

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

سال ۱۴۰۲ /دوره بهار و تابستان /شماره ۱ /صفحه ۲۷-۴۰

DOI: 10.22034/stme.2023.400164.1036



پیشبینی و مدلسازی رفتار نفوذ و پیمایش قطره مایع داخل محیط متخلخل با استفاده از روش جریان دو فازی حجم سیال

آرش نوربخش سعدآباد'، فاطمه افسونی'، سیدامیررضا عبداللهی'*، مهدی نامی خلیله ده'، سیدفرامرزرنجبر "

۱ - دانشجو دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ۲- دانشجو کارشناسی ارشد مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ۳- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیدہ

در ایسن مقالسه پدیسده نفسوذ قطره مایسع داخسل محیسط متخلخسل بسه کمسک روش حجسم سسیال دوفسازی مطالعسه شسده اسست. بسا توجسه بسه اهمیست جریان هسای دو و چنسد فسازی و دسستیابی بسه کسم تریسن خطا در شسبیه سسازی ایسن پدیسده، در ایسن پژوهسش مدلسی بسرای شسبیه سسازی جریسان دوفسازی نفسوذ قطره در محیسط متخلخسل پیشسنهاد شسده اسست، بسا توجسه بسه اینکسه مهسم تریسن نکتسه در شسبیه سسازی جریسان دوفسازی نفسوذ قطره در محیسط متخلخسل انطبساق بسا نتایسج تجربسی اسست تمرکسز ایسن پژوهسش بسر ارائسه مدلسی شسبیه سسازی جریسان دوفسازی نفسوذ قطره در محیسط متخلخسل انطبساق بسا نتایسج تجربسی اسست تمرکسز ایسن پژوهسش بسر ارائسه مدلسی با خطسای کم تسر نسست بسه دیگسر روش هسای ارائسه شسده در گذشسته اسست کسه دسستیابی بسه خطسای کم تسر نسسبت بسه نتایسج تجربسی مهم تریسن نسوآوری ایسن پژوهس محسسوب می شود. شسبیه سسازی هسا در ایسن پژوهس بسا روش حجسم سسیال انجسام شسده است. تاثیسر تغییسر متغیرهسای کشش سسطحی، ویسسکوزیته و زاویسه تماس، ویسسکوزیته و نفوذپذیسری و سسطح گسسترش قطیره در محیسط متخلخس پخش و نفسوذ قطیره آب بسدون حضور نیسروی گرانس بسا کشش سسطحی ۲۰/۰ کمتسر از دو کشسش سطحی دیگسر ان می باشد. سر مع تغییسر متعیرهسای کسه زاویسه تماس قطیره ۶۰ و ۲۰ در جسه است تغییسرات سطح گسسترش تقریسا یکسان می باشد. سر عت بر رسسی شده اند. زمانسی کسه زاویسه تماس قطیره ۶۰ و ۲۰ در جسه اسست تغییسرات سطح گسسترش تقریسا یکسان می باشد. سر عت پخش و نفسوذ قطیره آب بسون می و کرانس بسا کشش سطحی ۲۰/۰ کمتسر از دو کشیش سطحی دیگیر داره. نتایسج نشسان داد کسه روش حجسم سیال مسورد استان می پژوهیش نسست تمری نشیست به دو حالت دیگیر دارد. نتایسج فیزیسک مسسئله مشسابه در مقایسسه بسا نتایسج ترمی ناسست تری داشت به دو حالت دیگست داش نا داد فیزیسک مسیناه مشیابه در مقایسسه بی نتایسج به در می بیگیری داشست به است.

جريان دوفازى، حجم سيال، نفوذ قطره، محيط متخلخل، پيمايش قطره.

Prediction and simulation of diffusion of a droplet in a porous media using twophase control volume

Nourbakhshsadabad Arash¹, Fatemeh Afsouni², Abdollahi Seyyed Amirreza^{2*}, Nami Khalilehdeh Mahdi², Ranjbar Seyyed Faramarz³

1- Ph.D. Candidate, Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Master's student, faculty of mechanical engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

In this article, diffusion of a droplet in a porous media using a two-phase fluid volume is studied. Considering the importance of two-phase flow in achieving an accurate solution, this method is used in this study. The most important aspect of modeling two-phase flow in a porous media is conformity with empirical results. In this study the main focus is to provide a model based on simulations done with fluid volume method. The impact of parameters such as surface tension, viscosity, contact angle, diffusivity and expansion surface of a droplet in a porous media are studied. When the contact angle of 20 and 60 degree is considered, surface changes are almost negligible. Diffusivity of the droplet when gravity is not present with surface tension of 0.02 is less compared to 0.001 and 0.0072 values for surface tension while in the presence of gravity, the droplet with surface tension of 0.001 diffusivity is more than two other cases. Results indicate that the method of fluid volume utilized in this study, has 9 precent more accuracy compared to Boltzmann network method based on Shaun and Chen.

Keywords

Two-phase flow, fluid volume, Droplet diffusivity, Porous media, Droplet diffusion.

* سيد اميررضا عبداللهي، s.amirreza.abdollahi1401@ms.tabrizu.ac.ir

سید امیر رضا عبداللهی و همکاران

۲۸ 🔹 پیش بینی و مدل سازی رفتار نفوذ و پیمایش قطره مایع ...

۱– مقدمه

طبیعت پیچیده جریانهای دوفازی یا چند فازی ناشی از سطوح مشترک متعدد در حال حرکت و تغییر شکل پذیر و همچنین میدانهای جریان پیچیده نزدیک سطح مشترک میباشند. لازم به ذکر است که جریان های تک فاز براساس ساختار جریان به جریانهای آرام، گرا و آشفته دسته بندی می شوند. در حالیکه جریان گروه اصلی تقسیم می شود که هر یک از آنها رژیم جریان یا الگوی جریان نامیده می شود. شد دینامیک جریان دوفازی از پدیدههای بسیار پیچیده است، زیرا علاوه بر مشکلات جریان تک فاز، مشکلاتی در مکانهای مرزی سطح مشترک، مومنتوم درون فاز، انتقال حرارت، جرم و واکنشهای درون فازی دارد[۱].

با افزایش دبی فاز گازی حباب ها به هم می چسبند. در جریان اسلاگ، قطر حبابهای بخار یا گاز با قطر لوله تقریبا برابر می شود. دماغه حبابها شکل کروی دارد و گاز داخل حباب ها از دیواره لوله توسط یک فیلم نازک مایع که به سمت پایین حرکت میکند جدا می شود، همچنین در پشت حباب های اصلی ممکن است حباب های گازی کوچکتر دیده شود. جریان چرن از شکستن حبابهای بزرگ که در جریان اسلاگ تشکیل شده بودند به وجود میآید [۲]. گازیا بخار به صورت بینظم در داخل مایع و دور از دیـواره لولـه حرکـت میکنـد. ماهیـت جریـان نیـز متغیر با زمان است. به این جریان، جریان نیمه حلقوی یا حلقوی اسلاک نیے اطلاق میشود. جریان حلقوی از فیلم مایع بر روی دیواره لوله و هسته بخاریا گاز تشکیل می شود. بر روی سطح فیلم، امواج با دامنه بزرگ تشکیل می شوند کـه از شکسـتن ایـن امـواج مقادیـر قابـل توجهـی قطـره مایـع وارد هسـته بخـار یـا گاز میشـوند. بـه همیـن دلیل، نقطـه تمایـز ایـن جریـان از جریـان حلقـوی باریـک در این میباشد که قطرات جدا از هم هستند و به صورت

تــودهای حرکــت نمیکننــد [۳].

مدل حجم سیال مدلی است که برای دو یا چند سیال مخلوط نشدنی استفاده می شود که سطح مشترک بین دو فاز حائز اهمیت است. در این مدل، یک سری معادله مومنتوم برای سیال ها در نظر گرفته می شود و کسر حجمی برای هر سیال در هر سلول دامنه مساله حل می شود. مدل حجم سیال برای مدل کردن جریان لایه لایه، جریان های سطح آزاد، پر شدن یک مخزن، تکان خوردن سطح مایع در اثر اغتشاش، حرکت حباب های بزرگ در یک جریان مایع و ردیابی گذرا یا پایای سطح مشترک گاز- مایع استفاده می شود [۴].

تقیلو و رحیمیان [۵] به بررسی جریان دوفازی با نسبت چگالی و لزجت یک در داخل محیط متخلخل به روش شان و چن پرداختند. اما با تغییر میدان متخلخل و زاویه تماس تأثیر پارامترهای مربوط به محیط متخلخل از قبیل عدد دارسی و زاویه تماس را مطالعه نمودند. رقابت میان نیروی مخالف در برابر حرکت قطره و اثر مویینگی در اثر حضور ذرات محیط متخلخل به کمک عدد دارسی توصيف شد. همچمين تاثير زاويه تماس ميان فازهاى مایے۔گاز و سے جامے دیے میےزان نفوذ قطے ہ در داخے محیط متخلخل ارزیابی گردید. به علت محدودیت ذاتی روش مــورد بررســى آنهـا و ضعـف آن در كنتـرل مســتقل كشــش ســطحى، تأثيـر پارامترهايــى نظيـر عـدد رينولـدز، وبر و فرود ارزیابی نشده بود که در پژوهش حاضر سعی در بررسے آنها شدہ است. آلآمین و همکاران [۶] به بررسی رفتار انتقال نانوذرات را با استفاده از تکنیکهای یادگیری ماشین، از جمله رگرسیون تقویت کننده گرادیان، درختهای تصمیم گیری، جنگلهای تصادفی و شبکههای عصبی مصنوعی پرداختند. آنها روش های مختلفی را برای پردازش دادهها برای پیشبینی رفتار سیال در محیط متخلخل بررسی کردند. برای ارزیابی مدل ها از میانگین خطای مطلق و ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شده

سال ۱۴۰۲/ دوره بهار و تابستان / شماره ۱

رژیم ویسکوز فینگرینگ و نزدیک شدن به رژیم کاپیلاری فینگرینے به کمک آبدوست نمودن سطوح پرداخته شد. اوزاکی و اویاقی [۱۰] روش شبکه بولتزمن را برای مطالعه تراوایے یک آرایش مربعے و یک آرایش تصادفی از کرہھا به همراه عبارتهای مختلف برخورد مورد استفاده قرار دادند. مطالعات آن ها به صورت تک فاز صورت گرفت. در حالت دو فاز به بررسی عددی یک سیال دو فازی 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. آن ها نتایج خود را در قالب دیاگرامهایی جهت طبقه بندی رفتار جریان دو فاز درون محيط متخلخل ارائه كردند. بررسي جريان تك 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 یارامترہای مدل را بے صورت تجربے مورد مطالعہ قےرار دادند. در کار بایهات و یار [۱۱] یک جریان چند گوهای در حالت سه بعدی در بستر متشکل از ماسه سنگ مدل شان و چن بررسی شد. در این مطالعه جایگزینی یک سیال با سیال دیگر به خوبی مدل شد و تراوایی نسبی برای فازهای تر شده مختلف محاسبه شد که با مقادیر تجربی به خوبی مطابقت داشت. یک جریان چندفازی درون محیط متخلخل با ویسکوزیته و نسبت چگالی متغیر براساس مدل پیشنهادی گانستنسن پرداختند. آن ها محدودیت ها و مشکلات روش شبکه بولتزمن در مسائل واقعی را مورد بررسیی قــرار دادند.

در تحقیقات انجام گرفته در گذشته پیشبینی رفتار جریان دوفازی نفوذ قطره در محیط متخلخل در بیشتر موارد از روش های بولتزمن شبکهای بر پایه روش شان و چن استفاده شده بود و بررسی روش حجم سیال و دقت این روش برای پیشبینی جریان دوفازی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته بوده است که در این پژوهش نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

لست و گریـو [۷] بـه بررسـی نفـوذ قطـرات و فیلـم آب بـر روی محیط متخلخل پرداختند. با بررسی روش های مختلف یک یوشش آبگریز برای استفاده روی سطوح متخلخل پیشنهاد دادند. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد کے فرآینے یوشے ش دھے روی محیط متخلخے منجے ہے تشکیل حوزههای نانوذرات TiO۲ آبدوست و تکههای اسید استئاریک آبگریز میشود که امکان مرطوب شدن ناهمگـن را فراهـم می کنـد. چیـی و همـکاران [۸] بـه یافتـن دینامیک انتشار و جـذب قطـره بـا اسـتفاده از مبانـی و در عین حال تقریب های مربوطه برای محاسبه دینامیک شعاعی و عمودی پرداختند. آنها رفتار نفوذ قطره در محیط متخلخل را شبیهسازی کردند و با بررسی روش های مختلف مدل پیشنهاد کردند که زمان محاسبات داشت. نتایج با دادههای تجربی منتشر شده برای حالت مرطوبسازی کامـل مقایسـه شـد و مشـخص شـد کـه همخوانـی خوبـی با دادههای تجربی منتشر شده برای دینامیک قطرات و دینامیک نفوذ در بستر متخلخل وجود دارد.

صالح آبادی و همکاران [۹]، پدیده نفوذ فیلم مایع و همچنین قطره داخل محیط متخلخل لایهای به کمک مدل شان و چن دو فازی و روش شبکه بولتزمن را بررسی کردند. الگوی نفوذ سیال داخل محیط متخلخل، هم بصورت فیلم مایع و هم به شکل قطره مورد بررسی قرار گرفت و دو رژیم نفوذ ویسکوز فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ مشاهده و بررسی شد. تاثیر نسبت تخلخل و ویژگی آبدوست یا آبگریز بودن سطح بر روی آهنگ نفوذ نیز بررسی گردید. نتایج نشان داد که در کل افزایش میزان تخلخل و آبگریز نمودن سطوح موجب افزایش آهنگ پخش شده است. با توجه به لایهای بودن محیط متخلخل، اثر استفاده از لایهها با نسبت تخلخلهای مختلف و دارای بهبود آهنگ نفوذ سیال در محموع لایهها، بر روی بهبود آهنگ نفوذ سیال در محیط متخلخل مورد بحث

سید امیر رضا عبداللهی و همکاران

$$\frac{\partial \rho}{\partial} + \nabla . \nu = 0 \tag{1}$$

و \overline{v} به ترتیب چگالی و بردار سرعت جریان میباشند. ρ با فرض تراکم ناپذیر بودن فازها، بخش تغییر چگالی از رابطه بالاحذف می شود. معادله حاکم بر رفتار جریان های چندفازی، لـزج، تراکـم ناپذیـر و غیـر دائمـی بـرای هـر دو سـیال (هـوا و آب) كـه توسـط معـادلات ناوير اسـتوكس بيـان مىشـود به صورت زیر بیان می شود [۱۲]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \mu (\nabla v + \nabla v) + \rho g + F_s$$
(Y)

در معادلــه فــوق جملــه $\left(
abla v +
abla^T v
ight)$ تانســور نــرخ تغییــر شـکل $2/(2 - \nabla v + \nabla^T v)$ ، در قالـب اپراتـوری میباشـد و مولفه های آن در شکل نوشتاری تانسوری عبارت است از ی، p میدان سرعت، p فشار، v چگالی، $V_{i,i} = (v_{i,i} + v_{i,i})/2$ ویسکوزیته و F_s که به عنوان جمله منبع به معادله μ مومنتــوم اضافــه شــده، ناشــی از کشــش ســطحی در ســطح مشترک دوفاز است که با استفاده از قضیهی دیورژانس می توان آن را به عنوان نیروی حجمی و به صورت رابطه

$$F_{c} = \sigma k \nabla \alpha \tag{(7)}$$

کشت سطحی روی سطح مشترک است که در جهت σ عمود بر سطح محاسبه می شود. K انحنای سطح مشترک است که به صورت زیر است [۱۳] :

$$k = \nabla . \left(\frac{\nabla \alpha}{\left| \nabla \alpha \right|} \right) \tag{(f)}$$

معادلیه بقیای کسیر حجمتی نیز در میدل حجیم سیال به صورت زیر است [۱۲]: ۳۰ پیش بینی و مدل سازی رفتار نفوذ و پیمایش قطره مایع ...

مطالعه می شود. افزایش دقت پیش بینے رفتار نفوذ قطره نسبت به دیگر روشهای عددی ارائه شده در گذشته نوآوری این پژوهش است. از ویژگیهای تحقیق حاضر، ایــن بـودہ کــه بـا بررسـی چندیــن متغیـر و تاثیـر آنهـا روی رفتار قطره روى محيط متخلخل امكان پيشبيني رفتار قطره بوجود میآید که نتایج ارائه شده در این پژوهش قابل استفاده در طراحی بهینه تر مواردی با فیزیک مشابه در صنایعے چون چاپگرھای جوھے افشان، جریان ہے ای الکترواسمز و مبادله کننده ای گرمایی و جداکننده ا در صنایع نفتے خواہد شد، که پیش بینے دقیق رفتار قطرہ، موجب پیشبینی مسیر نفوذ قطره مایع و عبور آن از مسیر (مشخص، داخل محيط متخلخل می شود.

> ۲- مبانی و روشها ۲–۱– مدلسازی عددی

در این مقاله جریان دو فازی هوا و آب به صورت غیر قابل تراکم و مخلوط نشدنی مدل سازی شده است. ازجمله مشـکلات موجـود در جريـان دو فـازی، وجـود سـطح مشـترک بین چندفاز است که این سطح مشترک سبب ناپیوستگی در کمیتهای موجود در مرز مشترک میشود و همچنین این ناپیوستگی ها مدلسازی و اعمال شرایط مرزی در این زیر تعریف کرد [۱۲] و [۱۳] : مرزها را سخت و پیچیده می کند. در مقاله حاضر سطح مشترک دو فاز به روش حجم سیال شبیه سازی شده به این دلیل که این روش بقای جرم را نسبت به سایر روشها بهتـر حفـظ می کنـد و نسـبت بـه دیگـر روش هـا سـادگی بیشتری دارد و در انجام محاسبات صرفهجویلی می شود. در این مقاله برای شبیهسازی نفوذ یک قطره دو بعدی درون محیط متخلخل منظم از روش حجم سیال و از نرم افزار تجاری انسیس فلوئنت ۲۰۲۱ و گمبیت و در مواردی از کـد نویسـی در نـرم افـزار تجـاری متلـب ۲۰۱۷بـی بـرای انجـام محاسبات شده است.

معادله بقاء جرم یا معادله پیوستگی به صورت زیر می باشد [۱۲]:

Archive of SID.ir سال ۱۴۰۲/ دوره بهار و تابستان / شماره ۱



شکل ۲: هندسه قطره ورودی به محیط متخلخل



شکل ۳: هندسه قطره ورودی به محیط متخلخل در این پژوهش معادلات حاکم در شرایط ناپایا با حضور نیروی گرانش و یکبار هم بدون حضور نیروی گرانش حل شدهاند. همچنین سرعت اولیه s/m ۲ تنظیم شده است. اختصاص شرایط مرزی مناسب و به کارگیری نودهای کافی از شرایط ضروری هر حل عددی است. در این مسئله، روی دیواره پایینی و بالایی از شرط مرزی عدم لغزش و در دیواره های جانبی از شرط مرزی تناوبی استفاده می شود. برای انجام این مقاله فرضیات زیر بر پایه کار تقیلو و رحیمیان [۵] درنظر گرفته شده است: ۲- شرط جریان دوفازی در حالت ناپایا

۳- خواص آب و هوا ثابت و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد فرض شده است.

زاویـه تمـاس، زاویـه ای است بـرای یـک مایـع (قطـره) کـه میـان سـطح تمـاس مایـع یـا بخـار بـا جایـی کـه مایـع سـطح جامـد را لمـس میکنـد تعریـف میشـود. زاویـه تمـاس یـک قطـره از مایـع بـا سـطح آن در تعییـن ترشـوندگی، موثـر اسـت. نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\nu \alpha \right) = 0 \tag{(a)}$$

خواص جریان دو فازی، مانند چگالی و لزجت مطابق رابطه زیر محاسبه می شوند [۱۲]:

$$\beta(x,t) = \beta_L \alpha + (1-\alpha)\beta_G \tag{9}$$

آلف (α) یک پارامتر اسکالر است و مقدار بین ۰ تا ۱ دارد. اگر سلول حاوی سیال مایع باشد ۱ = α و اگر حاوی سیال گاز باشد ۰= α است. سلول های با مقدار α بین ۰ و ۱، سطح مشترک مایع و گاز را تشکیل دهند [۱۲]. ۲-۲- فیزیک مسئله و شرایط مرزی

در این مقاله به بررسی نفوذ قطره آب در محیط متخلخل منظم با در نظر گرفتن کشش سطحی و بدون نیروی گرانش و با سرعت اولیه و بار دیگر با حضور نیروی گرانش و با استفاده از نرم افزار فلوئنت و روش حجم سیال پرداخته میشود. در شکل ۱ نیز شبکه بندی مسئله که به صورت دو بعدی طراحی شده است دیده می شود. هندسه محیط متخلخل مورد مطالعه، متشکل از موانعی مربعی است که به طور منظم و به فاصله $\Lambda = X$ میلی متر از هم مربعی است که به طور منظم و به فاصله ۵ میشده می شود. در شکل قرار گرفته اند، همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود. در شکل

شکل ۱– شبکه بندی مسئله.

سید امیر رضا عبداللهی و همکاران

α LT (ali) $uxy0$, $uxy0$	جدول ۱-اعتبار سنجی روش حجم سیال عدد مورد استفاده تجربی کار استاروف و همکاران [۱۶]				
(1,1) $(1,1)$ $(1,1,1)$ $(1,1)$	درصد خطا نسبت به نتایج تجربی	شعاع قطره در محیط متخلخل بر حسب میلیمتر (نتایج تجربی اعدا)	شعاع قطره در محيط متخلخل (نتايج شبيه سازى پژوهش	مدت زمان سپری شده از ورود قطره به محیط متخلخل	
$\cdot / \cdot \wedge$ $\cdot \wedge \wedge \wedge \wedge$ $\cdot \wedge \wedge \wedge \wedge$ $\cdot \wedge \wedge \wedge$ $\cdot \wedge \wedge \wedge$ $\cdot \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge$ $\cdot \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge \wedge$ $\cdot \wedge \wedge$	•/• \7.	1/717	1/۲۲۶	•/•۴	
1/.6 $1/.9$	•/١٩%	١/۴٨۶	١/۴٨٩	•/• ٨	
1/1 $1/1$ <t< td=""><td>1/00%</td><td>1/897</td><td>۱<i>/</i>۶۷۹</td><td>•/18</td></t<>	1/00%	1/897	۱ <i>/</i> ۶۷۹	•/18	
\cdot/Λ $1/1$ Y $Y/1$ \cdot/F \cdot/Λ X Y/YFA Y/YaY $\cdot/F9$ \cdot/Λ Y/YFA Y/YaY $\cdot/F9$ $1/1 \cdot X$ Y/YFA Y/FA Y/FA $1/1 \cdot X$ Y/YFA Y/FA Y/FA $1/1 \cdot X$ Y/FA Y/FA $1/A \cdot$ $1/1 \cdot X$ Y/FA Y/FA $1/A \cdot$ $1/1 \cdot X$ Y/YFY $Y/A +$ $1/1 \cdot A$ $1/2 \cdot Y$ Y/YYY Y/YY $1/2 \cdot$ $1/2 \cdot Y$ Y/YYY Y/YY $1/2 \cdot$ $1/2 \cdot Y$ Y/YYY Y/YY Y/PY $1/2 \cdot Y$ Y/YYY Y/PY Y/PY $1/2 \cdot Y$ Y/YYY Y/PY Y/YYY $1/2 \cdot Y$ Y/YYY Y/YYY Y/YYY $1/2 \cdot Y$ Y/YYY Y/YYY Y/YYY $1/2 \cdot Y$ Y/YYY Y/YYY Y/YYY $1/2 \cdot Y$ $Y/YYYY$ $Y/YYYY$ <t< td=""><td>1/41 %</td><td>۱/۸۵۱</td><td>١/٨٢۴</td><td>۰/۲۳</td></t<>	1/41 %	۱/۸۵۱	١/٨٢۴	۰/۲۳	
$\cdot/\%$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $\cdot/\%$ $1/1 \cdot$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ \cdot/λ $1/1 \cdot$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $1/\lambda$ $1/1 \cdot$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $1/1 \cdot$ $1/1 \cdot$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $1/1 \cdot$ $1/1 \cdot$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $1/1 \cdot$ $1/5\%$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $1/1 \cdot$ $1/5\%$ $7/\%\%\%$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $1/2 \cdot \%$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $1/2 \cdot \%$ $7/\%\%\%$ $7/\%\%$ $7/\%\%$ $1/2 \cdot \%$ $7/\%\%\%$ $7/\%\%\%$ $7/\%\%\%$ $1/2 \cdot \%\%$ $7/\%\%\%$ $7/\%\%\%$ $7/\%\%\%\%$ $1/1 \cdot \%$ $7/\%\%\%\%\%\%\%$ $7/\%\%\%\%\%\%$ $7/\%\%\%\%\%\%\%\%\%\%$ $1/1 \cdot \%$	•/14 %	1/184	7/149	•/۴۶	
$1/1 \cdot \%$ $7/7\%$ $7/7\%$ $1/1 \cdot \%$ $1/1 \cdot \%$ $7/6 \Lambda^{T}$ $1/1 \cdot \%$ $1/1 \cdot \%$ $1/1 \cdot \%$ $1/1 \cdot \%$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $1/1 \cdot \%$ $1/1 \cdot \%$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $1/0 \pi^{T}$ $1/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $1/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $1/1 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $1/1 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $1/1 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $1/1 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $1/1 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $1/1 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $1/1 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$ $7/1 \pi^{T}$ $7/9 \pi^{T}$	·/WA %	۲/۳۴۸	7/30	•/۶٩	
\/. \/. \/. \/. \/. \/. \/	1/1. %	۲/۴۳۸	2/480	•/ \•	
\/·٣ ½ Υ/۶۲۶ Υ/۶١٩ \/٢λ ·/۶۶ ½ ۲/٧٢٧ ۲/٧٠٩ ١/۵١ ·/٩٧ ½ ۲/٧٢٩ ٢/٧٢٢ ١/٩٢ ·/٩٧ ½ ۲/٩٩٩ ٢/٧٢٢ ١/٩٢ ·/٩١ ½ ۲/٩٨٩ ٢/٩۶٢ ٢/٩٢ ·/٩١ ½ ۲/٩٨٩ ٢/٩۶٢ ٢/٩٢ ·/٩١ ½ ۲/٩٨٩ ٣/٠۶٦ ٣/٣٦ ·/٩٢ ½ ۲/٠٢٩ ٣/٠۶٦ ٣/٣٦ ·/٥٩ ½ ٣/٠٢٩ ٣/٠٢٦ ۵/٨۴ ·/١/١٧ ½ ٣/١٠٨٩ ٣/١٣۵ ٧/٩۴ ·/٧٢ ½ ٣/١٩٩ ٣/١٢٢ ١./٠۶	1/00%	۲/۵۵۵	۲/۵۸۲	۱/•۴	
·/۶۶ ½ ۲/٧٢٧ ۲/٧٠٩ ١/۵١ ·/٩٧ ½ ۲/٧٩٩ ۲/٧٢٢ ١/٩٢ ·/٩١ ½ ۲/٩٨٩ ۲/٩۶٢ ۲/٩٢ ·/٩١ ½ ۲/٩٨٩ ۲/٩۶٢ ۲/٩٢ ·/٩١ ½ ۲/٩٨٩ ۲/٩۶٢ ۲/٩٢ ·/٩١ ½ ۲/٠٢٩ ۲/٩۶٢ ۲/٩۴ ·/٩٢ ½ ۲/٠٢٩ ۳/٠٢٩ ۴/٨٣ ·/٩٢ ½ ۲/١٠٨ ۳/٠٢٢ ۵/٨۴ ١/١٢ ½ ۲/١٨٩ ۳/١٣۵ ٧/٩۴ ·/٢/٢ ٢/١٩٩ ٣/١٢٢ ١./٠۶	1/08%	7/848	۲/۶۱۹	١/٢٨	
·/٩٢ ۲/٧٩٩ ۲/٧٢ ١/٩٢ ·/٩٢ ۲/٩٢ ۲/٩٢ ٢/٩٢ ·/٩٢ ۲/٩٢ ۲/٩٢ ٢/٩٢ ·/٩٢ ۲/٠٢ ۲/٠٢ ٢/٠٢ ·/٩٢ ۲/٠٢ ۲/٠٢ ٢/٠٢ ·/٩٢ ۲/٠٢ ۲/٠٢ ٢/٠٢ ·/٢ ٢/٠٢ ٢/٠٢ ٢/٠٢ ·/٢ ٢/٠٢ ٢/٠٢ ٢/٠٢ ·/٢ ٢/٠٢ ٢/٠٢ ٢/٠٢ ·/٠٢ ٢/٠٢ ٢/٠٢ ٢/٠٢ ·/٠٢ ٢/٠٢ ٢/٠٢ ٢/٠٢	• 199 %	T/VTV	۲/۷ + ۹	۱/۵۱	
·/٩١ ٪ ٢/٩٨٩ ٢/٩۶٢ ٢/٩٤ ·/۵٩ ٪ ٢/٠٧٩ ٣/٠۶١ ٣/٣١ ·/۵٩ ٪ ٢/٠٢٩ ٣/٠۶١ ٣/٣١ ·/٥٩ ٪ ٢/٠٢٦ ٢/٠٢٦ ٢/٣١ ·/٥٩ ٪ ٣/٠٢٦ ٢/٠٢٦ ٢/٣١ ·/١٧٢ ٪ ٣/١٠٨ ٣/٠٧٢ ۵/٨٤ ١/١٢ ٪ ٢/١٢٥ ٣/١٣٥ ٧/٩٤ ٠/٠۶ ٣/١٩٩ ٣/١٧٢ ١.٠۶	•/97 %	۲/۷۹۹	T/YYT	١/٩٢	
·/ΥΥ Υ/·Υ Υ/·Υ Υ/Υ ·/Δ٩ ٪ Υ/·Υ Υ/·Υ Υ/·Υ ·/Δ9 ٪ Υ/·Υ Υ/·Υ Υ/·Υ ·/Δ9 ٪ Υ/·Υ Υ/·Υ Υ/·Υ ·/Δ Υ/·Υ Υ/·Υ Δ/Λ ·/Υ Υ/·Υ Υ/·Υ Δ/Λ ·/Υ Υ/·Υ Υ/·Υ Δ/Λ ·/Υ Υ/·Υ Υ/·Υ Δ/Λ	•/91 %	٢/٩٨٩	T/98T	۲/9۴	
·/Δ9 ½ ٣/٠٢۶ ۴/٨٣ ١/١٧ ½ ٣/١٠٨ ٣/٠٢۶ ۵/٨۴ ١/٢٢ ½ ٣/١٨٩ ٣/١٣Δ ٧/٩۴ ٠/٨٥ ½ ٣/١٩٩ ٣/١٢٢ ١./٠۶	•/69 %	٣/•٧٩	٣/•۶١	$\mathfrak{r}/\mathfrak{r}$)	
١/١٧ ٪ ٣/١٠٨ ٣/٠٧٢ ۵/٨۴ ١/٧٢ ٪ ٣/١٨٩ ٣/١٣۵ ٧/٩۴ ٠/٨٥ ٪ ٣/١٩٩ ٣/١٧٢ ١./٠۶	•/69 %	3.46	۳/• ۲۶	۴/۸۳	
۱/۷۲ ٪ ۳/۱۸۹ ۳/۱۳۵ ۷/۹۴ ۰/۸۵ ٪ ۳/۱۹۹ ۳/۱۷۲ ۱۰/۰۶	1/14 %	٣/١٠٨	٣/•٧٢	۵/۸۴	
·/10 × 1199 1117 1119	1/42 %	٣/١٨٩	37/130	۷/۹۴	
	•/10 %	٣/١٩٩	٣/١٧٢	۱۰/۰۶	

به منظور ارزیابی دقیق تر و نیز به دست آوردن مقدار عددی کشش سطحی از آزمایش لاپلاس استفاده می کنیم. قانون لاپلاس دلالت بر این موضوع دارد که اختلاف فشار بین داخل و خارج قطره به صورت خطی با معکوس شعاع قطره تغییر می کند، به طوری که شیب این خط مقدار کشش سطحی را نشان می دهد. طبق این قانون اختلاف فشار در داخل و خارج قطره از رابطه زیر پیروی می کند [17]:

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} = \frac{2\sigma}{R} \tag{9}$$

برای بهدست آوردن کشش سطحی، قطره ای با شعاع معین در یک میدان محاسباتی با ابعادی مشخص قرار داده ۳۲ 🚽 پیش بینی و مدل سازی رفتار نفوذ و پیمایش قطره مایع ...

هرچه زاویه تماس به صفر نزدیک تر باشد ترشوندگی بیشتر است و هرچه زاویه تماس به ۱۸۰ نزدیک تر باشد آب گریزی افزایش مییابد. به حداکشر زاویه تماس یک قطره با سطح، زاویه پیشروی و کمینه زاویه تماس را زاویه پسروی میگویند. برای پیشبینی میزان زاویه تماس از معادله یانگ که مطابق رابطه زیر است استفاده شده است. در این رابطه σ_{s1} و σ_{s2} به ترتیب میزان کشش میان سیال یک و سیال دو را با سطح جامد نشان میدهد و σ_{12} نیز مقدار کشش سطحی میان سیال او ۲ را تعیین می کند [۱۴]:

(۲)

$$Cos(\theta) = \frac{\sigma_{s2} - \sigma_{s1}}{\sigma_{12}}$$
برای اندازه گیری زاویه تماس قطره با سطح، قطره
ای با شعاع های ۱۵/۰ ، ۱۵/۰ و ۱۳/۰ متر با زاویه های
تماس ۵۰۵، ۹۰ و ۱۲۰ در داخل میدان محاسباتی به ابعاد
۱۵۰×۱۰۰ متر مربع به صورت مماس بر دیواره پایینی
قرار داده می شود. بعد از حدود ۲۰۰۰۰ تکرار که میدان
به حالت پایا درآمد به کمک پارامترهای هندسی و رابطه
ای میتوان زاویه تماس میان قطره و سطح را محاسبه کرد
[13]:

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

که در آن θ زاویه تماس، b طول تماس با سطح، h ارتفاع قطره و r معاع قطره است (شکل ۳). برای اعتبار سنجی حل عددی انجام گرفته در این پژوهش، روش عددی استفاده شده در این پژوهش با نتایج تجربی کار استاروف و همکاران [۱۶] در جدول ۱ مقایسه شده است.

می شود. بعد از آنکه قطره به حالت تعادل رسید، کشش سطحی آن را محاسبه کرده. بدین صورت اختلاف فشار متناظر با شعاع به دست می آید و سپس این کار را برای مقادیر متفاوتی از شعاع ها تکرار می کنیم [۱۸]. با وصل کردن نقاط حاصل خطی به دست می آید که شیب آن بیانگر کشش سطحی قطره می باشد. برای تایید قانون بیانگر کشش سطحی قطره می باشد. برای تایید قانون کردن میدان مقاله، ابتدا قطرات دایروی با شعاع های مختلف ۱۰۵/۰ ، ۲/۰ و ۳/۰ متر در مرکز میدان محاسباتی که یک صفحه ی مستطیلی شکل به ابعاد ۱۵۰×۱۰۰ متر است، قرار داده می شوند.

بعد از حدود ۱۰۰۰۰ تکرار، قطره ای کاملا دایروی بهدست میآید و مقدار کشش سطحی از رابطه ی ۸ محاسبه میشود. نتایج عددی و نظری بهدست آمده از رابطه ی ۸ در شکل ۴ و جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین شیب خط نشان داده شده در شکل ۴ همان کشش سطحی بوده و حدودا برابر با n/m ۲۰۷۵ میباشد. برای تست استقلال از شبکه ی آزمایش، همین روند در شبکههایی با تعداد ۲۱۲۱ یا ۲۷۲۴۹ المان و ۱۲۲۲۱ گره یا ۴۶۸۸۴ المان مثلثی مرتبه دوم که توسط نرم افزار یا ۲۸۸۴ المان مثلثی مرتبه دوم که توسط نرم افزار یا ۲۰ نشان داده شده است و همان طور که در شکل ۴ مشاهده میشود، نتایج عددی به مور تقریبی با پیش بینی نظری برابر هستند.



جدول ۲- نتايج آزمايش لاپلاس.

سال ۱۴۰۲/ دوره بهار و تابستان / شماره ۱

Archive of SID.ir

تعداد گرہ	R	PΔ	σ
۳۸۷۶	۰/۰۱۵	۵/۴۵	٠/•٨١
	•/•٢	٣/٨٠	•/•¥۶
	• / • ٣	۲/۶۰	•/• ٧٨
¥1¥1	۰/۰۱۵	۵/۲ ۱	• / • YA
	•/•٢	٣/٧٧	•/•Y۵
	•/•٣	۲/۵۰	•/•Y۵
١٢٢٢١	۰/۰۱۵	۵/۱۳	•/• ٧۶
	•/•٢	٣/٩٢	•/• 48
	• / • ٣	۲/۶۲	•/• ٧٨

همچنین برای تست استقلال از شبکه، در شبکه هایی که در بالا ذکر شده نمودارهای اختلاف فشار قطره به شعاع های ۱۵/۰ و ۰۳/۰ متر رسم شده است.(شکل ۵، شکل ۶).



شکل ۵–آزمون استقلال از شبکه اختلاف فشار قطره با شعاع ۰/۰۱۵ متر.

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

Archive of SID.ir سید امیر رضا عبداللهی و همکاران

۳۴ پیش بینی و مدل سازی رفتار نفوذ و پیمایش قطره مایع ...



۰/۰۳ شکل ۶-آزمون استقلال از شبکه اختلاف فشار قطره با شعاع ۰/۰۳ متر.

همچنیـن کانتـور فـاز قطـره آب بـا زاویـه تمـاس °۵۰، °۹۰ در شـکل ۷ نشـان داده شـده اسـت.



شکل ۷- کانتور فاز قطره آب با زاویه تماس

برای تست استقلال از شبکه، دو بار دیگر همین روند را برای شبکه هایی با تعداد ۷۱۷۱ و ۱۲۲۲۱ گره، تکرار شده است. در این مقاله ابتدا یک قطره دایروی با شعاع شده است. در این مقاله ابتدا یک قطره دایروی با شعاع ۱۰۱۰ متر و سرعت اولیه ۱۳/۵۱ در یک شبکه مستطیلی به ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ متر مربع با تعداد ۲۱۴۵۴ گره به صورت مماس به محیط متخلخل با تخلخل ۴۰۴۶۴ گره به مارد می شود. برای تست استقلال از شبکه قطره، همین روند را در شبکه ای با اندازه ۴۰۳۶۶ گره تکرار می کنیم. کانتورهای فاز مربوط به تست استقلال از شبکه، در شبکه هایی با اندازه ۲۱۴۵۴ و ۴۰۳۶۶ گره در زمان های بی بعد هایی با اندازه ۱۱۴۵۴ و ۴۰۳۶۶ گره در زمان های بی بعد مقایسه شده و متوجه می شویم که تغییر قابل ملاحضه ای در آن ها دیـده نمی شـود

۳- نتایج و بحث ۳-۱- نفوذ پذیری قطره آب در محیط متخلخل

در این مقاله همانط ور که در بالا نیز به آن اشاره شده ابتدا یک قطره دایروی با شعاع ۲۰۱۵ متر و سرعت اولیه m/s۱ در یک شبکه مستطیلی به ابعاد ۱۲۰×۱۰۰ متر مربع به صورت مماس به محیط متخلخل با تخلخل ۴۰ درصد قرار داده می شود. در روی دیواره پایینی و بالایی شرط مرزی عدم لغزش و در دیوارههای جانبی از شرط مرزی تناوبی استفاده شده است. سپس با تغییر کشش سطحی، ویسکوزیته، سرعت اولیه و همچنین زاویه تماس به میزان نفوذ پذیری قطره در محیط متخلخل و همچنین سطح گسترش قطره نسبت به زمان و میزان تغییرات عدد رینولدز و وبر براساس تغییرات ذکر شده، یکبار بدون حضور نیروی گرانش و یکبار هم با حضور نیروی گرانش پرداخته شده است.

برای بررسی تغییر عدد رینولدز، ویسکوزیته قطره ای به شعاع ۲۰/۱۵ متر و سرعت ۳/s۱ را تغییر داده شده است. با توجه به این که عدد رینولدز نشان دهنده نسبت اینرسی به نیروهای ویسکوز است که به دلیل حرکت سیال به وجود میآیند، بنابراین میتوان گفت با افزایش این عدد نیروی اینرسی قدرت بیشتری نسبت به نیروی لزج پیدا کرده و میتواند باعث تغییر شکل قطره شود. برای بررسی تغییر عدد وبر نیز، کشش سطحی قطره ای به شعاع ۲۰/۱۵ متر و سرعت ۱s/n را تغییر داده و نتایج بهدست آمده با یکدیگر مقایسه شدهاند. عدد وبر، عددی بدون بعد است و از رابطه زیر به دست میآید، با کاهش

(۱۰) $We = \frac{\rho v^2 D}{\sigma}$ در ادامه کانتورهای فاز، برای قطره آب در زمان های بی بعد ۰/۰۳ ۱/۳۳، ۱/۲، ۲/۰، ۲/۰، ۵/۰۶، ۶/۰، ۰/۵۳، ۰/۱۶، ۱/۰۶، ۰/۱۳ ۱/۴۶، ۶/۱، ۶/۱ و ۱/۶۶ و با کشش سطحی ۰/۰۲۲ n/m، سرعت اولیه

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

Archive of SID.ir سال ۱۴۰۲/ دوره بهار و تابستان / شماره ۱

> داده شده است. لازم به یادآوری است که این محاسبات به روش حجم سیال و با استفاده از نرم افزار فلوئنت در شبکهای به تعداد ۴۰۳۶۶ گره انجام شده است. در این کانتورها رنگ قرمز مربوط

m/s۱ و زاویه °۶۰ بدون حضور نیروی گرانش در شکل ۸ نمایش به هوا و رنگ آبی مربوط به قطره آب است. در شکل ۸ قطره آب به دلیل وجود موئینگی در محیط متخلخل نفوذ میکند ولی در شکل ۹ کانتورهای فاز قطره آب با حضور نیروی گرانش نشان داده شده است.



شکل ۸- نمایش کانتور نفوذ فاز قطره آب در زمان های بی بعد و بدون حضور نیروی گرانش

در شکل ۹ قطره آب به دلیل وجود موئینگی و نیروی گرانش در محیط متخلخل نفوذ و از آن خارج می شود. همچنین از مقایسه شکل ۸ و ۹ می توان متوجه شده که سرعت پخش و خروج قطره آب از محیط متخلخل در زمانی که نیروی گرانش وجود دارد بسیار سریعتر از زمانی است که نیروی گرانشی وجود ندارد. اکنون برای بهدست آوردن میزان نفوذ پذیری و سطح گسترش قطره آب نسبت به زمان در محیط متخلخل، نتایج بهدست آمده برای اعداد بی بعد مختلف در یک نمودار قرار داده و با هم مقایسه شده است. در شکلهای ۱۰ و ۱۱ تغییرات کشش سطحی روی نفوذ پذیری قطره بررسی شده است.



۳۶ پیش بینی و مدل سازی رفتار نفوذ و پیمایش قطره مایع ...



شکل ۹- نمایش کانتور نفوذ فاز قطره آب در زمان های بی بعد و با حضور نیروی گرانش



شکل ۱۰- نفوذ پذیری قطره آب براساس تغییرات کشش سطحی.



شکل ۱۱- نفوذ پذیری قطره آب با حضور نیروی گرانش براساس تغییرات کشش سطحی.

Archive of SID.ir

همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود سرعت پخش و نفوذ قطره آب بدون حضور نیروی گرانش با کشش سطحی ۰/۰۲ کمتر از دو حالت دیگر و قطره آب با کشش سطحی ۰/۰۲۱ با حضور نیروی گرانش بیشتر از دو حالت دیگر است و همچنین سرعت پخش و نفوذ قطره آب در محیط متخلخل با حضور نیروی گرانش بیشتر از حالت بدون نیروی گرانش است. در شکل ۱۲ و ۱۳ تغییرات ویسکوزیته بررسی شده است.



شکل ۱۲- نفوذ پذیری قطره آب براساس تغییرات ویسکوزیته.

سال ۱۴۰۲/ دوره بهار و تابستان / شماره ۱

نیروی گرانش وجود دارد سرعت پخش و نفوذ قطره با زاویه تماس ۹۰ درجه نسبت به شکل ۱۵ و دو حالت دیگر بیشتر میباشد. در شکلهای ۱۶ و ۱۷ تغییرات کشش سطحی روی سطح گسترش قطره بررسی شده است.



شکل ۱۶- سطح گسترش قطره براساس تغییرات کشش



شکل ۱۷- سطح گسترش قطره با حضور نیروی گرانش براساس تغییرات کشش سطحی. در شکل ۱۶ سرعت گسترش و نفوذ قطره آب با کشش سطحی ۲۲/۰ کمتر از دو حالت دیگر می باشد و شکل ۱۷ که نیروی گرانش در آن وجود دارد سریعتر از حالتی است که در آن نیروی گرانش وجود ندارد. در شکلهای ۱۸ و ۱۹ تغییرات ویسکوزیته روی سطح گسترش قطره بررسی شده است



شکل ۱۸- سطح گسترش قطره آب براساس تغییرات ویسکوزیته. نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک



شکل ۱۳- نفوذ پذیری قطره آب با حضور نیروی گرانش براساس تغییرات ویسکوزیته.

همان طور که در شکل ۱۲ و ۱۳ قابل مشاهده است، با افزایش ویسکوزیته سرعت پخش و نفوذ قطره آب در محیط متخلخل افزایش مییابد و همان طور که در بالانیز ذکر شد در حالت بدون گرانش سرعت نفوذ و پخش قطره آب بیشتر از حالتی است که نیروی گرانش وجود دارد. در شکلهای ۱۴ و ۱۵ تغییرات زاویه تماس بررسی شده است



شکل ۱۴- نفوذ پذیری قطره آب براساس تغییرات زاویه تماس.



شکل ۱۵- نفوذ پذیری قطره آب با حضور نیروی گرانش براساس تغییرات ویسکوزیته.

با توجـه بـه شـکل ۱۴ مـی تـوان گفـت تغییـرات در هـر سـه حالـت تقریبـا یکسـان مـی باشـد امـا در شـکل ۱۵ کـه

سید امیر رضا عبداللهی و همکاران

۳۸ 🛛 پیش بینی و مدل سازی رفتار نفوذ و پیمایش قطره مایع ...



شکل ۱۹- سطح گسترش قطره آب با حضور نیروی گرانش براساس تغییرات ویسکوزیته.

در شکل ۱۸ تغییرات در سه حالت تقریبا یکسان میباشد اما در شکل ۱۹ در حالتی که ویسکوزیته ۰/۰۰۰۵ میباشد، سرعت پخش و نفوذ سطح گسترش بسیار کمتر از دو حالت دیگر است. در شکل ۲۰ و ۲۱ سطح گسترش قطره با توجه به تغییرات زاویه تماس بررسی شده است.



شکل ۲۰– سطح گسترش قطره براساس تغییرات زاویه تماس.



شکل ۲۱- سطح گسترش قطره با حضور نیروی گرانش و براساس تغییرات زاویه تماس. از مقایسه شکل ۲۰ و ۲۱ می توان متوجه شد، زمانی که زاویه تماس قطره ۶۰ و ۲۰ درجه است تغییرات سطح گسترش تقریبا یکسان می باشد. اما در زاویه ۹۰ درجه

سرعت پخـش و نفـوذ قطـره در حالتـی کـه نیـروی گرانـش وجـود دارد بسـیار کمتـر از حالتـی اسـت کـه نیـروی گرانـش وجـود نـدارد. در جـدول ۳ مشـخصات پژوهـش انجـام گرفتـه در مقایسـه بـا کار و کار بررسـی و مقایسـه شـده انـد.

جدول ٣- مقایسه روش حجم سیال با دیگر مراجع [٩], [١۶].

	خطای محاسبه R نسبت به نتایج تجربی مرجع [۱۶]	روش مورد استفاده در محاسبات	بهبود دقت نسبت به کار مرجع [۹] در مقایسه با نتایج تجربی کار [۱۶]
پژوهش حاضر	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	حجم سیال	+ ૧%
[٩]	•,• ١٨٣۵	مدل شان و چن در غالب روش بولتزمن شبکهای	

۴- جمعبندی

در مقاله حاضر نفوذ قطره آب در داخل محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور برخورد یک قطره دو بعدی با سطح متخلخل به روش حجم سیال شبیهسازی گردید. استفاده ار روش حجم سیال موجب کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت نسبت به روش بولتزمن شبکهای شده است. از میان تمام پارامترهای موجود در مسئله، تاثیر کشش سطحی، ویسکوزیته، زاویه موجود در مسئله، تاثیر کشش سطحی، ویسکوزیته، زاویه تماس و همچنین نفوذپذیری و سطح گسترش قطره در محیط متخلخل بررسی شد. با استفاده از این شبیهسازی، تغییرات اعداد بی بعد رینولدز و وبر مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده می شود که با افزایش ویسکوزیته عدد رینولدز کاهش و با افزایش کشش سطحی عدد وبر نیز کاهش پیدا می کند اما زاویه تماس هیچ تاثیری در این



سال ۱۴۰۲/ دوره بهار و تابستان / شماره ۱

10.1021/acs.langmuir.8b03472.

[5] Taghilo, M. and Rahimian, M., "Simulation of two-dimensional drop penetration inside porous media using lattice Boltzmann method," Modares Mechanical Engineering, 13, No. 13, pages 43 to 56. 2016.

[6] El-Amin, M. F., Alwated, B., and Hoteit, H. A., "Machine Learning Prediction of Nanoparticle Transport with Two-Phase Flow in Porous Media," Energies, vol. 16, no. 2, 2023, doi: 10.3390/en16020678.

[7] Helseth, L. E. and Greve, M. M., "Wetting of porous thin films exhibiting large contact angles," J. Chem. Phys., vol. 158, no. 9, 2023, doi: 10.1063/5.0138148.

[8] Chebbi, R., "Absorption and Spreading of a Liquid Droplet over a Thick Porous Substrate," ACS Omega, vol. 6, no. 7, 2021, doi: 10.1021/acsomega.0c05341.

[9] Salehabadi, H., Nazari, M., and Kihani, M. H., "Two-phase modeling of fluid penetration and navigation in specific paths inside a layered porous medium using the Boltzmann network method," Mechanical Engineering, Tabriz University, D 47, No. 3, pages 129 to 138, 2016.

[10] Ozaki, H. and Aoyagi, T., "Prediction of steady flows passing fixed cylinders using deep learning," Sci. Rep., vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-021-03651-8.

[11] Bhat, N. U. H. and Pahar, G., "Depth-averaged coupling of submerged granular deformation with fluid flow: An augmented HLL scheme," J. Hydrol., vol. 606, 2022, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127364.

[12] Li, Y., Zhang, J., and Fan, L. S., "Numerical simulation of gas-liquid-solid fluidization systems using a combined CFD-VOF-DPM method: Bubble wake behavior," Chem. Eng. Sci., vol. 54, no. 21, 1999, doi: 10.1016/ S0009-2509(99)00263-8.

[13] Liu, Q. and Luo, Z. H., "CFD-VOF-DPM simulations of bubble rising and coalescence in low hold-up particle-liquid suspension systems," Powder Technol., vol. 339, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2018.08.041.

[14] Przykaza, K., Woźniak, K., Jurak, M., Wiącek, A. E., and Mroczka, R., "Properties of the Langmuir and Langmuir-Blodgett monolayers of cholesterol-cyclosporine A on water and polymer support," Adsorption, vol. 25, no. 4, 2019, doi: 10.1007/s10450-019-00117-2.

[15] Ding, B., Dong, M., Chen, Z., and Kantzas, A., "Enhanced oil recovery by emulsion injection in heterogeneous heavy oil reservoirs: Experiments, modeling and reservoir simulation," J. Pet. Sci. Eng., vol. 209, 2022, doi: 10.1016/j.petrol.2021.109882.

[16] Navaz, H. K. et al., "Sessile droplet spread into porous substrates-Determination of capillary pressure using a continuum approach," J. Colloid Interface Sci., vol. 325, no. 2, 2008, doi: 10.1016/j.jcis.2008.04.078.

[17] Deng, H., Huang, Y., Yang, Y., Wu, S., and Chen, Z., "Three-dimensional numerical investigation on micro-me-

[1] Ezzatneshan, E. and Goharimehr, R., "A Pseudopotential Lattice Boltzmann Method for Simulation of Two-Phase Flow Transport in Porous Medium at High-Density and High-Viscosity Ratios," Geofluids, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/5668743.

[2] Cerqueira, R. F. L., Paladino, E. E., Evrard, F., Denner, F., and Wachem, B. van, "Multiscale modeling and validation of the flow around Taylor bubbles surrounded with small dispersed bubbles using a coupled VOF-DBM approach," Int. J. Multiph. Flow, vol. 141, 2021, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103673.

[3] Li, X., Hao, Y., Zhao, P., Fan, M., and Song, S., "Simulation study on the phase holdup characteristics of the gasliquid-solid mini-fluidized beds with bubbling flow," Chem. Eng. J., vol. 427, 2022, doi: 10.1016/j.cej.2021.131488.

[4] Fu, F., Li, P., Wang, K., and Wu, R., "Numerical Simulation of Sessile Droplet Spreading and Penetration on Porous Substrates," Langmuir, vol. 35, no. 8, 2019, doi:



40 پیش بینی و مدل سازی رفتار نفوذ و پیمایش قطره مایع ...

ter droplet impact and penetration into the porous media with different velocities," MATEC Web Conf., vol. 355, 2022, doi: 10.1051/matecconf/202235501009.

[18] Zarareh, A., Burnside, S. B., Khajepor, S., and Chen, B., "Improving the staircase approximation for wettability implementation of phase-field model: Part 2 – Three-component permeation," Comput. Math. with Appl., vol. 109, 2022, doi: 10.1016/j.camwa.2022.01.005.