

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

احسان صابونیه^۱، میثم محمدزاده شیرازی^{۲*}، علیرضا کاظمی^۱ و سید شهاب الدین آیت‌اللهی^۳

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز

۳- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۲/۲۴)

چکیده - رفتار جابجایی نفت و میزان به دام افتادن آن در ناحیه اطراف چاه توسط سیال پیش‌شوی 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 هیلبارد و ناویر استوکس، ایجاد و با استفاده از روش اجزای محدود حل شد. با توجه به اهمیت نیروهای 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 $\log M \approx 0.5$ و $\log Nc \approx -2$ قرار گرفت. علاوه بر این، تأثیر چهار متغیر مستقل شامل حجم تزریق ($1 < PV < 5$)، عدد موئینگی ($-6 < \log Nc < 0$)، نسبت ویسکوزیته ($-5 < \log M < 2$) و زاویه تماس $\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{5\pi}{6}$ روی بازیافت نفت (RF)، که شاهدهی از پاکسازی ناحیه اطراف چاه است، با استفاده از طراحی ترکیب مرکزی 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 ($RF > 0.95$) در $\log M > 0$ و $\theta > \pi/6$ ، $PV > 1$ ، $-4.5 < \log Nc < -2$ اتفاق می‌افتد. شایان ذکر است که برای $\log M < 0$ ، شرایط بهینه در $\log Nc \approx -3.5$ ، $PV \approx 4$ و $\theta \approx \pi/6$ رخ می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اسیدکاری، سیال پیش‌شوی، 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 مکاتبات، پست الکترونیکی: m.mohammadzadeh@shirazu.ac.ir

visco-capillary behavior of the two-phase flow in the pore-scale is analyzed using computational fluid dynamics. A two-dimensional 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 (N_c) 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 $\text{Log } M \approx 0.5$ and $\text{Log } N_c \approx -2$. 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 ($-6 < \text{Log } N_c < 0$), viscosity ratio ($-5 < \text{Log } M < 2$) and contact angle (θ), 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 $\text{Log } M > 0$, $-4.5 < \text{Log } N_c < -2$, $PV > 1$, and $\theta > \pi/6$ conditions. It is worth mentioning that for $\text{Log } M < 0$, the optimum condition occurred at $\text{Log } M \approx 0$, $\text{Log } N_c \approx -3.5$, $PV \approx 4$ and $\theta \approx \pi/6$.

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

فهرست علائم

$\frac{\mu_w}{\mu_0}$	نسبت ویسکوزیته ها،	M	پارامتر حجم تزریق	A
Rad	زاویه تماس،	θ	پارامتر عدد موئینگی	B
	فضای بین سیالات	Ω	پارامتر نسبت ویسکوزیته	C
	دانسیته انرژی مخلوط	λ	پارامتر ترشوندگی	D
	ضخامت سطح تماس	ε	ترم پتانسیل شیمیایی، $\frac{J}{m^3}$	G
	پارامتر کمکی میدان فازی	ψ	فشار، Pa	p
$\frac{m^3 s}{kg}$	تحرك پذیری،	γ	سرعت، $\frac{N}{m}$	u
$\frac{kg}{m^3}$	دانسیته،	ρ	شتاب ثقلی، $\frac{g}{m^2}$	g
$\frac{Ns}{m^2}$	ویسکوزیته،	μ	نیروی بین سطحی	F_{st}
	پارامتر بدون بعد میدان فازی	ϕ	عدد موئینگی، $\frac{\mu_w u_{inj}}{\sigma}$	N_c
	پارامتر باقی مانده	α	حجم تزریق	PV
$\frac{1}{m}$	ضریب فورچهایمر،	β	عدد فورچهایمر	Fo
$\frac{N}{m}$	کشش سطحی،	σ	میانگین ابعاد حفرات، m	R

۱- مقدمه

۱-۱ تأثیر حضور نفت در مرحله تزریق اسید

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

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

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 موئینگی^۲ (N_c) و لگاریتم نسبت ویسکوزیته سیال جابه‌جا کننده 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^۴ قرار می‌گیرند [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 موئینگی، محل دقیق تغییر مرزهای فازی نیز در بهبود بازیافت نهایی نفت تأثیرگذار است [۷].

۱-۳- آنالیز عددی و شبیه‌سازی

در طول سه دهه گذشته، مدل‌های فیزیکی میکروساخته از محیط متخلخل (به عنوان مثال، میکرومدل‌ها) به‌طور 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 هیلارد^۶ را با استفاده از شبیه‌ساز چند منظوره کامسول مقایسه کرده‌اند تا مدل مناسب برای شبیه‌سازی جریان سیالات نفت-آب را در محیط متخلخل پیدا کنند [۹]. آنها زمان اجرا، دقت و توانایی ضبط پدیده‌های فیزیکی جریان وابسته به ساختار را در هر دو روش مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که پیش‌بینی‌های مدل

اصلی به نام سیال پیش‌شوی^۱ انجام می‌شود. در حقیقت سیال پیش‌شوی نقش آماده‌سازی ناحیه آسیب‌دیده اطراف چاه را برای پذیرش اسید ایفا می‌کند.

عمده تحقیقات آزمایشگاهی و مدل‌سازی اسیدکاری روی سنگ‌های آب‌دوست و شرایط سنگ اشباع از آب انجام شده 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 انجام شده است. در پژوهشی تأثیر تزریق یک سیال واسط به‌منظور تغییر اشباع هیدروکربن درون سنگ قبل از تزریق اسید روی میزان حجم اسید لازم برای شکل‌گیری 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 آسفالتینی و امولسیون‌هایی با ویسکوزیته بالا (به عنوان یک آسیب سازند القایی) و اختلال در عملکرد افزایه‌های اسیدی مانند منحرف‌کننده‌های 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 انجام شده است. به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی، عمدتاً آنالیز حساسیت بر روی

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

در این رابطه Ω بیانگر فضای بین دو سیال است. اولین بخش از انتگرال سمت راست تساوی در واقع بیانگر انرژی سطح است. دومین بخش از انتگرال نیز بیان‌کننده انرژی کلی سیستم است که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$f_0(\varphi) = \frac{\lambda}{4\varepsilon^2} (\varphi^2 - 1)^2 \quad (2)$$

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

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

معادله کاهن هیلارد 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 هیلارد برای ردیابی لایه مرزی بین دو سطح سیال از طریق زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = \nabla \cdot (\gamma \nabla G) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = \nabla \cdot \left(\frac{\gamma \lambda}{\varepsilon^2} \right) \nabla \psi \quad (5)$$

$$\psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \varphi + (\varphi^2 - 1)\varphi \quad (6)$$

در این روابط، ψ پارامتر کمکی میدان فازی است که وظیفه شکستن معادله مرتبه چهارم کاهن هیلارد (معادله ۴) را به دو معادله مرتبه دو (معادلات ۵ و ۶) بر عهده دارد. در این رابطه پارامترهای \mathbf{u} سرعت سیال، γ تحرک‌پذیری، و G نیز ترم پتانسیل شیمیایی معادله‌ی حاکم است.

$$G = \lambda \left[-\nabla^2 \varphi + \varphi(\varphi^2 - 1) / \varepsilon^2 \right] \quad (7)$$

ضخامت سطح تماس را می‌توان به صورت نوعی پارامتر برابر با $\varepsilon = \frac{h_c}{2}$ در نظر گرفت که h_c سایز مشخصه مش در ناحیه‌ای

توافق خوبی با نتایج تجربی و تحلیلی دارند. امیری و هامودا از کامسول برای حل معادله کاهن هیلارد 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، به نظر می‌رسد که شبیه‌سازی‌های عددی می‌توانند جابه‌جایی 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^۲ استفاده می‌شود.

۲-۱- معادلات حاکم بر مسئله

در نرم‌افزار کامسول به منظور بیان انتقال مومنتوم از معادلات ناویر استوکس^۳ 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 به منظور حل مسائل جریان چندفازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. منطق این روش، بر اساس استفاده از قوانین انرژی آزاد^۴ برای یک سیستم ایزوله گرمایی است. در این روش سطح تماس بین دو سیال به عنوان یک لایه متحرک در نظر گرفته می‌شود که خواص سیالات به‌طور یکنواخت در طول این لایه عوض می‌شود. این تغییرات خواص از یک سیال به سیال دیگر با پارامتر بدون بعد میدان فازی (φ) شناخته می‌شود. این پارامتر در لایه مرزی بین دوفاز از -۱ تا ۱ تغییر می‌کند و در هر فاز ثابت مقادیر برابر ۱ و -۱ دارد. مدل چگالی انرژی آزاد برای یک جریان دوفازی برابر است با:

$$F_{st} = \frac{2.8}{3G\nabla\phi} \quad (13)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، از آنجایی که در معادله میدان فازی به سطحی مشترک ضخامت داده می‌شود، کشش سطحی به‌صورت 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 مشکل‌ساز است جلوگیری می‌کند. شایان ذکر است که در این پژوهش به دلیل شبیه‌سازی دوبعدی از نیروی گرانش صرف‌نظر شده است. به‌علاوه برای تایید این فرضیه می‌توان از مفهوم عدد باند استفاده کرد:

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

در این رابطه، g شتاب گرانش و R میانگین سائز حفرات هستند. هر چه این عدد از ۱ کوچک‌تر شود با اطمینان بیشتری می‌توان از نیروی گرانش صرف‌نظر کرد. با توجه به اینکه در این پژوهش سیال آب و نفت (با دانسیته متوسط ۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و کشش سطحی متوسط ۰/۰۲۵ 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 سائز حفرات ۵۰۰ میکرون برابر با ۰/۰۰۹۸ است که بسیار کمتر از ۱ خواهد بود. بنابراین می‌توان از نیروی گرانش صرف‌نظر 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- مش‌بندی

به‌منظور تأثیر اندازه مش در جواب نهایی و همچنین زمان‌بر

که توسط سطح تماس رد شده است. پارامتر تحرک‌پذیری، مقیاس زمانی پراکنندگی کان هیلارد 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 ترم‌های جابجایی به‌طور کامل از بین نروند. مقدار قراردادی این پارامتر برابر $\gamma = \varepsilon^2$ است که معمولاً 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.

$$V_{f1} = \frac{1-\phi}{2}, V_{f2} = \frac{1+\phi}{2} \quad (8)$$

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

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)V_{f2} \quad (9)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)V_{f2} \quad (10)$$

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 استوکس و پیوستگی (بقای جرم) به‌صورت زیر خواهد بود.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \quad (11)$$

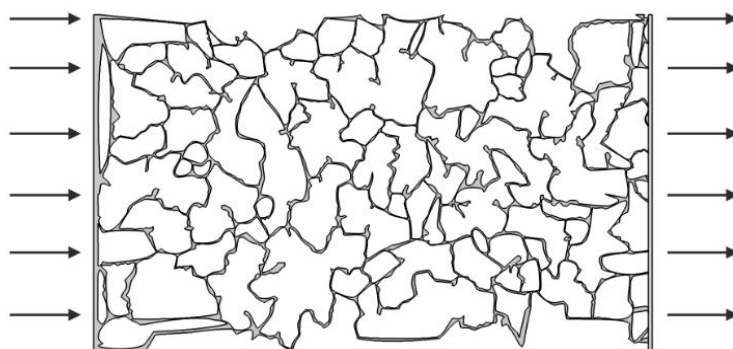
$$-\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + G\nabla\phi$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (12)$$

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.



شکل ۱- شماتیک مدل ناهمگن مورد استفاده در این پژوهش

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

ابعاد مدل (cm ²)	تخلخل (%)	تراوایی (D)	مدل
۵/۰۶	۱۰	۵/۲۱	ناهمگن

تزریق، سرعت (دبی) ثابت در نظر گرفته شد. سرعت ثابت ورودی سیال جابه‌جاکننده با توجه به سرعت تزریق سیال پیش‌شوی در عملیات‌های میدانی تزریق اسید در جنوب ایران و دامنه مجاز سرعت برای جریان آرام در مدل‌ها در سه سطح با توجه به اندازه عدد موئینگی محاسبه شد.

شرط مرزی در ورودی این مدل همانند عملیات‌های واقعی تزریق، سرعت (دبی) ثابت در نظر گرفته شد. سرعت ثابت ورودی سیال جابه‌جاکننده با توجه به سرعت تزریق سیال پیش‌شوی در عملیات‌های میدانی تزریق اسید در جنوب ایران و دامنه مجاز سرعت برای جریان آرام در مدل‌ها در سه سطح با توجه به اندازه عدد موئینگی محاسبه شد. برای محاسبه اندازه سرعت ورودی در عملیات پیش‌تزریق فرایند اسید کاری، داده‌های دبی پمپ تزریق، ناحیه تحت تزریق و قطر چاه برای ۴ چاه تزریقی واقع در میدانی اهواز و منصوری مورد بررسی قرار گرفت. محاسبه سرعت ظاهری در این چاه‌ها نشان داد که بازه سرعت تزریق به‌صورت میانگین در زمان تزریق سیال پیش‌شوی، بین ۰/۰۲ تا ۰/۱ سانتی‌متر 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 ناهمگن تعیین شود؛ بدین منظور از عدد فورچهایمر Fo و

بودن اجرای شبیه‌سازی‌ها، لازم است که اندازه بهینه مش‌بندی تعیین شود. به همین منظور اندازه مش‌بندی "ریزتر" تا "نرمال" در یک شبیه‌سازی دو فازی آب-نفت آزمایشی تغییر داده شد و میزان بازیافت از مدل در حجم تزریق‌های 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 شبیه‌سازی در این مدل به بیش از ۱۵ ساعت هم رسید. با توجه زمان‌گیر بودن شبیه‌سازی سیستم در مش‌بندی‌های مورد بررسی و مقایسه نتایج، می‌توان استقلال از مش را از سایز "ریز" به بعد نتیجه گرفت. از همین رو در سیستم مورد بحث از سایز "ریز" برای انجام شبیه‌سازی استفاده شد. (شکل ۲-الف).

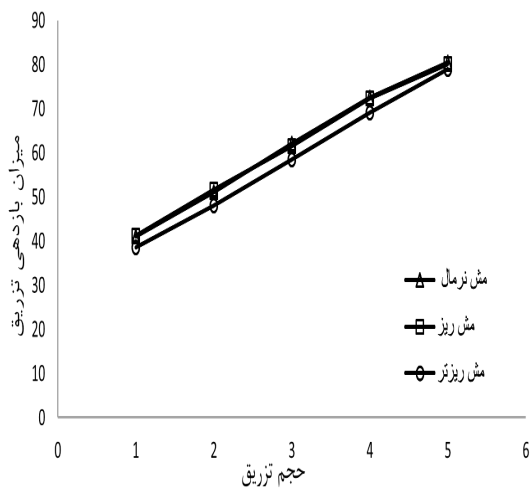
۲-۳- شرایط اولیه

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.

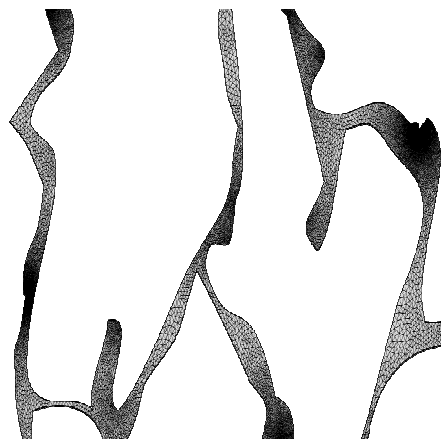
۳-۳- شرایط مرزی

۱-۳-۳- ورودی

شرط مرزی در ورودی این مدل همانند عملیات‌های واقعی



ب



الف

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

مترمکعب قرار داده شد. حد مجاز سرعت برای عدم تشکیل جریان غیرداریسی یا آشفته در جدول (۲) نشان داده شده است. مقایسه محدوده سرعت مجاز و سرعت به دست 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 پیش‌شوی به طور کامل برطرف می‌شود؛ این در حالی است که طبق محاسبات صورت گرفته، میزان تراوایی در سنگ‌های کربناته بسیار کمتر از میزان تراوایی محاسبه شده برای مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش بوده که این موضوع باعث افزایش کران بالای سرعت مجاز در سنگ‌های واقعی و به طبع آن افزایش محدوده جریان 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.

کسر خطای غیرداریسی برای تعیین این حد استفاده شد. زنگ و همکاران [۱۵] ضابطه‌ای عمومی و واحد برای نقطه تغییر رژیم جریان ارائه کردند. آنها با استفاده از تعریف عدد فورچهایمر، کسر خطای غیرداریسی را ارائه کردند. این کسر در واقع نشان‌دهنده میزان خطا هنگام فرض داریسی و چشم‌پوشی از تأثیرات جریان غیرداریسی را در مساله نشان می‌دهد. زنگ و همکاران با انجام آزمایش تزریق نیتروژن با نرخ‌های متفاوت در سه مدل مغزه متفاوت مرز ۱۰ درصد خطا را برای شروع جریان غیرداریسی پیشنهاد دادند. ضریب فورچهایمر β نیز از رابطه ارگان [۱۶] محاسبه شد. در معادلات زیر نحوه به دست آوردن عدد و ضریب فورچهایمر و کسر خطای غیرداریسی نشان داده شده است:

$$Fo = \frac{k\beta\rho v}{\mu} \quad (15)$$

$$\beta = ab^{-1/2}(K)^{-1/2}f^{3/2} \quad (16)$$

$$E = \frac{Fo}{1+Fo} \quad (17)$$

a و b به ترتیب ۱/۷ و ۱۵۰ و واحد تراوایی برابر (m²) است. ویسکوزیته و دانسیته سیال تزریقی برای محاسبه عدد فورچهایمر نیز برابر ۱ سنتی پویز و ۱۰۰۰ کیلوگرم بر

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

حداکثر سرعت مجاز (متر بر ثانیه)	درصد میزان خطا	عدد فورچهایمر
۱۰	۹/۸	۰/۱۰۳

۳-۴- طراحی ترکیب مرکزی

برای طراحی برنامه شبیه‌سازی از روش ترکیب مرکزی استفاده شد. مقدار پارامتر باقیمانده یا α از لحاظ فاصله از نقطه مرکزی تعیین می‌شود و اگر فاصله بین نقطه مرکزی و هر نقطه نمونه به ۱ برسد، فاصله نقاط ستاره از نقطه مرکزی می‌تواند از طریق روش‌های مختلف انتخاب شود. در این پژوهش برای رسیدن به خاصیت چرخشی و به طبع آن قابلیت آنالیز آماری بهتر، از $\alpha = \sqrt{2}$ 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 برهمکنش‌ها را به خوبی نشان می‌دهد. از طرفی با در نظر گرفتن ۵ سطح برای هر متغیر تمامی حالات سطح پاسخ قابل پیش‌بینی است.

تعیین محدوده تغییر پارامترها

محدوده تغییر متغیرها و تعداد سطوح هر متغیر با توجه به داده‌ها و تجربه عملیاتی اسیدکاری تعیین شد؛ متعاقباً عدد موئینگی که به صورت $N_c = \frac{\mu_w u_{Inj}}{\sigma}$ تعریف می‌شود، با توجه به داده‌های عملیاتی و مرز جریان آرام در مدل، دامنه $\log N_c$ از ۶- تا صفر در ۵ سطح با فواصل از پیش تعیین شده روش طراحی در نظر گرفته شد. برای نسبت ویسکوزیته که به صورت $M = \frac{\mu_w}{\mu_0}$ تعریف می‌شود نیز دامنه $\log M$ از ۵- تا ۲ با روند مشابه انتخاب شد. دامنه تغییرات ترشوندگی یا θ نیز از ۳۰ درجه (آب‌دوست) تا ۱۵۰ (نف‌دوست) درجه قرار داده شد. دامنه حجم تزریق سیالات نیز از ۱ تا ۵ حجم حفرات در نظر گرفته شد.

سطح پاسخ

پس از طراحی آزمایش‌ها و انجام آنها، باید نتایج به دست آمده

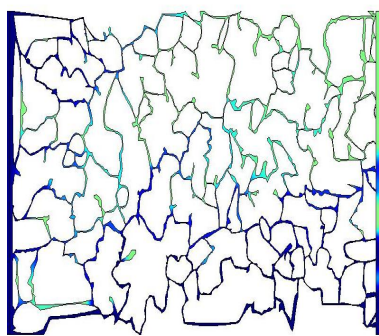
تحلیل و یک سطح پاسخ تولید شود. سطح پاسخ یک رابطه تجربی است که با رگرسیون، برای تخمین نتایج آزمایش‌ها یا شبیه‌سازی‌ها، بر آنها برازش می‌شود. از آنجایی که تعداد سطوح مورد بررسی در این پژوهش ۵ سطح است، سطح پاسخ به دست آمده از مرتبه دو است. در این پژوهش از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^{۱۲} برای این کار استفاده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

۴- آنالیز و تحلیل نتایج

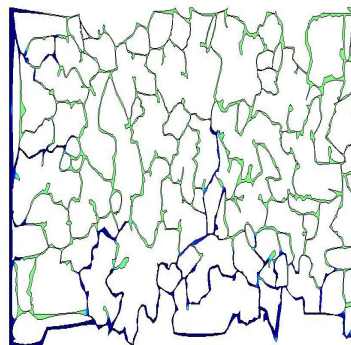
جابه‌جایی دوفازی در مدل ناهمگن تفاوت زیادی با مدل همگن دارد. در این سیستم به علت وجود مسیرهای بیشتر با تنوع در قطر، اندازه و تراوایی، رفتار الگوهای جریانی پیچیدگی بیشتری دارد. به منظور درک بهتر و دقیق‌تر توزیع اشباع و مکانیزم‌های اصلی جابه‌جایی غیرامتزاجی در این سیستم، آزمایش‌ها شبیه‌سازی در محدوده‌های قابل پیش‌بینی نمودار میدان فازی انجام و با تغییر نقاط در جهت M و N_c در نمودار، رفتار الگوهای مختلف برای سیستم ناهمگن بازنویسی شد. برخلاف مدل همگن، برای شناخت نوع رفتار جابه‌جایی لازم است تا 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_c ها که برای شناخت تأثیرگذاری نواحی مختلف دماغه‌زنی لازم است، نشان داده شده است.

۴-۱- دماغه‌زنی ویسکوز

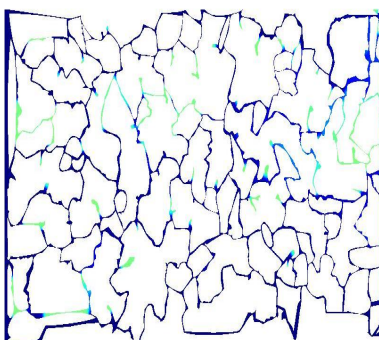
دماغه‌زنی ویسکوز شامل مسیرهای پیوسته و یا منقطع می‌شود که پهنایی به بزرگی ۱ تا ۳ بدنه محیط متخلخل (۳۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرون) دارند. این جبهه‌های جریانی همواره رو به جلو حرکت می‌کنند و تغییر مسیر به سمت عقب، بالا و پایین



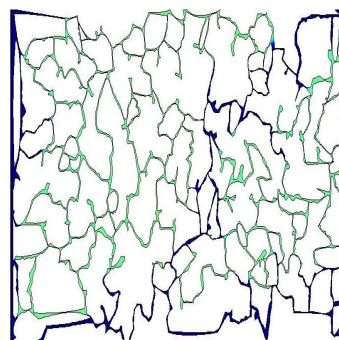
(ب) $\text{LogM}=-3.25/\text{LogNc}=-1.5$



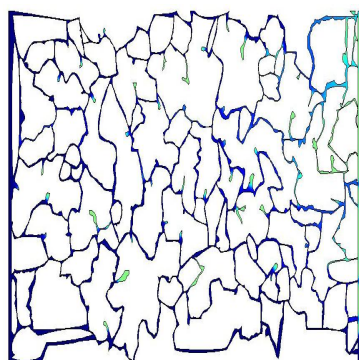
(الف) $\text{LogM}=-4.5/\text{LogNc}=-3.2$



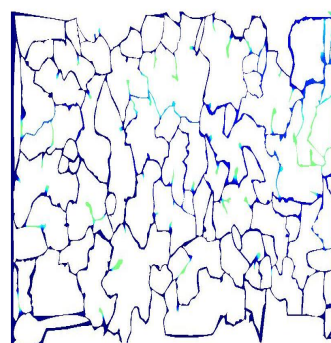
(ت) $\text{LogM}=-1.5/\text{LogNc}=-3$



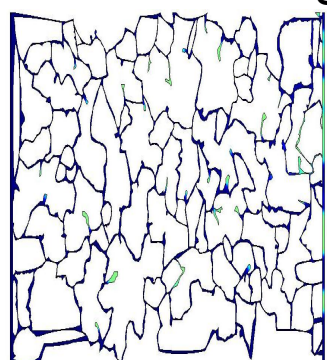
(پ) $\text{LogM}=-1.5/\text{LogNc}=-6$



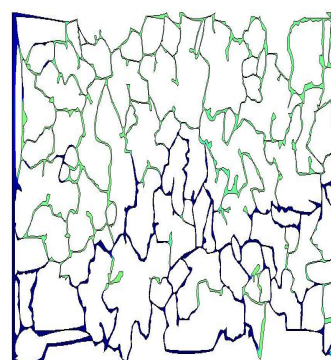
(ج) $\text{LogM}=0.25/\text{LogNc}=-3$



(ث) $\text{LogM}=-0.5/\text{LogNc}=-3$



(ح) $\text{LogM}=2/\text{LogNc}=-1.5$



(چ) $\text{LogM}=0.25/\text{LogNc}=-5.5$

شکل ۳- توزیع اشباع و الگوی جریان در نسبت ویسکوزیته و عدد موئینگی های مختلف برای مدل ناهمگن

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

۳-۴- جابه‌جایی یکنواخت

مکانیزم جابه‌جایی یکنواخت در مدل ناهمگن در $\text{Log } M > 0.5$ و $\text{Log } Nc > -2$ مشاهده شد. در این ناحیه جبهه سیالی جابه‌جاکننده از گوشه پایین مدل شروع به حرکت می‌کند، اما پس از کمی پیش روی در این مسیر، جبهه‌های جریان مابقی ماتریکس آغاز شده و خود را سریع به جبهه جریان اولیه می‌رسانند. این رفتار تا زمان میاننشکنی دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است، درصد بسیار کمی از سیال اولیه در پشت جبهه جریان باقی می‌ماند و در صورت وجود عمدتاً در مسیرهای ته بسته به تله می‌افتد. بازدهی این ناحیه پس از ۵ حجم از تزریق نزدیک به ۱۰۰ درصد خواهد شد.

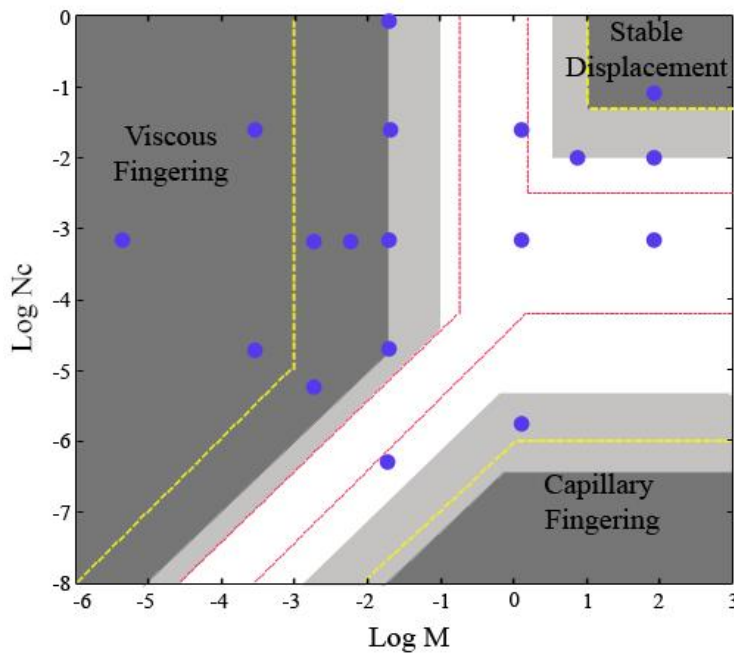
۴-۴- ناحیه انتقالی

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

به ندرت در آنها دیده می‌شود. همان‌طور که از شکل‌های (۳-۳ الف و ب) مشخص است، جبهه‌های جریان ابتدا مسیری با تراوایی کمتر را انتخاب و به سمت خروجی در مسیری مستقیم حرکت می‌کند. شکل (۳-۳ الف) که جابه‌جایی دوفازی در عدد موئینگی $4/25$ - و نسبت ویسکوزیته $3/25$ - 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 جبهه‌های جریان 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 کرده است ولی اندکی پس از تشکیل ادامه پیدا نکرده است. این رفتار را در این سیستم ناهمگن می‌توان به مکانیزم جابه‌جایی دماغه‌زنی ویسکوز نسبت داد. شکل (۳-۳ ب) رفتار جریان با لگاریتم عدد موئینگی $1/5$ - و لگاریتم نسبت ویسکوزیته ای مشابه شکل (۳-۳ الف) یعنی $3/25$ - را نشان می‌دهد. مکانیزم اصلی جابه‌جایی در این نقطه نیز در زیرمجموعه دماغه‌زنی ویسکوز قرار می‌گیرد. در این شکل نیز دماغه ویسکوز اصل در پایین مدل تشکیل شده است. دماغه‌های دیگری نیز در وسط و بالای مدل شکل گرفته‌اند که برخلاف شکل (۳-۳ الف) پس از ۵ حجم تزریق تا اواسط ماتریکس پیشروی کرده‌اند.

۲-۴- دماغه‌زنی موئینگی

در مدل همگن در محدوده $\text{Log } Nc > -6$ مکانیزم دماغه‌زنی به ندرت دیده شد. در ناحیه $\text{Log } M > 0.25$ و در $\text{Log } Nc < -5.5$ که یک نمونه از آن در شکل (۳-۳ ح) نشان داده شده است، جبهه‌های جریان 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 جریان



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 جریان، 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 انجام شده 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 پاره‌ای از خصوصیات دماغه‌زنی موئینگی (حرکت جبهه متصل به سمت میانه ماتریکس و مشاهده پیش روی به سمت بالا و عقب) را در خود دارد می‌توان 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 می‌توان 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 عموماً بعد از $\text{Log}M > 2$ و در $\text{Log}Nc > -5$ دیده شد می‌توان به ناحیه انتقالی بین دماغه‌زنی ویسکوز و جابه‌جایی یکنواخت نسبت داد. رفتار ناحیه

جدول ۳- جدول طراحی آزمایش برای مدل ناهمگن

تعداد شبیه سازی	Log Nc	Log M	زاویه تماس (θ)
۱	-۱/۵	۰/۲۵	۱۲۰
۲	-۱/۵	۰/۲۵	۶۰
۳	-۴/۵	-۳/۲۵	۱۲۰
۴	-۳	-۱/۵	۹۰
۵	-۳	۲	۹۰
۶	۰	-۱.۵	۹۰
۷	-۴/۵	۰/۲۵	۱۲۰
۸	-۱/۵	-۳/۲۵	۶۰
۹	-۴/۵	-۳/۲۵	۶۰
۱۰	-۶	-۱/۵	۹۰
۱۱	-۴/۵	۰/۲۵	۶۰
۱۲	-۳	-۱/۵	۳۰
۱۳	-۳	-۵	۹۰
۱۴	-۳	-۱/۵	۱۵۰
۱۵	-۱/۵	-۳/۲۵	۱۲۰

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 ۳/۵ 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، میزان تولید فاز آبی به تدریج افزایش یافته به ۱۰۰ درصد می‌رسد. مقاومت نیروی موئینگی در حفرات ریز و تفاوت ویسکوزیته سیالات، دلیل اصلی به دام افتادن نفت در این زمان است [۱۷ و ۱۸].

۴-۷-۲- 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.

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 D نشان داده شده‌اند.

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

۴-۷-۱- تحلیل سطح پاسخ

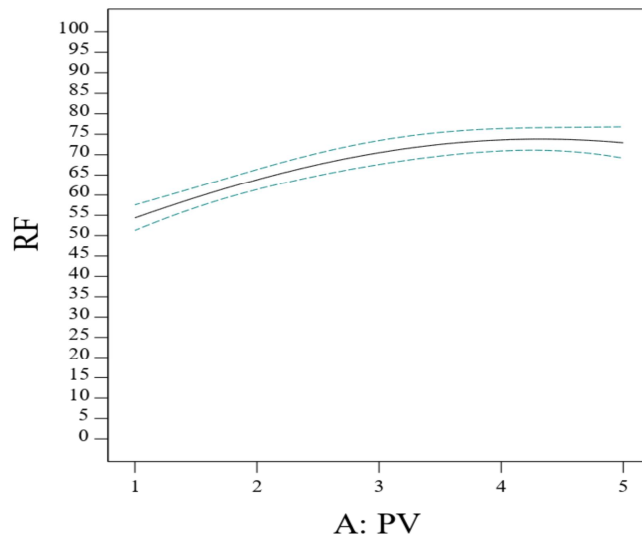
۴-۷-۱-۱- تأثیر پارامتر حجم تزریق

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

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

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	
CD	0.0216	1	0.0216	5.53	0.0218	
A ²	0.0395	1	0.0395	10.11	0.0023	
B ²	0.0957	1	0.0957	24.48	< 0.0001	
Residual	0.2502	64	0.0039			
Cor Total	2.27	74				

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



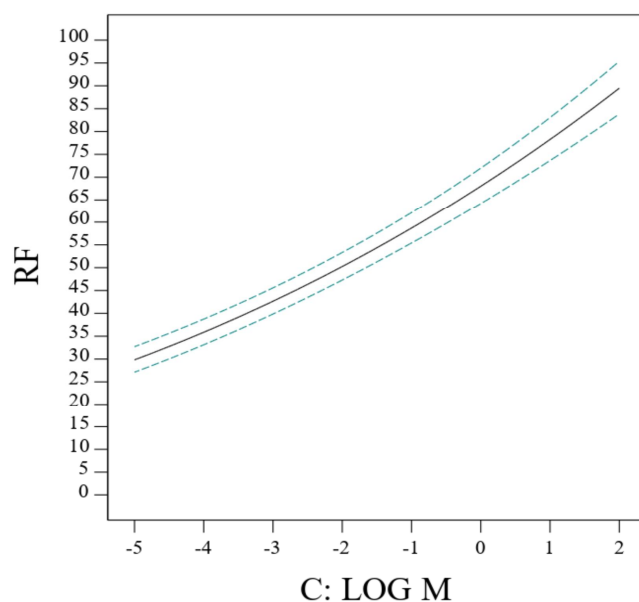
شکل ۶- تأثیر حجم تزریق بر بازدهی جابه‌جایی دوفازی مدل ناهمگن

زیادی از نفت در فازهای اولیه تزریق می‌شود [۱۹]. با افزایش ویسکوزیته فاز جابه‌جاکننده، این فاز فرصت غلبه بر نیروی موئینگی در ابعاد کوچک‌تر را خواهد یافت.

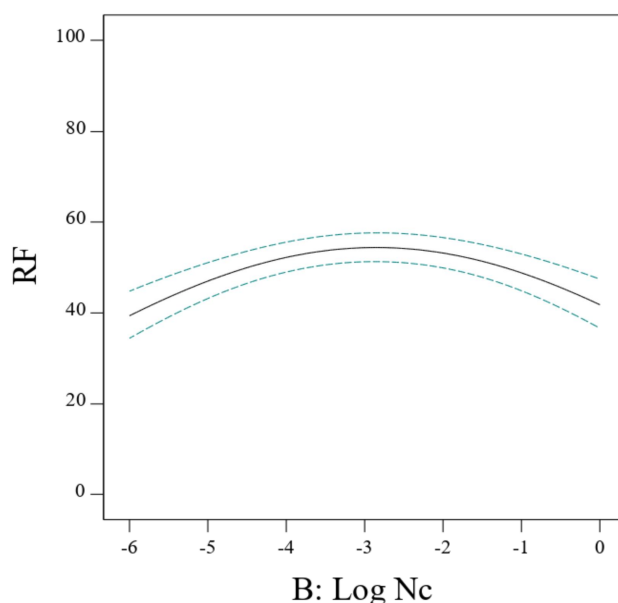
۴-۷-۳- تأثیر پارامتر عدد موئینگی

میزان اشباع سیال جابه‌جاشونده را در شکل (۸) در یک حجم تزریق، لگاریتم نسبت ویسکوزیته ۱/۵- و ترشوندگی ۹۰ درجه مشاهده می‌کنید. این نمودار نشان می‌دهد که اشباع سیال

همان‌طور که از نمودار مشخص است، میزان بازدهی تزریق با افزایش پارامتر نسبت ویسکوزیته افزایش می‌یابد و در $M=2$ به بیش‌ترین میزان خود خواهد رسید. طراحی آزمایش نشان داد که این پارامتر تأثیر 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 زود هنگام در هندسه‌های پیچیده‌تر به دلیل تفاوت فاحش میان ابعاد حفرات و گلوگاه‌ها تشدید و سبب به دام افتادن مقادیر



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

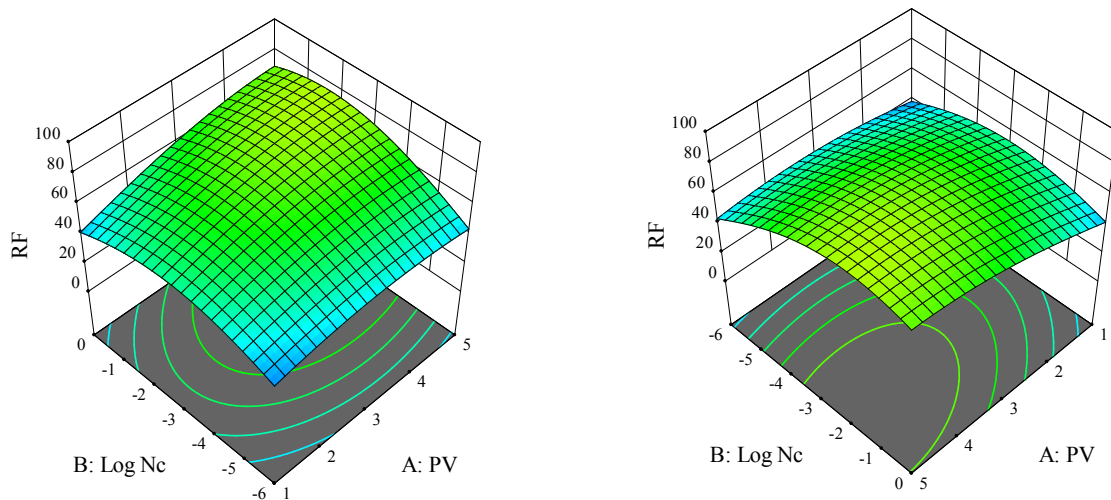


شکل ۸- تاثیر عدد موئینگی بر بازدهی جابه‌جایی دوفازی در مدل ناهمگن

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

۴-۷-۳-۱- برهم‌کنش حجم تزریق و عدد موئینگی همان‌طور که اشاره شد، طراحی آزمایش نشان داد که برای مدل

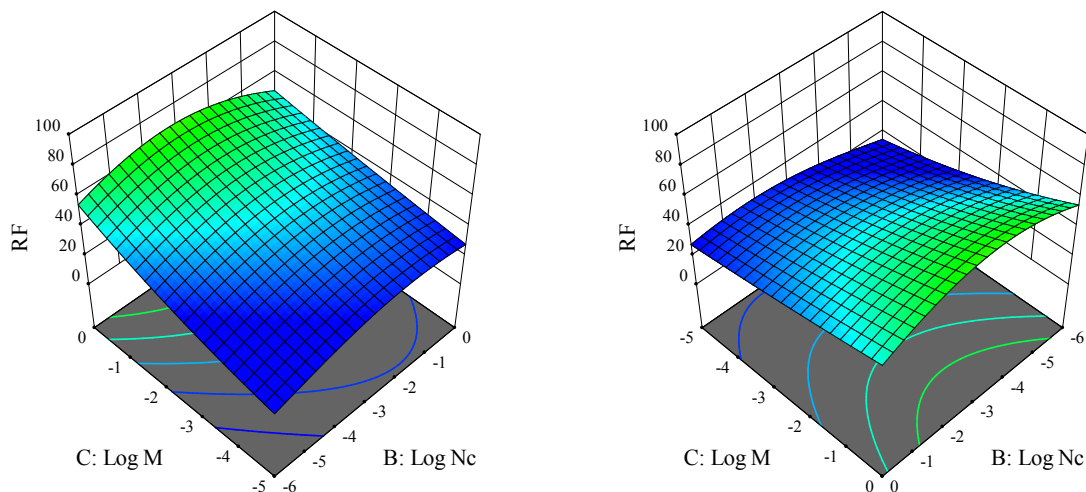
جابه‌جاکننده با افزایش عدد موئینگی افزایش می‌یابد. شیب افزایش بازدهی سیستم نیز همچنان در $\text{Log } N_c < -4$ نسبت به عدد موئینگی بسیار زیاد است اما در با رسیدن به $\text{Log } N_c = -3$ این میزان صفر می‌رسد و برای $\text{Log } N_c > -1.5$ شیب این نمودار نزولی می‌شود. هر چه عدد موئینگی بزرگ‌تر می‌شود، بازدهی در یک حجم تزریق افزایش می‌یابد. از تغییر پروفایل جابه‌جایی



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

۴-۷-۲- برهم کنش عدد موئینگی و نسبت ویسکوزیته دو سیال ناحیه دماغه‌زنی موئینگی در این سیستم طبق نمودار فازی به دست 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 نمی‌شود. 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 عملیات پیش تزریق است، نخواهد گذاشت؛ از طرفی تأثیر این ناحیه روی بازدهی تزریق واضح و قابل پیش‌بینی است. طراحی آزمایش برای نواحی که درستی آن با نمودار فازی اعتبارسنجی شده است برهم‌کنشی معنادار بین دو پارامتر نسبت ویسکوزیته و عدد موئینگی پیدا کرده است که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود. از این نمودار می‌توان برداشت کرد که تأثیر افزایش نسبت ویسکوزیته در اعداد موئینگی پایین بیشتر می‌شود. به عنوان مثال در $\text{Log } N_c = -6$ افزایش نسبت ویسکوزیته و رسیدن به $\text{Log } M = 0$ باعث بهبود ۴۰ درصدی بازدهی خواهد شد اما

ناهمگن، پارامتر حجم تزریق با پارامتر لگاریتم عدد موئینگی برهم‌کنش معنادار دارند. شکل (۹) تأثیر این دو پارامتر را به طور همزمان در لگاریتم نسبت ویسکوزیته $1/5$ - و زاویه تماس 90° درجه را نشان می‌دهد. طبق این نمودار، تأثیر حجم تزریق با افزایش عدد موئینگی زیاد می‌شود به نحوی که در لگاریتم عدد موئینگی -6 ، افزایش حجم تزریق از ۱ به ۵ تنها ۴ درصد بازدهی تزریق را بهبود می‌بخشد اما این میزان با افزایش عدد موئینگی افزایش می‌یابد. بیشینه تأثیر برای لگاریتم عدد موئینگی -1 مشاهده شد که افزایش حجم تزریق از ۱ به ۵، نزدیک به ۴۰ درصد بازدهی تزریق را بهبود می‌دهد. با افزایش عدد موئینگی، تأثیر نیروی ویسکوز افزایش می‌یابد بنابراین سیال 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 نیروی ویسکوز کافی سیال برای جابه‌جایی نفت باقی‌مانده، افزایش حجم تزریق کمکی به بهبود بازدهی نخواهد کرد.



شکل ۱۰- برهم کنش و تأثیر عدد موئینگی و نسبت ویسکوزیته بر بازدهی تزریق در مدل ناهمگن

بنابراین، مقدار زیادی از نفت از محیط خارج می‌شود. شایان ذکر است که پروفایل اشباع سیالات نشان داد که در محیط‌های خشی و نفت‌دوست، دماغه‌ها غالباً ویسکوز است؛ درحالی‌که در محیط آب‌دوست، ترکیبی از دماغه‌زنی‌های 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) تأثیر این برهم کنش‌ها آورده شده است.

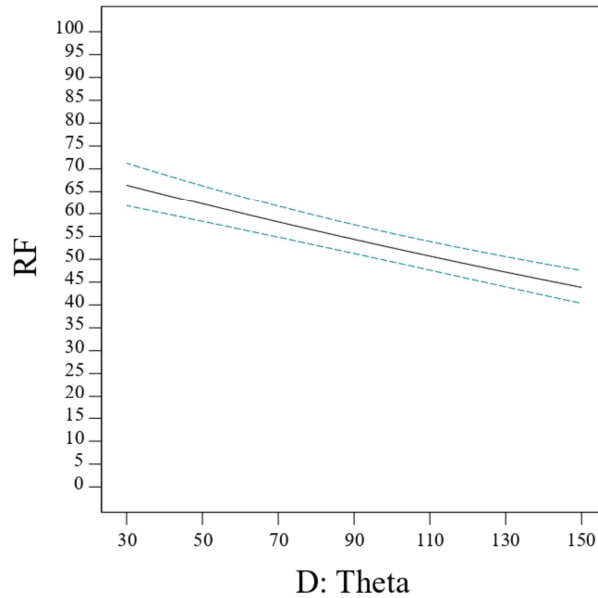
۴-۷-۴-۱- برهم کنش زاویه تماس و عدد موئینگی

با بررسی شکل (۱۲) که برهم کنش دو پارامتر زاویه تماس و عدد موئینگی را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که بیش‌ترین اثرگذاری مثبت کاهش زاویه تماس در $\text{Log } N_c = -6$ اتفاق می‌افتد و هر چه عدد موئینگی افزایش یابد اثرگذاری زاویه تماس کاهش می‌یابد. علت این برهم کنش میزان سرعت و پایداری رژیم جریان است. به طوری که در عدد موئینگی پایین به علت پایداریتر بودن رژیم جریان و کاهش اثر اینرسی، سیال در یک حجم تزریق فرصت کافی برای تخلیه مسیرهای کم تراوتر 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.

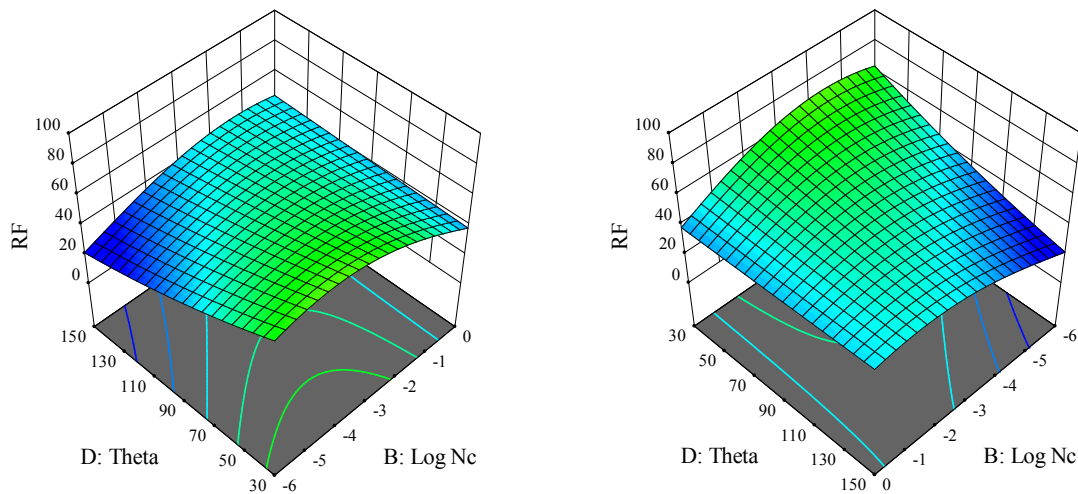
این میزان برای $\text{Log } N_c = 0$ به ۲۰ درصد خواهد رسید. این برهم کنش نشان می‌دهد که کاهش تحرک‌پذیری ناشی از افزایش ویسکوزیته عاملی مؤثر برای بهبود بازدهی در مدل ناهمگن به شمار می‌آید. شایان ذکر است که تأثیر برهم کنش این دو پارامتر برای نسبت‌های ویسکوزیته بالاتر نیز برقرار است با این تفاوت که در اعداد موئینگی بالا، به دلیل حضور ناحیه جابه‌جایی یکنواخت دیگر شاهد روند نزولی لگاریتم عدد موئینگی نخواهیم بود. شیب نزولی که به علت ناپایداری رژیم جریان و میان‌شکنی سریع اتفاق می‌افتد، با نزدیک شدن به ناحیه جابه‌جایی یکنواخت اثر خود را از دست داده و با حرکت سیال جابه‌جاکننده، همه سیال موجود در مسیر جبهه‌های جریانی را با خود به حرکت در می‌آورد و در عدد موئینگی بالا، بازدهی به شیب صفر و نه منفی خواهد رسید.

۴-۷-۴-۲- تأثیر پارامتر زاویه تماس

شکل (۱۱) تأثیر زاویه تماس را در بازه 30° تا 150° روی بازدهی در لگاریتم نسبت ویسکوزیته $1/5$ ، حجم تزریق یک و لگاریتم عدد موئینگی ۳- نشان می‌دهد. طبق این شکل، هر چه به سمت زاویه تماس 30° درجه پیش‌روی شود، میزان بهره‌وری افزایش می‌یابد. در محیط‌های آب‌دوست، فاز ترشونده علاوه بر حفرات بزرگتر، حفرات ریز را نیز مورد تهاجم قرار می‌دهد.



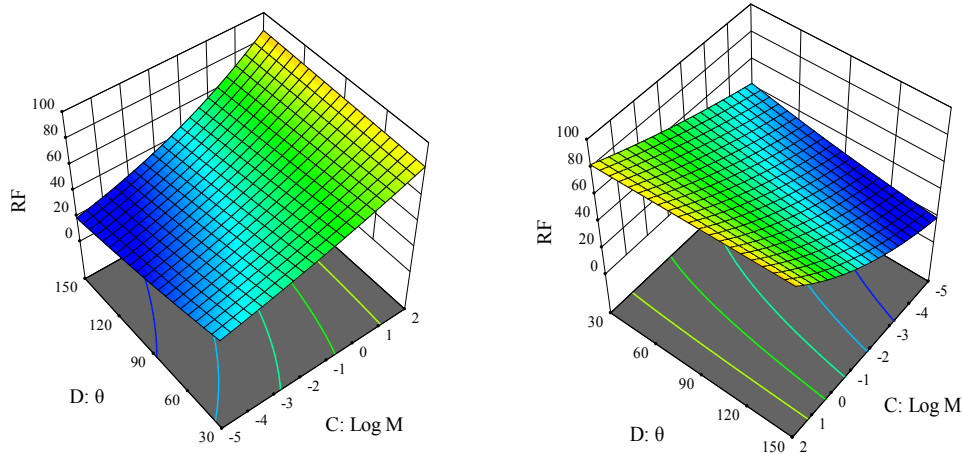
شکل ۱۱- تأثیر زاویه تماس بر بازدهی جابه‌جایی دوفازی مدل همگن افزایش یافته



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

دهد. می‌توان از این برهم‌کنش استنباط کرد که تأثیر کاهش تحرک‌پذیری روی سیستم ناهمگن، بیشتر از کاهش زاویه تماس باعث بهبود بازدهی پس از یک حجم تزریق خواهد شد. این نتیجه برای عملیات پیش‌تزریق که عموماً زاویه تماس در مخازن تحت تزریق نزدیک به 150° است، بسیار حائز اهمیت است.

۴-۷-۲- برهم‌کنش زاویه تماس و نسبت ویسکوزیته
شکل (۱۳) تأثیر برهم‌کنش 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 150° بیشتر اثرگذار است؛ به نحوی که می‌تواند بازدهی تزریق را تا ۶۵ درصد در یک حجم تزریق بهبود



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

حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. پس از آن، بازدهی تقریباً 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 موئینگی نشان داد که با افزایش عدد موئینگی، حجم تزریق 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 به‌دست‌آمده نشان داد که اثر تغییر ترشوندگی در نسبت‌های ویسکوزیته پایین‌تر اهمیت بیشتری دارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از مرکز خدمات فناوری نفت شریف - ازدیاد

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 هیلارد و ناویراستوکس برای ارزیابی اثرات ویسکوز و موئینگی با استفاده از روش اجزای محدود حل شدند. آنالیز حساسیت در مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها 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 ویسکوز با تغییر عدد موئینگی و نسبت ویسکوزیته مشاهده شدند. نتایج جریان شبیه‌سازی شده با آزمایش‌های میکرومدل موجود در تاریخچه ادبیات مطابقت خوبی داشت. با انجام این مدل‌سازی، $\text{Log } M \approx -2.5$ و $\text{Log } Nc \approx -5$ به عنوان شرایط محدودکننده برای ناحیه دماغه‌زنی ویسکوز محاسبه شدند. مرزهای تقریبی جابجایی پایدار در $\text{Log } M \approx 0.5$ و $\text{Log } Nc \approx -2$ قرار دارند. $\text{Log } M \approx -0.5$ ، $\text{Log } Nc \approx -5$ نیز به عنوان مرز بحرانی برای ناحیه دماغه‌زنی موئینگی محاسبه شد. تأثیر حجم تزریق بر بازدهی جابجایی دوفازی نشان داد که با افزایش حجم تزریق از ۱ به ۴، بازدهی نفت (پاک‌سازی ناحیه اطراف چاه)

نیز پشتیبانی محاسباتی در مدت انجام آن صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنند.

برداشت و بهبود تولید، مستقر در مجتمع خدمات فناوری دانشگاه صنعتی شریف، برای بررسی پیشنهاد اولیه این طرح و

واژه‌نامه

- | | | |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 1. Pre-flush | 5. LSM | 9. minimum free energy |
| 2. capillary number | 6. PFG | 10. convection-diffusion |
| 3. capillary fingering | 7. finite element method | 11. augmented central composition |
| 4. viscous fingering | 8. navior stokes | 12. design of expert |

مراجع

- 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., AlKhalidi, 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.
- Suzuki, F., "Precipitation of Asphaltic Sludge During Acid Stimulation Treatment: Cause, Effect, and Prevention", *SPE Western Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers*, 1993.
- 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 Asphaltic 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., Oostrom, 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.
- 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.
- 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.
- 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,

- pp. 42-51, 2009.
18. 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.