

شبیه سازی جا به جایی امتزاجی با استفاده از مدل شبکه فضاهای خالی

مهناز حکمت زاده، میترا دادور*⁺

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده: برای بررسی جابجایی امتزاجی در محیط متخلخل و شناخت تاثیر ناهمگونی های محیط بر این جابجایی استفاده از مدل های شبکه ای ضروری می باشد. هدف این مقاله دستیابی به الگوی جریان و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف نظیر سرعت، ویسکوزیته سیال و ساختار محیط متخلخل بر تشکیل جریان انگشتی در فرآیند جابجایی امتزاجی می باشد. برای شبیه سازی از یک شبکه دو بعدی از گلوها و گره ها به عنوان مدلی از محیط متخلخل استفاده شده و اندازه شعاع گلوها از یک تابع توزیع به دست آمده است. در این مدل سازی، توزیع غلظت در شبکه از حل همزمان معادلات فشار و جابجایی - نفوذ برای غلظت در گلوها و گره ها، برای شرایط امتزاجی از نوع تماس نخست، محاسبه می شود. نتیجه های این مدل نشان می دهد که با بزرگتر شدن اندازه گلوها ضریب بازیافت افزایش می یابد. همچنین افزایش جزء گلوهای بسته که موجب ناهمگنی شبکه می شود، ضریب بازیافت شبکه را کاهش می دهد. همچنین بر اساس نتیجه های به دست آمده ضریب پخش طولی در شبکه با بزرگ شدن اندازه شبکه به آرامی افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: جابه جایی امتزاجی، شبکه فضاهای خالی، مدل سازی، شبیه سازی، ضریب پخش، زمان اولین خروج، ضریب بازیافت.

KEY WORDS: Miscible displacement, Pore network, Modeling, Simulation, Dispersion factor, Break through, Recovery factor.

مقدمه

در شبکه های محیط متخلخل توسعه داده شده است. برای مثال پخش در شبکه ای از فضاهای خالی در مقیاس میکروسکوپی با فرض اینکه طول لوله ها بسیار طولانی تر از عرض آنها باشد [۳ - ۱]، مهاجرت در شبکه شکاف ها [۴، ۵] و مهاجرت ماکروسکوپیکی در محیط متخلخل ناهمگن [۶] مطالعه شده است.

مدل های شبکه ای توسط سایمون و کلسی استفاده گردید، اما مدل آنها بسیار ساده و شبکه بسیار کوچک بود [۷]. مهاجرت تک فازی در شبکه با استفاده از حل معادلات دیفرانسیل جزئی شبیه سازی می گردد. در این روش پیش بینی ویژگی های مهاجرت

یکی از ابزارهای عددی مهم در تخمین نفوذپذیری محیط متخلخل نامنظم، شبیه سازی کامپیوتری با استفاده از مدل شبکه ای است. مزیت مدل های شبکه ای نسبت به مدل های پیوسته این است که این مدل ها قادر به در نظر گرفتن اثر ساختار محیط متخلخل در پدیده های انتقال هستند، در صورتی که در مدل های پیوسته اثر ساختار فضاهای خالی در پدیده های انتقال وارد نمی شود. در نتیجه مدل شبکه ای قادر به پیش بینی دقیق چگونگی جابجایی سیال با توجه به ساختمان فضاهای خالی در مقیاس میکروسکوپی می باشد. در تحقیقات قبلی مدلهایی برای تخمین جریان انگشتی ویسکوز

*عهده دار مکاتبات

+ E-mail: dadvar@aut.ac.ir

سپس ذره‌ها از یک گره به گره دیگر در مراحل مجزا با استفاده از توزیع زمان گذار حرکت داده می‌شوند. در این مدل از فرضیه‌های مخلوط شدن کامل در هر گره و تخصیص تصادفی جریان نفوذ استفاده شده است و سرعت خروجی بر مبنای حد بالایی عدد پکلت و مشخص شدن تصادفی حد نفوذ وزن داده شده است. در مطالعه بایجلجیک انتقال در هر گلو همزمان با قدم‌های سرعت و نفوذ حرکت داده می‌شوند. جریانی که با قدم‌های سرعت به گره رسیده است متناسب با وزن سرعت خروجی، جریان می‌یابد و احتمال دستیابی به گره خروجی در صورت ورود با گام نفوذی امکان پذیر می‌شود. ولی در این روش در مورد درستی قانون اختلاط و چگونگی تخصیص جریان به گلوها هنگامی که به گره می‌رسند، در صورتیکه هر دو مکانیزم سرعت و نفوذ مهم باشد، اختلاف نظر وجود دارد.

در این پژوهش تلاش شده است که با استفاده از قانون‌های مخلوط شدن با استفاده از بالانس جرمی در گره‌ها و حل معادلات جابجایی - نفوذ در هر گلو (رابطه آریس و تیلور [۲۱، ۲۲]) و حل همزمان معادله‌های جریان و غلظت در شبکه، جابجایی امتزاجی با دقت بیشتری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد و اثر تغییر ساختمان محیط متخلخل بر فرایند پخش حلال در نفت بررسی شود. در اینجا جابه‌جایی امتزاجی از نوع تماس نخست یک سیال، "نفت" یا سیال دیگر، "حلال" که دارای ویسکوزیته متفاوت باشند بررسی شده است. به این منظور یک نرم افزار کامپیوتری به زبان فرترن توسعه داده شده است.

بخش نظری

مدل سازی شبکه‌ای

در مدل شبکه‌ای، محیط متخلخل با شبکه ای از فضاهای خالی متقاطع نمایش داده می‌شود. فضاهای خالی شامل گلوها و گره‌ها هستند. در اینجا گلوها به صورت استوانه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. البته گلوها ممکن است به اشکال نامنظم و به صورت همگرا و واگرا باشند اما از آنجا که شعاع موثر آنها محدود کننده حرکت و نفوذ می‌باشد، شعاع موثر آنها از یک تابع توزیع مناسب تعیین می‌شود. گلوها مسیرهای انتقال بوده و گره‌ها محل تقاطع گلوها می‌باشند. در اینجا از مدل شبکه دو بدی مربعی با عدد اتصال $Z = 4$ استفاده شده که بدین معنی است که در هر گره چهار گلو به یکدیگر وصل شده‌اند (شکل ۱). البته از آنجا که عملاً عدد

چند فازی و تکفازی در مطالعه‌های جدید مدلسازی شبکه‌ای محیط متخلخل در مقیاس اندازه فضاهای خالی، توسط بلانت به کار رفته و نتایج رضایت بخشی داشته است. [۸، ۹]. این روش به عنوان اولین قانون پیش‌بینی نفوذپذیری نسبی دو و سه فازی [۱۰، ۱۲] و ضریب‌های پخش [۱۳] به کار رفته است. مشکل این روش تقریب توزیع غلظت در طول هر گلو با فرض تغییرهای خطی درجه اول می‌باشد.

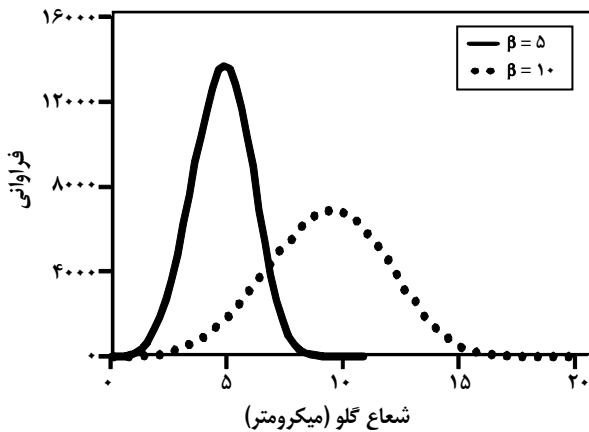
دی آرکانجلیس برای اصلاح مشکل فوق، معادلات دیفرانسیل غلظت را در فضای لاپلاس حل نمود. هر چند این روش هوشمندانه است ولی یافتن پروفیل غلظت در فضای حقیقی نیازمند استفاده از تبدیل معکوس لاپلاس همزمان برای تمامی گره‌ها است [۱۴].

روش مستقیم دیگر استفاده از مهاجرت ذره‌ها است که در هر بازه زمانی ذرات با اثرات سرعت و نفوذ در زمان t حرکت داده می‌شوند [۱۷-۱۵]. در روشی که توسط سهیمی استفاده شده است، حرکت نفوذی ذره‌ها در هر گلو با احتمالی متناسب با سطح مقطع گلو وارد می‌شوند [۱۸]. سپس ذره‌ها می‌توانند بین گره‌ها با زمان متوسط مهاجرت $L^2/2D$ حرکت نمایند. در حرکت جابجایی، ذرات در هر گلو با احتمالی متناسب با فلاكس خروجی وارد می‌شوند و بین گره‌ها با زمان L/V حرکت می‌کنند [۳]. تا کنون مدل ریاضی که بتواند مکانیزم‌های انتقال در اثر نفوذ و سرعت را بطور همزمان در نظر بگیرد ارائه نشده است. همچنین حل مسئله در شرایط امتزاج پذیری سیالات از نوع تماس متعدد، دچار چالش می‌باشد.

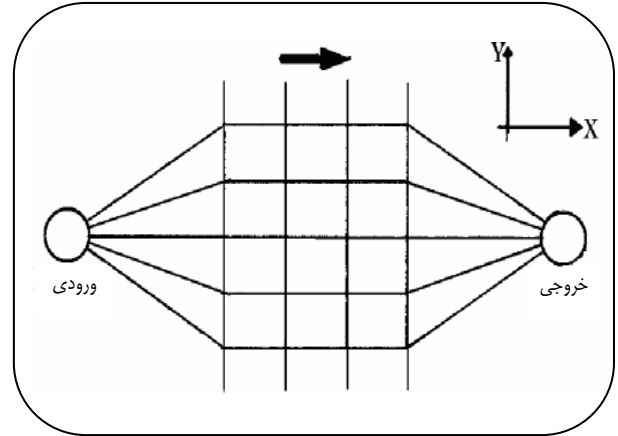
برکوویتز از وزن دادن به گلوهای جریان بر مبنای طول آنها استفاده کرد. [۱۹، ۲۰] او راه حل تحلیلی برای حل مساله جریان را با استفاده از حرکت ذره‌ها به طور توأم انجام داد و سپس نتیجه‌ها را برای بخشی از جریان ورودی به هر گلو به صورت تابعی از عدد پکلت $Pe = VL/D$ ارائه داد. از معایب این روش وابستگی جواب‌های نسبت به زمان مسئله به اندازه ابعاد شبکه است. اما در روش‌های تحلیلی قبلی جوابها مستقل از اندازه ابعاد شبکه بودند.

سربی و کلایفرد [۱] و همچنین بایجلجیک و همکارانش [۱۳] پخش ذرات ماده تزریقی را با استفاده از مدل سازی شبکه‌ای و الگوریتم مهاجرت با احتساب نفوذ مولکولی و سرعت جابه‌جایی شبیه‌سازی نمودند. در مطالعه سربی و کلایفرد زمان عبور از هر گلو با استفاده از مدل سازی قدم‌های تصادفی^(۱) با جریان جابه‌جایی و نفوذ عمودی و طولی به دست آمد.

(۱) Random Walk



شکل ۲- توزیع شعاع در شبکه ۳۰۰ × ۳۰۰.



شکل ۱- شمای شبکه دو بعدی جهت مدل‌سازی.

شبه استاتیک و مدل جابه‌جایی دینامیک. در مدل شبه استاتیک انتقال بر اساس فشار موئینگی است اما در مدل دینامیک سرعت سیال، عامل جابه‌جایی می‌باشد لذا با توجه به سرعت سیال و با گذشت زمان، مکان مرز جابه‌جایی (جبهه) دو سیال تعیین می‌شود. در این تحقیق از مدل دینامیک استفاده شده است.

معادله‌های جابه‌جایی سیال

برای انجام مدل‌سازی، معادله‌های جریان در اثر گرادیان فشار و معادله‌های غلظت در نظر گرفته شده است. در زیر معادله‌های فشار و غلظت برای گلوها و گره‌ها بیان گردیده است. گلوها محیط پیوسته بوده و مکانیسم توزیع غلظت در آنها جابه‌جایی و نفوذ می‌باشد. معادله جریان در گلوها نیز بر اساس جریان آرام تعیین می‌شود. هر گره نیز محل اختلاط جریان گلوهای متصل به آن گره بوده و در نتیجه تجمع در آنها وجود ندارد.

معادله‌های توزیع فشار

گلوها

از آنجا که شعاع گلوها بسیار کوچک می‌باشد رژیم جریان در گلوها در محیط متخلخل به صورت آرام است. در نتیجه شدت جریان Q_{ij} در هر گلو واقع بین گره‌های i و j در صورتی که یک سیال در آن جریان داشته باشد با استفاده از رابطه افت فشار در طول گلوها در جریان آرام (رابطه هاگن پویسله) تعیین می‌شود [۲۵]:

$$P_i - P_j = \frac{8\eta_r Q_{ij} l}{\pi R_{ij}^4} \quad (2)$$

اتصال ثابت نبوده و می‌تواند از یک گره به گره دیگر تغییر کند، برای بررسی اثر تغییر عدد اتصال و در واقع تغییر ساختمان محیط متخلخل می‌توان درصد معینی از گلوها را به صورت اتفاقی از شبکه حذف نمود.

گره‌ها، محل برخورد گلوها و در واقع مکانی برای انتقال جرم بین آنها در نظر گرفته می‌شوند. بسیاری از محققان نیز گره‌ها را به همین صورت در نظر گرفته و حجمی را به آنها اختصاص نداده‌اند [۲۳، ۲۴] هر چند تحقیقات فراوانی نیز وجود دارد که از این فرضیه تبعیت نمی‌کنند [۲۵، ۲۶].

شعاع مؤثر هر گلو با استفاده از تابع توزیع اندازه گلوها، که از روش‌های تجربی قابل اندازه‌گیری است، به دست می‌آید. در اینجا شعاع مؤثر گلوها بر اساس توزیع ویبال [۲۷] تعیین شده است.

$$r = \beta (-\ln(1-x))^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

که در آن $\alpha > 0$ است. در شبیه‌سازی حاضر از مقادیر $\alpha = 4$ و $\beta = 10 \mu\text{m}$ که برای محیطی از جنس ماسه سنگ مناسب می‌باشد، استفاده شده است.

در شکل ۲ توزیع اندازه شعاع گلوها در شبکه 300×300 گره برای دو توزیع متفاوت با پارامترهای توزیع $\beta = 5$ و $\beta = 10$ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است کوچکتر شدن β سبب باریک‌تر شدن تابع توزیع و کوچک شدن اندازه گلوها می‌شود.

طول گلوها مساوی در نظر گرفته شده است. البته در صورت وجود اطلاعات در مورد یک محیط متخلخل طول گلوها را نیز می‌توان از تابع توزیع طول آنها تعیین نمود.

مدل‌سازی شبکه‌ای از دو روش انجام می‌شود: مدل جابه‌جایی

گلوها

معادله جابه‌جایی - نفوذ غلظت در یک لوله موئین به صورت زیر است.

$$\frac{dC}{dt} = D_m \left(\frac{d^2 C}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dC}{dr} + \frac{d^2 C}{dx^2} \right) - v_m \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{dC}{dx} \quad (6)$$

این معادله توسط آریس و تیلور [۲۱، ۲۲] به صورت زیر تغییر داده شد.

$$\frac{d\bar{C}}{dt} = D_1 \left(\frac{d^2 \bar{C}}{dx'^2} \right) \quad (7)$$

همچنین:

$$x' = x - vt \quad (8)$$

این معادله با شرایط مرزی زیر حل می‌شود:

$$\begin{cases} x = 0 & \bar{C} = C_0 \\ x = \infty & \bar{C} = 0 \\ t = 0 & \bar{C} = 0 \end{cases}$$

حل معادله بالا در لوله موئین در شرایط با جریان آرام به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\bar{C}}{C_0} = \frac{c_i}{2} \left[1 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{x - vt}{\sqrt{2D_L t}} \right) \right] \quad (9)$$

$$\begin{cases} - & x - vt < 0 \\ + & x - vt > 0 \end{cases}$$

که در آن ضریب پخش طولی D_L از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{D_L}{D_m} = 1 + \frac{1}{48} Pe^2 \quad (10)$$

$$Pe = \frac{Rv}{D_m} \quad (11)$$

از این روابط برای تعیین غلظت در گلوها استفاده می‌شود. بنابراین پارامترهای مربوط به هر گلو به v_{ij} ، D_{ij} و Pe_{ij} تبدیل می‌شود.

گره‌ها

در مورد گره‌ها، از آنجا که گره‌ها فقط به عنوان نقطه اختلاط در نظر گرفته شده و تجمع در آنها وجود ندارد، معادله بیلان جرم در گره‌ها به صورت زیر است:

$$\sum_j J_{ij} S_{ij} = 0 \quad (12)$$

از آنجا که در اینجا مسئله به صورت ناپایدار حل می‌شود و زمان اقامت در گلوها متفاوت است، لذا یک مبنای زمانی انتخاب شد و تغییر ویسکوزیته در هر گلو برای فواصل زمانی کوچک به سمت جلو تعیین شد.

در گلوئی که حلال با ویسکوزیته‌ای متفاوت با نفت به آن وارد می‌شود در صورتی که قطعه X_{ij} با مخلوطی از سیال جابجا شونده و سیال جابجا کننده و بقیه آن با سیال جابجا شونده پر شده باشد، اختلاف فشار بین دو گره متصل به آن گلو $P_i - P_j$ از معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۳ و ۲۵]:

$$P_i - P_j = \frac{\lambda \eta_r \left(\frac{X_{ij}}{M} + L_{ij} - X_{ij} \right) Q_{ij}}{\pi R_{ij}^4} = \frac{Q_{ij}}{g_{ij}} \quad (3)$$

M از معادله زیر به دست می‌آید.

$$M = \frac{\eta_r}{\eta_m} \quad (4)$$

که η_m ویسکوزیته موثر مخلوط دو سیال می‌باشد که نحوه محاسبه آن در ادامه توضیح داده خواهد شد.

گره‌ها

گره‌ها محل تبادل بین گلوها در نظر گرفته شده‌اند که تجمع جرم در آنها وجود ندارد پس نرخ خالص جریان به هر گره i برابر صفر است. بنابراین معادله بیلان جرم در هر گره در داخل شبکه را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\sum_i Q_{ij} = 0 \quad (5)$$

مجموعه فوق برای تمام گلوهای متصل به گره i می‌باشد. برای گره‌های ستون اول و آخر مجموع جریان ورودی و یا خروجی به آنها نیز برابر با جریان ورودی و یا خروجی در نظر گرفته شده است. از نوشتن این معادله برای تمامی گره‌های شبکه یک دستگاه معادلات خطی حاصل می‌شود که از حل آن توزیع فشار در شبکه محاسبه می‌گردد.

معادله‌های توزیع غلظت

پس از تعیین توزیع فشار در شبکه و محاسبه سرعت در هر گلو می‌توان توزیع غلظت در شبکه را پس از گذشت Δt محاسبه نمود.

جدول ۱- پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی.

M	۱۰
Q	$2 \times 10^{-4} \text{ cc/min}$
η_1	۱ سانتی پواز
η_2	۱۰ سانتی پواز
D_m	10^{-5} متر مربع بر ثانیه
$1/R_{avg}$	۴/۵۷

مراحل انجام شبیه سازی

الگوریتم شبیه سازی جابه‌جایی شامل مراحل زیر است:

- ۱- شبکه با ابعاد و عدد اتصال مورد نظر ساخته شده و شعاع گلوها از تابع توزیع مربوطه تعیین می شود.
- ۲- ابتدا برای جریان حلال به تنهایی در شبکه با استفاده از روش ارائه شده در قسمت معادله‌های توزیع فشار، دبی در هر گلو و سپس سرعت در گلوها محاسبه شده و سپس زمان عبور از گلوها محاسبه می‌شود.

$$\bar{v}_{ij} = \frac{Q_{ij}}{S_{ij}} \quad (14)$$

$$t_{ij} = \frac{1}{\bar{v}_{ij}} \quad (15)$$

- در اینجا کوتاه‌ترین زمان عبور از گلوها به عنوان مبنایی برای تعیین Δt انتخاب می شود. Δt برابر با جزئی از کوتاه‌ترین زمان عبور در نظر گرفته می شود. در اینجا جزء $\frac{1}{4}$ در نظر گرفته شده است.
- ویسکوزیته موثر از قانون مخلوط شدن با توان چهارم به دست می‌آید [۲۲]:

$$\eta_m = \left(\frac{C_r}{\eta_r^{1/4}} + \frac{1-C_r}{\eta_1^{1/4}} \right) \quad (16)$$

- نسبت تحرک از معادله (۴) و نیز مقدار سرعت متوسط در هر گلو از معادله (۱۴) تعیین می‌شود و جهت آن نیز با توجه به فشار گره‌های مجاور مشخص می‌شود.
- فقط در لحظه شروع پیشروی در ستون اول شبکه، مکان جبهه در تمامی گلوها در اثر گرادیان فشار پس از گذشتن زمان Δt تعیین می‌شود.

$$\Delta X_{ij} = \frac{\bar{v}_{ij}}{\Delta t} \quad (17)$$

- پس از تعیین میزان پیشروی اولیه با استفاده از معادله (۱۷)، توزیع جدید فشار در شبکه با استفاده از معادله‌های (۳) و (۵) به دست می‌آید. پس سرعت در ناحیه قبل از جبهه تصحیح می‌شود.
- با استفاده از معادله‌های (۱۰) و (۱۱) ضریب پخش در هر گلو D_{ij} محاسبه می شود.

فلاکس جرمی در هر گلو J_{ij} بر اساس مکانیزم‌های نفوذ و جابه‌جایی از معادله زیر به دست می‌آید.

$$J_{ij} = \left(v_{ij} \bar{C} - D_m \frac{d\bar{C}}{dx} \right) \quad (13)$$

برای محاسبه $d\bar{C}/dx$ از معادله (۹) مشتق گرفته شده است. اگر معادله (۱۲) برای تمامی گره‌های شبکه نوشته شود، یک دستگاه معادلات بدست می‌آید که مجهول‌های آن غلظت در گره‌ها پس از گذشت زمان Δt است. این دستگاه با استفاده از روش‌های عددی قابل حل است. مجموعه معادلات حاصل که برای شبکه 300×300 شامل یک ماتریس حجیم 9000×9000 است.

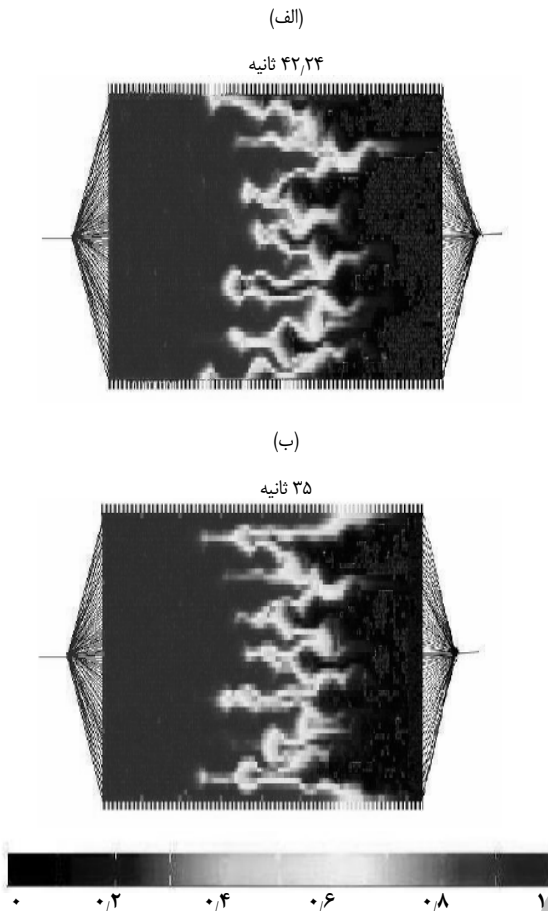
پس از منظم کردن ضریب‌های ماتریس به صورت ماتریس‌های پراکنده^(۱) و ذخیره کردن المان‌های غیر صفر و قطری آن با استفاده از روش گرادیان توام^(۲) برای زمان‌های متفاوت حل شده است.

شرایط مرزی و شرایط اولیه

در شرایط اولیه شبکه با سیال نفت اشباع می‌باشد. شرایط مرزی در جهت اصلی انتقال به صورت شدت جریان معین در ورودی و خروجی شبکه برابر Q می‌باشد. شرایط مرزی در جهت عمود بر جهت اصلی انتقال، بصورت پرپودیک در نظر گرفته می‌شود تا اثرات اندازه محدود شبکه در نتیجه‌های به حداقل رسانده شود. سایر فرضیه‌هایی که در این مدل‌سازی در نظر گرفته شده، عبارتند از اینکه سیال غیر قابل تراکم و امتزاجی از نوع تماس نخست باشد. همچنین از تغییرهای دما و فشار در فرایند صرف نظر شده است. طول گلوها نیز چندین برابر قطر متوسط آن‌ها در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است.

(۱) Sparce

(۲) Biconjugate Gradient



شکل ۳- شبیه سازی جابه‌جایی امتزاجی در شبکه ناهمگن با گلوهای باز و نسبت تحرک ده. الف) پارامتر توزیع شعاع $\beta = 5$ ، ب) پارامتر توزیع شعاع $\beta = 10$.

حلال از شبکه میزان سیال تزریقی با سیال تولید شده برابر است. اما بعد از این زمان مقداری از حلال نیز در جریان خروجی وجود دارد.

اثر توزیع شعاع گلوها

برای بررسی اثر اندازه شعاع گلوها در اولین زمان خروج، این زمان برای توزیع اندازه‌های در نظر گرفته شده در شکل ۳ الف و ب، با هم مقایسه شده است.

در شکل الف که مربوط به اندازه کوچکتری از گلوها می‌شود زمان اولین خروج ۴۲/۲۴ ثانیه و در شکل ب زمان خروج ۳۵ ثانیه شده است. همچنین تشکیل جریان انگشتی ویسکوز در شکل ب بیشتر است. بزرگتر شدن شعاع گلوها سبب افزایش ضریب پخش هم می‌شود. همچنین ضریب بازیافت برای توزیع اندازه بزرگ‌تر گلوها بزرگتر می‌باشد که این نتایج نیز در شکل ۹ ارایه می‌شوند.

۸- با استفاده از سرعت در ناحیه قبل از جبهه و D_{ij} و معادله (۱۲) می‌توان توزیع غلظت در ناحیه قبل از جبهه را به‌دست آورد. ۹- در زمان پس از لحظه شروع برای تعیین Δx مکان جبهه جابه‌جایی غلظت در گلوهای شبکه با استفاده از توزیع غلظت به‌دست می‌آید.

$$\Delta X_{ij} = J_{ij} \Delta t \quad (18)$$

۱۰- این مراحل تا رسیدن جبهه به هر گره تکرار می‌شود، اما زمان رسیدن به هر گره باید چک شود. اگر در زمان Δt بعدی پیشروی جبهه از طول یک گلو بیشتر شود و جبهه از یک گره عبور نماید باید Δt برای رسیدن به آن گره اصلاح شود به طوری که جزیی از Δt قبل از گره و مابقی بعد از آن در نظر گرفته شود. سپس با حل همزمان معادله (۱۲) برای همه گره‌ها غلظت در تمامی گره‌ها محاسبه می‌شود.

۱۱- این مراحل تا رسیدن حلال به گره خروجی تکرار می‌شود. ۱۲- پس از اولین خروج حلال از گره خروجی، زمان کل حرکت سیال در شبکه، دبی خروجی و ضریب بازیافت محاسبه شده است.

مقایسه نتیجه‌ها

برای مقایسه نتیجه‌های زمان اولین خروج، ضریب پخش شبکه و ضریب بازیافت مقایسه گردیده است. زمان خروج حلال از گره خروجی در شبکه به عنوان زمان اولین خروج ثبت شده است. برای محاسبه ضریب پخش از روابط زیر استفاده شد. غلظت متوسط در هر سطح مقطع از شبکه را با متوسط وزنی مساحت هر گلو محاسبه می‌شود:

$$\bar{C} = \frac{\sum C_{ij} A_{ij}}{\sum A_{ij}} \quad (19)$$

برای محاسبه ضریب پخش شبکه از نتیجه‌های محاسبه توزیع غلظت در شبکه استفاده می‌شود. به طوری که زمانی که \bar{C}/C_0 در خروجی شبکه برابر ۰/۱۶ و ۰/۸۴ (ت. ۱/۱۶) و ۰/۸۴ (ت. ۱/۸۴) شود، به‌دست می‌آیند. از معادله زیر داریم [۲]:

$$D_1 = \frac{1}{8} \left[\frac{L - vt_{.16}}{\sqrt{t_{.16}}} - \frac{L - vt_{.84}}{\sqrt{t_{.84}}} \right]^2 \quad (20)$$

ضریب بازیافت برابر نسبت میزان سیال تولیدی به کل سیال موجود در شبکه تعریف می‌شود. توجه گردد که تا زمان اولین خروج

اثر تغییر جزء گلوهای باز

برای بررسی اثر ناهمگنی در شبکه عدد اتصال در شبکه تغییر داده شد. به این منظور درصد معینی از گلوها در شبکه را به طور تصادفی بسته در نظر گرفته شد.

$$p = 1 - \frac{z >}{z} \quad (21)$$

برای شبکه‌های مختلفی با جزء گلوهای بسته به ترتیب برابر ۰، ۰/۲ و ۰/۴۵ تشکیل جریان انگشتی ویسکوز در شکل ۴ الف، ب و ج مقایسه شده است.

افزایش میزان گلوهای بسته و به عبارتی افزایش ناهمگنی در شبکه موجب افزایش زمان اولین خروج از ۳۵ ثانیه به ۴۴ ثانیه شده است. همچنین جریان‌های انگشتی با طول زیاد در بعضی از ناحیه‌ها تشکیل شده است که این پدیده موجب کاهش ضریب بازیافت از ۰/۴۴ به ۰/۱۶ شده است. در واقع سرعت در برخی نواحی زیاد و در بعضی کم بوده است و این موجب عدم یکنواختی در پیش روی جریان حلال در شبکه و در نتیجه کاهش ضریب بازیافت شده است.

اثر تغییر نسبت تحرک متغیر

اثر تغییر نسبت تحرک بر جابه‌جایی امتزاجی در شکل ۵ بررسی شده است. افزایش نسبت تحرک موجب کاهش زمان اولین خروج از ۴۶ به ۴۲ و در نهایت ۲۶ ثانیه شده است. همچنین جابه‌جایی در شبکه غیر یکنواخت تر و همراه با تشکیل انگشت‌های بیشتر و بلندتر شده است که این پدیده موجب کاهش ضریب بازیافت از ۰/۷۶ به ۰/۴۴ و در نهایت ۰/۳۷ شده است.

بررسی نتیجه‌های شبیه‌سازی

در اینجا از روش مونت کارلو برای به‌دست آوردن نتیجه‌های شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. در واقع به منظور به حداقل رساندن اثر عدم قطعیت در نتیجه‌هایی که ناشی از استفاده از اعداد تصادفی در تعیین اندازه گلوها می‌باشد، محاسبه‌ها برای چندین نمونه شبکه مختلف تکرار شده و نتیجه‌های ارایه شده از متوسط‌گیری نتیجه‌های مربوطه به نمونه‌های مختلف به‌دست آمده است. در اینجا از ده نمونه برای به‌دست آوردن نتیجه‌ها استفاده شده است.

برای بررسی اثر تعداد نمونه‌ها بر ضریب پخش طولی، متوسط ضریب پخش بر حسب تعداد نمونه برای شبکه‌های مختلف

در شکل ۶ نشان داده شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد با زیاد شدن تعداد نمونه‌ها تغییرها در نتیجه‌ها بسیار کم می‌شود.

ضریب پخش شبکه**وابستگی ضریب پخش به اندازه شبکه**

در اینجا اثر اندازه شبکه بر ضریب پخش بررسی شده است. لازم به توضیح است که در برخی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی انجام شده وابستگی ضریب پخش به ابعاد محیط متخلخل بررسی شده است. اما در برخی مطالعه‌های ضریب پخش مستقل از ابعاد سیستم در نظر گرفته شده و به‌صورت تابعی از عدد رینولدز و عدد پکلت در نظر گرفته شده است [۲۹، ۳۲].

هن ضریب پخش را در مکان‌های مختلف در جهت طولی در محیط متخلخل اندازه‌گیری نمود. نتایج او نشان می‌دهد که تنها در طول‌های خاصی ضریب پخش فقط تابع عدد پکلت است و تابعیت ضریب پخش نسبت به اندازه محیط متخلخل را اثبات نمود [۳۳].

در اینجا ضریب پخش برای شبکه‌هایی به ابعاد مختلف از معادله (۲۰) محاسبه شده است. شکل ۷ نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی را برای شبکه‌های دو بعدی ۵×۵ تا ۳۰۰×۳۰۰ گره نشان می‌دهد. بزرگ شدن شبکه منجر به افزایش ضریب پخش شده است. نتیجه‌های به‌دست آمده با نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی سهمی [۱۵] که برای شبکه‌هایی تا اندازه ۸۰×۸۰ انجام شده توافقی خوبی را نشان می‌دهد.

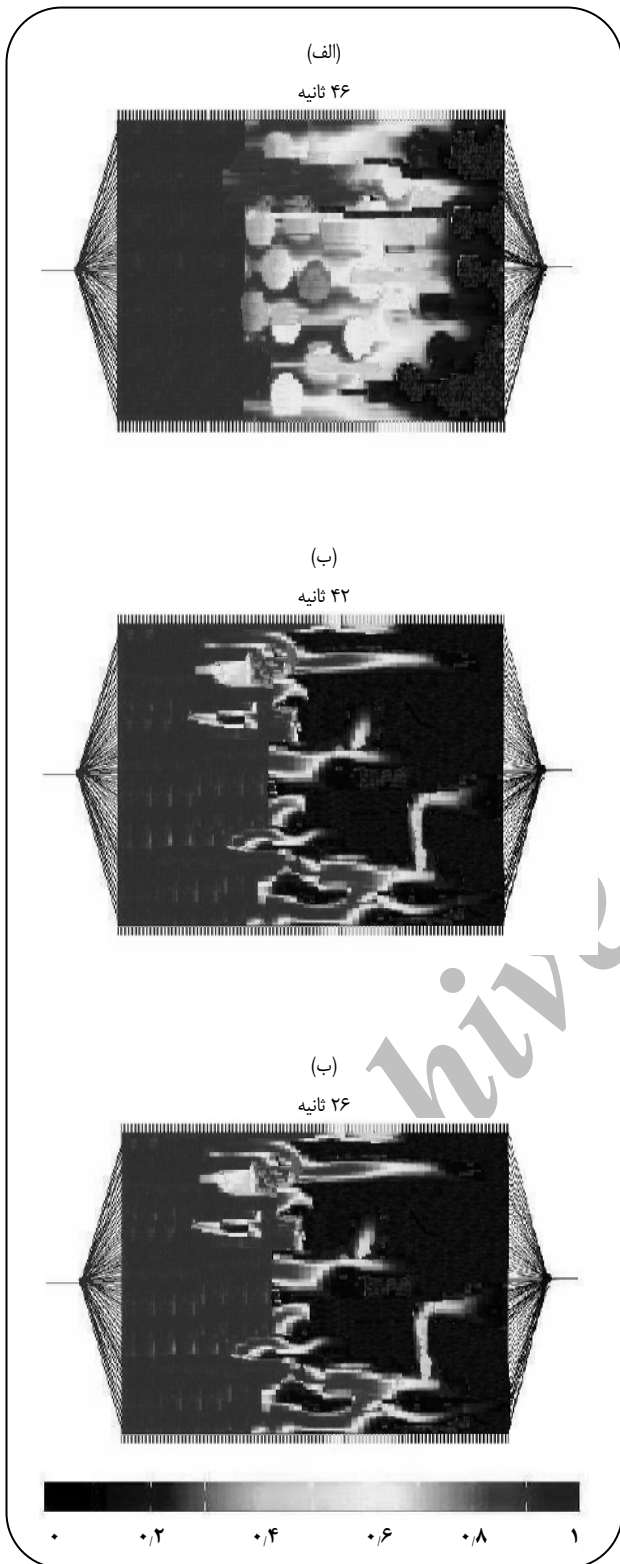
وابستگی ضریب پخش به ساختمان شبکه

برای بررسی اثر ناهمگنی شبکه بر ضریب پخش، محاسبه‌ها برای شبکه‌هایی که درصد باز بودن گلوهای باز در آنها تغییر داده شده تکرار شده است.

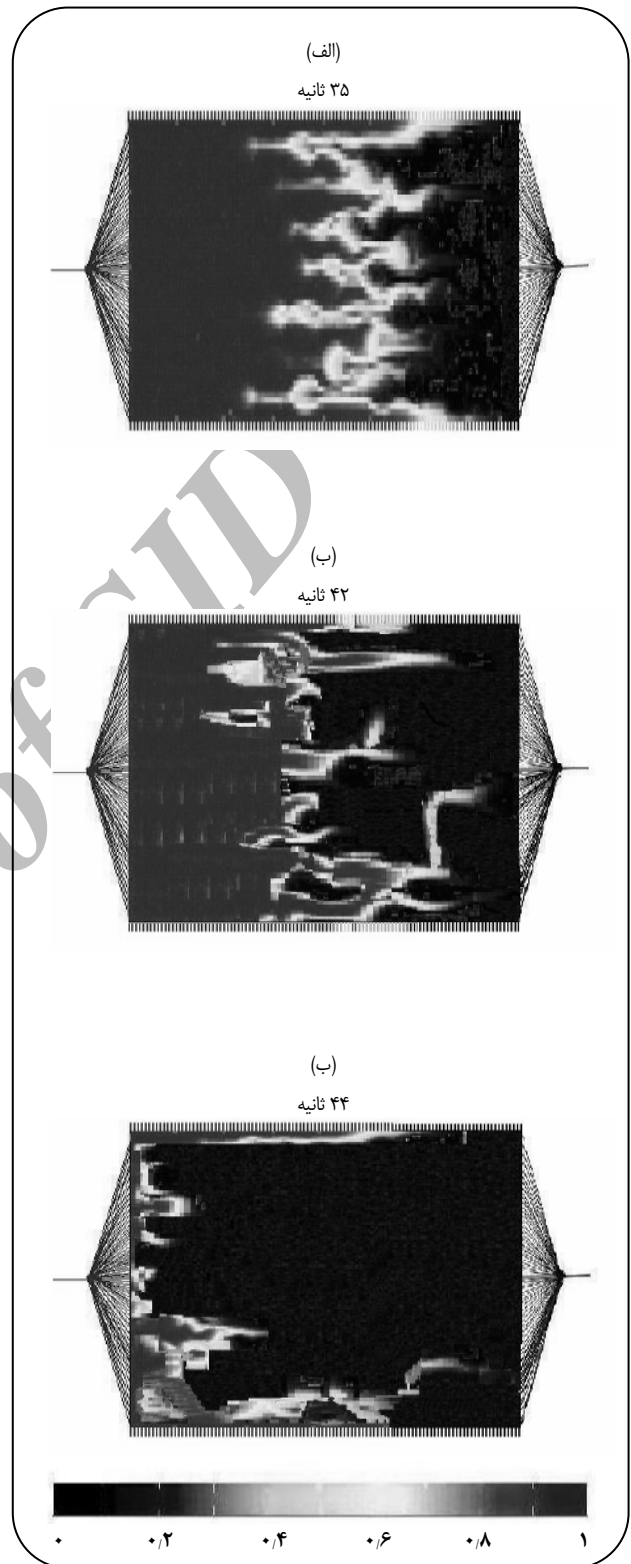
مطابق شکل ۸ نتیجه‌ها نشان می‌دهد که بسته شدن گلوها و افزایش ناهمگنی شبکه موجب افزایش ضریب پخش می‌شود. همچنین بزرگتر شدن اندازه گلوها موجب افزایش ضریب پخش طولی شده است.

ضریب بازیافت شبکه**وابستگی ضریب بازیافت به اندازه شبکه**

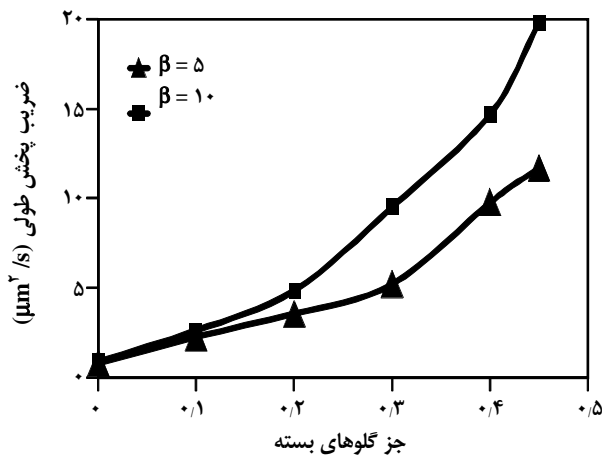
در شکل ۹، وابستگی ضریب بازیافت به اندازه شبکه برای دو مقدار نسبت تحرک ده و صد و پارامتر توزیع شعاع $\beta = 5$ و جزء گلوهای بسته ۰/۲ نشان داده شده است.



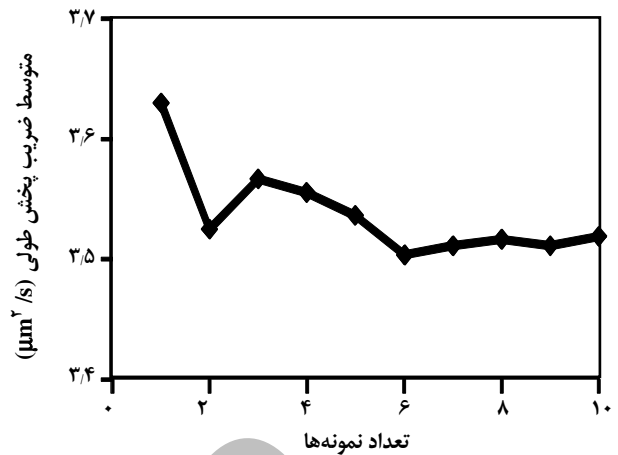
شکل ۵ - شبیه سازی جابه‌جایی امتزاجی در شبکه ناهمگن با جزء گلوله‌های بسته ۰٫۲ و پارامتر توزیع شعاع $\beta = 10$ ، الف) نسبت تحرک ۰٫۲، ب) نسبت تحرک ۱، ج) نسبت تحرک ۱۰۰.



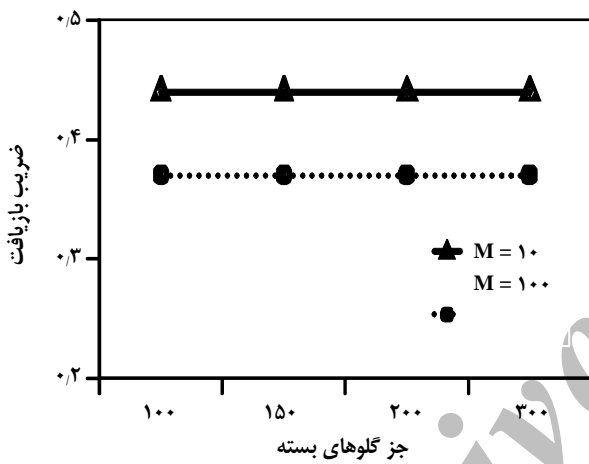
شکل ۴ - شبیه سازی جابه‌جایی امتزاجی در شبکه ناهمگن با و پارامتر توزیع شعاع $\beta = 10$ و نسبت تحرک ۵، الف) جزء گلوله‌های بسته صفر، ب) جزء گلوله‌های بسته ۰٫۲، ج) جزء گلوله‌های بسته ۰٫۴۵.



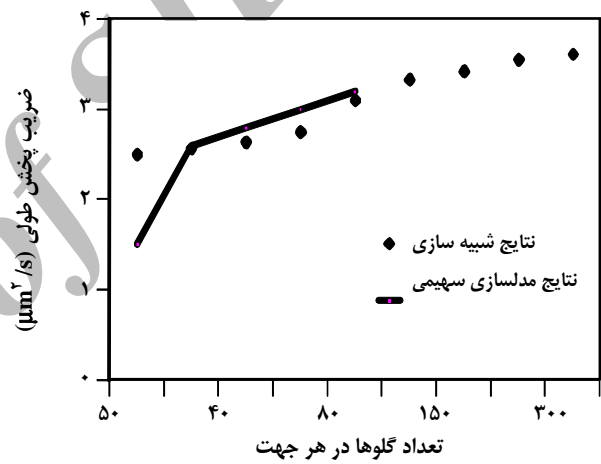
شکل ۸- وابستگی D_1 به جزء گلوهای بسته و اندازه گلوها در مدل شبکه‌ای.



شکل ۶- اثر افزایش تعداد نمونه‌ها بر نتیجه‌های حاصل از مدل شبکه‌ای.



شکل ۹- وابستگی ضریب باز یافت به اندازه شبکه.



شکل ۷- وابستگی ضریب پخش طولی به اندازه شبکه.

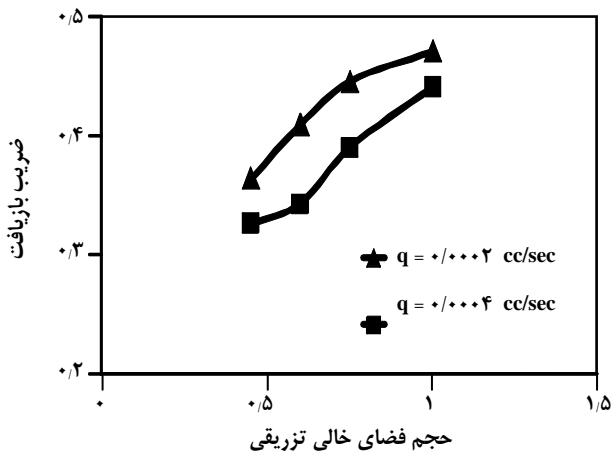
وابستگی ضریب باز یافت به دبی حلال تزریقی

تأثیر سرعت تزریق حلال بر ضریب باز یافت در زمان اولین خروج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ضریب باز یافت برای دو دبی تزریق حلال برابر 2×10^{-4} cc/min و 4×10^{-4} cc/min رسم شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که سرعت پایین‌تر تزریق حلال منجر به باز یافت بالاتری می‌شود. زیرا در دبی جریان پایین‌تر، زمان کافی برای نفوذ وجود دارد و امکان استخراج نفت به‌دام افتاده در فضاهای با انتهای بسته نیز فراهم می‌شود. بنابراین کاهش ویسکوزیته نفت و جابه‌جایی جریان مخلوط و جریان حلال را در پی خواهد داشت. بنابراین سرعت تزریق حلال باید متناسب با نفوذ در نفت باشد. این نتیجه‌ها با نتیجه‌های آزمایشگاهی برای نفت سنگین هماهنگی دارد [۳۴]. اما به علت نبودن اطلاعات کافی در مورد شرایط آزمایشگاهی مقایسه دقیق نتیجه‌ها امکان‌پذیر نبوده است.

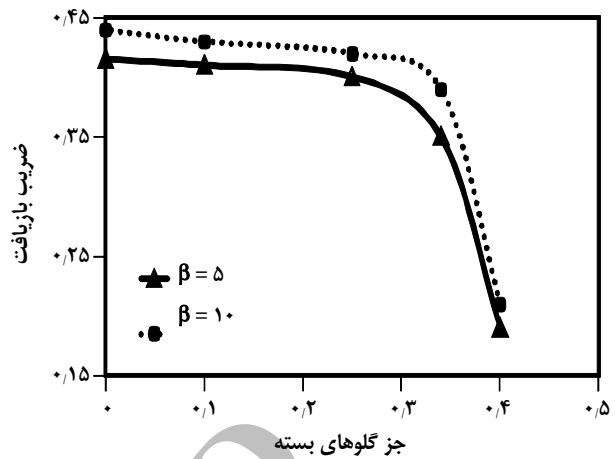
همان‌گونه که مشخص است ضریب باز یافت به اندازه شبکه وابسته نیست ولی همانگونه که انتظار می‌رود با افزایش نسبت تحرک، ضریب باز یافت کاهش می‌یابد.

وابستگی ضریب باز یافت به ساختمان شبکه

برای مطالعه اثر ناهمگنی ساختمان شبکه بر جابه‌جایی امتزاجی و ساختار جریان انگشتی ویسکوز، شکل ۹ تغییرهای ضریب باز یافت را بر حسب جزء گلوهای باز نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است با افزایش گلوهای باز ضریب باز یافت نیز افزایش می‌یابد. بنابراین عدد اتصال و در واقع ساختمان فضاهای خالی محیط متخلخل نقش مهمی در جابه‌جایی امتزاجی و بازده آن دارد. همچنین مطابق شکل ۹ با بزرگ شدن اندازه گلوها ضریب باز یافت جابه‌جایی امتزاجی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- وابستگی ضریب بازیافت به دبی حلال تزریقی.



شکل ۱۰- ضریب بازیافت به عنوان تابعی از درصد گلوهای باز برای دو توزیع شعاع مختلف $\beta=5$ و $\beta=10$.

نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای مختلف نظیر دبی حلال و ساختمان محیط متخلخل بر چگونگی تشکیل جریان انگشتی ویسکوز، میزان بازیافت نفت و ضریب پخش در محیط متخلخل بود. نتیجه‌های مدل‌سازی موارد زیر را نشان دادند:

- ۱- دبی حلال بر بازیافت نفت تاثیر گذار است. تاثیر سرعت تزریق حلال در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که در صورتی که شدت تزریق حلال پایین‌تر باشد، بازیافت نفت بیشتر می‌شود.
- ۲- ضریب پخش طولی به اندازه شبکه وابسته بوده و با بزرگ شدن شبکه به آرامی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش جزء گلوهای بسته، سرعت در گلوها کاهش یافته و ضریب پخش طولی افزایش می‌یابد.
- ۳- برای بررسی اثر ناهمگنی ساختمان شبکه بر جابجایی امتزاجی و ساختار جریان انگشتی ویسکوز، جزء گلوهای بسته و توزیع اندازه شعاع گلوها را تغییر دادیم. نتایج نشان می‌دهد با افزایش جزء گلوهای بسته و در واقع افزایش ناهمگنی شبکه، ضریب بازیافت کاهش می‌یابد. بنابراین عدد اتصال و جزء گلوهای بسته در شبکه (ساختار محیط متخلخل) نقش مهمی در جابجایی امتزاجی و بازده آن دارد. با افزایش شعاع و در واقع اندازه گلوها ضریب بازیافت فرآیند جابجایی نیز افزایش می‌یابد.
- ۴- ضریب بازیافت به اندازه شبکه وابسته نبوده اما با افزایش نسبت تحرک، ضریب بازیافت کاهش می‌یابد.
- ۵- کم شدن اتصال بین گلوها و افزایش فضاهای انتها بسته در شبکه، موجب ناهمگنی آن شده و افزایش ضریب پخش را به دنبال دارد.

نمادها

C	غلظت در گلو $[L^3/L^3]$
C_r	غلظت سیال جابجا شونده $[L^3/L^3]$
\bar{C}	غلظت متوسط در لوله موئین در جهت شعاعی $[L^3/L^3]$
C_o	غلظت اولیه $[L^3/L^3]$
D_l	ضریب پخش $[L^2/T]$
D_{ij}	ضریب پخش در گلو ij $[L^2/T]$
D_m	ضریب نفوذ مولکولی $[L^2/T]$
g_{ij}	ضریب هدایت هیدرولیکی گلو ij $[L/T]$
J_{ij}	فلاکس جرمی در هر گلو $[L/T]$
l	طول گلو ij $[L]$
L	طول شبکه $[L]$
M	نسبت تحرک [-]
p	جزء گلوهای بسته [-]
P_i	فشار گره i $[ML^{-1}T^{-2}]$
P_j	فشار گره j $[ML^{-1}T^{-2}]$
Pe	عدد پکلت [-]
Pe_{ij}	عدد پکلت در گلو ij [-]
r	فاصله در جهت شعاعی $[L]$
R	شعاع لوله‌ی موئین $[L]$
R_{avg}	شعاع متوسط گلوها $[L]$
R_{ij}	شعاع گلو ij $[L]$
S_{ij}	سطح مقطع گلو ij $[L^2]$
t	زمان $[T]$

X_{ij}	طول قسمتی از گلو ij که با مخلوط سیال جابه‌جا شوند و جابجاکننده پر شده است [L]	t_{ij}	زمان عبور از گلو ij [T]
z	عدد اتصال در شبکه [-]	$t_{.ij}$	زمانی که غلظت به غلظت اولیه ۰/۸۶ است [T]
$\langle z \rangle$	عدد اتصال متوسط در شبکه [-]	$t_{.i}$	زمانی که غلظت به غلظت اولیه ۰/۸۴ است [T]
α	پارامتر در توزیع ویبال برای تعیین شعاع موثر گلو [-]	Δt	بازه زمانی برای پیشروی جبهه سیال [T]
β	پارامتر در توزیع ویبال برای تعیین شعاع موثر گلو [-]	v	سرعت در لوله موئین [L/T]
η_1	ویسکوزیته سیال جابجا کننده [ML ⁻¹ T]	v_m	سرعت ماکزیمم در مسیر [L/T]
η_2	ویسکوزیته سیال جابجا شونده [ML ⁻¹ T]	v_{ij}	سرعت در گلو ij [L/T]
η_m	ویسکوزیته موثر مخلوط دو سیال [ML ⁻¹ T]	x	فاصله در جهت طولی [L]
		x	اعداد رندم بین صفر و یک در توزیع ویبال [-]

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۶/۲ ، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۸/۴

مراجع

- [1] Sorbie K.S., Clifford P.J., The Inclusion of Molecular Diffusion Effects in the Network Modeling of Hydrodynamic Dispersion in Porous Media, *Chem. Eng. Sci.*, **46**, p. 2525 (1991).
- [2] Koplik J., Redner S., Wilkinson D., Transport and Dispersion in Random Networks with Percolation Disorder, *Phys. Rev.*, **A 37**, p. 2619 (1988).
- [3] Sahimi M., Hughes B.D., Scriven L.E., Davis, H., Dispersion in Flow Through Porous Media: I. One-Phase Flow, *Chem. Eng. Sci.*, **41**, p. 2103 (1986).
- [4] Berkowitz B., Scher H., Anomalous Transport in Random Fracture Networks, *Phys. Rev. Lett.*, **79**, p. 4038 (1997).
- [5] Hull L.C., Koslow K.N., Stream Line Routing Through Fracture Junctions, *Water Resources Reservoir*, **22**, p. 1731 (1986).
- [6] Makes H.A., Andrade J.S., Standly H.E., Tracer Dispersion in a Percolation Network with Special Correlations, *Phy. Rev.*, **E 61**, p. 583 (2000).
- [7] Simon R., Kelsey F.J., The Use of Capillary Tube Networks in Reservoir Performance Studies: I. Equal Viscosity Miscible Displacements, *SPE J.*, **11**, p. 99 (1971).
- [8] Blunt M.J., Detailed Physics, Predictive Capabilities, and Macroscopic Consequences for Pore Network Models of Multiphase Flow, *Adv. Water Res.*, **25**, p. 1069 (2002).
- [9] Rhodes M.E., Blunt M.J., An Exact Particle Tracking Algorithm for Advective Dispersive Transport in Networks with Complete Mixing at Nodes, *Water Resources Res.*, **42**, p. W0450 (2006).
- [10] Bakke S., øren, P.E., Three Dimensional Pore Scale Modeling of Sandstone and Flow Simulations in the Pore Networks, *SPE J.*, **2**, p. 136 (1997).
- [11] Valvatne P.H., Blunt M.J., Predictive Pore Scale Modeling of Two Phase Flow in Mix Wet Media, *Water Resource Res.*, **40**, p. wo7406, (2004).
- [12] Piri M., Blunt M.J., Three Dimensional Mixed Wet Random Pore Scale Network Modeling of Two and Three Phase Flow in Porous Media. II Results, *Phy. Rev.*, **E**, p. 71, (2005).

- [13] Bijeljic B., Muggeridge A.H., Blunt M.J., Pore Scale Modeling of Longitudinal Dispersion, *J. Water Resour. Res.*, **40**, p. W11501 (2004).
- [14] DeArcangelis L., Koplik J., Redner S., Wilkinson D., Hydrodynamic Dispersion in Network Models of Porous Media, *Phys. Rev. Lett.*, **57**, p. 996 (1986).
- [15] Sahimi M., Flow Phenomena in Rocks from Continuum Models to Fractals, Percolations, Cellular Automate and Simulated annealing, *Rev. Mod. Physics*, **65**, p. 1393 (1993).
- [16] DeGennes, P. G., La Percolation: un Concept Unificateur, *J. Recherche*, **7**, p. 919 (1976).
- [17] Sahimi M., Imdakm A.O., The Effect of Morphological Disorder on Hydrodynamic Dispersion in Flow Through Porous Media, *J. Phys. A Math. Gen.*, **21**, p. 3833 (1988).
- [18] Havlin S., Arraham B.D., Diffusion in Disordered Media, *J. Adv. Phys.*, **51**, p. 187 (2002).
- [19] Berkovitz B.C., Naumann C., Smith L., Mass Transfer at Fracture Intersections: an Evaluation of Mixing Models, *J. Water Resour. Res.*, **30**, p. 1765 (1994).
- [20] Delshad M., McAllister D.J., Pope G.A., Rouse B.A., Multiphase Dispersion and Relative Permeability Experiments, *SPE J.*, **25**, p.476 (1985).
- [21] Taylor G.I., Dispersion of Soluble Matter in Solvent Flowing Slowly Through a Tube, *Proc. Roy. Soc.*, **219(A)**, p. 186 (1953).
- [22] Aris R., On the Dispersion of a Solute in a Fluid Flowing Through a Tube, *Proc. Roy. Soc.*, **235(A)**, p. 67 (1956).
- [23] Sahimi M., "Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock", VCH, Weinheim, pp.449 (1995).
- [24] Owen J.E., Resistivity of Fluid Filled Porous Body, *Trans. AIME*, **195**, p. 166 (1952).
- [25] Siddiqui H. and Sahimi M., Computer Simulations of Miscible Displacement Processes in Disordered Porous Media, *Chem. Eng. Sci.*, **45**, p. 163 (1990).
- [26] Fatt I., Network Model to Gas Diffusion in Moist Porous Media, *Trans. AIME*, **207**, p. 144 (1956).
- [27] Bijelic B., Blunt M.J., Dispersion at Pore Scale Unifying Experiment, Pore Network Modeling and Continuous Time Random Walk Theory, *American Geophysical Union*, p.H14B-04 (2006).
- [28] Koval E.J., A Method of Predicting the Performance of Unstable Miscible Displacement in Heterogeneous Media, *Soc. Pet. Eng. J., Trans. AIME*, **228**, p. 145 (1963).
- [29] Delshad M., McAllister D.J., Pope G.A. and Rouse B.A., Multiphase Dispersion and Relative Permeability Experiments, *SPE J.*, **25**, p.476 (1985).
- [30] Salter S.J., Mohanty K.K., Multiphase Flow in Porous Media: I. Macroscopic Observations and Modeling, *SPE* **11017**, (1982).
- [31] Edwards M.F., Richardson J.F., Gas Dispersion in Packed Beds, *J. Chem. Eng. Sci.*, **23**, p.109 (1968).
- [32] Harleman D.R.F., Rumer, R.R., Longitudinal and Lateral Dispersion in an Isotropic Porous. Medium, *Fluid Mech*, **16**, p.385 (1963).

- [33] Han N.W., Bhakta J., Carbonell R.G., Longitudinal and Lateral Dispersion in Packed Beds: Effect of Column Length and Particle Size Distribution, *American Ins. Chem. Eng. J.*, **31**, p. 277 (1985).
- [34] Behrouz T., Kharrat R., Experimental Investigation of Miscible Displacement in Heavy Oil: Using Glass Type Micro model, *Iran. Chem. Chem. Eng. (JCCE)*, **26**(4), p. 73 (2007).

Archive of SID