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

ابوالقاسم کاظمی‌نیاکرانی[1*]، شهاب گرامی[2]، سیروس قطبی[1]، عبدالنبی هاشمی[3]

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[1] و خطی‌سازی (نیوتن – رافسون)[2] برای حل معادلات ناخطی استفاده می‌کنیم. به منظور بالا بردن سرعت شبیه‌سازی، از روش برویدن[3] برای بروز کردن[4] ماتریس جاکوبین[5] استفاده می‌کنیم. در پایان این کار مهمترین نتیجه‌ای که می‌گیریم این است که، در حالت تک فازی؛ نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک‌های با تراوائی[6] کمتر از ۰/۰۱ میلی‌دارسی، اما در حالت دو فازی، در تراوائی‌های یک مرتبه بیشتر، یعنی ۰/۱ میلی‌دارسی، در این مخازن خود را نشان می‌دهد.

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

۱- مقدمه

شبیه‌سازی مخازن هیدروکربنی به منظور پیش‌بینی رفتار مخازن، یکی از مسائل کلیدی در صنعت نفت است؛ 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 شدهٔ مهندس مخزن از شبیه‌ساز به رفتار واقعی مخزن نزدیک‌تر باشد، قراردادهایی که براساس آن منعقد می‌شوند موفق‌تر می‌باشند. از بدو ورود شبیه‌سازها به صنعت نفت، تمامی تلاش‌ها متوجه این بوده است که یک شبیه‌ساز می‌بایست در عین حالی‌که 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

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

www.SID.ir

به شدت بالا ببرد؛ 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[1] به جامعه علمی ارائه شد [۱]. او یک طیف به منظور چگونگی اهمیت هر کدام از دو عامل تولید سیال (دارسی[2] و فیکی[3]) اما برای مخازن معمولی پیشنهاد کرد، اما از آنجا که کار او در مخازن معمولی با تراوائی 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[4] در تز دکترای خود به راهنمایی ارتکین در دانشگاه پنسیلوانیا[5] بر روی موضوع مکانیزم‌های چندتایی[6] مخازن گاز میعانی شکافدار کار کردند و نتایج بسیار عالی ارائه دادند [۲].

نفوذ مولکولی در مخازن شکافدار بر خلاف مخازن معمولی، می‌تواند به‌صورت 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 تراوائی 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[7] و روت[8]، [۴] تزریق در فشار بالا، علاوه بر بالا بردن هزینه تزریق؛ میان‌شکنی[9] زود هنگام گاز تزریقی را هم بدنبال 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 تراوائی ماتریس بلوک‌های خیلی کم عملاً گرادیان فشاری سهم زیادی در تولید هیدروکربن نخواهد داشت و عمدهٔ هیدروکربن تولید شده از آن به علت پدیدهٔ 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[10] شکافدار و افت فشار آن به زیر فشار شبنم[11] 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 فیکی‌ای می‌شود که به همراه تولید دارسی‌ای بر روی مخزن تأثیر می‌گذارد. تشکیل این سد و غالب بودن تولید فیکی در مخازن شکافدار با بلوک‌های با تراوائی پایین، شدیدتر و بحرانی‌تر خواهد بود [۲].

در این کار پدیده نفوذ مولکولی به‌صورت توده‌ای 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 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 تراوائی 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

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

Archive of SID
www.

عمیق‌تر و گرمتر افزایش یافت. کرفت[1] و هاوکینز[2] بـه وضـوح نـشان دادند که چگونه کشف مخازن گازی و گاز میعانی با شـروع فنـاوری حفر چاه‌های عمیق‌تر در سال ۱۹۵۰ افزایش یافته اسـت [۵]. از آن به بعد، اهمیت مخازن گاز میعانی با گذر زمان افزایش یافت.

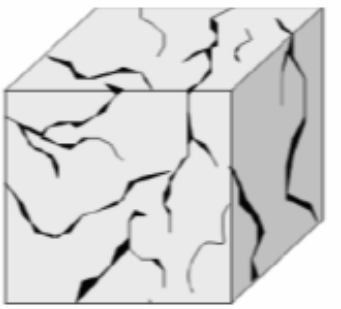
در مخازن گاز میعانی، شرایط اولیه مخزن بین نقطه بحرانی[3] و نقطه میعانی بحرانی[4] سیال مخزن می‌باشد که این منجـر بـه نـشان دادن رفتاری تحت عنوان رفتار معکوس[5] در این گازها می‌شود. بر اسـاس مطالعات موسز[6] و دانهـو[7] در سـال ۱۹۹۲، بـسیاری از مخـازن گـاز میعانی در محـدودهٔ فـشاری و دمـایی، بـه ترتیـب، Psia ۳۰۰۰ تـا Psia ۸۰۰۰ و ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه فارنهایت می‌باشند [۶].

در این نوع مخازن عملکرد تولید شـدیداً وابـسته بـه ترکیـب سـیال مـی‌باشـد و بـرای پـیش‌بینـی عملکـرد تولیـد از آنهـا، معمـولاً از شبیه‌سازهای مدل ترکیبی[8] استفاده می‌شود. این، منجر می‌شود بـه اینکـه خیلـی از اوقـات، هزینـه‌هـای گزافـی بـرای شـبیه‌سـازی و مدل‌سازی دقیق این مخازن، رفتار فازی آنها و همین‌طور مشخصات جریانی سیال آنها پرداخته شود [۲].

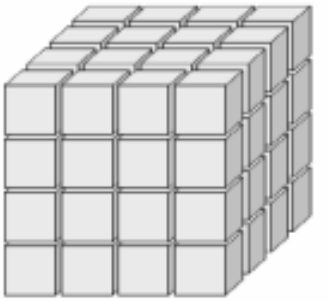
۳- مخازن شکافدار طبیعی

قسمت اعظمی از نفت و گاز تولیـد شـده در جهـان، از مخـازن گـاز میعانی شکافدار تولید می‌شود. بر اسـاس مطالعـات پـاپی[9] در سـال ۲۰۰۳، بیش از ۵۰ درصد از هیدروکربن‌های تولید شده در جهان از مخازن شکافدار می‌باشند [۷]. شکل (۱) یک نمونهٔ معمـول مخـزن شکافدار را نشان می‌دهد. این مخازن به‌صـورت ایـده‌آل شـکل (۲)، یعنی تعدادی ماتریس بلوک در شبکه‌ای از شکاف‌ها تصور می‌شوند. این مدل معمولاً به‌صورت مدل "حبه قندی[10]" شناخته می‌شود کـه برای اولین بار توسط ورن[11] و روت[12] در سال ۱۹۶۳ ارائه شد [۴].

در این مدل به جهت ساده‌سازی بیشتر فرض می‌شود که بلوک‌هـای مستطیلی که در شکل (۲) آمده است قسمت زیادی از هیـدروکربن ذخیره شده در مخزن را شامل شده در حالی‌که شکاف‌های متقـاطع افقی و عمودی یک شبکه‌ای را مهیا مـی‌نمایـد کـه از لحـاظ عبـور جریان مانند سیستم اصلی نشان داده شـده در شـکل (۱) را تـأمین می‌کند [۴]. برای مخازن شکافدار طبیعـی مـدل‌هـای دیگـری نیـز پیشنهاد شده است که چون در این مقاله نیازی به این مدل‌ها نبوده و تنها یک تک بلوک به عنوان نماینـده یـک مخـزن شـکافدار بکـار 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]

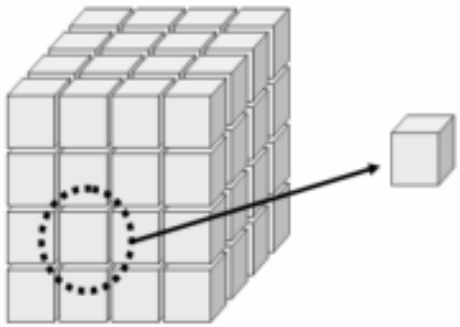
۴- مطالعه تک بلوکی مخازن شکافدار

مخازن شـکافدار طبیعـی در سـاختارهای بـسیار پیچیـده‌ای یافـت می‌شوند که جزئیات آنها هنوز به‌صـورت یـک مجهـول بـاقی مانـده است. در این مخازن، ماتریس بلوک‌ها بیش از ۹۰٪ کل هیـدروکربن در جای آنها را در خود ذخیره نموده‌اند بنابراین می‌تـوان گفـت کـه بیشتر هیدروکربن موجود در مخازن شکافدار در ماتریس بلوک‌هـای 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 مـاتریس بلـوک آنها می‌باشد، نه در شکاف‌ها.

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

www.SID.ir

از طـرف دیگـر در مخـازن شـکافدار طبیعـی، سیـستم شـکافهـا مسیرهایی مؤثر را برای عبور سیال هیدروکربنی از مخـزن بـه درون چاه تولیدی مهیا می‌کنند. شبکهٔ شکافهـا بـا سـطح گـسترده‌ای از ماتریس‌ها در ارتباط است که تغییرات فشار شکافها بر رفتار سـیال درون ماتریس‌ها تأثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر فـشار شـکافهـا بـا چگونگی تولید سیال درون ماتریس‌هـا در ارتبـاط اسـت. در چنـین شرایطی می‌توان بیان کرد که شکافها بعنوان شرایط مـرزی[1] بـرای بلوک‌های ماتریس عمل می‌کنند. نـوع محـیط اطـراف سـنگ یـک ماتریس بلوک چگونگی عملکرد و بازیافـت هیـدروکربن را از بلـوک خاص تعیین می‌کند. به اضافه، با فرض کل سیستم مخزن شـکافدار بعنوان چند تک بلوک می‌توان نتیجه گرفت کـه، بازیافـت نهـایی از کل مخزن به وسیله رفتار هر تک بلوک کنتـرل مـی‌شـود. بنـابراین، همانگونه که در شکل (۳) نشان داده شده اسـت، فهـم پدیـده‌هـای اتفاق افتاده در هر تک بلوک می‌تواند اطلاعاتی کلیدی در رابطـه بـا کل مخزن شکافدار را مهیا کند. در مطالعه تک بلوکی، حرکت سیال در شبکه شکاف در درجه دوم اهمیت قرار دارد. به این دلیل کـه 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 مـدل‌سـازی مخـازن شـکافدار، محققـان مختلفـی بـا استفاده از مدل تک بلوکی به اطلاعات بسیار مفیدی در زمینه رفتار کلی این مخازن دست یافته‌اند:

یاماموتو[2] و همکاران در سال ۱۹۷۱ به مدل‌سازی ترکیبی یـک تـک بلوک دو بُعدی و دو فازی برای مطالعه رفتار جریانی سـیال در یـک سیستم شکافدار پرداختند. آنها همچنین از مـدل خـود بـه منظـور آنالیز عملکرد بلوک‌هایی با اندازه‌های مختلف تحت تأثیر افت فشار و حفظ فشار پرداختند [۸].

کلپ[3] و مورس[4] (۱۹۷۴) یک مدل دوُبعدی ارائه کردند که به‌صورت عددی رفتار جریانی یـک سیـستم نفـت در مخـزن شـکافدار تحـت 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 نفـت و آبـی کـه مـابین ماتریس با شکافها جابجا می‌شد نیز محاسبه گردید [۹].

پیسمن[5] در سال ۱۹۷۶ بیان کرد که آنالیز رفتـار مخـازن شـکافدار می‌تواند با فهم رفتار و عملکرد بلـوک مـاتریس در شـرایط مختلـف مرزی یا شرایط محیطی شکاف به خوبی بررسی شود. در این کار، او به مطالعه جریان همرفت[6] و انگشتی شدن[7] بـدلیل پدیـده معکـوس چگالی[8] با استفاده از آنالیز آشـفتگی بـرای یـک شـکاف مـرتبط بـا ماتریس بلوک تحت افت فشار پرداخت. نتایج این آزمایش نشان داد که چگالی معکوس در محدودهٔ ضرائب معمول نفـوذ ناپایـدار اتفـاق می‌افتد [۱۰].

ون گولف[9] در سال ۱۹۸۲ نشان داد که فرض اساسی در مطالعه تک بلوکی مخازن شکافدار این است که باید تک بلـوک در نظـر گرفتـه شده به‌طور کامل به وسیله شکافها احاطه شده باشد و علاوه بر آن ارتباط آن با سایر بلوک‌ها، به‌طور کامل قطع شده و یا ارتبـاط قابـل اغماضی داشته باشد و این شرایط است که ما را قادر می‌سازد که به جای شبیه‌سازی کامل یک مخزن شکافدار، تنها به شبیه‌سازی یـک 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 بلوکِ در نظر گرفته شده، فرض می‌شود.

۵- مراحل کار

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

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

Archive of SID
www.

از یک مسئله خیلی ساده شروع می‌کنیم و رفته رفته مسئله را پیچده‌تر 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 به‌صورت 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 توجیه‌تر 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 توجیه 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 جریانی چندمکانیزمی

در این کار از فرمول‌بندی‌ای که آیالا در تز دکترای خود اثبات و استفاده کرده به‌کار 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 شدهٔ معادله؛ ساده‌سازی‌های تک بُعدی و افقی لحاظ شده است.

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

که در آن:

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 : تراوائی مطلق ماتریس بلوک در جهت x، دارسی

K_{rp} : تراوائی نسبی فاز p، بدون بُعد

μ_p : گرانروی فاز p، cp

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 به‌دست آوردن شکل کلی این معادله از فرضیات زیر استفاده کرد:

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

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

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

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

۵- 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].

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

1. Flash Calculation

www.SID.ir

Archive of SID

البته لازم به ذکر است که بیان شود که از شکل کامل معادلهٔ (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، تراوائی نسبی گاز همواره یک، و جملهٔ مربوط به میعان در سمت چپ معادلهٔ (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، تراوائی نسبی گاز همواره یک و جملهٔ مربوط به میعان در سمت چپ معادلهٔ (۱) و درجه اشباع میعان از سمت راست حذف خواهند شد.

به جهت اینکه در حل این سیستم معادلات به حالت تکین[1] برخورد نکنیم؛ لازم است که در همین جا به بررسی برابری تعداد معادلات و مجهولات این سیستم بپردازیم.

در این سیستم، معادلهٔ 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 موازنهٔ 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 درجهٔ اشباع و دیگر پارامترهای مورد نیاز را محاسبه کرد.

در حالتی که ترکیب موجود در مخزن به‌صورت n_c جزئی باشد و مخزن به‌صورت n_{blocks} گسسته‌سازی شده باشد، به جهت شبیه‌سازی آن باید $n_c \times n_{blocks}$ معادلهٔ ساخته شود که همزمان حل شوند. معادله ترکیبی در سیستم‌های چند مکانیزمی، 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 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 نمایندهٔ مخزن شکافدار است، در حالی که منظور از «شبکه بلوک» یکی از شبکه بلوک‌های شبیه‌سازی می‌باشد) ماتریس جاکوبین به‌صورت ۱۰۰ ×۱۰۰ خواهد شد که برای تشکیل آن به‌صورت عددی به حداقل ۲×۱۰۰۰۰ 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].

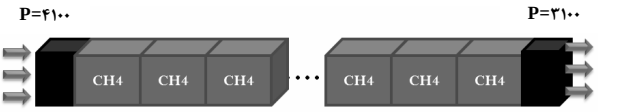
1. Singular

Archive of SID

www.

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

ماتریس بلوک در نظر گرفته شده در این حالت به‌صورت 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 قسمت‌های مشخص شده با رنگ تیره، شکاف‌ها را نشان می‌دهند که در اینجا در سمت چپ با فشار ثابت ۴۱۰۰Psia تزریق متان و در سمت راست با فشار ثابت ۳۱۰۰Psia تولید از این ماتریس بلوک انجام می‌شود و بقیه مرزها، مرز بدون جریان در نظر گرفته شده‌اند. تخلخل برای این ماتریس بلوک ۱۳٪ و ارتفاع آن ۳۰ فوت در نظر گرفته شده است. عرض ماتریس بلوک ۳۰ فوت و این برای شکاف‌ها ۰/۱ (مشخصات شکاف برای محاسبه جمله‌های تحرک‌پذیری در مرز بلوک‌ها و شکاف‌ها مورد نیاز می‌باشد) اختصاص داده شده است. اما در مورد طول هر شبکه بلوک در ابتدای ماتریس بلوک (قسمت تزریقی) و انتهای آن (قسمت تولیدی) به اندازهٔ ۶ بلوک، طول آنها ۵ فوت و بینابین آن اندازهٔ طول شبکه بلوکها ۱۵/۶۲۵ فوت در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر؛ طول کلی ماتریس بلوک به عنوان نمایندهٔ مخزن شکافدار ۶۲۰ فوت فرض شده است. تراوائی شکاف‌ها در تمامی حالت‌های این کار ثابت و برابر با ۵۰۰۰md در نظر گرفته شده است. پارامترهایی که در این حالت به عنوان پارامترهای حساسیت تغییر می‌کنند، تراوائی ماتریس و ضریب کلی نفوذ می‌باشند که به ترتیب از ۰/۰۰۱ md تا ۱ md و (ft^2/day) ۰ (حالت بدون نفوذ مولکولی) تا (ft^2/day) ۲۰ تغییر می‌کنند.

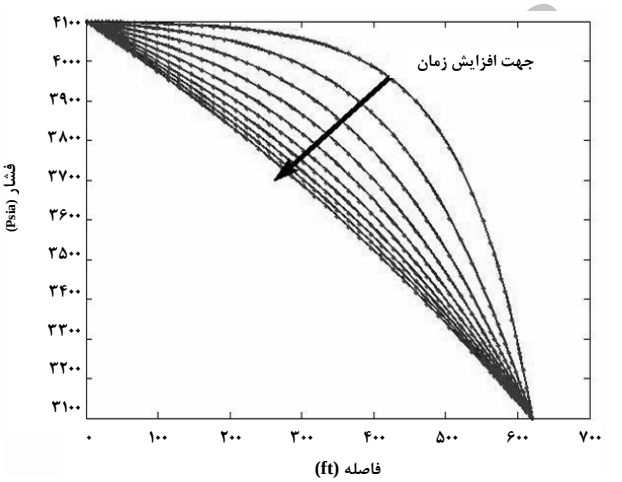
برای ضریب کلی نفوذ، کاسلر[1] مقادیر بین (ft^2/day) ۹/۳ تا (ft^2/day) ۹۳ را برای آن پیشنهاد کرده است [۱۴] اما از آنجا که از یک طرف مقادیر پیشنهاد شده ایشان در حالت استاندارد بوده و از طرف دیگر محدودهٔ (ft^2/day) ۰ تا (ft^2/day) ۲۰ توسط آیالا به‌کار گرفته شده است، در این کار نیز محدوده (ft^2/day) ۰ تا (ft^2/day) ۲۰ 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 معنائی می‌تواند داشته باشد؟ در جواب به این سؤال باید خاطر نشان شود که، همانگونه که قبلاً هم بیان شد در این کار پدیده نفوذ مولکولی به‌صورت توده‌ای و به علت تفاوت چگالی اتفاق می‌افتد که با این فرض اتفاق نفوذ مولکولی در حالت تک جزئی نیز امکان‌پذیر می‌باشد.

در شکل‌های زیر، ضریب نفوذ مولکولی در حالتی که نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده، (ft^2/day)۲۰ درنظرگرفته شده است.

در این شکل‌ها جهت افزایش زمان و چگونگی مؤثر بودن نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک‌های با تراوائی‌های مختلف نشان داده شده است.

در شکل‌های (۵) تا (۸) پیکان جهتدار بر روی توزیع فشاری جهت حرکت آن را با گذر زمان نشان می‌دهد.



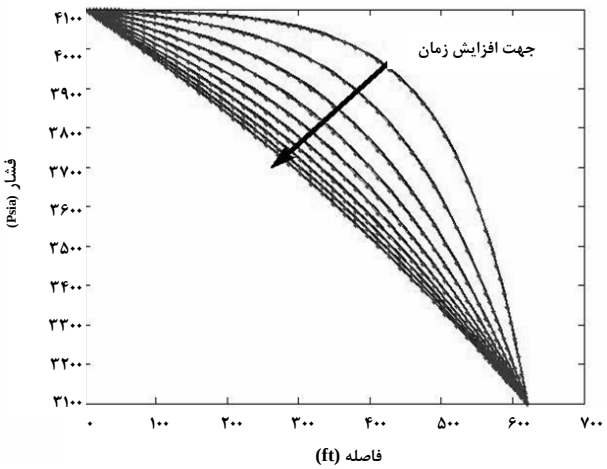
شکل ۵- توزیع فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۱md از زمان شبیه‌سازی ۱ تا ۱۰ روز با گام زمانی ۱ روز (در این شکل توزیع با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با خط نقطه‌دار نشان داده شده است که بر روی خط بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی واقع شده است)

با توجه به شکل (۵) که توزیع فشاری را در یک مخزن شکافدار با ماتریس بلوک‌های با تراوائی ۱ میلی دارسی نشان می‌دهد، در این شکل همانگونه که مشاهده می‌شود، دو توزیع بر هم منطبق

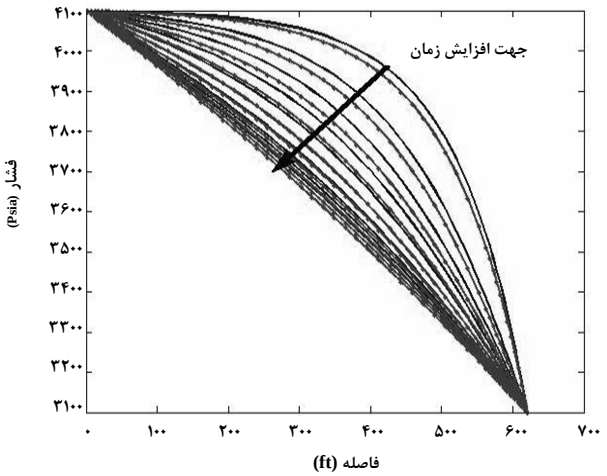
1. Cussler

www.SID.ir

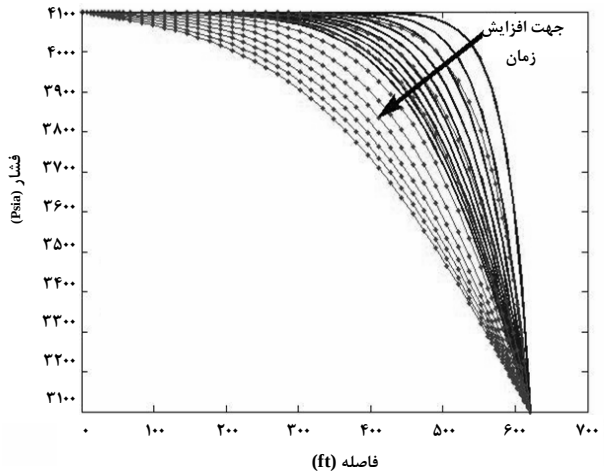
می‌باشند؛ در شکل (۶) نیز که برای ماتریس بلوک‌های با تراوائی ۰/۱ میلی‌دارسی می‌باشد، این دو توزیع بر هم منطبق‌اند، تفاوت این توزیع‌ها از ماتریس بلوک‌های با تراوائی ۰/۰۱ میلی‌دارسی، همانگونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، آغاز می‌شود که این تفاوت در شکل (۸) و برای ماتریس بلوک‌های با تراوائی ۰/۰۰۱ میلی‌دارسی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



شکل ۶- توزیع فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۱md 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 ۰/۰۱md 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)



شکل ۸- توزیع فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوایی ۰/۰۰۱md 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 تراوائی ۰/۰۱md برای ماتریس بلوک شروع می‌شود و در تراوائی‌های کمتر از ۰/۰۰۱md خیلی شدید خواهد شد.

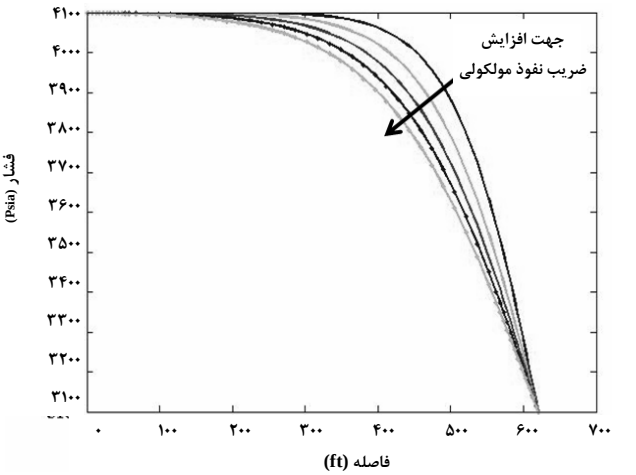
شکل (۹) توزیع فشاری را در زمان شبیه‌سازی ۲۰۰ روز و ماتریس بلوک ۰/۰۱md اما در ضرائب نفوذ مختلف (ft^2/day) ۰ تا (ft^2/day) ۲۰ را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که هر چه ضریب نفوذ مولکولی بیشتر باشد ضربان فشاری با سرعت بیشتری در ماتریس بلوک حرکت خواهد کرد.

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 ۴۱۰۰Psia ثابت نگاه دارد.

Archive of SID

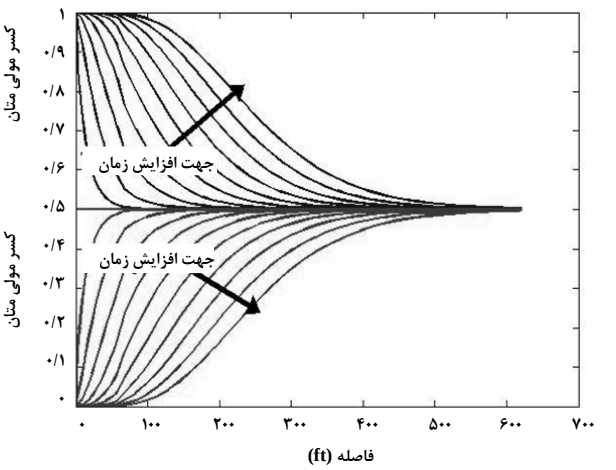
www.



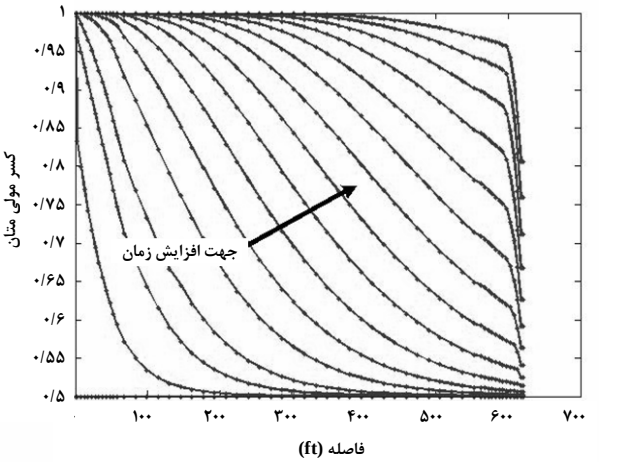
شکل ۹- تأثیر ضریب نفوذهای مختلف بر روی توزیع فشاری در زمان شبیه‌سازی ۲۰۰ روز و تراوائی ماتریس بلوک ۰/۰۱md (در این شکل بیرونی‌ترین خط مربوط به حالتی است که ضریب نفوذ مولکولی (ft^2/day) ۰ و خارجی‌ترین آن مربوط به حالتی است که ضریب نفوذ مولکولی (ft^2/day) ۲۰ است. ضریب نفوذ مولکولی در بقیه خط‌ها به ترتیب از بیرونی به درونی (ft^2/day) ۵، (ft^2/day) ۱۰ و (ft^2/day) ۱۵ 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 به‌صورت 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 به‌صورت بسیار واضح‌تر در آخرین توزیع در شکل (۱۱) که تنها توزیع کسر مولی متان را نشان می‌دهد، مشاهده کرد، به‌طوری‌که 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، به‌خاطر نمایش تأثیر نفوذ مولکولی می‌توان اثر آن را بر روی هر کدام از پارامترها (کسر مولی و یا فشار) نشان داد به‌طوری‌که در حالت اول 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



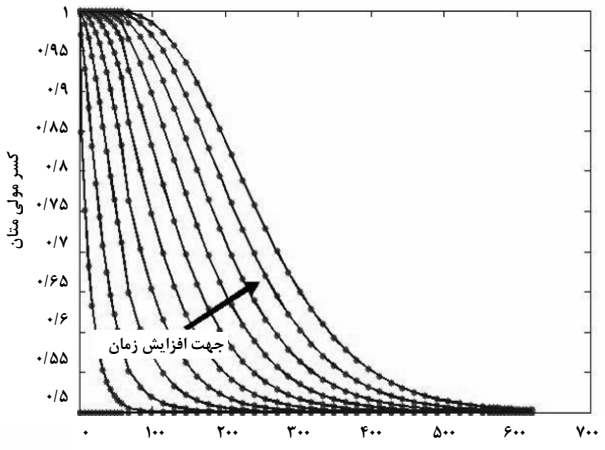
شکل ۱۱- توزیع کسر مولی متان برای ماتریس بلوک با تراوائی ۰/۰۰۱ md از زمان شبیه‌سازی ۳۰۰۰۰۰ روز تا ۱۰۰۰۰۰۰ با گام زمانی ۵۰۰۰۰ روز

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

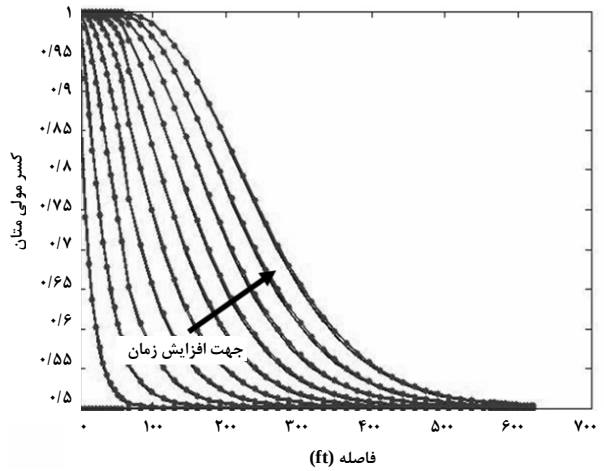
www.SID.ir

پرداخت. شکل‌های (۱۲) تا (۱۶) به بررسی تأثیر نفوذ بر روی توزیع کسر مولی متان در تراوائی‌های مختلف و شکل (۱۷) تأثیر آن را بر توزیع فشاری ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۰۱ نشان می‌دهند.

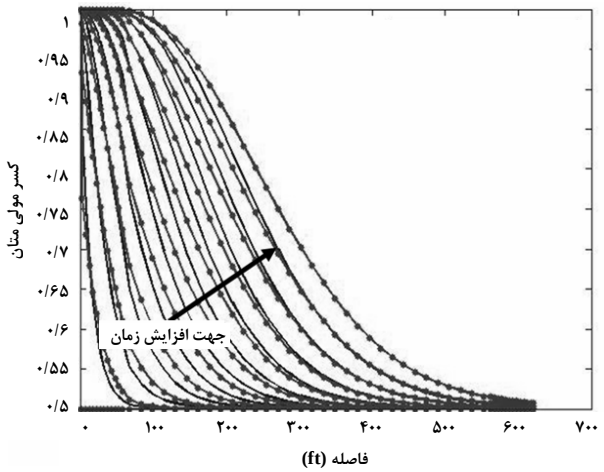
در شکل (۱۲) که برای ماتریس بلوک های ۱ میلی‌دارسی است، هر دو توزیع بر روی هم منطبق می‌باشند با کاهش تراوائی ماتریس بلوک‌ها به یک مرتبه پایین‌تر هم نیز تراوائی ۰/۱ میلی‌دارسی همانگونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است هیچ تغییری در این دو توزیع مشاهده نمی‌شود. شکل (۱۴)، که آغاز مشاهده شدن تغییر در دو توزیع می‌باشد، مربوط به ماتریس بلوک‌های با تراوائی ۰/۰۱ میلی‌دارسی است که با کاهش تراوائی ماتریس بلوک‌ها به مقادیر ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۰۱ میلی‌دارسی 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 تراوائی ۰/۰۰۰۱ میلی‌دارسی 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 تراوائی md ۱ 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)



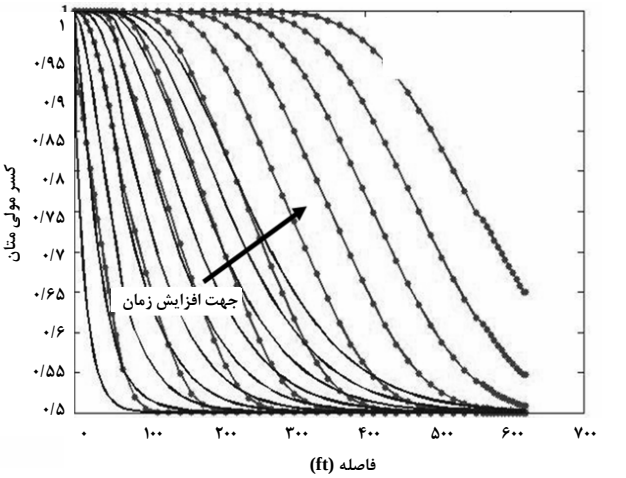
شکل ۱۳- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۱ از زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ روز تا ۱۰۰۰ روز و گام زمانی ۱۰۰ روز (در این شکل توزیع با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با خط نقطه‌دار نشان داده شده است که بر روی خط بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی واقع شده است)



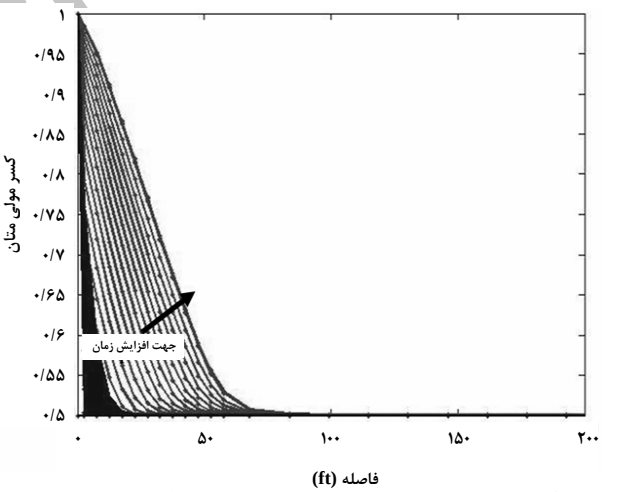
شکل ۱۴- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۱ از زمان شبیه‌سازی ۱۰۰۰ روز تا ۱۰۰۰۰ روز و گام زمانی ۱۰۰۰ روز (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می‌باشد)

Archive of SID

www.



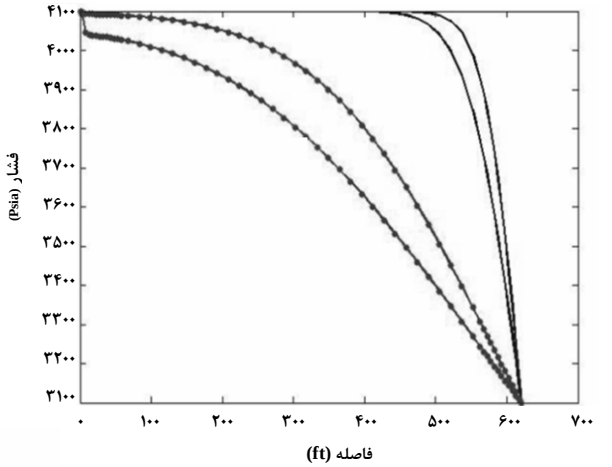
شکل ۱۵- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی ۰/۰۰۱ md از زمان شبیه‌سازی ۱۰۰۰ روز تا ۱۰۰۰۰ روز و گام زمانی ۱۰۰۰ روز (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می‌باشد)



شکل ۱۶- کسر مولی متان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی ۰/۰۰۰۱ md از زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ روز تا ۷۰۰۰۰۰ روز و 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)

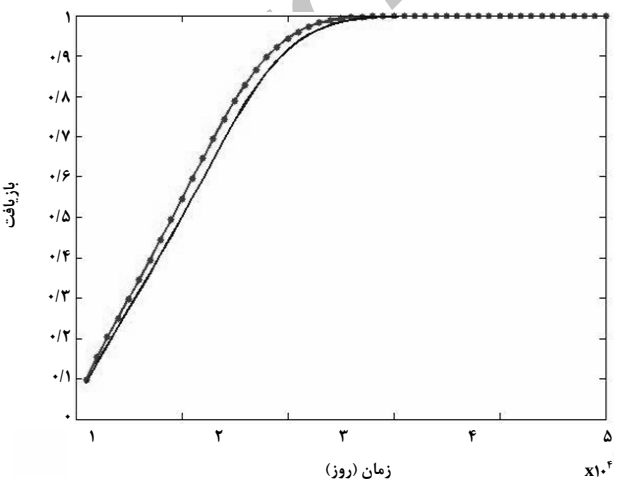
همانگونه که قبلاً هم بیان شد، در این حالت به جهت بررسی بهتر پدیدهٔ نفوذ مولکولی، فرض شده است که در این ماتریس بلوک هدف اصلی تولید اتان بوده به همین دلیل با تعریف بازیافت برای شکل‌های (۱۸) و (۱۹) به‌صورت معادله (۲) خواهد بود:

$$R_F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \phi_i V_{pi} y_i}{\left(\sum_{i=1}^{n} \phi_i V_{pi} y_i\right)_{initial}} \qquad (۲)$$



شکل ۱۷- توزیع فشار با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی در حالت تراوائی ۰/۰۰۰۱ میلی‌دارسی، در زمان‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ روز با گام 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 نمودن آن می‌باشد)

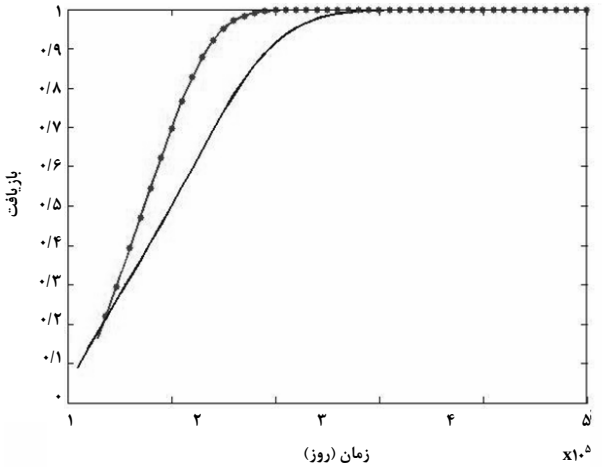
که در آن y_i کسر مولی اتان در هر بلوک در نظر گرفته می‌شود. در این دو شکل (شکل‌های (۱۸) و (۱۹)) نیز مشاهده می‌شود که تفاوت در بازیافت اتان در دو حالت در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون آن در هر دو ماتریس بلوک با تراوائی ۰/۰۱ میلی‌دارسی (شکل (۱۸)) و ۰/۰۰۱ میلی‌دارسی (شکل (۱۹)) مشاهده می‌شود.



شکل ۱۸- بازیافت اتان از مخزن با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی در تراوائی ۰/۰۱ 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)

Archive of SID

www.SID.ir



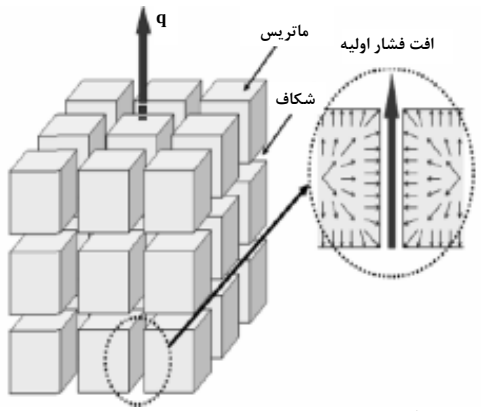
شکل ۱۹- بازیافت اتان از مخزن با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی در تراوائی ۰/۰۰۱ md (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر نمودن آن می‌باشد)

با مقایسه شکل‌های (۱۲) تا (۱۹) می‌توان به این نتیجه رسید که نفوذ مولکولی در این حالت همچون حالت قبل؛ خود را در تراوائی‌های کمتر از ۰/۰۱ میلی‌دارسی نشان می‌دهد به‌طوری‌که می‌توان بیان کرد که در تراوائی های کمتر از ۰/۰۰۰۱ میلی‌دارسی، گرادیان 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.

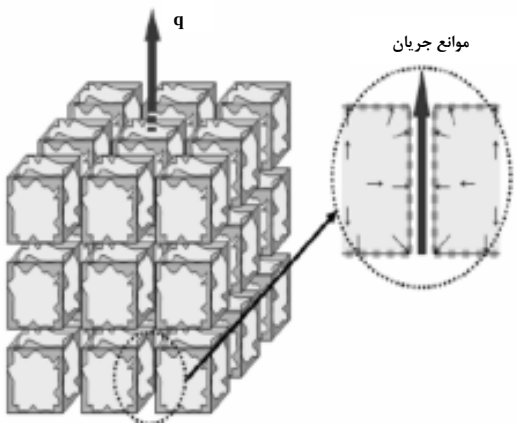
۱۰- حالت سوم: بررسی نفوذ مولکولی در مخزن دو جزئی و دو فازی

مراحل اولیه افت فشار در یک مخزن شکافدار طبیعی گاز میعانی در شکل (۲۰) نشان داده شده است. در طول تولید از مخزن شبکهٔ شکاف در معرض سریع‌تر افت فشار قرار خواهد گرفت و بعد از گذشت مدت کافی از تولید و با برقراری گرادیان 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 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 (تراوائی 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]



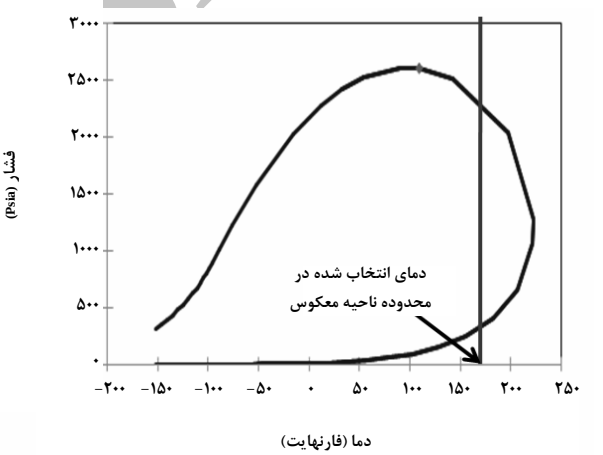
شکل ۲۱- ظاهر شدن میعان در مخازن شکافدار طبیعی گاز میعانی [۱۵]

Archive of SID

www.

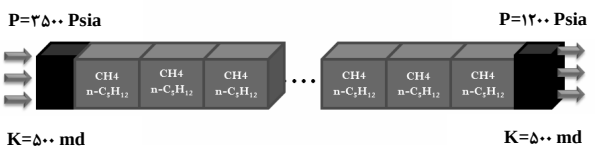
در شکل (۲۱)، میعان نامطلوب زیادی اطراف لبه‌های ماتریس بلوک‌ها را پوشش داده است و قسمت اعظمی از گاز هیدروکربنی در درون بلوک‌ها به دام افتاده است. این وضعیت در مخازنی با تراوائی پایین، بحرانی‌تر می‌شود. در چنین حالتی است که پدیدهٔ نفوذ مولکولی از اهمیت خاصی برخوردار خواهد شد به‌طوری‌که مکانیزم اصلی تولید از مخزن را به خود اختصاص می‌دهد [۱۵].

به جهت مدل‌سازی چنین رفتاری در ماتریس بلوک، ترکیب سیال اشباع کنندهٔ آن را به‌صورت 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 اندازهٔ 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 معادلهٔ حالت پنگ[1] و رابینسون[2] برای رفتار سیال (PVT) و تعادل ترمودینامیکی استفاده شده [۱۶] و همچنین داده‌های تراوائی نسبی و فشار موئینگی مرجع [۲] در شبیه‌سازی به‌کار گرفته شده است. شکل (۲۳) طرح اجمالی تک ماتریس بلوک در نظر گرفته شده در این حالت را نشان می‌دهد.



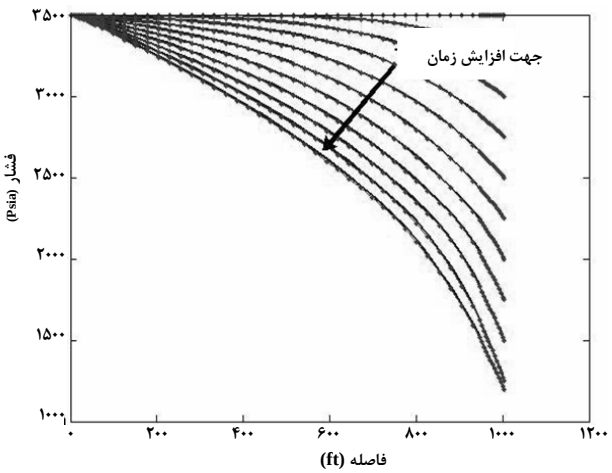
شکل ۲۳- طرح اجمالی یک ماتریس بلوک تک بُعدی، دو جزئی و دو فازی که در سمت چپ آن تزریق و از سمت راست آن تولید می‌شود

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 تراوائی ۰/۱ میلی‌دارسی 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 فازی در مخزن داشته باشیم در این تراوائی (۰/۱ میلی‌دارسی) 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 آیالا در تز دکترای خود در حالت تولید طبیعی از مخازن گاز میعانی شکافدار

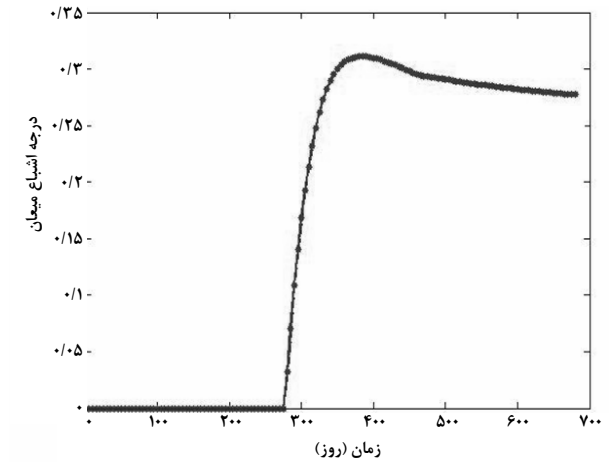
1. Peng
2. Robinson

www.SID.ir
Archive of SID

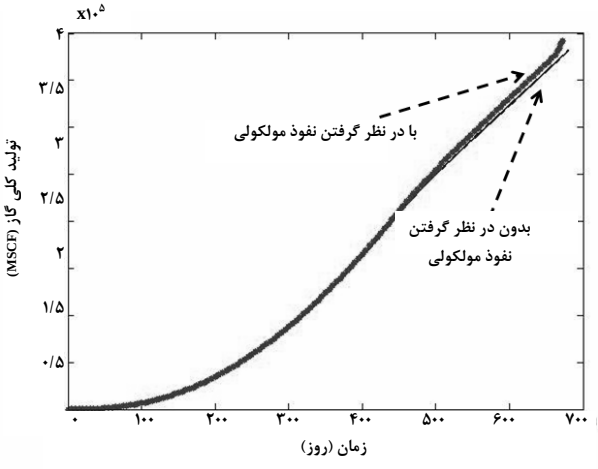
به آن رسیده بود (پدیده نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک‌های با تراوائی کمتر از ۰/۰۱ میلی‌دارسی مؤثر خواهد بود)؛ در حالت تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکافدار پدیدهٔ نفوذ در ماتریس بلوک‌های با تراوائی یک مرتبه بیشتر از آن یعنی در تراوائی ۰/۱ میلی‌دارسی تأثیر خود را به‌صورت چشمگیری نشان می‌دهد.



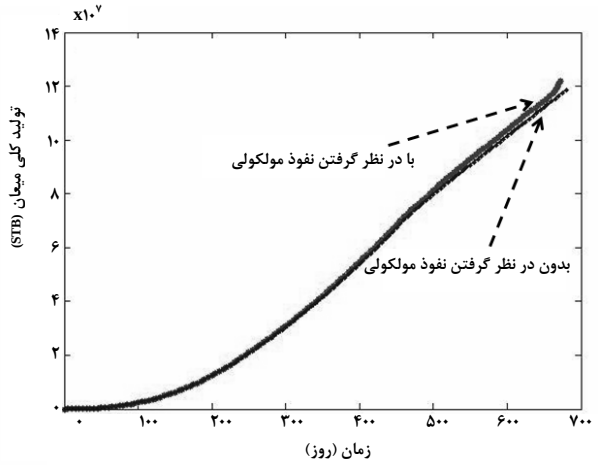
شکل ۲۴- توزیع فشاری با و بدون نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۱ (در این شکل توزیع با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی با خط نقطه‌دار نشان داده شده است که بر روی خط بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی واقع شده است)



شکل ۲۵- درجهٔ اشباع در شبکه بلوک ۴۸، با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۱ (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)



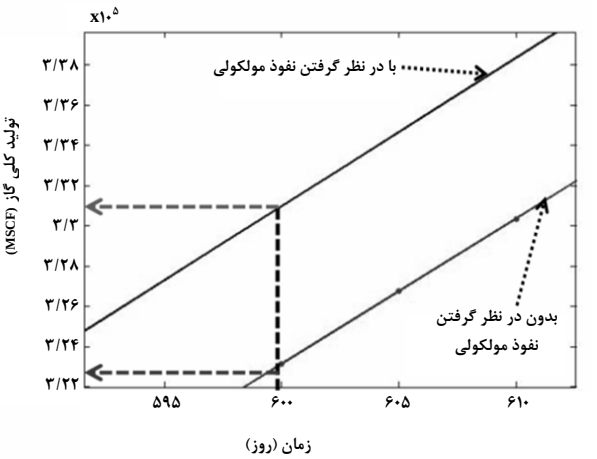
شکل ۲۶- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۱ (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)



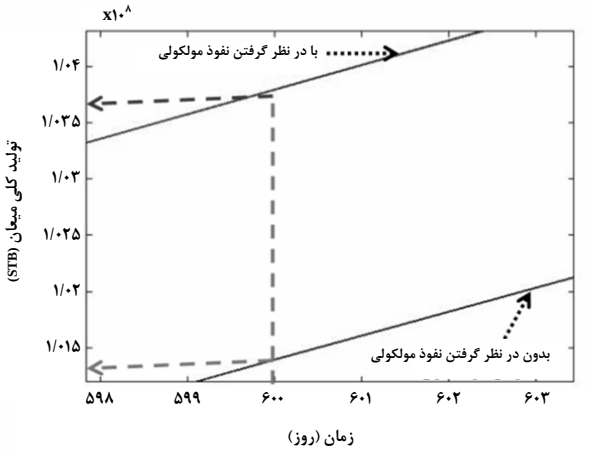
شکل ۲۷- تولید کلی میعان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۱ (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)

با کم شدن تراوائی 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 تراوائی ۰/۰۰۱ میلی‌دارسی 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

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

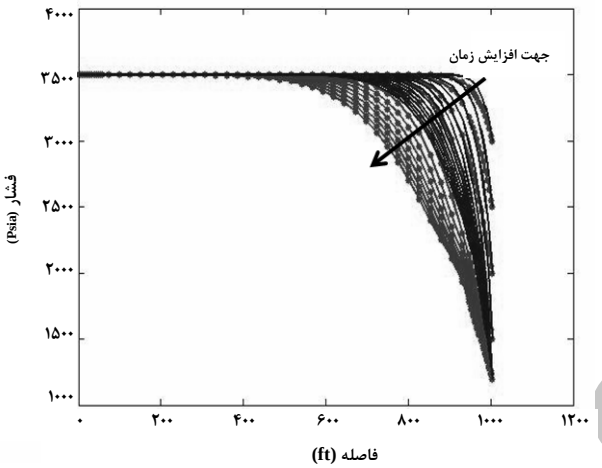


شکل ۲۸- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۱، در یک زمان مشخص شبیه‌سازی (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)

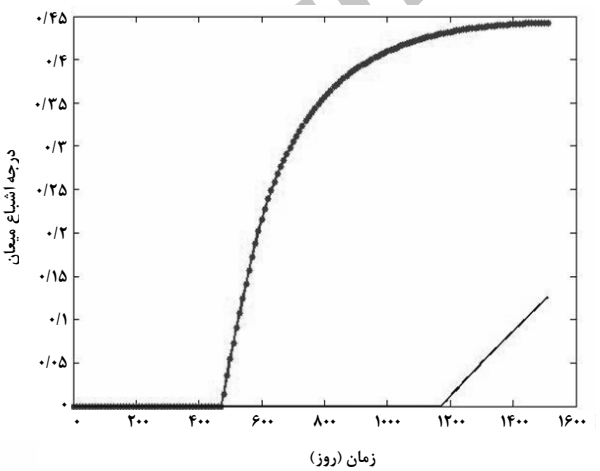


شکل ۲۹- تولید کلی میعان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۱، در یک زمان مشخص شبیه‌سازی (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)

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 پدیدهٔ نفوذ خود را نشان می‌دهد در حالی‌که با کمی بزرگنمایی بر روی این نمودار به شکل (۳۳) می‌رسیم که به وضوح 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.

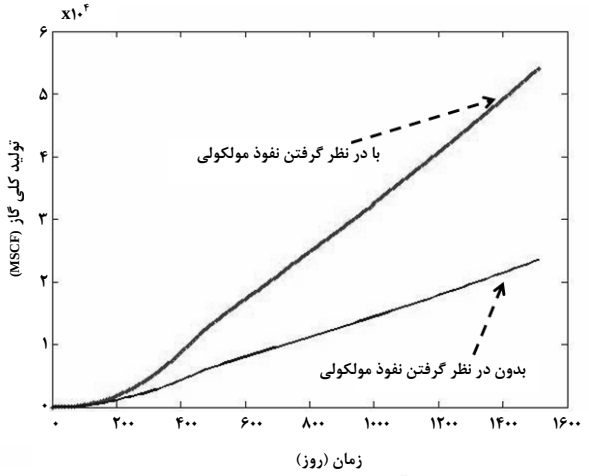


شکل ۳۰- توزیع فشاری با و بدون نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۱ (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر نمودن آن می‌باشد)

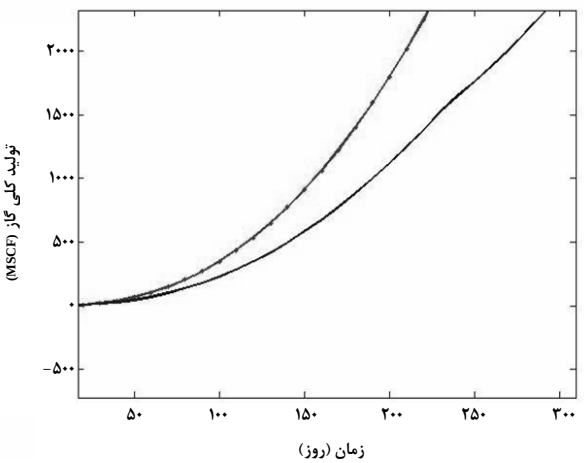


شکل ۳۱- درجهٔ اشباع در شبکه بلوک ۴۸، با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۱ (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می‌باشد)

www.SID.ir

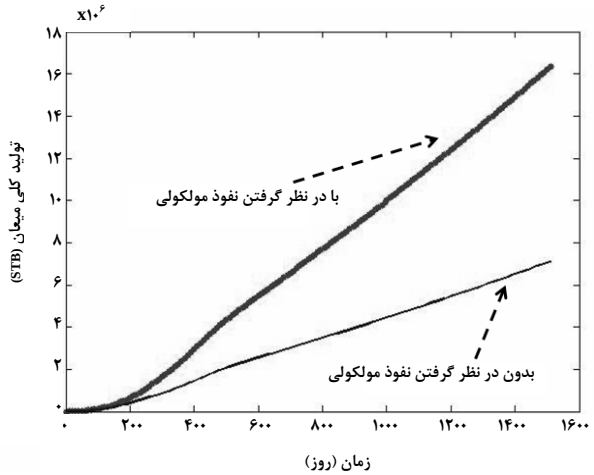


شکل ۳۲- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۱ (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)

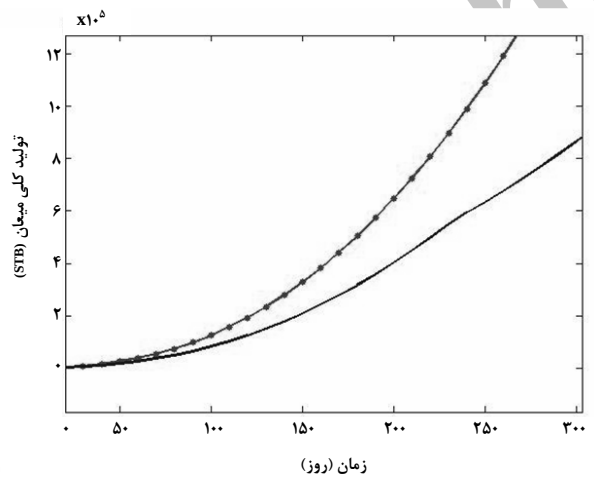


شکل ۳۳- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۱ (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می‌باشد)

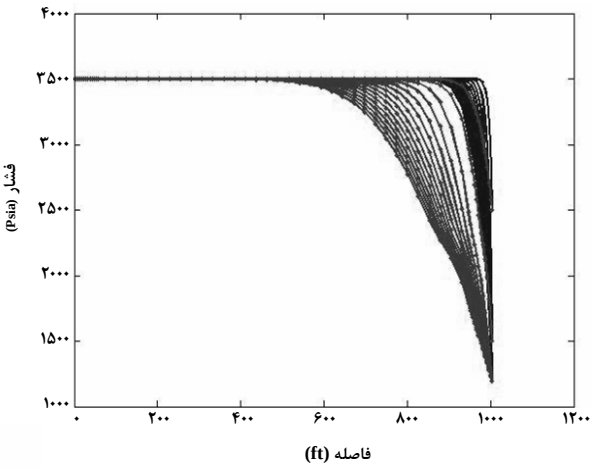
شکل‌های (۳۶) تا (۳۹)، به بررسی نفوذ مولکولی در ماتریس بلوکی با تراوائی md ۰/۰۰۰۱ می‌پردازند. در حالت تراوائی‌های خیلی کمتر (۰/۰۰۰۱ میلی‌دارسی) همانگونه که مشاهده می‌شود تفاوت‌ها اینقدر قابل توجه است که حتی اولین توزیع گام زمانی در شکل (۳۶) در حالتی که نفوذ در نظر گرفته شده است از توزیع فشاری بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی در مخزن بیشتر پیشرفت نموده است و یا با توجه به شکل (۳۷) که درجهٔ 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 حالی‌که در حالت بدون در نظر گرفتن نفوذ مولکولی حتی تا پایان زمان شبیه‌سازی (حدود ۴ سال)، میعانی در آن شبکه بلوک مشاهده نمی‌شود.



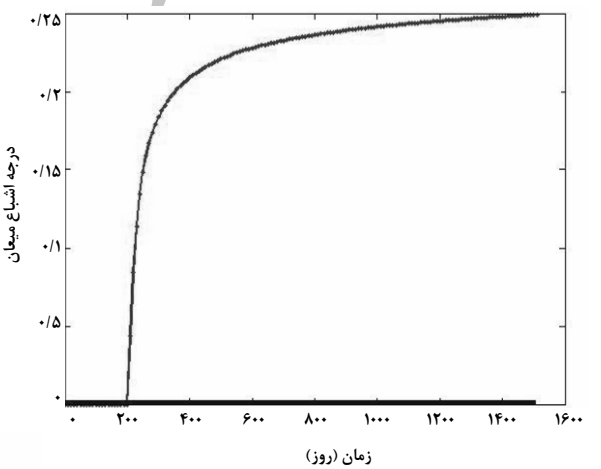
شکل ۳۴- تولید کلی میعان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۱ (در این شکل خطوط با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی و بدون در نظر گرفتن آن با پیکان نشان داده شده‌اند)



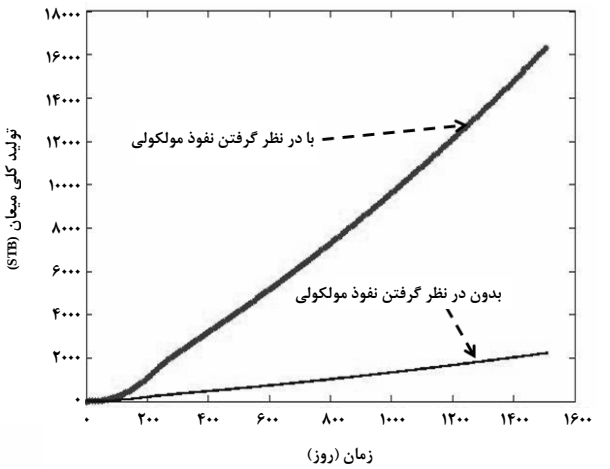
شکل ۳۵- تولید کلی میعان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۱ (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر نمودن آن می‌باشد)



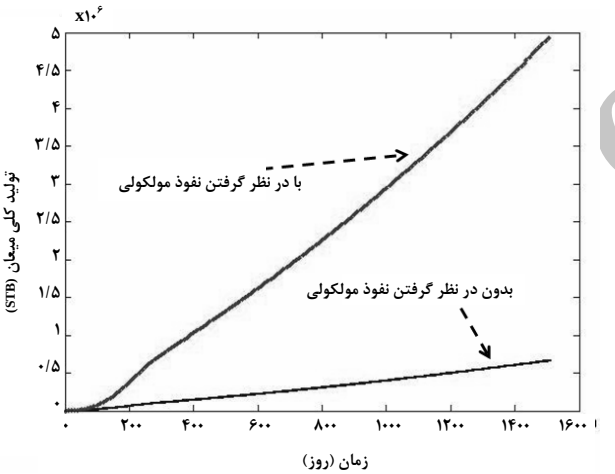
شکل ۳۶- توزیع فشاری با و بدون نفوذ مولکولی در ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۰۱ (در این شکل خط نقطه‌دار مربوط به حالتی است که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده و خط بدون نقطه مربوط به حالت صرف نظر کردن آن می‌باشد)



شکل ۳۷- درجهٔ اشباع در شبکه بلوک ۵۴، با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۰۱ (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)



شکل ۳۸- تولید کلی گاز با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۰۱ (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 میعان با و بدون در نظر گرفتن نفوذ برای ماتریس بلوک با تراوائی md ۰/۰۰۰۱ (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 تراوائی کمتر از ۰/۰۱ میلی‌دارسی مؤثر بوده در حالی‌که اگر مخزن به‌صورت

نکته جالبی که در شکل‌های (۳۸) و (۳۹) مشاهده می‌شود این است که در این تراوائی 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.

www.SID.ir

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

در شبیه‌سازهای عددی کار، بیشترین زمان برای انجام محاسبات در محاسبهٔ 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 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 Boubeguira 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).

Archive of SID