





دانشکده : مهندسی مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

بررسی دو فازي نفوذ و پيمایش قطره و فيلم مایع داخل محیط متخلخل لایه‌ای

حانیه صالح آبادی

استاد راهنما :

محمد حسن کیهانی

استاد مشاور:

محسن نظری

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۴



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه

کارشناسی ارشد خانم / آقای به شماره دانشجویی.....

رشته..... گرایش..... تحت عنوان.....

که در تاریخ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به

شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : امتیاز)	<input type="checkbox"/>	دفاع مجدد	<input type="checkbox"/>	مردود	<input type="checkbox"/>
---------------------------------------	--------------------------	-----------	--------------------------	-------	--------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
			۱- استاد راهنما
			۲- استاد مشاور
			۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
			۴- استاد ممتحن
			۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده : امضاء

اگر این اثر را منتهی باشد، تقدیم به:

آنان که از خواسته‌هایشان گذشتند،

سختی‌ها را به جان خریدند،

و خود را سپر پله‌های مشکلات و ناملایمات کردند،

تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم؛

به فرزندان روح الله که میر که عطر وجودشان فضا را معطر کرده و مزارشان معیادگاه عاشقان است و

نازنین یاران بی صدای شب‌های پر تلاطم زندگی ام:

مادر و پدرم...

تقدیر و شکر

به نام یاد آن مهربان که نامش زیور هر سخن است و یادش فروغ؛ هر انجمن، عزیزی که زبان‌ها به یادش گریانند و جان‌ها به یادش شیدا. معبودی که جلالش بی زوال است و جمالش بر کمال و درود بی-پایان و تحیت بیرون از شمار نثار روان‌های مطهر جمله انبیا و زمره اولیا که مقربان حضرتند و راهنمای

هدایت. رنج‌بارده فراوان، هنرآموز تمام
وازم، عشق‌تورا خوبتر آموخته‌ام

هی خطا کتتم و جز عشق ندارم هنری به بر عمر همین یک هنرآموز تمام

توفیق تدوین و نگارش این پایان‌نامه، به این آسانی بدست نیامده‌است. اندوخته‌های چند ساله علمی هرچند ناچیز این شاگرد ناتوان، که در لابه‌لای این اوراق، بعنوان پایان‌نامه فراهم آمده، بی‌هیچ گزافه محصول بهرمندی از اندیشه‌های تابناک اساتید بزرگوار و گرانقدری است که تا این مقطع تحصیلات از خرمن معرفت و دانش آن‌ها خوشه چینی کرده و از محضر فیاضشان بهره‌ور شده‌ام. همواره خود را حق-شناس و مدیون استادی آن بزرگواران دانسته و می‌دانم، به‌ویژه استاد راهنمای عالی‌قدر **آقای دکتر محمدحسن کیهانی** و همچنین استاد گرانمایه **آقای دکتر محسن نظری** که زحمت راهنمایی و مشاورت در ارایه هر چه بهتر این پایان‌نامه را متحمل شده‌اند و همیشه با صبوری‌ها، پیگیری‌ها، تلاش و انگیزه بالایشان چراغ روشنی در ناامیدی‌ها بودند.

همچنین فرصت را مغتنم شمرده از تمام دوستانی که صمیمانه و مجدانه از هیچ‌گونه یاری و مساعدتی دریغ ننموده و مرا در این مهم یاری رسانده‌اند به‌خصوص خانم آتنا قادری و آقای کیوان فلاح و همچنین آقایان صالحی و تقیلو و دوست خوبم هاجر محمدزاده و تمام کسانی که در به اتمام رساندن این پایان‌نامه مرا یاری نمودند، کمال قدردانی و تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب حانیه صالح آبادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی دو فازی نفوذ و پیمایش قطره و فیلم مایع داخل محیط متخلخل لایه‌ای تحت راهنمایی دکتر کیهانی و مشاورت دکتر نظری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

❖ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- ❖ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- ❖ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

در این مطالعه، به مدلسازی جریان‌های چند فازی، در دو بخش جریان‌های تک جزیبی و چند جزیبی به کمک روش شبکه بولترمن پرداخته شده است. در بخش اول، تمرکز بر روی صحت سنجی کد نگاشته شده و توسعه مدل شان و چن در حل جریان‌های تک جزیبی چندفازی با نسبت چگالی بالا می‌باشد. برای رسیدن به هدف مذکور از معادلات حالت غیر ایده‌آل ریدلیش کوانگ، کارناهان استرلینگ و پنگ رابینسون استفاده شده است. با بررسی نتایج حاصل از استفاده معادلات حالت مختلف، بر حسب مقادیر سرعت‌های کاذب و تطبیق نتایج منحنی‌های پیوستگی با تئوری ماکسول مشخص شد، همه معادلات حالت مذکور نسبت به معادله حالت شان و چن، نتایج بهتری داشتند و علاوه بر افزایش نسبت چگالی بین دو فاز، مقادیر سرعت‌های کاذب ایجاد شده در فصل مشترک دو فاز کاهش یافتند. در ادامه برای اطمینان از صحت کد توسعه داده شده، چند مدلسازی دوفازی انجام شده است، نتایج حاصل با نتایج ارائه شده در مطالعات پیشین مطابقت دارد. لازم به ذکر است، در روش شبکه بولترمن این نوع اعتبارسنجی رایج است. در انتها، نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای بررسی شده است و تاثیر نسبت تخلخل و ویژگی آبدوستی و آبگریزی سطح روی نرخ و الگوی نفوذ مورد بررسی قرار گرفته است.

در بخش دوم نیز، مدلسازی جریان‌های چندجزیبی و بطور خاص نفوذ قطره داخل محیط متخلخل پرداخته شده است. محیط متخلخل تولید شده دارای ویژگی‌های منحصر بفردی است، علاوه بر تصادفی بودن محل قرارگیری موانع جامد، از تعدادی لایه تشکیل شده است و ضریب تخلخل در هر لایه قابل کنترل می‌باشد. در این مطالعه، برای اولین بار الگوی نفوذ قطره و فیلم مایع داخل محیط متخلخل لایه‌ای به کمک دیاگرام فازی مورد بررسی قرار گرفته است؛ رژیم‌های ویسکوز فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ مشاهده و مطالعه شده‌اند. نرخ نفوذ قطره در محیط‌های متخلخل لایه‌ای در تخلخل‌های مختلف بررسی

شده است؛ با افزایش تخلخل نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. زمان نفوذ در تخلخل‌های پایین به کمک قرار دادن لایه‌ها با تخلخل‌های مختلف و دارای همان مقدار میانگین ثابت کاهش یافت. چگونگی تغییر الگوی نفوذ از دیگر مسائلی است که به آن پرداخته شده است. نتایج مربوط به نرخ نفوذ و الگوی جریان در هر تخلخل و برای حالتی که محیط متخلخل آبدوست و یا آبگریز باشد، نشان می‌دهد نرخ نفوذ در حالت آبگریز در تخلخل‌های بیشتر از ۰/۷۵ بیشتر از حالت آبدوست است؛ به طوری‌که نرخ نفوذ در حالت آبگریز بعنوان حالت ایده‌آل در نظر گرفته شده است. در این حالت سیال به صورت انگشت‌هایی ظریف از بین حفره‌ها عبور می‌کند و در راستای عمودی پیش می‌رود، به همین دلیل الگوی نفوذ، از رژیم ویسکوزفینگرینگ تعبیت می‌کند. در حالی‌که در حالت آبدوست سیال به صورت یک جبهه پیش می‌رود و بدلیل نفوذ در راستای عرضی دارای سرعت کمتری نسبت به حالت آبگریز می‌باشد. در ادامه، راهکاری برای نزدیک شدن به نرخ نفوذ ایده‌آل با هزینه کمتر ارائه شده است؛ برای این منظور، علاوه بر تغییر تخلخل لایه‌ها، از تعریف پارامتر ضریب آبگریزی که بصورت تعداد حفره‌های جامد در تماس با سیال، که بصورت تصادفی آبگریز در نظر گرفته می‌شوند، به کل سطوح جامد در تماس با سیال تعریف شده است، استفاده گردیده است؛ محیط متخلخل لایه‌ای با ضرایب آبگریزی متفاوت ایجاد نموده و تاثیر لایه‌ها با تخلخل‌ها و ضرایب آبگریزی متفاوت بر روی نرخ نفوذ و الگوی جریان بررسی شده است؛ مقایسه نتایج حاصل، با حالتی که تمام لایه‌ها دارای مقداری برابر با مقدار میانگین کل لایه‌ها می‌باشد، نشان می‌دهد چیدمانی از لایه‌ها و ضرایب وجود دارد که نرخ نفوذ را به حالت ایده‌آل نزدیک می‌کند. در انتها با استفاده از تقسیم ناحیه متخلخل به نواحی با ضرایب آبگریزی متفاوت، موفق به هدایت سیال در مسیرهای مشخص شدیم که اهمیت بسیار زیادی در صنایع مختلف، نفت و گاز، تولید پیل‌های سوختی و... مسائل زیست محیطی مثل نفوذ آب باران در خاک یا مقابله با رسوبات ایجاد شده در دودکش‌ها و لوله‌ها... دارد.

کلمات کلیدی: روش شبکه بولتزمن ، جریان‌های چندفازی، نفوذ سیال، ماده متخلخل.

۱	فصل اول: مقدمه.....
۲	۱-۱- مقدمه.....
۲	۲-۱- مروری بر کارهای انجام شده.....
۱۳	۳-۱- نوآوری و اهمیت مطالعه حاضر.....
۱۴	۴-۱- محتوای فصل‌های بعد.....
۱۷	۲ فصل دوم: روش تحقیق.....
۱۸	۱-۲- مقدمه.....
۱۹	۲-۲- روش شبکه بولتزمن.....
۲۱	۳-۲- معادلات شبکه بولتزمن [۲۶].....
۲۱	۱-۳-۲- تابع توزیع مرتبه اول.....
۲۳	۴-۲- چهارچوب اصلی روش شبکه بولتزمن و معادلات [۲۶].....
۲۶	۱-۴-۲- زمان آرامش منفرد BGK [۲۶].....
۲۷	۲-۴-۲- ویسکوزیته.....
۲۸	۵-۲- پیاده سازی.....
۲۹	۱-۵-۲- شرایط مرزی هیدرودینامیک [۳۶].....
۳۲	۱-۱-۵-۲- مرزهای جامد.....
۳۲	۱-۱-۱-۵-۲- شرایط مرزی نود خشک.....
۳۴	۲-۱-۱-۵-۲- شرط مرزی نود تر.....
۳۵	۲-۱-۵-۲- شرایط مرزی باز.....
۳۵	۱-۲-۱-۵-۲- شرط مرزی پرودیک.....
۳۵	۲-۲-۱-۵-۲- شرط مرزی با سرعت معلوم [۲۴].....
۳۶	۳-۲-۱-۵-۲- شرط مرزی دیریکله (فشار ثابت).....
۳۸	۴-۲-۱-۵-۲- شرط مرزی گرادیان صفر [۲۴].....
۳۸	۲-۵-۲- ضرایب تبدیل [۲۴].....

۳۹	۲-۵-۳- تفاوت حلگر ناویر- استوکس و بولتزمن.....
۴۱	۳ فصل سوم: نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای با نسبت چگالی بالا در حالت تک جزیی دوفازی..
۴۲	۳-۱- مقدمه.....
۴۲	۳-۲- معادلات شبکه بولتزمن برای سیالات تک جزیی چندفازی [۲۲].....
۴۴	۳-۲-۱- معادلات حالت برای افزایش نسبت چگالی [۴۵].....
۴۶	۳-۳- نتایج مدلسازی.....
۴۶	۳-۳-۱- مقایسه معادلات حالت.....
۵۰	۳-۳-۱-۱- طرح ماکسول منحنی $p-v$ برای معادلات حالت غیرایده‌آل.....
۵۳	۳-۳-۲- تست لاپلاس.....
۵۳	۳-۳-۱-۲- بررسی تاثیر نسبت دما بر روی کشش سطحی.....
۵۴	۳-۴- صحت سنجی.....
۵۸	۳-۵- مواد متخلخل.....
۵۸	۳-۵-۱- مهمترین خصوصیت هندسی.....
۵۹	۳-۵-۲- انواع مواد متخلخل [۴۹].....
۵۹	۳-۵-۱-۲- انواع مواد متخلخل سلول باز.....
۶۰	۳-۵-۱-۱- مواد متخلخل فیبری شکل و گونه‌های آن.....
۶۲	۳-۵-۳- تولید محیط متخلخل.....
۶۳	۳-۶- نفوذ قطره در ناحیه متخلخل.....
۶۴	۳-۶-۱- بررسی تاثیر نسبت تخلخل.....
۶۶	۳-۶-۲- بررسی تاثیر خصوصیت آبدوستی یا آبگریزی سطح.....
۷۱	۴ فصل چهارم: نفوذ و پیمایش قطره و فیلم مایع در ماده متخلخل لایه‌ای در حالت دوجزیی چندفازی..
۷۲	۴-۱- مقدمه.....
۷۲	۴-۲- معادلات شبکه بولتزمن برای سیالات چند جزیی چندفازی [۲۲].....
۷۵	۴-۳- محاسبه کشش سطحی.....
۷۵	۴-۳-۱- بررسی تاثیر نسبت ویسکوزیته روی کشش سطحی.....

۷۷	۴-۴- اندازه گیری زاویه تماس.....
۷۹	۵-۴- نتایج مدل سازی.....
۸۰	۴-۵-۱- نفوذ سیال در حفرات ساده یک بستر متخلخل.....
۸۳	۴-۵-۲- بررسی رژیم نفوذ.....
۸۹	۴-۵-۳- بررسی تاثیر تخلخل.....
۹۱	۴-۵-۳-۱- کاهش زمان نفوذ در تخلخل های پایین.....
۹۲	۴-۵-۴- بررسی تاثیر ویژگی آبدوستی یا آبگریزی سطح.....
۹۷	۴-۵-۴-۱- فاصله اطمینان.....
۹۹	۴-۵-۵- ضریب آبگریزی.....
۱۰۴	۴-۵-۶- پیمایش و هدایت نفوذ سیال در داخل محیط متخلخل لایه ای.....
۱۱۱	۵ فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۱۱۲	۵-۱- نتیجه گیری.....
۱۱۲	۵-۱-۱- نتیجه گیری در حوزه مدل سازی جریان های تک جزیی چندفازی با نسبت چگالی بالا.....
۱۱۲	۵-۱-۱-۱- بررسی معادلات حالت.....
۱۱۳	۵-۱-۱-۲- صحت سنجی.....
۱۱۳	۵-۱-۱-۳- مدل سازی نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه ای.....
۱۱۴	۵-۱-۲- نتیجه گیری در حوزه مدل سازی جریان های چندجزیی چندفازی.....
۱۱۷	۵-۲- پیشنهادات.....
۱۱۹	۶ پیوست.....
۱۲۵	۷ منابع.....

فهرست شکل؛

- شکل (۱-۱) نتایج کار زنگ؛ جابجایی بخار توسط مایع الف) در سطح ترشونده ب) در سطح تر نشونده [۱۹]..... ۶
- شکل (۲-۱) از نتایج دانگ- بررسی اثر گرانش در پدیده فینگرینگ الف) در غیاب گرانش ب) با وجود گرانش [۱۹]..... ۷
- شکل (۳-۱) رژیم مختلف جابه‌جایی در محیط متخلخل حفره‌ای الف) رژیم ویسکوز فینگرینگ ب) رژیم ویسکوز فینگرینگ کمی متمایل به جابه‌جایی پایدار پ) رژیم ویسکوز فینگرینگ کمی متمایل به کاپیلاری فینگرینگ [۲۰]..... ۸
- شکل (۴-۱) دیاگرام لگاریتم کاپیلاری برحسب لگاریتم نسبت ویسکوزیته فازی نشان دهنده الگوی جابه‌جایی سیال و موقعیت مدل‌سازی عددی این مقاله که در بالا آمده‌است. (با شکل‌های مجزا نشان داده شده‌اند؛ الف) مثلث ب) مربع پ) دایره [۲۰]..... ۸
- شکل (۵-۱) فلوجارت الگوریتم پیشنهادی فروغی و همکاران برای بازسازی عکس مبتنی بر شبکه مربعی غیر یکنواخت [۲۱]..... ۱۰
- شکل (۶-۱) فرایند بازسازی عکس در کار فروغی و همکاران با استفاده از شبکه مربعی غیر یکنواخت. ۱۰
- شکل (۷-۱) از نتایج تقیلو و رحیمیان. مدل‌سازی برخورد قطره به محیط متخلخل در شرایط مختلف در تخلخل $\epsilon = 0.93$ و $\theta_{eq} = 600$ (حالت پایه $Re = 80$, $We = 400$, $Fr = 0.5$, $\rho r = 10$ و $vr = 1$) [۲۳]..... ۱۳
- شکل (۱-۲) طرح ساده‌ای از جایگاه نسبی سه دیدگاه ماکرو، مزو و میکروسکوپیک نسبت به یکدیگر [۲۵]..... ۱۹
- شکل (۲-۲) شبکه $D2Q9$ و سرعت‌ها [۲۶]..... ۲۴

- شکل (۳-۲) مولفه‌های سرعت x و y شبکه $D2Q9$ [۲۶]. ۲۵.....
- شکل (۴-۲) نماهای روی شبکه و هیستوگرام تابع توزیع و یا چگالی مخصوص وابسته به جهت (f_a) یک تک ذره [۲۶]. ۲۶.....
- شکل (۵-۲) توابع توزیع در مرزهای یک ناحیه [۲۴]. ۳۱.....
- شکل (۶-۲) توابع توزیع یک مرز صاف روی دیوار پایین بعد از گام جاری شدن [۳۷]. ۳۱.....
- شکل (۷-۲) نمایش شرط مرزی بازگشت به عقب با دیوار میانی و بازگشت به عقب کامل. ۳۴.....
- شکل (۱-۳) جریان‌های کاذب در فصل مشترک دو فاز. ۴۷.....
- شکل (۲-۳) تغییرات سرعت کاذب ماکزیمم بر حسب نسبت چگالی. ۴۸.....
- شکل (۳-۳) مقایسه تغییرات سرعت کاذب ماکزیمم بر حسب نسبت چگالی الف- معادلات حالت C-S، R-K و P-R. ۴۸.....
- شکل (۴-۳) مقایسه تغییرات سرعت کاذب ماکزیمم بر حسب نسبت چگالی - معادله P-R. ۴۹.....
- شکل (۵-۳) نمودار نمایش رفتار فوق بحرانی و زیر بحرانی و طرح ماکسول (v_l و v_g حجم مخصوص مایع و بخار اشباع و p_s فشار اشباع متناسب با دما می‌باشد) [۱۷]. ۵۱.....
- شکل (۶-۳) مقایسه منحنی‌های پیوستگی حاصل از مدلسازی با نتایج تئوری ماکسول الف- معادله حالت P-R ب- معادله حالت C-S. ۵۲.....
- شکل (۷-۳) مقایسه منحنی‌های پیوستگی حاصل از مدلسازی با نتایج تئوری ماکسول پ- معادله حالت R-K ج- هر سه معادله. ۵۳.....
- شکل (۸-۳) آزمایش لاپلاس جهت محاسبه کشش سطحی. ۵۴.....
- شکل (۹-۳) ادغام دو قطره با هم با قطره‌های برابر. ۵۶.....
- شکل (۱۰-۳) سقوط آزاد قطره و برخورد آن با سطح جامد تحت میدان گرانش الف- سطح ترنشونده با

شتاب گرانش $g=10^{-5}$ ب- سطح ترشونده با زاویه ترشوندگی 90° با شتاب گرانش $g=10^{-5}$ ۵۷

شکل (۱۱-۳) سقوط آزاد قطره و برخورد آن با سطح جامد تحت میدان گرانش مطالعه کوپرشتوخ
و همکاران [۱۰]..... ۵۷

شکل (۱۲-۳) ماده متخلخل فیبری شکل یک بعدی با سطح مقطع دایره‌ای و آرایش تصادفی تحت جریان
عمودی [۵۰]..... ۶۱

شکل (۱۳-۳) ترکیب دو مدل یک بعدی از محیط متخلخل فیبری شکل و ایجاد یک مدل دو بعدی منظم
[۴۹]..... ۶۱

شکل (۱۴-۳) ماده متخلخل فیبری شکل سه بعدی دارای فیبرهای صاف با همپوشانی آزاد [۵۱]..... ۶۲

شکل (۱۵-۳) نمونه‌ای از محیط متخلخل لایه‌ای. (تخلخل در هر لایه و درکل ناحیه در الف) $0/9$ و در
(ب) $0/8$ می‌باشد.)..... ۶۳

شکل (۱۶-۳) نمایش پارامترهای تعریف شده (عمق نفوذ h) داخل محیط متخلخل و در هر گام زمانی و
به ارتفاع کلی ماده متخلخل (L) ۶۵

شکل (۱۷-۳) مقایسه نرخ نفوذ h برحسب t * در نسبت تخلخل‌های مختلف..... ۶۵

شکل (۱۸-۳) الگوی نفوذ برای تخلخل‌های الف) $0/93$ ب) $0/83$ (قطر اولیه قطره 30 واحد شبکه و
ناحیه محاسباتی 120×140 میباشد.)..... ۶۷

شکل (۱۹-۳) نرخ نفوذ در ماده متخلخل الف) $0/93$ ب) $0/83$ ۶۸

شکل (۱-۴) تست لاپلاس..... ۷۶

شکل (۲-۴) آزمایش لاپلاس جهت محاسبه کشش سطحی..... ۷۶

شکل (۳-۴) طرحواره زاویه تماس بین مایع و سطح جامد..... ۷۸

شکل (۴-۴) شکل نهایی قطره و زاویه‌های تماس حاصل برحسب درجه الف) 30° ب) 60° پ) 90°

- ج) ۱۲۰ ۷۸
- شکل (۵-۴) نفوذ سیال داخل لوله موئین الف) زاویه تماس ۳۰ درجه ب) زاویه تماس ۱۰۲ درجه (ابعاد ناحیه محاسباتی ۲۰×۸۰ می باشد. هردو در یک گام زمانی می باشند.) ۸۱
- شکل (۶-۴) نمودار سرعت نفوذ داخل لوله موئین برای سطوح آبدوست و آبگریز. ۸۲
- شکل (۷-۴) نفوذ سیال داخل دو لوله موئین با قطرهای متفاوت. ۸۳
- شکل (۸-۴) رژیم های مختلف جریان الف) جابه جایی پایدار ($\log(Ca)=2.08, \log(M)=2.7$) ب) ویسکوز فینگرینگ ($\log(Ca)=-2.92, \log(M)=-1$) پ) کاپیلاری فینگرینگ ($\log(Ca)=-1.92, \log(M)=2.7$) [۵۵]. ۸۵
- شکل (۹-۴) نمودار فازی با عدد کاپیلاری و نسبت ویسکوزیته مختلف (خط های ضخیم خاکستری سه ناحیه را از هم جدا می کند و خط چین قرمز نسبت ویسکوزیته یک را نشان می دهد.) [۵۳]. ۸۷
- شکل (۱۰-۴) کانتور الگوی نفوذ قطره داخل محیط متخلخل در نسبت تخلخل $\varepsilon = 0.96$ الف) تست اول ب) تست دوم (ابعاد ناحیه محاسباتی و ناحیه متخلخل بترتیب ۱۶۰×۲۳۰ و ۱۶۰×۱۱۸ و قطر اولیه قطره ۸۰ واحد شبکه می باشد، عدد بی بعد $B0 = 0.03$ می باشد.) ۸۷
- شکل (۱۱-۴) کانتور الگوی نفوذ قطره داخل محیط متخلخل در نسبت تخلخل $\varepsilon = 0.93$ الف) تست سوم ب) تست چهارم (ابعاد ناحیه محاسباتی و ناحیه متخلخل بترتیب ۱۶۰×۱۷۵ و ۱۶۰×۱۱۸ و ارتفاع اولیه سیال ۵۰ واحد شبکه می باشد، عدد بی بعد $B0 = 0.0675$ می باشد.) ۸۸
- شکل (۱۲-۴) نرخ نفوذ h^* بر حسب t^* ۹۰
- شکل (۱۳-۴) مقایسه نرخ نفوذ برای تخلخل ۰/۷۵ با چیدمان لایه های مختلف. ۹۲
- شکل (۱۴-۴) نرخ نفوذ h^* بر حسب t^* الف) $\varepsilon = 0.75$ ب) $\varepsilon = 0.8$ پ) $\varepsilon = 0.85$ ج) $\varepsilon = 0.9$ ۹۳
- شکل (۱۵-۴) الگوی نفوذ برای تخلخل ۰/۹ الف) سطوح خنثی ($\theta = 90^\circ$) ب) سطوح آبدوست)

- ۱۴۰×۱۲۰ محاسباتی و ناحیه شبکه و ارتفاع اولیه ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی $(\theta = 60^\circ)$ (پ) سطوح آبگریز $(\theta = 120^\circ)$ (ارتفاع اولیه ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 140×120 می باشد). ۹۵.....
- شکل (۱۶-۴) الگوی نفوذ برای $\varepsilon = 0.8$ ، همه شبکه‌های جامد آبدوست ۹۶.....
- شکل (۱۷-۴) الگوی نفوذ برای $\varepsilon = 0.8$ (ب) همه شبکه‌های جامد آبگریز (قطر اولیه قطره ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 200×80 می باشد). ۹۷.....
- شکل (۱۸-۴) تعیین فاصله اطمینان، در حالت آبگریز (قطر اولیه قطره ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 200×80 می باشد). ۹۸.....
- شکل (۱۹-۴) تعیین فاصله اطمینان ، در حالت آبگریز (قطر اولیه قطره ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 200×80 می باشد). ۹۹.....
- شکل (۲۰-۴) نرخ نفوذ نرخ نفوذ h^* بر حسب t^* (الف) $\varepsilon = 0.75$ (ب) $\varepsilon = 0.8$ (قطر اولیه قطره ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 200×80 می باشد). ۱۰۰.....
- شکل (۲۱-۴) نرخ نفوذ نرخ نفوذ h^* بر حسب t^* برای $\varepsilon = 0.83$ (قطر اولیه قطره ۲۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 200×80 می باشد). ۱۰۱.....
- شکل (۲۲-۱) الگوی نفوذ برای $\varepsilon = 0.8$ (الف) $f = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ (بترتیب لایه‌ها از بالا به پایین). ۱۰۲.....
- شکل (۲۳-۴) الگوی نفوذ برای $\varepsilon = 0.8$ (ب) $f = 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ (بترتیب لایه‌ها از بالا به پایین) (قطر اولیه قطره ۲۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 200×80 می باشد). ۱۰۳.....
- شکل (۲۴-۴) رصد فیلم مایع داخل محیط متخلخل؛ نواحی مشخص شده آبدوست ($f = 0$) و سایر نواحی آبگریز ($f = 1$) باشند. (ابعاد ناحیه محاسباتی 140×120 ، ارتفاع اولیه فیلم سیال ۴۰ واحد شبکه و نسبت تخلخل $0.9/0$ می باشد). ۱۰۵.....
- شکل (۲۵-۴) مسیر تعیین شده و نتایج مدلسازی برای $\varepsilon = 0.8$. ۱۰۶.....

شکل (۴-۲۶) تغییر مسیر تعیین شده و نتایج مدلسازی برای $\varepsilon = 0.8$ ۱۰۷

شکل (۴-۲۷) مسیر تعیین شده و نتایج مدلسازی برای $\varepsilon = 0.83$ ۱۰۸

شکل (۴-۲۸) مسیر تعیین شده و نتایج مدلسازی برای $\varepsilon = 0.83$ ۱۰۹

فهرست جداول

- جدول (۱-۱) از نتایج فکار فروغی و همکاران- مقایسه مدلسازی جریان در سه محیط مختلف و چهار مرحله بازسازی از نظر مصرف زمان [۲۱]..... ۱۱
- جدول (۱-۳) خصوصیات آب اشباع بدست آمده از جدولهای NIST [۴۷] و مدلسازی LBM در نسبت دماهای مختلف..... ۵۰
- جدول (۲-۳) تغییرات کشش سطحی برحسب نسبت دما..... ۵۴
- جدول (۳-۳) تغییرات سرعتهای کاذب برحسب نسبت دما..... ۵۵
- جدول (۱-۴) اطلاعات مربوط به دو تست با عدد کاپیلاری و نسبت ویسکوزیته متفاوت..... ۸۶
- جدول (۲-۴) مقادیر سرعت متوسط نفوذ در هر نسبت تخلخل..... ۹۰
- جدول (۳-۴) مقایسه سه سطح از نظر زمان نفوذ برای تخلخل ۰/۹..... ۹۵

فهرست علائم اختصاری

c_s	سرعت صوت در واحد لتیس
u	بردار سرعت سیال
Ca	عدد کاپیلاری
d_0	قطر اولیه قطره
g	شتاب گرانش
u_0	سرعت اولیه
Re	عدد رینولدز
We	عدد ویر
B_0	عدد بوند
F	میدان نیرو (در واحد شبکه)
f	تابع توزیع ذرات
T	دمای ماکروسکوپیک (در واحد شبکه)
$a^{(n)}$	ضرایب بسط هرمیت
$H^{(n)}$	چندجمله‌ای هرمیت
$f_{\alpha}^{(eq)}$	تابع توزیع تعادلی ذرات در جهت α
τ	زمان آرامش
T_c	دمای بحرانی (در واحد شبکه)
T_r	دمای کاهیده (دما به دمای بحرانی)
Lu	واحد شبکه
\vec{e}_{α}	بردارهای سرعت میکروسکوپی
$G_{\sigma\bar{\sigma}}, G$	پتانسیل برهم‌کنش بین دو سیال

G_{ads}	پتانسیل برهم‌کنش بین سیال و جامد
P	فشار
T	زمان
t^*	زمان بی‌بعد
S	تابع معرف جز جامد
w_α	تابع وزنی در جهت α
h^*	عمق بی‌بعد نفوذ
	علائم یونانی
ρ	چگالی سیال
$\psi(\rho)$	چگالی موثر سیال
ν	ویسکوزیته سینماتیکی
ε	نسبت تخلخل
Ω	تابع اولیه برخورد

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

مدلسازی جریان‌های چندفازی، از اهمیت ویژه‌ای در دینامیک سیالات برخوردار است. کاربرد این موضوعات در صنایع مختلف، جداسازی سیالات به‌خصوص در زمینه‌های صنعت نفت، تولید دارو (بوپتیه پنی‌سیلین)، ته نشینی مواد موجود در فاضلاب‌ها، نیروگاه‌ها (برج‌های خنک‌کن) مبدل‌های حرارتی، در الکتروپاشش‌ها و جریان‌های الکترواسموز، پرینترهای جوهرافشان و در صنایع رنگ‌سازی، تعمیر و رنگ کردن کشتی‌ها در داخل آب، تولید پیل‌های سوختی و هزاران محیط دیگر محسوس است.

این کاربردهای گسترده، موجب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بیشماری در این زمینه شده‌است. هرچند، بیشتر مطالعات بر مبنای روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی معمول می‌باشد [۱-۵]؛ محققان برای مدلسازی جریان سیال مخصوصاً جریان‌های چندفازی با استفاده از روش‌های نوین بسیار تلاش نمودند. در سال‌های اخیر روش شبکه بولتزمن^۱، بعنوان روشی که رویکرد محاسباتی جذابی برای شبیه‌سازی مسائل جریان سیال چندفازی هم‌دما ارائه داده است، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. بدلیل مزیت‌های بسیار مانند مفاهیم فیزیکی مشخص، اعمال آسان شرایط مرزی و الگوریتم حل موازی در شبیه‌سازی مسائل پیچیده دینامیک سیالات، این روش کاربرد گسترده‌ای در حل جریان‌های چند فازی دارد، که حل آن‌ها با روش‌های محاسباتی رایج دینامیک سیالات بسیار دشوار می‌نمود.

۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده

در دهه گذشته چند مدل برای مدل‌سازی سیالات چندفازی به روش شبکه بولتزمن ارائه شده‌است. اولین مدل برای سیالات مخلوط نشدنی مدل رنگی^۲ [۶] بود که از ذرات با رنگ‌های قرمز و آبی برای مشخص کردن دو سیال استفاده می‌کند. جدایش فازی با برهم‌کنش دافعه بین ذرات بر مبنای تغییر رنگ

^۱ Lattice Boltzmann method (LBM)

^۲ Color model

ایجاد می‌شود. در مدل پتانسیل کاذب^۱ که توسط شان و چن^۲ [۷] ارائه شد، یک برهم‌کنش غیرمحلی بین ذرات سیال در شبکه‌های همسایه با اضافه کردن یک جمله اضافی نیرو به میدان سرعت، اعمال می‌گردد. پتانسیل برهم‌کنش، شکل معادله حالت سیال را کنترل می‌کند و جدایی فازها با انتخاب مناسب پتانسیل برهم‌کنش اتفاق می‌افتد. مدل دیگر، مدل معروف به انرژی آزاد^۳ است که توسط سوئیفت و همکاران^۴ ارائه شد. مدل دیگری مبتنی بر تئوری سنیتیک، توسط هی-چن زه^۵ [۸] ارائه گردید. در بین این مدل‌ها، مدل پتانسیل کاذب بدلیل سادگی و کارآمدی در مدل‌سازی های چندفازی، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است. هم‌چنین این مدل از پتانسیل بالایی برای مدل‌سازی جریان چندفازی با نسبت چگالی بالا برخوردار می‌باشد. یوان و شافر^۶ [۹] شاید جز اولین کسانی بودند، که مدل پتانسیل کاذب را برای سیالات با نسبت چگالی‌های بالا توسعه دادند. آن‌ها معادلات حالت گاز غیر ایده آل را در مدل پتانسیل کاذب بکار بردند و بدین ترتیب توانستند به نسبت چگالی‌های بالاتر دست یابند. در تحقیق آن‌ها، معادلات حالت تعیین کننده عملکرد مدل می‌باشند. کوپرشتوخ و همکاران^۷ [۱۰] مدل جدیدی مبتنی بر پتانسیل کاذب (شان و چن) ارائه دادند؛ آن‌ها 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 چگالی موثر [۱۱] بود و روش زنگ و چن^۸ [۱۲] 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 [۱۳] نیز مدل پتانسیل کاذب

¹ Pseudo-potential model

² Shan and Chen

³ Free energy

⁴ Swift

⁵ He X, Chen S, Zhang R.

⁶ Yuan and Schaefer

⁷ Kupershtokh

⁸ Zhang and Chen's method

⁹ Hu

تک جزیی را با بکارگیری معادله حالات مختلف اصلاح کردند. بعضی اشکالات مدل پتانسیل کاذب مثل سرعت‌های کاذب بزرگ برطرف گردیده است. از آن جا که مدل شبکه بولترمن 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 واقع یک مقدار میانگین برای تنظیم کشش سطحی بدون تغییر نسبت چگالی ارائه می‌دهد. با معرفی این پارامتر نسبت چگالی بالا به آسانی بدست می‌آید. البته در کار آن‌ها کشش سطحی نسبتاً کوچک می‌باشد.

فخاری و رحیمیان^[۱۴] مدهای مختلف تغییر شکل و سقوط دو بعدی قطره با نسبت چگالی ۵ را شبیه‌سازی و تاثیر گرانش و ویسکوزیته‌ی سیال را مطالعه نمودند. مشاهدات آن‌ها حاکی از این است که با افزایش عدد ایتوس^۱ نیروهای گرانشی به تنش‌های سطحی غالب شده و تغییر شکل شدید منجر به تجزیه‌ی قطرات می‌شود. سون^۲ و همکارانش^[۱۵] برخورد قطرات را مدلسازی کردند. مولفین، تاثیر اعداد اهنسبرگ^۳، وبر، سرعت برخورد و نابرابری اندازه‌ی قطرات را در برخورد مورد بررسی قرار دادند. ژوبلو و لورا شافر^[۱۶] نیز مدلی برای جریان سیالات چندفازی- چندجزیی ارائه دادند که برای سیالات با نسبت چگالی‌های بالا صادق است. از آن جا که روش شان و چن در کنترل کشش سطحی محدودیت جدی دارد و کشش سطحی به طور مستقل قابل محاسبه نیست؛ آن‌ها بر ضعف مدل شان و چن با تعریف نیرویی مستقل برای محاسبه کشش سطحی بصورت (۱-۱) غلبه کردند.

$$\bar{F}_s = k \psi(\rho) \nabla \nabla^2 \psi(\rho) \quad (1-1)$$

که ضریب k قدرت کشش سطحی را تعیین می‌کند و $\psi(\rho)$ چگالی موثر سیال می‌باشد. با این کار مدلسازی سیالات با نسبت چگالی‌های یکسان ولی نسبت ویسکوزیته و کشش سطحی متفاوت مانند آب-

¹ Eotvos number

² Sun

³ Ohnesorge number

⁴ Jie Bao & Laura Schaefer.

هوا و هوا- روغن آسان تر خواهد بود. شن و همکاران^۱ [۱۷] برخورد قطره با سطح جامد انحنادار را مورد مطالعه قرار دادند و اثر پارامترهای مختلف روی تغییر شکل قطره بعد از اصابت به صفحه دو بعدی را بررسی کردند.

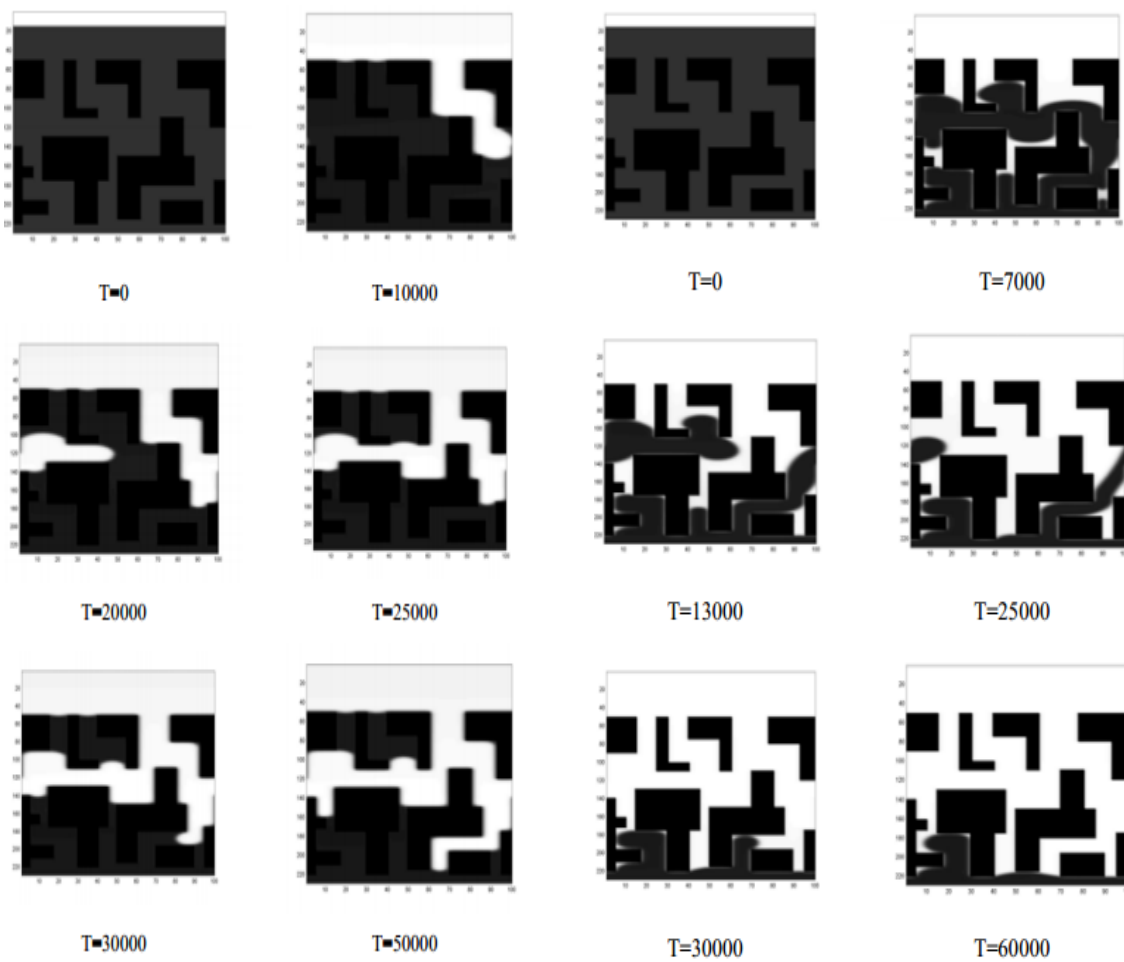
زنگ^۲ [۱۸] از روش شبکه بولتزمن شان و چن برای مدلسازی جریان تک جزیی دو فازی در محیط متخلخل استفاده نمودند. آنها چند تست معمول مانند جدایی فازها، تست های مربوط به محاسبه کشش سطحی و زاویه تماس، جریان داخل لوله و حرکت قطره در یک سیال که نتایج تئوری و یا آزمایشگاهی شان موجود است، را مدلسازی نمودند. عملکرد روش شبکه بولتزمن، در مدلسازی نفوذ سیال در ماده متخلخل بررسی شده است و تاثیر ترشوندگی سطح، روی جابه جایی بخار توسط مایع در محیط متخلخل نشان داده شده است. در شکل (۱-۱) نتایج این مدلسازی آمده است. دانگ و همکاران^۳ [۱۹] پدیده ویسکوز فینگرینگ^۴ را، در جابه جایی دو سیال مخلوط نشدنی در محیط متخلخل بررسی کردند؛ پدیده فینگرینگ وقتی رخ می دهد که ویسکوزیته دو سیال باهم متفاوت باشد و سیال با ویسکوزیته کمتر توسط سیال با ویسکوزیته بیشتر جابه جا شود. آنها از اعداد بی بعد مثل عدد کاپیلاری، عدد بوند و نسبت ویسکوزیته بین دو سیال برای نمایش بهتر تاثیر نیروی کاپیلاری، نیروی ویسکوز و گرانش روی رفتار سیال استفاده کردند. قسمتی از مدلسازی آنها در شکل (۲-۱) آمده است.

¹ Shen

² Zhang

³ Dong

⁴ Viscous fingering



(ب)

(الف)

شکل (۱-۱) نتایج کار زنگ، جابجایی بخار توسط مایع (الف) در سطح ترشونده (ب) در سطح تر نشونده [۱۹].

عدد کاپیلاری:

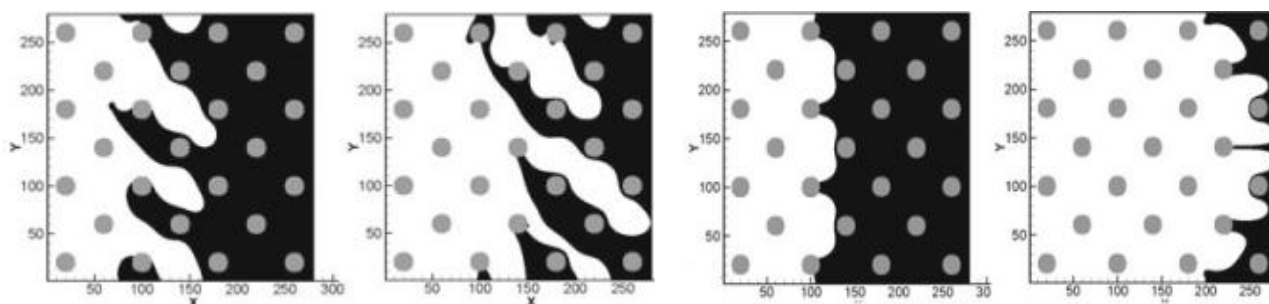
$$Ca = \rho v u_0 / \sigma \quad (۲-۱)$$

عدد بوند:

$$Bo = \Delta \rho g a^2 / \sigma \quad (۳-۱)$$

که ρ چگالی، ν ویسکوزیته سینماتیکی، u_0 سرعت اولیه، σ کشش سطحی، g شتاب گرانش و a شعاع

میانگین حفره‌ها می‌باشد. تاثیر خاصیت ترشوندگی سطح که تاثیر بسزایی در الگوی فینگرینگ دارد، نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌است. آن‌ها از محیط متخلخل یکنواخت با موانع دایروی استفاده نمودند و نسبت چگالی یک در نظر گرفته شده‌است. آن‌ها مشاهده نمودند، در غیاب گرانش و در نسبت ویسکوزیته‌های پایین، پدیده فینگرینگ به تغییرات عدد کاپیلاری حساس نیست؛ با افزایش نیروی گرانش پدیده فینگرینگ بهتر قابل مشاهده خواهد بود.



(ب)

(الف)

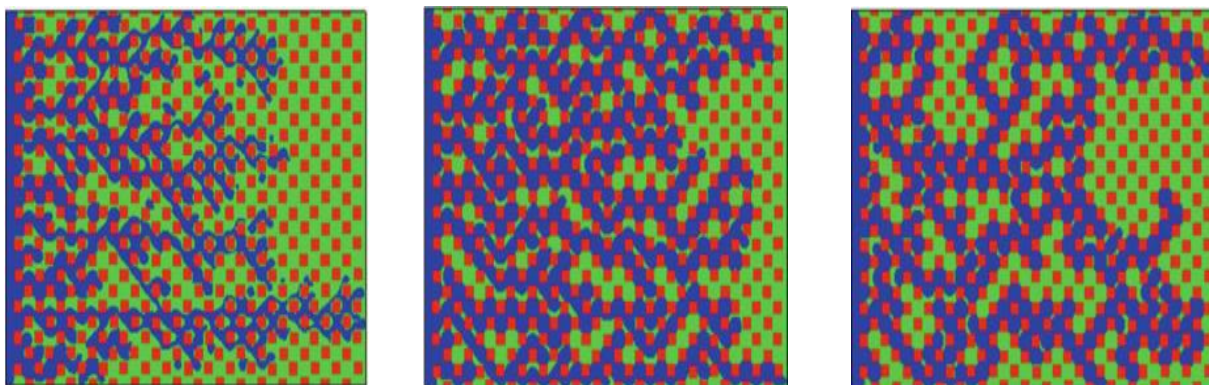
شکل (۲-۱) از نتایج دانگ- بررسی اثر گرانش در پدیده فینگرینگ (الف) در غیاب گرانش (ب) با وجود گرانش [۱۹] لیو و هم‌کاران^۱ [۲۰] از روش شبکه بولتزمن با نسبت چگالی بالا که توسط لی^۲ و لو پیشنهاد شده و مبتنی بر تئوری کان- هیلارد^۳ می‌باشد، برای مدلسازی جریان‌های چندفازی مخلوط نشدنی در ماده متخلخل استفاده کردند. آن‌ها برای نمایش توانایی و دقت این روش مدلسازی‌های مختلف، مانند محاسبه زاویه تماس، تزریق گاز ترشونده داخل لوله‌های موازی کاپیلاری، نفوذ کاپیلاری و در نهایت جابه‌جایی گاز توسط مایع در محیط متخلخل را انجام دادند. آن‌ها تاثیر عدد کاپیلاری، معادله (۲-۱)، نسبت ویسکوزیته، ترشوندگی سطح و عدد بوند، معادله (۳-۱)، را بررسی نمودند. آن‌ها سه رژیم مختلف جابه‌جایی به نام‌های جابه‌جایی پایدار، ویسکوز فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ را مشاهده نمودند. در شکل (۴-۱) لگاریتم

¹ Liu.

² Lee & Liu.

³ Chan-Hilliard theory

عدد کاپیلاری بر حسب نسبت ویسکوزیته آمده‌است، که سه رژیم در آن مشخص شده‌اند.

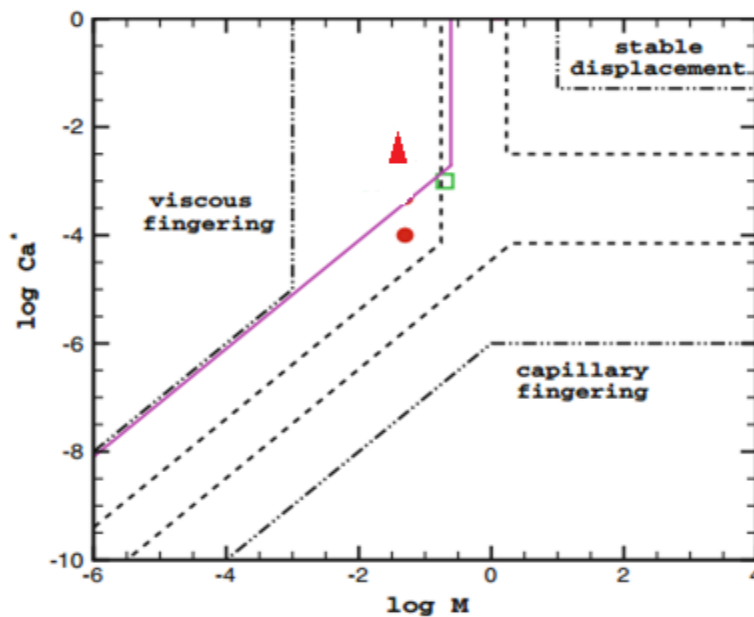


(الف)

(ب)

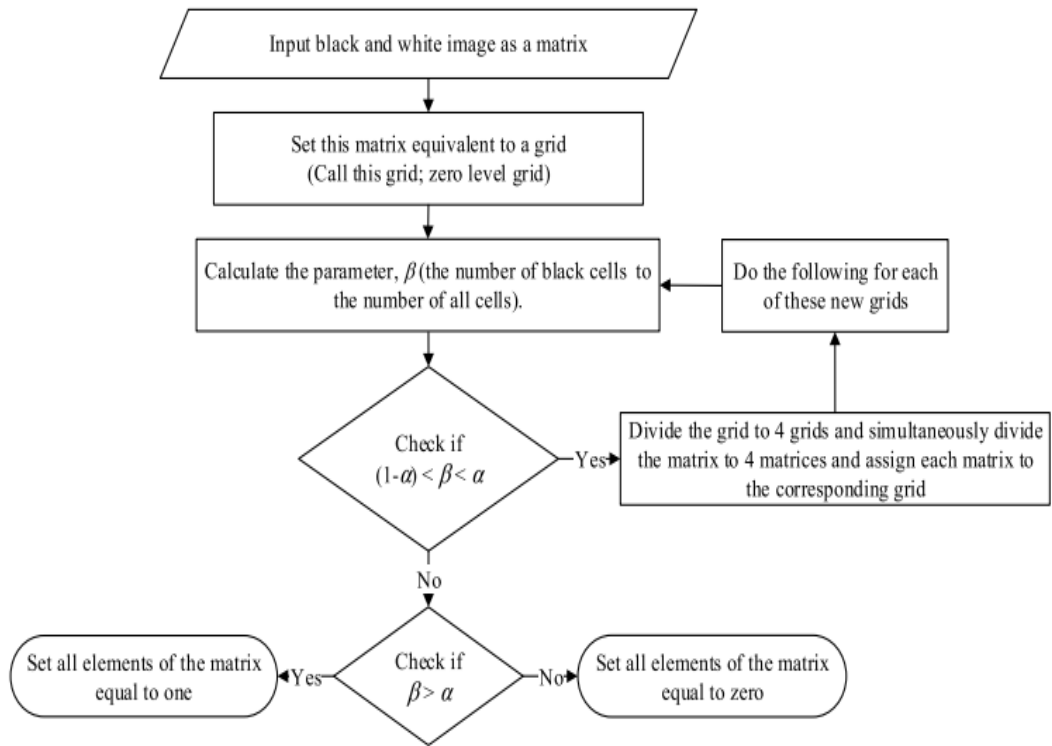
(پ)

شکل (۳-۱) رژیم مختلف جابه‌جایی در محیط متخلخل حفره‌ای (الف) رژیم ویسکوز فینگرینگ (ب) رژیم ویسکوز فینگرینگ کمی متمایل به جابه‌جایی پایدار (پ) رژیم ویسکوز فینگرینگ کمی متمایل به کاپیلاری فینگرینگ [۲۰].

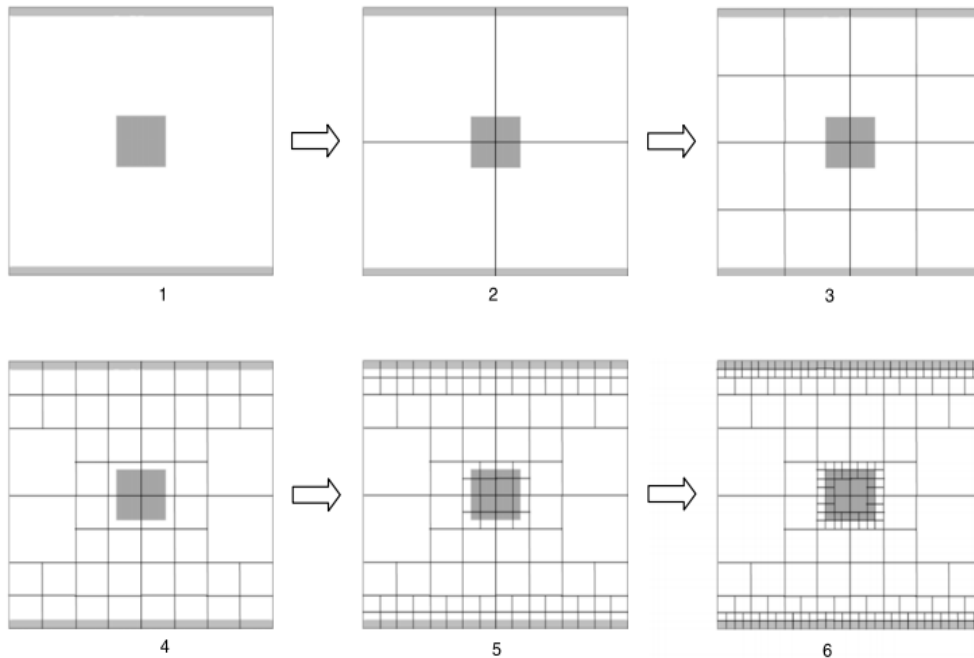


شکل (۴-۱) دیاگرام لگاریتم کاپیلاری بر حسب لگاریتم نسبت ویسکوزیته فازی نشان دهنده الگوی جابه‌جایی سیال و موقعیت مدلسازی عددی این مقاله که در بالا آمده‌است. (با شکل‌های مجزا نشان داده شده‌اند؛ الف) مثلث (ب) مربع (پ) دایره [۲۰].

فروغی و همکاران [۲۱] روش شبکه بولتزمن را که عمدتاً مبتنی بر شبکه یکنواخت و منظم می‌باشد، برای بکارگیری شبکه غیریکنواخت توسعه دادند. آن‌ها روش شبکه بولتزمن در شبکه یکنواخت را برای شبکه‌های غیریکنواخت فرمول‌بندی نمودند. با استفاده از این روش، سرعت انجام محاسبات مخصوصاً در هندسه‌های پیچیده مثل محیط‌های متخلخل بسیار کاهش یافته‌است. آن‌ها جریان سیال در یک محیط متخلخل ساختگی را، با استفاده از روش شبکه بولتزمن با شبکه غیر یکنواخت مدل‌سازی کردند و زمان انجام مدل‌سازی را با مدل‌سازی شبکه یکنواخت و مدل‌سازی با نرم‌افزارهای رایج مبتنی بر روش‌های المان محدود مقایسه نمودند. آن‌ها چند مساله معمولی دیگر را با روش‌های مختلف بررسی نمودند و مشاهده کردند زمان انجام مدل‌سازی با روش آن‌ها بسیار کمتر از سایر روش‌هاست. آن‌ها در مدل‌شان از تکنیک‌های بازسازی عکس برمبنای شبکه مربعی غیر یکنواخت بهره‌بردند؛ در واقع در نقاط مرزی و در موانع جامد شبکه را ریزتر از سایر نواحی در نظرمی‌گیرند. روش آن‌ها و نتایج حاصل به‌اختصار در شکل (۱-۵)، شکل (۱-۶) و جدول (۱-۱) آمده‌است.



شکل (۵-۱) فلوجارت الگوریتم پیشنهادی فروغی و همکاران برای بازسازی عکس مبتنی بر شبکه مربعی غیر یکنواخت [۲۱].



شکل (۶-۱) فرایند بازسازی عکس در کار فروغی و همکاران با استفاده از شبکه مربعی غیریکنواخت [۲۱].

جدول (۱-۱) از نتایج فکار فروغی و هم‌کاران - مقایسه مدل‌سازی جریان در سه محیط مختلف و چهار مرحله بازسازی از نظر مصرف زمان [۲۱].

	Normal uniform grids ($n = 1$)	Quadtree grid with two types of grids ($n = 2$)	Quadtree grid with three types of grids ($n = 3$)	Quadtree grid with four types of grids ($n = 4$)
Simulation time in seconds for flow over a square-shaped object (50,000 streaming-collision cycles)	3627	536	108	69
Simulation time in seconds flow over two square-shaped object (50,000 streaming-collision cycles)	3302	439	96	61
Simulation time in seconds for flow in porous media pattern (50,000 streaming-collision cycles)	42744	7780	3966	3637

تقیلو و رحیمیان [۲۲] جریان دوفازی در یک محیط متخلخل را با استفاده از روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. آن‌ها ابتدا نفوذ قطره در محیط متخلخل را با استفاده از مدل شان وچن مدل‌سازی کردند؛ در این مدل‌سازی، نسبت چگالی ویسکوزیته برابر یک در نظر گرفته شده است. آن‌ها با توجه به محدودیت روش شان وچن 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؛ آن‌ها [۲۳] کار خود را توسعه دادند و با استفاده از روش لی که مبتنی بر تئوری کان-هیلاارد است، توانستند نسبت چگالی را افزایش دهند و تاثیر اعداد بی‌بعد رینولدز و وبر و فرود، معادلات (۴-۱) تا (۶-۱)، را علاوه بر تاثیر نسبت تخلخل و زاویه تماس بین مایع و گاز و سطح جامد، بررسی نمایند. در روابط زیر، g, ν, ρ, u_0, d_0 بترتیب قطر اولیه، سرعت اولیه، چگالی، ویسکوزیته قطره و شتاب گرانش می‌باشند.

عدد رینولدز: بیانگر نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ویسکوز می‌باشد و با رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$Re = \frac{u_0 d_0}{\nu} \quad (۴-۱)$$

عدد وبر: بیانگر نسبت نیروهای اینرسی به نیروی کشش سطحی می‌باشد و با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$We = \frac{\rho u_0^2 d_0}{\sigma} \quad (5-1)$$

عدد فرود: بیانگر نسبت نیروهای اینرسی به نیروی جاذبه گرانش می‌باشد و با رابطه زیر تعریف می‌شود.

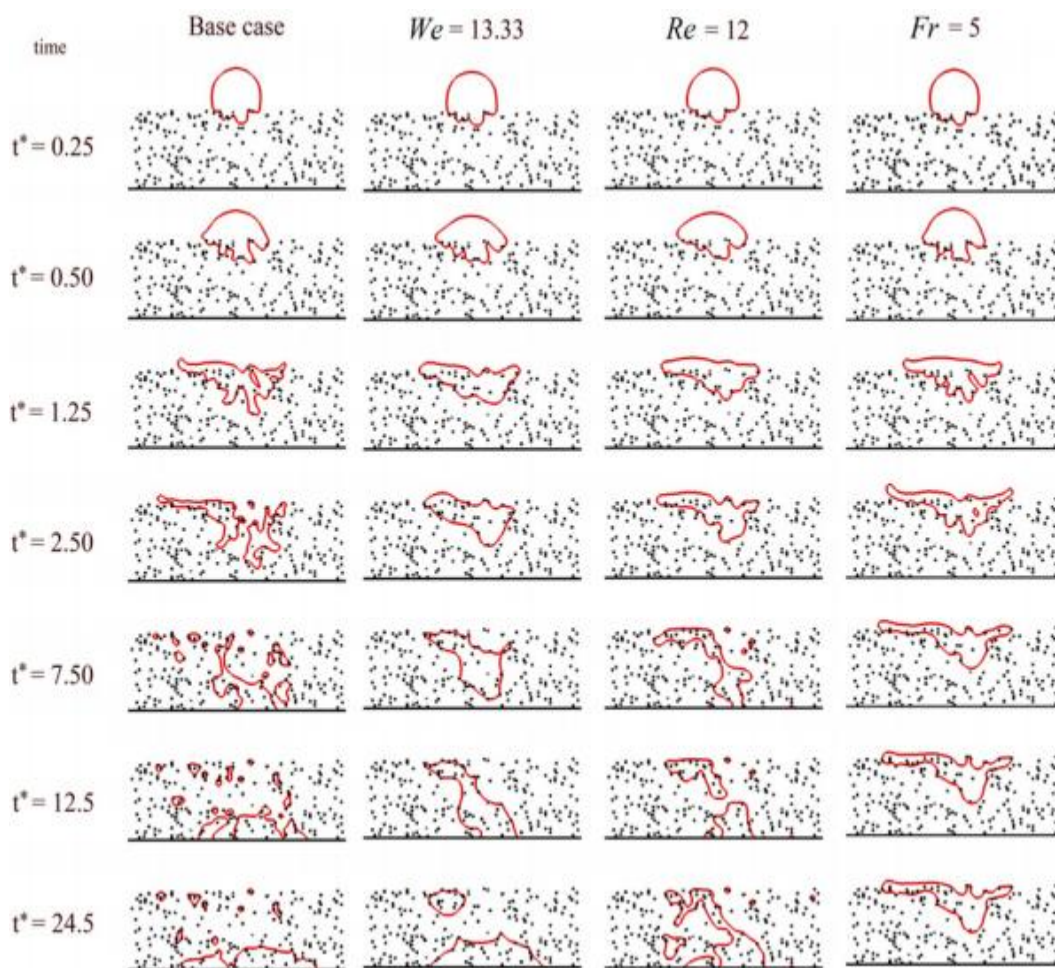
$$Fr = \frac{u_0^2}{gd_0} \quad (6-1)$$

بخشی از نتایج آن‌ها در شکل (۷-۱) نمایش داده شده است.

$1-p$ بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$1-p = \frac{V_{out}}{V_{total}} \quad (7-1)$$

V_{out} حجم قطره در بیرون از محیط متخلخل و V_{total} حجم کل قطره می‌باشد.



شکل (۷-۱) از نتایج تقیلو و رحیمیان. مدلسازی برخورد قطره به محیط متخلخل در شرایط مختلف در تخلخل
 $\theta_{eq} = 60^0$ و $\varepsilon = 0.93$ (حالت پایه $We=400, Re=80, Fr=0.5, \rho_r=10$ و $v_r=1$) [۲۳].

۳-۱- نوآوری و اهمیت مطالعه حاضر

با توجه به این که تا به حال به نفوذ سیال با نسبت چگالی بالا، محیط متخلخل لایه‌ای، رژیم نفوذ در محیط متخلخل لایه‌ای و تغییر مسیر نفوذ پرداخته نشده است؛ در این مطالعه، به کمک روش شبکه بولتزمن، نفوذ قطره و فیلم مایع در محیط متخلخل لایه‌ای مدلسازی شده است. محیط متخلخل لایه‌ای ایجاد شده از توزیع تصادفی موانع جامد بدست آمده است که مقدار تخلخل در هر لایه و در کل ناحیه محاسباتی قابل کنترل می‌باشد. از ویژگی‌های منحصر بفرد این مطالعه تولید محیط متخلخل بصورت

لایه‌ای و با خاصیت ترشوندگی مختلف است. روش شبه پتانسیل (شان وچن) برای مدل‌سازی در نسبت چگالی بالا به کمک معادلات حالت در حالت تک جزیی دوفازی توسعه یافته است و نفوذ قطره با نسبت چگالی بالا، به کمک معادله حالت غیر ایده‌آل مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل از این مدل‌سازی‌ها، در تخلخل‌ها و با ترشوندگی‌های متفاوت و در شرایط اولیه مختلف آورده شده است. الگوی نفوذ داخل محیط متخلخل یعنی رژیم‌های ویسکوز فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ نیز مورد بحث قرار گرفته و مقایسه شده‌اند. به کمک تعریف ضریب آبگریزی امکان تولید محیط متخلخل لایه‌ای با درصد آبگریزی متفاوت در لایه‌های مختلف ایجاد شده است؛ چگونگی تغییر مسیر نفوذ سیال داخل محیط متخلخل لایه‌ای نیز بررسی شده است؛ در صنایع مختلف مثل تولید پیل‌های سوختی، فرآوری نفت و گاز، مسائل زیست محیطی مثل نفوذ آب باران در خاک و غیره پیدا کردن راه حلی برای تعیین مسیر پدیده نفوذ داخل محیط متخلخل، اهمیت ویژه‌ای دارد.

همانطور که در بالا اشاره شد، در این پایان‌نامه برای مدل‌سازی جریان‌های تک جزیی و چند جزیی چند فازی از روش شبکه بولتزن مدل شان و چن استفاده شده است.

۱-۴- محتوای فصل‌های بعد

در فصل دوم به معرفی روش شبکه بولتزن که در این پایان‌نامه استفاده شده است می‌پردازیم. بعد از ذکر معادله و ایده اصلی این روش، نحوه استخراج آن و ساده‌سازی‌های انجام گرفته بیان می‌شود و سپس به شرایط مرزی مورد استفاده شده در این روش پرداخته می‌شود. در انتها بعد از آوردن ضرایب تبدیل بین دو مقیاس واقعی و شبکه بولتزن، تفاوت‌های اساسی این روش با روش‌های معمولی دینامیک سیالات بیان می‌شود. در فصل سوم به مدل‌سازی جریان‌های تک جزیی چندفازی با نسبت چگالی بالا پرداخته شده است. ضمن اشاره به مشکلات معادله حالت شان وچن در مدل‌سازی این گونه جریان‌ها، چند

معادله حالت غیر ایده‌آل برای رسیدن به نسبت چگالی بالا و رفع مشکلات مدلسازی با معادله حالت شان وچن معرفی می‌شوند. بعد از مقایسه معادلات حالت، چندین مدلسازی برای اطمینان از صحت کد توسعه داده شده انجام شده است؛ نتایج حاصل با نتایج ارائه شده توسط محققان قبلی تطبیق داده می‌شود. این نوع برخورد با مساله در روش شبکه بولتزمان رایج است؛ تمام گزارشات علمی در مورد روش شبکه بولتزمان که توسعه داده شده‌اند با یک سری تست‌ها و مسایل نمونه مقایسه و معتبرسازی می‌شوند. بعد از اعتبار سنجی، پدیده نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای در نسبت چگالی بالا به کمک معادله حالت ریدلیش-کوانگ بررسی می‌شود. و تاثیر عوامل مختلف بر روی نرخ و الگوی نفوذ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل چهارم، به مدلسازی جریان‌های چندجزیی چندفازی، و بطور خاص مدلسازی نفوذ قطره در ماده متخلخل لایه‌ای پرداخته می‌شود و تاثیر عوامل مختلف بر روی نفوذ قطره در ماده متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد و در انتها هدایت سیال در مسیرهای دلخواه داخل محیط متخلخل لایه‌ای مدلسازی می‌شود.

فصل دوم: روش تحقیق

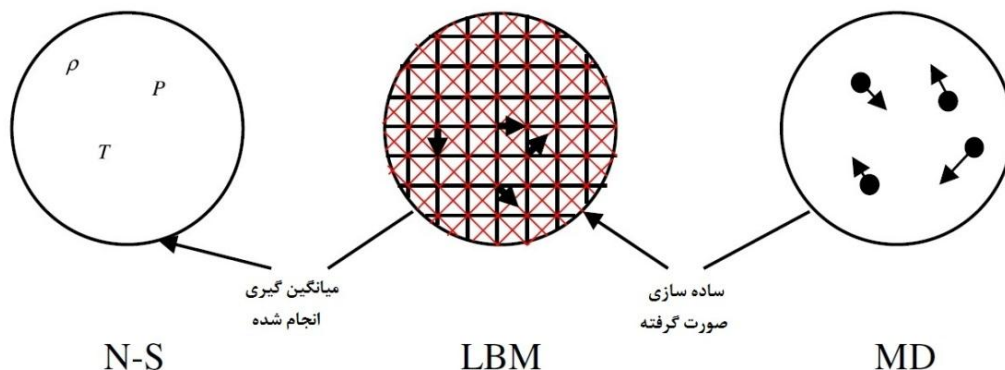
۲-۱- مقدمه

برای تحلیل جریان سیال روش‌های مختلفی وجود دارد. نخستین روشی که برای حل هر مسأله‌ای به ذهن می‌رسد، حل تحلیلی معادله حاکم بر آن است؛ اما برای بسیاری از پدیده‌های طبیعی و صنعتی شامل جریان سیال، حل تحلیلی وجود ندارد. لذا همگام با پیشرفت تکنولوژی و توسعه‌ی کامپیوترها، روش‌های عددی حل معادلات حاکم بر جریان مورد توجه قرار گرفتند؛ روش‌های اختلاف محدود، حجم محدود و اجزای محدود از جمله روش‌های متداول عددی در تحلیل جریان هستند. در این روش‌ها معادلات ناویر-استوکس به‌عنوان معادلات حاکم بر جریان در نظر گرفته می‌شود و با گسسته‌سازی، جبری-سازی، خطی‌سازی و حل دستگاه معادلات، جریان سیال تحلیل می‌شود. این معادلات تنها بر رژیم جریان پیوسته حاکم هستند. پیوستگی جریان با عدد بی‌بعد نودسن^۱ سنجیده می‌شود. رژیم جریانی که عدد نودسن آن، نسبت طول آزاد میانگین مولکولی به مقیاس طول مشخصه جریان، کمتر از ۰/۱ باشد پیوسته در نظر گرفته می‌شود، در صورتی که مسائلی وجود دارند که نمی‌توان از فرض پیوسته بودن جریان استفاده کرد جریان در میکرو کانال‌ها، از این جمله است. برای حل چنین مسائلی به شبیه‌سازی برخوردهای مولکولی یا دینامیک مولکولی پرداختند. همانطور که می‌توان حدس زد، بررسی سرعت و مکان هر مولکول کار پیچیده‌ای است و حجم محاسبات بسیار زیاد است. این مشکل سبب می‌شود بررسی رفتار برخوردهای مولکولی از دیدگاه آماری، بعنوان روش مناسبتر در نظر گرفته شود. در حال حاضر یکی از کارآمدترین روش‌ها برای شبیه‌سازی جریان‌های با نودسن بالا، شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو^۲ است؛ در این روش مولکول‌ها با خواص یکسان نظیر دما و سرعت، بصورت یک ذره در نظر گرفته می‌شود و به جای بررسی تک تک مولکول‌ها، برخورد این ذرات شبیه‌سازی می‌شود و در نهایت خواص ماکروسکوپی جریان با تحلیل

^۱ knudsen

^۲ Direct simulation of Monte Carlo

آماری به دست می‌آیند. در این روش هر چند حجم عملیات نسبت به روش‌های دینامیک مولکولی کمتر می‌باشد، ولی همچنان چشم‌گیر است. بنابراین با اعمال محدودیت دیگری بر روی روش‌های دینامیک مولکولی، روش‌های شبکه‌ای ایجاد گردید. در این روش‌ها درجات آزادی ذرات محدود شده‌است؛ یعنی ذرات تنها اجازه دارند در جهت‌های خاصی از میدان حرکت کنند. اگرچه در این نوع روش‌ها نوع ذرات و قواعد برخورد، در سطح میکروسکوپی منجر به ارضای معادلات بقای جرم و مومنتوم می‌گردد. روش شبکه گاز و روش شبکه بولتزمان از جمله این روش‌هاست. در واقع روش شبکه بولتزمان از روش شبکه گاز منشا گرفته‌است و برای پاسخگویی به اشکالات اولیه آن ایجاد شد. در اینجا فقط به روش شبکه بولتزمان می‌پردازیم. برای آگاهی از جزئیات روش شبکه گاز می‌توان به منبع [۲۴] مراجعه شود. جایگاه نسبی سه دیدگاه ماکروسکوپی، میکروسکوپی و مزوسکوپی صورت ساده در شکل (۱-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۱-۲) طرح ساده‌ای از جایگاه نسبی سه دیدگاه ماکرو، مزو و میکروسکوپی نسبت به یکدیگر [۲۵].

۲-۲- روش شبکه بولتزمان

آغاز شبکه بولتزمان از سال ۱۹۸۰ با کار فریش و همکاران^۱ آغاز شد. پس از کمک لاد^۲ و تحقیق روی رفتار مرزهای جامد و تلاشهای فراوان دیگران، روش شبکه بولتزمان به یک روش قدرتمند تبدیل شده و

^۱ Frish

^۲ Ladd

مکررا به عنوان یک روش محاسباتی بدلیل سادگی و کارآیی محاسباتی به کار برده شد. از لحاظ تاریخی، روش شبکه بولتزمن از شبکه گازی ماشینی^۱ سرچشمه گرفته و بعدا از معادله بولتزمن پیوسته استخراج شده است. روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل میکروسکوپی و معادله جنبشی مزوسکوپی^۲ استوار است که مجموعه رفتار ذرات در یک سیستم را در شبیه‌سازی در نظر می‌گیرد. در سال‌های اخیر، این روش، به عنوان یک الگوریتم عددی مطلوب برای شبیه‌سازی جریان‌های سیال و مدلسازی فیزیکی پدیده‌های متفاوتی، توسعه یافته است. در واقع این روش، پلی است که دو دیدگاه میکروسکوپی و ماکروسکوپی را به یکدیگر مرتبط می‌نماید. این روش به ویژه برای مدلسازی شرایط مرزی پیچیده‌ای همچون محیط‌های متخلخل واقعی [۲۵]، جریان‌های چندفازی یا چند جزیی [۲۶]، جریان‌های آشفته [۲۷]، جریان در نانو یا میکرو کانال‌ها [۲۸] و جریان سیالات غیرنیوتنی [۲۹، ۳۰] مناسب است. برخلاف طرح‌های عددی مرسوم در دینامیک سیالات محاسباتی، روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل‌های میکروسکوپی و تئوری جنبشی گازها و تحلیل‌های مربوط به مکانیک آماری بنا شده است. کتابهای اندکی در مورد اصول نظری و فیزیکی این روش و همچنین نحوه به کارگیری معادلات بولتزمن برای حل عددی مسایل مختلف مطرح در مکانیک سیالات و انتقال حرارت نوشته شده است [۲۶، ۳۱، ۳۲]. چند مقاله جامع [۲۵، ۲۷، ۳۳، ۳۴] نیز در مورد پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه این روش عددی وجود دارد که خوانندگان علاقمند می‌توانند به آن‌ها مراجعه نمایند.

اگرچه بیشتر طرح‌های شبکه بولتزمن فقط قادر بر بهبودبخشیدن به ممنوم و چگالی در سطح دینامیک ناویراستوکس برای جریان با ماخ کم (متناسب با مرتبه دوم) هستند، این به معنای محدودیت معادلات بولتزمن نیست. برای مثال، متدهای شبکه بولتزمن اخیرا برای مدلسازی جریان‌های

¹ lattice gas automaton(LGA)

² Mesoscopi

تراکم‌پذیر [۳۵] بکار گرفته شده اند. در حقیقت، شکل‌های عددی و گسسته‌سازی‌های جایگزین برای بهبود دقت مدل‌سازی‌ها می‌توانند انتخاب شوند.

۲-۳- معادلات شبکه بولتزمن [۲۶]

۲-۳-۱- تابع توزیع مرتبه اول

مکانیک آماری رویکرد آماری را پیشنهاد می‌کند که در آن یک سیستم به صورت یک اثر کلی از تعداد زیادی متغیر بیان می‌شود. می‌توان این سیستم را با تابع توزیع $f^{(N)}(x^N, p^N, t)$ نمایش داد، که N تعداد ذرات می‌باشد. در اینجا توزیع متعلق به فضای فاز می‌باشد، که فضایی است که در آن مختصات بوسیله بردارهای مکان، (\mathbf{x}) ، و مومنتوم، (p) ، و زمان، t ، مشخص می‌گردد. تغییرات در $f^{(N)}(x^N, p^N, t)$ بوسیله معادله لیوویل^۱ ($6N$ متغیر) معین می‌گردد. خوشبختانه فقط به توابع توزیع مرتبه پایین نیاز می‌باشد ($N=1,2$). توزیع $f^{(1)}(x, p, t)$ احتمال یافتن یک ذره خاص با موقعیت و مومنتوم معین را می‌دهد. مکان‌ها و مومنتوم $N-1$ مولکول باقیمانده می‌تواند نامشخص باقی بماند. از آنجایی که هیچ آزمایشی قادر به تمیز بین مولکولها نیست، بنابراین انتخاب چه مولکولی تفاوتی ایجاد نمی‌کند. این تابع توزیع "ذره تنها" است. $f^{(1)}$ بیانگر تمامی خصوصیات گاز است که به موقعیت‌های نسبی مولکول‌ها وابسته نیستند (گازهای رقیق با مسیر آزاد متوسط طولانی).

تعداد احتمال حضور مولکول‌ها با مختصات مکانی در محدوده $x \pm dx$ و مختصات مومنتومی $p \pm dp$ با $f^{(1)}(x, p, t) dx dp$ داده می‌شود. سپس نیروی خارجی F را به صورتی معرفی می‌کنیم که نسبت به نیروهای بین مولکولی کوچک باشد. اگر هیچ برخوردی نباشد آنگاه در زمان $t + dt$ موقعیت‌ها و مومنتوم-های جدید ذراتی که (حرکت خود را) از x شروع کرده بودند، به ترتیب:

^۱ Liouville

$$x + (P/m)dt = x + (dx/dt)dt = x + dx \quad (1-2)$$

و $P = P + \mathbf{F}dt = P + (dP/dt)dt = P + dP$ خواهد بود.

بنابراین هنگامی که مکان‌ها و مومنتوم‌ها در یک زمان خاص مشخص t باشند نمو دادن آنها اجازه

می‌دهد که $f^{(1)}$ را در زمان آینده یعنی $t+dt$ تعیین گردد.

$$f^{(1)}(x+dx, p+dp, t+dt) = f^{(1)}(x, p, t)dxdp \quad (2-2)$$

این فرایند را جاری شدن می‌نامند.

اگرچه برخوردهایی وجود دارند که منجر به نرسیدن برخی از نقاط فاز که از (x, p) شروع کرده بودند

به $(x, p = p + \mathbf{F}dt)$ و رسیدن برخی که از (x, p) شروع نکرده بودند به آن می‌شود.

$\Gamma^{(-)}$ را برابر با تعداد مولکول‌هایی قرار داده که به سبب برخوردهای صورت گرفته به بخش مورد

انتظار فضای فاز در مدت زمان dt نمی‌رسند. به طور مشابه $\Gamma^{(+)}$ را برابر با تعداد مولکول‌هایی قرار

داده که از نقطه‌ای غیر از (x, p) شروع کرده و به آن بخش از فضای فاز در مدت زمان dt می‌رسند. اگر با

معادله (2-2) شروع کرده و تغییرات را در $f^{(1)}$ بدلیل این برخوردها اعمال شود، خواهیم داشت:

$$f^{(1)}(x+dx, p+dp, t+dt)dxdp = f^{(1)}(x, p, t)dxdp + [\Gamma^{(+)} - \Gamma^{(-)}] dxdpdt. \quad (3-2)$$

از طرفی، عبارتهای مرتبه اول بسط سری تیلور سمت چپ معادله (3-2) بصورت رابطه (4-2) می-

باشند.

$$f^{(1)}(x+dx, p+dp, t+dt) = f^{(1)}(x, p, t) + dx \cdot \nabla_x f^{(1)} + dp \cdot \nabla_p f^{(1)} + \left(\frac{\partial f^{(1)}}{\partial t}\right)dt + \dots \quad (4-2)$$

با ترکیب معادلات (3-2) و (4-2) معادله بولتزمن به صورت معادله (5-2) یا (6-2) حاصل می‌شود:

$$\left[f^{(1)}(x, p, t) + dx \cdot \nabla_x f^{(1)} + dp \cdot \nabla_p f^{(1)} + \left(\frac{\partial f^{(1)}}{\partial t}\right)dt + \dots \right] dxdp = f^{(1)}(x, p, t)dxdp + [\Gamma^{(+)} - \Gamma^{(-)}]dxdpdt \quad (5-2)$$

یا

$$v \cdot \nabla_x f^{(1)} + F \cdot \nabla_p f^{(1)} + \frac{\partial f^{(1)}}{\partial t} = \Gamma^{(+)} - \Gamma^{(-)} \quad (۶-۲)$$

سمت راست معادله (۶-۲) که مربوط به برخورد ذرات می‌باشد، را در حالت کلی با Ω نمایش می‌دهند و به آن اپراتور برخورد می‌گویند و معادله حاصل، معادله انتقال بولتزمان نامیده می‌شود (معادله (۷-۲))

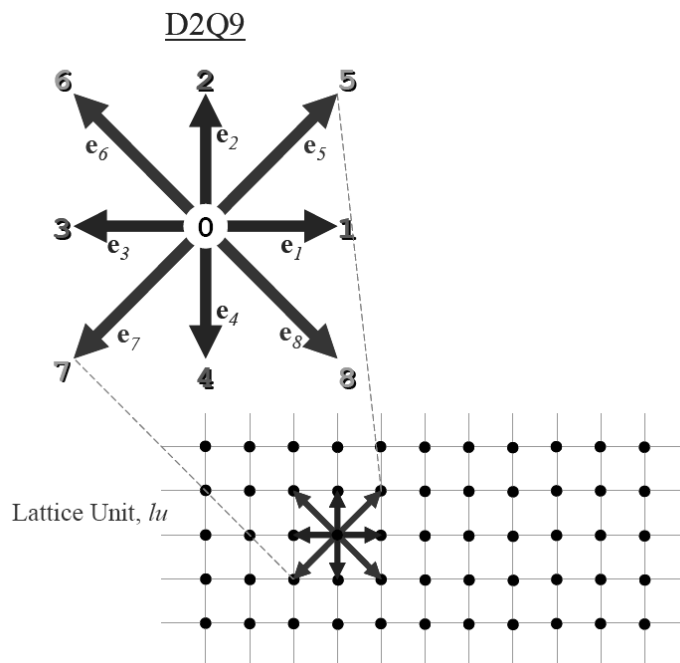
$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla_x f + \frac{F}{m} \cdot \nabla_p f = \Omega \quad (۷-۲)$$

معادله بولتزمان در شکل کاملش به همراه اپراتور برخورد که صریح‌تر نوشته شده، یک معادله انتگرالی دیفرانسیلی غیر خطی و جزء به جزء پیچیده می‌باشد. در روش‌های شبکه بولتزمان، این معادله به صورت تقریبی از دیدگاه ذره حل می‌گردد و بر معادله‌ای که به شدت به معادله (۳-۲) وابسته است، متمرکز می‌شود: این معادله شامل ایده "برخورد و جاری شدن" که ایده اصلی روش شبکه بولتزمان می‌باشد، است.

۴-۲- چهارچوب اصلی روش شبکه بولتزمان و معادلات [۲۶]

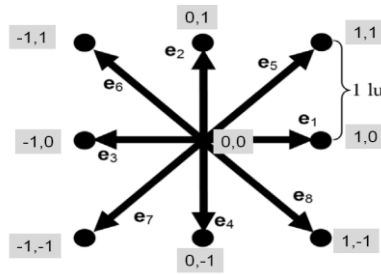
مدل‌های شبکه بولتزمان با کاهش موقعیت‌های ممکن ذره و مومنتوم‌های آن در فضای میکروسکوپیک از حالت پیوسته به توده‌های ذرات و با گسسته‌سازی زمان به گام‌های مجزا، دید مفهومی اصلی بولتزمان را بسیار ساده کردند. موقعیت‌های ذرات به نقاط شبکه محدود می‌گردند. تغییرات در مومنتوم‌ها که به علت پیوستگی جهت‌ها و دامنه (بزرگی) سرعت و تغییرات جرم ذره بوجود می‌آید (در حالت ساده دو بعدی) تنها به هشت جهت، سه دامنه و یک جرم ذره کاهش می‌یابد. در شکل (۲-۲) شبکه کارتزین و سرعت-های e_a را می‌بینید که $a = 0, 1, \dots, 8$ بیانگر اندیس جهت است و e_0 ذره را در حال سکون نشان می‌دهد.

این مدل به صورت $D2Q9$ نشان داده می‌شود که دو تعداد ابعاد و نه تعداد سرعت‌ها است. از آنجا که جرم ذره یکنواخت است (یک واحد جرم (m_u) در ساده‌ترین رویکرد) این سرعت‌ها و مومنتوم‌های میکروسکوپی همیشه به طور موثری برابرند. واحد شبکه (l_u)، اندازه اصلی طول، و گام‌های زمانی (t_s)، واحد زمان، هستند.



شکل (۲-۲) شبکه $D2Q9$ و سرعت‌ها [۲۶]

بزرگی سرعت e_1 تا e_4 برابر با یک واحد شبکه در هر گام زمانی یا l_u/t_s ، و بزرگی سرعت e_5 تا e_8 برابر با $\sqrt{2} l_u t_s^{-1}$ می‌باشد. (این معمول‌ترین طرح شاخص‌گذاری سرعت است ولی طرح‌های دیگر هم وجود دارند) این سرعت‌ها به طور استثنایی از این حیث که تمام اجزای x یا y آنها صفر یا یک هستند به طور استثنایی مفیدند. (شکل (۲-۲)).



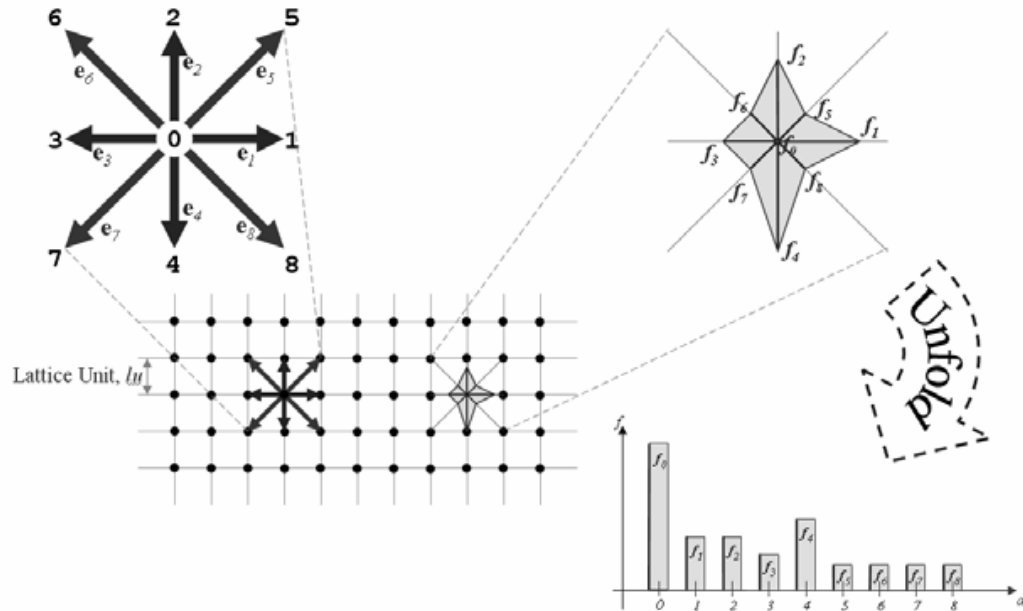
شکل (۳-۲) مولفه‌های سرعت x و y شبکه $D2Q9$ [۲۶].

گام بعدی ترکیب تابع توزیع تک ذره f می‌باشد که ضرورتاً همانی است که در معادله (۳-۲) نشان داده شده است، البته به جای اینکه تابعی پیوسته باشد نه بلوک گسسته دارد. تابع توزیع می‌تواند به عنوان یک نوع هیستوگرام که فرکانس رویداد را بیان می‌کند در نظر گرفته شود (شکل (۴-۲)). می‌توان فرض کرد که فرکانس‌ها، چگالی مخصوص‌های وابسته به جهت سیال هستند [۲۶]؛ در نتیجه، چگالی ماکروسکوپیک سیال برابر است با :

$$\rho = \sum_{a=0}^8 f_a \quad (۸-۲)$$

سرعت ماکروسکوپیک، u ، با میانگین سرعت‌های میکروسکوپی e_a که بوسیله چگالی‌های جهتی f_a وزن داده شده‌اند، برابر است :

$$u = \frac{1}{\rho} \sum_{a=0}^8 f_a e_a \quad (۹-۲)$$



شکل (۲-۴) نماهای روی شبکه و هیستوگرام تابع توزیع و یا چگالی مخصوص وابسته به جهت (f_a) یک تک ذره [۲۶].

این معادله ساده این امکان را می‌دهد که بوسیله سرعت‌های میکروسکوپی گسسته، مقدار سرعت پیوسته ماکروسکوپی که بیانگر حرکت سیال می‌باشند محاسبه شود. مقادیر دانسیته و سرعتی که با استفاده از این روابط به دست می‌آیند، معادل مقادیری است که از معادلات ناویر-استوکس برای سیالات نیوتونی به دست می‌آیند. گام بعدی اعمال جاری شدن و برخورد ذرات از طریق تابع توزیع می‌باشد. ساده‌ترین رویکرد از تخمین باتنکار-گروس-کروک^۱ (BGK) [۳۲] استفاده می‌کند.

۲-۴-۱- زمان آرامش منفرد BGK^۲ [۲۶]

تخمین BGK ساده‌ترین روش حل معادله شبکه بولتزمن می‌باشد. سوشی^۳ [۳۲] مطالعات زیادی در زمینه مدل‌های پیچیده‌تر و راه‌های استفاده از BGK ارائه کرده است. جاری شدن و برخورد (به عبارت

^۱Bhatnagar-Gross-Krook

^۲Bhatnagar-Gross-Krook

^۳Succi

دیگر آرامش به سوی تعادل محلی) در معادله (۱۰-۲) با زمان آرامش منفرد، τ ، نمایش داده شده است.

$$f_a(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \Delta t, t + \Delta t) = f_a(\mathbf{x}, t) - \frac{[f_a(\mathbf{x}, t) - f_a^{eq}(\mathbf{x}, t)]}{\tau} \quad (10-2)$$

که $f_a(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \Delta t, t + \Delta t) = f_a(\mathbf{x}, t)$ عبارت جاری شدن و $\frac{[f_a(\mathbf{x}, t) - f_a^{eq}(\mathbf{x}, t)]}{\tau}$ عبارت برخورد

می‌باشد. اگرچه می‌توان این عبارت‌ها را به صورت یک عبارت مانند معادله (۱۰-۲) ترکیب کرد، اما گام-

های برخورد و جاری شدن در محل حضور مرزهای جامد بدلیل اعمال شرط مرزی پرش به عقب^۱ که

گاهی نیاز به یک برخورد مجزا دارند، باید جدا گردند.

برخورد ذرات سیال به عنوان یک آرامش به سوی تعادل محلی فرض می‌شود و تابع توزیع تعادل

f_a^{eq} ، $D2Q9$ به صورت معادله (۱۱-۲) تعریف می‌شود.

$$f_a^{eq} = w_a \rho(\mathbf{x}) \left[1 + 3 \frac{\mathbf{e}_a \cdot \mathbf{u}}{c^2} + \frac{9 (\mathbf{e}_a \cdot \mathbf{u})^2}{2 c^4} - \frac{3 \mathbf{u}^2}{2 c^2} \right] \quad (11-2)$$

که ضرایب وزنی w_a برای ذرات ساکن ($a=0$) برابر $4/9$ ، $1/9$ برای $a=1, 2, 3, 4$ و $1/36$ برای $a=5, 6$

و $7, 8$ و c سرعت پایه روی شبکه می‌باشد (در ساده ترین پیاده سازی برابر $l_u t_s^{-1}$ است). توجه داشته

باشید که اگر سرعت ماکروسکوپیک صفر باشد ($u=0$)، آنگاه تابع توزیع تعادلی به سادگی برابر حاصلضرب

ضرایب وزنی در چگالی سیال می‌باشد.

۲-۴-۲ ویسکوزیته

با شروع از معادلات ناویر-استوکس و با انجام عملیات ریاضی مفصلی دریافت می‌شود که برای ارضای

قانون بقای مومنتوم در جریان، ویسکوزیته سینماتیک را بایستی از رابطه زیر محاسبه نمود [۲۶].

¹ Bounce back boundary condition

$$v = \left(\tau - \frac{1}{2} \right) c_s^2 \Delta t \quad (12-2)$$

با توجه به آنکه، در مدل $D2Q9$ سرعت صوت، $c_s = \frac{1}{\sqrt{3}}$ است، خواهیم داشت:

$$v = \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \frac{\Delta t}{3} \quad (13-2)$$

که واحد آن $l_u^2 t_s^{-1}$ است. توجه شود که برای آنکه مقدار فیزیکی درستی (مثبت) برای ویسکوزیته بدست آید، بایستی $\tau > \frac{1}{2}$ باشد. هنگامی که τ به سمت $\frac{1}{2}$ می رود، مشکلاتی در روند حل عددی ایجاد می گردد. بهترین مقدار برای زمان آرامش، $\tau = 1$ است که به ویسکوزیته $\nu = 1/6 l_u^2 t_s^{-1}$ منجر می شود.

۲-۵- پیاده سازی

در این بخش به طور مختصر مراحل پیاده سازی روش شبکه بولتزمن بر روی یک شبکه دو بعدی ۹ سرعتی ($D2Q9$) بیان می شود.

همانطور که در شکل (۲-۳) مشاهده می شود ۸ ذره متحرک و یک ذره ساکن در این مدل وجود دارد. این سرعتها را می توان برای حالت دو بعدی به صورت زیر نوشت:

$$e_i = (i, i) \quad \text{for } i = 0 \quad (14-2)$$

$$e_i = (\cos[\pi(i-1)/2], \sin[\pi(i-1)/2])c \quad \text{for } i = 1-4$$

$$e_i = \sqrt{2}(\cos[\pi(i-9/2)/2], \sin[\pi(i-9/2)/2])c \quad \text{for } i = 5-8$$

که در آن $c = \Delta x / \Delta t$ و Δx فاصله شبکه می باشد. تابع توزیع تعادلی در این حالت به شکل زیر می

باشد:

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left[1 + 3 \frac{(e_i \cdot u)}{c^2} + \frac{9}{2} \frac{(e_i \cdot u)^2}{c^4} - \frac{3}{2} \frac{u^2}{c^2} \right] \quad (15-2)$$

که در آن $c_s = c/\sqrt{3}$ سرعت صوت و w_i فاکتورهای وزنی با مقادیر زیر می باشد:

$$w_0 = 4/9 \quad (16-2)$$

$$w_i = 1/9 \quad \text{for } i = 1-4$$

$$w_i = 1/36 \quad \text{for } i = 5-8$$

همان طور که قبلا نیز ذکر شد، معادله تکامل در زمان دارای دو بخش برخورد و جاری شدن به صورت زیر است.

$$f_a(x + e_a \Delta t, t + \Delta t) = f_a(x, t) - \frac{[f_a(x, t) - f_a^{eq}(x, t)]}{\tau} \quad (17-2)$$

این دو گام بایستی به صورت جداگانه در حل اعمال شوند.

برای گام برخورد، تابع توزیع تعادلی برای هر سلول در هر گام زمانی و برای دانسیته محلی ρ با استفاده از معادله

(۸-۲) و میدان سرعت ماکروسکوپی محلی U با استفاده از معادله (۹-۲) محاسبه می شود. با توجه به این دو گام

می توان معادله (۱۷-۲) را در دو مرحله حل کرد که عبارتند از :

$$f_i^{out}(x, t) = f_i^{in}(x, t) - \frac{1}{\tau} [f_i^{in}(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] \quad (18-2)$$

$$f_i^{in}(x + e_i, t + \Delta t) = f_i^{out}(x, t) \quad (19-2)$$

که در آن f_i^{out} بیانگر مقادیر توزیع پس از برخورد (قبل از انتشار) و f_i^{in} مقادیر پس از برخورد و انتشار می باشند.

لذا مقادیری که به گره‌های همسایه وارد می شوند، داده‌های مربوط به گام زمانی بعدی هستند.

منظور از زمان آرامش واحد این است که انتقال جرم، مومنتوم در یک نرخ مشخص رخ می دهد.

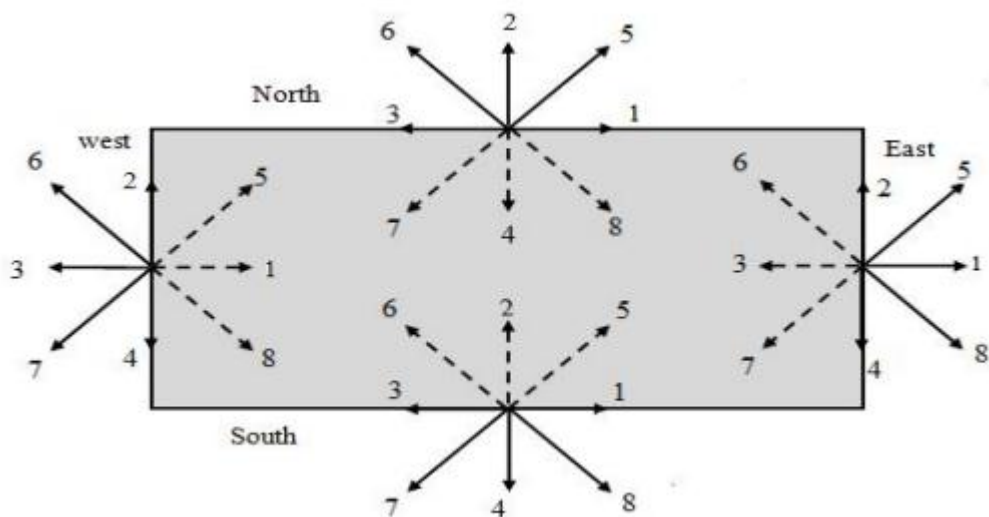
فشار نیز از معادله حالت برای گاز ایده‌آل بدست می آید:

$$p = \rho c_s^2, \quad c_s = c/\sqrt{3} \quad (20-2)$$

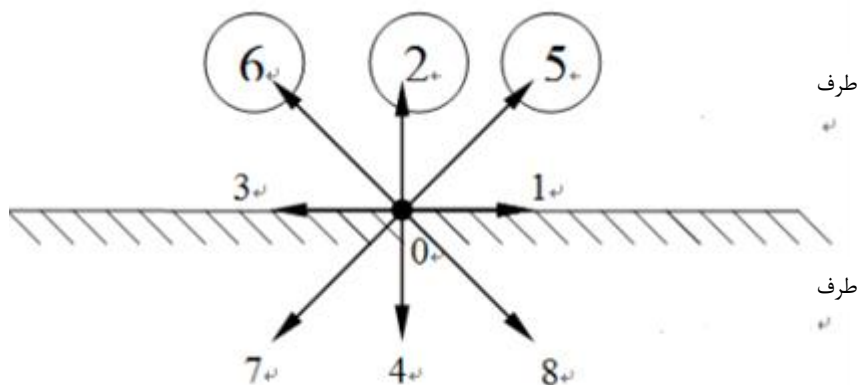
۲-۵-۱- شرایط مرزی هیدرودینامیک [۳۶]

دینامیک واقعی سیال به شدت به محیط احاطه کننده آن بستگی دارد. این وابستگی از دیدگاه ریاضی

با بیان مناسب شرایط مرزی توصیف می‌شود. شرایط مرزی یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در تمام مدل‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشند. صرف نظر از روش حل، حل معادله ناویراستوکس یا معادله انتقال بولتزمن، مقادیر متغیرهای ماکروسکوپی روی دیوارها، ورودی و خروجی‌ها، تاثیر بسزایی در دقت و پایداری یک شبیه‌سازی دارد. با توجه به اینکه روش شبکه بولتزمن روشی در مقیاس ریز بوده و خواص ماکروسکوپییک نظیر سرعت و فشار، از توابع توزیع که دارای معادلات مربوط خود می‌باشند بدست می‌آیند، بنابراین نمی‌توان مانند روش‌های مرسوم در دینامیک سیالات محاسباتی، شرایط مرزی را توسط کمیت ماکروسکوپییک اعمال کرد. بعنوان مثال شرط مرز جامد در دینامیک سیالات محاسباتی با صفر قرار دادن سرعت ماکروسکوپیکی سیال در دیواره اعمال می‌شود. اما در روش شبکه بولتزمن تابع توزیع ذره در دیواره را طوری تعیین می‌کنند که منجر به صفر شدن سرعت ماکروسکوپی (عدم لغزش) روی دیواره شود؛ در واقع اعمال شرط مرزی در روش شبکه بولتزمن بیشتر مربوط به تعیین توابع توزیع مجهول روی مرزها خلاصه می‌شود. به‌عنوان مثال در شکل (۲-۵) توابع توزیعی که با خطوط پیوسته نمایش داده شده‌اند، از مرحله جاری شدن بدست آمده‌اند و مشخص هستند؛ اما توابع توزیعی که با خط چین نشان داده شده‌اند نامعین می‌باشند و براساس شرایط مرزی مختلف تعیین می‌شوند. در شکل (۲-۶) به تفصیل نمایش داده شده‌است.



شکل (۲-۵) توابع توزیع در مرزهای یک ناحیه [۲۴]



توابع توزیع مجهول (وارد شونده به ناحیه محاسباتی) : f_2, f_5, f_6

توابع توزیع معلوم (خارج شونده از ناحیه محاسباتی) : f_4, f_7, f_8

شکل (۲-۶) توابع توزیع یک مرز صاف روی دیوار پایین بعد از گام جاری شدن [۳۷]

اگرچه تعیین خصوصیات ماکروسکوپی از طریق توابع توزیع و با رابطه های ذکر شده در معادله های (۲-۸) و (۲-۹) آسان است، اما راه منحصری فردی برای محاسبه توابع توزیع از خصوصیات ماکروسکوپی وجود ندارد. در نتیجه، شرایط مرزی متنوعی برای روش شبکه بولتزن ارائه شده است و همچنان تلاش

برای بهبود دقت آن‌ها ادامه دارد [۳۸-۴۱]. اجماع کمی برای شناسایی بهترین شرط مرزی وجود دارد، اما لات و چپارد^۱ [۴۲] مرور خوبی بر شرط مرزی دیواره صاف ارائه داده‌اند. بمنظور توسعه دیگر جنبه‌های روش شبکه بولتزمن، تعدادی از شرایط مرزی مورد قبول‌تر، که عملکرد خوب آن‌ها در بیش‌تر مدل‌سازی‌ها اثبات شده‌است، این‌جا توضیح داده شده‌اند.

۲-۵-۱-۱- مرزهای جامد

ابتدا یک نود سیال داخل ناحیه را که در مجاورت مرز جامد قرار گرفته‌است، را در نظر بگیرید. این نود دارای توابع توزیع با بردارهای سرعت مشخص می‌باشد. وقتی که گام جاری شدن انجام می‌گیرد، این توابع توزیع از این نود به سمت شبکه‌هایی، در جهت بردارهای سرعت خارج می‌شوند. در همین زمان، توابع توزیعی از شبکه‌های اطراف به سمت این نود جاری می‌شوند و این درحالی‌است که توابع توزیعی که از نود جامد می‌آیند، مجهول هستند. این‌ها مقادیری هستند که باید توسط شرایط مرزی تعیین شوند.

دو گروه اولیه برای شرط مرزی دیواره جامد وجود دارد، نود خشک و نود تر. در شرط مرزی نود خشک، نود مرزی جزئی از جامد بوده و بنابراین توابع توزیع آن با جریان تکامل نمی‌یابد. در شرط مرزی نود تر، شبکه‌های مرزی که توابع توزیع اصلاح می‌شوند، جزئی از محیط سیال می‌باشند. بدین ترتیب، این توابع توزیع در مقادیر خصوصیات ماکروسکوپی سیال سهمیم هستند و آن‌ها در دینامیک جریان مدل‌سازی شرکت دارند. تفاوت اولیه این دو روش در موقعیت فیزیکی قرارگیری مرزها می‌باشد.

۲-۵-۱-۱-۱- شرایط مرزی نود خشک

شرط مرزی نود خشک شرط مرزی کلاسیک شبکه بولتزمن می‌باشد. شرط بازگشت به عقب کامل^۲ (FWBBC) و شرط مرزی بازگشت به عقب با دیواره میانی^۳ (HWBBC) متعلق به این گروه از

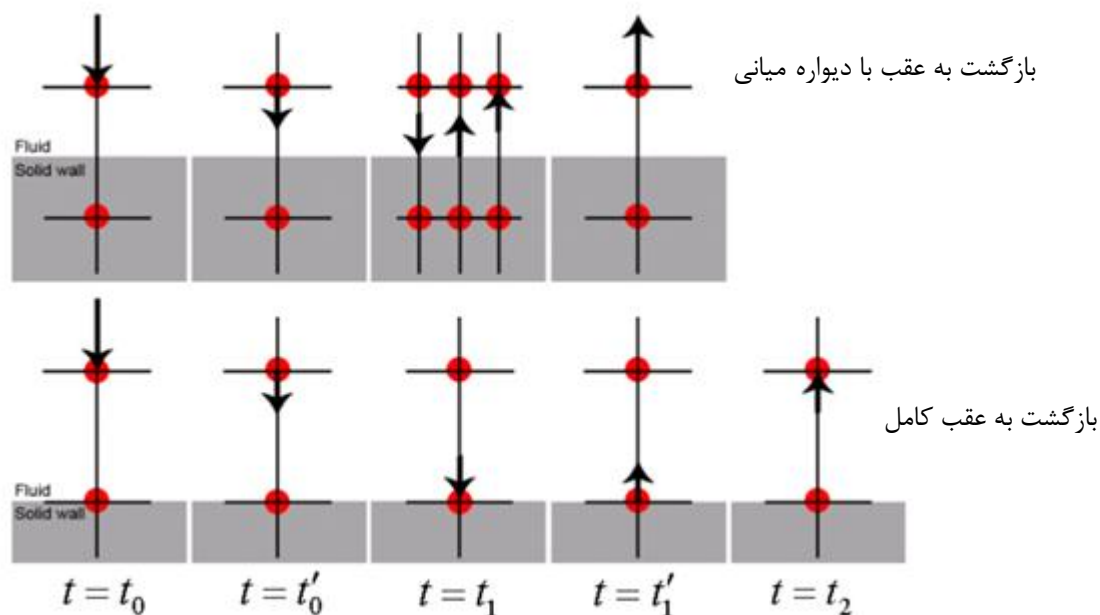
^۱ Latt and Chopard

^۲ Full_way bounce_back

^۳ Halfway bounce_back

شرایط مرزی می‌باشند. در شرط بازگشت به عقب کامل، از آنجایی که نود روی مرز جامد می‌باشد، معمولاً توابع توزیعی که از آن خارج می‌شوند مجهول هستند. در این جا، همه توابع توزیعی که وارد نود مرزی می‌شوند، مستقیماً به عقب منعکس می‌شوند. به این ترتیب، توابع توزیعی که از شبکه‌های مرزی وارد نود سیال می‌شوند در حقیقت توابع توزیعی هستند که قبلاً از نود سیال به سمت شبکه‌های مرزی جاری شده بودند. در این حالت، همه توابع توزیع مجهولی که وارد ناحیه محاسباتی می‌شدند، با توابع توزیعی که ناحیه را ترک می‌کردند جایگزین می‌شوند؛ بقای جرم و ممنتوم در مرز برقرار می‌ماند. این شرط مرزی، بدلیل عدم وابستگی به موقعیت دیوار به آسانی قابل اجرا می‌باشد و با موفقیت شرط عدم لغزش در دیواره برقرار می‌شود. با این وجود، مشخص شده است که دقت این شرط مرزی از مرتبه اول می‌باشد، که منجر به توسعه شرایط مرزی با دقت مرتبه دوم [۴۱] شده است.

شرط مرزی بازگشت به عقب با دیوار میانی این مساله را با قراردادن دیوار بین شبکه‌های مرزی و شبکه‌های سیال تصحیح می‌کند. در این روش، توابع توزیعی که ناحیه محاسباتی را در گام جاری شدن ترک می‌کنند، در توابع توزیعی که در جهت مخالف جاری می‌شوند و در اصل از سمت مرزها می‌آیند و مجهول می‌باشند، کپی می‌شوند. در واقع گام جاری شدن اصلاح می‌گردد. شرط مرزی بازگشت به عقب با دیوار میانی به موقعیت قرارگیری دیوار وابسته می‌باشد و یک مرز فیزیکی بین دو نود بوجود می‌آورد، اما از دقت مدل‌سازی مرتبه دوم برخوردار می‌باشد. در شکل (۲-۷) دو شرط مرزی نشان داده شده است.



شکل (۷-۲) نمایش شرط مرزی بازگشت به عقب با دیوار میانی و بازگشت به عقب کامل

۲-۵-۱-۱-۲- شرط مرزی نود تر

شرط مرزی نود تر از نظر دقت، مانند شرط بازگشت به عقب با دیوار میانی دارای دقت مرتبه دوم می‌باشد؛ در صورتی که از نظر محل قرارگیری مرز مانند شرط بازگشت به عقب کامل می‌باشد. در واقع نود مرزی بعنوان سیال رفتار می‌کند. در این آرایش، یک نود مرزی ویژگی‌های ماکروسکوپیک مانند چگالی و سرعت خواهد داشت، که به مقادیر مرزی دلخواه قابل تنظیم می‌باشد. چندین شرط مرزی نود تر وجود دارد، یکی از آنها شرط مرزی زو-هی^۱ [۴۰] می‌باشد. شرط مرزی زو-هی فقط توابع توزیع مجهول جایگزین می‌شوند. این ترکیب مثل این است که یک سیال فرضی بیرون ناحیه محاسباتی وجود دارد که به داخل نود مرزی جاری می‌شود و شرط هیدرودینامیکی صحیح در نود مرزی برقرار می‌شود. یک توصیف کامل از فرمول‌بندی و اجرای این شرط توسط زو و هی^۱ [۴۰] و هم‌چنین لات و چپارد^۲ [۴۲] ارائه

¹ Zou-He BC

² Latt and Chopard

شده است، به همین دلیل این جا توضیح داده نمی شود. این شرط برای رینولدزهای کوچک پایدار است و در مرزهای دیوار صاف از دقت مرتبه دوم برخوردار می باشد.

۲-۵-۱-۲- شرایط مرزی باز

شرایط مرزی باز بطور کلی شامل ورودی ها/خروجی ها، مرزهای پریودیک، خطوط تقارن و نامحدود می شود. پرکاربردترین شرایط مرزی باز در این قسمت معرفی می شوند.

۲-۵-۱-۲-۱- شرط مرزی پریودیک

هنگامی که روند جریان بگونه ای کاملا مشابه تکرار می شود، می توان به جای کل جریان بخشی از آن را تحلیل کرد. در این شرط مرزی که ساده ترین شرط مرزی نیز می باشد، توابع توزیع از مرز مخالف جایگزین می شوند.

$$f_{\alpha}(inlet) = f_{\alpha}(outlet) \quad \forall \alpha \in [1, d] \quad (21-2)$$

۲-۵-۱-۲-۲- شرط مرزی با سرعت معلوم [۲۴]

در بسیاری از مسائل کاربردی مولفه های سرعت ثابتی در طول زمان برای مرز وجود دارد. روش های مختلفی برای محاسبه توابع توزیع مجهول روی این نوع مرزها ارائه شده است. روش زو و هی یکی از این روش ها است که در ادامه به توضیح آن می پردازیم.

فرض کنید روابط مقادیر ماکروسکوپیک را برای مرز غربی می نویسیم :

$$\rho_w = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8 + f_0 \quad (22-2)$$

$$\rho_w u_w = f_1 + f_5 + f_8 - (f_6 + f_3 + f_7) \quad (23-2)$$

$$\rho_w v_w = f_5 + f_2 + f_6 - (f_7 + f_4 + f_8) \quad (24-2)$$

از آنجا که سرعت ها معلوم هستند، سه معادله و چهار مجهول داریم؛ سه تابع توزیع و چگالی. معادله چهارم شرط تعادل عمودی روی مرز است که توسط زو و هی پیشنهاد شد:

$$f_1 - f_1^{eq} = f_3 - f_3^{eq} \quad (25-2)$$

با جایگذاری f_1^{eq} و f_3^{eq} بدست آمده از رابطه (2-15) در معادله (2-25) داریم:

$$f_1 = f_3 + \frac{2}{3} \rho_w u_w \quad (26-2)$$

با ترکیب معادلات (2-22) - (2-24) و معادله (2-26) سه مجهول ρ_w ، f_5 و f_8 به صورت زیر محاسبه خواهند شد:

$$\rho_w = \frac{1}{1-u_w} [f_4 + f_2 + f_9 + 2(f_3 + f_6 + f_7)] \quad (27-2)$$

$$f_5 = f_7 - \frac{1}{2}(f_2 - f_4) + \frac{1}{6} \rho_w u_w + \frac{1}{2} \rho_w v_w \quad (28-2)$$

$$f_8 = f_6 - \frac{1}{2}(f_2 - f_4) + \frac{1}{6} \rho_w u_w - \frac{1}{2} \rho_w v_w \quad (29-2)$$

با معلوم شدن مقدار ρ_w ، مقدار f_1 از معادله (2-26) قابل محاسبه خواهد بود.

به همین ترتیب برای سایر مرزها در صورت داشتن سرعت معلوم می توان توابع توزیع را محاسبه نمود.

۲-۵-۱-۲-۳ - شرط مرزی دیریکله (فشار ثابت)

شرط مرزی دیریکله، فشار یا چگالی را بر روی مرز مقید می کند. حل برای آن مرزها بسیار شبیه مرزهای سرعت می باشد. با داشتن مقدار چگالی، ρ_0 ، سرعت قابل محاسبه می باشد (توجه کنید که از آنجایی که معادله حالت، چگالی را به فشار مربوط می کند، دانستن مقدار چگالی به معنای دانستن مقدار فشار است). در اینجا فرض می گردد که سرعت مماس بر مرز صفر بوده (مرز ورودی و خروجی) و معادلات برای مولفه های سرعت عمود به مرز حل می شود. مثلاً اعمال شرط مرزی فشار بر روی دیواره بالایی یک محفظه را در نظر بگیرید؛ سه تابع توزیع f_4, f_7, f_8 که از سمت دیواره خارج و وارد ناحیه

محاسباتی می‌شوند، و مقدار سرعت عمود بر دیواره مجهول می‌باشند.

$$\rho_N = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8 + f_0 \quad (30-2)$$

$$\rho_N v_N = f_5 + f_2 + f_6 - (f_7 + f_4 + f_8) \quad (31-2)$$

$$\rho_N u_N = f_1 + f_5 + f_8 - (f_6 + f_3 + f_7) = 0 \quad (32-2)$$

با جمع کردن روابط فوق خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \rho_N + \rho_N v_N &= f_1 + f_2 + f_3 + f_5 + f_6 + f_0 + f_5 + f_2 + f_6 \\ v_N &= \frac{f_1 + f_3 + f_0 + 2(f_5 + f_2 + f_6)}{\rho_N} - 1 \end{aligned} \quad (33-2)$$

مانند قبل:

$$\begin{aligned} f_2 - f_2^{eq} &= f_4 - f_4^{eq} \\ f_4 &= f_2 - \frac{2}{3} \rho_N v_N \end{aligned} \quad (34-2)$$

با جایگذاری معادله (34-2) در معادله (31-2) و با استخراج f_8 از معادله (32-2) و جایگذاری در

معادله (31-2) خواهیم داشت:

$$\rho_N v_N = f_2 + f_5 - f_7 + f_6 - f_2 + \frac{2}{3} \rho_N v_N - \underbrace{(f_3 - f_1 - f_5 + f_6 + f_7)}_{f_8} \Rightarrow \quad (35-2)$$

$$f_7 = f_5 + \frac{1}{2}(f_1 - f_3) - \frac{1}{6} \rho_N v_N$$

با تکرار مراحل فوق این بار برای بدست آوردن f_8 ، خواهیم داشت:

$$f_8 = f_6 + \frac{1}{2}(f_1 - f_3) - \frac{1}{6} \rho_N v_N \quad (36-2)$$

در نتیجه تمام توابع توزیع مجهول و بنابراین سرعت بدست آمد.

خلاصه کاری که در این بخش انجام شده به این صورت است که مقدار چگالی در مرز مشخص می‌گردد و سپس با استفاده از چهار معادله، سرعت ماکروسکوپیک و سه تابع توزیع مجهول را حساب می‌کنیم. این معادلات از روابط عادی متغیرهای ماکروسکوپیک و این فرض که شرط مرزی پرش به عقب در راستای عمود بر مرز دیریکله برقرار است، بدست آمده‌اند.

۲-۵-۱-۴-۲ شرط مرزی گرادیان صفر [۲۴]

برای اعمال این شرط، در خروجی کافی است مجهولات در ستون آخر شبکه برابر مقادیر آن در ستون یکی مانده به آخر قرار داده شود. در ورودی هم مقادیر ستون دوم در مجهولات ستون اول قرار گیرند.

$$f_{\alpha}(i=1, j) = f_{\alpha}(i=2, j) \quad (۳۷-۲)$$

$$f_{\alpha}(i=nx, j) = f_{\alpha}(i=nx-1, j) \quad (۳۸-۲)$$

۲-۵-۲ ضرایب تبدیل [۲۴]

با تعریف سه کمیت طول مشخصه، زمان مشخصه و چگالی مشخصه در یک سیستم آحاد متعارف و هم‌چنین در یک سیستم آحاد شبکه، می‌توان بین نتایج حاصل از روش شبکه بولتزمن و متغیرهای فیزیکی ارتباط برقرار کرد. در واقع ضرایب تبدیل از واحد شبکه به واحدهای متعارف با مقایسه کمیات فوق در دو سیستم قابل محاسبه است. اگر کمیات مشخصه را در سیستم آحاد متعارف به صورت t, H و ρ که به ترتیب طول مشخصه، زمان مشخصه و چگالی مشخصه هستند و در سیستم آحاد شبکه با t_L, H_L و ρ_L نشان دهیم، ضرایب تبدیل به شکل زیر تعیین می‌گردد.

$$C_H = \frac{H}{H_L}, \quad C_t = \frac{t}{t_L}, \quad C_{\rho} = \frac{\rho}{\rho_L} \quad (۳۹-۲)$$

این سه ضریب تبدیل به عنوان ضریب تبدیل اولیه در نظر گرفته می‌شود و سایر ضرایب تبدیل را می‌توان از ترکیب این ضرایب بدست آورد. بعنوان مثال:

$$[U] = \frac{[L]}{[t]} \Rightarrow C_U = \frac{C_H}{C_t} \quad (۴۰-۲)$$

البته باید توجه کرد که اعداد بی بعد در هر حالت ثابت باقی می ماندند.

۲-۵-۳ تفاوت حلگر ناویر- استوکس و بولتزمن

معادلات ناویر- استوکس، معادلات دیفرانسیل جزئی مرتبه دوم می باشند (معادلات ماکروسکوپی) ولی شکل گسسته شده تابع توزیع معادله بولتزمن، شامل یک معادله دیفرانسیل جزئی مرتبه اول می باشد (معادله جنبشی).

حلگر ناویر- استوکس، بایستی عبارت غیرخطی جابجایی را حل کند، اما در روش شبکه بولتزمن عبارت جابجایی خطی می باشند.

برای جریانهای غیر قابل تراکم، حلگر ناویر- استوکس نیازمند حل معادله پواسون برای بدست آوردن فشار می باشد، اما در روش شبکه بولتزمن فشار به راحتی به کمک معادله حالت به دست می آید:

$$p = \rho c_s^2$$

معمولاً در روش شبکه بولتزمن، عدد کورانت (CFL) بر اساس واحدهای شبکه که معمولاً $\delta_x = \delta_y = 1$ است، معادل با یک می باشد. به علت طبیعت جنبشی معادله بولتزمن، برهمکنش بین مولکولی که در فیزیک وجود دارد، به راحتی به کمک معادله بولتزمن شبیه سازی می شود. برای شرایط مرزی، در معادله بولتزمن، هیچ مورد مشابهی در مورد شرایط مرزی که در دیگر محیطهای پیوسته وجود دارد، پیدا نمی شود. بنابراین شرایط مرزی در معادله بولتزمن نیازمند توسعه بیشتری می باشد. در حلگر ناویر- استوکس معمولاً از روش تکرار برای همگرا شدن استفاده می شود، در صورتی که معادله بولتزمن یک معادله صریح است و نیاز به روش تکرار ندارد.

فصل سوم: نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه ای با نسبت

چگالی بالاتر حالت تک جزئی دو فازی

۳-۱- مقدمه

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 بسیار دارای اهمیت می‌باشد. 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 (شان وچن) به کمک معادلات حالت غیر ایده‌آل برای مدلسازی نفوذ قطره در محیط متخلخل لایه‌ای با نسبت چگالی بالا اصلاح گردیده‌است؛ در روش شبکه بولتزن، برای اطمینان از صحت برنامه، آن را با تست‌ها و حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌دهند و با مقایسه نتایج حاصل، معتبرسازی انجام می‌گیرد. در مطالعه حاضر نیز، برای این مهم از مدلسازی جریان‌های تک جزیی چندفازی با نسبت چگالی بالا بهره گرفته شده‌است. نفوذ قطره با نسبت چگالی بالا در محیط متخلخل لایه‌ای به کمک معادله حالت ریدلیش-کوانگ بررسی شده‌است؛ محیط متخلخل لایه‌ای ایجاد شده از توزیع تصادفی موانع جامد بدست آمده‌است که می‌تواند هر تخلخل دلخواهی را در هر لایه و در کل ناحیه متخلخل اختیار نماید و بمنظور یکنواخت‌تر شدن توزیع موانع جامد از چهار قسمت تشکیل شده‌است که از ویژگی‌های منحصر بفرد این مطالعه است. اثرات نسبت تخلخل و آب‌گریزی/آبدوستی سطح نیز بر روی الگوی نفوذ مطالعه شده است.

۳-۲- معادلات شبکه بولتزن برای سیالات تک جزیی چندفازی [۲۲]

در قسمت‌های قبل روش شبکه بولتزن بدون ترم نیرو معرفی شد. در حالی‌که، در بیش‌تر کاربردها نیروهای بین ذرات و یا نیروهای خارجی مثل گرانش و یا نیروی ناشی از میدان الکتریکی وجود دارند و باید در محاسبات لحاظ شوند. برای اعمال نیروهای بین مولکولی در روش شبکه بولتزن برای جریان دو فاز تک مولفه‌ای به روش شان وچن، سوکاپ و تورن [۲۶] نیروهای بین مولکولی بین ذرات سیال را

مطابق رابطه (۱-۳) تعریف نمودند.

$$\vec{F}_f(\vec{x}, t) = -G \psi(\vec{x}, t) \sum_{\alpha=1}^8 w_{\alpha} \psi(\vec{x} + \vec{e}_{\alpha} \delta t, t) \vec{e}_{\alpha} \delta t \quad (1-3)$$

که در آن G مقدار ثابتی است که تعامل بین مولکولی را نشان می‌دهد و قدرت برهم‌کنش مولکولی را تعیین می‌کند. 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 شده‌است. اصلی‌ترین و ابتدایی‌ترین تابع پتانسیل، تابع پتانسیل پیشنهاد شده توسط شان وچن می‌باشد که به فرم تابع نمایی است (معادله (۲-۳)).

$$\psi = \rho_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{\rho}{\rho_0}\right) \right) \quad (2-3)$$

البته معادلات حالت 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 (۳-۳) قابل محاسبه خواهد بود.

$$\vec{F}_s(\vec{x}, t) = -G_{ads} \psi(\vec{x}, t) \sum_{\alpha=1}^8 w_{\alpha} S(\vec{x} + \vec{e}_{\alpha} \delta t, t) \vec{e}_{\alpha} \delta t \quad (3-3)$$

در رابطه (۳-۳)، 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 به‌سادگی و با رابطه (۴-۳) قابل اعمال است [۴۳].

$$\vec{F}_g = \rho \vec{g} \quad (4-3)$$

که g شتاب گرانش می‌باشد.

نیروها در این مدل با تغییر دادن سرعت در تابع توزیع تعادلی، در محاسبات شرکت داده می‌شوند. یعنی سرعت در معادله (۹-۲) با رابطه (۵-۳) جایگزین می‌شود.

$$\vec{u}^{eq} = \vec{u} + \frac{\tau \vec{F}_{int}}{\rho(x)} \quad (۵-۳)$$

که F_{int} مجموع نیروهایی است که در هر نقطه از شبکه وجود دارند و از رابطه محاسبه می‌شود. این سرعت در محاسبه تابع توزیع تعادلی در مرحله برخورد بکار می‌رود.

$$\vec{F}_{int} = \vec{F}_f + \vec{F}_s + \vec{F}_g \quad (۶-۳)$$

بنابراین، با میانگین‌گیری از مقادیر ممنتوم قبل و بعد از برخورد، سرعت کل سیال محاسبه می‌شود.

$$\rho(x)\vec{\ddot{U}} = \rho(x)\vec{\ddot{u}} + \frac{1}{2}\vec{F}_{int} \quad (۷-۳)$$

البته روش‌های دیگری برای شرکت دادن نیروها در محاسبات وجود دارد؛ مانند اعمال مستقیم نیرو در معادله بولتزمن در مرحله برخورد که در مراجع [۴۳، ۴۴] به تفصیل آمده است.

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 (۸-۳) محاسبه می‌شود.

$$p = c_s^2 \rho + 3G (\psi(\rho))^2 \quad (۸-۳)$$

که همانطور که قبلاً اشاره شد، c_s سرعت صوت در واحد لیتیس است. اگر 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.

۳-۲-۱- معادلات حالت برای افزایش نسبت چگالی [۴۵]

مدل اصلی شان وچن محدود به نسبت چگالی‌های کم می‌باشد؛ برای مقادیر بزرگتر، ناپایداری‌های عددی اتفاق خواهد افتاد. یوان و شافر [۹] از تابع پتانسیلی استفاده کردند که نسبت چگالی بیشتری را

بین دو فاز نتیجه می‌دهد. معادله حالت واندروالس (vdw) آسان‌ترین و هنوز معروف‌ترین معادله حالت مکعبی است. معادله حالت واندروالس از دو قسمت تشکیل شده است که در معادله (۹-۳) تعریف شده- است.

$$p = \frac{\rho RT}{1-b\rho} - a\rho^2 \quad (9-3)$$

که p فشار، ρ چگالی و T دما می‌باشد. ترم اول معادله حالت برای در نظر گرفتن حجم کروی مولکول‌ها و ترم دوم برای در نظر گرفتن نیروهای بین مولکولی است؛ در صورتی که در حالت ایده‌آل از این دو صرف نظر شده است.

در این مطالعه، ما از معادله حالات زیر استفاده کردیم:

(الف) ریدلیش-کوانگ^۱ (R-K)

(ب) پنگ-رابینسون^۲ (P-R)

(پ) کارناهان-استرلینگ^۳ (C-S)

تحقیقات نشان می‌دهد [۹] که با معادله واندروالس نتایج مدل‌سازی از مقادیر تئوری انحراف دارند و همچنان مقادیر سرعت‌های کاذب در فصل مشترک دو فاز چشم‌گیرند. به این دلیل با اصلاح ترم‌های معادله واندروالس در برطرف کردن اشکالات اقدام می‌شود. با اصلاح ترم اول معادله واندروالس، معادله C-S و با اصلاح ترم دوم معادله واندروالس، معادلات R-K و P-R بوجود می‌آیند.

معادله ریدلیش-کوانگ:

$$p = \frac{\rho RT}{1-b\rho} - \frac{a\rho^2}{\sqrt{T}(1+b\rho)} \quad (10-3)$$

¹ Redlich-Kwong

² Peng-Robinson

³ Carnahan-Starling

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

معادله پنگ - رابینسون:

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

$$\alpha(T) = [1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2) (1 - \sqrt{T/T_c})]^2$$

با $b=0.0778R T_c/p_c$ و $a=0.45724R^2 T_c^2/p_c$ و ω ضریب خروج از مرکز نام دارد و برای سیالات

مختلف مقادیر متفاوتی دارد.

معادله کارناهان - استرلینگ:

$$p = \rho RT \frac{1 + b\rho/4 + (b\rho/4)^2 - (b\rho/4)^3}{(1 - b\rho/4)^3} - a\rho^2 \quad (12-3)$$

با $b=0.18727R T_c/p_c$ و $a=0.4963R^2 T_c^2/p_c$

در مدل سازی حاضر، برای معادلات R-K و P-R، $a=2/49$ و $b=2/21$ و برای معادله C-S، $a=4$ و

$b=1$ و در تمامی معادلات $R=1$ قرار داده شده است.

در مطالعه حاضر، برای مقایسه بین معادلات حالت مختلف سرعت های کاذب در فصل مشترک دو فاز

در سطوح دایروی مورد بررسی قرار می گیرند، زیرا در عمل دارای کاربرد بیشتری بوده و فقط حالت ساکن

و بدون جریان ارزیابی خواهد شد. در کنار مقایسه سرعت های کاذب ایجاد شده، مسائل مهم دیگری از

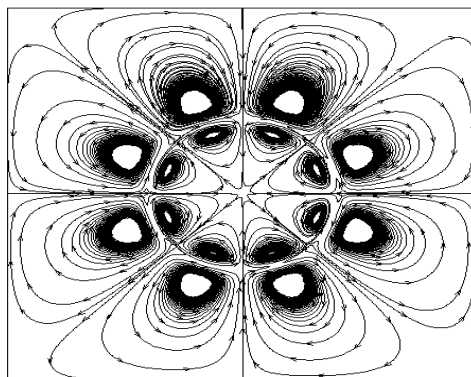
قبیل رنج دمای پایدار، منحنی پیوستگی و نسبت چگالی بررسی می شود.

۳-۳- نتایج مدل سازی

۳-۳-۱- مقایسه معادلات حالت

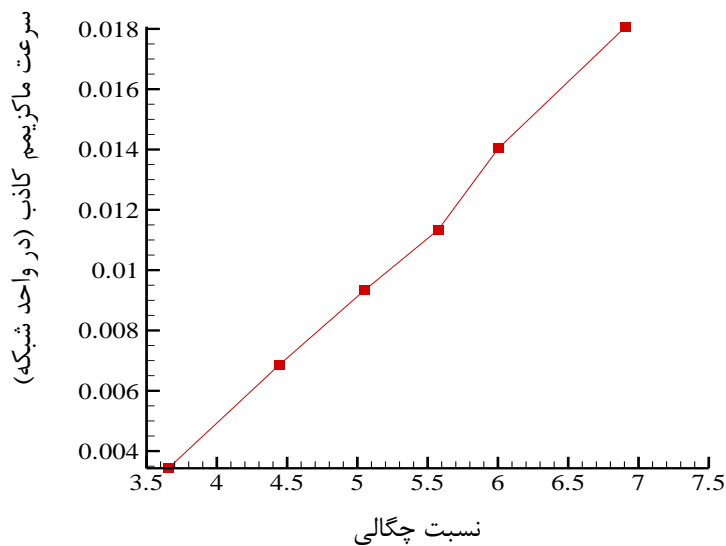
در ابتدا برای نشان دادن اهمیت موضوع، برای مدل سازی از معادله حالت شان و چن، که پیشتر

توضیح داده شد، استفاده شده است؛ برای این کار قطره ای ساکن با قطر، $d=20$ در واحد شبکه، در مرکز ناحیه محاسباتی با ابعاد 100×100 و شرایط مرزی پریودیک قرار داده شده است. هیچ نیروی خارجی مثل نیروی گرانش اعمال نمی شود و زمان آرامش، $\tau=1$ در نظر گرفته شده است. بعد از گذشت 100000 تکرار که قطره کاملاً به حالت تعادل رسید، خطوط جریان یا بردارهای سرعت را می توان رسم کرد. در شکل (۱-۳) خطوط جریان رسم شده است؛ جریان های کاذب در فصل مشترک دو فاز دیده می شوند. این جریان های کاذب، هشت گردابه کوچک متقارن ایجاد می شود [۴۶]، که نشانه انحراف از وضعیت واقعی هستند و در فصل مشترک دو فاز مقدار ماکزیمم خود را دارا می باشند.

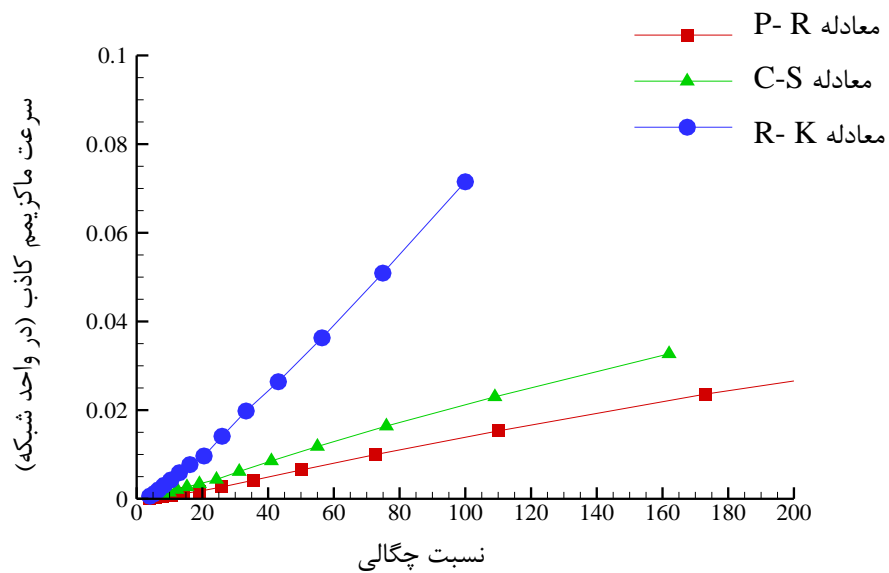


شکل (۱-۳) جریان های کاذب در فصل مشترک دو فاز [۴۶].

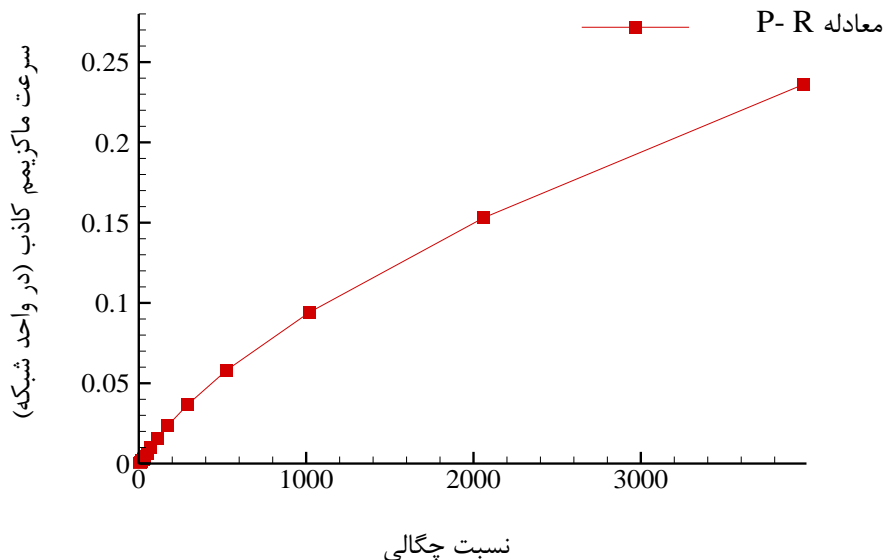
در شکل (۲-۳) سرعت های کاذب بر حسب نسبت چگالی برای معادله حالت شان و چن نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می شود، بالاترین نسبت چگالی بدست آمده در حدود 10^{-3} است که سرعت کاذب در این نسبت حدود 0.18 می باشد و کمترین سرعت کاذب از مرتبه 10^{-3} می باشد. این درحالی است که نسبت چگالی بدست آمده، همانطور که در شکل (۲-۳) مشاهده می شود به ازای معادلات حالت مختلف مقدار بزرگتری است و سرعت های کاذب معادل نیز بسیار کوچکترند. بطور مثال در نسبت چگالی 100 ، این مقدار برای معادله حالت P-R حدود 0.1 و برای معادله حالت R-K حدود 0.17 می باشد.



شکل (۲-۳) تغییرات سرعت کاذب ماکزیمم بر حسب نسبت چگالی برای معادله حالت شان و چن.



شکل (۳-۳) مقایسه تغییرات سرعت کاذب ماکزیمم بر حسب نسبت چگالی - هر سه معادله



شکل (۳-۴) مقایسه تغییرات سرعت کاذب ماکزیمم بر حسب نسبت چگالی - معادله P-R

شکل (۳-۴) مقایسه تغییرات $|u^s|_{\max}$ را بر حسب نسبت چگالی برای معادلات حالت مختلف نشان می‌دهد. برای معادلات R-K و C-S نمودار تقریباً خطی است. در معادله C-S حداقل نسبت دما $0/64$ و برای معادله R-k، $0/68$ بدست آمد؛ در نسبت‌های کمتر بدلیل افزایش نسبت چگالی ناپایداری‌هایی بوجود می‌آید. همانطور که در نمودار دیده می‌شود، مقادیر سرعت ماکزیمم در معادله C-S کمتر از معادله R-k می‌باشد. در معادله P-R حداقل نسبت دما $0/64$ می‌باشد. برای معادله P-R، ضریب خارج از مرکز ω برای آب $0/344$ در نظر گرفته شده است [۹]. با معادله P-R، نسبت چگالی حاصل بالاتر از دو معادله قبل می‌باشد. مقادیر سرعت کاذب در معادله P-R در یک نسبت چگالی مشخص در مقایسه با دو معادله دیگر کمتر است و نسبت چگالی‌های حاصل بزرگتر می‌باشند.

جدول (۱-۳) خصوصیات آب اشباع بدست آمده از جدول‌های NIST [۴۷] و مدل‌سازی LBM در نسبت دماهای مختلف.

نسبت دمای بی‌بعد	چگالی مایع واقعی (kg/m ³)	چگالی بخار واقعی (kg/m ³)	چگالی مایع در شبکه بولتزن (lattice unit)	چگالی بخار در شبکه بولتزن (lattice unit)	سرعت کاذب ماکزیمم (lattice unit)
۰/۶۸	۹۰۰/۶۲	۳/۸۳۵	۷/۶۳۶	۰/۰۳۲۵۲	۰/۰۷۱
۰/۷	۸۸۷/۱۹	۵/۱۳۷	۷/۵۲۲	۰/۰۴۳۵۶	۰/۰۵۰۹
۰/۷۲	۸۷۲/۹۷	۶/۷۷۶	۷/۴۰۱	۰/۰۵۷۴۵	۰/۰۳۶
۰/۷۴	۸۵۷/۹۲	۸/۸۱۱	۷/۲۷۴	۰/۰۷۴۷	۰/۰۲۶۳
۰/۷۶	۸۴۱/۹۴	۱۱/۳۲۳	۷/۱۳۸	۰/۰۹۵۱۰	۰/۰۱۹۸
۰/۷۸	۸۲۴/۹۸	۱۴/۳۹۷	۶/۹۹۴	۰/۱۲۲۰۶	۰/۰۱۴۱
۰/۸	۸۰۶/۹۰	۱۸/۱۴۶	۶/۸۴۱	۰/۱۵۳۸۵	۰/۰۰۹۶
۰/۸۲	۷۸۷/۵۷	۲۲/۷۱	۶/۶۷۷	۰/۱۹۲۵۴	۰/۰۰۷۷
۰/۸۴	۷۶۶/۷۸	۲۸/۲۶۷	۶/۵۰۱	۰/۲۳۹۶۵	۰/۰۰۵۹
۰/۸۶	۷۴۴/۲۵	۳۵/۰۶۱	۶/۳۰۱	۰/۲۹۷۲۶	۰/۰۰۴۲
۰/۸۸	۷۱۹/۶۳	۴۳/۴۲۳	۶/۱۰۱	۰/۳۶۸۱۵	۰/۰۰۳
۰/۹	۶۹۲/۳۷	۵۳/۸۵۰	۵/۸۷۰	۰/۴۵۶۵۶	۰/۰۰۱۹
۰/۹۲	۶۶۱/۶۸	۶۷/۱۲۰	۵/۶۰۹	۰/۵۶۹۰۷	۰/۰۰۱۱
۰/۹۴	۶۲۵/۹۲	۸۴/۵۹۵	۵/۳۰۸	۰/۷۱۷۲۲	۰/۰۰۰۶

در جدول (۱-۳) خصوصیات آب اشباع بدست آمده از جدول‌های NIST [۴۷] و مدل‌سازی شبکه بولتزن در نسبت دماهای مختلف برای معادله حالت R-K بعنوان نمونه آورده شده است.

۳-۳-۱-۱- طرح ماکسول منحنی p-v برای معادلات حالت غیرایده‌آل

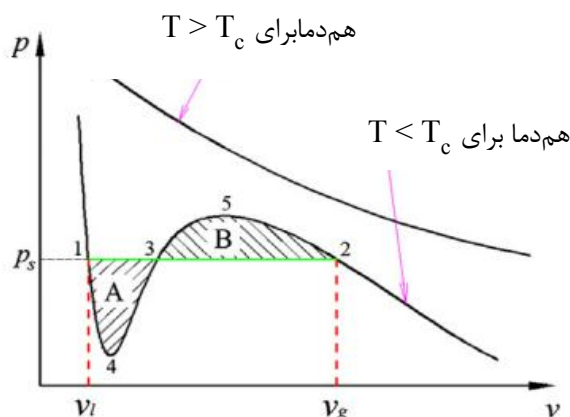
شکل (۵-۳) منحنی p-v یک ماده خالص در یک دمای داده شده برای هر معادله حالت غیر ایده‌آل ذکر شده در متن را نمایش می‌دهد. اگر ماده در دمای فوق بحرانی باشد، $T > T_c$ ، منحنی p-v در یک دمای ثابت، یکنواخت است و هر مقدار فشار متناسب با یک مقدار چگالی مخصوص یا حجم مخصوص

می‌باشد؛ در این حالت، تشخیص فاز مایع و بخار امکان‌پذیر نیست. از طرف دیگر، اگر دما از دمای بحرانی کمتر باشد، $T < T_c$ ، منحنی برای معادلات حالت یکنواخت نیست و در یک فشار معین، برای فازهای بخار و مایع مقادیر چگالی متفاوت وجود خواهد داشت؛ بعبارت دیگر فازهای بخار و مایع جدا هستند (مثلاً 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 با خط افقی ۱-۳-۲ جایگزین می‌شود. ایده اصلی ماکسول در رابطه (۱۳-۳) آمده است.

$$\int_{v_l}^{v_g} p \, dv = p_s (v_g - v_l) \quad (13-3)$$

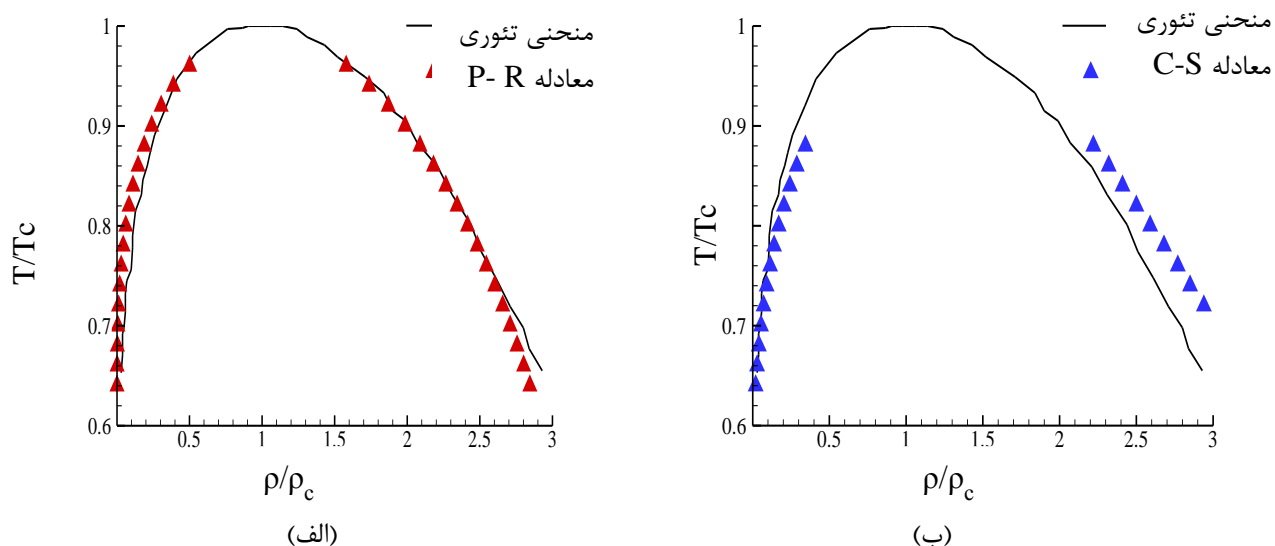
در واقع مساحت ناحیه A معادل مساحت ناحیه B می‌باشد. برای حل عددی معادله (۱۳-۳) برای یک معادله حالت خاص در یک دمای معین، می‌بایست ابتدا مقدار فشار از معادله حالت محاسبه شود و در رابطه (۱۳-۳) جایگزین گردد با حدس اولیه برای v_l ، v_g و p_s مقادیر نهایی از روش تکرار و زمانی که رابطه (۱۳-۳) ارضا شود، بدست می‌آیند.

شکل (۷-۳) مقادیر نسبت دما را بر حسب نسبت چگالی برای سه معادله حالت غیرایده‌آل ذکر شده نمایش می‌دهند، که در این مطالعه منحنی‌های پیوستگی نامیده شده‌اند.

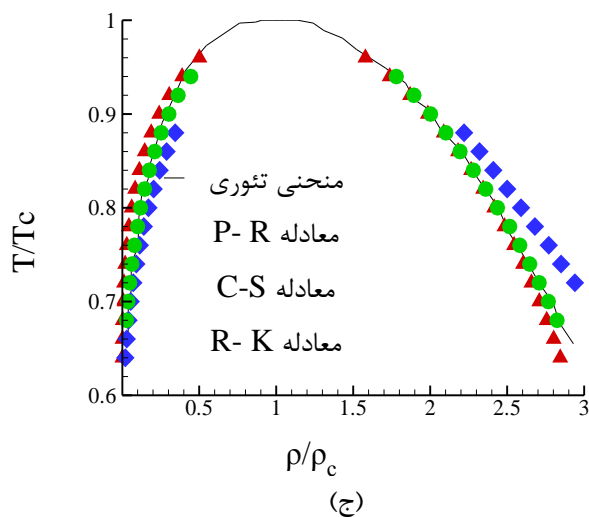
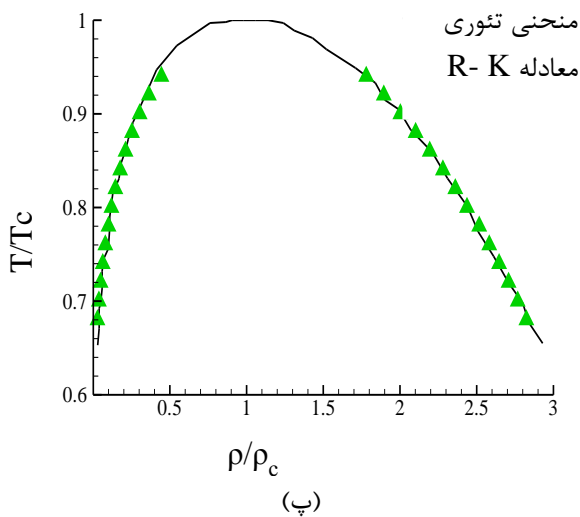


شکل (۵-۳) نمودار نمایش رفتار فوق بحرانی و زیر بحرانی و طرح ماکسول (v_l و v_g حجم مخصوص مایع و بخار اشباع و p_s فشار اشباع متناسب با دما می‌باشد) [۴۸].

برای ارزیابی دقیقتر معادلات حالت، منحنی‌های پیوستگی بدست‌آمده از مدل‌سازی، با منحنی‌های تئوری پیش‌بینی شده توسط ماکسول مقایسه شده‌است. نتایج حاصل از مدل‌سازی با معادلات حالت مختلف، بیانگر تطابق نتایج با نتایج تئوری می‌باشد؛ که این مطلب بر درستی کد نگاشته شده صحه می‌گذارد. البته معادله R-K، تطابق بیشتری با منحنی تئوری دارند و معادله P-R نیز از مطابقت خوبی برخوردار می‌باشد و فقط انحراف کمی در شاخه فاز بخار دارد. البته این انحراف از طبیعت معادله حالت ناشی می‌شود؛ بطوری‌که با کاهش بیشتر دما نسبت به دمای بحرانی، نسبت چگالی بسیار افزایش می‌یابد. برای معادله P-R، نسبت چگالی بیشتر از هزار می‌باشد که باعث می‌شود تغییر بسیار کوچکی در چگالی فاز مایع، نوساناتی را در چگالی فاز بخار به همراه داشته‌باشد. نتایج حاصل از مدل‌سازی با معادله C-S نیز، نسبت به دو معادله دیگر انحراف بیشتری را نشان می‌دهد؛ مدل‌سازی‌های بعدی با معادلات حالت P-R و R-K انجام گرفته‌است.



شکل (۳-۶) مقایسه منحنی‌های پیوستگی حاصل از مدل‌سازی با نتایج تئوری ماکسول الف- معادله حالت P-R ب- معادله حالت C-S



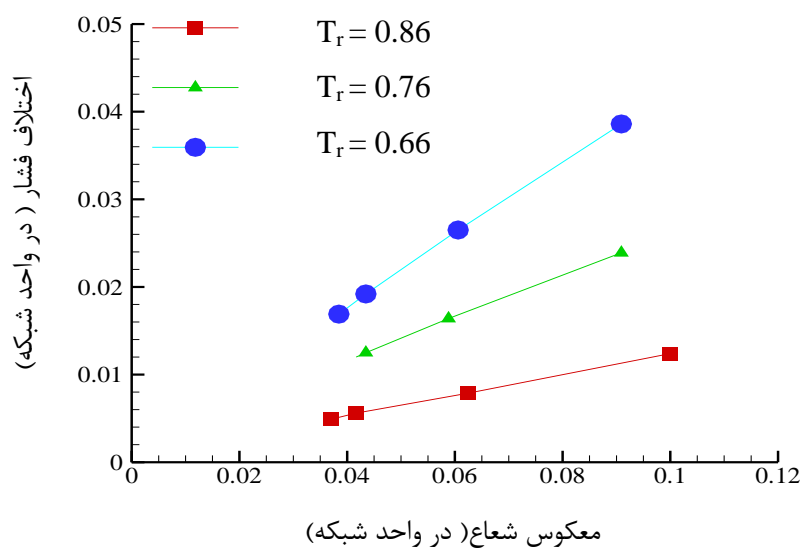
شکل (۷-۳) مقایسه منحنی‌های پیوستگی حاصل از مدل‌سازی با نتایج تئوری ماکسول پ- معادله حالت R- K ج- هر سه معادله

۲-۳-۳- تست لاپلاس

۱-۲-۳-۳ بررسی تاثیر نسبت دما بر روی کشش سطحی

از معایب روش شبه پتانسیل یا همان شان و چن عدم وجود روش مستقیمی برای محاسبه کشش سطحی است و برای محاسبه کشش سطحی، گرفتن تست لاپلاس لازم است. 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، پریودیک می‌باشند. مقدار ضریب G ، که قدرت برهم کنش سیال- سیال را کنترل می‌کند، نقش بسزایی در انجام این تست دارد. در ابتدا، قطرات با اندازه‌های مربعی مختلف در مرکز شبکه‌ای به ابعاد 100×100 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 (۸-۳) رابطه بین Δp و $1/R$ را در نسبت دماهای مختلف نشان می‌دهد. با افزایش نسبت دما، شیب

نمودار کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت دما، نسبت چگالی بین دو فاز کاهش می‌یابد، و نیروی کشش سطحی کاهش پیدا می‌کند. جدول (۲-۳) مقادیر کشش سطحی در هر نسبت دما را، ارائه می‌دهد. در این تست زمان آرامش، $\tau=1$ در نظر گرفته شده است. نسبت دمای بی‌بعد با T_r و کشش سطحی با σ نشان داده شده است.



شکل (۳-۸) آزمایش لاپلاس جهت محاسبه کشش سطحی

جدول (۲-۳) تغییرات کشش سطحی بر حسب نسبت دما

σ	T_r
۰/۴۱۲	۰/۶۶
۰/۲۴۱	۰/۷۶
۰/۱۱۸	۰/۸۶

۳-۴- صحت سنجی

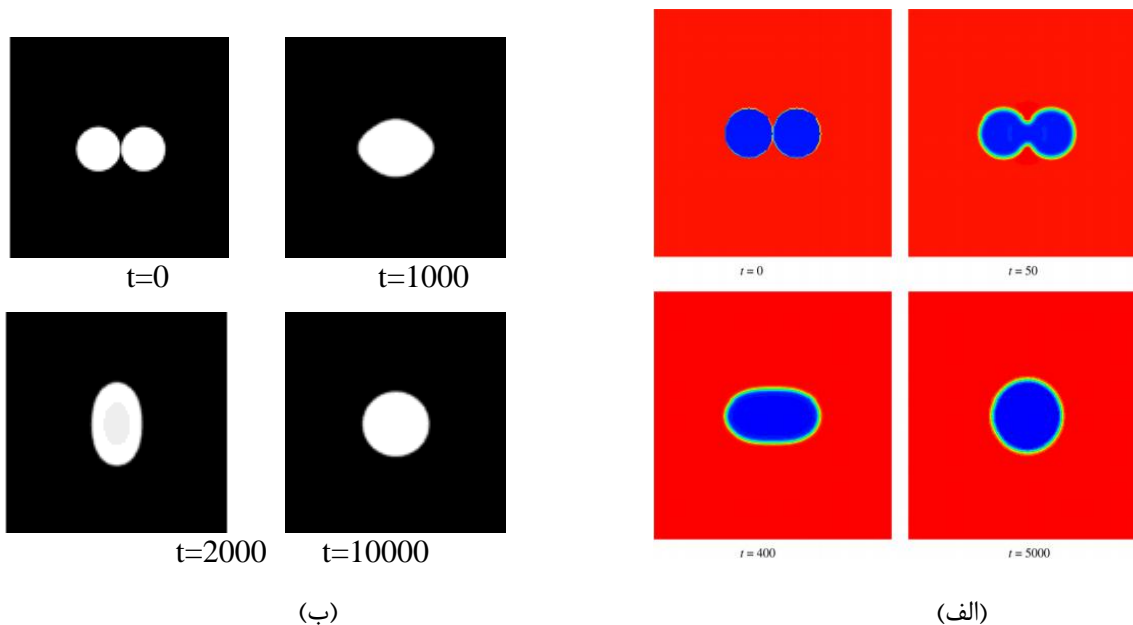
در روش شبکه بولتزن، برای اطمینان از صحت برنامه، آن را با تست‌ها و حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌دهند و با مقایسه نتایج حاصل، معتبرسازی انجام می‌گیرد. در مطالعه حاضر نیز، برای این مهم از مدلسازی جریان‌های تک جزیی چندفازی با نسبت چگالی بالا بهره گرفته شده است. در این تست-

ها، از مدل P-R و نسبت دمای $T_r=0.76$ و زمان آرامش $\tau=1$ استفاده شده است؛ در این نسبت دما نسبت چگالی حاصل حدود ۸۰ می باشد که با معادله حالت شان و چن قابل مدل سازی نیستند. اولین مساله، ادغام دو قطره با هم می باشد. در شکل (۳-۹-الف) مراحل مختلف فرایند ادغام دو قطره دوبعدی نشان داده شده است که در واقع بیانگر نیروی جاذبه بین دو قطره می باشد. در ابتدا، در زمان $t=0$ ، قطره ها با لایه ی نازکی از بخار به ضخامت یک واحد لیتیس جدا شده اند. بدلیل وجود نیروی جاذبه بین ملکولی قطره ها به هم متصل می شوند؛ با گذشت زمان، قطره ها بعلت وجود کشش سطحی در هم ادغام می شوند؛ شکل حاصل به سمتی میل می کند تا با کاهش محیط، انرژی سطحی بحداقل برسد. سرانجام یک قطره بزرگتر با سطحی تقریباً برابر مجموع مساحت دو قطره بوجود می آید. نتایج حاصل با نتایج مطالعه پراشنت جین و همکاران^۱ [۴۶] مطابقت دارد. در این تست، ابعاد ناحیه محاسباتی 300×300 واحد لیتیس می باشد و قطر اولیه قطره ها ۳۰ واحد است و کشش سطحی 0.241 می باشد. این تست به ازای نسبت دماهای مختلف نیز انجام گرفته است، و مقادیر سرعت های کاذب در هر تست بعد از رسیدن به حالت پایدار گزارش شده است. در جدول (۳-۳) مقادیر سرعت های کاذب در هر نسبت دما آمده است. همانطور که در جدول (۳-۳) مشاهده می شود با افزایش نسبت دما و در نتیجه کاهش نسبت چگالی مقادیر سرعت های کاذب کاهش می یابند، که با نتایج بدست آمده در قسمت (۳-۳-۱) شکل (۳-۴) مطابقت دارد.

جدول (۳-۳) تغییرات سرعت های کاذب بر حسب نسبت دما

$ U^s _{\max}$	T_r
۰/۱۱۵۶	۰/۶۸
۰/۰۱۷۸	۰/۷۶
۰/۰۰۱۸۹	۰/۸۶

¹ Prashant.k.jain

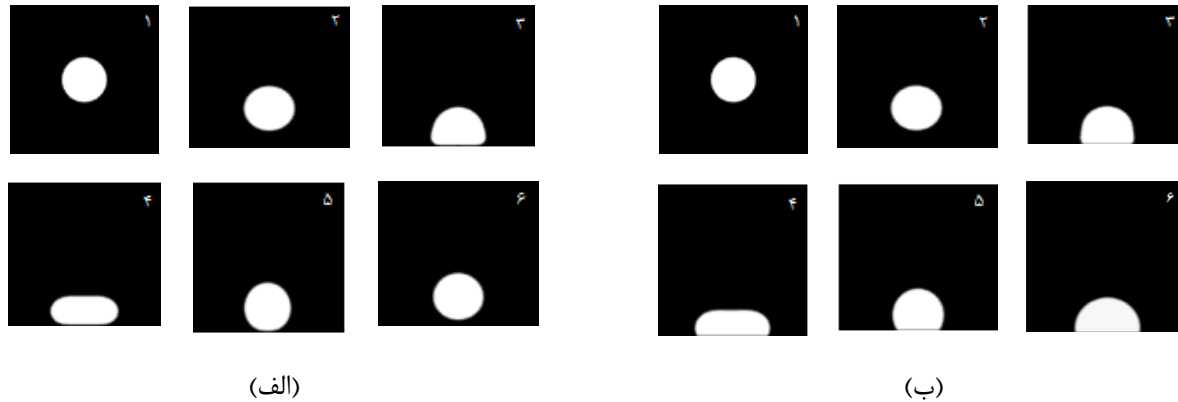


شکل (۳-۹) ادغام دو قطره با هم با قطرهای برابر (الف) کار پراشتت و همکاران [۴۶] (ب) مطالعه حاضر.

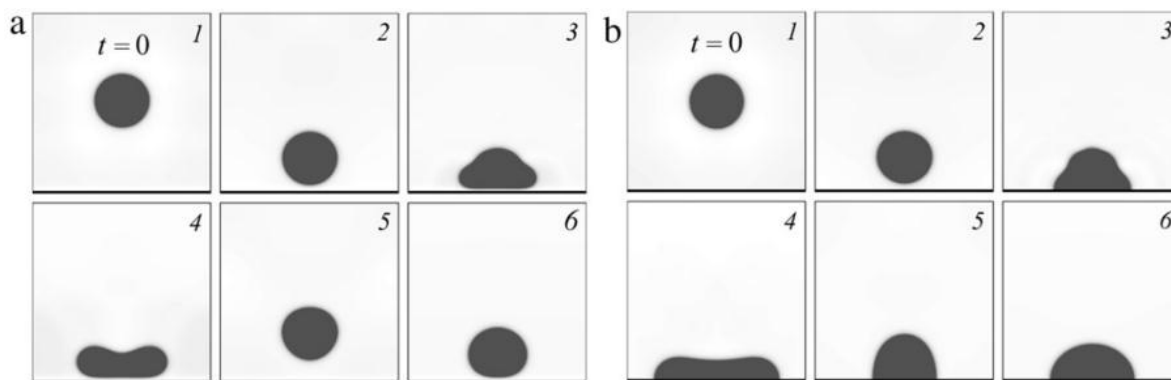
مثال دیگر سقوط قطره تحت گرانش و برخورد آن با سطوح با ترشوندگی‌های مختلف می‌باشد. در این مثال نیز همانطور که قبلاً گفته‌شد، نسبت دما 0.76 و کشش سطحی 0.241 می‌باشد. نتایج در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده‌است. برای هر دو حالت شکل نهایی قطره بعد از مدت طولانی بدست آمده‌است. ابعاد ناحیه محاسباتی 200×200 واحد لتیس می‌باشد و شرایط مرزی پریودیک است. قطر اولیه قطره 30 واحد لتیس می‌باشد. شتاب گرانش $g=10^{-5}$ واحد لتیس انتخاب شده است. در شکل (۳-۱۰-الف) در حالت سطح ترنشونده^۱ قطره بعد از برخورد با سطح پهن می‌شود. سپس تغییرشکل و نوسانات ناشی از کشش سطحی شروع می‌شود. اگر نیروهای کاپیلاری از نیروی گرانش بزرگتر باشند، قطره قادر به جهیدن از روی سطح می‌باشد. بعد از مدتی بدلیل اتلاف انرژی ناشی از ویسکوزیته نوسانات متوقف می‌شود. از آنجا که هیچ عدد بی‌بعدی را نمی‌توان یافت که نشان دهنده اثر ترشوندگی سطح باشد، به همین دلیل بررسی دقیق‌تر امکان‌پذیر نیست. برای حالت سطح ترنشونده، $G_{ads} = -0.6$ و برای سطح ترشونده

^۱ Non wetting

$G_{ads} = -2.3$ از تست زاویه تماس بدست آمده است. در حالت سطح ترشونده^۱، قطره قادر به جدایش از سطح نیست؛ در این حالت تغییر شکل و نوسانات قطره حول شکل ثابتی مشاهده می‌شود. شکل ثابت بعد از چندین نوسان حاصل می‌شود (شکل (۳-۱۰-ب)). نتایج با نتایج ارائه شده در مطالعه کوپرشتوخ و همکاران [۱۰] سازگار است.



شکل (۳-۱۰) سقوط آزاد قطره و برخورد آن با سطح جامد تحت میدان گرانش با شتاب گرانش $g = 10^{-5}$ الف- سطح ترشونده ب- سطح ترشونده با زاویه ترشوندگی 90° مطالعه حاضر.



شکل (۳-۱۱) سقوط آزاد قطره و برخورد آن با سطح جامد تحت میدان گرانش مطالعه کوپرشتوخ و همکاران [۱۰].

² Wetting

۳-۵- مواد متخلخل^۱

یک ماده یا محیط متخلخل^۲ از دو بخش یا دو فاز کاملاً جدا از هم، تشکیل شده است. به فاز جامد این محیط، عموماً ماتریس جامد^۳ و به بقیه فضای باقی مانده از حجم کل محیط، فضای حفره‌ای^۴ گویند. اگر حجم مشخصی از یک ماده متخلخل در نظر گرفته شود، حجم حفره‌ها و حجم کل را به ترتیب با V_{pores} ، V_{total} نشان می‌دهند. در عمل، فضای حفره می‌تواند توسط یک یا چند فاز از یک سیال و یا چند جزء از سیالات مختلف اشغال شده باشد.

۳-۵-۱- مهم‌ترین خصوصیت هندسی

شاید بتوان مهم‌ترین ویژگی هندسی یک محیط متخلخل را ضریب تخلخل^۵ (نسبت تخلخل یا میزان-تخلخل) آن محیط دانست. همچنان که از ظاهر این کلمه هم برمی‌آید، این ضریب نشان‌دهنده میزان حفره‌دار بودن (حضور خلل و فرج در یک حجم معین) یک محیط متخلخل است. میزان تخلخل یک محیط ارتباط مستقیم و تنگاتنگی با اجزای هندسی سازنده آن دارد. این پارامتر هندسی معمولاً با ε نشان داده شده و همواره به صورت رابطه (۳-۱۴) تعریف می‌شود.

$$\varepsilon = \frac{V_{pores}}{V_{total}} \quad (۳-۱۴)$$

براین اساس، افزایش در میزان این ضریب بی‌بعد، نشان‌دهنده وجود حفره‌های بیشتر در داخل حجم معینی از ماده متخلخل است.

¹ Porous materials
² Porous medium
³ Solid matrix
⁴ Void space
⁵ Porosity

۳-۵-۲- انواع مواد متخلخل [۴۹]

از نقطه نظر ارتباط بین فضاهای حفره‌ای، در یک دسته‌بندی کلی می‌توان مواد متخلخل را به خانواده سلول باز^۱ و سلول بسته^۲ تقسیم بندی نمود، که هر کدام کاربردهای خاص خود را دارا هستند. مبنای این تعریف را می‌توان این‌گونه تشریح نمود که، در محیط‌های سلول بسته امکان حرکت (داخل فضای حفره- ای) از هر نقطه دلخواه به نقطه مشخصی دیگر بدون عبور از فاز جامد وجود نداشته، در حالی که در خانواده سلول باز، این امکان، یعنی انتقال از هر نقطه دلخواه به نقطه دلخواهی دیگر در داخل فضای حفره‌ای بدون عبور از فاز جامد، وجود دارد. لازم به ذکر است که در عمل، امکان پیدایش محیط‌هایی که ترکیبی از خانواده سلول باز و سلول بسته باشند هم وجود دارد، که این مورد در اینجا بررسی نخواهد شد.

۳-۵-۲-۱- انواع مواد متخلخل سلول باز

در حالت کلی، یک ماده متخلخل سلول باز، محیط غیرهمگنی^۳ است که بین اجزای سازنده آن فضای خالی وصل شده^۴ وجود دارد، به نحوی که سیال می‌تواند در این فضا حرکت کند. توزیع منافذ موجود در داخل این محیط متخلخل، می‌تواند کاملاً تصادفی^۵ باشد. در کلی‌ترین حالت ممکن، حرکت سیال در منافذ موجود در مواد متخلخل، دارای یک الگوی بسیار پیچیده سه‌بعدی است. به لحاظ موجودیت، مواد متخلخل یا به فرم طبیعی و به صورت مستقیم به کار گرفته می‌شوند، و یا طی فرآیندهای آزمایشگاهی یا بعضاً شیمیایی مختلف، به صورت مصنوعی ساخته می‌شوند. شاید بتوان همه گونه‌های مواد متخلخل موجود را در سه خانواده بزرگ با نام‌های، مواد متخلخل دانه‌ای^۶، فیبری شکل^۷ و در حالت خاص دیگری از

¹ Open cell

² Close cell

³ Heterogeneous

⁴ Interconnected voids

⁵ Random

⁶ Granular porous media

⁷ Fibrous porous media

مواد متخلخل فیبری شکل یعنی، شبکه‌ای^۱ تقسیم‌بندی نمود [۵۰]. در دسته اخیر، فیبرهای ساختاری به صورتی خاص نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند، به طوری که مجموعه آن‌ها ایجاد یک شبکه چند وجهی نموده، و در نهایت کل محیط مورد نظر از تکرار این الگو در راستاهای مختلف به وجود می‌آید. مواد متخلخل دانه‌ای، عموماً به علت ویژگی‌های خاص هندسی‌شان، دارای ضریب تخلخل‌های نسبتاً پایینی هستند. شاید معروف‌ترین عضو این خانواده را بتوان بسترهای فشرده کروی^۲ دانست.

۳-۵-۲-۱-۱- مواد متخلخل فیبری شکل و گونه‌های آن

مواد متخلخل فیبری شکل یک گونه پرکاربرد از مواد متخلخل سلول باز هستند، که معمولاً از روش‌های آزمایشگاهی برای ساخت آن، استفاده می‌شود. به اجزای سازنده ماتریس یک محیط متخلخل فیبری شکل سلول باز، میکروالیاف‌های ساختاری یا فیبرهای ساختاری^۳ گفته می‌شود. سطح این فیبرهای جامد به جز در مواردی خاص، همواره به صورت نفوذناپذیر^۴ و صلب^۵ در نظر گرفته می‌شود به طوری که سیال عبوری از بین این ماتریس جامد، قابلیت نفوذ به داخل این فیبرها را نداشته و همچنین، حرکت سیال از لابه‌لای این فیبرها باعث تغییر شکل آنها نمی‌شود. برخلاف مواد متخلخل فیبری شکل طبیعی که عموماً از فیبرهای ساختاری انحنادار تشکیل شده‌اند، معمولاً، اکثر مواد متخلخل فیبری شکل سلول باز^۶ آزمایشگاهی، دارای فیبرهای ساختاری کاملاً صاف و بدون انحنا هستند. این گونه خاص را می‌توان به لحاظ هندسه قرارگیری فیبرها نسبت به هم، به سه گروه مواد متخلخل فیبری شکل یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی تقسیم‌بندی کرد [۵۱]. براساس الگوی ارایه شده در شکل (۳-۱۲)، محور فیبرهای ساختاری یک محیط متخلخل فیبری شکل یک بعدی، همگی موازی یکدیگر بوده و می‌توانند دارای آرایش‌های

¹ Network porous media

² Spherical packed beds

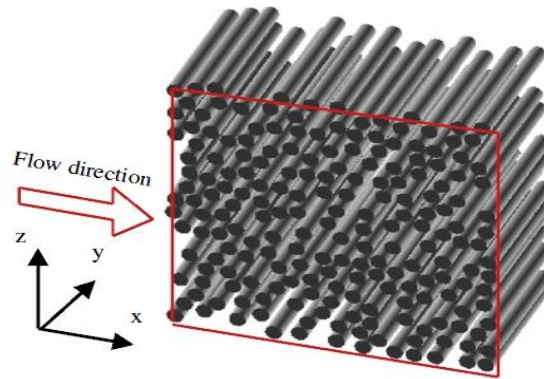
³ Structural fibers

⁴ Impermeable

⁵ Rigid

⁶ Open cell fibrous media

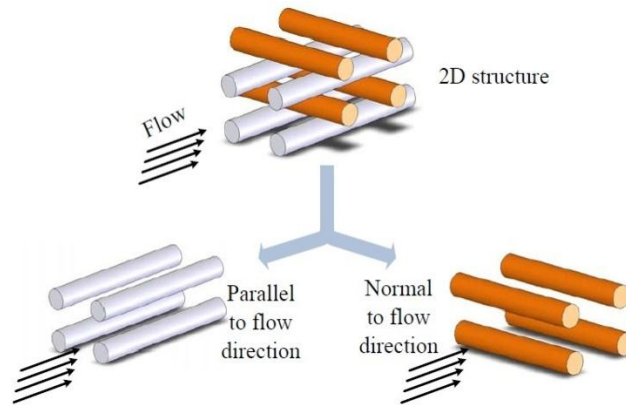
مختلف منظم^۱ یا نامنظم^۲ (تصادفی) باشند.



شکل (۳-۱۲) ماده متخلخل فیبری شکل یک بعدی با سطح مقطع دایره‌ای و آرایش تصادفی تحت جریان عمودی^۳

[۵۲]

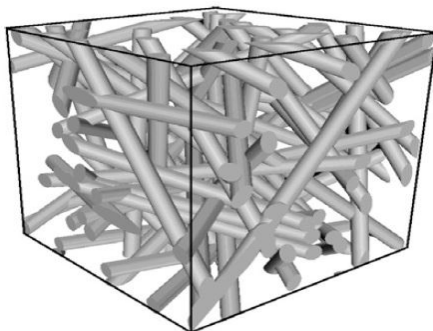
در حالتی که، ماتریس جامد محیط دو بعدی است، محور فیبرهای ساختاری آن می‌توانند با هر توزیعی (منظم یا تصادفی) در صفحات مختلفی قرار بگیرند. در حالت مذکور، صفحات حاوی فیبرها میبایست در فضا با یکدیگر موازی باشند. نمونه‌ای از محیط متخلخل دوبعدی منظم در شکل (۳-۱۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۱۳) ترکیب دو مدل یک بعدی از محیط متخلخل فیبری شکل و ایجاد یک مدل دو بعدی منظم [۵۱]

^۱ Ordered
^۲ Disordered
^۳ Cross flow

در وضعیتی که ساختار ماتریس جامد محیط متخلخل سه بعدی باشد، محور فیبرهای جامد تشکیل-
 دهنده آن می‌توانند مطابق با بدون هیچ قیدی، در جهات و زوایای مختلف در فضای مورد نظر، نسبت به
 یکدیگر قرار بگیرند.



شکل (۳-۱۴) ماده متخلخل فیبری شکل سه بعدی دارای فیبرهای صاف با همپوشانی آزاد^۱ [۵۳].

در این مطالعه به مدلسازی مواد متخلخل فیبری شکل پرداخته می‌شود.

۳-۵-۳- تولید محیط متخلخل

در مطالعه حاضر، برای تولید محیط متخلخل دو بعدی یک کد با زبان برنامه نویسی فرترن نوشته
 شده است. این کد دارای ویژگی‌های منحصر بفردی است، که آن را از سایر موارد مشابه متمایز می‌کند؛ از
 جمله:

+ تولید موانع جامد با ابعاد دلخواه (در این مطالعه موانع جامد دارای ابعاد 3×3 می‌باشد).

+ انتخاب تصادفی شبکه‌ها برای تولید موانع جامد و امکان همپوشانی آزاد در تولید موانع.

+ تولید محیط متخلخل با نسبت تخلخل دلخواه (نسبت تخلخل به صورت داده ورودی گرفته می-

شود).

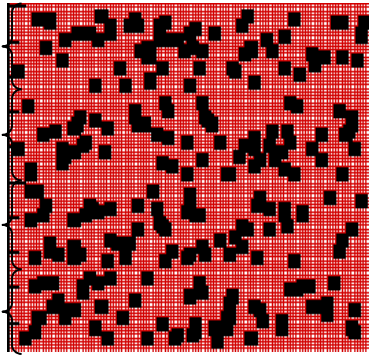
+ ایجاد محیط متخلخل لایه‌ای (به طوری که نسبت تخلخل در هر لایه و در کل ناحیه دارای مقدار

¹ Free overlapping

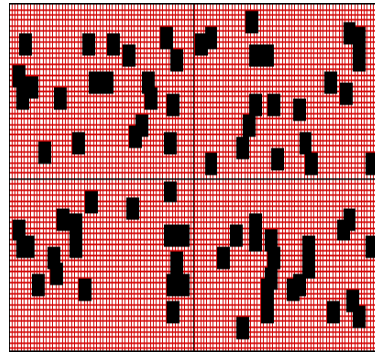
یکسانی باشد؛ این کار باعث یکنواخت تر شدن توزیع موانع جامد می شود.

✚ امکان تولید محیط متخلخل لایه‌ای با لایه‌ها با تخلخل‌های مختلف.

نسبت تخلخل که پیشتر توضیح داده شد، در کدنویسی برای حالت دو بعدی بصورت نسبت تعداد لتیس‌های داخل سیال به تعداد کل لتیس‌های موجود در ناحیه متخلخل در نظر گرفته شده است. در شکل زیر نمونه‌ای از محیط متخلخل لایه‌ای ایجاد شده با این کد نمایش داده شده است. البته با توجه به توزیع تصادفی موانع جامد در ناحیه متخلخل، برای هر تخلخل می‌توانیم چند ساختار مختلف داشته باشیم.



(ب)



(الف)

شکل (۳-۱۵) نمونه‌ای از محیط متخلخل لایه‌ای. (تخلخل در هر لایه و در کل ناحیه در الف) $0/9$ و در ب) $0/8$ می‌باشد.)

در این فصل از طرح محیط متخلخل (الف) استفاده شده است و در مدلسازی‌های فصل بعد از طرح (ب) استفاده می‌شود.

۳-۶- نفوذ قطره در ناحیه متخلخل

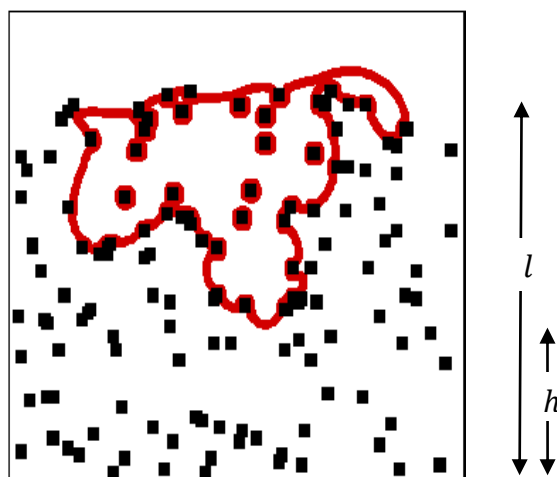
برای بررسی نفوذ قطره در داخل محیط متخلخل، ابتدا قطره‌ای با قطر اولیه d_0 را بصورت مماس بر

سطح محیط متخلخل قرار می‌دهیم. بعد از گذشت چند هزار تکرار و رسیدن قطره به پایداری، قطره با سرعت اولیه u_0 و تحت اعمال 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 که مربوط به نحوه اعمال این شرط در پیوست قسمت (چ) آورده شده است.

از آنجا که در اکثر منابع، نفوذ قطره در ماده متخلخل [۱۹،۹] برای جریان‌های دوجزئی چندفازی مورد مطالعه قرار گرفته است و کمتر به پدیده نفوذ در جریان‌های تک جزئی چند فازی با نسبت چگالی بالا، به کمک معادلات حالت پرداخته شده است؛ درانتها برای تکمیل بحث، نفوذ قطره در یک محیط متخلخل منظم را با مدل انتخابی R-K و نسبت دمای $0/۸۶$ بررسی می‌کنیم. البته با توجه به گستردگی و اهمیت این موضوع، در آینده به تفصیل به بحث پدیده نفوذ خواهیم پرداخت. ابعاد ناحیه محاسباتی ۱۴۰×۱۲۰ و قطر اولیه قطره ۶۰ واحد شبکه می‌باشد. در این مطالعه، زمان بی‌بعد نیز بصورت $t^* = Tu_0/d_0$ تعریف شده است که T تعداد مراحل زمانی می‌باشد.

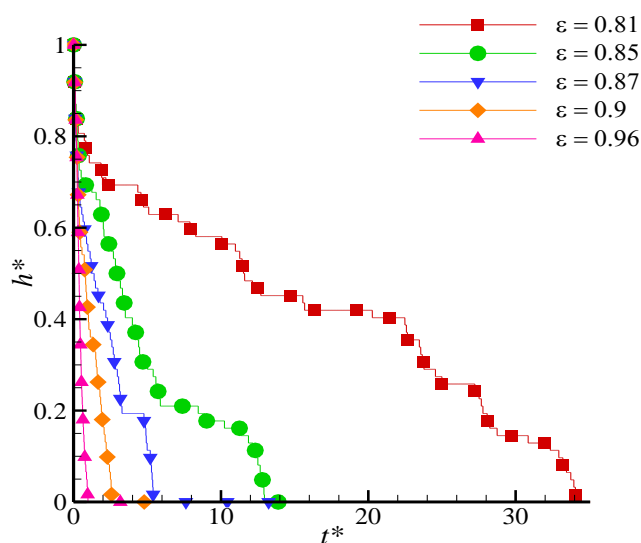
۳-۶-۱- بررسی تاثیر نسبت تخلخل

برای بررسی تاثیر نسبت تخلخل بر روی نرخ نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای، پدیده نفوذ در پنج تخلخل $0/۹۶$ ، $0/۹۰$ ، $0/۸۷$ ، $0/۸۵$ و $0/۸۱$ مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای نمایش بهتر نرخ نفوذ در ماده متخلخل، از دو پارامتر استفاده شده است. پارامتر بی‌بعد h^* که بصورت نسبت عمق نفوذ (h) داخل محیط متخلخل در هر گام زمانی به ارتفاع کلی ماده متخلخل (L) تعریف شده است و با رابطه $h^* = h/L$ نمایش داده می‌شود طرحواره مربوط به آن در شکل (۳-۱۶) نمایش داده شده است؛ بطوریکه با استفاده از این پارامتر، تغییرات نرخ نفوذ سیال در عمق ماده محیط متخلخل مشخص می‌شود.



شکل (۳-۱۶) نمایش پارامترهای تعریف شده (عمق نفوذ h) داخل محیط متخلخل و در هر گام زمانی و به ارتفاع کلی ماده متخلخل (L) .

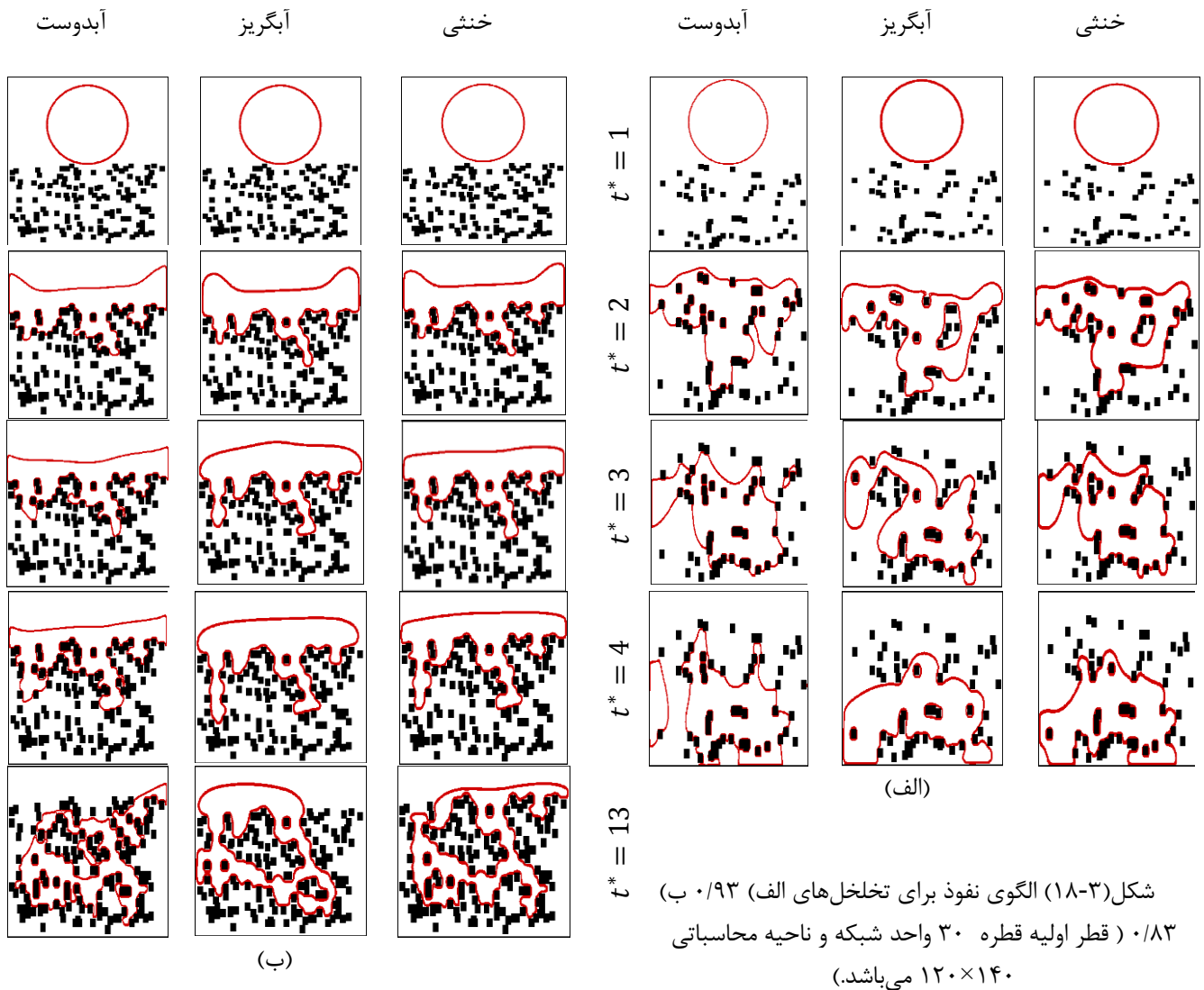
همانطور که در شکل (۳-۱۷) مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت تخلخل بعلت افزایش سطوح جامد و در نتیجه افزایش نیروی مقاوم سطح متوسط نفوذ به میزان چشمگیری کاهش یافته‌است. مثلاً سرعت متوسط نفوذ داخل محیط متخلخل 0.96 (بر مبنای عمق نفوذ)، بترتیب $3.5/1$ ، $1.3/3$ ، $5/5$ و $2/7$ برابر سرعت متوسط نفوذ در تخلخل‌های 0.81 ، 0.87 ، 0.85 و 0.90 می‌باشد.



شکل (۳-۱۷) مقایسه نرخ نفوذ h^* بر حسب t^* در نسبت تخلخل‌های مختلف.

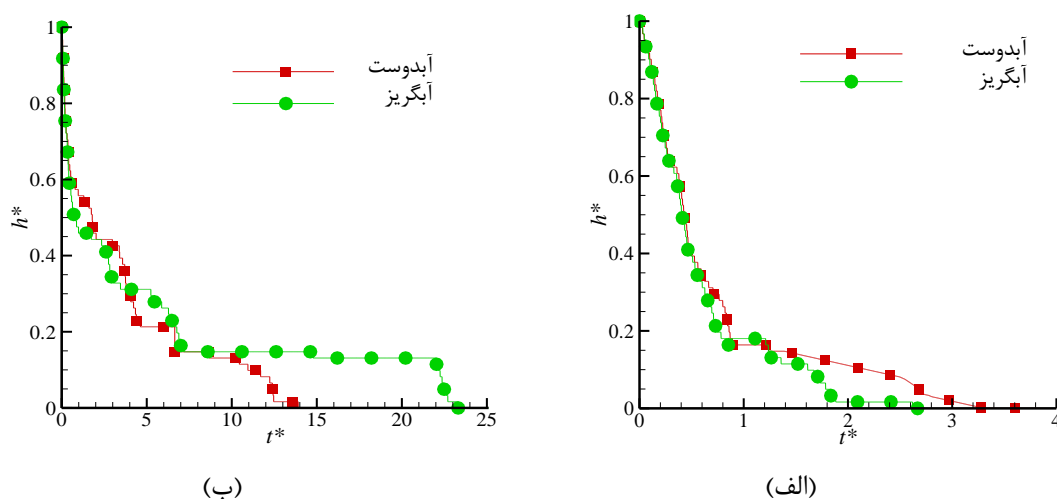
۳-۶-۲- بررسی تاثیر خصوصیت آبدوستی یا آبگریزی سطح

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 90° درجه، سیال تمایل به خیس کردن سطح را دارد، در این صورت به سطح، ترشونده و یا آبدوست می‌گویند؛ برای زاویه تماس بزرگ‌تر از 90° درجه، سیال به شکل فشرده درمی‌آید و روی سطح پخش نمی‌شود، در این حالت سطح ترنشونده و آبگریز نامیده می‌شود. در حالتی که زاویه تماس بین سطوح جامد و سیال 90° درجه است، وضعیت خنثی نامیده می‌شود. مقادیر زاویه تماس و مقدار G_{ads} متناظرشان بترتیب، برای حالت آبدوست، 60° درجه و $3/5-$ و برای حالت آبگریز، 120° درجه و $1/7-$ ، از تست زاویه تماس بدست آمده‌اند. در اینجا، برای بررسی اثر خصوصیت آبدوست یا آبگریز بودن سطوح جامد روی نرخ و الگوی نفوذ در ماده متخلخل لایه‌ای یک بار همه شبکه‌های 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 (۳-۱۸) 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 لتیس‌های 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 صورتی که در حالت آبگریز، سیال تمایل دارد به گونه‌ای از بین موانع عبور کند که کمترین تماس را با سطوح جامد داشته‌باشد، عبارتی سیال مانند انگشت‌دانه‌هایی از بین سطوح عبور می‌کند؛ قطره 30 واحد شبکه می‌باشد. نتایج مربوط به الگوی نفوذ در شکل (۳-۱۸) 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 لتیس‌های 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 صورتی که در حالت آبگریز، سیال تمایل دارد به-گونه‌ای از بین موانع عبور کند که کمترین تماس را با سطوح جامد داشته‌باشد، عبارتی سیال مانند انگشت‌دانه‌هایی از بین سطوح عبور می‌کند؛ بهمین دلیل این الگوی نفوذ رژیم فینگرینگ یا انگشت-مانند نامیده می‌شود. البته این انگشت دانه‌ها در رژیم پیستونی هم دیده می‌شود ولی ضخامت آن‌ها بسیار کمتر

از ضخامت انگشت‌دانه‌های رژیم انگشتی یا فینگرینگ می‌باشد. تفاوت این دو رژیم در تخلخل 0.83 محسوس‌تر است. در حالت خنثی، الگوی نفوذ بین این دو الگو متغیر است و مشخصاتی از هردو الگو را در زمان‌های مختلف دارا می‌باشد. در شکل (۳-۱۹) نرخ نفوذ در دو تخلخل مختلف برای قطر نفوذ کننده داخل محیط متخلخل آورده شده‌است. نمودارهای مربوط به نرخ نفوذ نشان می‌دهد، در تخلخل 0.83 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 نیروی‌های مقاوم در برابر نفوذ در حالت آبگریز، اشاره کرد؛ در حالت آبگریز مقداری از سیال در خارج محیط متخلخل باقی خواهد ماند و نفوذ نمی‌کند. در تخلخل بالاتر نتایج کمی تغییر می‌کند، البته بطور کلی بدلیل وجود حفره‌های بیشتر سرعت نفوذ بیشتر از تخلخل 0.83 می‌باشد.



شکل (۳-۱۹) نرخ نفوذ در ماده متخلخل الف) 0.93 ب) 0.83 .

در این تخلخل، در هر دو حالت نفوذ به طور کامل انجام می‌گیرد؛ هرچند که غلبه نیروهای مقاوم 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 بگونه‌ای 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 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.

لازم به ذکر 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 گونه‌ای شود که نفوذ سریعتر یا کندتر رخ دهد.

فصل چهارم: نفوذ و پیمایش قطره و فیلم مایع در ماده متخلخل

لایه ای در حالت دو جزئی چندفازی

۴-۱- مقدمه

جریان‌های چندفازی و بطور خاص نفوذ سیال در ماده متخلخل، اهمیت بسیاری در صنایع مختلف دارد؛ از جمله تولید پیل سوختی، جداسازی سیالات به خصوص در زمینه‌های صنعت نفت، نیروگاه‌ها (برج-های خنک‌کن)، مبدل‌های حرارتی، در الکتروپاشش‌ها، پرینترهای جوهرافشان، در مسائل زیست محیطی از جمله ته‌نشینی مواد موجود در فاضلاب‌ها، نفوذ آب باران در زمین، که آب در بسترهای خاکی با لایه-های مختلف که مانند بستر متخلخلی است که از لایه‌ها با تخلخل متفاوت تشکیل شده است نفوذ می‌کند. در این فصل با توجه به اهمیت موضوع و کاربردهای ذکر شده، پدیده نفوذ قطره و فیلم سیال در محیط متخلخل لایه‌ای به کمک روش شبه پتانسیل بررسی شده است. تاثیر ویژگی‌های مختلف از جمله نسبت تخلخل و ویژگی آبدوستی و آبگریزی بر روی الگو و نرخ نفوذ مورد بررسی قرار گرفته است. راهکارهایی در جهت افزایش نرخ نفوذ در یک تخلخل مشخص و تغییر مسیر سیال در مسیرهای مشخص داخل محیط متخلخل لایه‌ای ارائه شده است که در ادامه به تفصیل به آن‌ها پرداخته شده است.

۴-۲- معادلات شبکه بولتزمن برای سیالات چند جزیی چندفازی [۲۲]

در این مدل برای هر جز تابع توزیع مجزایی تعریف می‌شود، مانند رابطه (۴-۱)

$$f_{\alpha}^{\sigma}(x+\Delta x, t+\Delta t) - f_{\alpha}^{\sigma}(x, t) = -\frac{1}{\tau_{\sigma}} [f_{\alpha}^{\sigma}(x, t) - f_{\alpha}^{\sigma(eq)}(x, t)] \quad (4-1)$$

در رابطه (۴-۱) f_{α}^{σ} تابع توزیع جز σ ام در جهت α می‌باشد. مقادیر α به تعداد اجزا بستگی دارد؛ مثلاً برای سیالات دو جزیی مقادیر یک و دو را اختیار می‌کند. τ_{σ} زمان آرامش منفرد جز σ ام می‌باشد که توسط رابطه $\nu_{\sigma} = (\tau_{\sigma} - \frac{1}{2})/3$ به لزجت سینماتیکی مرتبط می‌شود. تابع توزیع تعادلی $f_{\alpha}^{\sigma(eq)}$ از رابطه (۲-۳) مشابه حالت تک جزیی بدست می‌آید، با این تفاوت که سرعت بکار رفته در رابطه سرعت تعادلی است که توسط ممنتوم که بوسیله نیروهای کل اعمال شده بر جز σ ام در محاسبات شرکت کرده است،

شیفت یافته‌است و به همین دلیل به این روش، روش انتقال سرعت^۱ می‌گویند.

$$f_{\alpha}^{\sigma(eq)} = \rho_{\sigma} W_{\alpha} \left[1 + \frac{3}{c^2} (\vec{e}_{\alpha} \cdot \vec{u}_{\sigma}^{eq}) + \frac{9}{2c^2} (\vec{e}_{\alpha} \cdot \vec{u}_{\sigma}^{eq})^2 - \frac{3}{2c^2} |\vec{u}_{\sigma}^{eq}|^2 \right] \quad (۲-۴)$$

$$\vec{u}_{\sigma}^{eq} = \vec{u}' + \frac{\tau_{\sigma} \vec{F}_{\sigma}}{\rho_{\sigma}} \quad (۳-۴)$$

که ρ_{σ} چگالی جز σ است که توسط رابطه $\rho_{\sigma} = \sum_{\alpha} f_{\alpha}^{\sigma}$ محاسبه می‌شود. سرعت \vec{u}' بصورت رابطه (۴-۴) تعریف می‌شود.

$$\vec{u}' = \frac{\sum_{\sigma=1}^s \frac{\rho_{\sigma} \vec{u}_{\sigma}}{\tau_{\sigma}}}{\sum_{\sigma=1}^s \frac{\rho_{\sigma}}{\tau_{\sigma}}} \quad (۴-۴)$$

\vec{F}_{σ} کل نیروهای وارد شده بر جز σ می‌باشد، که توسط رابطه (۵-۴) محاسبه می‌شود.

$$\vec{F}_{\sigma} = \vec{F}_{f,\sigma} + \vec{F}_{s,\sigma} + \vec{F}_{body,\sigma} \quad (۵-۴)$$

در رابطه (۵-۴)، $\vec{F}_{f,\sigma}$ نیروی مربوط به اندرکنش داخلی دو سیال، $\vec{F}_{s,\sigma}$ نیروی بین سیال و جامد و $\vec{F}_{body,\sigma}$ نیروهای حجمی مثل نیروی گرانش می‌باشد.

تعامل غیرمحلی بین سیالات با تعریف پتانسیل تعامل لحاظ می‌شود [۱۹]؛

$$v(x, x') = G_{\sigma\bar{\sigma}}(x, x') \psi_{\sigma}(x) \psi_{\bar{\sigma}}(x') \quad (۶-۴)$$

که $x' = x + \vec{e}_{\alpha}$ نشان‌دهنده همسایگی مکان x در جهت α می‌باشد؛ $G_{\sigma\bar{\sigma}}(x, x')$ تابع گرین است که $G_{\sigma\bar{\sigma}}(x, x') = G_{\sigma\bar{\sigma}}(x', x)$ می‌باشد. $\psi_{\sigma}(x)$ چگالی موثر جز σ است که بصورت تابعی از چگالی محلی ذرات تعریف می‌شود. فرم‌های مختلف چگالی موثر، منجر به معادلات حالت مختلف می‌گردد. با جمع زدن نیروها در تمام جهات و بین همه اجزا، نیروی بین سیالات به شکل رابطه (۷-۴) در می‌آید.

¹ Shifting velocity Method

$$F_f^\sigma(x) = -\psi_\sigma(x) \sum_{x'} \sum_{\bar{\sigma}=1}^s G_{\sigma\bar{\sigma}}(x, x') \psi_{\bar{\sigma}}(x') (x' - x) \quad (7-4)$$

که با در نظر گرفتن تنها، برهم کنش‌های همگن ایزوتروپیک بین نزدیک‌ترین همسایگی‌ها تابع $G_{\sigma\bar{\sigma}}(x, x')$ به صورت ماتریس متقارن زیر در خواهد آمد؛

$$G_{\sigma\bar{\sigma}}(x, x') = \begin{cases} 0, & |x' - x| > c' \\ G_{\sigma\bar{\sigma}} & |x' - x| \leq c' \end{cases} \quad (8-4)$$

c' طول یک واحد شبکه می‌باشد که این‌جا برابر یک در نظر گرفته شده است. مقادیر $G_{\sigma\bar{\sigma}}$ برای جهات مختلف در منابع مقادیر متفاوتی ذکر شده است. سوکاپ و تورن، مقدار $G_{\sigma\bar{\sigma}}$ را برای تمام جهات یکسان بکار برده اند ولی در عوض از ضرایب وزنی برای جهات مختلف استفاده کرده‌اند. رابطه (۹-۴)، رابطه ارائه شده توسط سوکاپ و تورن می‌باشد [۲۶].

$$\vec{F}_f^\sigma(x) = -G \psi_\sigma(\vec{x}, t) \sum_{\alpha=1}^8 w_\alpha \psi_{\bar{\sigma}}(\vec{x} + \vec{e}_\alpha \delta t, t) \vec{e}_\alpha \quad (9-4)$$

البته شکل‌های مختلفی برای نمایش این نیرو وجود دارد که همه مشابه‌اند، فقط ممکن است تعبیر و ضرایب عوض شوند. مقدار G قدرت برهم کنش بین اجزای سیال را کنترل می‌کند. با تغییر G کشش سطحی بین سیالات کنترل می‌شود.

نیروی بین سطح جامد و ذرات سیال مانند حالت قبل برای هر جز محاسبه می‌شود؛

$$\vec{F}_s(\vec{x}, t) = -G_{ads} \psi(\vec{x}, t) \sum_{\alpha=1}^8 w_\alpha S(\vec{x} + \vec{e}_\alpha \delta t, t) \vec{e}_\alpha \delta t \quad (10-4)$$

البته این شکل رایج نیرو است. اما در کار حاضر بدلیل مدلسازی سطوح با خصوصیات آبدوستی و

آبگریزی متفاوت که به G_{ads} های مختلف می‌انجامد، ما از رابطه (۱۱-۴) استفاده می‌کنیم:

$$\vec{F}_s(\vec{x}, t) = -\psi(\vec{x}, t) \sum_{\alpha=1}^8 w_{\alpha} G_{ads}(\vec{x} + \vec{e}_{\alpha} \delta t, t) S(\vec{x} + \vec{e}_{\alpha} \delta t, t) \vec{e}_{\alpha} \delta t \quad (11-4)$$

نیروی گرانش نیز در صورت لزوم، مانند قبل اعمال می‌شود [۴۳]؛

$$\vec{F}_g = \rho_{\sigma} \vec{g} \quad (12-4)$$

برای مدل D2Q9، ترم فشار مخلوط سیال از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۹]؛

$$p(x) = c_s^2 \sum_{\sigma} \psi_{\sigma}(x) + \frac{3}{2} \sum_{\sigma\bar{\sigma}} G \psi_{\sigma}(x) \psi_{\bar{\sigma}}(x) \quad (13-4)$$

و سرعت مخلوط سیال از رابطه (۱۴-۴) بدست می‌آید؛

$$\vec{u} = \sum_{\sigma} \rho_{\sigma} \vec{u}_{\sigma} / \rho + \sum_{\sigma} \vec{F}_{\sigma} / (2\rho) \quad (14-4)$$

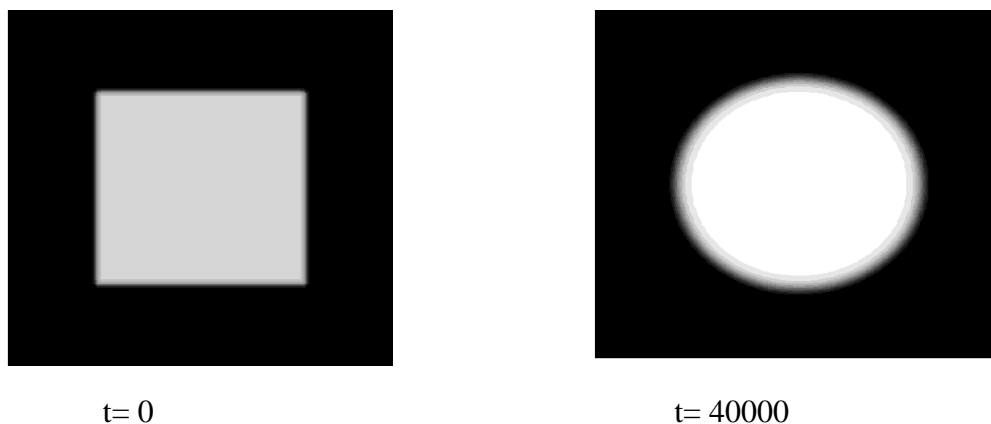
که ρ ، مجموع چگالی اجزا در هر لتیس می‌باشد. در مدلسازی‌های این فصل برای فاز مایع از معادله حالت شان-چن استفاده شده است و فاز گازی به حالت ایده آل در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب برهم‌کنش بین اجزای جز مایع $G_{11} = -3.62$ و ضریب برهم‌کنش بین دو فاز $G_{12} = 5$ می‌باشد. در همه شبیه‌سازی‌های این فصل زمان آرامش $\tau_1 = \tau_2 = 1$ و چگالی‌ها $\rho_1 = 1$ و $\rho_2 = 0.25$ در نظر گرفته شده است.

۴-۳- محاسبه کشش سطحی

۴-۳-۱- بررسی تاثیر نسبت ویسکوزیته روی کشش سطحی

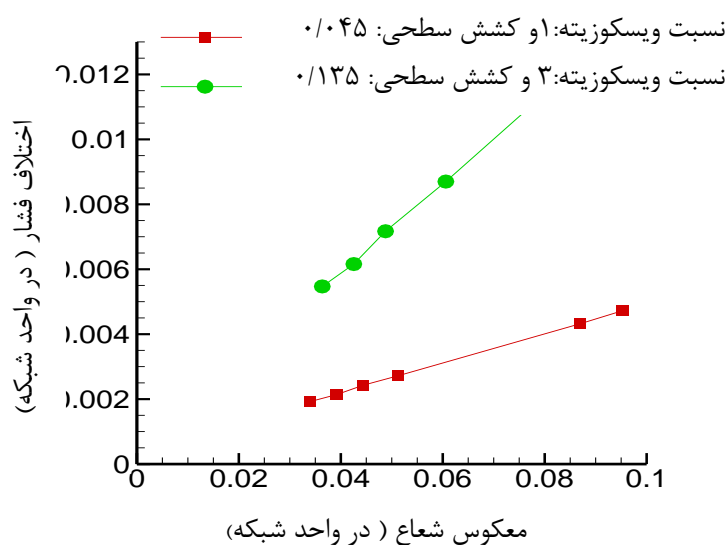
همانطور که قبلاً بیان شد، برای محاسبه کشش سطحی در روش شان وچن نیاز به انجام تست لاپلاس می‌باشد. البته این تست بخودی خود برای اعتبارسنجی کد نیز بکار می‌رود؛ در واقع انجام این تست که منجر به محاسبه کشش سطحی می‌شود بر درستی کد، نیز صحه می‌گذارد. شکل (۴-۱) تست لاپلاس

کنتور چگالی مربوط به قطره ساکن در محیط پریودیک با ابعاد 100×100 را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۴) تست لاپلاس

در شکل (۲-۴) رابطه بین اختلاف فشار و معکوس شعاع در دو نسبت ویسکوزیته مختلف نمایش داده شده است و مقادیر کشش سطحی که شیب منحنی‌ها می‌باشند نیز مشخص شده‌اند؛ در نسبت ویسکوزیته یک، مقدار کشش سطحی 0.045 و در نسبت ویسکوزیته سه، مقدار کشش سطحی 0.135 می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت ویسکوزیته کشش سطحی افزایش می‌یابد.



شکل (۲-۴) آزمایش لاپلاس جهت محاسبه کشش سطحی

۴-۴ - اندازه گیری زاویه تماس

هنگامی که یک قطره انحلال ناپذیر^۱ در تماس با یک جامد قرار می‌گیرد، آنگاه میان سیال ترکننده^۲ و سیال ترنشونده^۳ و سطح جامد خط تماسی ایجاد می‌شود (شکل (۳-۴)). ترشوندگی یک سطح نسبت به سیال و به اصلاح آبدوست یا آبگریز بودن سطح، بستگی به زاویه تماس θ دارد. برای زاویه کم‌تر از ۹۰ درجه، سیال تمایل به خیس کردن سطح را دارد، پس سطح ترشونده و آبدوست می‌باشد و برای زاویه بزرگ‌تر از ۹۰ درجه، سیال به شکل سیال فشرده درمی‌آید، بنابراین سطح ترنشونده و آبگریز است. برای محاسبه زاویه تماس، ابتدا قطره با قطر ۲۰ واحد را در داخل میدان محاسباتی به ابعاد 100×100 بصورت مماس بر دیواره پایینی قرار داده می‌شود. با در نظر گرفتن مقدار معینی برای G_{ads} ، که قدرت برهم‌کنش بین سطح جامد و سیال را کنترل می‌کند، و بعد از ۲۰۰۰۰ مرحله که میدان به حالت پایا درآمد، مقدار زاویه تماس محاسبه خواهد شد. بمنظور تعیین رابطه بین ضریب برهم‌کنش سیال_جامد و زاویه تماس، یک سری قطره تست شده‌اند. شرایط مرزی دیواره بالا و پایین شرط بازگشت به عقب کامل و شرط مرزی دیواره‌های جانبی شرط مرزی تناوبی می‌باشد. زاویه تماس به کمک پارامترهای هندسی شکل‌های حاصل و با استفاده از معادله (۴-۱۵) قابل محاسبه خواهد بود؛ که h ارتفاع قطره و b طول پخش شده قطره روی سطح می‌باشد.

$$\theta = \pi - \arctan \left[\frac{b}{2(r-h)} \right] \quad (۴-۱۵)$$

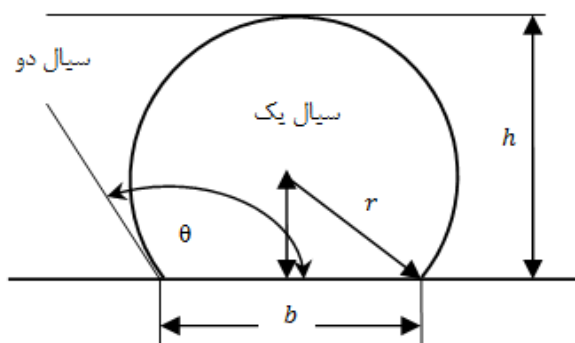
در این رابطه مقدار $r = h/2 + b^2/8h$ خواهد بود. باید توجه داشت در این مساله بدلیل وجود ضخامتی در حد چند واحد در فصل مشترک دو فاز، تعیین فصل مشترک اهمیت ویژه‌ای دارد. در مطالعه حاضر موقعیت فصل مشترک محلی قرار داده می‌شود که چگالی قطره بزرگتر از نصف چگالی اولیه باشد.

¹ Immiscible

² Wetting

³ Non Wetting

مقادیر ضرایب برهم کنش بین اجزا و سطح جامد بصورت $G_{ads,1} = -G_{ads,2}$ در نظر گرفته شده است.



شکل (۳-۴) طرحواره زاویه تماس بین مایع و سطح جامد

با تغییر مقادیر G_{ads} ، زوایای مختلف بدست خواهند آمد. شکل (۴-۴) نتایج تماس برخورد با سطح

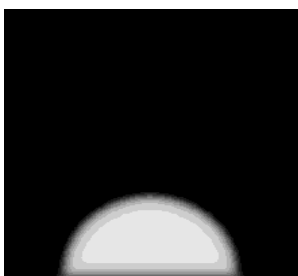
جامد را نشان می‌دهد.



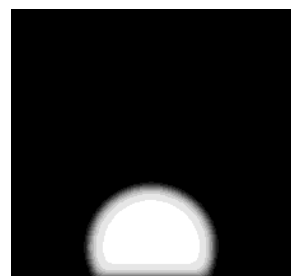
(الف)



(ب)



(پ)



(ج)

شکل (۴-۴) شکل نهایی قطره و زاویه‌های تماس حاصل بر حسب درجه الف) 30°

ب) 60° پ) 90° ج) 120°

۴-۵- نتایج مدلسازی

در مطالعه حاضر، با توجه به بررسی دقیق ادبیات موضوع و نیاز به بررسی دقیق رژیم نفوذ سیال در ماده متخلخل، ابتدا رژیم نفوذ در ماده متخلخل در اعداد کاپیلاری و نسبت ویسکوزیته مختلف بررسی می‌شود؛ همچنین تاثیر تخلخل و آبدوستی یا آبگریزی سطوح بر روی سرعت نفوذ و الگوی نفوذ در محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفته‌است و در انتها راهکارهایی برای افزایش سرعت نفوذ و پیمایش فیلم و قطره مایع در مسیرهای مشخص داخل محیط متخلخل لایه‌ای ارائه شده‌است.

مشخصه‌های جریان در ماده متخلخل اعداد بی بعد رینولدز، وبر، فرود و کاپیلاری هستند، که در مدلسازی‌ها دارای مقدار ثابت ۷۲، ۸۰، ۱/۷، ۱/۱ بترتیب می‌باشند و در زیر تعریف شده‌اند. (البته مقادیر جدید این پارامترهای بی‌بعد در صورت تغییر ذکر خواهند شد.) برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد اعداد بی‌بعد می‌توان به مرجع [۲۳] مراجعه کرد.

Re : عدد رینولدز، بیان‌گر نسبت نیروی‌های اینرسی به نیروهای ویسکوز می‌باشد و با فرمول $Re = u_0 d_0 / \nu_1$ نمایش داده می‌شود.

We : عدد وبر، نسبت نیروهای اینرسی به کشش سطحی را نشان می‌دهد و دارای فرمول $We = \rho_1 u_0 d_0 / \sigma$ می‌باشد.

Fr : عدد فرود، نسبت نیروهای اینرسی به نیروی جاذبه گرانشی را بیان می‌کند و با رابطه $Fr = u_0^2 / d_0 g$ نشان داده می‌شود.

Ca : عدد کاپیلاری، نسبت نیروهای ویسکوز به کشش سطحی می‌باشد، که در سطح میانی بین یک سیال و گاز یا دو سیال مخلوط نشدنی عمل می‌کند و با رابطه $Ca = \rho_1 u_0 v_1 / \sigma$ نمایش داده می‌شود.

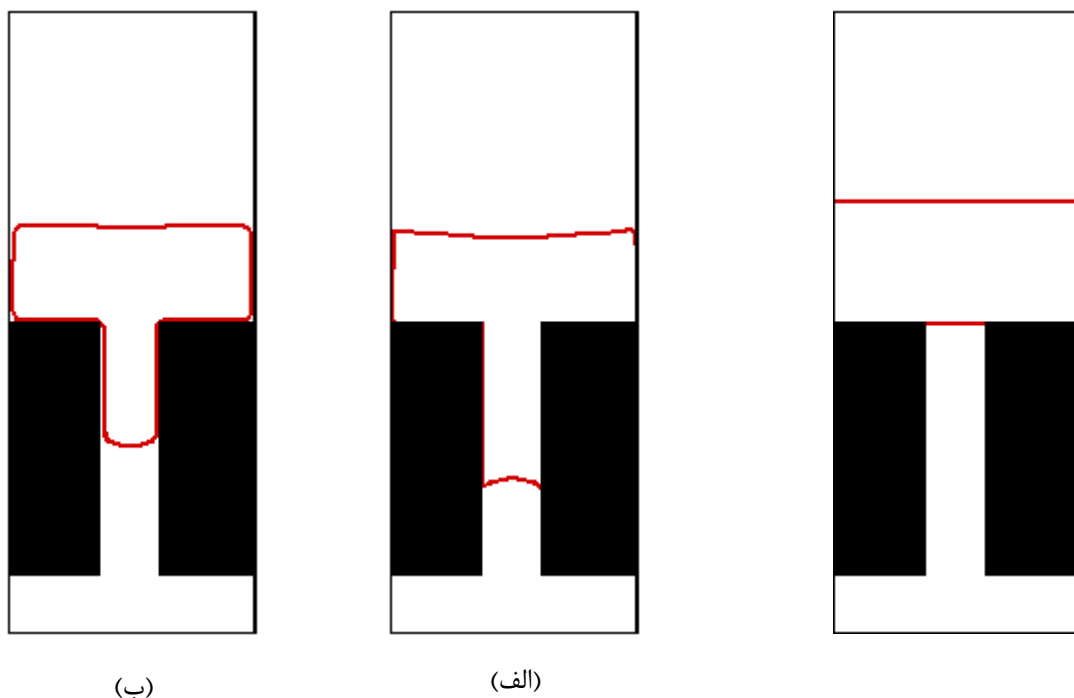
که در تعاریف فوق ρ_1, v_1, g بترتیب، شتاب گرانش، ویسکوزیته جز اول (قطره) و چگالی جز اول (یا همان قطره) می‌باشند.

۴-۵-۱- نفوذ سیال در حفرات ساده یک بستر متخلخل

نفوذ در داخل ماده متخلخل در واقع نفوذ سیال در داخل حفرات است و بنابراین شکل دقیق نفوذ در حفرات در مقیاس حفره اهمیت دارد و کمتر نیز به آن پرداخته شده است. به همین منظور ابتدا چند تست ساده و کاربردی انجام شده است؛ که ضمن آسان نمودن درک مفاهیم مربوط به نفوذ در ماده متخلخل، با توجه به شکل نفوذ بر درستی کد نیز صحت می‌گذارند. در این تست‌ها، نفوذ سیال به داخل لوله‌های مویین را مورد بررسی قرار می‌دهیم که شباهت بسیاری به نفوذ سیال داخل باریکه‌های ایجاد شده در محیط متخلخل دارد. در تست اول، که در شکل (۴-۵) نمایش داده شده است، لایه‌ای از سیال که در ابتدا ساکن است، تحت اثر گرانش با سرعت اولیه $u_0 = 0.1 \text{ } \mu\text{.ts}^{-1}$ در یک لوله مویین نفوذ می‌کند. در این مطالعه، از رابطه ارائه شده توسط ریس و همکاران برای محاسبه فشار موئینگی (رابطه (۴-۱۶)) که وابستگی فشار موئینگی به زاویه تماس سطح و سیال و ابعاد باریکه‌ها^۱ را نشان می‌دهد، استفاده می‌نماییم.

$$p_c = -2 \frac{\sigma \cos(\theta)}{d_{pores}} \quad (۴-۱۶)$$

^۱Capillaries

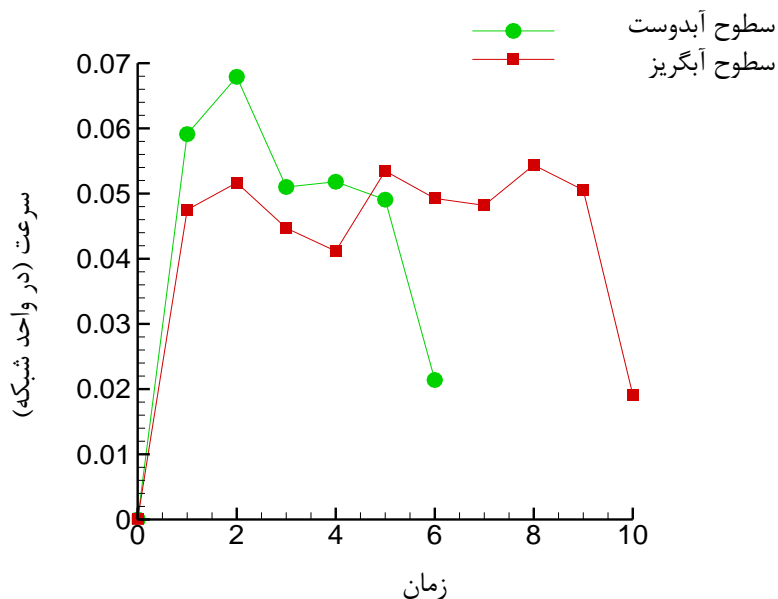


شکل (۴-۵) نفوذ سیال داخل لوله موئین الف) زاویه تماس ۳۰ درجه ب) زاویه تماس ۱۰۲ درجه (ابعاد ناحیه محاسباتی ۸۰×۲۰۰می باشد. هر دو در یک گام زمانی می باشند).

هنگامی که زاویه تماس کوچکتر از ۹۰ درجه می باشد، مقدار فشار موئینگی منفی خواهد شد که به تزریق سیال در داخل لوله کمک می کند؛ در واقع، این امر موجب اختلاف فشاری بین دو فاز داخل لوله می شود که مقدار این اختلاف فشار در این حالت مقداری مثبت می باشد؛ یعنی فشار سیال اولیه داخل لوله بیشتر از سیال نفوذ کننده است و تعقر سطح مشترک دو فاز به سمت پایین خواهد بود. به همین دلیل در این حالت به سطح، آبدوست یا ترشونده می گویند (شکل (۴-۵) الف)). از طرف دیگر اگر زاویه تماس بیش از ۹۰ درجه باشد، فشار موئینگی مثبت خواهد بود که این امر در برابر نفوذ سیال داخل لوله مقاومت خواهد کرد و نفوذ کندتر اتفاق می افتد؛ اختلاف فشار بین دو فاز در این حالت مقداری منفی می باشد، یعنی فشار سیال نفوذ کننده بیشتر از سیال اولیه داخل لوله است و شکل سطح مشترک دو فاز محدب خواهد بود. در این حالت به سطح آبگریز یا ترنشونده می گویند (شکل (۴-۵) ب)). در داخل محیط متخلخل نیز شاهد چنین رفتاری در انحناهای سطح سیال نفوذ کننده هستیم که در قسمت های بعد مورد

بررسی قرار می گیرد. این شکل میزان پیشروی سیال داخل لوله موئین در هر دو زاویه تماس را، نیز نشان می دهد؛ در یک گام زمانی یکسان میزان پیشروی سیال در زاویه ۳۰ درجه یا حالت آبدوست بیشتر است.

نمودار مربوط به سرعت نفوذ داخل لوله موئین با در نظر گرفتن سرعت نقطه مرکزی در فصل مشترک بین دوفاز در شکل (۴-۶) نیز نمایش داده شده است. این نمودار در واقع سرعت سیال در مدت پیشروی در لوله را نشان می دهد. همانطور که در شکل دیده می شود، سرعت سیال در ابتدای نفوذ برای هر دو حالت افزایش می یابد و با نزدیک شدن به انتهای لوله از سرعت کاسته می شود و سرعت سیال در مدت نفوذ، در زاویه ۳۰ درجه غالباً بیشتر از سرعت نفوذ در زاویه ۱۰۲ درجه می باشد و سریعتر به انتهای میله می رسد.



شکل (۴-۶) نمودار سرعت نفوذ داخل لوله موئین برای سطوح آبدوست و آبگریز.

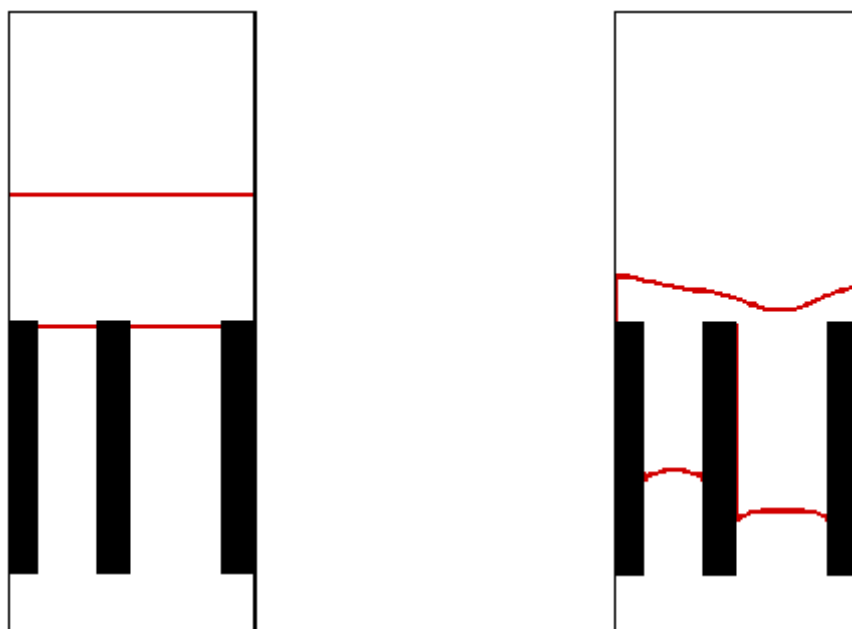
در تست دوم، نفوذ لایه سیال را در دو لوله موئین با قطرهای متفاوت بررسی می کنیم. ابعاد ناحیه محاسباتی ۸۰ × ۲۰۰، قطر لوله سمت ۲۰ و قطر لوله سمت راست ۳۰ واحد شبکه و زاویه تماس ۳۰ درجه در نظر گرفته شده اند؛ کشش سطحی نیز از تست لاپلاس ۰/۰۴۵ بدست آمده است. بدین ترتیب طبق

رابطه (۴-۱۶) اندازه فشار موئینگی لوله سمت راست، کمتر از لوله سمت چپ می‌باشد؛ سیال در لوله سمت راست سریعتر نفوذ می‌کند (شکل (۴-۷)).

$$-p_{c,l} = 2 \frac{0.045 \cdot \cos(30)}{20} > -p_{c,r} = 2 \frac{0.045 \cdot \cos(30)}{30} \quad (۴-۱۷)$$

در دو تست فوق، شرایط مرزی بالا و پایین شرط مرزی تناوبی و دیوارهای جانبی، جامد در نظر گرفته

شده‌اند.



شکل (۴-۷) نفوذ سیال داخل دو لوله موئین با قطرهای متفاوت.

۴-۵-۲- بررسی رژیم نفوذ

لنورمند و همکاران^۱ [۵۴] آزمایش‌های زهکشی^۲ زیادی را برای چند جفت مایع انجام دادند، و آن‌ها برای اولین بار سه رژیم مختلف جابه‌جایی به نام‌های جابه‌جایی پایدار^۳، ویسکوز فینگرینگ^۱ و کاپیلاری

^۱ Lenormand.

^۲ drainage experiment

^۳ stable displacement

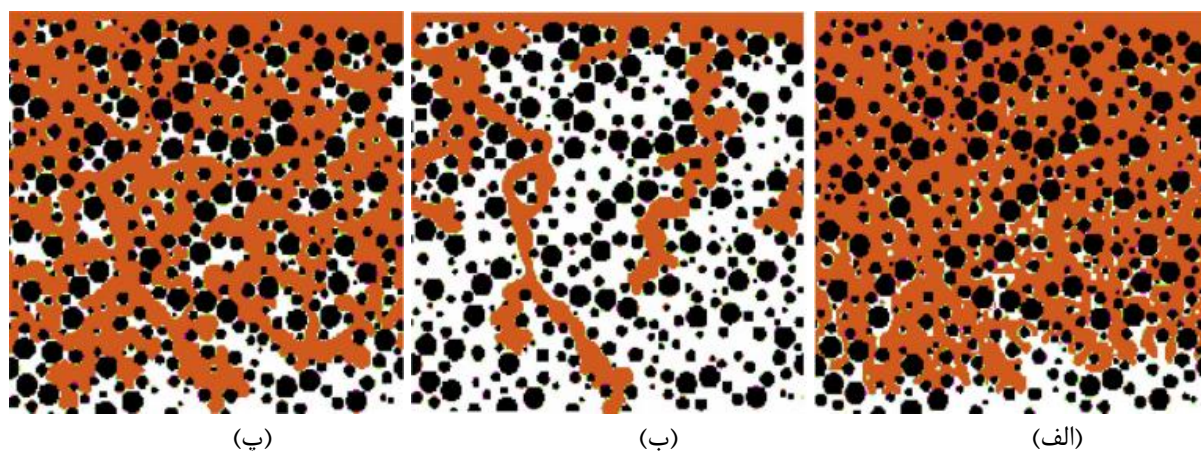
فینگرینگ^۲ را شناسایی کردند که روی نمودار فازی $\log Ca - \log M$ قابل رسم است و M نسبت ویسکوزیته ویسکوزیته می‌باشد. شکل سه ناحیه با جزییات توسط لنورمند و همکارانش مورد بحث و بررسی قرار گرفته شده است و موقعیت مرزهای هر ناحیه بر مبنای تعادل بین نیروهای ویسکوز و کاپیلاری بدست آمده است. در سال‌های اخیر، محققان دیگری کار لنورمند را ادامه دادند و تقسیم‌بندی متفاوتی برای نواحی مختلف در نمودار فازی ارائه دادند [۵۵]. برای آشنایی بیشتر با رژیم‌های جابه‌جایی، در زیر به اختصار توضیح داده شده‌اند.

رژیم جابه‌جایی پایدار: در این رژیم مرز بین دو فاز یا سیال تقریباً صاف است البته اغتشاشات یا فینگرهای کوچک گاهی قابل مشاهده می‌باشند. در این رژیم مقدار کمی حباب بین سیال دور کننده و جامد گیر می‌افتد. سیال از تمام جهات تقریباً یکسان پیشروی می‌کند و تمام حفره‌ها را غیر از نواحی که حباب گیر کرده است را پر می‌کند. این رژیم بیشتر در نسبت ویسکوزیته‌های بالاتر از ده (۱۰) و کاپیلاری‌های بیشتر از یک دهم (۰/۱) رخ می‌دهد. از آنجا که این نامگذاری‌ها برای حالتی بوده که با تزریق یک سیال جدید، سیالی را که در محیط قرار داشته جابه‌جا یا از محیط خارج می‌کردند، به این رژیم جابه‌جایی پایدار می‌گویند (شکل ۴-۸-الف).

رژیم ویسکوز فینگرینگ: در این رژیم سیال جابه‌جا کننده، به شکل انگشت‌مانند پیشروی می‌کند و فقط از نواحی خاصی بسته به فضای خالی بین موانع جامد عبور می‌کند؛ در نتیجه هیچگونه حلقه‌ای که حباب داخل آن گیر بیافتد تشکیل نمی‌شود. این رژیم جریان در نسبت ویسکوزیته‌های پایین‌تر از ده و رنج وسیعی از عدد کاپیلاری رخ می‌دهد (شکل ۴-۸-ب).

¹ viscous fingering
² capillary fingering

رژیم کاپیلاری فینگرینگ: این رژیم حالتی ما بین دو رژیم ویسکوز فینگرینگ و جابه‌جایی پایدار است. در این رژیم سیال مانند جابه‌جایی پایدار از همه جهات پیشروی می‌کند اما شکل پیشروی آن انگشت مانند است؛ فینگرها بسیار کلفت‌تر از حالت ویسکوز فینگرینگ هستند و تمام فضای خالی بین حفره‌ها را پر می‌کنند. در این رژیم نسبت به رژیم جابه‌جایی پایدار، حباب‌های بیشتری در بین سیال پیش روی-کننده و جامد گیر می‌افتد، که این مورد در حالتی که جریان داخل محیط متخلخل تزریق می‌شود قابل مشاهده است (شکل (۴-۸-پ)).



شکل (۴-۸) رژیم‌های مختلف جریان الف) جابه‌جایی پایدار ($\log(Ca)=2.08, \log(M)=2.7$) ب) ویسکوز فینگرینگ ($\log(Ca)=-2.92, \log(M)=-1$) پ) کاپیلاری فینگرینگ ($\log(Ca)=-1.92, \log(M)=2.7$) [۵۶].

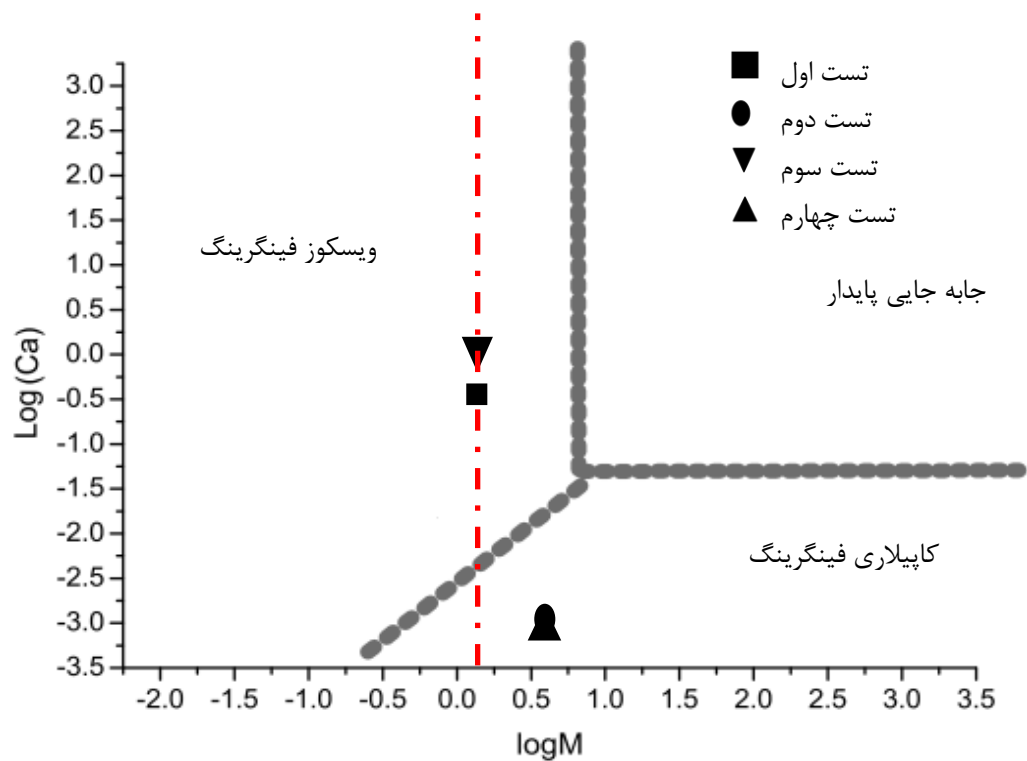
ما در این مطالعه، از نمودار فازی ارائه شده توسط لنورمند استفاده خواهیم کرد (شکل (۴-۹)). البته در کار ایشان و مطالعات مشابه جریانی از یک سیال در داخل ماده متخلخل به کمک اختلاف فشار بین ورودی و خروجی و با یک سرعت اولیه تزریق می‌شود و سیال دوم را که در ابتدا در کل ناحیه متخلخل قرار دارد را از ماده متخلخل به بیرون می‌رانند؛ و با مطالعه حاضر تفاوت دارد، اما همچنان می‌توان از نتایج موجود و نمودار ارائه شده استفاده نمود. در مطالعات گذشته، رژیم نفوذ قطره و فیلم مایع بررسی نشده-است. در این مطالعه به مقایسه رژیم‌های نفوذ ویسکوز فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ و شکل هندسی

آن‌ها پرداخته شده است. برای این کار چهار تست انجام گرفته است. در همه مدلسازی‌ها مقادیر چگالی‌ها $\rho_1 = 1$ و $\rho_2 = 0.25$ می‌باشد، اطلاعات لازم مربوط به چهار تست در جدول (۱-۴) آورده شده است.

جدول (۱-۴) اطلاعات مربوط به دو تست با عدد کاپیلاری و نسبت ویسکوزیته متفاوت.

logCa	log M	Ca	M	u_0 (در واحد شبکه)	τ_2	τ_1	
-۰/۴۳	۰	۰/۳۷	۱	۰/۱	۱	۱	تست اول
-۲/۹۵	۰/۴۸	۰/۰۰۱	۳	۰/۰۰۰۳	۱	۲	تست دوم
۰/۰۴۶	۰	۱/۱۱	۱	۰/۳	۱	۱	تست سوم
-۳/۱۳	۰/۴۸	۰/۰۰۰۷	۳	۰/۰۰۰۲	۱	۲	تست چهارم

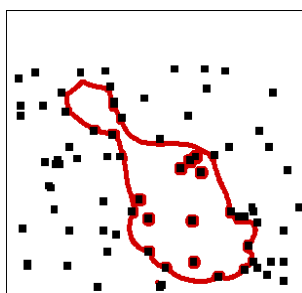
از تفاوت دیگر این مطالعه با مطالعات قبلی، وجود نیروی گرانش می‌باشد؛ در واقع قطره تحت تاثیر نیروی گرانش و سرعت اولیه در ماده متخلخل نفوذ می‌کند. از آنجا که در دیاگرام فازی فقط اثر عدد کاپیلاری و نسبت ویسکوزیته لحاظ شده است، در هر دو تست اثر نیروی گرانش را یکسان در نظر گرفتیم. در این مطالعه، برای در نظر گرفتن اثر گرانش، از عدد بی بعد بوند که بصورت $B_0 = \frac{g\Delta\rho a^2}{\sigma}$ که a شعاع متوسط حفره‌ها می‌باشد، استفاده شده است و در هر دو تست این عدد یکسان در نظر گرفته شده است. نکته قابل ذکر دیگر، انجام مدلسازی‌ها در زاویه تماس 90° است؛ بعبارتی دیگر سطح از نظر آبدوستی و آبگریزی خنثی می‌باشد.



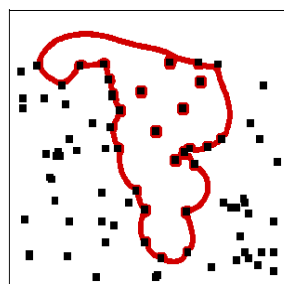
شکل (۹-۴) نمودار فازی با عدد کاپیلاری و نسبت ویسکوزیته مختلف (خطهای ضخیم خاکستری سه ناحیه را از هم جدا می کند و خط چین قرمز نسبت ویسکوزیته یک را نشان می دهد). [۵۴].

همانطور که در نمودار فازی دیده می شود، تست های اول و سوم در ناحیه ویسکوز فینگرینگ و تست-

های دوم و چهارم در ناحیه کاپیلاری فینگرینگ قرار می گیرند.

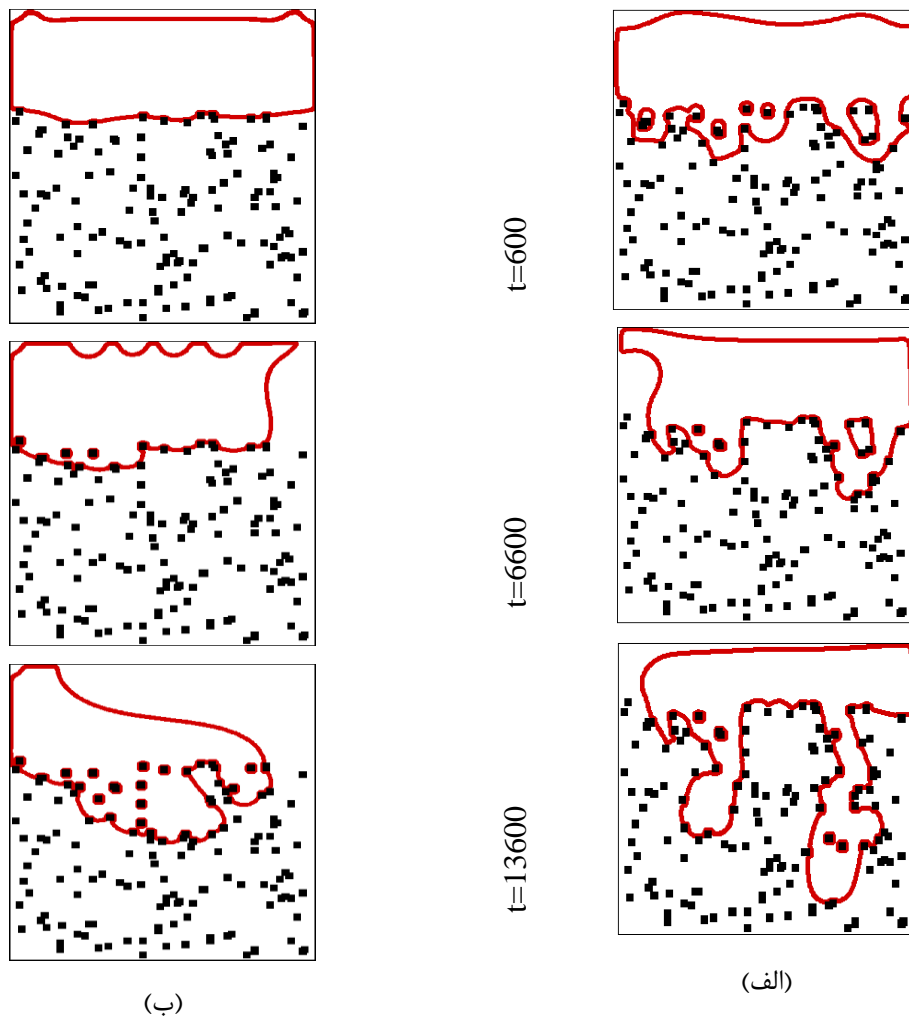


(ب)



(الف)

شکل (۱۰-۴) کانتور الگوی نفوذ قطره داخل محیط متخلخل در نسبت تخلخل $\varepsilon = 0.96$ (الف) تست اول (ب) تست دوم (ابعاد ناحیه محاسباتی و ناحیه متخلخل بترتیب 160×230 و 160×118 و قطر اولیه قطره ۸۰ واحد شبکه می باشد، عدد بی بعد $B_0 = 0.03$ می باشد).



شکل (۴-۱۱) کانتور الگوی نفوذ قطره داخل محیط متخلخل در نسبت تخلخل $\varepsilon = 0.93$ (الف) تست سوم (ب) تست چهارم) ابعاد ناحیه محاسباتی و ناحیه متخلخل بترتیب 160×118 و 160×175 و ارتفاع اولیه سیال ۵۰ واحد شبکه می- باشد، عدد بی بعد $B_0 = 0.0675$ می باشد.

همانطور که مشاهده می شود، در تست های اول و سوم (شکل (۴-۱۰-الف) و شکل (۴-۱۱-الف) نفوذ به صورت انگشت- مانند پیشروی می کند و فقط از مسیرهای خاصی عبور می نماید و سیال نفوذکننده تعداد شبکه های کمتری را در بر می گیرد، میانگین ضخامت فینگرها در این حالت حدود ۱۲ واحد شبکه می باشد؛ می توان گفت از رژیم ویسکوز فینگرینگ تبعیت می کنند. نتایج عددی این مقاله نشان می دهد که این رژیم جریان در نسبت ویسکوزیته های پایین تر از ده و رنج وسیعی از عدد کاپیلاری رخ می دهد. در

تست‌های دوم و چهارم نفوذ بصورت یک جبهه منسجم پیشروی می‌کند و تعداد شبکه‌های بیشتری را در برمی‌گیرد؛ در واقع سیال تمام موجود در مسیری که از آن عبور می‌کند را پر می‌نماید (شکل (۴-۱۰) و شکل (۴-۱۱) - ب) میانگین ضخامت فینگرها در این حالت حدود ۴۴ می‌باشد. در این حالت رژیم نفوذ کاپیلاری فینگرینگ می‌باشد. با آزمایشات عددی مختلف به این نتیجه رسیدیم که فینگرهای ایجاد شده در این حالت بسیار ضخیم‌تر از حالت ویسکوز می‌باشند.

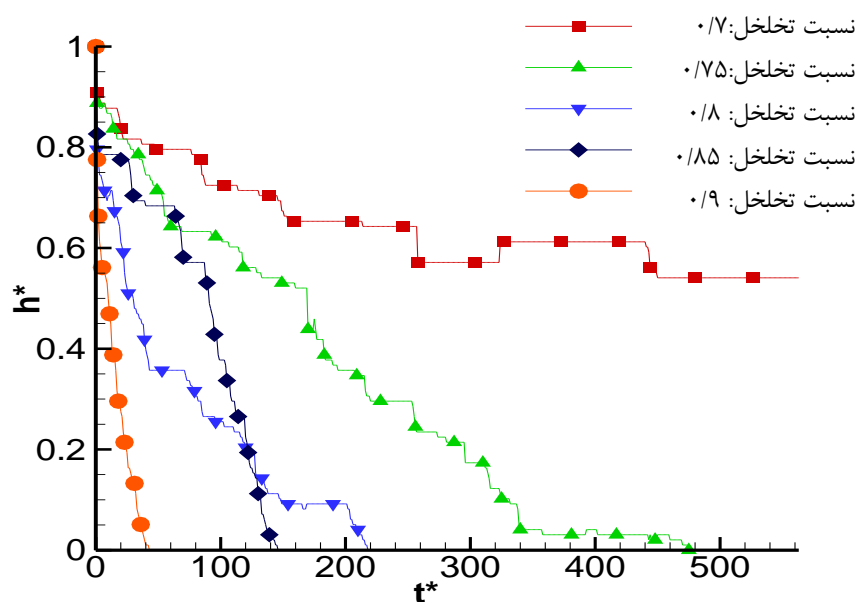
همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، در مدلسازی‌های بعدی زمان آرامش $\tau_1 = \tau_2 = 1$ و چگالی‌ها $\rho_1 = 1$ و $\rho_2 = 0.25$ در نظر گرفته شده است و با توجه به شکل (۴-۹) که خط چین نازک، که نشان دهنده نسبت ویسکوزیته یک می‌باشد و عدد کاپیلاری که دارای مقدار $1/1$ می‌باشد، تمام مدلسازی‌ها در رژیم ویسکوز فینگرینگ قرار می‌گیرند؛ البته در قسمت‌های بعدی به بررسی تاثیر ویژگی ترشوندگی سطح (آبدوستی/آبگریزی) بر روی الگوی نفوذ و تغییر آن خواهیم پرداخت.

مشخصه‌های جریان در ماده متخلخل که اعداد بی‌بعد رینولدز، وبر، فرود و کاپیلاری هستند، در مدلسازی‌های بعدی بترتیب دارای مقادیر ثابت ۷۲، ۸۰، $1/7$ ، $1/1$ می‌باشند، که در صورت تغییر، مقادیر جدید ذکر خواهند شد.

۴-۵-۳ - بررسی تاثیر تخلخل

برای بررسی تاثیر نسبت تخلخل بر روی سرعت نفوذ قطره داخل محیط متخلخل پنج تخلخل 0.9 ، 0.85 ، 0.8 ، 0.75 و 0.7 مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده‌اند. ابعاد ناحیه محاسباتی 80×200 و قطر اولیه قطره ۴۰ واحد شبکه می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رود و در شکل نشان داده شده‌است، با کاهش تخلخل قطره روی سطح پخش می‌شود و نرخ نفوذ کاهش می‌یابد با کاهش بیشتر تخلخل نفوذ کامل انجام نمی‌گیرد، البته با گذشت زمان طولانی‌تر بدلیل اثرات کاپیلاری و

گران‌ش سرانجام نفوذ کامل می‌شود؛ افزایش زمان انجام نفوذ با کاهش تخلخل نیز، بیانگر این مطلب است. زمان آرامش $\tau_1 = \tau_2 = 1$ و چگالی‌ها $\rho_1 = 1$ و $\rho_2 = 0.25$ در نظر گرفته شده است. سرعت متوسط مربوط به نفوذ در هر نسبت تخلخل بصورت کمی در جدول (۲-۴) گزارش شده است (در واحد شبکه). همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت تخلخل سرعت متوسط نفوذ به میزان چشمگیری کاهش یافته است. مثلاً سرعت متوسط نفوذ در تخلخل ۰/۹، بترتیب ۳/۴، ۵، ۱۱ و ۲۵ برابر سرعت متوسط نفوذ در تخلخل-های ۰/۸۵، ۰/۸، ۰/۷۵ و ۰/۷ می‌باشد.



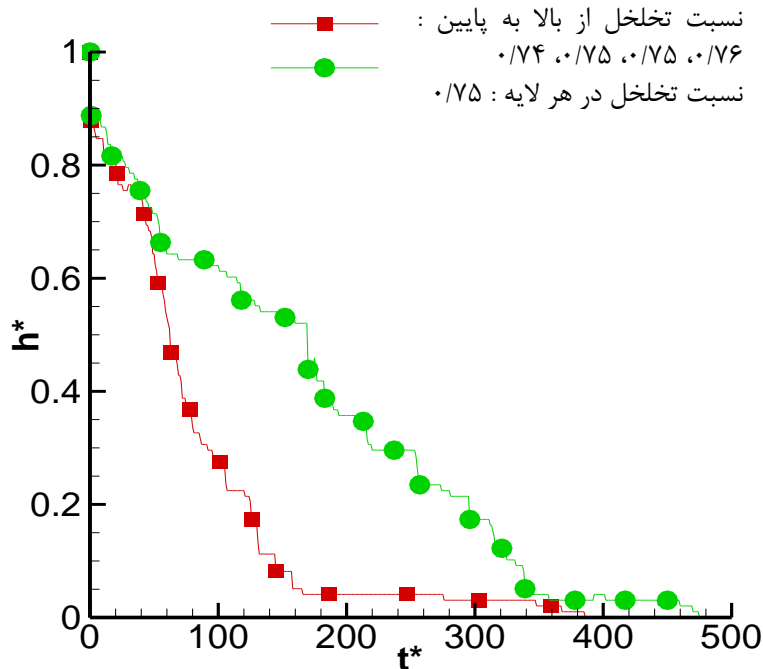
شکل (۲-۴) نرخ نفوذ h^* بر حسب t^*

جدول (۲-۴) مقادیر سرعت متوسط نفوذ در هر نسبت تخلخل

نسبت تخلخل	۰/۷	۰/۷۵	۰/۸	۰/۸۵	۰/۹
سرعت متوسط	۰/۰۹۱۱	۰/۲۰۶۳	۰/۴۴۹۵	۰/۶۷۱۲	۲/۲۷۹

کاهش زمان نفوذ در تخلخل‌های پایین ۴-۵-۳-۱-

همانطور که در بالا اشاره شد و در شکل (۴-۱۲) مشاهده می‌شود، در نسبت تخلخل‌های پایین یا نفوذ بصورت کامل صورت نمی‌گیرد یا زمان نفوذ خیلی طولانی است و نرخ نفوذ در زمان‌های مختلف بسیار کم است. در مطالعه حاضر، بدلیل تولید محیط متخلخل لایه‌ای امکان کاهش زمان نفوذ و افزایش نرخ نفوذ وجود دارد. در این مقاله بعنوان نمونه برای نسبت تخلخل ۰/۷۵، بجای استفاده از چهار لایه با نسبت تخلخل یکسان ۰/۷۵ (با زمان نفوذ طولانی)، از چهار لایه با همان میانگین نسبت تخلخل ۰/۷۵ ولی با مقادیر متفاوت ۰/۷۶، ۰/۷۵، ۰/۷۴ و ۰/۷۴ استفاده شده‌است. در شکل (۴-۱۳) نرخ نفوذ برای دوچیدمان مختلف آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نرخ نفوذ در زمان‌های مختلف به طور چشمگیری افزایش یافته‌است؛ بطوریکه سرعت متوسط نفوذ حدود ۲/۵ برابر افزایش یافته‌است (در حالیکه فقط تغییر اندکی در تخلخل لایه فوقانی داده شده است) و در حالت کلی، زمان نفوذ نیز به میزان ۹۰ گام زمانی (بی بعد) کاهش یافته‌است. علت این مورد تغییر سرعت سیال نفوذ کننده در لایه اول به دلیل تغییر سایز حفرات و اثر چشمگیر آن روی نفوذ در لایه‌های دیگر است.

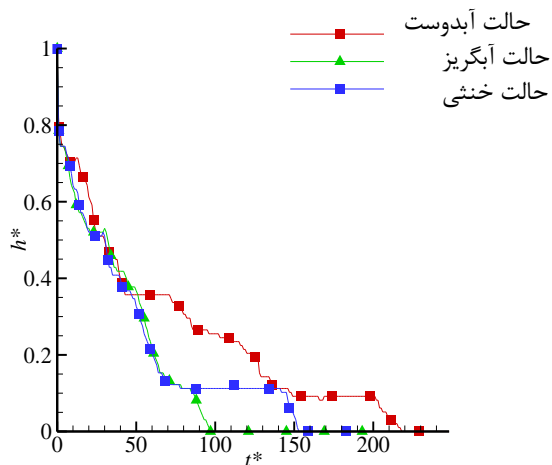


شکل (۴-۱۳) مقایسه نرخ نفوذ برای تخلخل ۰/۷۵ با چیدمان لایه‌های مختلف.

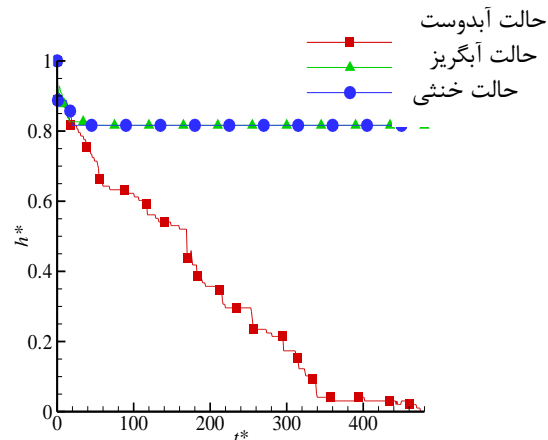
۴-۵-۴ - بررسی تاثیر ویژگی آبدوستی^۱ یا آبگریزی^۲ سطح

برای بررسی اثر خصوصیت آبدوست یا آبگریز بودن سطوح جامد روی نرخ و الگوی نفوذ در ماده متخلخل یک بار همه شبکه‌های جامد، آبدوست و یکبار آبگریز، برای دو شکل قطره و فیلم سیال نفوذکننده در محیط متخلخل، فرض می‌شوند. در شکل (۴-۱۴) نرخ نفوذ در سه تخلخل مختلف برای قطره نفوذکننده داخل محیط متخلخل آورده شده است. ابعاد ناحیه محاسباتی ۲۰۰×۸۰ و قطر اولیه قطره ۸۰ واحد شبکه می‌باشد. برخلاف نتایج حاصل در تست لوله موئین، سرعت نفوذ در حالت آبدوست بدلیل افزایش نیروی مقاوم سطح و نیروی چسبندگی بین سیال و سطح کمتر از حالت آبگریز می‌باشد (چنین موردی در لایه دیفیوژن پیل‌های سوختی نیز گزارش شده است).

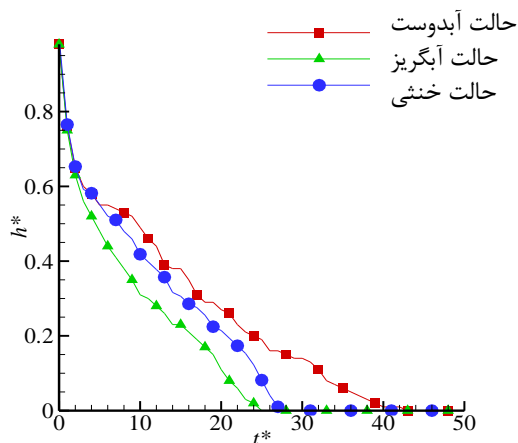
^۱ hydrophilic
^۲ hydrophobic



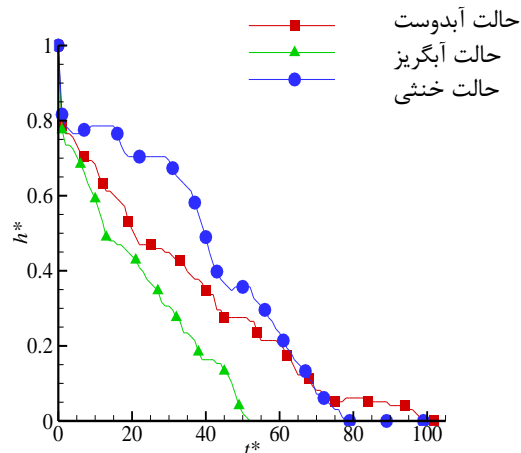
(ب)



(الف)



(ج)



(پ)

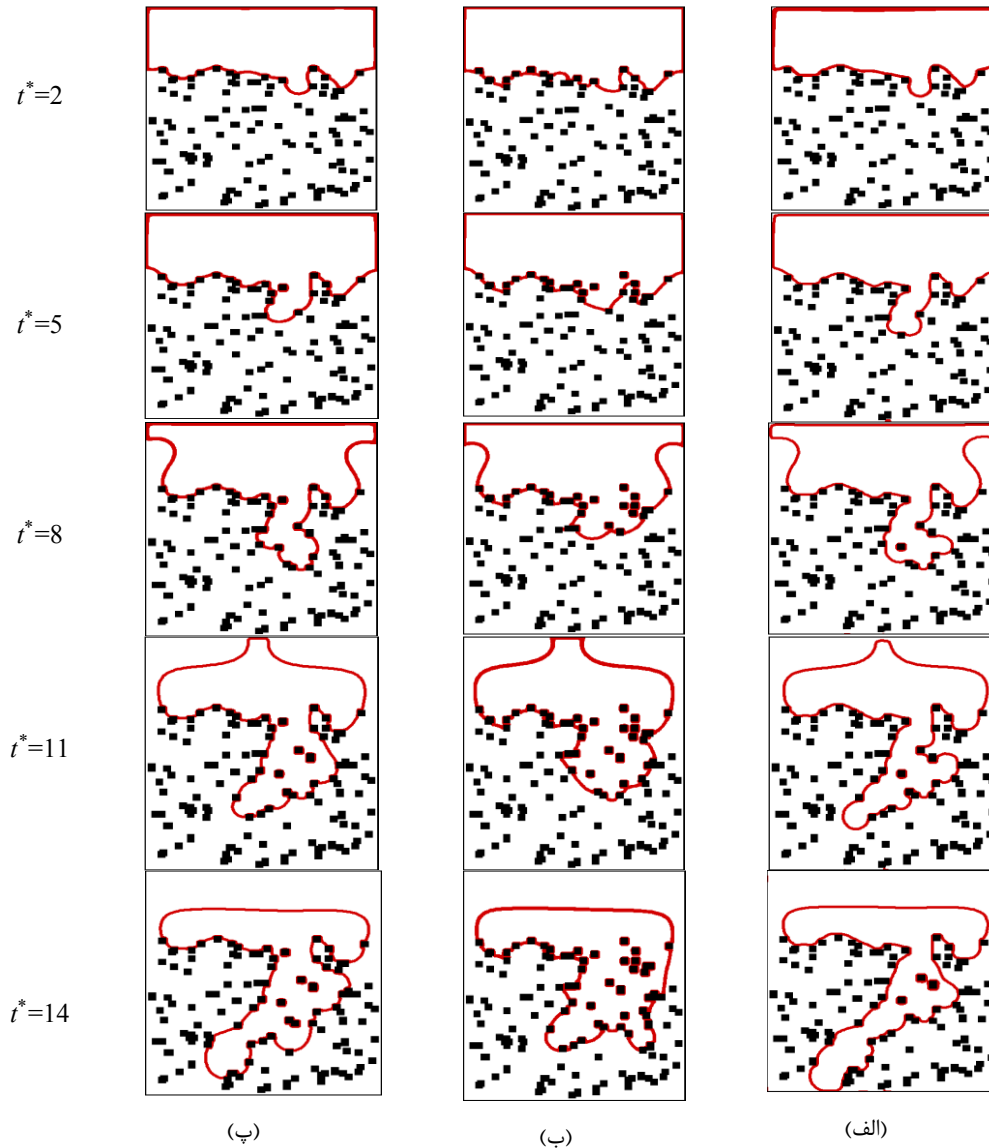
شکل (۴-۱۴) نرخ نفوذ h^* برحسب t^* (الف) $\varepsilon = 0.75$ (ب) $\varepsilon = 0.8$ (پ) $\varepsilon = 0.85$ (ج) $\varepsilon = 0.9$

همانطور که مشاهده می‌شود در تخلخل‌های بیشتر و با در نظر گرفتن کلیه شبکه‌های جامد بصورت آگریز، نرخ نفوذ بیشتر است و نفوذ سریعتر انجام می‌گیرد در حالی که با در نظر گرفتن تمام شبکه‌های جامد به صورت آبدوست بدلیل تمایل سیال به خیس کردن سطح، زمان بیشتری برای جدایش سیال از سطح صرف می‌شود و نرخ نفوذ کاهش می‌یابد (شکل (۴-۱۴) - ب و پ وج). البته با کاهش تخلخل، نتایج به کلی تغییر می‌کنند؛ در حالت آگریز اصلاً نفوذ بصورت کامل انجام نمی‌گیرد و قطره روی سطح

متخلخل پخش می‌شود. اما در حالت آبدوست، نیروی چسبندگی بین سیال و جامد به انجام نفوذ کمک می‌کنند و نفوذ با گذشت زمان (البته طولانی در مقایسه با سایر شکل‌ها) کامل می‌شود که قابل توجه است (شکل (۴-۱۴) - الف) و در همه تخلخل‌ها زمان انجام نفوذ در حالت خنثی بین حالت آبدوست و آبریز می‌باشد.

برای بررسی الگوی نفوذ ابتدا فیلمی از سیال، با سرعت اولیه و تحت گرانش مماس بر سطح متخلخل قرار داده شده‌است و الگوی نفوذ برای سه حالت خنثی، آبدوست و آبریز در تخلخل ۰/۹۰ نمایش داده شده‌است؛ همانطور که قبلاً گفته شد رژیم جریان ویسکوز فینگرینگ می‌باشد (در شکل (۴-۹) خط چین مربوط به نسبت ویسکوزیته یک درکاپیلاری ۱/۱ در ناحیه ویسکوینگ قرار دارد). اما می‌توان با در نظر گرفتن تمام شبکه‌های جامد بصورت آبدوست این الگو 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 باصطلاح مانند یک پیستون (منسجم) پیشروی می‌کند، فینگرها دارای ضخامت میانگین حدود ۳۹ واحد شبکه می‌باشد (شکل (۴-۱۵) - ب) که نشان دهنده شباهت رژیم نفوذ به رژیم کاپیلاری فینگرینگ می‌باشد. به همین دلیل می‌توان ادعا کرد رژیم نفوذ، به الگوی پیستون - مانند نزدیک شده است. اما در حالتی که تمام شبکه‌های جامد آبریز باشند، سیال به گونه‌ای پیشروی می‌کند که از شبکه‌های کمتری بگذرد و فقط در تلاش است مانند یک انگشت (فینگر مانند) با کمترین برخوردی از بین موانع جامد عبور کند؛ بنابراین زمان نفوذ بسیار کمتر از حالت آبدوست می‌باشد (شکل (۴-۱۵) - پ) و ضخامت فینگرها در حد ۱۷ واحد شبکه می‌باشد. اما در مقایسه با حالت خنثی بدلیل وجود سطوح آبریز و احتمالاً افزایش نیروی مقاوم در برابر حرکت در برخی نقاط (به علت توزیع رندم حفرات و سطوح و توزیع نیروی سطحی پیچیده) و همچنین چند شاخگی بیشتر جبهه سیال در شکل (پ) (نفوذ به جهات مختلف)، زمان نفوذ مقداری بیشتر می‌شود و تعداد شبکه‌های بیشتری درگیر می‌شوند. زمان بی‌بعد نفوذ کامل برای سه سطح

آبدوست، آبگریز و خنثی در برای تخلخل ۰/۹ در جدول (۳-۴) آورده شده است.

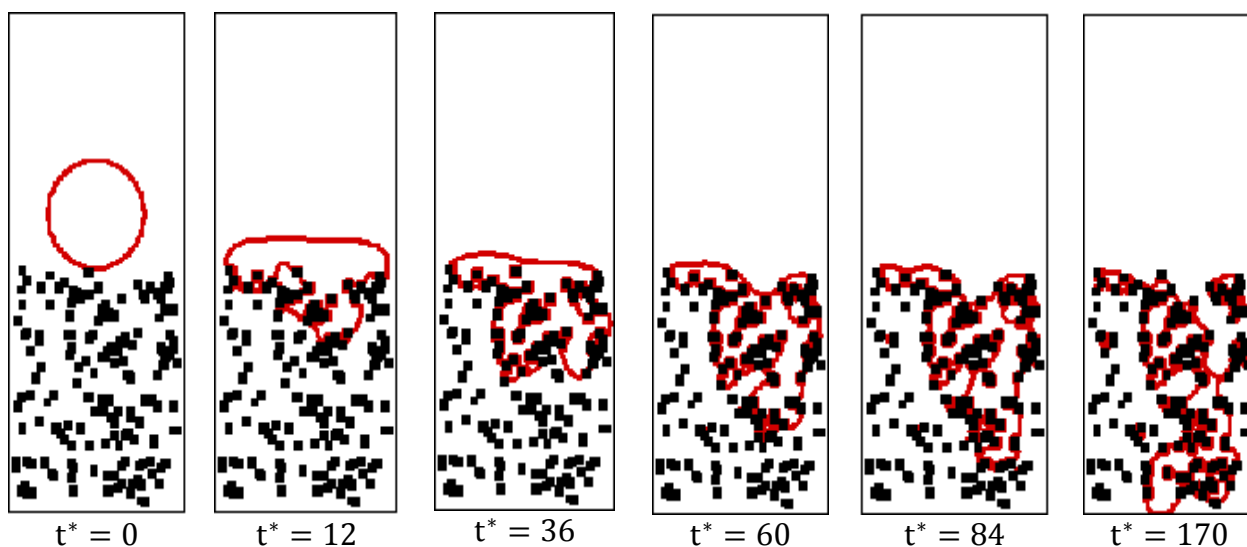


شکل (۴-۱۵) الگوی نفوذ برای تخلخل ۰/۹ (الف) سطوح خنثی ($\theta = 90^\circ$) (ب) سطوح آبدوست ($\theta = 60^\circ$) (پ) سطوح آبگریز ($\theta = 120^\circ$) (ارتفاع اولیه ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 140×120 می باشد).

جدول (۳-۴) مقایسه سه سطح از نظر زمان نفوذ برای تخلخل ۰/۹

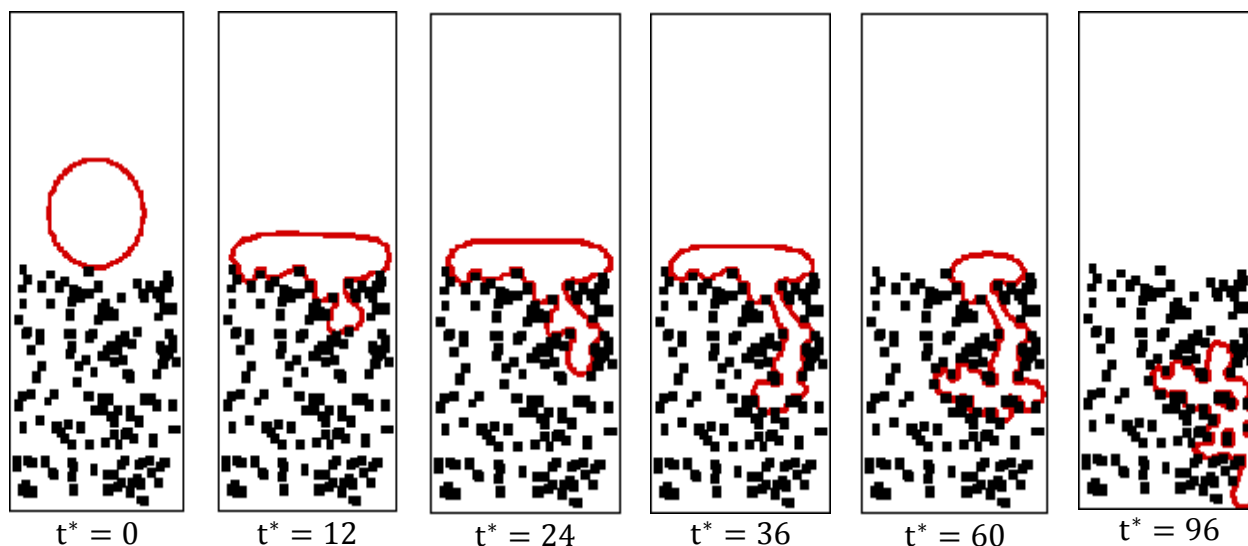
نوع سطح	خنثی	آبدوست	آبگریز
زمان بی بعد	۱۴	۲۱	۱۶

در تست دوم، قطره‌ای به شعاع اولیه 40μ ، مماس بر سطح محیط متخلخل با تخلخل 0.8 در نظر گرفته می‌شود؛ الگوی نفوذ برای دو حالت سطوح آبدوست و آبگریز در شکل (۴-۱۷) ارائه شده است. همانطور که قبلاً گفته شد رژیم جریان ویسکوز فینگرینگ می‌باشد، اما می‌توان با در نظر گرفتن تمام شبکه‌های جامد بصورت آبدوست این الگو را کمی تغییر داد؛ در حالت آبدوست، با توجه به تمایل سیال به خیس کردن سطح تعداد لیس بیشتری خیس می‌شوند و نفوذ بصورت یک جبهه منسجم باصطلاح مانند یک پیستون پیشروی می‌کند، به همین دلیل می‌توان ادعا کرد رژیم نفوذ، کاپیلاری فینگرینگ یا پیستون-مانند می‌باشد. اما در حالتی که تمام شبکه‌های جامد آبگریز باشند، سیال به گونه‌ای پیشروی می‌کند که از لیس‌های کمتری بگذرد و فقط در تلاش است مانند یک انگشت با کمترین برخوردی از بین موانع جامد عبور کند بنابراین زمان نفوذ بسیار کمتر است؛ به این الگوی نفوذ، رژیم انگشت-مانند^۱ می‌گویند.



شکل (۴-۱۶) الگوی نفوذ برای $\varepsilon = 0.8$ ، همه شبکه‌های جامد آبدوست (قطر اولیه قطره 80 واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 80×200 می‌باشد).

^۱ Finger- type regime



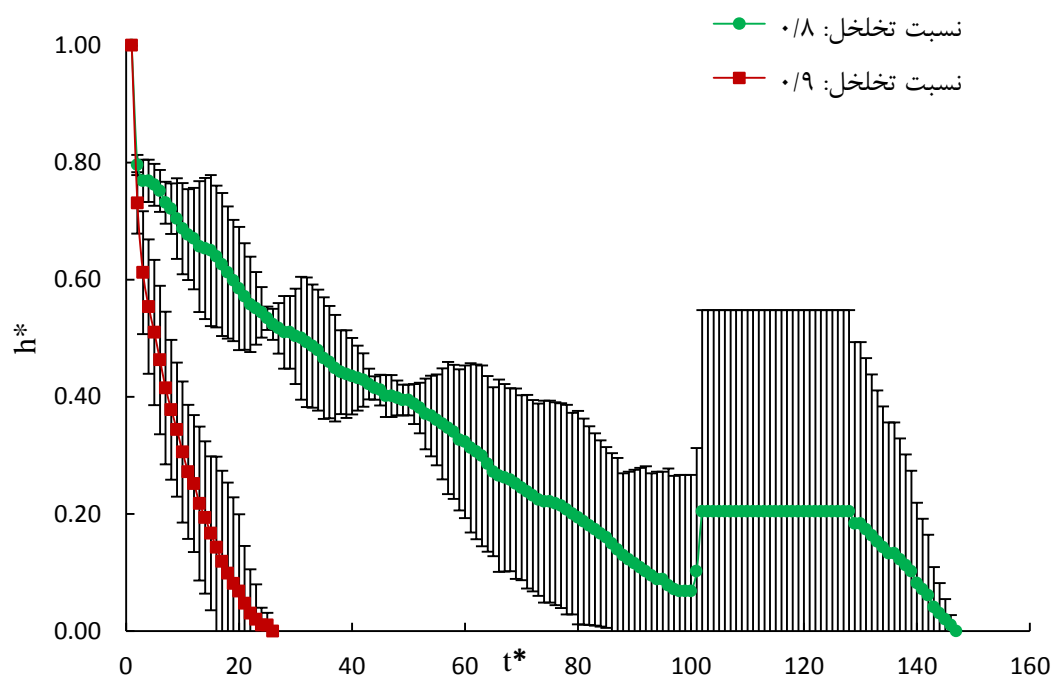
(ب)

شکل (۴-۱۷) الگوی نفوذ برای $\varepsilon = 0.8$ ، همه شبکه‌های جامد آبریز (قطر اولیه قطره ۸۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 80×200 می‌باشد).

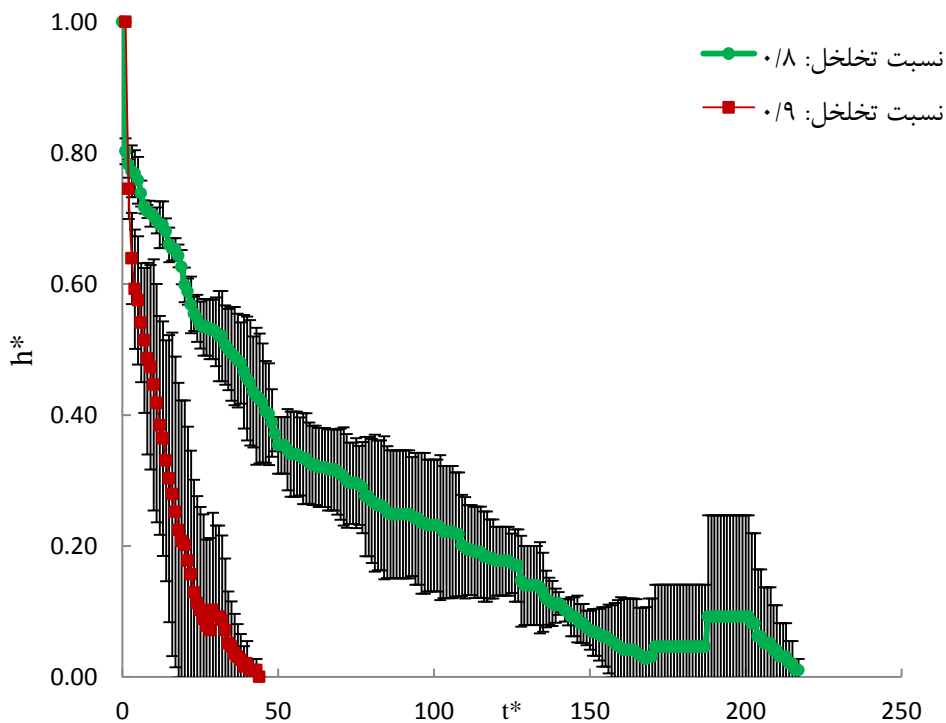
۴-۵-۴-۱- فاصله اطمینان

با توجه به توزیع تصادفی موانع جامد در ناحیه محاسباتی، برای هر نسبت تخلخل چندین ساختار یا چیدمان متفاوت وجود دارد؛ این ساختارها نرخ نفوذ و الگوی نفوذ را تحت تاثیر قرار می‌دهند. برای بررسی تاثیر این ساختارها و تعیین قطعیت نتایج حاصل، در هر نسبت تخلخل چندین ساختار مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نرخ نفوذ میانگین در این ساختارها و مقادیر انحراف از مقادیر میانگین برای دو نسبت تخلخل و در دو حالت آبدوست و آبریز در شکل (۴-۱۹) به نمایش در آمده‌اند. همانطور که مشاهده می‌کنید، بدلیل توزیع تصادفی موانع و وجود چیدمان‌های مختلف برای هر نسبت تخلخل، در تخلخل‌های پایین‌تر و در بعضی زمان‌ها اختلاف از مقدار میانگین دیده می‌شود، که البته در ساختار کلی نفوذ تغییری دیده نمی‌شود. بطور کلی زمان نفوذ با کاهش تخلخل از 0.19 به 0.18 ، $434/25$ درصد افزایش و با تغییر خاصیت آبریزی سطح به آبدوستی، در تخلخل 0.18 به میزان $65/4$ درصد افزایش می‌یابد و در تخلخل

۰/۹ تغییر این خاصیت، به افزایش ۴۹/۳ درصدی زمان نفوذ می انجامد ولی رفتار کلی نفوذ مشابه است و قدرت تصمیم‌گیری را به طراح می‌دهد.



شکل (۴-۱۸) تعیین فاصله اطمینان ، در حالت آبگریز (قطر اولیه قطره ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی ۲۰۰×۸۰ می‌باشد).

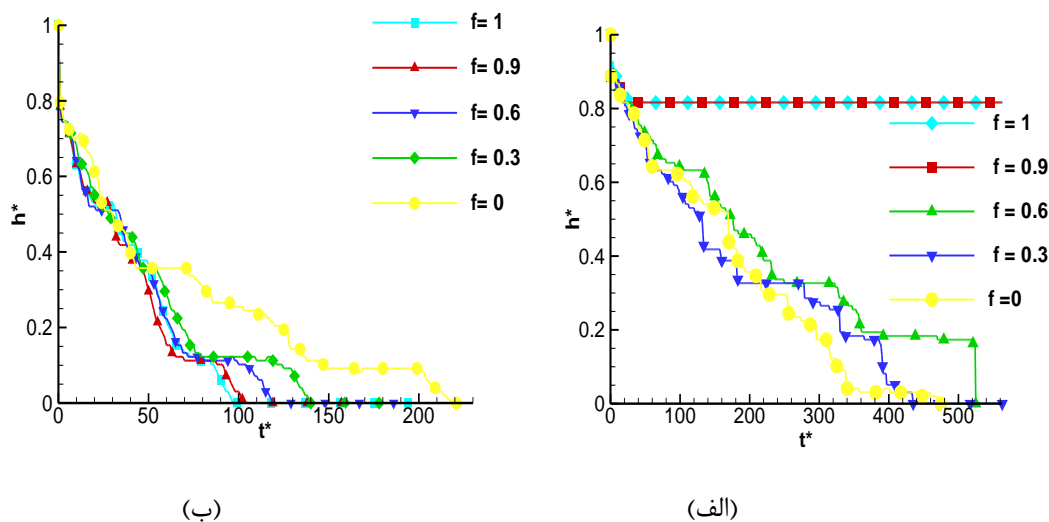


شکل (۴-۱۹) تعیین فاصله اطمینان، در حالت آبدوست (قطر اولیه قطره ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی ۲۰۰×۸۰ می‌باشد).

۴-۵-۵- ضریب آبگریزی

همانطور که در نتایج قسمت (۴-۵-۴-) نشان داده شده است، در حالتی که همه شبکه‌های جامد آبگریز هستند نرخ نفوذ بسیار بیشتر از حالتی است که تمام شبکه‌های جامد آبدوست هستند. اما گاهی اوقات در صنایع مختلف مثل صنعت تولید پیل‌های سوختی آبگریز نمودن تمام سطوح کار پرهزینه‌ای می‌باشد، به همین دلیل پیدا کردن راهی برای بالا بردن نرخ نفوذ با پرداخت هزینه کمتر، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. برآنیم در مطالعه خود نشان دهیم که برای بالا بردن نرخ نفوذ، نیازی نیست حتماً تمام سطوح آبگریز باشند بلکه با آبگریز نمودن تعدادی از سطوح می‌توان نرخ نفوذ را افزایش داد؛ برای این کار نیاز به تعریف پارامتر جدیدی به نام "درصد آبگریزی یا ضریب آبگریزی" می‌باشیم. با تعریف این پارامتر، ما می‌توانیم محیط متخلخل لایه‌ای با ضرایب آبگریزی متفاوت داشته باشیم. این پارامتر با "f" نشان داده شده است و

بصورت نسبت تعداد شبکه‌های جامد آگریز در تماس با سیال به تعداد کل شبکه‌های جامد در تماس با سیال در هر لایه (البته این شبکه‌ها آبدوست فرض شده‌اند) تعریف شده‌است. بنابراین $f=1$ به این معنی است که تمام شبکه‌های جامد در تماس با سیال در یک لایه آگریز هستند و $f=0.1$ این مفهوم را می‌رساند که فقط ۰/۱ شبکه‌های جامد در تماس با سیال آگریز می‌باشند و بقیه شبکه‌ها آبدوست می‌باشند. ذکر این نکته لازم است که انتخاب شبکه‌های جامد بصورت تصادفی انجام می‌گیرد و مقدار f در هر لایه و کل ناحیه یکسان می‌باشد. البته این قابلیت نیز وجود دارد که نواحی مشخص یا شبکه‌هایی خاص آگریز شوند. در شکل (۴-۲۰) نرخ نفوذ h^* بر حسب t^* برای دو تخلخل $\varepsilon = 0.8$ و $\varepsilon = 0.75$ با شرایط آگریزی مختلف نمایش داده شده است.

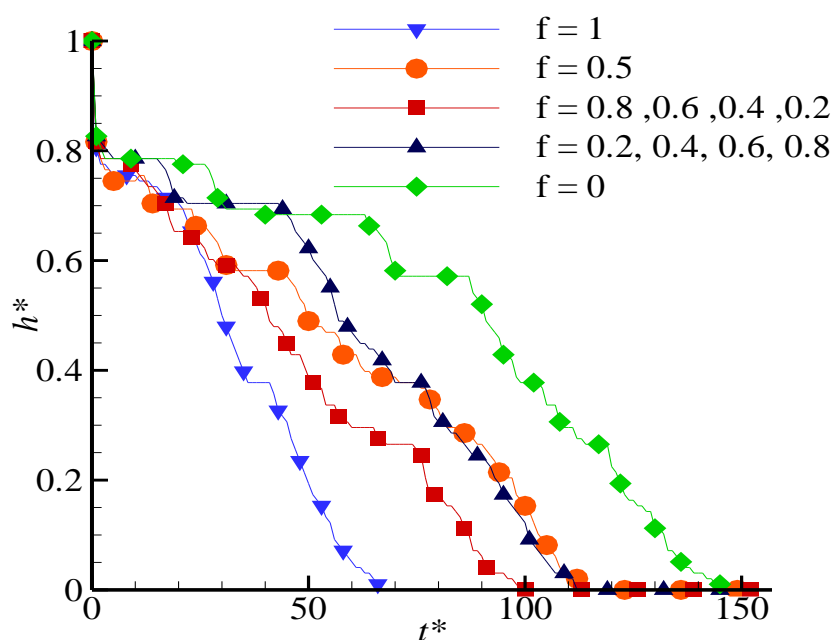


شکل (۴-۲۰) نرخ نفوذ h^* بر حسب t^* (الف) $\varepsilon = 0.75$ (ب) $\varepsilon = 0.8$ (قطر اولیه قطره ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 80×20 می‌باشد).

همانطور که مشاهده می‌شود، در تخلخل $\varepsilon = 0.75$ با تغییر مقدار f نفوذ به طور کامل انجام می‌گیرد و با کاهش بیشتر f نرخ نفوذ کاهش می‌یابد. در تخلخل $\varepsilon = 0.8$ که در حالت $f=1$ نفوذ کامل انجام می‌گیرد، با کاهش f نرخ نفوذ کاهش می‌یابد و نفوذ در زمان بیشتری انجام می‌گیرد اما این افزایش مثلا در

مقادیر $f=0.6$ و کمتر چندان زیاد نیست و قابل اغماض می باشد.

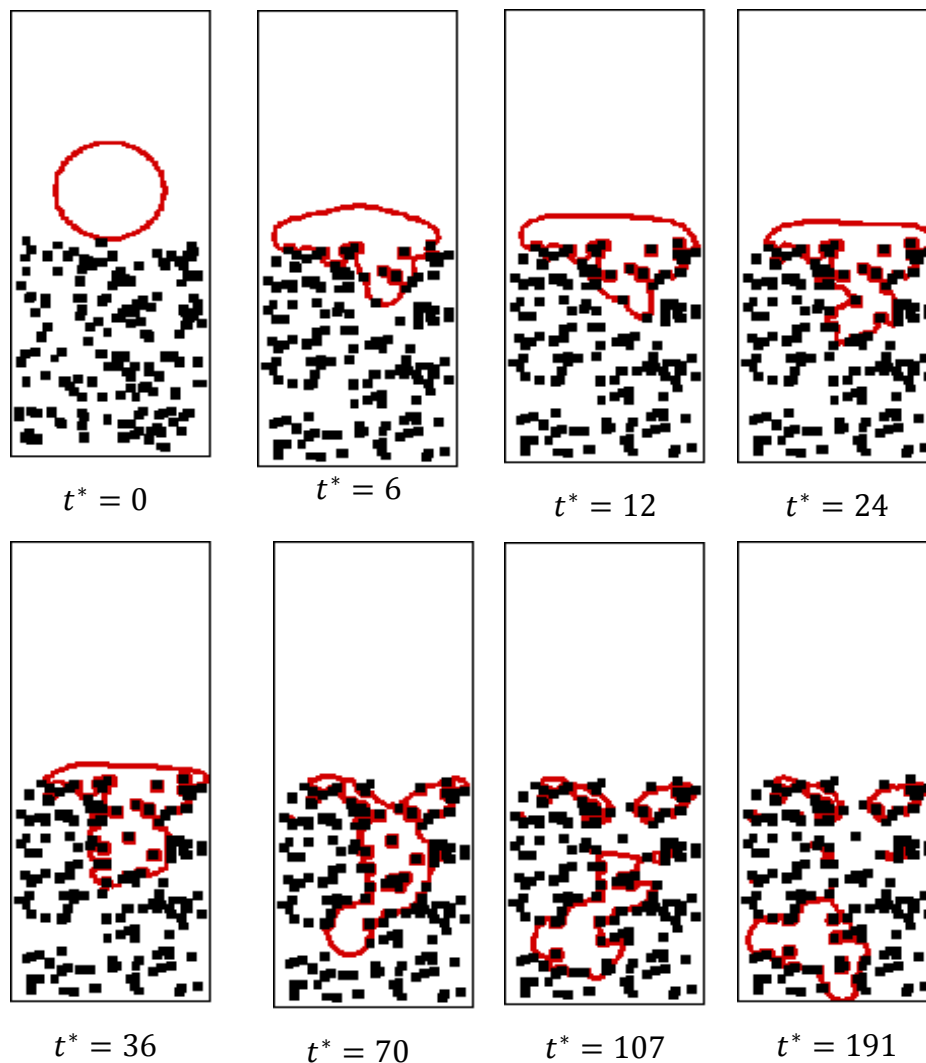
تاکنون همه لایه ها ضریب آگریزی یکسانی داشتند، حال به بررسی تاثیر لایه ها با ضرایب آگریزی متفاوت می پردازیم. این ضرایب به گونه ای انتخاب شده اند که در همه موارد در کل ناحیه، ضریب آگریزی دارای مقدار یکسانی باشد. در شکل (۴-۲۱) مقایسه بین پنج حالت برای $\varepsilon = 0.83$ به نمایش درآمده است.



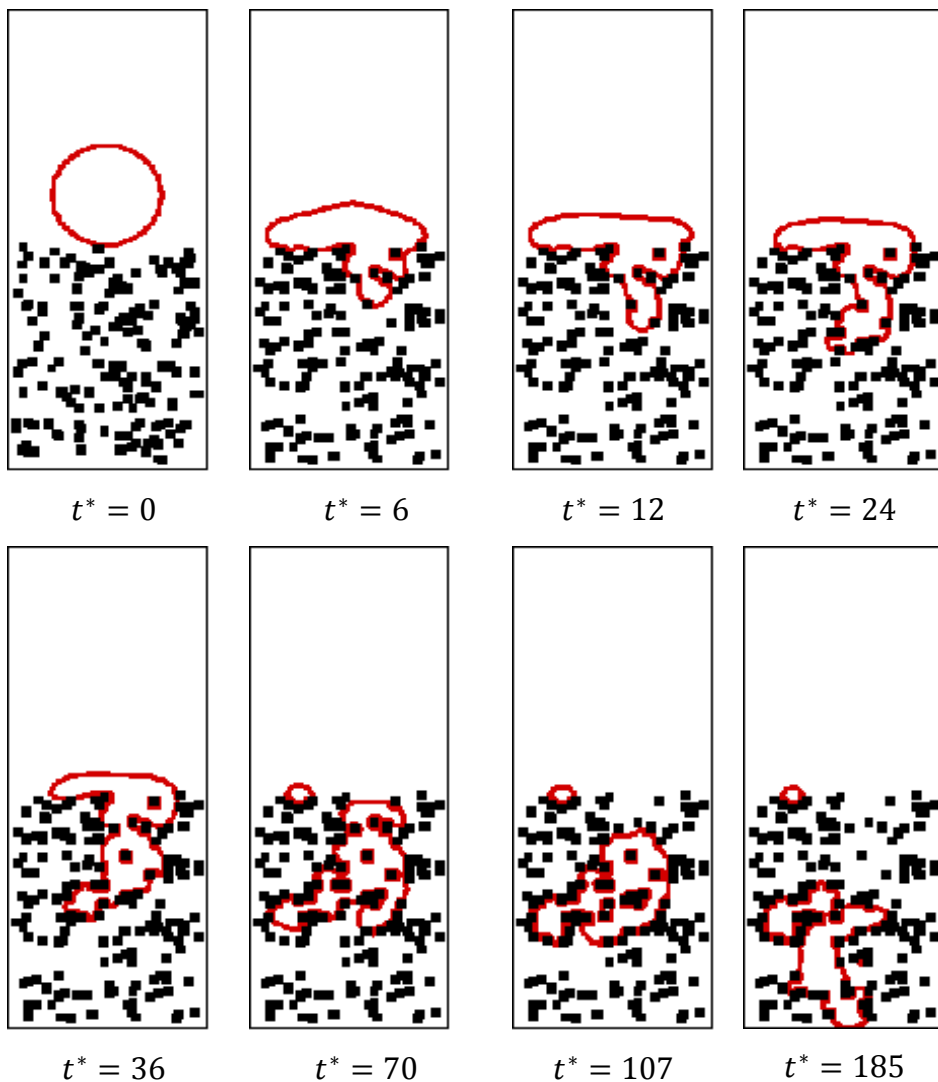
شکل (۴-۲۱) نرخ نفوذ نرخ نفوذ h^* بر حسب t^* برای $\varepsilon = 0.83$ (قطر اولیه قطره ۲۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 80×200 می باشد).

چیدمان ضرایب به گونه ای صورت گرفته است که در هر دو حالت در کل ناحیه مقدار ضریب آگریزی 0.5 می باشد که امکان مقایسه با حالتی که مقدار ضریب آگریزی در هر لایه و در کل ناحیه دارای همین مقدار است وجود داشته باشد. همان طور که مشاهده می شود می توان با چیدمان های مختلف ضرایب، نرخ نفوذ را افزایش داد و حتی از حالتی که همه لایه ها دارای یک مقدار ثابت یکسان باشند، هم نتیجه بهتری

گرفت. در شکل (۲۲-۴) و شکل (۲۳-۴) نفوذ برای دو مورد گفته شده برای تخلخل $\varepsilon = 0.8$ که شکل‌های مربوط به الگوی نفوذ این تخلخل در بالا آمده است و امکان مقایسه بهتری را فراهم می‌آورد، ارائه شده است.



شکل (۲۲-۴) الگوی نفوذ برای $\varepsilon = 0.8$ ، $f = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ (بترتیب لایه‌ها از بالا به پایین)



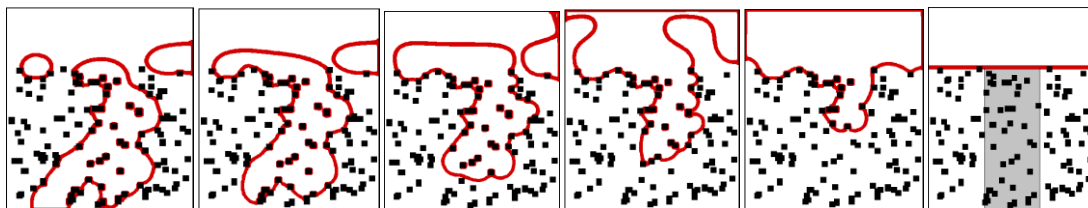
شکل (۴-۲۳) الگوی نفوذ برای $\varepsilon = 0.8$ ، $f = 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ (بترتیب لایه‌ها از بالا به پایین) (قطر اولیه قطره ۲۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی 80×20 می‌باشد).

در شکل (۴-۲۲) ضرایب آبریزی بصورت صعودی تغییر می‌کنند و لایه‌های ابتدایی ضریب آبریزی کمتری دارند، همانطور که مشاهده می‌شود نفوذ از رژیم پیستون-مانند تبعیت می‌کند و تعداد شبکه بیشتری را در برمی‌گیرد؛ اما با افزایش ضریب آبریزی، قطره در داخل محیط متخلخل به شکل انگشتی پیش می‌رود و الگوی نفوذ انگشت-مانند می‌باشد. البته در عبور از لایه‌های آبریز اگر فضای خالی بین

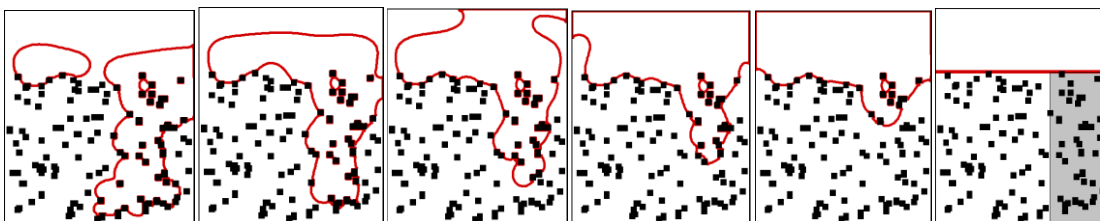
لایه‌ها یا موانع جامد بزرگ باشد، بدلیل وجود سطوح آبگریز، نفوذ به سمت پایین متوقف می‌شود و قطره فضای خالی را پر می‌کند(همانطور که در زمان‌های ۳۶-۱۰۷ شکل (۴-۲۲) دیده می‌شود). در عوض، در حالتی که ضرایب آبگریزی بصورت نزولی تغییر می‌کنند، در ابتدا الگوی نفوذ رژیم انگشت-مانند می‌باشد و سپس با ورود به لایه‌هایی با ضریب آبگریزی کمتر، از الگوی پیستونی تبعیت می‌کند.

۴-۵-۶- پیمایش و هدایت نفوذ سیال در داخل محیط متخلخل لایه‌ای

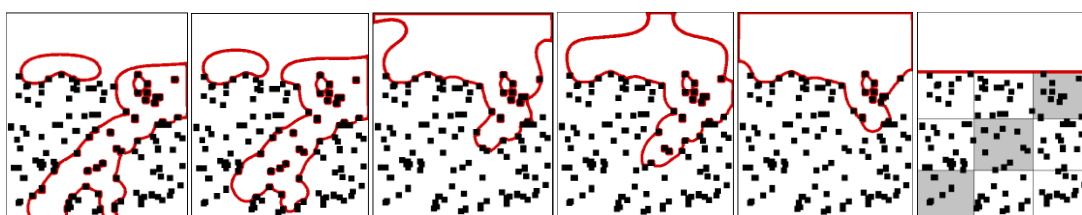
در صنایع مختلف مثل تولید پیل‌های سوختی، فرآوری نفت و گاز، مسائل زیست محیطی مثل نفوذ آب باران در خاک و غیره پیدا کردن راه حلی برای تعیین مسیر پدیده نفوذ داخل محیط متخلخل، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه، برای هدایت نفوذ داخل محیط متخلخل راه‌حل تازه‌ای ارائه شده‌است. در این جا ما با استفاده از ضریب آبگریزی و تقسیم ناحیه محاسباتی به چند ناحیه با درصد آبگریزی‌های مختلف سعی بر هدایت قطره و فیلم مایع در مسیرهای تعیین شده داریم. در واقع تمام قسمت‌ها را آبگریز $f=1$ در نظر می‌گیریم و فقط چند ناحیه دلخواه با توجه به مسیر در نظر گرفته شده، ضریب آبگریزی متفاوتی دارند در واقع چند ناحیه دلخواه تقریباً آبدوست می‌باشند. البته نحوه چیدمان ضرایب آبگریزی در هدایت بهتر موثر است. در شکل‌های زیر چند مسیرهای تعیین شده و نتایج مدل‌سازی (پیمودن مسیر توسط قطره و فیلم مایع) نمایش داده شده‌اند. همانطور که گفته شد، از این موضوع می‌توان برای جهت دهی به نفوذ آب باران برای بهره‌وری بیشتر استفاده نمود. در ابتدا، پیمایش فیلم مایع در محیط متخلخل با تخلخل ۰/۹ و سپس پیمایش قطره سیال داخل محیط متخلخل با تخلخل ۰/۸ رصد شده است.



(الف)

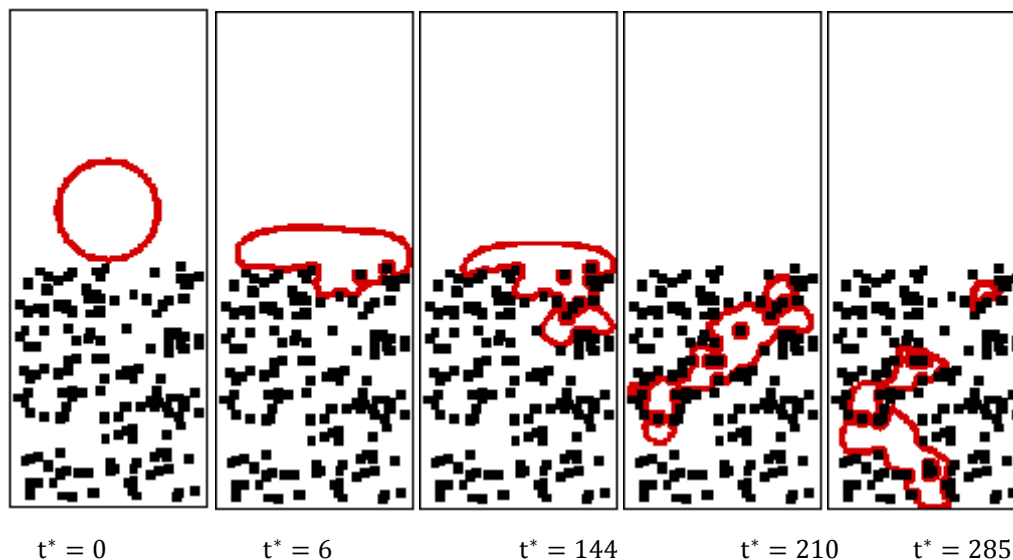
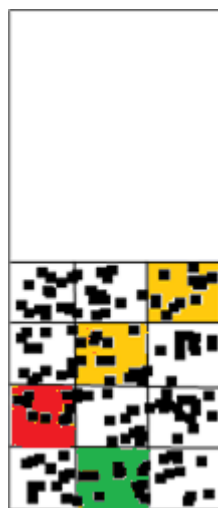


(ب)



شکل (۴-۲۴) رصد فیلم مایع داخل محیط متخلخل؛ نواحی مشخص شده آبدوست ($f=0$) و سایر نواحی آبگریز ($f=I$) باشند. (ابعاد ناحیه محاسباتی 140×120 ، ارتفاع اولیه فیلم سیال ۴۰ واحد شبکه و نسبت تخلخل $0/9$ می باشد).

در مسیرهای تعیین شده در مدل‌سازی‌های زیر نواحی با رنگ‌های زرد، قرمز و سبز بترتیب دارای مقادیر ضریب آبگریزی $0/1$ ، $0/05$ و 0 می‌باشند. در مدل‌سازی‌های اول تخلخل $0/8$ و ابعاد ناحیه محاسباتی و قطر اولیه قطره مانند قبل می‌باشد تا با فراهم نمودن امکان مقایسه با نتایج قبلی، موضوع هدایت برجسته‌تر شود. مشخصه‌های جریان رینولدز، وبر، فرود و کاپیلاری بترتیب مقادیر 24 ، 9 ، $0/36$ و $0/37$ می‌باشند.



شکل (۴-۲۵) مسیر تعیین شده و نتایج مدلسازی برای $\varepsilon = 0.8$.

عوامل دیگری نیز بر هدایت سیال داخل محیط متخلخل اثرگذار است، از جمله این عوامل نحوه چیدمان موانع جامد و عبارتی یکنواخت بودن چیدمان مخصوصاً در مسیرهای تعیین شده می‌باشد؛ هر چه چیدمان موانع جامد مخصوصاً در مسیرهای تعیین شده یکنواخت‌تر باشد، هدایت سیال داخل محیط متخلخل قابل کنترل‌تر خواهد بود؛ برای مثال مسیر را در مورد قبلی تغییر می‌دهیم. در مسیر تعیین شده و نتایج حاصل نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۴-۲۶) مشاهده می‌شود، بدلیل تراکم موانع جامد در ابتدای مسیر، نفوذ بسیار کندتر از حالت قبل انجام می‌گیرد. و با ورود سیال به ناحیه قرمز رنگ

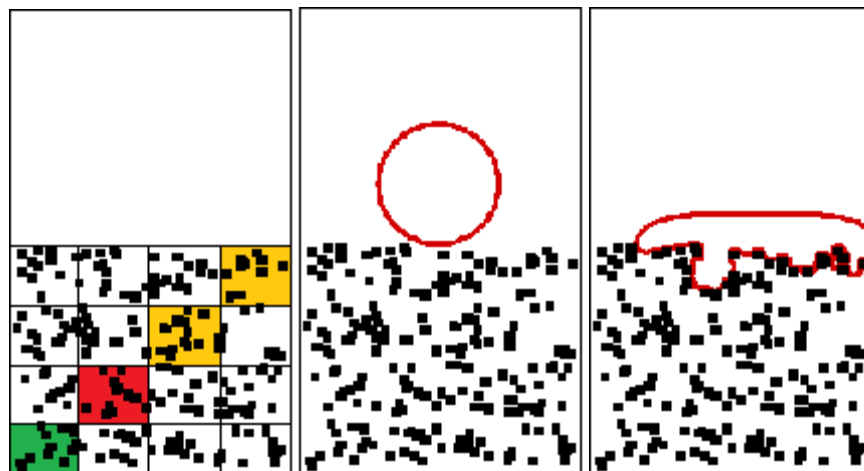
بعلت تراکم زیاد موانع و بسته شدن مسیر و وجود فضای خالی در ناحیه مجاور، نفوذ به ناحیه قرمز متوقف می‌شود و سیال از فضای خالی برای پیمودن مسیر استفاده می‌کند.



شکل (۴-۲۶) تغییر مسیر تعیین شده و نتایج مدل‌سازی برای $\varepsilon = 0.8$

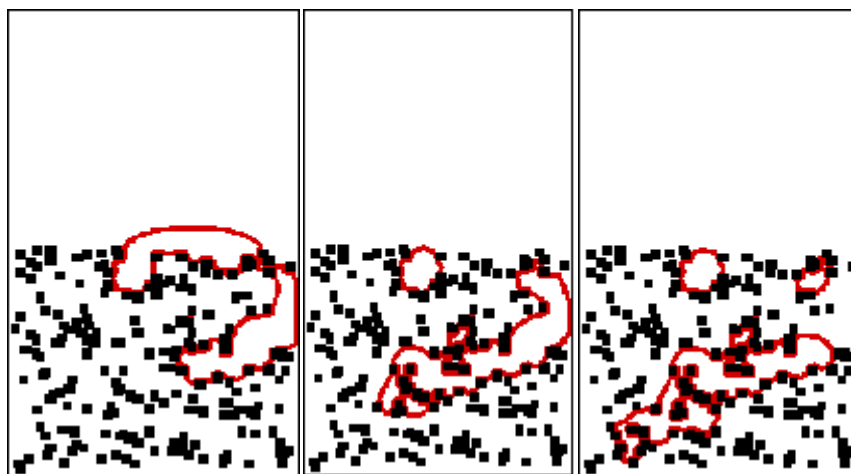
در ادامه، برای تکمیل بحث چند مدل‌سازی دیگر با شرایط متفاوت آورده شده‌است. در مدل‌سازی‌های

زیر ابعاد ناحیه محاسباتی 120×200 و قطر اولیه قطره ۲۵ واحد شبکه می‌باشد.



$t^* = 0$

$t^* = 60$

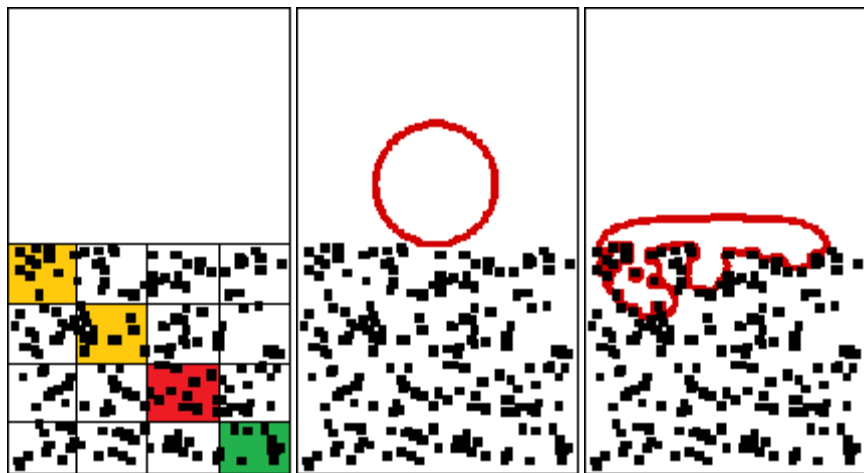


$t^* = 96$

$t^* = 175$

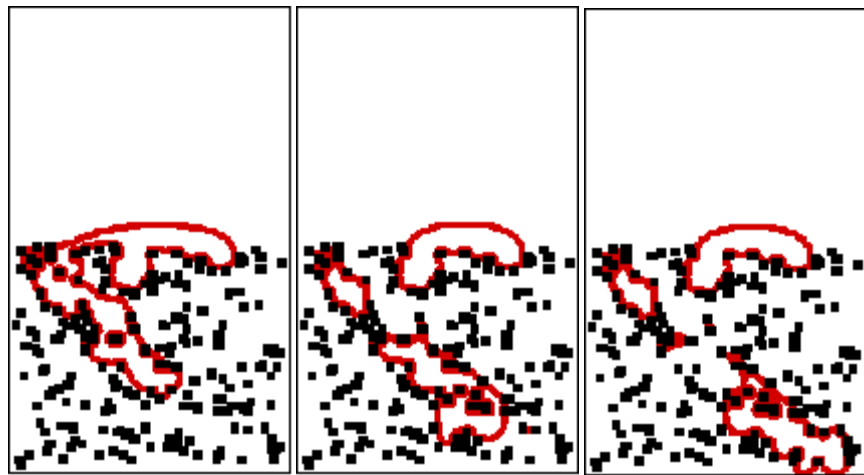
$t^* = 214$

شکل (۲۷-۴) مسیر تعیین شده و نتایج مدلسازی برای $\varepsilon = 0.83$



$t^* = 0$

$t^* = 20$



$t^* = 40$

$t^* = 70$

$t^* = 96$

شکل (۴-۲۸) مسیر تعیین شده و نتایج مدلسازی برای $\varepsilon = 0.83$

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

۵-۱-۱- نتیجه‌گیری در حوزه مدل‌سازی جریان‌های تک جزیی چندفازی با

نسبت چگالی بالا

در بخش اول این مطالعه جریان‌های تک جزیی چند فازی با نسبت چگالی بالا به کمک مدل شبکه بولتزمن شان وچن مورد بررسی قرار گرفتند؛ در واقع هدف از ارائه این بخش صحت سنجی کد نگاشته شده و همچنین توسعه روش و نمایش توانمندی آن در مدل‌سازی‌های چندفازی می‌باشد. از مشکلات جدی مدل شبه‌پتانسیل، عدم تعریف مشخص دمای ترمودینامیکی و بوجود آمدن سرعت‌های بزرگ در فصل مشترک دو فاز، که از نظر فیزیکی نادرست هستند، می‌باشد. در مطالعه حاضر، مدل شبه‌پتانسیل با معادلات حالت کارناهان-استرلینگ، ریدلیش کوانگ و پنگ-رابینسون بکار رفته‌است؛ و معادلات از نقطه نظر مقادیر سرعت‌های کاذب، نسبت چگالی حاصل و تطابق با منحنی پیوستگی ماکسول مقایسه شدند و نتایج زیر حاصل شد.

۵-۱-۱-۱- بررسی معادلات حالت

- ترم دما بطور صریح در محاسبات ظاهر شده‌است و وابستگی مدل‌سازی به مقادیر ضریب برهم‌کمنش بین اجرا G کاهش یافت. همچنین، امکان مدل‌سازی آسانتر جریان‌هایی که با تغییر فاز همراه هستند، بوجود آمد.

- نسبت چگالی حاصل از مدل‌سازی به کمک معادلات حالت بسیار بیشتر از معادله حالت رایج شان وچن می‌باشد.

- سرعت‌های کاذب ایجاد شده در فصل مشترک دو فاز در تمامی معادلات حالت ذکر شده در بالا کاهش یافت.

- معادلات حالت پنگ- رابینسون و کارناهان- استرلینگ از نظر کاهش سرعت‌های کاذب ایجاد شده در فصل مشترک فازها، موفق‌تر بودند.

- منحنی‌های پیوستگی حاصل از مدل‌سازی با معادلات پنگ- رابینسون و ریدلیش- کوانگ تطابق بیشتری با منحنی‌های پیوستگی ماکسول، دارند.

۵-۱-۱-۲- صحت سنجی

جهت اطمینان از صحت روش توسعه یافته و نمایش توانمندی آن به کمک معادله حالت پنگ رابینسون مدل‌سازی‌های زیر انجام گرفت و نتایج با نتایج رانه شده توسط محققان قبلی مطابقت داشت. مدل‌سازی:

➤ ادغام دو قطره در هم،

➤ سقوط قطره و برخورد آن با سطح با ترشوندگی‌های مختلف.

۵-۱-۱-۳- مدل‌سازی نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای

مدل‌سازی نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای به کمک معادله حالت ریدلیش-کوانگ در نسبت چگالی بالا انجام گرفت. برای تولید محیط متخلخل موانع جامد مربعی با ابعاد 3×3 به صورت تصادفی در ناحیه محاسباتی پراکنده شدند. در این مطالعه برای یکنواخت‌تر شدن توزیع موانع جامد، ناحیه محاسباتی به چندلایه تقسیم شد و تخلخل در همه لایه‌ها و در کل ناحیه محاسباتی یکسان در نظر گرفته شدند.

- تاثیر عوامل مختلف بر روی نرخ نفوذ و الگوی نفوذ بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد:

➤ تاثیر نسبت تخلخل: با افزایش تخلخل، نرخ نفوذ افزایش می‌یابد و زمان نفوذ کاهش می‌یابد.

➤ تاثیر ویژگی آبدوستی و آبگریزی:

❖ در حالتی که تمام شبکه‌های جامد آبدوست هستند، نفوذ بصورت کلونی و منسجم

انجام می‌شود و توده سیال با هم نفوذ می‌کنند و از تعداد شبکه‌های بیشتری عبور می‌کنند. در صورتی که در حالت آگریز، سیال بصورت انگشت‌دانه‌هایی از بین شبکه‌های جامد عبور می‌نماید و تعداد شبکه‌های کمتری را درگیر می‌کند؛ در ابتدا نفوذ بصورت شاخه شاخه به سمت پایین پیش می‌رود اما بتدریج بدلیل بالابودن کشش سطحی در نسبت چگالی‌های بالا، ابتدا انگشت‌دانه‌ها بهم متصل شده و سپس نفوذ پیشروی می‌کند؛ در نتیجه در این حالت نفوذ با سرعت کمتری نسبت به حالت آبدوست اتفاق می‌افتد و نرخ نفوذ کمتر می‌باشد.

۵-۱-۲- نتیجه‌گیری در حوزه مدلسازی جریان‌های چندجزیی چندفازی

در بخش دوم این مطالعه، جریان‌های دوجزیی چند فازی مورد توجه قرار گرفتند و به طور خاص مساله نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. الگوی نفوذ قطره و فیلم مایع برای اولین به کمک دیاگرام فازی $\log Ca - \log M$ بررسی شد. تاثیر عوامل مختلف مثل تخلخل و ویژگی آبدوستی یا آگریزی سطح بر روی نفوذ قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای بررسی شد و ضربی بعنوان درصد شبکه‌های آگریز در تماس با سیال به کل شبکه‌های جامد در یک لایه معرفی شد؛ تاثیر این ضریب در مدلسازی بررسی شد. نتایج در زیر گزارش شده‌است:

- الگوی نفوذ برای حالت قطره و فیلم مایع بررسی شد و رژیم‌های ویسکوز فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ مشاهده شدند. مشخصات این رژیم‌ها بصورت زیر گزارش شد:

➤ رژیم ویسکوز فینگرینگ:

نفوذ به صورت انگشت- مانند پیشروی می‌کند و فقط از مسیرهای خاصی عبور می‌نماید و سیال نفوذکننده تعداد شبکه‌های کمتری را در راستای افقی در بر می‌گیرد، میانگین ضخامت

فینگرها در این حالت حدود ۱۲ واحد شبکه می‌باشد و سرعت نفوذ بیشتر از رژیم کاپیلاری فینگرینگ می‌باشد. نتایج عددی این مقاله نشان می‌دهد که این رژیم جریان در نسبت ویسکوزیته‌های پایین‌تر از ده و رنج وسیعی از عدد کاپیلاری رخ می‌دهد.

➤ رژیم کاپیلاری فینگرینگ: در این رژیم، نفوذ بصورت یک جبهه منسجم پیشروی می‌کند و تعداد شبکه‌های بیشتری را در راستای افقی در برمی‌گیرد؛ در واقع سیال تمام موجود در مسیری که از آن عبور می‌کند را پر می‌نماید و میانگین ضخامت فینگرها در این حالت حدود ۴۴ می‌باشد که فینگرهای مشاهده شده بسیار ضخیم‌تر از رژیم ویسکوز فینگرینگ می‌باشند.

- با افزایش تخلخل، نرخ نفوذ افزایش می‌یابد و زمان نفوذ کاهش می‌یابد.

- ویژگی آبدوستی / آبریزی سطوح نیز بر روی نرخ نفوذ و الگوی نفوذ موثر هستند:

➤ نرخ نفوذ:

در صورتی که تمام شبکه‌های جامد آبریز باشند، نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. درحالی‌که در حالت آبدوست، بدلیل تمایل سیال به خیس کردن سطح جدایش سیال از سطح و نفوذ در ماده متخلخل در زمان بیشتری انجام می‌گیرد.

❖ در تخلخل‌های پایین می‌توان با قرار دادن لایه‌ها با تخلخل‌های مختلف و

دارای همان مقدار میانگین ثابت در کل ناحیه، نرخ نفوذ را کاهش داد.

➤ الگوی جریان:

❖ در حالت آبریز، الگوی نفوذ از رژیم انگشتی تبعیت می‌کند و سیال در حین نفوذ

تعداد شبکه‌های کمتری را درگیر می‌کند و فقط بدنبال یافتن راهی برای عبور سریعتر از بین موانع است، ضخامت فینگرها حدود ۱۷ می‌باشد.

❖ در حالت آبدوست، سیال به‌صورت یک جبهه مانند پیستون پیش می‌رود و تعداد

شبکه‌های کمتری را در برمی‌گیرد و از رژیم پیستون-مانند تبعیت می‌کند. در این حالت ضخامت فینگرها بیشتر از حالت آبگریز و نزدیک به مقدار رژیم کاپیلاری فینگرینگ می‌باشد و حدود ۴۰ می‌باشد.

- اگر لایه‌ها ضرایب آبگریزی متفاوتی داشته‌باشند (البته در مجموع، کل ناحیه دارای ضریب ثابتی خواهد بود)

➤ نرخ نفوذ:

می‌توان با چیدمان‌های مختلف ضرایب، نرخ نفوذ را افزایش داد و حتی از حالتی که همه لایه‌ها دارای همان مقدار ثابت باشند، هم نتیجه بهتری گرفت.

➤ الگوی جریان:

هنگامی که چیدمان ضرایب آبگریزی بصورت صعودی از لایه بالا به پایین تغییر می‌کند و لایه‌های ابتدایی ضریب آبگریزی کمتری دارند، نفوذ از رژیم پیستون-مانند تبعیت می‌کند و تعداد شبکه بیشتری را در برمی‌گیرد؛ اما با افزایش ضریب آبگریزی، قطره در داخل محیط متخلخل به شکل انگشتی پیش می‌رود و الگوی نفوذ انگشت-مانند می‌باشد. البته در عبور از لایه‌های آبگریز اگر فضای خالی بین لایه‌ها یا موانع جامد بزرگ باشد، بدلیل وجود سطوح آبگریز، نفوذ به سمت پایین متوقف می‌شود و قطره فضای خالی را پر می‌کند. در عوض، در حالتی که ضرایب آبگریزی بصورت نزولی تغییر می‌کنند در ابتدا الگوی نفوذ، رژیم انگشت-مانند می‌باشد و سپس با ورود به لایه‌هایی با ضریب آبگریزی کمتر، از الگوی پیستونی تبعیت می‌کند.

- مسیریابی سیال در داخل محیط متخلخل:

➤ تاثیر آبدوست بودن و آبگریز بودن سطوح جامد، در هدایت سیال داخل محیط

متخلخل به کمک تقسیم ناحیه محاسباتی به قسمت‌های کوچکتر و با ضرایب
آبگریزی یک و نزدیک صفر مشاهده شد و توانایی مدل در مسیریابی سیال داخل
محیط متخلخل با انجام مدلسازی‌های مختلف (هم برای قطره و هم فیلم مایع)
اثبات شد.

۵-۲- پیشنهادات

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در این پایان‌نامه، برای توسعه و ادامه کار ایده‌ها و پیشنهاداتی در
زیر ارائه شده‌است، که امیدوارم راهگشای سایر دانشجویان و علاقه‌مندان باشد.

✚ بررسی پیمایش سیال با نسبت چگالی بالا در داخل محیط متخلخل به کمک روش شبه بولتزمان

✚ هدایت سیال الکترواسموز در محیط متخلخل تحت میدان الکتریکی

✚ بررسی انتقال حرارت در پدیده نفوذ در ماده متخلخل

✚ بررسی صعود و حرکت حباب در کانال حاوی ماده متخلخل با تخلخل بالا.

پوست

کدنویسی

الف- محاسبه تابع توزیع تعادلی (توجه شود Rho، Uxin و Uyin چگالی و سرعت مربوط به

جز مورد نظرنند و feq محاسبه شده نیز برای همان جز است.)

$$U2 = Uxin * Uxin + Uyin * Uyin$$

$$EU(1) = Uxin$$

$$EU(2) = Uyin$$

$$EU(3) = - Uxin$$

$$EU(4) = - Uyin$$

$$EU(5) = Uxin + Uyin$$

$$EU(6) = - Uxin + Uyin$$

$$EU(7) = - Uxin - Uyin$$

$$EU(8) = Uxin - Uyin$$

$$EU2 = EU * EU$$

$$feq(0) = Rho * (1 - 1.5d0 * U2) * 4 / 9$$

$$feq(1:4) = Rho * (1 + 3 * EU(1:4) + 4.5d0 * EU2(1:4) - 1.5d0 * U2) / 9$$

$$feq(5:8) = Rho * (1 + 3 * EU(5:8) + 4.5d0 * EU2(5:8) - 1.5d0 * U2) / 36$$

ب- محاسبه کمیت‌های ماکروسکوپیک:

DO X=1,NX

$$XE=X+1$$

$$XW=X-1$$

$$IF(X==1) XW=NX$$

$$IF(X==NX) XE=1$$

DO Y=1,NY

```

YS=Y-1
YN=Y+1
IF(Y==1) YS=NY
IF(Y==NY) YN=1
IF (Is Solid(X,Y)==0) THEN
RHO(X,Y,:)=SUM(F(:,X,Y,:),1)
UX(X,Y,:)=F(1,X,Y,:)+F(5,X,Y,:)+F(8,X,Y,:)-F(3,X,Y,:)-F(6,X,Y,:)-F(7,X,Y,:)
UY(X,Y,:)=F(5,X,Y,:)+F(2,X,Y,:)+F(6,X,Y,:)-F(7,X,Y,:)-F(4,X,Y,:)-F(8,X,Y,:)
PSI(X,Y,1)= 1*(1-exp(-RHO(:,1)/1))
PSI(X,Y,2)=RHO(X,Y,2) !1*(1-exp(-RHO(:,2)/1))
ELSE
RHO(X,Y,:)=0
PSI(X,Y,:)=0
END IF
END DO
END DO

```

پ - محاسبه نیروها:

```

DO X=1,NX
XE=X+1
XW=X-1
IF(X==1) XW=NX
IF(X==NX) XE=1
DO Y=1,NY
YS=Y-1
YN=Y+1
IF(Y==1) YS=NY
IF(Y==NY) YN=1
FX(X,Y,1)=-PSI(X,Y,1)*(G11*(1./9.*(PSI(XE,Y,2)*(1-S(XE,Y))-
PSI(XW,Y,2)*(1-S(XW,Y))))+1./36.*(PSI(XE,YN,2)*(1-
S(XE,YN))+PSI(XE,YS,2)*(1-S(XE,YS))- PSI(XW,YN,2)*(1-S(XW,YN))-
PSI(XW,YS,2)*(1-S(XW,YS))))))

```

FY(X,Y,1)=-PSI(X,Y,1)*(G11*(1./9.*(PSI(X,YN,2)*(1-S(X,YN))-PSI(X,YS,2)*(1-S(X,YS))))+1./36.*(PSI(XE,YN,2)*(1-S(XE,YN))+PSI(XW,YN,2)*(1-S(XW,YN))-PSI(XW,YS,2)*(1-S(XW,YS))-PSI(XE,YS,2)*(1-S(XE,YS))))))

FX(X,Y,2)=-PSI(X,Y,2)*(G22*(1./9.*(PSI(XE,Y,1)*(1-S(XE,Y))-PSI(XW,Y,1)*(1-S(XW,Y))))+1./36.*(PSI(XE,YN,1)*(1-S(XE,YN))+PSI(XE,YS,1)*(1-S(XE,YS))-PSI(XW,YN,1)*(1-S(XW,YN))-PSI(XW,YS,1)*(1-S(XW,YS))))))

FY(X,Y,2)=-PSI(X,Y,2)*(G22*(1./9.*(PSI(X,YN,1)*(1-S(X,YN))-PSI(X,YS,1)*(1-S(X,YS))))+1./36.*(PSI(XE,YN,1)*(1-S(XE,YN))+PSI(XW,YN,1)*(1-S(XW,YN))-PSI(XW,YS,1)*(1-S(XW,YS))-PSI(XE,YS,1)*(1-S(XE,YS))))))

FSX(X,Y,1)=-GADS1*PSI(X,Y,1)*(1./9.*(S(XE,Y)-S(XW,Y))+1./36.*(S(XE,YN)+S(XE,YS)-S(XW,YN)-S(XW,YS))))

FSY(X,Y,1)=-GADS1*PSI(X,Y,1)*(1./9.*(S(X,YN)-S(X,YS))+1./36.*(S(XE,YN)+S(XW,YN)-S(XW,YS)-S(XE,YS))))

FSX(X,Y,2)=-GADS2*PSI(X,Y,2)*(1./9.*(S(XE,Y)-S(XW,Y))+1./36.*(S(XE,YN)+S(XE,YS)-S(XW,YN)-S(XW,YS))))

FSY(X,Y,2)=-GADS2*PSI(X,Y,2)*(1./9.*(S(X,YN)-S(X,YS))+1./36.*(S(XE,YN)+S(XW,YN)-S(XW,YS)-S(XE,YS))))

END DO
END DO

ث - گام بر خورد

DO X=1,Nx
DO Y=1,Ny
if (Is Solid(X,Y)==0) THEN
f(0:8,X,Y,1) = f(0:8,X,Y,1) - (f(0:8,X,Y,1) - feq(0:8))/TAU1
f(0:8,X,Y,2) = f(0:8,X,Y,2) - (f(0:8,X,Y,2) - feq(0:8))/TAU2
END IF
END DO
END DO

ج- گام جاری شدن

```
DO X=1,NX
  XE=X+1
  XW=X-1
  IF(X==1) XW=NX
  IF(X==NX) XE=1
  DO Y=1,NY
    YS=Y-1
    YN=Y+1
    IF(Y==1) YS=NY
    IF(Y==NY) YN=1
    FTEMP( 0 ,X,Y,:)=F(0,X,Y,:)
    FTEMP( 1,XE,Y,:)=F(1,X,Y,:)
    FTEMP( 2,X,YN,:)=F(2,X,Y,:)
    FTEMP( 3,XW,Y,:)=F(3,X,Y,:)
    FTEMP( 4,X,YS,:)=F(4,X,Y,:)
    FTEMP(5,XE,YN,:)=F(5,X,Y,:)
    FTEMP(6,XW,YN,:)=F(6,X,Y,:)
    FTEMP(7,XW,YS,:)=F(7,X,Y,:)
    FTEMP(8,XE,YS,:)=F(8,X,Y,:)

  END DO
END DO
F=FTEMP
```

چ- شرط مرزی جامد(نود خشک-بازگشت به عقب کامل)اینجا فقط برای یک جز بعنوان

نمونه آورده شده است.)

```
DO X=1,NX
DO Y=1,NY
IF (Is Solid(X,Y)==1) THEN
temp1=f(1,x,y,1)
f(1,x,y,1)=f(3,x,y,1)
f(3,x,y,1)=temp1
temp1=f(2,x,y,1)
f(2,x,y,1)=f(4,x,y,1)
f(4,x,y,1)=temp1
```

```
temp1=f(5,x,y,1)
f(5,x,y,1)=f(7,x,y,1)
f(7,x,y,1)=temp1
temp1=f(6,x,y,1)
f(6,x,y,1)=f(8,x,y,1)
f(8,x,y,1)=temp1
END IF
END DO
END DO
```

- [1] P. Alam, M. Toivakka, K. Backfolk, P. Sirviö (2007)," Impact spreading and absorption of Newtonian droplets on topographically irregular porous materials", **J.Chemical Engineering Science**, Vol. 62, No. 12, pp. 3142-3158.
- [2] N. C. Reis Jr, R. F. Griffiths, J. M. Santos(2004), "Numerical simulation of the impact of liquid droplets on porous surfaces", **J. Computational Physics**, Vol. 198, No. 2, pp. 747-770 .
- [3] N. C. Reis Jr, R. F. Griffiths, J. M. Santos (2008), "Parametric study of liquid droplets impinging on porous surfaces", **J.Applied Mathematical Modelling**, Vol. 32, No. 3, pp. 341-361 .
- [4] N. Alleborn, H. Raszillier (2004)," Spreading and sorption of a droplet on a porous substrate", **J.Chemical Engineering Science**, Vol. 59, No. 10, pp. 2071-2088.
- [5] N. Alleborn, H. Raszillier(2004), "Spreading and sorption of droplets on layered porous substrates", **J. Colloid and Interface Science**, Vol. 280, No. 2, pp. 449-464 .
- [6] A. K. Gunstensen, D. H. Rothman, S. Zaleski, G. Zanetti(1991)," Lattice Boltzmann model of immiscible fluids", **J.Physical Review A**, Vol. 43, No. 8, pp. 4320-4327 .
- [7] X. Shan, H. Chen," Simulation of nonideal gases and liquid-gas phase transitions by the lattice Boltzmann equation", **J.Physical Review E** ,Vol. 49, No. 4, pp. 2941-2948.
- [8] X. He, S. Chen, R. Zhang(1999), "A Lattice Boltzmann Scheme for Incompressible Multiphase Flow and Its Application in Simulation of Rayleigh–Taylor Instability", **J.Computational Physics**, Vol. 152, No. 2 ,pp. 642-663 .
- [9] P. Yuan, L. Schaefer(2006), "Equations of state in a lattice Boltzmann model", **J.Physics of Fluids (1994-present)**, Vol. 18, No. 4 .
- [10] A. L. Kupershtokh, D. A. Medvedev, D. I. Karpov(2009), "On equations of state in a lattice Boltzmann method", **J.Computers & Mathematics with Applications**, Vol. 58, No. 5, pp. 965-974 .
- [11] X. Shan, H. Chen(1993), "Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components", **J.Physical Review E**, Vol. 47, No. 3, pp. 1815-1819 .
- [12] R. Zhang, H. Chen(2003.), "Lattice Boltzmann method for simulations of liquid-vapor thermal flows", **J.Physical Review E**, Vol. 67, No. 6, pp. 066711.
- [13] A. Hu, L. Li, S. Chen, Q. Liao, J. Zeng(2013), "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, No. 0, pp. 159-163.
- [14] A. Fakhari, M. H. Rahimian(2009), "Simulation of falling droplet by the lattice

- Boltzmann method" , **J.Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Vol. 14, No. 7, pp. 3046-3055 .
- [15] K. Sun, M. Jia, T. Wang(2013), "Numerical investigation of head-on droplet collision with lattice Boltzmann method", **J.International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 58, No. 1–2, pp. 260-275.
- [16] J. Bao, L. Schaefer(2013), "Lattice Boltzmann equation model for multi-component multi-phase flow with high density ratios", **J.Applied Mathematical Modelling**, Vol. 37, No. 4, pp. 1860-1871.
- [17] S. Shen, F. Bi, Y. Guo(2012), "Simulation of droplets impact on curved surfaces with lattice Boltzmann method", **J.International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 55, No. 23–24, pp. 6938-6943.
- [18] X. Zhang(2011), "Lattice Boltzmann implementation for FluidsFlow Simulation in Porous Media, **I.J. Image, Graphics and Signal Processing**, Vol. 4, pp. 39-45 .
- [19] B. Dong, Y. Y. Yan, W. Li, Y. Song(2010), "Lattice Boltzmann simulation of viscous fingering phenomenon of immiscible fluids displacement in a channel", **J.Computers & Fluids**, Vol. 39, No. 5, pp. 768-779 .
- [20] H. Liu, A. Valocchi, Q. Kang, C. Werth(2013), "Pore-Scale Simulations of Gas Displacing Liquid in a Homogeneous Pore Network Using the Lattice Boltzmann Method", **J.Transport in Porous Media** ,Vol. 99, No. 3, pp. 555-580.
- [21] S. Foroughi, S. Jamshidi, M. Masihi(2013), "Lattice Boltzmann method on quadtree grids for simulating fluid flow through porous media: A new automatic algorithm", **J.Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Vol. 392, No. 20, pp. 4772-4786.
- [22] M. H. R. Mohammad Taghilou(2014),"simulation of 2D droplet penetration in porous media using lattice boltzmann method", **J.Modares Mechanical Engineering**, Vol. 13, pp. 43-56 .
- [23] M. Taghilou, M. H. Rahimian(2014), "Investigation of two-phase flow in porous media using lattice Boltzmann method", **J.Computers & Mathematics with Applications**, Vol. 67, No. 2, pp. 424-436.
- [24] Shokri h.(2013), master Thesis, "**Numerical solution of fluid flow and heat transfer in a closed chamber with curved walls using the Lattice Boltzmann Method**", mechanical engineering, shahrood .
- [25] C. Pan, L.-S. Luo, C. T. Miller(2006), "An evaluation of lattice Boltzmann schemes for porous medium flow simulation", **J.Computers & Fluids**, Vol. 35, No. 8–9, pp. 898-909 .
- [26] M. C. Sukop, D. T. Thorne (2006), "**Lattice Boltzmann Modeling An Introduction for Geoscientists and Engineers**", New York: Springer-Verlag.
- [27] D. Yu, R. Mei, L.-S. Luo, W. Shyy (2003), "Viscous flow computations with the method of lattice Boltzmann equation", **J.Progress in Aerospace Sciences**, Vol. 39, No. 5, pp. 329-367 .
- [28] A. Karimipour, A. Hossein Nezhad, A. D’Orazio, E. Shirani(2012)," Investigation of the gravity effects on the mixed convection heat transfer in a microchannel using lattice Boltzmann method", **J.International Journal of Thermal Sciences**, Vol. 54, No. 0, pp. 142-152 .
- [29] A. Salehi-Shabestari, K. Sadeghy, M. Raisee(2012), "On the use of lattice

- Boltzmann model for simulating dean flow of non-Newtonian fluids in curved square ducts", **J.Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Vol. 17, No. 11, pp. 4250-4261 .
- [30] K. Fallah, M. Khayat, M. H. Borghei, A. Ghaderi, E. Fattahi(2012), "Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann simulation of non-Newtonian flows past a rotating circular cylinder", **J. Non-Newtonian Fluid Mechanics**, Vol. 177–178, No. 0, pp. 1-14 .
- [31] A. A. Mohamad (2011), "**Lattice Boltzmann method: Fundamentals and Engineering Applications with Computer Code New York:**" Springer-Verlag.
- [32] S. Succi (2001), "**The lattice Boltzmann equation for fluid dynamics and beyond**", New York: Oxford University PressZ .
- [33] Y. Y. Yan, Y. Q. Zu, B. Dong(2011), "LBM a useful tool for mesoscale modelling of single-phase and multiphase flow", **J. Applied Thermal Engineering**, Vol. 31, No. 5, pp. 649-655 .
- [34] A. A. Mohamad, A. Kuzmin(2010), "A critical evaluation of force term in lattice Boltzmann method, natural convection problem", **J.International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 53, No .65 ,pp. 990-996 .
- [35] N. Xiaobo, S. Xiaowen, C. Hudong(2009), "A Lattice-Boltzmann / Finite-Difference Hybrid Simulation of Transonic Flow", **Aerospace Sciences Meetings in: 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition**, Eds.: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [36] M. Ikeda(2012), Ph.D.Thesis, "**A NOVEL MULTIPLE-PHASE,MULTIPLE-COMPONENT, THERMAL LATTICE BOLTZMANN MODEL**", Mechanical Engineering, Pittsburgh .
- [37] M. C. Sukop, Thorne ,Daniel T. (2006), "**Lattice Boltzmann Modeling**", 1 ed., Florida USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg .
- [38] J. Bao(2010), Ph.D. Thesis, "**High density ratio multi-component lattice Boltzmann flow model for fluid dynamics and CUDA parallel computation**" , Pittsburgh .
- [39] M. Y. T. Inamuro, F. Ogino (1995), "A non-slip boundary condition for lattice Boltzmann simulations", **J.Physics of Fluids** (1994-present), Vol. 7, pp. 2928-2930 .
- [40] Q. Zou, X. He(1997), "On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model", **J.Physics of Fluids** (1994-present), Vol. 9, No. 6, pp. 1591-1598.
- [41] P. Yuan(2005),Ph.D Thesis, "**Thermal lattice Boltzmann two-phase flow model for fluid dynamics**", Pittsburgh .
- [42] J. Latt, B. Chopard, O. Malaspinas, M. Deville, A .Michler (2008), "Straight velocity boundaries in the lattice Boltzmann method", **J.Physical Review E**, Vol. 77, No. 5, pp. 056703.
- [43] J. M. Buick, C. A. Greated(2000), "Gravity in a lattice Boltzmann model", **J.Physical Review E**, Vol. 61, No. 5, pp. 5307-5320.
- [44] N. S. Martys, H. Chen(1996), "Simulation of multicomponent fluids in complex three-dimensional geometries by the lattice Boltzmann method", **J. Physical Review E**, Vol. 53, No. 1, pp. 743-750.

- [45] M. R. kamali(2013), PhD Thesis, "**A Lattice Boltzmann Approach to Multi-Phase Surface Reactions with Heat Effects**", Chemical Engineering, Delft University of Technology.
- [46] P. K. JAIN(2010), Phd. Thesis, "**SIMULATION OF TWO-PHASE DYNAMICS USING LATTICE BOLTZMANN METHOD (LBM)**", Nuclear Engineering, Illinois .
- [47] National, I. o. S. a. Technology(2004)," NIST/ASME Steam Properties".
- [48] S. Gong, P. Cheng(2012), "Numerical investigation of droplet motion and coalescence by an improved lattice Boltzmann model for phase transitions and multiphase flows", **J.Computers & Fluids**, Vol. 53, No. 0, pp. 93-104 .
- [49] a. salehi(2014), Phd Thesis "**Numerical study of heat transfer in a channel with fiber forms-porous media using Lattice Boltzmann Method**", mechanical engineering, amir kabir university of technology.
- [50] H. Cho, N. Jeong, H. J. Sung(2009), "Permeability of microscale fibrous porous media using the lattice Boltzmann method", **J. Heat and Fluid Flow**.
- [51] A. Tamayol(2011), Ph.D Thesis, "**Micro/Macroscopic Fluid Flow in Open Cell Fibrous Structures**", Faculty of Applied Science, Simon Fraser University.
- [52] K. Yazdchi, S. Srivastava, S. Luding(2012), "Micro–macro relations for flow through random arrays of cylinders", **J.Composites Part A**, Vol. 4 ,No. 11, pp. 2007-2020.
- [53] A. Nabovati, E. W. Llewellyn, A. C. M. Sousa(2009), "A general model for the permeability of fibrous porous media based on fluid flow simulations using the lattice Boltzmann method", **J.Composites Part A**, Vol. 40, No. 6–7, pp. 860-869.
- [54] R. Lenormand, E. Touboul, C. Zarcone(1988), "Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media", **J. Fluid Mechanics**, Vol. 189, No. -1, pp. 165-187.
- [55] C. Zhang, M .Oostrom, T. W. Wietsma, J. W. Grate, M. G. Warner (2011), "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 ,No. 8, pp. 3493-3505.
- [56] H. Huang, J.-J. Huang, X.-Y. Lu (2014), "Study of immiscible displacements in porous media using a color-gradient-based multiphase lattice Boltzmann method", **J.Computers & Fluids**, Vol. 93, pp. 164-172.

Abstract:

In this thesis, simulation of single and multi-components, multi-phase flows with lattice Boltzmann method (chan & chen model) are discussed. In the first part, we focus on developing of chan & chen model to simulate flows with high density ratios. To achieve this goal non-ideal equation of state such as Redlich-Kwong, Carnahan-Starling and Peng-Robinson are used. The results of the use of different equations of state, in terms of spurious currents are illustrated and the coexistence curves obtained from the simulations are compared with the theoretical curves predicted by the Maxwell equal-area construction. All the equations of state have better results than chan& chen equation of state in decreasing spurious currents and receiving high density ratio. To validate the written code and show the capabilities of the developed method in simulation of multi-phase fluids with high density ratios, several two phase physics such as coalescence of two droplets and free fall of a drop on the surface with different wettability property are simulated; results were according to the previous ones that were done by other researchers. Furthermore, penetration pattern and rate of droplet in layered porous media with hydrophilic and hydrophobic surfaces is studied with R-K equation of state. The influences of porosity and hydrophilicity property of surface were investigated.

In second part, simulation of multi component multi phase flows with a different approach has been done; the concentration is on a specific issue, drop penetration into the porous medium. Porous medium has unique characteristics; it is generated by locating square obstacles randomly that the porosity is controllable in each layer. In this study, the regime of drop penetration in layered porous medium is investigated by using phase diagram and viscous fingering and capillary fingering regimes are observed and studied. The effect of porosity and hydrophilic/hydrophobic surface on penetration rate and penetration pattern is studied. The results show in hydrophobic situation rate of penetration for porosity more than 0.75 is higher, so that penetration rate in hydrophobic situation is considered as ideal situation. In that case fluid just pass the cavities like fingers and go ahead in vertical direction so the pattern of penetration is finger type, as in hydrophilic one the fluid go ahead colony and because of penetration in cross direction, the rate of penetration is lower. The pattern of penetration is piston-type regime. Then, some solution is given to close the penetration rate to ideal one; So, moreover change the porosity layer, a new parameter has been

defined as hydrophobicity coefficient which could be adjusted in different layer. The effect of layers with different hydrophobicity coefficient on penetration rate and pattern is considered. The comparison between results show there are the layout of porosity layer and hydrophobicity coefficient that make the penetration rate close to ideal condition. By splitting the layers in some parts and adjusting this coefficient the direction of fluid was determined and the fluid is guided in specified path, which has a lot important in oil exploitation, fuel cell industry, enviromental issues like penetration of rain water in soil and to prevent sedimentation in chimneys and tubes and i.e.

Key words: lattice Boltzmann method, multiphase flow, fluid penetration, porous medium.



University of Shahrood
Faculty Mechanical engineering

**Investigation of penetration and routing of drop and liquid film in
layered porous media**

Hanieh salehabadi

Supervisor(s):
Mohammad hasan keyhani
Mohsen Nazari

September 1394