

تحلیل عددی عبور قطره هم مقیاس با حفره‌های یک محیط متخلخل با استفاده از روش شبکه بولتزمن

محمد رضا سلیمی^۲ و محمد طیبی رهنی^{۳*}

دانشکده مهندسی هوافضا
دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۲)

ابوالفضل امیری هزاوه^۱

دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران مرکزی

چکیده

جریان‌های چندفازی در محیط‌های متخلخل هم در طبیعت و هم در صنعت از اهمیت بالایی برخوردارند. هدف اصلی این پژوهش بررسی اثرات اندرکنش قطرات با یک محیط متخلخل است. جریان چندفازی در محیط متخلخلی، شامل موانع دایره‌ای شکل در رژیم غیرداریسی در گرادیان‌های فشار مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. از یک محیط متخلخلی که قبلاً "مایعی در آن جریان دارد، قطره‌ای با خواص متفاوت عبور داده که برخورد این قطره با محیط متخلخل الگوهای مختلف شکست، حبس و یا به هم پیوستن را ایجاد می‌نماید. روش عددی شبکه بولتزمن که در محیط متخلخل به همراه جریان چندفازی قابلیت و انعطاف‌پذیری بالایی از خود نشان داده، مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای موثر و اعداد بدون بعد مهم مرتبط با جریان چندفازی (مثل عدد آنسرج، عدد کاپیلاری، نسبت چگالی فازها) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مقادیر فشار بی بعد وارده، 0.000108 ، 0.000144 ، 0.000180 و محدوده آنسرج مورد بررسی $0.19-0.76$ می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که جریان چندفازی پیچیدگی‌ها و فاکتورهای موثر زیادی داشته که بررسی همزمان آن‌ها ضروری است. فاکتورهای مرتبط با قطره و فاز زمینه، مانند تنش سطحی و نسبت چگالی قطرات در کنار خصوصیات جریان (مانند گرادیان فشار) بسیار موثر بوده و تنوعی از حالات شکست، حبس و به هم پیوستن قطره (ات) را به وجود می‌آورد. از نقاط برجسته این تحقیق این که نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته قابلیت پیش‌بینی رفتار قطرات در محیط متخلخل را با فرضیات و روش‌های مورد استفاده در این پژوهش با دقت بالایی امکان‌پذیر می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: محیط متخلخل، مقیاس حفره، تحلیل عددی، قطره، روش شبکه بولتزمن

Numerical Analysis of Same Scales Droplet-Particle Interaction Inside a Porous Medium, Using Lattice Boltzmann Method

A. Amiri-Hezaveh

Engineering School
Islamic Azad University - Central Tehran Branch

M.R. Salimi and M. Taeibi Rahni

Aerospace Engineering Department
Sharif University of Technology

(Received: 21/November/2016; Accepted: 1/January/2017)

ABSTRACT

Multiphase flows, combined with porous media, with application in both nature and industry are greatly important. The main objective of this research is to analyze drop interaction with porous media. Multiphase flow through a porous medium, including circular obstacle in non-Darcian regime at different pressure gradients was investigated. The porous medium, wherein a liquid flow was present, a drop with different fluid properties was forced to pass. The drop impact with porous medium leads to different patterns: break-up, trap, and coalescence. Lattice Boltzmann method (LBM), which has shown high capability and flexibility in relation with multiphase flows combined with porous media, have been implemented. The effective dimensionless numbers related to this flow (such as, Ohnesorge, Capillary number, and density ratio of the two phases) were thoroughly analyzed. The values of exerted dimensionless pressure were 0.000108 , 0.000144 , and 0.000180 and the range of Ohnesorge was $0.19-0.76$. Our results show that there are high complexity and many effective factors, which necessitate their concurrent examinations. The effects of factors connected to drop and secondary phase properties (such as, surface tension and density ratio), along with flow characteristics (such as pressure gradient), are considerable. Consequently, the simulations of this study, using certain assumptions and methods, show excellent capability to predict drop behavior in porous media, which is the valuable feature of this study.

Keywords: Porous Media, Pore-scale, Numerical Analysis, Drop, Lattice Boltzmann Method (LBM)

۱- کارشناس ارشد: Abolfazl.amiri.h@gmail.com

۲- دکتری: mrsalimi@sharif.ir

۳- استاد (نویسنده پاسخگو): taeibi@sharif.edu

فهرست علائم و اختصارات

۱- مقدمه

مطالعه جریان در یک محیط متخلخل همواره مرکز توجه بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته بوده است. در حقیقت، در طبیعت و فناوری 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 نفوذناپذیری 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 سامانه استخراجی در نظر گرفته شوند. مطالعه جریان سیالات دوفازی در مخازن نفتی موضوع پژوهش‌های وسیعی بوده است [۱-۲] و قطعاً حوزه کاربردی است که بیشترین توجه را به توسعه تئوری‌های مرتبط با محیط متخلخل داشته است.

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 زیست فناوری، درختان و گیاهان می‌توانند آب را از طریق ساختارهای حفره‌ای درون خود به واسطه خاصیت موینگی بالا بکشند و انتقال دهند. علاوه بر این، بسیاری از غشاهای زیستی می‌توانند در زمره یک محیط متخلخل به شمار آیند که توضیح و دلیلی برای رشد تئوری‌های مرتبط با محیط متخلخل در حوزه زیست فناوری است [۴-۵].

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندرکنش جریان دوفاز با محیط متخلخل کاربرد وسیعی در صنایع مختلف و طبیعت دارد. بنابراین، در این زمینه به مطالعات پایه‌ای پدیده‌ها و فیزیک حاکم بر آنها بیشتر 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.

در تئوری‌های کلاسیک محیط متخلخل، خواص سیال به وسیله روش‌های مرتبه بالا مورد بررسی قرار می‌گیرد. 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

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 سیال

اعداد بدون بعد

Re	عدد رینولدز
Oh	عدد آنسرج
Ca	عدد کاپیلاری

علائم یونانی

δ	گام زمانی
ε	ضریب تخلخل
μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال
ρ	چگالی سیال
σ	تنش سطحی
τ	زمان تخفیف لتیس
ν	ویسکوزیته سینماتیکی
ϕ	تابع مشخصه
ω	ضریب وزنی

زیرنویس

w	فاز تر شده
nw	فاز تر نشده

یک مثال از این معادلات، معادله کارمن کوزنی^۹ است که تراوایی را به ضریب تخلخل هندسه محیط متخلخل، فاکتور شکل و کمیتی به نام تورئوسیتی^{۱۰} مرتبط می‌کند [۱].

در مورد جریان‌های چندفازی در محیط متخلخل، 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. در این حالت، شرایط ترشوندگی محیط متخلخل و پارامترهای بدون بعد مرتبط با حضور فاز دوم از اهمیت بالایی برخوردار هستند. پیچیدگی‌های موضوع سبب شده تا تحقیقات اولیه روی اثر پارامترهای مختلف بر تراوایی و تراوایی نسبی به صورت تجربی صورت بگیرند.

پن و همکارانش^{۱۱}، 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 [۶]. لازم به ذکر است که مطالعات آنها به صورت تک فاز می‌باشد. کاربرد استفاده از یک محیط متخلخل تولیدشده به روش تصادفی به طور کلی، در بسیاری از مقالات مرسوم است. برای نمونه آلتوسالمی^{۱۲} در سال ۲۰۰۵، از این روش برای مطالعه تراوایی سنگ‌ریزه‌های ساخته شده از ماسه سنگ استفاده کرده است [۷].

در حالت دوفاز نیز، گانستنسن و رتمن^{۱۳} 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 دیاگرام‌هایی جهت طبقه‌بندی رفتار جریان دو فاز درون محیط متخلخل ارائه کردند [۸]. فرئول و رتمن^{۱۴} 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 به صورت تجربی را مورد مطالعه قرار دادند [۹]. مارتیس و چن^{۱۵} به بررسی یک جریان

قابل دسترسی نیست (عملی نیست)، بلکه هدف تمرکز بر روی شاخص‌های ماکرومقیاس و تعریف کمیت‌های ماکروسکوپی بر این اساس می‌باشد.

رابطه داری که توسط، هنری داری^۱ که در قرن ۱۹ ارائه شد بر اساس رویکرد ماکرومقیاس می‌باشد. این رابطه بیان می‌کند وقتی یک سامانه به حالت تعادل رسید، دبی جرمی یک سیال درون محیط متخلخل متناسب با نسبت اختلاف فشار و ویسکوزیته دینامیکی سیال است. ثابت تناسب این رابطه مهم‌ترین کمیت در محیط متخلخل است که تراوایی نامیده می‌شود. به عبارتی ساختار حفره‌ها خودش را در سطح ماکروسکوپی به نمایش می‌گذارد تا حدی که تراوایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تراوایی یک محیط متخلخل تا حد زیادی به اندازه، توزیع و شیوه اتصال حفره‌های تشکیل دهنده یک محیط متخلخل بستگی دارد.

قانون داری فقط برای سیالات نیوتنی در دامنه خاصی از دبی سیال معتبر است. با افزایش دبی سیال انحراف از قانون داری افزایش می‌یابد. این موضوع توسط فورچمیر^۲، ۱۹۰۱ و دیوپویت^۳، ۱۸۶۳ مشاهده شده است. مشاهدات تجربی و مدل‌های ریاضی نشان می‌دهند که این انحراف به دلیل اثرات اینرسی، توربولانسی سیال و سایر فاکتورهایی که می‌توانند به سرعت بالای سیال نسبت داده شوند، است (فرانچر و لویس^۴، ۱۹۹۳؛ هابرت^۵، ۱۹۵۶؛ می و آریالت^۶، ۱۹۹۱؛ چن و همکاران^۷، ۲۰۰۰).

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 (عزیز و ستاری، ۱۹۷۹). اصلاح معادله داری برای جریان سیالات با دبی بالا توسط عبارت مرتبه دوم فورچمیر اعمال می‌شود (فورچمیر، ۱۹۰۱؛ وارد^۸، ۱۹۶۴؛ چن و همکاران، ۲۰۰۰).

تراوایی به وسیله معادلات ساختاری (بقا) به پارامترهایی که ساختار محیط متخلخل را توصیف می‌کند، مرتبط می‌شوند.

9- Kozeny-Carman

10- Tortuosity

11- Pan et al.

12- Aaltosalmi

13- Gunstensen and Rothman

14- Ferreol and Rothman

15- Martys, N.S. and Chen

1- Henry Darcy

2- Forchheimer

3- Dupuit

4- Fancher and Lewis

5- Hubbert

6- Mei and Auriault

7- Chen et al.

8- Ward

کردند [۱۶]. تب و همکارانش^۸ 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 [۱۷]. هوانگ و همکارانش 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 [۱۸].

هوان و همکارانش^۹ در سال ۲۰۱۱ به مقایسه سه مدل انرژی آزاد، شان چن و رتاهاام کلر^{۱۰} و بررسی عملکرد از نظر دقت و پایداری آن‌ها در محیط متخلخل پرداختند [۱۹]. مطالعه آن‌ها نشان داد مدل رتاهاام 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 نظر دقت و پایداری این دو مدل بسیار بهتر از مدل شان و چن عمل می‌کند. لیو و همکارانش^{۱۱} نیز در سال ۲۰۱۳ از روش شبکه بولتزمن به همراه مدل لی^{۱۲} برای جریان دو فازی در محیط تخلخل استفاده کردند [۲۰].

لطیفیان و همکارانش به بررسی تخییر قطره در برخورد با یک محیط متخلخل پرداختند و اعداد بدون بعد مرتبط با جریان چندفازی، انتقال حرارت و محیط متخلخل را مطالعه و پروفیل دمایی، جریانی و انتقال جرم را مورد بررسی قرار دادند [۲۱].

تقی‌لو و رحیمیان در سال ۲۰۱۴ از مدل هی در مطالعه جریان دوفاز درون محیط متخلخل شامل موانع مربع شکل که به صورت تصادفی تولید شده بودند، با در نظر گرفتن زاویه تماس بین فازهای سیال و جامد جهت بررسی دینامیک رفتار قطره درون محیط متخلخل استفاده کردند [۲۲].

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

چندگونه‌ای در حالت سه‌بعدی در بستر متشکل از ماسه سنگ با مدل شان و چن^۱ پرداختند. جایگزینی یک سیال با سیال دیگر به خوبی مدل شد و تراوایی نسبی برای فازهای ترشده مختلف محاسبه شده و با مقادیر تجربی به خوبی مطابقت داشت [۱۰]. تولکه و همکارانش^۲ به بررسی یک جریان چند فازی درون محیط متخلخل با ویسکوزیته و نسبت چگالی متغیر بر اساس مدل پیشنهادی گانستنسن پرداختند. محدودیت‌ها و مشکلات روش شبکه بولتزمن در مسائل واقعی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه شبیه‌سازی اولیه روی کاربردهایی با مقیاس بزرگ واقعی از آب- هوا و راکتور بچ^۳ آب- آب صورت گرفت [۱۱].

لین و همکارانش^۴ به بررسی یک محیط متخلخل واقعی تولید شده به وسیله روش ماکروتوموگرافی اشعه ایکس به کمک مدل هی پرداختند و از این مل برای شبیه‌سازی فرآیند تصفیه و عبور سیال دوفازی از میان یک بستر متخلخل پرداختند. تنس‌های سطحی متفاوت و نسبت چگالی‌های پایین در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت [۱۲].

فرانک و پری^۵ به مطالعه برخورد یک قطره به یک سطح متخلخل در ضرایب تخلخل مختلف و زوایای تماس مختلف پرداختند. نتایج این مطالعه یک رفتار توانی نسبت به زمان برای شعاع ترشدگی از ناحیه محیط متخلخل از خود نشان می‌دهد که ثابت آن با تغییر ضریب تخلخل تغییر می‌کند [۱۳].

هوانگ و همکارانش^۶ 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 [۱۴]. مدل دو جزئی شان و چن پیشتر توسط پن و همکارانش در سال ۲۰۰۴، برای به‌دست آوردن منحنی اشباع فشار کاپیلاری و مقایسه نتایج با نتایج تجربی به‌کار رفته است [۱۵]. هاوو و چنگ^۷ در سال ۲۰۱۰ روش انرژی آزاد برای بررسی تراوایی نسبی یک مجموعه از کره‌ها و یک لایه نفوذ گازی برای کربن استفاده

1- Shan and Chen

2- Tölke et al.

3- Batch Reactor

4- Lin et al.

5- Frank and Perré

6- Huang et al.

7- Hao and Cheng

8- Tabe et al.

9- Huan et al.

10- Rothman and Keller

11- Liu et al.

12- Lee

۱:۳ مورد بررسی قرار گرفته است که در هر دو حالت چگالی فاز اصلی (زمینه) ۱ می‌باشد و این چگالی قطره است که تغییر می‌کند.

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 ۱۰ 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 دوبعدی سطح) حاوی سیال (V_f) به حجم (سطح) کل (V_{total}) می‌باشد. عدد کاپیلاری از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

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

در این رابطه، U سرعت متوسط سیال در یک سطح مقطع، μ ویسکوزیته دینامیکی فاز زمینه و σ تنش سطحی بین دو فاز می‌باشد. این عدد دینامیک جریان چند فاز، به طور دقیق‌تر، تاثیر جریان فاز زمینه بر روی فاز اولیه (قطره) را بیان می‌کند. عدد آنسرج از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma D}} \quad (4)$$

در این رابطه، μ ویسکوزیته دینامیکی قطره، σ تنش سطحی بین دو فاز، ρ چگالی قطره، D قطر اولیه قطره می‌باشد. این عدد به نوعی معرف قدرت قطره به طور منفک از اثرات جریان بیان می‌کند.

۳- روش عددی

به عنوان روش عددی، روش شبکه بولتزمن، مدل هی، مدل D2Q9 دو بعدی با ۹ بردار سرعت با تقریب BGK^۲ مورد

شکست قطرات مشاهده شود. از این‌رو، 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 بتوانند برای رفتارشناسی 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 آرایش 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، شامل اشکال دایره‌ای و با ضریب تخلخل ۰/۸ که از تقارن نسبت به مرکز دامنه محاسباتی برخوردار بوده، می‌باشد. نمایی شماتیک از هندسه نمونه در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

شروط مرزی مورد استفاده در بالا- پایین و چپ- راست به صورت تناوبی در نظر گرفته شده‌اند. رژیم جریان با توجه به عدد رینولدز جریان درون محیط متخلخل مشخص می‌شود. سیال تحت تاثیر نیروی حجمی مشخصی قرار دارد که محرکه اصلی حرکت سیال در راستای محور افقی می‌باشد. دامنه عدد رینولدز از ۲ تا ۱۶ می‌باشد که در محدود جریان داریسی نیست. خواص سیال لزجت سینماتیکی هر دو فاز برابر فرض شده‌اند ولی چگالی‌های متفاوتی خواهند داشت. ویسکوزیته سینماتیکی سیال ۰/۱۶۶۶۶۶ و مقدار چگالی فاز زمینه، ۱ در نظر گرفته شده است. در این مطالعه دو نسبت چگالی ۱:۲ و

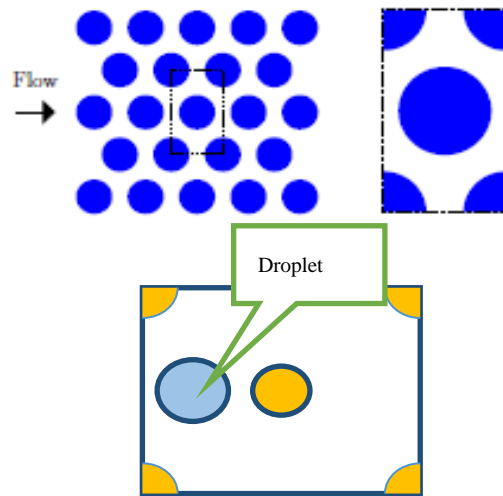
استفاده قرار گرفته است.

نیوتن برای سیال با فرض پیوستگی سیال است. به دلیل طبیعت پیچیده دینامیک سیالات، حل تحلیلی برای این معادلات دیفرانسیل جزئی فقط در مواردی با ساده‌سازی بسیار، قابل دستیابی است.

به طور کلی، حل معادلات ناویراستوکس فقط از طریق عددی امکان پذیر است. بنابراین، نقطه شروع محاسبات استاندارد دینامیکی یک سیال، گسسته‌سازی معادلات ناویراستوکس است. به عنوان مثال، این گسسته‌سازی به کمک روش‌های حجم کنترل، تفاضل محدود و المان محدود صورت می‌گیرد. 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 دارد [۲۴] که نیازمند روش‌های عددی پیچیده است که مخصوصاً وقتی در هندسه‌های پیچیده قرار گیرند، پیچیدگی آن دو چندان می‌شود. در مقابل روش شبکه بولتزنم 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^۱ (از مدل‌های جدیدی که بر اساس تئوری انرژی جنبشی بوده و از انسجام بالایی برخوردار است) می‌باشد. در مدل لو^۲ و مدل هی شان دولن^۳ اختلاف چگالی بالا در مجاورت مرز سطح مشترک منجر به ناپایداری عددی در محاسبات می‌شود. برای غلبه بر این مشکل هی، یک مدل برای جریان‌های چندفازی ارائه داد. هی و همکارانش^۴ (۱۹۹۹) 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^۵ دوفاز عمل می‌کند ولی به‌جای محاسبه مستقیم چگالی، از تابع مشخصه^۶ ϕ (این تابع توزیع مشابه معادله بقای ردیابی سیال در



شکل (۱): نمای شماتیک از هندسه.

در سال‌های اخیر روش شبکه‌ای بولتزنم به عنوان یک روش مناسب در شبیه‌سازی جریان سیالات مطرح شده و استفاده از آن گسترش یافته است [۲۳]. بر خلاف روش‌های مرسوم عددی که بر پایه جداسازی معادلات پیوسته ماکروسکوپی می‌باشند، روش شبکه‌ای بولتزنم بر پایه مدل‌های میکروسکوپی و معادلات جنبشی مزوسکوپی می‌باشد که به منظور ایجاد تمایز از دو روش مذکور دیدگاه حاکم بر آن را مزوسکوپی می‌نامند. ایده اصلی در روش شبکه‌ای بولتزنم این است که مدل‌های جنبشی ساده شده‌ای ایجاد کند که با استفاده از اصول اساسی فیزیک مزوسکوپی، خصوصیات ماکروسکوپی به دست آمده از این روش، معادلات مربوط به متغیرهای ماکروسکوپی را ارضاء نمایند.

روش شبکه‌ای بولتزنم بر پایه معادله بولتزنم و روش شبکه‌ای گاز اوتوماتا بنا شده است. به منظور رفع مشکلات روش شبکه‌ای گاز اوتوماتا، روش شبکه‌ای بولتزنم جایگزین مناسبی می‌باشد. در این روش به‌جای 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 ماکروسکوپی، معادلات حاکم بر دینامیک سیالات، معادلات ناویراستوکس هستند. معادلات ناویراستوکس اساساً ترجمه قوانین بقای جرم و قانون دوم

1- He et al.

2- Lue

3- He Shan Doolen (HSD)

4- He Chen Zhang

5- Standard Particle Distribution Functions

6- Index Parameter

و توابع توزیع تعادلی نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f^{eq} = \phi \Gamma(u), \tag{7}$$

$$g^{eq} = \rho RT \Gamma(u) + \psi(\rho) \Gamma(0),$$

که در آن، پارامترهای نامعلوم به صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

$$\phi = \int f d\xi, \tag{9}$$

$$p = \int g d\xi, \tag{10}$$

$$\rho RT u = \int \xi g d\xi. \tag{11}$$

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

$$v(\phi) = v_l + \frac{\phi - \phi_l}{\phi_h - \phi_l} (v_h - v_l). \tag{12}$$

۳-۲- گسسته سازی معادلات

فضای سرعت میکروسکوپی به مجموعه‌ای از سرعت‌های معین به صورت زیر گسسته می‌شود [۲۶]:

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

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

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

در نتیجه، توابع توزیع تعادلی زیر حاصل می‌شوند:

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

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

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

روش وی-او-اف^۱ است) استفاده می‌کند. تابع توزیع دوم تابع توزیع فشار^۲ است که برای محاسبه فشار از ممان مرتبه صفر^۳ آن استفاده می‌کند. این مدل همچنین از نیروهای جاذبه بین ذره‌ای استفاده می‌کند که کاملاً متفاوت از مدل شان چن است.

شبه‌سازی جریان سیال بر اساس تابع توزیع^۴ دینامیکی (تابع توزیع تعادلی بولتزمن) است. دینامیک مرز مشترک^۵ که شامل جداسازی فازها و کشش سطحی^۶ می‌باشد، با استفاده از تعاملات بین مولکولی^۷ 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^۸، تعریف شده است [۲۵].

یک مزیت مدل هی این است که در مقایسه با مدل HSD 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 تاثیر خطای عددی در محاسبه تغییرات چگالی بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر می‌شود.

۳-۱- معادلات مدل دوفازی

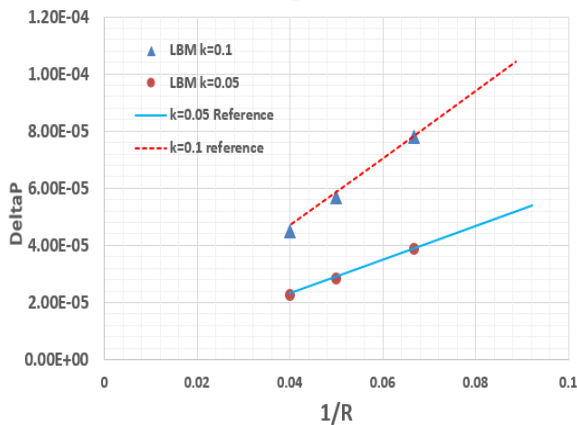
بردارهای سرعت مدل ۹ سرعته دو بعدی D2Q9 به صورت رابطه (۵) می‌باشد:

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

مدل دو فازی 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 می‌باشد:

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

- 1- VOF
- 2- Pressure Distribution Function
- 3- Zero Order Moment
- 4- Distribution Function
- 5- Interface
- 6- Surface Tension
- 7- Intermolecular Interactions
- 8- Single Density Distribution Function



شکل (۲): نتایج اعتبار سنجی لاپلاس.

۲-۴- جریان هایگن پوازیه

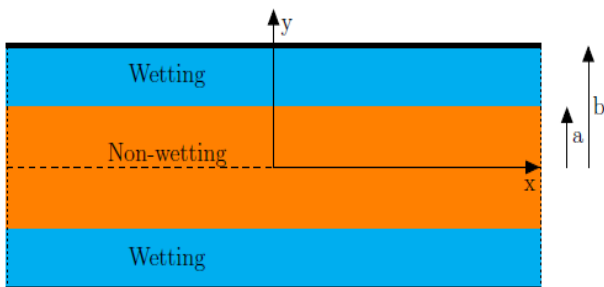
به عنوان یک اعتبارسنجی دینامیکی از نتایج حل تحلیلی برای جریان هایگن پوازیه دوفازی استفاده می‌شود. در این آزمون جریان سیال درون یک کانال با اشباع ۵۰ درصد مطابق شکل ۳ مورد بررسی قرار گرفته است و پروفیل سرعت به دست آمده با روابط تجربی موجود در شکل ۴ مورد مقایسه قرار گرفته است. برای فاز ترشده و ترنشده به ترتیب روابط زیر را داریم:

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

$$u(y) = -\frac{\Delta P}{2L\mu_w}(b^2 - a^2) - \frac{\Delta P}{2L\mu_{nw}}(a^2 - y^2), \quad |0| \leq |y| \leq a \quad (21)$$

مقدار اشباع که به صورت نسبت بین حجم اشغال شده به وسیله فاز W به کل حجم اشغال شده توسط سیال است از تعریف زیر حاصل می‌شود:

$$S_w = \frac{V_w}{V_w + V_{nw}} \quad (22)$$



شکل (۳): شماتیکی از هندسه اعتبارسنجی.

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

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

تابع توزیع g تنها سرعت و فشار را نتیجه می‌دهد. برای جریان تراکم ناپذیر دوفازی^۱، چگالی دور از مرز مشترک دقیقاً مشخص است. تنها کار باقی مانده 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 ارضاء می‌کنند.

$$\bar{f}_\alpha(x + e_\alpha \delta_t, t + \delta_t) - \bar{f}_\alpha(x, t) = -\frac{\bar{f}_\alpha(x, t) - f^{eq}_\alpha(x, t)}{\tau} \quad (18)$$

$$-\frac{(2\tau - 1)(e_\alpha - u) \cdot \nabla \psi(\phi)}{RT} \Gamma(u) \delta_t,$$

$$\bar{g}_\alpha(x + e_\alpha \delta_t, t + \delta_t) - \bar{g}_\alpha(x, t) = -\frac{\bar{g}_\alpha(x, t) - g^{eq}_\alpha(x, t)}{\tau}$$

$$-\frac{(2\tau - 1)(e_\alpha - u) \cdot [\Gamma_\alpha(u)(F_s + G) - (\Gamma_\alpha(u) - \Gamma_\alpha(0)) \nabla \psi(\rho)]}{\delta_t}.$$

مشخصه‌های ماکروسکوپی از روابط زیر قابل محاسبه‌اند:

$$\phi = \sum \bar{f}_\alpha, \quad (19)$$

$$p = \sum \bar{g}_\alpha - \frac{1}{2} u \cdot \nabla \psi(\rho) \delta_t,$$

$$\rho RT u = \sum e_\alpha \bar{g}_\alpha + \frac{RT}{2} (F_s + G) \delta_t.$$

۴- اعتبار سنجی

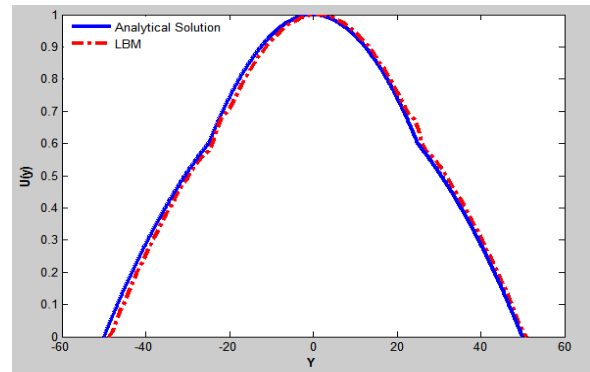
به منظور اعتبار سنجی کد محاسباتی، دو اعتبار سنجی قانون لاپلاس و جریان دوفازی هایگن پوازیه^۳، به ترتیب به عنوان اعتبار سنجی استاتیکی و دینامیکی صورت گرفته است که نتایج آن گواهی بر انطباق نتایج حل عددی با حل های تحلیلی می باشد.

۴-۱- قانون لاپلاس

به عنوان اولین اعتبار سنجی دوفازی، یک قطره منفرد که تحت تاثیر هیچ نیروی خارجی قرار ندارد مورد بررسی قرار می گیرد. اختلاف فشار یک نقطه درون قطره و نقطه ای پیرامون قطره برای مقادیر مختلف تنش سطحی باید مقدار و الگوی خطی مورد انتظار را داشته و بر اساس رابطه زیر بیان شود. نتایج اعتبار سنجی در شکل ۲ ارائه شده است.

$$P_{out} - P_{in} = \frac{\sigma}{r} \quad (20)$$

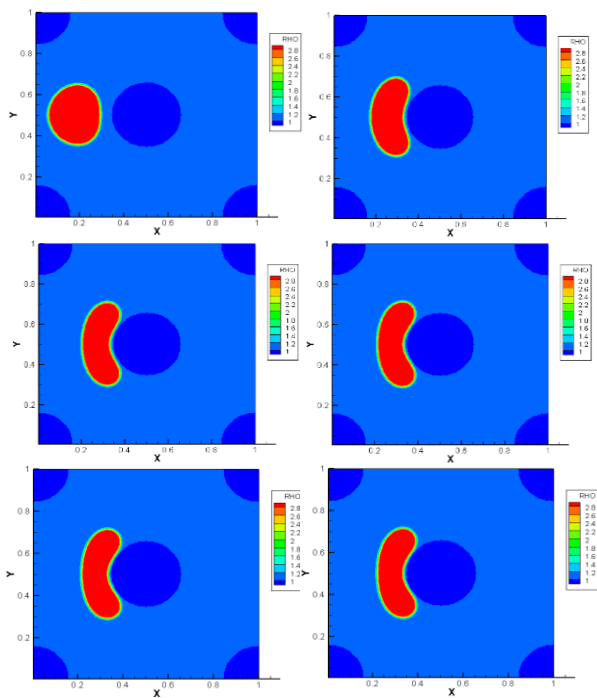
عبور قطرات از میان موانع را نشان می‌دهند. در جدول ۱ مشخصات حالات الف و ب ارائه شده در اشکال ۶ و ۷ بیان شده است. در این نمودارها نمونه ای از تاثیر افزایش عدد کاپیلاری و کاهش عدد آنسرج به عنوان عواملی که احتمال و پتانسیل عبور و شکست قطرات را افزایش می‌دهد و در تفسیر رفتار قطرات در محیط متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرند، مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج، در مقادیر پایین عدد آنسرج تا نقطه مشخصی که عدد آنسرج بحرانی است، پایداری و مقاومت قطره در برابر ناپایداری‌های القا شده به واسطه فاز اولیه، هندسه موانع و فشار مستقیم وارده به قطره می‌شود، مشاهده می‌شود. با کاهش مقدار تنش سطحی، عملا کشیدگی قطره و تغییر شکل آن افزایش می‌یابد که دلیل آن این است که تنش سطحی اثر دوگانه‌ای دارد. به عبارتی، کاهش تنش سطحی، منجر به افزایش عدد کاپیلاری (عامل محرک شکست) و عدد آنسرج (مخالف شکست) می‌شود. اثر محرک شکست (کاپیلاری) برای حالتی با تنش سطحی پایین (با توجه به فرمول اعداد بدون بعد این نتیجه قابل استدلال است) بیشتر از اثر مخالف شکست (آنسرج) بوده بنابراین، در تنش سطحی پایین پدیده شکست و عبور قطرات مشاهده می‌شود و بالعکس.



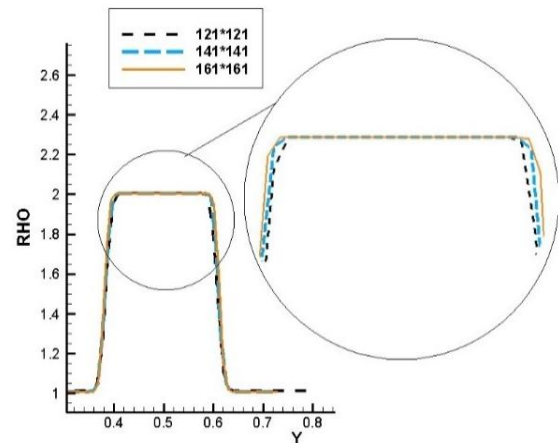
شکل (۴): نتایج اعتبار سنجی هایگن پوازیه.

۴-۳- بررسی استقلال از شبکه

از مهمترین مسایل 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 [۲۷-۲۹]. با مشاهده تاثیر سایزهای مختلف شبکه، در شکل ۵ استقلال حل از شبکه به وضوح مشاهده می‌شود.



شکل (۶): تصاویر حرکت قطره درون محیط متخلخل برای حالت الف.



شکل (۵): نمایش توزیع چگالی در خط مرکزی محور Y شامل قطره، فاز زمینه و مرز مشترک دو فاز.

۵- بحث و نتیجه گیری

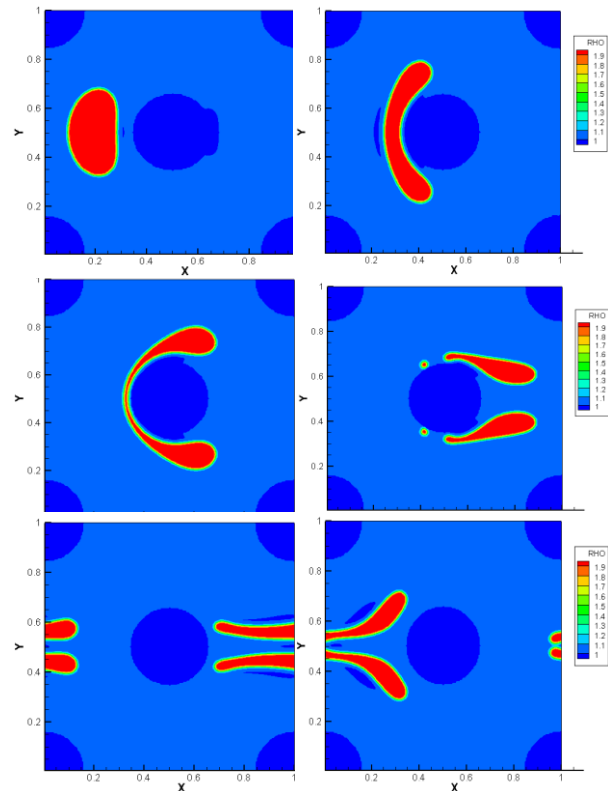
شکل‌های ۶ و ۷ دو مورد از انیمیشن‌های مربوط به حبس و

در صورتی که در مرحله سوم برآیند نیروهای مانع حرکت با انرژی مومنتوم قطره به نفع انرژی مومنتوم قطره باشد، در ابتدا فرآیندی با کاهش سرعت قطره و تغییر شکل کامل قطره روبرو می شویم که قطره پیشانی مانع را فرا می گیرد. در واقع با کاهش ضخامت و افزایش طول قطره، قطره در طول پیشانی مانع گسترده می شود. تاثیر موافق مومنتوم سیال عبوری از اطراف قطره، به عنوان منبعی برای افزایش مومنتوم قطره پشت مانع است که با انتقال مومنتوم از طریق تنش سطحی بین سیال فاز پایه و قطره انجام می شود. افزایش مومنتوم قطره با تغذیه انرژی جنبشی قطره از سیال اطراف، نتیجتاً سبب گلوئی شدن قطره و عبور قسمت هایی از قطره از طرفین مانع می شود. به دلیل نیروی کوهیژن، قسمت هایی از قطره باقیمانده در پشت مانع نیز در اکثر موارد به همراه بخش های جانبی قطره از مانع عبور می کند. با فاصله گرفتن از مانع سرعت قطرات شکسته شده بیشتر می شود (شکل ۷).

جدول (۱): فهرست نمونه هایی از حالات مختلف انیمیشن های حرکت قطره درون محیط متخلخل.

حالت	توصیف حالت
الف	نسبت چگالی ۱:۲، عدد آنسرج ۰/۲۸۰۷، عدد کاپیلاری ۰/۱۶۵۹ و فشار PI (حبس قطره)
ب	نسبت چگالی ۱:۲، عدد آنسرج ۰/۶۲۷۶، عدد کاپیلاری ۰/۹۰۱۰ و فشار PI (شکست قطره)

در اشکال ۹ - ۸ به بررسی عدد آنسرج - رینولدز در سه مقدار اختلاف فشار بی بعد شده مختلف به ترتیب برای دو نسبت چگالی ۱:۲ و ۱:۳ می پردازیم. با توجه به نمودار شکل ۹ - ۸ مشاهده می شود با افزایش فشار، عدد رینولدز جریان افزایش می یابد، در عین حال با کاهش عدد آنسرج تا مقدار مشخصی عملاً عدد رینولدز ثابت مانده و همچنان قطره با شکست از مانع عبور می کند، اما در مقدار مشخصی که به نوعی معرف عدد آنسرج بحرانی است قطره حبس شده و یک مانع (بلوکج) بر سر جریان ایجاد می کند که باعث کاهش رینولدز جریان نیز می شود. با کاهش بیشتر آنسرج و تماس شدن قطره بر پیشانی مانع اندکی از تاثیر سد مانند، ممانعت قطره در مقابل جریان کاسته شده و رینولدز کمی افزایش می یابد.

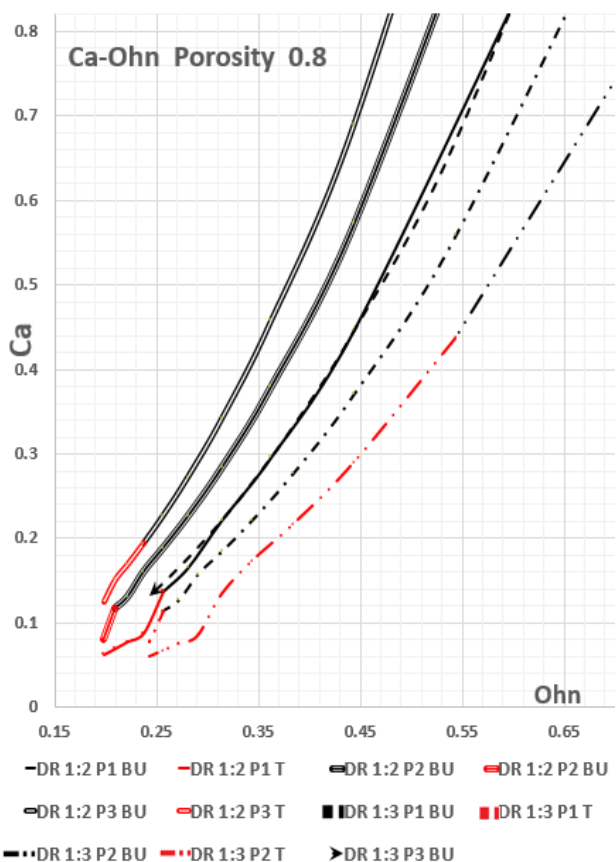


شکل (۷): تصاویر برخورد قطرات برای محیط متخلخل برای حالت ب.

بنابر انیمیشن های برخورد، مراحل مختلف برخورد به طور کلی شامل موارد زیر می باشد:

مرحله اول، شتاب گیری قطره از ورودی تا نزدیکی مانع تا اندازه ای که قطره مانع را حس کند، مرحله دوم، کاهش سرعت قطره تا سرعت مطلق نزدیک به صفر، در این مرحله تغییر شکل قطره از حالت دایره شکل به حالت بیضوی، رخ می دهد. محبوس شدن یا شکست و عبور آن از روی مانع براساس تقابل بین انرژی جنبشی قطره و انرژی داخلی حاصل از چسبندگی ذرات تشکیل دهنده آن به وقوع می پیوندد.

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 قطره فائق آید، قطره متوقف شده و در نزدیک ترین فاصله با مانع قرار می گیرد. به عبارتی، در این حالت بر اساس تقابل بین تمایل به داشتن کمترین سطح انرژی (تمایل به پیدا کردن شکل دایره) در مقابل اثرات انتقال مومنتوم سیال فاز پایه، قطره با پیدا کردن شکلی بیضوی و غیرمتمارن با سطحی پهن شده روی مانع به خود گرفته و پشت مانع حبس می شود.

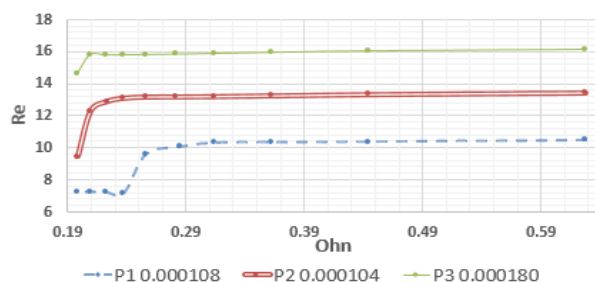


شکل (۱۰): نمودار آنسرج-کاپیلاری برای نسبت چگالی ۱:۲ و ۱:۳.

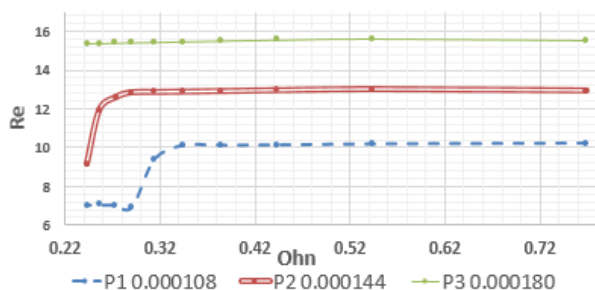
خطوط ممتد یک تا سه گانه، برای نسبت چگالی ۱:۲ و حالات خط چین برای نسبت چگالی ۱:۳ می‌باشند. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که برای مواردی مثل نسبت چگالی ۱:۳ و فشار P3 حبس قطرات رخ نمی‌دهد و در فشار مذکور در ازای هر عدد آنسرجی در طیف مورد مطالعه پدیده حبس قطرات مشاهده نمی‌شود. اما با افزایش گرادیان فشار، سهم محدوده شکست و عبور قطرات نسبت به حبس قطرات بیشتر 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 قطرات (جابه جایی نمودارها به سمت راست و مقادیر بیشتر عدد آنسرج شروع شکست) می‌شود.

با تکمیل طیفی مقادیر عدد آنسرج و کاپیلاری این نمودار می‌توان از آن برای پیش بینی رفتار قطرات در محیط متخلخل



شکل (۸): نمودار آنسرج-رینولدز برای نسبت ۱:۲.



شکل (۹): نمودار آنسرج-رینولدز برای نسبت چگالی ۱:۳.

افزایش مقدار فشار وارده باعث جابه‌جایی منحنی‌ها به سمت مقادیر بیشتر عدد رینولدز می‌شود (افزایش دامنه عدد رینولدز و جابه جایی نمودار در راستای قائم) و مقادیر آنسرج بحرانی نیز به سمت چپ (مقادیر بیشتر آنسرج) جا به جا می‌شود، به عبارتی حبس و عدم عبور قطرات در عدد آنسرج کمتری رخ می‌دهد. در مقادیر خاصی، به عنوان مثال برای نسبت چگالی ۱:۳ و فشار P3 در شکل ۹ عملاً رینولدز بحرانی وجود نداشته (برای محدوده اعداد آنسرج بررسی شده در این تحقیق) و در هر مقداری از عدد آنسرج شکست قطره و عبور آن رخ می‌دهد. در این حالت اثرات تغییر آنسرج بر رینولدز جریان ناچیز می‌باشد.

لازم به توضیح است که P1 اشاره به کمترین مقدار فشار بی‌بعد شده با مقدار ۰/۰۰۰۱۰۸ دارد. نمودارهای تغییر عدد کاپیلاری بر حسب آنسرج برای مقادیر مختلف نسبت چگالی و افت فشار بی‌بعد در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. علایم اختصاری BU و T به ترتیب اشاره به شکست قطره و حبس شدن آن دارند.

P1 تا P3 به ترتیب اشاره به مقادیر فشار بی بعد شده ۰/۰۰۰۱۰۸، ۰/۰۰۰۱۴۴ و ۰/۰۰۰۱۸۰ دارند و حرف T و BU^۱ به ترتیب معرف حالت حبس و شکست قطره می‌باشند. DR1:2 نیز اشاره به نسبت چگالی ۱:۲ دارد.

1- Trap
2- Break Up

متخلخل و چگونگی اثرپذیری جریان از تغییرات آنها را نمایان می‌سازد.

۷- مراجع

1. Dullien, F.A.L. "Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure", Academic Press, San Diego, 1991.
2. Donaldson, E.C., Chilingarian, G.V. and Yen, T.F. "Enhanced Oil Recovery, I Fundamentals and Analyses", Vol. 17, Elsevier, 1985.
3. Ingham, D.B. and Pop, I. "Transport Phenomena in Porous Media II", Pergamon Press, Oxford, 2002.
4. Khaled, A.R.A. and Vafai, K. "The Role of Porous Media in Modeling Flow and Heat Transfer in Biological Tissues", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, No. 26, pp. 4989-5003, 2003.
5. Rowlinson, J.S. and Widom, B. "Porous Media, Applications in Biological Systems and Biotechnology", Crc Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2011.
6. Pan, C., Luo, L.-S. and Miller, C.T. "An Evaluation of Lattice Boltzmann Schemes for Porous Medium Flow Simulation", Computer & Fluids, Vol. 35, pp. 898-909, 2006.
7. Aaltosalmi, U. "Fluid Flow in Porous Media with the Lattice-Boltzmann Method", PhD Dissertation, Department of Physics, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland, 2005.
8. Gunstensen, A.K. and Rothman, D.H. "Lattice-Boltzmann Studies of Immiscible Two-phase Flow through Porous Media", Journal of Geophysical Research, Vol. 98, pp. 6431-6441, 1993.
9. Ferreol, B. and Rothman, D.H. "Lattice-Boltzmann Simulations of Flow Through Fontainebleau Sandstone", Transport in Porous Media, Vol. 20, pp. 3-20, 1995.
10. Martys, N.S. and Chen, H. "Simulation of Multicomponent Fluids in Complex Three-dimensional Geometries by the Lattice Boltzmann Method", Physical Review E, Vol. 53, 1996.
11. Tölke, J., Krafczyk, M., Schulz, M., and Rank, E. "Lattice Boltzmann Simulations of Binary Fluid Flow through Porous Media", Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol. 360, pp. 535-545, 2002.
12. Lin, C.L., Videla, A.R., and Miller, J.D. "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, Vol. 21, pp. 255-261, 2010.

بهره برد. به عبارتی این نمودار همانند یک نقشه رفتار شناسی 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 هم مقیاس با ابعاد موانع در محیط متخلخل می‌باشند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با بررسی توامان فاکتورها و پارامترهای مرتبط با یک جریان دوفازی در بستر یک محیط متخلخل، به بررسی رفتار قطرات در برخورد با موانع دایره شکل تشکیل دهنده محیط متخلخل پرداخته شد. نکته قابل توجه در این رابطه، هم مقیاس بودن قطرات با موانع تشکیل دهنده محیط متخلخل می‌باشد.

مجموعه نمودارهای به‌دست‌آمده از این مطالعه پارامتریک روی فاکتورهای مرتبط با فیزیک جریان چند فاز و محیط متخلخل امکان پیش‌بینی رفتار قطرات در بستر محیط متخلخل را فراهم می‌کند. این فاکتورها شامل نسبت‌های چگالی متفاوت، اعداد بدون بعدی چون آنسرج و کاپیلاری و رینولدز محیط متخلخل بوده است. در محدوده اعداد بدون بعد مطالعه شده دو فیزیک شکست و محبوس شده قطره مشاهده و اثرات پارامترهای بی‌بعد مختلف روی آنها بررسی شد. بر اساس نتایج بدست 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 تاثیر مستقیمی بر افزایش شانس شکست و پیچیده‌تر 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. عدد آنسرج بالا در سرعت‌های پایین می‌تواند حبس قطره را منجر شود ولی با افزایش سرعت جریان و به دنبال آن افزایش عدد کاپیلاری، علی‌رغم افزایش عدد آنسرج در فیزیک مسئله، پدیده شکست قطره حاکم است. لازم به‌ذکر است که حبس قطرات برای هندسه فعلی که شامل موانع دایره‌ای شکل بوده در مواردی که عدد آنسرج، رینولدز و گرادیان فشار بسیار پایین باشند نیز مشاهده می‌شود. این موضوع، پارامترهای بی‌بعد مجموعه مهم در مطالعه اندرکنش قطرات هم مقیاس با ذرات محیط

22. Taghilou, M. and Rahimian, M.H. "Investigation of Two-phase Flow in Porous Media Using Lattice Boltzmann Method", *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 67, pp. 424-436, 2014.
23. Javadi, A., Taeibi-Rahni, M., Bastani, D., and Javadi K. "The Effects of Hydrodynamics Characteristics on the Mass Transfer during Droplet Formation Using Computational Approach, ASME's International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE)", pp. 811-821, 2006.
24. Chen, F. and Hagen, H. "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)*, Vol. 19, pp. 11-19, 2011.
25. Cooper-White, J.J., Fagan, J.E., Tirtaatmadja, V., Lester, D.R., and Boger, D.V. "Drop Formation Dynamics of Constant Low-viscosity", *Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 106, pp. 29-59, 2002.
26. Heertjes, P.M., De-Nie, L.H., and De-Vries, D.H. "Drop Formation in Liquid-Liquid Systems-II Testing of the Considerations Given in Part I, for Drop Volumes below the Jetting Velocity, A Criterion for the Jetting Velocity", *Chemical Engineering Science*, Vol. 26, No. 3, pp. 441-449, 1971.
27. Yang, Z.L., Dinh, T.N., Nourgaliev, R.R., and Sehgal, B.R. "Numerical Investigation of Bubble Growth and Detachment by the Lattice Boltzmann Method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 195-206, 2001.
28. Taghilou, M. and Rahimian, M.H. "Simulation of 2D Droplet Penetration in Porous Media, Using Lattice Boltzmann Method", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, pp. 43-56, 2013 (in Persian).
29. Kim, L.S., Ha, H.K., Jeong, M.Y., and Kim, K.C. "Numerical Simulation of Droplet Formation in Micro-channel, Using Lattice Boltzmann Method", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 770-779, 2008.
13. Frank, X., Perré, P. "Droplet Spreading on a Porous Surface: A Lattice Boltzmann Study", *Physics of Fluids*, Vol. 24, 2012.
14. Huang, H., Li, Z., Shuaishuai, L., and Lu, X. "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*, Vol. 61, pp. 341-354, 2009.
15. Pan, C., Hilpert, C.T., and Miller, C.T. "Lattice-Boltzmann Simulation of Two-phase Flow in Porous Media", *Water Resources Research*, Vol. 40, 2004.
16. Hao, L. and Cheng, P. "Pore-scale Simulations on Relative Permeabilities of Porous Media by Lattice Boltzmann Method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1908-1913, 2010.
17. Tabe, Y., Yongju, L., Takemi, C., and Masaya, K. "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*, Vol. 193, 2009.
18. Huang, H., Huan, Jun-Jie, and Lu, Xi-Yun "Study of Immiscible Displacements in Porous Media Using a Color-Gradient-Based Multiphase Lattice Boltzmann Method", *Computers & Fluids*, Vol. 93, pp. 164-172, 2014.
19. Huan, H., Wang, L., and Lu, X. "Evaluation of Three Lattice Boltzmann Models for Multiphase Flows in Porous Media", *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 61, p. 606-3617, 2011.
20. Liu, H., Valocchi, A.J., Kang, Q., and Werth, C. "Pore-scale Simulations of Gas Displacing Liquid in a Homogeneous Pore Network, Using Lattice Boltzmann Method", *Transport in Porous Media*, Vol. 99, pp. 555-580, 2013.
21. Latifiyan, N., Farhadzadeh, M., Hanafizadeh, P., and Rahimian, M.H. "Numerical Study of Droplet Evaporation in Contact with Hot Porous Surface Using Lattice Boltzmann Method", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015.