مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۰، جلد ۴۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۱۲۹-۱۳۸

مدلسازی دوفازی نفوذ و پیمایش سیال در مسیرهای مشخص داخل محیط متخلخل لایه‌ای به کمک روش شبکه بولتزمن

حانیه صالح‌آبادی دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
محسن نظری* دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
محمد حسن کیهانی استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

در این مقاله، پدیده نفوذ فیلم مایع و همچنین قطره داخل محیط متخلخل لایه‌ای به کمک مدل شان و چن دو فازی و روش شبکه بولتزمن مطالعه شده‌است. محیط متخلخل لایه‌ای از توزیع تصادفی موانع جامد ایجاد شده است به‌طوریکه نسبت تخلخل در هر لایه و در کل ناحیه متخلخل، دارای مقدار ثابتی می‌باشد و به یکنواخت‌تر شدن توزیع موانع کمک می‌کند. در این مطالعه، الگوی نفوذ سیال داخل محیط متخلخل، هم بصورت فیلم مایع و هم به شکل قطره مورد بررسی قرار گرفته و دو رژیم نفوذ ویسکوز فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ مشاهده و بررسی شده‌است. تاثیر نسبت تخلخل و ویژگی آبدوست یا آبگریز بودن سطح بر روی آهنگ نفوذ نیز بررسی گردیده است؛ درکل افزایش میزان تخلخل و آبگریز نمودن سطوح موجب افزایش آهنگ پخش می‌گردد. با توجه به لایه‌ای بودن محیط متخلخل، اثر استفاده از لایه‌ها با نسبت تخلخل‌های مختلف و دارای یک نسبت تخلخل معین در مجموع لایه‌ها، بر روی بهبود آهنگ نفوذ سیال در محیط متخلخل مورد بحث قرار گرفته‌است. همچنین به چگونگی تغییر الگوی نفوذ از رژیم ویسکوز فینگرینگ و نزدیک شدن به رژیم کاپیلاری فینگرینگ به کمک آبدوست نمودن سطوح پرداخته شده‌است. از ویژگی‌های منحصربفرد تحقیق حاضر، ارائه راهکاری برای تغییر مسیر نفوذ فیلم مایع و عبور آن از مسیر مشخص، داخل محیط متخلخل لایه‌ای می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: محیط متخلخل لایه‌ای، سطوح آبدوست و آبگریز، نفوذ فیلم مایع، روش شبکه بولتزمن، رژیم ویسکوز فینگرینگ.

Simulation of Two Phase Penetration and Routing the fluid in a Specified Path in Layered Porous Media with Lattice Boltzmann Method

H. SalehAbadi Department of Mechanical Eng., Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
M. Nazari Department of Mechanical Eng., Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
M. H. Kayhani Department of Mechanical Eng., Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract

In this paper, penetration of drop and liquid film in layered porous media is studied by the two phase lattice Boltzmann-Shan and Chen model. Layered porous medium is generated by locating solid obstacles randomly, such that the amount of porosity in each layer and whole domain is a fixed value, making the porous medium more homogeneous. In this study, penetration pattern of liquid drop and liquid film in porous substrate is investigated and viscous fingering and capillary fingering regimes are considered and compared. The influences of porosity and the hydrophilicity or hydrophobicity property of surface are considered, too; generally, increasing the porosity and making the surface hydrophobic cause increasing the penetration rate. Because the porous medium being layered, the effects of using layers with different porosities and having an averaged-specified value in whole domain, on improving the penetration rate are discussed. Also, it is investigated how to change the penetration pattern from the viscous fingering to the capillary fingering regime by means of hydrophilic and hydrophobic surfaces inside the porous matrix. A unique feature of this research is to provide a mechanism to change the penetration path into specified one.

Keywords: Layered Porous Media, Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces, Liquid film Penetration, Lattice Boltzmann Method, viscous fingering regime.

۱- مقدمه

مدلسازی جریان‌های چندفازی در محیط متخلخل، از اهمیت ویژه‌ای در دینامیک سیالات برخوردار است. کاربرد این موضوعات در صنایع مختلف، از جمله تولید پیل سوختی[۱]، جداسازی سیالات به‌خصوص در زمینه‌های صنعت نفت[۲]، نیروگاه‌ها(برج های خنک کن) مبادله‌کن‌های گرما[۳, ۴]، درالکتروپاشش‌ها و جریان‌های الکترواسموز، چاپگرهای جوهرافشان[۵]، در مسائل زیست محیطی، ته نشینی مواد موجود در فاضلاب‌ها، نفوذ آب باران در زمین و غیره قابل مشاهده می‌باشد. شبیه‌سازی و حل این مسائل با روش‌های سنتی دینامیک سیالات محاسباتی بسیار دشوار و زمان‌بر می‌باشد. از این رو در سال‌های اخیر، دانشمندان به توسعه روش‌های جدید مخصوصا روش شبکه بولتزمن چندفازی، روی آورده‌اند؛ زیرا این روش از ویژگی‌های منحصربفردی مانند الگوریتم حل موازی، مدلسازی آسان هندسه‌های پیچیده مثل محیط متخلخل، اعمال ساده شرایط مرزی و مفاهیم و کدنویسی آسان برخوردار می‌باشد. دراین روش چندین مدل برای مدلسازی جریان‌های چندفازی ارائه شده‌است؛ یکی از پرکاربردترین این مدل‌ها روش پتانسیل کاذب می‌باشد که توسط شان و چن ارائه شد[۶]. در این مدل، یک برهم‌کنش غیرمحلی بین ذرات سیال در شبکه‌های همسایه با افزودن عبارت اضافی نیرو به میدان سرعت، اعمال می‌گردد. ضریب پتانسیل برهم‌کنش، معادله حالت سیال را کنترل می‌کند و جدایی فازها، با انتخاب ضریب مناسب برهم‌کنش اتفاق می‌افتد؛ این مدل، بدلیل سادگی و کاربرد آسان آن در هندسه‌های پیچیده مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌است. زنگ و همکاران از این مدل برای مدلسازی جریان تک جزیی دو فازی در محیط متخلخل استفاده نمودند[۷]. آن‌ها چند آزمون معمول مانند جدایی فازها،

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: nazari_me@yahoo.com
تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۲۴
تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۸/۱۱

آزمون‌های مربوط به محاسبه کشش سطحی و زاویه تماس، جریان داخل لوله و حرکت قطره در یک سیال را مدلساری نمودند؛ نتایج آن‌ها، با نتایج تئوری و یا آزمایشگاهی موجود مطابقت داشت. آن‌ها علاوه بر بررسی عملکرد روش شبکه بولتزمن در مدلسازی حرکت سیال در ماده متخلخل، تاثیر ترشوندگی سطح روی جابه‌جایی بخار توسط مایع در محیط متخلخل را، مطالعه نمودند. دانگ و همکاران نیز پدیده ویسکوز فینگرینگ[1] را، در جابه‌جایی دو سیال مخلوط نشدنی در محیط متخلخل به کمک همین مدل بررسی کردند[۸]؛ پدیده فینگرینگ وقتی رخ می‌دهد که لزجت دو سیال باهم متفاوت باشد و سیال با لزجت کمتر توسط سیال با لزجت بیشتر جابه‌جا شود. مطالعه آن‌ها فقط به حوزه رژیم ویسکوز فینگرینگ در جریان رانده شدن سیال اولیه توسط سیال ثانویه و محیط متخلخل منظم با موانع دایروی اختصاص دارد. آن‌ها ضریب راندمان جاروب کردن را برای بررسی راندمان جابه‌جایی سیال معرفی کردند؛ همچنین از اعداد بی‌بعد مثل عدد مویینگی، عدد بوند و نسبت لزجت بین دو سیال برای نمایش بهتر تاثیر نیروی کاپیلاری، نیروی لزجی و گرانش روی الگوی جریان و ضریب راندمان جاروب کردن استفاده کردند. بعلاوه، تاثیر ویژگی ترشوندگی سطح را بر روی الگوی جریان، مطالعه نمودند. آن‌ها جریان افقی با نسبت چگالی یک را مدلسازی نمودند. لیو و هم‌کاران از روش شبکه بولتزمن با نسبت چگالی بالا که توسط لی و لو پیشنهاد شده و مبتنی بر تئوری کان-هیلارد می‌باشد، برای مدلسازی جریان‌های چندفازی مخلوط نشدنی در ماده متخلخل استفاده کردند[۹]. آن‌ها برای نمایش توانایی و دقت این روش، مدلسازی‌های مختلف مانند محاسبه زاویه تماس، تزریق گاز ترشونده داخل لوله‌های موازی مویین و در نهایت جابه‌جایی گاز توسط جریان سیال در محیط متخلخل را انجام دادند. آن‌ها تاثیر عدد مویینگی، نسبت لزجت، ترشوندگی سطح و عدد بوند، را در جریان افقی گذارا از محیط متخلخل بررسی نمودند؛ در مدلسازی آن‌ها محیط متخلخل متشکل از موانع مربعی با چیدمان منظم می‌باشد. آن‌ها سه رژیم مختلف جابه‌جایی به‌نام‌های جابه‌جایی پایدار، ویسکوز فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ را مشاهده نمودند. تقیلو و رحیمیان جریان دو فازی در یک محیط متخلخل را با استفاده از روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. آن‌ها ابتدا نفوذ قطره در محیط متخلخل را با استفاده از مدل شان و چن مدلسازی کردند[۵]؛ در این مدلسازی، نسبت چگالی و لزجت برابر یک در نظر گرفته-شده‌است. آن‌ها با توجه به محدودیت روش شان و چن در کنترل مستقل کشش سطحی، فقط تاثیر نسبت تخلخل و زاویه تماس بین مایع و گاز و سطح جامد را بر میزان نفوذ قطره در داخل محیط متخلخل بررسی نمودند(فقط درحالت سطوح تر شونده)، ؛ در مطالعه آن‌ها به رژیم‌های نفوذ و تغییر مسیر نفوذ پرداخته نشده‌است. آن‌ها کار خود را توسعه دادند و با استفاده از روش لی که مبتنی بر تئوری کان- هیلارد است، توانستند نسبت چگالی را افزایش دهند [۱۰] و تاثیر اعداد بی‌بعد رینولدز، فرود و وبر و نسبت چگالی را نیز بر روی آهنگ نفوذ بررسی نمودند.

با توجه به این‌که تا به‌حال به محیط متخلخل لایه‌ای، رژیم‌های نفوذ در محیط متخلخل لایه‌ای و تغییر مسیر نفوذ قطره و فیلم مایع در محیط متخلخل تصادفی پرداخته نشده‌است؛ دراین مقاله، به کمک روش شبکه بولتزمن، نفوذ قطره و فیلم مایع در محیط متخلخل لایه‌ای مدلسازی شده‌است. محیط متخلخل لایه‌ای ایجاد شده از توزیع تصادفی موانع جامد بدست آمده‌است که می‌تواند هر تخلخل دلخواهی را در هر لایه و در کل ناحیه متخلخل اختیار نماید. از ویژگی‌های منحصر بفرد این مطالعه تولید محیط متخلخل به صورت لایه‌ای و با خاصیت ترشوندگی مختلف است. نتایج حاصل از این مدلسازی‌ها، در تخلخل‌ها و با ترشوندگی‌های متفاوت و در شرایط اولیه مختلف آورده شده‌است. الگوی نفوذ داخل محیط متخلخل یعنی رژیم‌های ویسکوز فینگرینگ و کاپیلاری فینگرینگ نیز مورد بحث قرار گرفته و مقایسه شده‌اند. چگونگی تغییر مسیر نفوذ سیال داخل محیط متخلخل نیز بررسی شده‌است.

۲- روش شبکه بولتزمن چند جزیی چندفازی

در این مدل برای هر جز، تابع توزیع مجزایی مشابه رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$f_\alpha^\sigma(x+\Delta x, t+\Delta t) - f_\alpha^\sigma = -\frac{1}{\tau_\sigma}\left[f_\alpha^\sigma(x,t) - f_\alpha^{\sigma(eq)}(x,t)\right] \quad (۱)$$

در رابطه (۱) تابع توزیع جز σام در جهت α می‌باشد. مقادیر σ به تعداد اجزا بستگی دارد؛ مثلا برای سیالات دو جزیی مقادیر یک و دو را اختیار می-کند. τ_σ زمان آرامش منفرد جز σام می‌باشد که توسط رابطه $\nu_\sigma = \left(\tau_\sigma - \frac{1}{2}\right)/3$ به لزجت سینماتیکی مرتبط می‌شود. تابع توزیع تعادلی $f_\alpha^{\sigma(eq)}$ از رابطه (۲) مشابه حالت تک جزیی بدست می‌آید، با این تفاوت که سرعت بکار رفته در این رابطه سرعت تعادلی است، که توسط ممنتوم که با نیروهای کل اعمال شده بر جز σام در محاسبات شرکت کرده‌است، جابه‌جا شده است و به همین دلیل به‌این روش، روش انتقال سرعت[2] می‌گویند رابطه (۲):

$$f_\alpha^{\sigma(eq)} = \rho_\sigma w_\alpha\left[1 + \frac{3}{c^2}(\vec{e}_\alpha.\vec{u}_\sigma^{eq}) + \frac{9}{2c^2}(\vec{e}_\alpha.\vec{u}_\sigma^{eq})^2 - \frac{3}{2c^2}\left|\vec{u}_\sigma^{eq}\right|^2\right] \quad (۲)$$

$$\vec{u}_\sigma^{eq} = \vec{u}' + \frac{\tau_\sigma \vec{F}_\sigma}{\rho_\sigma}$$

w_α، ضرایب وزنی و $\vec{e}_\alpha$، سرعت‌های میکروسکوپی می‌باشند که در روابط (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند و ρ_σ چگالی جزσ ام است که توسط رابطه $\rho_\sigma = \sum_\alpha^s f_\alpha^\sigma$ محاسبه می‌شود.

$$w_\alpha = \begin{Bmatrix} \frac{4}{9} & \alpha = 0 \\ \frac{1}{9} & \alpha = 1,2,3,4 \\ \frac{1}{36} & \alpha = 5,6,7,8 \end{Bmatrix} \quad (۳)$$

$$\vec{e}_\alpha = \begin{Bmatrix} (0,0) & \alpha = 0 \\ [\cos[(\alpha-1)\pi/2], \sin[(\alpha-1)\pi/2]c & \alpha = 1,2,3,4 \\ \sin[(\alpha-5)\pi/2 + \pi/4]c & \alpha = 5,6,7,8 \end{Bmatrix} \quad (۴)$$

سرعت $\vec{u}'$ بصورت رابطه(۵) تعریف می‌شود.

$$\vec{u}' = \left.\sum_{\sigma=1}^s \frac{\rho_\sigma \vec{u}_\sigma}{\tau_\sigma}\right/ \sum_{\sigma=1}^s \frac{\rho_\sigma}{\tau_\sigma} \quad (۵)$$

$\vec{F}_\sigma$ کل نیروهای وارد شده بر جز σام می‌باشد، که توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\vec{F}_\sigma = \vec{F}_{f,\sigma} + \vec{F}_{s,\sigma} + \vec{F}_{body,\sigma} \quad (۶)$$

در رابطه (۶) $\vec{F}_{f,\sigma}$ نیروی مربوط به اندرکنش داخلی دو سیال، $\vec{F}_{s,\sigma}$ نیروی بین سیال و جامد و $\vec{F}_{body,\sigma}$ نیروهای حجمی مثل نیروی گرانش می‌باشد.

1 Viscous fingering

2 Shifting velocity Method

تعامل غیرمحلی بین سیالات با تعریف پتانسیل تعامل و از طریق رابطه (۷) لحاظ می‌شود [۸]؛

$$v(x,x') = G_{\sigma\bar{\sigma}}(x,x')\psi_\sigma(x)\psi_{\bar{\sigma}}(x') \quad (۷)$$

که $x' = x + \vec{e}_\alpha \Delta t$ نشان‌دهنده همسایگی مکان x در جهت α ام می‌باشد؛ $G_{\sigma\bar{\sigma}}(x,x')$ تابع گرین است که $G_{\sigma\bar{\sigma}}(x,x') = G_{\sigma\bar{\sigma}}(x',x)$ می‌باشد. $\psi_\sigma(x)$ چگالی موثر جز σ ام است که بصورت تابعی از چگالی محلی ذرات تعریف می‌شود. شکل‌های مختلف چگالی موثر، منجر به معادلات حالت مختلف می‌گردد. با جمع زدن نیروها در تمام جهات و بین همه اجزا، نیروی بین سیالات به شکل رابطه (۸) استخراج می‌شود.

$$F_f^\sigma(x) = -\psi_\sigma(x)\sum_{x'}\sum_{\bar{\sigma}=1}^{s} G_{\sigma\bar{\sigma}}(x,x')\psi_{\bar{\sigma}}(x')\,(x'-x) \quad (۸)$$

که با در نظر گرفتن تنها برهم‌کنش‌های همگن ایزوتروپیک بین نزدیک‌ترین همسایگی‌ها تابع $G_{\sigma\bar{\sigma}}(x,x')$ به‌صورت ماتریس متقارن طبق رابطه (۹) درخواهد آمد؛

$$G_{\sigma\bar{\sigma}}(x,x') = \begin{cases} 0, & |x'-x| > c' \\ G_{\sigma\bar{\sigma}} & |x'-x| \le c' \end{cases} \quad (۹)$$

c' طول یک واحد شبکه می‌باشد که این‌جا برابر یک در نظرگرفته شده است. مقادیر $G_{\sigma\bar{\sigma}}$ برای جهات مختلف در منابع مقادیر متفاوتی ذکر شده‌است. سوکاپ و تورن، مقدار $G_{\sigma\bar{\sigma}}$ را برای تمام جهات یکسان بکار برده‌اند ولی در عوض از ضرایب وزنی برای جهات مختلف استفاده کرده‌اند. رابطه (۱۰)، رابطه ارائه شده توسط سوکاپ و تورن می‌باشد[۱۱].

$$\vec{F}_f^\sigma(x) = -G\psi_\sigma(\vec{x},t)\sum_{\alpha=1}^{8} w_\alpha\,\psi_{\bar{\sigma}}(\vec{x}+\vec{e}_\alpha\delta t,t)\vec{e}_\alpha \quad (۱۰)$$

البته شکل‌های مختلفی برای نمایش این نیرو وجود دارد که همه مشابه‌اند، فقط ممکن است تعابیر و ضرایب عوض شوند. مقدار G قدرت برهم‌کنش بین اجزای سیال را کنترل می‌کند. با تغییر Gکشش سطحی بین سیالات کنترل می‌شود.نیروی بین سطح جامد و ذرات سیال مانند حالت قبل برای هر جز بصورت معادله (۱۱) محاسبه می‌شود؛

$$\vec{F}_s(\vec{x},t) = -G_{ads}\psi(\vec{x},t)\sum_{\alpha=1}^{8} w_\alpha\, S(\vec{x}+\vec{e}_\alpha\delta t,t)\vec{e}_\alpha\delta t \quad (۱۱)$$

البته این شکل رایج نیرو است. اما در کار حاضر بدلیل مدلسازی سطوح با خصوصیات آبدوستی و آبگریزی متفاوت که به G_{ads} های مختلف می‌انجامد، از رابطه(۱۲) استفاده شده‌است:

$$\vec{F}_s(\vec{x},t) = -\psi(\vec{x},t)\sum_{\alpha=1}^{8} w_\alpha\, G_{ads}(\vec{x}+\vec{e}_\alpha\delta t,t)S(\vec{x}+\vec{e}_\alpha\delta t,t)\vec{e}_\alpha\delta t \quad (۱۲)$$

نیروی گرانش نیز در صورت لزوم، به شکل معادله (۱۳) اعمال می‌شود[۱۲]؛

$$\vec{F}_g = \rho_\sigma \vec{g} \quad (۱۳)$$

برای مدل D2Q9، فشار مخلوط سیال از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود [۸]؛

$$p(x) = c_s^2\sum_\sigma \psi_\sigma(x) + \frac{3}{2}\sum_{\sigma\bar{\sigma}} G\psi_\sigma(x)\psi_{\bar{\sigma}}(x) \quad (۱۴)$$

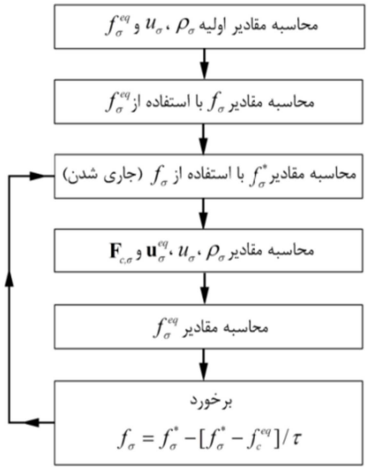
در مدلسازی‌های برای چگالی موثر فاز مایع از معادله حالت شان- چن بصورت رابطه (۱۵) استفاده شده است و فاز گازی به حالت ایده‌آل در نظر گرفته شده است.

$$\psi = \rho_0\left(1-\exp\left(-\frac{\rho}{\rho_0}\right)\right) \quad (۱۵)$$

ρ_0، چگالی اولیه می‌باشد؛ که در این مطالعه یک در نظر گرفته شده است. سرعت مخلوط سیال از رابطه (۱۶) بدست می‌آید؛

$$\vec{u} = \sum_\sigma \rho_\sigma \vec{u}_\sigma/\rho + \sum_\sigma \vec{F}_\sigma/(2\rho) \quad (۱۶)$$

که ρ، مجموع چگالی اجزا در هر گره می‌باشد. در همه شبیه‌سازی‌های زمان آرامش $\tau_1 = \tau_2 = 1$ و چگالی‌ها $\rho_1 = 1$ و $\rho_2 = 0.25$ در نظرگرفته شده است.برای این شرایط، مقدار ضریب برهم‌کنش بین اجزای جز مایع $G_{11} = -3.62$ و ضریب برهم‌کنش بین دو فاز $G_{12} = 5$ می‌باشد؛ در صورت تغییر، مقادیرجدید ذکر می‌گردند. در ادامه مراحل شبیه‌سازی و حل عددی جریان دوفازی به کمک مدل شان و چن دو جزئی به‌صورت طرحواره در شکل نمایش داده شده‌است.

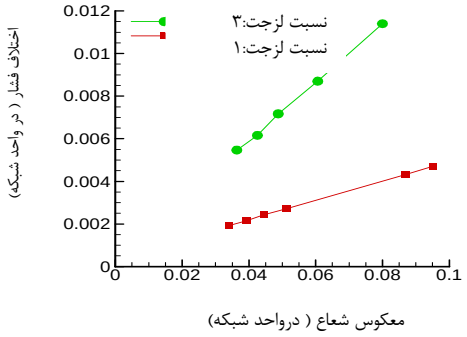


شکل ۱- طرحواره شبیه‌سازی جریان به کمک مدل شان و چن دو جزئی

۳- آزمون لاپلاس

برای محاسبه کشش سطحی در روش شان وچن نیاز به انجام آزمون لاپلاس می‌باشد. البته این آزمون بخودی خود برای اعتبارسنجی کد نیز بکار می‌رود؛ در واقع انجام این آزمون که منجر به محاسبه کشش سطحی می‌شود بر درستی کد، نیز صحه می‌گذارد. هیچ نیروی خارجی مثل نیروی گرانش نیز اعمال نمی‌شود و شرایط مرزی، تناوبی می‌باشند. در ناحیه با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰، قطرات با اندازه‌های مربعی مختلف در مرکز شبکه گذاشته می‌شوند و بعد از چند هزار تکرار، قطرات دایروی پایدار ایجاد می‌شوند. اختلاف فشار داخل و خارج قطره در نقاطی دور از ضخامت بین دو فاز و شعاع قطره نیز در حالت پایدار، در واحد شبکه اندازه‌گیری می‌شوند.

شکل ۲- رابطه بین اختلاف فشار و معکوس شعاع را برای در نسبت لزجت‌های مختلف نشان می‌دهد.

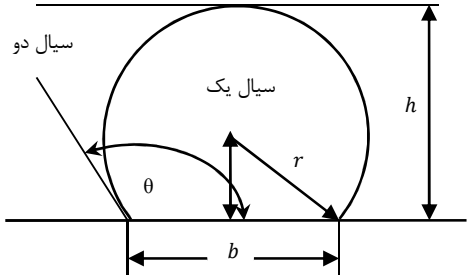


شکل ۲- آزمون لاپلاس جهت محاسبه کشش سطحی در دو نسبت لزجت

مقدار کشش سطحی در نسبت لزجت یک، ۰/۰۴۵ و در نسبت لزجت سه، ۰/۱۳۵ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت لزجت کشش سطحی افزایش می‌یابد.

۴- محاسبه زاویه تماس

هنگامی‌که یک قطره انحلال ناپذیردر تماس با یک جامد قرار می‌گیرد، آنگاه میان سیال ترکننده[1] و سیال ترنشونده[2]و سطح جامد خط تماسی ایجاد می‌شود(شکل ۳).



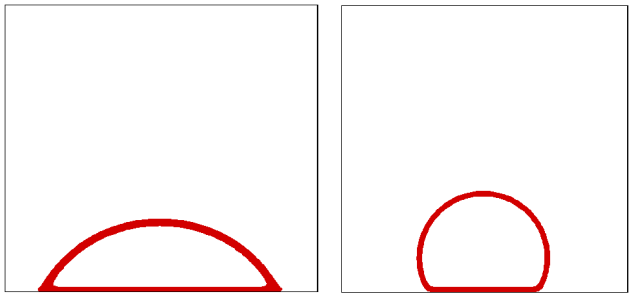
شکل ۳- طرحواره زاویه تماس بین مایع و سطح جامد

ترشوندگی یک سطح نسبت به سیال و به اصلاح آبدوست یا آبگریز بودن سطح ، بستگی به زاویه تماس θ دارد. برای زاویه کم‌تر از $^{\circ}$۹۰ ، سیال تمایل به خیس کردن سطح را دارد، پس سطح ترشونده وآبدوست می‌باشد و برای زاویه بزرگ‌تر از $^{\circ}$۹۰، سیال به شکل فشرده درمی‌آید، بنابراین سطح ترنشونده و آبگریز است. برای محاسبه زاویه تماس، قطره با قطر۲۰ واحد در داخل میدان محاسباتی به ابعاد۱۰۰ ×۱۰۰ بصورت مماس بر دیواره پایینی قرار داده می‌شود. با در نظر گرفتن مقدار معینی برای G_{ads}، که قدرت برهم-کنش بین سطح جامد وسیال را کنترل می‌کند، و بعد از ۲۰۰۰۰ مرحله که میدان به حالت پایا درآمد، مقدار زاویه تماس محاسبه خواهد شد. به‌منظور تعیین رابطه بین ضریب برهم‌کنش سیال-جامد و زاویه تماس، یک سری قطره مورد آزمون قرار گرفته‌اند. شرایط مرزی دیواره بالا و پایین شرط بازگشت به عقب کامل و شرط مرزی دیواره‌های جانبی شرط مرزی تناوبی می‌باشد. زاویه تماس θ به کمک پارامترهای هندسی شکل‌های حاصل و با استفاده از معادله (۱۷) قابل محاسبه خواهد بود، کهh ارتفاع قطره و b طول پخش شده قطره روی سطح می‌باشد.

$$\theta = \pi - \arctan\left[\frac{b}{2(r-h)}\right] \qquad (۱۷)$$

در این رابطه مقدار$r = h/2 + b^2/8h$ خواهد بود. باید توجه داشت در این مساله به دلیل وجود ضخامتی در حد چند واحد در فصل مشترک دو فاز، تعیین فصل مشترک اهمیت ویژه‌ای دارد. در مطالعه حاضر موقعیت فصل مشترک محلی قرارداده می‌شود که چگالی قطره بزرگتر از نصف چگالی اولیه باشد.

مقادیر ضرایب برهم‌کنش بین اجزا و سطح جامد بصورت$G_{ads,1}$= $G_{ads,2}$- در نظرگرفته شده است. با تغییر مقادیر G_{ads}، زوایای مختلف بدست خواهند آمد. شکل نتایج تماس با سطح جامد را نشان می‌دهد. زمان آرامش$\tau_1 = \tau_2 = 1$ و چگالی‌ها $\rho_1 = 1$ و $\rho_2 = 0.25$ در نظرگرفته شده است.



شکل ۳-زاویه تماس الف) $^{\circ}$۱۲۰ ب) $^{\circ}$۶۰

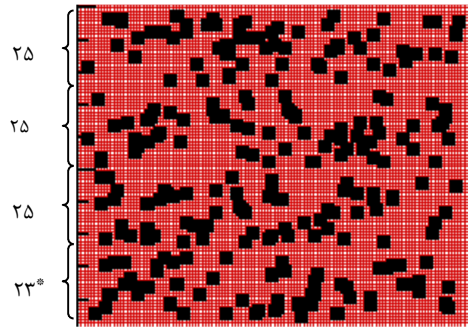
۵- برخورد با محیط متخلخل

مهمترین پارمتر هندسی برای محیط‌های متخلخل، نسبت تخلخل یا تخلخل است که بصورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود؛

$$\varepsilon = \frac{V_{pores}}{V_{total}} \qquad (۱۸)$$

که V_{pores} حجم حفره‌ها و V_{total}، حجم کل محیط متخلخل می‌باشد؛ در کدنویسی برای حالت دو بعدی بصورت نسبت تعداد گره‌های داخل سیال به تعداد کل گره‌های موجود در ناحیه متخلخل در نظرگرفته شده است. در شکل ۵ نمونه‌ای از محیط متخلخل لایه‌ای ایجاد شده با کد نوشته شده نمایش داده شده است. البته با توجه به توزیع تصادفی موانع جامد در ناحیه متخلخل، برای هر تخلخل می‌توانیم چند ساختار مختلف داشته‌باشیم که یکی از اهداف این مقاله بررسی تاثیر همین چیدمان‌های مختلف می‌باشد. برای بررسی نفوذ قطره در داخل محیط متخلخل، ابتدا قطره‌ای با قطر اولیه d_o را بصورت مماس بر سطح محیط متخلخل که بوسیله فاز دیگر پر شده است، قرار می‌دهیم و به طور مشابه برای بررسی نفوذ لایه‌ای از سیال، فیلمی ازسیال به ارتفاع مشخص را مماس بر سطح محیط متخلخل می‌گذاریم.

بعد از گذشت چند هزار تکرار و رسیدن به پایداری، قطره یا لایه سیال با سرعت اولیه u_o و با وجود نیروی گرانش رها می‌شود. اطراف ناحیه محاسباتی بصورت دیواره در نظرگرفته شده است و از شرط مرزی بازگشت به عقب کامل در کلیه سطوح جامد استفاده شده است.



شکل ۵- نمونه‌ای از محیط متخلخل لایه‌ای. (نسبت تخلخل در هر لایه و درکل ناحیه ۰/۸می‌باشد.)

1 Wetting
2 Non Wetting

۶- نتایج مدلسازی و بحث و بررسی

در مطالعه حاضر، با توجه به بررسی دقیق ادبیات موضوع و نیاز به بررسی دقیق رژیم نفوذ سیال در ماده متخلخل، هدف اصلی، بررسی رژیم نفوذ در ماده متخلخل در چند عدد مویینگی و نسبت لزجت مختلف می‌باشد؛ همچنین تاثیر تخلخل و آبدوستی یا آبگریزی سطوح بر روی سرعت نفوذ و الگوی نفوذ در محیط متخلخل را مورد بررسی قرار گرفته‌است و راهکارهایی برای افزایش سرعت نفوذ و پیمایش فیلم مایع در مسیرهای مشخص داخل محیط متخلخل لایه‌ای ارائه شده‌است.

عدد مویینگی، با رابطه $\mathrm{Ca} = \rho_1 u_o \nu_1 / \sigma$، نشان داده می‌شود که u_o، ν_1، ρ_1 و σ بترتیب سرعت اولیه، لزجت سیال نفوذکننده، چگالی سیال نفوذکننده و کشش سطحی می‌باشند. زمان بی‌بعد نیز بصورت $t^* = Tu_0/d_0$ تعریف شده‌است که T تعداد مراحل زمانی می‌باشد.

۶-۱- نفوذ سیال در حفرات ساده یک بستر متخلخل

نفوذ در داخل ماده متخلخل در واقع نفوذ سیال در داخل حفرات است و بنابراین شکل دقیق نفوذ در حفرات در مقیاس حفره اهمیت دارد و کمتر نیز به آن پرداخته شده به همین منظور ابتدا چند آزمون ساده و کاربردی انجام شده است؛ که ضمن آسان نمودن درک مفاهیم مربوط به نفوذ در ماده متخلخل، با توجه به شکل نفوذ بر درستی کد نیز صحه می‌گذارند.

در این آزمون‌ها، نفوذ سیال به داخل لوله‌های مویین را مورد بررسی قرار می‌دهیم که شباهت بسیاری به نفوذ سیال داخل باریکه‌های ایجاد شده در محیط متخلخل دارد. در آزمون اول، که در شکل نمایش داده شده‌است، لایه-ای از سیال که در ابتدا ساکن است، تحت اثر گرانش با سرعت اولیه $u_0 = 0.1$ $lu.ts^{-1}$ در یک لوله مویین نفوذ می‌کند.

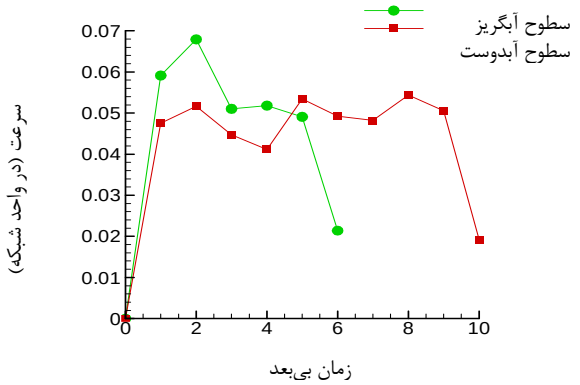
برای محاسبه فشار مویینگی رابطه (۱۹) در مراجع ارائه شده است، که وابستگی فشار مویینگی به زاویه تماس سطح و سیال، ابعاد باریکه‌ها[1] و کشش سطحی، θ، d_{pore}، σ را نشان می‌دهد[۱۳, ۱۴].

$$p_c = -4\frac{\sigma\cos(\theta)}{d_{pore}} \qquad (۱۹)$$

هنگامی‌که زاویه تماس کوچکتر از ۹۰° می‌باشد، مقدار فشار مویینگی منفی خواهد شد که به تزریق سیال در داخل لوله کمک می‌کند؛ در واقع، این امر موجب اختلاف فشاری بین دو فاز داخل لوله می‌شود که مقدار این اختلاف فشار در این حالت مقداری مثبت می‌باشد؛ یعنی فشار سیال اولیه داخل لوله بیشتر از سیال نفوذ کننده است و تعقر سطح مشترک دو فاز به سمت پایین خواهد بود. به‌همین دلیل در این حالت به سطح، آبدوست یا ترشونده می‌گویند(شکل ۶-الف) از طرف دیگر اگر زاویه تماس بیش از ۹۰° باشد، فشار مویینگی مثبت خواهد بود که این امر در برابر نفوذ سیال داخل لوله مقاومت خواهد کرد و نفوذ کندتر اتفاق می‌افتد؛ اختلاف فشار بین دو فاز در این حالت مقداری منفی می‌باشد، یعنی فشار سیال نفوذ کننده بیشتر از سیال اولیه داخل لوله است و شکل سطح مشترک دو فاز محدب خواهد بود.در این حالت به سطح آبگریز یا ترشونده می‌گویند(شکل۶-ب)

در داخل محیط متخلخل نیز شاهد چنین رفتاری در انحنای سطح سیال نفوذ کننده هستیم که در قسمت های بعد مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۶ میزان پیش‌روی سیال داخل لوله مویین در هر دو زاویه تماس را، نیز نشان می‌دهد؛ در یک گام زمانی یکسان میزان پیش‌روی سیال در زاویه ۳۰° یا حالت آبدوست بسیار بیشتر است. نمودار مربوط به سرعت نفوذ داخل لوله مویین با در نظرگرفتن سرعت نقطه مرکزی در فصل مشترک بین دو فاز در شکل ۷ نیز نمایش داده شده‌است. این نمودار در واقع سرعت سیال در مدت پیش‌روی در لوله را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، سرعت سیال در ابتدای نفوذ برای هردو حالت افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن به انتهای لوله از سرعت کاسته می‌شود و سرعت سیال در مدت نفوذ، در زاویه ۳۰° غالبا بیشتر از سرعت نفوذ در زاویه ۱۰۲° می‌باشد و سریعتر به انتهای میله می‌رسد. البته آزمایش عددی تا قبل از رسیدن سیال نفوذ کننده به انتها معتبر است.

شکل۶-نفوذ سیال داخل لوله مویین الف) زاویه تماس ۳۰° ب) زاویه تماس ۱۰۲°(ابعاد ناحیه محاسباتی ۸۰×۲۰۰ می‌باشد و هر دو در یک گام زمانی می‌باشند.)



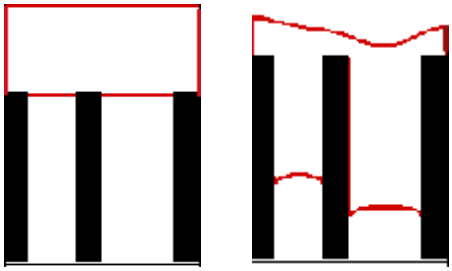
شکل ۷-نمودار سرعت نفوذ داخل لوله مویین برای سطوح آبدوست و آبگریز

در آزمون دوم، نفوذ لایه سیال را در دو لوله مویین با قطرهای متفاوت بررسی می‌کنیم. ابعاد ناحیه محاسباتی ۸۰ ×۲۰۰، قطر لوله سمت چپ ۲۰ و قطر لوله سمت راست ۳۰ واحد شبکه و زاویه تماس۳۰ درجه در نظر گرفته شده‌اند؛ کشش سطحی نیز از آزمون لاپلاس ۰/۰۴۵ بدست آمده‌است. بدین ترتیب طبق رابطه (۲۰) فشار مویینگی لوله سمت راست، کمتر از لوله سمت چپ می‌باشد؛ در نتیجه سیال در لوله سمت راست سریعتر نفوذ می‌کند(). در دو آزمون فوق، شرایط مرزی بالا و پایین شرط مرزی تناوبی و دیوارهای جانبی، جامد در نظرگرفته شده‌اند.

$$p_{c,l} = -4\frac{0.045 * cos(30)}{20} > p_{c,r} = -4\frac{0.045 * cos(30)}{30} \qquad (۲۰)$$

* ابعاد در واحد شبکه می‌باشند.

1 Capillaries



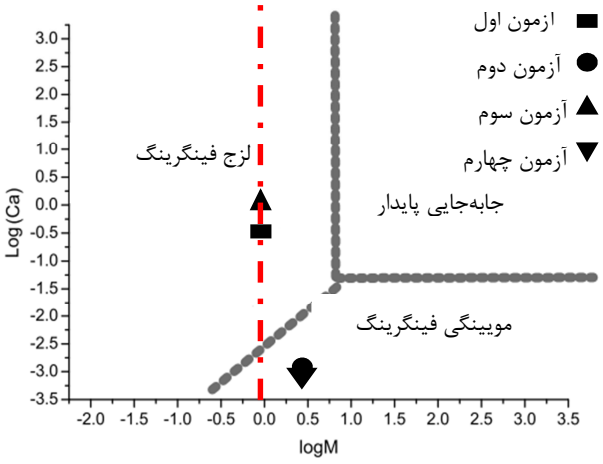
شکل ۸- نفوذ سیال داخل دو لوله مویین با قطرهای متفاوت

۶-۲- بررسی رژیم نفوذ

لنورمند و همکاران آزمایش تجربی جابجایی یک سیال توسط سیال دوم برای چندین جفت مایع انجام دادند و آن‌ها سه رژیم مختلف به نام‌های جابه‌جایی پایدار[1]، ویسکوز فینگرینگ وکاپیلاری فینگرینگ[2] را شناسایی کردند که روی نمودارفازی logCa_log$M$، قابل رسم‌است که M نسبت لزجت می‌باشد[۱۵]. سه ناحیه توسط لنورمند و همکارانش ارائه شده و موقعیت مرزهای هر ناحیه بر مبنای تعادل بین نیروهای ویسکوز و کاپیلاری بدست آمده است. در این مطالعه، از نمودار فازی ارائه شده توسط لنورمند در شکل استفاده شده است. البته در کار ایشان و مطالعات مشابه جریانی از یک سیال در داخل ماده متخلخل به کمک اختلاف فشار بین ورودی و خروجی و با یک سرعت اولیه تزریق می‌شود و سیال دوم را که در ابتدا در کل ناحیه متخلخل قرار دارد را از ماده متخلخل به بیرون می‌راند. در مقاله حاضر، پدیده نفوذ در یک ماده متخلخل لایه‌ای با چیدمان نامنظم (و با لایه های مختلف از نظر تخلخل و آبدوستی) تحت تاثیر نیروی گرانش و با سرعت اولیه مشخص بررسی شده‌است و رژیم‌های ویسکوز فینگرینگ وکاپیلاری فینگرینگ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برای این کار چهار آزمون انجام گرفته است. در چهار آزمون مقادیر چگالی‌ها، ρ_1=1 و ρ_2=0.25 ابعاد ناحیه محاسباتی ۱۶۰×۲۳۰، ابعاد ناحیه متخلخل ۱۱۸×۲۳۰ می‌باشد. در دو آزمون اول، نفوذ قطره به قطر اولیه ۴۰ واحد شبکه در محیط متخلخل با نسبت تخلخل ۰/۹۶ مدلسازی شده‌است. برای نمایش بهتر تفاوت دو رژیم، بجای استفاده از قطره، فیلم مایع نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. در دو آزمون آخر، نفوذ فیلم مایع با ارتفاع ۴۰ واحد شبکه در محیط متخلخل با نسبت تخلخل ۰/۹۳ مدلسازی شده‌اند. اطلاعات لازم مربوط به چهارآزمون در جدول ۱ آورده شده است.

تفاوت دیگر این مطالعه با مطالعات قبلی (علاوه بر اثر لایه‌ها، حفرات و آبدوستی سطوح)، وجود نیروی گرانش می‌باشد؛ در واقع قطره یا فیلم مایع تحت تاثیر نیروی گرانش و سرعت اولیه در ماده متخلخل نفوذ می‌کند. این مورد در نفوذ آب باران به خاک (با لایه های متفاوت) نیز دیده می شود. از آنجا که در دیاگرام فازی فقط اثر عدد مویینگی و نسبت لزجت لحاظ شده است، در هر دو آزمون مشابه هم، اثر نیروی گرانش را یکسان درنظر گرفته شده‌است. در این مطالعه، برای درنظر گرفتن اثر گرانش، از عدد بی‌بعد بوند، که بصورت $\mathrm{Bo} = \Delta\rho g a^2/\sigma$ تعریف شده است و a شعاع متوسط حفره‌ها می‌باشد، استفاده شده است و در هر دو آزمون مشابه این عدد یکسان درنظر گرفته شده‌است. نکته قابل ذکر دیگر، انجام مدلسازی‌ها در زاویه تماس ۹۰° است؛ بعبارتی دیگر سطوح از نظر آبدوستی و آبگریزی خنثی می‌باشند. در شکل ۹ و شکل ۱۰ الگوهای نفوذ چهار آزمون نمایش داده شده‌اند.

1Stable displacement
2Capillary fingering

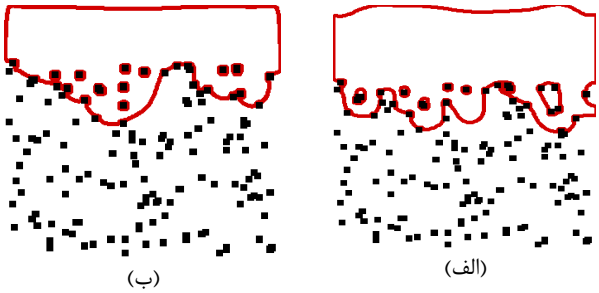


شکل ۹- نمودار فازی با عدد مویینگی و نسبت لزجت مختلف(خط‌های ضخیم خاکستری سه ناحیه را از هم جدا می‌کند و خط چین قرمز نسبت لزجت یک را نشان می‌دهد.)

جدول ۱- اطلاعات مربوط به دو آزمون با عدد مویینگی و نسبت لزجت متفاوت

آزمون	τ_1	τ_2	u_0 (در واحد شبکه)	M	Ca	logM	logCa
اول	۱	۱	۰/۱	۱	۰/۳۷	۰	-۰/۴۳
دوم	۲	۱	۰/۰۰۰۳	۳	۰/۰۰۱	۰/۴۸	-۲/۹۵
سوم	۱	۱	۰.۳	۱	۱.۱۱	۰	۰/۰۴۶
چهارم	۲	۱	۰/۰۰۲	۳	۰/۰۰۰۷	۰/۴۸	-۳/۱۳

شکل ۱۰- کانتور الگوی نفوذ قطره داخل محیط متخلخل در نسبت تخلخل ۰/۹۶ الف) آزمون اول ب) آزمون دوم

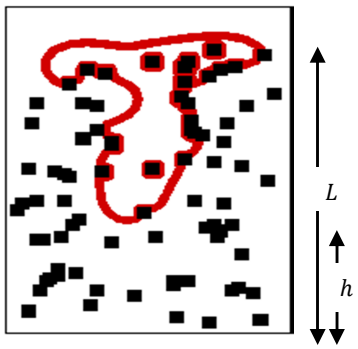


شکل ۱۱- کانتور الگوی نفوذ فیلم مایع داخل محیط متخلخل در نسبت تخلخل ۰/۹۳ الف) آزمون سوم ب) آزمون چهارم

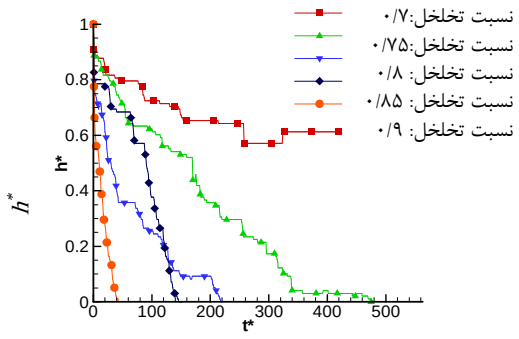
همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت لزج فینگرینگ (شکل ۱۱-الف) نفوذ به صورت انگشت-مانند پیشروی می‌کند و فقط از مسیرهای خاصی عبور می‌نماید و سیال نفوذکننده تعداد گرههای کمتری را در بر می‌گیرد. نتایج عددی این مقاله نشان می دهد که این رژیم جریان در نسبت لزجت‌های پایین‌تر از ده و رنج وسیعی از عدد مویینگی رخ می‌دهد. در حالت کاپیلاری فینگرینگ نفوذ بصورت یک جبهه منسجم پیشروی می‌کند و تعداد گره‌های بیشتری را در برمی‌گیرد؛ در واقع سیال تمام موجود در مسیری که از آن عبور می‌کند را پر می‌نماید(شکل ۱۱-الف و ب) البته در بعضی نواحی در طی نفوذ، فینگرهایی هم قابل مشاهده می‌باشد ولی با آزمایشات عددی مختلف به این نتیجه رسیدیم که فینگرهای ایجاد شده در این حالت بسیار ضخیم‌تر از حالت ویسکوز می‌باشند.

۶-۳- بررسی تاثیر نسبت تخلخل

برای بررسی تاثیر نسبت تخلخل بر روی سرعت نفوذ قطره داخل محیط متخلخل پنج تخلخل ۰/۹، ۰/۸۵، ۰/۸، ۰/۷۵ و ۰/۷ مورد بررسی قرار گرفته‌اند وبرای بررسی سرعت نفوذ در ماده متخلخل، از پارامتر h^* که نسبت عمق نفوذ (h) داخل محیط متخلخل در هر گام زمانی به ارتفاع کلی ماده متخلخل (L) می‌باشد و با رابطه $h^*=h/L$ نمایش داده می‌شود، استفاده شده‌است، طرحواره مربوط به آن در شکل ۱۲ نمایش داده شده‌است. نتایج در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. ابعاد ناحیه محاسباتی ۸۰ × ۲۰۰، قطر اولیه قطره ۲۰ واحد شبکه و زاویه تماس ۶۰ درجه می‌باشد. همانطورکه انتظار می‌رود و در شکل نشان داده شده‌است، با کاهش تخلخل قطره روی سطح پخش می‌شود و آهنگ نفوذ کاهش می‌یابد و با کاهش بیشتر تخلخل نفوذ کامل انجام نمی‌گیرد؛ البته با گذشت زمان طولانی‌تر، بدلیل اثرات مویینگی و گرانش سرانجام نفوذ کامل می‌شود. افزایش زمان انجام نفوذ با کاهش تخلخل نیز، بیانگر این مطلب است. سرعت متوسط مربوط به نفوذ در هر نسبت تخلخل بصورت کمی در جدول ۲ گزارش شده‌است (در واحد شبکه).



شکل ۱۲-نمایش پارامترهای تعریف شده (عمق نفوذ (h) داخل محیط متخلخل در هر گام زمانی و به ارتفاع کلی ماده متخلخل (L))



شکل ۱۳- آهنگ نفوذ h^* برحسب t^* در نسبت تخلخل‌های مختلف

جدول ۲- مقادیر سرعت متوسط نفوذ در هر نسبت تخلخل

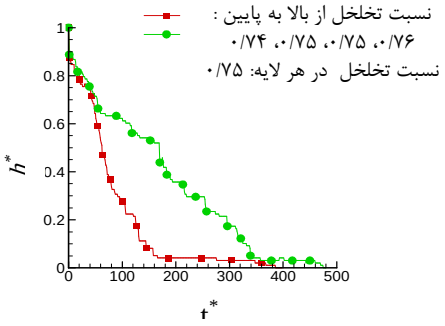
نسبت تخلخل	۰/۹	۰/۸۵	۰/۸	۰/۷۵	۰/۷
سرعت میانگین	۲/۲۷۹	۰/۶۷۱۲	۰/۴۴۹۵	۰/۲۰۶۳	۰/۰۹۱۱

کاهش نسبت تخلخل سرعت میانگین نفوذ به میزان چشمگیری کاهش یافته‌است. مثلا سرعت متوسط نفوذ در تخلخل ۰/۹، بترتیب ۳/۴، ۵، ۱۱ و ۲۵ برابر سرعت متوسط نفوذ در تخلخل‌های ۰/۸۵، ۰/۸، ۰/۷۵ و ۰/۷ می-باشد. همانطور که قبلا گفته شد، زمان آرامش $\tau_1=\tau_2=1$ و چگالی‌ها $\rho_1=1$ و $\rho_2=0.25$ در نظرگرفته شده است.

۶-۳-۱- کاهش زمان نفوذ در تخلخل‌های پایین

همانطور که در بالا اشاره شد و در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در نسبت تخلخل‌های پایین یا نفوذ بصورت کامل صورت نمی‌گیرد یا زمان نفوذ خیلی طولانی است و آهنگ نفوذ در زمان‌های مختلف بسیارکم است. در مطالعه حاضر،بدلیل تولید محیط متخلخل لایه‌ای امکان کاهش زمان نفوذ و افزایش آهنگ نفوذ وجود دارد. در این مقاله بعنوان نمونه برای نسبت تخلخل ۰/۷۵، بجای استفاده از چهار لایه با نسبت تخلخل یکسان ۰/۷۵ (با زمان نفوذ طولانی)، از چهار لایه با همان میانگین نسبت تخلخل ۰/۷۵ولی با مقادیر متفاوت ۰/۷۶، ۰/۷۵، ۰/۷۵ و ۰/۷۴ استفاده شده‌است.

در شکل ۱۴ آهنگ نفوذ برای دوچیدمان مختلف آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود آهنگ نفوذ در زمان‌های مختلف به طور چشمگیری افزایش یافته‌است؛ بطوریکه سرعت میانگین نفوذ حدود ۲/۵ برابر



شکل ۱۴- آهنگ نفوذ برای تخلخل ۰/۷۵ با چیدمان لایه‌های مختلف

افزایش یافته‌است (در حالیکه فقط تغییر اندکی در تخلخل لایه فوقانی داده شده است) ودر حالت کلی، زمان نفوذ نیز به میزان ۹۰ گام زمانی (بی

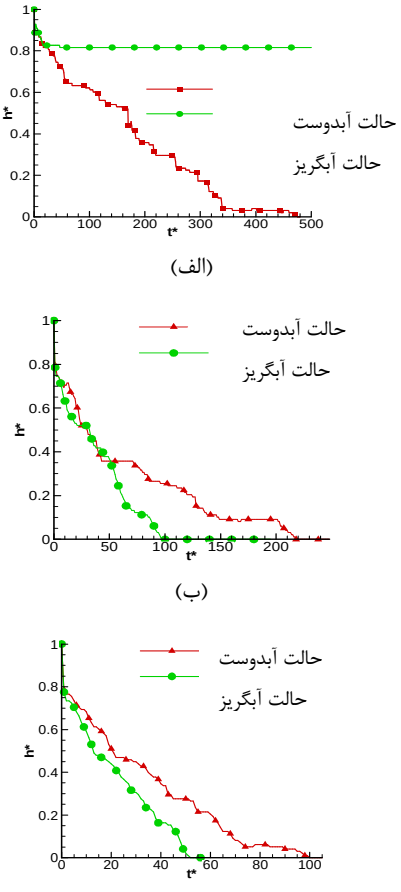
بعد) کاهش یافته‌است. علت این مورد تغییر سرعت سیال نفوذ کننده در لایه اول به دلیل تغییر اندازه حفرات و اثر چشمگیر آن روی نفوذ در لایه های دیگر است.

۶-۴- بررسی تاثیر ویژگی آبدوستی یا آبگریزی سطح

برای بررسی اثر خصوصیت آبدوست یا آبگریز بودن سطوح جامد روی آهنگ و الگوی نفوذ در ماده متخلخلیک بار همه گرههای جامد، آبدوست و یکبار آبگریز، برای دو شکل قطره و فیلم سیال نفوذکننده در محیط متخلخل، فرض می‌شوند.

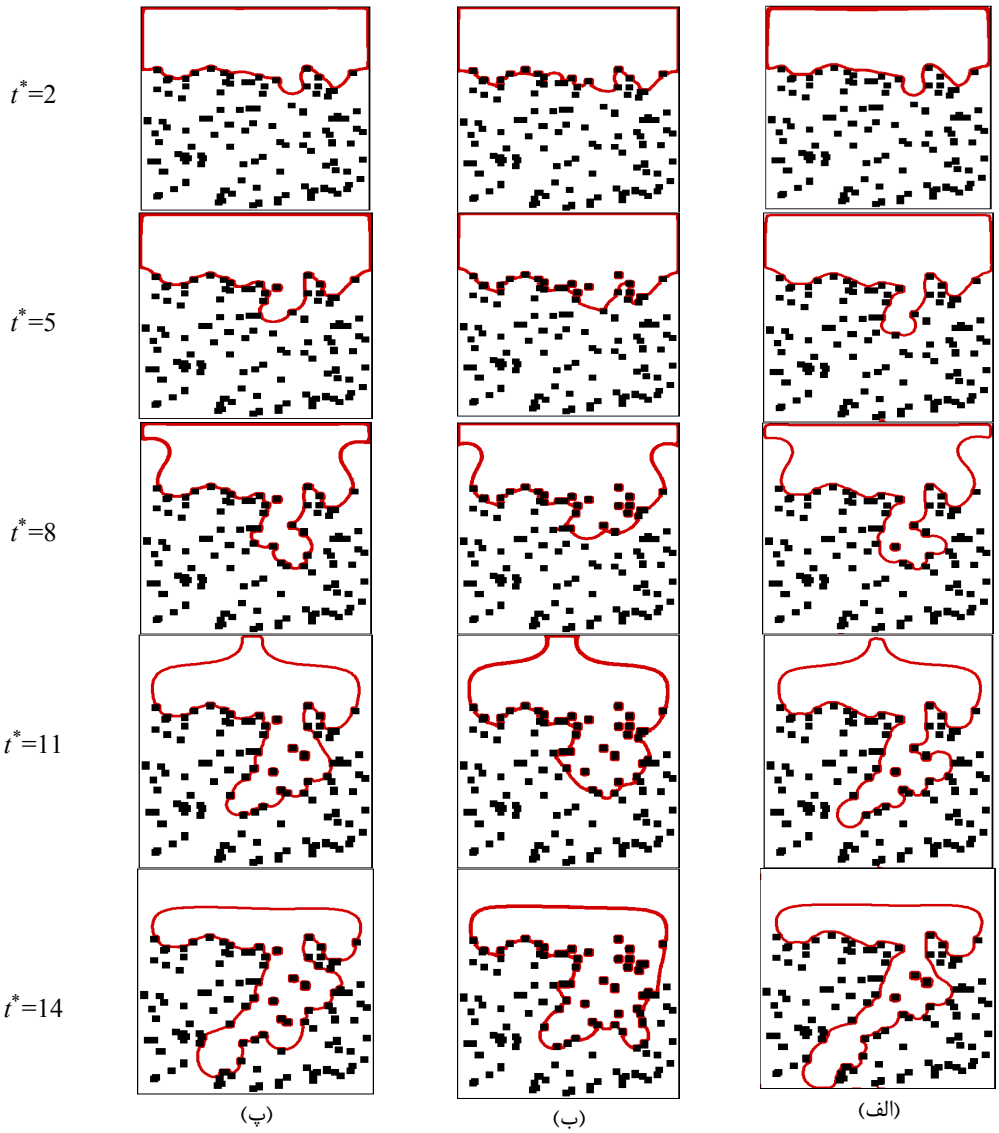
در شکل ۱۵ آهنگ نفوذ در سه تخلخل مختلف برای قطره نفوذ کننده داخل محیط متخلخل آورده شده‌است. ابعاد ناحیه محاسباتی ۸۰× ۲۰۰ و قطر اولیه قطره ۴۰ واحد شبکه می‌باشد. برخلاف نتایج حاصل در آزمون لوله مویین، سرعت نفوذ در حالت آبدوست به دلیل افزایش نیروی مقاوم سطح و نیروی چسبندگی بین سیال و سطح کمتر از حالت آبگریز می‌باشد (چنین موردی در لایه نفوذ پیل‌های سوختی نیز گزارش شده است)؛ همانطور که مشاهده می‌شود در تخلخل‌های بیشتر و با در نظر گرفتن کلیه گره‌های جامد بصورت آبگریز، آهنگ نفوذ بیشتر است و نفوذ سریعتر انجام می‌گیرد در حالی‌که با در نظرگرفتن تمام گره‌های جامد به صورت آبدوست به‌دلیل تمایل سیال به خیس کردن سطح، زمان بیشتری برای جدایش سیال از سطح صرف می‌شود و آهنگ نفوذ کاهش می‌یابد(شکل ۱۵-ب وپ). البته با کاهش تخلخل، نتایج به کلی تغییر می‌کنند؛ در حالت آبگریز اصلا نفوذ بصورت کامل انجام نمی‌گیرد و قطره روی سطح متخلخل پخش می‌شود. اما در حالت آبدوست، نیروی چسبندگی بین سیال و جامد به انجام نفوذ کمک می‌کنند و نفوذ با گذشت زمان (البته طولانی در مقایسه با سایر شکل ها) کامل می‌شود که قابل توجه است (شکل ۱۵- الف).

از آن‌جا که مدلسازی‌ها در زمان آرامش $\tau_1 = \tau_2 = 1$ و چگالی‌ها $\rho_1 = 1$ و $\rho_2 = 0.25$ در نظرگرفته شده است؛ با توجه به این‌که در شکل نسبت لزجت‌های پایین مثلا نسبت لزجت یک که مدلسازی‌های بعدی نیز در این نسبت انجام گرفته‌است، در رژیم لزج فینگرینگ قرار می‌گیرند(خط چین نازک غالبا داخل ناحیه مربوط به رژیم لزج فینگرینگ قراردارد) تمام مدلسازی‌ها در رژیم لزج فینگرینگ قرار خواهند گرفت که به بررسی چگونگی تغییر الگوی نفوذ در این رژیم خواهیم پرداخت؛ بعنوان نمونه در شکل ، الگوی نفوذ برای دو حالت آبدوست و آبگریز برای تخلخل ۰/۹، برای حالتی که سیال نفوذ کننده بصورت فیلم سیال مماس بر سطح محیط متخلخل باشد، ارائه شده است.



شکل ۱۵- آهنگ نفوذ h^* برحسب t^* الف) نسبت تخلخل ۰/۷۵ ب) نسبت تخلخل۰/۸ پ) نسبت تخلخل ۰/۸۵

همانطور که قبلا گفته شد رژیم جریان لزج فینگرینگ می‌باشد(در شکل ۱۶ خط چین مربوط به نسبت لزجت یک در ناحیه ویسکوینگ قرار دارد.) اما می‌توان با در نظر گرفتن تمام گره‌های جامد بصورت آبدوست این الگو را کمی تغییر داد؛ در حالت آبدوست، با توجه به تمایل سیال به خیس کردن - سطح، تعداد گره بیشتری خیس می‌شوند و نفوذ بصورت یک جبهه منسجم باصطلاح مانند یک پیستون (منسجم) پیشروی می‌کند، البته فینگرهایی با ضخامت زیاد نیز مشاهده می‌شود (شکل۱۶-ب). به همین دلیل می‌توان ادعا کرد رژیم نفوذ، به الگوی پیستون- مانند نزدیک شده است. اما در حالتی که تمام گره‌های جامد آبگریز باشند، سیال به‌گونه‌ای پیشروی می‌کند که از گره‌های کمتری بگذرد و فقط در تلاش است مانند یک انگشت (فینگر مانند)



شکل ۱۶- الگوی نفوذ برای تخلخل ۰/۹ الف) سطوح خنثی($\theta = 90^\circ$) ب) سطوح آبدوست ($\theta = 60^\circ$) پ) سطوح آبگریز ($\theta = 120^\circ$) (ارتفاع اولیه ۴۰ واحد شبکه و ناحیه محاسباتی ۱۲۰×۱۴۰ می‌باشد.)

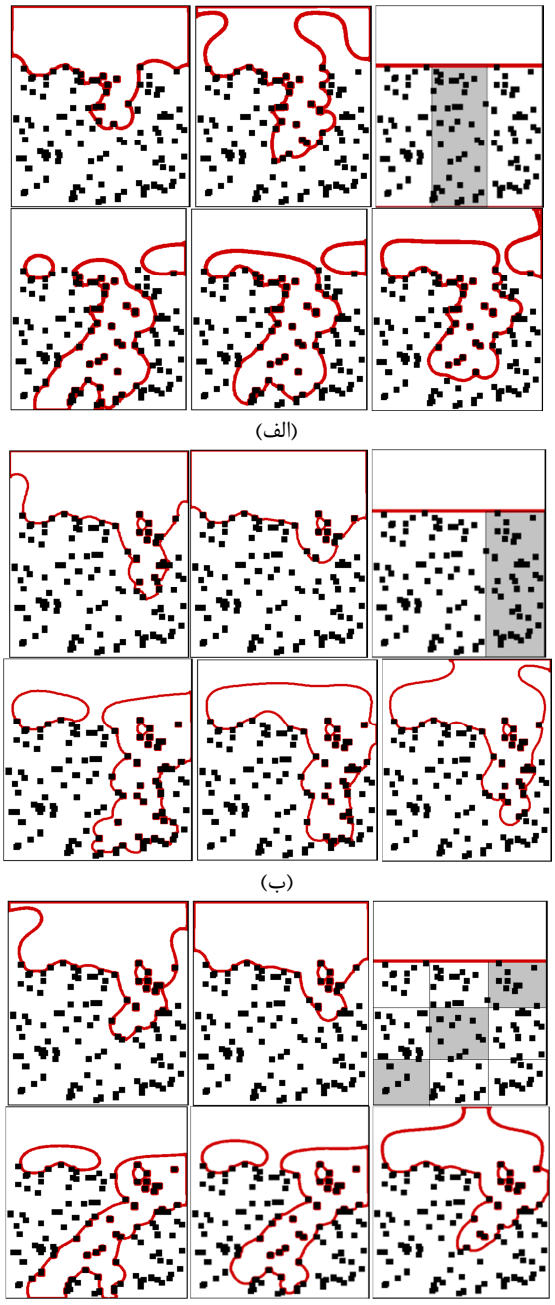
با کمترین از بین موانع جامد عبورکند؛ بنابراین زمان نفوذ بسیار کمتر از حالت آبدوست می‌باشد(شکل۱۶- پ)؛ اما در مقایسه با حالت خنثی بدلیل وجود سطوح آبگریز و احتمالا افزایش نیروی مقاوم در برابر حرکت در برخی نقاط (به علت توزیع تصادفی حفرات و سطوح و توزیع نیروی سطحی پیچیده) و همچنین چند شاخگی بیشتر جبهه سیال در شکل ۱۶ (پ) (نفوذ به جهات مختلف)، زمان نفوذ مقداری بیشتر می‌شود و تعدادگره‌های بیشتری درگیر می‌شوند. زمان بی‌بعد نفوذ کامل برای سه سطح آبدوست، آبگریز و خنثی در جدول ۳ برای تخلخل ۰/۹آورده شده‌است.

جدول ۳- مقایسه سه سطح از نظر زمان نفوذ برای تخلخل ۰/۹

نوع سطح	خنثی	آبدوست	آبگریز
زمان بی‌بعد	۱۴	۲۱	۱۶

۶-۵- تغییر مسیر نفوذ داخل محیط متخلخل

در این مطالعه، به کمک سطوح آبدوست و آبگریز مسیر حرکت سیال را تغییر می‌دهیم؛ برای این کار چند آزمون انجام شده است و حرکت سیال از مسیرهای تعیین شده رصد شده است. برای این کار، فقط بخشی از محیط متخلخل آبدوست و سایر نواحی آبگریز در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۱۷ نواحی آبدوست، داخل مستطیل‌های رنگی نمایش داده شده‌اند. همانطور که در شکل نمایش داده شده است، با تعیین نواحی آبدوست و آبگریز می‌توان مسیر نفوذ را به مسیر دلخواه تغییر داد. چیدمان موانع نیز در تغییر مسیر تاثیر بسزایی دارد؛ هر چه چیدمان موانع در مسیر نفوذ یکنواخت‌تر باشد تغییر و تعیین مسیر نفوذ امکان‌پذیرتر است.



شکل ۱۷- نواحی مشخص شده آبدوست و سایر نواحی آبگریز باشند.(ابعاد ناحیه محاسباتی ۱۴۰×۱۲۰ ، ارتفاع اولیه فیلم سیال ۴۰ واحد شبکه و نسبت تخلخل ۰/۹ می‌باشد.)

۷- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، نفوذ فیلم سیال و قطره تحت اثر نیروی گرانش در محیط متخلخل به کمک روش شبکه بولتزمن و مدل دوفازی مدلسازی شده است. الگوی نفوذ سیال داخل محیط متخلخل هم بصورت فیلم مایع و هم به شکل قطره مورد بررسی قرار گرفت و دو رژیم لزج فینگرینگ و موبینگی فینگرینگ مشاهده و بررسی شد. از ویژگی‌های دیگر این مطالعه، تولید محیط متخلخل بصورت لایه‌ای است؛ به‌طوریکه امکان تولید محیط متخلخل متشکل از لایه‌ها با تخلخل‌های مختلف وجود دارد. تاثیر لایه‌ای شدن (تخلخل) بر روی آهنگ و الگوی نفوذ در تخلخل‌های مختلف بررسی شد و شکل نفوذ لزج فینگرینگ و موبینگی فینگرینگ در حالت تخلخل لایه‌ای مقایسه و تفاوت‌های نفوذ مورد بحث قرار گرفت. تاثیر نسبت تخلخل و ویژگی ترشوندگی سطح بر روی آهنگ نفوذ سیال داخل محیط متخلخل بررسی گردید. از دیگر موارد مطالعه شده، بررسی چگونگی تغییر جبهه نفوذ در ناحیه لزج فینگرینگ به کمک سطوح آبدوست و آبگریزمی‌باشد.

۸- مراجع

[1] Yasser Ben Salah Y. T., Takemi Chikahisa, Gas channel optimisation for PEM fuel cell using the lattice Boltzmann method, Energy Procedia, Vol. 28, pp. 125 – 133, 2012.

[2] Dong B., Yan Y. Y., Li W., LBM Simulation of Viscous Fingering Phenomenon in Immiscible Displacement of Two Fluids in Porous Media, Transport in Porous Media, Vol. 88, pp. 293–314, 2011.

[3] Nazari M., Ashouri M., Kayhani M. H., Tamayol A., Experimental study of convective heat transfer of a nanofluid through a pipe filled with metal foam, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 88, No. 0, pp. 33-39, 2015.

[4] Nazari M., Mohebbi R., Kayhani M. H., Power-law fluid flow and heat transfer in a channel with a built-in porous square cylinder: Lattice Boltzmann simulation, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 204, No. 0, pp. 38-49, 2014.

[5] Mohammad Taghilou M. H. R., simulation of 2D droplet penetration in porous media using lattice boltzmann method, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, pp. 43-56, 2014.

[6] Shan X., Chen H., Simulation of nonideal gases and liquid-gas phase transitions by the lattice Boltzmann equation", Physical Review E, Vol. 49, No. 4, pp. 2941-2948, 1994.

[7] Zhang X., Lattice Boltzmann implementation for Fluids Flow Simulation in Porous Media, I.J. Image, Graphics and Signal Processing, Vol. 4, pp. 39-45, 2011.

[8] Dong B., Yan Y. Y., Li W., Song Y., Lattice Boltzmann simulation of viscous fingering phenomenon of immiscible fluids displacement in a channel, Computers & Fluids, Vol. 39, No. 5, pp. 768-779, 2010.

[9] Liu H., Valocchi A., Kang Q., Werth C., Pore-Scale Simulations of Gas Displacing Liquid in a Homogeneous Pore Network Using the Lattice Boltzmann Method, Transport in Porous Media, Vol. 99, No. 3, pp. 555-580, 2013. English

[10] Taghilou M., Rahimian M. H., Investigation of two-phase flow in porous media using lattice Boltzmann method, Computers & Mathematics with Applications, Vol. 67, No. 2, pp. 424-436, 2014.

[11] Sukop M. C., Thorne, Daniel T., Lattice Boltzmann Modeling, 1 ed., Florida USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

[12] Buick J. M., Greated C. A., Gravity in a lattice Boltzmann model, Physical Review E, Vol. 61, No. 5, pp. 5307-5320, 2000.

[13] Reis Jr N. C., Griffiths R. F., Santos J. M., Numerical simulation of the impact of liquid droplets on porous surfaces, Journal of Computational Physics, Vol. 198, No. 2, pp. 747-770, 2004.

[14] Reis Jr N. C., Griffiths R. F., Santos J. M., Parametric study of liquid droplets impinging on porous surfaces, Applied Mathematical Modelling, Vol. 32, No. 3, pp. 341-361, 2008.

[15] Lenormand R., Touboul E., Zarcone C., Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 189, No. -1, pp. 165-187, 1988.