



کاربرد روش نوآورانه شبکه بولتزمن آنتروپیک برای شبیه‌سازی جریان چند فازي در بستر متخلخل

سیدامیر حسینی مقدم¹، مسعود ایرانمنش^{2*}، ابراهیم جهانشاهی جواران²، عابد زاده گل²

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

* کرمان، صندوق پستی 76315117، m.iranmanesh@kgut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، با استفاده از مدل جنبشی سرعت ثابت آنتروپیک (CSKM) که بر پایه تابع آنتروپی غیر متعارف برگ و تسالیس می‌باشد و با بکارگیری مدل شبه-پتانسیل شان-چن، جریان دوفازی سیال‌های تراکم ناپذیر و مخلوط نشدنی در بستر متخلخل مورد مطالعه قرار می‌گیرد. عدم وجود یک تابع آنتروپی در مدل‌های متعارف شبکه بولتزمن (که در آن‌ها تابع توزیع تعادلی به صورت چند جمله‌ای است) قبلاً به اثبات رسیده است و نشان داده شده است که در مدل‌های مذکور تضمینی برای برقراری قانون دوم ترمودینامیک وجود ندارد. از این رو، در برخی از شرایط جریان (به طور مثال در جریان‌های چند فازي با اختلاف دانسیته‌ی بالا) مدل‌های متعارف شبکه بولتزمن ممکن است دچار ناپایداری‌های عددی شوند. در کار حاضر، دقت و پایداری مدل آنتروپیک سرعت ثابت جدید در مقایسه با مدل‌های شبکه بولتزمن متعارف با انجام شبیه‌سازی‌های جداسازی فازها، قانون لاپلاس و محاسبه‌ی زاویه تماس مورد ارزیابی قرار گرفته است و سپس شبیه‌سازی جریان دو فازي در کانال دو بعدی، به منظور مقایسه ضریب تراوایی نسبی با حل تحلیلی انجام شده است. همچنین جریان دو فازي در یک بستر متخلخل شبیه‌سازی شده و اثر تخلخل و ترشوندگی بر روی ضریب نفوذپذیری نسبی بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده با دقت بسیار خوبی منطبق بر نتایج ارائه شده توسط سایر محققین می‌باشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 بهمن 1396
پذیرش: 12 فروردین 1397
ارائه در سایت: 21 اردیبهشت 1397
کلید واژگان:
جریان چندفازی
مدل جنبشی آنتروپیک
روش شان-چن
بستر متخلخل
ضریب نفوذپذیری نسبی

Application of innovative entropic lattice Boltzmann method for multiphase fluid flow through porous media

Seyed Amir Hosseini Moghaddam, Masoud Iranmanesh*, Ebrahim Jahanshahi Javaran, Abed Zadeh gol

Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

* P.O.B. 76315117, Kerman, Iran, m.iranmanesh@kgut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 February 2018
Accepted 01 April 2018
Available Online 11 May 2018

Keywords:

Multiphase flow
Entropic kinetic model
Shan-Chen method
Porous media
Relative permeability coefficient

ABSTRACT

In this work, using the recently introduced constant speed kinetic model (CSKM) with the unconventional entropies of Burg and Tsallis and employing the Pseudo-Potential model of Shan and Chen (SC), two phase flow of the incompressible and immiscible fluids through porous media is studied. It is known that for the conventional lattice Boltzmann model (LBM) with polynomial equilibrium distribution function (EDF) an H-theorem does not exist. Hence, the thermodynamic consistency of the conventional LBM, under all flow conditions (e.g. for the multi-phase flows with high density ratio) cannot be guaranteed and numerical instabilities can occur. In this work, the accuracy and stability of the CSKM and conventional LBM are compared, by simulating the phase separation, Laplace law, and contact angles. Next, two phase flow in simple channel and through porous media are simulated and the relative permeability versus wettability are reported. The present results are in excellent agreement with previous works of others.

1- مقدمه

به‌منظور ازدیاد برداشت، جریان موجود چند فازي می‌باشد [1]. مهمترین علامت مشخصه جریان‌های دوفازی سطح مشترک بین فازهای گاز و مایع بوده که دارای اشکال مختلفی می‌باشد. تقریباً امکان پیدایش یک دامنه نامحدود از فصل‌های مشترک مختلف بین دو فاز وجود دارد، اما عموماً تاثیر کشش سطحی¹ بین دو فاز منجر به پیدایش فصل‌های مشترک مختلف منحنی شکل شده که نهایتاً تمامی آن‌ها تبدیل به اشکال کروی (نظیر

جریان‌های چند فازي نقش مهمی در بسیاری از فرایندهای طبیعی، کاربردهای مهندسی در صنایع، محیط‌های پیچیده از جمله محیط‌های متخلخل و پیل‌های سوختی، جریان‌های با وجه متغیر مثل جریان جت مایع، جریان سطح آزاد و دینامیک حباب‌ها، ایفا می‌کنند. در صنایع نفت و گاز احتمال چند فازي شدن سیال در عملیات برداشت از مخزن و عملیات انتقال فرآورده‌های نفتی وجود دارد و همچنین در تزریق آب و گاز به مخازن نفتی

¹ Surface tension

قطره‌ها و حباب‌ها) می‌شوند. در طول فرآیندهای جریان چند فاز، ممکن است فازهای مختلف جریان با یکدیگر ترکیب، جدا و حتی شاید از یک فاز به فاز دیگر تبدیل شوند. به عبارت دیگر امکان تشکیل قطرات آب در محیط بخار و یا حباب‌های بخار در یک محیط مایع وجود دارد.

در سال‌های اخیر روش شبکه بولتزمن¹ به دفعات و با موفقیت برای تحلیل بسیاری از مسائل و پدیده‌های مرتبط با مکانیک سیالات مورد استفاده قرار گرفته است. برخلاف دیگر روش‌های متعارف دینامیک سیالات محاسباتی که روش‌هایی با دیدگاه میکروسکوپی می‌باشند، روش شبکه بولتزمن بر مبنای مدل‌های مزوسکوپی و معادله جنبشی (دیدگاه مزوسکوپی) استوار است، که در آن رفتار جمعی ذرات تشکیل دهنده محیط سیال برای شبیه‌سازی رفتار سیستم به عنوان یک محیط پیوسته مورد توجه و بررسی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، خصوصیات و پارامترهای ماکروسکوپی سیال به عنوان یک محیط پیوسته، بر مبنای خصوصیات و پارامترهای مربوط به حرکت ذرات تشکیل دهنده آن (خصوصیات مزوسکوپی) به دست می‌آیند. به علت وجود این طبیعت جنبشی- ذره‌ای و نیز سادگی اعمال شرایط مرزی، این روش‌ها به خوبی در حل مسائل متعدد مکانیک سیالات به خصوص جریان با مرزهای پیچیده مانند جریان در محیط‌های متخلخل [2]، جریان‌های چند فاز [3] و جریان‌های چند جزئی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در بعضی موارد می‌توان آن را بهترین راه حل برای تحلیل مسأله دانست.

شبکه بولتزمن بر اساس گسسته‌سازی در میدان سرعت در جهت‌های خاصی بنا نهاده شده است. در مرجع [4] نشان می‌دهد که راه حل‌ها و نتایج حاصل از شبکه بولتزمن و معادله بولتزمن می‌توانند متفاوت باشند و تنها در محدوده خاصی از هیدرو دینامیک همگرا می‌باشند. علاوه بر این در استخراج روش شبکه بولتزمن از معادله بولتزمن، ویژگی‌های آنتروپی پیوسته معادله اصلی حفظ نمی‌شوند. در مرجع [5] عدم وجود تابع آنتروپی H برای شبکه بولتزمن متعارف با استفاده از چند جمله‌ای‌های معادلات پاره‌ای نشان داده شده است.

کارلین و همکاران [6] روش شبکه‌ای بولتزمن آنتروپیک² را برای شبیه‌سازی جریان دو فاز مورد استفاده قرار دادند. نوآوری اصلی در کار کارلین در آن است که آن‌ها برای نخستین بار از یک مدل آنتروپیک برای شبیه‌سازی جریان دو فاز و بررسی پدیده‌های دینامیک در مرز مایع-گاز استفاده نمودند و جزئیات برخورد دو قطره و تشکیل یک قطره جدید را با دقت بسیار زیاد شبیه‌سازی نمودند. مظلومی و همکاران [7] این مطالعه را توسعه دادند به گونه‌ای که بررسی سیال دو فاز (یعنی سیال واقع در مرز مایع گاز) با مرز جامد انجام‌پذیر می‌گردد. آن‌ها با استفاده از مدل آنتروپیک ELBM پدیده‌های تر کردن سطح جامد، پخش شدن بر سطح و تشکیل زاویه‌ی تماس بین سطح مشترک سیال دو فاز و سطح جامد را شبیه‌سازی می‌کنند. شبیه‌سازی‌های مذکور با استفاده از مدل‌های پیشین شبکه‌ی بولتزمن امکان‌پذیر نبود چرا که مدل‌های قبلی فاقد تابع آنتروپی بودند و همچنین سازگاری ترمودینامیکی نداشتند.

زاده‌گل و اشرفی‌زاده [8] و زاده‌گل [9] مدل جنبشی آنتروپیک جدید سرعت ثابت³ را ارائه نمودند. در مدل‌های شبکه بولتزمن، گسسته‌سازی میدان سرعت در هر دو مرحله برخورد و انتشار صورت می‌گیرد در حالی که در مدل جنبشی سرعت ثابت، گسسته‌سازی میدان سرعت فقط در مرحله

انتشار انجام می‌شود و تابع توزیع تعادلی دارای یک فرم غیرخطی می‌باشد. در روش مذکور برای تغییرات محدود ولی بزرگ تابع توزیع ذرات نسبت به وضعیت تعادلی آن، یک تابع آنتروپیک H وجود دارد به گونه‌ای که مشتق مادی H نسبت به زمان همواره کوچکتر و یا مساوی صفر می‌گردد. وجود یک تابع آنتروپیک برای یک مدل جنبشی به معنی وجود یک وضعیت تعادلی مشخص در هر حالت ممکن از جریان می‌باشد و لذا پایداری مدل را در تمام شرایط جریان تضمین می‌نماید. لازم به ذکر است که در مدل شبکه بولتزمن آنتروپیک متعارف ارائه شده توسط کارلین و همکاران [6]، از یک تعریف جدید برای تابع آنتروپی به صورت $H = -\sum f_i \log(f_i/w_i)$ استفاده می‌شود. علاوه بر آن در مدل ELBM نیاز به محاسبه‌ی یک پارامتر جدید α در هر گام زمانی است که با استفاده از آن زمان آرامش مدل به صورت موضعی و در هر گام زمانی تصحیح می‌شود. برای تعیین پارامتر مذکور، در مدل ELBM، لازم است که جواب غیربدیهی معادله‌ی کمکی $H(f) = H[f - \alpha(f - f^{eq})]$ با استفاده از روش آزمایش و خطا محاسبه شود. در این خصوص لازم به ذکر است که حل معادله‌ی کمکی فوق با استفاده از روش آزمایش و خطا هزینه‌ی محاسبات را افزایش می‌دهد. علاوه بر آن نشان داده شده است که معادله‌ی کمکی مذکور در برخی از شرایط خاص جریان دارای یک حل غیربدیهی $\alpha \neq 0$ نمی‌باشد که در این صورت از یک معادله کمکی برای تعیین α استفاده می‌شود. در مدل CSKM برای حالت دو بعدی تابع آنتروپی غیر متعارف برگ به صورت $H = \sum w_i \log f_i$ مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای ابعاد بالاتر تابع آنتروپی غیرمتعارف تسالیس به صورت $H = \sum w_i f_i^{1-\frac{2}{n}}$ به کار بسته می‌شود. با توجه به این که در مدل آنتروپیک جدید CSKM، نیازی به تصحیح زمان آرامش نیست، لذا انتظار می‌رود در صورت حل جریان دو فاز با استفاده از مدل آنتروپیک جدید، ضمن بازیابی نتایج ارائه شده توسط مظلومی و همکارانش بتوان بر پایداری مدل افزود و در عین حال هزینه‌های محاسباتی مربوطه را نیز کاهش داد.

در CSKM ذرات مجازی برخورد به صورت پیوسته در سطح یک کره با تعداد نامحدود توزیع می‌شوند. افزون بر آن در مرجع [10] گسسته‌سازی میدان سرعت برای CSKM، منجر به شکل‌های گسسته آنتروپی‌های برگ⁴ و تسالیس⁵ می‌شوند.

مدل شبکه بولتزمن بر مبنای برخورد و انتشار ذرات در مسیرهای گسسته و از پیش تعیین شده‌ی یک شبکه منظم ایجاد شده است، در حالی که در CSKM ذرات به صورت پیوسته بر روی یک کره n -بعدی توزیع شده‌اند و گسسته‌سازی میدان سرعت فقط به منظور انتقال اطلاعات توزیع ذرات از یک کره n -بعدی به کره‌های مجاور می‌باشد. به عبارت دیگر گسسته‌سازی میدان سرعت در CSKM صرفاً یک روش محاسباتی به منظور پیاده‌سازی مرحله انتشار می‌باشد. در صورت موجود بودن توان محاسباتی کافی، در روش CSKM محدودیتی در تعداد جهات انتشار وجود ندارد و می‌توان حتی از روش‌هایی نظیر گالرخین گسسته⁶ برای مرحله انتشار ذرات استفاده نمود [11]. شکل گسسته توابع آنتروپی برگ و تسالیس توسط بوقاسیان [12] ارائه شده است. در کار مذکور نشان داده شده است که به کارگیری آنتروپی گسسته به طریق فوق، منجر به تابع توزیع تعادلی به شکل یک سری نامحدود می‌شود که با توجه به پیچیدگی این تابع توزیع تعادلی، عملاً استفاده از آن بسیار محدود می‌باشد. در مرجع [13] دقت روش جنبشی

⁴ burg⁵ Tsallis⁶ discontinuous Galerkin¹ Lattice Boltzmann Method (LBM)² Entropic Lattice Boltzmann Method (ELBM)³ Constant Speed Kinetic Model (CSKM)

بردارهای هادی در جهات 18 گانه در این فضا به صورت $V_{1-2} = (\pm 1, 0, 0)$ ، $V_{3-4} = (0, \pm 1, 0)$ ، $V_{5-6} = (0, 0, \pm 1)$ ، با ضرایب وزنی برابر $w_{1-6} = 1/24$ و $V_{7-10} = (0, \pm 1, \pm 1)$ ، $V_{11-14} = (\pm 1, 0, \pm 1)$ و $V_{15-18} = (\pm 1, \pm 1, 0, 0)$ با ضرایب وزنی برابر $w_{7-18} = 1/24$ در می‌آیند. در مرجع [9] نشان داده شده است که این روش تصویر کردن از فضای 4-بعدی به فضای 3-بعدی باعث می‌شود تا تابع توزیع تعادلی در شبکه d3z18 به صورت معادله (3) درآید:

$$[f_i]_{3D}^{eq} = w_i \left[\frac{\rho v^2 (V^2 - U^2)}{(V^2 + U^2 - 2u_\alpha v_\alpha)^2} \right] \quad (3)$$

در ادامه با تصویر کردن مجدد فضای اصلی، در فضای 2-بعدی بردارهای هادی برای جهات مختلف برابر $V_{1-2} = (\pm 1, 0)$ ، $V_{3-4} = (0, \pm 1)$ ، با ضرایب وزنی برابر $w_{1-4} = 4/24$ و $V_{5-8} = (\pm 1, \pm 1)$ با ضرایب وزنی برابر $w_{5-8} = 1/24$ و بردار $V_9 = (0, 0)$ با ضرایب وزنی $w_9 = 4/24$ حاصل می‌شوند که یک واحد شبکه برای جهات مختلف در "شکل 1" رسم شده است. تابع توزیع تعادلی برابر معادله (4) خواهد شد [13]:

$$[f_i]_{2D}^{eq} = w_i \left[\frac{\rho v^2 (V^2 - U^2)}{(V^2 + U^2 - 2u_\alpha v_\alpha)^2} \right] \quad (4)$$

در روش CSKM، فشار به سرعت ماکروسکوپی سیال بستگی دارد. اگر چه خطای به وجود آمده در مدل از مرتبه دوم می‌باشد اما با افزودن ذره‌ی مقیم در مرکز می‌توان وابستگی مذکور را به طور کامل حذف نمود. بدین منظور، برای تنظیم معادله حالت، در تعریف تابع توزیع تعادلی، بخشی از جرم به مرکز برخورد انتقال داده می‌شود و سپس به همان میزان و به‌طور یکنواخت از جرم ذرات متحرک که بر دایره‌ی برخورد قرار دارند کاسته می‌شود. در نتیجه انجام مراحل فوق تابع توزیع تعادلی برای جهات 1 تا 8 به‌صورت معادله (5-الف) و برای نقطه مرکزی به‌صورت معادله (5-ب) تصحیح می‌گردد [7]:

$$f_i^{eq} = w_i \left[\frac{\rho v^2 (V^2 - U^2)}{(V^2 + U^2 - 2u_\alpha v_\alpha)^2} - \lambda \right] \quad (5-الف)$$

$$f_0^{eq} = w_0 \left[\frac{\rho v^2 (V^2 - U^2)}{(V^2 + U^2)^2} \right] + \rho \lambda \quad (5-ب)$$

3- مدل چند فازی شان-چن

مدل‌های چند فازی بسیاری با استفاده از روش شبکه بولتزمن ارایه شده‌اند که چهار روش اصلی برای مدل سازی جریان دو فازی به قرار زیر می‌باشند:

- 1- مدل گرادیان رنگ² ارائه شده توسط گانستنسن و همکاران [15]
- 2- مدل شبه پتانسیل کنشی³ ارائه شده توسط شان و چن [16]
- 3- مدل انرژی آزاد⁴ ارائه شده توسط سووفت و همکاران [17]
- 4- مدل تئوری میدان⁵ ارائه شده توسط هی و همکاران [18]

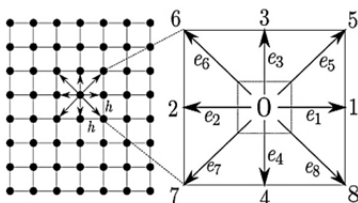


Fig. 1 lattice unit cell in CSKM

شکل 1 یک واحد شبکه در روش CSKM

CSKM در دو بعد و سه بعد مورد بررسی قرار گرفته و سپس جریان تک جزئی در بستر متخلخل شبیه‌سازی و نتایج مربوط به ضریب نفوذپذیری مطلق مورد بحث قرار گرفته شده است. تطابق کانتورهای آنتروپی ثابت و فشار ثابت برای اثبات آنتروپیک بودن روش CSKM از دیگر نتایج مهم، در مرجع مذکور بوده است.

در این پژوهش، در ابتدا به تشریح مدل جنبشی CSKM پرداخته و در ادامه روش شبه پتانسیل شان-چن برای پیاده‌سازی بر روی این مدل بررسی می‌شود. با انجام سه آزمون جداگانه (جداسازی فازها، آزمون حباب و آزمون زاویه تماس) و استفاده از معادله حالت، مدل از لحاظ تطبیق با قانون لاپلاس اعتبارسنجی شده است. کاهش سرعت‌های پارازیتی و همچنین دقت روش در شبیه‌سازی جریان در کانال دو بعدی در جریان دوفازی در مدل مذکور و مدل‌های متعارف شبکه بولتزمن مقایسه می‌شود. در انتها جریان دو فازی مخلوط نشدنی در یک بستر متخلخل شامل دایره‌هایی با چیدمان مثلثی، شبیه‌سازی و تأثیرات ترشوندگی بر روی ضریب نفوذپذیری نسبی بررسی می‌گردد.

2- مدل جنبشی سرعت ثابت (CSKM)

در حالت حدی، هنگامی که تعداد جهات انتشار به بی‌نهایت میل می‌کند می‌توان شکل پیوسته توابع آنتروپی برگ و تسالیس را برای ایجاد یک مدل جنبشی آنتروپیک جدید مورد استفاده قرار داد [9]. در این صورت تابع توزیع تعادلی مدل پیوسته را می‌توان با استفاده از کرنل پواسون n-بعدی و به صورت دقیق با معادله (1) بیان کرد:

$$f_{nD}^{eq} = \frac{\rho v^{n-2}}{\sigma_n} \left[\frac{V^2 - U^2}{(V^2 + U^2 - 2u_\alpha v_\alpha)^{n/2}} \right] \quad (1)$$

که در آن σ_n مساحت سطح رویه n-بعدی، $V \equiv |V|$ و $U \equiv |U|$ سرعت‌های میکرو و ماکروسکوپی می‌باشند.

علاوه بر آن در مرجع [11] نشان داده شده است که در مرحله انتشار ذرات نیز می‌توان از مدل‌های شبکه و یا گالرین گسسته استفاده نمود، بنابراین CSKM از یک سو سادگی مدل‌های شبکه بولتزمن متعارف را دارا می‌باشد و از سوی دیگر به دلیل آنتروپیک بودن روش از پایداری بسیار بالاتری برخوردار است.

در صورت استفاده از آنتروپی برگ و مدل‌های دو بعدی، تنها شبکه منظم دو بعدی که در آن فاصله نقاط همسایه از هر نقطه مشخصی یکسان باشد شبکه شش ضلعی است. با توجه به پیچیدگی استفاده از شبکه شش ضلعی برای انجام محاسبات عددی و همچنین به منظور افزایش جهات انتشار می‌توان از مدل 4-بعدی CSKM و شبکه مکعبی FCHC¹ که دارای 24 جهت انتشار می‌باشد استفاده کرد [14]. بردارهای هادی این شبکه 4-بعدی به صورت $V_{1-4} = (\pm 1, 0, 0, \pm 1)$ ، $V_{5-8} = (0, \pm 1, 0, \pm 1)$ ، $V_{9-12} = (0, 0, \pm 1, \pm 1)$ و $V_{13-16} = (\pm 1, 0, \pm 1, 0)$ ، $V_{17-20} = (\pm 1, 0, \pm 1, 0)$ و نهایتاً $V_{21-24} = (\pm 1, \pm 1, 0, 0)$ می‌باشند. با توجه به تقارن، در شبکه FCHC، ضرایب وزنی برای همه جهات انتشار یکسان و برابر $w_i = 1/24$ می‌باشند و تابع توزیع تعادلی در فضای 4-بعدی به صورت معادله (2) می‌باشد.

$$f_{4D}^{eq} = \frac{\rho v^2}{\sigma_4} \left[\frac{V^2 - U^2}{(V^2 + U^2 - 2u_\alpha v_\alpha)^2} \right] \quad (2)$$

چنانچه بردارهای فضای 4-بعدی به فضای 3-بعدی تصویر شوند [13].

² color-gradient model

³ inter-particle potential model

⁴ Free Energy model

⁵ field theory model

¹ Face-Centered Hyper-Cube

تعریف شده باشد می‌توان تابع پتانسیل را از رابطه (12) به دست آورد:

$$\psi = \sqrt{\frac{2(P - c_s^2 \rho)}{c_s^2 G}} \quad (12)$$

بدین صورت می‌توان معادله حالت‌های مختلف را برای روش شان-چن در جریان چند فاز مورد استفاده قرار داد. معادلات حالتی که معمولاً در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از وان در والس¹، ریدلیش-کوانگ²، پنگ-رابینسون³ و کارناهان-استرلینگ⁴ که در مرجع [24] به صورت کامل بیان شده است. به منظور استفاده از زوایای تماس⁵ مختلف در این روش می‌توان به راحتی از تغییر ρ_w استفاده نمود [25]. نیروی چسبندگی بین فاز گاز-مایع و دیوار به وسیله رابطه (13) محاسبه شده است.

$$F_{ads}(x, t) = -G_{ads} \psi(\rho) \sum_{a=1}^8 w_a \psi(\rho_w) s(x + e_a \Delta t, t) e_a \quad (13)$$

که در این معادله $s(x + e_a \Delta t, t)$ یک تابع شاخص دو مقداری 0 و 1 به ترتیب برای گره‌های مایع و جامد می‌باشد. در این جا ρ_w چگالی دیوار و واقعیت نیست بلکه تنها یک پارامتر آزاد برای تنظیم خواص دیواره‌های مختلف می‌باشد.

4- نتایج

در این قسمت در ابتدا مدل‌سازی دینامیکی سطح مشترک بین دو فاز و سپس آزمون لاپلاس⁶ و زاویه تماس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج جریان دوفازی لایه‌ای مخلوط نشدنی در کانال دو بعدی و در انتها جریان دوفازی در بستر متخلخل ارائه می‌شود.

4-1- شبیه‌سازی فرآیند جداسازی فازها

به منظور مطالعه جریان تک جزئی چند فاز به بررسی فرآیند جداسازی فازهای گاز و مایع در یک اختلاط تصادفی پرداخته شده است. در ابتدا دانسیته همه نقاط حل را عددی معین ($\rho_0 = 200$) در نظر گرفته شده است و یک مقدار تصادفی کمتر از یک به همه نقاط اضافه می‌شود و فرآیند جداسازی فازها شروع خواهد شد. وجود نیروی چسبندگی بین فازها باعث خواهد شد تا فاز مایع در فضای بخار به صورت قطره‌ای دایروی شکل ایجاد شود. با توجه به مقدار G در نیروی چسبندگی، اختلاف دو فاز مایع و بخار متفاوت خواهد بود. در "شکل 2" تغییرات اختلاف دو فاز مایع و بخار بر حسب افزایش G به نمایش گذاشته شده است.

همان‌طور که بیان شد G بیانی از قدرت چسبندگی دو فاز می‌باشد که افزایش آن منجر به اختلاف دانسیته‌های بالاتری برای هر فاز خواهد شد. این آزمایش برای دو روش شبکه بولتزمن متعارف و CSKM انجام شد و برای شرایط کاملاً یکسان همان‌طور که ملاحظه می‌شود حداکثر اختلاف دانسیته برای شبکه بولتزمن حدود 22 برابر و برای روش CSKM تا حدود 75 برابر شده است. یکی از مهمترین دلایلی که در روش CSKM می‌توان به اختلاف دانسیته بالاتری نسبت به شبکه بولتزمن معمولی رسید کاهش سرعت‌های غیرفیزیکی می‌باشد که در بخش بعدی مفصلاً در مورد آن بحث شده است.

از میان این مدل‌ها، مدل شبه‌پتانسیل شان-چن به دلیل کارایی محاسباتی و قابلیت استفاده آن در نسبت چگالی بالا، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است [19]. در مدل شان-چن، یک مولفه نیرو در معادله بولتزمن قرار داده شده که از طریق آن فعل و انفعالات غیرمحملی بین ذره‌ای اعمال شده بین شبکه‌های همسایه به وسیله یک تابع شبه پتانسیلی (جرم مؤثر) وارد معادلات می‌شود [20]. این تابع فرم معادله حالت سیال و تغییر فاز را کنترل می‌کند و جدایش فازها به صورت خودکار در حالت دوفازی به کمک این تابع اتفاق می‌افتد.

در این جا به پیاده‌سازی مدل شان-چن در دو بعد برای جریان تک فاز چند جزیی پرداخته می‌شود. سرعت ماکروسکوپیک تعادلی در تابع توزیع دانسیته تعادلی به صورت معادله (6) تعریف می‌شود:

$$u^{eq} = u + \frac{\tau F}{\rho} \quad (6)$$

که در این جا u در جریان چند جزیی به صورت معادله (7) تعریف می‌شود:

$$u = \frac{\sum_a f_a e_a}{\rho} \quad (7)$$

F نیروی اعمال شده بر سیال مورد نظر می‌باشد که مجموع نیروهای داخلی F_{int} ، نیروی چسبندگی بین فازهای مایع-گاز و جامد F_{ads} و نیروهای خارجی F_{ext} می‌باشد. نیروی بین ذرات که باعث جداسازی فازها می‌شود به صورت معادله (8) تعریف می‌شود [16]:

$$F_{int}(x, t) = -G \psi(x, t) \sum_{a=1}^8 w_a \psi(x + e_a \Delta t, t) e_a \quad (8)$$

که در این معادله G پارامتر قدرت نیروی چسبندگی میان ذرات دو فاز (عامل کشش سطحی) می‌باشد. هر چه میزان G زیاده‌تر شود ضخامت مرز میان فازها کوچکتر شده و در نتیجه شیب تغییرات چگالی هر جزء در راستای عمود بر آن تندتر می‌شود. اگر مقدار G کم در نظر گرفته شود به دلیل مبهم بودن مرز میان فازها محاسبات عددی دارای خطای زیادی خواهد بود و کلاً جداسازی انجام نخواهد شد. لازم به ذکر است که اگر مقدار این پارامتر بیش از اندازه زیاد باشد، شبیه‌سازی عددی ناپایدار خواهد شد.

تابع ψ که با نام تابع شبه‌پتانسیل مشهور است، یک تابع صعودی از چگالی هر نقطه و ملاکی از تأثیر مستقیم آن در نیروی میان فازها است. برای این تابع بسته به معادله حالت غیرایده‌آل رابطه‌های مختلفی ارائه شده است که در این جا از رابطه (9) استفاده می‌شود:

$$\psi(\rho) = \psi_0 e^{(-\rho_0/\rho)} \quad (9)$$

که در این رابطه ψ_0 و ρ_0 مقادیر ثابت اختیاری می‌باشند. توابع حالت مختلف پتانسیل برای روش شان-چن در نظر گرفته شده است که همه این توابع به صورت یکنواخت تا مقدار مشخصی در حال افزایش می‌باشند [21]. یکی دیگر از این فرم‌ها برای تابع پتانسیل به صورت رابطه (10) می‌باشد:

$$\psi(\rho) = \rho_0 [1 - e^{(-\rho_0/\rho)}] \quad (10)$$

با استفاده از بسط تیلور، همان‌گونه که در مرجع [22] مشاهده می‌شود $(-\partial_j p + \partial_i (c_s^2 \rho)) = F_i$ می‌توان فشار را از رابطه (11) به دست آورد:

$$P = c_s^2 \rho + \frac{c_s^2 G}{2} [\psi(\rho)]^2 \quad (11)$$

با توجه به نتایج یوان و همکاران [23] اگر در معادله حالت،

¹ van der Waals

² Redlich-Kwong

³ Peng-Robinson

⁴ Carnahan-Starling

⁵ Contact Angle

⁶ Laplace law

چشمگیری داشته است. این اتفاق به دلیل بیشتر بودن جهات انتشار در شبکه FCHC و همچنین آنتروپیک بودن روش افتاده است.

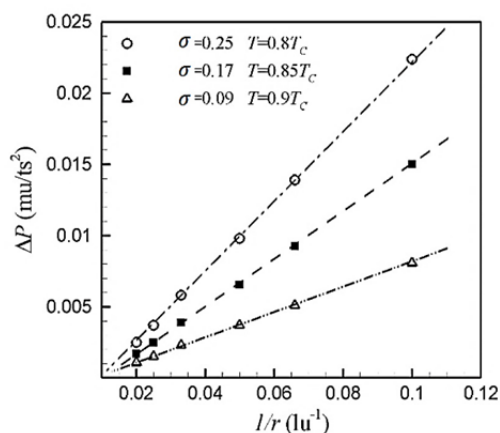


Fig. 3 Variation of pressure difference versus curvature ($1/r$) at different temperatures

شکل 3 تغییرات اختلاف فشار برحسب انحنا ($1/r$) در دماهای مختلف

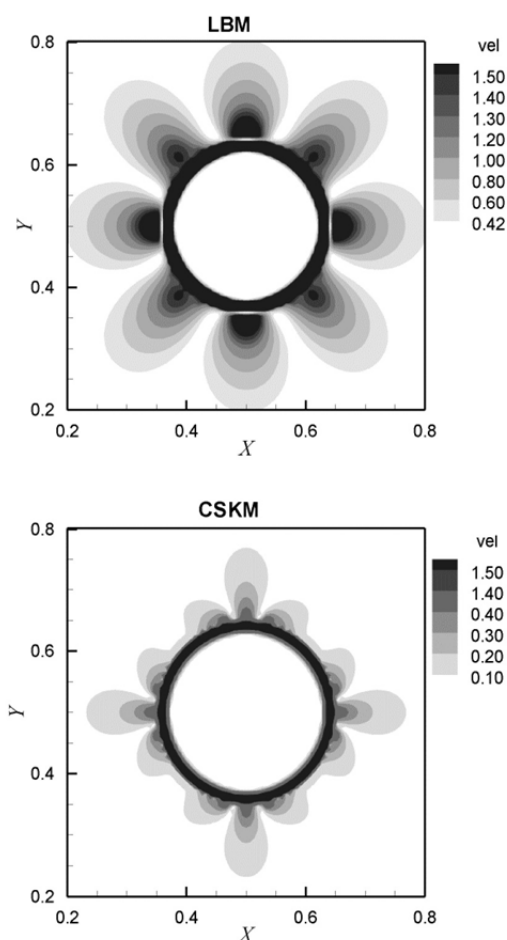


Fig. 4 Velocity contours for static droplet and comparison of spurious velocities in two methods of conventional Lattice Boltzmann method and CSKM

شکل 4 کانتورهای سرعت برای قطره ساکن و مقایسه سرعت‌های پارازیتی در دو روش شبکه بولتزمن متعارف و CSKM

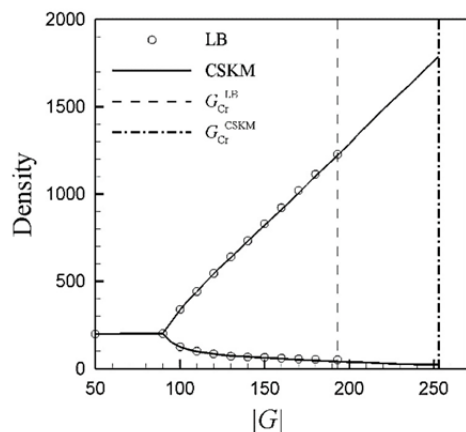


Fig. 2 Maximum and minimum density values as a function of $|G|$
شکل 2 حداکثر و حداقل مقدار چگالی برحسب تابعی از $|G|$

4-2- آزمون لاپلاس

آزمون لاپلاس از جمله مهم‌ترین آزمون‌ها در صحت‌سنجی کد و روش در شبیه‌سازی دینامیکی سطح مشترک دو سیال می‌باشد. از معایب روش شبه پتانسیل عدم وجود روش مستقیمی برای محاسبه کشش سطحی می‌باشد، به‌طوری که برای محاسبه کشش سطحی، انجام آزمون لاپلاس لازم می‌باشد. مطابق قانون لاپلاس اختلاف فشار میان داخل و خارج در یک قطره دایره‌ای شکل با رابطه (14) محاسبه می‌شود [26]:

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

که در این رابطه ΔP ، σ و r به ترتیب اختلاف فشار داخل و خارج قطره، کشش سطحی و شعاع قطره می‌باشد.

برای انجام آزمون لاپلاس، قطره‌ای به ازای مقادیر معین دما و چگالی‌های دو فاز، در مرکز یک میدان محاسباتی به ابعاد 150×150 با شرط مرزی تناوبی در هر چهار طرف میدان، قرار داده شده است. بعد از آن که قطره به حالت تعادل رسید، اختلاف فشار میان داخل و خارج آن را محاسبه کرده و اختلاف فشار متناظر با عکس شعاع رسم می‌شود (شکل 3). این آزمایش برای قطره با همان شرایط اولیه و فقط با تغییر در شعاع تکرار می‌شود. با وصل کردن نقاط حاصل خط راستی به‌دست می‌آید که شیب آن بیانگر کشش سطحی قطره می‌باشد. همان‌طور که در "شکل 3" ملاحظه می‌شود با کاهش دما، که بیانگر کاهش اختلاف چگالی دو فاز می‌باشد کشش سطحی کاهش می‌یابد که این امر به علت کاهش نیروهای بین مولکولی رخ داده است.

در مثال حاضر توجه به این نکته ضروری می‌باشد که برای محاسبه مقادیر فشار داخل و خارج، باید به اندازه کافی از فصل مشترک میان دو فاز فاصله گرفت. چرا که به علت حضور سرعت‌های موضعی غیرفیزیکی در فصل مشترک، مقادیر فشار در این ناحیه دچار تغییراتی می‌شود. البته قوت روش CSKM نسبت به شبکه بولتزمن معمولی به وضوح قابل نشان دادن می‌باشد. اگر میدان سرعت بی‌بعد، در دو روش برای این مثال با شرایط کاملاً یکسان مقایسه شود، کاهش چند برابری این سرعت‌های غیرفیزیکی در روش CSKM ملاحظه خواهد شد. "شکل 4" این میدان‌های سرعت را برای دو چگالی فاز مایع $\rho_l = 6.0$ و فاز گاز $\rho_g = 0.4$ را نشان می‌دهد. مدل CSKM در واقع از یک مدل 24 جهتی 4-بعدی منشأ گرفته است که با دو مرحله تصویر نمودن در ابعاد پایین‌تر، مدل 2-بعدی 8 جهتی حاصل شده است. لذا علی‌رغم یکسان بودن بیشینه سرعت‌های پارازیتی در دو روش، میانگین این سرعت‌های موضعی غیرفیزیکی در روش جدید کاهش

باشد، فاز موردنظر ترکنده خواهد بود. در کار حاضر برای انجام این شبیه‌سازی‌ها از معادله حالت ریدلیش-کوانگ مطابق رابطه (17) استفاده شده است [30]:

$$P = \frac{\rho RT}{1 - b\rho} - \frac{a\rho^2}{\sqrt{T}(1 + b\rho)} \quad (17)$$

که در این رابطه $a = 2/49$ ، $b = 2/21$ ، $T_c = 0.1961$ و $T = 0.85T_c$ به عنوان مقادیر ثابت در نظر گرفته شده‌اند. چگالی فاز مایع $\rho_l = 6.0$ ، و چگالی فاز گاز $\rho_g = 0.4$ می‌باشد. در ادامه به بررسی تغییرات بر روی زاویه تماس پرداخته می‌شود که نتایج را می‌توان در "شکل 6" مشاهده نمود.

4-4- جریان دوفازی لایه‌ای مخلوط نشدنی در کانال دو بعدی

جریان دوفازی لایه‌ای مخلوط نشدنی را بین دو صفحه موازی مطابق "شکل 7" در نظر گرفته می‌شود. ابتدا به حل تحلیلی این جریان بین دو صفحه موازی پرداخته و سپس با شرایط مرزی مناسب به صحت‌سنجی روش پرداخته شده است. عامل حرکت در این کانال اعمال نیروی خارجی روی کل میدان محاسباتی می‌باشد.

در این مثال، همان‌گونه که در "شکل 7" مشاهده می‌شود فاز ترکنده در ناحیه $a < |y| < b$ و فاز ترنشونده در مرکز کانال یعنی $0 < |y| < a$ قرار دارند. مطابق "شکل 5" بدیهی است مقدار اشباع فاز ترکنده برابر $S_{nw} = 1 - a/b$ و مقدار اشباع برای فاز ترنشونده $S_{nw} = a/b$ می‌باشند.

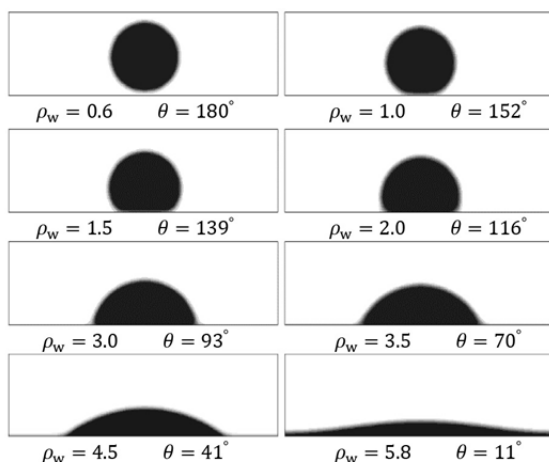


Fig. 6 Drop modeling on solid surface and calculated contact angle

شکل 6 مدل‌سازی قطره بر روی سطح جامد و زاویه تماس محاسبه شده

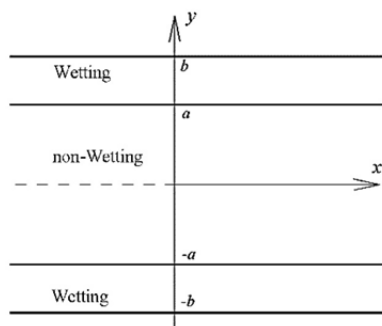


Fig. 7 Immiscible two-phase flow between two parallel plates

شکل 7 جریان دوفازی مخلوط نشدنی بین دو صفحه موازی

⁶ wetting phase saturation

4-3- محاسبه زاویه تماس

با قرار گرفتن یک قطره انحلال‌ناپذیر در تماس با یک مرز جامد، میان سیال ترشونده¹، سیال ترنشونده² و سطح جامد خط تماسی ایجاد می‌شود که زاویه تماس را همان‌گونه که در "شکل 5" ملاحظه می‌شود، تشکیل می‌دهد [27]. ترشوندگی یک سطح نسبت به سیال، بستگی به زاویه تماس θ دارد. برای $\theta < 90^\circ$ ، سیال تمایل به خیس کردن سطح دارد، بنابراین سطح ترشونده می‌باشد و برای $\theta > 90^\circ$ ، سیال به صورت فشرده در می‌آید، بنابراین سطح ترنشونده خواهد بود. برای پیش‌بینی میزان زاویه تماس می‌توان از معادله یانگ³ مطابق رابطه (15) استفاده کرد [28]:

$$\cos(\theta) = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sl}}{\sigma_{gl}} \quad (15)$$

که در این رابطه σ_{sl} و σ_{sg} به ترتیب میزان کشش سطحی میان فاز گاز و فاز مایع با سطح جامد می‌باشند و همچنین σ_{gl} نیز مقدار کشش سطحی بین دوفاز گاز و مایع را تعیین می‌کند. زاویه تماس میان قطره و سطح جامد را می‌توان به کمک پارامترهای هندسی مساله و رابطه (16) محاسبه نمود [29]:

$$\theta = \pi - \tan^{-1}\left(\frac{b/2}{r-h}\right), \quad r = \frac{4h^2 + b^2}{8h} \quad (16)$$

لازم به ذکر است در محاسبه عددی پارامترهای هندسی فوق، تعیین موقعیت فصل مشترک دو فاز مسأله‌ای قابل توجه می‌باشد، زیرا موقعیت این فصل مشترک دارای ضخامت در حد چند واحد می‌باشد که مقادیر چگالی در این قسمت از چگالی مایع تا چگالی گاز در حال کاهش است. در مطالعه حاضر موقعیت فصل مشترک در محلی قرار دارد که چگالی برابر میانگین چگالی‌های دوفاز مایع و گاز است.

برای انجام شبیه‌سازی‌های مذکور از یک شبکه 150×150 استفاده شده است. فاز مایع در یک شبکه 40×25 به صورت مماس بر دیواره پایینی قرار داده و فاز گازی اطراف آن مقدار دهی اولیه شده است. با در نظر گرفتن مقادیر معینی برای ρ_w و بعد از حدود 20000 مرحله که میدان به حالت پایا در آمد، مقدار زاویه تماس با توجه به مقادیر هندسی محاسبه خواهد شد. بر روی دیواره پایینی و بالایی شرط مرزی کمانه کردن⁴ در روی نقاط، و در دیواره‌های جانبی از شرط مرزی تناوبی⁵ استفاده شده است. برای ایجاد زوایای تماس مختلف از مقادیر معینی برای ρ_w که عددی بین دو چگالی مایع و گاز است استفاده می‌شود. اگر این مقادیر به هر یک از فازها نزدیک‌تر

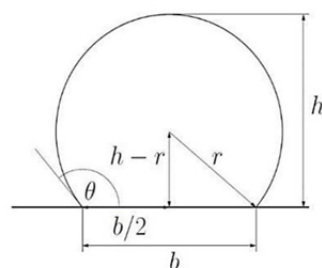


Fig. 5 The contact angle scheme between the droplet and solid surface

شکل 5 طرح‌واره زاویه تماس بین قطره و سطح جامد

¹ Wetting

² Non Wetting

³ young equation

⁴ bounce back boundary condition

⁵ Periodic boundary condition

$$k_{r,nw} = \frac{\int_{|x|=0}^a U_{nw} dx}{\int_{|x|=0}^L U_{nw} dx} \quad (21-ب)$$

در ادامه ضریب نفوذپذیری نسبی فاز ترشونده و ترنشونده را برحسب اشباع فاز ترشونده در "شکل 9" رسم نموده و نتایج عددی روش CSKM با حل تحلیلی مقایسه شده است.

5-4- جریان دوفازی در بستر متخلخل

در این قسمت جریان دوفازی در یک بستر متخلخل دو بعدی شامل دوایری با چیدمان مثلثی به‌عنوان مرز جامد شبیه‌سازی شده است. ابعاد شبکه محاسباتی 200×150 واحد مربع و شعاع دایره‌های جامد 20 واحد و تخلخل شبکه برابر $\varepsilon = 0.69$ می‌باشد. در ابتدا دو فاز ترشونده و ترنشونده به صورت تصادفی با نسبت‌های اشباع مشخص مقداردهی می‌شوند. در این قسمت شرط مرزی تناوبی برای تمام جهات در نظر گرفته شده است. نیروی حجمی F در راستای مثبت محور x بر هر دو فاز سیال اعمال می‌شود.

لازم به ذکر است در جریان دوفازی در بستر متخلخل سه عدد بی‌بعد نسبت ویسکوزیته دو فاز جریان M ، عدد رینولدز³ $Re = ud/\nu$ و عدد موینگی⁴ $Ca = \mu/\sigma$ دارای اهمیت می‌باشند. عدد موینگی را می‌توان نسبت نیروهای حجمی به نیروهای سطحی بین دو فاز در نظر گرفت. در مقاله حاضر $M = 15$ و نیروی حجمی اعمالی بر میدان محاسباتی $F = 5 \times 10^{-4}$ در نظر گرفته شده است. بنابراین عدد موینگی با توجه به تعریف بالا برابر $Ca = F/\sigma = 5 \times 10^{-4}/0.16625 = 0.003$ خواهد بود. مقادیر بالای عدد موینگی بیانگر آن است که حرکت فازها بیشتر توسط نیروهای لزجی کنترل می‌شود.

در "شکل 10" توزیع چگالی جریان دوفازی در بستر متخلخل در حالت پایا برای $S_w = 0.25$ ، $S_w = 0.5$ و $S_w = 0.75$ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی‌ها فاز گازی ترشونده (رنگ روشن) و فاز مایع ترنشونده (رنگ آبی) و زاویه تماس $\theta = 180^\circ$ می‌باشد. در "شکل 10-ا)" با توجه به آن که اشباع فاز ترشونده بسیار پایین است و

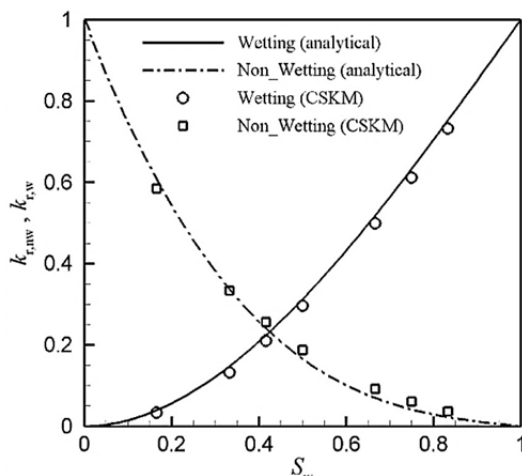


Fig. 9 The relative permeability of wetting and non wetting phases in terms of saturated wetting phase in the two-dimensional channel

شکل 9 منحنی ضریب نفوذپذیری نسبی فازهای ترشونده و ترنشونده برحسب اشباع فاز ترشونده در کانال دو بعدی

برای جریان پواریه¹ در کانال، راه حل تحلیلی برای پروفایل سرعت بین صفحات موازی برای فاز ترشونده در ناحیه $a < |y| < b$ مطابق رابطه (18) برابر خواهد بود با [31]:

$$u(y) = \frac{\Delta P}{2l\mu_w} (b^2 - y^2) = \frac{\Delta F}{2\mu_w} (b^2 - y^2) \quad (18)$$

برای فاز ترنشونده در ناحیه $0 < |y| < a$ پروفایل سرعت طبق رابطه (19) برابر خواهد بود با:

$$u(y) = \frac{\Delta F}{2\mu_w} (b^2 - a^2) + \frac{\Delta F}{2\mu_{nw}} (a^2 - y^2) \quad (19)$$

که در معادلات فوق ΔF گرادیان فشار در جهت جریان می‌باشد که به طور مستقیم در معادله‌های بالا وارد شده است. با استفاده از معادله‌های (20-الف) و (20-ب)، نفوذپذیری نسبی² هر فاز برحسب اشباع فاز ترکنده مطابق حل تحلیلی برابر است با [31]:

$$k_{r,w} = \frac{1}{2} S_w^2 (3 - S_w) \quad (20-الف)$$

$$k_{r,nw} = S_{nw} \left[\frac{3}{2} M + S_{nw}^2 \left(1 - \frac{3}{2} M \right) \right] \quad (20-ب)$$

که در این روابط، $M = \rho_{nw}/\rho_w$ می‌باشد. با توجه به معادله‌های (20-الف) و (20-ب) شایان ذکر است با توجه به آن که $S_w \in [0, 1]$ می‌باشد، $k_{r,w} \in [0, 1]$ خواهد بود و این در حالی است که ممکن است $k_{r,w}$ بیشتر از یک باشد، زیرا ضریب نفوذپذیری فاز ترنشونده علاوه بر S_w تابعی از M نیز می‌باشد. در مطالعه حاضر به مقایسه پروفایل سرعت در یک مقطع عرضی کانال برای دو روش شبکه بولتزمن متعارف و روش CSKM با حل تحلیل پرداخته شده است. در این مثال $M = 0.0667$ و $S_w = 0.333$ در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از این مقایسه در "شکل 8" ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج روش CSKM انطباق خیلی بهتری نسبت به روش شبکه بولتزمن دارد که این به دلیل پایداری و قوت روش CSKM نسبت به روش شبکه بولتزمن می‌باشد. ضریب نفوذپذیری نسبی هر فاز از لحاظ سرعت سطحی ذرات مایع در یک سطح مقطع عمود بر جریان مطابق معادلات (21) تعریف می‌شوند [31].

$$k_{r,w} = \frac{\int_{|x|=a}^L U_w dx}{\int_{|x|=0}^L U_w dx} \quad (21-الف)$$

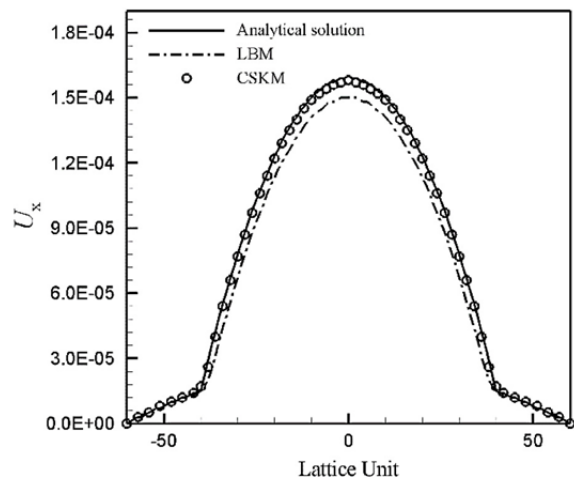


Fig. 8 The velocity profile for the flow between two parallel plates

شکل 8 پروفایل سرعت برای جریان بین دو صفحه موازی

³ reynolds number

⁴ capillary number

¹ Poiseuille Flow

² relative permeability

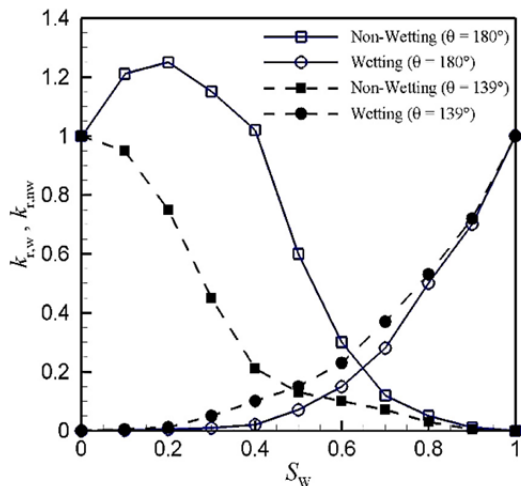


Fig. 11 The coefficient of relative permeability of wetting and non-wetting phases in terms of the saturated phase of wetting for two angles of contact $\theta = 180^\circ$ and $\theta = 139^\circ$

شکل 11 ضریب نفوذپذیری نسبی دو فاز ترشونده و ترنشونده در بستر متخلخل برحسب اشباع فاز ترشونده برای دو زاویه تماس $\theta = 180^\circ$ و $\theta = 139^\circ$

در ادامه به بررسی تأثیرات ترشوندگی بر روی ضریب نفوذپذیری پرداخته شده است. بدین منظور شبیه‌سازی جریان دو فاز در بستر متخلخل را با زاویه‌های تماس مختلف انجام شده است. اگر $\rho_w = 1.5$ و زاویه تماس $\theta = 139^\circ$ باشد و با همان عدد موینگی شبیه‌سازی‌ها تکرار شود نمودار ضریب نفوذپذیری بر برحسب اشباع فاز ترشونده به صورت "شکل 12" با شبیه‌سازی قبلی قابل مقایسه می‌باشد.

با توجه به "شکل 11" و مقایسه میان دو شبیه‌سازی می‌توان گفت که ضریب نفوذپذیری نسبی فاز ترشونده نسبت به حالت قبل بیشتر شده و این پدیده با توجه به کاهش ترشوندگی و زاویه تماس قابل پیش‌بینی هم بود. اما در مورد فاز ترنشونده، با کاهش قابل توجه ضریب نفوذپذیری نسبی مواجه شده و این به علت کاهش ترشوندگی فاز ترنشونده قابل توجه است. با کاهش

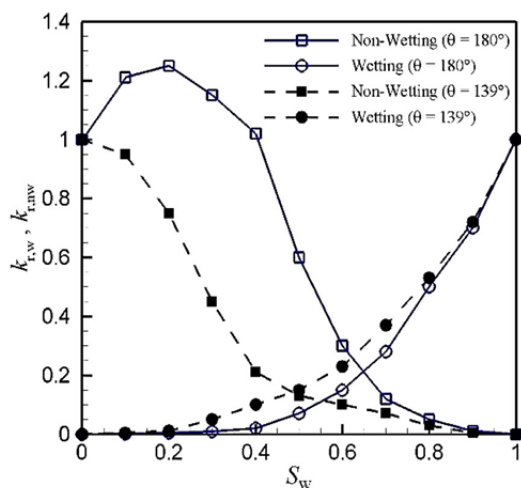


Fig. 11 The coefficient of relative permeability of wetting and non-wetting phases in terms of the saturated phase of wetting for two angles of contact $\theta = 180^\circ$ and $\theta = 139^\circ$

شکل 11 ضریب نفوذپذیری نسبی دو فاز ترشونده و ترنشونده در بستر متخلخل برحسب اشباع فاز ترشونده برای دو زاویه تماس $\theta = 180^\circ$ و $\theta = 139^\circ$

عملاً فاز ترنشونده جریان کلی در میدان محاسباتی را انجام می‌دهد در نتیجه $k_{r,nw} > 1$ و $k_{r,w} \ll 1$ می‌باشد و بدین صورت قابل توجه می‌باشد که فاز ترکننده بیشتر دیواره‌های جامد را پوشش داده و نقش روان کننده برای فاز ترنشونده را دارد در نتیجه حرکت فاز ترنشونده به خوبی در میدان متخلخل انجام می‌شود.

در "شکل 10-(b)" کانتور چگالی برای $S_w = 0.5$ را نشان می‌دهد. همان گونه که قابل مشاهده می‌باشد فاز ترنشونده پیوسته و فاز ترشونده ناپیوسته را در بر گرفته در نتیجه $k_{r,nw} > k_{r,w}$ خواهد بود. اما برای "شکل 10-(c)" فاز ترنشونده به صورت قطراتی در بین فاز ترشونده می‌باشد و به دلیل مقاومت در برابر نیروهای موینگی حرکتی بسیار کند دارد پس در نتیجه $k_{r,nw} \ll 1$ می‌باشد. ضریب نفوذپذیری نسبی برای فاز ترشونده و ترنشونده برحسب اشباع فاز ترشونده در "شکل 11" نشان داده شده است. به دلیل روان کاری فاز ترشونده برای محدوده $0 < S_w < 0.4$ ، ضریب نفوذپذیری فاز ترنشونده $k_{r,nw}$ بزرگتر واحد می‌باشد. در ادامه با افزایش اشباع فاز ترشونده به دلیل وجود نیروهای موینگی ضریب نفوذپذیری فاز ترنشونده کاهش می‌یابد.

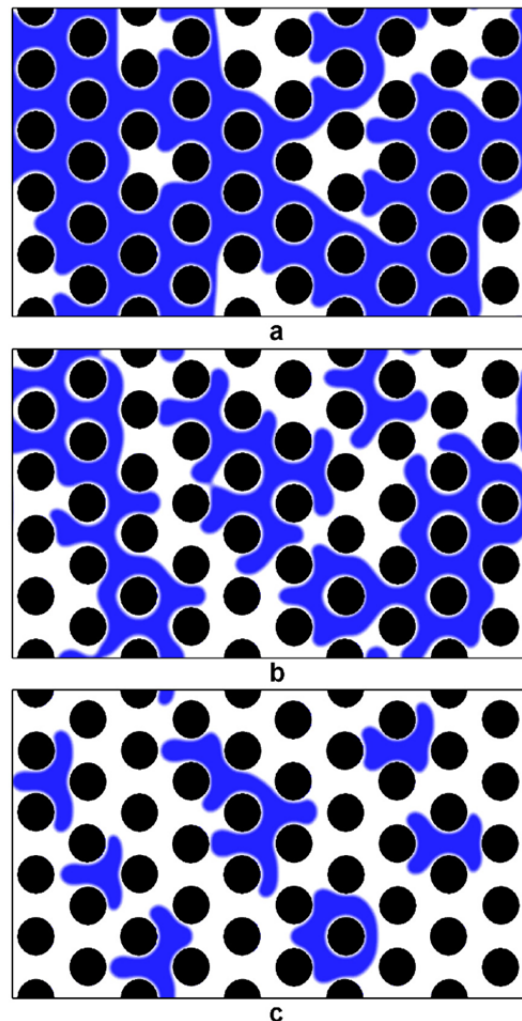


Fig. 10 Steady-state two-phase flow in porous media at $\theta = 180^\circ$ for (a) $S_w = 0.25$, (b) $S_w = 0.5$, (c) $S_w = 0.75$

شکل 10 جریان پایایی دو فاز در بستر متخلخل در $\theta = 180^\circ$ برای $S_w = 0.25$ (a)، $S_w = 0.5$ (b) و $S_w = 0.75$ (c)

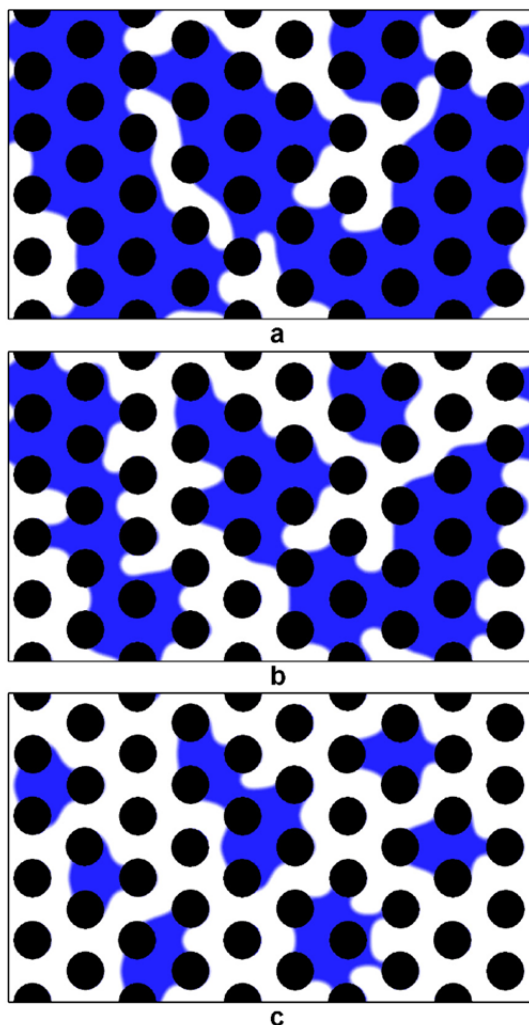


Fig. 13 Steady-state two-phase flow in porous media at $\theta = 41^\circ$ for (a) $S_{nw} = 0.25$, (b) $S_{nw} = 0.5$, (c) $S_{nw} = 0.75$

شکل 13 جریان پایای دو فاز در بستر متخلخل در $\theta = 41^\circ$ برای $S_{nw} = 0.25$ (a)، $S_{nw} = 0.5$ (b) و $S_{nw} = 0.75$ (c)

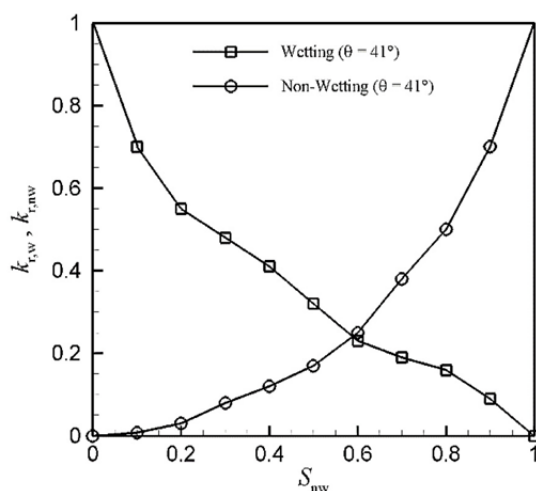


Fig. 14 The coefficient of relative permeability curvature of two phase-wetting and non wetting porous media in terms of the saturated phase of non wetting for $\theta = 41^\circ$

شکل 14 منحنی ضریب نفوذپذیری نسبی دو فاز ترشونده و ترنشونده در بستر متخلخل برحسب اشباع فاز ترنشونده برای $\theta = 41^\circ$

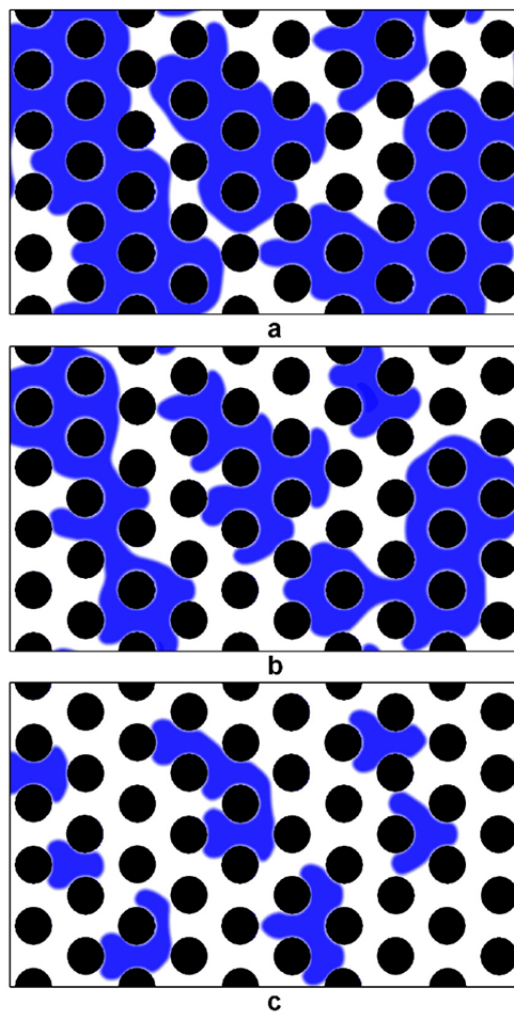


Fig. 12 Steady-state two-phase flow in porous media at $\theta = 139^\circ$ for (a) $S_w = 0.25$, (b) $S_w = 0.5$, (c) $S_w = 0.75$

شکل 12 جریان پایای دو فاز در بستر متخلخل در $\theta = 139^\circ$ برای $S_w = 0.25$ (a)، $S_w = 0.5$ (b) و $S_w = 0.75$ (c)

نیروی چسبندگی بین فاز ترشونده و دیواره های جامد، اثر روان کاری نسبت به حالت قبل کاهش می یابد و در نتیجه شدت جریان فاز ترشونده هم کمتر خواهد بود.

حال اگر $\rho_w = 4.5$ و $\theta = 41^\circ$ ، در نتیجه فاز ترشونده، فازى خواهد بود که لزجت بیشتری دارد. در این شرایط $M = 0.066$ و اگر با همان نیروی حجمی و عدد موینگی شبیه سازی به انجام برسد نتایج برای $S_{nw} = 0.25, 0.5, 0.75$ در "شکل 13" قابل مشاهده است. با توجه به "شکل 13- (c)" فاز ترشونده همه دیواره ها را پوشش داده و فاز ترنشونده تنها به صورت حباب هایی در میدان فاز ترشونده احاطه شده است. نتایج مربوط به منحنی ضریب نفوذپذیری نسبی دو فاز ترشونده و ترنشونده در "شکل 14" نشان داده شده است. نکته قابل توجه در این شکل، مقدار کمتر از واحد شدن ضریب نفوذپذیری نسبی هر دو فاز می باشد، حتی اگر قدرت ترشوندگی تا بیشترین حد امکان افزایش یابد.

5- نتیجه گیری

در کار حاضر جریان دو فازى با روش شبه پتانسل شان-چن بر روی روش جنبشی آنتروپیک CSKM پیاده سازی شد. بدین منظور در ابتدا با مثال هایی

ext خارجی
g گاز
int داخلی
l مایع
nw ترنشونده
r نسبی
s جامد
w ترشونده

نظیر جداسازی فازها، قانون لاپلاس و زاویه تماس قدرت روش CSKM برای شبیه‌سازی جریان‌های چند فازی مورد ارزیابی قرار گرفت. کاهش سرعت‌های غیرفیزیکی در کار حاضر نسبت به شبکه بولتزمن متعارف، از نقاط قوت روش جدید می‌باشد. سپس به مقایسه روش CSKM با شبکه بولتزمن متعارف در شبیه‌سازی جریان در کانال دو بعدی پرداخته شد و دقت روش‌ها ارزیابی شد. در نهایت جریان دو فازی مخلوط نشدنی در بستر متخلخل شبیه‌سازی و تأثیرات ترشوندگی بر روی ضریب نفوذپذیری نسبی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این قسمت بیشتر از واحد شدن مقدار ضریب نفوذپذیری نسبی فاز ترشونده، زمانی که ترشوندگی فاز ترشونده بسیار زیاد بود حائز اهمیت بود.

7- مراجع

- [1] C. Cercignani, *The Boltzmann Equation and Its Applications*, Eds., pp. 40-103; Springer, 1988.
- [2] M. Taghilou, M. H. Rahimian, Simulation of 2D droplet penetration in porous media using lattice Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 13, pp. 43-56, 2014. (in Persian فارسی)
- [3] M. A. Bijarchi, M. H. Rahimian, Numerical simulation of droplet collision in the two phase flow using Lattice Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 85-96, 2014. (in Persian فارسی)
- [4] M. Sukop, D. T. Thorne, Jr. Lattice Boltzmann Modeling Lattice Boltzmann Modeling, 2006.
- [5] I. V. Karlin, A. N. Gorban, S. Succi, V. Boffi, Maximum entropy principle for lattice kinetic equations, *Physical Review Letters*, Vol. 81, No. 1, pp. 6, 1998.
- [6] S. Chikatamarla, I. Karlin, Entropic lattice Boltzmann method for multiphase flows, *Physical Review Letters*, Vol. 114, No. 17, pp. 174502, 2015.
- [7] A. Mazloomi, S. S. Chikatamarla, I. V. Karlin, Entropic lattice Boltzmann method for multiphase flows: Fluid-solid interfaces, *Physical Review E*, Vol. 92, No. 2, pp. 023308, 2015.
- [8] A. Zadehghol, M. Ashrafizaadeh, Introducing a new kinetic model which admits an H-theorem for simulating the nearly incompressible fluid flows, *Journal of Computational Physics*, Vol. 274, pp. 803-825, 2014.
- [9] A. Zadehghol, Kinetic models in n-dimensional Euclidean spaces: From the Maxwellian to the Poisson kernel, *Physical Review E*, Vol. 91, No. 6, pp. 063311, 2015.
- [10] A. Zadehghol, M. Ashrafizaadeh, On the entropy variations and the Maxwell relations, *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 28, No. 01, pp. 1750009, 2017.
- [11] A. Zadehghol, M. Ashrafizaadeh, S. Musavi, A nodal discontinuous Galerkin lattice Boltzmann method for fluid flow problems, *Computers & Fluids*, Vol. 105, pp. 58-65, 2014.
- [12] B. M. Boghosian, P. J. Love, P. V. Coveney, I. V. Karlin, S. Succi, J. Yezep, Galilean-invariant lattice-Boltzmann models with H theorem, *Physical Review E*, Vol. 68, No. 2, pp. 025103, 2003.
- [13] A. Hosseini, M. Iranmanesh, E. J. Javaran, A. Zadehghol, Application of lattice kinetic models with Tsallis entropy in simulating fluid flow through porous media, *International Journal of Modern Physics C*, pp. 1750110, 2017.
- [14] A. Zadehghol, Generalizing the Boltzmann equation in complex phase space, *Physical Review E*, Vol. 94, No. 2, pp. 023316, 2016.
- [15] A. K. Gunstensen, D. H. Rothman, S. Zaleski, G. Zanetti, Lattice Boltzmann model of immiscible fluids, *Physical Review A*, Vol. 43, No. 8, pp. 4320, 1991.
- [16] X. Shan, H. Chen, Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components, *Physical Review E*, Vol. 47, No. 3, pp. 1815, 1993.
- [17] M. R. Swift, W. Osborn, J. Yeomans, Lattice Boltzmann simulation of nonideal fluids, *Physical review letters*, Vol. 75, No. 5, pp. 830, 1995.
- [18] X. He, X. Shan, G. D. Doolen, Discrete Boltzmann equation model for nonideal gases, *Physical Review E*, Vol. 57, No. 1, pp. R13, 1998.
- [19] S. Fallah kharmiani, M. Passandideh-Fard, A new method to reach high-density ratios and low viscosities based on the Shan-Chen multiphase model in lattice Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 145-152, 2017. (in Persian فارسی)
- [20] K. Fallah, M. Taeibi, Numerical Simulation of drop Formation in a Microchannel, Using Lattice Boltzmann Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 94-102, 2016. (in Persian فارسی)
- [21] S. Chen, G. D. Doolen, Lattice Boltzmann method for fluid flows, *Annual review of fluid mechanics*, Vol. 30, No. 1, pp. 329-364, 1998.
- [22] X. Shan, H. Chen, Simulation of nonideal gases and liquid-gas phase transitions by the lattice Boltzmann equation, *Physical Review E*, Vol. 49, No. 4, pp. 2941, 1994.
- [23] P. Yuan, L. Schaefer, Equations of state in a lattice Boltzmann model, *Physics of Fluids*, Vol. 18, No. 4, pp. 042101, 2006.
- [24] Y. S. Wei, R. J. Sadus, Equations of state for the calculation of fluid-phase equilibria, *AIChE Journal*, Vol. 46, No. 1, pp. 169-196, 2000.

6- فهرست علائم

a, b پارامترهای ثابت معادله حالت
 e راستای بردارهای جهتی
 Ca عدد مویینگی
 c_s سرعت صوت در شبکه ($lu\ ts^{-1}$)
 f تابع توزیع ذره ($mu\ lu^{-3}$)
 F نیروی برهم‌کنش
 G ضریب قدرت برهم‌کنش
 h ارتفاع
 H تابع آنتروپیک
 k ضریب تراوایی نسبی
 M نسبت چگالی
 P فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
 P_c فشار بحرانی ($kgm^{-1}s^{-2}$)
 r شعاع قطره
 R ثابت گاز در معادله حالت
 Re عدد رینولدز
 S مقدار اشباع هر فاز
 T دما (K)
 T_c دمای بحرانی
 u سرعت در راستای افقی (ms^{-1})
 v سرعت در راستای عمودی (ms^{-1})
 w ضریب وزنی

علائم یونانی

ε تخلخل شبکه
 θ زاویه تماس
 λ ضریب تنظیم ذره مقیم در مرکز
 μ لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
 ρ چگالی (kgm^{-3})
 σ کشش سطحی ($mu\ ts^{-2}$)
 τ زمان آرامش (s)
 ψ تابع جرم موثر

بالانویس‌ها

eq تعادلی

زیرنویس‌ها

ads جذب سطحی

- multiphase lattice Boltzmann models, *Physical Review E*, Vol. 76, No. 6, pp. 066701, 2007.
- [29] S. Schmieschek, J. Harting, Contact angle determination in multicomponent lattice Boltzmann simulations, *arXiv preprint arXiv:0910.3915*, 2009.
- [30] S. M. Khatoonabadi, M. Ashrafizadeh, Comparison and Development of multi-phase Pseudo-potential model for various equations of state, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 376-386, 2016. (in Persian فارسی)
- [31] A. G. Yiotis, J. Psihogios, M. E. Kainourgiakis, A. Papaioannou, A. K. Stubos, A lattice Boltzmann study of viscous coupling effects in immiscible two-phase flow in porous media, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 300, No. 1, pp. 35-49, 2007.
- [25] R. Benzi, L. Biferale, M. Sbragaglia, S. Succi, F. Toschi, Mesoscopic modeling of a two-phase flow in the presence of boundaries: the contact angle, *Physical Review E*, Vol. 74, No. 2, pp. 021509, 2006.
- [26] S. Succi, *The lattice Boltzmann equation: for fluid dynamics and beyond*: Oxford university press, 2001.
- [27] O. Jahanian, A. Mihandoust, H. Hassanzadeh, Numerical simulation of inlet vortex near the inlet air duct of an aircraft engine in headwind condition, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 90-100, 2017. (in Persian فارسی)
- [28] H. Huang, D. T. Thorne Jr, M. G. Schaap, M. C. Sukop, Proposed approximation for contact angles in Shan-and-Chen-type multicomponent