

جریان چند مکانیزمی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکافدار - مدل ترکیبی

ابوالقاسم کاظمی نیاکرانی^{۱*}، شهاب گرامی^۲، سیروس قطبی^۱، عبدالنبی هاشمی^۳

۱- تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

۲- تهران، شرکت ملی نفت ایران، مرکز پژوهش و توسعه (R & D)

۳- تهران، دانشگاه صنعت نفت، دانشکده مهندسی نفت

پیام نگار: aboulghasem.kazemi@gmail.com

چکیده

نفوذ مولکولی در مخازن گاز میعانی شکافدار تأثیر بسیار اساسی در رفتار مخزن از خود نشان می‌دهد. مقاله حاضر اولین کاری است که به بررسی نفوذ مولکولی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکافدار می‌پردازد. در این کار یک تک بلوک در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که در حالت اول تنها با متان، در حالت دوم با متان و اتان و در حالت آخر با متان و نرمال پنتان اشباع شده باشد. سمت چپ آن با تزریق متان در فشار ثابت نگاه داشته می‌شود و از سمت راست آن با فشار ثابت، متان تولید می‌شود. از روش کاملاً ضمنی^۱ و خطی سازی (نیوتن - رافسون)^۲ برای حل معادلات ناخطی استفاده می‌کنیم. به منظور بالا بردن سرعت شبیه سازی، از روش برویدن^۳ برای بروز کردن^۴ ماتریس جاکوبین^۵ استفاده می‌کنیم. در پایان این کار مهمترین نتیجه‌ای که می‌گیریم این است که، در حالت تک فاز، نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک‌های با تراوانی^۶ کمتر از ۰/۰۱ میلی داری، اما در حالت دو فاز، در تراوانی‌های یک مرتبه بیشتر، یعنی ۰/۱ میلی داری، در این مخازن خود را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: نفوذ مولکولی، مخازن گاز میعانی، مخازن گاز میعانی شکافدار، تراوانی

۱- مقدمه

بر اساس آن منعقد می‌شوند موفق تر می‌باشند. از بدو ورود شبیه‌سازها به صنعت نفت، تمامی تلاش‌ها متوجه این بوده است که یک شبیه‌ساز می‌بایست در عین حالی که تخمین خوبی از رفتار مخزن ارائه می‌دهد، از سرعت بالایی نیز برخوردار باشد. در این مقاله بر روی این دو نکته متمرکز شده‌ایم. در سال‌های اخیر نوسانات قیمت نفت، نیاز به شبیه‌سازهای سریع و دقیق را دو چندان کرده و در نتیجه، 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 کردن و یا صرف نظر کردن نفوذ مولکولی در شبیه‌سازی مخازن است. در نظر گرفتن پدیده نفوذ مولکولی در شبیه‌سازی می‌تواند دقت آن را

شبیه‌سازی مخازن هیدروکربنی به منظور پیش‌بینی رفتار مخازن، یکی از مسائل کلیدی در صنعت نفت است؛ به طوری که قراردادهای نفتی بر اساس نوع تخمینی که مهندسان مخزن با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی به دست می‌آورند، منعقد می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت که هر چه رفتار پیش‌بینی شده مهندس مخزن از شبیه‌ساز به رفتار واقعی مخزن نزدیک‌تر باشد، قراردادهایی که

1. Fully Implicit
2. Newton-Raphson
3. Broyden
4. Update
5. Jacobian
6. Permeability

هیدروکربن نخواهد داشت و عمده هیدروکربن تولید شده از آن به علت پدیده نفوذ مولکولی انجام می‌پذیرد.

پدیده نفوذ مولکولی هم در حالت تک فازی و هم در حالت دو فازی در مخزن اتفاق می‌افتد که در حالت دو فازی مخازن شکافدار بحرانی‌تر می‌باشند. با تولید از یک مخزن گاز میعانی^۱ شکافدار و افت فشار آن به زیر فشار شبنم^{۱۱} 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 این نقاط می‌باشند زیرا آنها در معرض اولیه افت فشار هستند. اگرچه ممکن است که میعان ایجاد شده در شکاف‌ها از تحرک‌پذیری بالایی برخوردار باشد اما این برای میعان تشکیل شده در لبه‌های ماتریس بلوک، صادق نیست. تشکیل میعان در لبه‌های اطراف ماتریس بلوک، همانند سدی در مقابل هیدروکربن داخل آن بلوک‌ها عمل می‌کند که تشکیل آن، مشکل‌سازی در تولید هیدروکربن داخلی بلوک‌ها را به دنبال خواهد داشت. 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 فیکسی‌ای می‌شود که به همراه تولید دارسی‌ای بر روی مخزن تأثیر می‌گذارد. تشکیل این سد و غالب بودن تولید فیکسی در مخازن شکافدار با بلوک‌های با تراوایی پایین، شدیدتر و بحرانی‌تر خواهد بود [۲].

در این کار پدیده نفوذ مولکولی به صورت توده‌ای فرض می‌شود. به این صورت که گرادیان چگالی گاز در یک بلوک و بلوک مجاور آن باعث حرکت از نوع فیکسی می‌شود و همانگونه که آیالا در تز دکترای خود پیشنهاد می‌دهد که نفوذ در حالت گازی ۱۰۰ برابر آن در حالت مایع می‌باشد [۲] بنابراین در حالت دو فازی، این پدیده تنها در فاز گاز در نظر گرفته می‌شود. در نظر گرفتن ضرائب نفوذ و تراوایی مختلف از جمله پارامترهایی می‌باشند که مؤثر بودن هر کدام از آنها در بازیافت هیدروکربن از مخازن شکافدار بررسی خواهد شد.

۲- مخازن گاز میعانی

کشف مخازن گاز میعانی همزمان با پیشرفت در فناوری حفر مخازن

به شدت بالا برود؛ از طرفی به دلیل اینکه در نظر گرفتن همیشگی این جمله در شبیه‌سازی، سرعت شبیه‌سازی را در حد قابل توجهی پایین می‌آورد بنابراین در این مقاله به دنبال این هستیم که حد تأثیر گذاری این پدیده را در تزریق گاز طبیعی به یک مخزن گاز میعانی شکافدار بررسی کنیم که در شبیه‌سازی‌های بعدی خود در بالای این حد، نفوذ مولکولی صرف نظر شود تا سرعت تا حد امکان بالا باشد و در پایین این حد، نفوذ مولکولی صرف نظر شود که دقت شبیه‌سازی تا حد امکان بالا باقی بماند.

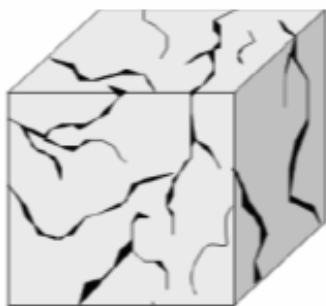
بررسی نفوذ مولکولی اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط ارتکین^۱ به جامعه علمی ارائه شد [۱]. او یک طیف به منظور چگونگی اهمیت هر کدام از دو عامل تولید سیال (دارسی^۲ و فیکسی^۳) اما برای مخازن معمولی پیشنهاد کرد، اما از آنجا که کار او در مخازن معمولی با تراوایی بسیار پایین (در حد ۰/۰۱ میلی‌دارسی) کاربرد داشت و از طرفی این مخازن، به ندرت یافت می‌شوند، کار او در آن سال‌ها چندان مورد استقبال مهندسان نفت واقع نشد تا اینکه در سال ۲۰۰۵ آیالا^۴ در تز دکترای خود به راهنمایی ارتکین در دانشگاه پنسیلوانیا^۵ بر روی موضوع مکانیزم‌های چندتایی^۶ مخازن گاز میعانی شکافدار کار کردند و نتایج بسیار عالی ارائه دادند [۲].

نفوذ مولکولی در مخازن شکافدار بر خلاف مخازن معمولی، می‌تواند به صورت مؤثر بر بازدهی تزریق گاز در مخازن نفتی و یا بازگردانی گاز در مخازن گاز میعانی مؤثر باشد [۳]. در اهمیت این موضوع همین بس که در فرایند تزریق گاز طبیعی در یک مخزن شکافدار با تراوایی ماتریس بلوک‌های خیلی کم، شبیه‌سازی که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته نشده است، تزریق در فشار بالاتر را پیشنهاد می‌کند در حالیکه با در نظر گرفتن مدل ورن^۷ و روت^۸، [۴] تزریق در فشار بالا، علاوه بر بالا بردن هزینه تزریق؛ میان‌شکنی^۹ زود هنگام گاز تزریقی را هم دنبال خواهد داشت. بر عکس، مدل‌سازی که در شبیه‌سازی خود نفوذ مولکولی را در نظر می‌گیرد، تزریق با فشار بالا را پیشنهاد نمی‌کند زیرا در مخازن شکافدار با تراوایی ماتریس بلوک‌های خیلی کم عملاً گرادیان فشاری سهم زیادی در تولید

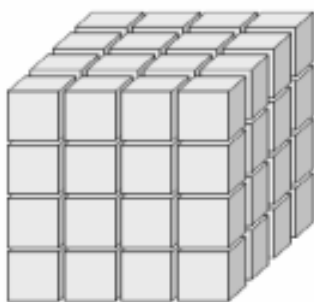
1. Ertekin
2. Darcian
3. Fickian
4. Ayala
5. Pennsylvania State University
6. Multi-Mechanistic
7. Warren
8. Root
9. Breakthrough

10. Gas condensate
11. Dew point

ذخیره شده در مخزن را شامل شده در حالی که شکافهای متقاطع افقی و عمودی یک شبکه‌ای را مهیا می‌نماید که از لحاظ عبور جریان مانند سیستم اصلی نشان داده شده در شکل (۱) را تأمین می‌کند [۴]. 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 بکار گرفته شده است، بنابراین، این مدل‌ها در اینجا آورده نشده‌اند.



شکل ۱- شکل واقعی یک مخزن شکافدار [۱۷ و ۴]



شکل ۲- شکل ایده‌آل یک مخزن شکافدار (ورن و روت) [۱۷ و ۴]

۴- مطالعه تک بلوکی مخازن شکافدار

مخازن شکافدار طبیعی در ساختارهای بسیار پیچیده‌ای یافت می‌شوند که جزئیات آنها هنوز به صورت یک مجهول باقی مانده است. در این مخازن، ماتریس بلوک‌ها بیش از ۹۰٪ کل هیدروکربن در جای آنها را در خود ذخیره نموده‌اند بنابراین می‌توان گفت که بیشتر هیدروکربن موجود در مخازن شکافدار در ماتریس بلوک‌های آنها می‌باشند 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 آنها می‌باشد، نه در شکاف‌ها.

عمیق‌تر و گرم‌تر افزایش یافت. گرفت^۱ و هاوکینز^۲ به وضوح نشان دادند که چگونه کشف مخازن گازی و گاز میعانی با شروع فناوری حفر چاه‌های عمیق‌تر در سال ۱۹۵۰ افزایش یافته است [۵]. از آن به بعد، اهمیت مخازن گاز میعانی با گذر زمان افزایش یافت.

در مخازن گاز میعانی، شرایط اولیه مخزن بین نقطه بحرانی^۳ و نقطه میعانی بحرانی^۴ سیال مخزن می‌باشد که این منجر به نشان دادن رفتاری تحت عنوان رفتار معکوس^۵ در این گازها می‌شود. بر اساس مطالعات موسز^۶ و دانهو^۷ در سال ۱۹۹۲، بسیاری از مخازن گاز میعانی در محدوده فشاری و دمایی، به ترتیب، ۳۰۰۰ Psia تا ۸۰۰۰ Psia و ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه فارنهایت می‌باشند [۶].

در این نوع مخازن عملکرد تولید شدیداً وابسته به ترکیب سیال می‌باشد و برای پیش‌بینی عملکرد تولید از آنها، معمولاً از شبیه‌سازهای مدل ترکیبی^۸ استفاده می‌شود. این، منجر می‌شود به اینکه خیلی از اوقات، هزینه‌های گزافی برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی دقیق این مخازن، رفتار فازی آنها و همین‌طور مشخصات جریانی سیال آنها پرداخته شود [۲].

۳- مخازن شکافدار طبیعی

قسمت اعظمی از نفت و گاز تولید شده در جهان، از مخازن گاز میعانی شکافدار تولید می‌شود. بر اساس مطالعات پاپی^۹ در سال ۲۰۰۳، بیش از ۵۰ درصد از هیدروکربن‌های تولید شده در جهان از مخازن شکافدار می‌باشند [۷]. شکل (۱) یک نمونه معمول مخزن شکافدار را نشان می‌دهد. این مخازن به صورت ایده‌آل شکل (۲)، یعنی تعدادی ماتریس بلوک در شبکه‌ای از شکاف‌ها تصور می‌شوند. این مدل معمولاً به صورت مدل "حبه قندی"^{۱۰} شناخته می‌شود که برای اولین بار توسط ورن^{۱۱} و روت^{۱۲} در سال ۱۹۶۳ ارائه شد [۴].

در این مدل به جهت ساده‌سازی بیشتر فرض می‌شود که بلوک‌های مستطیلی که در شکل (۲) آمده است قسمت زیادی از هیدروکربن

1. Craft
2. Hawkins
3. Critical
4. Cricondentherm
5. Retrograde
6. Moses
7. Donohoe
8. Compositional Simulation
9. Papay
10. Sugar Cube
11. Warren
12. Root

بلوک دو بُعدی و دو فازی برای مطالعه رفتار جریانی سیال در یک سیستم شکافدار پرداختند. آنها همچنین از مدل خود به منظور آنالیز عملکرد بلوک‌هایی با اندازه‌های مختلف تحت تأثیر افت فشار و حفظ فشار پرداختند [۸].

کلپ^۳ و مورس^۴ (۱۹۷۴) یک مدل دو بُعدی ارائه کردند که به صورت عددی رفتار جریانی یک سیستم نفت در مخزن شکافدار تحت تزریق آب را شبیه‌سازی می‌کرد، در این محاسبات از مدل تک‌بلوکی ماتریس استفاده کردند که این ماتریس، به وسیله شکاف‌های افقی و عمودی احاطه شده بودند. در کار آن‌ها، فاز نفت و آبی که مابین ماتریس با شکاف‌ها جابجا می‌شد نیز محاسبه گردید [۹].

پیسمن^۵ در سال ۱۹۷۶ بیان کرد که آنالیز رفتار مخزن شکافدار می‌تواند با فهم رفتار و عملکرد بلوک ماتریس در شرایط مختلف مرزی یا شرایط محیطی شکاف به خوبی بررسی شود. در این کار، او به مطالعه جریان همرفت^۶ و انگشتی شدن^۷ بدلیل پدیده معکوس چگالی^۸ با استفاده از آنالیز آشفتگی برای یک شکاف مرتبط با ماتریس بلوک تحت افت فشار پرداخت. نتایج این آزمایش نشان داد که چگالی معکوس در محدوده ضرائب معمول نفوذ ناپایدار اتفاق می‌افتد [۱۰].

ون گولف^۹ در سال ۱۹۸۲ نشان داد که فرض اساسی در مطالعه تک بلوکی مخزن شکافدار این است که باید تک بلوک در نظر گرفته شده به‌طور کامل به وسیله شکاف‌ها احاطه شده باشد و علاوه بر آن ارتباط آن با سایر بلوک‌ها، به‌طور کامل قطع شده و یا ارتباط قابل اغمازی داشته باشد و این شرایط است که ما را قادر می‌سازد که به جای شبیه‌سازی کامل یک مخزن شکافدار، تنها به شبیه‌سازی یک تک بلوک آن بسنده نماییم [۱۱].

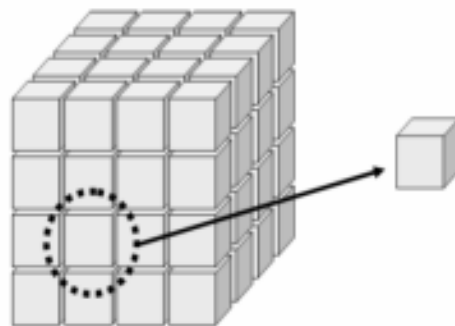
مدل تک بلوکی روشی است که در این مقاله به‌کار گرفته خواهد شد و شبکه شکاف‌ها به‌صورت شرایط مرزی برای ماتریس بلوک در نظر گرفته شده، فرض می‌شود.

۵- مراحل کار

در این مقاله به جهت بررسی دقیق تمامی ابعاد پدیده نفوذ مولکولی،

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

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 است که تغییرات فشار شکاف‌ها بر رفتار سیال درون ماتریس‌ها تأثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر فشار شکاف‌ها با چگونگی تولید سیال درون ماتریس‌ها در ارتباط است. در چنین شرایطی می‌توان بیان کرد که شکاف‌ها بعنوان شرایط مرزی^۱ برای بلوک‌های ماتریس عمل می‌کنند. نوع محیط اطراف سنگ یک ماتریس بلوک چگونگی عملکرد و بازیافت هیدروکربن را از بلوک خاص تعیین می‌کند. به اضافه، با فرض کل سیستم مخزن شکافدار بعنوان چند تک بلوک می‌توان نتیجه گرفت که، بازیافت نهایی از کل مخزن به وسیله رفتار هر تک بلوک کنترل می‌شود. بنابراین، همانگونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، فهم پدیده‌های اتفاق افتاده در هر تک بلوک می‌تواند اطلاعاتی کلیدی در رابطه با کل مخزن شکافدار را مهیا کند. در مطالعه تک بلوکی، حرکت سیال در شبکه شکاف در درجه دوم اهمیت قرار دارد. به این دلیل که در حالت کلی، شکاف‌ها به‌صورت شرایط مرزی برای جریان سیال درون بلوک احساس می‌شوند.



شکل ۳- یک تک بلوک از سنگ ماتریسی یک مخزن

شکافدار طبیعی [۲]

در طول عمر مدل‌سازی مخازن شکافدار، محققان مختلفی با استفاده از مدل تک بلوکی به اطلاعات بسیار مفیدی در زمینه رفتار کلی این مخازن دست یافته‌اند:

یاماموتو^۲ و همکاران در سال ۱۹۷۱ به مدل‌سازی ترکیبی یک تک

1. Boundary Condition
2. Yamamoto

- x_m : کسر مولی جزء m در فاز میعان، بدون بُعد
 $\bar{\rho}_p$: چگالی مولی فاز p ($lbmol/ft^3$)
 A_x : سطح عمود بر جریان در جهت x ، ft^2
 k_m : تراوانی مطلق ماتریس بلوک در جهت x ، داری
 K_{mp} : تراوانی نسبی فاز p بدون بُعد
 μ_p : گرانروی فاز p
 Φ_p : پتانسیل هابرگ فاز p $Psia$
 y_m : کسر مولی جزء m در فاز گاز، بدون بُعد
 ϕ : تخلخل، بدون بُعد
 S_g : درجه اشباع گاز در شرایط مخزن، بدون بُعد
 D_{eff} : ضریب نفوذ مولکولی مؤثر فاز گاز، (ft^2/day)
 V_b : حجم ماتریس بلوک در نظر گرفته شده، ft^3

آیالا در به دست آوردن شکل کلی این معادله از فرضیات زیر استفاده کرد:

- 1- هیدروکربن‌ها در هر زمان و در هر نقطه از مخزن به طور آبی به حالت تعادل می‌رسند؛ به عبارت دیگر تعادل ترمودینامیکی بسیار سریع‌تر از سرعت حرکت سیال اتفاق خواهد افتاد.
- 2- تعادل ترمودینامیکی می‌تواند به کمک محاسبات فلش^۱ سریع در فشار و دمای مخزن و با استفاده از ترکیب کلی مخزن تعیین شود.
- 3- دمای مخزن ثابت است و از گرادیان دمایی زمین صرف نظر می‌شود.
- 4- برای جریان سیال در مخزن از قانون داری (برای جریان تحریک فشاری) و قانون فیک (برای جریان تحریک غلظتی) استفاده می‌شود.
- 5- نفوذ مولکولی در فاز مایع کمک ناچیزی به حرکت سیال می‌کند در حالیکه این، برای فاز گاز چشمگیر است. در حالت کلی، نفوذ مولکولی در فاز گاز ۱۰۰ برابر بیشتر از این نفوذ در حالت مایع می‌باشد [۲].

6- نفوذ مولکولی بین یک بلوک و بلوک مجاور آن به صورت توده‌ای در نظر گرفته می‌شود تا به صورت جزئی، به این صورت که اختلاف چگالی منجر به تولید فیک می‌شود نه اختلاف غلظت یک مولکول در یک بلوک و بلوک مجاور آن

از یک مسئله خیلی ساده شروع می‌کنیم و رفته رفته مسئله را پیچیده‌تر می‌نماییم تا اینکه به یک حالت مورد نظر برسیم. به این صورت که در ابتدا، ماتریس بلوکی را در نظر می‌گیریم که تنها از متان اشباع شده است. مسلم است که در این حالت تزریق متان در سمت چپ این مخزن هیچ معنا و مفهوم عملیاتی نخواهد داشت اما همانگونه که قبلاً هم بیان شد این مرحله تنها از نقطه نظر دانشگاهی می‌تواند ما را در رسیدن به یک مسئله واقعی‌تر کمک کند. در حالت بعد، ماتریس بلوک را به صورت دو جزئی متان و اتان که با درصد جزئی یکسان (۵۰-۵۰) اشباع شده باشد، در نظر می‌گیریم. در این حالت، تزریق متان در سمت چپ مخزن می‌تواند نسبت به حالت اول قابل توجه‌تر باشد. به این صورت که می‌توان فرض کرد که هدف از تولید این مخزن بازیافت اتان آن می‌باشد و به همین دلیل تزریق متان در سمت چپ مخزن قابل توجه است. اما از آنجا که ترکیب‌های پیشین در نظر گرفته شده برای ماتریس بلوک (متان در حالت اول؛ متان و اتان در حالت دوم) در شرایط دمایی و فشاری ماتریس بلوک به هیچ وجه تشکیل دو فاز نخواهند داد بنابراین در آخرین مرحله به منظور بررسی تأثیر نفوذ در حالت دو فازی، ترکیب آن را به ۸۰٪ متان و ۲۰٪ نرمال پنتان تغییر می‌دهیم که در دمای در نظر گرفته شده برای مخزن (۱۷۵) درجه فارنهایت) رفتار معکوس از خود نشان می‌دهد.

۶- معادله ترکیبی برای شبیه‌سازی در یک سیستم جریان چند مکانیزمی

در این کار از فرمول‌بندی‌ای که آیالا در تز دکترای خود اثبات و استفاده کرده به کار رفته که برای شبیه‌سازی آن از محیط MATLAB استفاده شده است. در زیر تنها شکل ساده شده و استفاده شده در این کار آورده شده اما خواننده می‌تواند به منظور مطالعه بیشتر به مرجع ۲ مراجعه کند. در این شکل ساده شده معادله؛ ساده‌سازی‌های تک بُعدی و افقی لحاظ شده است.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(x_m \bar{\rho}_o A_x \frac{k_x k_m}{\mu_o} \frac{\partial \Phi_o}{\partial x} + y_m \bar{\rho}_g A_x \frac{k_x k_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial \Phi_g}{\partial x} + y_m \phi S_g A_x \frac{D_{eff} \partial \bar{\rho}_g}{6.328} \frac{\partial \bar{\rho}_g}{\partial x} \right) dx = \frac{V_b}{6.328} \frac{\partial}{\partial t} [\phi (S_o x_m \bar{\rho}_o + S_g y_m \bar{\rho}_g)] \quad (1)$$

که در آن:

همینطور در حالت تک جزئی، جمله‌های کسر مولی برابر با یک در نظر گرفته می‌شوند.

۷- روش‌های حل عددی

از آنجا که بیشترین وقت یک شبیه‌ساز عددی در تشکیل ماتریس جاکوبین صرف می‌شود، به‌عنوان مثال در یک شبیه‌سازی یک مخزن ۱۰۰ شبکه بلوکی (توجه شود که در این مقاله، "ماتریس بلوک" همان تک بلوک در نظر گرفته شده به عنوان نماینده مخزن شکافدار است، در حالی که منظور از «شبکه بلوک» یکی از شبکه بلوک‌های شبیه‌سازی می‌باشد) ماتریس جاکوبین به‌صورت 100×100 خواهد شد که برای تشکیل آن به‌صورت عددی به حداقل 2×10000 فراخوانی تابع نیاز می‌باشد به همین دلیل استفاده از روشی که بتواند بدون فراخوانی مجدد تابع، این ماتریس را تشکیل دهد سرعت شبیه‌سازی را دوچندان می‌کند. روش برویدن [۱۲] با استفاده از ماتریس جاکوبین پیشین و دیگر پارامترهای مورد نیاز این امکان را فراهم می‌کند که در این حالت با استفاده از این روش، سرعت شبیه‌سازی حداقل ۲ برابر شده است.

در مسائل دو جزئی به جهت پایداری بیشتر، ترتیب معادلات به این صورت فرض شده است که کسر مولی کلی جزء اول به عنوان متغیرهای فرد و فشار هر بلوک به عنوان متغیرهای زوج در نظر گرفته شده‌اند. به این صورت که در سطر اول ماتریس جاکوبین، مشتق معادلات نسبت به کسر مولی جزء اول در شبکه بلوک اول و در سطر دوم آن، مشتق معادلات نسبت به فشار شبکه بلوک اول، در سطر سوم مشتق معادلات نسبت به کسر مولی جزء اول در شبکه بلوک دوم و در سطر چهارم مشتق نسبت به فشار شبکه بلوک دوم گرفته می‌شود و همین طور تا تمامی تعداد شبکه بلوکها در نظر گرفته شوند، این ماتریس را می‌سازیم و به این صورت عمل نشده است که ابتدا مشتقات معادلات نسبت به کسر مولی جزء اول در تمامی شبکه بلوکها و سپس مشتقات معادلات نسبت به فشار گرفته شود. ترتیب مشتق‌گیری اول پایدارترین حالت برای ماتریس جاکوبین در بین حالت‌های امتحان شده در این کار می‌باشد که با هر حدس اولیه معقولی همگرا خواهد شد و در عوض، ترتیب معادلات در حالت دوم حتی با حدس اولیه‌ای نزدیک به جواب اصلی نیز همگرا نخواهد شد [۱۳].

البته لازم به ذکر است که بیان شود که از شکل کامل معادله (۱) تنها در مرحله سوم این کار استفاده می‌شود و در مراحل اول و دوم بعضی از جمله‌های آن حذف می‌شوند: در مرحله اول از آنجا که سیال در نظر گرفته شده تک جزء و تک فاز است بنابراین، کسر مولی گاز، تراوانی نسبی گاز همواره یک، و جمله مربوط به میعان در سمت چپ معادله (۱) و درجه اشباع میعان از سمت راست صفر خواهد شد و در مرحله دوم این کار از آنجا که سیال دو جزئی و تک فاز می‌باشد بنابراین، تراوانی نسبی گاز همواره یک و جمله مربوط به میعان در سمت چپ معادله (۱) و درجه اشباع میعان از سمت راست حذف خواهند شد.

به جهت اینکه در حل این سیستم معادلات به حالت تکین^۱ برخورد نکنیم؛ لازم است که در همین جا به بررسی برابری تعداد معادلات و مجهولات این سیستم بپردازیم.

در این سیستم، معادله بالا در هر شبکه بلوک شبیه‌سازی و برای هر جزء نوشته می‌شود، از آنجا که ترکیب مورد نظر در این کار حداکثر دو جزئی است، بنابراین در هر شبکه بلوک دو معادله نوشته می‌شود. پس تعداد معادلات در هر شبکه بلوک دو عدد است، بنابراین به جهت اینکه به حالت تکین بر نخوریم، در هر شبکه بلوک می‌توانیم حداکثر دو مجهول مستقل تعریف کنیم. چون حداکثر تعداد اجزاء در ترکیب مورد نظر در این کار، دو می‌باشد، بنابراین تنها کسر مولی یک جزء در هر بلوک می‌تواند به عنوان مجهول تعریف شود زیرا کسر مولی جزء دیگر با استفاده از موازنه مولی بین اجزاء (اینکه جمع کسر مولی‌ها در ترکیب باید یک باشد) محاسبه می‌شود پس مجهول دیگر را در هر بلوک فشار سیال تعریف می‌کنیم. با داشتن فشار و کسر مولی کلی ترکیب در هر شبکه بلوک، می‌توان محاسبات فلش انجام داد و به دنبال آن درجه اشباع و دیگر پارامترهای مورد نیاز را محاسبه کرد.

در حالتی که ترکیب موجود در مخزن به صورت n_c جزئی باشد و مخزن به صورت n_{blocks} گسسته‌سازی شده باشد، به جهت شبیه‌سازی آن باید $n_c \times n_{blocks}$ معادله ساخته شود که همزمان حل شوند. معادله ترکیبی در سیستم‌های چند مکانیزی، هم در حالت تک فازی و هم در حالت دو فازی کاربرد دارد و همانگونه که در بالا هم به آن اشاره شد، مسلم است که در حالت تک فازی جمله‌های مربوط به میعان از معادله بالا حذف خواهند شد و

1. Singular

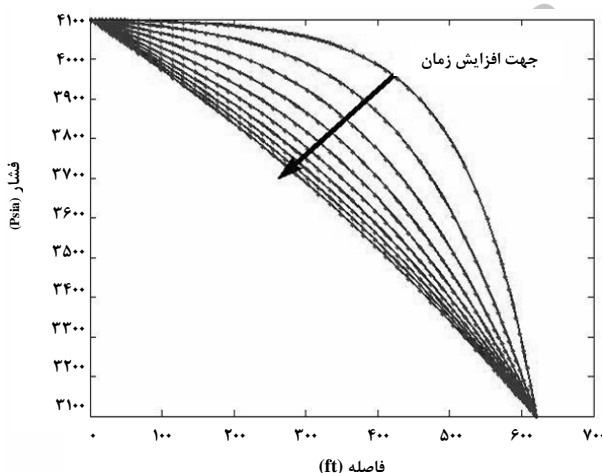
به کار گرفته شده است، در این کار نیز محدوده $(ft^2/day) \cdot 0$ تا $(ft^2/day) \cdot 20$ برای آن در نظر گرفته شده است.

سؤالی که در اینجا ممکن است ذهن مخاطب را به خود مشغول کند این است که در حالت تک جزئی نفوذ مولکولی چه معنایی می تواند داشته باشد؟ در جواب به این سؤال باید خاطر نشان شود که، همانگونه که قبلاً هم بیان شد در این کار پدیده نفوذ مولکولی به صورت توده ای و به علت تفاوت چگالی اتفاق می افتد که با این فرض اتفاق نفوذ مولکولی در حالت تک جزئی نیز امکان پذیر می باشد.

در شکل های زیر، ضریب نفوذ مولکولی در حالتی که نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده، $(ft^2/day) \cdot 20$ در نظر گرفته شده است.

در این شکل ها جهت افزایش زمان و چگونگی مؤثر بودن نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک های با تراوایی های مختلف نشان داده شده است.

در شکل های (۵) تا (۸) پیکان جهتدار بر روی توزیع فشاری جهت حرکت آن را با گذر زمان نشان می دهد.

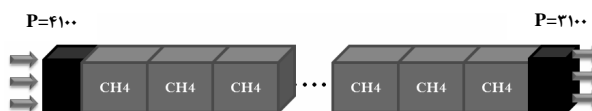


شکل ۵- توزیع فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی 1 md از زمان شبیه سازی ۱ تا ۱۰ روز با گام زمانی ۱ روز (در این شکل توزیع با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با خط نقطه دار نشان داده شده است که بر روی خط بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی واقع شده است)

با توجه به شکل (۵) که توزیع فشاری را در یک مخزن شکافدار با ماتریس بلوک های با تراوایی ۱ میلی دارسی نشان می دهد، در این شکل همانگونه که مشاهده می شود، دو توزیع بر هم منطبق

۸- حالت اول: بررسی نفوذ مولکولی در مخزن تک جزئی و تک فازی

ماتریس بلوک در نظر گرفته شده در این حالت به صورت شکل (۴) نشان داده شده است.



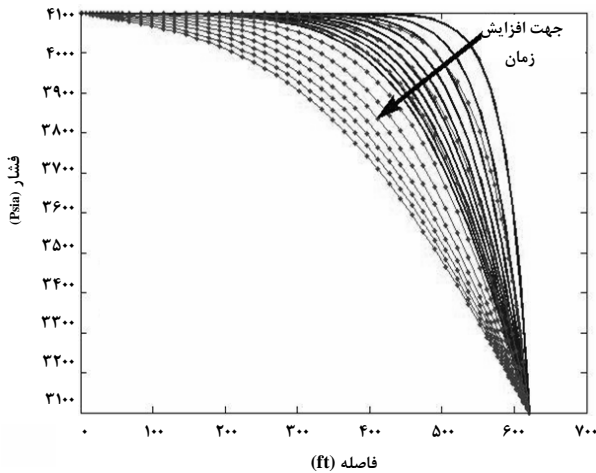
شکل ۴- طرح اجمالی ماتریس بلوک در نظر گرفته شده

در حالت تک جزئی و تک فازی

در این حالت قسمت های مشخص شده با رنگ تیره، شکافها را نشان می دهند که در اینجا در سمت چپ با فشار ثابت 4100 Psia تزریق متان و در سمت راست با فشار ثابت 3100 Psia تولید از این ماتریس بلوک انجام می شود و بقیه مرزها، مرز بدون جریان در نظر گرفته شده اند. تخلخل برای این ماتریس بلوک 13% و ارتفاع آن 30 فوت در نظر گرفته شده است. عرض ماتریس بلوک 30 فوت و این برای شکافها $0/1$ (مشخصات شکاف برای محاسبه جمله های تحرک پذیری در مرز بلوکها و شکافها مورد نیاز می باشد) اختصاص داده شده است. اما در مورد طول هر شبکه بلوک در ابتدای ماتریس بلوک (قسمت تزریقی) و انتهای آن (قسمت تولیدی) به اندازه 6 بلوک، طول آنها 5 فوت و بینابین آن اندازه طول شبکه بلوکها $15/625$ فوت در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر؛ طول کلی ماتریس بلوک به عنوان نماینده مخزن شکافدار 620 فوت فرض شده است. تراوایی شکافها در تمامی حالت های این کار ثابت و برابر با 5000 md در نظر گرفته شده است. پارامترهایی که در این حالت به عنوان پارامترهای حساسیت تغییر می کنند، تراوایی ماتریس و ضریب کلی نفوذ می باشند که به ترتیب از $0/01 \text{ md}$ تا 1 md و $(ft^2/day) \cdot 0$ (حالت بدون نفوذ مولکولی) تا $(ft^2/day) \cdot 20$ تغییر می کنند.

برای ضریب کلی نفوذ؛ کاسلر^۱ مقادیر بین $(ft^2/day) \cdot 9/3$ تا $(ft^2/day) \cdot 93$ را برای آن پیشنهاد کرده است [۱۴] اما از آنجا که از یک طرف مقادیر پیشنهاد شده ایشان در حالت استاندارد بوده و از طرف دیگر محدوده $(ft^2/day) \cdot 0$ تا $(ft^2/day) \cdot 20$ توسط آیالا

1. Cussler



شکل ۸- توزیع فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۰۱ md از زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ روز با گام زمانی ۱۰۰ روز (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می‌باشد)

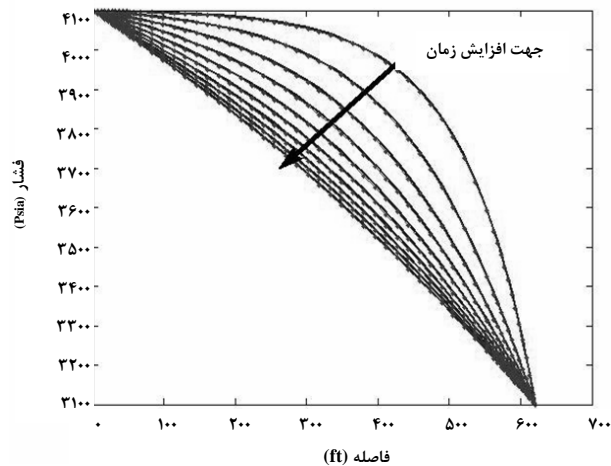
از این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت توزیع فشاری در حالت‌هایی که در آن‌ها از نفوذ مولکولی صرف نظر شده و حالت‌هایی که در آن‌ها نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده است؛ از تراوایی ۰/۰۱ md برای ماتریس بلوک شروع می‌شود و در تراوایی‌های کمتر از ۰/۰۰۱ md خیلی شدید خواهد شد.

شکل (۹) توزیع فشاری را در زمان شبیه‌سازی ۲۰۰ روز و ماتریس بلوک ۰/۰۱ md اما در ضرائب نفوذ مختلف (ft²/day) ۰ تا ۲۰ (ft²/day) را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که هر چه ضریب نفوذ مولکولی بیشتر باشد ضریب فشاری با سرعت بیشتری در ماتریس بلوک حرکت خواهد کرد.

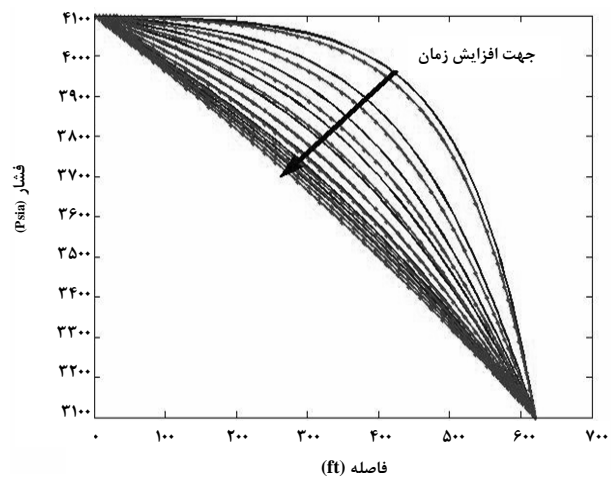
۹- حالت دوم: بررسی نفوذ مولکولی در مخزن دو جزئی و تک فازی

در این حالت تمامی مشخصات در نظر گرفته شده برای مخزن همانند حالت اول است با این تفاوت که به جای اینکه مخزن تنها با متان اشباع شده باشد در این حالت با ترکیب ۵۰٪ متان و ۵۰٪ اتان اشباع شده است. همانگونه که در بالا هم بیان شد، در این حالت به جهت توجیه عملیاتی فرض می‌شود که هدف تولید اتان بوده و متان تولید شده از این مخزن در سمت چپ ماتریس بلوک تزریق می‌شود تا فشار آن را در ۴۱۰۰ Psia ثابت نگاه دارد.

می‌باشد؛ در شکل (۶) نیز که برای ماتریس بلوک‌های با تراوایی ۰/۱ میلی‌داری می‌باشد، این دو توزیع بر هم منطبق‌اند، تفاوت این توزیع‌ها از ماتریس بلوک‌های با تراوایی ۰/۰۱ میلی‌داری، همانگونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، آغاز می‌شود که این تفاوت در شکل (۸) و برای ماتریس بلوک‌های با تراوایی ۰/۰۰۱ میلی‌داری بسیار مشهود می‌باشد.

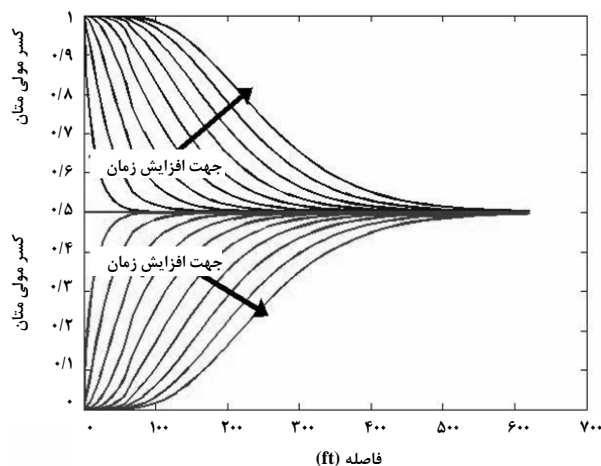


شکل ۶- توزیع فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md از زمان شبیه‌سازی ۱۰ تا ۱۰۰ روز با گام زمانی ۱۰ روز (در این شکل توزیع با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با خط نقطه‌دار نشان داده شده است که بر روی خط بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی واقع شده است)

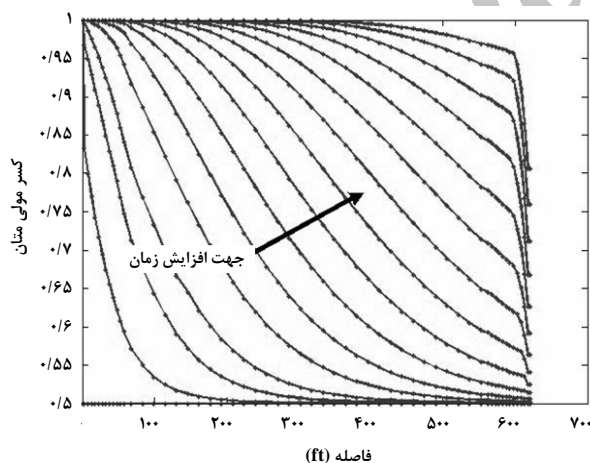


شکل ۷- توزیع فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۰۱ md از زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ روز با گام زمانی ۱۰۰ روز (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن از آن می‌باشد)

ترجیح داده شد که این تأثیرات بر روی توزیع فشاری نشان داده شود اما در این حالت چون با در نظر گرفتن کسر مولی این تأثیرات بهتر نمایان می‌شوند بنابراین، پارامتر کسر مولی برای مقایسه حالت‌های بدون در نظر گرفتن و با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی، منظور شده است.

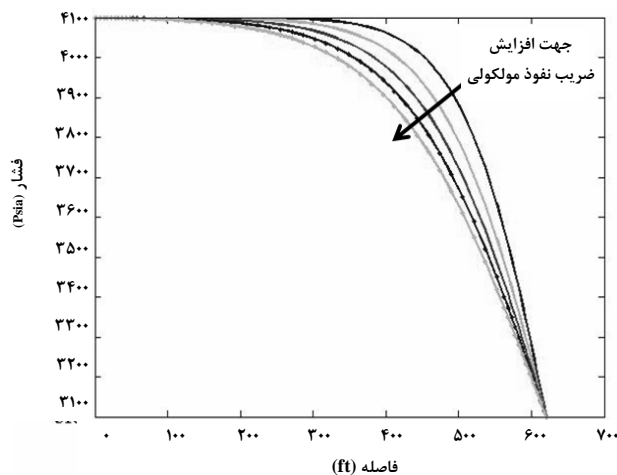


شکل ۱۰- کسر مولی متان و اتان بر حسب فاصله در یک ماتریس بلوک



شکل ۱۱- توزیع کسر مولی متان برای ماتریس بلوک با تراوانی ۰/۰۱ md از زمان شبیه‌سازی ۳۰۰۰۰ روز تا ۱۰۰۰۰۰۰ با گام زمانی ۵۰۰۰۰ روز

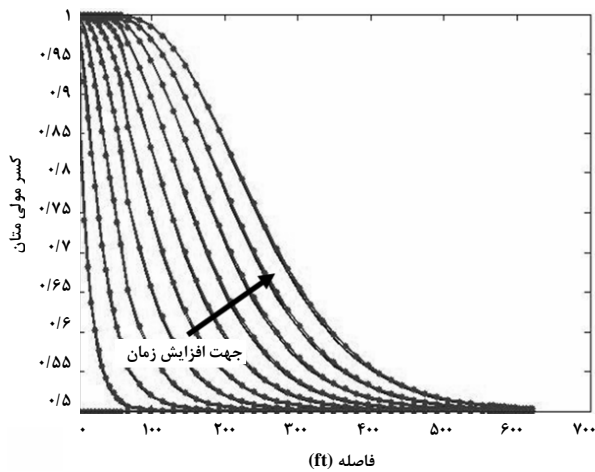
بعد از اطمینان از اینکه شبیه‌ساز رفتار مخزن را به درستی پیش‌بینی می‌کند، حال به بررسی تأثیر نفوذ مولکولی بر رفتار ضربه فشاری و تغییرات کسر مولی شبکه بلوک‌های ماتریس بلوک خواهیم



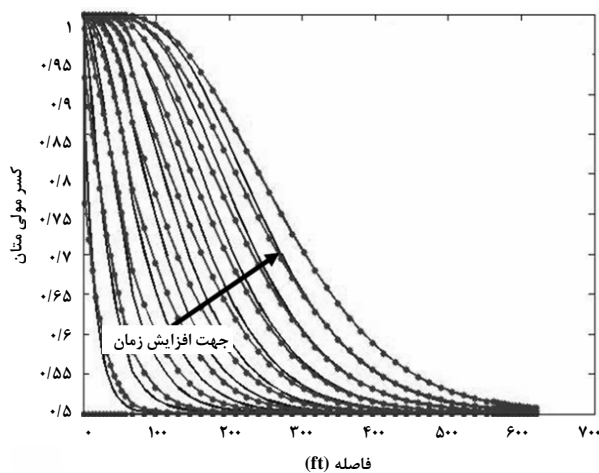
شکل ۹- تأثیر ضریب نفوذهای مختلف بر روی توزیع فشاری در زمان شبیه‌سازی ۲۰۰ روز و تراوانی ماتریس بلوک ۰/۰۱ md (در این شکل بیرونی‌ترین خط مربوط به حالتی است که ضریب نفوذ مولکولی ۰ (ft²/day) و خارجی‌ترین آن مربوط به حالتی است که ضریب نفوذ مولکولی ۲۰ (ft²/day) است. ضریب نفوذ مولکولی در بقیه خط‌ها به ترتیب از بیرونی به درونی ۵ (ft²/day)، ۱۰ (ft²/day) و ۱۵ (ft²/day) می‌باشند)

به جهت اطمینان از اینکه شبیه‌ساز رفتار مخزن را به درستی پیش‌بینی می‌کند؛ قبل از بررسی تأثیر نفوذ مولکولی بر توزیع‌های فشاری و یا کسر مولی، به بررسی رفتار پیش‌بینی شده به کمک شبیه‌ساز می‌پردازیم. شکل (۱۰) توزیع 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 بنابراین باید کسر مولی متان در بلوک‌های نزدیک به تزریق به ۱ نزدیک شود (یا کسر مولی اتان آن‌ها به صفر میل کند) و این به صورت یک پالس (ضربه) در طول ماتریس بلوک حرکت نماید. این دقیقاً همان رفتاری است که توسط شبیه‌ساز برای این ماتریس بلوک پیش‌بینی می‌شود (به شکل (۱۰) توجه شود). این رفتار را می‌توان به صورت بسیار واضح‌تر در آخرین توزیع در شکل (۱۱) که تنها توزیع کسر مولی متان را نشان می‌دهد، مشاهده کرد، به طوری که در آخرین توزیع این شکل، تقریباً تمامی شبکه بلوک‌ها، کسر مولی نزدیک به یک از خود نشان می‌دهند.

نکته‌ای که در اینجا باید به آن توجه شود این است که، به خاطر نمایش تأثیر نفوذ مولکولی می‌توان اثر آن را بر روی هر کدام از پارامترها (کسر مولی و یا فشار) نشان داد به طوری که در حالت اول

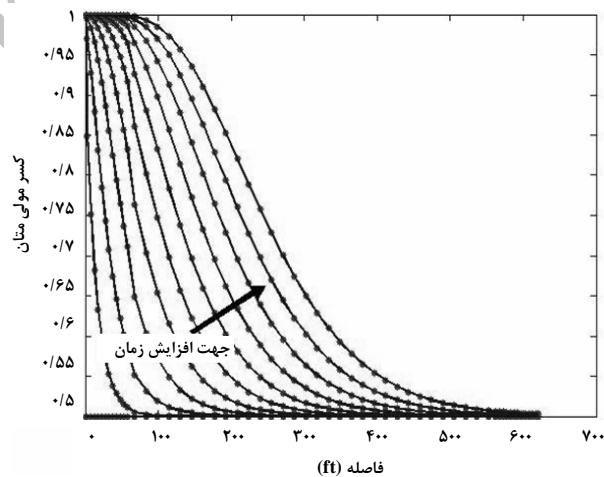


شکل ۱۳- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوانی 0.1 md از زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ روز تا ۱۰۰۰ روز و گام زمانی ۱۰۰ روز (در این شکل توزیع با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با خط نقطه‌دار نشان داده شده است که بر روی خط بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی واقع شده است)



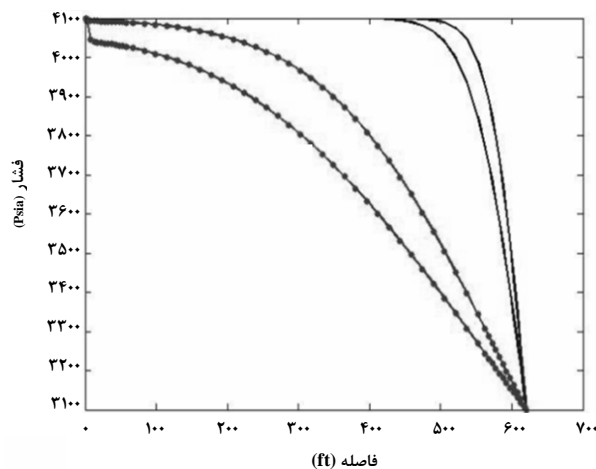
شکل ۱۴- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوانی 0.1 md از زمان شبیه‌سازی ۱۰۰۰ روز تا ۱۰۰۰۰ روز و گام زمانی ۱۰۰۰ روز (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می‌باشد)

پرداخت. شکل‌های (۱۲) تا (۱۶) به بررسی تأثیر نفوذ بر روی توزیع کسر مولی متان در تراوانی‌های مختلف و شکل (۱۷) تأثیر آن را بر توزیع فشاری ماتریس بلوک با تراوانی 0.0001 md نشان می‌دهند. در شکل (۱۲) که برای ماتریس بلوک های ۱ میلی‌داریسی است، هر دو توزیع بر روی هم منطبق می‌باشند با کاهش تراوانی ماتریس بلوک‌ها به یک مرتبه پایین‌تر هم نیز تراوانی 0.1 میلی‌داریسی همانگونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است هیچ تغییری در این دو توزیع مشاهده نمی‌شود. شکل (۱۴)، که آغاز مشاهده شدن تغییر در دو توزیع می‌باشد، مربوط به ماتریس بلوک‌های با تراوانی 0.1 میلی‌داریسی است که با کاهش تراوانی ماتریس بلوک‌ها به مقادیر 0.0001 و 0.001 میلی‌داریسی به ترتیب در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) این تفاوت مشهودتر خواهد شد. شکل (۱۷) نیز برای نشان دادن تفاوت در توزیع فشاری علاوه بر توزیع کسر مولی برای ماتریس بلوک‌های با تراوانی 0.0001 میلی‌داریسی نیز آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در این شکل تفاوت بین دو توزیع فشاری در دو حالت با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون آن به وضوح مشاهده می‌شود.



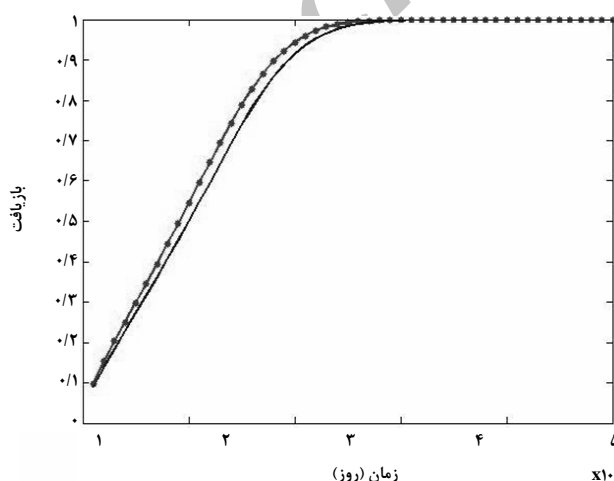
شکل ۱۲- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک‌هایی با تراوانی 1 md از زمان شبیه‌سازی ۱۰۰۰۰ روز تا ۱۰۰۰۰۰ روز و گام زمانی ۱۰۰۰۰ روز (در این شکل توزیع با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با خط نقطه‌دار نشان داده شده است که بر روی خط بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی واقع شده است)

$$R_F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i V_{pi} \gamma_i}{\left(\sum_{i=1}^n \phi_i V_{pi} \gamma_i \right)_{initial}} \quad (2)$$

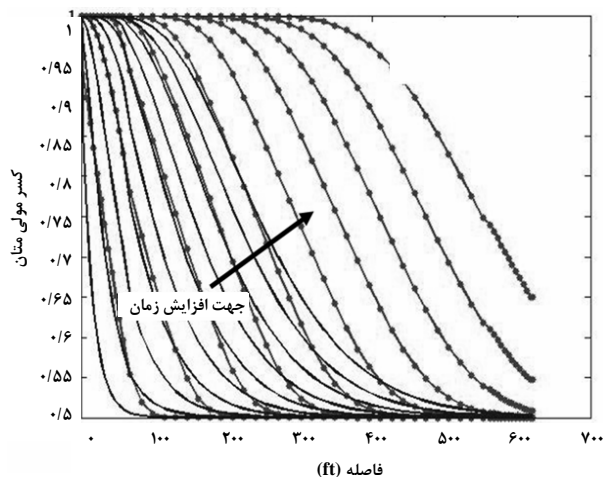


شکل ۱۷- توزیع فشار با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی در حالت تراوانی ۰/۰۰۱ میلی داریسی، در زمان های ۱۰۰ و ۲۰۰ روز با گام ۱۰۰ روز (در این شکل خط نقطه دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر نمودن آن می باشد)

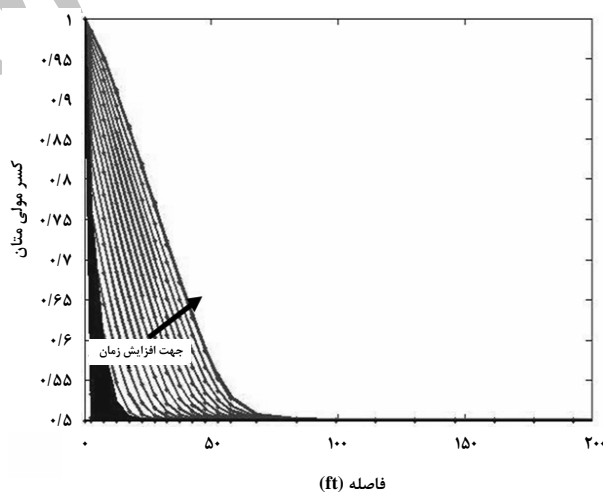
که در آن γ_i کسر مولی اتان در هر بلوک در نظر گرفته می شود. در این دو شکل (شکل های (۱۸) و (۱۹)) نیز مشاهده می شود که تفاوت در بازیافت اتان در دو حالت در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون آن در هر دو ماتریس بلوک با تراوانی ۰/۰۱ میلی داریسی (شکل (۱۸)) و ۰/۰۰۱ میلی داریسی (شکل (۱۹)) مشاهده می شود.



شکل ۱۸- بازیافت اتان از مخزن با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی در تراوانی ۰/۰۱ میلی داریسی (در این شکل خط نقطه دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر نمودن آن می باشد)



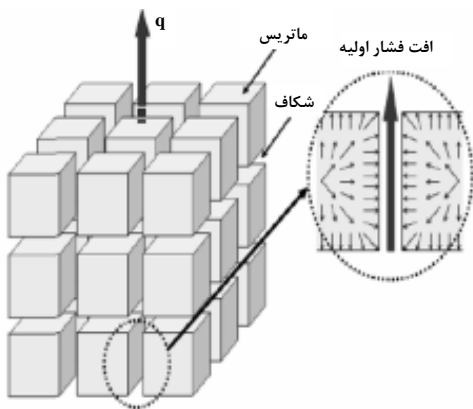
شکل ۱۵- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوانی ۰/۰۰۱ md از زمان شبیه سازی ۱۰۰۰ روز تا ۱۰۰۰۰ روز و گام زمانی ۱۰۰۰ روز (در این شکل خط نقطه دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می باشد)



شکل ۱۶- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوانی ۰/۰۰۰۱ md از زمان شبیه سازی ۱۰۰ روز تا ۷۰۰۰۰۰ روز و گام زمانی ۱۰۰ روز (در این شکل خط نقطه دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می باشد)

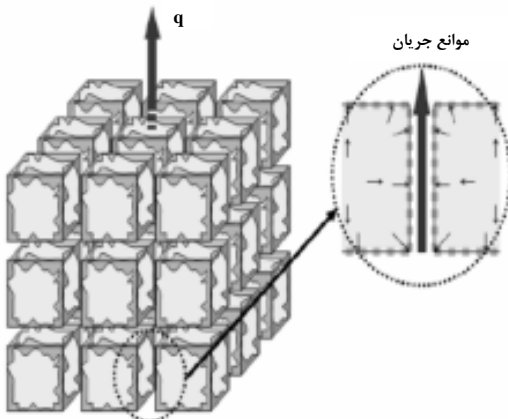
همانگونه که قبلاً هم بیان شد، در این حالت به جهت بررسی بهتر پدیده نفوذ مولکولی، فرض شده است که در این ماتریس بلوک هدف اصلی تولید اتان بوده به همین دلیل با تعریف بازیافت برای شکل های (۱۸) و (۱۹) به صورت معادله (۲) خواهد بود:

و در نتیجه فشار، سریع‌تر به زیر فشار شبنم افت می‌کند و آنها اولین نقاطی هستند که میعان در آنها ظاهر می‌شود. این وضعیت به خوبی در شکل (۲۱) به تصویر کشیده شده است. اگر بلوک‌های ماتریس، خیلی فشرده (تراوایی پایین) باشند قسمت داخلی این بلوک‌ها متوجه افت فشار حاصل از تولید نمی‌شوند. در این حالت حتی اگر فرض شود که مایع تشکیل شده در شکاف‌ها از تحرک‌پذیری بالایی برخوردار باشد، مایع تشکیل شده در لبه‌های بلوک‌ها تقریباً غیر قابل حرکت است. بنابراین، مایع تشکیل شده در لبه‌های بلوک‌ها محدودیت قابل ملاحظه‌ای در تولید گاز درونی بلوک‌ها ایجاد خواهد کرد و مایع هرگز در درون بلوک‌ها تشکیل نشده و گاز آنها هم به همین ترتیب تولید نخواهد شد [۱۵].



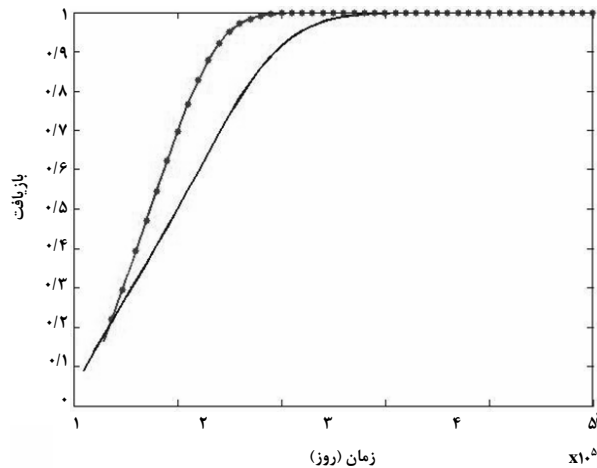
شکل ۲۰- عملکرد افت فشار اولیه در یک مخزن شکافدار

طبیعی گاز میعانی [۱۵]



شکل ۲۱- ظاهر شدن میعان در مخازن شکافدار طبیعی

گاز میعانی [۱۵]



شکل ۱۹- بازیافت اتان از مخزن با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی در تراوایی 0.001 md (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر نمودن آن می‌باشد)

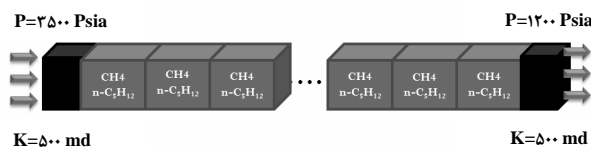
با مقایسه شکل‌های (۱۲) تا (۱۹) می‌توان به این نتیجه رسید که نفوذ مولکولی در این حالت همچون حالت قبل، خود را در تراوایی‌های کمتر از 0.01 میلی‌داریسی نشان می‌دهد به طوری که می‌توان بیان کرد که در تراوایی‌های کمتر از 0.0001 میلی‌داریسی، گرایان فشاری هیچ نقش مؤثری در تولید هیدروکربن از خود نشان نمی‌دهد. در حالت بعد به بررسی نفوذ مولکولی در حالت دو فازی و دو جزئی پرداخته می‌شود.

۱۰- حالت سوم: بررسی نفوذ مولکولی در مخزن دو جزئی و دو فازی

مرحله اولیه افت فشار در یک مخزن شکافدار طبیعی گاز میعانی در شکل (۲۰) نشان داده شده است. در طول تولید از مخزن شبکه شکاف در معرض سریع‌تر افت فشار قرار خواهد گرفت و بعد از گذشت مدت کافی از تولید و با برقراری گرایان فشاری مناسب تمامی سیال شکاف‌ها تولید شده که در این هنگام سیال (گاز) از بلوک‌ها به داخل شکاف‌ها به همان صورتی که در (شکل ۲۰) نشان داده شده است تخلیه می‌شود [۲].

در یک مخزن شکافدار به محض اینکه فشار مخزن به زیر فشار شبنم افت پیدا کند مایع در مخزن تشکیل می‌شود. از آنجا که نقاطی مانند شکاف‌ها و لبه‌های بلوک‌های ماتریس، در معرض افت فشار بیشتری می‌باشند، در این نقاط، فشار سریع‌تر افت پیدا می‌کند

شده [۱۶] و همچنین داده‌های تراوایی نسبی و فشار موئینگی مرجع [۲] در شبیه‌سازی به کار گرفته شده است. شکل (۲۳) طرح اجمالی تک ماتریس بلوک در نظر گرفته شده در این حالت را نشان می‌دهد.

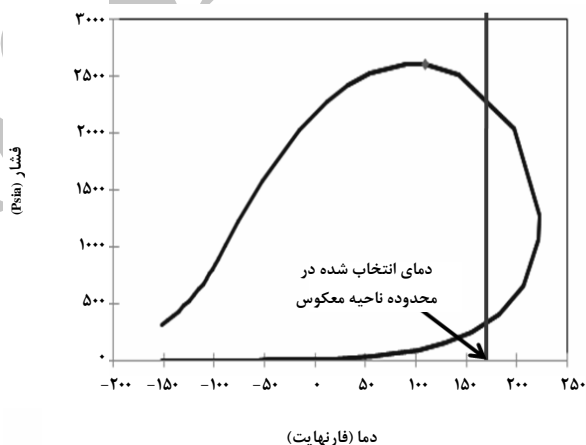


شکل ۲۳- طرح اجمالی یک ماتریس بلوک تک بُعدی، دو جزئی و دو فازي که در سمت چپ آن تزریق و از سمت راست آن تولید می‌شود

شکل‌های (۲۴) تا (۳۷) به بررسی اثر نفوذ مولکولی بر روی توزیع پارامترهای مختلف می‌پردازند. همانگونه که مشاهده می‌شود در شکل‌های (۲۴) و (۲۵) که برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ میلی‌داری در نظر گرفته شده‌اند؛ هیچ تفاوتی بین حالت‌های بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و در نظر گرفتن نفوذ مولکولی مشاهده نمی‌شود. نکته جالبی که در شکل‌های (۲۶) و (۲۷) مشاهده می‌شود این است که در زمانی که تنها جریان تک فازي در مخزن داشته باشیم در این تراوایی (۰/۱ میلی‌داری) نسبتاً بالا برای نفوذ مولکولی هیچ تفاوتی بین در نظر گرفتن نفوذ و یا نادیده گرفتن آن مشاهده نمی‌شود اما در حالتی که دو فاز در مخزن تشکیل شده است این تفاوت مشاهده می‌شود. شاید این تفاوت در شکل‌های (۲۶) و (۲۷) خیلی اساسی به نظر نرسد اما توجه به مرتبه‌های محورهای عمودی که در نمودار تولید کلی گاز از مرتبه 10^5 و در نمودار کلی میعان از مرتبه 10^7 می‌باشند، این تفاوت قابل توجه‌تر نمایان می‌شود. دو شکل (۲۸) و (۲۹) به ترتیب تولید کلی گاز و میعان را بعد از ۶۰۰ روز شبیه‌سازی نشان می‌دهند. در این شکل‌ها تفاوت بین حالتی که از نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و یا صرف نظر شده به وضوح نشان داده شده است. به عنوان مثال شکل (۲۸) حاکی از آن است که ۶۰۰ روز پس از تولید، در حالتی که از نفوذ مولکولی صرف نظر شده است تولید کلی گاز از مقدار ۳۱۳ MMScf به ۲۳۳ MMScf به اشتباه تخمین زده خواهد شد. بنابراین با توجه به این مطلب می‌توان بیان کرد که بر خلاف نتیجه‌ای که آیلان در تز دکترای خود در حالت تولید طبیعی از مخازن گاز میعانی شکافدار

در شکل (۲۱)، میعان نامطلوب زیادی اطراف لبه‌های ماتریس بلوک‌ها را پوشش داده است و قسمت اعظمی 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 مولکولی از اهمیت خاصی برخوردار خواهد شد به طوری که مکانیزم اصلی تولید از مخزن را به خود اختصاص می‌دهد [۱۵].

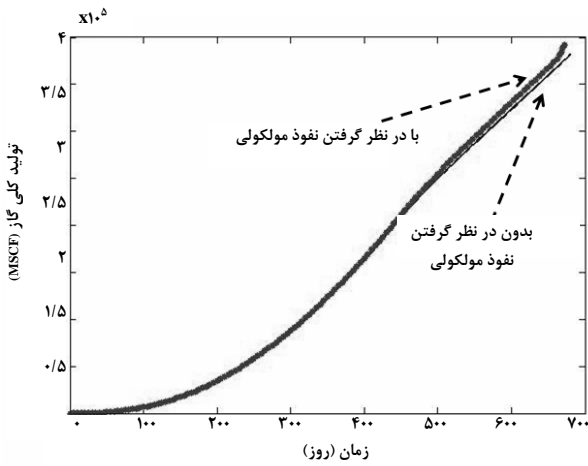
به جهت مدل‌سازی چنین رفتاری در ماتریس بلوک، ترکیب سیال اشباع کننده آن را به صورت ۸۰٪ متان و ۲۰٪ نرمال پنتان تغییر می‌دهیم. نمودار فازی این ترکیب در شکل (۲۲) آورده شده است. دما در این مخزن ۱۷۵ درجه فارنهایت در نظر گرفته شده است که با توجه به شکل (۲۲)، سیال در چنین دمایی رفتار میعانی از خود نشان می‌دهد.



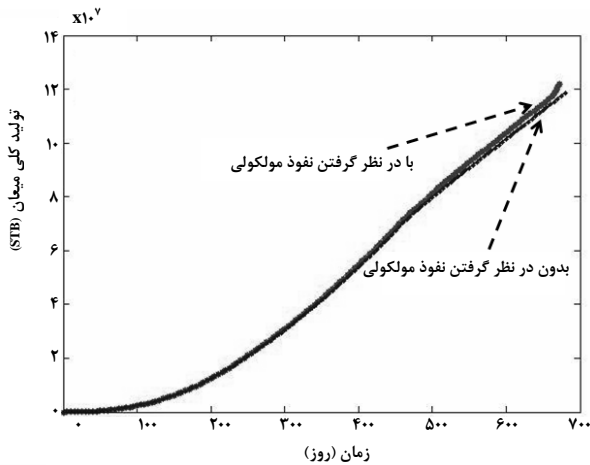
شکل ۲۲- نمودار فازی گاز میعانی سیال اشباع شده ماتریس بلوک و دمای در نظر گرفته شده

در این حالت به جهت بررسی بهتر نفوذ، طول ماتریس بلوک را از ۶۲۰ فوت در نظر گرفته شده در شکل (۴) به ۱۰۰۰ فوت تغییر می‌دهیم. که در این حالت ۳۶ شبکه بلوک با طول ۲۴ فوت در قسمت میانی ماتریس بلوک و ۱۲ شبکه بلوک به اندازه ۵ فوت هم در قسمت تزریقی و هم در قسمت تولیدی ماتریس بلوک در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر ماتریس بلوک در نظر گرفته شده به ۶۰ شبکه بلوک تقسیم شده است. از معادله حالت پنگ^۱ و رابینسون^۲ برای رفتار سیال (PVT) و تعادل ترمودینامیکی استفاده

1. Peng
2. Robinson



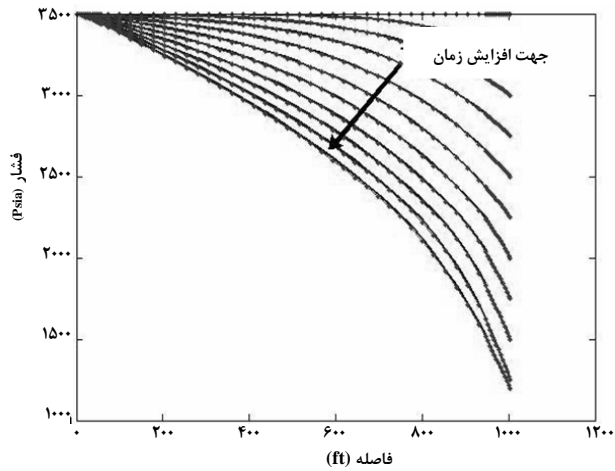
شکل ۲۶- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)



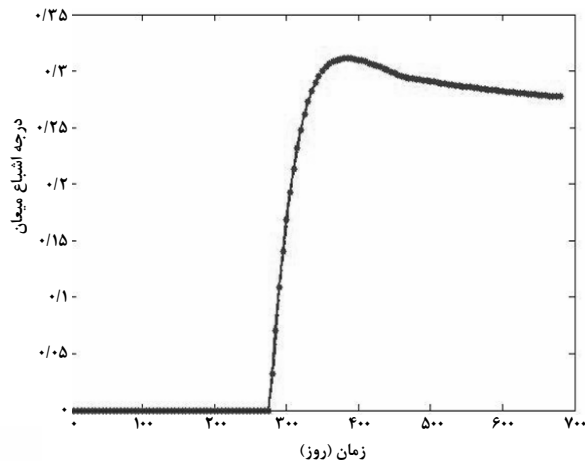
شکل ۲۷- تولید کلی میعان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)

با کم شدن تراوایی ماتریس بلوک‌ها، شدت تفاوت بین توزیع‌های با نفوذ مولکولی و بدون آن بیشتر خواهد شد، شکل (۳۰) و (۳۱) به ترتیب توزیع فشاری و درجه اشباع میعان در یک گرید بلوک خاص را برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۰۰۱ میلی‌داریسی نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۳۱) می‌توان به این نتیجه رسید که نفوذ در شروع میعان در مخزن تا اندازه‌ای می‌تواند مؤثر باشد. به‌طوریکه با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی در مخزن، شروع میعان در شبکه بلوک ۴۸ بعد

به آن رسیده بود (پدیده نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک‌های با تراوایی کمتر از ۰/۰۱ میلی‌داریسی مؤثر خواهد بود)؛ در حالت تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکافدار پدیده نفوذ در ماتریس بلوک‌های با تراوایی یک مرتبه بیشتر از آن یعنی در تراوایی ۰/۱ میلی‌داریسی تأثیر خود را به‌صورت چشمگیری نشان می‌دهد.

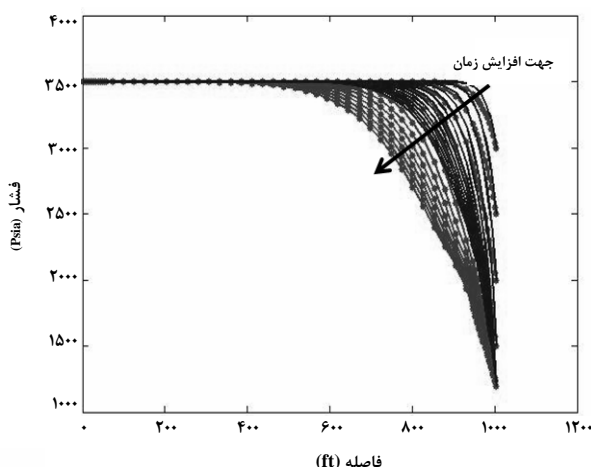


شکل ۲۸- توزیع فشاری با و بدون نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md (در این شکل توزیع با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با خط نقطه‌دار نشان داده شده است که بر روی خط بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی واقع شده است)

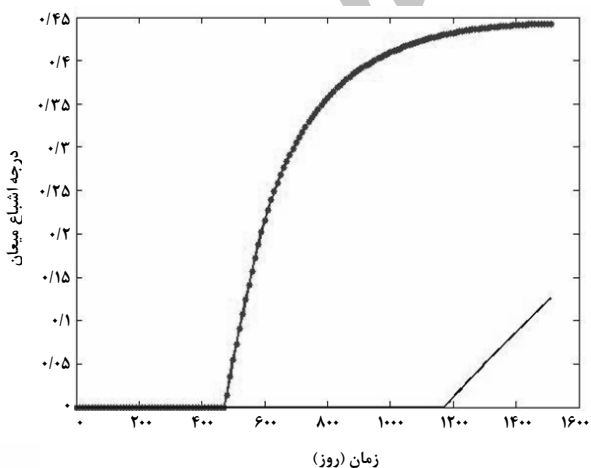


شکل ۲۹- درجه اشباع در شبکه بلوک ۴۸، با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md (در این شکل توزیع با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با خط نقطه‌دار نشان داده شده است که بر روی خط بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی واقع شده است)

نشان می‌دهد که حتی در حالتی که در مخزن تنها یک فاز وجود دارد، این تفاوت قابل توجه می‌باشد و به این دلیل که در حالت دو فازی این تفاوت در مقیاس بزرگتری می‌باشد بنابراین به نظر می‌رسد که هیچ تفاوتی بین رفتار مخزن در حالت تک فازی بدون در نظر گرفتن نفوذ و یا با در نظر گرفتن آن مشاهده نمی‌شود، در صورتی که خلاف آن در شکل (۳۳) نشان داده شد. تمامی مطالب مربوط به شکل‌های (۳۲) و (۳۳) در مورد شکل‌های (۳۴) و (۳۵) نیز صادق می‌باشند.

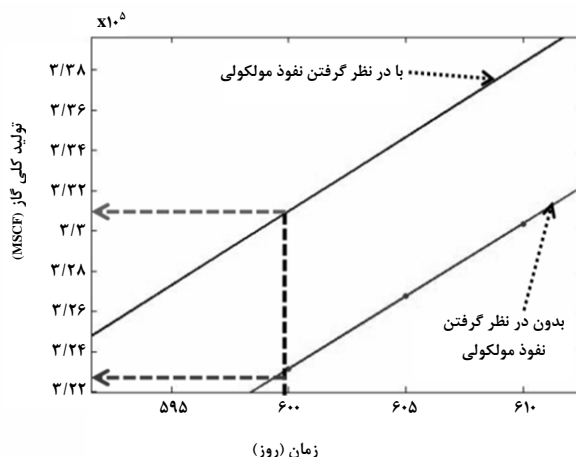


شکل ۲۸- توزیع فشاری با و بدون نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک با تراوانی ۰/۰۰۱ md (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر نمودن آن می‌باشد)

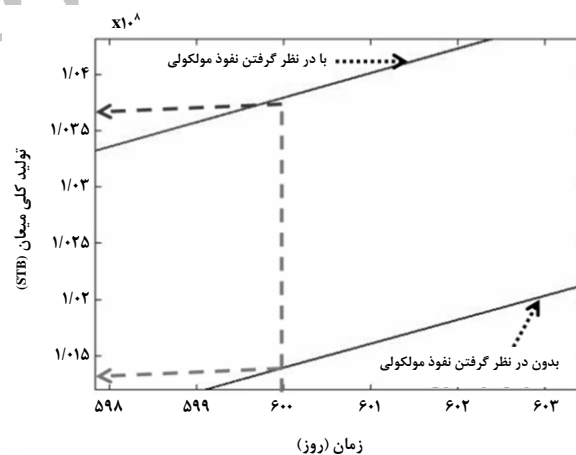


شکل ۲۹- درجه اشباع در شبکه بلوک ۰/۴۸، با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوانی ۰/۰۰۱ md (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می‌باشد)

از ۵۰۰ روز تولید از آن ماتریس بلوک اتفاق می‌افتد در حالی که این زمان برای حالت بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی تقریباً ۱۱۰۰ روز است.



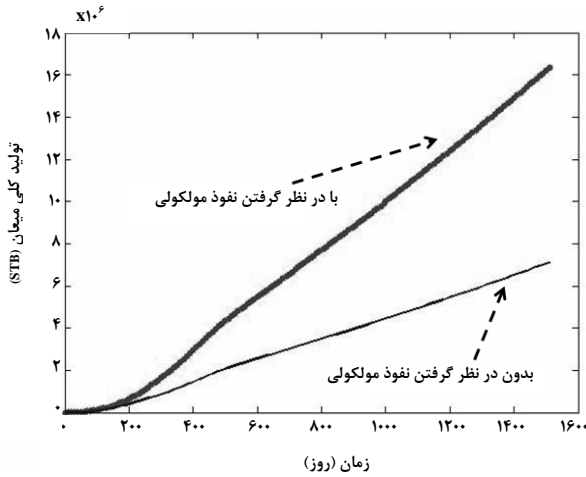
شکل ۳۰- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوانی ۰/۱ md، در یک زمان مشخص شبیه‌سازی (در این شکل خطوط با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)



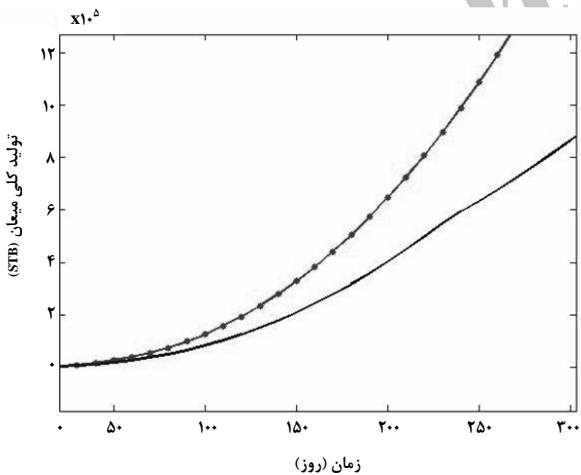
شکل ۳۱- تولید کلی میعانی با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوانی ۰/۱ md، در یک زمان مشخص شبیه‌سازی (در این شکل خطوط با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)

در شکل (۳۲) تولید کلی گاز از این ماتریس بلوک بعد از تقریباً ۴ سال نشان داده شده است. شاید اینگونه به نظر رسد که در زمان‌های حدود ۲۰۰ روز که از آن به بعد این دو نمودار از هم فاصله گرفته‌اند تنها پدیده نفوذ خود را نشان می‌دهد در حالی که با کمی بزرگنمایی بر روی این نمودار به شکل (۳۳) می‌رسیم که به وضوح

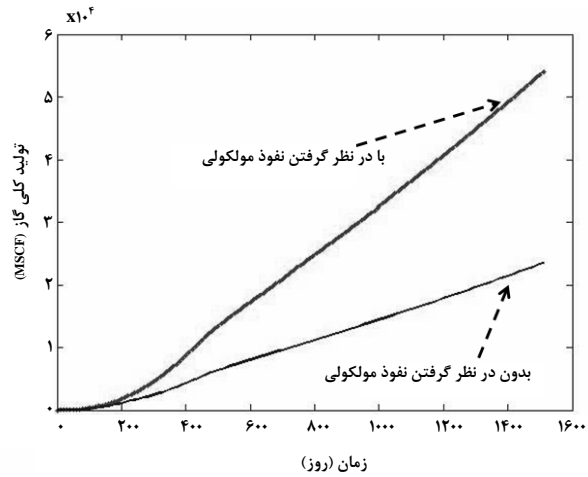
است و یا با توجه به شکل (۳۷) که درجه اشباع میعان را در شبکه بلوک ۵۴ نشان می‌دهد، در حالتی که نفوذ مولکولی در نظر گرفته شود، بعد از تقریباً ۲۰۰ روز تولیدی تشکیل میعان در این شبکه بلوک ظاهر می‌شود در حالی که در حالت بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی حتی تا پایان زمان شبیه‌سازی (حدود ۴ سال)، میعانی در آن شبکه بلوک مشاهده نمی‌شود.



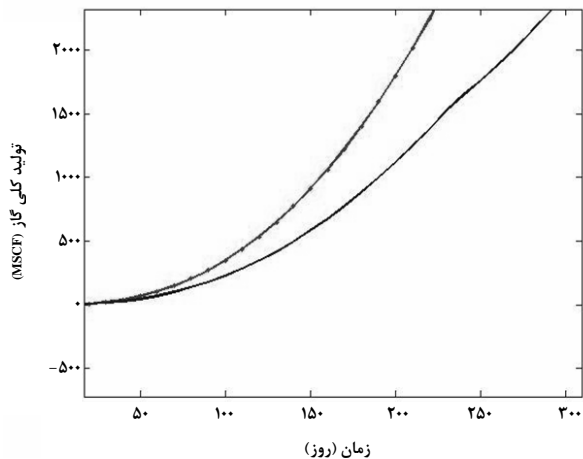
شکل ۳۲- تولید کلی میعان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوانی $0/001$ md (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)



شکل ۳۳- تولید کلی میعان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوانی $0/001$ md (در این شکل خطوط مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر نمودن آن می‌باشد)

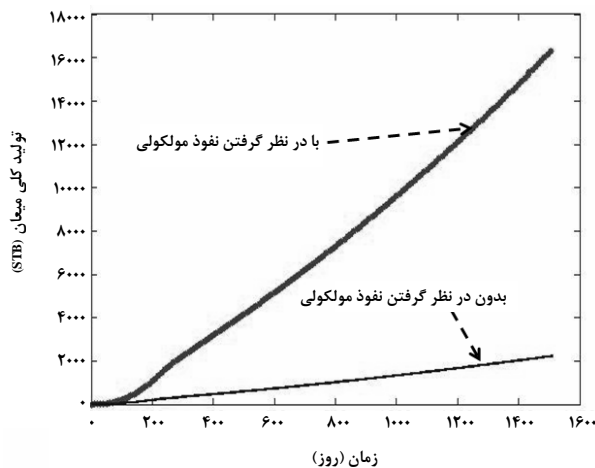


شکل ۳۴- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوانی $0/001$ md (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)

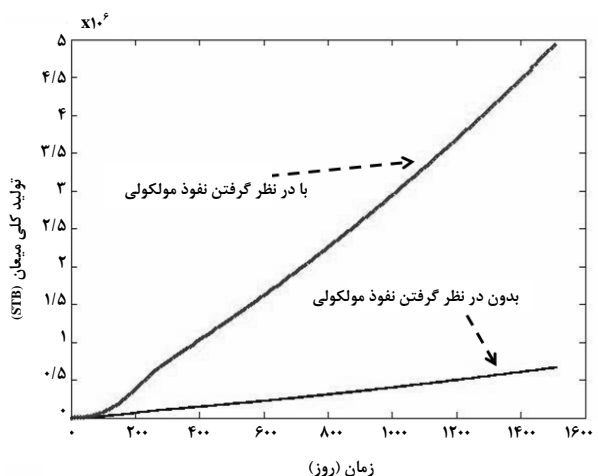


شکل ۳۵- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوانی $0/001$ md (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می‌باشد)

شکل‌های (۳۶) تا (۳۹)، به بررسی نفوذ مولکولی در ماتریس بلوکی با تراوانی $0/0001$ md می‌پردازند. در حالت تراوانی‌های خیلی کمتر ($0/0001$ میلی‌داریسی) همانگونه که مشاهده می‌شود تفاوت‌ها اینقدر قابل توجه است که حتی اولین توزیع گام زمانی در شکل (۳۶) در حالتی که نفوذ در نظر گرفته شده است از توزیع فشاری بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی در مخزن بیشتر پیشرفت نموده



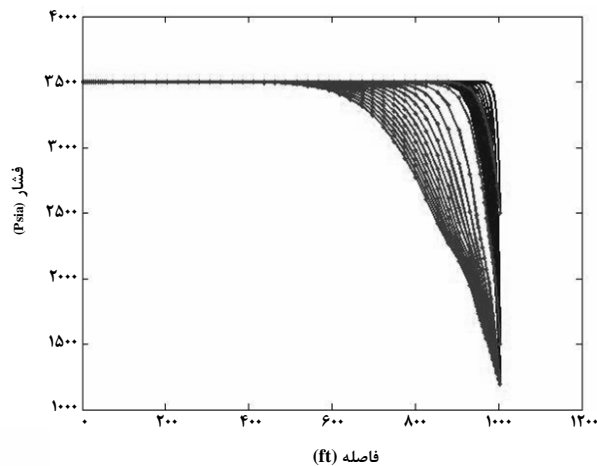
شکل ۳۸- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوایی 0.0001 md (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)



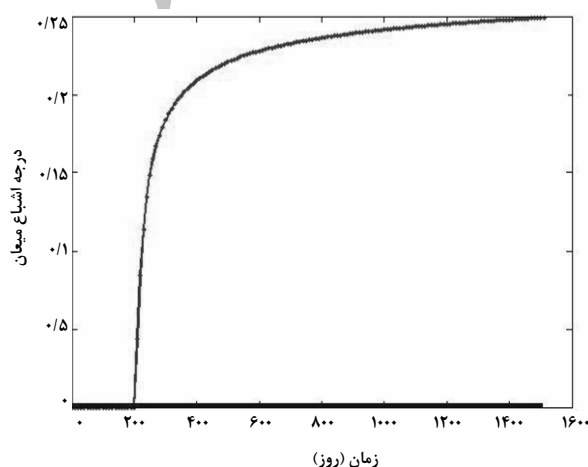
شکل ۳۹- تولید کلی میعانی با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوایی 0.0001 md (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)

۱۱- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مهمترین نتیجه‌ای که با توجه به کار در این مقاله می‌توان به آن اشاره نمود این است که پدیده نفوذ مولکولی 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 است [۲]؛ در ماتریس بلوک‌های با تراوایی کمتر از 0.1 میلی‌داریسی مؤثر بوده در حالی که اگر مخزن به صورت



شکل ۳۶- توزیع فشاری با و بدون نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک با تراوایی 0.0001 md (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می‌باشد)



شکل ۳۷- درجه اشباع در شبکه بلوک 0.0001 md، با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوایی 0.0001 md (در این شکل خطی که بر روی محور افقی واقع شده است مربوط به حالتی می‌باشد که در آن از نفوذ مولکولی صرف نظر شده و خط نقطه‌دار دیگر مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده است)

نکته جالبی که در شکل‌های (۳۸) و (۳۹) مشاهده می‌شود این است که در این تراوایی پایین در نظر گرفته شده برای ماتریس بلوک، نفوذ مولکولی حتی در حالت تک فازی بسیار قابل توجه است زیرا بین دو نموداری که نفوذ مولکولی در آنها در نظر گرفته شده و یا نادیده گرفته شده است از همان ابتدا و بدون بزرگنمایی تفاوت مشاهده می‌شود.

- Diffusion in Fractured Media for Gas Injection and Recycling Schemes", SPE Paper, No. 103292, pp. 1, (2006).
- [4] Warren, R. B. and Root, P. J., "The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs", SPE Journal, Trans. AIME, v. 234, pp. 245-255, (1963).
- [5] Craft B. C., Hawkins M., and Terry Re., "Applied Petroleum Reservoir Engineering", 2nd edition, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, NJ, pp. 8-10, (1990).
- [6] Moses, P. L. and 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 Reprint, First edition, Richardson, TX, ISBN 1-55563-010-3, pp.350-400, (1992).
- [7] Papay, J., "Development of Petroleum Reservoirs", Akadémiai Kiadó Publishers, ISBN 963-05-7917-8, First edition, pp. 53-75, (2003).
- [8] Yamamoto R. H., Padgett J. B., Ford W.T., and Boubeguir A., "Compositional Reservoir Simulator for Fissured Systems - The Single-Block Model", SEE Journal, pp. 113-128, (1971).
- [9] Kepple, J. and 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, pp. 2-3, (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, pp. 269-280, (1976).
- [11] Van-Golf-Racht T. D., "Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering", Developments in Petroleum Science volume 12, Elsevier, New York, NY, First edition, pp.216-320, (1982).
- [12] Holland, C. D. "Fundamentals of Multi-component Distillation". McGraw Hill Chemical Engineering Series, [TEACHER'S EDITION], First edition, pp. 103-150, (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, pp. 63-120, (2009).
- [14] Cussler, E. L., "Diffusion: Mass transfer in Fluid Systems", Third reprint, Second edition, Cambridge University Press, New York, NY, ISBN 0-521-56477-8, pp. 153-180, (2001).
- [15] Ayala, L. F., Ertekin, T., and A. Adewuni, M., 2004. "Analysis of Recovery Mechanism for Naturally Fractured Gas-Condensate Reservoirs". SPE paper 94856, 90010, pp. 5, (2006).
- [16] Danesh A., "PVT and Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids", 3rd, Science Direct Publishing, First edition, pp. 141-142, (1998).
- [17] Aguilera, R., "Naturally Fractured Reservoirs". PennWell Publishing Company, Tulsa, Ok, ISBN 0-87814-449-8, 1st Edition, pp. 100-105, (1995).

دو فازی عمل کند نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک‌های با تراوانی یک مرتبه بیشتر یعنی ۰/۱ میلی‌داری تأثیرگذار می‌باشد.

در شبیه‌سازهای عددی کار، بیشترین زمان برای انجام محاسبات در محاسبه ماتریس جاکوبین صرف می‌شود. بنابراین هر روشی که بتواند این ماتریس را با تعداد فراخوانی کمتر و یا بدون فراخوانی تابع محاسبه نماید، سرعت اینگونه شبیه‌سازها را به‌صورت 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 ناخطی مورد نیاز در شبیه‌سازی استفاده شود.

هر چه ضریب نفوذ مولکولی بیشتر باشد، پالس فشاری با سرعت بیشتری پیشرفت می‌کند.

ترتیب معادلات در ساختن ماتریس جاکوبین در شبیه‌سازی عددی ترکیبی بسیار مهم است. به‌طوری‌که یک ترتیب خاص در این شبیه‌سازی منجر به طولانی شدن فرایند شبیه‌سازی و یا حتی وگرا شدن آن با حدس اولیه در نظر گرفته شده می‌شود در حالی‌که ترتیبی دیگر با حدس‌های اولیه معقول همگرا شده و یا سرعت همگرایی بسیار بالایی دارد. این گونه به نظر می‌رسد که این ترتیب بسته به نوع مسئله متفاوت است. بنابراین اگر در شبیه‌سازی عددی تغییر حدس اولیه هیچ تأثیری در تغییر واگرایی به همگرایی نداشته باشد، ترتیب معادلات می‌تواند مؤثر واقع شود.

۱۲- 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، ابراز می‌نمایند.

مراجع

- [1] Ertekin, T., King, G, and Schwerer, F., "Dynamic Gas Slippage: A Unique Dual Mechanism Approach to the Flow of Gas in Tight Formations", SPE Paper 2045, pp. 3-4, (1986).
- [2] Ayala L. F., "Compositional Modeling of Naturally-Fractured Reservoirs in Multi-mechanistic Flow Domains", PhD dissertation. Penn State U., University Park, Pennsylvania, pp.2-30, (2005).
- [3] Hoteit, H., Firoozabadi, A., "Numerical Modeling of