مدل‌سازی ترکیبی پدیده نفوذ ملکولی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گازی و گاز میعانی شکاف‌دار کم تراوا - مدل تک بلوکی

ابوالقاسم کاظمی‌نیاکرانی*[۱]، شهاب گرامی[۲]، سیروس قطبی[۱] و عبدالنبی هاشمی[۳]
۱- دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت
۲-شرکت ملی نفت ایران، مرکز پژوهش و توسعه (R & D)
۳- دانشگاه صنعت نفت تهران
Aboulghasem.kazemi@gmail.com

پژوهش نفت
سال بیست و یکم
شماره ۶۵
صفحه ۱۷-۳، ۱۳۹۰

چکیده

در نظر گرفتن نفوذ ملکولی همزمان با گرادیان فشاری در محیط متخلخل معمولاً به صورت جریان چند مکانیزمی خوانده می‌شود. نفوذ ملکولی پدیده‌ای است که خواه ناخواه به همراه گرادیان فشاری در مخزن اتفاق می‌افتد و در بیشتر مواقع اثر آن در شبیه‌سازی مخازن منظور نمی‌شود که دلیل آن به غالب بودن مکانیزم گرادیان فشاری برمی‌گردد. اما در بعضی از مخازن صرف نظر کردن از نفوذ مولکولی در شبیه‌سازی، منجر به پیش‌بینی رفتاری غیر از رفتار واقعی مخزن خواهد شد. یکی از حالت‌هایی که نفوذ ملکولی تأثیر بسیار اساسی در رفتار مخزن از خود نشان می‌دهد، مخازن گاز میعانی شکاف‌دار می‌باشد. مقاله حاضر اولین کاری است که به بررسی نفوذ ملکولی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکاف دار می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: نفوذ ملکولی، جریان چند مکانیزمی، مخازن گاز میعانی شکاف‌دار، تراوایی

مقدمه

شبیه‌سازی مخزن یکی از ابزارهای مفید و عملیاتی می‌باشد که اختراع و پیشرفت دنیای کامپیوتری به مهندسان مخزن عرضه نموده است. بسته به پیچیدگی رفتار سیال مخزن، مدل‌سازی مخزن به دو دسته اصلی مدل‌سازی نفت سیاه[۱] و مدل‌سازی ترکیبی[۲] تقسیم می‌شود. شبیه‌سازی مخازن هیدروکربنی به منظور پیش‌بینی رفتار مخازن، یکی از مسائل کلیدی در صنعت نفت می‌باشد؛ به‌طوری‌که قراردادهای نفتی بر اساس نوع تخمینی که مهندسان مخزن با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی به‌دست می‌آورند، منعقد می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت که هر چه رفتار پیش‌بینی شده توسط شبیه‌ساز به رفتار واقعی مخزن نزدیک‌تر باشد، قراردادهایی که بر اساس آن بسته می‌شوند موفق‌تر می‌باشند. از بدو ورود شبیه‌سازها به صنعت نفت، تمامی تلاش‌ها متوجه این بوده که یک شبیه‌ساز علاوه بر این‌که تخمین خوبی از رفتار مخزن ارائه دهد از سرعت بالایی

1. Black Oil Simulator
2. Compositional Simulation

Archive of SID
www.SID.ir

نیز برخوردار باشد. در این مقاله این دو نکته مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در سال‌های اخیر نواسانات قیمت نفت، نیاز به شبیه‌سازهای دقیق و با سرعت بالا را دو چندان نموده است. در راستای طراحی، گسترش و ساخت این‌گونه شبیه‌سازها، قدم‌های بسیاری برداشته شده است. یکی از جنبه‌هایی که بر روی این دو عامل تأثیر می‌گذارد، منظور نمودن و یا صرف نظر کردن از نفوذ ملکولی[1] در شبیه‌سازی مخازن می‌باشد. در نظر گرفتن پدیده نفوذ ملکولی در شبیه‌سازی می‌تواند دقت آن را به میزان قابل توجهی بالا ببرد؛ از طرفی در نظر گرفتن این ترم در شبیه‌سازی، سرعت شبیه‌سازی را به میزان بسیار زیادی پایین می‌آورد. بنابراین در این تحقیق به دنبال این هستیم که مرز تأثیرگذاری این پدیده را در تزریق گاز طبیعی به یک مخزن گاز میعانی[2] شکاف‌دار به‌دست آوریم تا در شبیه‌سازی‌های بعدی در بالای این حد، از نفوذ ملکولی به‌منظور افزایش سرعت صرف نظر شود و در پایین این مقدار، نفوذ ملکولی منظور گردد تا دقت شبیه‌سازی همچنان بالا باقی بماند.

بررسی نفوذ ملکولی اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط ارتکین[3] و همکاران به جامعه علمی ارائه شد [۱]. او یک طیف به منظور چگونگی اهمیت هر کدام از دو عامل تولید سیال (دارسی و فیکی) را برای مخازن معمولی پیشنهاد داد. اما از آنجایی که کار او در مخازن معمولی با تراوایی[4] بسیار پایین (در حد ۰/۰۱ میلی‌دارسی) کاربرد داشت و این مخازن نیز به ندرت یافت می‌شوند؛ کار او در آن سال‌ها چندان مورد استقبال مهندسان نفت واقع نشد، تا اینکه در سال ۲۰۰۵ آیالا[5] در تز دکترای خود به راهنمایی ارتکین در دانشگاه پنسیلوانیا بر روی موضوع مکانیزم‌های چندتایی مخازن گاز میعانی شکاف‌دار کار نموده و نتایج بسیار عالی را ارائه داد [۲].

نفوذ ملکولی در مخازن شکاف‌دار بر خلاف مخازن معمولی، می‌تواند به صورت مؤثر بر بازده تزریق گاز در مخازن نفتی و یا بازگردانی گاز در مخازن گاز میعانی مؤثر باشد [۳]. در اهمیت این موضوع همین بس که در فرآیند تزریق گاز طبیعی در یک مخزن شکاف‌دار با تراوایی ماتریس بلوک‌های خیلی کم، شبیه‌سازی که در آن نفوذ ملکولی در نظر گرفته نشده است، تزریق در فشار بالاتر را پیشنهاد می‌کند در حالی‌که بر اساس مدل ورن[6] و روت[7] [۴] آنچه در عمل مشاهده می‌شود این است که تزریق در فشار بالا، علاوه بر بالا بردن هزینه تزریق؛ میان‌شکنی زود هنگام گاز تزریقی را هم به‌دنبال خواهد داشت. بر عکس، مدل‌سازی که در محاسبات خود نفوذ ملکولی را در نظر می‌گیرد، تزریق با فشار بالا را پیشنهاد نمی‌کند چرا که در مخازن شکاف‌دار با تراوائی ماتریس بلوک‌های خیلی کم عملاً گرادیان فشاری سهم زیادی در تولید هیدروکربن نخواهد داشت و عمده هیدروکربن تولید شده به‌دلیل پدیده نفوذ ملکولی می‌باشد.

پدیده نفوذ ملکولی هم در حالت تک فازی و هم در حالت دو فازی در مخزن اتفاق می‌افتد که در حالت دو فازی مخازن شکاف‌دار بحرانی‌تر است. با تولید از یک مخزن گاز میعانی شکاف‌دار و افت فشار آن به زیر فشار شبنم[8] ترکیب سیال، تشکیل میعان در شرایط فشاری و دمایی مخزن شروع خواهد شد. در مخازن شکاف‌دار گاز میعانی، لبه‌های اطراف بلوک‌های ماتریس و خود شکاف‌ها اولین نقاط تشکیل میعان می‌باشند، چرا که این نقاط در معرض اولیه افت فشار هستند. ممکن است که میعان تشکیل شده در شکاف‌ها از تحرک‌پذیری بالایی برخوردار باشد، اما میعان تشکیل شده در لبه‌های ماتریس بلوک این گونه نیست. تشکیل میعان در لبه‌های اطراف ماتریس بلوک، همانند سدی در مقابل هیدروکربن داخل بلوک‌ها عمل می‌کند و تشکیل آن، تولید هیدروکربن داخلی بلوک‌ها را با مشکل روبرو می‌نماید. این شرایط در مخازن شکاف‌دار با ماتریس بلوک‌های فشرده بسیار اساسی خواهد بود. در چنین مخازنی اختلاف غلظت سیال در شکاف و ماتریس بلوک منجر به تولید فیکی می‌شود که به همراه تولید دارسی بر روی مخزن تأثیر می‌گذارد. تشکیل این سد و غالب بودن تولید فیکی در مخازن شکاف‌دار با بلوک‌های تراوایی پایین، شدیدتر و بحرانی‌تر خواهد بود [۲].

در این تحقیق، پدیده نفوذ ملکولی به صورت توده‌ای

1. Molecular Diffusion
2. Gas Condensate
3. Ertekin
4. Permeability
5. Ayala
6. Warren
7. Root
8. Dew Point

Archive of SID
www.SID.ir

فرض می‌شود. به این صورت که گرادیان چگالی گاز در یک بلوک و بلوک مجاور آن باعث حرکت از نوع فیکی می‌شود و همان‌گونه که آیالا در تز دکترای خود پیشنهاد می‌دهد، نفوذ در حالت گازی ۱۰۰ برابر نفوذ در حالت مایع می‌باشد [۲]. بنابراین در حالت دو فازی، این پدیده تنها در فاز گاز در نظر گرفته می‌شود. ضرایب نفوذ و تراوایی نیز از جمله پارامترهایی است که تأثیر هر کدام از آنها در بازیافت هیدروکربن از مخازن، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مخازن گاز میعانی

کشف مخازن گاز میعانی همزمان با پیشرفت در تکنولوژی حفر مخازن عمیق‌تر و گرم‌تر افزایش پیدا نمود. کرفت[1] و همکاران به وضوح نشان دادند که چگونه کشف مخازن گازی و گاز میعانی با شروع تکنولوژی حفر چاه‌های عمیق‌تر در سال ۱۹۵۰ رشد نموده است [۵]. از آن به بعد، اهمیت مخازن گاز میعانی با گذر زمان افزایش پیدا نمود.

در مخازن گاز میعانی، شرایط اولیه مخزن بین نقطه بحرانی[2] و نقطه میعانی بحرانی[3] سیال مخزن می‌باشد که منجر به نشان دادن رفتاری تحت عنوان رفتار معکوس[4] در این گازها می‌شود. بر اساس مطالعات موسز[5] و دانهو[6] در سال ۱۹۹۲، بسیاری از مخازن گاز میعانی در محدوده فشاری و دمایی به ترتیب ۳۰۰۰ psia تا ۸۰۰۰ psia و ۲۰۰ °F تا ۴۰۰ °F می‌باشند [۶].

برای پیش‌بینی عملکرد تولید از مخازن گاز میعانی، معمولاً مدل‌سازی به روش شبیه‌سازهای مدل ترکیبی انجام می‌گیرد که دلیل آن وابستگی تولید به ترکیب سیال در این نوع از مخازن می‌باشد. این مسأله باعث می‌شود که هزینه‌های گزافی به منظور شبیه‌سازی و مدل‌سازی دقیق این مخازن و پیش‌بینی رفتار فازی و مشخصات جریانی سیال در این مخازن پرداخته شود [۲].

مخازن شکاف‌دار طبیعی

قسمت اعظمی از نفت و گاز تولید شده در جهان، از مخازن گاز میعانی شکاف‌دار به‌دست می‌آید. بر اساس مطالعات پاپی[7] در سال ۲۰۰۳، بیش از ۵۰ درصد از هیدروکربن‌های تولید شده در جهان از مخازن شکاف‌دار می‌باشد [۷]. مخازن شکاف‌دار در حالت ایده‌آل به صورت تعدادی ماتریس بلوک در یک شبکه از شکاف‌ها تصور می‌شوند. این مدل معمولاً به نام مدل "حبه قندی"[8] شناخته می‌شود که برای اولین بار توسط ورن و روت در سال ۱۹۶۳ ارائه شد [٤].

در این مدل به جهت ساده‌سازی بیشتر، فرض می‌شود که بلوک‌های مستطیلی قسمت زیادی از هیدروکربن ذخیره شده در مخزن را شامل گردیده و شکاف‌های متقاطع افقی و عمودی، شبکه اصلی عبور جریان محسوب می‌شوند [٤]. برای مخازن شکاف‌دار طبیعی، مدل‌های دیگری نیز پیشنهاد شده است که چون در این مقاله نیازی به این مدل‌ها نبوده و تنها یک تک بلوک به عنوان نماینده یک مخزن شکاف‌دار به‌کار گرفته شده، این مدل‌ها در مقاله ارائه نشده‌اند.

مطالعه تک بلوکی مخازن شکاف‌دار

مخازن شکاف‌دار طبیعی، ساختارهای بسیار پیچیده‌ای دارند که جزئیات آنها هنوز به‌صورت یک مجهول باقی‌مانده است. در این مخازن، ماتریس بلوک‌ها بیش از ۹۰٪ کل هیدروکربن در جای را در خود ذخیره نموده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که بیشتر هیدروکربن موجود در مخازن شکاف‌دار، در ماتریس بلوک‌ها واقع است و شکاف‌ها تنها وظیفه هدایت سیال به چاه تولیدی را بر عهده دارند. از این جهت، مهم‌ترین نگرانی در تولید از این مخازن، بازیافت و خارج ساختن هیدروکربن ذخیره شده در ماتریس بلوک می‌باشد نه شکاف‌ها.

از طرف دیگر در مخازن شکاف‌دار طبیعی، سیستم شکاف‌ها مسیرهایی مؤثر را برای عبور سیال هیدروکربنی از مخزن به درون چاه تولیدی مهیا می‌کنند. شبکه شکاف‌ها با سطح گسترده‌ای از ماتریس‌ها در ارتباط می‌باشند و تغییرات فشار شکاف‌ها بر رفتار سیال درون ماتریس، تأثیر می‌گذارد.

به عبارت دیگر، فشار شکاف‌ها با چگونگی تولید سیال درون ماتریس‌ها در ارتباط می‌باشد. در چنین شرایطی

1. Craft
2. Critical
3. Cricondentherm
4. Retrograde
5. Moses
6. Donohoe
7. Papay
8. Sugar Cube

Archive of SID

www.SID.ir

می‌تـوان بیان کـرد که شـکاف‌ها به‌عنوان شـرایط مرزی برای بلوک‌های ماتریـس عمل می‌کنند. نوع محیط اطراف سـنگ یک ماتریس بلوک، چگونگـی عملکرد و بازیافت هیدروکربـن را از بلوک خاص تعیین می‌کند. با فرض کل سیسـتم مخزن شکاف‌دار به‌عنوان چند تک بلوک، می‌توان نتیجه گرفت که بازیافت نهایی از کل مخزن به وسیله رفتار هر تک بلوک کنترل می‌شود. بنابراین، فهم پدیده‌های اتفاق افتاده در هـر تک بلوک می‌تواند اطلاعاتـی کلیدی را در رابطه با کل مخزن شکاف‌دار ارائه دهد.

در مدل‌سـازی مخازن شـکاف‌دار، محققـان مختلفی بـا اسـتفاده از مدل تک بلوکی به اطلاعات بسـیار مفیدی در زمینه رفتار کلی این مخازن دسـت پیدا نموده‌اند که به برخی از آنها در ادامه اشاره می‌شود.

یاماموتو[1] و همکاران در سال ۱۹۷۱ به مدل‌سازی ترکیبی یک تک بلوک دو بعدی و دو فازی برای مطالعه رفتار جریانی سـیال در یک سیستم شکاف‌دار پرداختند. آنها همچنین از مـدل خود به منظور آنالیز عملکرد بلوک‌هایی با اندازه‌های مختلف در شـرایط افت فشار و حفظ فشار پرداختند [۸].

کلـپ[2] و مـورس[3] یک مدل دو بعـدی که به صورت عددی رفتار جریانی یک سیستم نفت در مخزن شکاف‌دار تحت تزریق آب را شبیه‌سازی می‌نمود، ارائه دادند. در این محاسبات، از مدل تک بلوکی ماتریس استفاده شده که این ماتریس به وسـیله شکاف‌های افقی و عمودی احاطه شده اسـت. در این تحقیق، فاز نفت و آبی که مابین ماتریس با شکاف‌ها جابجا می‌شود، محاسبه گردیده است [۹].

پیسـمن[4] در سـال ۱۹۷۶ بیـان نمود کـه رفتار مخازن شـکاف‌دار را می‌توان بـا مطالعه رفتـار و عملکرد بلوک ماتریس در شرایط مختلف مرزی یا شرایط محیطی شکاف، مورد بررسـی قـرار داد. در این کار، او بـه مطالعه جریان همرفت[5] و انگشتی شدن[6] به‌دلیل پدیده معکوس چگالی[7] با استفاده از آنالیز آشفتگی برای یک شکاف مرتبط با ماتریس بلوک تحت افت فشـار پرداخت. نتایج این آزمایش نشان داد که چگالی معکـوس در محدوده ضرایب معمول نفوذ ناپایدار، اتفاق می‌افتد [۱۰].

ون گولف[8] در سال ۱۹۸۲ نشان داد که فرض اساسی در مطالعه تک بلوکی مخازن شکاف‌دار، این است که باید تک بلوک در نظر گرفته شـده، به طور کامل به وسیله شکاف‌ها احاطه شده باشد و ارتباط آن با سایر بلوک‌ها، به طور کامل قطع شـده و یا قابل اغماض باشـد. با فرض این شرایط، می‌توان به جای شبیه‌سـازی کامل یک مخزن شـکاف‌دار، تنها به شبیه‌سازی تک بلوک آن بسنده نمود [۱۱].

مراحل کار

در این تحقیق به منظور بررسـی دقیـق تمامی ابعاد پدیده نفوذ ملکولی، از یک مسأله خیلی ساده شروع کرده و رفته رفته مسأله را پیچیده می‌نماییم. به این صورت که در ابتدا، ماتریـس بلوکی را در نظر می‌گیریم که تنها از متان اشـباع شـده اسـت. بدیهی اسـت که در این حالت، تزریق متان در سـمت چپ این مخزن معنا و مفهوم عملیاتی نخواهد داشت. این مرحله تنها از نقطه نظر دانشگاهی، می‌تواند ما را در رسیدن به حالت واقعی‌تر کمک نماید. در مرحله بعد، ماتریـس بلوک را به صورت دو جزیی متـان و اتان که با درصد جزئی یکسـان اشباع شده، در نظر می‌گیریم. در این حالت با این فرض کـه هدف از تولید این مخزن بازیافت اتان اسـت، تزریق متان در سـمت چپ مخزن قابل توجیه می‌باشـد. اما از آنجا که ترکیب‌های پیشـین در نظر گرفته شـده برای ماتریس بلوک (متان در حالت اول؛ متان و اتان در حالت دوم) در شـرایط دمایی و فشاری ماتریس بلوک به هیچ وجه تشـکیل دو فاز نمی‌دهد، در آخرین مرحله به منظور بررسـی تأثیر نفوذ در حالت دو فازی، ترکیب آن را بـه ۸۰٪ متان و ۲۰٪ نرمال پنتان تغییر می‌دهیم که در دمای در نظر گرفته شـده برای مخزن (۱۷۵°F) رفتار معکوس از خود نشان می‌دهد.

معادله ترکیبی برای شبیه‌سازی در یک سیستم جریانی چند مکانیزمی

در ایـن کار از فرمولاسـیونی که آیـالا در تز دکترای خود اثبات و اسـتفاده نموده، در شبیه‌سازی استفاده شده است.

1. Yamamoto
2. Kleppe
3. Morse
4.Peaceman
5. Convection
6. Fingering
7. Density Inversion
8. Van-Golf

Archive of SID
www.SID.ir

در زیــر تنها فرمولاســیون کلی آن آورده شــده و از ارائه چگونگی گسسته‌سازی معادلات صرف نظر می‌شود [۲]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(x_m\bar{\rho}_o A_x\frac{k_x k_{ro}}{\mu_o}\frac{\partial \Phi_o}{\partial x}+y_m\bar{\rho}_g A_x\frac{k_x k_{rg}}{\mu_g}\frac{\partial \Phi_g}{\partial x}+ y_m\phi S_g A_x\frac{D_{eff}}{6.328}\frac{\partial \bar{\rho}_g}{\partial x}\right)\Delta x = \frac{V_b}{6.328}\frac{\partial}{\partial t}\left[\phi\left(S_o x_m\bar{\rho}_o+S_g y_m\bar{\rho}_g\right)\right] \quad (۱)$$

علائم به کار رفته در رابطه بالا عبارتند از:

x_m: کسر مولی جزء m در فاز میعان

$\bar{\rho}_p$: چگالی مولی فاز P $(lbmol/ft^3)$

A_x: سطح عمود بر جریان در جهت x، (ft^2)

kx: تراوایی مطلق ماتریس بلوک در جهت x، (دارسی)

k_{rp}: تراوایی نسبی فاز (p)، (بدون بعد)

μ_p: گرانروی فاز p، (cP)

Φ_p: پتانسیل هابرگ فاز p، $(psia)$

y_m: کسر مولی جزء m در فاز گاز

Φ: تخلخل

S_g: درجه اشباع گاز در شرایط مخزن،(بدون بُعد)

D_{eff}: ضریب نفوذ ملکولی مؤثر فاز گاز، (ft^2/day)

V_b: حجم ماتریس بلوک در نظر گرفته شده، (ft^3)

برای رسیدن به معادله بالا، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱- هیدروکربن‌ها در هر زمان و در هر نقطه از مخزن به طور آنی به حالت تعادل می‌رسند؛ به عبارت دیگر تعادل ترمودینامیکی خیلی ســریع‌تر از سرعت حرکت سیال اتفاق خواهد افتاد.

۲- تعادل ترمودینامیکی می‌تواند به کمک محاسبات فلش[1] در فشار و دمای مخزن و با استفاده از ترکیب کلی مخزن تعیین شود.

۳- دمــای مخزن ثابت می‌باشــد و از گرادیان دمایی زمین صرف نظر می‌شود.

۴- برای جریان سیال در مخزن از قانون دارسی (برای جریان تحریک فشــاری) و قانــون فیک (برای جریــان تحریک غلظتی) استفاده می‌شود.

۵- نفــوذ ملکولی در فاز مایع، کمــک ناچیزی به حرکت سیال می‌کند. در حالی‌که این پدیده در حرکت سیال در فاز گاز حائز اهمیت است. در حالت کلی، نفوذ ملکولی در فاز گاز ۱۰۰ برابر بیشتر از فاز مایع می‌باشد [۲].

۶- نفوذ ملکولی بین یک بلوک و بلوک مجاور آن به‌صورت توده‌ای در نظر گرفته می‌شــود تا به صورت جزئی. به این صورت که اختلاف چگالی منجر به تولید فیکی می‌شود و اختلاف غلظت یــک ملکول در یک بلوک و بلوک مجاور آن، در تولید فیکی تأثیری ندارد.

به جهت اینکه در حل سیستم معادلات بالا به حالت تکین[2] برخورد نکنیم، لازم اســت که در همیــن جا برابری تعداد معادلات و مجهولات این سیســتم مورد بررسی قرار گیرد.

از آنجــا کــه ترکیب مورد نظر در ایــن تحقیق حداکثر دو جزئی می‌باشــد، در هر گرید[3] بلوک دو معادله نوشــته می‌شــود. بنابراین برای این که به حالت تکین بر نخوریم، در هر گرید بلوک حداکثر دو متغیر مستقل می‌توان تعریف نمــود. چون حداکثر دو جــزء در ترکیب مورد نظر در این تحقیق موجود می‌باشــد، تنها کســر مولی یک جزء در هر بلوک می‌تواند به عنوان مجهول تعریف شــود و کسر مولی جزء دیگر با اســتفاده از پایستگی مولی بین اجزاء محاسبه می‌شــود. بنابراین مجهول دیگر در هر بلوک، فشــار سیال می‌باشــد. با داشتن فشار و کســر مولی کلی ترکیب در هر گرید بلوک، می‌توان محاسبات فلش را انجام داد و به‌دنبال آن درجه اشباع و دیگر پارامترهای مورد نیاز را محاسبه نمود.

در حالتــی که ترکیب موجــود در مخزن به صورت n_c جزء باشــد و مخزن به صورت n_{blocks} گسسته‌ســازی شده باشــد، برای شبیه‌ســازی آن باید $n_c \times n_{blocks}$ معادله ســاخته شــده و به‌صورت همزمان حل شــوند. معادلــه ترکیبی در سیســتم‌های چند مکانیزمی، هم در حالت تک فازی و هم در حالت دو فازی کاربرد دارد و بدیهی است که در حالت تــک فازی، ترم‌های مربوط به میعــان از معادله بالا حذف می‌شود. همچنین در حالت تک جزئی، ترم‌های کسر مولی برابر با یک در نظر گرفته می‌شود.

تکنیک‌های حل عددی

بیشــترین وقت یک شبیه‌ســاز عددی در تشکیل ماتریس جاکوبین صرف می‌شــود. به‌عنوان مثال در یک شبیه‌سازی یــک مخــزن ۱۰۰ گریــد بلوکــی (توجــه شــود کــه در

1.Flash
2. Singular
3. Grade

Archive of SID

www.SID.ir

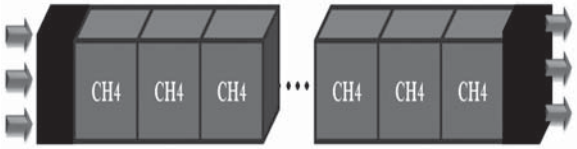
ایـن مقاله، "ماتریس بلوک" همان تک بلوک در نظر گرفته شـده به عنوان نماینده مخزن شکاف‌دار است در حالی که منظور از "گرید بلوک" یکی از گرید بلوک‌های شبیه‌سازی می‌باشـد) ماتریس جاکوبین به صورت ۱۰۰ ×۱۰۰ خواهد شـد که برای تشـکیل آن به صورت عددی لازم است که تابع، حداقل ۱۰۰۰۰×۲ بار فراخوانی تابع شـود. به همین دلیل اسـتفاده از تکنیکی که بتوانـد بدون فراخوانی مجدد تابع، این ماتریس را تشـکیل دهد، سـرعت شبیه‌سـازی را دوچنـدان می‌کند. تکنیک برویدن[1] [۱۲] با اسـتفاده از ماتریس جاکوبین پیشـین و دیگر پارامترهـای مورد نیاز، سرعت شبیه‌سازی را حداقل ۲ برابر می‌کند.

در مسـائل دو جزئی به جهت پایداری بیشـتر، ترتیب معادلات به این صورت فرض شـده اسـت که کسر مولی کلی جزء اول به عنوان متغیرهای فرد و فشـار هر بلوک به عنوان متغیرهای زوج در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب در سطرهای فرد (اول، سوم و ...) ماتریس جاکوبین، مشتق معادلات نسـبت به کسر مولی جزء اول در هرگرید بلوک (اول، دوم و ...) و در سـطرهای (اول، دوم و ...) مشـتق معادلات نسبت به فشار گرید بلوک زوج (دوم، چهارم و ...) گرفته می‌شود. این ترتیب مشتق‌گیری، پایدارترین حالت برای ماتریس جاکوبین در بین حالت‌های امتحان شده در این کار می‌باشـد که با هر حدس اولیه معقولی همگرا می‌شـود در حالی که با تغییر ترتیب مشتق‌گیری حتی با حدس اولیه‌ای نزدیک به جواب اصلی نیز، همگرایی حاصل نمی‌شود [۱۳].

حالـت اول: بررسـی نفـوذ ملکولـی در ماتریس بلوک تک‌جزئی و تک فازی

ماتریس بلوک در نظر گرفته شده در این حالت به صورت شکل ۱ است.

در این شـکل قسـمت‌های مشـخص شـده با رنگ تیره،



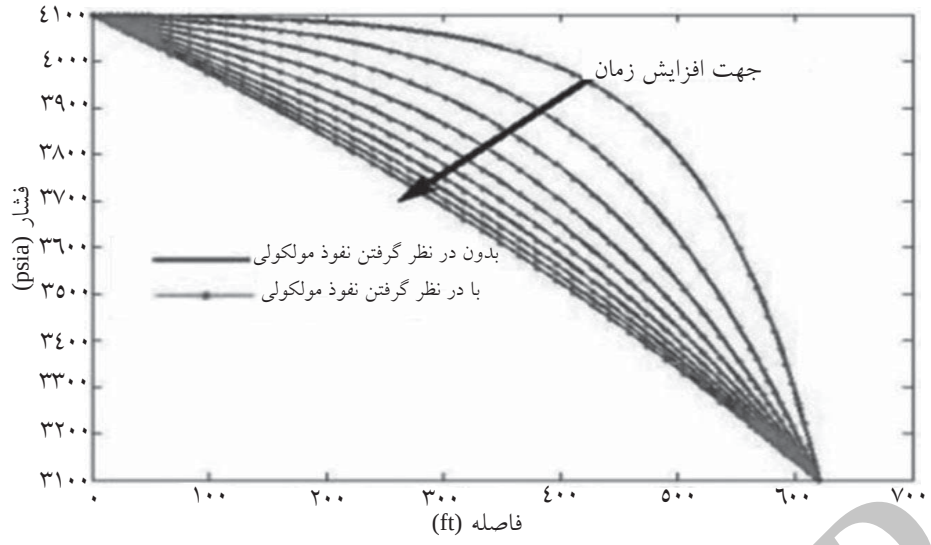
شکل ۱- شماتیک ماتریس بلوک در نظر گرفته شده در حالت تک‌جزئی و تک فازی

شـکاف‌ها را نشان می‌دهد که در سمت چپ با فشار ثابت ٤۱۰۰ psia تزریق متان و در سـمت راسـت با فشار ثابت ۳۱۰۰ psia تولید انجام می‌شود و سایر مرزها، بدون جریان در نظر گرفته شده‌اند. تخلخل در نظر گرفته شده برای این ماتریس بلوک ۱۳٪ و ارتفاع آن ft ۳۰ است. عرض ماتریس بلوک ft ۳۰ و عرض شـکاف‌ها ft ۰/۱ اسـت. مشخصات شکاف برای محاسبه ترم‌های تحرک‌پذیری در مرز بلوک‌ها و شـکاف‌ها مورد نیاز می‌باشـد. طول هر گرید بلوک در ابتدای ماتریس بلوک (قسمت تزریقی) و انتهای آن (قسمت تولیدی) به اندازه ٦ بلوک به طول ft ۵ و در فاصله بین این دو ft ۱۵/٦۲۵ در نظر گرفته شـده است. به عبارت دیگر، طول کلی ماتریس بلوک به عنوان نمایندهٔ مخزن شکاف‌دار ft ٦۲۰ فرض شـده اسـت. تراوایی شـکاف‌ها در این کار ثابت و برابر با md ۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است. در واقع مهم‌ترین تفاوتی که بین تک بلوک در نظر گرفته شـده در این مطالعه با یک سیلاب‌زنی معمولی در مخزن وجود دارد، این است که تراوایی گریدهای در نظر گرفته شده به عنوان شکاف نسـبت به تراوایی گریدهای ماتریس بلوک، بسیار بالا است و می‌توان فرض نمود که گرید بلوک اول و آخر نقش شـکاف را بازی می‌کنند. در حالی که در سیلاب‌زنی معمولی یک مخـزن، تراوایی همه گرید بلوک‌های در نظر گرفته شده در شبیه‌سـازی، هم مرتبه می‌باشد. پارامترهای متغیر در ایـن حالت، تراوایی ماتریس و ضریب کلی نفوذ می‌باشـد که به‌ترتیـب در محـدوده md ۰/۰۰۱ تا md ۱ و ft^2/day ۰ (حالـت بدون نفوذ مولکولـی) تا ft^2/day۲۰ تغییر می‌کنند. مطالعات کتابخانه‌ای نشان می‌دهد که در حالت کلی نیز، محدوده تغییرات ضریب نفوذ کلی بین ft^2/day ۰ تا ft^2/day ۲۰ می‌باشد [۲]. برای ضریب کلی نفوذ؛ کاسلر[2] مقادیر بین ft^2/day ۹/۳ تا ft^2/day ۹۳ را در حالت استاندارد پیشنهاد نموده است [۱٤].

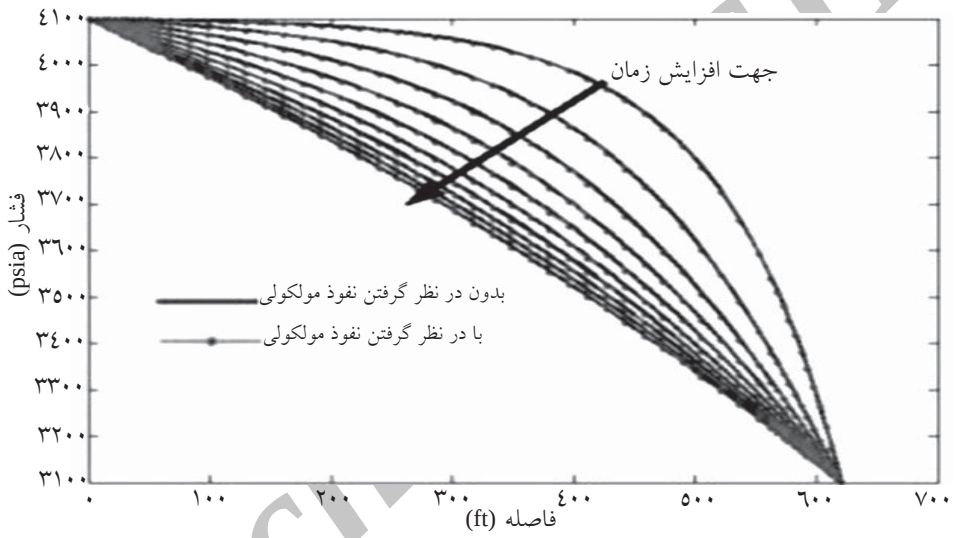
در شـکل‌های ۲ تا ٤ پروفایل فشـاری برای ماتریس بلوک با تراوایی‌های مختلف، رسـم شـده است که در این شـکل‌ها، پیکان جهت‌دار بر روی پروفایل فشـاری جهت حرکت آن را با گذر زمان نشان می‌دهد.

1. Broyden
2. Cussler

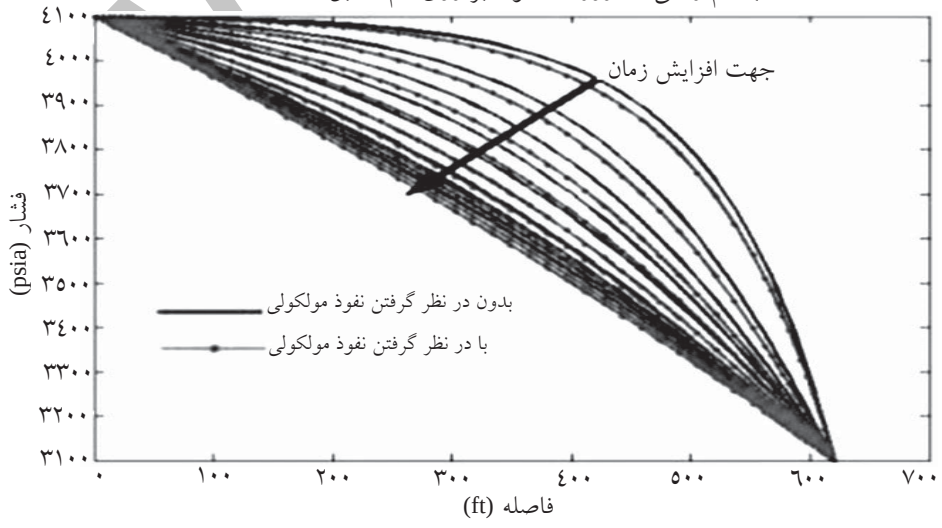
Archive of SID
www.SID.ir



شکل۲- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی md ۱ (زمان شبیه سازی ۱ تا ۱۰ روز با گام زمانی ۱ روز) (خطوط بر روی هم منطبق شده‌اند.)



شکل۳- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی md ۰/۱ (زمان شبیه‌سازی ۱۰ تا ۱۰۰ روز با گام زمانی ۱۰ روز) (خطوط بر روی هم منطبق شده‌اند.)



شکل٤- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی md ۰/۰۱ (زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ روز با گام زمانی ۱۰۰ روز)

www.SID.ir

از این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت حالت‌های مربوط به در نظر گرفتن نفوذ از تراوایی ۰/۰۱ md برای ماتریس بلوک شروع می‌شود (شکل ٤). هر چه تراوایی ماتریس بلوک کمتر گردد، شدت تأثیر آن نیز بیشتر خواهد شد.

شکل ۵ پروفایل فشاری در زمان شبیه‌سازی ۲۰۰ روز در ضرایب نفوذ مختلف ۰ ft^2/day تا ۲۰ ft^2/day را برای یک ماتریس بلوک با تروایی ۰/۰۱ md نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که هر چه ضریب نفوذ ملکولی بیشتر باشد، پالس فشاری با سرعت بیشتری در ماتریس بلوک حرکت خواهد نمود.

حالت دوم: بررسی نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک دوجزئی و تک فازی

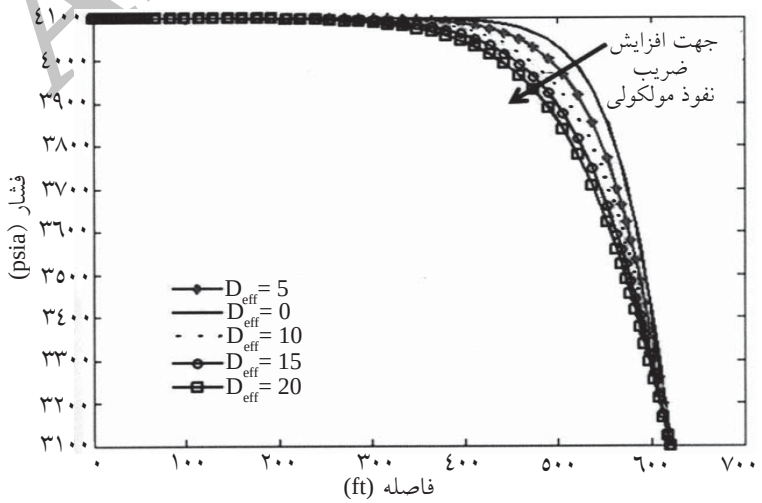
در این حالت تمامی مشخصات در نظر گرفته شده برای ماتریس بلوک، همانند حالت اول می‌باشد. با این تفاوت که به جای این‌که ماتریس بلوک تنها با متان اشباع شده باشد، با ترکیب ۵۰٪ متان و ۵۰٪ اتان اشباع شده است. همان‌گونه که پیشتر بیان شد، در این حالت فرض می‌شود که هدف تولید اتان بوده و متان تولید شده از این ماتریس بلوک در سمت چپ ماتریس بلوک، تزریق می‌شود تا فشار آن را در ٤١٠٠ psia ثابت نگاه دارد.

به‌منظور اطمینان از اینکه شبیه‌ساز، رفتار مخزن را به درستی پیش‌بینی می‌کند، قبل از بررسی تأثیر نفوذ ملکولی بر پروفایل‌های فشاری و یا کسر مولی، به بررسی رفتار پیش‌بینی شده به کمک شبیه‌ساز می‌پردازیم. شکل ٦ پروفایل کسر مولی متان و اتان را با گذر زمان نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار داریم، از آنجا که در سمت چپ این ماتریس بلوک، تزریق متان انجام می‌شود، باید کسر مولی متان در بلوک‌های مجاور تزریق به عدد ۱ نزدیک شود و کسر مولی اتان در این بلوک‌ها به صفر میل کند. این دقیقاً همان رفتاری است که توسط شبیه‌ساز برای این ماتریس بلوک پیش‌بینی می‌شود.

همان‌گونه که در فرضیات توسعه مدل اشاره گردید (فرض شماره ٦)، جریان نفوذ مولکولی به دلیل اختلاف چگالی گاز (فشار) صورت می‌پذیرد. بنابراین به‌منظور درک بهتر این اثر، نتایج حاصل از اعمال و یا حذف پدیده نفوذ مولکولی در شبیه‌سازی رفتار جریانی بر اساس کسر مولی گزارش می‌گردد.

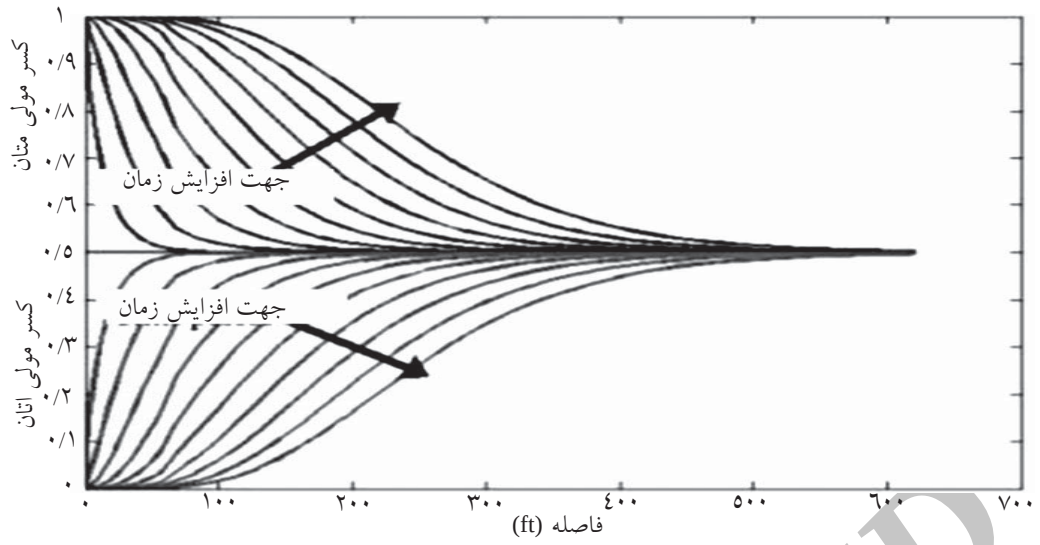
بعد از اطمینان ازدرستی شبیه‌ساز در پیش‌بینی رفتار مخزن، به بررسی تأثیر نفوذ ملکولی بر کسر مولی گرید بلوک‌های ماتریس بلوک می‌پردازیم. شکل‌های ۷ و ۸ تأثیر نفوذ ملکولی بر روی پروفایل کسر مولی متان در تراوایی‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می شود، اختلاف در لحاظ نمودن نفوذ ملکولی، از تروایی‌های ۰/۰۱ md شروع می‌شود و در تراوایی‌های بالاتر اختلافی مشاهده نمی‌شود (شکل ۸).

در این حالت می‌توان مقدار بازیافت اتان از ماتریس بلوک‌ها را نیز به عنوان پارامتر مقایسه به‌کار گرفت و مقدار تولید شده اتان را در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی با هم مقایسه نمود. خواننده می‌تواند برای مطالعه بیشتر به مرجع ۱۳ مراجعه نماید.

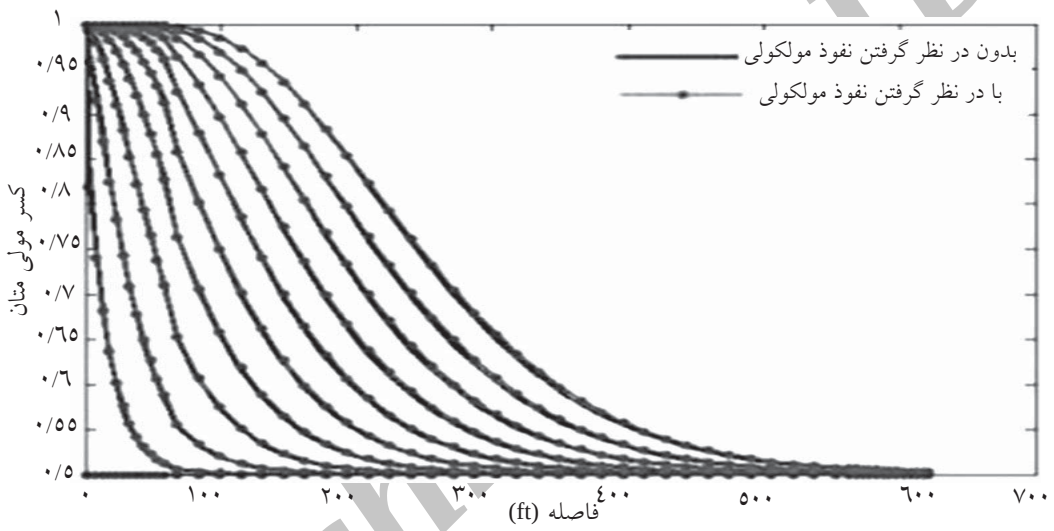


شکل۵- تأثیر ضریب نفوذهای مختلف بر روی پروفایل فشاری در زمان شبیه‌سازی ۲۰۰ روز و تراوائی ماتریس بلوک ۰/۰۱ md

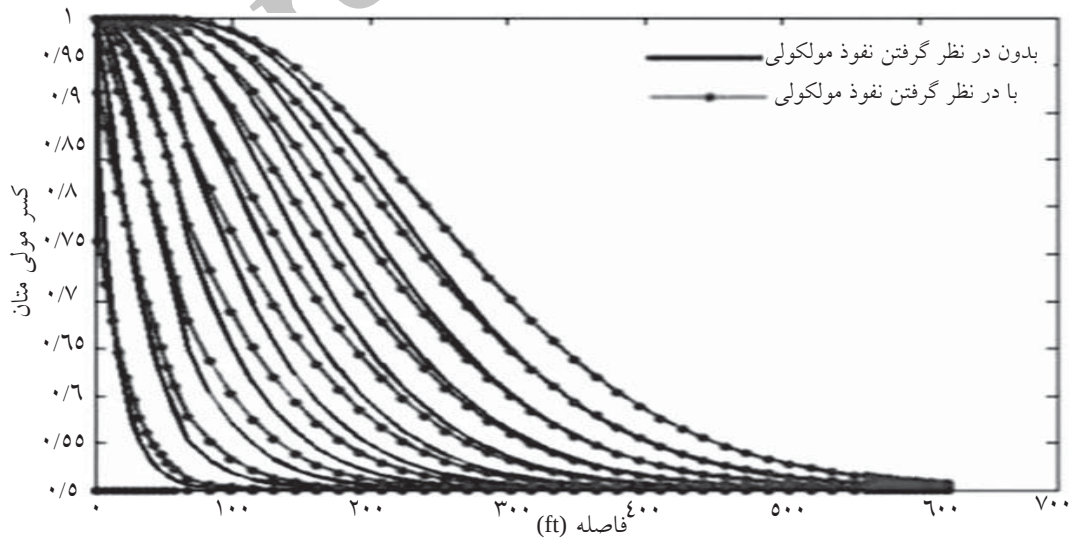
Archive of SID
www.SID.ir



شکل٦- کسر مولی متان و اتان بر حسب فاصله در یک ماتریس بلوک



شکل۷- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۱ (زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ روز تا ۱۰۰۰ روز و گام زمانی ۱۰۰ روز) (خطوط بر روی هم منطبق شده‌اند.)

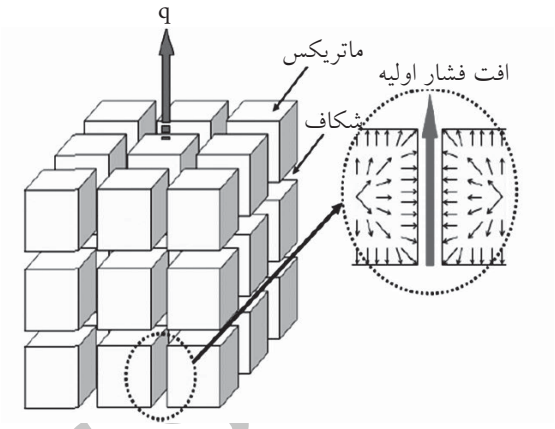


شکل۸- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۱ (زمان شبیه‌سازی ۱۰۰۰ روز تا ۱۰۰۰۰ روز با گام زمانی ۱۰۰۰ روز)

www.SID.ir

حالت سوم: بررسی نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک دو جزئی و دو فازی

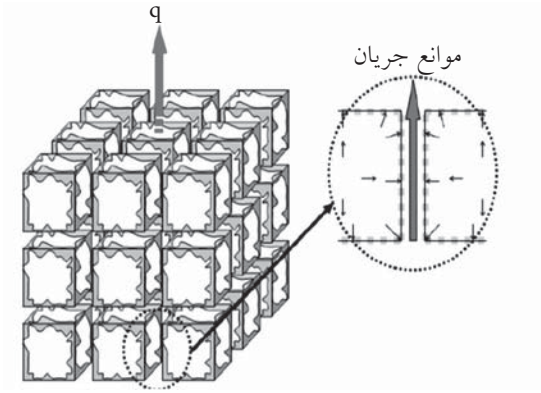
شکل ۹ مکانیزم تخلیه فشار در شکاف و ماتریس یک مخزن گاز میعانی شکاف‌دار را نمایش می‌دهد. در ابتدا سیال تولیدی از چاه از طریق شبکه شکاف تامین می‌شود.



شکل ۹- عملکرد افت فشار اولیه در یک مخزن شکاف‌دار طبیعی گاز میعانی [۱۵]

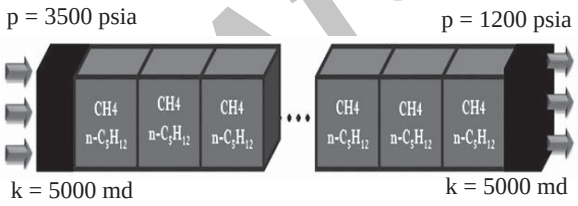
به‌دلیل حجم محدود شکاف‌ها، اختلاف فشار قابل توجهی بین ماتریس و شکاف ایجاد می‌شود که باعث می‌گردد سیال از ماتریس به درون شکاف جریان یابد. در یک مخزن شکاف‌دار به محض افت فشار به زیر فشار شبنم، مایع در مخزن تشکیل می‌شود. از آنجایی که نقاطی مانند شکاف‌ها و لبه‌های بلوک‌های ماتریس، در معرض افت فشار بیشتری می‌باشند، در این نقاط، فشار سریع‌تر به زیر فشار شبنم افت پیدا می‌کند و اولین نقاطی هستند که میعان در آنها روی دهد. این وضعیت به خوبی در شکل ۱۰ به تصویر کشیده شده است. اگر بلوک‌های ماتریس خیلی فشرده (تراوایی پایین) باشند، در قسمت داخلی این بلوک‌ها افت فشار حاصل از تولید روی نمی‌دهند. در این حالت حتی اگر فرض شود که میعان تشکیل شده در شکاف‌ها از تحرک‌پذیری بالایی برخوردار است، میعان تشکیل شده در لبه‌های بلوک‌ها تقریباً غیر قابل حرکت می‌باشد. بنابراین، میعان تشکیل شده در لبه‌های بلوک‌ها، محدودیت قابل ملاحظه‌ای در تولید گاز درونی بلوک‌ها ایجاد می‌نماید و میعان هرگز در درون بلوک‌ها تشکیل نشده و گاز هم بتبع آن تولید نخواهد شد [۱۵].

در شکل ۱۰، میعان زیادی اطراف لبه‌های ماتریس بلوک‌ها را پوشانده و قسمت زیادی از گاز هیدروکربنی در درون بلوک‌ها به دام افتاده است. این وضعیت در مخازنی با تراوایی پایین بحرانی‌تر می‌شود. در چنین حالتی است که پدیده نفوذ ملکولی اهمیت بالایی دارد و مکانیزم اصلی تولید از مخزن به شمار می‌رود [۱۵].



شکل ۱۰- ظاهر شدن میعان در مخازن شکاف‌دار طبیعی گاز میعانی [۱۵]

در مرحله بعد، ترکیب سیال اشباع کننده ماتریس بلوک را به صورت ۸۰٪ متان و ۲۰٪ نرمال پنتان تغییر می‌دهیم که شماتیک این ماتریس بلوک، در شکل ۱۱آورده شده است. نمودار فازی این ترکیب در شکل ۱۲ رسم شده است. دما در این مخزن ۱۷۵ °F فرض می‌شود که با توجه به شکل ۱۲، سیال در چنین دمایی رفتار میعانی از خود نشان می‌دهد.



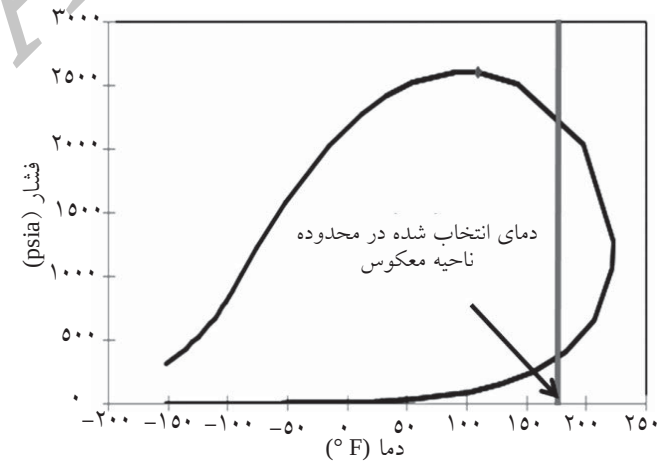
شکل ۱۱- شماتیک یک ماتریس بلوک تک بعدی، دو جزئی و دو فازی که در سمت چپ آن تزریق و از سمت راست آن تولید می‌شود

در ادامه به‌منظور بررسی بهتر پدیده نفوذ، طول ماتریس بلوک را از ۶۰۰ ft به ۱۰۰۰ ft تغییر می‌دهیم. در این حالت ۳۶ گرید بلوک با طول ۲۴ ft در قسمت میانی ماتریس بلوک و ۱۲ گرید بلوک به اندازه ۵ ft در قسمت تزریقی و تولیدی ماتریس بلوک فرض می‌شود. به عبارت دیگر، ماتریس بلوک در نظر گرفته شده به ۶۰ گرید بلوک

Archive of SID
www.SID.ir

تقسیم شده است. از معادله حالت پنگ رابینسون برای رفتار سیال (PVT) و تعادل ترمودینامیکی استفاده می‌شود [۱۶]. همچنین داده‌های تراوایی نسبی و فشار مویینگی مرجع [۲] در شبیه‌سازی به‌کار گرفته شده است. شکل‌های ۱۳ تا ۱۹ به بررسی اثر نفوذ ملکولی بر روی پروفایل پارامترهای مختلف اختصاص دارد. شکل ۱۳ اثر اعمال پدیده نفوذ مولکولی را بر توزیع فشار درون یک ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۱ نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل پیداست، در این تراوایی، پدیده نفوذ مولکولی اثری روی توزیع فشار درون ماتریس بلوک ندارد. شکل ۱٤ نیز موید بی‌تاثیر بودن پدیده نفوذ مولکولی در بلوک‌های با تراوائی md ۰/۱ می‌باشد. نکته حائز اهمیت در شکل ۱۵، این است که در صورت وجود جریان تک فازی در مخزن در این تراوائی نسبتاً بالا، لحاظ نمودن و یا صرف نظر کردن از نفوذ ملکولی هیچ تأثیری روی تولید کلی گاز نخواهد داشت. اما در حالتی که دو فاز در مخزن تشکیل می‌شود، اثر نفوذ مولکولی بر تولید گاز از مخزن نمایان می‌شود (باید توجه نمود که محور عمودی از مرتبه ۱۰۵ می‌باشد). در شکل ۱٦ تولید کلی گاز بعد از ٦۰۰ روز شبیه‌سازی، نشان داده شده است. در این شکل تفاوت بین تولید گاز در حالتی که نفوذ ملکولی در نظر گرفته شده و حالی که از نفوذ مولکولی صرف نظر شده به وضوح مشاهده می‌شود. این شکل حاکی از آن است که ٦۰۰ روز پس از تولید، در صورت صرف نظر کردن از نفوذ ملکولی تولید کلی گاز به جای MMScf ۳۳۱، به اشتباه MMScf ۲۳۳ تخمین زده خواهد شد. بنابراین می‌توان گفت که بر خلاف نتیجه‌ای که آیالا در تز دکترای خود در حالت تولید طبیعی از مخازن گاز میعانی شکاف‌دار به آن رسیده بود، مبنی بر موثر بودن پدیده نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک‌هایی با تراوایی کمتر از md ۰/۰۱ مؤثر است، در حالت تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکاف‌دار، پدیده نفوذ در ماتریس بلوک‌هایی با تراوایی md ۰/۱ تأثیر خود را به‌صورت چشمگیری نشان می‌دهد.

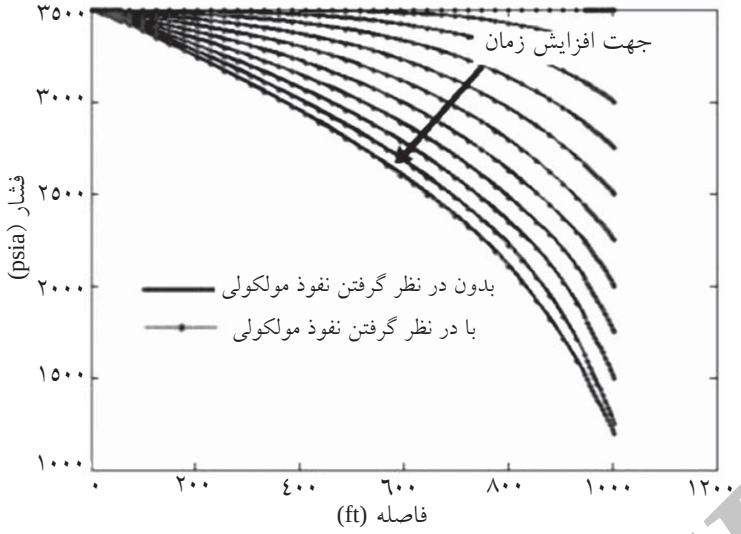
با کم شدن تراوایی ماتریس بلوک‌ها، تفاوت بین در نظر گرفتن و یا صرف‌نظر نمودن از نفوذ ملکولی بیشتر می‌شود. شکل‌های ۱۷ تا ۱۹، به بررسی نفوذ ملکولی در ماتریس بلوکی با تراوایی md ۰/۰۰۰۱ می‌پردازد. در تراوایی‌های پایین (md ۰/۰۰۰۱) همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تفاوت بسیار قابل توجه است، به‌طوری‌که در شکل ۱۷ این تفاوت در اولین پروفایل گام زمانی دیده می‌شود. با توجه به شکل ۱۸ که درجه اشباع میعان را در گرید بلوک ٥٤ نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی، بعد از حدود ۲۰۰ روز در این گرید بلوک، میعان ظاهر می‌شود، در حالی‌که با صرف‌نظر کردن از نفوذ ملکولی حتی تا پایان زمان شبیه‌سازی (حدود ٤ سال)، میعانی در آن گرید بلوک مشاهده نمی‌شود. نکته جالبی که در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود، این است که در این تراوایی پایین ماتریس بلوک، نفوذ ملکولی حتی در حالت تک فازی نیز بسیار قابل توجه می‌باشد و تفاوت بین دو نموداری که نفوذ ملکولی در آنها در نظر گرفته شده و یا صرف‌نظر شده از همان ابتدا و بدون بزرگنمایی قابل مشاهده است.



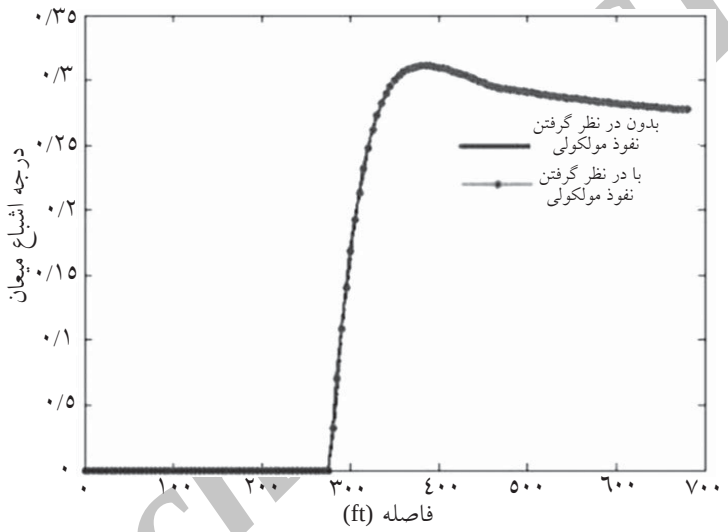
شکل۱۲- نمودار فازی گاز میعانی سیال اشباع شده ماتریس بلوک برحسب دما

Archive of SID

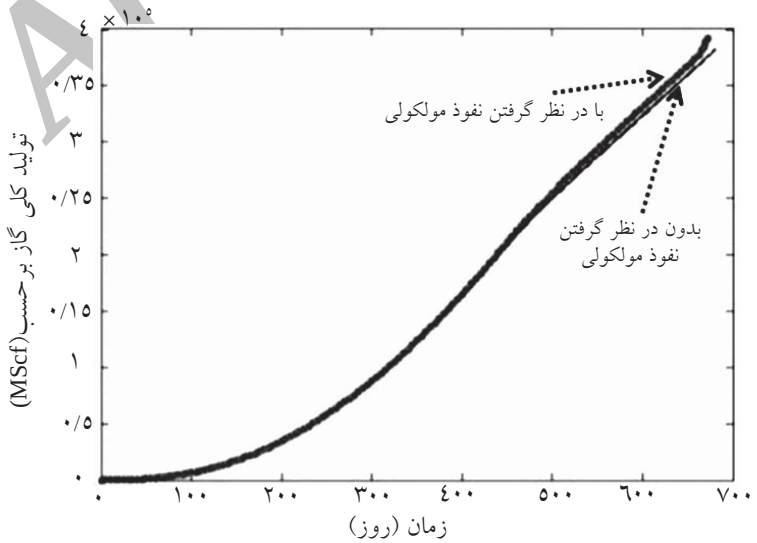
www.SID.ir



شکل۱۳- پروفایل فشاری با و بدون نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md (خطوط بر روی هم منطبق شده‌اند.)

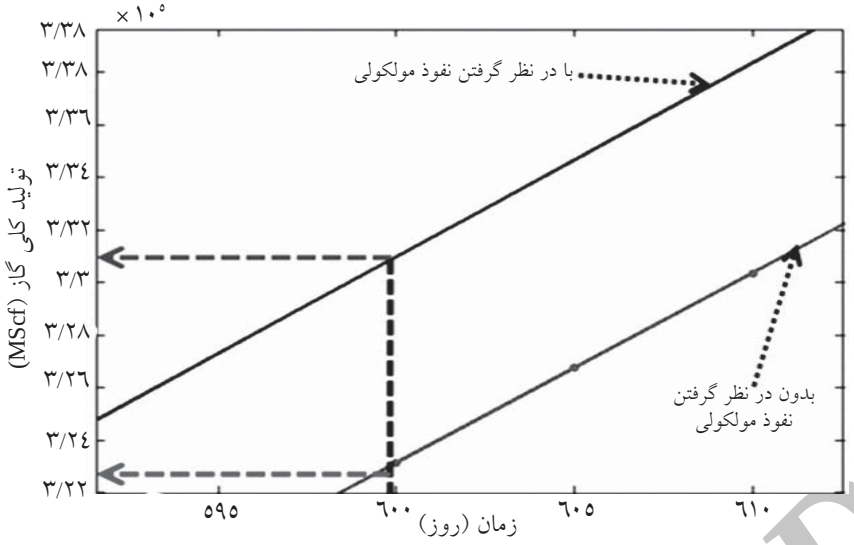


شکل۱٤- درج i اشباع در گرید بلوک ٤٨، با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md

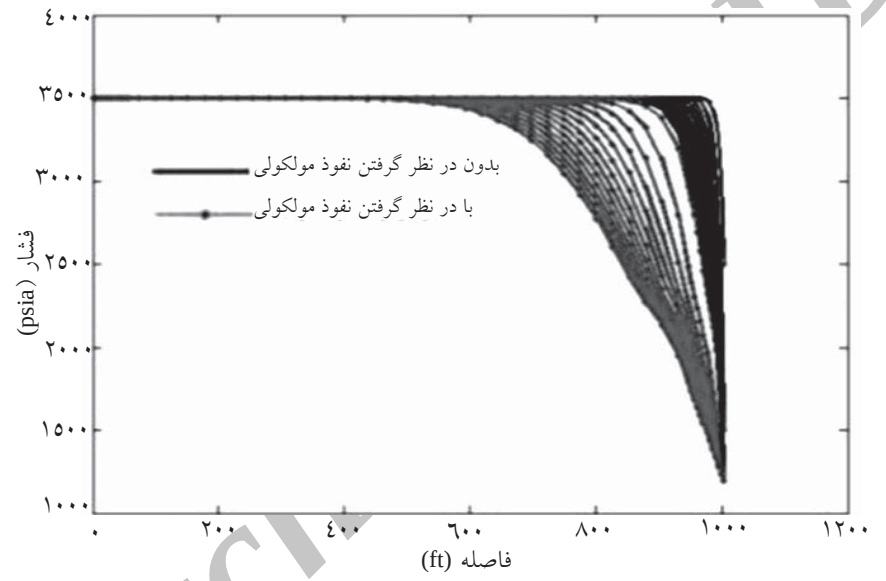


شکل۱۵- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md

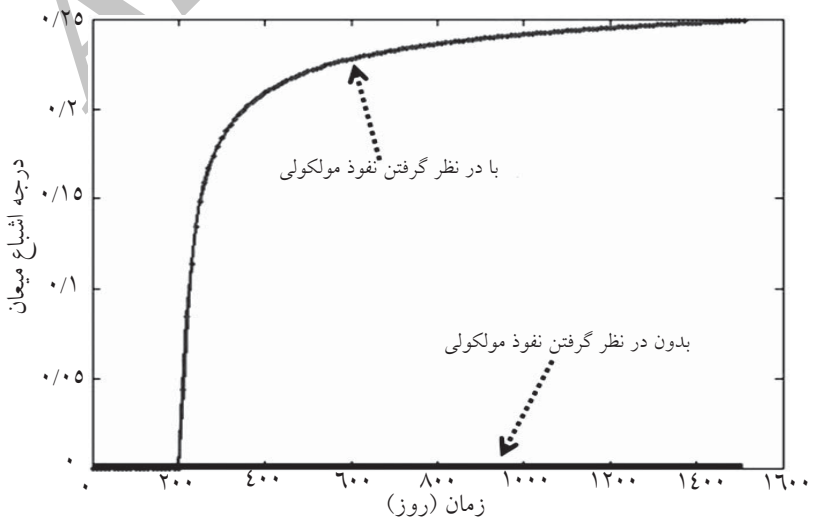
Archive of SID
www.SID.ir



شکل۱٦- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی ۰/۱ md

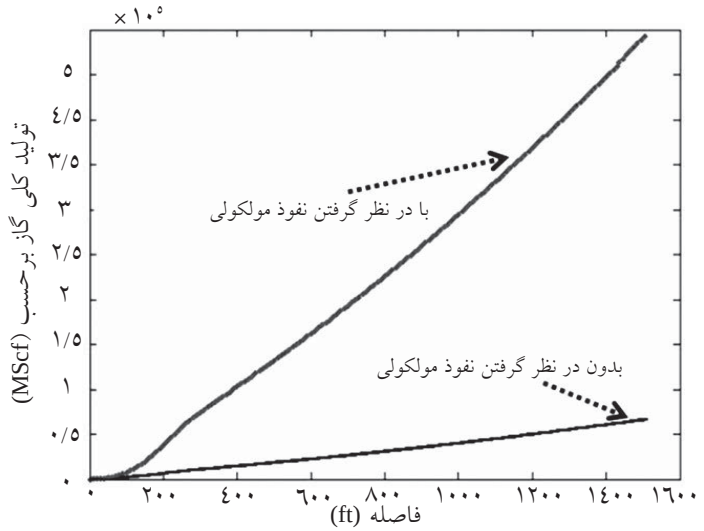


شکل۱۷- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۰۰۰۱ md (خطوط بر روی هم منطبق شده‌اند.)



شکل۱۸- درجهٔ اشباع در گرید بلوک ٥٤، با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۰۰۰۱ md

www.SID.ir



شکل۱۹- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک با تراوایی md ۰/۰۰۰۱

نتیجه‌گیری

مهمترین نتیجه‌ای که از این تحقیق می‌توان گرفت، این است که پدیده نفوذ ملکولی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکاف‌دار در حالتی که تنها یک فاز در مخزن حضور داشته باشد؛ همچون حالت تولید طبیعی از این مخازن که توسط آیالا ارائه شده [۲]؛ در ماتریس بلوک‌های با تراوایی کمتر از md ۰/۰۱ مؤثر است. در حالی‌که اگر مخزن به صورت دو فازی عمل کند نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک‌هایی با تراوایی یک مرتبه بیشتر یعنی md ۰/۱ تأثیر گذار می‌باشد.

در شبیه‌سازهای عددی، زمان زیادی برای محاسبه ماتریس جاکوبین صرف می‌شود. بنابراین هر تکنیکی که بتواند این ماتریس را با تعداد فراخوانی کمتر و یا بدون فراخوانی تابع محاسبه نماید، سرعت شبیه‌سازها را به میزان قابل توجهی بالا خواهد برد. در این کار از روش برویدن استفاده شد که سرعت شبیه‌سازی را نسبت به حالت معمول نیوتن - رافسون دو برابر نمود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که از این روش در حل معادلات غیرخطی مورد نیاز در شبیه‌سازی استفاده شود. نتایج نشان می‌دهد که هر چه ضریب نفوذ ملکولی بیشتر باشد، پالس فشاری با سرعت بیشتری پیشرفت می‌کند.

ترتیب معادلات در ساختن ماتریس جاکوبین در شبیه‌سازی عددی ترکیبی بسیار مهم می‌باشد. به‌طوری‌که یک ترتیب خاص در این شبیه‌سازی منجر به طولانی شدن فرآیند شبیه‌سازی و یا حتی واگرا شدن آن با حدس‌های اولیه مختلف می‌شود. در صورتی که ترتیبی دیگر با حدس اولیه‌های معقول، همگرا شده و سرعت همگرایی بسیار بالایی دارد. این گونه به نظر می‌رسد که این ترتیب بسته به نوع مسأله متفاوت می‌باشد. بنابراین اگر در شبیه‌سازی عددی تغییر حدس اولیه هیچ تأثیری در همگرایی نداشت، تغییر ترتیب معادلات می‌تواند مؤثر واقع شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله کمال تشکر و قدردانی خود را از مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی نفت ایران، به خاطر حمایت مالی قسمتی از این پروژه به عنوان پایان‌نامه کارشناسی ارشد، اعلام می‌دارد.

علائم و نشانه‌ها

D_{eff}: ضریب نفوذ ملکولی، (ft^2/day)

x_m: کسر مولی فاز میعان (-)

k: تراوائی مطلق، (دارسی)

$\bar{\rho}_p$: چگالی مولی فاز p، ($lbmol/ft^3$)

μ_p: گرانروی فاز p، (cP)

k_{rp}: تراوائی نسبی فاز p، (-)

γ_p: وزن مخصوص فاز p، (psi/ft)

G: عمق، فوت (ft)

Φ: تخلخل (-)

Sp: درجه اشباع فاز p، (-)

Archive of SID
www.SID.ir

منابع

[1] Ertekin T., King, G, & Schwerer, F., "*Dynamic ˌas slippage: A Unique dual mechanism approach to the flow of gas in tight formations"*, SPE Paper 2045, pp. 43, 1986

[2] Ayala L.F., *Compositional modeling of naturally-fractured reservoirs in multi-mechanistic flow domains*, PhD dissertation. Penn. State U., University Park, Pennsylvania, 2005.

[3] Hoteit, H. & Firoozabadi, A., *Numerical modeling of diffusion in fractured media for gas injection and recycling schemes*, SPE Paper, No. 103292, 2006.

[4] Warren R.B. & Root P.J, *The Behavior of naturally fractured reservoirs*, SPE Journal, pp. 245-255, Trans. AIME, V. 234, 1963

[5] Craft B.C., Hawkins M., & Terry Re., *Applied petroleum reservoir engineering*, 2nd edition, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, 1990.

[6] Moses P.L. & Donohoe C.W, *Gas condensate reservoirs*, SPE Petroleum Engineering Handbook, Chapter 39, Ed: Bradley, H.B., Gipson, F.W., Odeb, AS., Sizer, P.S., Mortada, M., Raymer, L.L., Smith, G,L., Third Re-print, Richardson, TX, ISBN 1-55563-010-3, 1992.

[7] Papay J., *Development of petroleum reservoirs*, Akadémiai Kiadó Publishers, ISBN 963-05-7917-8, 2003

[8] Yamamoto R.H., Padgett J.B., Ford W.T., & Boubeguira A., *"Compositional reservoir simulator for fissured systems - the single-block model"*, SEE Journal, p. 113 - 128, 1971.

[9] Kepple, J. & Morse, R.A., *Oil production from fractured reservoirs by water displacement*, SPE Paper 5084 presented at the 49th SPE Annual Fall Meeting, Houston, TX, Oct. 6-9, 1974.

[10] Peaceman D.W., *"Convection in fractured reservoirs - the effect of matrix-fissure transfer on the instability of a density inversion in a vertical fracture"*, SPE Journal, p. 269-280, 1976.

[11] Van-Golf-Racht T.D., *Fundamentals of fractured reservoir engineering*, Developments in Petroleum Science vol. 12, Elsevier, New York, NY, 1982.

[12] Holland, C.D., *Fundamentals of multi-component distillation*, McGraw Hill Chemical Engineering Series, [TEACHER>S EDITION], 1996.

[13] Kazemi Nia Korrani A., *Mathematical modeling of molecular diffusion for gas injection of fractured gas condensate reservoir – single block approach*, M. Sc. dissertation, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2009.

[14] Cussler, E.L, *Diffusion: mass transfer in fluid systems*, Second edition, Third reprint, Cambridge University Press, New York, NY, ISBN 0-521-56477-8, 2001.

[15] Ayala L.F., Ertekin T., & Adewuni M., *Analysis of recovery mechanism for naturally fractured gas-condensate reservoirs*, SPE Paper, 90010, 2004.

[16] Danesh A., *PVT and Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids*, 3rdEd, Science Direct Publishing, 1998.

Archive of SID

www.SID.ir