



مطالعه عددی دینامیک و انتقال حرارت در تماس با سطح متخلخل با استفاده از روش بولتزمان شبکه‌ای

حسین محسنیان سی سخت^۱، نیما غیثی طبری^۲، سیدعلی آقامیر جلیلی^۳

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

^۲ استادیار 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

چکیده

هدف از این مطالعه شبیه‌سازی عددی دینامیک (یعنی نفوذ) و انتقال حرارت قطره در تماس با سطح متخلخل است. برای رسیدن به این هدف از روش بولتزمان شبکه‌ای استفاده شده است. در گام نخست جریان دوفاز حاوی قطره و محیط پیرامونی (شامل گاز و سطح متخلخل) با روش "لی" شبیه‌سازی شده است. استفاده از روش لی این امکان را فراهم می‌کند تا مدل ایجاد شده در محدوده وسیع‌تری 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 شبیه‌سازی شده است. از میان پارامترهای مؤثر در این مسئله، تأثیر زاویه تماس و نسبت چگالی بررسی می‌گردند. کاهش زاویه تماس، افزایش نسبت چگالی، افزایش موجب افزایش نفوذ قطره می‌شوند. همچنین کاهش عدد پراتل و افزایش عدد استفان موجب افزایش نرخ تبخیر قطره در تماس با محیط متخلخل می‌گردد.

کلمات کلیدی: رفتار دینامیکی، انتقال حرارت، جریان دوفاز، سطح متخلخل، روش بولتزمان شبکه‌ای.

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 سرمایه‌گذاری تجهیزات الکترونیکی، مبدل‌های حرارتی، راکتورهای کاتالیستی شیمیایی و رسوب بخارهای شیمیایی دارند. کاربردهای محیطی مانند ارزیابی میزان خطر انتشار مایعات در خاک، بطور اساسی به نرخ تبخیر قطره مایع وابسته است که تابعی از منطقه مرطوب روی سطح متخلخل و همچنین عمق نفوذ قطره می‌باشد.

بخاطر محدودی و وسیع کاربرد نفوذ قطره در محیط متخلخل، تحقیقات آزمایشگاهی 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 مناسب سایز ذرات، تخلخل فیتیله و ضخامت فیتیله، ضریب انتقال حرارت تبخیری را افزایش خواهد داد. تأثیر پارامترهای فیتیله‌ای در لوله‌های حرارتی متخلخل بوسیله زان 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 می‌شود. سپس لی و پترسون [۳] تأثیر تخلخل حجمی و ابعاد مش را در حین فرآیندهای تبخیر و جوشش در فیتیله‌های مویرگی نازک تحت شرایط پایا و در فشار اتمسفر بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهند 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 شبیه‌سازی عددی، تأثیر تخلخل فیتیله روی رفتار لوله حرارتی را تحقیق کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که اختلاف دما بین اواپراتور و کندانسور با افزایش تخلخل، افزایش می‌یابد. 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 متخلخل وجود دارد که مرتبط با ضریب انتقال حرارت بیشینه می‌باشد و تأثیر سایز ذره بیشتر از تأثیر ضخامت لایه متخلخل خواهد بود.

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 شبیه‌سازی نفوذ و انتقال حرارت قطره در یک سطح متخلخل داغ استفاده می‌شود. این اولین بار است که تبخیر و تغییر شکل قطره در یک سطح متخلخل داغ بوسیله‌ی روش بولتزمان شبکه‌ای شبیه‌سازی می‌شود. در ابتدا توسعه معادله کان-هیلیارد جابجایی کلاسیک در حضور تغییر فاز ارائه می‌شود. سپس این معادله در چارچوب بولتزمان شبکه‌ای چندفاز آقای لی بکار گرفته می‌شود. آنگاه تغییر مشخصه‌های جریان و سطح بطور جامع مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲. مدل‌سازی ریاضی

مدل تغییر فاز براساس چارچوب میدان فازی تاننهن لی ولین [۶] می‌باشد. در این روش، مرزبیندی و فازتراکم ناپذیر و غیرقابل امتزاج به وسیله‌ی معادله کان-هیلیارد جابجایی توصیف و کنترل 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 \tilde{A} از سیالات باینری می‌تواند بصورت زیر نوشته شود:

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

که n_i نرخ جریان جرمی (بر واحد حجم) جزء \tilde{A} و m''' چشمه یا چاه حجمی برای تغییرات فاز می‌باشد. در منطقه توده‌ای^۱، جریان جرم تنها به فرارفت^۲ نسبت داده می‌شود، بنابراین $\mathbf{n}_i = \tilde{\rho}_i \mathbf{u}$ است که \mathbf{u} سرعت حجمی میانگین جریان می‌باشد. در فصل مشترک بین دو فاز، یک جریان جرمی پخش بوسیله‌ی $\rho_i \mathbf{j}_i$ مشخص می‌شود که \mathbf{j}_i نرخ جریان پخش حجمی است. بنابراین جریان جرمی کلی مولفه \tilde{A} بصورت زیر بیان می‌شود:

^۱ bulk region
^۲ advection

$$\mathbf{n}_i = \tilde{\rho}_i \mathbf{u} - \rho_i \mathbf{j}_i \quad (2)$$

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 دو فاز مقداری بین صفر و یک دارد، بنابراین چگالی‌های محلی بصورت زیر به چگالی‌های توده‌ای وابسته هستند:

$$\tilde{\rho}_L = C \rho_L \quad (3)$$

$$\tilde{\rho}_G = (1 - C) \rho_G \quad (4)$$

و چگالی‌های میانگین محلی بصورت زیر مشخص می‌گردند:

$$\rho = C \rho_L + (1 - C) \rho_G \quad (5)$$

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}C) - \nabla \cdot \mathbf{j}_L = -\frac{m''''}{\rho_L} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(1 - C)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}(1 - C)) - \nabla \cdot \mathbf{j}_G = -\frac{m''''}{\rho_G} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{Df_\alpha}{Dt} &= \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \mathbf{e}_\alpha \cdot \nabla f_\alpha = -\frac{1}{\lambda} (f_\alpha - f_\alpha^{eq}) \\ &+ \frac{1}{c_s^\gamma} (\mathbf{e}_\alpha - \mathbf{u}) \cdot \mathbf{F} \Gamma_\alpha \end{aligned} \quad (8)$$

که در این رابطه f_α تابع توزیع ذره، \mathbf{e}_α سرعت میکروسکوپی ذره در جهت α ، ρ چگالی مخلوط، \mathbf{u} سرعت میانگین حجمی، c_s سرعت صوت، λ زمان استراحت^۵ و f_α^{eq} تابع توزیع تعادلی است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_\alpha^{eq} = \omega_\alpha \rho \left[1 + \frac{\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u}}{c_s^\gamma} + \frac{(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})^2}{2c_s^\delta} - \frac{(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u})}{2c_s^\delta} \right] \quad (9)$$

که در این رابطه ω_α فاکتور وزنی محاسبه شده از ساختار شبکه و $f_\alpha^{eq}/\rho = \Gamma_\alpha(u) = \Gamma_\alpha$ می‌باشد. فاکتور بین‌مولکولی \mathbf{F} تأثیرات گاز غیر ایده‌آل را مدل می‌کند و شکل فشاری آن بصورت زیر است:

$$\mathbf{F} = \nabla \rho c_s^\gamma - \nabla p_{th} + \rho k \nabla \nabla^2 \rho \quad (10)$$

که در این رابطه p_{th} فشار ترمودینامیکی است و از یک معادله حالت مناسب تعیین می‌شود. استفاده از معادله ۱۰ در معادله بولتزمان گسسته موجب ناپایداری می‌گردد 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 می‌آیند. آقای لی نشان داده است که خطای برشی و جریان‌های پارازیتی حاصل می‌توانند با بازنویسی معادله ۱۰ به فرم پتانسیلی با استفاده از تساوی ترمودینامیکی $\nabla p_{th} = \rho \nabla \mu$ حذف شوند. \mathbf{F} برای سیالات باینری با جایگذاری پارامتر مرتبه از چگالی به نسبت ترکیب C و سپس اندازه‌گیری انرژی آزاد سیستم، بدست می‌آید. همچنین \mathbf{F} شامل فشار هیدرودینامیکی می‌باشد که تراکم‌ناپذیری را تحمیل می‌کند.

^۳ VOF Method

^۴ discrete Boltzmann equation (DBE)

^۵ relaxation time

شرط مرزی

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 C در جهت عمود بر دیوار جامد ضروری بنظر می‌رسد. به این دلیل روابط زیر اعمال می‌شوند:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0} = -\frac{\phi_1}{k} \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right|_{z=0} \approx \frac{1}{2} \left(-3 \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0} + 4 \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=1} - \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=2} \right) \quad (12)$$

که z جهت عمود بر دیوار است. برای ارزیابی جمله گرادینان در طرف راست معادله ۱۲ بصورت زیر عمل می‌شود:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=2} \approx \frac{1}{2} \left(3 C \Big|_{z=2} - 4 C \Big|_{z=1} + C \Big|_{z=0} \right) \quad (13)$$

توزیعی تصادفی از میله‌های جامد انتخاب می‌شوند، از اینرو توزیع منظمی از ذرات در محیط وجود ندارد. ویژگی اصلی این روش، انتخاب تصادفی شبکه‌هایی است که بایستی بصورت جامد در نظر گرفته شوند. یک برنامه تولیدکننده تصادفی برای پرکردن درصدی از دامنه بصورت متخلخل، استفاده می‌شود. این برنامه میله‌های جامد را در دامنه بصورت یکنواخت توزیع می‌کند، یعنی یک شانس یکسان برای هر شبکه به‌همراه دارد و تولید متخلخل در هر پردازش برنامه با دیگری متفاوت است. حجم کل سلول‌های پر شده، متخلخل موردنیاز را ایجاد می‌کند. از آنجا که در هر شبکه جامد امکان حصول مقادیر متفاوتی برای C_S وجود دارد (زیرا گرادینان C_S برای مقادیر C نزدیک به دیوار و در جهت عمود بر آن بسیار حساس است). برای ارزیابی مقادیر صحیح C در دیواره‌های جامد، یک محیط متخلخل تصادفی با حداقل ضخامت دو شبکه برای هر ذره متخلخل ایجاد می‌شود. برای اعمال شرط مرزی شار جرمی صفر، بایستی گرادینان پتانسیل شیمیایی در جهت عمود بر مرز جامد را بصورت زیر در نظر گرفت:

$$n \cdot \nabla \mu \Big|_s = 0 \quad (14)$$

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

$$n \cdot \nabla C \Big|_s = -\frac{\phi}{k} \quad (15)$$

که در این رابطه ϕ ضریبی ثابت است که به نام پتانسیل خیس‌شوندگی معروف است. در سطح پایینی، فائده‌ی بازگشت به عقب^۶ برای توابع توزیع نسبت ترکیب و مومنتوم (\bar{h}_α و \bar{g}_α) اعمال می‌شوند و مرز بالایی و مرزهای اطراف به عنوان مرزهای خروجی در نظر گرفته می‌شوند. در مرزهای خروجی از یک برونمایی مرتبه دوم برای ارزیابی توابع توزیع مجهول مومنتوم و نسبت ترکیب استفاده می‌شود. زمانیکه سطح پایینی در یک دمای فوق‌گرم ثابت است، از شرط مرزی متناوب در دیواره‌های اطراف استفاده می‌شود.

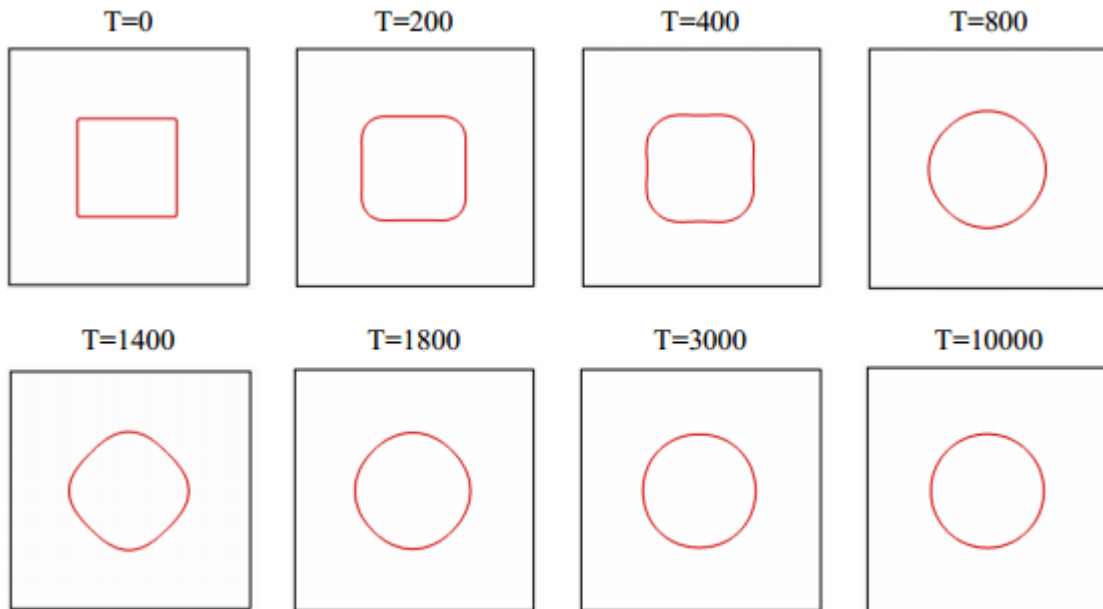
۳- صحت سنجی کد

۳-۱ آزمایش رهاسازی قطره

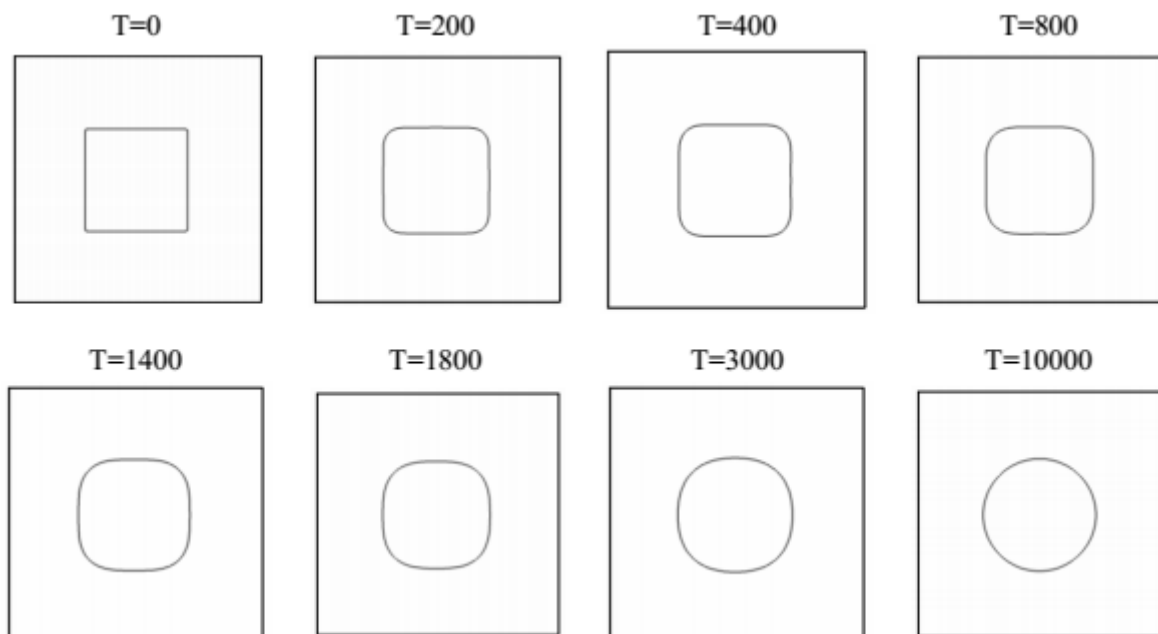
آزمون دیگری که به وسیله آن صحت کد نوشته شده اعتبارسنجی میشود آزمون رهاسازی یقظره مربعی شکلدر مرکز میدان است. برای این منظور یقظره مربعی شکل به ابعاد ۱۰۰ رها میشود. شکل‌های ۱ و ۲ نتایج حاصل از رهاسازی را در در حالتیکه $U = 0.333$ و $U = 0.333$ باشد، نشان می‌دهند.

^۶bounce-back rule

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



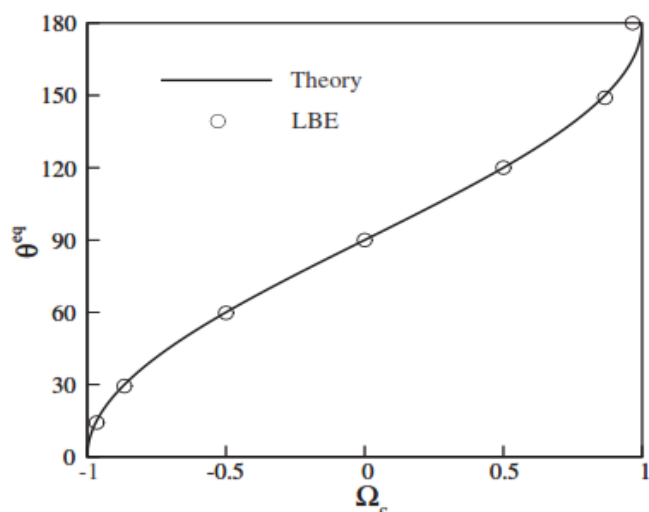
شکل ۱ آزمایش رهاسازی قطره مربعی شکل در حالت $U = \frac{\tau}{\eta} = 0.0333$



شکل ۲ آزمایش رهاسازی قطره مربعی شکل در حالت $U = \frac{\tau}{\eta} = 0.333$

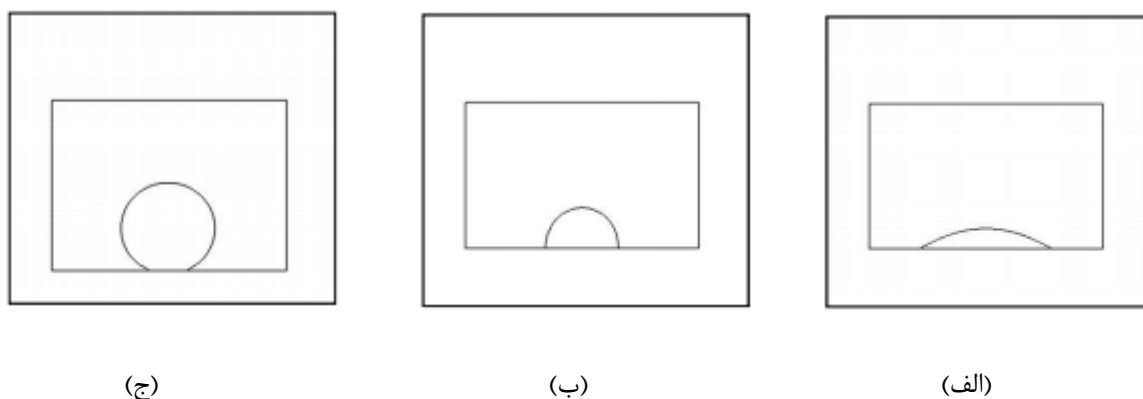
۳-۲ آزمایش زاویه تماس

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



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

قرارگیری قطره روی سطح جامد به ازای زاویه‌های تماس ۲۰، ۹۰ و ۱۵۰ درجه در شکل (۴) آورده شده است.



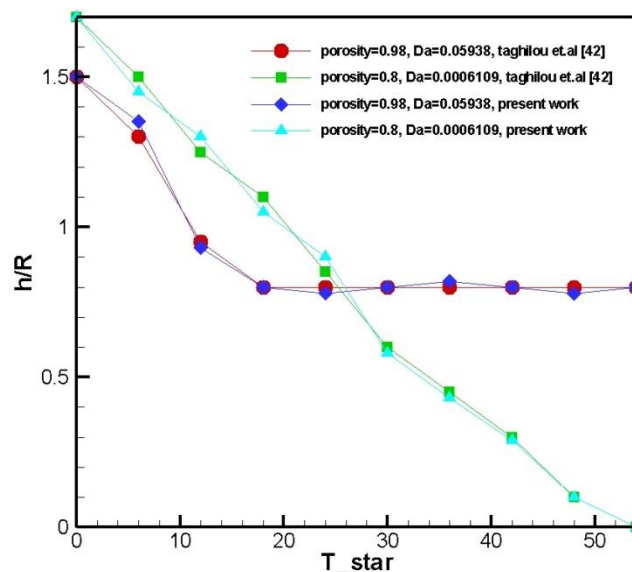
شکل ۴ قرارگیری قطره روی سطح جامد با زاویه تماس (الف) ۲۰ (ب) ۹۰ (ج) ۱۵۰ بر حسب درجه

۳-۳ دینامیک قطره روی سطح متخلخل

تقیلو و 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 می‌کنیم.

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

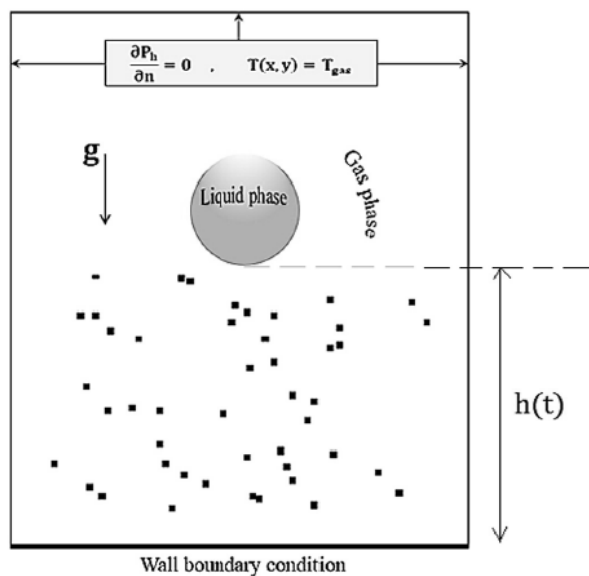
با ثابت فرض کردن اعداد بی‌بعد موجود در مسئله می‌توان نفوذ قطره در میدان متخلخل را بین کار حاضر و کار تقیلو و همکاران [۹] مقایسه کرد. نتایج حاصل در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج حاصله با مرجع مذکور تطابق خوبی دارد.



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 می‌گردد. در شکل زیر شماتیک مسئله آورده شده است.



شکل ۶ شماتیک مسئله

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 $C_{p,g}$ ، رسانندگی گرمایی مایع K_l ، رسانندگی گرمایی گاز K_g ، اختلاف دما $\Delta T = T_{gas} - T_{sat}$ ، گرمای نهان h_{fg} ، زاویه تماس θ ، میزان تخلخل ϵ و 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 $C_{p,l}$ ، رسانندگی 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:

$$\frac{\rho_l}{\rho_g} \quad \text{نسبت چگالی} \quad (16)$$

$$Ar_g = \frac{\rho_g \sqrt{gD^3}}{\mu_g} \quad \text{عدد ارشمیدس گاز} \quad (17)$$

$$Ar_l = \frac{\rho_l \sqrt{gD^3}}{\mu_l} \quad \text{عدد ارشمیدس مایع} \quad (18)$$

$$Bo = \frac{\rho_g g D^2}{\sigma} \quad \text{عدد بوند} \quad (19)$$

$$St_g = \frac{C_{p,g} (T_{gas} - T_{sat})}{h_{fg}} \quad \text{عدد استفان گاز} \quad (20)$$

$$Pr_g = \frac{\mu_g C_{p,g}}{K_g} \quad \text{عدد پرنتل گاز} \quad (21)$$

$$\theta \quad \text{زاویه تماس} \quad (22)$$

$$t^* = \frac{t}{\sqrt{\frac{D}{g}}} \quad \text{زمان بی بعد} \quad (23)$$

$$\varepsilon \quad \text{پارامتر تخلخل} \quad (24)$$

$$Re_l = \frac{uD}{\nu_l} \quad \text{عدد رینولدز مایع} \quad (25)$$

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود در دیواره ی پایین و ذرات متخلخل جامد شرط مرزی بازگشت به عقب و در دیواره ها شرط مرزی جریان خروجی استفاده شده است. در تمامی محاسبات انجام شده نسبت چگالی ثابت و برابر ۵۰۰ نسبت ویسکویته سینماتیک برابر ۵۰۰ و زاویه تماس ۶۰ درجه می باشد، جز در مواردی که صریحاً ذکر 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 می باشد.

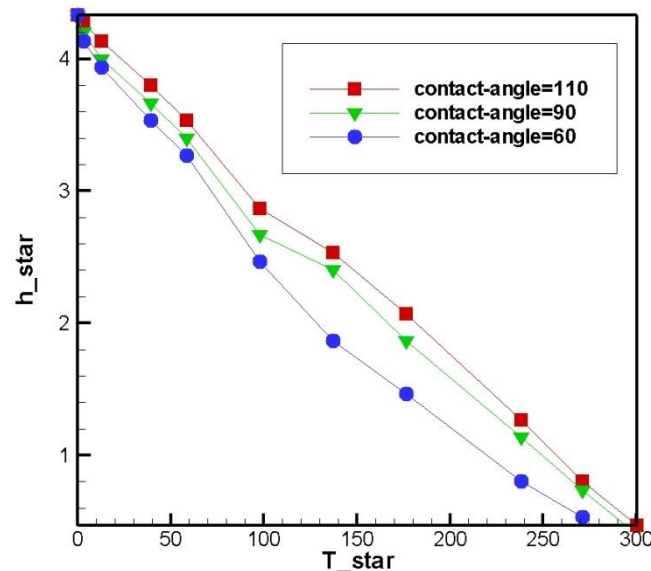
در ادامه تاثیر بعضی از این پارامترها در نفوذ و انتقال حرارت قطره در میدان متخلخل، بررسی می گردد. از بین پارامترهای تعریف شده در معادلات ۵۴ تا ۶۳، بعضی روی رفتار دینامیکی قطره و بعضی روی رفتار حرارتی قطره تأثیر دارند. در این فصل تأثیر پارامترهای زاویه تماس، عدد رینولدز، نسبت چگالی و پارامتر تخلخل روی نفوذ قطره در محیط متخلخل و تأثیر عدد پراتل و استفان روی نرخ تبخیر قطره در محیط متخلخل بررسی می شود. برای بررسی کمی میزان نفوذ قطره در محیط متخلخل، ضریب نسبت جذب شده تعریف می گردد که بی بعد است و بصورت $h^* = h(t)/D$ تعریف می شود. در این رابطه $h(t)$ در شکل ۶ مشخص شده است و D نیز قطر اولیه ی قطره می باشد. همچنین برای بررسی کمی نرخ تبخیر قطره در محیط متخلخل، جرم تبخیر نشده تعریف می گردد که بی بعد است و بصورت $m^* = m(t)/M$ تعریف می شود. در این رابطه $m(t)$ مقدار جرم لحظه ای قطره است و M نیز جرم اولیه ی قطره 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 ی تماس 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 کمی نتایج، ضریب نسبت جذب شده در زمان‌های مختلف در شکل ۷ رسم 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 پراوتل ۰/۱۲۸

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 مورد استفاده 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 بولترمن 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 می‌گردد. دلیل این رفتار را می‌توان اینگونه توضیح داد که با افزایش چگالی فاز مایع در حضور میدان گرانش، نیروی وزن اعمالی بیشتر می‌گردد 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 شبیه‌سازی نسبت چگالی و ویسکوزیته بالا معرفی گردید.
- تئوری خیس‌شوندگی کان جهت بررسی تأثیرات سطح به مدل مذکور وارد گردید.
- تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل زاویه سطح، نسبت چگالی، سرعت اولیهی قطرهمیزان تخلخل در دینامیک قطره به هنگام نفوذ در محیط متخلخل (بدون لحاظ انتقال حرارت) مطالعه گردید.

- با ادغام مدل اسکالر منفعل که برای شبیه‌سازی انتقال حرارت تک فاز شناخته شده‌است به مدل لی، انتقال حرارت دوفازی معرفی شد.
- با افزودن ترم چشمه حجمی به معادلات کان-هیلیارد، تغییر فاز شبیه‌سازی 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 می‌شود. از اینرو هرچه زاویه تماس کمتر باشد، نفوذ قطره بیشتر می‌گردد.

تشکر و قدردانی

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 دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد بخاطر همکاری‌شان سپاسگزار هستیم.

مراجع

- [۱] M.A. Hanlon, H.B. Ma, Evaporation heat transfer in sintered porous media, ASME J. Heat Transf. ۱۲۵ (۲۰۰۳) ۶۴۴-۶۵۲.
- [۲] K.J. Zan, C.J. Zan, Y.M. Chen, S.J. Wu, Analysis of the parameters of the sintered loop heat pipe, Heat Transf.—Asian Res. ۳۳ (۲۰۰۴) ۵۱۵-۵۲۶.
- [۳] C. Li, G.P. Peterson, Evaporation/Boiling in thin capillary wicks (II) – effects of volumetric porosity and mesh size, ASME J. Heat Transf. ۱۲۸ (۲۰۰۶) ۱۳۲۰-۱۳۲۸.
- [۴] S. Mahjoub, A. Mahtabroshan, Numerical simulation of a conventional heat pipe, World Academy of Science, Engineering, and Technology, May ۲۰۰۸.
- [۵] H.M. Sabir, Y.B.M. ElHag, R. Benhadj-Djilali, Experimental study of capillary assisted evaporators, Energy Build. ۴۰ (۲۰۰۸) ۳۹۹-۴۰۷.
- [۶] 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. ۲۰۶, pp. ۱۶-۴۷, ۲۰۰۵.
- [۷] T. Lee, Effects of incompressibility on the elimination of parasitic currents in the lattice Boltzmann equation method for binary fluids, *Comput. Math. Appl.* ۵۸ (۲۰۰۹) ۹۸۷-۹۹۴.
- [۸] T. Lee, L. Liu, Lattice Boltzmann simulations of micron-scale drop impact on dry surfaces, *J. Comput. Phys.* ۲۲۹ (۲۰۱۰) ۸۰۴۵-۸۰۶۳.
- [۹] M. Taghilou, M.H. Rahimian, Investigation of two-phase flow in porous media using lattice 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 Ghyasi Tabari

Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Islamic Azad Dashtestan Branch, Address, Iran, E-mail: *Nima_Ghyasi_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