

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

امیرعلی فراهانی، محسن مسیحی*

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

amirali.f.1376@gmail.com

masihi@sharif.edu

چکیده

در مخازن شکافدار تحت مکانیزم 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 مدل سازی 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 موینگی 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 میلی‌متر) 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 پوند بر اینچ مربع در مقدار اختلاف فشار دوفاز درون شکاف گردد. به علاوه با افزایش تراوایی سنگ و ورود بیشتر جریان درون شکاف شعاع گلوگاه پل مایع تشکیل شده از مقدار حدود ۰/۰۳ میلی‌متر به حدود ۰/۰۵ میلی‌متر افزایش یافت که با داده‌های منتشر شده آزمایشگاهی مطابقت دارد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای درک بهتر چگونگی تغییرات ساختار پل مایع و تاثیر آن بر اختلاف فشار دوفاز درون شکاف که کنترل کننده فصل مشترک دوفاز است بکار رود.

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

۱- مقدمه

مخازن شکافدار به مخازن با شکاف‌های با منشأ طبیعی گفته می‌شود که در محیط‌های مختلفی مانند ماسه‌سنگ^۱، سنگ آهک^۲، کوارتزیت^۳ و سنگ خارا^۴ دیده شده و در آنها شکاف‌ها با ابعاد متفاوتی از میکرومتر تا کیلومتر وجود دارند [۱ و ۲]. اهمیت مخازن شکافدار از آنجایی است که حجم درجای نفت بسیار زیادی (مثلاً در حدود ۴۵۰ میلیارد بشکه در ایران) در این‌گونه مخازن موجود است [۳ و ۴]. نمونه‌هایی از مخازن شکافدار شامل مخازن آسماری در میادین گچساران، بی‌بی‌حکیمه، هفتگل، آغاجاری، پارسی و رگ سفید، در جنوب ایران هستند [۴]. مخازن شکافدار بر اساس ساختار ارتباطی درونی به دو ناحیه تقسیم می‌گردند:

¹ Sandstone

² Limestone

³ Quartzite

⁴ granite

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 [۲۰۱].

قسمت اعظم هیدروکربن موجود در مخازن شکافدار در فضاهای حفره ماتریکس قرار دارد که می‌تواند توسط مکانیزم‌های مختلفی مانند مکانیزم آشام، ریزش‌ثقلی [۳]۵، جابجایی ویسکوز و نفوذ ۷ و انتشار ۸ و جریان همرفتی ۹ [۴] جابجا شود. در اکثر موارد مشاهده شده که در مخازن شکافدار تاثیر نیروی ریزش‌ثقلی بیش از سایر نیروها از جمله نیروی ویسکوز، آشام یا نفوذ است. در مخازنی که تراوایی پایینی دارند، نیروی پراکنش^{۱۰} هم می‌تواند نقشی در تولید ایفا نماید. البته تاثیر برخی نیروها هم به میزان تولید از مخازن شکافدار بستگی دارد [۴].

ریزش‌ثقلی گاز- نفت به عنوان یکی از مکانیزم‌های اصلی مخازن شکافدار^{۱۱} 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 ریزش‌ثقلی قرار می‌گیرند؛ آن‌گاه اگر نیروی ثقلی از نیروی موینگی^{۱۲} بیشتر باشد، گاز موجود در داخل شکاف جایگزین نفت داخل ماتریکس می‌شود. به علت اختلاف چگالی نفت و گاز، جابجایی نفت از سطح پایین بلوک بوده و گاز از سطح بالای بلوک وارد می‌شود. [۳]. مطالعات آزمایشگاهی [۵] و مشاهدات میدانی [۴] به بررسی مکانیزم ریزش‌ثقلی و نقش آن در میزان بازیافت نفت پرداخته است. هم‌چنین بسیاری عقیده دارند که مکانیزم ریزش‌ثقلی به برهم‌کنش بین بلوک‌های ماتریکس مجاور وابسته است، (برهم‌کنش بلوک - به - بلوک^{۱۳}). این برهم‌کنش در قالب دو پدیده پیوستگی موینه^{۱۴} و آشام مجدد^{۱۵}، صورت می‌پذیرد [۳و۴].

مطالعات قبلی نشان می‌دهد که چگونگی فرارگیری بلوک، ارتفاع آن، اشباع آب باقی مانده، تراوایی و فشار موینگی ماتریکس، نقاط تماس و اتصال بین بلوک‌ها و اندازه و زاویه شکاف و رخداد هم‌زمان سایر مکانیزم‌ها مانند نفوذ مولکولی از جمله پارامترهای موثر برهم‌کنش بین بلوک‌های ماتریکس مجاور در عملکرد پیوستگی موینگی و آشام مجدد می‌باشند [۶]. مطالعات مختلفی در مقیاس مغزه در آزمایشگاهی [۷]، با مدل سازی مقیاس حفره [۸و۹] یا با کمک نرم‌افزارهای موجود [۱۰] به بررسی میزان تاثیر این عوامل پرداخته است. در سال ۱۹۹۰، لستی آزمایش‌هایی را روی دسته‌ای از بلوک‌ها انجام داد تا برهم‌کنش بلوک - به - بلوک را بررسی کند. او در تحقیق خود به مقدار بحرانی ۰/۰۳ میلی متر برای بازشدگی شکاف اشاره داشت که برای مقادیر بازشدگی شکاف کم‌تر از آن آستانه نیروی موینگی 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 ۵۰ میکرون باشد، ناپیوستگی موینگی در شکاف برقرار است [۴]. یکی از پارامترهایی که می‌تواند در این پدیده بسیار موثر باشد، فشار موینگی شکاف است. در حالت استاتیک وقتی جریان و گرادیان فشاری قابل توجهی درون شکاف وجود نداشته باشد، میزان فشار موینگی به صورت اختلاف فشار دوفاز تر و غیرتر درون شکاف بستگی به بازشدگی شکاف، زبری دیواره‌های شکاف و تشکیل پل مایع درون شکاف [۱۲و۱۳] دارد. در این شرایط، مقدار فشار موینگی شکاف را می‌توان صفر، مقداری ثابت ولی غیر صفر یا تابعی از اشباع سیال در نظر گرفت. فشار موینگی صفر برای شکاف نشان دهنده وجود ناپیوستگی موینگی بین بلوک‌ها است. در حالتی که فشار موینگی 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 موینگی شکاف

⁵ Gravity Drainage

⁶ viscous displacement

⁷ diffusion

⁸ dispersion

⁹ convection flow

¹⁰ Dispersive force

¹¹ Fracture Reservoirs

¹² Capillary Force

¹³ Block to block interaction

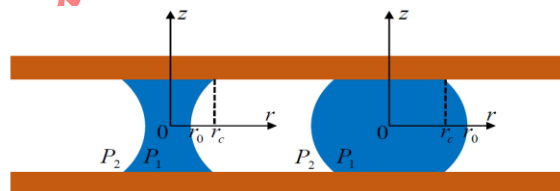
¹⁴ Capillary Continuity

¹⁵ Reimbibition

رفتاری مشابه تغییرات فشار مویبستگی 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 برهم‌انباشته بستگی دارد [۱۶].

وجود پیوستگی مویبستگی با افزایش ارتفاع ستون سیال در داخل شکاف، بر بازیافت نهایی نفت تأثیر می‌گذارد. بسته به خواص ماتریکس و شکاف، وجود پیوستگی مویبستگی نرخ بازیافت نفت را به طور قابل توجهی به عنوان مثال، در برخی موارد تا ۶۰ درصد بهبود می‌بخشد [۱۱]. ارتباط مویبستگی 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 موثر و غیر موثر طبقه بندی 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 مویبستگی و گرانش بستگی دارد [۱۸]. جریان از طریق این مکانیزم یا از طریق نقاط تماس دو بلوک ماتریکس مجاور یا پل‌های مایع تشکیل شده بین دو بلوک رخ می‌دهد [۱۷]. شکل 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 پایینی 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 مویبستگی مهم می‌شود [۱۵]. هم‌چنین ترکیب نیروهای گرانشی و مویبستگی برای مدل‌سازی پدیده نفوذ مجدد در یک محیط متخلخل شکاف‌دار ضروری می‌باشد. در مدل‌سازی چنین مکانیزمی، 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 مویبستگی بین دو سطح شکاف به پارامترهایی از جمله ترشوندگی و پایداری پل مایع تشکیل شده در داخل شکاف بستگی دارد [۱۷].

بررسی نحوه شکل‌گیری، پایداری پل مایع ایجاد شده درون شکاف و به دنبال 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 بکارگیری نرم‌افزارهای موجود مانند fluent یا comsol بررسی شده است. دارابی و همکاران (۲۰۱۰) با شبیه‌سازی با نرم‌افزار fluent به بررسی پروفایل پل مایع پرداخته و نقش زاویه تماس را در شکل پل مایع مهم ارزیابی نمودند [۱۸]. لی و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که بکارگیری نرم‌افزارهای شبیه‌ساز و کدهای مختلف براساس رویکردهای عددی مختلف الزامات نتایج یکسانی در تخمین

لحظه انقطاع پل مایع نمی‌دهد [۱۹]. اخیراً آداک و غضنفری (۲۰۲۴) با توسعه یک مدل CFD تاثیر رژیم‌های مختلف زاویه تماس را بر پایداری پل مایع بررسی نمودند و رابطه‌ای را برای وابستگی پایداری به حجم پل مایع 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 پل مایع را در محیط متخلخل شکاف‌دار در مقیاس منفذی با استفاده از یک میکرو مدل مورد مطالعه قرار دادند [۸]. آنها دریافتند که پایداری پل مایع به جهت گیری شکاف و تعداد پل‌های مایع ایجاد شده در شکاف بستگی دارد. دژم و حسن زاده از حل عددی معادله YLE برای تعیین تماس گاز و مایع استفاده کرد [۱۳]. مطالعات دیگر مانند کار فیروزآبادی و هاگ در سال ۱۹۹۰ بر روی فشار مویینگی شکاف متمرکز بود. مطالعات بعدی هوری و همکاران (۱۹۹۰) و دیندروک و فیروزآبادی (۱۹۹۵) وابستگی فشار مویینگی 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 مویینگی شکاف و محیط ماتریکس (یعنی محیط‌های مشابه) به دست می‌آید [۲۲]. مکانیزم ریزش ثقلی (GD) به نوع آزاد یا خودبخودی و نوع اجباری طبقه‌بندی می‌شود. اصطلاح ریزش ثقلی 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 ریزش ثقلی 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 ریزش ثقلی نشان داده شده که وجود گرادیان فشار گاز در شکاف‌ها می‌تواند باعث کاهش ارتفاع آستانه مویینگی و افزایش باز یافت 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 مویینگی 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 به طور 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^{۱۶} و Ω به‌عنوان نسبت ذخیره سازی^{۱۷} برای بررسی و تحلیل عملکرد تبادل جریان بین دو محیط ماتریکس و شکاف و ذخیره جریان در این دو محیط معرفی شدند [۲۵]. در ادامه برای بهبود مدل‌سازی جریان چند فاز در مخازن شکاف‌دار، روش‌هایی برای توسعه مدل WR معرفی شد (به‌عنوان مثال، مدل‌های کاظمی و گیلمن) که بعداً با در نظر گرفتن مکانیزم‌های 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 (۱۹۶۰) استفاده شد [۲۸]. برای جریان تک فاز و شرایط جریانی شبه پایدار، گیلمن و کاظمی تابع انتقال WR را برای جریان چند فاز توسعه دادند [۲۶]. اصلاحات بعدی متمرکز بر نحوه درست محاسبه ضریب شکل و چگونگی در نظر گرفتن سایر مکانیزم‌های دخیل در جابجایی جریان چند فاز بود. به‌عنوان مثال، می‌توان به رویکرد کوتس (۱۹۸۷) برای مدل‌های تک تخلخل و تخلخل دوگانه با ریزش ثقلی اشاره کرد [۲۹]. توابع انتقال بعدی بر شیوه درست تر لحاظ نیروی گرانش یا تحرک پذیری فازهای جابجا کننده و جابجا شونده متمرکز بود [۳۰ و ۳۱].

¹⁶ inter-porosity flow coefficient

¹⁷ Storativity ratio

البته، رویکردهای دیگری هم برای تعیین مقدار جریان بین شکاف و ماتریکس وجود دارد. یکی از این رویکردها، استفاده از روش منحنی بازیافت^{۱۸} ارایه شده توسط هایمن بود که توسط قاندى و همکاران در سال ۲۰۱۵ گسترش یافت [۳۲]. در این روش، مقدار تبادل جریان بین دو محیط ماتریکس و شکاف در هر مرحله زمانی در طول شبیه‌سازی جریان به صورت تجربی یا عددی و براساس نوع مکانیزم موجود تعیین می‌شود.

یکی از پارامترهای ضروری دیگر برای شبیه‌سازی جریان در مقیاس بزرگ در یک مخزن شکاف‌دار، فشار مویینگی شکاف است. همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، مطالعات تجربی و تحلیلی نشان می‌دهد که فشار مویینگی شکاف به طور قابل توجهی بر میزان تولید و هم‌چنین مقدار بازیافت نهایی نفت تأثیر می‌گذارد. فشار مویینگی شکاف ممکن است صفر، یک مقدار ثابت غیر صفر، یا تابعی از اشباع نفت باشد. فشار مویینگی صفر (که به دلایل سادگی در بسیاری از شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود) نشان دهنده ناپیوستگی مویینگی 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 گرادیان فشار درون شکاف بر شکل فصل مشترک دوفاز موثر 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 موثر هستند. اگرچه بر اساس 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 مدل سازی 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 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.

۲- مدل مورد مطالعه و روش محاسبات

هدف از این مطالعه بررسی خواص پل مایع تشکیل شده درون شکاف (به عنوان مثال، شکل و پایداری پل مایع) در حالت دینامیک و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف در اثر تغییر خواص سنگ شکاف‌دار است. به طور 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 به صورت عددی تجزیه و تحلیل می‌شود. نرم‌افزار کامسول (Multiphysics 5.4.0.225) بکار رفته در این تحقیق قادر است با در نظر گرفتن فیزیک مسئله و با استفاده از معادلات دیفرانسیل مناسب جریان حاکم بر حرکت سیالات در محیط متخلخل را لحاظ نموده، و با رویکردهای عددی مناسب برای حل معادلات حاکم مانند روش اجزاء محدود را پیاده سازی کند. برای انجام این کار، باید ضمن تعریف درست مسئله، شرایط اولیه و مرزی مناسب، اندازه، تعداد و نوع سیستم مش برای آن تعریف شود. هم‌چنین برای انتخاب درست این پارامترها ممکن است نیاز به انجام مراحل حساسیت‌سنجی و پیش پردازش قبل از شبیه‌سازی باشد.

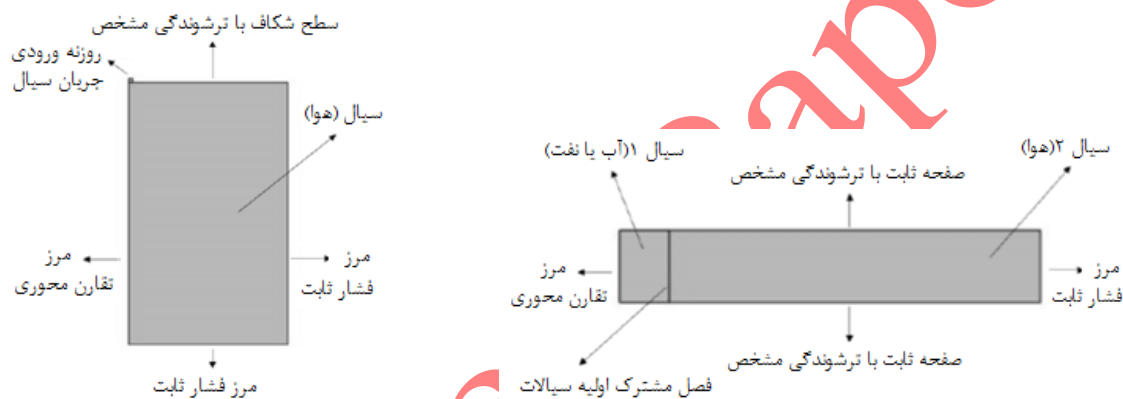
با توجه به نوع مسئله در این کار پژوهشی، برای مدل هندسی محیط از گزینه دو بعدی متقارن^{۱۹} استفاده شد. هم‌چنین، برای بررسی هیدرودینامیک سیالات تک فاز و چندفازی از ماژول جریان سیال^{۲۰} استفاده گردید. به طور خاص، فیزیک مسئله بر اساس

¹⁸ Recovery curve method

¹⁹ 2D Axisymmetric

²⁰ Fluid flow

جریان دوفازی و رویکرد سطح^{۲۱} و جریان آرام^{۲۲} انتخاب شد. به علاوه، از آنجایی که تشکیل پل مایع وابسته به زمان است، در این جا گزینه وابسته به زمان با مقداردهی اولیه فاز^{۲۳} 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 شیوه مش بندی فضا انجام شود. شکل هندسه دوبعدی مستطیل^{۲۴} به ابعاد ۲ میلی متر استفاده گردید. برای سادگی جنس مواد^{۲۵} مورد استفاده آب یا نفت با مشخصات چگالی و گرانیوی مشخص شده در کامسول به عنوان سیال ۱ و هوا به عنوان سیال ۲ بکار گرفته شد. برای مش بندی محیط با توجه به امکانات کامسول از مش بندی کنترل شده فیزیکی^{۲۶} استفاده شد. سایر جزئیات مدل مورد استفاده پل مایع در حالت استاتیک و دینامیک به همراه شرایط مرزی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: مدل هندسه بکار رفته در مطالعه پل مایع به همراه تعریف شرایط مرزی برای (راست) حالت استاتیک (چپ) حالت دینامیک در همه شبیه سازی های شرایط دینامیک بجز 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

²¹ level set

²² laminar

²³ Time Dependent with Phase Initialization

²⁴ Rectangle

²⁵ Material

²⁶ Physics controlled mesh

هم چنین، برای بررسی استقلال نتایج شبیه سازی از تعداد مش، از مش بندی با سه درجه ریز، متوسط و درشت استفاده شد. نتایج تاثیر 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).

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

نوع مش بندی	شعاع گلوگاه (mm)	زمان جدایش ^{۲۷}	مساحت متوسط سلول
درشت	۱/۷۵۳	۰/۰۷۱۸	۱۰ ^{-۴} mm ^۲
نرمال	۱/۷۵۹	۰/۰۷۲۹	۶
ریز	۱/۷۶۰	۰/۰۷۳۳	۴

هم چنین 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 غیر تر استفاده می شود. برای محاسبه فشار هر فاز، ابتدا در امتداد فصل مشترک و در عمق های مختلف مقادیر فشار محاسبه شده و مقدار 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.

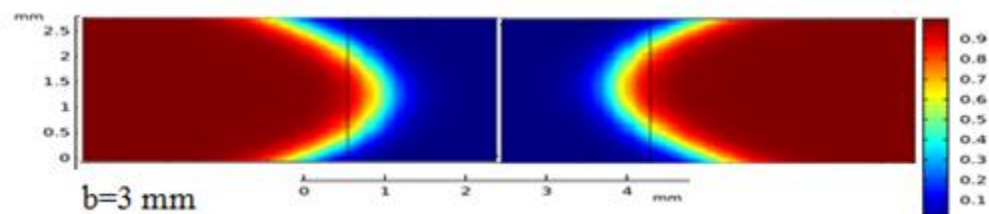
اگرچه در کارهای آزمایشگاهی برای بررسی اثر ترشوندگی محیط، از سطوح با مواد مختلف مانند شیشه، کلسیت و غیره استفاده می شود، اما در اینجا برای شبیه سازی اثر سطوح در "بخش هندسه" نرم افزار از گزینه دیوار تر برای تعیین زوایای تماس مختلف و تنظیم ترشوندگی سطح استفاده می شود. هم چنین برای در نظر گرفتن اثرات تراوایی سنگ با توجه به تاثیر 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.

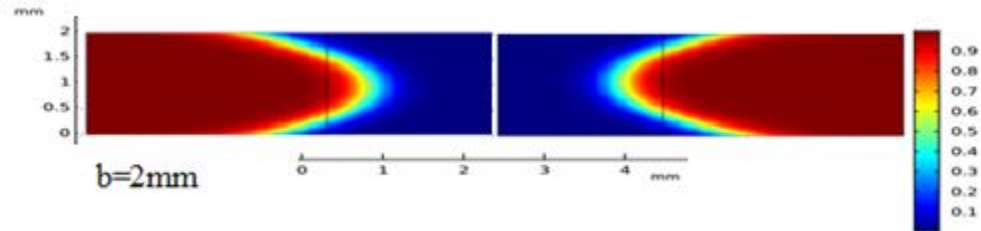
۳- نتایج و تحلیل

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

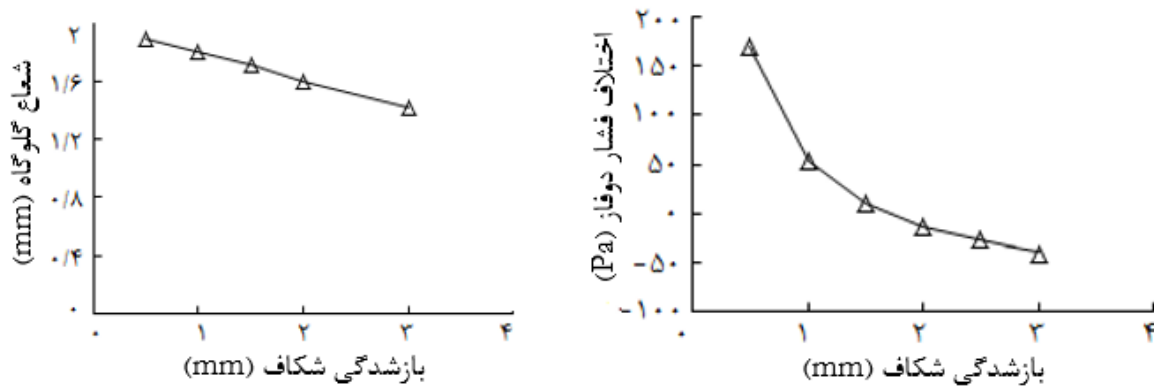
اولین پارامتر مورد نظر بازشدگی شکاف است که می تواند بر شکل پل مایع اثرگذار باشد. شکل ۳ تصاویر پل مایع تشکیل شده بین دو صفحه (نشان دهنده شکاف) با فواصل مختلف (۲ و ۳ میلی متر) را نشان می دهد. این تصاویر نمای از جلوی پل مایع را نشان می دهد. سیال مورد استفاده در این سیستم آب است. خط سیاه عمودی در هر تصویر،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





شکل ۳: تصاویر نمونه از پل‌مایع تشکیل شده برای شبیه‌سازی با مقادیر بازشدگی شکاف ۲ و ۳ میلی‌متر و در زاویه تماس ثابت ۳۰ درجه.

همان‌گونه که از شکل ۳ دیده می‌شود با افزایش بازشدگی شکاف، مقدار شعاع گلوگاه پل‌مایع تشکیل شده، که معادل با حداقل فاصله افقی مرز پل‌مایع از مبدأ در نظر گرفته می‌شود، کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی چگونگی تغییرات شعاع گلوگاه به عنوان تابعی از بازشدگی شکاف در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین، نتایج تخمین اختلاف فشار دوفاز درون شکاف به عنوان تابعی از مقدار بازشدگی شکاف در شکل ۴ آورده شده است.



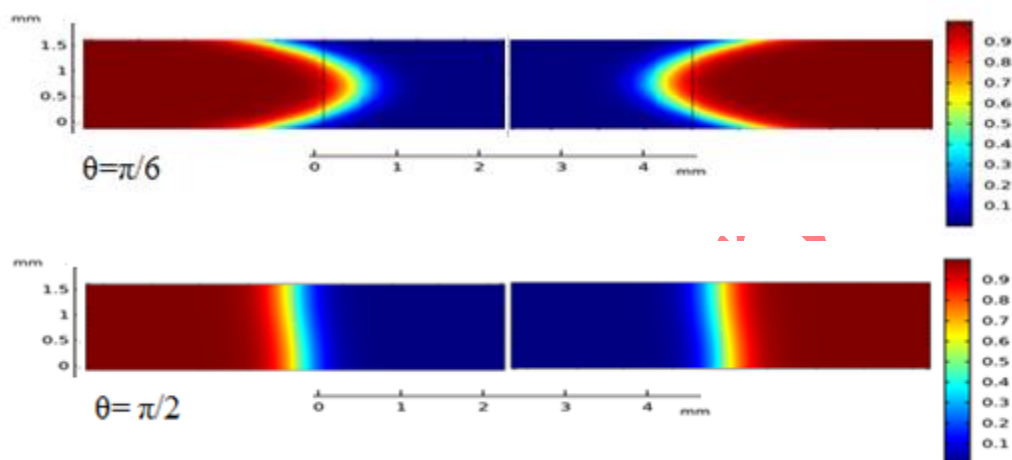
شکل ۴: (راست) تغییرات شعاع گلوگاه پل‌مایع به صورت تابعی از مقدار بازشدگی شکاف و (چپ) وابستگی اختلاف فشار دوفاز درون شکاف به مقدار بازشدگی شکاف برای حالت ترشوندگی با زاویه تماس ۳۰ درجه.

همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، شعاع گلوگاه پل‌مایع با اندازه بازشدگی شکاف بطور تقریباً خطی کاهش می‌یابد. به علاوه از شکل ۴ اختلاف فشار دوفاز درون شکاف با افزایش بازشدگی شکاف کاهش یافته و پس از یک مقدار مشخص (۱/۷ میلی‌متر) فشار مویینگی 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. بهرحال مقدار مثبت اختلاف فشار دوفاز نشان دهنده شکاف نازک و مقدار منفی شکاف نسبتاً گسترده‌تر را نشان می‌دهد.

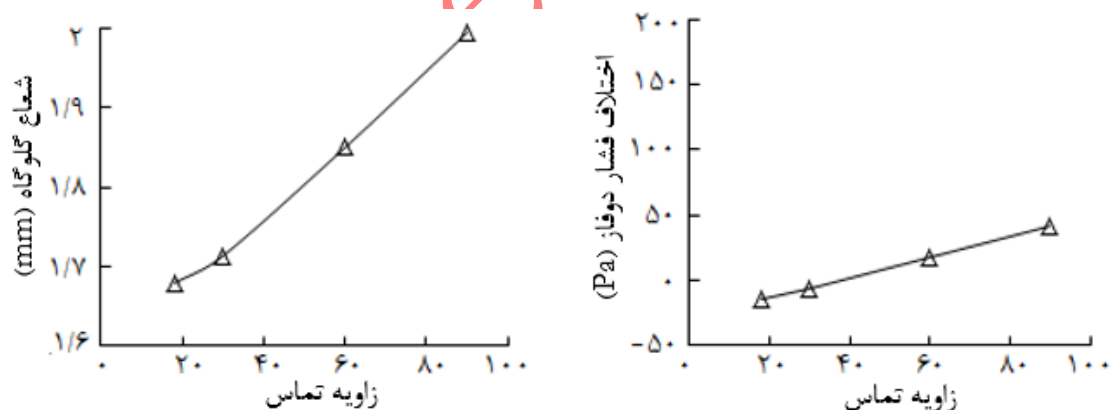
به علاوه، نتایج تغییرات اختلاف فشار دوفاز در شکل ۴ با ایده وجود یک مقدار آستانه برای بازشدگی شکاف (مثلاً، ۵۰ میکرومتر گفته شده توسط سعیدی و همکاران) برای تصمیم‌گیری در مورد وجود یا عدم وجود پیوستگی مویینگی در شکاف هم‌راستا است [۱۴-۱۵]. تحلیل مشابهی را می‌توان از کارهای تجربی در اثرات بازشدگی شکاف دید. به عنوان 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 ۳۰ درجه و محدوده فشار مویینگی ۲۰- تا ۱۰۰ پاسکال و بازه بازشدگی شکاف ۲ تا ۲ میلی‌متر دیده می‌شود [۱۵ و ۱۷].

(ب) ترشوندگی سنگ

پارامتر دیگری که انتظار می‌رود بر شکل پل‌مایع اثرگذار باشد ترشوندگی سنگ است. در این بخش اثرات ترشوندگی بر شکل پل‌مایع و اختلاف فشار دوفاز بررسی می‌شود. شکل ۵ اثر ترشوندگی را بر شکل پل‌مایع در بازشدگی شکاف ۱/۵ میلی‌متر و زوایای تماس ۳۰ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد.



شکل ۵: اثر ترشوندگی بر شکل پل‌مایع با حجم ثابت در زوایای تماس ۳۰ و ۹۰ درجه
 نتایج محاسبات شعاع گلوگاه پل‌مایع مشاهده شده و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف در شبیه‌سازی‌های با زاویه تماس‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است.



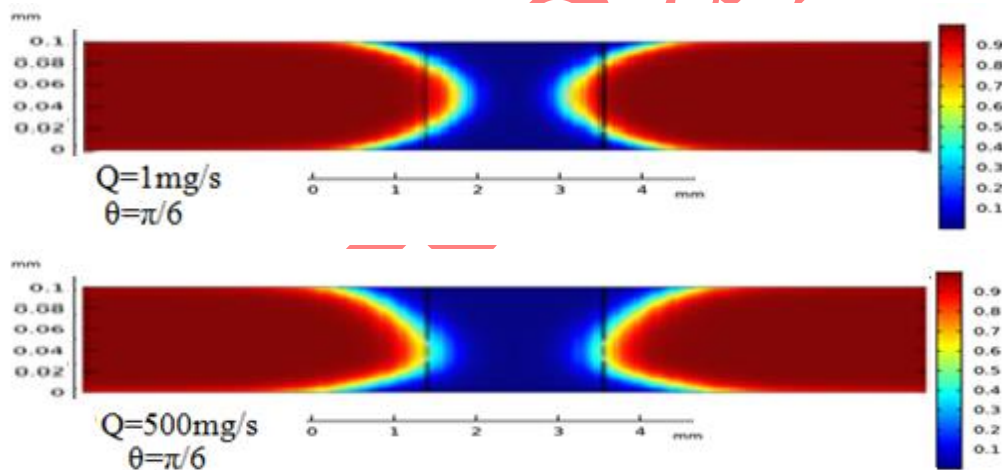
شکل ۶: (راست) تغییرات شعاع گلوگاه پل‌مایع به صورت تابعی از زاویه تماس و (چپ) وابستگی اختلاف فشار دوفاز درون شکاف به زاویه تماس برای حالت شکاف با بازشدگی ۱/۵ میلی‌متر
 از نقطه نظر فیزیکی، در زوایای تماس بیشتر تا میزان خنثی، پل‌مایع به شکل عمودی‌تر است و در نتیجه شعاع گلوگاه پل‌مایع افزایش می‌یابد.

هم‌چنین، همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، اختلاف فشار دوفاز درون شکاف با تغییر ترشوندگی تغییر می‌کند. شایان توجه است که این روند تغییرات با نحوه وابستگی فشار موئینگی 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 می‌شود که، این تغییرات اختلاف فشار فازها در اثر عامل ترشوندگی در مقایسه با اثر عامل بازشدگی شکاف ضعیف‌تر است. هم‌چنین این نتیجه

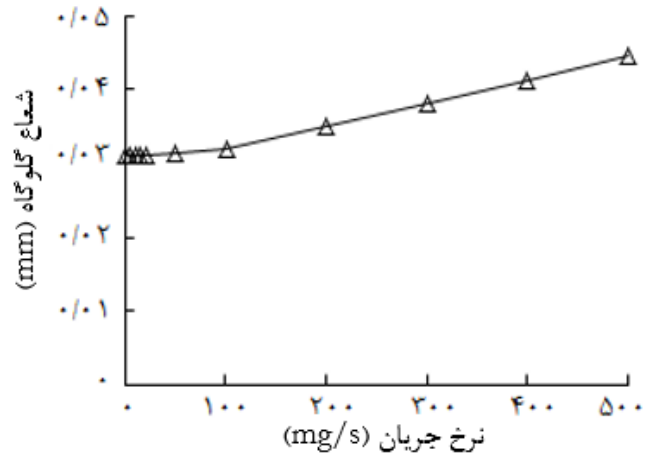
شبیه‌سازی مطابق با نتایج تجربی داده شده در کار داهیم و همکاران برای وابستگی فشار موئینگی شکاف به زاویه تماس در محدوده ۴۶ تا ۷۶ درجه است [۱۷ و ۱۵]. البته نتایج اثر ترشوندگی بر پل مایع در شرایط دما و فشاری که فرآیند تبخیر بوجود می‌آید می‌تواند متفاوت باشد [۳۲].

ج) تراوایی سنگ

پارامتر دیگری که به طور مستقیم بر میزان ورود نفت از ماتریکس به درون شکاف و لذا حجم و شکل پل مایع اثرگذار باشد تراوایی ماتریکس است که بر اساس معادله دارسی ($Q \propto k$) می‌تواند مستقیماً بر میزان جریان وارد شده به درون شکاف موثر باشد. لذا در این قسمت به بررسی اثر تراوایی بر روی شکل پل مایع و شعاع گلوگاه پرداخته می‌گردد. برای ثابت فرض نمودن سایر پارامترها زاویه تماس ۳۰ درجه و عرض شکاف ۱ میلی‌متر 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 پیاده‌سازی گردید. از این رو با تغییر مقدار جریان داخل شکاف، شکل و انحنای پل مایع 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 پل مایع در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۷: اثر نرخ جریان بر حجم و شکل پل مایع در زاویه تماس ۳۰ درجه و عرض شکاف ۱ میلی‌متر



شکل ۸: اثر نرخ جریان (و تراوایی ماتریکس) بر شعاع گلوگاه پل مایع در زاویه تماس ۳۰ درجه و عرض شکاف ۱ میلی‌متر همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود با افزایش مقدار جریان داخل شکاف (با افزایش تراوایی)، شعاع گلوگاه از مقدار حدود ۰/۰۳ میلی‌متر به حدود ۰/۰۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد. این نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی گزارش شده توسط داهیم و همکاران ۲۰۲۱ مطابقت دارد [۱۷ و ۱۵].

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

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 شکاف‌دار با رویکرد عددی با نرم‌افزار کامسول پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است.

۱. هر دو عامل بازشدگی شکاف و ترشوندگی سنگ بر شکل و پایداری پل مایع موثر دیده شد. البته میزان و نحوه اثر آن دو عامل متفاوت است.

۲. شعاع گلوگاه پل مایع با اندازه بازشدگی شکاف بطور تقریباً خطی کاهش می‌یافت. 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 بازشدگی‌های شکاف می‌تواند مقادیر مثبت (مثلاً در حدود ۱۷۰ پاسکال برای شکاف با بازشدگی ۵/ میلی‌متر) یا مقادیر منفی (تا حدود ۴۰- پاسکال برای شکاف با بازشدگی ۳ میلی‌متر) داشته باشد.

۳. اثر ترشوندگی سنگ بر فشار موینگی شکاف در مقایسه با اثر بازشدگی شکاف ضعیف‌تر است (محدوده تغییرات اختلاف فشار دوفاز ناشی از تاثیر ترشوندگی در شکل ۶ تا ۴۰ پوند بر اینچ مربع دیده شد در حالی که این مقدار در شکل ۴ برای اثر بازشدگی شکاف تا ۲۰۰ پوند بر اینچ مربع بود). این نتیجه شبیه‌سازی 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 ۰/۰۳ میلی‌متر به حدود ۰/۰۵ میلی‌متر افزایش یافت که با نتایج منتشر شده آزمایشات قبل مطابقت دارد.

پیشنهادات برای کارهای آتی می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

۱. یکی از عوامل دیگر که می‌تواند بر شکل پل مایع و اختلاف فشار دوفاز درون شکاف تاثیرگذار باشد، زبری سطح شکاف است که در این مطالعه سطوح صاف استفاده شد. لذا تعمیم این مطالعه با بکارگیری مدل سطوح دیواره‌ها با زبری‌های متفاوت.
۲. در این مطالعه تشکیل پل مایع در شکاف افقی بررسی شد، تعمیم این مطالعه به پل مایع تشکیل شده در شکاف‌های غیرافقی.

۳. بکارگیری 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.

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. Vol. 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, pp 864, Total co.
5. Parvizi R., and Ghaseminejad E. (2014) An Experimental Investigation of gravity drainage during Immiscible Gas Injection in Carbonate Rocks Under Reservoir Conditions, 4(1), 63-71.
6. Erfani H., Malekabadi A. K., Ghazanfari M.H. and Rostami B. (2020) Experimental and Modelling Study of Gravity Drainage in a Three-Block System. (202). Transport in Porous Media, 7.
7. Sajjadian, V., A. Danesh, and D. Tehrani, 1998. Laboratory Studies of Gravity Drainage Mechanism in Fractured Carbonate Reservoir - Capillary Continuity. In: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Society of Petroleum Engineers. 11-14 October.
8. Mashayekhizadeh, V., Ghazanfari, M. H., Kharrat, R., and Dejam, M. (2011), Pore-Level Observation of Free Gravity Drainage of Oil in Fractured Porous Media, Transport in Porous Media, Vol. 87, No. 2, p. 561-584.
۹. احمد محمدی، محمدرضا رسایی، وحید مشایخی زاده، علی نخعی (۱۴۰۱). مدل سازی شبکه حفره های نفوذ مولکولی توأم با ریزش ثقلی در یک مدل تک بلوکی، پژوهش نفت، دوره ۳۲، خرداد و تیر ۱۴۰۱، صفحه 130-112
10. Manafi M., Kalantariasl A., Ghaedi M.. (2022) A COMSOL Multi-physics study on block-to-block interactions in naturally fractured reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering, p. 109540
11. Labastie, A. (1990). Capillary continuity between blocks of a fractured reservoir. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
12. Bina, O. (2019), Laboratory study of liquid bridges in gravity drainage mechanism in fractured reservoirs and its modeling. Pages 2-49.
13. Dejam, M. and H. Hassanzadeh (2011), Formation of liquid bridges between porous matrix blocks. AIChE journal. 57 (2): p. 286-298.
14. Firoozabadi, A. and J. Hauge (1990), Capillary Pressure in Fractured Porous Media (includes associated papers 21892 and 22212). Journal of Petroleum Technology. P. 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
16. Harimi B., Masihi M, Ghazanfari M H. (2020). 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

17. Dahim S., Harimi B, Ghazanfari M H, and 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.
18. Darabi P., Li T., Pougatch K., Salcudean M., and Grecov D. (2010), Modeling the evolution and rupture of stretching pendular liquid bridges, *Chemical Engineering Sciences*, 65 (15), 4472-4483
19. Li, Y. and Sprittles J.E(2016), Capillary breakup of a liquid bridge: identifying regimes and transitions, *Journal of Fluid Mechanics*, 797.
20. Adak Z., and 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*, Volume 398, 124188
۲۱. مهدی عباسی، مجتبی ایزدمهر، محمد شریفی، محمد حسین غضنفری؛ علیرضا کاظمی و شهاب گرامی (۱۳۹۶) مدل سازی تحلیلی فرآیند آشام مجدد بین ماتریس ها در فرآیند ریزش ثقلی در ناحیه مورد هجوم گاز، پژوهش نفت ، دوره ۲۷، ۱-۹۶، فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۶، صفحه 4-15
22. Horie T., Firoozabadi A., Ishimoto K.(1990), Laboratory Studies of Capillary Interaction in Fracture/Matrix Systems, *SPE Res Eng* 5 (03): 353–360.
23. Firoozabadi, A. and Dindoruk, B (1995), Computation of Gas–liquid Drainage in Fractured Porous Media Recognizing Fracture Liquid Flow, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 34, p. 39– 49.
24. GanjehGhazvini M., R. Kharrat and M. Masihi, A new mathematical model for force gravity drainage in fractured porous media, *Transport in Porous Media*, 83, 711-724, 2010.
25. Christian M. (2016), *Fractured reservoir engineering with modeling and simulation approach*. First: Petroleum Industry Research Institute. 262.
26. Gilman J. R., Kazemi, H., "Improved Calculations for Viscous and Gravity Displacement in Matrix Blocks in Dual-Porosity Simulators." *SPE* 16010, 1989
27. Kazemi, H., et al., Numerical simulation of water-oil flow in naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1976. 16 (06)p. 317-326.
28. A-Barenblatt, G.I., I.P. Zheltov, and I. Kochina, Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata]. *Journal of applied mathematics and mechanics*, 1960. 24 (5): p. 1286-1303.
29. Coats, K.H. Implicit compositional simulation of single-porosity and dual-porosity reservoirs. In *SPE symposium on reservoir simulation*. 1989. Society of Petroleum Engineers.
30. Sonier, F., P. Souillard, and F. Blaskovich, Numerical simulation of naturally fractured reservoirs. *SPE reservoir engineering*, 1988. 3 (04): p. 1,114-1,122
31. Quandalle, P. and J. Sabathier, Typical features of a multipurpose reservoir simulator. *SPE Reservoir Engineering*, 1989. 4 (04): p. 475- 480
32. Ghaedi M, M. Masihi, Zoltán E. Heinemann, Mohammad Hossein Ghazanfari, History Matching of Naturally Fractured Reservoirs Based on the Recovery Curve Method, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 126, 211-221, 2015

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

In fractured reservoirs under the gravity drainage, the oil transfer between adjacent matrix blocks is one of the main factors in determining the degree of oil recovery. Communication between matrix blocks can occur by forming a liquid bridge between two adjacent matrices. Therefore, in this study, by modeling and simulating in Comsol, we investigated the characteristics of the liquid bridge formed inside the fracture and the dependency of the liquid bridge shape and the pressure difference on the fracture properties such as the fracture aperture, matrix permeability and wettability. The initial and boundary conditions in the problem are set such that it can show physically the flow exchange between the matrix and fracture in reservoir conditions. The results of this simulation showed that the liquid bridge throat decreases with the size of the fracture aperture. This change in the liquid bridge causes the two phase pressure difference to decrease with the increase of the fracture aperture, and after a critical value (for example, 1.7 mm), it becomes negative.

Also, the results showed that as the contact angle increases toward neutral wettability, the more vertically liquid bridge formed and it leads to small changes (40 psi) for two phase pressure difference inside the fracture. In addition, with the increase of rock permeability and more flow entering the fracture, the throat radius of the formed liquid bridge increased from about 0.03 mm to about 0.05 mm, which is consistent with the published laboratory data. The findings of this research can be used for better understanding how the liquid bridge changes and its effect on the of the two phase pressure difference, which is a controlling parameter for two phase interface inside fracture.

Keywords: Modeling and Simulation, Fractured reservoir, Gravity drainage, Liquid bridge, Fracture capillary pressure, Comsol