

استفاده از روش بولتزمن شبکهای

حسین محسنیان سی سخت '، نیما غیاثی طبری '، سیدعلی آقامیر جلیلی "

^۱ دانشجوی دکتری مکانیک تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دشتستان hosseinmohsenian@gmail.com

^۲استادیار بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دشتستان Nima_Ghiasi_te@yahoo.co.uk

^۳ استادیار بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد Saa_mirjalily@iauyazd.ac.ir

چکیدہ

هدف از این مطالعه شبیه سازی عددی دینامیک (یعنی نفوذ) و انتقال حرارت قطره در تماس با سطح متخلخل است. برای ر سیدن به این هدف از روش بولتزمن شبکهای استفاده شده است. در گام نخست جریان دوفاز حاوی قطره و محیط پیرامونی (شامل گاز و سطح متخلخل) با روش "لی" شبیه سازی شده است. استفاده از روش لی این امکان را فراهم می کند تا مدل ایجاد شده در محدوده و سیعتری از نسبت چگالی قابل اجرا باشد. مطالعه حاضر، علاوه بر رفتار دینامیکی (نفوذ قطره) شامل انتقال حرارت قطره نیز میباشد. از اینرو در گام بعدی، با ادغام مدل لی و مدل اسکالر منفعل، انتقال حرارت دوفازی شبیه سازی شده است.از میان پارامترهای مؤثر در این مسئله، تأثیر زاویه تماس ونسبت چگالی بررسی می گردند. کاهش زاویهی تماس، افزایش نسبت چگالی، افزایش موجب افزایش نفوذ قطره می شوند. همچنین کاهش عدد پرانتل و افزایش عدد استفان موجب افزایش نرخ تبخیر قطره در تماس با محیط متخلخل می گردد.

۱. مقدمه

تبخیر و نفوذ قطره مایع در داخل یک محیط متخلخل، نقش مهمی در بسیاری از فرآیندهای صنعتی مانند تبخیر آب در عبور از فضاهای خالی خاک و همچنین در کاربردهای صنعتی مانند تکنولوژی چاپ جوهر افشان (افزایش در کیفیت چاپهای جوهر افشان بطور مستقیم به شعاع قطره بعد از برخورد به یک سطح متخلخل و نرخ پخش آن وابسته است.)، سیستمهای سرمایشی تجهیزات الکترونیکی، مبدلهای حرارتی، راکتورهای کاتالیستی شیمیایی و رسوب بخارهای شیمیایی دارند. کاربردهای محیطی مانند ارزیابی میزان خطر انتشار مایعات در خاک، بطور ا سا سی به نرخ تبخیر قطره مایع وابسته ا ست که تابعی از منطقه مرطوب روی سطح متخلخل و همچنین عمق نفوذ قطره میباشد.

بخاطر محدوده ی وسیع کاربرد نفوذ قطره در محیط متخلخل، تحقیقات آزمایشیگاهی و عددی زیادی به این موضوع پرداختهاند. هانلون و ما [۱] یک مدل دوبعدی را توسعه دادند و یک تحقیق آزمایشگاهی برای پیشبینی پارامترهای مؤثر حین فرآیند تبخیر در محیط متخلخل ارائه کردند. نتایج نشان داد که انتخاب منا سب سایز ذرات، تخلخل فیتیله و ضخامت فیتیله، ضریب انتقال حرارت تبخیری را افزایش خواهد داد. تأثیر پارامترهای فیتیلهای در لولههای حرارتی متخلخل بوسیله ژان و همکاران [۲] تحلیل شد و نتایج مشابه با نتایج ما و همکاران [۱] بدست آمد؛ در واقع ترکیب بهینه پارامترهای سازهای فیتیله موجب افزایش عملکرد حرارتی می شود. سپس لی و پترسون [۳] تأثیر تخلخل حجمی و ابعاد مش را در حین فرآیندهای تبخیر و جو شش در فیتیلههای مویرگی نازک تحت شرایط پایا و در فشار اتمسفر برر سی کردند. نتایج نشان می دهند که شار حرارتی بحرانی به تخلخل حجمی و ابعاد مش وابسته است. البته، ضرایب انتقال حرارت جوششی و تبخیری به ابعاد مش بیشتر از تخلخل حجمی وابسته هستند. محجوب و مهتابروشن [۴] با استفاده از شبیه سازی عددی، تأثیر تخلخل فیتیله روی رفتار لوله حرارتی را تحقیق کردند. نتایج شبیه سازی نشان دادند که اختلاف دما بین اواپراتور و کندانسور با افزایش تخلخل، افزایش می یابد. این افزایش اختلاف دما بخاطر کاهش رسانندگی حرارتی مؤثر فیتیله است. سبیر و همکاران [۵] تأثیر پارامترهای لایهای متخلخل را در اواپراتورها بصورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آنها دریافتند که یک سایز ذره بهینه برای هر ضخامت لایه لایهای متخلخل را در اواپراتورها بصورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آنها دریافتند که یک سایز ذره بهینه برای هر ضخامت لایه می طرح این مناز داد که مرتبط با ضریب انتقال حرارت بیشینه می باشد و تأثیر سایز ذره بیشتر از تأثیر ضخامت لایه متخلخل وجود دارد که مرتبط با ضریب انتقال حرارت بیشینه می باشد و تأثیر سایز ذره بیشتر از تأثیر ضخامت لایه متخلخل

همهی کارهای عددی مذکور از معادلات ناویر- استوکس برای میدان جریان استفاده کردهاند و با وجود رشد روزافزون تحقیقات روی جریانهای مذکور، شبیهسازی مستقیم جریانهای دوفاز با فصل مشترک متحرک بین دوفاز هنوز چالش برانگیز است. پیچیدگی اصلی بخاطر وجود بسیاری از اثرات بصورت همزمان مانند انتقال جرم مرزی، گرمای نهان و کشش سطحی با توجه به قوانین جرم، تکانه و انرژی میباشد.

در کار حاضر، از مدل صفری و رحیمیان برای شبیه سازی نفوذ و انتقال حرارت قطره در یک سطح متخلخل داغ استفاده می شود. این اولین بار است که تبخیر و تغییر شکل قطره در یک سطح متخلخل داغ بوسیلهی روش بولتزمن شبکهای شبیه سازی می شود. در ابتدا توسعه معادله کان – هیلیارد جابجایی کلاسیک در حضور تغییر فاز ارائه می شود. سپس این معادله در چارچوب بولتزمن شبکهای چندفاز آقای لی بکار گرفته می شود. آنگاه تغییر مشخصه های جریان و سطح بطور جامع مورد بحث قرار می گیرد.

۲. مدلسازی ریاضی

مدل تغییر فاز براساس چارچوب میدان فازی تانهن لی ولین [۶]میباشد. دراین روش،مرزبیندی و فازتراکم ناپذیروغیرقابل امتزاج به وسیله ی معادله کان- هیلیارد جابجایی توصیف وکنترل میشود. ۲-۱.توسعهی معادلات کان- هیلیارد جابجایی در حضور تغییر فاز

سیستمی شامل دو سیال تراکمناپذیر و غیرقابل امتزاج با لزجت و چگالی تودهای متفاوت را در نظر بگیرید. معادله پیوستگی برای جزء i از سیالات باینری میتواند بصورت زیر نوشته شود:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_i}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{n}_i = \pm \dot{m'''} (i = L, G) \tag{1}$$

که n_i نرخ جریان جرمی (بر واحد حجم) جزء iو m''' چشمه یا چاه حجمی برای تغییرات فاز میباشد. در منطقه تودهای n_i که n_i نرخ جریان جرمی الگین جریان میباشد. در n_i میانگین جریان میباشد. در فصل مشترک بین دو فاز، یک جریان جرمی پخشی بوسیلهی $\rho_i j_i$ مشخص می شود که j_i نرخ جریان پخشی حجمی است. بنابراین جریان جرمی کلی مولفه i بصورت زیر بیان می شود:

^{&#}x27;bulk region

advection

$$\boldsymbol{n}_i = \tilde{\rho}_i \boldsymbol{u} - \rho_i \boldsymbol{j}_i \tag{(Y)}$$

مشابه با روش حجم سیال^۳، دو فاز بوسیلهی نسبت ترکیب آنها در یک المان حجمی دامنه، متمایز میشوند. این نسبت ترکیب C در فاز مایع مقدار یک، در فاز گاز مقدار صفر و در فصل مشترک بین دوفاز مقداری بین صفر و یک دارد، بنابراین چگالیهای محلی بصورت زیر به چگالیهای تودهای وابسته هستند:

$$\tilde{\rho}_L = C \rho_L \tag{(7)}$$

$$\tilde{\rho}_L = (1 - C)\rho_G \tag{(f)}$$

و چگالیهای میانگین محلی بصورت زیر مشخص می گردند:

$$\rho = C\rho_L + (v - C)\rho_G \tag{(b)}$$

بنابراین معادله پیوستگی بر حسب نسبت ترکیب برای هرفاز بصورت زیر نوشته میشود:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\boldsymbol{u}C) - \nabla \cdot \boldsymbol{j}_{L} = -\frac{\boldsymbol{m}^{\prime\prime\prime\prime}}{\rho_{L}}$$
(9)

$$\frac{\partial(\mathbf{v}-C)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\boldsymbol{u}(\mathbf{v}-C) \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{j}_{G} = -\frac{\dot{m'''}}{\rho_{G}}$$
(Y)

معادله بولتزمن گسسته^۴ برای انتقال چگالی مخلوط و مومنتوم سیالات باینری تراکمناپذیر بصورت زیر میباشد[۷]:

$$\frac{Df_{\alpha}}{Dt} = \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial t} + \boldsymbol{e}_{\alpha} \cdot \nabla f_{\alpha} = -\frac{1}{\lambda} (f_{\alpha} - f_{\alpha}^{eq}) + \frac{1}{c^{\gamma}} (\boldsymbol{e}_{\alpha} - \boldsymbol{u}) \cdot \boldsymbol{F} \boldsymbol{\Gamma}_{\alpha}$$
(A)

که در این رابطه f_{α} تابع توزیع ذره، e_{α} سرعت میکروسکوپی ذره در جهت α ، α چگالی مخلوط، u سرعت میانگین که در این رابطه f_{α} تابع توزیع تعادلی است که بصورت زیر تعریف می شود: حجمی، c_{s} مرعت صوت، λ زمان استراحت e_{α} و f_{α}^{eq} تابع توزیع تعادلی است که بصورت زیر تعریف می شود: $e_{\alpha} \cdot u \quad (e_{\alpha} \cdot u)^{\gamma} \quad (u \cdot u)$

$$f_{\alpha}^{eq} = \omega_{\alpha}\rho \left[1 + \frac{e_{\alpha} \cdot u}{c_{s}^{\gamma}} + \frac{(e_{\alpha} \cdot u)}{\gamma c_{s}^{\gamma}} - \frac{(u \cdot u)}{\gamma c_{s}^{\gamma}}\right]$$
(9)

که در این رابطه ω_{lpha} فاکتور وزنی محاسبه شده از ساختار شبکه و $\Gamma_{lpha}=\Gamma_{lpha}(u)=f_{lpha}^{
m eq}/
ho$ میباشد. فاکتور بینمولکولی آتأثیرات گاز غیر ایدهآل را مدل می کند و شکل فشاری آن بصورت زیر است:

(۱۰) $F = \nabla \rho c_s^r - \nabla p_{th} + \rho k \nabla \nabla^r \rho$ که در این رابطه pth فشار ترمودینامیکی است و از یک معادله حالت مناسب تعیین می شود. استفاده از معادله ۱۰ در معادله بولتزمن گسسته موجب ناپایداری می گردد که بخشی از آن بخاطر جریانهای پارازیتی است که بدلیل وجود خطاهای برشی حاصل از عدم تعادل بین گرادیان فشار ترمودینامیکی و جمله کشش سطحی بوجود می آیند. آقای لی نشان داده است که خطای برشی و جریانهای پارازیتی حاصل می توانند با بازنویسی معادله ۱۰ به فرم پتانسیلی با استفاده از تساوی ترمودینامیکی = ∇p_{th} ∇p_{th} حذف شوند. F برای سیالات باینری با جایگذاری پارامتر مرتبه از چگالی به نسبت ترکیب C و سپس اندازه گیری انرژی آزاد سیستم، بدست می آید. همچنین F شامل فشار هیدرودینامیکی می باشد که تراکمناپذیری را تحمیل می کند.

VOF Method

^t discrete Boltzmann equation (DBE)

relaxation time

شروط مرزى

فصل مشترک بین فازهای مایع- بخار و جامد- مایع بصورت عمود بر سطح فرض میشوند. چگالی سیال در منطقه فصل مشترک بصورت تابعی از فاصله نسبت به سطح تعریف میشود که برای ارزیابی مشتق دوم Cدر جهت عمود بر دیوار جامد ضروری بنظر میرسد. به این دلیل روابط زیر اعمال میشوند:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z = +} = -\frac{\phi_1}{k} \tag{11}$$

$$\frac{\partial^{\mathsf{r}} C}{\partial z^{\mathsf{r}}} \bigg|_{Z=0} \approx \frac{1}{\mathsf{r}} \left(-\mathsf{r} \frac{\partial C}{\partial z} \bigg|_{Z=0} + \mathsf{r} \frac{\partial C}{\partial z} \bigg|_{Z=0} - \frac{\partial C}{\partial z} \bigg|_{Z=0} \right)$$
(17)

که ۲جهت عمود بر دیوار است. برای ارزیابی جمله گرادیان در طرف راست معادله ۱۲ بصورت زیر عمل می شود:

$$\frac{\partial C}{\partial z}\Big|_{z=\gamma} \approx \frac{1}{\gamma} \left(\left| \left| r \right|_{z=\gamma} - \left| r \right|_{z=\gamma} + C \right|_{z=\gamma} \right) + C \left|_{z=\gamma} \right)$$

$$(17)$$

$$n \cdot \nabla \mu \bigg|_{S} = \cdot \tag{14}$$

که در این رابطه nبردار واحد عمود بر سطح است. شرط مرزی دیگر با کمینه کردن انرژی آزاد کل نسبت به Cبصورت زیر بدست میآید[۱۵]:

$$\left. n \cdot \nabla C \right|_{S} = -\frac{\phi}{k} \tag{10}$$

که در این رابطه ϕ ضریبی ثابت است که به نام پتانسیل خیسشوندگی معروف است. در سطح پایینی، قائدهی بازگشت به عقب 2 برای توابع توزیع نسبت ترکیب و مومنتوم (\overline{h}_{α} **g** \overline{g}_{α}) اعمال میشون و مرز بالایی و مرزهای اطراف به عنوان مرزهای خروجی در نظر گرفته میشوند. در مرزهای خروجی از یک برونیابی مرتبه دوم برای ارزیابی توابع توزیع مجهول مومنتوم و نسبت ترکیب استفاده میشود. در مرزهای خروجی از یک در مای فوق گرم ثابت است، از شرط مرزی میتوا در دیواره میشود. در میشون و مرز بالایی و مرزهای اطراف به عنوان مرزهای خروجی در نظر گرفته میشوند. در مرزهای خروجی از یک برونیابی مرتبه دوم برای ارزیابی توابع توزیع مجهول مومنتوم و نسبت ترکیب استفاده میشود. در مرزهای اطراف به عنوان مرزهای اطراف به عنوان مرزهای خروجی در نظر گرفته میشود. در مرزهای خروجی از یک برونیابی مرتبه دوم برای ارزیابی توابع توزیع مجهول مومنتوم و نسبت ترکیب استفاده میشود. زمانیکه سطح پایینی در یک دمای فوق گرم ثابت است، از شرط مرزی متناوب در دیوارههای اطراف استفاده میشود.

۳- صحت سنجی کد

۳-۱ آزمایش رهاسازی قطره

آزمون دیگری که به وسیله آن صحت کد نوشته شده اعتبارسنجی میشود آزمون رهاسازی یکقطره مربعی شکلدر مرکز میدان است. برای این منظور یکقطره مربعی شکل به ابعاد ۱۰۰ رها میشود. شکلهای ۱ و ۲ نتایج حاصل از رهاسازی را دردر حالتیکه υ = ۰.۰۳۳۳ و υ = ۰.۳۳۳ باشد، نشان میدهند.

bounce-back rule

همانطور که انتظار میرود،در حالتیکه لزجت سیال کم است قطره در طی رسیدن به حالت تعادل دچار نوسان میشود در صورتیکه باافزایش لزجت و به تبع آن افزایش تلفات ناشی از آن تغییر شکل قطره به آرامیصورت پذیرفته ونوسان در آن دیده نمیشود.



 $\upsilon = \frac{\tau}{\pi} = ...$ آزمایش رهاسازی قطره مربعی شکل در حالت ۱ آزمایش رهاسازی قطره مربعی شکل در ا



 $v = \frac{\tau}{\pi} = ...$ آزمایش رهاسازی قطره مربعی شکل در حالت ۲۳۳

۲-۳ آزمایش زاویه تماس

در شکل ۳زاویه تماس تعادلی بدست آمده بر حسب مقادیر مختلف پتانسیل خیس شوندگی رسم گردیده است که تطابق خوبی با معادله یانگ دارد.



شکل ۳ زاویه تماس تعادلی بدست آمده در شبیهسازی به ازای مقادیر مختلف پتانسیل خیسشوندگی همراه با مقادیرپیشبینی شده توسط معادله یانگ مرجع [۸]

قرار گیریقطره روی سطح جامد به ازایزاویههای تماس ۲۰، ۹۰ و ۱۵۰ درجه درشکل (۴) آورده شده است.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۴ قرار گیری قطره روی سطح جامد با زاویه تماس الف) ۲۰ ب) ۹۰ ج) ۱۵۰ بر حسب درجه

۳-۳ دینامیک قطره روی سطح متخلخل

تقیلوو رحیمیان [۹] جریان دو فاز روی سطح متخلخل را برای نسبت چگالی یک بررسی کردهاند. در اینجا برای بررسی صحت شرایط مرزی سطح متخلخل جامد در کار حاضر، نتایج کار مذکور را با کار حاضر مقایسه می کنیم.

R بدون در نظر گرفتن تغییر فاز در میدان متخلخل، ضریب نسبت جذب نشده بصورت $h^*=h/R$ تعریف می شود که در آن شعاع اولیه قطره، h ارتفاع مقداری از قطره که هنوز در میدان نفوذ نکرده است.

با ثابت فرض کردن اعداد بیبعد موجود در مسئله میتوان نفوذ قطره در میدان متخلخل را بین کار حاضر و کار تقیلو و همکاران [۹] مقایسه کرد. نتایج حاصل در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود نتایج حاصله با مرجع مذکور تطابق خوبی دارد.



شکل ۵ مقایسه نفوذ قطره در محیط متخلخل بین کار حاضر و مرجع [۹]

۴- ارائهی نتایج

در این بخش مسئله نفوذ و انتقال حرارت تبخیری قطره در تماس با یک سطح داغ متخلخل بررسی می گردد. در شکل زیر شماتیک مسئله آورده شده است.



کمیتهای موثر در مسئله عبارتند از : چگالی مایع ρ_l ، چگالی گاز ρ_g ، ویسکوزیته مایع μ_l ، ویسکوزیته گاز μ_g ، قطر اولیه قطره D، شتاب گرانش g، کشش سطحی σ ، گرمای ویژه مایع $C_{p,l}$ ، گرمای ویژه گاز $\rho_{p,g}$ ، رسانندگی گرمایی مایع N_l رسانندگی گرمایی گاز K_g ، اختلاف دما $T_{sat} - T_{gas} - T_{sat}$ ، گرمای نهان h_{fg} ، زاویه تماس θ ، میزان تخلخل 3و زمان t. در بررسی انتقال حرارت، دمای قطره ثابت و برابر دمای اشباع (T_{sat}) در نظر گرفته میشود بنابراین خواص حرارتی مایع یعنی گرمای ویژه مایع رو سنندگی گرمایی مایع K_l تاثیری در مسئله ندارند. با آنالیز ابعادی و استفاده از قضیه پی-باکینگهام اعداد بدون مسئله به صورت زیر بدست میآیند:

$$rac{
ho_l}{
ho_g}$$
نسبت چگالی (1۶)

$$Ar_{g} = rac{
ho_{g}\sqrt{gD^{3}}}{\mu_{g}}$$
عدد ارشمیدس گاز (۱۷)

$$Bo = \frac{\rho_g g D^2}{\sigma} \tag{19}$$

$$St_{g} = \frac{C_{p,g}(T_{gas} - T_{sat})}{h_{fg}}$$
 عدد استفان گاز (۲۰)

θ

Е

$$\Pr_{g} = \frac{\mu_{g} C_{p,g}}{K_{g}}$$
 عدد پرنتل گاز (۲۱)

$$t^* = \frac{t}{\sqrt{\frac{D}{g}}}$$
 زمان بی بعد (۲۳)

$$\operatorname{Re}_{l} = \frac{uD}{v_{l}}$$
 عدد رینولدز مایع (۲۵)

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود در دیواره ی پایین و ذرات متخلخل جامد شرط مرزی بازگشت بهعقب و در دیواره ها شرط مرزی جریان خروجی استفاده شده است. در تمامی محاسبات انجام شده نسبت چگالی ثابت و برابر ۵۰۰ نسبت ویسکوییته سینماتیک برابر ۵۰۰ و زاویه تماس ۶۰ درجه می باشد، جز در مواردی که صریحاذکر شده باشد. میدان محاسباتی مستطیلی ۱۵۰ واحد شبکه در راستای افقی و ۱۰۰ واحد در راستای عمودی می باشد. دمای اولیه فاز گاز برابر *T*gas است که بالاتر از دمای اشباع میباشد.

در ادامه تاثیربعضی از این پارامترها در نفوذ و انتقال حرارت قطره در میدان متخلخل، بررسی می گردد. از بین پارامترهای تعریف شده در معادلات ۵۴ تا ۶۳، بعضی روی رفتار دینامیکی قطره و بعضی روی رفتار حرارتی قطره تأثیر دارند. در این فصل تأثیر پارامترهای زاویه تماس، عدد رینولدز، نسبت چگالی و پارامتر تخلخل روی نفوذ قطره در محیط متخلخل و تأثیر عدد پرانتل و استفان روی نرخ تبخیر قطره در محیط متخلخل بررسی می شود. برای بررسی کمّی میزان نفوذ قطره در محیط متخلخل، فر عند پرانتل متخلخل و تأثیر عدد پرانتل معان روی نرخ تبخیر قطره در محیط متخلخل بررسی می شود. برای بررسی کمّی میزان نفوذ قطره در محیط متخلخل، فر و استفان روی نرخ تبخیر قطره در محیط متخلخل بررسی می شود. برای بررسی کمّی میزان نفوذ قطره در محیط متخلخل، فریب نصبت جذب شده تعریف می گردد که بیبعد است و بصورت h(t)/D تعریف می شود. در این رابطه h(t) در شکل ۶ مشخص شده است و D نیز قطر اولیه یقطره می باشد. همچنین برای بررسی کمّی نرخ تبخیر قطره در محیط متخلخل، شکل ۶ مشخص شده است و D نیز قطر اولیه یقطره می باشد. همچنین برای بررسی کمّی نرخ تبخیر قطره در محیط متخلخل، در این رابطه (t) م در شکل ۶ مشخص شده است و D نیز قطر اولیه یقطره می باشد. همچنین برای بررسی کمّی نرخ تبخیر قطره در محیط متخلخل، فریب نصبت جذب شده تعریف می گردد که بیبعد است و سورت m(t)/D تعریف می شود. در این رابطه m(t)/D مقدار جرم شکل ۶ مشخص شده است و M نیز جرم اولیه یقطره می باشد. همچنین برای برسی کمّی نرخ تبخیر قطره در محیط متخلخل، خرم بخین می قطره است و M نیز جرم اولیه یقطره می باشد.

۴–۱ تأثیر زاویه تماس

زاویه سطح پارامتری است که در جریان چندفاز تعریف می گردد. در واقع وقتی که یک سطح جامد در تماس با دوفاز قرار می گیرد، زاویه یتماس تعریف می شود. در ابتدای این فصل نیز برخورد یک قطره در تماس با سطح جامد برای سه زاویه ی تماسی بررسی گردید. سیالاتی مانند آب که متمایل به چسبیدن به سطح جامد دارند و دارای زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه هستند را اصطلاحاً "آبدوست" می نامند. از طرفی، سیالاتی مانند جیوه نیز که تمایل به چسبیدن به سطح جامد ندارند و زاویه تماس بیشتر از ۹۰ درجه دارند را اصطلاحاً "آبگریز" گویند. در این بخش تأثیر زاویه تماس در نرخ نفوذ قطره در محیط متخلخل بررسی میشود. زاویه تماس مورد بررسی در این مطالعه شامل سه مقدار ۶۰، ۹۰ و ۱۱۰ درجه میباشد. این مقادیر بترتیب شامل سیالات آبدوست، خنثی و آبگریز میباشد. برای بررسی کمّی نتایج، ضریب نسبت جذب شده در زمانهای مختلف در شکل ۷رسم شده است. همانطور که از این نتایج دیده میشود، در یک زمان مشخص، هر چه زاویه تماسی کمتر باشد ضریب نسبت جذب شده نیز کمتر است.

ضریب نسبت جذب شده کمتر به معنای نفوذ بیشتر قطره است. پس هر چه زاویه سطح کمتر باشد نفوذ قطره در محیط متخلخل بیشتر شده است. در واقع این نتیجه با انتظارات فیزیکی تطابق دارد زیرا سیال آبدوست میل بیشتری به چسبیدن به سطح جامد (ذرات متخلخل) دارد و از اینرو نفوذ آن بیشتر میشود.



شکل ۷ نمودار ضریب نسبت جذب شده بر حسب زمان بی بعد برای زوایای سطح مختلف و نسبت چگالی ۴۰۰، تخلخل ۰/۹۷، عدد رینولدز ۹، عدد استفان ۰/۰۲ و عدد پرانتل ۱۲۸۸

۴-۲ تأثیر نسبت چگالی

نسبت چگالی از پارامترهای بسیار مهم در جریان دوفاز است. در واقع بیشتر مدلهای عددی موجود در نسبت چگالیهای بالا ناپایدار هستند. پارامتر نسبت چگالی، نسبت بین چگالی فاز مایع (قطره) به چگالی فاز گازی (محیط اطراف) میباشد. از مزیتهای روش لی مورداستفاده در این تحقیق، پایداری در نسبت چگالیهای بالا میباشد. در این بخش تأثیر نسبت چگالی در میزان نفوذ قطره در محیط متخلخل بررسی شده است. مقادیر نسبت چگالیها شامل مقادیر ۲، ۱۰ و ۴۰۰ میباشد.

در واقع، مدلهای پیشین چندفازی بولتزمن شبکهای تنها در نسبت چگالیهای از مرتبه ۱۰ پایدار بودند که معروفترین آنها مدل شان و چن بوده است. با استفاده از مدل لی در این تحقیق، نسبت چگالیهای در محدوده ۱۰۰۰ با موفقیت شبیهسازی شدهاند. شکل ۸ تغییر ضریب نسبت جذب شده بر حسب زمان برای سه نسبت چگالی را نشان میدهد. همانطور که دیده میشود با افزایش نسبت چگالی، نفوذ قطره در محیط متخلخل بیشتر می *گ*ردد. دلیل این رفتار را میتوان اینگونه توضیح داد که با افزایش چگالی فاز مایع در حضور میدان گرانش، نیروی وزن اعمالی بیشتر می *گ*ردد و چون نیروی وزن همواره در ابتدای نفوذ تا انتها به قطره وارد میشود، انتظار میرود نفوذ قطره بیشتر شود. این انتظار بخوبی با نتایج موجود در شکل ۸ مطابقت دارد.

۳. نتیجهگیری

- مدل لی در مدلسازی جریان دوفازی برای شبیه سازی نسبت چگالی و ویسکوزیته بالا معرفی گردید.
 - تئورى خيس شوندگى كان جهت بررسى تأثيراتسطح به مدل مذكور واردگرديد.
- تاثیر پارامترهای مختلف از قبیلزاویهی سطح، نسبت چگالی، سرعت اولیهی قطرهومیزان تخلخل در دینامیک قطره بههنگامنفوذ در محیط متخلخل (بدون لحاظ انتقال حرارت) مطالعه گردید.

- با ادغام مدل اسکالر منفعل که برای شبیه سازی انتقال حرارت تک فاز شناخته شدهاست به مدل لی، انتقال حرارت دوفازی معرفی شد.
- با افزودن ترم چشـمه حجمی به معادلات کان- هیلیارد، تغییر فاز شـبیهسازی و تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل گرمای
 نهان و رسانندگی گرمایی در رفتار قطره بههنگام تبخیر مطالعه گردید.
- هر چه زاویه تماس کمتر باشد، سیال آبدوستتر میباشد و میل چسبیدن به سطح جامد (ذرات متخلخل) بیشتر می شود.
 از اینرو هرچه زاویه تماس کمتر باشد، نفوذ قطره بیشتر می گرد.

تشكر و قدرداني

همواره از دکتر هادی کارگر شریف آبادی که در طول اجرای این تحقیق، با راهنماییهای خود موجب به ثمر نشستن این تحقیق شدند نهایت تشکر را دارم. همچنین از گروه مکانیک دان شگاه آزاد ا سلامی واحد یزد بخاطر همکاری شان سپا سگذار هستیم.

مراجع

[1] M.A. Hanlon, H.B. Ma, Evaporation heat transfer in sintered porous media, ASME J.Heat Transf. ١٢۵ (٢٠٠٣) ۶۴۴–۶۵۲.

[Υ] K.J. Zan, C.J. Zan, Y.M. Chen, S.J.Wu, Analysis of the parameters of the sintered loopheat pipe, Heat Transf.—Asian Res. $\Upsilon\Upsilon$ ($\Upsilon \cdot \cdot \Upsilon$) $\Delta 1\Delta - \Delta \Upsilon \beta$.

[\mathfrak{T}] C. Li, G.P. Peterson, Evaporation/Boiling in thin capillary wicks (II) – effects ofvolumetric porosity and mesh size, ASME J. Heat Transf. 17A ($\mathfrak{T} \cdot \mathfrak{S}$) 1 $\mathfrak{T} \cdot -1\mathfrak{T} A$.

[۴] S. Mahjoub, A. Mahtabroshan, Numerical simulation of a conventional heat pipe, World Academy of Science, Engineering, and Technology, May ۲۰۰۸.

[Δ] H.M. Sabir, Y.B.M. ElHag, R. Benhadj-Djilali, Experimental study of capillary assisted evaporators, Energy Build. *• (*••Λ) ***

[β] T. Lee, C.-L. Lin, A stable discretization of the lattice Boltzmann equation for simulation of incompressible two-phase flows at high density ratio, *Journal of Computational Physics*, Vol. $\gamma \cdot \beta$, pp. $\gamma - \gamma \cdot \gamma$.

[Y] T. Lee, Effects of incompressibility on the elimination of parasitic currents in the

latticeBoltzmann equation method for binary fluids, Comput. Math. Appl. ۵۸ (۲۰۰۹)۹۸۷–۹۹۴.

[Λ] T. Lee, L. Liu, Lattice Boltzmann simulations of micron-scale drop impact on drysurfaces, J. Comput. Phys. ۲۲۹ (۲۰۱۰) Δ·۴۵–Δ·۶۳.

[9] M. Taghilou, M.H. Rahimian, Investigation of two-phase flow in porous media usinglattice Boltzmann method, Comput. Math. Appl. ۶۷ (۲) (۲۰۱۴) ۴۲۴–۴۳۶.

Two-Dimensional Numerical modeling of penetration and heat transfer on to porous media by lattice Boltzmann method

Hossein Mohsenian Sizkhat

Ph.D. Student of Mechanics, University of Islamic Azad Dashtestan Branch, Address, Iran, E-mail: hosseinmohsenian@gmail.com

Nima Ghiyasi Tabari

Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Islamic Azad Dashtestan Branch, Address, Iran, E-mail: *Nima_Ghiasi_te@yahoo.co.uk*

Seyed Ali Aqa Mirjalili

Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Islamic Azad Dashtestan Branch, Address, Iran, E-mail: *Seyed Ali Aqa Mirjalili*

Abstract. The main purpose of this work is numerical simulation of droplet dynamics (as penetration) and heat transfer in contact with the porous surface. To achieve this purpose Lattice Boltzmann method has been used. In the first step, a two phase flow containing droplet and its surrounding (involved gas and porous surface) is simulated using Lee method. Lee method provides the ability of using the models in a wider range of density ratio.

In the Present study, dynamical behavior (droplet penetration) and heat transfer are studied simultaneously. Hence, in the next step, with integration of passive scalar model and Lee method, two-phase heat transfer simulated. Among important parameters in this study, the effect of contact angle and density ratio parameter on droplet penetration in porous surface have been studied.Decreasing contact angle and increasing density ratio cause high penetration of the droplet in porous surface. Also, increasing Stefan number and decreasing Prandtl number will increase the rate of evaporation.

Keywords: Dynamic behavior, heat transfer, two phase flow, porous surface, lattice Boltzmann method