

استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای تعیین شرایط تزریق بهینه سیال پیششوی در عملیات اسیدکاری چاههای نفتی

(دریافت مقاله: ۱/۱۱/۵ - ۱۴ – دریافت نسخه نهایی: ۱/۲/۲۴)

چکیده- رفتار جابجایی نفت و میزان به دام افتادن آن در ناحیه اطراف چاه توسط سیال پیش شوی فرآیند اسیدکاری حایز اهمیت است. در این مطالعه، رفتار ویسکوز و موئینگی جریان دو فازی در مقیاس منفذی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این کار یک مدل دو بعدی، بر اساس معادلات میدان فازی کان هیلیارد و ناویر استوکس، ایجاد و با استفاده از روش اجزای محدود حل شد. با توجه در این کار یک مدل دو بعدی، بر اساس معادلات میدان فازی کان هیلیارد و ناویر استوکس، ایجاد و با استفاده از روش اجزای محدود حل شد. با توجه مقایسه شد. پن وهای حاکم در این جابجایی، نمودار فازی براساس عدد موئینگی و نسبت ویسکوزیته تهیه و سپس با کارهای تجربی گزارش شده قبلی مقایسه شد. پس از شناسایی حداکثر و حداقل دامنه عدد موئینگی (Nc) و نسبت ویسکوزیته (M)، پایدارترین منطقه جابجایی در 0.5 ≈ M کور یه مقایسه شد. پس از شناسایی حداکثر و حداقل دامنه عدد موئینگی (Nc) و نسبت ویسکوزیته (M)، پایدارترین منطقه جابجایی در 0.5 ≈ M کور یه مقایسه شد. پس از شناسایی حداکثر و حداقل دامنه عدد موئینگی (Nc) و نسبت ویسکوزیته (M)، پایدارترین منطقه جابجایی در 0.5 ≈ M کور یه مقایسه شد. پس از شناسایی حداکثر و حداقل دامنه عدد موئینگی (Nc) و نسبت ویسکوزیته (M)، پایدارترین منطقه جابجایی در 0.5 ≈ M کور یه مقایسه شد. پس از شناسایی حداکثر و حداقل دامنه عدد موئینگی (Nc) و نسبت ویسکوزیته (M)، پایدارترین منطقه جابجایی در 0.5 ≈ M کور یه کور یه مقایسه شد. پس از شناسایی حداکثر و حداقل دامنه عدد موئینگی (Nc) و نوسبت ویسکوزیته (M)، پایدارترین منطقه جابجایی در 0.5 × 20 ه مع در در عدی موزینه (Nc)، پید موئینگی (Nc)، پید موئینگی (Nc) و در و Nc مور از گرفت. نفت (RF)، که شاهدی از پاکسازی ناحیه اطراف چاه است، با استفاده از طراحی ترکیب مرکزی و روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. نفت (RF)، که شاهدی از پاکسازی ناحیه اطراف چاه است، برای در اوراحی درکی و روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای محدوده انتخاب شده از متغیرهای مستقل، شرایط مناسب برای جریان دو فازی غیرقابل امتزاجی Log Nc و (S × 0.5 × 0

واژههای کلیدی: اسیدکاری، سیال پیش تزریق، دینامیک سیالات محاسباتی، آنالیز حساسیت، عدد موئینگی.

Using Computational Fluid Dynamics for Determining the Optimum Pre-flush Fluid Injection Condition During Matrix Acidizing

E. Sabouniha¹, M. Mohammadzadeh shirazi^{2*}, A. Kazemi¹ and S. Sh. Ayatollahi³

1- Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology

2- Department of Chemical and Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University

3- Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology

Abstract: Optimum oil displacement is the most important goal of pre-flush stage during matrix acidizing. In this study, the

* : مسئول مكاتبات، پست الكترونيكي:m.mohammadzadeh@shirazu.ac.ir

visco-capillary behavior of the two-phase flow in the pore-scale is analyzed using computational fluid dynamics. A twodimensional model, based on Cahn–Hilliard phase-field and Navier–Stokes equations, was established and solved using the finite element method. To recognize the effective forces of two-phase flow displacement, a stability phase diagram based on the Logarithm of capillary number (Nc) versus the Logarithm of viscosity ratio (M) was constructed and then compared with the reported experimental data. After identifying both viscous fingering and capillary fingering regions, the most stable displacement region was found to be located at Log $M \approx 0.5$ and Log $Nc \approx -2$. Furthermore, the impact of four independent variables that critically affect the efficiency of the pre-flush stage, including pore volume of injection (1<PV<5), capillary number (-6<Log Nc<0), viscosity ratio (-5<Log M < 2) and contact angle (), was investigated on the oil Recovery Factor (RF) using central composite design of response surface methodology. For the chosen range of independent variables, the optimum conditions for the immiscible two-phase flow (e.g., RF>0.95) occurred at Log M > 0, -4.5 <Log Nc < -2, PV>1, and $\theta > \pi/6$ conditions. It is worth mentioning that for Log M < 0, the optimum condition occurred at Log $M \approx 0$, Log $Nc \approx -3.5$, $PV \approx 4$ and $\theta \approx \pi/6$.

Keywords: Acidizing, Pre-flush fluid, Computational fluid dynamic, Sensitivity analysis, Capillary number.

۱ – مقدمه

تزریق اسید به سازند کربناته پیچیدگیهای متعددی در واکنش، محصولات جانبی و شرایط تزریق دارد که هر کدام از آنها میتوانند موفقیت یک عملیات اسیدکاری را تحت تأثیر قرار دهند. در این میان شرایط سطح سنگ و میزان اشباع سیالات

اطراف چاه قبل از تزریق اسید در میان پارامترهایی هستند که میتوانند بر کاهش میزان آسیبهای القایی ناشی از اسیدکاری (مانند تشکیل لجن)، نوع و میزان تزریق اسید، نوع افزایههای و نهایتاً هزینه عملیات تأثیر جدی بگذارند. در شرایط میدانی ایجاد شرایط بهینه از لحاظ اشباع سیالات اطراف چاه و نوع ترشوندگی سنگ، توسط تزریق سیالی واسط قبل از تزریق اسید

اصلی به نام سیال پیششوی^۱ انجام می شود. در حقیقت سیال پیش شوی نقش آماده سازی ناحیه آسیب دیده اطراف چاه را برای پذیر ش اسید ایفا می کند.

عمده تحقیقات آزمایشگاهی و مدلسازی اسیدکاری روی سنگهای آبدوست و شرایط سنگ اشباع از آب انجامشده است و شرایط بهینه تزریق اسید در آنها به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است. در واقع فرض تحقیقات بر این بوده است که به کمک تزریق سیالی ایدهآل قبل از اسید، تمامی سیالات هیدروکربنی از محدوده اطراف چاه دور شده است. در واقعیت، سازند چاه تولیدی نفت، عمدتاً شامل سنگ نفتدوست و ناحیه اطراف چاه اشباع از نفت است. تحقیقات اندکی در زمینه استفاده از سیال پیششوی و کاربرد آن در تغییر ترشوندگی و میزان اشباع سیال هیدروکربنی در اطراف چاه انجامشده است. در پژوهشی تأثیر تزریق یک سیال واسط بهمنظور تغییر اشباع هیدروکربن درون سنگ قبل از تزریق اسید روی میزان حجم اسید لازم برای شکل گیری کرم راهه در مغزه بهصورت آزمایشگاهی بررسی شده است [۱]. حضور نفت بر روی سطح سنگ و همچنین درون حفرات آن میتواند بر نمودار عملکرد بهینه تزریق اسید و نرخ واکنش اسید–سنگ تأثیر بگذارد. همچنین در تماس مستقیم اسید با نفت، ایجاد رسوبات لجن آسفالتينی و امولسيون،هایی با ویسکوزیته بالا (به عنوان یک آسیب سازند القایی) و اختلال در عملکرد افزایههای اسیدی مانند منحرفکننده های شیمیایی و... محتمل است. [۵-۲]

۱–۲– جابهجایی نفت در شرایط ناپایدار دهانه چاه

بهمنظور جلوگیری از تماس مستقیم اسید با نفت موجود در سازند، یافتن شرایط بهینه بهمنظور جابهجایی حداکثری سیال نفتی در اطراف چاه امری ضروری به نظر میرسد. تحقیقات گستردهای درباره جابهجایی دوفاز آب-نفت در محیط متخلخل (در مقیاس میکرو و ماکرو) در شرایط پایدار و نرخ سرعت پایین و با کاربرد ازدیاد برداشت نفت انجامشده است. به دلیل محدودیتهای آزمایشگاهی، عمدتا آنالیز حساسیت بر روی

یک یا دو پارامتر مشخص با سیالات محدود و در یک مدل خاص گزارش شده است. لنورماند و همکاران برای نخستین بار در سال ۱۹۸۸ جابهجایی دوفازی را برای محدوده گستردهای از سیالات در میکرومدل نفتدوست به ثبت رساندند. آنها تغییرات دماغه زنی و بازدهی جاروبی دوفازی را در میکرومدل مشاهده و برای نخستین بار نمودار فازی را برای لگاریتم عدد موئينگي^۲ (Nc) و لگاريتم نسبت ويسكوزيته سيال جابهجا كننده به سیال جابهجا شونده (M) رسم کردند. در این نمودار سیالات با M>1 در عدد موئینگی پایین در ناحیه دماغه زنی موئینگی^۳ و سیالات با M<1 و عدد موئینگی بالا در ناحیه دماغه زنی ویسکوز ٔ قرار می گیرند [۶]. ژانگ و همکاران تعدادی آزمایش روی جابهجایی نفت توسط آب در میکرومدل همگن آبدوست انجام دادند؛ آنها با بازنویسی نمودارهای فازی نشان دادند که علاوه بر نیروی ویسکوز و نیروی مویینگی، محل دقیق تغییر مرزهای فازی نیز در بهبود بازیافت نهایی نفت تأثير گذار است [٧].

۱–۳– آنالیز عددی و شبیهسازی

در طول سه دهه گذشته، مدلهای فیزیکی میکروساخته از محیط متخلخل (به عنوان مثال، میکرومدلها) به طور گستردهای برای درک اثرات مکانیزمهای مختلف که جریان دو فازی غیرقابل امتزاج را کنترل میکنند استفاده شده است [۸]. شبیهسازی عددی یک روش قابل اعتماد برای ارزیابی نتایج تجربی، بدون داشتن محدودیتهای آزمایشگاهی است. شبیهسازی عددی میتواند نتایج مربوط به حالت پایا و ناپایا را برای موقعیتهای مختلف فراهم کند. امیری و هامودا روش سطح تنظیمشده^۵ و روش میدان فازی کاهن هیلیارد^۶ را با استفاده از شبیهسازی جریان سیالات نفت–آب را در محیط مناسب برای شبیهسازی جریان سیالات نفت–آب را در محیط مناسب برای شیدای از ابا را در محیط مناحر یداد که پیش بینیهای مدل مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که پیش بینیهای مدل

روش های عددی در مهندسی، سال ۴۱، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۱

توافق خوبی با نتایج تجربی و تحلیلی دارند. امیری و هامودا از کامسول برای حل معادله کاهن هیلیارد میدان فازی و معادلات انتقال حرارت استفاده کردند تا فرآیندهای مختلف غیر همدمای جابجایی نفت-آب در محیط متخلخل را برای فرآیند ازدیاد برداشت شبیهسازی کنند [۱۰]. بر اساس این مطالعات، بهنظر میرسد که شبیهسازیهای عددی میتوانند جابه جایی در مقیاس منفذی را با دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج تجربی نشان دهند [۱۴–۱۱]

۲– معادلات حاکم بر مسئله و روش تحقیق

برای شبیهسازی جریان دوفازی غیرامتزاجی در این پژوهش از نرمافزار کامسول استفاده شد. در این نرمافزار به منظور شبیهسازی مسائل مختلف از روش المان محدود^۷ استفاده می شود.

۲-۱- معادلات حاکم بر مسئله

در نرمافزار کامسول بهمنظور بیان انتقال مومنتوم از معادلات ناویر استوکس^۸ استفاده میشود. به منظور لحاظ کردن اثر موئینگی و ترم کشش سطحی نیز، از روش میدان فازی استفاده شده است که در نهایت این معادله با معادله ناویر استوکس ترکیب و مدلسازی و شبیهسازی انجام میشود.

روش میدان فازی

روش میدان فازی بهمنظور حل مسائل جریان چندفازی مورد استفاده قرار می گیرد. منطق این روش، بر اساس استفاده از قوانین انرژی آزاد^۹ برای یک سیستم ایزوله گرمایی است. در این روش سطح تماس بین دو سیال به عنوان یک لایه متحرک در نظر گرفته می شود که خواص سیالات به طور یکنواخت در طول این لایه عوض می شود. این تغییرات خواص از یک سیال به سیال دیگر با پارامتر بدون بعد میدان فازی (φ) شناخته می شود. این پارامتر در لایه مرزی بین دوفاز از -۱ تا ۱ تغییر می کند و در هر فاز ثابت مقادیر برابر ۱ و -۱ دارد. مدل چگالی انرژی آزاد برای یک جریان دوفازی برابر است با:

$$F(\phi) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \lambda \left| \nabla \phi \right|^2 + f_0(\phi) \right] dx$$
(1)
et al. (1)
et al. (1)
et al. (1)

انتگرال سمت راست تساوی در واقع بیانگر انرژی سطح است. دومین بخش از انتگرال نیز بیانکننده انرژی کلی سیستم است که از رابطه (۲) بهدست میآید:

$$f_0(\phi) = \frac{\lambda}{4\epsilon^2} (\phi^2 - 1)^2 \tag{7}$$

در رابطه (۲)، λ بیانکننده دانسیته انرژی مخلوط, (φ) بیان کننده پارامتر بدون بعد میدان فازی و ع بیانکننده ضخامت سطح تماس است. ترکیب این دو پارامتر با یکدیگر از طریق رابطه (۳)، کشش بین سطحی را تولید میکند.

$$\sigma = \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{\lambda}{\varepsilon}$$
(٣)

معادله کاهن هیلیارد پدیدههای تحرک و انتقال^۱ هر یک از فازها را در دینامیک سیال دوفازی روش میدان فازی توصیف میکند. این معادله به نوعی ایجاد، تکامل و حذف لایه مرزی بین دو سیال را شبیهسازی میکند. بنابراین معادلات کاهن هیلیارد برای ردیابی لایه مرزی بین دو سطح سیال از طریق زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u.\nabla \phi = \nabla .(\gamma \nabla G) \tag{6}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u.\nabla \phi = \nabla .(\frac{\gamma \lambda}{\epsilon^2}) \nabla \psi \tag{(a)}$$

$$\psi = -\nabla . \varepsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1)\phi \tag{9}$$

در این روابط، Ψ پارامتر کمکی میدان فازی است که وظیفه شکستن معادله مرتبه چهارم کاهن هیلیارد (معادله ۴) را به دو معادله مرتبه دو (معادلات ۵ و ۶) بر عهده دارد. در این رابطه پارامترهای u سرعت سیال، γ تحرکپذیری، و G نیز ترم پتانسیل شیمیایی معادلهی حاکم است. (۷) $\left[\frac{c^2}{2} + \phi(\phi^2 - 1) + \phi(\phi^2 - 1) \right]$ ضخامت سطح تماس را میتوان به صورت نوعی پارامتر برابر با $\frac{b}{2}$ در نظر گرفت که h_c سایز مشخصه مش در ناحیهای

$$F_{st} = \frac{2.8}{3G\nabla\phi} \tag{17}$$

همان طور که مشاهده می شود، از آنجایی که در معادله میدان فازی به سطحی مشترک ضخامت داده می شود، کشش سطحی به صورت یک نیروی حجمی در معادله مومنتوم با استفاده از متغیرهای Ψ و گرادیان پارامتر میدان فازی بیان شده است. این محاسبه از استفاده کردن از انحنا سطح که در حل به روش عددی مشکل ساز است جلوگیری می کند. شایان ذکر است که در این پژوهش به دلیل شبیه سازی دوبعدی از نیروی گرانش صرفنظر شده است. به علاوه برای تایید این فرضیه می توان از مفهوم عدد باند استفاده کرد:

$$B_0 = \frac{(\rho_w - \rho_o)gR^2}{\sigma}$$
(14)

در این رابطه، g شتاب گرانش و R میانگین سایز حفرات هستند. هر چه این عدد از ۱ کوچکتر شود با اطمینان بیشتری میتوان از نیروی گرانش صرف نظر کرد. با توجه به اینکه در این پژوهش سیال آب و نفت (با دانسیته متوسط ۰۰۵ کیلوگرم بر متر مکعب و کشش سطحی متوسط ۲۵ /۰ نیوتن بر متر) بهترتیب عنوان سیال مرجع ورودی و اولیه موجود در محیط در نظر گرفته شدهاند، میتوان با قاطعیت اعلام کرد که گستره تغییرات عدد باند در این پژوهش با داشتن میانگین سایز حفرات ۰۵۰ میکرون برابر با ۹۸ ۰۰ است که بسیار کمتر از ۱ خواهد بود. بنابراین میتوان از نیروی گرانش صرف نظر کرد.

۳- روش حل
برای ساخت مدل دوبعدی ناهمگن از مدل واقعی سنگ دولومیتی
بهره گرفته شد. گلوگاهها و بدنه محیط متخلخل در این مدل از ۱۰
تا ۱۰۰۰ متغیر است. شماتیک مدل ناهمگن و خصوصیات فیزیکی
این مدل را در شکل (۱) و جدول (۱) مشاهده میکنید.

۳-۱- مش**بندی** بهمنظور تأثیر اندازه مش در جواب نهایی و همچنین زمانبر که توسط سطح تماس رد شده است. پارامتر تحرکپذیری، مقیاس زمانی پراکندگی کان هیلیارد را مشخص میکند و باید بهصورت منطقی انتخاب شود. این پارامتر باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند یک ضخامت ثابت سطح تماس را نگه دارد و به اندازه کافی کوچک باشد تا ترم های جابجایی بهطور کامل از بین نروند. مقدار قراردادی این پارامتر برابر ²ع = γ است که معمولا حدس اولیه مناسبی است. این مدل یک تحرکپذیری بالاتری را استفاده کرده تا به تغییرات فشاری درستی در طول سطح تماس برسد. در این روش کسر حجمی هر سیال بهصورت زیر تعریف میشود.

$$V_{f1} = \frac{1 - \phi}{2}, V_{f2} = \frac{1 + \phi}{2}$$
 (A)

مدل دانسیته و ویسکوزیته مخلوط نیز به صورت زیر تعریف شده تا بهصورت آرام در طول سطح تماس تغییر کند.

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) V_{f_2} \tag{(4)}$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) V_{f2}$$
 (1 •)

بقای جرم و انتقال مومنتوم
معادلات ناویر استوکس، انتقال مومنتوم را برای سیالاتی با
دانسیته ثابت بیان میکند. بهمنظور لحاظ کردن اثر موئینگی ترم
کشش سطحی در مدل وارد شده است. بنابراین معادلات ناویر
کشش سطحی در مدل وارد شده است. بنابراین معادلات ناویر
کشش سطحی در مدل وارد شده است. استوکس نیر مواهد بود.
استوکس و پیوستگی (بقای جرم) بهصورت زیر خواهد بود.
(۱۱)
$$-\nabla p + \nabla [\mu (\nabla u + (\nabla u)^T)] + G \nabla \phi$$

$$\nabla . \mathbf{u} = \mathbf{0} \tag{11}$$

در این رابطه ρ بیانگر چگالی، µ ویسکوزیتهی دینامیک، u نمایانگر سرعت، P نمایانگر فشار و g شتاب ثقلی است. F_{st} نیروی بین سطحی است که در سطح تماس دو سیال عمل میکند.

در روش میدان فازی، ترم کشش سطحی طبق رابطه (۱۳) محاسبه میشود.

روش های عددی در مهندسی، سال ۴۱، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۱



شکل ۱– شماتیک مدل ناهمگن مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی مدل ناهمگن مورد استفاده در این پژوهش

-	مدل	تراوایی(D)	تخلخل(٪)	ابعاد مدل(cm ²)		
-	ناهمگن	۵/۲۱	١٠	۵/۰۶		

بودن اجرای شبیه سازی ها، لازم است که اندازه بهینه مشبندی تعیین شود. به همین منظور اندازه مشبندی "ریزتر" تا "نرمال" در یک شبیه سازی دو فازی آب-نفت آزمایشی تغییر داده شد و میزان بازیافت از مدل در حجم تزریق های ۱-۵ با یکدیگر مقایسه شدند (شکل ۲-ب) پس از انجام آنالیز استقلال از مش در مدل ناهمگن و مقایسه اندازه "ریزتر" با موارد "ریز" و "نرمال"، تفاوت زمان شبیه سازی در این مدل به بیش از ۱۵ ساعت هم رسید. با توجه زمان گیر بودن شبیه سازی سیستم در مش بندی های مورد بررسی و مقایسه نتایج، می توان استقلال از مش را از سایز "ریز" به بعد نتیجه گرفت. از همین رو در سیستم مورد بحث از سایز "ریز "برای انجام شبیه سازی استفاده شد. (شکل ۲-الف).

۳–۲– شرايط اوليه

در ابتدا نفت در مدل حضور داشته و آب در قسمت ورودی مدل است. سرعت در ابتدا صفر بوده و فشار اولیه مدل برابر فشار اتمسفر است.

۳**-۳- شرایط مرزی** ۳**-۳-۱- ورودی** شرط مرزی در ورودی این مدل همانند عملیاتهای واقعی

تزریق، سرعت (دبی) ثابت در نظر گرفته شد. سرعت ثابت ورودی سیال جابه جاکننده با توجه به سرعت تزریق سیال پیش شوی در عملیات های میدانی تزریق اسید در جنوب ایران و دامنه مجاز سرعت برای جریان آرام در مدل ها در سه سطح با توجه به اندازه عدد موئینگی محاسبه شد.

شرط مرزی در ورودی این مدل همانند عملیات های واقعی تزریق، سرعت(دبی) ثابت در نظر گرفته شد. سرعت ثابت ورودی سیال جابهجاکننده با توجه به سرعت تزریق سیال پیش شوی در عملیات های میدانی تزریق اسید در جنوب ایران و دامنه مجاز سرعت برای جریان آرام در مدل ها در سه سطح با توجه به اندازه عدد موئینگی محاسبه شد. برای محاسبه اندازه سرعت ورودی در عملیات پیش تزریق فرایند اسید کاری، داده های دبی پمپ تزریق، ناحیه تحت تزریق و قطر چاه برای قرار گرفت. محاسبه سرعت ظاهری در این چاه ها نشان داد که بازه سرعت تزریق به صورت میانگین در زمان تزریق سیال پیش شوی، بین ۲۰/۰ تا ۱/۰ سانتی متر بر ثانیه متغیر بسته به شرایط چاه متغیر است. در ادامه برای آنالیز حساسیت عدد موئینگی، نیاز بود تا حد مجاز سرعت در دو مدل همگن و مؤینگی، نیاز بود تا حد مجاز سرعت در دو مدل همگن و



شکل ۲– الف) توزیع مش بندی مثلثی ریز در سیستم ب) آنالیز استقلال از مش

کسر خطای غیردارسی برای تعیین این حد استفاده شد. زنگ و همکاران [10] ضابطهای عمومی و واحد برای نقطه تغییر رژیم جریان ارائه کردند. آنها با استفاده از تعریف عدد فورچهایمر، کسر خطای غیردارسی را ارائه کردند. این کسر در واقع نشاندهنده میزان خطا هنگام فرض دارسی و چشمپوشی از تأثیرات جریان غیردارسی را در مساله نشان میدهد. زنگ و ممکاران با انجام آزمایش تزریق نیتروژن با نرخهای متفاوت در سه مدل مغزه متفاوت مرز ۱۰ درصد خطا را برای شروع جریان غیردارسی پیشنهاد دادند. ضریب فورچهایمر β نیز از رابطه ارگان [17] محاسبه شد. در معادلات زیر نحوه بهدست آوردن عدد و ضریب فورچهایمر و کسر خطای غیردارسی نشان داده شده است:

$$F_{O} = \frac{k\beta\rho v}{\mu} \tag{10}$$

$$\beta = ab^{-\frac{1}{2}}(K)^{-\frac{1}{2}}f^{-\frac{3}{2}}$$
(19)

$$E = \frac{Fo}{1 + Fo}$$
(1V)

a و b به ترتیب ۱/۷ و ۱۵۰ و واحد تراوایی برابر (^m) است. ویسکوزیته و دانسیته سیال تزریقی برای محاسبه عدد فورچهایمر نیز برابر ۱ سنتی پویز و ۱۰۰۰ کیلوگرم بر

مترمکعب قرار داده شد. حد مجاز سرعت برای عدم تشکیل جریان غیردارسی یا آشفته در جدول (۲) نشان داده شده است. مقایسه محدوده سرعت مجاز و سرعت بهدست آمده از دادههای عملیاتی نشان میدهد که بازه سرعت معمول استفاده شده به هنگام تزریق سیال مایع در عملیات انگیزش چاه، در محدوده جریان آرام قرار میگیرد و ابهام وجود جریان آشفته در ناحیه اطراف چاه هنگام تزریق سیال پیش شوی به طور کامل برطرف می شود؛ این در حالی است که طبق محاسبات صورت گرفته، میزان تراوایی در سنگهای کربناته بسیار کمتر از میزان تراوایی محاسبه شده برای مدل های مورد استفاده در این پژوهش بوده که این موضوع باعث افزایش کران بالای سرعت آرام در ناحیه اطراف چاه در واقعیت خواهد شد.

۳-۳-۲- خروجی

در همه مدلها در قسمت خروجی، فشار برابر با فشار اتمسفر قرار داده شده است که همان شرایط آزمایش میکرومدل است.

۳-۳-۳-دیواره شرایط مرزی دیواره تر شونده^۱ و عدم لغزش^۲ در دیواره از فرضیات اولیه مسئله به شمار میرود.

جدول ۲– شرایط مرزی تا قبل از رسیدن به جریان آشفته

عدد فورچهايمر	درصد میزان خطا	حداکثر سرعت مجاز (متر بر ثانیه)
۰/۱۰۳	٩/٨	۱ ۰

۳-۴- طراحی ترکیب مرکزی

برای طراحی برنامه شبیه سازی از روش ترکیب مرکزی استفاده شد. مقدار پارامتر باقیمانده یا α از لحاظ فاصله از نقطه مرکزی تعیین می شود و اگر فاصله بین نقطه مرکزی و هر نقطه نمونه به ۱ برسد، فاصله نقاط ستاره از نقطه مرکزی می تواند از طریق روش های مختلف انتخاب شود. در این پژوهش برای رسیدن به خاصیت چرخشی و به طبع آن قابلیت آنالیز آماری بهتر، از $\sqrt{2} = \alpha$ استفاده شد.

طراحی آزمایش شرایط موجود در این پژوهش ترکیب مرکزی مرتبه دوم افزوده انتخاب شد. این روش از آنجا که تکمیل شده روش فاکتوریل ۳ سطحی است تمام برهمکنش ها را به خوبی نشان میدهد. از طرفی با در نظر گرفتن ۵ سطح برای هر متغیر تمامی حالات سطح پاسخ قابل پیشبینی است.

تعيين محدوده تغيير پارامترها

محدوده تغییر متغیرها و تعداد سطوح هر متغیر با توجه به دادهها و تجربه عملیاتی اسیدکاری تعیین شد؛ متعاقبا عدد موئینگی که بهصورت $\frac{\mu_w u_{Inj}}{\sigma} = N_c$ تعریف میشود، با توجه به دادههای عملیاتی و مرز جریان آرام در مدل، دامنه Log Nc از ۶- تا صفر در ۵ سطح با فواصل از پیش تعیینشده روش طراحی در نظر گرفته شد. برای نسبت ویسکوزیته که بهصورت $\frac{\mu}{\mu_0} = M$ تعریف میشود نیز دامنه M از ۵- تا ۲ با روند مشابه انتخاب شد. دامنه تغییرات ترشوندگی یا θ نیز از ۳۰ درجه (آبدوست) تا مالات ایک در نظر گرفته شد.

سطح پاسخ

پس از طراحی آزمایشها و انجام آنها، باید نتایج بهدستآمده

تحلیل و یک سطح پاسخ تولید شود. سطح پاسخ یک رابطه تجربی است که با رگرسیون، برای تخمین نتایج آزمایشها یا شبیهسازیها، بر آنها برازش میشود. از آنجایی که تعداد سطوح مورد بررسی در این پژوهش ۵ سطح است، سطح پاسخ بهدست آمده از مرتبه دو است. در این پژوهش از نرمافزار دیزاین اکسپرت^{۱۲} برای این کار استفاده شده است.

۴– آنالیز و تحلیل نتایج

جابهجایی دوفازی در مدل ناهمگن تفاوت زیادی با مدل همگن دارد. در این سیستم به علت وجود مسیرهای بیشتر با تنوع در قطر، اندازه و تراوایی، رفتار الگوهای جریانی پیچیدگی بیشتری دارد. به منظور درک بهتر و دقیق تر توزیع اشباع و مکانیزمهای اصلی جابهجایی غیرامتزاجی در این سیستم، آزمایشها شبیهسازی در محدودههای قابل پیشبینی نمودار میدان فازی انجام و با تغییر نقاط در جهت M و N در نمودار، رفتار الگوهای مختلف برای سیستم ناهمگن بازنویسی شد. برخلاف زمان بیشتری به سیال جابهجاکننده داده شود. از همین رو در شکل (۳) توزیع اشباع سیالات و مکانیزم الگوهای جریانی را در زاویه تماس ۹۰ درجه و پس از ۵ حجم تزریق به درون مدل را برای دامنه گستردهای از M و N ها که برای شناخت تأثیرگذاری نواحی مختلف دماغهزنی لازم است، نشان داده شده است.

۴–۱– دماغەزنى ويسكوز

دماغهزنی ویسکوز شامل مسیرهای پیوسته و یا منقطعی می شود که پهنایی به برزگی ۱ تا ۳ بدنه محیط متخلخل (۳۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرون) دارند. این جبهههای جریانی همواره رو به جلو حرکت میکنند و تغییر مسیر به سمت عقب، بالا و پایین



شکل ۳- توزیع اشباع و الگوی جریانی در نسبت ویسکوزیته و عدد موئینگیهای مختلف برای مدل ناهمگن

تشکیل شده به هم متصل هستند. در اواسط و نقطههای پایانی نیز درون جبهه تشکیل شده مقادیری از سیال جابه جا شونده به تله افتاده است. موارد ذکر شده نشان می دهد که در عدد موئینگی پایین و نسبت ویسکوزیته های بالا، مدل به سمت ناحیه موئینگی نزدیک شده است. شواهد نشان می دهد که ناحیه موئینگی برای مدل ناهمگن به ندرت در شرایط ناحیه اطراف چاه اتفاق می افتد.

۴-۳- جابهجایی یکنواخت

مکانیزم جابهجایی یکنواخت در مدل ناهمگن در 0.5<Log M و 2-< Nc در این ناحیه جبهه سیالی جابهجاکننده از گوشه پایین مدل شروع به حرکت میکند، اما پس از کمی پیش روی در این مسیر، جبهههای جریانی مابقی ماتریکس آغازشده و خود را سریع به جبهه جریانی اولیه میرسانند. این رفتار تا زمان میانشکنی دیده میشود. همان طور که در شکل (۳- چ) نشان داده شده است، درصد بسیار کمی از سیال اولیه در پشت جبهه جریانی باقی میماند و در صورت وجود عمدتا در مسیرهای ته بسته به تله میافتد. بازدهی این ناحیه پس از ۵ حجم از تزریق نزدیک به ۱۰۰ درصد خواهد شد.

۴–۴– ناحیه انتقالی

در مدل ناهمگن، ناحیه انتقالی نسبت به مدل همگن درصد بیشتری از نمودار فازی را تشکیل خواهد داد زیرا ساختار فیزیکی مدل پیچیدهتر و مکانیزم های رفتاری ثابت در محدوده کوچکتری مشاهده خواهند شد. به دلیل پیچیدهتر شدن مدل، مکانیزم های رفتاری در ناحیه انتقالی نیز پیچیدهتر و تشخیص آنها سختتر خواهد شد. بهطور کلی به مقایسه رفتار مکانیزم های اصلی جابهجایی دوفازی با نقاط این ناحیه، تفاوتهای رفتاری آن را مشخصتر کرد. به عنوان مثال در 1.5-M Log و 6-M شکل (۳- پ) جبهه جریانی از گوشه سمت پایین پیش روی خود را آغاز کرده است اما برخلاف سایر

روشهای عددی در مهندسی، سال ۴۱، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۱

به ندرت در آنها دیده می شود. همان طور که از شکل های (۳-الف و ب) مشخص است، جبهه جریانی ابتدا مسیری با تراوایی کمتر را انتخاب و به سمت خروجی در مسیری مستقیم حرکت میکند. شکل (۳- الف) که جابهجایی دوفازی در عدد موئینگی ۴/۲۵ و نسبت ویسکوزیته ۳/۲۵ را توصیف میکند، سیال از گوشه پایین مدل که پیچ و خم کمتری دارد و به طبع تراواییش بیشتر است، شروع به حرکت میکند و با تشکیل جبهه جریانی با عرض ۳ بدنه محیط متخلخل و ۳۰۰۰ میکرون به سمت خروجی مدل حرکت میکند. همانطور که از این شکل مشخص است، شاخههایی از این جبهه به سمت بالا و وسط مدل وجود دارد ولی مدت کوتاهی پس از تشکیل ادامه پیدا نکرده است. علاوه بر جبهه اصلی تشکیل شده در پایین مدل، جبهههایی در وسط و بالای مدل نیز شروع به تشکیل شدن كرده است ولى اندكى پس از تشكيل ادامه پيدا نكرده است. اين رفتار را در این سیستم ناهمگن میتوان به مکانیزم جابهجایی دماغهزنی ویسکوز نسبت داد. شکل (۳– ب) رفتار جریانی با لگاریتم عدد موئینگی ۱/۵- و لگاریتم نسبت ویسکوزیته ای مشابه شکل (۳– الف) یعنی ۳/۲۵– را نشان میدهد. مکانیزم اصلی جابهجایی در این نقطه نیز در زیرمجموعه دماغهزنی ويسكوز قرار مي گيرد. در اين شكل نيز دماغه ويسكوز اصل در پایین مدل تشکیل شده است. دماغههای دیگری نیز در وسط و بالای مدل شکل گرفته اند که برخلاف شکل (۳- الف) پس از ۵ حجم تزریق تا اواسط ماتریکس پیشروی کردهاند.

۲-۴- دماغەزنى موئينگى

در مدل همگن در محدوده 6-<Log Nc مکانیزم دماغهزنی به ندرت دیده شد. در ناحیه Log Nc و در Log Nc-5.5 که یک نمونه از آن در شکل (۳- ح) نشان داده شده است، جبهه جریانی تشکیل شده در گوشه پایین مدل، عرضی به طول ۵ بدنه محیط متخلخل (۷۰۰۰ میکرون) داشته و علاوه بر مسیر رو به جلو در پارهای از نقاط به سمت عقب و بالا نیز حرکت کرده است. به علاوه در این دماغه، تمام جبهههای جریانی



شکل ۴- نمودار فازی مدل ناهمگن

انتقالی بین دماغهزنی موئینگی و جابهجایی یکنواخت نیز مشابه رفتار انتقالی بین ناحیه ویسکوز و جابهجایی یکنواخت است با این تفاوت که حجم کمتری از سیال اولیه پس از رسیدن به پایداری در مدل به دام میافتد شکل (۳–ج).

۴–۵– تعیین نمودار فازی

با مقایسه الگوهای جریانی، مرزهای نواحی اصلی جابهجایی در نمودار فازی با در نظر گرفتن عدم قطعیتهای احتمالی تعیین شد شکل (۴). ناحیه خاکستری عدم قطعیت احتمالی برای مرز هر ناحیه را نشان میدهد. خطوط قرمز و زرد نیز به ترتیب مرزهای بهدست آمده در آزمایشهای ژانگ و لنورماند را نشان میدهند.

۴–۶– محاسبه سطح پاسخ

جدول (۳) نقاط شبیهسازی که طبق برنامه طراحی آزمایش برای مدل ناهمگن انجامشده است را نشان میدهد. شایان ذکر است که زمان شبیهسازی برای هر یک از این نقاط برای هر یک از زمانهای ۱–۵ حجم حجم تزریق، یادداشت و به نرمافزار طراحی

نقاطی که مکانیزم دماغهزنی ویسکوز در آنها دیده شد، در میانه مسیر با ایجاد شاخهای متصل کل میانه و مسیر بالا سمت راست را عبور و از گوشه بالا میانشکنی کرده است. این الگو را که برخی از خصوصیات دماغهزنی ویسکوز (مسیر مستقیم با عرض کم) و یارهای از خصوصیات دماغهزنی موئینگی (حرکت جبهه متصل به سمت میانه ماتریکس و مشاهده پیش روی به سمت بالا و عقب) را در خود دارد می توان به ناحیه انتقالی بین نواحی دماغهزنی ویسکوز و موئینگی نسبت داد. در پاره از نقاط شکل (۳– ت، ث) جبهههای جریانی هنگام تشکیل رفتاری همانند ناحیه دماغهزنی ویسکوز از خود نشان میدهند. در حجم کم تزریق دماغههای تشکیل شده با عرضی کم به سمت جلو حرکت میکنند. اما پس از میانشکنی جبهههای از قبل تشکیل شده نیز به پیش روی خود ادامه میدهند و خود را به انتها میرسانند. این رفتار را می توان به ناحیه جابهجایی یکنواخت نسبت داد. مقادیری از سیال اولیه (تا ۲۰ درصد) در زمان پایداری جریان در ماتریکس به دام میافتد. این الگو که عموما بعد از LogM>-2 و در LogNc>-5 دیده شد می توان به ناحیه انتقالی بین دماغهزنی ویسکوز و جابهجایی یکنواخت نسبت داد. رفتار ناحیه

روش های عددی در مهندسی، سال ۴۱، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۱

تعداد شبيه سازى	Log Nc	Log M	زاويه تماس (θ)						
١	$-1/\Delta$	۰/۲۵	170						
٢	$-1/\Delta$	۰/۲۵	۶.						
٣	-۴/۵	-٣/٢۵	١٢٠						
۴	-٣	-1/۵	۹ ۰						
۵	-٣	۲	۹ ۰						
8	٥	۵.۱–	۹ ۰						
V	-4/2	۰/۲۵	۱۲۰						
٨	$-1/\Delta$	-٣/٢۵	9 •						
٩	$-F/\Delta$	-٣/٢۵	۶ •						
١٠	-9	-1/۵	۹ ۰						
11	-4/2	۰/۲۵	9 •						
١٢	-٣	-1/۵	٣٠						
١٣	-٣	۵–	۹ ۰						
14	-٣	-1/۵	100						
١٥	-1/۵	-٣/٢۵	170						

جدول ۳- جدول طراحی آزمایش برای مدل ناهمگن

آزمایش برای انجام آنالیز داده شد. در ادامه شکل (۵) آنالیز سطح پاسخ برای مدل ناهمگن بیان میکند. طبق آنالیز آنووا، این مدل با دقت پیشبینی نزدیک به ۳۰ از اعتبار لازم برای پیشبینی مدل ناهمگن بهرهمند است. هر یک از پارامترهای حجم تزریق، عدد موئینگی(Log Nc)، نسبت ویسکوزیته(Log M) و زاویه تماس با حروف A، B، C و C نشان داده شدهاند.

از این آنالیز مشخص شد که در مدل ناهمگن پارامترهای حجم تزریق-عدد موئینگی، عدد موئینگی-نسبت ویسکوزیته ها، عدد موئینگی- زاویه تماس و نسبت ویسکوزیته-زاویه تماس با یکدیگر برهمکنش معنادار دارند.

۴–۷– تحلیل سطح پاسخ ۴–۷–۱– تأثیر پارامتر حجم تزریق بررسی پارامتر حجم تزریق به طور مجزا نشان داد که این پارامتر همواره تأثیر مثبتی در بازدهی تزریق خواهد داشت. البته شیب این تأثیر وابسته به پارامتر عدد موئینگی است و این دو پارامتر روی

یکدیگر اثر خواهند گذاشت. در شکل (۶) تأثیر حجم تزریق در مدل را عدد موئینگی ۳- و نسبت ویسکوزیته ۱/۵- و ترشوندگی ۹۰ درجه مشاهده میشود. همانطور که از این نمودار پیدا است شیب این خط تا رسیدن به ۲/۵ حجم حفره، مثبت است اما با افزایش حجم تزریق تغییری در بازدهی رخ نخواهد داد و جریان به پایداری خواهد رسید. هنگام جریان دوفازی سیال پیششوی نفت، فاز نفت قبل از رسیدن به زمان میانشکنی با شیب ثابت از سیستم خارج میشود. بعد از زمان میانشکنی با شیب ثابت از سیستم تدریج افزایش یافته به ۱۰۰ درصد می رسد. مقاومت نیروی موئینگی در حفرات ریز و تفاوت ویسکوزیته سیالات، دلیل اصلی به دام افتادن نفت در این زمان است [۱۷ و ۱۸].

۲-۷-۲ - تأثیر پارامتر نسبت ویسکوزیته دو سیال
 شکل (۷) تأثیر بهدست آمده نسبت ویسکوزیته دو سیال بر
 روی سطح پاسخ را در لگاریتم عدد موئینگی ۳-، ترشوندگی
 ۹۰ درجه و یک حجم حفره از تزریق را نشان میدهد.

روشهای عددی در مهندسی، سال ۴۱، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۱

		Response 1:RF Transform: Power Lambda: 0.21, Constant: 0						
		Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
		Model	2.02	10	0.2020	51.67	< 0.0001	significant
		A-PV	0.2820	1	0.2820	72.14	< 0.0001	
		B-LOG CA	0.0477	1	0.0477	12.21	0.0009	
		C-LOG M	1.28	1	1.28	327.66	< 0.0001	
		D-Theta	0.1238	1	0.1238	31.67	< 0.0001	
		AB	0.0242	1	0.0242	6.19	0.0155	
		BC	0.0290	1	0.0290	7.41	0.0084	
		BD	0.0449	1	0.049	11.49	0.0012	
2		CD	0.0216	1	0.0216	5.53	0.0218	
R ⁴	0.8898	A ²	0.0395	1	0.0395	10.11	0.0023	
Adjusted R ²	0.8726	B ²	0.0957	1	0.0957	24.48	< 0.0001	
Predicted R ²	0.8538	Residual	0.2502	64	0.0039			
Adeq Precision	296.999	Cor Total	2.27	74				

Fit Statistics			
Std. Dev.	0.0625	R ²	0.8898
Mean	2.37	Adjusted R ²	0.8726
C.V. %	2.64	Predicted R ²	0.8538
		Adeq Precision	296.999

شکل ۵- الف) آنالیز آنووا ب) دقت سطح پاسخ پیش بینی شده در مدل ناهمگن



شکل ۶- تأثیر حجم تزریق بر بازدهی جابهجایی دوفازی مدل ناهمگن

زیادی از نفت در فازهای اولیه تزریق می شود [۱۹]. با افزایش ويسكوزيته فاز جابهجاكننده، اين فاز فرصت غلبه بر نيروى موئينگي در ابعاد کوچکتر را خواهد يافت.

۴–۷–۳– تأثیر پارامتر عدد موئینگی

میزان اشباع سیال جابهجاشونده را در شکل (۸) در یک حجم تزریق، لگاریتم نسبت ویسکوزیته ۱/۵- و ترشوندگی ۹۰ درجه مشاهده مي كنيد. اين نمودار نشان مي دهد كه اشباع سيال

همانطور که از نمودار مشخص است، میزان بازدهی تزریق با افزایش پارامتر نسبت ویسکوزیته افزایش می یابد و در Log M= 2 به بیشترین میزان خود خواهد رسید. طراحی آزمایش نشان داد که این پارامتر تاثیر تعاملی با پارامترهای عدد موئینگی و زاویه تماس دارد که در بخشهای مرتبط با تأثیر عدد موئینگی و زاویه تماس به آن پرداخته خواهد شد. میانشکنی زودهنگام در هندسههای پیچیدهتر به دلیل تفاوت فاحش میان ابعاد حفرات و گلوگاهها تشدید و سبب به دام افتادن مقادیر

الف



شکل ۷- تاثیر نسبت ویسکوزیته سیالات بر بازدهی جابهجایی دوفازی در مدل ناهمگن



شکل ۸- تأثیر عدد موئینگی بر بازدهی جابهجایی دوفازی در مدل ناهمگن

سیالات و شکل دماغهها می توان به عنوان دلایل این کاهش یاد کرد. نتایج بهدست آمده در این بخش با دستاوردهای شبیهسازی و آزمایشگاهی قبلی مطابقت دارد [۲۲-۲۰].

۴-۷-۳-۱- برهم کنش حجم تزریق و عدد موئینگی همانطور که اشاره شد، طراحی آزمایش نشان داد که برای مدل جابهجاکننده با افزایش عدد موئینگی افزایش مییابد. شیب افزایش بازدهی سیستم نیز همچنان در Log N_c-4 نسبت به عدد موئینگی بسیار زیاد است اما در با رسیدن به Log N_c=-3 این میزان صفر میرسد و برای Log N_c-5 شیب این نمودار نزولی میشود. هر چه عدد موئینگی بزرگتر میشود، بازدهی در یک حجم تزریق افزایش مییابد. از تغییر پروفایل جابهجایی

روشهای عددی در مهندسی، سال ۴۱، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۱



شکل ۹- برهمکنش و تأثیر عدد موئینگی و حجم تزریق بر بازدهی تزریق در ناهمگن

۲-۷-۴ برهم کنش عدد موئینگی و نسبت ویسکوزیته دو سیال ناحیه دماغهزنی موئینگی در این سیستم طبق نمودار فازی بهدست آمده برای شرایط اطراف چاه، بسیار محدود و قابل چشمپوشی است. اما ناحیه جابهجایی یکنواخت روی میزان بازدهی تزریق تأثیرگذار خواهند بود. با توجه به اینکه نقاط مورد بررسی در طراحی آزمایش در منطقه جابهجایی یکنواخت محدود است تأثیر این ناحیه در مدل دیده نمی شود. با این وجود این ناحیه تأثیری روی برهمکنشها در ناحیه گسترده دماغهزنی ویسکوز و ناحیه انتقالی نزدیک به ناحیه دماغهزنی ویسکوز که به نوعی ناحیه اصلی مورد بررسی در عمليات پيش تزريق است، نخواهد گذاشت؛ از طرفي تأثير این ناحیه روی بازدهی تزریق واضح و قابل پیشبینی است. طراحی آزمایش برای نواحی که درستی آن با نمودار فازى اعتبارسنجي شده است برهمكنشي معنادار بین دو پارامتر نسبت ویسکوزیته و عدد موئینگی پیدا کرده است که در شکل (۱۰) مشاهده می شود. از این نمودار می توان برداشت کرد که تأثیر افزایش نسبت ویسکوزیته در اعداد موئینگی پایین بیشتر می شود. به عنوان مثال در Log N_c=-6 افزایش نسبت ویسکوزیته و رسیدن به Log M=0 باعث بهبود ۴۰ درصدی بازدهی خواهد شد اما

برهمکنش معنادار دارند. شکل (۹) تأثیر این دو پارامتر را بهطور همزمان در لگاریتم نسبت ویسکوزیته ۱/۵- و زاویه تماس ۹۰ درجه را نشان میدهد. طبق این نمودار، تأثیر حجم تزریق با افزایش عدد موئینگی زیاد میشود بهنحوی که در لگاریتم عدد موئینگی ۶-، افزایش حجم تزریق از ۱ به ۵ تنها ۴ درصد بازدهی تزریق را بهبود میبخشد اما این میزان با افزایش عدد موئینگی افزایش می یابد. بیشینه تأثیر برای لگاریتم عدد موئینگی ۱-مشاهده شد که افزایش حجم تزریق از ۱ به ۵، نزدیک به ۴۰ درصد بازدهی تزریق را بهبود میدهد. با افزایش عدد موئینگی، تأثير نيروى ويسكوز افزايش مىيابد بنابراين سيال جابهجاشونده قادر خواهد بود که در نواحی متعددی که جبهه اولیه جریان از آن رد نشده است را تخلیه کند. از آنجایی که در مدل ناهمگن مدل در کمترین زمان ممکن از تراواترین مسیر را میانشکنی میکند، میزان زیادی از سیال اولیه در ماتریکس دستنخورده باقی میماند. و با افزایش حجم تزریق، سیال جابهجاکننده فرصت کافی برای تخلیه نفت باقیمانده خواهد داشت. اما در عدد موئینگی پایین، به علت مقاومت بالاتر نیروی موئینگی و عدم نيروى ويسكوز كافي سيال براي جابهجايي نفت باقىمانده، افزایش حجم تزریق کمکی به بهبود بازدهی نخواهد کرد.

ناهمگن، پارامتر حجم تزریق با پارامتر لگاریتم عدد موئینگی



شکل ۱۰– برهمکنش و تأثیر عدد موئینگی و نسبت ویسکوزیته بر بازدهی تزریق در مدل ناهمگن

این میزان برای No No No درصد خواهد رسید. این برهمکنش نشان می دهد که کاهش تحرک پذیری ناشی از افزایش ویسکوزیته عاملی مؤثر برای بهبود بازدهی در مدل ناهمگن به شمار می آید. شایان ذکر است که تأثیر برهمکنش این دو پارامتر برای نسبتهای ویسکوزیته بالاتر نیز برقرار است با این تفاوت که در اعداد موئینگی بالا، به دلیل حضور ناحیه جابه جایی یکنواخت دیگر شاهد روند نزولی لگاریتم عدد موئینگی نخواهیم بود. شیب نزولی که به علت ناپایداری رژیم جریان و میانشکنی سریع اتفاق می افتد، با نزدیک شدن به ناحیه جابه جایی یکنواخت اثر خود را از دست داده و با حرکت سیال جابه جاکننده، همه سیال موجود در مسیر جبهههای جریانی را با خود به حرکت در می آورد و در عدد موئینگی بالا، بازدهی به شیب صفر و نه منفی خواهد رسید.

۴–۷–۴– تأثیر پارامتر زاویه تماس

شکل (۱۱) تأثیر زاویه تماس را در بازه ۳۰ تا ۱۵۰ روی بازدهی در لگاریتم نسبت ویسکوزیته ۱/۵-، حجم تزریق یک و لگاریتم عدد موئینگی ۳- نشان میدهد. طبق این شکل، هر چه به سمت زاویه تماس ۳۰ درجه پیشروی شود، میزان بهرهوری افزایش مییابد. در محیطهای آبدوست، فاز ترشونده علاوه بر حفرات بزرگتر، حفرات ریز را نیز مورد تهاجم قرار میدهد.

بنابراین، مقدار زیادی از نفت از محیط خارج می شود. شایان ذکر است که پروفایل اشباع سیالات نشان داد که در محیطهای خنثی و نفت دوست، دماغه ها غالبا ویسکوز است؛ درحالی که در محیط آب دوست، ترکیبی از دماغهزنی های ویسکوز و موئینه قابل مشاهده است. طراحی آزمایش نشان داد که این پارامتر با پارامترهای عدد موئینگی و نسبت ویسکوزیته برهم کنش معنادار دارد که در شکلهای (۱۲) و (۱۳) تاثیر این برهم کنش ها آورده شده است.

۲-۷-۴–۱- برهم کنش زاویه تماس و عدد موئینگی

با بررسی شکل (۱۲) که برهمکنش دو پارامتر زاویه تماس و عدد موئینگی را نشان میدهد میتوان دریافت که بیشترین اثرگذاری مثبت کاهش زاویه تماس در 6-=Log Nc اتفاق میافتد و هر چه عدد موئینگی افزایش یابد اثرگذاری زاویه تماس کاهش مییابد. علت این برهمکنش میزان سرعت و پایداری رژیم جریان است. بهطوری که در عدد موئینگی پایین به علت پایدارتر بودن رژیم جریان و کاهش اثر اینرسی، سیال در یک حجم تزریق فرصت کافی برای تخلیه مسیرهای کم تراواتر را خواهد داشت. درحالیکه که در اعداد موئینگی بالاتر، اثر فرایند آشام و نیروی موئینگی باعث تشدید ناپایدار و اینرسی جریان شده و تأثیری منفی در بهبود بازدهی خواهد گذاشت.



شکل ۱۲– برهمکنش و تأثیر عدد موئینگی و زاویه تماس بر بازدهی تزریق در مدل ناهمگن

۴-۷-۴-۲- برهم کنش زاویه تماس و نسبت ویسکوزیته شکل (۱۳) تأثیر برهم کنش این دو پارامتر در مدل ناهمگن را نشان میدهد. با بررسی این نمودار مشاهده میشود که تأثیر افزایش ویسکوزیته غالب بر کاهش زاویه تماس روی بازدهی اثرگذار است. از طرفی این تأثیر در زوایای تماس نزدیک به ۱۵۰ بیشتر اثرگذار است؛ به نحوی که می تواند بازدهی تزریق را تا ۶۵ درصد در یک حجم تزریق بهبود

دهد. می توان از این برهم کنش استنباط کرد که تأثیر کاهش تحرک پذیری روی سیستم ناهمگن، بیشتر از کاهش زاویه تماس باعث بهبود بازدهی پس از یک حجم تزریق خواهد شد. این نتیجه برای عملیات پیش تزریق که عموما زاویه تماس در مخازن تحت تزریق نزدیک به ۱۵۰ است، بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۱۳– برهم کنش و تأثیر زاویه تماس و نسبت ویسکوزیته بر بازدهی تزریق در مدل ناهمگن

۵- جمعبندی و نتیجهگیری

این پژوهش رفتار جریان جابجاییهای نفت-آب و تأثیر خواص ترشوندگی را در یک الگوی ناهمگن، برگرفته از ساختار حفره-ای یک سنگ واقعی، ارزیابی میکند. برای انجام شبیهسازیها، معادلات میدان فازی کان هیلیارد و ناویراستوکس برای ارزیابی اثرات ویسکوز و موئینگی با استفاده از روش اجزای محدود حل شدند. آنالیز حساسیت در مجموعهای از شبیهسازی ها با ترکیبهای مختلف نسبت ویسکوزیته (M)، عدد موئینگی (Nc) و زوایای تماس در حوزه محاسباتی مورد استفاده قرار گرفت. سه رژیم جریان جابجایی پایدار، دماغهزنی موئینگی، و دماغهزنی ويسكوز با تغيير عدد موئينگي و نسبت ويسكوزيته مشاهده شدند. نتایج جریان شبیهسازی شده با آزمایش های میکرومدل موجود در تاریخچه ادبیات مطابقت خوبی داشت. با انجام این مدلسازی، 2.5 $\approx M \approx 1.5$ و Log Nc ≈ -5 و Log M محدودكننده براى ناحيه دماغه زنى ويسكوز محاسبه شدند. Log Nc \approx -2 و Log M \approx 0.5 مرزهای تقریبی جابجایی پایدار در M \approx 0.5 مرزهای قرار دارند. Log Nc ≈ -5 ،Log M ≈ -0.5 نيز به عنوان مرز بحرانی برای ناحیه دماغهزنی موئینگی محاسبه شد. تأثیر حجم تزریق بر بازدهی جابهجایی دوفازی نشان داد که با افزایش حجم تزریق از ۱ به ۴، بازدهی نفت (پاکسازی ناحیه اطراف چاه)

حدود ۲۰ درصد افزایش می یابد. پس از آن، بازدهی تقریبا ثابت است. نتایج همچنین نشان دهنده اثر افزایش نسبت ویسکوزیته به عنوان یک عامل مثبت بر عملکرد جابجایی دوفازی نفت است. ارزیابی اثر عدد موئینگی بر روی بازدهی نفت نشان داد که یک عدد موئینگی بحرانی وجود دارد؛ برهمکنش حجم تزریق و عدد موئينگي نشان داد که با افزايش عدد موئينگي، حجم تزريق به شدت بر بازدهی نفت تأثیر میگذارد. برهمکنش بین عدد موئینگی و نسبت ویسکوزیته مشخص کرد که در نسبت ویسکوزیته بالا، دماغهزنی موئینگی بیشترین تأثیر را بر بازدهی نفت دارد. علاوه بر این، برهمکنش بین زاویه تماس و عدد موئینگی نشان داد که اثربخشی زاویه تماس (به عنوان شاخص ترشوندگی) در اعداد موئینگی پایین به بیشترین حد خود خواهد رسید. از سوی دیگر، با افزایش عدد موئینگی، اثر ترشوندگی بر بازدهی کاهش مییابد. در نهایت، اثر زاویه تماس و نسبت ویسکوزیته مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج بهدست آمده نشان داد که اثر تغییر ترشوندگی در نسبتهای ویسکوزیته یایین تر اهمیت بیشتری دارد.

تقدیر و تشکر نویسندگان مقاله از مرکز خدمات فناوری نفت شریف – ازدیاد برداشت و بهبود تولید، مستقر در مجتمع خدمات فناوری نیز پشتیبانی محاسباتی در مدت انجام آن صمیمانه تشکر و دانشگاه صنعتی شریف، برای بررسی پیشنهاد اولیه این طرح و قدردانی میکنند.

1. Pre-flush

- 2. capillary number
- 3. capillary fingering
- 4. viscous fingering
- 5. LSM 6. PFG
- 7. finite element method
- 8. navior stokes
- واژەنامە 9. minimum free energy 10. convection-diffiusion 11. augmented central composition

مراجع

- 12. design of expert
- 1. Kumar, R. P., He, J., and Nasr-El-Din, H., "Effect of Oil Saturation on Acid Propagation During Matrix Acidization of Carbonate Rocks", *SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Society of Petroleum Engineers*, 2014.
- AlMubarak, T., AlKhaldi, M., AlMubarak, M., Rafie, M., Al-Ibrahim, H., and AlBokhari, N., "Investigation of Acid-Induced Emulsion and Asphaltene Precipitation in Low Permeability Carbonate Reservoirs", SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2015.
- 3. Suzuki, F., "Precipitation of Asphaltic Sludge During Acid Stimulation Treatment: Cause, Effect, and Prevention", *SPE Western Regional Meeting*, *Society of Petroleum Engineers*, 1993.
- 4. Karimi, M., Shirazi, M. M., and Ayatollahi, S., "Investigating the Effects of Rock and Fluid Properties in Iranian Carbonate Matrix Acidizing During Pre-Flush Stage", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 166, pp. 121-130, 2018.
- Shirazi, M. M., Ayatollahi, S, and Ghotbi, C., "Damage Evaluation of Acid-Oil Emulsion and Asphaltic Sludge Formation Caused by Acidizing of Asphaltenic Oil Reservoir", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 174, pp. 880-890, 2019.
- Lenormand, R., Touboul, E., and Zarcone, C., "Numerical Models and Experiments on Immiscible Displacements in Porous Media", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 189, pp. 165-187, 1988.
- Zhang, C., Oostromm, M. W., Wietsma, T. W., Grate, J. G., and Warner, M., "Influence of Viscous and Capillary Forces on Immiscible Fluid Displacement: Pore-Scale Experimental Study in a Water-Wet *Micromodel* Demonstrating Viscous and Capillary Fingering", *Energy & Fuels*, Vol. 25, No. 8, pp. 3493-3505, 2011.
- Karadimitriou, N., and Hassanizadeh, S., "A review of Micromodels and Their Use in Two-Phase Flow Studies", *Vadose Zone Journal*, Vol. 11, No. 3, 2012.
- 9. Amiri, H. A., and Hamouda, A., "Evaluation of

Level Set and Phase Field Methods in Modeling Two Phase Flow with Viscosity Contrast Through Dual-Permeability Porous Medium", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 52, pp. 22-34, 2013.

- Amiri, H. A., and Hamouda, A., "Pore-Scale Modeling of Non-Isothermal Two Phase Flow in 2D Porous Media: Influences of Viscosity, Capillarity, Wettability and Heterogeneity", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 61, pp. 14-27, 2014.
- Riazi, M., Jamiolahmady, M., and Sohrabi, M., "Theoretical investigation of Pore-Scale Mechanisms of Carbonated Water Injection", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 75, No. 3, pp. 312-326, 2011.
- Rokhforouz, M., and Akhlaghi Amiri, H. A., "Phase-Field Simulation of Counter-Current Spontaneous Imbibition in A Fractured Heterogeneous Porous Medium", *Physics of Fluids*, Vol. 2, No. 6, pp. 062104, 2017.
- Sabooniha, E., Rokhforouz, M. R., and Ayatollahi, S., "Pore-scale Investigation of Selective Plugging Mechanism in Immiscible Two-Phase Flow Using Phase-Field Method", *Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles*, Vol. 74, pp. 78, 2019.
- 14. Sabooniha, E., Rokhforouz, M. R., Kazemi, A., and Ayatollahi, S., "Numerical analysis of Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media During Pre-Flush Stage of Matrix Acidizing: Optimization by Response Surface Methodology", *Physics of Fluids*, Vol. 33, No. 5, pp. 053605, 2021.
- 15. Zeng, Z., and Grigg, R., "A criterion for Non-Darcy Flow in Porous Media", *Transport in Porous Media*, Vol. 63, No. 1, pp. 57-69, 2006.
- Ergun, S., and Orning, A. A., "Fluid Flow Through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds", *Industrial & Engineering Chemistry*, Vol. 51, No. 6, pp.1184-1179, 1949.
- Mai, A., and Kantzas, A., "Heavy Oil Waterflooding: Effects of Flow Rate and Oil Viscosity", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 48, No. 03,

١٣۵

pp. 42-51, 2009.

- Moore, T., and Slobod, R., "The Effect of Viscosity and Capillarity on the Displacement of Oil by Water", *Producers Monthly*, Vol. 20, No. 10, pp. 20-30, 1956.
- 19. Rezaveisi, M., Ayatollahi, S., and Rostami, B., "Experimental Investigation of Matrix Wettability Effects on Water Imbibition in Fractured Artificial Porous Media", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 86, pp. 165-171, 2012.
- 20. Guo, H., Dou, M., Hanqing, W., Wang, F., Yuanyuan, G., Yu, Z., Yansheng, W., and Li, W.,

"Proper Use of Capillary Number in Chemical Flooding", *Journal of Chemistry*, 2017.

- 21. Rokhforouz, M., and Amiri, H. A., "Effects of Grain Size and Shape Distribution on Pore-Scale Numerical Simulation of Two-Phase Flow in A Heterogeneous Porous Medium", *Advances in Water Resources*, Vol. 124, pp. 84-95, 2019.
- 22. Zheng, X., Mahabadi, N., Yun, T. S., and Jang, J., "Effect of Capillary and Viscous Force on CO2 Saturation and Invasion Pattern in the Microfluidic Chip", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 122, No.3, pp. 1634-1647, 2017.