

بررسی وابستگی پل مایع و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف به خواص سنگ شکافدار در سازوکار ریزش ثقلی

امیرعلی فراهانی و محسن مسیحی*

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

چکیده

در مخازن شکافدار تحت سازوکار ریزش ثقلی، نحوه انتقال نفت بین بلوک‌های ماتریکس مجاور، یکی از عوامل اصلی در تعیین درجه بازیافت نفت مخزن به‌شمار می‌رود. ارتباط بین بلوک‌های ماتریکس می‌تواند توسط تشکیل پل مایع بین دو ماتریکس مجاور رخ دهد. لذا در این مطالعه با مدل‌سازی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول، به بررسی مشخصات پل مایع ایجاد شده درون شکاف پرداخته و وابستگی شکل پل مایع و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف (که در حالت استاتیک نمایانگر فشار مویینگی شکاف است) به خواص شکاف مانند بازشدگی شکاف، تراوایی سنگ و ترشوندگی محیط بررسی می‌شود. شرایط اولیه و مرزی در مسئله به شکلی دیده می‌شود که بتواند تبادل جریان بین دو محیط ماتریکس و شکاف را به‌طور فیزیکی نشان دهد. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد شعاع گلوگاه پل مایع با اندازه بازشدگی شکاف کاهش می‌یابد. این تغییر شکل پل مایع باعث می‌شود تا اختلاف فشار دوفاز درون شکاف هم با افزایش بازشدگی شکاف کاهش یافته و پس از یک آستانه بحرانی بازشدگی شکاف (۱/۷ mm) این اختلاف فشار دوفاز مقداری منفی شود. همچنین، نتایج نشان داد که هر چه زاویه تماس تا میزان خنثی بیشتر باشد، پل مایع به شکل عمودی تر ایجاد می‌شود و منجر به تغییراتی کمی در حدود ۴۰ psi در مقدار اختلاف فشار دوفاز درون شکاف گردد. به‌علاوه با افزایش تراوایی سنگ و ورود بیشتر جریان درون شکاف شعاع گلوگاه پل مایع تشکیل شده از مقدار حدود ۰/۰۳ mm به حدود ۰/۰۵ mm افزایش یافت که با داده‌های منتشر شده آزمایشگاهی مطابقت دارد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای درک بهتر چگونگی تغییرات ساختار پل مایع و تأثیر آن بر اختلاف فشار دوفاز درون شکاف که کنترل کننده فصل مشترک دوفاز است به‌کار رود.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی و مدل‌سازی، مخزن شکافدار، ریزش ثقلی، پل مایع، فشار مویینگی شکاف، کامسول

مقدمه

مانند ماسه‌سنگ^۱، سنگ آهک، کوارتزیت^۲ و سنگ خارا^۳ دیده شده و در آنها شکافها با ابعاد متفاوتی از میکرومتر تا کیلومتر وجود دارند [۱ و ۲].

مخازن شکافدار به مخازن با شکافهایی با منشأ طبیعی گفته می‌شود که در محیط‌های مختلفی

1. Sandstone
2. Quartzite
3. Granite

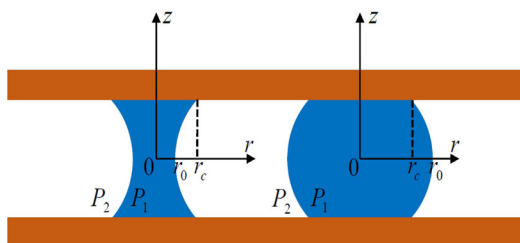
*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
masihi@sharif.edu
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/pr.2024.5330.3374)

سازوکار ریزش ثقلی به برهم کنش بین بلوک‌های ماتریکس مجاور وابسته است (برهم کنش بلوک به - بلوک^۴). این برهم کنش در قالب دو پدیده پیوستگی موئینه^۵ و آشام مجدد^۶ صورت می‌پذیرد [۳ و ۴]. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که چگونگی قرارگیری بلوک، ارتفاع آن، اشباع آب باقی مانده، تراوایی و فشار موئینگی ماتریکس، نقاط تماس و اتصال بین بلوک‌ها و اندازه و زاویه شکاف و رخداد هم‌زمان سایر سازوکارها مانند نفوذ مولکولی از جمله پارامترهای مؤثر برهم کنش بین بلوک‌های ماتریکس مجاور در عملکرد پیوستگی موئینگی و آشام مجدد می‌باشند [۶]. مطالعات مختلفی در مقیاس مغزه در آزمایشگاهی [۷]، با مدل‌سازی مقیاس حفره [۸ و ۹] یا با کمک نرم‌افزارهای موجود [۱۰] به بررسی میزان تأثیر این عوامل پرداخته است. لبستی آزمایش‌هایی را روی دسته‌ای از بلوک‌ها انجام داد تا برهم کنش بلوک به بلوک را بررسی کند. او در تحقیق خود به مقدار بحرانی $0.3/0$ mm برای بازشدگی شکاف اشاره داشت که برای مقادیر بازشدگی شکاف کم‌تر از آن آستانه نیروی موئینگی قابل توجه می‌باشد [۱۱]. این در حالی بود که در کارهای قبلی سعیدی مقدار دیگری را گزارش کرده بود. سعیدی خاطر نشان کرد زمانی که بازشدگی شکاف بیش از $50 \mu m$ باشد، ناپیوستگی موئینگی در شکاف برقرار است [۴]. یکی از پارامترهایی که می‌تواند در این پدیده بسیار مؤثر باشد، فشار موئینگی شکاف است. در حالت استاتیک وقتی جریان و گرادیان فشاری قابل توجهی درون شکاف وجود نداشته باشد، میزان فشار موئینگی به صورت اختلاف فشار دوفاز تر و غیرتر درون شکاف بستگی به بازشدگی شکاف، زبری دیواره‌های شکاف و تشکیل پل مایع درون شکاف [۱۲ و ۱۳] دارد.

اهمیت مخازن شکاف‌دار از آنجایی است که حجم درجای نفت بسیار زیادی (مثلاً در حدود ۴۵۰ میلیارد بشکه در ایران) در این گونه مخازن موجود است [۳ و ۴]. نمونه‌هایی از مخازن شکاف‌دار شامل مخازن آسماری در میداین گچساران، بی‌بی حکیمه، هفتگل، آجاجاری، پارسی و رگ سفید در جنوب ایران هستند [۴]. مخازن شکاف‌دار براساس ساختار ارتباطی درونی به دو ناحیه تقسیم می‌گردند: سیستم ماتریکس که دارای تخلخل (یا ظرفیت ذخیره‌سازی) بالا و تراوایی (یا نفوذپذیری) پایینی است و سیستم شکاف که دارای تخلخل پایین و تراوایی بالا است [۱ و ۲]. قسمت اعظم هیدروکربن موجود در مخازن شکاف‌دار در فضاهای حفره ماتریکس قرار دارد که می‌تواند توسط سازوکارهای مختلفی مانند سازوکار آشام، ریزش ثقلی^۱ [۳]، جابه‌جایی ویسکوزو نفوذ^۲ و انتشار و جریان همرفتی [۴] جابه‌جا شود. در اکثر موارد مشاهده شده که در مخازن شکاف‌دار تأثیر نیروی ریزش ثقلی بیش از سایر نیروها از جمله نیروی ویسکوز، آشام یا نفوذ است. در مخازنی که تراوایی پایینی دارند، نیروی پراکنش^۳ هم می‌تواند نقشی در تولید ایفا نماید. البته تأثیر برخی نیروها هم به میزان تولید از مخازن شکاف‌دار بستگی دارد [۴]. ریزش ثقلی گاز-نفت به‌عنوان یکی از سازوکارهای اصلی مخازن شکاف‌دار در ناحیه گاززده محسوب می‌شود. طی این فرآیند بلوک‌های ماتریکسی که اشباع از نفت هستند توسط شکاف‌های اشباع از گاز احاطه می‌شوند و تحت فرآیند ریزش ثقلی قرار می‌گیرند؛ آن‌گاه اگر نیروی ثقلی از نیروی موئینگی بیشتر باشد، گاز موجود در داخل شکاف جایگزین نفت داخل ماتریکس می‌شود. به‌علت اختلاف چگالی نفت و گاز، جابه‌جایی نفت از سطح پایین بلوک بوده و گاز از سطح بالای بلوک وارد می‌شود [۳]. مطالعات آزمایشگاهی [۵] و مشاهدات میدانی [۴] به بررسی سازوکار ریزش ثقلی و نقش آن در میزان بازیافت نفت پرداخته است. هم‌چنین بسیاری عقیده دارند که

1. Gravity Drainage
2. Diffusion
3. Dispersive Force
4. Block to Block Interaction
5. Capillary Continuity
6. Reimbibition

۱ به صورت شماتیک نفوذ مجدد بین دو بلوک ماتریکس را نشان می‌دهد. هنگامی که بازشدگی شکاف کمتر از حد معینی است (مقدار آستانه)، مایعی که از بلوک بالایی به بلوک پایینی می‌ریزد، یک اتصال بین دو بلوک از طریق پل مایع ایجاد می‌کند. هنگامی که قطرات متصل به سطح بالایی به اندازه کافی بزرگ نباشد که به سطح پایینی برسد، پل مایع دیگر تشکیل نخواهد شد. اگر این قطره از سطح بالایی جدا شود و روی سطح پایین بیفتد، فرآیند نفوذ مجدد رخ می‌دهد.



شکل ۱ شکل پل مایع تشکیل شده در حالت استاتیک بین دو صفحه و فشار داخل و خارج پل مایع

در مورد اتصال هیدرولیکی بین دو دیواره شکاف، تعداد و ویژگی‌های نقاط تماس برای وجود پیوستگی مویینگی مهم می‌شود [۱۵]. همچنین ترکیب نیروهای گرانشی و مویینگی برای مدل‌سازی پدیده نفوذ مجدد در یک محیط متخلخل شکاف‌دار ضروری می‌باشد. در مدل‌سازی چنین سازوکاری، گاهی فرض می‌شود که نفت استخراج شده از بلوک بالایی کاملاً توسط بلوک ماتریکس پایینی جذب می‌شود. این زمانی اتفاق می‌افتد که بلوک ماتریکس پایینی ظرفیت مناسبی برای جذب این میزان سیال را داشته باشد. به عنوان مثال، با غیر افقی شدن شکاف، میزان نفوذ مجدد کاهش می‌یابد و در انتها این تأثیر زمانی که شکاف به سمت عمودی می‌رود، ناچیز است [۱۲]. همچنین مشاهده می‌شود که اتصال مویینگی بین دو سطح شکاف به پارامترهایی از جمله ترشوندگی و پایداری پل مایع تشکیل شده در داخل شکاف بستگی دارد [۱۷].

در این شرایط، مقدار فشار مویینگی شکاف را می‌توان صفر، مقداری ثابت ولی غیرصفر یا تابعی از اشباع سیال در نظر گرفت. فشار مویینگی صفر برای شکاف نشان‌دهنده وجود ناپیوستگی مویینگی بین بلوک‌ها است. در حالتی که فشار مویینگی شکاف به صورت تابعی از اشباع مایع در نظر گرفته می‌شود، نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های میدانی مطابقت بهتری نشان می‌داد. در این حالت برای تغییرات فشار مویینگی شکاف رفتاری مشابه تغییرات فشار مویینگی ماتریکس ولی با یک درجه ضعیف‌تر در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. اخیراً حریمی و همکاران نشان دادند مقدار بحرانی بازشدگی شکاف به عواملی مانند زبری دیواره شکاف [۱۵]، موقعیت هر بلوک نسبت به سایر بلوک‌ها در سیستم بلوک‌های برهم انباشته بستگی دارد [۱۶]. وجود پیوستگی مویینگی با افزایش ارتفاع ستون سیال در داخل شکاف، بر بازیافت نهایی نفت تأثیر می‌گذارد. بسته به خواص ماتریکس و شکاف، وجود پیوستگی مویینگی نرخ بازیافت نفت را به طور قابل توجهی به عنوان مثال، در برخی موارد تا ۶۰٪ بهبود می‌بخشد [۱۱]. ارتباط مویینگی بین بلوک‌ها می‌تواند از طریق ایجاد پل مایع درون شکاف یا تشکیل یک فیلم مایع بین دو بلوک ماتریکس باشد [۱۷]. سجادیان و همکاران پیوستگی بین بلوک‌ها را بسته به درجه تماس بلوک در جهت عمودی به دو دسته مؤثر و غیرمؤثر طبقه‌بندی کرد [۷]. در حالت اول، بیشتر نفت داخل بلوک‌های ماتریکس را می‌توان در مقیاس عمر تولید مخزن (۲۰ تا ۵۰ سال) تولید کرد، در حالی که در حالت دوم، اتصال بین بلوک‌ها به نحوی ضعیف بوده و عملاً تأثیر قابل توجهی بر مقدار تولید نفت ندارد. پدیده بلوک به بلوک دیگر، فرآیند آشام مجدد است که به رقابت نیروی مویینگی و گرانش بستگی دارد [۱۸]. جریان از طریق این سازوکار یا از طریق نقاط تماس دو بلوک ماتریکس مجاور یا پل‌های مایع تشکیل شده بین دو بلوک رخ می‌دهد [۱۷]. شکل

نوع آزاد یا خودبه‌خودی و نوع اجباری طبقه‌بندی می‌شود. اصطلاح ریزش‌ثقلی آزاد زمانی استفاده می‌شود که نیروی محرکه اصلی در داخل ماتریکس نیروهای گرانشی باشد و افت فشار قابل توجهی در داخل شکاف وجود نداشته باشد. همچنین ممکن است فرآیند نیروی ریزش‌ثقلی را در محیط متخلخل شکاف‌دار در نظر بگیریم که در آن گاز هم در ماتریکس و هم در شکاف‌ها جریان دارد که منجر به ایجاد یک گرادیان فشار گاز محدود و یک نیروی مؤثر می‌شود. این امر از طریق سناریوهای تزریق گاز در مخازن شکاف‌دار مشاهده می‌شود. در فرآیند ریزش‌ثقلی نشان داده شده که وجود گرادیان فشار گاز در شکاف‌ها می‌تواند باعث کاهش ارتفاع آستانه موینگی و افزایش بازیافت نفت از ماتریکس شود [۲۴]. شایان ذکر است در این شرایط دینامیکی وقتی جریان و گرادیان فشار درون شکاف وجود داشته باشد، اختلاف فشار دوفاز تر و غیر تر درون شکاف جایگزین فشار موینگی شکاف (در حالت استاتیک) می‌گردد. از نظر مدل‌سازی جریان، ممکن است مدل‌های پیوسته (یعنی مدل‌های تخلخل و نفوذپذیری دوگانه) یا رویکرد ناپیوسته (مانند مدل‌های شبکه گسسته) برای مدل‌سازی جریان در مخازن شکاف‌دار در نظر گرفته شوند. به‌عنوان مثال، در مدل شناخته شده وارن و روت WR (به اصطلاح مدل حبه قندی)، که یک رویکرد مدل‌سازی پیوسته است، بلوک‌های ماتریکس به‌طور مداوم شکاف‌ها را تغذیه می‌کنند، اما جریان در داخل بلوک ماتریکس نادیده گرفته می‌شود. در چنین رویکردی، هم‌چنین دو پارامتر λ به‌عنوان پارامتر جریان بین تخلخلی^۱ و Ω به‌عنوان نسبت ذخیره‌سازی^۲ برای بررسی و تحلیل عملکرد تبادل جریان بین دو محیط ماتریکس و شکاف و ذخیره جریان در این دو محیط معرفی شدند [۲۵].

بررسی نحوه شکل‌گیری، پایداری پل‌مایع ایجاد شده درون شکاف و به‌دنبال آن اختلاف فشار دوفاز تر و غیرتر درون شکاف در تحقیقات و با رویکردهای آزمایشگاهی مانند میکرومدل و شبیه‌سازی‌های عددی مختلف بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و با به‌کارگیری نرم‌افزارهای موجود مانند Fluent یا Comsol بررسی شده است. دارابی و همکاران با شبیه‌سازی با نرم‌افزار Fluent به بررسی پروفایل پل‌مایع پرداخته و نقش زاویه تماس را در شکل پل مایع مهم ارزیابی نمودند [۱۸]. لی و همکاران نشان دادند که به‌کارگیری نرم‌افزارهای شبیه‌ساز و کدهای مختلف براساس رویکردهای عددی مختلف الزامات نتایج یکسانی در تخمین لحظه انقطاع پل مایع نمی‌دهد [۱۹]. اخیراً آداک و غضنفری با توسعه یک مدل CFD تأثیر رژیم‌های مختلف زاویه تماس را بر پایداری پل مایع بررسی نمودند و رابطه‌ای را برای وابستگی پایداری به حجم پل‌مایع ارائه نمودند [۲۰]. دژم و حسن زاده مدلی را پیشنهاد کردند که نیروهای درگیر برای پایداری قطره متصل و شرایط جدا شدن آن را توصیف می‌کند [۱۳]. مشایخی‌زاده و همکاران، پایداری پل‌مایع را در محیط متخلخل شکاف‌دار در مقیاس منفذی با استفاده از یک میکرو مدل مورد مطالعه قرار دادند [۸]. آنها دریافتند که پایداری پل‌مایع به جهت گیری شکاف و تعداد پل‌های مایع ایجاد شده در شکاف بستگی دارد. دژم و حسن زاده از حل عددی رابطه YLE برای تعیین تماس گاز و مایع استفاده کرد [۱۳]. مطالعات دیگر مانند کار فیروزآبادی و هاگ بر روی فشار موینگی شکاف متمرکز بود. مطالعات بعدی هوری و همکاران و دیندروک و فیروزآبادی وابستگی فشار موینگی شکاف به اشباع مایع را نشان می‌داد [۲۲ و ۲۳]. به‌عنوان مثال، دیندروک و فیروزآبادی دریافتند که حداکثر تولید نفت در کمترین اختلاف بین فشارهای موینگی شکاف و محیط ماتریکس (یعنی محیط‌های مشابه) به‌دست می‌آید [۲۲]. سازوکار ریزش‌ثقلی (GD) به

1. Inter-Porosity Flow Coefficient

2. Storativity Ratio

که فشار موینگی شکاف به‌طور قابل توجهی بر میزان تولید و همچنین مقدار بازیافت نهایی نفت تأثیر می‌گذارد. فشار موینگی شکاف ممکن است صفر، یک مقدار ثابت غیر صفر، یا تابعی از اشباع نفت باشد. فشار موینگی صفر (که به دلایل سادگی در بسیاری از شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود) نشان‌دهنده ناپیوستگی موینگی بین بلوک‌های ماتریکس است. با این حال، اعمال این فرض بیشتر نفت را در داخل بلوک‌های ماتریکس باقی می‌گذارد که نتایج آن در اکثر موارد توسط مشاهدات میدانی پشتیبانی نمی‌شود. البته همانگونه که اشاره شد در حالت دینامیک و وجود جریان درون شکاف گرا دیان فشار درون شکاف بر شکل فصل مشترک دوفاز مؤثر بوده لذا در این شرایط اختلاف فشار دوفاز تر و غیرتر درون شکاف بررسی می‌شود. از طرفی عوامل مختلفی در حالت دینامیک بر شکل پل مایع درون شکاف و به دنبال آن اختلاف فشار دوفاز تر و غیرتر درون شکاف مؤثر هستند. اگرچه براساس نتایج منتشر شده در کارهای قبلی اثرات برخی عوامل بر شکل و پایداری پل مایع گزارش شده ولی هنوز نتیجه قابل پذیرش همگانی برای توصیف نحوه اثرگذاری پارامترهای دخیل در پایداری پل مایع و اختلاف فشار دوفاز در دسترس نیست و بعضاً روابط تجربی پیشنهادی مختلفی توسط محققان در این حوزه پیشنهاد شده است. لذا در این کار پژوهشی با مدل‌سازی و شبیه‌سازی دو محیط ماتریکس و شکاف در نرم‌افزار کامسول، به بررسی مشخصات پل مایع ایجاد شده بین دو بلوک ماتریکس مجاور پرداخته و وابستگی شکل پل مایع و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف به خواص شکاف مانند بازشدگی شکاف، تراوایی ماتریکس و ترشوندگی محیط متخلخل بررسی می‌شود. اگرچه اثر بازشدگی شکاف بر تشکیل پل مایع در کارهای قبل مفصل‌تر بررسی شده است، ولی در اینجا با بررسی مجدد این اثر پارامتر بر

در ادامه برای بهبود مدل‌سازی جریان چند فازی مخازن شکاف‌دار، روش‌هایی برای توسعه مدل WR معرفی شد (به‌عنوان مثال، مدل‌های کاظمی و گیلمن) که بعداً با در نظر گرفتن سازوکارهای دیگری که به تبادل جریان بین شکاف و ماتریکس کمک می‌کردند، تعمیم یافت. در رویکرد مدل‌سازی پیوسته لازم است تابع انتقال مناسبی وجود داشته باشد که میزان تبادل جریان بین دو محیط را به درستی نشان دهد [۲۶]. در واقعیت تابع انتقال مناسب به عوامل مختلفی از جمله اندازه ماتریکس، شکل و شرایط مرزی بستگی دارد [۲۷]. مفهوم تابع انتقال در مخازن شکاف‌دار اولین بار توسط بارنبلانت و همکاران استفاده شد [۲۸]. برای جریان تک فاز و شرایط جریانی شبه پایدار، گیلمن و کاظمی تابع انتقال WR را برای جریان چند فازی توسعه دادند [۲۶]. اصلاحات بعدی متمرکز بر نحوه درست محاسبه ضریب شکل و چگونگی در نظر گرفتن سایر سازوکارهای دخیل در جابه‌جایی جریان چند فازی بود. به‌عنوان مثال، می‌توان به رویکرد کوتس برای مدل‌های تک تخلخل و تخلخل دوگانه با ریزش‌ثقلی اشاره کرد [۲۹]. توابع انتقال بعدی بر شیوه درست تر لحاظ نیروی گرانش یا تحرک پذیری فازهای جابه‌جا کننده و جابه‌جا شونده متمرکز بود [۳۰ و ۳۱]. البته، رویکردهای دیگری هم برای تعیین مقدار جریان بین شکاف و ماتریکس وجود دارد. یکی از این رویکردها، استفاده از روش منحنی بازیافت^۱ ارائه شده توسط هاینمن بود که توسط قائدی و همکاران گسترش یافت [۳۲]. در این روش، مقدار تبادل جریان بین دو محیط ماتریکس و شکاف در هر مرحله زمانی در طول شبیه‌سازی جریان به‌صورت تجربی یا عددی و براساس نوع سازوکار موجود تعیین می‌شود. یکی از پارامترهای ضروری دیگر برای شبیه‌سازی جریان در مقیاس بزرگ در یک مخزن شکاف‌دار، فشار موینگی شکاف است. همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، مطالعات تجربی و تحلیلی نشان می‌دهد

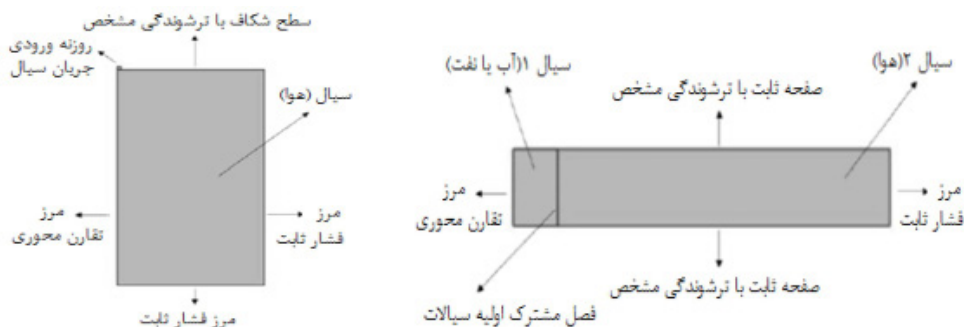
1. Recovery Curve Method

سیستم مش برای آن تعریف شود. همچنین برای انتخاب درست این پارامترها ممکن است نیاز به انجام مراحل حساسیت سنجی و پیش پردازش قبل از شبیه‌سازی باشد. با توجه به نوع مسئله در این کار پژوهشی، برای مدل هندسی محیط از گزینه دو بعدی متقارن^۱ استفاده شد. هم چنین، برای بررسی هیدرودینامیک سیالات تک فاز و چندفازی از ماژول جریان سیال^۲ استفاده گردید. به‌طور خاص، فیزیک مسئله براساس جریان دوفازی و رویکرد سطح^۳ و جریان آرام‌انتخاب شد. به‌علاوه، از آنجایی که تشکیل پل مایع وابسته به زمان است، در این جا گزینه وابسته به زمان با مقداردهی اولیه فاز^۴ انتخاب شد. پس از ایجاد محیط مدل در کامسول، برای تعریف مسئله در محیط گرافیکی باید چهار مرحله تعریف اشکال هندسی، تعیین جنس اشکال، تعریف پارامترهای مورد استفاده و شیوه‌مش‌بندی فضا انجام شود. شکل هندسه دوبعدی مستطیل به ابعاد ۲ mm استفاده گردید. برای سادگی جنس مواد مورد استفاده آب یا نفت با مشخصات چگالی و گرانیوی مشخص شده در کامسول به‌عنوان سیال ۱ و هوا به‌عنوان سیال ۲ به‌کار گرفته شد. برای مش‌بندی محیط با توجه به امکانات کامسول از مش‌بندی کنترل شده فیزیکی استفاده شد. سایر جزئیات مدل مورد استفاده پل مایع در حالت استاتیکی و دینامیک به‌همراه شرایط مرزی در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکل و پایداری پل مایع، ابتدا مدل ساخته شده در نرم‌افزار کامسول راستی آزمایی می‌گردد تا از اجرای شبیه‌سازی در بخش‌های بعدی اطمینان حاصل گردد. در ادامه اثرات تراوایی ماتریکس و ترشوندگی محیط متخلخل بر نحوه تشکیل پل مایع و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف بررسی می‌گردد.

مدل مورد مطالعه و روش محاسبات

هدف از این مطالعه بررسی خواص پل مایع تشکیل شده درون شکاف (به‌عنوان مثال، شکل و پایداری پل مایع) در حالت دینامیک و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف در اثر تغییر خواص سنگ شکافدار است. به‌طور خاص، اثراتی مانند بازشدگی شکاف، تراوایی ماتریکس و خاصیت ترشوندگی سنگ بر ویژگی‌های پل مایع و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف با استفاده از نرم‌افزار کامسول به‌صورت عددی تجزیه و تحلیل می‌شود. نرم‌افزار کامسول (Multiphysics 5.4.0.225) به‌کار رفته در این تحقیق قادر است با در نظر گرفتن فیزیک مسئله و با استفاده از روابط دیفرانسیل مناسب جریان حاکم بر حرکت سیالات در محیط متخلخل را لحاظ نموده، و با رویکردهای عددی مناسب برای حل روابط حاکم مانند روش اجزاء محدود را پیاده‌سازی کند. برای انجام این کار، باید ضمن تعریف درست مسئله، شرایط اولیه و مرزی مناسب، اندازه، تعداد و نوع



شکل ۲ مدل هندسه به‌کار رفته در مطالعه پل مایع به‌همراه تعریف شرایط مرزی برای الف) حالت استاتیکی ب) حالت دینامیک

1. 2D Axisymmetric
2. Fluid Flow
3. level Set
4. Time Dependent With Phase Initialization

متوسط این مقادیر به عنوان تخمین فشار آن فاز در نظر گرفته می شود. سپس، اختلاف متوسط فشار فاز غیر تر و فشار فاز تر درون شکاف تخمین زده می شود. اگرچه در کارهای آزمایشگاهی برای بررسی اثر ترشوندگی محیط، از سطوح با مواد مختلف مانند شیشه، کلسیت و غیره استفاده می شود، اما در اینجا برای شبیه سازی اثر سطوح در "بخش هندسه" نرم افزار از گزینه دیوار تر برای تعیین زوایای تماس مختلف و تنظیم ترشوندگی سطح استفاده می شود. همچنین برای در نظر گرفتن اثرات تراوایی سنگ با توجه به تأثیر مستقیم آن بر نرخ جریان درون شکاف با در نظر گرفتن مقادیر مختلف نرخ جریان در محیط دو بعدی در نرم افزار پیاده سازی می شود.

نتایج و تحلیل

در این بخش، نتایج شبیه سازی اثرات خواص سنگ شکاف دار بر روی شکل و فرم پل مایع تشکیل شده بررسی می شود. به طور خاص اثر بازشدگی شکاف، و اثرات تراوایی و ترشوندگی محیط مورد ارزیابی قرار می گیرد.

الف) بازشدگی شکاف

اولین پارامتر مورد نظر بازشدگی شکاف است که می تواند بر شکل پل مایع اثرگذار باشد. شکل ۳ تصاویر پل مایع تشکیل شده بین دو صفحه (نشان دهنده شکاف) با فواصل مختلف (۲ mm و ۳ mm) را نشان می دهد. این تصاویر نمای از جلوی پل مایع را نشان می دهد. سیال مورد استفاده در این سیستم آب است. خط سیاه عمودی در هر تصویر، هندسه اولیه سیال آب یا نفت (نشان دهنده حجم قطره مایع) را در شرایط اولیه نشان می دهد.

در همه شبیه سازی های شرایط دینامیک به جز موردی که ذکر شده باشد از نرخ تزریق 1 mg/s استفاده شده است. شرایط اولیه برای تماس دو سیال مایع و هوا توسط خط سیاه عمودی نشان داده شده در شکل ۲ تعیین شده است. همچنین، با در نظر گرفتن سیستم مش بندی کنترل شده فیزیکی در این کار تعداد و اندازه سلول ها می تواند در بخش های مختلف متفاوت در نظر گرفته شود. به عنوان مثال، اطلاعات آماری مش بندی مدل شبیه سازی شده برای پل مایع در دو حالت استاتیک و دینامیک در جدول ۱ نشان داده شده است.

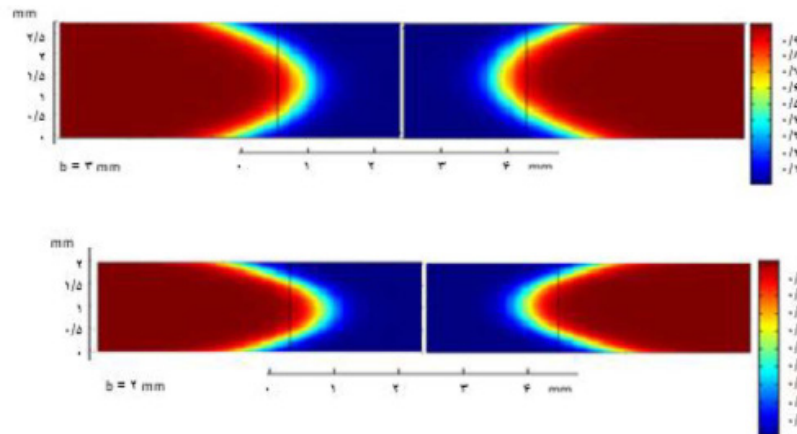
جدول ۱ اطلاعات آماری مش بندی مدل های پل مایع در دو حالت استاتیک و دینامیک

ویژگی های مش بندی	حالت استاتیک	حالت دینامیک
المان های مثلثی	۱۱۵۰۰	۳۴۰۰۰
المان های لبه ای	۷۵۰	۷۰۰
المان های گوشه ای	۶	۷

همچنین، برای بررسی استقلال نتایج شبیه سازی از تعداد مش، از مش بندی با سه درجه ریز، متوسط و درشت استفاده شد. نتایج تأثیر اندازه مش بر شعاع گلوگاه پل تشکیل شده و زمان جدایش قطره در جدول ۲ آورده شده است که با بررسی نتایج انحراف خیلی کم در شعاع گلوگاه پل مایع دیده شد (جدول ۲). همچنین در این کار پژوهشی، برای محاسبه اختلاف فشار دوفاز درون شکاف ناشی از تشکیل پل مایع درون شکاف شکل ۱، از تفاوت فشار فازهای تر و غیرتر استفاده می شود. برای محاسبه فشار هر فاز، ابتدا در امتداد فصل مشترک و در عمق های مختلف مقادیر فشار محاسبه شده و مقدار

جدول ۲ مقایسه آماری اثر نوع مش بر شعاع گلوگاه و زمان جدایش قطره

نوع مش بندی	شعاع گلوگاه (mm)	زمان جدایش ^۱	مساحت متوسط سلول 10^{-4} mm^2
درشت	۱/۷۵۳	۰/۰۷۱۸	۱۰
نرمال	۱/۷۵۹	۰/۰۷۲۹	۶
ریز	۱/۷۶۰	۰/۰۷۳۳	۴



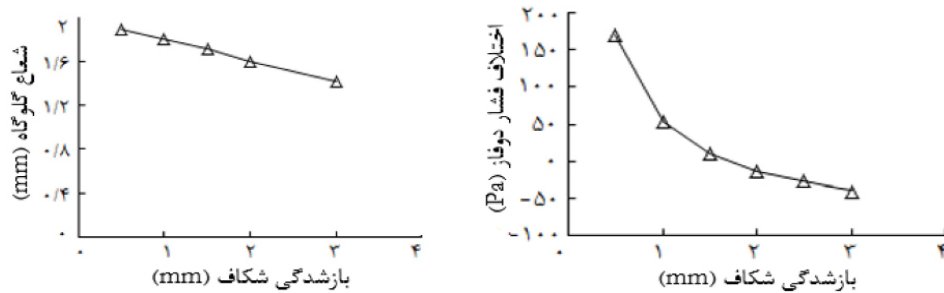
شکل ۳ تصاویر نمونه از پل مایع تشکیل شده برای شبیه‌سازی با مقادیر بازشدگی شکاف ۲ و ۳ mm و در زاویه تماس ثابت 30°

ایده وجود یک مقدار آستانه برای بازشدگی شکاف (مثلاً، $50 \mu\text{m}$ گفته شده توسط سعیدی و همکاران) برای تصمیم‌گیری در مورد وجود یا عدم وجود پیوستگی مویبندی در شکاف هم‌راستا است [۱۴-۱۵]. تحلیل مشابهی را می‌توان از کارهای تجربی در اثرات بازشدگی شکاف دید. به‌عنوان مثال، وابستگی اختلاف فشار دوفاز درون شکاف با نتایج تجربی گزارش شده در کار داهیم و همکاران برای حجم سیال ثابت ۱ میکرولیتر، زاویه تماس 30° درجه و محدوده فشار مویبندی 20 Pa تا 100 Pa و بازه بازشدگی شکاف تا 2 mm دیده می‌شود [۱۵ و ۱۷].

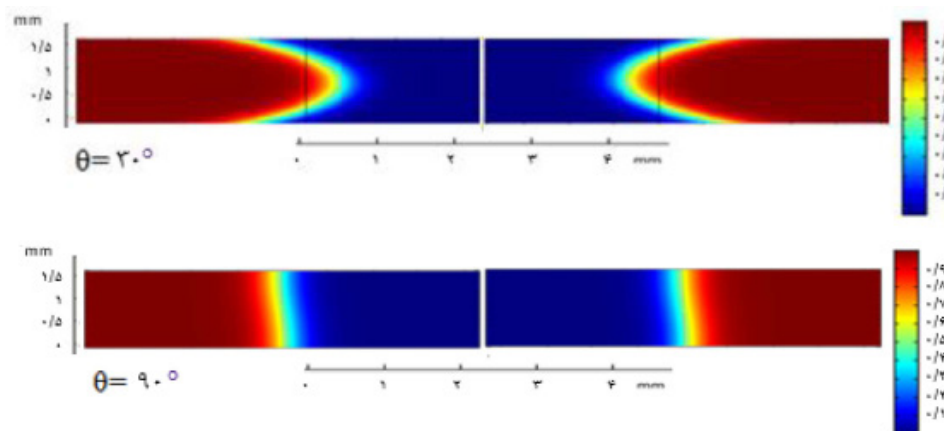
(ب) ترشوندگی سنگ

پارامتر دیگری که انتظار می‌رود بر شکل پل مایع اثرگذار باشد ترشوندگی سنگ است. در این بخش اثرات ترشوندگی بر شکل پل مایع و اختلاف فشار دوفاز بررسی می‌شود. شکل ۵ اثر ترشوندگی را بر شکل پل مایع در بازشدگی شکاف $1/5 \text{ mm}$ و زوایای تماس 30° و 90° نشان می‌دهد. نتایج محاسبات شعاع گلوگاه پل مایع مشاهده شده و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف در شبیه‌سازی‌های با زاویه تماس‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. از نقطه نظر فیزیکی، در زوایای تماس بیشتر تا میزان خنثی، پل مایع به شکل عمودی‌تر است و در نتیجه شعاع گلوگاه پل مایع افزایش می‌یابد.

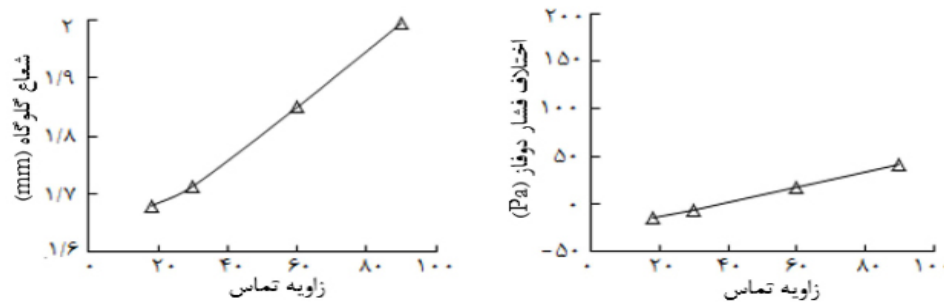
همان‌گونه که از شکل ۳ دیده می‌شود با افزایش بازشدگی شکاف، مقدار شعاع گلوگاه پل مایع تشکیل شده، که معادل با حداقل فاصله افقی مرز پل مایع از مبدا در نظر گرفته می‌شود، کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی چگونگی تغییرات شعاع گلوگاه به‌عنوان تابعی از بازشدگی شکاف در شکل ۴ نشان داده شده است. هم‌چنین، نتایج تخمین اختلاف فشار دوفاز درون شکاف به‌عنوان تابعی از مقدار بازشدگی شکاف در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، شعاع گلوگاه پل مایع با اندازه بازشدگی شکاف بطور تقریباً خطی کاهش می‌یابد. به‌علاوه از شکل ۴ اختلاف فشار دوفاز درون شکاف با افزایش بازشدگی شکاف کاهش یافته و پس از یک مقدار مشخص ($1/7 \text{ mm}$) فشار مویبندی منفی می‌شود. این مشاهده تأکید می‌کند که تشکیل پل‌های مایع با شعاع گلوگاهی معین لزوماً با مقدار مثبت اختلاف فشار دوفاز همراه نیست [۱۴]. در واقع، مقدار منفی اختلاف فشار دوفاز درون شکاف نشان می‌دهد که فشار فازتر بیشتر از فشار فاز غیرتر است و این زمانی اتفاق می‌افتد که شعاع گلوگاه بسیار کوچک باشد. به هر حال مقدار مثبت اختلاف فشار دوفاز نشان‌دهنده شکاف نازک و مقدار منفی شکاف نسبتاً گسترده‌تر را نشان می‌دهد. به‌علاوه، نتایج تغییرات اختلاف فشار دوفاز در شکل ۴ با



شکل ۴ الف) تغییرات شعاع گلوگاه پل مایع به صورت تابعی از مقدار بازشدگی شکاف و ب) وابستگی اختلاف فشار دوفاز درون شکاف به مقدار بازشدگی شکاف برای حالت ترشوندگی با زاویه تماس 30°



شکل ۵ اثر ترشوندگی بر شکل پل مایع با حجم ثابت در زوایای تماس 30° و 90°



شکل ۶ الف) تغییرات شعاع گلوگاه پل مایع به صورت تابعی از زاویه تماس و ب) وابستگی اختلاف فشار دوفاز درون شکاف به زاویه تماس برای حالت شکاف با بازشدگی ۱/۵ mm

که، این تغییرات اختلاف فشار فازها در اثر عامل ترشوندگی در مقایسه با اثر عامل بازشدگی شکاف ضعیف تر است. هم چنین این نتیجه شبیه سازی مطابق با نتایج تجربی داده شده در کار داهیم و همکاران برای وابستگی فشار مویینگی شکاف به زاویه تماس در محدوده ۴۶ تا ۷۶ درجه است [۱۵] و [۱۷]. البته نتایج اثر ترشوندگی بر پل مایع در شرایط دما و فشاری که فرآیند تبخیر به وجود

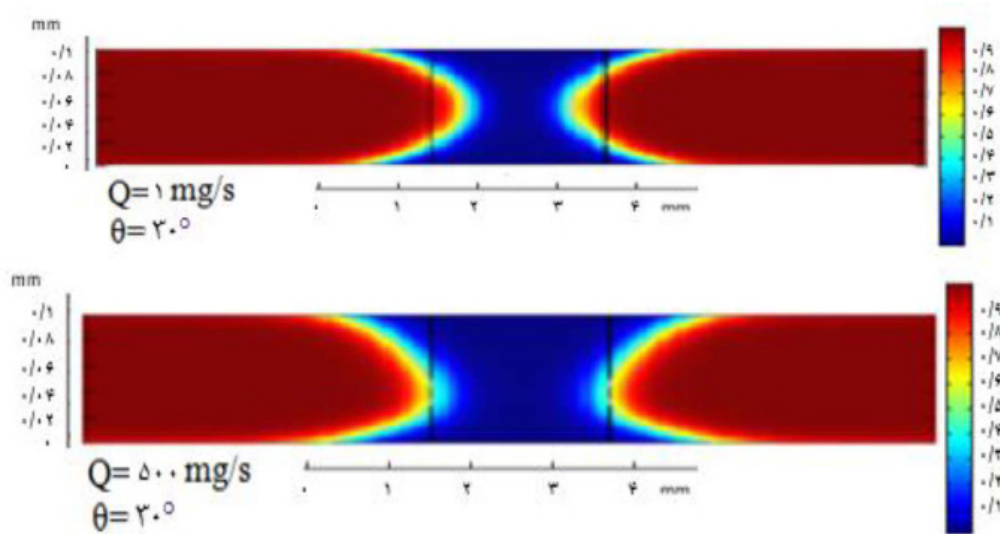
همچنین، همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، اختلاف فشار دوفاز درون شکاف با تغییر ترشوندگی تغییر می کند. شایان توجه است که این روند تغییرات با نحوه وابستگی فشار مویینگی شکاف بر اساس رابطه لاپلاس به تغییرات ترشوندگی در حالت استاتیک متفاوت است. با این حال با مقایسه محدوده تغییرات روی محور عمودی نمودارهای سمت چپ در شکل ۴ و ۶ دیده می شود

می‌آید می‌تواند متفاوت باشد [۳۲].

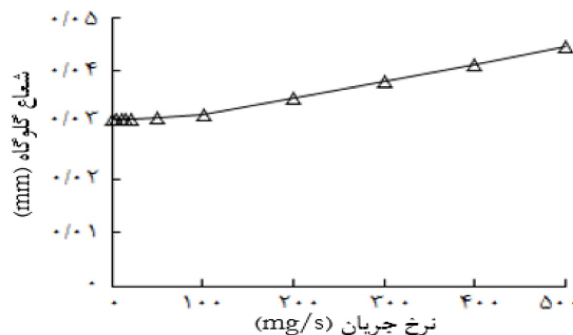
ج) تراوایی سنگ

پارامتر دیگری که به‌طور مستقیم بر میزان ورود نفت از ماتریکس به درون شکاف و لذا حجم و شکل پل‌مایع اثرگذار باشد تراوایی ماتریکس است که براساس رابطه دارسی ($Q \propto K$) می‌تواند مستقیم بر میزان جریان وارد شده به درون شکاف مؤثر باشد. لذا در این قسمت به بررسی اثر تراوایی بر روی شکل پل‌مایع و شعاع گلوگاه پرداخته می‌گردد. برای ثابت فرض نمودن سایر پارامترها زاویه تماس 30° و عرض شکاف ۱ mm در نظر گرفته شد. مقدار جریان داخل شکاف با تغییرات تراوایی ماتریکس با افزودن جریان در ورودی و در نظر گرفتن محیط دو بعدی در نرم‌افزار

پایه‌سازی گردید. از این رو با تغییر مقدار جریان داخل شکاف، شکل و انحنای پل‌مایع تغییر یافته که در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین، اثر تغییرات نرخ جریان تزریق شده Q از محل نشان داده شده در شکل ۲ سمت راست برای نرخ‌های تا 500 mg/s بر شعاع گلوگاه پل‌مایع در شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود با افزایش مقدار جریان داخل شکاف (با افزایش تراوایی)، شعاع گلوگاه از مقدار حدود 0.3 mm به حدود 0.5 mm افزایش می‌یابد. این نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی گزارش شده توسط داهیم و همکاران ۲۰۲۱ مطابقت دارد [۱۵] و [۱۷].



شکل ۷ اثر نرخ جریان بر حجم و شکل پل‌مایع در زاویه تماس 30° و عرض شکاف ۱ mm



شکل ۸ اثر نرخ جریان (و تراوایی ماتریکس) بر شعاع گلوگاه پل‌مایع در زاویه تماس 30° و عرض شکاف ۱ mm

نتیجه گیری

در این مطالعه، به بررسی مشخصات پل مایع تشکیل شده بین دو سطح (دیواره ماتریکس) در حالت دینامیک و وابستگی به خواص شکاف مانند بازشدگی شکاف و ترشوندگی سنگ شکاف دار با رویکرد عددی با نرم افزار کامسول پرداخته شد. مهم ترین نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است.

۱. هر دو عامل بازشدگی شکاف و ترشوندگی سنگ بر شکل و پایداری پل مایع مؤثر دیده شد. البته میزان و نحوه اثر آن دو عامل متفاوت است.
۲. شعاع گلوگاه پل مایع با اندازه بازشدگی شکاف به طور تقریباً خطی کاهش می یافت. این تغییر شکل پل مایع باعث گردید تا اختلاف فشار دوفاز هم به طور یکنواخت کاهش یافته (با افزایش بازشدگی شکاف) و حتی پس از یک آستانه بحرانی بازشدگی شکاف مقداری منفی شود. اختلاف فشار دوفاز درون شکاف نشان داده شده در شکل ۴ در بازشدگی های شکاف می تواند مقادیر مثبت (مثلاً در حدود Pa ۱۷۰ برای شکاف با بازشدگی mm ۰/۵) یا مقادیر منفی (تا حدود Pa ۴۰- برای شکاف با بازشدگی mm ۳) داشته باشد.
۳. اثر ترشوندگی سنگ بر فشار موینگی شکاف در مقایسه با اثر بازشدگی شکاف ضعیف تر است (محدوده تغییرات اختلاف فشار دوفاز ناشی از تأثیر ترشوندگی در شکل Psi ۶ تا ۴۰ دیده شد در حالی که این مقدار در شکل ۴ برای اثر بازشدگی

مراجع

- [1]. Aguilera, R. (1980), Naturally fractured reservoirs. Petroleum Publishing Company Tulsa, Okla.
- [2]. Van Golf-Racht, T.D. (1982), Fundamentals of fractured reservoir engineering. 12. Elsevier.
- [3]. Masihi M, Fractured reservoir engineering- modeling and simulation, RIPI Publication Institute, 258, ISBN: 978-600-5961-98-0, 2016. (Persian).
- [4]. Saidi A. M. (1987). Reservoir Engineering of Fractured Reservoirs: Fundamental and Practical Aspects, 864, Total co.
- [5]. Parvizi, R., & Ghaseminejad, E. (2014). An experimental investigation of gravity drainage during immiscible gas injection in carbonate rocks under reservoir conditions. Journal of Petroleum Science and Technology, 4(1), 63-71. doi: 10.22078/jpst.2014.326.
- [6]. Erfani H., Malekabi A. K., Ghazanfari M.H. and Roštami B. (2020) Experimental and modelling study of gravity drainage in a three block system. (202). Transport in Porous Media, 7.

شکاف تا ۲۰۰ پوند بر اینچ مربع بود). این نتیجه شبیه سازی با نتایج تجربی منتشر شده قبلی مطابقت دارد.

۴. با افزایش مقدار جریان داخل شکاف (با افزایش تراوایی)، شعاع گلوگاه پل مایع تشکیل شده از مقدار حدود mm ۰/۳ به حدود mm ۰/۵ افزایش یافت که با نتایج منتشر شده آزمایشات قبل مطابقت دارد.

پیشنهادات برای کارهای آتی می تواند شامل موارد زیر باشد:

۱- یکی از عوامل دیگر که می تواند بر شکل پل مایع و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف تأثیرگذار باشد، زبری سطح شکاف است که در این مطالعه سطوح صاف استفاده شد. لذا تعمیم این مطالعه با به کارگیری مدل سطوح دیواره ها با زبری های متفاوت.

۲- در این مطالعه تشکیل پل مایع در شکاف افقی بررسی شد، تعمیم این مطالعه به پل مایع تشکیل شده در شکاف های غیرافقی.

۳- به کارگیری شرایط واقعی دما و فشار مخزن در تشکیل پل مایع و در نظر گرفتن هم زمان هر دو محیط ماتریکس و شکاف برای محاسبات.

از آنجا که جریان بین ماتریکس و شکاف به میزان اختلاف فشار دوفاز درون شکاف و تشکیل پل مایع و پایداری آن بستگی دارد، دانش ما در این زمینه می تواند به بالا بردن دقت نتایج شبیه سازی جریان در محیط شکاف دار کمک کند.

- [7]. Erfani, H., Karimi Malekabadi, A., Ghazanfari, M. H., & Roštami, B. (2021). Experimental and modelling study of gravity drainage in a three-block system. *Transport in Porous Media*, 136, 471-494.
- [8]. Mashayekhizadeh, V., Ghazanfari, M. H., Kharrat, R., & Dejam, M. (2011). Pore-level observation of free gravity drainage of oil in fractured porous media. *Transport in Porous Media*, 87, 561-584.
- [۹]. محمدی ا.، رسایی م.، ر.، مشایخی زاده و. و نخعی ع. (۱۴۰۱). مدل سازی شبکه حفره ای نفوذ مولکولی توأم با ریزش ثقلی در یک مدل تک بلوکی، پژوهش نفت، دوره ۳۲، خرداد و تیر ۱۴۰۱، صفحه ۱۳۰-۱۱۲. doi: 10.22078pr.2022.4719.3116
- [10]. Manafi, M., Kalantariasl, A., & Ghaedi, M. (2022). A COMSOL Multiphysics study on block-to-block interactions in naturally fractured reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109540. doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109540.
- [11]. Labaštie, A. (1990, September). Capillary continuity between blocks of a fractured reservoir. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition? SPE-20515*. SPE.
- [12]. Bina, O., Aminshahidy, B., Dadvar, M., & Moghadasi, J. (2020). Capillary continuity in fractured porous media; part II: Evaluation of fracture capillary pressure in the presence of liquid bridges using a novel microfluidic approach. *Journal of Molecular Liquids*, 314, 113666. doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113666.
- [13]. Dejam, M., & Hassanzadeh, H. (2011). Formation of liquid bridges between porous matrix blocks. *AIChE Journal*, 57(2), 286-298. doi.org/10.1002/aic.12262.
- [14]. Firoozabadi, A., & Hauge, J. (1990). Capillary pressure in fractured porous media (includes associated papers 21892 and 22212). *Journal of Petroleum Technology*, 42(06), 784-791.
- [15]. Harimi, B., M.H. Ghazanfari, M. Masihi (2020), Modeling of the capillary pressure in horizontal rough-walled fractures in the presence of liquid bridges. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 185. doi.org/10.2118/18747-PA.
- [16]. Harimi, B., Masihi, M., & Ghazanfari, M. H. (2021). An insight into the formation of liquid bridge and its role on fracture capillary pressure during gravity drainage in fractured porous media. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99, S212-S231. doi.org/10.1002/cjce.23988.
- [17]. Dahim, S., Harimi, B., Ghazanfari, M. H., & Masihi, M. (2021). Analysis of liquid bridge characteristics in a horizontal fracture: critical fracture aperture and fracture capillary pressure. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 11(4), 2-13. doi: 10.22078/jpst.2022.4683.1772.
- [18]. Darabi, P., Li, T., Pougatch, K., Salcudean, M., & Grecov, D. (2010). Modeling the evolution and rupture of stretching pendular liquid bridges. *Chemical Engineering Science*, 65(15), 4472-4483. doi.org/10.1016/j.ces.2010.04.003.
- [19]. Li, Y., & Sprittles, J. E. (2016). Capillary breakup of a liquid bridge: identifying regimes and transitions. *Journal of Fluid Mechanics*, 797, 29-59. doi.org/10.1017/jfm.2016.276.
- [20]. Adak, Z., & Ghazanfari, M. H. (2024). A new insight into the stability of static and dynamic liquid bridges in smooth-walled horizontal fractures. *Journal of Molecular Liquids*, 398, 124188, doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124188.
- [۲۱]. عباسی، م.، ایزدمهر، م.، شریفی م.، غضنفری م.، ح.، کاظمی، ع. ر. و گرامی ش. (۱۳۹۶). مدل سازی تحلیلی فرآیند آشام مجدد بین ماتریس ها در فرآیند ریزش ثقلی در ناحیه مورد هجوم گاز، پژوهش نفت، دوره ۲۷، ۹۶-۱، فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۶، صفحه ۱۵-۴.
- [22]. Horie, T., Firoozabadi, A., & Ishimoto, K. (1990). Laboratory studies of capillary interaction in fracture/matrix systems. *SPE Reservoir Engineering*, 5(03), 353-360. doi.org/10.2118/18282-PA.
- [23]. Dindoruk, B., & Firoozabadi, A. (1994, June). Computation of gas-liquid drainage in fractured porous media recognizing fracture liquid flow. In *PETSOC Annual Technical Meeting (pp. PETSOC-94)*. PETSOC. doi.org/10.2118/94-23.
- [24]. Ghazvini, M. G., Kharrat, R., & Masihi, M. (2010). A new mathematical model for force gravity drainage in fractured porous media. *Transport in Porous Media*, 83, 711-724.
- [25]. Christian M. (2016), *Fractured reservoir engineering with modeling and simulation approach*. First: Petroleum Industry Research Institute. 262.
- [26]. Gilman, J. R., & Kazemi, H. (1988). Improved calculations for viscous and gravity displacement in matrix blocks in dual-porosity simulators (includes associated papers 17851, 17921, 18017, 18018, 18939, 19038, 19361 and 20174). *Journal of Petroleum Technology*, 40(01), 60-70. doi.org/10.2118/16010-PA.
- [27]. Kazemi, H., Merrill Jr, L. S., Porterfield, K. L., & Zeman, P. R. (1976). Numerical simulation of water-oil flow in naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 16(06), 317-326. doi.org/10.2118/5719-PA.

- [28]. Barenblatt, G. I., Zheltov, I. P., & Kochina, I. N. (1960). Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 24(5), 1286-1303.
- [29]. Coats, K. H. (1989, February). Implicit compositional simulation of single-porosity and dual-porosity reservoirs. In *SPE Reservoir Simulation Conference?* (pp. SPE-18427). SPE. doi.org/10.2118/18427-MS.
- [30]. Sonier, F., Souillard, P., & Blaskovich, F. T. (1988). Numerical simulation of naturally fractured reservoirs. *SPE Reservoir Engineering*, 3(04), 1114-1122. doi.org/10.2118/15627-PA.
- [31]. Quandalle, P., & Sabathier, J. C. (1989). Typical features of a multipurpose reservoir simulator. *SPE Reservoir Engineering*, 4(04), 475-480. doi.org/10.2118/16007-PA.
- [32]. Ghaedi, M., Masihi, M., Heinemann, Z. E., & Ghazanfari, M. H. (2015). History matching of naturally fractured reservoirs based on the recovery curve method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 126, 211-221. doi.org/10.1016/j.petrol.2014.12.002.



Investigating the Dependency of Liquid Bridge and Two-Phase Pressure Difference inside Fracture on Fractured Rock Properties in Gravity Drainage

Amirali Farahani and Mohsen Masihi

Chemical and Petroleum Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
masihi@sharif.edu

DOI:10.22078/pr.2024.5330.3374

Received: December/12/2023

Accepted: May/25/2024

Introduction

Fractured reservoirs are characterized by natural fractures and are found in various environments such as sandstone, limestone, quartzite, and granite, where fractures range in size from micrometers to kilometers [1]. Moreover, the significance of fractured reservoirs arises from the substantial volumes of oil in place (approximately 450 billion barrels in Iran) present in these types of reservoirs [1,2]. Furthermore, examples of fractured reservoirs include the Asmari reservoirs in the Gachsaran, Bibi Hakimeh, Haftgel, Aghajari, Parsiy, and Rag-e-Sefid fields in southern Iran. Fractured reservoirs can be divided into two regions based on their internal structural connectivity: the matrix system, which has high porosity (or storage capacity) and low permeability, and the fracture system, which has low porosity and high permeability [3,4].

Most of the hydrocarbons in fractured reservoirs are located in the matrix pore spaces, which can be displaced by various mechanisms such as imbibition, gravity drainage, viscous displacement, diffusion, and convective flow. In most cases, it has been observed that the influence of gravitational forces in fractured reservoirs outweighs that of other forces, including viscous, imbibition, or diffusion forces. In reservoirs with low permeability, dispersive forces may also play a role in production. However, the impact of certain forces also depends on the production from fractured reservoirs [5].

Gas-oil gravity drainage is considered one of the main

mechanisms in gas-saturated fractured reservoirs. During this process, matrix blocks that are saturated with oil are surrounded by gas-saturated fractures and are subjected to gravity drainage. If the gravitational force exceeds the capillary force, the gas inside the fracture replaces the oil in the matrix. Due to the difference in density between oil and gas, oil is displaced from the lower surface of the block, while gas enters from the upper surface. Laboratory studies and field observations have examined the gravity drainage mechanism and its role in oil recovery rates. Many believe that the gravity drainage mechanism is dependent on the interaction between adjacent matrix blocks (block-to-block interaction). This interaction manifests through two phenomena: capillary continuity and imbibition [12,13].

The block-to-block phenomenon is the process of imbibition, which relies on the competition between capillary and gravitational forces. Flow through this mechanism occurs either at the contact points of two adjacent matrix blocks or through liquid bridges formed between the two blocks [14,15].

Materials and Methods

Model and Computational Method

The goal of this study is to investigate the properties of the liquid bridge formed within the fracture (for example, the shape and stability of the liquid bridge) in dynamic conditions and the two-phase pressure difference within the fracture due to changes in

fractured rock properties. Specifically, the effects of fracture aperture, matrix permeability, and rock wettability on the characteristics of the liquid bridge and the two-phase pressure difference within the fracture are analyzed numerically using COMSOL software.

The COMSOL Multiphysics software used in this research can account for the physics of the problem and apply suitable differential equations governing the fluid movement in porous media, implementing appropriate numerical approaches for solving the governing equations, such as the finite element method. To achieve this, the problem must be defined correctly, along with suitable initial and boundary conditions, as well as the size, number, and type of the mesh system. Given the nature of the problem in this research, a two-dimensional symmetric geometric model was employed. Furthermore, the fluid dynamics of single-phase and multiphase flows were examined using the fluid flow module. Specifically, the physics of the problem was based on two-phase flow and the surface approach in a laminar flow regime. Additionally, since the formation of liquid bridges is time-dependent, a time-dependent model with initial phase assignments was chosen.

After creating the model environment in COMSOL, defining the problem in the graphical interface requires four stages: defining geometric shapes, determining material types, defining used parameters, and specifying the method of meshing the space. A rectangular two-dimensional geometry with dimensions of 2 mm was utilized. For simplicity, water or oil with specified density and viscosity properties defined in COMSOL was used as fluid 1, while air was designated as fluid 2. For meshing the environment, a controlled physical meshing approach was employed based on COMSOL's capabilities.

In this research, to calculate the two-phase pressure difference within the fracture resulting from the formation of the liquid bridge, the difference in pressure between the wetting and non-wetting phases is utilized. Moreover, to compute the pressure of each phase, values of pressure are first calculated along the interface and at various depths, and the average of these values is taken as an estimate of that phase's pressure. Furthermore, the average pressure difference between the non-wetting phase and the wetting phase within the fracture is then estimated.

Although laboratory studies typically use surfaces made of various materials such as glass, calcite, etc., to investigate the effect of wettability, in this study, the wettability of the surface is simulated in the "geometry section" of the software, employing the wet wall option to determine various contact angles and set the wettability.

Additionally, to account for the effects of rock permeability, which has a direct impact on the flow

rate within the fracture, various flow rates in the two-dimensional environment are implemented in the software.

Results and Analysis

In this section, the results of simulating the effects of fractured rock properties on the shape and form of the liquid bridge formed are examined. Specifically, the effects of fracture aperture, permeability, and wettability of the environment will be assessed.

Fracture Aperture

The first parameter of interest is the fracture aperture, which can influence the shape of the liquid bridge. Fig. 1 shows images of the liquid bridge formed between two plates (representing the fracture) at different spacings (2 mm and 3 mm). These images represent a frontal view of the liquid bridge. The fluid used in this system is water. The vertical black line in each image indicates the initial geometry of the water or oil (representing the liquid droplet volume) under initial conditions.

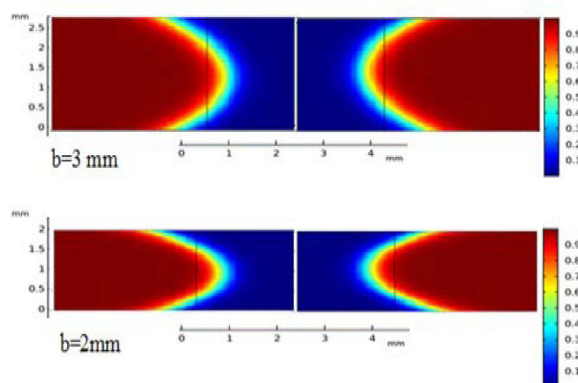


Fig. 1 Images of the liquid bridge formed between two plates (representing the fracture) at different spacings (2 mm and 3 mm).

Additionally, the results of the changes in the two-phase pressure difference in Fig. 2 align with the idea of a critical value for the fracture aperture (for instance, 50 micrometers as mentioned by Saidi and colleagues) for determining the existence of capillary continuity within the fracture. Similar analyses can be seen in experimental studies regarding the effects of fracture aperture. For instance, the dependence of the two-phase pressure difference within the fracture corresponds with experimental results reported in Dahim and colleagues' work for a fixed fluid volume of 1 microliter, a contact angle of 30 degrees, and a capillary pressure range from -20 Pa to 100 Pa, with fracture aperture ranges up to 2 mm.

Rock Wettability

Another parameter expected to influence the shape of the liquid bridge is the rock wettability. This section explores the effects of wettability on the shape of the liquid bridge and the two-phase pressure difference.

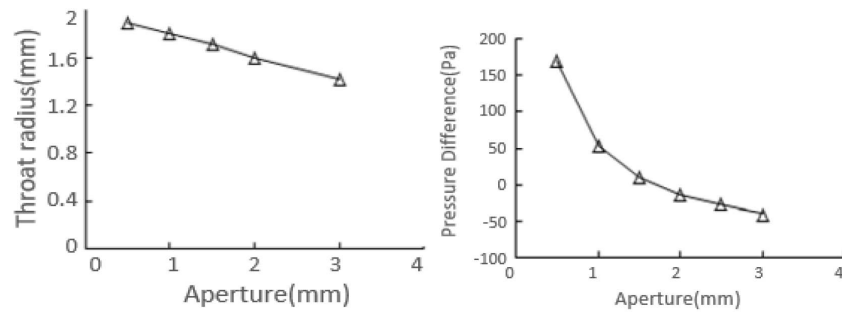


Fig. 2 Variation of liquid bridge neck radius and Pressure difference, with the fracture aperture.

Conclusions

In this study, the characteristics of the liquid bridge formed between two surfaces (matrix walls) under dynamic conditions and their dependency on fracture properties such as fracture aperture and rock wettability were analyzed numerically using COMSOL software. The main findings of this study are as follows:

1. Both fracture aperture and rock wettability were found to significantly affect the shape and stability of the liquid bridge, though the degree and nature of their effects differed.
2. The throat radius of the liquid bridge decreased approximately linearly with an increase in fracture aperture. This deformation of the liquid bridge resulted in a corresponding uniform decrease in the two-phase pressure difference (with increasing fracture aperture), which could even become negative after reaching a critical fracture aperture threshold. The two-phase pressure difference within the fracture, can exhibit both positive (approximately 170 Pa for a fracture aperture of 1.5 mm) and negative values (down to approximately -40 Pa for a fracture aperture of 3 mm).
3. The effect of rock wettability on the capillary pressure of the fracture is weaker compared to the effect of fracture aperture (the range of changes in the two-phase pressure difference caused by wettability is observed to be between 6 to 40 psi, while for the effect of fracture aperture, this value reached up to 200 psi). This result aligns with previously published experimental findings.
4. As the flow rate into the fracture increased (indicating higher permeability), the throat radius of the liquid bridge formed increased from about 0.03 mm to 0.05 mm, which is consistent with results from previous experiments.

References

1. Aguilera, R. (1980), naturally fractured reservoirs. Petroleum Publishing Company Tulsa, Okla.
2. Van Golf-Racht, T.D. (1982), Fundamentals of fractured reservoir engineering. 12. Elsevier.
3. Masihi M, Fractured Reservoir Engineering-Modeling and Simulation, RIPI Publication Institute, pp 258, ISBN: 978-600-5961-98-0, 2016. (Persian).
4. Saidi A. M. (1987). Reservoir Engineering of Fractured Reservoirs: Fundamental and Practical Aspects, 864, Total co.
5. Parvizi, R., & Ghaseminejad, E. (2014). An Experimental Investigation of Gravity Drainage during Immiscible Gas Injection in Carbonate Rocks under Reservoir Conditions. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 4(1), 63-71. doi: 10.22078/jpst.2014.326.
6. Erfani H., Malekabadi A. K., Ghazanfari M.H. and Roštami B. (2020) Experimental and Modelling Study of Gravity Drainage in a Three Block System. (202). *Transport in Porous Media*, 7.
7. Erfani, H., Karimi Malekabadi, A., Ghazanfari, M. H., & Roštami, B. (2021). Experimental and modelling study of gravity drainage in a three-block system. *Transport in Porous Media*, 136, 471-494.
8. Mashayekhizadeh, V., Ghazanfari, M. H., Kharrat, R., & Dejam, M. (2011). Pore-level observation of free gravity drainage of oil in fractured porous media. *Transport in porous media*, 87, 561-584.
9. [9]. Mohammadi A., Rasaei M. R., Meshaikhizadeh V., Akhai A. (1401). Pore-network modeling of molecular infiltration combined with gravity drainage in a single-block model, *Petroleum Research*, 32, June and July 1401, 112-130. 112-130. doi:10.22078pr.2022.4719.3116.
10. Manafi, M., Kalantariasl, A., & Ghaedi, M. (2022). A COMSOL Multiphysics study on block-to-block interactions in naturally fractured reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109540. doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109540.
11. Labaštie, A. (1990, September). Capillary continuity between blocks of a fractured reservoir. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition? SPE-20515*). SPE.
12. Bina, O., Aminshahidy, B., Dadvar, M., & Moghadasi, J. (2020). Capillary continuity in fractured porous media; part II: Evaluation of fracture capillary pressure in the presence of liquid bridges using a novel microfluidic approach. *Journal of Molecular Liquids*, 314, 113666. doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113666.

13. Dejam, M., & Hassanzadeh, H. (2011). Formation of liquid bridges between porous matrix blocks. *AICHE Journal*, 57(2), 286-298. doi.org/10.1002/aic.12262.
14. Firoozabadi, A., & Hauge, J. (1990). Capillary Pressure in Fractured Porous Media (includes associated papers 21892 and 22212). *Journal of Petroleum Technology*, 42(06), 784-791.
15. Harimi, B., M.H. Ghazanfari, M. Masihi (2020), Modeling of the capillary pressure in horizontal rough-walled fractures in the presence of liquid bridges. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 185. doi.org/10.2118/18747-PA.