

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

پژوهش‌فنت

سال بیست و یکم

شماره ۶۵

صفحه ۱۷-۳، ۱۳۹۰

ابوالقاسم کاظمی نیاکرانی<sup>۱\*</sup>، شهاب گرامی<sup>۲</sup>، سیروس قطبی<sup>۱</sup> و عبدالنبی هاشمی<sup>۳</sup>

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

## 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<sup>۱</sup> و مدل‌سازی ترکیبی<sup>۲</sup> تقسیم می‌شود. شبیه‌سازی مخازن هیدروکربنی به منظور پیش‌بینی رفتار مخازن، یکی از مسائل کلیدی در صنعت نفت می‌باشد؛ 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 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 این که تخمین خوبی از رفتار مخزن ارائه دهد از سرعت بالایی

## 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

1. Black Oil Simulator  
2. Compositional Simulation

ملکولی در نظر گرفته نشده است، تزریق در فشار بالاتر را پیشنهاد می‌کند در حالی که بر اساس مدل ورن<sup>۶</sup> و روت<sup>۷</sup> [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 به دنبال 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 تراوانی ماتریس بلوک‌های خیلی کم عملاً گرادیان فشاری سهم زیادی در تولید هیدروکربن نخواهد داشت و عمده هیدروکربن تولید شده به دلیل 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 بحرانی تر است. با تولید از یک مخزن گاز میعانی شکاف‌دار و افت فشار آن به زیر فشار شبنم<sup>۸</sup> 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 فیکسی می‌شود که به همراه تولید دارسی بر روی مخزن تأثیر می‌گذارد. تشکیل این سد و غالب بودن تولید فیکسی در مخازن شکاف‌دار با بلوک‌های تراوانی پایین، شدیدتر و بحرانی تر خواهد بود [۲].

در این تحقیق، پدیده نفوذ ملکولی به صورت توده‌ای

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

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 این گونه 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> شکاف‌دار به دست آوریم تا در شبیه‌سازی‌های بعدی در بالای این حد، از نفوذ ملکولی به منظور 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<sup>۳</sup> و همکاران به جامعه علمی ارائه شد [۱]. او یک طیف به منظور چگونگی اهمیت هر کدام از دو عامل تولید سیال (دارسی و فیکسی) را برای مخازن معمولی پیشنهاد داد. اما از آنجایی که کار او در مخازن معمولی با تراوانی<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> 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 تراوانی ماتریس بلوک‌های خیلی کم، شبیه‌سازی که در آن نفوذ

شکاف‌دار در حالت ایده‌آل به صورت تعدادی ماتریس بلوک در یک شبکه از شکاف‌ها تصور می‌شوند. این مدل معمولاً به نام مدل "جبه قندی"<sup>۸</sup> شناخته می‌شود که برای اولین بار توسط ورن و روت در سال ۱۹۶۳ ارائه شد [۴]. 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 [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 به کار گرفته شده، این مدل‌ها در مقاله ارائه نشده‌اند.

### مطالعه تک بلوکی مخازن شکاف‌دار

مخازن شکاف‌دار طبیعی، ساختارهای بسیار پیچیده‌ای دارند که جزئیات آنها هنوز به صورت یک مجهول باقی مانده 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 مسیریایی 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

فرض می‌شود. به این صورت که گرادیان چگالی گاز در یک بلوک و بلوک مجاور آن باعث حرکت از نوع فیزیکی می‌شود و همان‌گونه که آبالا 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. گرفت<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> و نقطه میعانی بحرانی<sup>۳</sup> سیال مخزن می‌باشد که منجر به نشان دادن رفتاری تحت عنوان رفتار معکوس<sup>۴</sup> در این گازها می‌شود. بر اساس مطالعات موسز<sup>۵</sup> و دانهو<sup>۶</sup> 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 جریان 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 به دست می‌آید. بر اساس مطالعات پاپی<sup>۷</sup> در سال ۲۰۰۳، بیش از ۵۰ درصد از هیدروکربن‌های تولید شده در جهان از مخازن شکاف‌دار می‌باشد [۷]. مخازن

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

بلوک در نظر گرفته شده، به طور کامل به وسیله شکاف‌ها احاطه شده باشد و ارتباط آن با سایر بلوک‌ها، به طور کامل قطع شده و یا قابل اغماض باشد. با فرض این شرایط، می‌توان به جای شبیه‌سازی کامل یک مخزن شکاف‌دار، تنها به شبیه‌سازی تک بلوک آن بسنده نمود [۱۱].

### مراحل کار

در این تحقیق به منظور بررسی دقیق 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، ماتریس بلوکی را در نظر می‌گیریم که تنها از متان اشباع شده است. بدیهی است که در این حالت، تزریق متان در سمت 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، ماتریس بلوک را به صورت دو جزئی متان و اتان که با درصد جزئی یکسان اشباع شده، در نظر می‌گیریم. در این حالت با این فرض که هدف از تولید این مخزن بازیافت اتان است، تزریق متان در سمت چپ مخزن قابل توجیه می‌باشد. 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 نمی‌دهد، در آخرین مرحله به منظور بررسی تأثیر نفوذ در حالت دو فاز، ترکیب آن را به ۸۰٪ متان و ۲۰٪ نرمال پنتان تغییر می‌دهیم که در دمای در نظر گرفته شده برای مخزن (۱۷۵°F) رفتار معکوس از خود نشان می‌دهد.

### معادله ترکیبی برای شبیه‌سازی در یک سیستم جریان‌ی چند مکانیزی

در این کار از فرمولاسیونی که آیالا در تز دکترای خود اثبات و استفاده نموده، در شبیه‌سازی استفاده شده است.

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

می‌توان بیان کرد که شکاف‌ها به‌عنوان شرایط مرزی برای بلوک‌های ماتریس عمل می‌کنند. نوع محیط اطراف سنگ یک ماتریس بلوک، چگونگی عملکرد و بازیافت هیدروکربن را از بلوک خاص تعیین می‌کند. با فرض کل سیستم 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 هر تک بلوک می‌تواند اطلاعاتی کلیدی را در رابطه با کل مخزن شکاف‌دار ارائه دهد.

در مدل‌سازی مخازن شکاف‌دار، محققان مختلفی با استفاده از مدل تک بلوکی به اطلاعات بسیار مفیدی در زمینه رفتار کلی این مخازن دست پیدا نموده‌اند که به برخی از آنها در ادامه اشاره می‌شود.

یاماموتو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۱۹۷۱ به مدل‌سازی ترکیبی یک تک بلوک دو بعدی و دو فاز برای مطالعه رفتار جریانی سیال در یک سیستم شکاف‌دار پرداختند. آنها همچنین از مدل خود به منظور آنالیز عملکرد بلوک‌هایی با اندازه‌های مختلف در شرایط افت فشار و حفظ فشار پرداختند [۸].

کلیپ<sup>۲</sup> و مورس<sup>۳</sup> یک مدل دو بعدی 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 وسیله شکاف‌های افقی و عمودی احاطه شده است. در این تحقیق، فاز نفت و آبی که مابین ماتریس با شکاف‌ها جابجا می‌شود، محاسبه گردیده است [۹].

پیسمن<sup>۴</sup> در سال ۱۹۷۶ بیان نمود که رفتار مخازن شکاف‌دار را می‌توان با مطالعه رفتار و عملکرد بلوک ماتریس در شرایط مختلف مرزی یا شرایط محیطی شکاف، مورد بررسی قرار داد. در این کار، او به مطالعه جریان همرفت<sup>۵</sup> و انگشتی شدن<sup>۶</sup> به دلیل پدیده معکوس چگالی<sup>۷</sup> 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 ضرایب معمول نفوذ ناپایدار، اتفاق می‌افتد [۱۰].

ون گولف<sup>۸</sup> در سال ۱۹۸۲ نشان داد که فرض اساسی در مطالعه تک بلوکی مخازن شکاف‌دار، این است که باید تک

۶- نفوذ ملکولی 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 فیکسی می‌شود و اختلاف غلظت یک ملکول در یک بلوک و بلوک مجاور آن، در تولید فیکسی تأثیری ندارد.

به جهت اینکه در حل سیستم معادلات بالا به حالت تکین<sup>۲</sup> برخورد نکنیم، لازم است که در همین جا برابری تعداد معادلات و مجهولات این سیستم مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که ترکیب مورد نظر در این تحقیق حداکثر دو جزئی می‌باشد، در هر گرید<sup>۳</sup> بلوک دو معادله نوشته می‌شود. بنابراین برای این که به حالت تکین بر نخوریم، در هر گرید بلوک حداکثر دو متغیر مستقل می‌توان تعریف نمود. چون حداکثر دو جزء در ترکیب مورد نظر در این تحقیق موجود می‌باشد، تنها کسر مولی یک جزء در هر بلوک می‌تواند به عنوان مجهول تعریف شود و کسر مولی جزء دیگر با استفاده از پایستگی مولی بین اجزاء محاسبه می‌شود. بنابراین مجهول دیگر در هر بلوک، فشار سیال می‌باشد. با داشتن فشار و کسر مولی کلی ترکیب در هر گرید بلوک، می‌توان محاسبات فلش را انجام داد و به دنبال آن درجه اشباع و دیگر پارامترهای مورد نیاز را محاسبه نمود. در حالتی که ترکیب موجود در مخزن به صورت  $n_c$  جزء باشد و مخزن به صورت  $n_{blocks}$  گسسته‌سازی شده باشد، برای شبیه‌سازی آن باید  $n_c \times n_{blocks}$  معادله ساخته شده و به صورت همزمان حل شوند. معادله ترکیبی در سیستم‌های چند مکانیزمی، هم در حالت تک فازی و هم در حالت دو فازی کاربرد دارد و بدیهی است که در حالت تک فازی، ترم‌های مربوط به میعان از معادله بالا حذف می‌شود. همچنین در حالت تک جزئی، ترم‌های کسر مولی برابر با یک در نظر گرفته می‌شود.

### تکنیک‌های حل عددی

بیشترین وقت یک شبیه‌ساز عددی در تشکیل ماتریس جاکوبین صرف می‌شود. به عنوان مثال در یک شبیه‌سازی یک مخزن ۱۰۰ گرید بلوکی (توجه شود که در

1. Flash  
2. Singular  
3. Grade

در زیر تنها فرمولاسیون کلی آن آورده شده و از ارائه چگونگی گسسته‌سازی معادلات صرف نظر می‌شود [۲]:

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

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<sup>3</sup>)

$A_x$ : سطح عمود بر جریان در جهت x، (ft<sup>2</sup>)

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

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

$\mu_p$ : گرانروی فاز p، (cP)

$\Phi_p$ : پتانسیل هابریگ فاز p (psia)

$y_m$ : کسر مولی جزء m در فاز گاز

$\Phi$ : تخلخل

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

$D_{eff}$ : ضریب نفوذ ملکولی مؤثر فاز گاز، (ft<sup>2</sup>/day)

$V_b$ : حجم ماتریس بلوک در نظر گرفته شده، (ft<sup>3</sup>)

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 سریع‌تر از سرعت حرکت سیال اتفاق خواهد افتاد.

۲- تعادل ترمودینامیکی می‌تواند به کمک محاسبات فلش<sup>۱</sup> در فشار و دمای مخزن و با استفاده از ترکیب کلی مخزن تعیین شود.

۳- دمای مخزن ثابت می‌باشد و از گرادیان دمایی زمین صرف نظر می‌شود.

۴- برای جریان سیال در مخزن از قانون داریسی (برای جریان تحریک فشاری) و قانون فیک (برای جریان تحریک غلظتی) استفاده می‌شود.

۵- نفوذ ملکولی در فاز مایع، کمک ناچیزی به حرکت سیال می‌کند. در حالی که 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].

شکاف‌ها را نشان می‌دهد که در سمت چپ با فشار ثابت ۴۱۰۰ psia تزریق متان و در سمت راست 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 ۳۰ ft است. عرض شکافها ۰/۱ ft است. مشخصات شکاف برای محاسبه ترم‌های تحرک‌پذیری در مرز بلوک‌ها و شکاف‌ها مورد نیاز می‌باشد. طول هر گرید بلوک در ابتدای ماتریس بلوک (قسمت تزریقی) و انتهای آن (قسمت تولیدی) به اندازه ۶ بلوک به طول ۵ ft و در فاصله بین این دو ۱۵/۶۲۵ ft در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، طول کلی ماتریس بلوک به عنوان نماینده مخزن شکاف‌دار ۶۲۰ ft فرض شده است. تراوایی شکاف‌ها در این کار ثابت و برابر با ۵۰۰۰ md در نظر گرفته شده است. در واقع مهم‌ترین تفاوتی که بین تک بلوک در نظر گرفته شده در این مطالعه با یک سیلاب‌زنی معمولی در مخزن وجود دارد، این است که تراوایی گریدهای در نظر گرفته شده به عنوان شکاف نسبت به تراوایی گریدهای ماتریس بلوک، بسیار بالا است و می‌توان فرض نمود که گرید بلوک اول و آخر نقش شکاف را بازی می‌کنند. در حالی که در سیلاب‌زنی معمولی یک مخزن، تراوایی همه گرید بلوک‌های در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی، هم مرتبه می‌باشد. پارامترهای متغیر در این حالت، تراوایی ماتریس و ضریب کلی نفوذ می‌باشد که به ترتیب در محدوده ۰/۰۰۱ md تا ۱ md و  $ft^2/day$  ۰ (حالت بدون نفوذ مولکولی) تا  $ft^2/day$  ۲۰ 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<sup>۲</sup> مقادیر بین  $ft^2/day$  ۹/۳ تا  $ft^2/day$  ۹۳ را در حالت استاندارد پیشنهاد نموده است [۱۴].

در شکل‌های ۲ تا ۴ پروفایل فشاری برای ماتریس بلوک با تراوایی‌های مختلف، رسم شده است که در این شکل‌ها، پیکان جهت‌دار بر روی پروفایل فشاری جهت حرکت آن را با گذر زمان نشان می‌دهد.

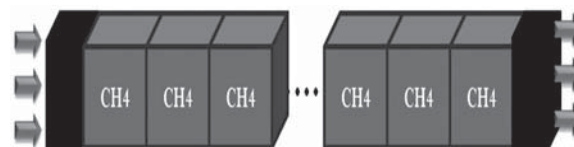
این مقاله، "ماتریس بلوک" همان تک بلوک در نظر گرفته شده به عنوان نماینده مخزن شکاف‌دار است در حالی که منظور از "گرید بلوک" یکی از گرید بلوک‌های شبیه‌سازی می‌باشد (ماتریس جاکوبین به صورت  $100 \times 100$  خواهد شد که برای تشکیل آن به صورت عددی لازم است که تابع، حداقل  $2 \times 10000$  بار فراخوانی تابع شود. به همین دلیل استفاده از تکنیکی که بتواند بدون فراخوانی مجدد تابع، این ماتریس را تشکیل دهد، سرعت شبیه‌سازی را دوچندان می‌کند. تکنیک برویدن<sup>۱</sup> [۱۲] با استفاده از ماتریس جاکوبین پیشین و دیگر پارامترهای مورد نیاز، سرعت شبیه‌سازی را حداقل ۲ برابر می‌کند.

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 شده است. بدین ترتیب در سطرهای فرد (اول، سوم و ...) ماتریس جاکوبین، مشتق معادلات نسبت به کسر مولی جزء اول در هر گرید بلوک (اول، دوم و ...) و در سطرهای (اول، دوم و ...) مشتق 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 می‌باشد که با هر حدس اولیه معقولی همگرا می‌شود در حالی که با تغییر ترتیب مشتق‌گیری حتی با حدس اولیه‌ای نزدیک به جواب اصلی نیز، همگرایی حاصل نمی‌شود [۱۳].

### حالت اول: بررسی نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک تک جزئی و تک فازی

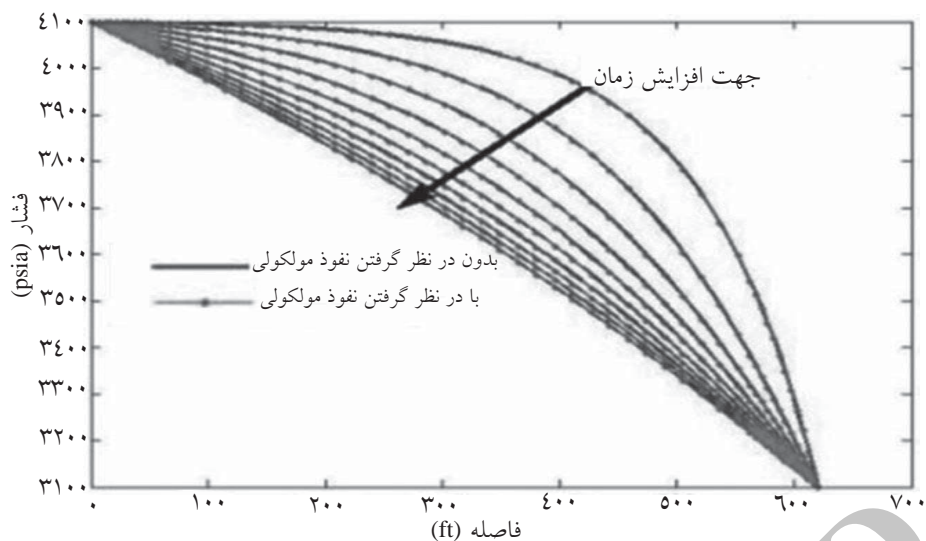
ماتریس بلوک در نظر گرفته شده در این حالت به صورت شکل ۱ است.

در این شکل قسمت‌های مشخص شده با رنگ تیره،

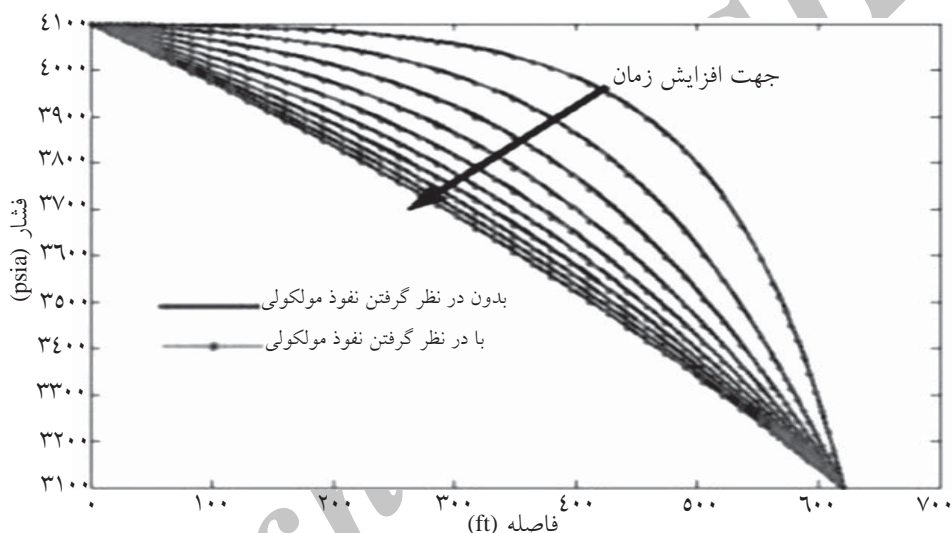


شکل ۱- شماتیک ماتریس بلوک در نظر گرفته شده در حالت تک جزئی و تک فازی

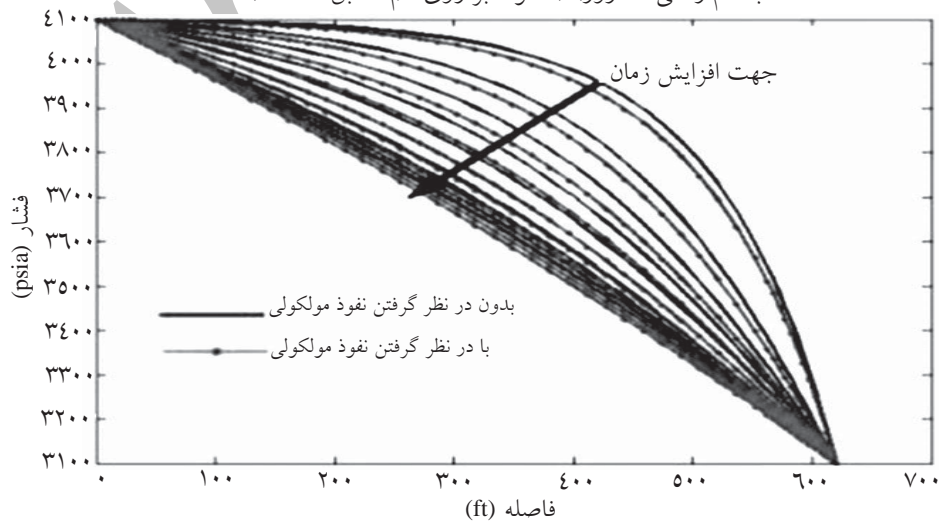
1. Broyden  
2. Cussler



شکل ۲- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۱ md (زمان شبیه سازی ۱ تا ۱۰ روز با گام زمانی ۱ روز) (خطوط بر روی هم منطبق شده‌اند).



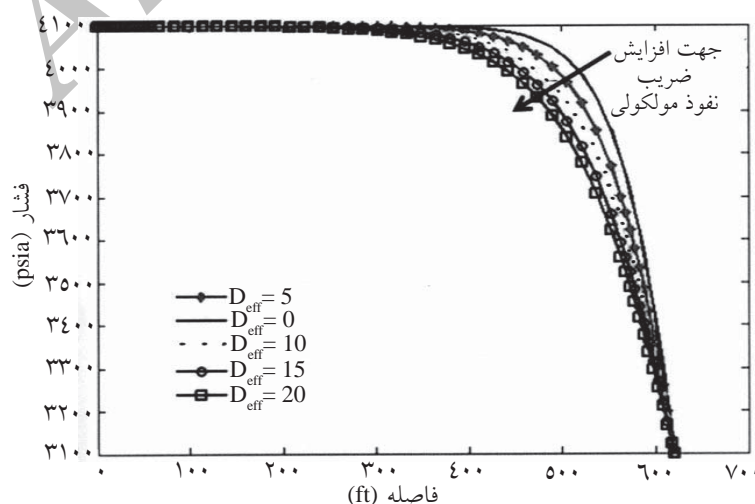
شکل ۳- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md (زمان شبیه سازی ۱۰ تا ۱۰۰ روز با گام زمانی ۱۰ روز) (خطوط بر روی هم منطبق شده‌اند).



شکل ۴- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۰۱ md (زمان شبیه سازی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ روز با گام زمانی ۱۰۰ روز)

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 ۶)، 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 جریان بر اساس کسر مولی گزارش می‌گردد.

بعد از اطمینان از درستی شبیه‌ساز در پیش‌بینی رفتار مخزن، به بررسی تأثیر نفوذ مولکولی بر کسر مولی گرید بلوک‌های ماتریس بلوک می‌پردازیم. شکل‌های ۷ و ۸ تأثیر نفوذ مولکولی بر روی پروفایل کسر مولی متان در تراوایی‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اختلاف در لحاظ نمودن نفوذ مولکولی، از تراوایی‌های  $0/01$  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 به کار گرفت و مقدار تولید شده اتان را در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با هم مقایسه نمود. خواننده می‌تواند برای مطالعه بیشتر به مرجع ۱۳ مراجعه نماید.



شکل ۵- تأثیر ضریب نفوذهای مختلف بر روی پروفایل فشاری در زمان شبیه‌سازی ۲۰۰ روز و تراوایی ماتریس بلوک  $0/01$  md

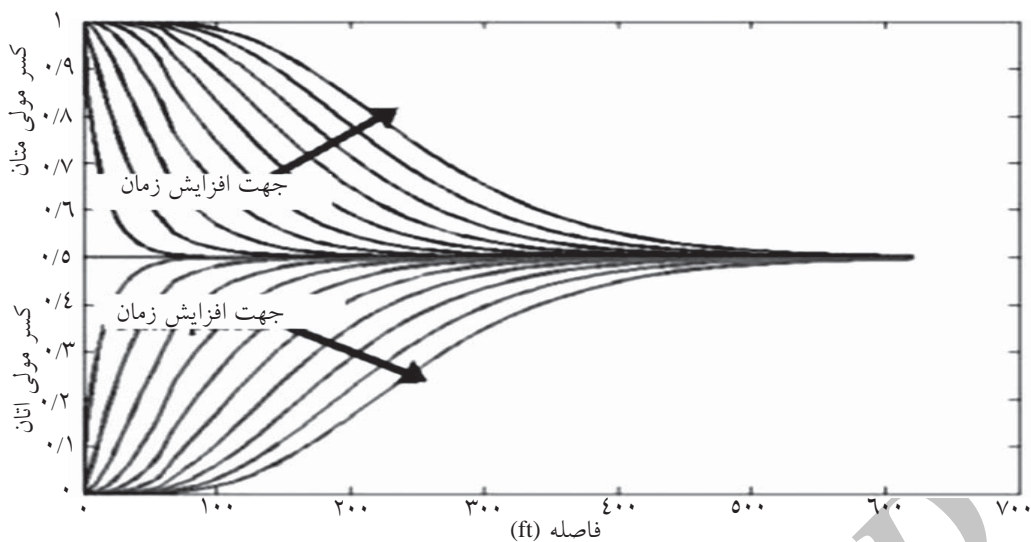
از این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت حالت‌های مربوط به در نظر گرفتن نفوذ از تراوایی  $0/01$  md برای ماتریس بلوک شروع می‌شود (شکل ۴). هر چه تراوایی ماتریس بلوک کمتر گردد، شدت تأثیر آن نیز بیشتر خواهد شد. شکل ۵ پروفایل فشاری در زمان شبیه‌سازی ۲۰۰ روز در ضرایب نفوذ مختلف  $0$  تا  $20$   $ft^2/day$  را برای یک ماتریس بلوک با تراوایی  $0/01$  md نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که هر چه ضریب نفوذ مولکولی بیشتر باشد، پالس فشاری با سرعت بیشتری در ماتریس بلوک حرکت خواهد نمود.

### حالت دوم: بررسی نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک دو جزئی و تک فازی

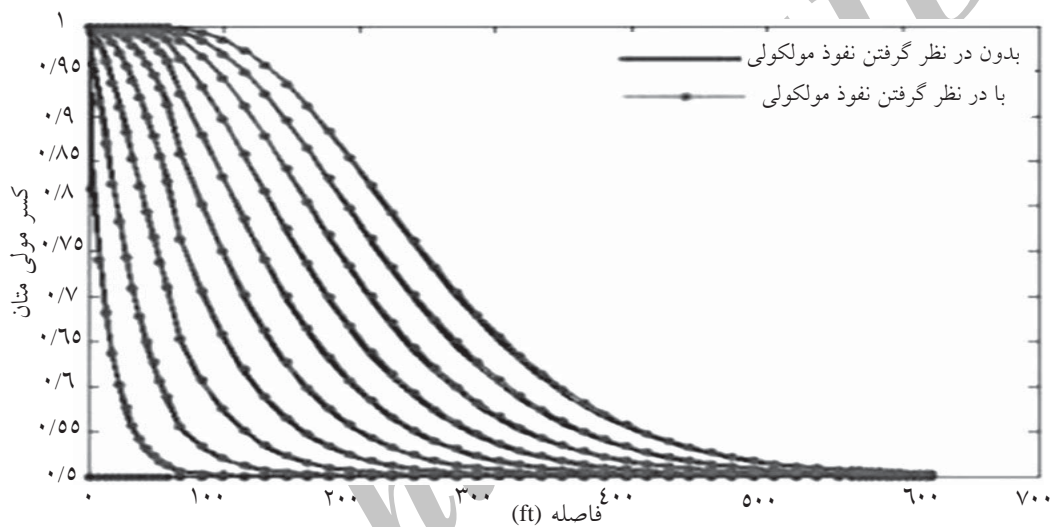
در این حالت تمامی مشخصات در نظر گرفته شده برای ماتریس بلوک، همانند حالت اول می‌باشد. با این تفاوت که به جای این که ماتریس بلوک تنها با متان اشباع شده باشد، با ترکیب  $50\%$  متان و  $50\%$  اتان اشباع شده است. همان‌گونه که پیشتر بیان شد، در این حالت فرض می‌شود که هدف تولید اتان بوده و متان تولید شده از این ماتریس بلوک در سمت چپ ماتریس بلوک، تزریق می‌شود تا فشار آن را در  $4100$  psia ثابت نگاه دارد.

به‌منظور اطمینان از اینکه شبیه‌ساز، رفتار مخزن را به درستی پیش‌بینی می‌کند، قبل از بررسی تأثیر نفوذ مولکولی بر پروفایل‌های فشاری و یا کسر مولی، به بررسی رفتار پیش‌بینی شده به کمک شبیه‌ساز می‌پردازیم. شکل ۶ پروفایل کسر

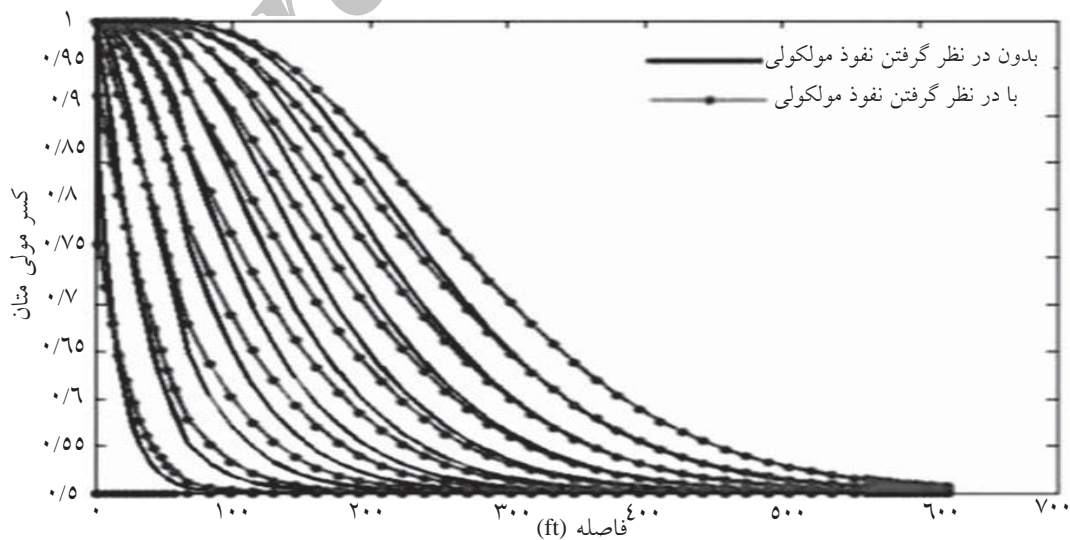




شکل ۶- کسر مولی متان و اتان بر حسب فاصله در یک ماتریس بلوک



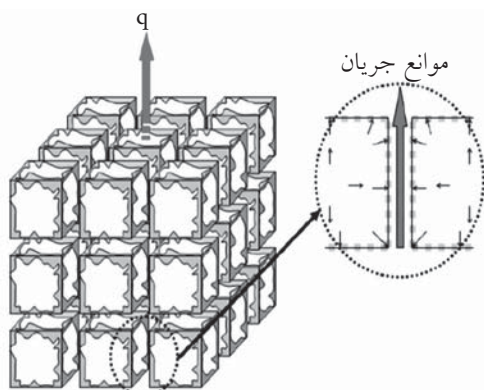
شکل ۷- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوانی ۰/۱ md (زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ روز تا ۱۰۰۰۰ روز و گام زمانی ۱۰۰ روز) (خطوط بر روی هم منطبق شده‌اند.)



شکل ۸- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوانی ۰/۱ md (زمان شبیه‌سازی ۱۰۰۰ روز تا ۱۰۰۰۰۰ روز با گام زمانی ۱۰۰۰ روز)

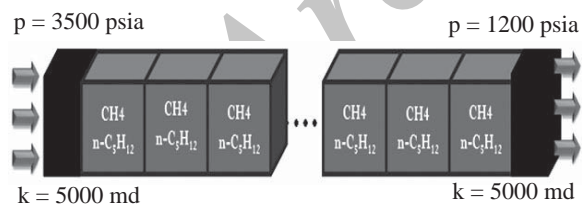
نخواهد شد [۱۵].

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 ۱۱ آورده شده است. نمودار فازی این ترکیب در شکل ۱۲ رسم شده است. در این مخزن  $175^{\circ}\text{F}$  فرض می‌شود که با توجه به شکل ۱۲، سیال در چنین دمایی رفتاری میعانی از خود نشان می‌دهد.



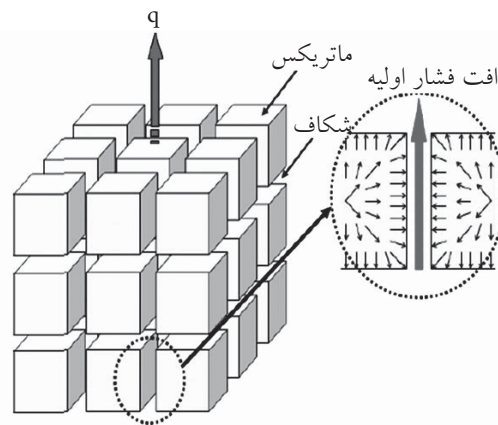
شکل ۱۱- شماتیک یک ماتریس بلوک تک بعدي، دو جزئی و دو فازی که در سمت چپ آن تزریق و از سمت راست آن تولید می‌شود

در ادامه به منظور 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

حالت سوم: بررسی نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک دو

### جزئی و دو فازی

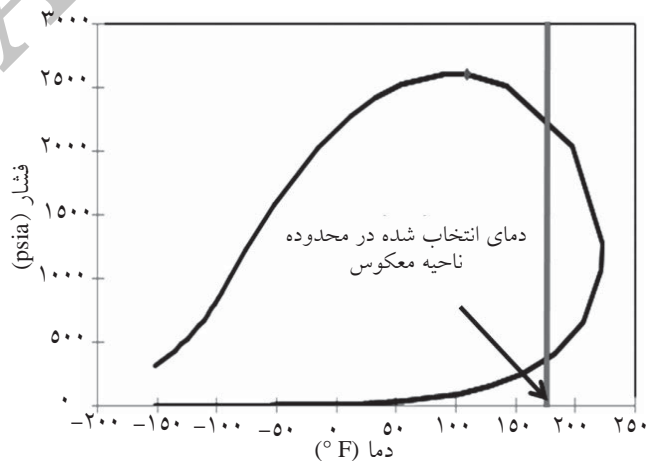
شکل ۹ مکانیزم تخلیه فشار در شکاف و ماتریس یک مخزن گاز میعانی شکاف‌دار را نمایش می‌دهد. در ابتدا سیال تولیدی از چاه از طریق شبکه شکاف تامین می‌شود.



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

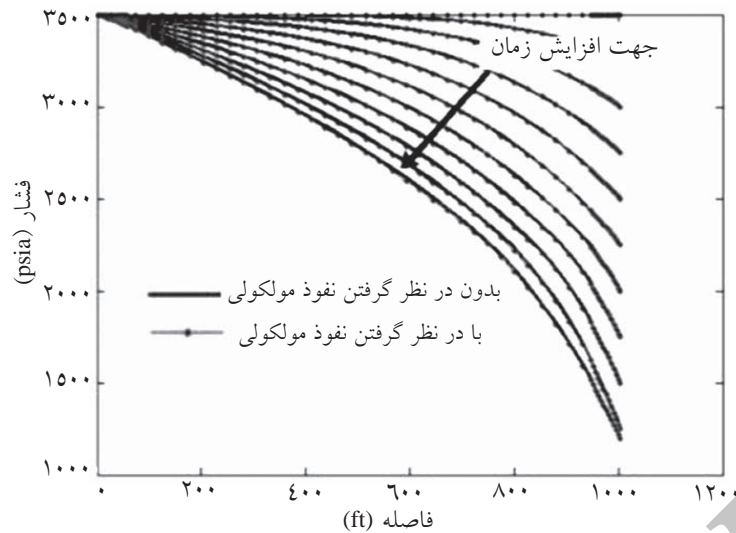
به دلیل حجم محدود شکاف‌ها، اختلاف فشار قابل توجهی بین ماتریس و شکاف ایجاد می‌شود که باعث می‌گردد سیال از ماتریس به درون شکاف جریان یابد. در یک مخزن شکاف‌دار به محض افت فشار به زیر فشار شبنم، مایع در مخزن تشکیل می‌شود. از آنجایی که نقاطی مانند شکاف‌ها و لبه‌های بلوک‌های ماتریس، در معرض افت فشار بیشتری 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

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  $0.01$  md مؤثر است، در حالت تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکاف‌دار، پدیده نفوذ در ماتریس بلوک‌هایی با تراوایی  $0.1$  md تأثیر خود را به صورت چشمگیری نشان می‌دهد. با کم شدن تراوایی ماتریس بلوک‌ها، تفاوت بین در نظر گرفتن و یا صرف نظر نمودن از نفوذ ملکولی بیشتر می‌شود. شکل‌های ۱۷ تا ۱۹، به بررسی نفوذ ملکولی در ماتریس بلوکی با تراوایی  $0.0001$  md می‌پردازد. در تراوایی‌های پایین ( $0.0001$  md) همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تفاوت بسیار قابل توجه است، به طوری که 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 ۵۴ نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی، بعد از حدود ۲۰۰ روز در این گرید بلوک، میعان ظاهر می‌شود، در حالی که با صرف نظر کردن از نفوذ ملکولی حتی تا پایان زمان شبیه‌سازی (حدود ۴ 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 فاز نیز بسیار قابل توجه می‌باشد و تفاوت بین دو نموداری که نفوذ ملکولی در آنها در نظر گرفته شده و یا صرف نظر شده از همان ابتدا و بدون بزرگنمایی قابل مشاهده است.

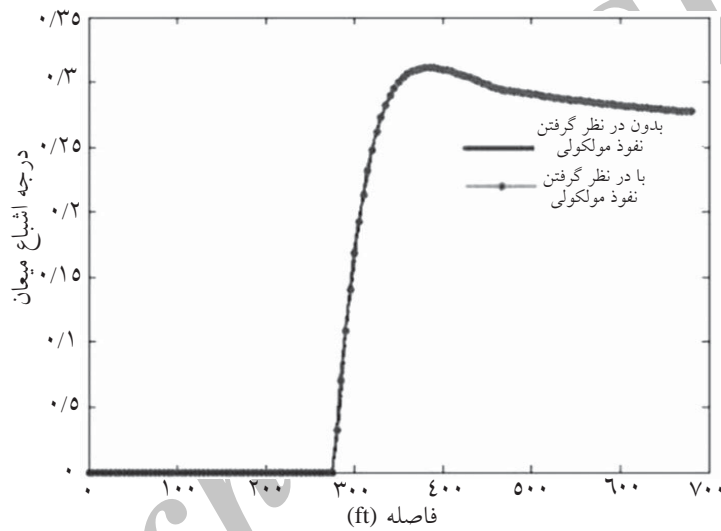


شکل ۱۲- نمودار فازی گاز میعانی سیال اشباع شده ماتریس بلوک برحسب دما

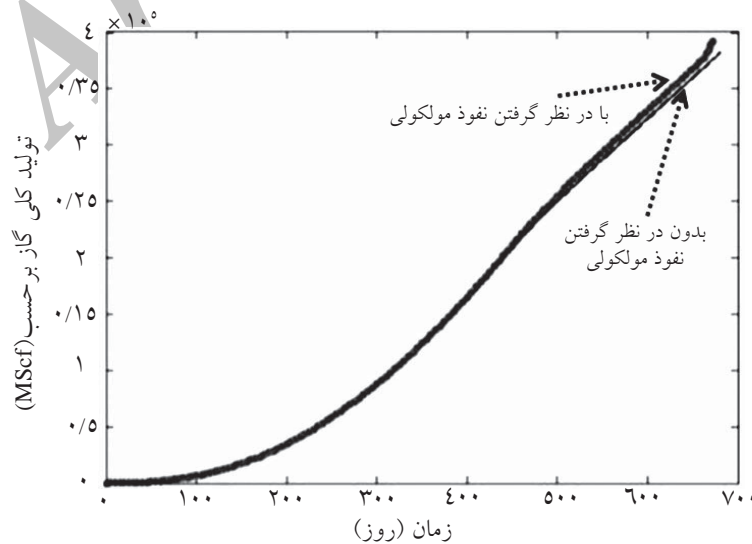
تقسیم شده است. از معادله حالت پنگ رایبنسون برای رفتار سیال (PVT) و تعادل ترمودینامیکی استفاده می‌شود [۱۶]. همچنین داده‌های تراوایی نسبی و فشار موینگی مرجع [۲] در شبیه‌سازی به کار گرفته شده است. شکل‌های ۱۳ تا ۱۹ به بررسی اثر نفوذ ملکولی بر روی پروفایل پارامترهای مختلف اختصاص دارد. شکل ۱۳ اثر اعمال پدیده نفوذ مولکولی را بر توزیع فشار درون یک ماتریس بلوک با تراوایی  $0.1$  md نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل پیداست، در این تراوایی، پدیده نفوذ مولکولی اثری روی توزیع فشار درون ماتریس بلوک ندارد. شکل ۱۴ نیز موید بی‌تأثیر بودن پدیده نفوذ مولکولی در بلوک‌های با تراوایی  $0.1$  md می‌باشد. نکته حائز اهمیت در شکل ۱۵، این است که در صورت وجود جریان تک فاز در مخزن در این تراوایی 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 ۱۶ تولید کلی گاز بعد از ۶۰۰ 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 ۶۰۰ روز پس از تولید، در صورت صرف نظر کردن از نفوذ ملکولی تولید کلی گاز به جای  $331$  MMScf، به اشتباه  $233$  MMScf تخمین زده خواهد شد. بنابراین



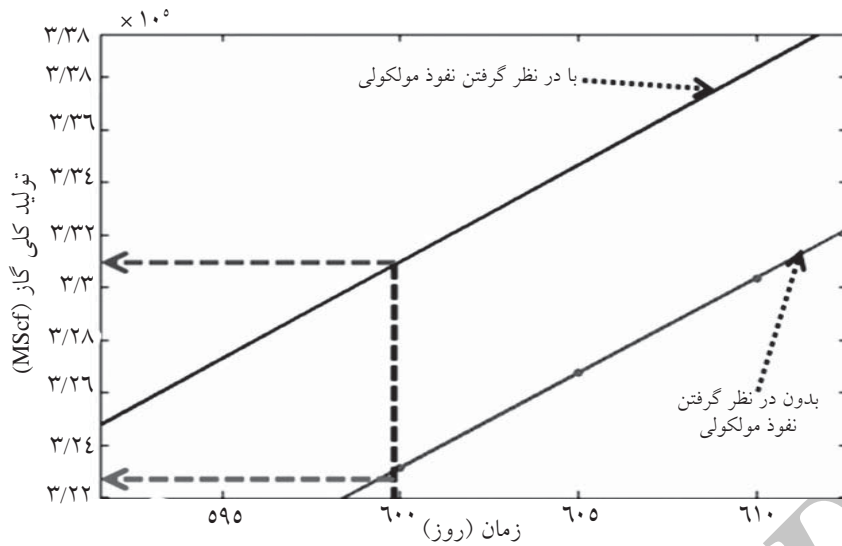
شکل ۱۳- پروفایل فشاری با و بدون نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md (خطوط بر روی هم منطبق شده‌اند).



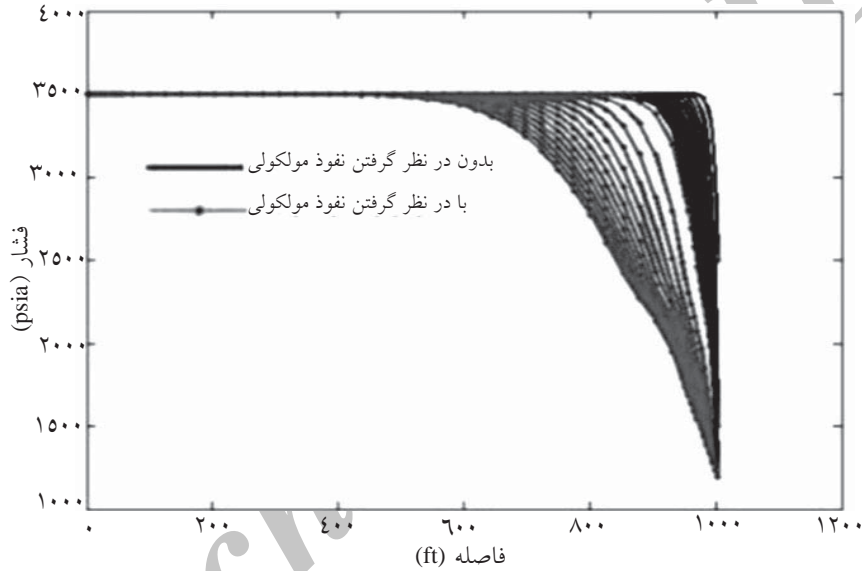
شکل ۱۴- درج اشباع در گرید بلوک ۴۸، با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md



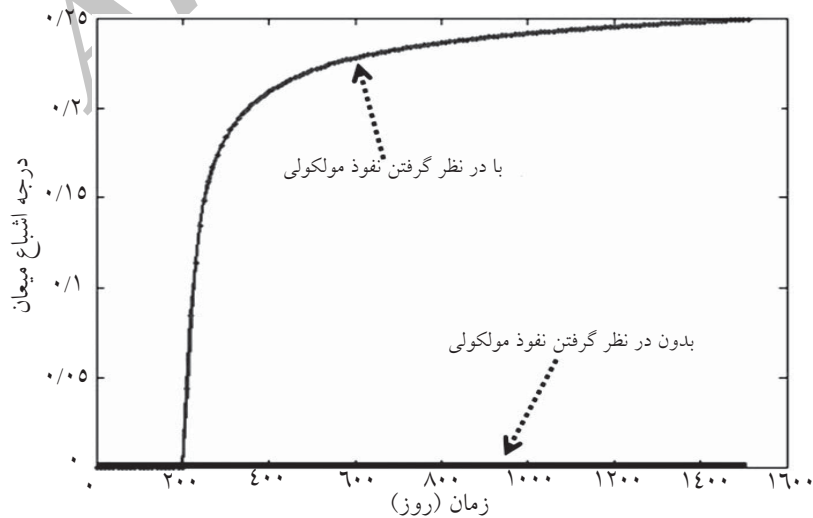
شکل ۱۵- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md



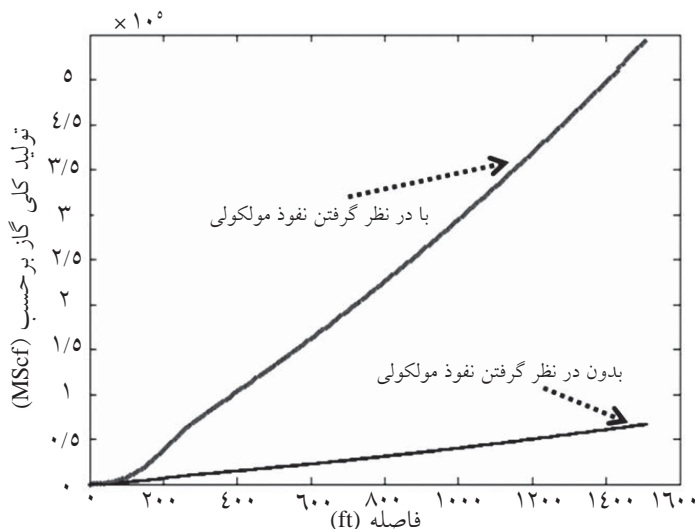
شکل ۱۶- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱ md



شکل ۱۷- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۰۰۱ md (خطوط بر روی هم منطبق شده‌اند).



شکل ۱۸- درجه اشباع در گرید بلوک ۵۴، با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۰۰۰۱ md



شکل ۱۹- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۰۰۰۱ md

### نتیجه گیری

اولیه مختلف می شود. در صورتی که ترتیبی دیگر با حدس اولیه های معقول، همگرا شده و سرعت همگرایی بسیار بالایی دارد. این گونه به نظر می رسد که این ترتیب بسته به نوع مسأله متفاوت می باشد. بنابراین اگر در شبیه سازی عددی تغییر حدس اولیه هیچ تأثیری در همگرایی نداشت، تغییر ترتیب معادلات می تواند 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 پایان نامه کارشناسی ارشد، اعلام می دارد.

### علائم و نشانه ها

$D_{eff}$ : ضریب نفوذ ملکولی، (ft<sup>2</sup>/day)

$x_m$ : کسر مولی فاز میعان (-)

$k$ : تراوایی مطلق، (داریسی)

$\bar{p}_p$ : چگالی مولی فاز p، (lbmol/ft<sup>3</sup>)

$\mu_p$ : گرانیوی فاز p، (cP)

$k_{rp}$ : تراوایی نسبی فاز p، (-)

$\gamma_p$ : وزن مخصوص فاز p، (psi/ft)

$G$ : عمق، فوت (ft)

$\Phi$ : تخلخل (-)

$S_p$ : درجه اشباع فاز p، (-)

مهمترین نتیجه ای که از این تحقیق می توان گرفت، این است که پدیده نفوذ ملکولی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکاف دار 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 بلوک های با تراوایی کمتر از ۰/۰۱ md مؤثر است. در حالی که اگر مخزن به صورت دو فازی عمل کند نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک هایی با تراوایی یک مرتبه بیشتر یعنی ۰/۱ md تأثیر گذار می باشد.

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

ترتیب معادلات در ساختن ماتریس جاکوبین در شبیه سازی عددی ترکیبی بسیار مهم می باشد. به طوری که یک ترتیب خاص در این شبیه سازی منجر به طولانی شدن فرآیند شبیه سازی و یا حتی واگرا شدن آن با حدس های

## منابع

- [1] Ertekin T., King, G. & Schwerer, F., "Dynamic gas 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 Reprint, 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., & Boubeguir 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 49<sup>th</sup> 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*, 3<sup>rd</sup>Ed, Science Direct Publishing, 1998.