

شبیه‌سازی میکروفلوئیدیک به منظور شناسایی نیروهای موثر در حرکت سیال درون

محیط متخلخل

امین احمدی*، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجدسلیمان ■ فرشاد عبدی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر

چکیده

فرآیندهای ازدیاد برداشت و تولید نفت مستقیماً به جابه‌جایی نفت از درون حفرات ریز مربوط می‌شوند. به‌منظور آنالیز و ارزیابی دقیق جریان سیال درون این حفرات شبیه‌سازی میکروفلوئیدیک مورد نیاز است. به‌طور کلی تعامل با سیالات در ابعاد میکرو در حوزه‌ی تخصصی میکروفلوئیدیک است. میکروفلوئیدیک هم به‌عنوان علم، در شناخت و بررسی رفتارهای سیالات و هم به‌عنوان فناوری، در ساخت و استفاده از ویژگی‌های خاص سیالات در این ابعاد در حال پیشرفت و ورود به حوزه‌های مختلف است. جریان میکروفلوئیدیکی جریان سیال درون میکروکانال‌ها و یا میکروحفرات هستند که به واسطه‌ی کانال‌های ورودی و خروجی با محیط اطراف در تعامل هستند. سیالات در جریان حرکت در این کانال‌ها و حفرات می‌توانند با هم مخلوط شده یا از هم جدا شوند. هدایت و کنترل سیالات نیز می‌تواند از خارج یا از داخل به‌واسطه طراحی صورت گرفته، انجام شود. شبیه‌سازی سیال در این ابعاد به‌خوبی توصیف‌کننده جریان سیال درون میکروحفرات سنگ مخزن است. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی میکروفلوئیدیک به بررسی جریان درون گلوگاه‌ها و حفرات یک سنگ مخزن خواهیم پرداخت تا نحوه حرکت جریان سیالات دو فازی و تاثیر نیروهای مختلف مثل کشش سطحی به‌خوبی دیده شده و مورد تحلیل قرار گیرند. میکرومدل با دانه‌های مربعی شکل به‌همراه یک مدل تک حفره همگرا اگر مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که نیروهای موینگی چگونه با کنترل سطح تماس بین آب و نفت میزان بازده جابه‌جایی را کنترل می‌کنند. تغییرات سرعت در گلوگاه همگرا^۱ و واگرا^۲ بسیار بیشتر از سایر نقاط بوده و کنترل افت فشار بر عهده این نقطه است.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۱۲/۱۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۰۲/۰۶

واژگان کلیدی:

میکروفلوئیدیک، ازدیاد برداشت، میکرومدل، حفرات سنگ مخزن.

مقدمه

روی میکرومدل یا یک محیط متخلخل دو بعدی مصنوعی، برای شبیه‌سازی محیط متخلخل در مقیاس کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد که امکان بررسی و مشاهده وقایع در مقیاس حفرات را فراهم می‌کند. میکرومدل‌ها معمولاً با حکاکی الگوهای جریان بر روی شیشه‌هایی ساخته می‌شوند که شکل و هندسه دقیقی دارند، اما اندازه و ارتباط حفرات در آن محدودیت دارد. از میکرومدل‌ها می‌توان برای مشاهده جریان سیال و مکانیزم‌های حرکت سیال و سطوح تماس سیالات در محیط متخلخل و همچنین به‌منظور مشاهده فرآیندهای انتقال ذرات و مواد شیمیایی در مقیاس خلل و فرج استفاده کرد. با شبیه‌سازی میکروفلوئیدیک امکان ارزیابی نحوه حرکت سیال درون حفرات میسر شده و می‌توان تاثیر پارامترهایی چون سایز حفره، هندسه حفره، ارتباط حفره با گلوگاه‌ها در محیط متخلخل و تاثیر آن بر فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت را به‌خوبی مورد مطالعه قرار داد [۳-۴]

کوچاران و همکاران (۲۰۱۸) شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در کانال‌های متنوع با هندسه‌های پیچیده را بررسی کرده‌اند. سیال نیوتنی استفاده شده در آزمایش‌ها

میکروفلوئیدیک طراحی و مطالعه ابزاری است که سبب حرکت و بررسی مقادیر بسیار کوچک سیالات که از یک قطره هم کوچکترند، می‌شود. ابزار میکروفلوئیدیک میکروکانال‌هایی دارند که اندازه‌ای در محدوده میلی‌متر و کوچک‌تر از میکرون دارند. میکروفلوئید به‌طور گسترده در علوم زیستی به‌کار می‌رود زیرا آزمایش‌های کنترل‌شده به‌طور دقیق می‌توانند با هزینه کمتر و سرعت بالاتر عمل کنند. در حین کوچک‌سازی و اتوماسیون که توسط میکروفلوئیدیک ایجاد می‌شوند، ممکن است یکی از موارد زیر رخ دهد: [۱-۲]

الف) توسعه دقیق آزمایش‌ها

ب) محدودیت‌های کمتر برای شناسایی

ج) انجام چندین بررسی به‌طور همزمان

رفتار جریان سیالات پلیمری، نفتی و سیالات خاص دیگر که غیرنیوتنی هستند عموماً بسیار پیچیده‌تر از سیال نیوتنی است و در فرآیندهای مختلف از نظر کیفیت و بازده تولید اثر فراوان دارد. از این‌رو جریان‌های غیرنیوتنی به‌صورت آزمایشگاهی و عددی در هندسه‌های مختلف کانال همچون تبدیل همگرا، تبدیل واگرا و حفره را ارائه می‌دهد. شبیه‌سازی میکروفلوئیدیک قابلیت اجرا بر

* نویسنده عهد‌دار مکاتبات (ahmadi.amin68@yahoo.com)

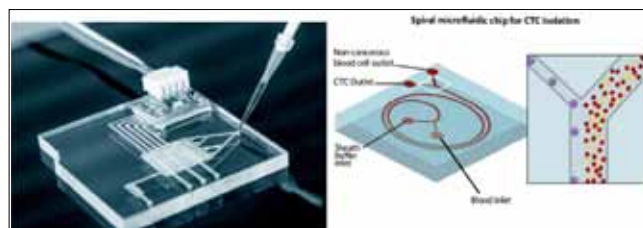
مورد مطالعه قرار دادند. دستگاه ماسه‌سنجی میکروفلوئیدیک استفاده شده زمان و هزینه را نسبت به سایر روش‌های سنتی جهت افزایش بازیافت نفت کاهش می‌دهد و همچنین به سرعت می‌توان برای انتخاب سیال ازدیاد برداشت نفت تمرکز کرد. [۹] گل شکوه و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی از میکرومدل‌های نونین جهت بررسی فرآیند ازدیاد برداشت شیمیایی با استفاده از نانوذرات سیلیکا استفاده کرده‌اند. طراحی میکرومدل‌های شیشه‌ای به صورت سه بعدی و ساخت آنها با استفاده از دانه‌های شیشه‌ای و کانی‌های معدنی نظیر ماسه‌سنگ با شکل هندسی کروی و غیر کروی انجام شد. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد با بررسی سیلاب‌زنی^۳ ترکیب هیبریدی پلیمر و نانو در میکرومدل، افزایش بازیافت نفت و تشکیل امولسیون نفت در آب در مقایسه با تزریق پلیمر به‌تنهایی مشاهده شد و همچنین میکرومدل‌های شیشه‌ای جدید طراحی شده وسیله مناسبی را برای مشاهده جریان سیال در سه بعد فراهم می‌کند. [۱۰] کریمان‌مقدم و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی به شبیه‌سازی تزریق پلیمر در میکرومدل شکافدار حاوی نفت سنگین پرداخته‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که اضافه کردن پلیمر به آب به‌خصوص در مخازن شکافدار پدیده انگشتی شدن^۴ را کاهش و میزان بازیافت نفت در فرآیند تزریق آب را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در میکرومدل با تعدادی شکاف کوتاه، میزان بازیافت نفت بهتر از سایر حالات است. [۱۱] ایزدی و همکاران (۱۳۹۷) در یک مطالعه به بررسی آزمایشگاهی سیلاب‌زنی با نانوسیالات جهت افزایش بازیافت نفت با استفاده از میکرومدل شیشه‌ای پرداختند. آنها با توجه به نتایج مجموعه آزمایش‌های میکرومدل، نانوسیالات پایدار (گاما-آلومینا و سیلیکا) را به‌عنوان سیالات مناسبی جهت ازدیاد بازیافت نفت عنوان کردند همچنین، ازدیاد بازیافت که عموماً تحت مکانیزم‌های تغییر ترشوندگی ناشی از جذب نانوذرات (گاما-آلومینا و سیلیکا) به دیواره حفرات و کاهش کشش بین سطحی رخ می‌دهد در تست‌های میکرومدل توانستند بازیافت را تا بیشتر از ۲۵ درصد افزایش دهند. [۱۲] در این تحقیق به شبیه‌سازی و حرکت جریان و اختلاط دو سیال درون لوله و دیدن اثر نیروهای مختلف می‌پردازیم. متغیرهای اساسی در این تحقیق میزان تغییر حجم محیط متخلخل، سایز حفرات، کشش سطحی و میزان جابه‌جایی سیالات درون حفرات است که با مدل‌سازی میکروفلوئیدیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کاربردهای میکروفلوئیدیک در مهندسی نفت

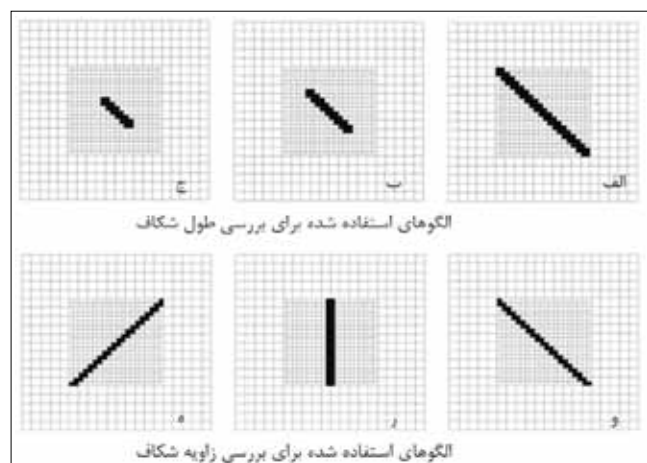
میکروفلوئیدیک^۵ تکنیک بسیار جالبی برای محققان آکادمیک و

ترکیبی از ماده قندی و آب است و سیال غیرنیوتنی استفاده شده در آزمایش‌ها محلول رقیق پلی‌اکریلامید ترکیب شده در آب و ماده قندی می‌باشد [۵] در پژوهشی توسط صادقی و همکاران (۲۰۰۳) حل دقیق معادلات جریان درون حفرات متخلخل و لایه مرزی برای سیال ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. آنها مشاهده کردند در صورتی که الاستیسیته سیال به اندازه کافی بالا باشد، سرعت سیال در داخل لایه مرزی ممکن است از سرعت سیال در خارج از این لایه بیشتر شود. [۶] یو و همکاران (۲۰۱۲) به شبیه‌سازی میکروفلوئیدیک حرکت نانوذرات در مقیاس حفرات سنگ مخزن پرداختند. آنها تاثیر اندازه حفرات در مسدودسازی توسط ذرات نانو و نیروهای جذب‌کننده سطحی را بررسی کردند. [۷]

Gogoi و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی مروری روش‌های ازدیاد برداشت از قبیل سیلاب‌زنی شیمیایی مانند پلیمر، سیلاب‌زنی سورفکتانت و تزریق گاز در میکرومدل پرداخته است. در این پژوهش ازدیاد برداشت نفت و پدیده انگشتی شدن و تغییرات نفوذپذیری و میزان بازیابی نفت در میکرومدل توسط محققان در گذشته مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. [۸] نیلسون و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی اثر رئولوژی سیال را در ازدیاد برداشت نفت از سیستم میکروفلوئیدیک ماسه‌سنجی



شکل ۱ | شماتیک میکروچیپ‌های مختلف [۲]



شکل ۲ | الگوهای میکرومدلی برای جریان در شکاف [۱]

باقیمانده درون مخزن به درون چاه‌های تولیدی رانده شود. در صورت ناهمگن بودن مخزن، به‌عنوان نمونه مخزن حاوی شکاف، آب به‌دنبال آسان‌ترین مسیر به‌سمت چاه تولیدی است. در این حالت آب از بین شکاف‌ها و لایه‌های با تراوایی بالا عبور می‌کند و خود را به چاه‌های تولید می‌رساند. در این حالت نفت سایر مناطق دست‌نخورده باقی می‌ماند، در نتیجه میزان ضریب جاروبی^۶ مخزن کاهش می‌یابد. [۱۳] برای انجام آزمایشات جریان چند فاز، از میکرومدل‌های شیشه‌ای استفاده می‌شود. این میکرومدل‌ها به‌عنوان مدل دو بعدی سنگ مخزن در نظر گرفته می‌شوند که مهم‌ترین مزیت آنها قابلیت مشاهده حرکت سیال است که از لحاظ کیفی به تهیه بهترین مدل‌های حرکت سیال در محیط متخلخل کمک می‌کند. همچنین در این میکرومدل‌ها می‌توان بسیاری از خصوصیات ناهمگنی مخزن را بررسی کرد. در سال‌های اخیر مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی تزریق مواد شیمیایی از جمله پلیمر، سورفکتانت و آلکالین در مقیاس میکرومدل صورت گرفته است. بررسی اثر غلظت پلیمر، غلظت نمک، نرخ تزریق و اختلاف میزان بازیافت تزریق پلیمر و آب در مطالعات آزمایشگاهی سایر محققین انجام شده است همچنین بررسی و شبیه‌سازی اثر هندسه شیل و آب همزاد در تزریق محلول پلیمر صورت گرفته است. اما در مورد بررسی اثر الگوهای احتمالی یک شبکه شکافدار مطالعات کمی صورت گرفته است و نیاز به بررسی جامع در این حوزه احساس می‌شود. از آنجاکه انجام آزمایشات میکرومدل مانند هر فعالیت آزمایشگاهی دیگر نیاز به مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار دارد، روش‌های عددی به‌عنوان گزینه‌های ارزان، سریع و در عین حال قابل‌اعتماد همواره مورد توجه است. [۱۴، ۱۵] علاوه بر این تحقیقات در حوزه آب هوشمند و تزریق آب کم‌شور در مخازن در مقیاس حفره یا میکروفلوئیدیک جای دارد. تفاوت ترکیب آب تزریقی با آب سازندی و تغییر ترشوندگی در فرآیند سیلاب‌زنی آب‌شور رقیق سبب شده است که این فرآیند یکی از روش‌های ازدیاد برداشت نفت^۷ محسوب شود. چندین فرضیه‌ی مختلف به‌عنوان مکانیسم‌های سیلاب‌زنی آب کم‌شور^۸ ارائه شده است اما هیچ‌یک از این فرضیه‌ها که تاکنون ارائه شده است به‌طور کلی به‌عنوان مکانیسم

گروه‌های صنعتی است. امروزه بیشتر کشورها، در حال توسعه‌ی تکنولوژی میکروفلوئیدیک هستند. بیش از ۵۰ شرکت و تیم تحقیقاتی در سراسر جهان بر روی این موضوع کار می‌کنند. سیستم‌های میکروفلوئیدیک با استفاده از یک پمپ و یک چپ یا تراشه کار می‌کنند. انواع متفاوتی از پمپ‌ها به‌دقت مایعات را درون چپ با سرعت یک میکرولیتر در دقیقه تا چندین میکرولیتر در دقیقه حرکت می‌دهند. [۱، ۲] برای مقایسه، یک قطره کوچک آب را می‌توان مثال زد که تقریباً یک‌صدم میکرولیتر است. درون چپ، میکروکانال‌هایی وجود دارد که امکان انجام فرآیندهایی چون مخلوط شدن، واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی را برای مایعات، فراهم می‌کنند. میکروچپ الگویی از میکروکانال است که قالب زده شده است. شبکه میکروکانالی که درون میکروچپ قرار دارد، توسط چندین حفره که اندازه‌های متفاوتی دارند و در میکروچپ موجود هستند، به محیط ماکرو متصل می‌شود. در این مسیرها مایعات به داخل تزریق شده و چپ میکروفلوئیدیک تخلیه می‌شود. مسیر مایعات به‌منظور دستیابی به سیستم‌های پیچیده اتومات و با عملکرد بالا، مشخص شده و دستکاری می‌شود. کار در شبکه میکروکانالی باید به‌دقت انجام شود تا بتوان این موارد را محقق کرد. مزایای میکروفلوئیدیک عبارت است از:

- ۱- زمان واکنش کمتر
 - ۲- حساسیت بالا در بررسی
 - ۳- کنترل پیشرفته دما
 - ۴- قابل حمل بودن
 - ۵- اتوماسیون و موازی‌سازی ساده‌تر
 - ۶- یکپارچگی روش‌های آزمایشگاهی در یک ابزار
- در مهندسی نفت معمولاً پژوهشگران علاقمند به مدل‌سازی حرکت جریان سیالات نفت، گاز و آب در ابعاد هندسه میکروحفرات هستند. حفرات موجود در محیط متخلخل و در مقیاس بزرگ‌تر شبکه‌های حفره‌ای خود ساختاری از یک میکرومدل می‌باشند. جریان سیال در این میکروکانال‌ها و میکروحفرات در الگوی میکروفلوئیدیک قرار دارد. [۴، ۷] به‌عنوان نمونه می‌توان با کاربرد میکرومدل‌ها در شبیه‌سازی جریان درون شکاف مخازن نفتی جریان سیال درون آنها را مدل کرد. در تمامی مخازن به‌علت تولید نفت، افت فشار شدیدی روی می‌دهد. این افت فشار مانع از تولید نفت درون مخزن به‌صورت طبیعی می‌شود. برای حفظ فشار مخزن از سیلاب‌زنی آب استفاده می‌شود. در این روش آب تزریقی سبب می‌شود نفت

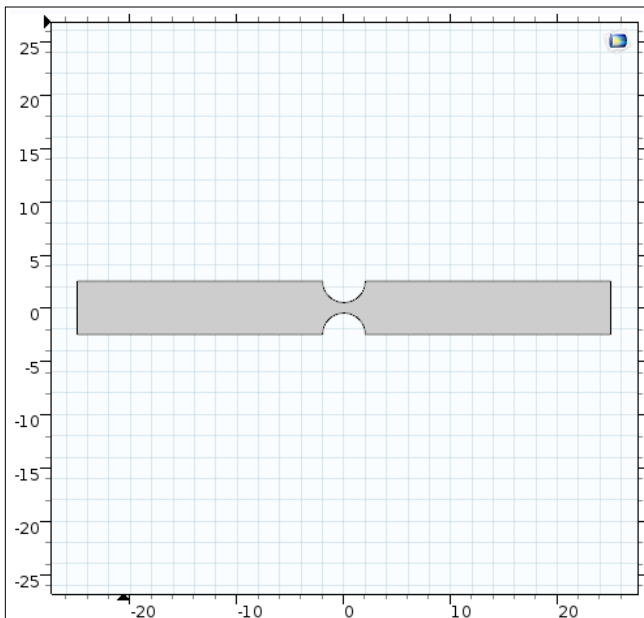
عدد موینگی و کاهش نیروی چسبندگی بین ذرات رس در اثر افزایش دافعه لایه دوگانه و نیروی هیدرودینامیکی سبب کنده شدن و جابه‌جایی پیستونی سیستم نفت‌رس می‌شود. [۱۴، ۱۶]

روش پژوهش

در این تحقیق ابتدا هندسه مدل تک حفره و تک کاناله ساخته می‌شود. این مدل تک کاناله حفرات، به‌منظور ارزیابی شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کانال ایجاد شده توسط نرم‌افزار گمیت مش‌بندی و هندسه آن آماده می‌شود. سپس با نرم‌افزار COMSOL میزان حرکت دو فاز آب و نفت درون حفرات و کانال مدل می‌شود. در ابتدا مدل جریان درون کانال از مقالات معتبر انتخاب شده که در منابع ذکر شده است و شبیه‌سازی با فلونت اعتبارسنجی می‌شود. سپس تاثیر اختلات سیالات درون حفرات، تاثیر سایز حفرات در مقدار نیروی موئینگی و تاثیر آن در جابه‌جایی سیال درون کانال و در نهایت شبیه‌سازی حرکت سیال درون محیط متخلخل و تعیین نقاط پرسرعت و کم‌سرعت سیال انجام خواهد شد که این پارامترها تاثیر زیادی در ارزیابی و مطالعات ازدیاد برداشت خواهند داشت.

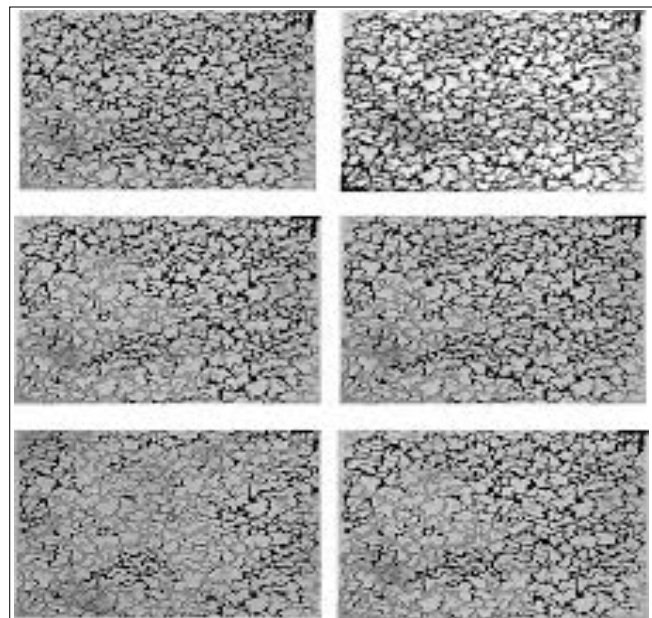
مدل‌سازی جریان در میکروکانال

در دیدگاه اویلر-اویلر، فازهای مختلف به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. از آنجاکه حجم یک فاز نمی‌تواند توسط فازهای دیگر اشغال شود، مفهوم کسر حجمی فازی معرفی می‌شود. کسرهای حجمی



شکل ۴ | هندسه مدل تک حفره

اصلی پذیرفته نشده است. فرض بر این است که اثر آب کم‌شور به‌دلیل دفع اجزای نفتی از سطح سنگ و نهایتاً تغییر ترشوندگی به‌سمت شرایط آب‌دوست‌تر است. حضور رس‌ها یا ذرات ریز دارای پتانسیل حرکت، یکی از مکانیسم‌های مطرح‌شده برای اثر آب کم‌شور است. اکثر مخازن ماسه‌سنگی شامل کانی‌های رسی در فضاهای خالی هستند که به‌وسیله دانه‌های ماسه ایجاد شده‌اند. سازندهایی با مقادیر رس بالا، اغلب حساس به آب هستند وقتی در معرض آب تازه قرار می‌گیرند تمایل به هیدراسیون یا پراکندگی دارند. مطالعات نشان داده است که کاهش درجه شوری آب تزریقی سبب انبساط و حرکت رس‌ها می‌شود. همچنین افزایش PH می‌تواند باعث تشدید انبساط و مهاجرت رس‌ها شود. به‌علاوه، اثرات هیدرودینامیکی سیلاب‌زنی در دبی‌های بالا بر روی مهاجرت ذرات می‌تواند قابل‌ملاحظه باشد. اگرچه اغلب سرعت‌های سیلاب‌زنی میدانی به‌صورت آرام است اما در بعضی موارد، خصوصاً در منافذ و گلوگاه‌های کوچک جریان آشفته می‌شود. بدون حضور آب همزاد سازندی، افزایش مهاجرت ذرات ریز در اثر سیلاب‌زنی شوراب رقیق سبب به‌حرکت درآمدن قطرات نفت چسبیده شده به رس‌ها و در نهایت افزایش بازیافت می‌شود. در حضور آب همزاد سازندی، سیلاب‌زنی ثانویه شوراب رقیق پس از سیلاب‌زنی آب دریا هیچ تاثیری در افزایش بازیافت ندارد زیرا حضور آب همزاد سبب آب‌دوستی شدید سطوح منافذ شده و جابه‌جایی فیلم مانند نفت توسط آب باعث شکسته شدن قطرات نفت می‌شود. سیلاب‌زنی آب‌شور رقیق در دبی‌های بالا نشان داد که با افزایش

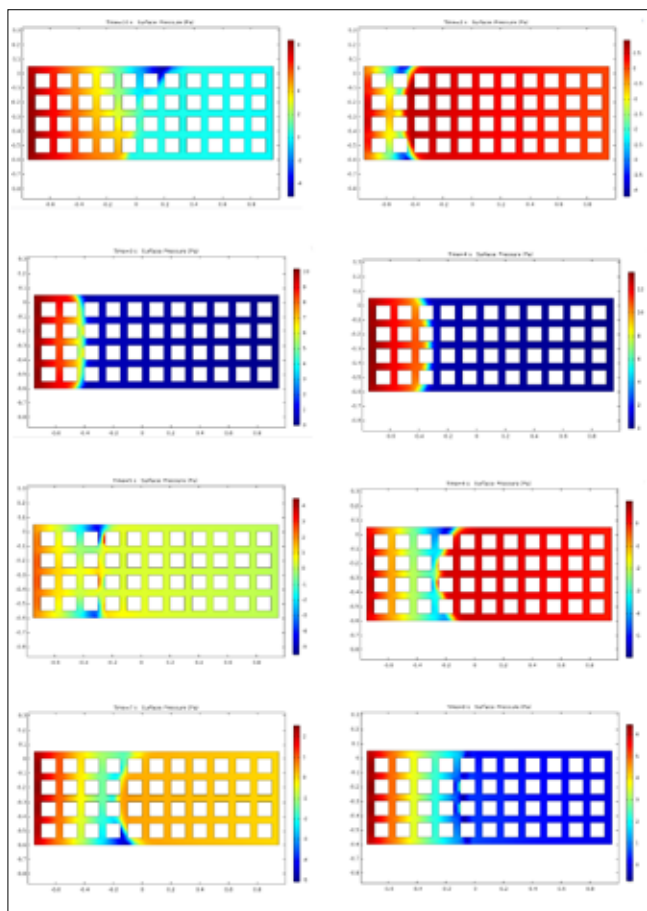


شکل ۳ | مطالعه با میکرومدل اثر شوری آب [۱۴]

مدل، یک‌سری معادله مومنتوم برای سیال‌ها در نظر گرفته می‌شود و کسر حجمی برای هر سیال در هر سلول دامنه مساله حل می‌شود. مدل VOF برای مدل کردن جریان لایه‌لایه^{۱۱}، جریان‌های سطح آزاد^{۱۲}، پر شدن یک مخزن، تکان خوردن سطح مایع در اثر اغتشاش، حرکت حباب‌های بزرگ در یک جریان مایع و ردیابی گذرا یا پایایی سطح مشترک گاز-مایع استفاده می‌شود. [۱۷]

مدل Mixture

این مدل برای دو یا چند فاز سیال یا ذرات استفاده می‌شود. مدل Mixture از یک معادله مومنتوم ترکیبی استفاده می‌کند، به گونه‌ای که خواص میانگین فازهای مختلف در معادله در نظر گرفته می‌شود. برای فازهای پراکنده این مدل از سرعت نسبی استفاده می‌کند. البته اگر مدل Mixture سرعت‌های نسبی را برای فازهای پراکنده در نظر نگیرد جریان چندفازی همگن را مدل می‌کند. کاربردهای این مدل شامل جریان‌های حاوی ذرات با بار کم، جریان‌های حبابی^{۱۳}، رسوب گذاری و جداساز سیکلونی می‌شود. [۱۷]

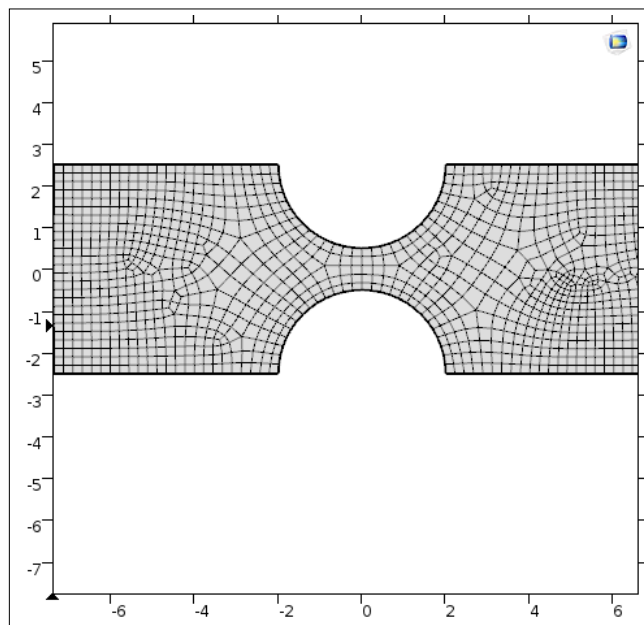


شکل ۷ | تغییرات فشار در طول مدل برای زاویه تماس ۱۲۰ درجه

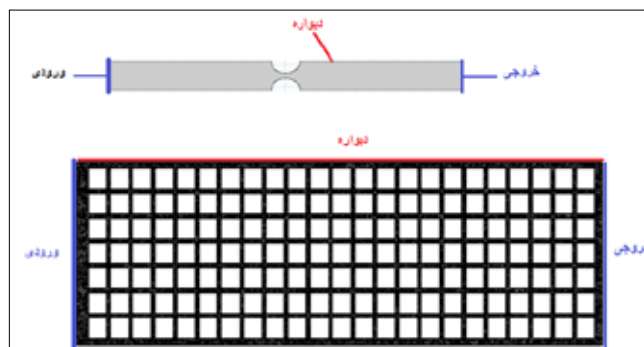
این‌گونه فرض می‌شوند که توابع پیوسته‌ای از زمان و مکان هستند و مجموع آنها برابر یک است. معادلات بقا برای هر فاز به صورت جدا به دست می‌آیند که به لحاظ ظاهری ساختار مشابهی برای همه فازها دارند. برای استفاده از این دیدگاه سه مدل VOF، Mixture، Eulerian وجود دارد. [۱۷]

مدل VOF

برای حل جریان دو فازی از مدل سازی VOF^{۱۰} در این مطالعه استفاده شده است. چراکه در مدل VOF سطح مقطع بین دو فاز قابل تشخیص بوده و این سطح مقطع توسط نیروهای موئینگی کنترل می‌شود. مدل VOF مدلی است که برای دو یا چند سیال مخلوط‌نشده استفاده می‌شود که سطح مشترک بین دو فاز حائز اهمیت خواهد بود. در این



شکل ۵ | مش مدل تک حفره



شکل ۶ | شرایط مرزی در حل مسائل

مدل Eulerian

طریق فشار و ضرایب تبادل بین فازی انجام می‌شود. شیوه‌ای که در این کوپل کردن استفاده می‌شود بر اساس نوع فازهای درگیر است به گونه‌ای که برای جریان‌های سیال-جامد متفاوت از جریان‌های سیال-سیال است. [۱۷]

هندسه و شرایط مرزی مسئله

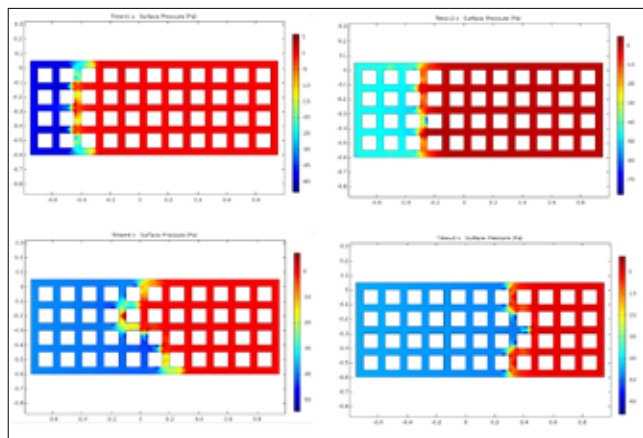
در مقیاس حفره نیروهای موئینگی غالب هستند. برای شبیه‌سازی حرکت سیال آب‌نفت در مقیاس است. هندسه میکرومدل شامل مجموعه‌ای از دانه‌ها به شکل مربع با فاصله یکسان از یکدیگر هستند. نوع مش موردنظر از نوع مثلثی بوده و کاملاً بر مدل منطبق است. مش‌بندی و هندسه مدل انتخابی در اشکال ۴ و ۵ نشان داده می‌شود. شرایط مرزی حل مسئله در شکل ۶ نشان داده شده است. سیال در کل محیط ابتدا آب فرض شده و سپس نفت وارد محیط می‌شود. زاویه تماس بین آب و نفت در ۶۰ درجه تنظیم شده است. حفرات از شبیه‌سازی میکروفلوئیدیک استفاده شده است. در ابتدا هندسه‌های تک حفره و چند حفره با هم بررسی شده است.

بحث و نتایج

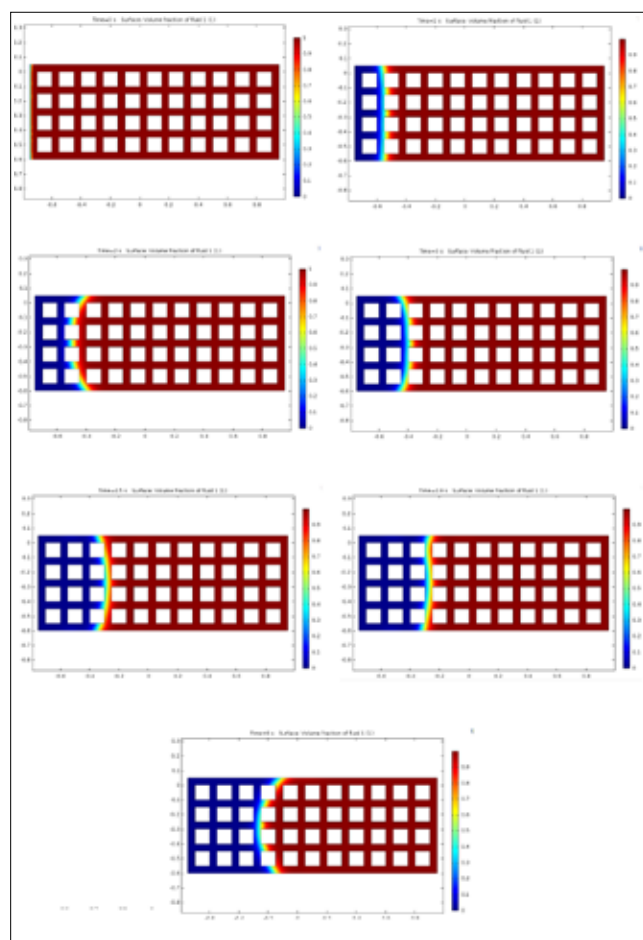
جابه‌جایی سیالات در مقیاس دسته حفرات

در این قسمت دسته حفراتی که در چارچوب دانه‌های مربعی شکل ساخته شده‌اند در معرض جابه‌جایی سیالات درون آنها قرار می‌گیرند. شکل ۷ تغییرات فشار درون میکرومدل را نشان می‌دهد. تغییرات فشار در دو فاز رخ می‌دهد چراکه فشار موئینه در گلوگاه و سطح تماس دو فاز متغیر است و عمده تغییرات در این مقاطع می‌باشد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است با گذشت زمان سطح

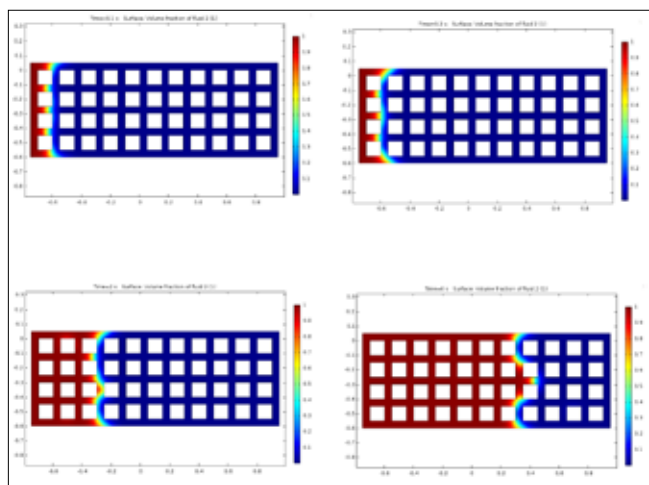
این مدل پیچیده‌ترین مدل چندفازی است. این مدل برای هر فاز معادلات پیوستگی و مومنتوم جدا حل می‌کند. کوپل این معادلات از



شکل ۸ | تغییرات فشار در طول مدل برای زاویه تماس ۳۰ درجه



شکل ۹ | تغییرات غلظت دو فاز در میکرومدل



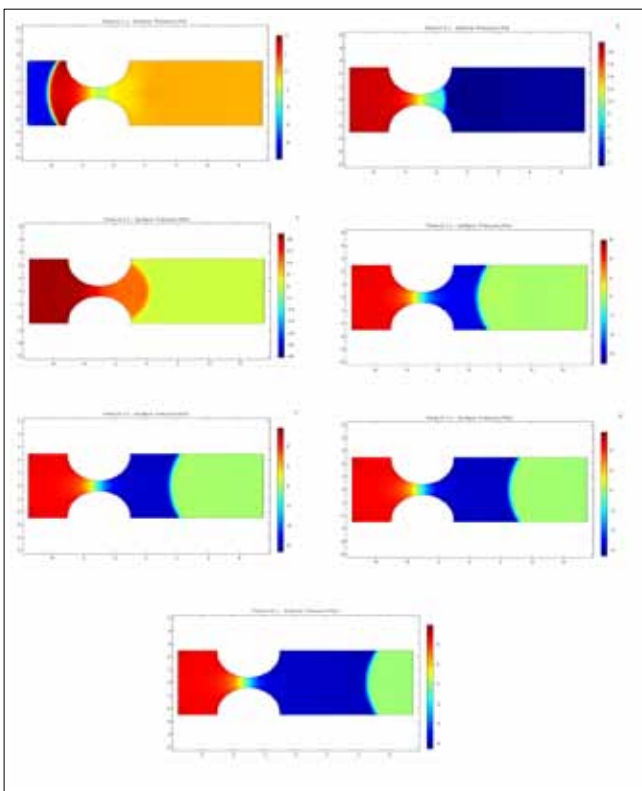
شکل ۱۰ | تغییرات غلظت دو فاز برای زاویه تماس ۳۰ درجه

می‌شود بیشترین سرعت در مرکز گلوگاه اتفاق می‌افتد. همچنین میزان کشش بین فازی در گلوگاه را می‌توان در پروفایل‌های سرعت مشاهده کرد که در اثر نفوذ سیال ترشونده به درون گلوگاه رخ می‌دهد این پدیده در واقع snap-off است که نقش مهمی در ازدیاد برداشت دارد. شکل ۱۲ تغییرات فشار را نشان می‌دهد همان‌طور که دیده می‌شود سیال ترشونده وارد حفره شده و فشار منفی است. به‌مرور که سیال به گلوگاه نزدیک می‌شود افزایش فشار منفی به‌علت غالب شدن نیروی موئینگی بر مومنتم رخ می‌دهد.

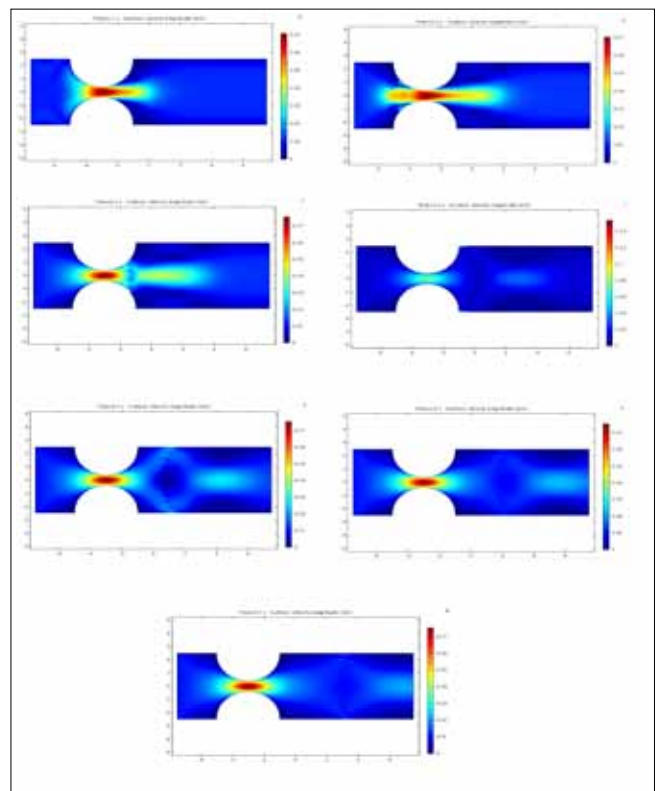
نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی میکروفلوئیدیک به بررسی جریان درون گلوگاه‌ها و حفرات یک سنگ مخزن پرداخته‌ایم تا نحوه حرکت جریان سیالات دو فازی و تاثیر نیروهای مختلف مانند کشش سطحی به‌خوبی دیده شوند و مورد تحلیل قرار گیرند. میکرومدل با دانه‌های مربعی شکل به‌همراه یک مدل تک حفره همگراو اگر مورد تحلیل قرار گرفت. میکروفلوئیدیک در واقع جریان سیال در ابعاد میکروکانال‌ها و حفرات یا مقاطعی که هندسه‌ی آنها در مقیاس میکرو است و ما به آن میکرومدل می‌گوییم و تنها تفاوتی

مقطع تماس دو سیال به‌صورت پیش‌رونده می‌باشد. در شکل ۷ زاویه تماس سیال ترکنده با دیواره ۱۲۰ درجه مدل شده است. همان‌طور که دیده می‌شود فشار موئینگی مثبت است و مقدار آن تا ۵ پاسکال می‌رسد. شکل ۸ تغییرات فشار را برای حالت زاویه تماس ۳۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود فشار موئینگی در این حالت بیشتر است. علاوه بر این چون فاز ترشونده مهاجم بوده بنابراین فشار موئینگی منفی است. شکل ۹ تغییرات غلظت دو فاز یا تغییرات سطح تماس دو سیال را در حالت زاویه ۱۲۰ درجه درون مجموعه حفرات نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر اختلاف نیروها در حفرات موئینه وقتی به چهارراه می‌رسند تقعر سطح مقطع نوسانی تغییر می‌کند. این اثر به‌علت تغییرات ناگهانی قطر، رخ می‌دهد. شکل ۱۰ تغییرات غلظت دو فاز یا تغییرات سطح تماس دو سیال را درون مجموعه حفرات برای زاویه تماس ۳۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در اثر اختلاف نیروها در حفرات موئینه سطح قطع سه انحناى مختلف می‌گیرد و تقعر سطح مقطع نوسانی تغییر می‌کند. این اثر به‌علت تغییرات ناگهانی قطر، رخ می‌دهد. میزان انحناى سطح تماس وقتی به گلوگاه می‌رسد بسیار متمرکز می‌شود. شکل ۱۱ تغییرات سرعت را نشان می‌دهد، مشاهده



شکل ۱۲ | تغییرات فشار سیال در حفره گلوگاه



شکل ۱۱ | تغییرات سرعت سیال در حفره گلوگاه

۱۲۰ درجه کمترین فشار موئینگی را داریم و با توجه به تعریف $PC=PNw-Pw$ تغییرات فشار برای ورود سیال ترشونده با توجه به زاویه تماس ۳۰ درجه منفی و برای سیال غیر ترشونده با زاویه تماس ۱۲۰ درجه مثبت است.

۴- در مجموعه حفرات جریانات گردشی لحظه‌ای به علت وجود چهارراه در مسیرها به وجود می‌آید.

۵- تغییرات فشار به صورت تپ‌های منظم در اثر رسیدن به گلوگاه‌های چهارراه رخ می‌دهد.

۶- در مدل حفره گلوگاه، هنگام ورود سیال ترشونده به حفره فشار منفی است. به مرور که سیال به گلوگاه نزدیک می‌شود افزایش فشار منفی به علت غالب شدن نیروی موئینگی بر مومنتم رخ می‌دهد.

۷- سرعت در جریانات گردشی کاملاً وابسته به زمان بوده و ناپایدار است. این تغییرات سرعت ناگهانی ناشی از نیروهای موئینگی است که در گلوگاه‌ها دچار تغییرات می‌شوند. تغییرات نیروهای موئینه به نوبه خود تغییرات فشار و جریان را در پی خواهد داشت. ■

که جریان سیال در میکرومدل با جریان در لوله‌ها و مقاطع بزرگ‌تر دارد این است که نیروی موئینگی غالب است و این نیرو بیشتر کنترل جریان سیال را در اختیار دارد. به طور کلی این نتایج از این تحقیق حاصل می‌شود:

۱- نتایج نشان داد که نیروهای موئینگی چگونه با کنترل سطح تماس بین آب و نفت میزان بازده جابه‌جایی را کنترل می‌کنند.

۲- تغییرات سرعت در گلوگاه همگرا و واگرا بسیار بیشتر از سایر نقاط بوده و کنترل افت فشار بر عهده این نقطه است.

۳- تغییرات موئینگی برای سیال ترشونده و سیال غیر ترشونده با زاویه تماس ۳۰ و ۱۲۰ درجه کنترل شد. تغییرات فشار برای ورود سیال ترشونده منفی و برای ورود سیال غیر تر مثبت است. بدین منظور که با افزایش قطر میکرومدل فشار موئینگی کاهش می‌یابد و بالعکس و همچنین هرچه زاویه تماس کمتر باشد مقدار چسبندگی سطحی افزایش یافته و در نتیجه فشار موئینگی افزایش می‌یابد، بدین ترتیب در زاویه تماس ۳۰ درجه بیشترین فشار موئینگی و در زاویه تماس

پانویس‌ها

1. Converging
2. Diverging
3. Flooding
4. Fingering
5. Microfluidic
6. Swipe coefficient
7. Enhanced Oil Recovery

8. low-salinity waterflooding
9. Fresh water
10. Volume of Fluid
11. stratified flow
12. free-surface flows
13. bubbly flows

منابع

rheology on enhanced oil recovery in a microfluidic sandstone device, 2013, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 202 (2013) 112-119. [ps://doi.org/10.1007/s13202-019-0610-4](https://doi.org/10.1007/s13202-019-0610-4).

[۱۰]. گل شکوه، سعید، حکمت‌زاده، مهناز، خرمیان، رضا، ۱۳۹۶، طراحی میکرومدل‌های جدید سه بعدی برای بررسی عملکرد نانوذرات سیلیکا در افزایش اثربخشی تزریق آب، مجله پژوهش نفت، شماره ۹۶.

[۱۱]. کریمان‌مقدم، علی، صادق‌زاد، سعید، جعفری، آرزو، شبیه‌سازی فرآیند تزریق پلیمر در میکرومدل شکافدار حاوی نفت سنگین، پژوهش نفت، شماره ۸۳.

[۱۲]. ایزدی، نصرت، مرادی‌کوچی، مهران، دهقان، علی‌اکبر، گنجه قزوینی، مصطفی، مرادی، ابوالفضل، ۱۳۹۷، مطالعه آزمایشگاهی سیلاب‌زنی با نانوسیالات و مکانیزم‌های موثر بر افزایش بازافت نفت با استفاده از میکرومدل، پژوهش نفت، شماره ۱۰۱.

[13]. Zhang .L.D, Liu.S, Puerto.M, Miller .C.A, Hirasaki.G.J. "Wettability alteration and spontaneous imbibition in oil-wet carbonate formation, Journal of Petroleum Science and Engineering 52 (2006).

[14].J. Sheng, Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice. Gulf Professional Publishing, Gulf Professional Publishing, USA, 648, 2010.

[15].M. Sabet, S. N. Hosseini, A. Zamani, Z. Hosseini, and H. Soleimani, Application of Nanotechnology for Enhanced Oil Recovery: A Review, Defect and Diffusion Forum, 367,149-156, 2016.

[16].M. Barahoei, Z. A. Hezave, S. Sabbaghi, and S. Ayatollahi, Copper Oxide Nano-Fluid Stabilized by Ionic Liquid for Enhancing Thermal Conductivity of Reservoir Formation: Applicable for Thermal Enhanced Oil Recovery Processes, Chem. Ind. Chem. Eng. Q., 22,211-225, 2016.

[۱۷]. ایمان میرزاییان، میترا جوان، افشین اقبال‌زاده، حسین بنگداری، ۱۳۸۹، مقایسه مدل‌های VOF, Mixture در شبیه‌سازی جریان ریزشی روی سرریزهای یلکانی، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران

[۱]. علی کریمان مقدم، صادق‌زاد و آرزو جعفری، ۱۳۹۴، شبیه‌سازی فرآیند تزریق پلیمر در میکرومدل شکافدار حاوی نفت سنگ، پژوهش نفت، شماره ۸۳.

[2].T. Cochrane, K. Walters, M. F. Webster, On Newtonian and Non-Newtonian Flow in Complex Geometries, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, pp. 163-181. 2018.

[3].M. Norouzi, S. R. Varedi, M. J. Maghrebi, M. M. Shahmardan, Numerical investigation of Viscoelastic shedding flow behind a circular cylinder, J. Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 197, pp. 3 1-40, 2013.

[4].T. Yamamoto, M. Ishiyama, M. Nakajima, K. Nakamura, N. Mori, Threedimensional viscoelastic flows through a rectangular channel with a cavity, J. Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 1 14, pp. 13-31, 2003.

[5].T. Cochrane, K. Walters, M. F. Webster, On Newtonian and Non-Newtonian Flow in Complex Geometries, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, pp. 163-181. 2018.

[6].k. Sadeghi, M. Sharifi, An Exact Solution for the Flow of a Second-Order Viscoelastic Fluid above a Fixed Plate, Journal of The Faculty of Engineering (University of Tehran), Vol. 37, pp. 123-13 4, 2003.

[7].Yu, J., An, C., Mo, D., Liu, N., Lee, R. " Study of Adsorption and transportation behavior of Nanoparticles in Three Different Porous Media." SPE-153337)2012(.

[8].Sekhar Gogoi, Subrata Borgohain Gogoi, Review on microfluidic studies for EOR application, 2019, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology ,htt

[9].Michael A.Nilsson, Ruta Kulkarni, Lauren Gerberich, Ryan Hammond, Rohitashwa Singh, Elizabeth Baumhoff, Jonathan P. Rothstein, Effect of fluid