارتفاع تاج مورد تحقیق و تحلیل قرار گرفته است.

5-1- اثر اعداد بدون بعد رینولدز و وبر

عدد رینولدز و وبر همانطور که قبلاً نیز اشاره شده به ترتیب معیاری از نسبت نیروهای اینرسی به لزجت و اینرسی به کشش سطحی هستند. با وجود تحقیقات فراوان پیرامون اثر این دو عدد بدون بعد بر نحوه تغییرات لایه جدا شده از سطح مایع، اثر همزمان آن ها بر شعاع و ارتفاع قسمت تاج شکل بصورت کامل مشخص نشده است.

در فرایند برخورد قطره با فیلم نازک مایع که بدون جدا شدن بخشی از لایه همراه باشد مقدار اعداد بدون بعد حائز اهمیت است. شکل 4 نحوه تغییر شکل قطره و ایجاد لایه ای از مایع را پس از برخورد قطره با $Re = 500$ و $We = 1000$ نشان می دهد. همان طور که از این شکل مشخص است از لحاظ فیزیکی قطره پس از برخورد نیروی اینرسی خود را به فیلم مایع منتقل می کند و سیال وارد شده به فیلم مایع به طرف پایین حرکت می کند. قطره با نیروی مومنتوم اولیه به علت نازک بودن فیلم بسیار سریع با دیواره پایین برخورد کرده و به سمت بالا بر می گردد. و در مرز بین قطره و فیلم شروع به رشد می نماید. پس از آن لایه ای ایجاد شده که بصورت تاج شکل است به دلیل نیروی اینرسی ارتفاع بیشتری پیدا می کند. به علت وجود نیروی کشش سطحی قسمت سر تاج بشکل برآمده تبدیل می شود و مادامی که نیروی اینرسی بسیار بیشتر از نیروی کشش سطحی و گرانش نباشد رشد این لایه بدون جدا شدن قطره کوچکی از تاج ادامه می یابد. البته این نیروی اینرسی پس از مدتی به دلیل مقاومت نیروهای لزجت، کشش سطحی و گرانش کم می شود و ارتفاع لایه کاهش پیدا می کند. لازم به ذکر است که در این شبیه سازی از نیروی گرانش صرف نظر شده است. اثرات هر کدام از این نیروها را می توان به کمک اعداد بدون بعد بررسی نمود.

یکی از ویژگی های مهم این روش تعیین شکل سطح مشترک در لحظات مختلف است. همان طور که در شکل 4 مشخص است سطح مشترک با وضوح بالایی قابل تشخیص است. این مساله در مدل های چندفازی دیگر شبکه بولتزن قابل مشاهده نیست و یکی از معایب آن ها به شمار می رود.

ابتدا لازم است اثرات تغییر اعداد رینولدز و وبر بر نحوه تغییرات شعاع در لحظات اولیه بررسی شود. در زمان بدون بعد کمتر از یک تغییرات این پارامتر برحسب شعاع با معادله $r/D = c\sqrt{t^*}$ ارتباط دارد که به آن قانون توانی¹ گویند. مقدار ضریب c به عوامل مختلفی بستگی دارد. جزراند و زالسکی [9] مقدار این ضریب را برای عدد رینولدز 1000 و وبر 8000 برابر

که مقدار کشش سطحی در نسبت چگالی 110 و 1000 به ترتیب 0.027 و 0.048 است.

جهت اعتبارسنجی نتایج عددی تغییرات شعاع تاج در زمان های مختلف هنگامی که $Re = 500$ و $We = 1000$ است اندازه گیری و رسم شده است. شکل 3، نمودار تغییرات زمانی شعاع را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی یارین و ویس [6] و شبیه سازی عددی گو و وانگ [18] نشان می دهد. در این نمودار محور افقی زمان بدون بعد و محور عمودی شعاع بدون بعد تاج را نشان می دهد. همان طور که مشخص است در بیشتر بازه زمانی نتایج با یکدیگر مطابقت قابل قبولی دارند. نتایج بدست آمده در این پژوهش در مقایسه با نتایج روش انرژی آزاد [18] با نتایج یارین و ویس [6] نزدیک تر می باشد. تنها اختلاف موجود در زمان های بسیار کوچک می باشد که در بخش بعد بطور کامل تری بررسی می گردد. البته متأسفانه داده های کافی جهت بررسی تغییرات شعاع در زمان بدون بعد کمتر از 0.5 در مراجع مذکور گزارش نشده است. به عبارت دیگر سایر مراجع بر روی دقت نتایج خود در زمان های بسیار کوچک بررسی دقیقی انجام ندادند.

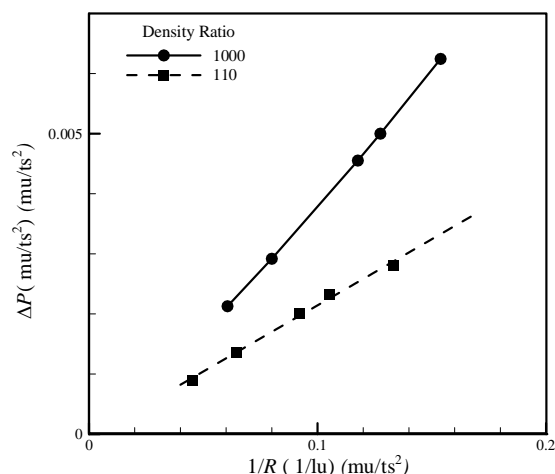


Fig. 2 Laplace test for two density ratios 110 and 1000.

شکل 2 آزمون لاپلاس برای دو نسبت چگالی 110 و 1000

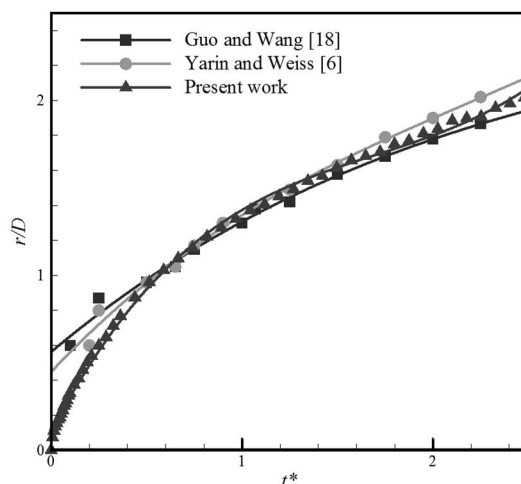


Fig. 3 Time evolution of the radius at the bottom of the crown

شکل 3 تغییرات زمانی شعاع در پایین تاج

1- Power Law

قانون توانی می توان نتیجه گرفت که این قانون معیار مناسبی برای پیش بینی تغییر شکل قطره در لحظات اولیه است. پیش از این نیز چندین محقق بر روی اثرات اعداد رینولدز مختلف بر روی تغییرات شعاع در زمان های بسیار کوچک بررسی انجام داده اند که نتایج بدست آمده در این پژوهش با نتایج آن ها مطابقت دارد. البته در صورتی که از ضرایب C کمتر استفاده شود دقت نتایج برای زمان های کوچک تر بیشتر می شود و در مقادیر نزدیک یک مقادیر شعاع با مقادیر بدست آمده از قانون توانی دچار اختلاف اندکی می گردد. لذا با توجه به مطالبی که تاکنون بیان شد می توان نتیجه گرفت که اختلاف موجود در نمودارهای تغییرات شعاع در شکل 3 نشان دهنده ی خطای موجود در مطالعه ی سایر محققین در زمان های بسیار کوچک است.

روند تغییرات شعاع در زمان های مختلف در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به نمودار حاصل می توان نتیجه گرفت که عدد و بر اثر بسیار کمی بر روی تغییرات شعاع دارد. البته با کاهش عدد و بر مقدار شعاع افزایش پیدا می کند ولی این افزایش بسیار اندک است. همچنین عدد رینولدز رابطه مستقیمی با شعاع لایه تاج شکل دارد. با مقایسه ی نمونه اصلی ($Re = 500$) و ($We = 1000$) با دو مورد دیگر کاملاً مشخص است که عدد رینولدز تاثیر به مراتب بیشتری بر روی شعاع تاج دارد. به همین دلیل در برخی مراجع تغییرات شعاع بطور مستقیم با عدد رینولدز سنجیده شده است. البته معادلات تئوری مشخصی برای این منظور تاکنون ارائه نشده است. در نتیجه به کمک رسم نمودارهای شعاع و ارتفاع تاج و بررسی بازه ی گسترده ای از اعداد بدون بعد می توان روابط تئوری برای این پدیده استخراج نمود.

بطور مشابه با ترسیم تغییرات ارتفاع تاج این نتیجه حاصل می شود که اثرات عدد رینولدز بر روی ارتفاع نیز بیشتر است. با افزایش عدد رینولدز ارتفاع تاج نیز بیشتر می شود بطوری که با 1.68 برابر شدن عدد رینولدز ارتفاع 1.50 برابر می شود. این در حالی است که با 1.50 برابر شدن عدد و بر مقدار ارتفاع 1.13 برابر می گردد. برخلاف شعاع، عدد و بر رابطه مستقیمی با ارتفاع تاج دارد و اثرات آن نیز قابل توجه است (شکل 7).

علاوه بر مقادیر ارتفاع، اعداد بدون بعد رینولدز و و بر در زمان رسیدن لایه تاج شکل به مقدار بیشینه ارتفاع نیز اثر دارند. مقایسه دو مورد اول نشان می دهد که با کاهش عدد و بر لایه زودتر به بیشینه خود می رسد. از نقطه نظر

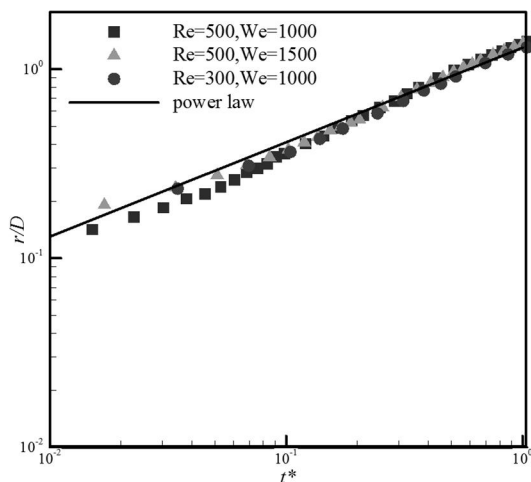


Fig. 5 Time evolution of the radius at initial times for different Reynolds and Weber numbers

شکل 5 تغییرات زمانی شعاع در زمان های اولیه برای اعداد رینولدز و و بر مختلف

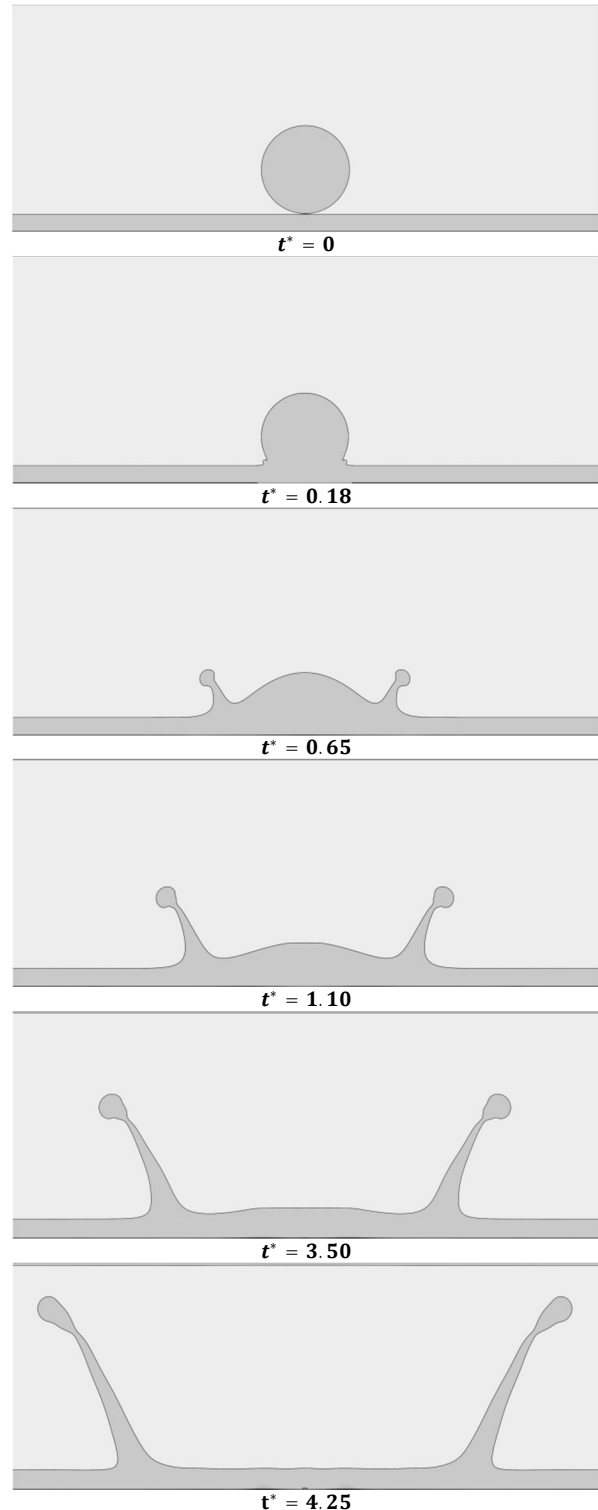


Fig. 4 Simulation of crown formation in different non-dimensional times $Re = 500$ و $We = 1000$

شکل 4 شبیه سازی تشکیل تاج در زمان های بدون بعد مختلف $Re = 500$ و $We = 1000$

1.1 گزارش کردند. شکل 5، نمودار لگاریتمی مقادیر شعاع بدون بعد در اعداد و بر و رینولدز مختلف را در زمان های کمتر از یک نشان می دهد. همان طور که مشخص است تغییرات اعداد رینولدز و و بر بر روی تغییرات شعاع اثر قابل توجهی ندارند و تنها در زمان های اولیه اختلاف اندکی بین نتایج دیده می شود. همچنین با در نظر گرفتن ضریب C برابر 1.3 و مقایسه نتایج حاصل با

سطحی از 0.005 فراتر نمی رود [16]. درحالی که مقدار کشش سطحی قابل استفاده در نسبت چگالی 1000 در این مدل 0.048 است که حدود 10 برابر بزرگتر می باشد. شکل 8 نتایج شبیه سازی مدل شبه پتانسیل (کار حاضر) و مدل انرژی آزاد [18] را در اعداد رینولدز و وبر یکسان $Re = 500$ و $We = 1000$ نشان می دهد. اگرچه همان طور که در بخش قبلی نیز اشاره شد مقدار شعاع تاج با یکدیگر اختلاف قابل توجهی ندارند (شکل 3) ولی شکل سر تاج در نتایج بدست آمده از روش شبه پتانسیل ضخیم تر است. از لحاظ فیزیکی نیز این ضخامت به دلیل کشش سطحی بیشتر در مدل مورد استفاده است. این در حالی است که اعداد بدون بعد رینولدز و وبر که معمولاً به عنوان اعداد بدون بعد اساسی جهت بررسی این پدیده استفاده می شوند در هر دو شبیه سازی برابر است. بنابراین در صورتی که مقدار کشش سطحی به طور قابل ملاحظه ای تغییر کند شکل تاج نیز تغییر می نماید اگرچه شعاع آن تغییر قابل توجهی پیدا نکند. از طرف دیگر با مقایسه نتایج دو روش کاملاً مشخص است که سطح مشترک در مدل شبه پتانسیل با وضوح بالاتری قابل تشخیص است و ضخامت آن نیز بسیار کمتر از مدل انرژی آزاد می باشد. این ویژگی برای شبیه سازی مسائل دوفازی جهت تشخیص سطح مشترک حائز اهمیت فراوانی است.

5-3- اثر عدد بدون بعد باند

در بسیاری از شبیه سازی ها جهت ساده کردن مساله اثرات گرانش صرف نظر شده است [9,2]. اثرات گرانش به کمک عدد باند قابل بررسی می باشد. بر اساس بررسی های انجام گرفته اگرچه در شرایط خاصی می توان از اثرات گرانش صرف نظر کرد ولی در حالت کلی این نیرو تاثیر بسیاری بر روی تغییر شکل تاج به خصوص در نسبت چگالی های کم دارد [22]. متأسفانه تحقیق های قبلی در این زمینه بسیار کلی بوده اند و اثرات گرانش به صورت دقیق مورد تحلیل قرار نگرفته است. در این قسمت با شبیه سازی سه عدد باند مختلف و رسم نمودارهای تغییرات شعاع و ارتفاع لایه تاج شکل برحسب زمان تاثیر گرانش بخوبی نشان داده می شود.

برای این قسمت با ثابت در نظر گرفتن اعداد رینولدز و وبر مشابه نمونه اولیه که مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است ($We = 1000$ و $Re = 500$) مقادیر شتاب گرانش تغییر می کند و اعداد باند به ترتیب صفر، 20 و 100 می باشند. ابتدا اثرات عدد باند بر روی تغییرات شعاع در لحظات اولیه در شکل 9 بررسی شده است. با توجه به نتایج حاصل کاملاً مشخص است که نیروی گرانش هیچ تاثیری بر روی تغییرات شعاع در این لحظات ندارد.

برخلاف لحظات اولیه، عدد باند اثر زیادی بر روی شعاع تاج ایفا می کند (شکل 10)، بطوری که با افزایش عدد باند مقدار شعاع کاهش می یابد. اگرچه در نمودار بدست آمده اختلاف مقادیر شعاع در زمان بدون بعد 6 حدود 0.4



Fig. 8 Comparison of crown shape at $t^* = 1$: Pseudopotential (right) and Free-Energy (left) [18] Models

شکل 8 مقایسه شکل تاج در $t^* = 1$: مدل های شبه پتانسیل (راست) و انرژی آزاد [18] (چپ)

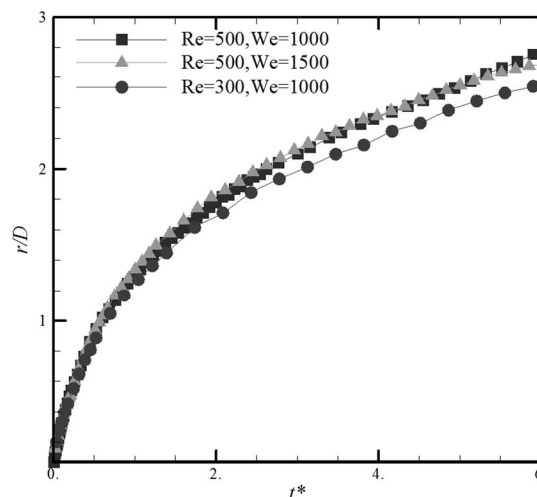


Fig. 6 Time evolution of the radius for different Reynolds and Weber numbers

شکل 6 تغییرات زمانی شعاع برای اعداد رینولدز و وبر مختلف

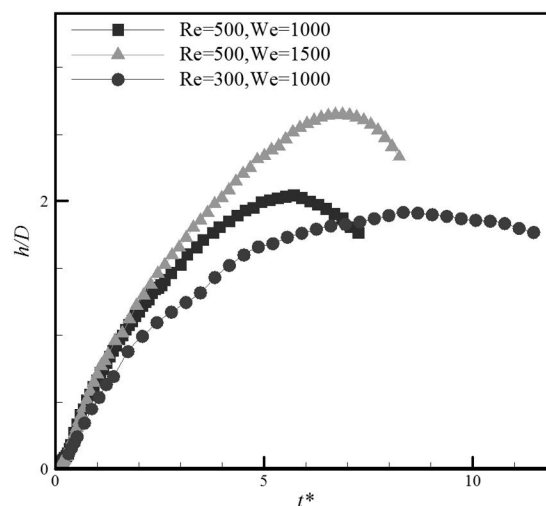


Fig. 7 Time evolution of the height for different Reynolds and Weber numbers

شکل 7 تغییرات زمانی ارتفاع برای اعداد رینولدز و وبر مختلف

فیزیکی کاهش عدد وبر به معنی افزایش نیروی کشش سطحی است که این نیرو با حرکت رو به بالای تاج مخالفت می کند لذا سریعتر به بیشینه مقدار خود رسیده و ارتفاع آن به تدریج کاهش می یابد. کاهش عدد رینولدز باعث می شود که فرایند بسیار آهسته تر اتفاق بیافتد. بنابراین زمان رسیدن به بیشینه مقدار نیز بیشتر می گردد. دلیل این تغییر در سرعت نیز به دلیل کاهش در سرعت برخورد قطره است که منتج به کمتر شدن مقدار نیروی اینرسی اولیه قطره می شود. بنابراین علاوه بر این که با کاهش عدد رینولدز مقدار ارتفاع کمتر می شود، زمان رسیدن به بیشینه ارتفاع نیز بیشتر می گردد.

5-2- اثر کشش سطحی

یکی از ویژگی های این مدل قابلیت شبیه سازی جریان هایی با کشش سطحی بالا است. از آن جا که با افزایش کشش سطحی، مقدار جریان پارازیتی و در نتیجه پایداری روش به شدت کاهش می یابد لذا در شبیه سازی های قبلی که از مدل های چندفازی روش شبکه بولتزمن استفاده شده است مقدار کشش

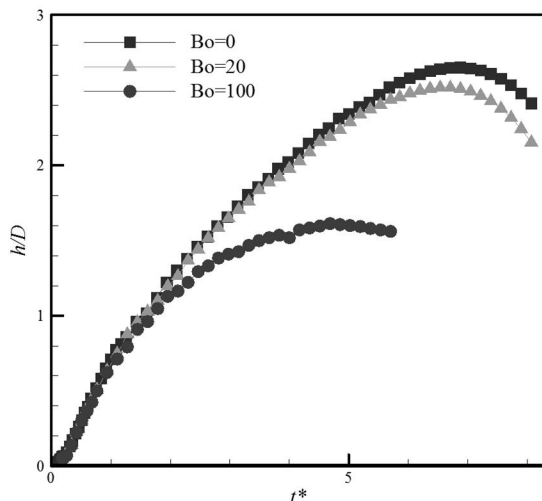


Fig. 11 Time evolution of height for different Bond numbers

شکل 11 تغییرات زمانی ارتفاع برای اعداد باند مختلف

به عنوان یک نتیجه گیری کلی می توان این گونه بیان کرد که اعمال نیروی گرانش در کنار سایر پارامترها حائز اهمیت است. اگرچه ممکن است در شرایط خاصی بتوان از اثرات آن صرف نظر کرد ولی در مواردی نیز (مانند نسبت چگالی پایین) نمی توان از اثرات آن چشم پوشی نمود.

6- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از روش نیرویی اختلاف دقیق در مدل شبه-پتانسیل، اثرات اعداد بدون بعد مختلف رینولدز، وبر و باند بر روی شعاع و ارتفاع لایه تاج شکل بررسی شده اند. مهمترین نتایج را می توان بصورت زیر خلاصه کرد:

- همان طور که تحقیقات سایر محققان نیز نشان داده است، اعداد رینولدز و وبر تأثیری بر روی تغییرات شعاع در لحظات اولیه پس از برخورد ندارند.
- بر خلاف عدد رینولدز که رابطه مستقیمی با شعاع تاج دارد، عدد وبر اثرات بسیار اندکی بر روی این پارامتر می گذارد. البته در صورتی که اختلاف عدد وبر در مرتبه های هزار باشد انتظار می رود این اثرات قابل تشخیص باشد که نشان دهنده رابطه معکوس عدد وبر و شعاع است.
- اعداد وبر و رینولدز هر دو رابطه مستقیمی با ارتفاع تاج دارند. علاوه بر مقدار ارتفاع، این اعداد بر روی زمان رسیدن تاج به بیشینه مقدار خود نیز تأثیر می گذارند و با کاهش عدد رینولدز و یا افزایش عدد وبر این زمان به تأخیر می افتد.
- اگرچه عدد باند تأثیری بر روی تغییرات شعاع در لحظات اولیه ندارد ولی در زمان های بزرگتر با کاهش عدد باند مقدار شعاع افزایش می یابد.
- اثرات عدد باند بر روی ارتفاع تاج قابل توجه است. بطوری که با افزایش این عدد ارتفاع بطور قابل ملاحظه ای کاهش پیدا می کند.
- شکل تاج علاوه بر اعداد بدون بعد به مقدار کشش سطحی بستگی دارد. به گونه ای که در جریان هایی با کشش سطحی بسیار بزرگتر با اعداد بدون بعد یکسان سر تاج ضخیم تر می شود.
- بررسی رفتار لایه تاج شکل در یک بازه گسترده نسبت چگالی می تواند

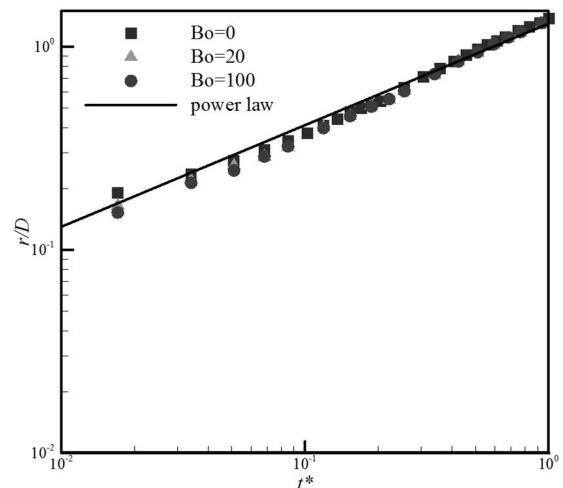


Fig. 9 Time evolution of the radius for different Bond numbers at initial times.

شکل 9 تغییرات زمانی شعاع برای اعداد باند مختلف در لحظات اولیه

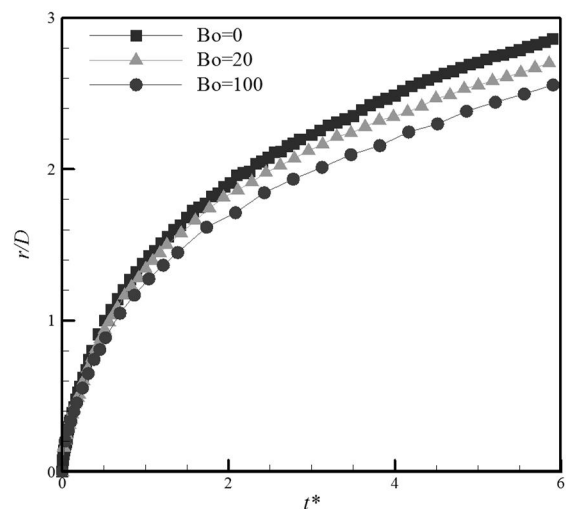


Fig. 10 Time evolution of the radius for different Bond numbers

شکل 10 تغییرات زمانی شعاع در زمان های اولیه برای اعداد باند مختلف

است ولی با افزایش قطر قطره و در نتیجه افزایش مقدار عدد باند این اختلاف بسیار بیشتر می گردد. بنابراین نمی توان اثرات گرانش را در چنین مواردی نادیده گرفت.

شکل 11، نمودار تغییر ارتفاع لایه تاج را نشان می دهد. براساس نتایج، عدد باند نقش قابل توجهی در تغییرات ارتفاع بازی می کند. برای اعداد باند بزرگتر از 100 نمی توان از اثرات گرانش صرف نظر نمود. همچنین اختلاف ارتفاع اعداد باند صفر و بیست اندک است ولی بطور کلی با افزایش عدد باند مقدار ارتفاع کاهش می یابد. از نقطه نظر فیزیکی نیز می توان این گونه استدلال کرد که علاوه بر نیروهای لزجت و کشش سطحی در اعداد باند بالا نیروی گرانش نیز با حرکت روبه بالای لایه مایع مخالفت می کند و لایه تاج شکل پس از این که به بیشترین ارتفاع خود می رسد تحت تأثیر نیروی گرانش قرار می گیرد. همچنین با افزایش این عدد زمان رسیدن به بیشینه مقدار خود کاهش پیدا می کند و تغییرات نیز با شیب ملایم تری انجام می گیرد.

- pp.455–461, 1999.
- [8] I.V. Roisman, C. Tropea, Impact of a drop onto a wetted wall: description of crown formation and propagation, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.472, No. 1, pp.373–397, 2002.
- [9] C. Josserand, S. Zaleski, Droplet splashing on a thin liquid film, *Physics of Fluids*, Vol.15, No. 1, pp.1650–1657, 2003.
- [10] R.D. Deegan, P. Brunet, J. Eggers, *Complexities of splashing*, School of Mathematics, pp. 45-96, University of Bristol, Bristol, United Kingdom, 2007.
- [11] R. Guy, G. McNamara, G. Zanetti, Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata, *Physical Review*, Vol. 61, No. 20, pp. 2332–2335, 1988.
- [12] X. Shan, H. Chen, Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components, *Physical Review E*, Vol. 47, No. 3, pp. 1815-1819, 1993.
- [13] P. Yuan, L. Schaefer, Equations of state in a lattice Boltzmann model, *Physics Fluids*, Vol. 4, No.18, pp. 042101, 2006.
- [14] A. L. Kupershtokh, D. A. Medvedev, D. I. Karpov, On equations of state in a lattice Boltzmann method, *Computers and Mathematics with Application*, Vol.58, No. 5, pp. 965–974, 2009.
- [15] Chen, L., Kang, Q., Mu, Y., He, Y., Tao, W., A critical review of the pseudo-potential multiphase lattice Boltzmann model: methods and applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 76, No. 1, pp. 210–236, 2014.
- [16] 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 Computing Physics*, Vol. 201, No. 1, pp.16-47, 2005.
- [17] S. Asadi, M. Passandideh-Fard, A computational study on droplet impingement onto a thin liquid film, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol.34, No.2B, pp. 78-91, 2009.
- [18] J.H. Guo, X.Y. Wang, Simulation of the two phase flow of impingement onto a liquid film by the lattice Boltzmann method, Vol. 24, No. 2, pp.292-297, 2012.
- [19] C. Ming, L. Jing, Lattice Boltzmann simulation of a drop impact on a moving wall with a liquid film, *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 67, No. 2, pp.307–317, 2014.
- [20] Q. Li, K.H. Luo, Thermodynamic consistency of the pseudo-potential lattice Boltzmann model for simulating liquid and vapor flows, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 72, No. 1, pp. 56-61, 2014.
- [21] S.M. Khatoonabadi, M. Ashrafizaadeh, Comparison and development of multiphase pseudo-potential model for various equations of state, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 376-386, 2015. (in Persian فارسی)
- [22] J. Wu, C. Liu, N. Zhao, Dynamics of falling droplets impact on a liquid film: Hybrid lattice Boltzmann simulation, *Colloids and Surfaces A: Physicochem, Engineering Aspects*, Vol.472, No. 1, pp. 92–100, 2015.
- [23] 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*, Vol. 94, No. 3, pp. 511-525, 1954.
- [24] J. Zou, Y. Ren, Ch. Ji, X.D. Ruan, X. Fu, Phenomena of a drop impact on a restricted liquid surface, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.51, No. 2, pp.332–341, 2013.
- [25] E. Sattari, M. Aghajani Delavar, E. Fattahi, K. Sedighi, Investigation of two bubble coalescence with large density differences with lattice Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 93-100, 2014. (in Persian فارسی)

یکی از موارد مهم تحقیقات آینده در این زمینه باشد. زیرا مدل شبه پتانسیل شان - چن علاوه بر سادگی، قابلیت استفاده برای نسبت چگالی بسیار بالا را دارد و این امر می تواند برای شبیه سازی بسیار حائز اهمیت باشد. البته محدودیت تعیین کشش سطحی یکی از معایب این روش است که نیازمند بررسی های بیشتر است.

7- فهرست علائم

c_s	سرعت صوت
e_i	سرعت شبکه
f_i	توابع توزیع
g	مقدار تابع گرین
u	سرعت میکروسکوپی تعادلی
علائم یونانی	
α	ضریب وابسته به شبکه
ρ	چگالی
σ	کشش سطحی
τ	زمان آسایش
بالانویس ها	
eq	مقدار تعادلی
زیرنویس ها	
cr	مقدار بحرانی
r	نسبت مقدار یک پارامتر به مقدار بحرانی آن

8- مراجع

- [1] A. M. Worthington, *A Study of Splashes*, pp. 102-134, Green, London, 1908.
- [2] M. Pasandideh-Fard, S. Chandra, J. Mostaghimi, A three-dimensional model of droplet impact and solidification, *International journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 11, pp. 22-29, 2002.
- [3] G. E. Cossali, M. Marengo, A. Coghe, S. Zhdanov, The role of time in single drop splash on Thin Film, *Experiments in Fluids*, Vol. 36, No. 6, pp. 80-88, 2004.
- [4] S. Jafari, M.R. Ansari, N. Samkhaniani, Contact angle comparison of droplet impact on solid surface using VOF, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 84-94, 2015. (in Persian فارسی)
- [5] A. Prosperetti, H. N. Oguz, The impact of drops on liquid surfaces and the under-water noise of rain, *Annual Review Fluid Mechanics*, Vol.25, No. 1, pp.577–602, 1993.
- [6] A.L. Yarin, D.A. Weiss, Impact of drops on solid surface: selfsimilar capillary waves and splashing as a new type of kinematic discontinuity, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.283, No. 1, pp.141–173, 1995.
- [7] M. Rieber, A. Frohn, A numerical study on the mechanism of splashing, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol.20, No. 5,