



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۶۵ تا ۷۶
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 65-76



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک
AmirKabir Journal of Science & Research
Mechanical Engineering
(ASJR-ME)

مدل سازی نفوذ سیال با نسبت چگالی بالا در بستر متخلخل لایه‌ای به کمک معادلات حالت با روش شبکه بولتزمن

حانیه صالح‌آبادی^۱، آتنا قادری^۲، محسن نظری^{۳*}، محمدحسن کیهانی^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۲- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۴- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: ۱۳۹۴/۲/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۶)

چکیده

در این مطالعه، نفوذ قطره با نسبت چگالی بالا داخل محیط متخلخل لایه‌ای به کمک روش شبکه بولتزمن و مدل شبه‌پتانسیل مدل‌سازی شده-است؛ بدلیل ضعف ذاتی این مدل در مدل‌سازی جریان‌ها با نسبت چگالی‌های بالا، از معادلات حالت ریدلیش-کوانگ و پنگ-رابینسون استفاده شده و تاثیر دما بر روی کشش سطحی بررسی شده‌است. پس از اعتبارسنجی مدل‌سازی با چند آزمایش ساده، نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای در نسبت چگالی بالا بررسی شده‌است؛ تاثیر عوامل مختلف از جمله نسبت تخلخل و ویژگی آبدوستی یا آبگریزی سطح بر روی نرخ نفوذ و الگوی نفوذ مورد مطالعه قرار گرفته‌است. برای نشان دادن بهتر نرخ نفوذ، از دو تعریف نرخ نفوذ عمقی و نرخ نفوذ حجمی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که با کاهش تخلخل، نرخ نفوذ کاهش می‌یابد و آبدوست کردن سطوح نیز در تخلخل‌های پایین بطور کلی موجب افزایش نرخ نفوذ می‌شود. همچنین، بررسی الگوی نفوذ نشان می‌دهد، نفوذ در حالت آبدوست منسجم و پیستون-مانند پیشروی می‌کند و در حالت آبگریز بصورت انگشت‌دانه‌هایی و باصطلاح انگشت-مانند نفوذ می‌کند. برای بررسی کلی‌تر پدیده نفوذ در ماده متخلخل، کد نوشته شده برای مدل‌سازی دو جزیی-دوفازی توسعه داده شده است. پس از اعتبارسنجی کد توسعه یافته، الگوی نفوذ در اعداد مؤینگی و نسبت ویسکوزیته مختلف بررسی شده و رژیم‌های ویسکوز فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ مشاهده و برای اولین بار مقایسه شده‌است.

کلمات کلیدی:

مدل دوفازی، معادله حالت، نفوذ سیال، محیط متخلخل لایه‌ای.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، روش شبکه بولتزمن^۱ رویکرد محاسباتی جذابی را برای شبیه‌سازی مسائل جریانهای چندفازی هم‌دما ارائه داده است. این روش از ویژگیهای منحصر‌بفردی مانند الگوریتم حل موازی، مدل‌سازی آسان هندسه‌های پیچیده مثل محیط متخلخل، اعمال ساده شرایط مرزی و مفاهیم و کدنویسی آسان برخوردار است. در دهه‌های گذشته چند مدل برای مدل‌سازی سیالات چندفازی به روش شبکه بولتزمن ارائه شده‌است. اولین مدل برای سیالات مخلوط نشدنی مدل رنگی^۲ بود [۱] که از ذرات با رنگ‌های قرمز و آبی برای مشخص کردن دو سیال استفاده می‌کند. جدایش فازی از برهم‌کنش بین ذرات بر مبنای تغییر رنگ ایجاد می‌شود. مدل شبه‌پتانسیل^۳ [۲] مدل دیگری است که توسط شان و چن ارائه شد. در این مدل، یک برهم‌کنش غیرمحلی بین ذرات سیال در شبکه‌های همسایه با اضافه کردن جمله نیرو به میدان سرعت اعمال می‌گردد. ضریب پتانسیل برهم‌کنش، معادله حالت سیال را کنترل می‌کند و جدایی فازها، با انتخاب ضریب مناسب برهم‌کنش اتفاق می‌افتد. مدل دیگر، مدل معروف به انرژی آزاد^۴ است که توسط سویفت و همکاران [۳] ارائه شد. مدل مبتنی بر تئوری سنتیک^۵ [۴] که توسط هی-چن زه ارائه شد، یکدیگر از انواع این مدل‌هاست. در بین این مدل‌ها، مدل شبه‌پتانسیل بدلیل سادگی و کارآمدی در مدل‌سازیهای چندفازی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است. این مدل با اعمال تغییراتی، پتانسیل بالایی برای مدل‌سازی جریان چندفازی با نسبت چگالی بالا دارد. یوان و شافر [۵] شاید جز اولین کسانی بودند که مدل شبه‌پتانسیل را برای سیالات با نسبت چگالی‌های بالا توسعه دادند. آن‌ها معادلات حالت گاز غیر ایده‌آل را در مدل شبه‌پتانسیل بکار بردند و بدین ترتیب توانستند به نسبت چگالی‌های بالاتر دست یابند. در تحقیق آن‌ها، معادلات حالت تعیین‌کننده عملکرد مدل هستند. کوپرشتوخ و همکاران [۶] مدل جدیدی مبتنی بر مدل شبه‌پتانسیل ارائه دادند. در واقع با انتگرال‌گیری از معادلات حالت بی‌بعد به مدل تازه‌ای دست یافتند. در این مدل نیروی برهم‌کنش با ترکیب روش اصلی که وابسته به جرم موثر است [۷] و روش زنگ و چن [۸] که بر مبنای تابع پتانسیل می‌باشد، محاسبه می‌شود. البته مدل آن‌ها محدودیت‌هایی نیز دارد؛ مانند کوچک بودن سرعت صوت در فاز بخار که باعث شده مدل آن‌ها فقط برای جریان‌ها با سرعت به مقدار کافی کم، قابل استفاده باشد. هو و همکاران [۹] نیز مدل شبه‌پتانسیل تک جزئی را با بکارگیری معادلات حالت مختلف اصلاح کردند. بعضی اشکالات مدل شبه‌پتانسیل مثل سرعت‌های کاذب بزرگ برطرف شد. از آن‌جا که مدل شبکه بولتزمن به شدت تحت تاثیر معادله حالت و مدل محاسبه نیروهای بین ذرات می‌باشد؛ آن‌ها با تلفیق این دو، یک پارامتر اصلاحی به مدل افزودند. این پارامتر تاثیر بسزایی روی کشش سطحی و فشار دارد و در

1 Lattice Boltzmann method (LBM)

2 Color mode

3 Pseudo-potential model

4 Free energy

5 kinetic theory

واقع یک مقدار میانگین برای تنظیم کشش سطحی بدون تغییر نسبت چگالی ارائه می‌دهد. با معرفی این پارامتر نسبت چگالی بالا به‌آسانی بدست می‌آید؛ البته در کار آن‌ها کشش سطحی نسبتاً کوچک است. بدلیل کاربردهای فراوان جریانهای چندفازی در محیط متخلخل و پیچیدگی مدل‌سازی این محیط‌ها با روشهای سنتی توسعه روشهای جدید از جمله روش شبکه بولتزمن بسیار مورد توجه است. زنگ و همکاران [۱۰] با استفاده از این روش و مدل شبه‌پتانسیل جریان تک‌جزئی دو فازی در محیط متخلخل را مدل‌سازی کردند. آنها چند آزمون معمول مانند جدایی فازها، آزمونهای مربوط به محاسبه کشش سطحی و زاویه تماس، جریان داخل لوله و حرکت قطره در یک سیال را بررسی کردند؛ نتایج آنها، با نتایج تئوری و یا آزمایشگاهی موجود مطابقت داشت. آنها علاوه بر بررسی عملکرد روش شبکه بولتزمن در مدل‌سازی حرکت سیال در ماده متخلخل، تاثیر ترشوندگی سطح روی جابه‌جایی بخار توسط جریان مایع در محیط متخلخل را، مطالعه نمودند. دانگ و همکاران [۱۱] نیز پدیده ویسکوز فینگرینگ^۶، در جابه‌جایی دو سیال مخلوط نشدنی در محیط متخلخل را به کمک همین مدل بررسی کردند؛ بطور کلی، پدیده فینگرینگ وقتی رخ میدهد که ویسکوزیته دو سیال با هم متفاوت باشد و سیال با ویسکوزیته کمتر توسط سیال با ویسکوزیته بیشتر جابه‌جا شود. آنها ضریب راندمان جاروب کردن را برای بررسی راندمان جابه‌جایی سیال معرفی کردند؛ همچنین از اعداد بی‌بعد مثل عدد کاپیلاری، عدد بوند و نسبت ویسکوزیته بین دو سیال برای نمایش بهتر تاثیر نیروی کاپیلاری، نیروی ویسکوز و گرانش روی الگوی جریان و ضریب راندمان جاروب کردن استفاده کردند. بعلاوه، تاثیر ویژگی ترشوندگی سطح را بر روی الگوی جریان، مطالعه نمودند. آنها از محیط متخلخل یکنواخت با موانع دایروی استفاده نمودند و جریان افقی با نسبت چگالی یک را مدل‌سازی نمودند. تقیلو و رحیمیان [۱۲] جریان دوفازی در یک محیط متخلخل را با استفاده از روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. آنها نفوذ قطره در محیط متخلخل را با استفاده از مدل شان و چن (شبه پتانسیل) مدل‌سازی کردند؛ در این مدل‌سازی، نسبت چگالی و ویسکوزیته برابر یک در نظر گرفته شده‌است. آنها با توجه به محدودیت روش شان و چن در کنترل مستقل کشش سطحی، فقط تاثیر نسبت تخلخل و زاویه تماس بین مایع و گاز و سطح جامد را، بر میزان نفوذ قطره در داخل محیط متخلخل بررسی نمودند.

همانطور که اشاره شد در کارهای گذشته اغلب به بررسی جریان سیال و جاروب کردن سیال ثانویه توسط سیال اول و یا به مدل‌سازی در نسبت چگالی‌های پایین در محیط متخلخل پرداخته شده‌است. با توجه به اینکه تا به حال به پدیده نفوذ سیالات به شکل قطره با نسبت چگالی بالا در محیط متخلخل لایه‌ای به کمک معادلات حالت پرداخته نشده‌است، در مطالعه حاضر، مدل شبه‌پتانسیل به کمک معادلات حالت غیر ایده‌آل برای مدل‌سازی نفوذ قطره در محیط متخلخل لایه‌ای با نسبت چگالی

6 Viscous fingering

(۳) محاسبه می‌شود:

$$v = \left(\tau - \frac{1}{2} \right) c_s^2 \Delta t \quad (۳)$$

که $c_s = \frac{c}{\sqrt{3}}$ سرعت صوت در واحد لیتیس می‌باشد. برای آنکه لزجت سیال مثبت باشد، نیاز است که زمان آرامش بزرگتر از $\tau/5$ باشد. البته ضرورت پایداری ایجاب می‌کند که مقدار τ از این مقدار بیشتر باشد. مقادیر چگالی و سرعت‌های ماکروسکوپی در هر نقطه نیز با استفاده از تابع توزیع، به کمک معادله‌های (۴) و (۵) به ترتیب قابل محاسبه خواهند بود:

$$\rho = \sum_{\alpha}^q f_{\alpha} \quad (۴)$$

$$\rho \bar{u} = \sum_{\alpha}^q f_{\alpha} \bar{e}_{\alpha} \quad (۵)$$

برای اعمال نیروهای بین مولکولی در روش شبکه بولتزمن برای جریان دو فاز تک مولفه‌ای به روش شان وچن، سوکاپ و تورن [۱۳] نیروهای بین مولکولی بین ذرات سیال را مطابق رابطه (۶) تعریف نمودند:

$$\bar{F}(\bar{x}, t) = -G \psi(\bar{x}, t) \sum_{\alpha=1}^8 w_{\alpha} \psi(\bar{x} + \bar{e}_{\alpha} \delta t, t) \bar{e}_{\alpha} \quad (۶)$$

که در آن G مقدار ثابتی است که تعامل بین مولکولی را نشان می‌دهد و تعیینکننده قدرت برهمکنش بین مولکولی است. مقدار منفی G ، مقادیر مثبت نیرو را ایجاد می‌کند که نشاندهنده نیروی جاذبه است. حال آنکه مقادیر مثبت G ، نیرویی منفی ایجاد می‌کند که بیانگر نیروی دافعه بین ذرات است. w_{α} نیز ضرایب وزنی است. تابع پتانسیل ψ ، پتانسیل تعامل بین مولکولی است که تابعی از چگالی موضعی می‌باشد و روابط متعددی برای آن پیشنهاد شده است. اصلیتین و ابتدائیتین تابع پتانسیل، تابع پتانسیل پیشنهاد شده توسط شان وچن می‌باشد که به صورت تابع نمای است (معادله ۷):

$$\psi = \rho_0 \left(1 - \exp \left(- \frac{\rho}{\rho_0} \right) \right) \quad (۷)$$

البته توابع دیگری نیز وجود دارند که در ادامه به تفصیل بیان شده‌اند. در صورت وجود شرط مرزی دیواره جامد، علاوه بر نیروی بین ذرات سیال-سیال، نیروی بین ذرات سیال-جامد نیز در نظر گرفته میشوند که از معادله (۸) قابل محاسبه خواهد بود:

$$\bar{F}_s(\bar{x}, t) = \bar{F}_s(\bar{x}, t) = -G_{ads} \psi(\bar{x}, t) \sum_{\alpha=1}^8 w_{\alpha} S(\bar{x} + \bar{e}_{\alpha} \delta t, t) \bar{e}_{\alpha} \delta t \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، S نشانگر تابع فاز جامد می‌باشد که برای فاز جامد دارای مقدار یک و در سایر نواحی دارای مقدار صفر است. بطور مشابه، G_{ads} قدرت برهمکنش بین سطح جامد و سیال را کنترل می‌کند. با تغییر دادن مقدار G_{ads} شرایط مختلف ترشوندگی حاصل می‌شود. نیروی گرانش نیز در صورت لزوم به سادگی و با رابطه (۹) قابل اعمال است [۱۱]:

بالا اصلاح گردیده است؛ در نتیجه با استفاده از معادلات حالت غیرایده آل علاوه بر امکان مدلسازی در نسبت چگالیهای بالا، دما بطور مستقیم وارد محاسبات می‌شود و مدلسازی و درک مفاهیم در حوزه تک جزیی-دوفازی آسانتر میگردد. اهمیت توسعه روش شبه پتانسیل برای مدلسازی در نسبت چگالیهای بالا، بدلیل سادگی و کاربرد آسان در مدلسازی جریانهای چندفازی در هندسه‌های پیشرفته مثل محیط متخلخل می‌باشد. در این مطالعه، برای اطمینان از درستی مدلسازی و کد نوشته شده سه آزمون ساده انجام شده است از جمله مقایسه منحنیهای پیوستگی حاصل با نمودار ماکسول، ترکیب دو قطره در هم و سقوط و برخورد قطره با سطح با ترشوندگیهای مختلف که همگی با نتایج گزارش شده توسط محققان مطابقت دارند. نفوذ قطره با نسبت چگالی بالا در محیط متخلخل لایه‌ای به کمک معادله حالت ریذلیش-کوانگ بررسی شده است؛ محیط متخلخل لایه‌ای ایجاد شده از توزیع تصادفی موانع جامد بدست آمده است که میتواند هر تخلخل دلخواهی را در هر لایه و در کل ناحیه متخلخل اختیار نماید و بمنظور یکنواختی شدن توزیع موانع جامد از چهار قسمت تشکیل شده است که از ویژگیهای منحصر بفرد این مطالعه است. اثرات نسبت تخلخل و آب‌گریزی/آبدوستی سطح نیز بر روی الگوی نفوذ مطالعه شده است و در انتها کد برای حالت کلیتر دو جزیی-دوفازی توسعه یافته است و پس از اعتبار سنجی، الگوی نفوذ و تاثیر ویژگی آبدوستی بر روی الگوی نفوذ بررسی شده است.

۲- روش شبکه بولتزمن

معادله شبکه بولتزمن با استفاده از تقریب باتانگار-گراس-کروک بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$f_{\alpha}(\bar{x} + \Delta \bar{x}, t + \Delta t) - f_{\alpha}(\bar{x}, t) = -\frac{1}{\tau} \left[f_{\alpha}(\bar{x}, t) - f_{\alpha}^{(eq)}(\rho, \bar{u}) \right] \quad (۱)$$

که در آن f_{α} تابع توزیع برای ذرات مجزایی است که دارای سرعت میکروسکوپی \bar{e}_{α} می‌باشند. τ زمان آرامش و $f_{\alpha}^{(eq)}$ تابع توزیع تعادلی ذرات می‌باشد که با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$f_{\alpha}^{(eq)} = \rho w_{\alpha} \left[1 + \frac{3}{c^2} (\bar{e}_{\alpha} \cdot \bar{u}) + \frac{9}{2c^2} (\bar{e}_{\alpha} \cdot \bar{u})^2 - \frac{3}{2c^2} |\bar{u}|^2 \right] \quad (۲)$$

که $c = \frac{\delta x}{\delta t}$ سرعت لیتیس می‌باشد و در این مقاله برای سادگی مقدار آنرا یک در نظر میگیریم با فرض این که δx و δt برابر باشند. در معادله (۲)، ρ و \bar{u} به ترتیب مقادیر سرعت و چگالی ماکروسکوپی هستند و w_{α} ضرایب وزنی می‌باشند که در مدل D2Q9 به ازای $\alpha = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ به ترتیب دارای مقادیر 0, 4/9, 1/9, 1/36 می‌باشد. مقادیر سرعتیهای میکروسکوپی، نیز به ازای $\alpha = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ به ترتیب دارای مقادیر 0, $\pm 1, \pm 2\sqrt{2}$ می‌باشد.

لزجت سیال به کمک زمان رهاسازی و سرعت صوت شبکه، طبق رابطه

پتانسیل جدید (ψ) بدست می‌آیند.

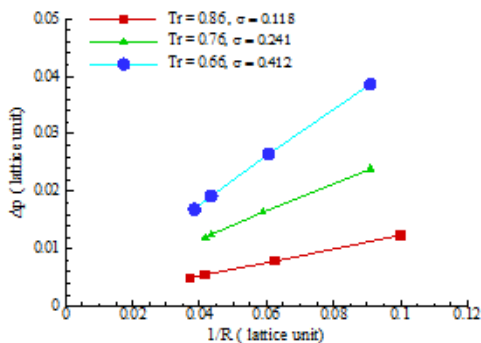
$$\begin{aligned} \rho^{real} / \rho_c^{real} &= \rho^{Lu} / \rho_c^{real} \rightarrow \rho^{real} = \rho_c^{real} \rho^{Lu} / \rho_c^{real} \\ p^{real} / p_c^{real} &= p^{Lu} / p_c^{real} \rightarrow p^{real} = p_c^{real} p^{Lu} / p_c^{real} \quad (13) \\ T^{real} / T_c^{real} &= T^{Lu} / T_c^{real} \rightarrow T^{real} = T_c^{real} T^{Lu} / T_c^{real} \end{aligned}$$

برای تبدیل خصوصیات بدست آمده در واحد لیتیس به خصوصیات فیزیکی، از اعداد بی بعد استفاده می‌شود. این اعداد بی بعد در هر دو واحد یکسان می‌باشند. که در این مدلسازی، بالانویس "real" و "Lu" به ترتیب نشان‌دهنده واحدها در مقیاس فیزیکی و شبکه و زیرنویس "c" نشان‌دهنده خصوصیات بحرانی می‌باشند.

۳- آزمون لاپلاس

۳-۱- تاثیر دما بر روی کشش سطحی

از معایب روش شبه پتانسیل یا همان شان و چن نبود روش مستقیمی برای محاسبه کشش سطحی است، بطوریکه برای محاسبه کشش سطحی، گرفتن آزمون لاپلاس لازم است. برای این کار، قطره‌ها با شعاعهای مختلف در ناحیه ای به ابعاد آزمایش شدند. با استفاده از قانون لاپلاس که رابطه بین اختلاف فشار و شعاع می‌باشد و بصورت $\Delta p = \sigma/R$ بیان می‌شود، کشش سطحی (σ) بدست می‌آید. هیچ نیروی خارجی مثل نیروی گرانش نیز اعمال نمی‌شود و شرایط مرزی، دوره‌ای هستند. مقدار ضریب G که قدرت برهمکنش سیال-سیال را کنترل می‌کند، نقش بسزایی در انجام این آزمون دارد. در ابتدا، قطرات با هندسهی مربع در مرکز شبکه گذاشته میشوند و بعد از چند هزار تکرار، قطرات دایروی پایدار ایجاد میشوند. اختلاف فشار داخل و خارج قطره در نقاطی دور از ضخامت بین دو فاز و شعاع قطره نیز در حالت پایدار، در واحد لیتیس اندازه‌گیری میشوند. شکل ۱ رابطه بین Δp و $1/R$ را در نسبت دماهای مختلف نشان میدهد. با افزایش نسبت دما، شیب نمودار کاهش می‌یابد. از آنجا که با افزایش نسبت دما، نسبت چگالی بین دو فاز کاهش می‌یابد، نیروی کشش سطحی کاهش می‌یابد. در این آزمون زمان آرامش، $\tau = 1$ در نظر گرفته شده‌است. نسبت دمای بی بعد با T_r و کشش سطحی با σ نشان داده شده‌است.



شکل ۱: آزمایش لاپلاس برای محاسبه کشش سطحی به کمک معادله حالت پنگ - رابینسون

$$\vec{F}_g = \rho \vec{g} \quad (9)$$

\vec{g} که شتاب گرانش می‌باشد. نیروها در این مدل با تغییر دادن سرعت در تابع توزیع تعادلی، در محاسبات شرکت داده میشوند؛ یعنی سرعت در معادله (۲) با رابطه (۱۰) جایگزین می‌شود:

$$\vec{u}^{eq} = \vec{u} + \frac{\tau F_{int}}{\rho(x)} \quad (10)$$

که F_{int} مجموع نیروهایی است که در هر نقطه از شبکه وجود دارند. این سرعت در محاسبه تابع توزیع تعادلی در مرحله برخورد بکار می‌رود. بنابراین، با میانگین گیری از مقادیر ممتنوم قبل و بعد از برخورد، سرعت کل سیال محاسبه می‌شود (معادله ۱۱):

$$\rho(x)\vec{U} = \rho(x)\vec{u} + \frac{1}{2}F_{int} \quad (11)$$

معادله حالت رابطه بین دما، فشار، حجم یا چگالی برای ماده مشخص یا مخلوطی از مواد است. اگر بین ذرات نیروهای بین مولکولی موجود باشد معادله حالت از معادله (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$p = c_s^2 \rho + 3G(\psi(\rho))^2 \quad (12)$$

همانطور که قبلاً اشاره شد، c_s سرعت صوت در واحد لیتیس است. اگر بتوان از نیروی بین ذرات صرف نظر کرد، سیال مانند گاز ایده آل رفتار می‌کند. از نظر تئوری، با تغییر شکل $\psi(\rho)$ ، معادلات مختلف حالت بدست خواهند آمد.

۲-۱- معادلات حالت [۱۴]

در این مقاله، ما از معادله‌های حالت زیر استفاده کردیم:

(الف) ریدلیش-کوانگ (R-K)

(ب) پنگ-رابینسون (P-R)

معادله حالت ریدلیش-کوانگ:

$$p = \frac{\rho RT}{1-b\rho} - \frac{a\rho^2}{\sqrt{T}(1+b\rho)} \quad (14)$$

با $b=0.08664R T_c/p_c$ و $a=0.42748 R^2 (T_c^{2.5})/p_c$

معادله حالت پنگ-رابینسون:

$$p = \frac{\rho RT}{1-b\rho} - \frac{\alpha\alpha(T)\rho^2}{1+2b\rho-b^2\rho^2} \quad (15)$$

$$\alpha(T) = \left[1 + \left(\frac{0}{37464} + \frac{1}{54226\omega} \right) \frac{T}{T_c} - \left(\frac{0}{26992\omega^2} \right) \left(1 - \sqrt{T/T_c} \right) \right]^2$$

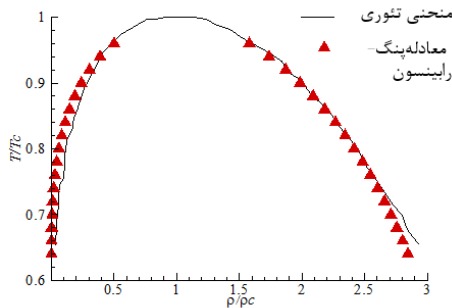
با $b=0.0778R T_c/p_c$ و $a=0.45724 R^2 (T_c^2)/p_c$ و ω ضریب خروج از مرکز نام دارد و برای سیالات مختلف مقادیر متفاوتی دارد.

با جایگذاری مقادیر فشار از معادلات حالت فوق در رابطه (۱۲) توابع

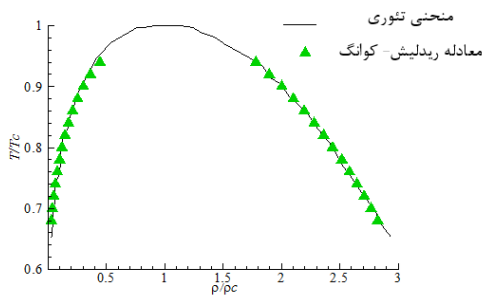
7 Redlich-Kwong

8 Peng-Robinson

شده‌اند. برای ارزیابی دقیقتر معادلات حالت، منحنیهای پیوستگی بدست آمده از مدل‌سازی، با منحنیهای تئوری پیشبینی شده توسط ماکسول مقایسه شده است؛ در این مطالعه، از مقادیر بدست آمده برای آب که در مرجع [۱۶] گزارش شده، استفاده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳: مقایسه منحنیهای پیوستگی حاصل از مدل‌سازی با نتایج تئوری ماکسول (الف) معادله حالت پنگ-رابینسون (ب) معادله حالت ریدلیش-کوانگ

نتایج حاصل از مدل‌سازی با معادله ریدلیش-کوانگ، تطابق بیشتری با منحنی تئوری دارند. البته معادله پنگ-رابینسون نیز مطابقت خوبی دارد و فقط انحراف کمی در شاخه فاز بخار دارد. البته این انحراف از طبیعت معادله ناشی می‌شود؛ بطوریکه با کاهش بیشتر دما نسبت به دمای بحرانی، نسبت چگالی بسیار افزایش می‌یابد. برای معادله پنگ-رابینسون، نسبت چگالی بیشتر از هزار است که باعث می‌شود تغییر بسیار کوچکی در چگالی فاز مایع نوساناتی را در چگالی فاز بخار به همراه داشته باشد. البته در حالت کلی، مدل توسعه داده شده به خوبی با منحنی تئوری منطبق است و درستی کد عددی را نشان می‌دهد.

۴-۲- معتبرسازی ۲: ترکیب قطرات و برخورد قطره با سطح جامد

در این آزمون که با استفاده از معادله حالت پنگ-رابینسون و در نسبت دمای ۰/۷۶ انجام شده، نسبت چگالی حاصل حدود ۱۰۰ می‌باشد که با معادله حالت شان و چن قابل مدل‌سازی نیستند. اولین مساله که در روش شبکه بولتزمن برای آزمایش بسیار رایج است، ترکیب دو قطره در هم و بوجود آمدن یک قطره است. در شکل ۴ مراحل مختلف فرایند ترکیب دو

۴-اعتبارسنجی

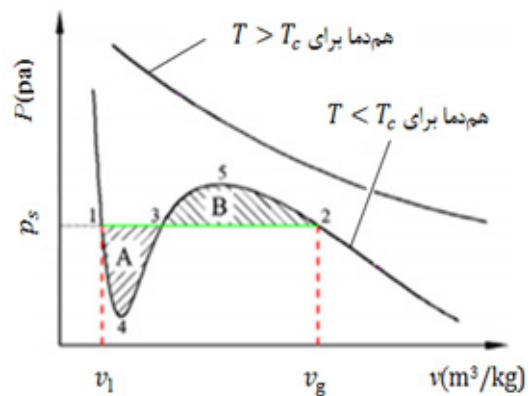
در مقاله حاضر، معتبرسازیهای مختلفی برای اطمینان از درستی کد توسعه داده شده انجام شده است.

۴-۱- معتبرسازی ۱: مقایسه معادلات حالت در کد عددی با مدل تئوری

شکل ۲ منحنی p-v یک ماده خالص در یک دمای داده شده برای هر معادله حالت غیر ایده‌آل را نمایش می‌دهد. اگر ماده در دمای فوق بحرانی باشد، $T > T_c$ ، منحنی p-v در یک دمای ثابت، یکنواخت است و هر مقدار فشار، متناسب با یک مقدار چگالی مخصوص یا حجم مخصوص می‌باشد؛ در این حالت، تشخیص فاز مایع و بخار امکانپذیر نیست. از طرف دیگر، اگر دما از دمای بحرانی کمتر باشد، $T < T_c$ ، در یک فشار معین، برای فازهای بخار و مایع، مقادیر چگالی متفاوتی وجود خواهد داشت؛ عبارت دیگر فازهای بخار و مایع جدا هستند (مثلا برای حالت اشباع، فازهای مایع و بخار در تعادل قرار دارند). مقادیر چگالی یا حجم مخصوص بخار و مایع اشباع، در یک دمای معین توسط طرح ماکسول تعیین میشوند که در واقع قسمت ۱-۴-۳-۵-۲ شکل ۲ با خط افقی تعیین می‌شوند که در واقع قسمت ۱-۴-۳-۲ جابجیزین می‌شود. ایده اصلی ماکسول در رابطه (۱۶) آمده است:

$$\int_{v_l}^{v_g} p dv = p_s (v_g - v_l) \quad (16)$$

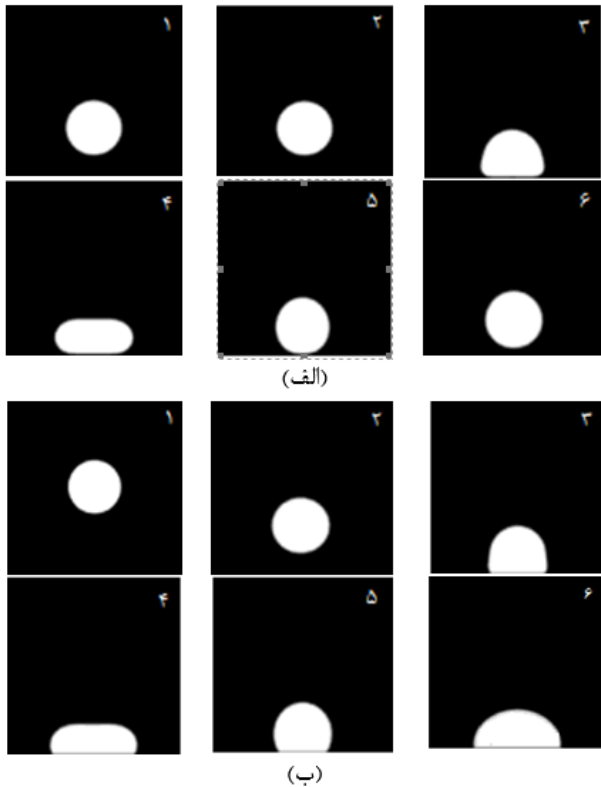
این رابطه بیان می‌کند، مساحت ناحیه A معادل مساحت ناحیه B در شکل ۲ می‌باشد.



شکل ۲: نمودار نمایش رفتار فوق بحرانی و زیر بحرانی و طرح ماکسول (v_l و v_g حجم مخصوص مایع و بخار اشباع و فشار اشباع متناسب با دما می‌باشد) [۱۵].

برای حل عددی معادله (۱۶) برای یک معادله حالت خاص در یک دمای معین، باید ابتدا مقدار فشار از معادله حالت محاسبه شود و در رابطه (۱۶) جایگزین گردد؛ با حدس اولیه برای v_l ، v_g و p_s ، مقادیر نهایی از روش تکراری و زمانی که رابطه (۱۶) ارضا شود، بدست می‌آیند. شکل ۳ مقادیر نسبت دما را بر حسب نسبت چگالی برای سه معادله حالت غیرایده آل گفته شده نشان می‌دهند که در این مطالعه منحنیهای پیوستگی نامیده

است. نتایج حاصل با نتایج آزمون زاویه تماس و نتایج گزارش شده در مرجع [۶] همخوانی دارند.



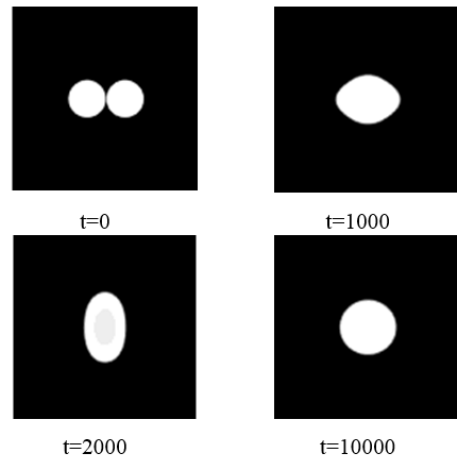
شکل ۵: سقوط آزاد قطره و برخورد آن با سطح جامد تحت میدان گرانش (الف) سطح ترشونده (ب) سطح ترشونده با زاویه ترشوندگی 90°

۵- ماده متخلخل

از آنجا که در اکثر منابع، نفوذ قطره در ماده متخلخل برای جریانهای دو جزئی چند فازی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲، ۱۹] و کمتر به پدیده نفوذ در جریانهای تک جزئی چند فازی با نسبت چگالی بالا، به کمک معادلات حالت پرداخته شده است؛ در این مطالعه نفوذ قطره در یک محیط متخلخل لایه‌ای را با معادله حالت ریپلیش-کوانگ و نسبت دمایی 0.186 بررسی میکنیم. در مطالعه حاضر، برای تولید محیط متخلخل دو بعدی یک کد با زبان برنامه نویسی فرتن نوشته شده است. این کد دارای ویژگی‌های منحصربفردی از جمله انتخاب تصادفی شبکه‌ها برای تولید موانع جامد و امکان همپوشانی آزاد در تولید موانع جامد بمنظور ایجاد یک ماده متخلخل واقعی، تولید محیط متخلخل با نسبت تخلخل دلخواه (نسبت تخلخل به صورت داده ورودی گرفته می‌شود) و امکان ایجاد محیط متخلخل لایه‌ای (به طوریکه نسبت تخلخل در هر لایه یا هر قسمت و در کل ناحیه دارای مقدار یکسانی باشد؛ اینکار باعث یکنواختتر شدن توزیع موانع جامد می‌شود) است که آنرا از سایر موارد مشابه متمایز می‌کند. نسبت تخلخل یا تخلخل که مشخصه هندسی محیط متخلخل است، بصورت رابطه (۱۷) تعریف می‌شود؛

$$\varepsilon = \frac{V_{pores}}{V_{total}} \quad (17)$$

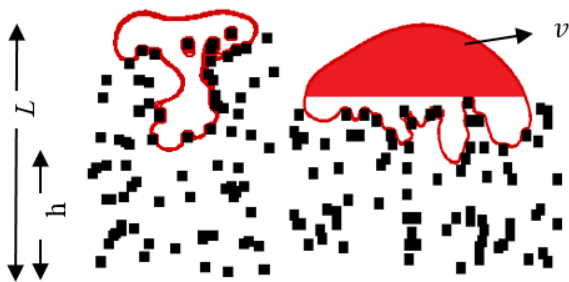
قطره دوبعدی نشان داده شده است که در واقع بیانگر نیروی جاذبه بین دو قطره می‌باشد. در ابتدا، در زمان $t=0$ ، قطره‌ها با لایه نازکی از بخار به ضخامت یک واحد لئیس جدا شده‌اند. بهدلیل وجود نیروی جاذبه بین ملکولی قطره‌ها به هم متصل میشوند؛ با گذشت زمان، پل رابط بین دو قطره بعثت وجود کشش سطحی رشد می‌کند که در نتیجه دو قطره در هم ترکیب میشوند؛ از آنجا که هیچ نیروی خارجی وجود ندارد، شکل حاصل به سمتی میل می‌کند تا با کاهش محیط، انرژی سطحی به حداقل برسد [۱۷]. سرانجام یک قطره بزرگتر با سطحی بزرگتر از مساحت هر قطره و برابر مساحت مجموع دو قطره در زمان اولیه بوجود می‌آید. در این آزمون، قطر اولیه قطره‌ها 30 واحد شبکه و ابعاد ناحیه محاسباتی 300×300 واحد شبکه است و کشش سطحی 0.241 می‌باشد. نتایج حاصل با نتایج ارائه شده در مراجع [۱۶، ۱۸] همخوانی دارند.



شکل ۴: ترکیب دو قطره با هم با قطرهای برابر

معتبرسازی دیگر سقوط قطره تحت نیروی گرانش و برخورد آن با سطوح با ترشوندگیهای مختلف می‌باشد. در این مثال نیز همانطور که قبلاً گفته شد، نسبت دما 0.176 و کشش سطحی 0.241 می‌باشد. نتایج در شکل ۵ نشان داده شده اند. برای هر سه حالت شکل نهایی قطره بعد از مدت طولانی بدست آمده است. ابعاد ناحیه محاسباتی 200×200 واحد لئیس می‌باشد و شرایط مرزی دوره‌ای است. قطر اولیه قطره 30 واحد لئیس می‌باشد. شتاب گرانش $g=10^{-5}$ در واحد لئیس انتخاب شده است. در شکل (۵-الف) در حالت سطح ترشونده^۹ قطره بعد از برخورد با سطح ابتدا کمی پخش می‌شود، سپس تغییرشکل و نوسانات ناشی از کشش سطحی شروع می‌شود. در نهایت قطره از سطح جدا می‌شود (شکل (۵-الف)) و بعد از مدتی بدلیل اتلاف انرژی ناشی از ویسکوزیته نوسانات متوقف می‌شود. در حالت سطح ترشونده^{۱۰} با زاویه ترشوندگی 90° قطره قادر به جدایش از سطح نیست؛ در این حالت تغییرشکل و نوسانات قطره بصورت شکل ثابتی مشاهده می‌شود؛ شکل ثابت بعد از چندین نوسان حاصل می‌شود (شکل (۵-ب)). در آزمون زاویه تماس، برای حالت سطح ترشونده، $G_{ads} = -0.6$ و برای سطح ترشونده $G_{ads} = -2.3$ بدست آمده

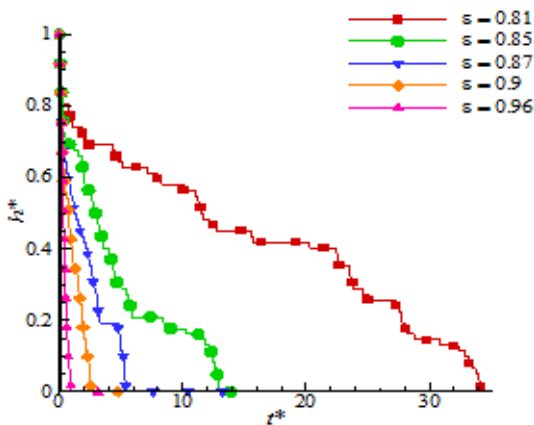
- 9 Non wetting
- 10 Wetting



شکل ۷: نمایش پارامترهای تعریف شده (عمق نفوذ (h) داخل محیط متخلخل و حجم قطره خارج از محیط متخلخل (v) در هر گام زمانی و به ارتفاع کلی ماده متخلخل (L)).

همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت تخلخل بعثت افزایش سطوح جامد و در نتیجه افزایش نیروی مقاوم سطح سرعت متوسط نفوذ به میزان چشمگیری کاهش یافته‌است. مثلاً سرعت متوسط نفوذ داخل محیط متخلخل ۰/۹۶ (برمبنای عمق نفوذ)، به ترتیب ۳۵/۱، ۱۳/۳، ۵/۵ و ۲/۷ برابر سرعت متوسط نفوذ در تخلخل‌های ۰/۸۷، ۰/۸۵ و ۰/۹۰ می‌باشد.

علت کامل نشدن نفوذ حجمی در تخلخل‌های پایین، ممکن است بعثت جداسدن قسمتی از قطره در زمانهای اولیه نفوذ و باقی ماندن آن روی ماده متخلخل باشد در حالیکه نفوذ در عمق ماده متخلخل کامل اتفاق افتاده است؛ در شکل‌های الگوی نفوذ در محیط متخلخل در قسمت بعد قابل مشاهده می‌باشد.

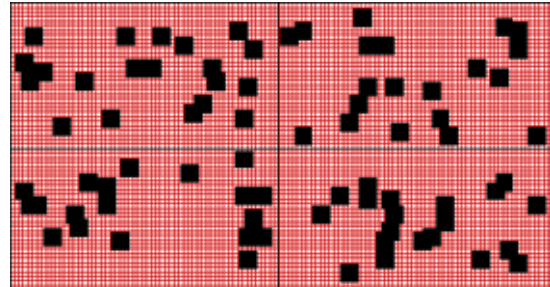


شکل ۸: مقایسه نرخ نفوذ h^* بر حسب t^* در نسبت تخلخل‌های مختلف

۶-۲- بررسی تاثیر خصوصیت آبدوستی یا آبگریزی سطح

ترشوندگی یک سطح نسبت به سیال و به اصلاح آبدوست یا آبگریز بودن سطح، بستگی به زاویه تماس θ بین سیال و سطح جامد دارد. برای زاویه کم‌تر از ۹۰ درجه، سیال تمایل به خیس کردن سطح دارد، در این صورت به سطح، ترشونده و یا آبدوست می‌گویند؛ برای زاویه تماس بزرگ‌تر از ۹۰ درجه، سیال به شکل فشرده درمی‌آید و روی سطح پخش نمی‌شود،

که V_{pores} حجم حفره‌ها و V_{total} حجم کل محیط متخلخل می‌باشد؛ در کدنویسی برای حالت دو بعدی، بصورت نسبت تعداد شبکه‌های داخل سیال به تعداد کل شبکه‌های موجود در ناحیه متخلخل در نظر گرفته شده است.



شکل ۶: نمونه‌ای از محیط متخلخل لایه‌ای متشکل از چهار لایه. (نسبت تخلخل در هر لایه و در کل ناحیه ۹/۱۰ می‌باشد).

در شکل ۶ نمونه‌ای از محیط متخلخل لایه‌ای ایجاد شده با این کد نمایش داده شده است.

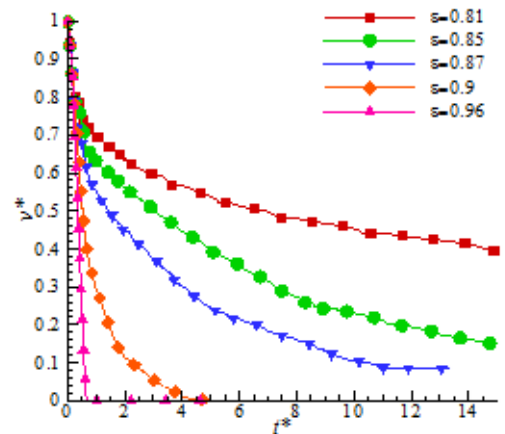
۶- نتایج مدلسازی و بحث و بررسی

برای بررسی نفوذ قطره در ماده متخلخل، ابتدا قطرهای با قطر اولیه d_0 را بصورت مماس بر سطح محیط متخلخل که بوسیله فاز دیگر پر شده است، قرار می‌دهیم و به طور مشابه برای بررسی نفوذ لایه‌ای از سیال، فیلمی از سیال به ارتفاع مشخص را مماس بر سطح محیط متخلخل می‌گذاریم. بعد از گذشت چند هزار تکرار و رسیدن به پایداری، قطره با سرعت اولیه u_0 و تحت نیروی گرانش رها می‌شود. اطراف ناحیه محاسباتی بصورت دیواره در نظر گرفته شده است و از شرط مرزی بازگشت به عقب کامل در کلیه سطوح جامد استفاده شده است.

۶-۱- بررسی تاثیر نسبت تخلخل

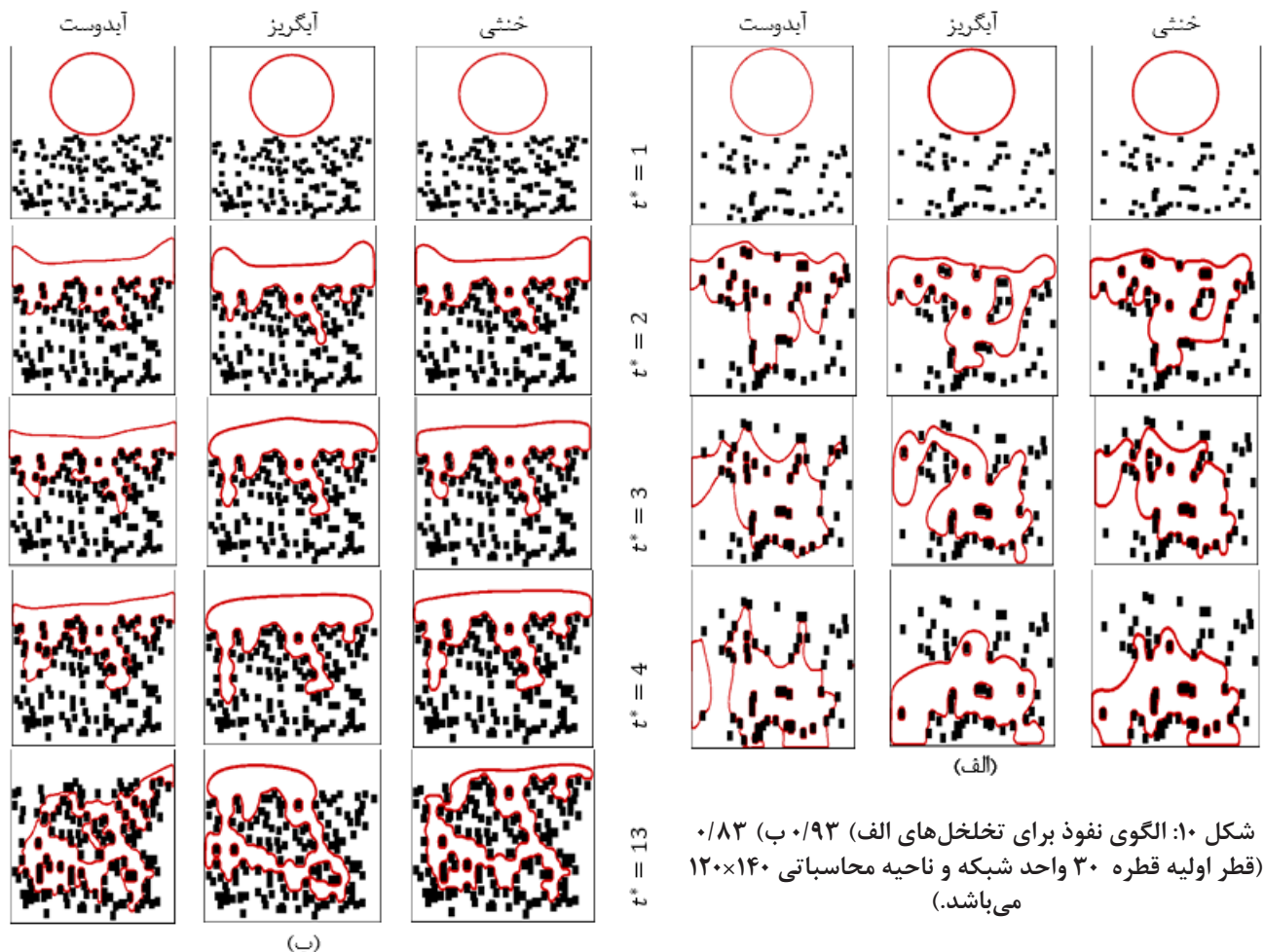
برای بررسی تاثیر نسبت تخلخل بر روی نرخ نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای، پدیده نفوذ در پنج تخلخل ۰/۹۶، ۰/۹۰، ۰/۸۷، ۰/۸۵ و ۰/۸۱ مورد بررسی قرار گرفته شده‌است. برای نمایش بهتر نرخ نفوذ در ماده متخلخل، از دو پارامتر استفاده شده‌است. پارامتر بی‌بعد h^* که بصورت نسبت عمق نفوذ (h) داخل محیط متخلخل در هر گام زمانی به ارتفاع کلی ماده متخلخل (L) تعریف شده‌است و با رابطه $h^* = h/L$ نشان داده می‌شود و پارامتر بی‌بعد v^* که بصورت نسبت حجم قطره خارج محیط متخلخل در هر گام زمانی به حجم اولیه قطره تعریف شده‌است و با $v^* = v/v_1$ نشان داده شده است. البته در حالت دوبعدی منظور از حجم، مساحت و در کدنویسی تعداد شبکه‌ها می‌باشد. طرحواره مربوط به آن در شکل ۷ نشان داده شده‌است؛ بطوریکه با استفاده از این دو پارامتر، تغییرات نرخ نفوذ هم از دیدگاه عمق نفوذ در محیط متخلخل و هم از دیدگاه حجم خارج محیط متخلخل مشخص می‌شود.

ماده متخلخل لایه‌ای یک بار همه نودهای جامد، آبدوست و یکبار آبگریز، فرض میشوند. ابعاد ناحیه محاسباتی 140×120 و قطر اولیه قطره 30 واحد شبکه می‌باشد. نتایج مربوط به الگوی نفوذ در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر دو تخلخل در حالتی که سطوح آبدوست هستند، سیال تمایل دارد مسیری را برای نفوذ انتخاب کند که با سطوح بیشتری در تماس باشد و تعداد لیسهای بیشتری را در برگیرد؛ در نتیجه داخل ماده متخلخل بیشتر پخش می‌شود و حفره‌های بیشتری را پر می‌کند. این الگوی نفوذ که سیال بیشتر به صورت کلونی نفوذ می‌کند، الگوی پیستون - مانند نامیده می‌شود. در صورتیکه در حالت آبگریز، سیال تمایل دارد به‌گونه‌ای از بین موانع عبور کند که کمترین تماس را با سطوح جامد داشته‌باشد، عبارتی سیال مانند انگشتان‌هایی از بین سطوح عبور می‌کند؛ به همین دلیل این الگوی نفوذ رژیم فینگرینگ یا انگشت - مانند نامیده می‌شود. البته این انگشت‌دانه‌ها در رژیم پیستونی نیز دیده می‌شود ولی ضخامت آنها بسیار کمتر از ضخامت انگشت‌دانه‌های رژیم انگشتی یا فینگرینگ است. تفاوت این دو رژیم در تخلخل $0.83/0.83$ محسوستر است. در حالت خنثی، الگوی نفوذ بین این دو الگو متغیر است و مشخصاتی از هر دو الگو را در زمانهای مختلف دارند. در شکل ۱۱ نفوذ در دو تخلخل مختلف برای قطر نفوذ کننده داخل محیط متخلخل آورده شده‌است. نمودارهای مربوط به نرخ نفوذ نشان میدهد



شکل ۹: مقایسه نرخ نفوذ J^* بر حسب t^* در نسبت تخلخلهای مختلف

در این حالت سطح تر نشونده و آبگریز نامیده می‌شود. در حالتیکه زاویه تماس بین سطوح جامد و سیال 90° درجه است، وضعیت خنثی نامیده می‌شود. مقادیر زاویه تماس و مقدار G_{ads} متناظرشان به ترتیب، برای حالت آبدوست، 60° درجه و $3/5$ - و برای حالت آبگریز، 120° درجه و $1/7$ -، از آزمون زاویه تماس بدست آمده‌اند. در اینجا، برای بررسی اثر خصوصیت آبدوست یا آبگریز بودن سطوح جامد روی نرخ و الگوی نفوذ در



شکل ۱۰: الگوی نفوذ برای تخلخل‌های الف) $0.93/0.83$ (ب) $0.83/0.83$ (قطر اولیه قطره 30 واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 140×120 می‌باشد).

خیس کردن سطوح و چسبندگی ایجاد شده بین سیال و سطوح موجب می‌شود سرعت نفوذ در عمق محیط متخلخل کمی کمتر از حالت آبگریز باشد. البته در این تخلخل اختلافات بسیار اندک است. گفتنی است، هندسه (ابعاد ناحیه محاسباتی)، شرایط اولیه و قطر اولیه قطره و البته تصادفی بودن تولید محیط متخلخل لایه‌ای در بدست آمدن این نتایج اثرگذار هستند، یعنی ممکن است با تغییر هر یک از عوامل فوق برآیند نیروهای وارد بر سیال در هنگام نفوذ به گونه‌های شود که نفوذ سریعتر یا کندتر رخ دهد.

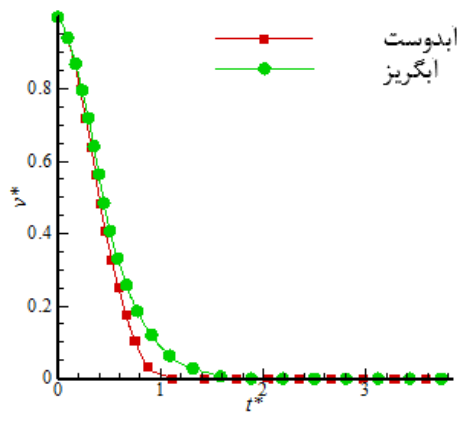
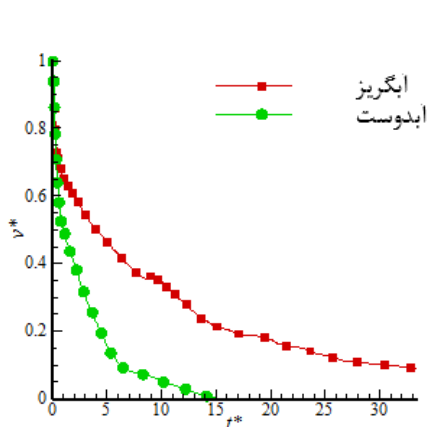
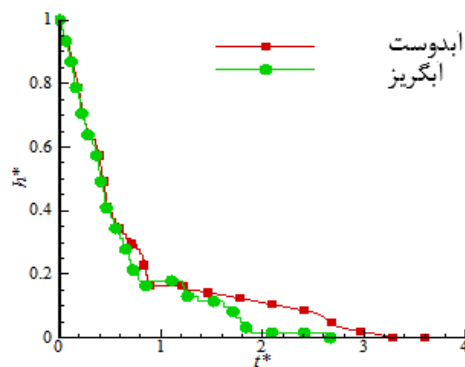
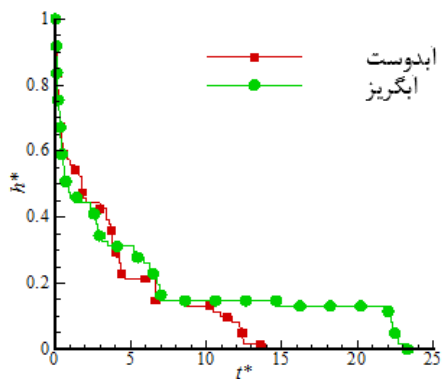
۷- توسعه کد برای مدلسازی جریان چند جزیی - چند فازي

کد نوشته شده به کمک معادلات ارائه شده در مراجع [۲۰، ۲۱] برای مدلسازی در حوزه جریانهای چند جزیی - چند فازي توسعه داده شده است. برای نشان دادن کارایی و درستی کد توسعه یافته ابتدا یک آزمون نمونه انجام شده است و نتایج با نتایج موجود مقایسه شده است.

۷-۱- اعتبار سنجی کد توسعه یافته

برای اطمینان از درستی کد دوفازی توسعه یافته، صعود و تغییر شکل دو حباب همسان ناهم‌محور مدلسازی شده است. آنالو همکاران [۲۲] رفتار دینامیکی دو قطره کروی ناهم محور را با استفاده از روش حجم محدود مدلسازی کردند.

که در تخلخل ۰/۸۳ در حالت آبدوست نفوذ در عمق ماده متخلخل نسبت به حالت آبگریز سریعتر اتفاق می‌افتد که از علت‌های آن می‌توان به تمایل سیال به خیس کردن سطوح بیشتر در این حالت و همچنین افزایش نیروهای مقاوم که بواسطه افزایش تعداد سطوح در حالت آبگریز زیاد شده است، اشاره کرد؛ این درحالی است که سرعت نفوذ حجم سیال بیرون محیط متخلخل به داخل آن نیز، بنا به دلایل گفته‌شده به همین صورت است و همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود در حالت آبگریز مقداری از سیال در خارج محیط متخلخل باقی خواهد ماند و نفوذ نمی‌کند. در تخلخل بالاتر نتایج کمی تغییر میکنند البته بطور کلی بدلیل وجود حفره‌های بیشتر سرعت نفوذ بیشتر از تخلخل ۰/۸۳ می‌باشد. در این تخلخل در هر دو حالت، نفوذ به طور کامل انجام می‌گیرد؛ هرچند که نیروی مقاوم سطح در حالت آبگریز و تمایل سیال به خیس کردن سطوح در حالت آبدوست موجب سریعتر رخ دادن نفوذ حجم سیال به داخل محیط متخلخل در حالت آبدوست نسبت به حالت آبگریز می‌شود ولی با ورود سیال به داخل محیط متخلخل، با توجه به وجود نیروی گرانش و موانع جامد کمتر، برآیند نیروهای وارد بر سیال بگونه‌های است که حتی به انجام سریعتر نفوذ میانجامد و سرعت نفوذ در حالت آبگریز بیشتر می‌باشد. این درحالی است که در حالت آبدوست در این تخلخل، تمایل سیال به

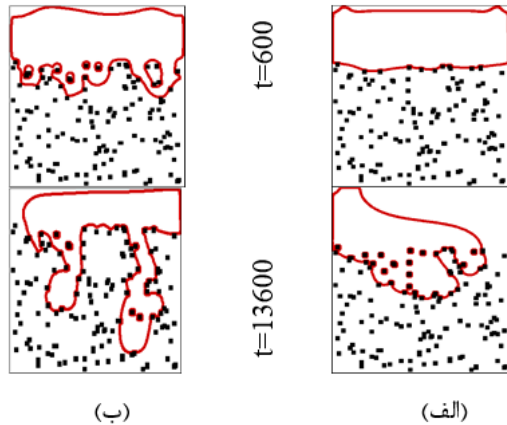


(ب)

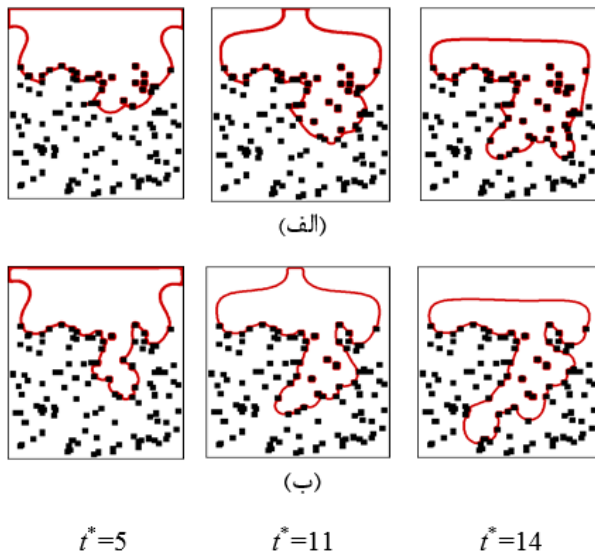
(الف)

شکل ۱۱: نرخ نفوذ در ماده متخلخل (الف) ۰/۹۳ (ب) ۰/۸۳

فینگرهای ایجاد شده در این حالت بسیار ضخیمتر از شکل ب می‌باشند. به این رژیم، رژیم کاپیلاری فینگرینگ [۲۳] می‌گویند. در شکل ۱۳- ب نفوذ به صورت انگشت-مانند پیشروی می‌کند، فقط از مسیرهای خاصی عبور مینماید و سیال نفوذکننده تعداد شبکه‌های کمتری را در بر می‌گیرد، این رژیم به رژیم ویسکوز فینگرینگ [۲۴] معروف است؛ نتایج عددی این مقاله نشان میدهند که این رژیم جریان در نسبت ویسکوزیته‌های پایینتر از ده و رنج وسیعی از عدد موئینگی رخ میدهد.



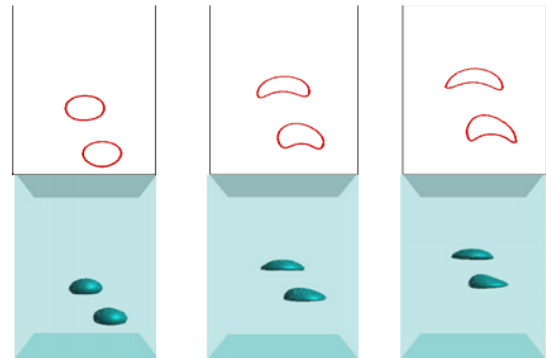
شکل ۱۳: الگوی نفوذ فیلم سیال در ماده متخلخل $\varepsilon=0.93$ (الف) $M=3$ و $Ca=0.0007$ و (ب) $M=1$ و $Ca=1.1$



شکل ۱۴: الگوی نفوذ برای تخلخل ۰/۹ (الف) سطوح آبدوست (ب) سطوح آبگریز (ارتفاع اولیه ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی ۱۲۰×۱۴۰ می‌باشد).

۷-۳- تغییر الگوی نفوذ با استفاده از سطوح آبدوست و آبگریز در قسمت قبل تفاوت دو الگوی نفوذ در شکل نشان داده شد، میتوان با در نظر گرفتن تمام شبکه‌های جامد بصورت آبدوست الگوی نفوذ را کمی تغییر داد. در حالت آبدوست، با توجه به تمایل سیال به خیس کردن سطح، تعداد نود بیشتری خیس میشوند و نفوذ بصورت یک جبهه منسجم،

در این قسمت، قبل از مدلسازی نفوذ در داخل محیط متخلخل در حالت دوجزیی- دوفازی صعود دو قطره با قطر اولیه یکسان مدلسازی شده‌است. مدلسازی در اعداد بی بعد ایتوس $E_0 = (g\Delta\rho d^2)/\sigma$ و عدد مورتن $M_0 = (g\Delta\rho \rho_g^2 v^4)/\sigma^3$ که به ترتیب دارای مقادیر ۱۶ و ۰/۰۰۰۲ می‌باشند، انجام شده‌است. در شکل ۱۲ نتایج مدلسازی با نتایج مطالعه آنالد مقایسه شده‌است. در این مورد حباب جلویی دچار تغییر شکل بیش‌تری از حباب عقبی می‌شود. در حقیقت بنظر می‌رسد حباب جلویی آزادانه در سیال اطراف صعود می‌کند و موجی که تولید می‌کند بشدت حباب پایین‌تر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. موج حاصل از حباب جلویی مانند یک بالابر برای حباب پشت سر رفتار می‌کند و نیروی درگ و هم‌چنین تغییر شکل آن‌را کاهش می‌دهد. با گذشت زمان، حباب عقبی با ورود به ناحیه موج حاصل از حباب بالاتر در حین سقوط تغییر شکل بیشتری می‌یابد. تفاوت دو مدلسازی فقط در ابعاد ناحیه محاسباتی و نسبت چگالی و ویسکوزیته می‌باشد. البته نتایج کاملاً برهم منطبق می‌باشند.



شکل ۱۲: مدل‌سازی صعود دو حباب نا هم‌محور کانال عمودی. (شکل بالایی مطالعه حاضر و شکل پایین از نتایج آنالد و همکاران [۲۲] باروش vof).

۷-۲- نفوذ فیلم سیال در محیط متخلخل لایه‌ای

در این قسمت، رژیم نفوذ در ماده متخلخل در چند عدد موئینگی و نسبت ویسکوزیته مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ در اینجا دو عدد بی‌بعد، موئینگی که با رابطه $Ca = (\rho_l u_0 v_l)/\sigma$ نشان داده می‌شود و ρ_l, v_l, u_0 و σ به ترتیب سرعت اولیه، ویسکوزیته سیال نفوذکننده، چگالی سیال نفوذکننده و کشش سطحی می‌باشند و نسبت ویسکوزیته، M است. در شکل ۱۳ الگوی نفوذ فیلم سیال نشان داده شده است. ابعاد ناحیه محاسباتی 175×160 و ابعاد ناحیه متخلخل 118×160 می‌باشد و ارتفاع اولیه فیلم سیال ۵۰ واحد شبکه است. مقادیر چگالیها، $\rho_1 = 1$ و $\rho_2 = 0.25$ هستند و سطوح از نظر آبدوستی و آبگریزی خنثی در نظر گرفته شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، در شکل ۱۳- الف نفوذ بصورت یک جبهه منسجم پیشروی می‌کند و تعداد شبکه‌های بیشتری را در برمی‌گیرد؛ در واقع سیال تمام حفرات موجود در مسیری که از آن عبور می‌کند را پر مینماید. البته در بعضی نواحی در طی نفوذ، فینگرهایی هم قابل مشاهده می‌باشد ولی با آزمایشهای عددی مختلف به این نتیجه رسیدیم که

عبور مینماید.

در ادامه، برای نشان دادن توانایی کد نوشته شده، کد در حالت دو جزئی - دو فازی توسعه داده شده است و برای اطمینان از درستی کد، یک آزمون ساده انجام شده و با نتایج قبلی درستی سنجی شده است. پس از اطمینان از درستی کد توسعه داده شده، الگوی نفوذ در اعداد مؤینگی و نسبت ویسکوزیته مختلف بررسی شده است و دو رژیم ویسکوزیته فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ مشاهده و توضیح داده شده است. چگونگی تغییر الگوی نفوذ به کمک سطوح آبدوست / آبریز نیز بررسی شد؛ این امر میتواند به ارائه راهکاری برای تغییر مسیر نفوذ سیال و هدایت آن در مسیرهای مشخص بیانجامد که در آینده به آن خواهیم پرداخت. جریان سیالات با نسبت چگالی بالا و پدیده نفوذ در ماده متخلخل اهمیت زیادی در صنایع مختلف از جمله نفت و پتروشیمی، صنایع رنگسازی، ساخت پرینترهای جوهرافشان دارد و به همین دلیل توجه ویژه ای به این موضوعات شده است؛ برای مثال یافتن راه حلی برای تعیین مسیر پدیده نفوذ داخل محیط متخلخل، میتواند در صنایعی مثل بهره وری بیشتر پیلهای سوختی، فرآوری نفت و گاز، مسائل زیست محیطی مثل نفوذ آب باران در خاک و هدایت آن به سمت سفره های آب زیرزمینی و غیره بسیار کارآمد باشد.

۹- مراجع

- [1] A.K. Gunstensen; D.H. Rothman; S. Zaleski and G. Zanetti, "Lattice Boltzmann model of immiscible fluids", J. Physical Review A, Vol. 43, pp. 4320-4327, 1991.
- [2] X. Shan and H. Chen, "Simulation of nonideal gases and liquid-gas phase transitions by the lattice Boltzmann equation", J. Physical Review E, Vol. 49, pp. 2941-2948, 1994.
- [3] O.W. Swift MR, Yeomans JM, "Lattice Boltzmann simulation of nonideal fluids", J. Phys Rev Lett, Vol. 75, pp. 830-833, 1995.
- [4] X. He; S. Chen and R. Zhang, "A Lattice Boltzmann Scheme for Incompressible Multiphase Flow and Its Application in Simulation of Rayleigh-Taylor Instability", J. Journal of Computational Physics, Vol. 152, pp. 642-663, 1999.
- [5] P. Yuan and L. Schaefer, "Equations of state in a lattice Boltzmann model", J. Physics of Fluids (1994-present), Vol. 18, 2006.
- [6] A.L. Kupershtokh; D.A. Medvedev and D.I. Karpov, "On equations of state in a lattice Boltzmann method", J. Computers & Mathematics with Applications, Vol. 58, pp. 965-974, 2009.
- [7] T. Inamuro; T. Ogata; S. Tajima and N. Konishi, "A

باصطلاح مانند یک پیستون (منسجم) پیشروی می کند، البته فینگرهایی با ضخامت زیاد نیز مشاهده میشوند شکل ۱۴- ب به همین دلیل میتوان ادعا کرد رژیم نفوذ، به الگوی کاپیلاری فینگرینگ نزدیک شده است.

۸- نتیجه گیری

بدلیل سادگی و آسانی روش شان و چن در مدلسازی هندسه های پیشرفته مثل محیط متخلخل، توسعه این مدل برای نسبت چگالیهای بالا اهمیت دارد و از آنجا که مدل شبه پتانسیل قادر به مدلسازی جریانها با چگالی بالا نیست و دما بطور مستقیم در معادلات ظاهر نشده است. در این مطالعه، از معادلات حالت استفاده شده است؛ در نتیجه این کار، جمله دما بطور صریح در محاسبات ظاهر شده است و امکان مدلسازی جریانها با نسبت چگالی بالا فراهم شده است. در این مطالعه، تاثیر دما بر روی کشش سطحی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بیانگر کاهش کشش سطحی با افزایش نسبت دما است. برای اطمینان از درستی مدلسازی و کد نوشته شده سه آزمون ساده انجام شده است از جمله مقایسه منحنیهای پیوستگی حاصل با نمودار ماکسول، ترکیب دو قطره در هم و سقوط و برخورد قطره با سطح با ترشوندگیهای مختلف که همگی با نتایج گزارش شده توسط محققان مطابقت دارند.

در ادامه، نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه ای، با نسبت چگالی بالا به کمک معادله حالت R-k بررسی شده است. در این مطالعه برای یکنواختتر شدن توزیع موانع جامد، محیط متخلخل از چهار قسمت با تخلخل یکسان تشکیل شده است. برای بررسی نرخ نفوذ، دو پارامتر جدید تعریف شده است؛ نرخ نفوذ عمقی که نرخ نفوذ را بر مبنای عمق نفوذ سیال داخل محیط متخلخل نشان میدهد و نرخ نفوذ حجمی (در حالت دو بعدی) که نرخ نفوذ را بر مبنای نفوذ حجم سیال بیرون محیط در داخل محیط متخلخل بیان می کند. تاثیر نسبت تخلخل بر روی این نرخهای نفوذ بررسی شده است؛ نتایج نشان میدهند با کاهش تخلخل و در واقع کاهش حفره ها و فضاهای باز، هر دو نرخ نفوذ کاهش میابند. سپس، تاثیر ویژگی آبدوستی / آبریزی سطوح جامد بر روی نرخهای نفوذ و الگوی نفوذ در دو تخلخل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است؛ در تخلخل پایین، هر دو نرخ نفوذ عمقی و حجمی، در حالت سطوح آبدوست بیشتر از حالت آبریز می باشند، در حالیکه در تخلخل بالا، نتایج تغییر می کند و نرخ نفوذ حجمی در حالت آبدوست بدلیل تمایل سیال به خیس کردن سطوح بیشتر و نیروی چسبندگی ایجاد شده، کمی بیشتر از حالت آبریز است. در حالیکه با نفوذ سیال در محیط متخلخل این چسبندگی ایجاد شده بین سیال و سطوح از یک طرف و غلبه نیروی گرانش بر نیروهای مقاوم در برابر نفوذ در حالت آبریز از طرف دیگر، موجب افزایش نرخ نفوذ عمقی در حالت آبریز شده است. بررسی الگوی نفوذ نیز نشان میدهد، در حالت آبدوست با توجه به تمایل سیال به خیس کردن سطح، نفوذ مانند یک پیستون (منسجم) پیشروی می کند. در حالت آبریز، سیال به صورت انگشتانه هایی با کمترین تماس ممکن با شبکه های جامد، از بین حفره ها

- flows”, J. Computers & Fluids, Vol. 53, pp. 93-104, 2012.
- [16] A.T. Prashant K. Jain, Rizwan-uddin, “A lattice Boltzmann framework to simulate boiling–water reactorcore hydrodynamics”, J. Computers and Mathematics with Applications, Vol. 58, pp. 975-986, 2009.
- [17] T. Reis, “The Lattice Boltzmann Method for Complex Flows”. University of Cardiff: United Kingdom, 2007.
- [18] C.S. H.W. Zheng, Y.T. Chew, “A lattice Boltzmann model for multiphase flows with large density ratio”, J. Journal of Computational Physics, Vol. 218, pp. 353–371, 2006.
- [19] M. Taghilou and M.H. Rahimian, “Investigation of two-phase flow in porous media using lattice Boltzmann method”, J. Computers & Mathematics with Applications, Vol. 67, pp. 424-436, 2014.
- [20] S. Chen and G.D. Doolen, “LATTICE BOLTZMANN METHOD FOR FLUID FLOWS”, J. Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 30, pp. 329-364, 1998.
- [21] X. Shan and H. Chen, “Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components”, J. Physical Review E, Vol. 47, pp. 1815-1819, 1993.
- [22] N.G.D. M. van Sint Annaland, J.A.M. Kuipers, “Numerical simulation of gas bubbles behaviour using a three-dimensional volume of fluid method”, J. Chemical Engineering Science, Vol. 60, pp. 2999-3011, 2005.
- [23] H. Huang; J.-J. Huang and X.-Y. Lu, “Study of immiscible displacements in porous media using a color-gradient-based multiphase lattice Boltzmann method”, J. Computers & Fluids, Vol. 93, pp. 164-172, 2014.
- [24] A.M. Worthington, “On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate”, J. Proc. R. Soc. Lond. Ser. A, Vol. 25, pp. 261–271, 1876.
- lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density differences”, J. Journal of Computational Physics, Vol. 198, pp. 628-644, 2004.
- [8] R. Zhang and H. Chen, “Lattice Boltzmann method for simulations of liquid-vapor thermal flows”, J. Physical Review E, Vol. 67, pp. 066711, 2003.
- [9] A. Hu; L. Li; S. Chen; Q. Liao and J. Zeng, “On equations of state in pseudo-potential multiphase lattice Boltzmann model with large density ratio”, J. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 67, pp. 159-163, 2013.
- [10] C. Zhang; M. Oostrom; T.W. Wietsma; J.W. Grate and M.G. Warner, “Influence of Viscous and Capillary Forces on Immiscible Fluid Displacement: Pore-Scale Experimental Study in a Water-Wet Micromodel Demonstrating Viscous and Capillary Fingering ”, J. Energy & Fuels, Vol. 25, pp. 3493-3505, 2011.
- [11] B. Dong; Y.Y. Yan; W. Li and Y. Song, “Lattice Boltzmann simulation of viscous fingering phenomenon of immiscible fluids displacement in a channel”, J. Computers & Fluids, Vol. 39, pp. 768-779, 2010.
- [12] M. Taghilou and M.H. Rahimian, “simulation of 2D droplet penetration in porous media using lattice boltzmann method ”, J. Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, pp.43-56, 2014.
- [13] M.C. Sukop, Thorne, Daniel T., “ Lattice Boltzmann Modeling ”. 1 ed., Florida USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [14] M.R. kamali, “A Lattice Boltzmann Approach to Multi-Phase Surface Reactions with Heat Effects”, in Chemical Engineering. Delft– University of Technology, 2013.
- [15] S. Gong and P. Cheng, “Numerical investigation of droplet motion and coalescence by an improved lattice Boltzmann model for phase transitions and multiphase