



پدیده شناسی رفتار قطره عبورکننده از یک محیط متخلخل در مقیاس حفره به روش شبکه بولتزمن

ابوالفضل امیری هزازه^۱، محمدرضا سلیمی^{۲*}، محمد طیبی رهنی^۲

^۱دانشکده فنی مهندسی، آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

^۲دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ مرداد ۱۳۹۵
بازنگری: ۴ بهمن ۱۳۹۵
پذیرش: ۱ خرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۷ خرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

محیط متخلخل
مقیاس حفره
جریان دوفاز
قطره
روش شبکه بولتزمن

چکیده: مطالعه جریان سیالات تک فاز و چند فاز در محیط متخلخل هم در طبیعت و هم در صنایع از اهمیت بالایی برخوردار است و مورد توجه طیف وسیعی از محققین قرار دارد. به طور خاص، اندرکنش قطرات با سطوح متخلخل در بسیاری از فرآیندها مانند اسپری برگ‌های گیاهان با آفت‌کش‌ها، چاپگرها، نفوذ باران و آب‌های سطحی به خاک کاربرد وسیعی دارد. هدف اصلی این پژوهش بررسی اثرات اندرکنش قطرات با یک محیط متخلخل است. قطرات از نظر ابعادی هم مقیاس با ابعاد حفره‌های محیط متخلخل هستند که در مواردی همچون نفوذ قطراتی با سایز خاص در بسترهای سنگی و بحث فیلترینگ قطرات کاربرد دارند. در این پژوهش محیط متخلخلی که متشکل از موانع مربع شکل با ضریب تخلخل ۰/۸ بوده، در معرض یک جریان دوفاز قرار می‌گیرد. اعداد بدون بعد مؤثر فیزیکی مذکور عدد رینولدز، عدد کاپیلاری و آنسرج می‌باشند. در این پژوهش مقادیر فشار بی بعد و آنسرج مورد بررسی ۰/۱۹-۰/۷۶ می‌باشند. فاکتورهای مرتبط با قطره و فاز زمینه (خواص سیالی)، مانند تنش سطحی و نسبت چگالی قطرات در کنار خصوصیات جریان (مانند فشار وارده) بسیار مؤثر بوده و تنوعی از حالات شکست قطرات را به وجود می‌آورد که در قالب مطالعه جامع پارامتریک مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. انواع حالات شکست قطره، طبقه‌بندی شده و در قالب تصاویر شاخص هر حالت، ارائه می‌شوند. در عین حال، تفکیک این حالات در نمودار رینولدز-آنسرج نیز (به عنوان یک نقشه رفتار شناسی شکست قطره بر حسب دو عدد بدون بعد و فشار وارده) صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته قابلیت پیش بینی رفتار قطرات در محیط متخلخل را به کمک نمودارهای ارائه شده، در کنار مقایسه نسبی تأثیر پارامترهای مؤثر را امکان‌پذیر می‌سازند. همچنین، روش شبکه بولتزمن که در محیط متخلخل و جریان‌های چندفازی قابلیت و انعطاف‌پذیری بالایی نشان داده، مورد استفاده قرار گرفته است.

۱- مقدمه

مطالعه جریان در یک محیط متخلخل همواره مرکز توجه بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته بوده است. در حقیقت، در طبیعت و تکنولوژی بسیاری از پدیده‌های موجود به نحوی شامل محیط‌های متخلخل می‌شوند. فیلتراسیون آب در سنگ‌ها، جریان سیالات در میان سنگ‌های زیرزمین و سفره‌های زیرزمینی مثال‌های مشخصی از فیزیک مذکور می‌باشند. در مهندسی شیمی، سنگ‌های یک میدان نفتی می‌توانند به عنوان یک محیط متخلخل در نظر گرفته شوند که دارای فضاهای خالی بوده و یکپارچگی و نفوذ ناپذیری یک ماده معمول را ندارند. در این حوزه از پژوهش، درک رفتار سیالات در مخازن طبیعی، شناخت مقدار نفت یا مشتقات نفتی بازآوری شده از پارامترهای فنی بوده و بایستی در طراحی یک سیستم استخراجی در نظر گرفته شوند. مطالعه جریان سیالات دوفازی در مخازن نفتی موضوع پژوهش‌های وسیعی بوده است [۱-۲] و به دلیل این که بیشترین توجه را به توسعه تئوری‌های مرتبط با محیط متخلخل داشته است، حوزه کاربردی به شمار می‌رود.

از کاربردهای امروزی‌تر در رابطه با تئوری‌های مرتبط با محیط متخلخل، کاربرد در مهندسی انرژی، مطالعه جریان دوفاز از میان الکترودهای پیل‌های سوختی را می‌توان نام برد [۳]. در بیوتکنولوژی، درختان و گیاهان می‌توانند

آب را از طریق ساختارهای حفره‌ای درون خود به واسطه خاصیت مویبگی بالا بکشند و انتقال دهند. علاوه بر این، بسیاری از غشاهای بیولوژیکی می‌توانند در زمره یک محیط متخلخل به شمار آیند که توضیح و دلیلی برای رشد تئوری‌های مرتبط با محیط متخلخل در حوزه بیوتکنولوژی است [۴-۵]. بنابراین اندرکنش جریان دوفاز با محیط متخلخل کاربرد وسیعی در صنایع مختلف و طبیعت دارد و در این زمینه به مطالعات پایه‌ای بیشتر برای درک پدیده‌ها و فیزیک حاکم بر آن‌ها نیاز است. از این رو، موضوع تحقیق حاضر بررسی دقیق اندرکنش قطرات با ساختار داخلی محیط متخلخل و شناسایی اعداد بدون بعد مرتبط با آن می‌باشد.

هدف از مطالعه محیط متخلخل در اغلب مسائل مهندسی، به دست آوردن جزئیات دقیق و توصیف حفره‌های موجود در محیط متخلخل نیست زیرا این مقیاس از نظر تجربی و آزمایشگاهی قابل دسترسی نیست (عملی نیست)، بلکه هدف تمرکز بر روی شاخص‌ها در مقیاس ماکرو و تعریف کمیت‌های ماکروسکوپیک بر این اساس می‌باشد.

رابطه داری فقط برای سیالات نیوتنی در دامنه خاصی از عدد رینولدز معتبر بوده (رژیم داری) و براساس رویکردی با مقیاس ماکرو می‌باشد. این رابطه بیان می‌کند وقتی یک سیستم به حالت تعادل می‌رسد، دبی جرمی یک سیال درون محیط متخلخل متناسب با نسبت اختلاف فشار و ویسکوزیته دینامیکی سیال تغییر می‌کند. ثابت تناسب این رابطه مهم‌ترین کمیت در

محیط متخلخل است که تراوایی نامیده می‌شود. به عبارتی ساختار حفره‌ها خود را در سطح ماکروسکوپی به نمایش می‌گذارد تا حدی که تراوایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تراوایی یک محیط متخلخل تا حد زیادی به اندازه، توزیع و شیوه اتصال حفره‌های تشکیل دهنده یک محیط متخلخل بستگی دارد. در مورد جریان‌های چندفازی در محیط متخلخل نیز رابطه داری می‌تواند به وسیله مفهوم تراوایی نسبی توسعه پیدا کند که تلاشی در جهت وارد کردن اثرات حضور سیالات دیگر (در قالب فاز یا گونه دیگر) محسوب می‌شود. هابرت مشاهده کرد انحراف از قانون داری در یک عدد رینولدز در حدود ۱ (بر اساس اندازه دانه‌های تشکیل دهنده محیط متخلخل) اتفاق می‌افتد در حالی که پدیده توربولانس تا رینولدز حدود ۶۰۰ اهمیت پیدا نمی‌کند. جهت مدل‌سازی اصلاح معادله داری برای جریان سیالات با دبی بالا توسط عبارت مرتبه دوم فورچمیر اعمال می‌شود. با این مقدمه رژیم‌های جریان درون محیط متخلخل به رژیم آرام که شامل رژیم‌های داری و غیر داری و رژیم‌های آشفته طبقه بندی می‌شوند که بر اساس عدد رینولدز طبقه بندی می‌شوند. در این مطالعه رژیم جریان غیر داری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به طور کلی دو رویکرد از نظر مقیاس در برخورد با محیط متخلخل وجود دارد. رویکرد اول مدل‌سازی به وسیله معادلات داری یا معادلات داری با ترم‌های اصلاح شده مانند داری-فورچمیر، داری-برینکمن (استفاده از مدل‌سازی و معادلات متوسط‌گیری شده) می‌باشد که در پاراگراف‌های قبل به این رویکرد اشاره شد. رویکرد دوم که شبیه‌سازی کامل بوده و هیچ مدل‌سازی در آن صورت نمی‌گیرد که تحت عنوان برخورد با محیط متخلخل در مقیاس حفره‌ها شناخته می‌شود و مبنای مطالعه فعلی، این رویکرد می‌باشد. لازم به ذکر است که روش شبکه بولتزمن به دلیل توانایی آن در مواجهه با هندسه‌های پیچیده از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای مطالعه جریان در محیط متخلخل در مقیاس حفره‌ها است.

در این بخش مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه جریان‌های تک‌فازی و چندفازی درون محیط متخلخل با استفاده از روش شبکه بولتزمن (مقیاس حفره‌ها) خواهیم داشت. پن و همکاران [۶]، روش شبکه بولتزمن را برای مطالعه تراوایی یک آرایش مربعی و یک آرایش تصادفی از کره‌ها به همراه عبارت‌های مختلف برخورد مورد استفاده قرار دادند. لازم بذکر است که مطالعات آنها به صورت تک فاز صورت گرفت. کاربرد استفاده از یک محیط متخلخل تولید شده به روش تصادفی به طور کلی، در بسیاری از مقالات مرسوم است. برای نمونه آتوسالمی [۷] در سال ۲۰۰۵، از این روش برای مطالعه تراوایی سنگ‌ریزه‌های ساخته شده از ماسه سنگ استفاده کرد. در حالت دوفاز نیز، گانستسن و رتمن [۸] به بررسی عددی یک سیال دوفازی درون محیط متخلخل در حالت سه بعدی پرداختند. مطالعه آنها به بررسی تحت نیروی ویسکوز بالا و پایین و حالاتی با درصد اشباع مختلف معطوف بود. آنها نتایج خود را در قالب دیگرام‌هایی جهت طبقه بندی رفتار جریان دو فاز درون محیط متخلخل ارائه کردند.

فرئول و رتمن [۹] به بررسی جریان تک فاز و دو فاز از میان بستر یک محیط متخلخل متشکل از ماسه سنگ به صورت سه بعدی پرداخته و حساسیت محاسبه تراوایی نسبت به سایز نمونه، تفکیک شبکه حل و انتخاب پارامترهای مدل را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. مارتیس و چن [۱۰] به بررسی یک جریان چندگونه‌ای در حالت سه بعدی در بستر متشکل از ماسه سنگ با مدل شان و چن پرداختند. در این مطالعه جایگزینی یک سیال با سیال دیگر به خوبی مدل شد و تراوایی نسبی برای فازهای ترشده مختلف محاسبه شد که با مقادیر تجربی به خوبی مطابقت داشت. تولکه و همکاران [۱۱] به بررسی یک جریان چند فازی درون محیط متخلخل با ویسکوزیته و نسبت چگالی متغیر بر اساس مدل پیشنهادی گانستسن پرداختند. آنها محدودیت‌ها و مشکلات روش شبکه بولتزمن در مسائل واقعی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه شبیه‌سازی اولیه روی کاربردهایی با مقیاس بزرگ واقعی از آب-هوا و راکتور بچ آب-آب صورت گرفت.

لین و همکاران [۱۲] به بررسی یک محیط متخلخل واقعی تولید شده به وسیله روش ماکروتوموگرافی اشعه ایکس به کمک مدل هی پرداختند و از این مدل برای شبیه‌سازی فرآیند تصفیه و عبور سیال دوفازی از میان یک بستر متخلخل پرداختند. تنش‌های سطحی متفاوت و نسبت چگالی‌های پایین در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. فرانک و پری [۱۳] به مطالعه برخورد یک قطره به یک سطح متخلخل در ضرایب تخلخل مختلف و زاویای تماس مختلف پرداختند. نتایج این مطالعه یک رفتار توانی نسبت به زمان برای شعاع ترشدگی ناحیه متخلخل را نشان می‌دهند که ثوابت آن با تغییر ضریب تخلخل تغییر می‌کنند.

هوانگ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۹، با مدل تک جزئی شان و چن به مطالعه وابستگی تراوایی نسبی به پارامترهای مختلف از قبیل زاویه تماس و نسبت ویسکوزیته در یک آرایش تصادفی از مربع‌های دو بعدی پرداختند. مدل دو جزئی شان و چن پیش‌تر توسط پن و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۰۴ برای به دست آوردن منحنی اشباع فشار کاپیلاری و مقایسه با نتایج تجربی به کار رفته است. هاوو و چنگ [۱۶] در سال ۲۰۱۰ روش انرژی آزاد برای بررسی تراوایی نسبی یک مجموعه از کره‌ها و یک لایه نفوذ گازی برای کربن استفاده کردند.

تب و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش شبکه بولتزمن به بررسی رفتار دینامیکی آب کندانس شده و بخار در یک غشای الکترولیت پلیمری پیل سوختی در حالت دو بعدی پرداختند. هوانگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۴ به مطالعه جریان سیال دو فازی درون محیط متخلخل به کمک روش شبکه بولتزمن و مدل گرادیان رنگ با زمان آسایش چندگانه پرداختند. هوان و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۱ به مقایسه سه مدل انرژی آزاد، شان چن و رتاهام کلر و بررسی عملکرد از نظر دقت و پایداری آنها در محیط متخلخل پرداختند. مطالعه آنها نشان داد مدل رتاهام کلر و انرژی آزاد دقت بالایی در برخورد با جریان دوفازی هم‌سو و غیر هم‌سو با نسبت ویسکوزیته بالا درون محیط متخلخل از خود نشان می‌دهد. در عین حال، از

شروط مرزی مورد استفاده در بالا-پایین و چپ-راست تناوبی (پریودیک) در نظر گرفته شده‌اند. رژیم جریان با توجه به عدد رینولدز جریان درون محیط متخلخل مشخص می‌شود. سیال تحت تأثیر گرادیان فشاری در راستای افقی قرار می‌گیرد که به صورت نیروی حجمی وارد محاسبات شده است. دامنه عدد رینولدز در محدود رژیم جریان داری نیست. خواص سیال لزجت سینماتیکی هر دو فاز برابر فرض شده‌اند ولی چگالی‌های آن‌ها متفاوت هستند. ویسکوزیته سیال 0.166666 در نظر گرفته شده و چگالی فاز زمینه برابر ۱ است. در این مطالعه دو نسبت چگالی $1:3$ و $1:2$ مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در هر دو حالت چگالی فاز اصلی (زمینه) ۱ بوده و این چگالی قطره است که تغییر می‌کند. در این پژوهش مقادیر فشار بی بعد وارده، 0.000108 ، 0.000144 و 0.000180 و محدوده آنسرج مورد بررسی 0.19 - 0.76 می‌باشند.

به طور کلی فرضیات مورد استفاده در این مطالعه شامل موارد زیر می‌باشند: ۱- جریان غیرقابل تراکم، ۲- جریان ایزوترمال، ۳- سیال نیوتنی، ۴- تنش سطحی ثابت، ۵- از اثرات چسبندگی دیواره صرف نظر شده و ۶- گرادیان فشار به صورت نیروی حجمی وارد شده است.

با فرضیات فوق به شبیه‌سازی برخورد قطره‌های هم مقیاس با حفره‌های محیط متخلخل در مقیاس حفره‌ها در رژیم جریان غیرداری و در قالب یک مطالعه پارامتریک می‌پردازیم که بنابر اطلاعات نویسنده در قالب پژوهش مشابه دیگری انجام نگرفته است.

اعداد بدون بعد مورد استفاده در مسئله حاضر، رینولدز، کاپیلاری و آنسرج می‌باشند. در مجموع ۶۰ شبیه‌سازی در قالب دو نسبت چگالی، سه مقدار گرادیان فشار و ده مقدار عدد آنسرج انجام گرفته است. اعداد بدون بعد مورد استفاده در پژوهش فعلی شامل موارد زیر می‌باشند:

$$Re = \frac{\rho U D_{Pore}}{\mu} \quad (1)$$

در این رابطه U سرعت متوسط سیال در یک سطح مقطع، D قطر حفره ورودی جریان، ρ چگالی و μ ویسکوزیته دینامیکی سیال می‌باشند. ضریب تخلخل

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V_{total}} \quad (2)$$

ضریب تخلخل محیط متخلخل نسبت حجم (در حالت دو بعدی سطح) حاوی سیال (V_f) به حجم (سطح) کل (V_{total}) می‌باشد. عدد کاپیلاری

$$Ca = \frac{U \mu}{\sigma} \quad (3)$$

در این رابطه U سرعت متوسط سیال در یک سطح مقطع، μ ویسکوزیته دینامیکی فاز زمینه و σ تنش سطحی بین دو فاز می‌باشند. این عدد دینامیک

نظر دقت و پایداری این دو مدل بسیار بهتر از مدل شان و چن عمل می‌کنند. لیو و همکاران [۲۰] از روش شبکه بولتزمن و مدل لی برای جریان دو فازی در محیط متخلخل استفاده کردند.

لطیفیان و همکاران [۲۱] به بررسی تبخیر قطره در برخورد با یک محیط متخلخل پرداختند و اعداد بدون بعد مرتبط با جریان چندفازی و انتقال حرارت در محیط متخلخل را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در نتایج خود پروفیل‌های دما، جریان و انتقال جرم را مورد بررسی قرار دادند. صالح آبادی و همکاران [۲۲] به بررسی تأثیر دما و تغییر معادلات حالت مختلف پرداخته در مدل شبه پتانسیل، در محیط متخلخلی با اختلاف مقیاس بالا بین محیط متخلخل و قطره پرداختند و پارامترهایی مانند آب‌دوستی، نسبت چگالی را مورد بررسی قرار دادند.

توجه شود که در هیچکدام از تحقیقات فوق، رفتار منفرد یک قطره هم مقیاس با حفره‌های تشکیل دهنده محیط متخلخل مطالعه نشده است و در تمامی این تحقیقات شعاع قطرات بسیار بیشتر از اندازه موانع هستند. هم مقیاس نبودن ابعاد قطرات و موانع سبب شده تا قطره‌ها به سادگی توسط موانع شکسته شده و در نتیجه تنوع بسیار کمی در رفتار شکست قطرات مشاهده شود. از این رو، در تحقیق حاضر مقیاس طولی قطرات و موانع محیط متخلخل از یک مرتبه در نظر گرفته شده که نتیجه آن تنوع بیشتر در رفتار شکست قطرات در محیط متخلخل است. به عبارت دیگر، هم مقیاس بودن قطرات و موانع در محیط متخلخل سبب وقوع پدیده‌های متنوعی شده که در تحقیق حاضر گزارش می‌شوند. علاوه بر این، در این تحقیق تلاش شده تا اعداد بی‌بعدی با شاخص‌های قابل اندازه‌گیری در مقیاس ماکروسکوپی تعریف شوند تا از نظر مهندسی معنی‌دار باشند (برای نمونه مقیاس سرعت برابر سرعت متوسط در محیط متخلخل در نظر گرفته شده). این کار با هدف تعمیم بخشیدن و عمومیت دادن به نتایج به دست آمده انجام گرفته است. براین اساس، نمودارهای شاخصی که می‌توانند برای رفتاری شناسی دینامیک قطره در محیط متخلخل بسیار کارآمد باشند استخراج شده‌اند.

۲- معرفی مسئله

این مطالعه به بررسی جریان چند فاز درون محیط متخلخل اختصاص دارد که به دلیل آرایشی تکرار شونده از فیزیک و هندسه، دامنه محاسباتی می‌تواند تا هندسه شکل ۱ کاهش یابد که نشان‌دهنده یک حجم معرف^۱ می‌باشد. این امر منجر به مطالعه ساده‌تر محیط متخلخل با حفظ دقت مورد انتظار می‌شود.

هندسه محیط متخلخل مورد مطالعه، متشکل از موانع مربعی است که از تقارن نسبت به مرکز دامنه محاسباتی برخوردار هستند و دارای ضریب تخلخل 0.8 می‌باشد. طرح‌واره‌ای از هندسه نمونه در شکل ۱ مشاهده می‌شود. طول و عرض کلی دامنه محاسباتی به ترتیب 201 و 201 واحد لیس می‌باشند.

1 Representative Elementary Volume (REV)

اساساً ترجمه قوانین بقای جرم و قانون دوم نیوتن برای سیال با فرض پیوستگی سیال هستند. به دلیل طبیعت پیچیده دینامیک سیالات، حل تحلیلی برای این معادلات دیفرانسیل جزئی فقط در مواردی با ساده‌سازی زیاد، قابل دست‌یابی است.

به طور کلی حل معادلات ناوبراستوکس فقط از طریق عددی امکان پذیر هستند. بنابراین، نقطه شروع محاسبات استاندارد دینامیکی یک سیال، گسسته‌سازی معادلات ناوبراستوکس است. به عنوان مثال، این گسسته‌سازی به کمک روش‌های حجم محدود، تفاضل محدود و المان محدود صورت می‌گیرند. با این وجود به نظر می‌رسد این روش‌ها در برخورد با جریان سیال در محیط متخلخل دچار مشکل می‌شوند. به طور خاص، مشکل این مدل‌ها در رفتار با هندسه پیچیده یک محیط متخلخل می‌باشد.

علاوه بر این، مطالعه جریان‌های چندفازی نیاز به الگوریتم تعقیب سطح مشترک فازی دارند [۲۵] که نیازمند روش‌های عددی پیچیده است که مخصوصاً وقتی در هندسه‌های پیچیده قرار گیرند، پیچیدگی آن دو چندان می‌شود. در مقابل، روش شبکه بولتزن در هر دو فیزیک مذکور قابلیت بالایی از خود نشان می‌دهد. در این بین، مدل‌های مختلفی در این روش در برخورد با جریان‌های چندفازی و چند گونه‌ای تعریف شده است که مدل مورد استفاده در این پژوهش، مدل ارائه شده توسط هی (از مدل‌های جدیدی که بر اساس تئوری انرژی جنبشی بوده و از انسجام بالایی برخوردار است) می‌باشد.

در مدل لو و مدل هی شان دولن اختلاف چگالی بالا در مجاورت مرز سطح مشترک منجر به ناپایداری عددی در محاسبات می‌شود. برای غلبه بر این مشکل هی و همکاران^۱ مدلی برای شبیه‌سازی فیزیک‌های دوفازی که دوفاز از یک نوع (گونه) می‌باشند (مانند آب و بخار) پیشنهاد دادند. در این مدل از دو تابع توزیع استفاده می‌شود. تابع توزیع اول مانند تابع استاندارد توزیع ذرات^۲ دوفاز عمل می‌کند ولی به جای محاسبه مستقیم چگالی، از تابع مشخصه^۳ ϕ (این تابع توزیع مشابه معادله بقای ردیابی سیال در روش وی-او-اف^۴ است) استفاده می‌کند. تابع توزیع دوم تابع توزیع فشار^۵ است که برای محاسبه فشار از ممان مرتبه صفر^۶ آن استفاده می‌کند. در این مدل همچنین از نیروهای جاذبه بین ذره‌ای استفاده استفاده می‌شود که کاملاً متفاوت از مدل شان چن است.

شبیه‌سازی جریان سیال بر اساس تابع توزیع^۷ دینامیکی (تابع توزیع تعادلی بولتزن) است. دینامیک مرز مشترک^۸ که شامل جداسازی فازها و

جریان چند فاز، به طور دقیق‌تر تأثیر فاز زمینه بر روی فاز اولیه (قطره) را بیان می‌کند.
عدد آنسرج

$$ohn = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma D}} \quad (۴)$$

در این رابطه μ ویسکوزیته دینامیکی قطره، σ تنش سطحی بین دو فاز، ρ چگالی قطره، D قطر اولیه قطره می‌باشند. این عدد به نوعی معرف مقاومت قطره (ذات منفرد قطره) به طور منفک از اثرات جریان را بیان می‌کند.

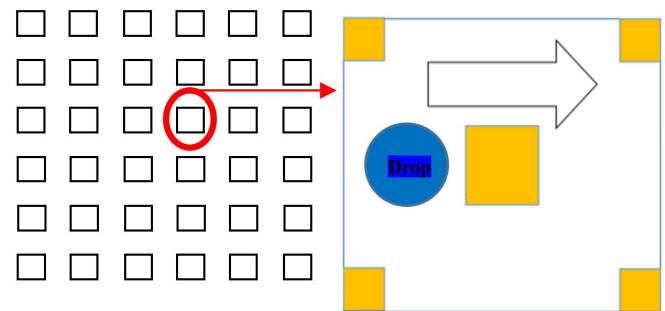


Fig. 1. Schematic view of problem

شکل ۱: طرح‌واره‌ای از هندسه پژوهش

۳- روش عددی

به عنوان روش عددی، روش شبکه بولتزن، مدل هی [۲۳]، مدل D2Q9 دو بعدی با ۹ بردار سرعت با تقریب BGK مورد استفاده قرار گرفته است.

در سال‌های اخیر روش شبکه‌ای بولتزن به عنوان یک روش مناسب در شبیه‌سازی جریان سیالات مطرح شده و استفاده از آن گسترش یافته است [۲۴]. بر خلاف روش‌های مرسوم عددی که بر پایه جداسازی معادلات پیوسته میکروسکوپی می‌باشند، روش شبکه‌ای بولتزن بر پایه مدل‌های میکروسکوپی و معادلات جنبشی میکروسکوپی می‌باشد که به منظور ایجاد تمایز از دو روش مذکور دیدگاه حاکم بر آن را میکروسکوپی می‌نامند. ایده اصلی در روش شبکه‌ای بولتزن این است که مدل‌های جنبشی ساده شده‌ای ایجاد کند که با استفاده از اصول اساسی فیزیک میکروسکوپی، خصوصیات میکروسکوپی به دست آمده از این روش، معادلات مربوط به متغیرهای میکروسکوپی را ارضا نمایند.

روش شبکه‌ای بولتزن بر پایه معادله بولتزن و روش شبکه گاز اوتوماتا بنا شده است. به منظور رفع مشکلات روش شبکه گاز اوتوماتا، روش شبکه‌ای بولتزن جایگزین مناسبی می‌باشد. در این روش به جای مشخص نمودن آرایش ذرات مجازی، احتمال حضور این ذرات در مسیرهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این امر علاوه بر حفظ کلیه محاسن روش شبکه گاز، معایب آن را ندارد. در مقیاس پیوسته و میکروسکوپی، معادلات حاکم بر دینامیک سیالات، معادلات ناوبراستوکس هستند. معادلات ناوبراستوکس

- 1 He Chen Zhang
- 2 Standard Particle Distribution Functions
- 3 Index Parameter
- 4 VOF
- 5 Pressure Distribution Function
- 6 Zero Order Moment
- 7 Distribution Function
- 8 Interface

$$\rho RTu = \int \xi g d \xi. \quad (11)$$

برای محاسبه خصوصیات فیزیکی مانند چگالی و لزجت از تابع مشخصه راه‌های مختلفی وجود دارد. در این پژوهش از روابط (۱۲) برای محاسبه‌ی چگالی و لزجت استفاده شده است.

$$\begin{aligned} v(\phi) &= v_l + \frac{\phi - \phi_l}{\phi_h - \phi_l} (v_h - v_l), \\ \rho(\phi) &= \rho_l + \frac{\phi - \phi_l}{\phi_h - \phi_l} (\rho_h - \rho_l). \end{aligned} \quad (12)$$

۳-۲- گسسته سازی معادلات

در ابتدا فضای سرعت میکروسکوپی به محیطی از سرعت‌های معین بصورت زیر گسسته می‌شود [۲۷]:

$$e_\alpha = \begin{cases} 0, & \alpha = 0, \\ (\cos[(\alpha-1)\pi/2], \sin[(\alpha-1)\pi/2])c & \alpha = 1, 2, 3, 4, \\ \sqrt{2}(\cos[(\alpha-5)\pi/2 + \pi/4], \sin[(\alpha-5)\pi/2 + \pi/4])c & \alpha = 5, 6, 7, 8. \end{cases} \quad (13)$$

و در حل مقدار dx را می‌توان مقدار پایه در نظر گرفت. بنابراین، $\sqrt{3RT} = c = dx/dt$ یا $RT = C_s^2 = C^2/3$ که در آن C_s سرعت صوت سیال است. در این رابطه سرعت $c = (\sqrt{3RT})^{1/2}$ است. با این گسسته‌سازی برای توابع توزیع به صورت زیر داریم:

$$\begin{aligned} f_\alpha(x, t) &= \omega_\alpha f(x, e_\alpha, t), \\ g_\alpha(x, t) &= \omega_\alpha g(x, e_\alpha, t), \\ w_0 &= 4/9, w_a = 1/9, \text{ for } a=1, 2, 3, 4, w_a = 1/36 \text{ for } a=5, 6, 7, 8. \end{aligned} \quad (14)$$

در نتیجه، توابع توزیع تعادلی زیر حاصل می‌شوند:

$$\begin{aligned} f_\alpha^{eq} &= \omega_\alpha \phi \left[1 + \frac{3e_\alpha u}{c^2} + \frac{9(e_\alpha u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right], \\ g_\alpha^{eq} &= \omega_\alpha \left[p + \rho \left(\frac{3e_\alpha u}{c^2} + \frac{9(e_\alpha u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

برای صریح باقی ماندن روش، متغیرهای زیر را معرفی می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \bar{f}_\alpha &= f_\alpha + \frac{(e_\alpha - u) \cdot \nabla \psi(\phi)}{2RT} \Gamma_\alpha(u) \delta_i, \\ \bar{g}_\alpha &= g_\alpha - \frac{1}{2} (e_\alpha - u) \cdot [\Gamma_\alpha(u)(F_s + G) - (\Gamma_\alpha(u) - \Gamma_\alpha(0))] \end{aligned} \quad (16)$$

که در آن، δt گام زمانی است و $\Gamma_\alpha(u)$ به صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$\Gamma_\alpha(u) = \omega_\alpha \left[1 + \frac{3e_\alpha u}{c^2} + \frac{9(e_\alpha u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right]. \quad (17)$$

تابع توزیع g تنها سرعت و فشار را نتیجه می‌دهد. برای جریان تراکم

کشش سطحی^۱ می‌باشد، با استفاده از تعاملات بین مولکولی^۲ مدل‌سازی شده است. از تابع مشخصه برای ردیابی مرز مشترک بین فازهای مختلف استفاده شده است. تابع توزیع فشار نیز در مقابل تابع توزیع تعادلی منفرد چگالی^۳، تعریف شده است [۲۶].

یک مزیت مدل هی چن زانگ این است که در مقایسه با مدل هی شان دولن پایداری عددی آن افزایش یافته است. این به این خاطر است که ضریب قبل از $\nabla \psi$ (که در نزدیکی سطح مشترک فازها به خاطر اختلاف چگالی بالا می‌رود) برای جریان‌های سیالات با سرعت پایین کوچک است. بنابراین، سفتی معادلات به طور مؤثری کاهش می‌یابد و در عین حال تأثیر خطای عددی در محاسبه تغییرات چگالی به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر می‌شود.

۳-۱- معادلات مدل دوفازی

در این بخش به طور اجمالی روابط این مدل شرح داده می‌شوند. بردارهای سرعت مدل ۹ سرعت دو بعدی D2Q9 با تقریب BGK مورد استفاده قرار گرفته است که معادلات این بخش همگی بر مبنای مرجع [۲۳] می‌باشند و به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} [c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8] = \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

مدل دوفازی هی از دو تابع توزیع بهره می‌برد که تابع توزیع اول تابع g به منظور محاسبه کمیت‌های جریان و تابع توزیع f به منظور ردیابی مرز دو فاز به کار می‌رود. معادلات این دو تابع توزیع به شرح زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} \frac{Df}{Dt} &= -\frac{f - f^{eq}}{\lambda} - \frac{(\xi - u) \cdot \nabla \psi(\phi)}{RT} \Gamma(u), \\ \frac{Dg}{Dt} &= -\frac{g - g^{eq}}{\lambda} - (\xi - u) \cdot [(\Gamma(u)(F_s + G) - (\Gamma(u) - \Gamma(0)) \nabla \psi(\rho))], \end{aligned} \quad (6)$$

و توابع توزیع تعادلی نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} f^{eq} &= \phi \Gamma(u), \\ g^{eq} &= \rho RT \Gamma(u) + \psi(\rho) \Gamma(0), \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن پارامترهای نامعلوم به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Gamma(u) = \frac{1}{(2\pi RT)^{D/2}} \exp \left[-\frac{(\xi - u)^2}{2RT} \right], \quad (8)$$

$$\phi = \int f d \xi, \quad (9)$$

$$p = \int g d \xi, \quad (10)$$

- 1 Surface Tension
- 2 Intermolecular Interactions
- 3 Single Density Distribution Function

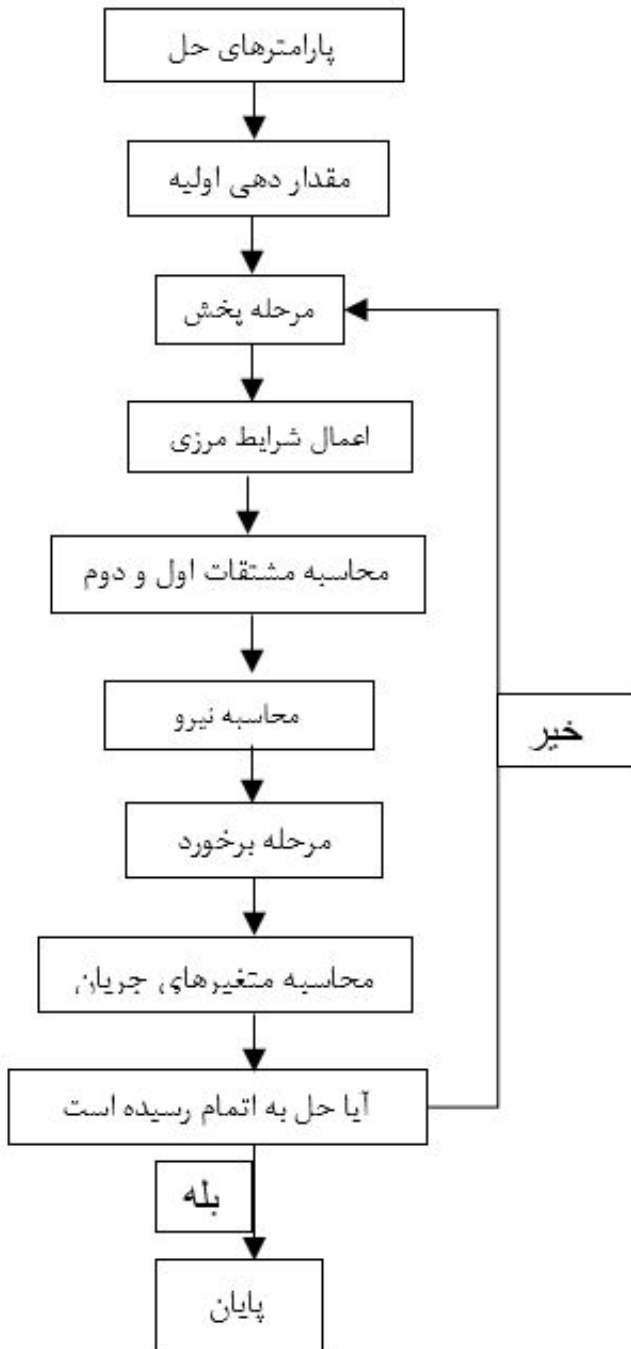


Fig. 2. Solution algorithm

شکل ۲: فلوجارت حل.

نیز مانند فیزیک پژوهش، حضور مرزهای جامد از اهمیت بالایی برخوردار هستند و به طور ملموسی بر فیزیک موردنظر مؤثر می‌باشند و به نوعی یک تشابه میان جریان درون حفره‌های محیط متخلخل و جریان هایگن پوازیه وجود دارد. لازم به ذکر است که مسئله مورد بحث در مقاله از نظر شرایط مرزی دارای شرط مرزی عدم لغزش در تمام مرزهای جامد و شرط پریودیسی در راستاهای مختلف می‌باشد. اعتبارسنجی جریان هایگن پوازیه نیز دارای مرزهای جامد در اطراف سیال است که مستقیماً بر پروفیل جریان دوفاز تأثیر می‌گذارد.

ناپذیر دوفازی^۱، چگالی دور از مرز مشترک دقیقاً مشخص است. تنها کار باقی‌مانده ردیابی مرز مشترک^۲ و در واقع ردیابی اختلاف چگالی دو فاز است تا مرز مشترک ضخامت کمتری داشته باشد. متغیرهای جدید \bar{f} و \bar{g} روابط گسسته جدید (۱۸) را ارضا می‌کنند.

$$\begin{aligned} \bar{f}_\alpha(x + e_\alpha \delta_i, t + \delta_i) - \bar{f}_\alpha(x, t) &= -\frac{\bar{f}_\alpha(x, t) - f_\alpha^{eq}(x, t)}{\tau} \\ &\quad - \frac{(2\tau - 1)(e_\alpha - u) \cdot \nabla \psi(\phi)}{2\tau RT} \Gamma(u) \delta_i, \\ \bar{g}_\alpha(x + e_\alpha \delta_i, t + \delta_i) - \bar{g}_\alpha(x, t) &= -\frac{\bar{g}_\alpha(x, t) - g_\alpha^{eq}(x, t)}{\tau} \\ &\quad - \frac{(2\tau - 1)(e_\alpha - u) \cdot [\Gamma_\alpha(u)(F_s + G) - (\Gamma_\alpha(u) - \Gamma_\alpha(0)) \nabla \psi(\rho)]}{2\tau} \delta_i, \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن، $\tau = \lambda / \delta t$ ضریب آرامش بوده و مقدار آن یک می‌باشد. از روش اختلاف محدود مرتبه دوم برای محاسبه $\nabla \psi$ مطابق رابطه (۱۹) استفاده شده است.

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{3\delta_x} [\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j} + \frac{1}{4}(\psi_{i+1,j-1} + \psi_{i+1,j+1} - \psi_{i-1,j-1} - \psi_{i-1,j+1})] \quad (19)$$

مشخصه‌های ماکروسکوپی از روابط زیر قابل محاسبه‌اند:

$$\begin{aligned} \phi &= \sum \bar{f}_\alpha, \\ p &= \sum \bar{g}_\alpha - \frac{1}{2} u \cdot \nabla \psi(\rho) \delta_i, \\ \rho RT u &= \sum e_\alpha \bar{g}_\alpha + \frac{RT}{2} (F_s + G) \delta_i. \end{aligned} \quad (20)$$

۴- فلوجارت حل

در شکل ۲ فلوجارتی از، فرآیند انجام شده در کد ارائه شده است.

۵- اعتبارسنجی

دو اعتبارسنجی در نظر گرفته شده‌است که انتخاب آن‌ها کاملاً مطابق با رویه موجود در مقالات است. بر اساس مطالعاتی که انجام شده اعتبارسنجی لاپلاس به عنوان اعتبارسنجی اصلی در بسیاری از مقالات مبنا قرار گرفته است.

در برخی از مقالات یک اعتبارسنجی دوم دینامیکی نیز در کنار آزمون لاپلاس استفاده می‌شود مانند سیلندر نوسانی، هایگن پوازیه، برخورد قطره با سطح و غیره. با توجه به این که در این پژوهش حضور موانع محیط متخلخل از اهمیت بالایی برخوردار است، اعتبارسنجی جریان هایگن پوازیه به عنوان اعتبارسنجی مکمل دوم انتخاب شده است چرا که در این نوع اعتبارسنجی

- 1 Incompressible Multiphase Flows
- 2 Interface

نتایج این اعتبارسنجی در شکل ۵ ارائه شده است.

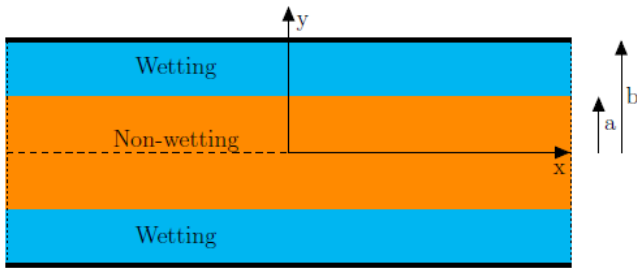


Fig. 4. Schematic view of the Hagen-Poiseuille problem
شکل ۴: شماتیکی از هندسه آزمون جریان هایگن پوازیه

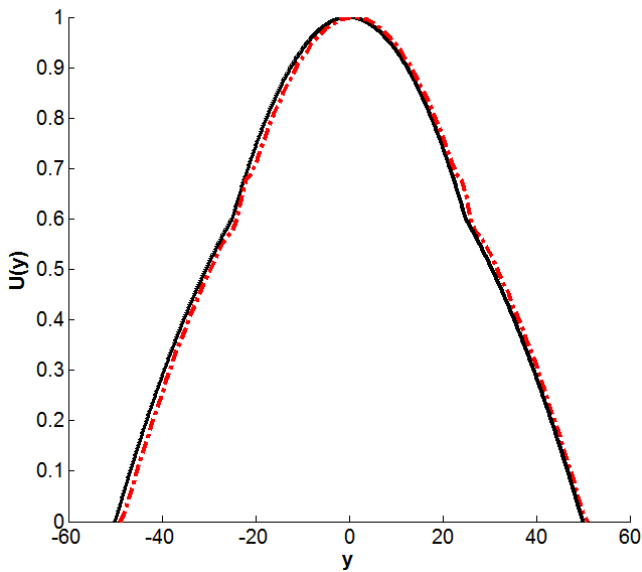


Fig. 5. The result of Hagen-Poiseuille validation
شکل ۵: نتایج اعتبار سنجی هایگن پوازیه

۶- بررسی استقلال از شبکه

از مهم‌ترین مسائل در حل عددی جریان‌های دوفازی توزیع صحیح چگالی و ضخامت مرز مشترک بین قطره و سیال اطراف می‌باشد. در پدیده‌های طبیعی ضخامت سطح مشترک بین دو سیال صفر است، اما در تمامی حل‌های عددی معمولاً چند گره (در اینجا شبکه)، به عنوان مرز مشترک در نظر گرفته می‌شود، زیرا در ردیابی مسیر حرکت سیال، یک گره (شبکه) دارای قدرت تفکیک لازم برای چگالی قطره یا سیال اطراف خود نمی‌باشد. در بسیاری از مطالعات جریان‌های دوفازی که با روش شبکه بولتزمن تحلیل شده، بررسی ضخامت مرز مشترک به عنوان معیاری برای استقلال از شبکه مطرح است [۲۹-۳۲]. در شکل ۶ با مشاهده تأثیر اندازه‌های مختلف شبکه، استقلال حل از شبکه به وضوح مشاهده می‌شود.

۷- نتایج و بحث

عدد کاپیلاری و عدد آنسرج، دو عدد بی بعد اصلی در مطالعه فعلی

علاوه بر این، محققین این حوزه، جریان درون محیط متخلخل با ضریب تخلخل بالا را از نظر رفتاری مقارن با جریان درون یک کانال می‌دانند [۱]. بنابراین، ابتدا اعتبار سنجی قانون لاپلاس و سپس جریان دوفازی هایگن پوازیه، به ترتیب به عنوان اعتبارسنجی استاتیکی و دینامیکی صورت گرفته است که نتایج آن گواهی بر انطباق نتایج حل عددی با حل‌های تحلیلی می‌باشد.

۵-۱- قانون لاپلاس

به عنوان اولین اعتبار سنجی دوفازی، یک قطره منفرد که تحت تأثیر هیچ نیروی خارجی قرار ندارد مورد بررسی قرار می‌گیرد. اختلاف فشار یک نقطه درون قطره و نقطه‌ای پیرامون قطره برای مقادیر مختلف تنش سطحی باید مقدار و الگوی خطی مورد انتظار را داشته و بر اساس رابطه (۲۱) بیان شود. نتایج اعتبار سنجی در شکل ۳ ارائه شده است.

$$P_{out} - P_{in} = \frac{2\sigma}{r} \quad (21)$$

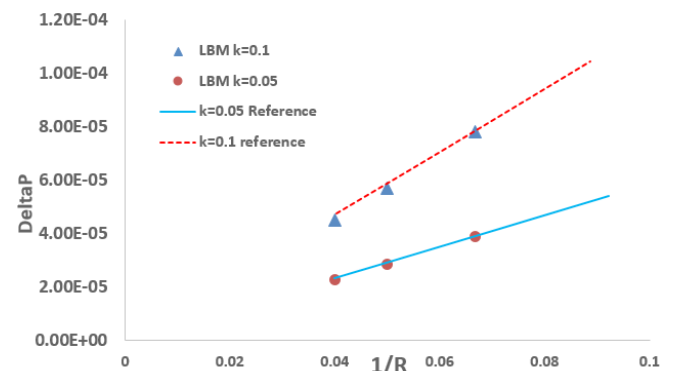


Fig. 3. The result of Laplace validation
شکل ۳: نتایج اعتبار سنجی لاپلاس

۵-۲- جریان هایگن پوازیه

به عنوان یک اعتبارسنجی دینامیکی از نتایج حل تحلیلی برای جریان هایگن پوازیه دوفازی استفاده می‌شود. در این آزمون جریان سیال درون یک کانال با اشباع ۵۰ درصد مطابق شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفته است و پروفیل سرعت به دست آمده با روابط تجربی موجود مورد مقایسه قرار گرفته است. برای سرعت فاز ترشده و ترنشده به ترتیب روابط زیر را داریم [۲۸]:

$$u(y) = -\frac{\Delta P}{2L\mu_w}(b^2 - y^2), \quad |a| \leq |y| \leq b; \quad (22)$$

$$u(y) = -\frac{\Delta P}{2L\mu_w}(b^2 - a^2) - \frac{\Delta P}{2L\mu_w}(a^2 - y^2), \quad |0| \leq |y| \leq a;$$

مقدار اشباع که به صورت نسبت بین حجم اشغال شده به وسیله فاز W به کل حجم اشغال شده است به صورت زیر تعریف می‌شود،

$$S_w = \frac{V_w}{V_w + V_{mw}} \quad (23)$$

گرفته و اعمال می‌شود. اما، افزایش عدد کاپیلاری معادل کاهش پایداری است، البته با منشأ جریانی (این عدد برخلاف عدد آنسرج تنها دارای خواص استاتیکی نبوده و درون خود خواص جریان و دینامیک را دارد). اما با توجه به مکانیزم افزایش عدد آنسرج که از طریق کاهش تنش سطحی صورت می‌گیرد، افزایش این عدد به طور همزمان با افزایش عدد کاپیلاری نیز همراه است. بنابراین، به نظر می‌رسد برآیند این دو عامل مخالف در جهت شکست (ناپایداری قطره) در مقابل پایداری بخشیدن به قطره به نفع تأثیر بیشتر عدد کاپیلاری است. به عبارتی، با کاهش تنش سطحی، که معادل افزایش عدد کاپیلاری و عدد آنسرج بوده، بنابر نمودارهای به دست آمده (آنسرج- رینولدز) و نواحی مربوط به هر نوع رفتار قطره (شکست-حبس قطره)، شانس شکست افزایش می‌یابد.

بنابر نمودارهای برخورد در شکل‌های ۸ تا ۱۳، مراحل مختلف برخورد به طور کلی شامل موارد زیر می‌باشند:

مرحله اول؛ شتاب گیری قطره از ورودی تا نزدیکی مانع تا اندازه‌ای که قطره مانع را حس می‌کند. مرحله دوم؛ کاهش سرعت قطره تا سرعت مطلق نزدیک به صفر. در این مرحله تغییر شکل قطره از حالت دایره به بیضی، قابل مشاهده است. محبوس شدن یا شکست و عبور قطره از روی مانع براساس تقابل بین انرژی جنبشی آن و انرژی داخلی حاصل از چسبندگی ذرات تشکیل دهنده قطره به وقوع می‌پیوندد.

در مرحله سوم، با توجه به تقابل عوامل موافق و مخالف شکست قطره، دو حالت امکان پذیر است. در حالت اول، اگر انرژی مومنتوم قطره نتواند بر عوامل بازدارنده شکست قطره فائق آید، قطره متوقف شده و در نزدیک‌ترین فاصله با مانع قرار می‌گیرد (شکل ۸). در این حالت، تمایل قطره به داشتن کمترین سطح انرژی (تمایل به پیدا کردن شکل دایره) در مقابل اثرات انتقال مومنتوم سیال فاز پایه قرار گرفته و این دو نیرو در شکلی بیضوی و غیرمتقارن قطره با سطحی پهن شده روی مانع به تعادل می‌رسند. در این حالت قطره پشت مانع حبس می‌شود (مرحله پایانی برای شکل ۸ و حالت الف از جدول ۱).

جدول ۱: فهرست حالات نمونه حرکت قطره درون محیط متخلخل (ترتیب زمانی کلیه اشکال از چپ به راست و از بالا به پایین)

Table 1. Different cases of droplet movement in the porous media

حالت	توصیف حالت
الف	نسبت چگالی ۱:۳، آنسرج ۰/۳۱۳۸ و عدد کاپیلاری ۰/۰۵۶۱ و فشار P_I (حبس قطره)
ب	نسبت چگالی ۱:۲، آنسرج ۰/۴۴۳۸ و عدد کاپیلاری ۰/۲۳۷۴ و فشار P_I (شکست قطره)
ج	نسبت چگالی ۱:۲، آنسرج ۰/۳۱۳۸ و عدد کاپیلاری ۰/۱۰۸۰ و فشار P_I (به هم پیوستن قطره)

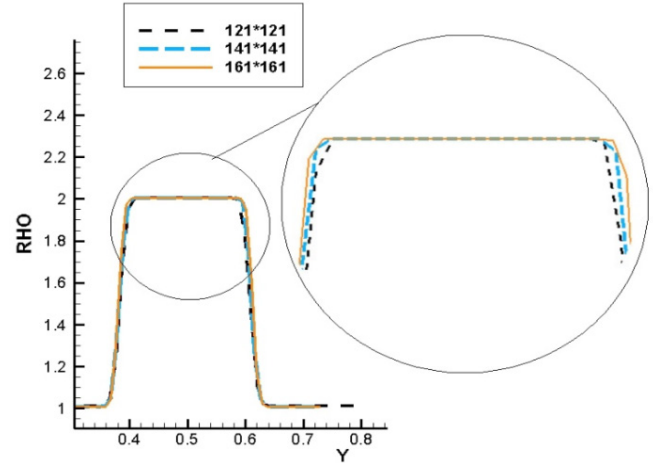


Fig. 6. Density distribution in the Y centerline

شکل ۶: نمایش توزیع چگالی در خط مرکزی محور Y شامل قطره، محیط فاز زمینه و مرز مشترک دو فاز

هستند که به ترتیب طبیعت، ویژگی‌های جریانی و منفرد یک قطره را بیان می‌کنند. در مخرج هر دو عدد بدون بعد مذکور تنش سطحی قرار دارد. بنابر اهمیت تنش سطحی، ابتدا تأثیر تغییر آن را به طور کیفی در شکل ۷ مورد بررسی قرار می‌دهیم. در شکل ۷ تأثیر کاهش تنش سطحی، از راست به چپ بر شکل قطره پس از شکست و لحظات اولیه عبور از مانع مشاهده می‌شود. با کاهش تنش سطحی قطره تغییر شکل و کشیدگی بیشتری از خود نشان می‌دهد.

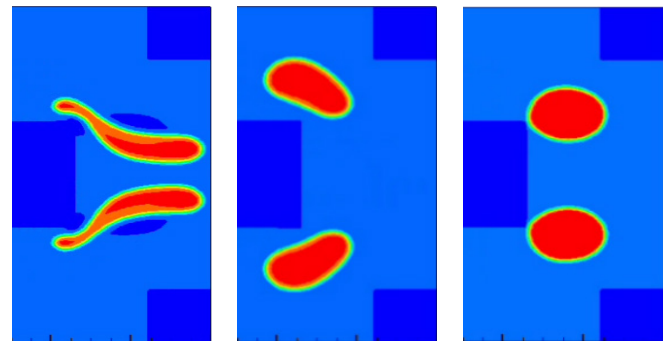


Fig. 7. Droplet break up patterns

شکل ۷: تصاویر لحظه پس از برخورد برای حالات مختلف شکست

شکل‌های ۸ تا ۱۳ به ترتیب فرآیندهای مربوط به حبس، به هم پیوستن و عبور قطرات از میان محیط متخلخل را نشان می‌دهند. مشخصات دقیق هر کدام از این موارد در جدول ۱ ارائه شده است (ترتیب زمانی از چپ به راست و از بالا به پایین است). در این اشکال، نمونه‌هایی از تأثیر افزایش عدد کاپیلاری و کاهش عدد آنسرج به عنوان عواملی که احتمال و پتانسیل عبور و شکست قطرات را افزایش می‌دهند و در تفسیر رفتار قطرات در محیط متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرند، مشاهده می‌شوند. با توجه به مفهوم عدد آنسرج و عدد کاپیلاری، افزایش عدد آنسرج متقارن با افزایش پایداری قطره منفرد است که این اثر به طور ذاتی از خصوصیات قطره سرچشمه

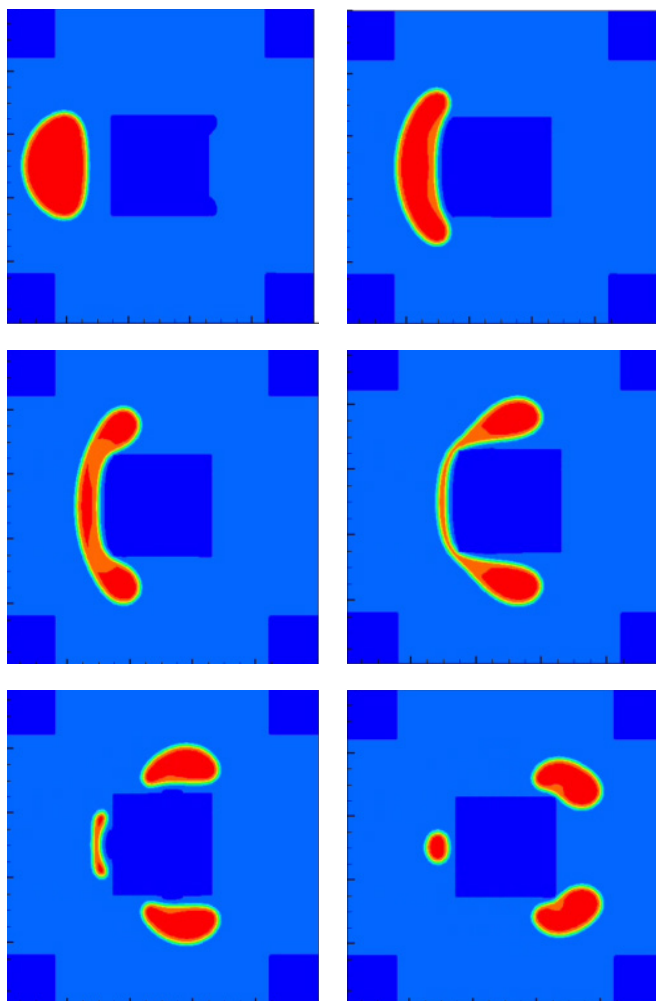


Fig. 9. Movement of droplet in the porous media, case (b) , part 1

شکل ۹: حرکت قطره درون محیط متخلخل حالت ب قسمت اول

با افزایش گرادیان فشار، عدد رینولدز جریان افزایش می‌یابد، در عین حال با کاهش عدد آنسرج تا مقدار مشخصی عملاً عدد رینولدز ثابت مانده و همچنان قطره با شکست از مانع عبور می‌کند. اما در مقدار مشخصی که به نوعی معرف عدد آنسرج بحرانی است، قطره حبس شده و یک مانع^۲ بر سر جریان ایجاد می‌کند که باعث کاهش رینولدز جریان می‌شود. با کاهش بیشتر آنسرج و تماس شدن قطره بر پیشانی مانع، اندکی از تأثیر سدمانند قطره در مقابل جریان کاسته شده و رینولدز کمی افزایش می‌یابد. افزایش مقدار فشار وارده باعث جابه‌جایی منحنی‌ها به سمت مقادیر بیشتر عدد رینولدز می‌شود (افزایش دامنه عدد رینولدز و جابه‌جایی نمودار در راستای قائم) و مقادیر آنسرج بحرانی نیز به سمت چپ (مقادیر کمتری آنسرج) جابه‌جا می‌شوند، به عبارتی حبس و عدم عبور قطرات در عدد آنسرج کمتری رخ می‌دهد.

در ادامه به توضیح ناحیه‌بندی‌های صورت گرفته در نمودارهای آنسرج-رینولدز در اشکال ۱۴ و ۱۵، پرداخته و نمودارهای مربوط به دینامیک و شکست قطره را به نواحی مرتبط در نمودارهای آنسرج-رینولدز ارتباط

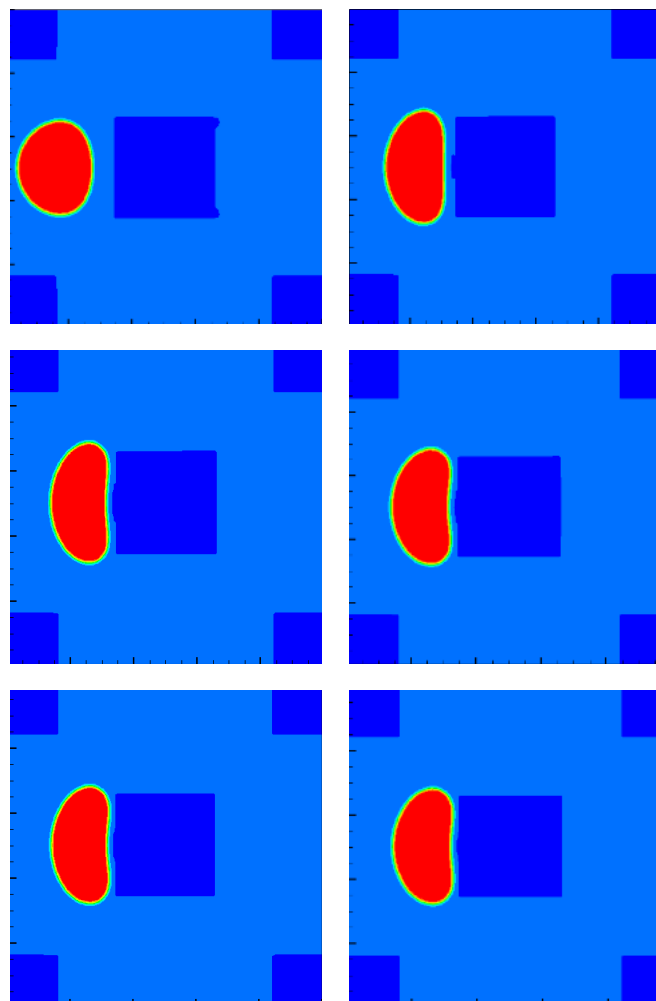


Fig. 8. Movement of droplet in the porous media, case (a)

شکل ۸: حرکت قطره درون محیط متخلخل حالت الف

در صورتی که در مرحله سوم، تقابل نیروهای حفظ کننده شکل قطره با مومنتوم قطره، به نفع انرژی مومنتوم قطره باشد، ابتدا با کاهش سرعت قطره و تغییر شکل کامل آن روبرو می‌شویم که در آن قطره کل پیشانی مانع را فرا می‌گیرد. در واقع با کاهش ضخامت و افزایش طول قطره، قطره در طول پیشانی مانع گسترده می‌شود. انتقال مومنتوم بیشتر از سیال اطراف به قطره سبب گلوئی شدن، شکستن و نهایتاً عبور قسمت‌هایی از آن از طرفین مانع می‌شود. به دلیل نیروی کوهیژن، قسمت‌های باقی‌مانده قطره در پشت مانع نیز در اکثر موارد به همراه بخش‌های جانبی قطره از مانع عبور می‌کند. با فاصله گرفتن از مانع سرعت قطرات شکسته شده بیشتر می‌شوند. در مواردی نیز دو بخش قطره با هم ترکیبی شده^۱ و قطره واحدی را قبل از برخورد مجدد با مانع تشکیل می‌دهند. (شکل‌های ۹ تا ۱۳ و حالت ب و ج از جدول ۱).

در نمودار اشکال ۱۴ و ۱۵ نمودارهای عدد آنسرج-رینولدز در سه مقدار اختلاف فشار بی بعد شده مختلف به ترتیب برای دو نسبت چگالی ۱:۲ و ۱:۳ رسم شده است. با توجه به نمودارهای شکل ۱۴ و ۱۵، مشاهده می‌شود،

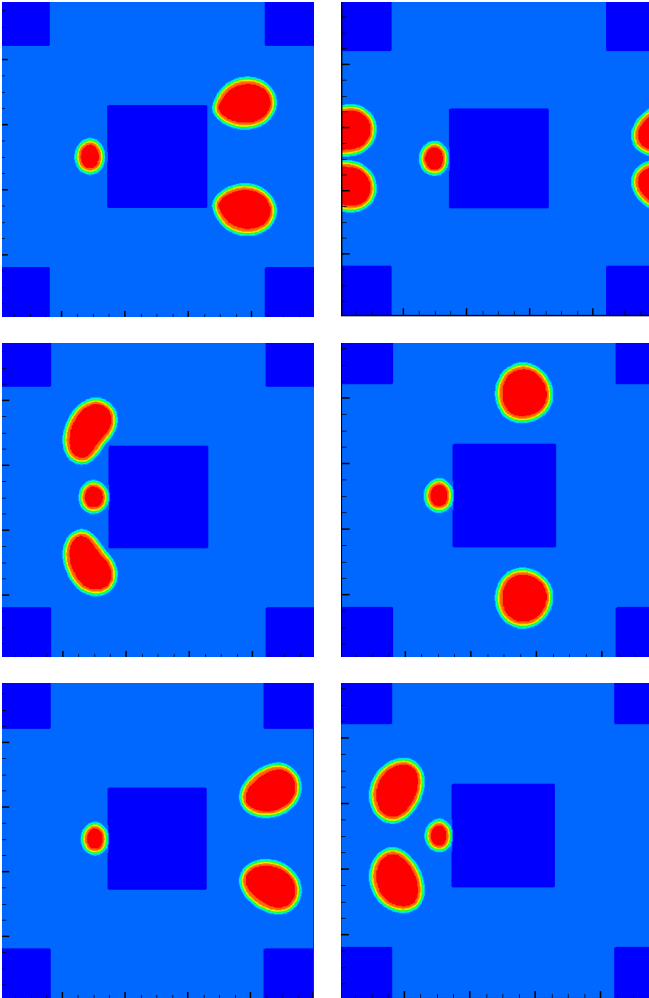


Fig. 11. Movement of droplet in the porous media, case (b) , part 3
 شکل ۱۱: حرکت قطره درون محیط متخلخل حالت ب قسمت سوم

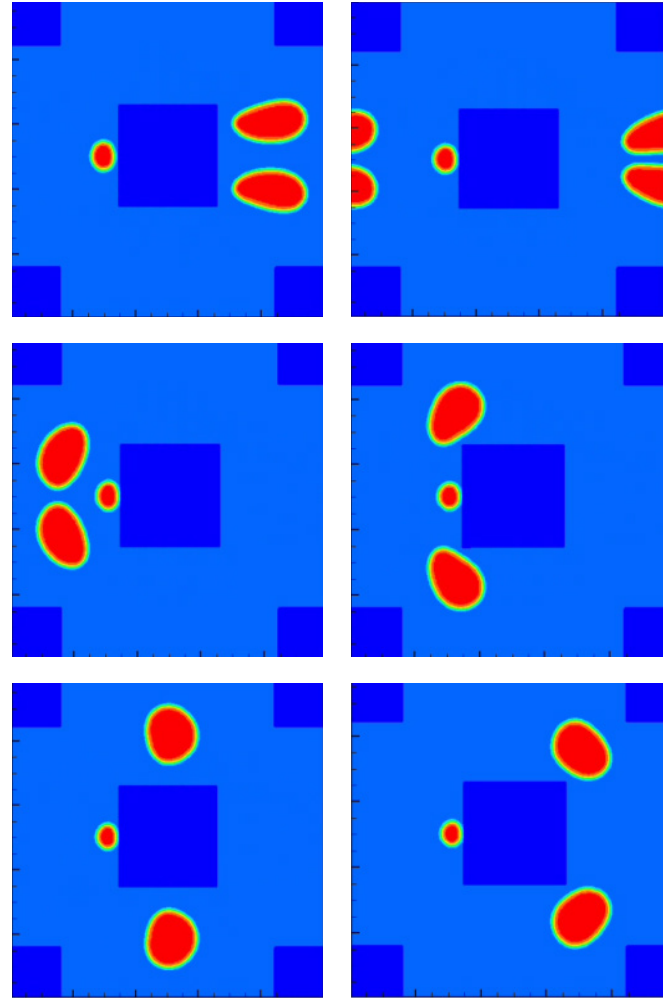


Fig. 10. Movement of droplet in the porous media, case (b) , part 2
 شکل ۱۰: حرکت قطره درون محیط متخلخل حالت ب قسمت دوم

برای شروع ناحیه حبس قطره بوده، را شامل می‌شود. مرز نواحی میان سه منحنی در هر شکل، بر مبنای میان‌یابی خطی (از میان سه گرادیان فشار مورد بررسی) و مرز نواحی در هر منحنی، بر مبنای شکل شکست متمایز شده است.

نمودارهای تغییر عدد کاپیلاری بر حسب آنسرج برای مقادیر مختلف نسبت چگالی و افت فشار بی‌بعد در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. علائم اختصاری BU و T به ترتیب اشاره به شکست قطره و حبس شدن آن دارند. همان‌طور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود پدیده حبس شدن قطرات و شکست در این نمودار برای دو نسبت چگالی با خط چین و خط ممتد نشان داده شده است. خطوط ممتد یک تا سه‌گانه، برای نسبت چگالی ۱:۲ و حالات خط چین برای نسبت چگالی ۱:۳ می‌باشند. افزایش مقدار فشار، باعث افزایش دامنه عدد کاپیلاری و افزایش سهم محدوده شکست و عبور قطرات نسبت به حالت حبس قطرات می‌شود. افزایش نسبت چگالی باعث افزایش آنسرج قطره شده (در این مطالعه ویسکوزیته سینماتیکی قطرات یکسان و ویسکوزیته دینامیکی متغیر بوده بنابراین، عدد آنسرج با جذر چگالی نسبت مستقیم دارد) که باعث افزایش پایداری قطره و به تعویق افتادن شکست

می‌دهیم. حروف BU، C و T در نمودارهای شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب معرف حالات شکست، به هم پیوستن قطره بعد از شکست و حبس قطره پشت مانع می‌باشند. علائم P_1 ، P_2 و P_3 به ترتیب اشاره به سه مقدار گرادیان فشار بی بعد 0.000180 و 0.000144 و 0.000108 دارند. در حالت دوم و سوم (شکل‌های ۹ تا ۱۳)، شکست قطره با برخورد قطره به مانع رخ می‌دهد و تفاوت این دو حالت در این است که در حالت سوم بعد از عبور از مانع و قبل از دومین برخورد قطرات ثانویه مجدداً تشکیل قطره واحدی را داده و سپس با مانع برای بار دیگر برخورد می‌کنند. محدوده به هم پیوستن قطرات، به عنوان یک محدوده حائل گذار می‌باشد که حد پایین آن نقطه آنسرج بحرانی و حد بالایی آن، اولین ناحیه عدم تغییر عدد رینولدز به ازای تغییر عدد آنسرج است. به عبارتی، این ناحیه بین دو ناحیه شکست و حبس قطرات قرار دارد و با کاهش عدد آنسرج و حرکت بر روی یک منحنی با فشار مشخص از راست به چپ، محدوده‌ای از کمترین مقدار آنسرج ناحیه شکست بدون بهم پیوستن تا مقدار آنسرج بحرانی که حداکثر مقدار آنسرج

- 1 Breakup
- 2 Trap

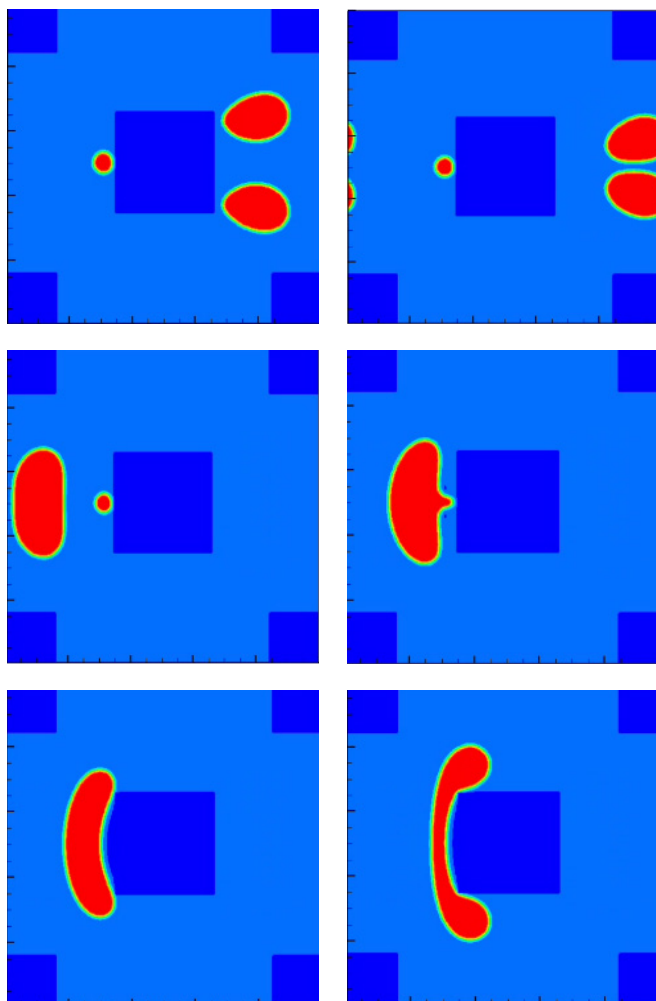


Fig. 13. Movement of droplet in the porous media, case (c) , part 2
 شکل ۱۳: حرکت قطره درون محیط متخلخل حالت ج قسمت دوم

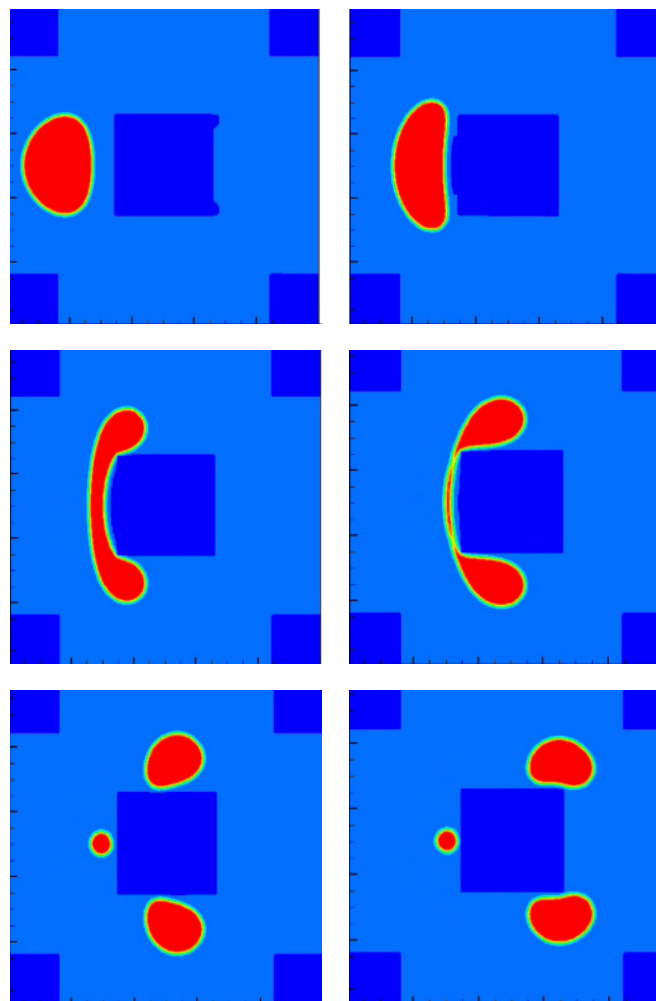


Fig. 12. Movement of droplet in the porous media, case (c) , part 1
 شکل ۱۲: حرکت قطره درون محیط متخلخل حالت ج قسمت اول

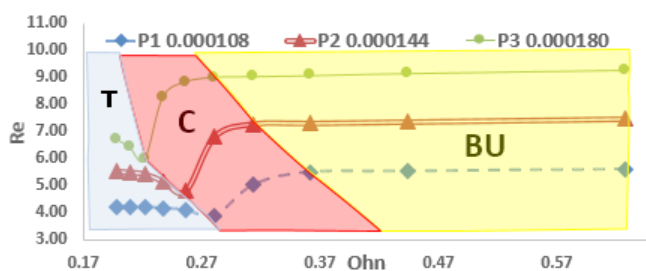


Fig. 14. Ohn-Re figure-Density ratio of 1:2
 شکل ۱۴: نمودار آنسرچ-رینولدز برای نسبت چگالی ۱:۲

فاکتورهای مرتبط با فیزیک جریان چند فاز در محیط متخلخل امکان پیش‌بینی رفتار قطرات در بستر محیط متخلخل را فراهم می‌کنند. این فاکتورها شامل نسبت‌های چگالی متفاوت، اعداد بدون بعدی چون آنسرچ، کاپیلاری و رینولدز محیط متخلخل می‌باشند. در محدوده اعداد بدون بعد مطالعه شده، سه فیزیک شکست، به هم پیوستن و محبوس شده قطره مشاهده و اثرات پارامترهای بی‌بعد مختلف روی آن‌ها بررسی شدند. اعداد بدون بعد تعریف شده می‌توانند جهت پیش‌بینی شکل شکست نیز مورد

قطرات (جاب‌جایی نمودارها به سمت راست و مقادیر بیشتر عدد آنسرچ شروع شکست) می‌شود.

با گسترش دامنه مقادیر عدد آنسرچ و کاپیلاری در این نمودار می‌توان از آن برای پیش‌بینی رفتار قطرات در محیط متخلخل بهره برد. به عبارتی این نمودار همانند یک نقشه رفتارشناسی قطرات در محیط متخلخل محسوب شده و برای هر ضریب تخلخل یک نمودار مشخص قابل ترسیم است. بنابراین، نمودارهای ارزشمندی برای مطالعه جریان سیال حاوی قطراتی هم‌مقیاس با ابعاد موانع در محیط متخلخل می‌باشند.

۸- جمع‌بندی

در این مقاله با بررسی همزمان فاکتورهای و پارامترهای مرتبط با جریان دوفازی در بستر یک محیط متخلخل، به بررسی رفتار قطرات در برخورد با موانع مربع شکل تشکیل دهنده محیط متخلخل پرداخته شد. نکته قابل توجه در این رابطه، هم‌مقیاس بودن قطرات با موانع تشکیل‌دهنده محیط متخلخل می‌باشد.

مجموعه نمودارهای به دست آمده از این مطالعه پارامتریک روی

شدن رفتار شکست قطرات دارند. در مقابل کاهش عدد کاپیلاری و افزایش عدد آنسرج باعث کاهش شانس شکست و عبور قطرات از محیط متخلخل می‌شوند. بنابر توضیحات ارائه شده، علی‌رغم این که افزایش عدد آنسرج باعث افزایش پایداری قطره می‌شود به دلیل اینکه تأثیر کاپیلاری بر الگوی رفتاری قطره از عدد آنسرج بیشتر است، در اعداد آنسرج بالا و عدد کاپیلاری بالا پدیده شکست قطره مشاهده می‌شود، نه حبس قطرات. لازم به ذکر است همان‌طور که انتظار می‌رود حبس قطرات تا حد زیادی متأثر از شکل مربع شکل موانع می‌باشد که این مانع هندسی بر شکست و عبور قطرات به همراه سایر فاکتورهای سیالی و جریانی تعیین‌کننده رفتار قطرات در بستر محیط متخلخل می‌باشد. این موضوع، مجموعه پارامترهای بی‌بعد مهم در مطالعه اندرکنش قطرات هم مقیاس با ذرات محیط متخلخل و چگونگی اثرپذیری جریان از تغییرات آن‌ها را نمایان می‌سازد.

فهرست علائم

a, b	شعاعی از لوله
C_s	سرعت صوت
D_{pore}	قطر دهانه ورودی محیط متخلخل
d	قطر موانع
e_i	سرعت گسسته شبکه
F	نیروی خارجی
f_i	تابع توزیع اولیه
f_i^{eq}	تابع توزیع تعادلی
g_i	تابع توزیع ثانویه
g_i^{eq}	تابع توزیع تعادلی ثانویه
k	تراوایی محیط متخلخل
p	فشار
r	شعاع قطره
S	مقدار اشباع
u, v	سرعت ماکروسکوپی

اعداد بدون بعد

Re	عدد رینولدز
Ohn	عدد آنسرج
Ca	عدد کاپیلاری

علامت یونانی

δ	گام زمانی
ε	ضریب تخلخل
ζ	سرعت لتیس

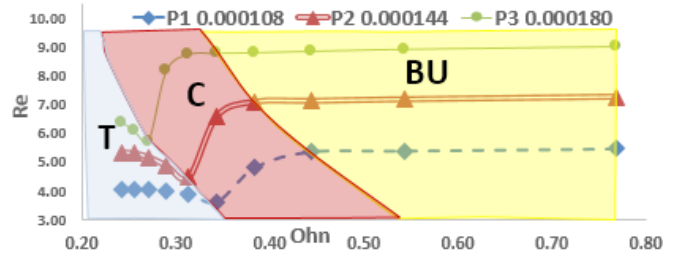


Fig. 15. Ohn-Re figure-Density ratio of 1:3

شکل ۱۵: نمودار آنسرج-رینولدز برای نسبت چگالی ۱:۳

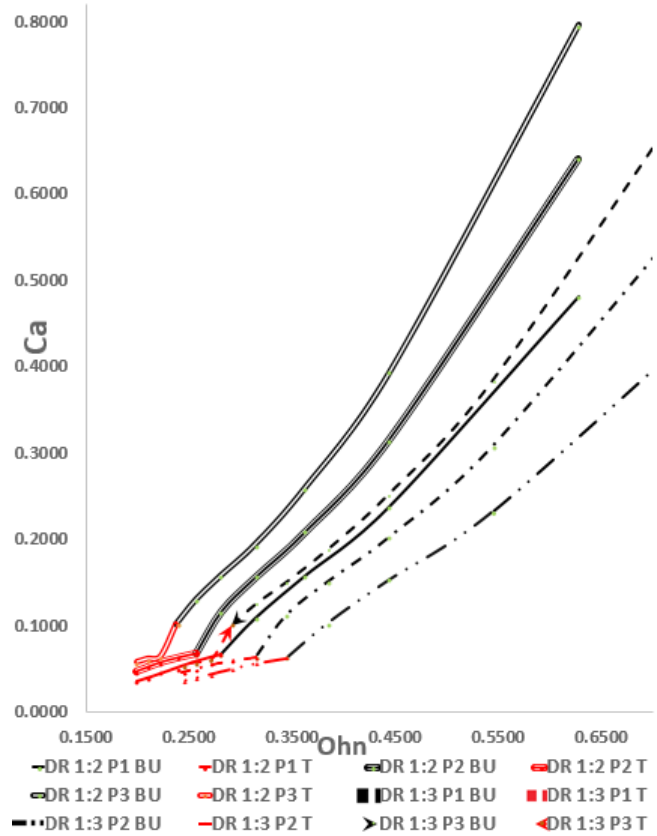


Fig. 16. Ca-Ohn figure-Density ratio of 1:2 and 1:3

شکل ۱۶: نمودار آنسرج-کاپیلاری برای نسبت چگالی ۱:۲ و ۱:۳

استفاده قرار بگیرند. پدیده‌هایی مثل به هم پیوستن یا شکست بدون به هم پیوستن در منحنی‌های مختلف آنسرج-رینولدز برای نسبت‌های چگالی مختلف و فشارهای مختلف مشاهده شده‌اند. محل انواع شکست‌ها، حدود بالا و پایین آنسرج هر ناحیه و فاصله این حدود با نقاط خاصی مثل مقدار آنسرج بحرانی گزارش شده‌اند و مورد بررسی قرار گرفتند.

تأثیر افزایش تنش سطحی در شکل شکست با ارائه حالات کیفی از شکست بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، مجموعه پارامترهایی که منجر به افزایش احتمال شکست قطرات و در نتیجه ممانعت از حبس آن‌ها می‌شوند، عبارتند از: افزایش گرادیان فشار و در نتیجه عدد رینولدز درون محیط متخلخل که تأثیر مستقیمی بر افزایش شانس شکست و پیچیده‌تر

porous media, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 360(1792) (2002) 535–545.

μ ویسکوزیته دینامیکی سیال

ρ چگالی ماکروسکوپیک

σ تنش سطحی

τ زمان آسایش لئیس

ν ویسکوزیته سینماتیکی

ϕ تابع مشخصه

ψ متغیر میانی

ω ضریب وزنی

زیرنویس و بالانویس

W, NW فاز تر شده، فاز تر نشده

eq شرایط تعادلی

منابع

- [12] C.L. Lin, A.R. Videla, J.D. Miller, Advanced three-dimensional multiphase flow simulation in porous media reconstructed from X-ray microtomography using the He Chen Zhang lattice Boltzmann model, *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3) (2010) 255-261.
- [13] X. Frank, P. Perré, Droplet spreading on a porous surface, A lattice Boltzmann study, *Physics of Fluids*, 24(4) (2012) 042101.
- [14] H. Huang, Z. Li, L. Shuaishuai, X. Lu, Shan-and-Chen-type multiphase lattice Boltzmann study of viscous coupling effects for two-Phase flow in porous media, *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 61(3) (2009) 341-354.
- [15] C. Pan, M. Hilpert, C.T. Miller, Lattice-Boltzmann simulation of two-phase flow in porous media, *Water Resources Research*, 40(1) (2004).
- [16] L. Hao, P. Cheng, Pore-scale simulations on relative permeabilities of porous media by lattice Boltzmann method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(9-10) (2010) 1908-1913.
- [17] Y. Tabe, L. Yongju, C. Takemi, K. Masaya, Numerical simulation of liquid water and gas flow in a channel and simplified gas diffusion layer model of polymer electrolyte membrane fuel cell using the lattice Boltzmann method, *Journal of Power Sources*, 193(1) (2009) 24-31.
- [18] H. Huang, J. Huan, X. Lu, Study of immiscible displacements in porous media using a color-gradient-based multiphase lattice Boltzmann method, *Computers & Fluids*, 93 (2014) 164-172.
- [19] H. Huan, L. Wang, X. Lu, Evaluation of three lattice Boltzmann models for multiphase flows in porous media, *Computers and Mathematics with Applications*, 61(12) (2014) 3606–3617.
- [20] H. Liu, A. J. Valocchi, Q. Kang, C. Werth, Pore-scale simulations of gas displacing liquid in a homogeneous pore network using the lattice Boltzmann method, *Transport in Porous Media*, 99(3) (2013) 555-580.
- [21] N. Latifiyan, M. Farhadzadeh, P. Hanafizadeh, M. H. Rahimian, Numerical study of droplet evaporation in contact with hot porous surface using lattice Boltzmann method, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 71 (2016) 56-74 .
- [22] X. He, S. Chen, R. Zhang, A Lattice Boltzmann Scheme for Incompressible Multiphase Flow and Its Application in Simulation of Rayleigh– Taylor Instability, *Journal of Computational Physics*, 152(2) (1999) 642-663.
- [23] A. Javadi, D. Bastani, M. Taeibi-Rahni, Kh. Javadi, [1] F.A.L. Dullien, *Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, 1991.
- [2] E. C. Donaldson, G. V. Chilingarian, and T.F. Yen, *Enhanced Oil Recovery, I Fundamentals and Analyses*, Elsevier, 1985.
- [3] D.B. Ingham, I. Pop, *Transport Phenomena in Porous Media II*, Elsevier, 2002.
- [4] A.R.A. Khaled, K. Vafai, The Role of porous media in modeling flow and heat transfer in biological tissues, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(26) (2003) 4989-5003.
- [5] J.S. Rowlinson, B. Widom, *Porous media, Applications in Biological Systems and Biotechnology*, 2011.
- [6] C. Pan, L.-S. Luo, C.T. Miller, An evaluation of lattice Boltzmann schemes for porous medium flow simulation, *Computer & Fluids*, 35(8-9) (2006) 898-909.
- [7] U. Aaltosalmi, *Fluid Flow in Porous Media with the Lattice-Boltzmann Method*, (No. 3/2005) (2005).
- [8] A. K. Gunstensen, D. H. Rothman, Lattice-Boltzmann studies of immiscible two-Phase flow through porous media, *Journal of Geophysical Research*, 98(B4) (1993) 6431-6441.
- [9] B. Ferreol, D. H. Rothman, Lattice-Boltzmann simulations of flow through fontainebleau sandstone, *Transport in Porous Media*, 20 (1995) 3-20.
- [10] N. S. Martys, H. Chen, Simulation of multi-component fluids in complex three-dimensional geometries by the lattice Boltzmann method, *Physical Review E*, 53(1) (1996) 743.
- [11] J. Tölke, M. Krafczyk, M. Schulz, and E. Rank, Lattice Boltzmann simulations of binary fluid flow through

- the jetting velocity, a criterion for the jetting velocity, *Chemical Engineering Science*, 26(3) (1971) 441-449.
- [27] A.G. Yiotis, J. Psihogios, M.E. Kainourgiakis, A. Papaioannou, A.K. Stubos, A lattice Boltzmann study of viscous coupling effects in immiscible two-phase flow in porous media, *Colloids and Surfaces A-physicochemical and Engineering Aspects*, 300(1-2) (2007) 35-49.
- [28] Z.L. Yang, T.N. Dinh, R.R. Nourgaliev, B.R. Sehgal, Numerical investigation of bubble growth and detachment by the lattice Boltzmann method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(1) (2001) 195-206.
- [29] L.S. Kim, H.K. Jeong, M.Y. Ha, K.C. Kim, Numerical simulation of droplet formation in a micro-channel using the lattice Boltzmann method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22(4) (2008) 770-779.
- The effects of hydrodynamics characteristics on the mass transfer during droplet formation using computational approach, *ASME's International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, (2006) 811-821.
- [24] F. Chen, H. Hagen, A survey of interface tracking methods in multi-phase fluid visualization, Visualization of Large and Unstructured Data Sets - Applications in Geospatial Planning, *Modeling and Engineering (Irtg 1131 Workshop)*, 19 (2011) 11-19.
- [25] J.J. Cooper-White, J.E. Fagan, V. Tirtaatmadja, D.R. Lester, D.V. Boger, Drop formation dynamics of constant low-viscosity, *Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 106(1) (2002) 29-59.
- [26] P.M. Heertjes, L.H. De-Nie, D.H. De-Vries, Drop formation in liquid-liquid systems-II testing of the considerations given in part I, for drop volumes below

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Amiri Hezaveh, M. R. Salimi, M. Taeibi Rahni, Phenomenological Study of Droplet Behavior Passing through a Porous Medium at Pore-Scale, Using Lattice Boltzmann Method, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 697-710.
DOI: 10.22060/mej.2017.11848.5198

