مدلسازی ترکیبی پدیده نفوذ ملکولی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گازی و گاز میعانی شکافدار کم تراوا – مدل تک بلو کی

پژه وش نفت
سال بيست و يكم

شماره ۶۵ صفحه ۱۷–۳، ۱۳۹۰ ابوالقاسم کاظمینیاکرانی^۹، شهاب گرامی^۲، سیروس قطبی^۱ و عبدالنبی هاشمی^۳ ۱- دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت ۲-شرکت ملی نفت ایران، مرکز پژوهش و توسعه (R & D) ۳- دانشگاه صنعت نفت تهران Aboulghasem.kazemi@gmail.com

مكيده

در نظر گرفتن نفوذ ملکولی همزمان با گرادیان فشاری در محیط متخلخل معمولاً به صورت جریان چند مکانیزمی خوانده می شود. نفوذ ملکولی پدیده ای است که خواه ناخواه به همراه گرادیان فشاری در مخزن اتفاق می افتد و در بیشتر مواقع اثر آن در شبیه سازی مخازن منظور نمی شود که دلیل آن به غالب بودن مکانیزم گرادیان فشاری برمی گردد. اما در بعضی از مخازن صرف نظر کردن از نفوذ مولکولی در شبیه سازی، منجر به پیش بینی رفتاری غیر از رفتار واقعی مخزن خواهد شد. یکی از حالت هایی که نفوذ ملکولی تأثیر بسیار اساسی در رفتار مخزن از خود نشان می دهد، مخازن گاز میعانی شکاف دار می باشد. مقاله حاضر اولین کاری است که به بررسی نفوذ ملکولی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکاف دار می پردازد.

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

مقدمه

شبیهسازی مخزن یکی از ابزارهای مفید و عملیاتی میباشد که اختراع و پیشرفت دنیای کامپیوتری به مهندسان مخزن عرضه نموده است. بسته به پیچیدگی رفتار سیال مخزن، مدلسازی مخزن به دو دسته اصلی مدلسازی نفت سیاه ^۱ و مدلسازی ترکیبی تقسیم میشود. شبیهسازی مخازن هیدرو کربنی 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 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 موفق تر میباشد. 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

1. Black Oil Simulator

2. Compositional Simulation

بروث رفقت و شماره ۶۵

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

در سال های اخیر نواسانات قیمت نفت، نیاز به شبيهسازهاي دقيق 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 می گذارد، منظور نمودن و یا صرف نظر کردن از نفوذ ملکولی در شبیه سازی مخازن می باشد. در نظر گرفتن پدیده نفوذ ملکولی در شبیه سازی مي تواند دقت آن را به ميزان قابل توجهي بالا ببرد؛ از طرفي در نظر گرفتن این ترم در شبیه سازی، سرعت شبیه سازی را به میزان بسیار زیادی پایین می آورد. بنابراین در این تحقیق به دنبال این هستیم که مرز تأثیر گذاری این پدیده را در تزریق گاز طبیعی به یک مخزن گاز میعانی آ شکافدار بهدست آوریم تا در شبیهسازیهای بعدی در بالای این حد، از نفوذ ملکولی بهمنظور افزایش سرعت صرف نظر شود و در پایین این مقدار، نفوذ ملکولی منظور گردد تا دقت شبيهسازي همچنان بالا باقى بماند.

بررسے نفوذ ملکولی اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط ارتکین ؓ و همکاران به جامعه علمی ارائه شــد [۱]. او یک طیف به منظور چگونگی اهمیت هر کدام از دو عامل تولید سیال (دارسی و فیکی) را برای مخازن معمولی پیشینهاد داد. اما از آنجایی کیه کار او در مخازن معمولی با تراوایی^³ بسیار پایین (در حد ۰/۰۱ میلیدارسی) كاربرد داشت و این مخازن نیز به ندرت یافت می شوند؛ کار او در آن سالها چندان مورد استقبال مهندسان نفت واقع نشد، تا اینکه در سال ۲۰۰۵ آیالا[°] در تز دکترای خود به راهنمایی ارتکین در دانشگاه ینسیلوانیا بر روی موضوع مکانیزمهای چندتایی مخازن گاز میعانی شــكافدار كار نموده و نتايج بسـيار عالى را ارائه داد [٢]. نفوذ ملکولی در مخازن شکافدار بر خلاف مخازن معمولی، می تواند به صورت مؤثر بر بازده تزریق گاز در مخازن نفتی و یا بازگردانی گاز در مخازن گاز میعانی مؤثر باشــد [۳]. در اهمیت این موضوع همین بس که در فر آیند تزریق گاز طبیعی در یک مخزن شکافدار با تراوایی ماتریـس بلوکهای خیلی کم، شبیهسـازی که در آن نفوذ

ملکولی در نظر گرفته نشده است، تزریق در فشار بالاتر را پيشينهاد مي کند در حالي که بر اسياس مدل ورن و روت [٤] آنچه در عمل مشاهده می شود این است که تزریق در فشار بالا، علاوه بر بالا بردن هزينه تزريق؛ ميان شكني زود هنگام گاز تزریقی را هم بهدنبال خواهد داشت. بر عکس، مدلسازی که در محاسبات خود نفوذ ملکولی را در نظر می گیرد، تزریق با فشار بالا را پیشنهاد نمی کند چرا که در مخازن شـكافدار با تراوائي ماتريس بلوكهاي خيلي كم عملاً گرادیان فشاری سهم زیادی در تولید هیدروکربن نخواهد داشت و عمده هيدروكربن توليد شده بهدليل يديده نفوذ ملكولي مي باشد.

یدیده نفوذ ملکولی هم در حالت تک فازی و هم در حالت دو فازی در مخزن اتفاق می افتد که در حالت دو فازی مخازن شکافدار بحرانی تر است. با تولید از یک مخزن گاز میعانی شـکافدار و افت فشار آن به زیر فشار شبنم^ ترکیب سیال، تشکیل میعان در شرایط فشاری و دمایی مخزن شروع خواهد شد. در مخازن شکافدار گاز میعانی، لبه های اطراف بلوک های ماتریس و خود شکاف ها اولين نقاط تشكيل ميعان مي باشند، چرا كه اين نقاط در معرض اوليه افت فشار هستند. ممكن است كه ميعان تشكيل شده در شكافها از تحركيذيري بالايي برخوردار باشد. اما میعان تشکیل شده در لبههای ماتریس بلوک این گونه نيست. تشکيل ميعان در لبههاي اطراف ماتريس بلوک، همانند سدی در مقابل هیدروکربن داخل بلوکها عمل مي كند و تشـكيل آن، توليد هيدروكربن داخلي بلوكها را با مشکل روبرو مینماید. این شرایط در مخازن شکافدار با ماتریس بلوکهای فشرده بسیار اساسی خواهد بود. در چنین مخازنی اختلاف غلظت سیال در شکاف و ماتریس بلوک منجر به تولید فیکی می شود که به همراه تولید دارسے بر روی مخزن تأثیر می گذارد. تشکیل این سد و غالب بودن تولید فیکی در مخازن شکافدار با بلوکهای تراوايي پايين، شديدتر و بحراني تر خواهد بود [۲]. در این تحقیق، یدیده نفوذ ملکولی به صورت تودهای

1. Molecular Diffusion 6. Warren

- 2. Gas Condensate 7. Root 8. Dew Point
- 3. Ertekin
- 4. Permeability
- 5. Ayala

فرض می شود. به این صورت که گرادیان چگالی گاز در یک بلوک و بلوک مجاور آن باعث حرکت از نوع فیکی می شود و همان گونه که آیالا در تز دکترای خود پیشنهاد می دهد، نفوذ در حالت گازی ۱۰۰ برابر نفوذ در حالت مایع می باشد [۲]. بنابراین در حالت دو فازی، این پدیده تنها در فاز گاز در نظر گرفته می شود. ضرایب نفوذ و تراوایی نیز از جمله پارامترهایی است که تأثیر هر کدام از آنها در بازیافت هیدرو کربن از مخازن، مورد بررسی قرار می گیرد.

مخازن گاز میعانی

کشف مخازن گاز میعانی همزمان با پیشرفت در تکنولوژی حفر مخازن عمیق تر و گرم تر افزایش پیدا نمود. کرفت و همکاران به وضوح نشان دادند که چگونه کشف مخازن گازی و گاز میعانی با شروع تکنولوژی حفر چاههای عمیق تر در سال ۱۹۵۰ رشد نموده است [٥]. از آن به بعد، اهمیت مخازن گاز میعانی با گذر زمان افزایش پیدا نمود.

در مخازن گاز میعانی، شرایط اولیه مخزن بین نقطه بحرانی^۲ و نقطه میعانی بحرانی^۳ سیال مخزن می باشد که منجر به نشان دادن رفتاری تحت عنوان رفتار معکوس^۲ در این گازها می شود. بر اساس مطالعات موسز[°] و دانهو¹ در سال ۱۹۹۲، بسیاری از مخازن گاز میعانی در محدوده فشاری و دمایی به ترتیب ۳۰۰۹ تا ۳۰۰۰ و ۲۰۰۰ و ۲۰۰۰ و تا ۲۰۰۰ عی باشند [7].

برای پیش بینی عملکرد تولید از مخازن گاز میعانی، معمولاً مدلسازی به روش شبیه سازهای مدل ترکیبی انجام می گیرد که دلیل آن وابستگی تولید به ترکیب سیال در این نوع از مخازن می باشد. این مسأله باعث می شود که هزینه های گزافی به منظور شبیه سازی و مدل سازی دقیق این مخازن و پیش بینی رفتار فازی و مشخصات جریانی سیال در این مخازن پرداخته شود [۲].

مخازن شکاف دار طبیعی قسمت اعظمی از نفت و گاز تولید شده در جهان، از مخازن گاز میعانی شکاف دار به دست می آید. بر اساس مطالعات پاپی^۷ در سال ۲۰۰۳، بیش از ۵۰ درصد از هیدرو کربن های تولید شده در جهان از مخازن شکاف دار می باشد [۷]. مخازن SID.ir

شکافدار در حالت ایده آل به صورت تعدادی ماتریس بلوک در یک شبکه از شکافها تصور می شوند. این مدل معمولاً به نام مدل "حبه قندی"^۸ شناخته می شود که برای اولین بار توسط ورن و روت در سال ۱۹۶۳ ارائه شد [٤]. در این مدل به جهت ساده سازی بیشتر، فرض می شود 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 می شوند [٤]. شده است که چون در این مقاله نیازی به این مدلها نبوده شده است که چون در این مقاله نیازی به این مدلها نبوده و تنها یک تک بلوک به عنوان نماینده یک مخزن شکاف دار به کار گرفته شده، این مدله ا در مقاله ارائه نشده اند.

مطالعه تک بلوکی مخازن شکافدار

مخازن شکافدار طبیعی، ساختارهای بسیار پیچیدهای دارند کے جزئیات آنھا ہنے ز به صورت یک مجھول باقیمانده است. در این مخازن، ماتریس بلوکها بیش از ۹۰٪ کل هیدروکربن در جای را در خود ذخیره نمودهاند. بنابراين مىتوان گفت كه بيشتر هيدروكربن 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 ذخيره شده در ماتريس بلوک مي باشد نه شکافها. از طرف دیگر در مخازن شکافدار طبیعی، سیستم شكافها مسيرهايي مؤثر رابراي عبور سيال هيدروكربني از مخزن به درون چاه تولیدی مهیا می کنند. شبکه شکافها با سطح گستردهای از ماتریس ها در ارتباط می باشند و تغییرات فشار شکافها بر رفتار سیال درون ماتریس، تأثیر می گذارد. به عبارت ديگر، فشار شكافها با چگونگی توليد سيال درون ماتریس ها در ارتباط می باشد. در چنین شرایطی

1. Craft

- 2. Critical
- 3. Cricondentherm
- 4. Retrograde
- 5. Moses
 6. Donohoe
- Papay
- 8. Sugar Cube

پژوش نفت و شماره ۶۵

می توان بیان کرد که شکافها به عنوان 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 به عنوان چند تک بلوک، می توان نتیجه گرفت که بازیافت نهایی از کل مخزن به وسیله رفتار هر تک بلوک کنترل می شود. بنابراین، فهم پدیده های اتفاق افتاده در هر تک بلوک می تواند اطلاعاتی کلیدی را در رابطه با کل مخزن شکاف دار 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 می شود.

یامامو تو ^۱ و همکاران در سال ۱۹۷۱ به مدلسازی ترکیبی یک تک بلوک دو بعدی 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 در شرایط افت فشار و حفظ فشار پرداختند [۸].

کلپ^۲ و مورس^۳ 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 می شود، محاسبه گردیده است [۹].

پیسمن⁴ در سال ۱۹۷٦ بیان نمود که رفتار مخازن شکاف دار را می توان 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 همرفت⁶ و انگشتی شدن^۲ به دلیل پدیده معکوس چگالی^۷ با استفاده از آنالیز آشفتگی برای یک شکاف مرتبط با ماتریس بلوک تحت افت فشار پر داخت. نتایج این آزمایش نشان داد که چگالی معکوس در محدوده ضرایب معمول نفوذ ناپایدار، اتفاق می افتد [۱۰].

ون گولف^ در سال ۱۹۸۲ نشان داد که فرض اساسی در مطالعه تک بلوکی مخازن شکافدار، این است که باید تک

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، می توان 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 یدیده نفوذ ملکولی، از یک مسأله خیلی ساده شروع کرده و رفته رفته مسأله را پیچیده مینماییم. به این صورت که در ابتدا، ماتریـس بلوكي را در نظر مي گيريم كه تنها از متان اشـباع 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، می تواند ما را در رسیدن به حالت واقعی تر کمک نماید. در مرحله بعد، ماتریس بلوک را به صورت دو جزیی متان و اتان که با درصد جزئی یکسان اشباع شده، در نظر می گیریم. در این حالت با این فرض کے هدف از تولید این مخزن بازیافت اتان است، تزريق متان در سمت چپ مخزن قابل توجيه می باشد. اما از آنجا که ترکیب های 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 نمی دهد، در آخرین مرحله به منظور بررسی تأثیر نفوذ در حالت دو فازی، ترکیب آن را ب. ۸۰٪ متان و ۲۰٪ نرمال پنتان تغییر می دهیم که در دمای در نظر گرفته شده برای مخزن (۱۷۵°F) رفتار معکوس از خود نشان مي دهد.

معادله ترکیبی برای شبیهسازی در یک سیستم جریانی چند مکانیزمی

در ایسن کار از فرمولاسیونی که آیسالا در تز دکترای خود اثبات و استفاده نموده، در شبیه سازی استفاده شده است.

- 5. Convection
- 6. Fingering
- 7. Density Inversion
- 8. Van-Golf

^{1.} Yamamoto

Kleppe
 Morse

^{4.}Peaceman

در زیر تنها فرمولاسیون کلی آن آورده شده و از ارائه
چگونگی گسسته سازی معادلات صرف نظر می شود [۲]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(x_m \bar{\rho}_o A_x \frac{k_x k_{ro}}{\mu_0} \frac{\partial \Phi_o}{\partial x} + y_m \bar{\rho}_g A_x \frac{k_x k_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial \Phi_g}{\partial x} + y_m \phi S_g A_x \frac{D_{eff}}{6.328} \frac{\partial \bar{\rho}_g}{\partial x} \right) \Delta x$$

$$V_b = \frac{\partial}{\partial x} \left[t \left(S_{abc} = x_{abc} - \bar{S}_{abc} - \bar{S}_{abc} \right) \right]$$

S: درجه اشباع گاز در شرایط مخزن، (بدون بُعد) $F_g: ضریب نفوذ ملکولی مؤثر فاز گاز، (ft²/day)$ $<math>F_{eff}: ضریب نفوذ ملکولی مؤثر فاز گاز، (ft²/day)$ $<math>F_b:$ حجم ماتریس بلوک در نظر گرفته شده، (ft³) برای رسیدن به معادله بالا، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است: ا-هیدرو کربن ها در هر زمان و در هر نقطه از مخزن به طور آنی به حالت تعادل می رسند؛ به عبارت دیگر تعادل تر مودینامیکی نیلی سریع تر از سرعت حرکت سیال اتفاق خواهد افتاد. ۲- تعادل تر مودینامیکی می تواند به کمک محاسبات فلش ¹ در فشار و دمای مخزن ثابت می باشد و از گرادیان دمایی زمین صرف نظر می شود.

٤-برای جریان سیال در مخزن از قانون دارسی (برای جریان تحریک فشـاری) و قانـون فیک (برای جریـان تحریک غلظتی) استفاده میشود.

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

۲- نفوذ ملکولی بین یک بلوک و بلوک مجاور آن به صورت تودهای در نظر گرفته می شود تا به صورت جزئی. به این صورت که اختلاف چگالی منجر به تولید فیکی می شود و اختلاف غلظت یک ملکول در یک بلوک و بلوک مجاور آن، در تولید فیکی تأثیری ندارد.

به جهت اینکه در حل سیستم معادلات بالا به حالت تکین ۲ برخورد نکنیم، لازم است که در همین جا برابری تعداد معادلات و مجهولات این سیستم مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا کے ترکیب مورد نظر در ایے تحقیق حداکثر دو جزئی می باشد، در هر گرید " بلوک دو معادله نوشته می شود. بنابراین برای این که به حالت تکین بر نخوریم، در هر گرید بلوک حداکثر دو متغیر مستقل می توان تعریف نمود. چون حداکثر دو جرع در ترکیب مورد نظر در این تحقيق موجود مي باشـد، تنها كسـر مولى يك جزء در هر بلوک می تواند به عنوان مجهول تعریف شود و کسر مولی جزء دیگر با استفاده از پایستگی مولی بین اجزاء محاسبه می شود. بنابراین مجهول دیگر در هر بلوک، فشار سیال می باشد. با داشتن فشار و کسر مولی کلی ترکیب در هر گرید بلوک، می توان محاسبات فلش را انجام داد و بهدنبال آن درجه اشباع و دیگر پارامترهای مورد نیاز را محاسبه نمود. n در حالتی که ترکیب موجود در مخزن به صورت جزء باشد و مخزن به صورت n_{blocks} گسسته سازی شده باشد، برای شبیه سازی آن باید n_c×n_{blocks} معادله ساخته شده و بهصورت 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 تــک فازی، ترمهای مربوط به میعـان از معادله بالا حذف می شود. همچنین در حالت تک جزئی، ترمهای کسر مولی برابر با یک در نظر گرفته می شود.

تکنیکهای حل عددی

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

^{1.}Flash

^{2.} Singular

^{3.} Grade

پژهش نفت و شماره ۶۵

شــکافها را نشان میدهد که در سمت چپ با فشار ثابت ٤١٠٠ psia تزریق متان و در سمت راست با فشار ثابت ۳۱۰۰ psia تولید انجام می شود و سایر مرزها، بدون جریان در نظر گرفته شدهاند. تخلخل در نظر گرفته شده برای این ماتریس بلوک ۱۳٪ و ارتفاع آن ۴t ۳۱ است. عرض ماتریس بلوک ft و عرض شکافها ۲۰ ۱۴ است. مشخصات شکاف برای محاسبه ترمهای تحرکیذیری در مرز بلوکها و شـكاف، مورد نياز مي باشـد. طول هر گريد بلوك در ابتدای ماتریس بلوک (قسمت تزریقی) و انتهای آن (قسمت تولیدی) به اندازه ٦ بلوک به طول ft و در فاصله بین این دو ۱٥/٦٢٥ ft در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، طول کلی ماتریس بلوک به عنوان نمایندهٔ مخزن شکافدار ۲۲۰ ft فرض شـده اسـت. تراوایی شـکافها در این کار ثابت و برابر با ۵۰۰۰ md در نظر گرفته شده است. در واقع مهم ترین 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 می توان فرض نمود که گرید بلوک اول و آخر نقش شـکاف را بازی میکنند. در حالی که در سیلابزنی معمولی یک مخـزن، تراوایی همه گرید بلوکهای در نظر گرفته شده در شبیهسازی، هم مرتبه می باشد. یارامترهای متغیر در این حالت، تراوایی ماتریس و ضریب کلی نفوذ می باشد که به تر تیب در محدوده md ۰/۰۰۱ تا md و ft²/day ۲۰ (حالت بدون نفوذ مولکولی) تا ft²/day ۲۰ و تغییر می کنند. مطالعات کتابخانه ای نشان می دهد که در حالت كلى نيز، محدوده تغييرات ضريب نفوذ كلى بين ft²/day • تا ۲۰ ft²/day می باشد [۲]. برای ضریب کلی نفوذ؛ کاسلر مقادیر بین ۹/۳ ft²/day تا ۹/۳ ft²/day را در حالت استاندارد پیشنهاد نموده است [۱٤].

در شــکلهای ۲ تا ٤ پروفایل فشــاری برای ماتریس بلوک با تراواییهای مختلف، رســم شــده است که در این شــکلها، پیکان جهتدار بر روی پروفایل فشــاری جهت حرکت آن را با گذر زمان نشان میدهد. این مقاله، "ماتریس بلوک" همان تک بلوک در نظر گرفته شده به عنوان نماینده مخزن شکاف دار است در حالی که منظور از "گرید بلوک" یکی از گرید بلوک های شبیه سازی می باشد) ماتریس جاکوبین به صورت ۱۰۰ × ۱۰۰ خواهد شد که برای تشکیل آن به صورت عددی لازم است که تابع، حداقل ۲۰۰۰×۲ بار فراخوانی تابع شود. به همین دلیل استفاده از تکنیکی که بتواند بدون فراخوانی مجدد تابع، این ماتریس را تشکیل دهد، سرعت شیبه سازی را دوچندان میکند. تکنیک برویدن' [۱۲] با استفاده از ماتریس جاکوبین پیشین و دیگر پارامترهای مورد نیاز، سرعت شبیه سازی 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 هرگرید بلوک (اول، دوم و ...) و در سطرهای (اول، دوم و ...) مشتق معادلات نسبت به فشار گرید بلوک زوج (دوم، چهارم و ...) گرفته می شود. این ترتیب مشتق گیری، پایدار ترین حالت برای ماتریس جاکوبین در بین حالتهای امتحان شده در این کار می باشد که با هر حدس اولیه معقولی همگرا می شود در حالی که با تغییر ترتیب مشتق گیری حتی با حدس اولیه ای نزدیک به جواب اصلی نیز، همگرایی حاصل نمی شود [۳۳].

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

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

در این شـکل قسـمتهای مشـخص شـده با رنگ تیره،



شکل۱- شماتیک ماتریس بلوک در نظر گرفته شده در حالت تکجزئی و تک فازی

- 1. Broyden
- 2. Cussler





٧..

شکل۲– 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.)



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



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

31..

پژهش نفت و شماره ۶۵

از این شکل ها می توان نتیجه گرفت که تفاوت حالتهای مربوط به در نظر گرفتن نفوذ از تراوایی ۱ md ۰/۰۱ برای ماتریس بلوک شروع می شود (شکل ٤). هر چه تراوایی ماتریس بلوک کمتر گردد، شدت تأثیر آن نیز بیشتر خواهد شد.

شکل ۵ پروفایل فشاری در زمان شبیهسازی ۲۰۰ روز در ضرایب نفوذ مختلف ft²/day تا ۲۰ ft²/day را برای یک ماتریس بلوک با تروایی ۱ md ۲۰۰۰ نشان می دهد. از این شکل می توان نتیجه گرفت که هر چه ضریب نفوذ ملکولی بیشتر باشد، پالس فشاری با سرعت بیشتری در ماتریس بلوک حرکت خواهد نمود.

حالـت دوم: بررسـی نفـوذ ملکولـی در ماتریس بلوک دوجزئی و تک فازی

در این حالت تمامی مشخصات در نظر گرفته شده برای ماتریس بلوک، همانند حالت اول میباشد. با این تفاوت که به جای این که ماتریس بلوک تنها با متان اشباع شده باشد، با ترکیب ۵۰٪ متان و ۵۰٪ اتان اشباع شده است. همان گونه 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 psia ثابت نگاه دارد.

بهمنظور اطمینان از اینکه شبیهساز، رفتار مخزن را به درستی پیشبینی میکند، قبل از بررسی تأثیر نفوذ ملکولی بر پروفایل های فشاری و یاکسر مولی، به بررسی رفتار پیشبینی شده به کمک شبیهساز میپردازیم. شکل 7 پروفایل کسر

مولی متان و اتان را با گذر زمان نشان میدهد. همان گونه که انتظار داریم، از آنجا که در سمت چپ این ماتریس بلوک، تزریق متان انجام میشود، باید کسر مولی متان در بلوکهای مجاور تزریق به عدد ۱ نزدیک شود و کسر مولی اتان در این بلوکها به صفر میل کند. این دقیقاً همان رفتاری است که توسط شبیهساز برای این ماتریس بلوک پیشبینی میشود.

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

بعد از اطمینان ازدرستی شبیهساز در پیشبینی رفتار مخزن، به بررسی تأثیر نفوذ ملکولی بر کسر مولی گرید بلوکهای ماتریس بلوک می پردازیم. شکلهای ۷ و ۸ تأثیر نفوذ ملکولی بر روی پروفایل کسر مولی متان در تراواییهای مختلف را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، اختلاف در لحاظ نمودن نفوذ ملکولی، از ترواییهای ۱۳۰۱ شروع می شود و در تراواییهای پلاتر اختلافی مشاهده نمی شود (شکل ۸).

در این حالت می توان 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 ملکولی با هم مقایسه نمود. خواننده می تواند برای مطالعه بیشتر به مرجع ۱۳ مراجعه نماید.



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

www.SID.ir



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

www.SID.ir

یروش آفت و شماره ۶۵

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

شــکل ۹ مکانیزم تخلیه فشــار در شــکاف و ماتریس یک مخزن گاز میعانی شــکافدار را نمایــش میدهد. در ابتدا سیال تولیدی از چاه از طریق شبکه شکاف تامین می شود.



بهدليل حجم محدود شكافها، اختلاف فشار قابل توجهمی بین ماتریس و شمکاف ایجاد میشمود که باعث میگـردد سـیال از ماتریـس بـه درون شـکاف جریـان یابد. در یک مخزن شکافدار به محض افت فشار به زیر فشار شبنم، مایع در مخزن تشکیل می شود. از آنجایمی که نقاطی مانند شکافها و لبههای بلوکهای ماتریس، در معرض افت فشار بیشتری می باشند، در این نقاط، فشار سريعتر به زير فشار شبنم افت پيدا مي كند و اولیــن نقاطی هســتند که میعان در آنهــا 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 تحرکیذیری بالایی برخوردار است، میعان تشکیل شده در لبههای بلوکها تقريباً غير قابل حركت مي باشـد. بنابراين، ميعان تشـكيل 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 www.SID.ir

در شکل ۱۰، میعان زیادی اطراف لبه های ماتریس در شکل ۱۰، میعان زیادی از گاز هیدرو کربنی در درون بلوک ها به دام افتاده است. این وضعیت در مخازنی با تراوایی پایین بحرانی تر می شود. در چنین حالتی است که پدیده نفوذ ملکولی اهمیت بالایی دارد و مکانیزم اصلی تولید از مخزن به شمار می رود [۱۵].

نخواهد شد [10].



شکل۱۰- 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 می دهیم که شماتیک این ماتریس بلوک، در شکل ۱۱آورده شده است. نمودار فازی این ترکیب در شکل ۱۲ رسم شده است. دما در این مخزن ۴° ۷۷ فرض می شود که با توجه به شکل ۱۲، سیال در چنین دمایی رفتار میعانی از خود نشان می دهد. p = 1200 psia



در ادامه به منظور بررسی بهتر پدیده نفوذ، طول ماتریس بلوک را از ۲۰۰ ft به ۱۰۰۰ تغییر می دهیم. در این حالت ۳٦ گرید بلوک با طول ۲٤ ft در قسمت میانی ماتریس بلوک و ۱۲ گرید بلوک به اندازه ft ٥ در قسمت تزریقی و تولیدی ماتریس بلوک فرض می شود. به عبارت دیگر، ماتریس بلوک در نظر گرفته شده به ۲۰ گرید بلوک ۱۲

می توان 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 nm ۱۰/۰ مؤثر است، در حالت تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکافدار، پدیده نفوذ در ماتریس بلوکهایی با تراوایی nm 1/۰ تأثیر خود را به صورت چشمگیری نشان می دهد.

با کم شدن تراوایی ماتریس بلوکها، تفاوت بین در نظر گرفتن و یا صرفنظر نمودن از نفوذ ملکولی بیشتر می شود. شکل های ۱۷ تا ۱۹، به بررسی نفوذ ملکولی در ماتریس بلوکی با تراوایی md ۲۰۰۰۱ می پردازد. در تراوایی های پایین (۰/۰۰۰۱ md) همان گونـه که مشاهده می شـود، تفاوت بسیار قابل توجه است، به طوری که در شکل ۱۷ این تفاوت در اولین پروفایل گام زمانی دیده می شود. با توجه به شکل ۱۸ که درجه اشباع میعان را در گرید بلوک ٥٤ نشان می دهد، مشاهده می شود که با در نظر گرفتن نفوذ مولکولی، بعد از حدود ۲۰۰ روز در این گرید بلوک، میعان ظاهر می شود، در حالی که با صرف نظر کردن از نفوذ ملكولي حتى تا پايان زمان شبيهسازي (حدود ی سال)، میعانے در آن گرید بلوک مشاہدہ نمی شود. نکته جالبی که در شکل های ۱۸ و ۱۹ مشاهده می شود، این است که در این تراوایی پایین ماتریس بلوک، نفوذ ملکولے حتمی در حالت تک فازی نیز بسمیار قابل توجه می باشد و تفاوت بین دو نموداری که نفوذ ملکولی در آنها در نظر گرفته شده و یا صرفنظر شده از همان ابتدا و بدون بزرگنمایی قابل مشاهده است.

تقسیم شده است. از معادله حالت پنگ رابینسون برای رفتار سیال (PVT) و تعادل ترمودینامیکی استفاده می شود [۱٦]. همچنین دادههای تراوایی نسبی و فشار مویینگی مرجع [۲] در شبیهسازی به کار گرفته شده است. شکل های ۱۳ تا ۱۹ به بررسی اثر نفوذ ملکولی بر روی پروفایل یارامتر های مختلف اختصاص دارد. شکل ۱۳ اثر اعمال پدیده نفوذ مولکولی را بر توزیع فشار درون یک ماتریس بلوک با تراوائی md /۱ md می دهد. همان گونه که از این شکل پیداست، در این تراوایی، پدیده نفوذ مولکولی اثری روی توزیع فشار درون ماتریس بلوک ندارد. شکل ۱٤ نیز موید بی تاثیر بودن پدیده نفوذ مولکولی در بلوکهای با تراوائی md /۱ md میباشد. نکته حائز اهمیت در شکل ۱۰، این است که در صورت وجود جریان تک فازی در مخزن در این تراوائی نسبتاً بالا، لحاظ نمودن و یا صرف نظر کردن از نفوذ ملکولی هیچ تأثیری روی تولید کلی گاز نخواهد داشت. اما در حالتی که دو فاز در مخزن تشكيل مي شود، اثر نفوذ مولكولي بر توليد گاز از مخزن نمایان می شود (باید توجه نمود که محور عمودی از مرتبه ۱۰۵ می باشد). در شکل ۱۹ تولید کلی گاز بعد از **۲۰۰** روز شبیهسازی، نشان داده شده است. در این شک**ا** تفاوت بین تولید گاز در حالتی کے نفوذ ملکولی در نظر گرفته شــده و حالي كه از نفوذ مولكولي صرف نظر شــده به وضوح مشاهده می شود. این شکل حاکی از آن است کـه ۲۰۰ روز پس از تولید، در صورت صرف نظر کردن از نفوذ ملكولي توليد كلي گاز به جاي MMScf، به اشتباه MMScf تخمین زده خواهد شد. بنابراین



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

www.SID.ir





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



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





شکل۱۹- پروفایل فشاری با و بدون در نظر گرفتن نفوذ ملکولی در ماتریس بلوک با تراوایی nd ۰٬۰۰۰ md

نتيجهگيرى

مهمترین نتیجهای که از این تحقیق می توان گرفت، این است که پدیده نفوذ ملکولی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گاز میعانی شکافدار در حالتی که تنها یک فاز در مخزن حضور داشته باشد؛ همچون حالت تولید طبیعی از این مخازن که توسط آیالا ارائه شده [7]؛ در ماتریس بلوکهای با تراوایی کمتر از m ۱۰/۱ مؤثر است. در حالی که اگر مخزن به صورت دو فازی عمل کند نفوذ ملکولی در ماتریس بلوکهایی با تراوایی یک مرتبه بیشتر یعنی m ۱/۱ تأثیر گذار می باشد.

در شبیه سازهای 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 سازها 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 غیر خطی 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 شبیهسازی عددی ترکیبی بسیار مهم میباشد. بهطوریکه یک ترتیب خاص در این شبیهسازی منجر به طولانی شدن فرآیند شبیهسازی و یا حتی واگرا شدن آن با حدسهای

اولیه مختلف 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 پایاننامه کارشناسی ارشد، اعلام میدارد.

علائم و نشانهها

(ft²/day): ضريب نفوذ ملكولى، (ft²/day) m_{eff} : ضريب نفوذ ملكولى، (-) m_m : كسر مولى فاز ميعان (-) m_m : تراوائى مطلق، (دارسى) (cP)، مولى فاز q، (cP) m_p : تراوائى نسبى فاز q، (-) m_p : وزن مخصوص فاز q، (-) m_p : تخلخل (-) m_c : ترجه اشباع فاز q، (-)

منابع

[1] Ertekin T., King, G, & Schwerer, F., "Dynamic Jas 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., & Boubeguira A., "Compositional reservoir simulator for fissured systems - the single-block model", SEE Journal, p. 113 - 128, 1971.

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

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

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

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

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

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

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

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