

تعیین فشار مویینگی در شکاف‌های افقی با شبیه‌سازی عددی ریزش ثقلی

پژوهش نفت

سال هفدهم

شماره ۲-۵۶

صفحه ۶۱-۴۸، ۱۳۸۶

حسن نادری

پژوهشگاه صنعت نفت، مرکز مطالعات اکتشاف و تولید

naderih@ripi.ir

چکیده

در ابتدای تولید از مخازن شکاف‌دار، به علت بالا بودن تراوایی شکاف‌های عمودی نسبت به سنگ مخزن، نفت تولید شده عمدتاً سبب تخلیه شکاف‌های عمودی می‌شود. در نتیجه ناحیه‌ای جدید به نام مورد تهاجم گاز، شکل می‌گیرد. به علت وجود گاز در شکاف‌های اطراف و نفت در داخل سنگ مخزن شرایط غیرمتعادلی ایجاد می‌شود که سبب ریزش ثقلی نفت از سنگ می‌شود.

یکی از عوامل مهم در چگونگی عملکرد مکانیزم ریزش ثقلی در ناحیه مورد تهاجم گاز، خواص فیزیکی شکاف‌های افقی موجود در این ناحیه می‌باشد. در اکثر موارد فرض بر این است که شکاف‌های افقی، موجب جدا شدن سنگ مخزن به صورت فیزیکی و عدم پیوستگی مویینگی می‌باشد. اگر بلوک‌های ناحیه گاز زده، به صورت مجزا از هم عمل کنند، میزان نفت قابل استحصال از مخازن شکاف‌دار، تحت مکانیزم ریزش ثقلی بسیار ناچیز خواهد بود. اما چنانچه پیوستگی فشار مویینگی در بین بلوک‌ها برقرار باشد، سبب خواهد شد تا میزان قابل ملاحظه‌ای از سیال موجود در سنگ مخزن از ناحیه مورد تهاجم گاز تولید شود. این افزایش تولید را می‌توان با تغییر در فشار مویینگی بلوک مورد بررسی قرار داد. از این رو لازم است تا برای شکاف افقی، فشار مویینگی

و تراوایی اختصاص داد تا تولید از سیستم تعریف شود. بر این اساس مدل‌هایی برای توابع شبه فشار مویینگی، تعریف شده است که بر اساس آن فشار مویینگی بلوک تحت تأثیر شکاف، تغییر می‌یابد، به شکلی که می‌توان مقدار تولید از بلوک‌های بر روی هم انباشته را مدل کرد.

در این مطالعه بر اساس مجموعه آزمایش‌های انجام گرفته توسط فیروزآبادی و همکاران در زمینه پیوستگی فشار مویینگی، تراوایی در شکاف افقی و اثر آن در تولید از بلوک‌ها، مدلی با استفاده از شبه توابع فشار مویینگی ارائه شده است. بر این اساس برای شکاف افقی، فشار مویینگی تعریف شد، که مقدار آن تابعی از ارتفاع شکاف نسبت به سطح تماس نفت و گاز (GOC) و عرض شکاف می‌باشد. این فشار مویینگی سبب کاهش فشار مویینگی بلوک می‌شود، به طوری که تولید از دسته بلوک‌ها حاصل شود. بر اساس مدل ارائه شده، تعریف تراوایی محیط شکاف، نقش عمده‌ای در کنترل جریان ندارد.

واژه‌های کلیدی: ریزش ثقلی، تراوایی نسبی، ناحیه مورد تهاجم گاز، فشار مویینگی، مخازن شکاف‌دار، محیط متخلخل شکاف‌دار

مقدمه

برای مطالعه سیال در محیط‌های متخلخل شکاف‌دار، هنگامی که شکاف‌ها به خوبی توسعه یافته باشند، شبکه‌های تخلخل دوگانه یا تراوایی دوگانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مدل‌های تخلخل دوگانه، سیال در داخل بلوک‌ها قرار دارد و از بلوک به شکاف می‌ریزد و سپس در شکاف‌ها جریان می‌یابد، ولی در مدل‌های تراوایی دوگانه، حرکت سیال از بلوک به بلوک نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. این مدل‌ها عموماً به لحاظ پیش‌بینی عملکرد مخزن، جواب مناسبی به مهندسان نمی‌دهند. مطالعه و تحقیق در زمینه آگاهی یافتن از اثر بلوک و شکاف بر روی هم، همچنین تعیین مشخصات شکاف، برای مدل‌سازی تولید نفت از دسته بلوک‌ها امری ضروری است. یکی از پدیده‌هایی که در مخازن شکاف‌دار مطرح است، پدیده ریزش ثقلی می‌باشد. این پدیده در هنگام تزریق گاز به مخازن شکاف‌دار و تخلیه شکاف‌ها از نفت رخ می‌دهد، که در آن بر اساس نیروهای گراویته، گاز به داخل بلوک وارد و نفت از آن خارج می‌شود. ریزش ثقلی در محیط‌های متخلخل شکاف‌دار به (۱) تراوایی مطلق، تراوایی نسبی و فشار مویینگی سنگ (۲) ارتفاع بلوک و دانسیته سیال (۳) مشخصات جریان دو فاز نفت و گاز در داخل شکاف، وابسته می‌باشد [۱]. در سال‌های اخیر برای مطالعه پدیده ریزش ثقلی، موضوع‌های آشام مجدد و پیوستگی در فشار مویینگی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲].

لوان نشان داده است که اثر نهایی در فشار مویینگی و قدرت انتقال‌پذیری در شکاف، مهمترین عوامل در تولید نفت می‌باشند [۳]. آزمایش‌های اخیر توسط فیروزآبادی و همکارانش برای مطالعه مجدد ریزش ثقلی بیانگر پیوستگی در فشار مویینگی بین بلوک‌ها می‌باشد [۴ و ۵]. دین دورک و فیروزآبادی نتایج حاصل از آزمایش‌های خود را مدل‌سازی کرده‌اند و بر اساس مشاهدات خود نتیجه گرفته‌اند مقدار تراوایی در شکاف افقی در مقدار تولید و سرعت آن مؤثر نمی‌باشد. آن‌ها عامل کنترل‌کننده را فشار مویینگی در شکاف معرفی کرده‌اند [۶].

به‌طورعمومی در کلیه نرم‌افزارهای موجود، فشار مویینگی در شکاف برابر صفر می‌باشد. این تعبیر از شکاف سبب

می‌شود تا مفهوم پیوستگی در فشار مویینگی و اضافه تولید از دسته بلوک‌ها مورد چالش اساسی قرار گیرد. لذا فیروزآبادی و همکاران با تعریف مفهوم فشار مویینگی در شکاف، سعی کردند تا تولید اضافی از دسته بلوک‌ها را در مقایسه با بلوک‌های تنها، توجیه کنند.

با استفاده از تعریف فشار مویینگی در شکاف‌های افقی و تأثیر آن در فشار مویینگی بلوک، می‌توان مدل ساده‌ای برای مدل‌های تخلخل دوگانه تعریف کرد که نتایج تولید از دسته بلوک‌ها را بیان کند. استفاده از فشار شبه مویینگی در بلوک‌های به هم چسبیده، می‌تواند روشی برای مدل‌سازی مخازن شکاف‌دار باشد.

در این پژوهش، مدل ساده‌ای بر اساس مفهوم تخلخل دوگانه نوشته شده است، که در آن سیال از بلوک به داخل شکاف ریخته شده و سپس در آن جریان می‌یابد. از مفهوم توابع شبه مویینگی در بلوک‌ها برای همخوانی نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط فیروزآبادی و همکاران استفاده شده است. این مفهوم با تابع انتقال بین بلوک و شکاف که در مدل‌های موجود استفاده می‌شود، متفاوت می‌باشد.

خلاصه آزمایش‌ها

آزمایش‌های مورد استناد در این مقاله، برگرفته از دو مقاله فیروزآبادی و مارکست می‌باشد. آن‌ها به‌منظور یافتن میزان تخلیه از بلوک و نقش شکاف‌ها در آن، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را انجام دادند و پی بردند که میزان تخلیه از بلوک وابستگی شدیدی به اندازه بازشدگی شکاف دارد. همچنین با تغییر سطح مقطع عمود بر جریان سعی کردند تا تأثیر آن را بر روی میزان جریان تولیدی پیدا کنند. در مقاله اول [۷]، پیوستگی فشار مویینگی در شکاف‌های افقی که سطح بلوک توسط جداکننده‌های کوچک و بزرگ با ارتفاع یکسان مسدود شده‌اند، مورد ارزیابی قرار گرفته است و در مقاله دوم [۸] توان انتقال مایع^۱ در محیط شکاف‌دار و اثر عرض شکاف در میزان سیال تولیدی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طورکلی این دو مقاله تأثیر عرض شکاف و سطح عمود بر مسیر سیال را در تراوایی محیط شکاف‌دار

1. Transmissibility

جدول ۱- مشخصات فیزیکی بلوک‌های مورد آزمایش [۹]

| بلوک | ابعاد L_z, L_y, L_x (cm) | KH mD | KVt mD | KVb mD | درصد تخلخل |
|------|-----------------------------------|----------|-----------|-----------|------------|
| SA | $45/49 \times 14/71 \times 14/71$ | 275 | 1035 | 865 | 22/3 |
| SB | $45/49 \times 14/71 \times 14/71$ | 799 | 468 | 786 | 21/6 |
| SC | $45/49 \times 14/71 \times 14/71$ | 346 | 811 | 642 | 22/2 |
| SD | $45/49 \times 14/71 \times 14/71$ | 698 | 695 | 574 | 21/9 |
| Tall | $182/9 \times 14/71 \times 14/71$ | 416 | 406 | 754 | 21/6 |

KVt: تراوایی عمودی در سطح بالایی سنگ

KVb: تراوایی عمودی در سطح پایینی سنگ

KH: تراوایی سطح جانبی سنگ

محققین در آزمایش‌های خود از یک سیستم شیشه‌ای برای نگهداری بلوک‌ها استفاده کردند و ابتدا محفظه را از نرمال دکان پر کرده و بعد از اشباع بلوک‌ها، شیر زیر محفظه را باز کرده تا سیال موجود در محفظه، از آن خارج شود. فاصله بین بلوک و محفظه شیشه‌ای به‌عنوان شکاف عمودی تعریف می‌شود که سیال داخل آن در دقایق اولیه تخلیه می‌شود و سپس سیال تحت نیروی گراویتی از بلوک‌ها خارج می‌شود. سطح تماس گاز و نفت در شکاف عمودی بیانگر احاطه بلوک توسط گاز می‌باشد. در آزمایش‌های انجام شده، اعم از بلوک کوتاه تنها و بلوک بلند و دسته بلوک‌ها، این زمان بسیار کوتاه است. در پایان تخلیه، شکاف عمودی برای مایع خارج شده از بلوک و جاری شده در شکاف، ارتفاع سطح مایع در شکاف عمودی و میزان مایع تخلیه شده از بلوک گزارش شده است. بر اساس داده‌های به‌دست آمده، درصد اشباع نهایی بلوک به‌دست آمده است [۹ و ۷]. شکل ۱، شماتیک سیستم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در زیر شرح مختصری از آزمایش‌های انجام گرفته نشان داده شده است.

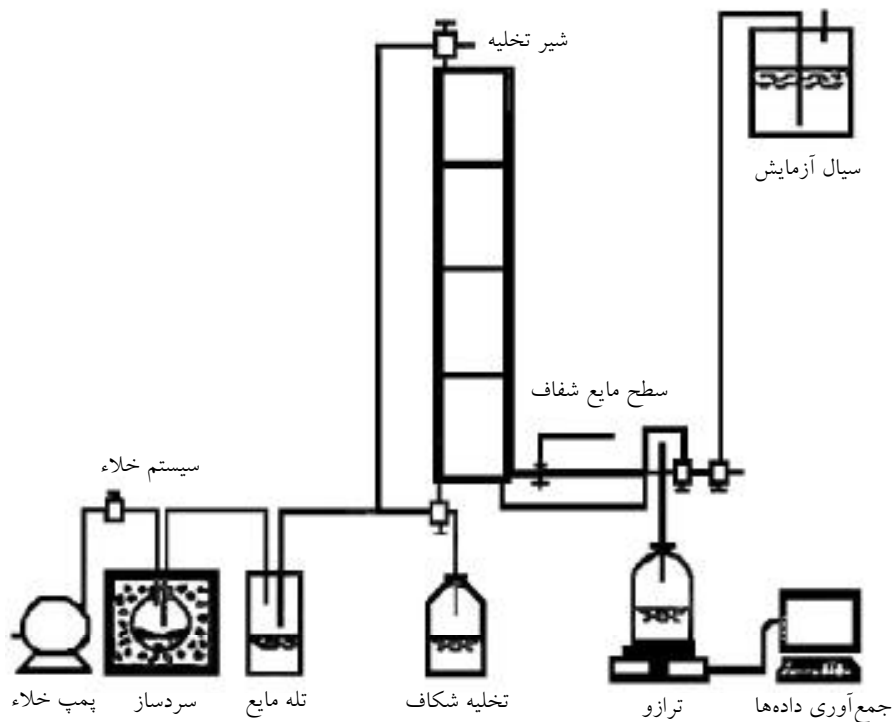
هدف از آزمایش‌های انجام شده، بررسی عرض شکاف بر روی تولید دسته بلوک‌ها می‌باشد. بر این اساس، بلوک‌ها با استفاده از جداکننده‌هایی از هم جدا شده‌اند. ضخامت این جداکننده‌ها بیانگر عرض شکاف می‌باشد. محققین، تولید از دسته بلوک‌ها هنگامی که مستقیماً در تماس با یکدیگر بودند و هنگامی که با جداکننده از هم جدا شده بودند را با تولید از یک بلوک بلند نیز مقایسه کرده‌اند، تا تأثیر شکاف

نشان می‌دهند. آزمایش‌ها به دو دسته کلی (۱) آزمایش‌های بلوک تنها و (۲) آزمایش‌های دسته بلوک تقسیم می‌شوند. مشخصات بلوک‌ها در جدول ۱ آورده شده است [۹].

برای ارزیابی نتایج، میزان تولید از بلوک تنها و هنگامی که بلوک‌ها بر روی هم قرار دارند، جداگانه مورد آزمایش قرار گرفته است. در صورت مجزا بودن بلوک‌ها به طور کامل، مقدار تولید از دسته بلوک‌ها باید برابر مجموع بلوک‌ها به تنهایی باشد و در صورت تأثیر آن‌ها بر روی هم، مقدار تولید از بلوک‌ها با عرض شکاف‌ها و سطح مقطع عمود بر جریان رابطه دارد. همچنین رابطه مقدار تولید از دسته بلوک‌ها با یک بلوک تنها به ارتفاع دسته بلوک‌ها قابل بررسی است. لذا آزمایش‌هایی برای بلوک‌های تنها و دسته بلوک‌ها با عرض شکاف متفاوت، طراحی و نتایج آن با یک بلوک تنها و بلند مقایسه شده است. برای بلوک‌های فوق، ارتفاع مبنا برای فشار موینگی آن‌ها بین ۳۵ cm تا ۴۱ cm تغییر می‌یابد، اگرچه در مقالات چاپ شده مقدار هر بلوک به تنهایی بیان نشده است. آزمایش‌ها در دمای 76°F انجام گرفته است و سیال مورد استفاده نرمال دکان گزارش شده است. همچنین مقدار اشباع پایانی سیال برای هر بلوک با استفاده از وزن آن گزارش شده است. کلیه بلوک‌ها از سنگ بریا^۱ بوده و آب‌دوست می‌باشند [۷].

محققین مشخصاتی از ترشوندگی سنگ و آزمایش‌های مربوط به آن ارائه نکرده‌اند. فیروزآبادی و همکاران برای فشار موینگی هر بلوک، رابطه ۴ را ارائه کرده‌اند؛ آن‌ها همچنین تراوایی نسبی بلوک را متناسب با اشباع سیال دانسته‌اند $(K_{ro} = S_o^3)$ [۷].

1. Berea



شکل ۱- شماتیک آزمایش‌های انجام شده توسط فیروزآبادی و همکاران [۹]

آزمایش پنجم

منحنی تولید بر حسب زمان برای بلوک بلند (۱۸۲/۹ cm) در زمان‌های ۰ تا ۵۶۰۰۰ دقیقه اندازه‌گیری شده است. مقدار تولید نهایی برای سطح مایع شکاف ۱/۴۵ cm برابر ۵۰/۲ درصد حجم تخلخل می‌باشد.

آزمایش ششم

چهار بلوک ۴۵/۵ cm در تماس مستقیم با هم قرار گرفته‌اند و منحنی تولید بر حسب زمان در سه آزمایش با زمان پایانی ۱۵۳۸۲ دقیقه، ۲۱۳۶۸ دقیقه و ۵۶۱۹۰ دقیقه بر روی هم منطبق می‌باشند.

آزمایش هفتم

در این آزمایش سه جداکننده (۲/۵×۲/۵×۱/۲ mm) از جنس فلز در داخل هر شکاف قرار گرفته است.

آزمایش هشتم

در این آزمایش از سه جداکننده (۲/۵×۲/۵×۰/۲۵ mm) داخل شکاف استفاده شده است.

آزمایش نهم

هدف از این آزمایش ادامه بررسی اثر عرض شکاف در قدرت تولید سیال می‌باشد. بدین منظور پنج عدد جداکننده (۲/۵×۲/۵×۰/۱ mm) در داخل هر شکاف قرار گرفته است.

را بر روی مقدار نهایی تولید و شیب تولید بررسی کنند. آزمایش اول

مقدار تولید و سرعت آن برای بلوک SA برای دو موقعیت سطح مایع در شکاف (۱/۶ cm و ۰/۲۵ cm) گزارش شده است. تولید نهایی برای سطح مایع ۰/۲۵ cm برابر ۴/۸ درصد از حجم تخلخل و برای سطح مایع ۱/۶ cm، ۳/۵۰ درصد از حجم تخلخل می‌باشد.

آزمایش دوم

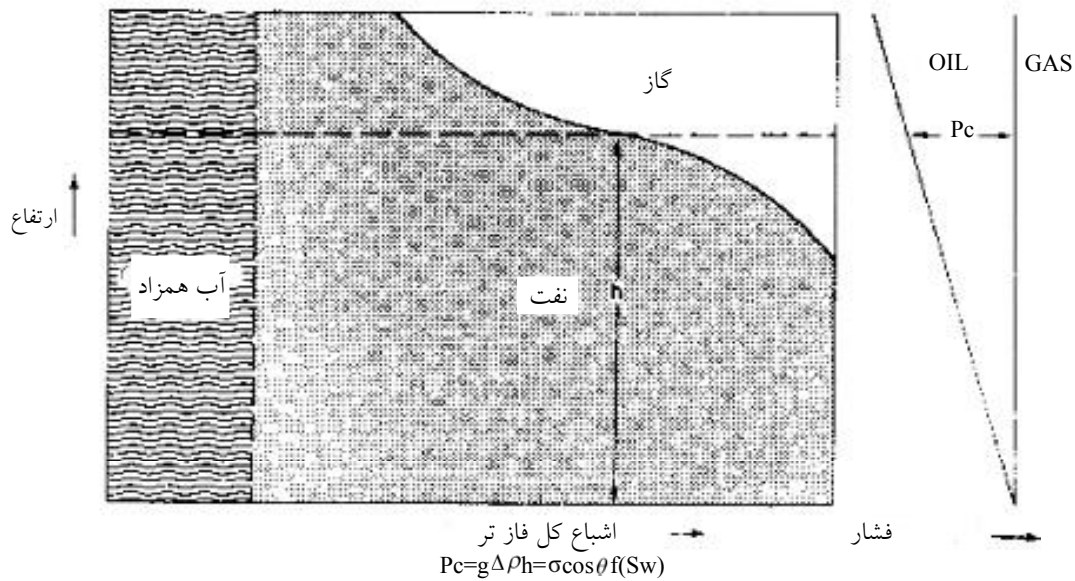
مقدار تولید بر حسب زمان و سرعت آن در بلوک SB برای سطوح مایع ۰/۶ cm و ۱/۵ cm اندازه‌گیری شده و مقدار نهایی آن برابر ۴/۲ و ۳/۵ درصد از حجم تخلخل می‌باشد. داده‌های آزمایشگاهی تا ۹۰۰ دقیقه گزارش شده است.

آزمایش سوم

آزمایش مذکور برای بلوک SC تکرار گردید و مقدار تولید نهایی در سطح مایع ۰/۳ cm برابر ۴/۵ درصد حجم تخلخل گزارش شده است. شیب منحنی تولید تقریباً بعد از ۵۰۰ دقیقه ناچیز می‌شود.

آزمایش چهارم

تولید نهایی در بلوک SD با سطح مایع ۰/۸ cm برابر ۲/۹ درصد بوده و منحنی تولید تا زمان ۹۰۰ دقیقه ارائه شده است.



شکل ۲- فشار مویبگی در بلوک

در آزمایش‌های انجام شده، تخلیه شکاف عمودی در چندین دقیقه اول رخ می‌دهد. زمان تخلیه با داشتن سرعت تغییرات GOC^۱ در شکاف طولی از بلوک که مورد تهاجم گاز واقع شده، تعیین می‌شود. شرایط مرزی بیان شده برای بلوک تنها، برای دسته بلوک‌ها نیز قابل تعمیم می‌باشد. سیال داخل بلوک تا مقدار Pc_{th} تخلیه می‌شود [۱۰]. فشار Pc_{th} متناسب با ارتفاعی در بلوک می‌باشد که با h_{th} نشان داده می‌شود و حداقل سیالی است که در شرایط معمول قابل تخلیه نمی‌باشد. سیال باقیمانده در بلوک در پایان آزمایش در شکل ۳ با سطح هاشور خورده نشان داده شده است. برای حرکت نفت و گاز در داخل بلوک بر اساس معادله داری خواهیم داشت:

$$u_o = -2.3097 k \frac{K_{ro}}{\mu_o} \left\{ \frac{dP_o}{d\ell} + \rho_o g \right\} \quad (1)$$

$$u_g = -2.3097 k \frac{K_{rg}}{\mu_g} \left\{ \frac{dP_g}{d\ell} + \rho_g g \right\} \quad (2)$$

در فشار ثابت خواهیم داشت:

$$u_o \frac{\mu_o}{K_{ro}} - u_g \frac{\mu_g}{K_{rg}} = 2.3097 k \left\{ \frac{dPc}{d\ell} + \Delta\rho g \right\} \quad (3)$$

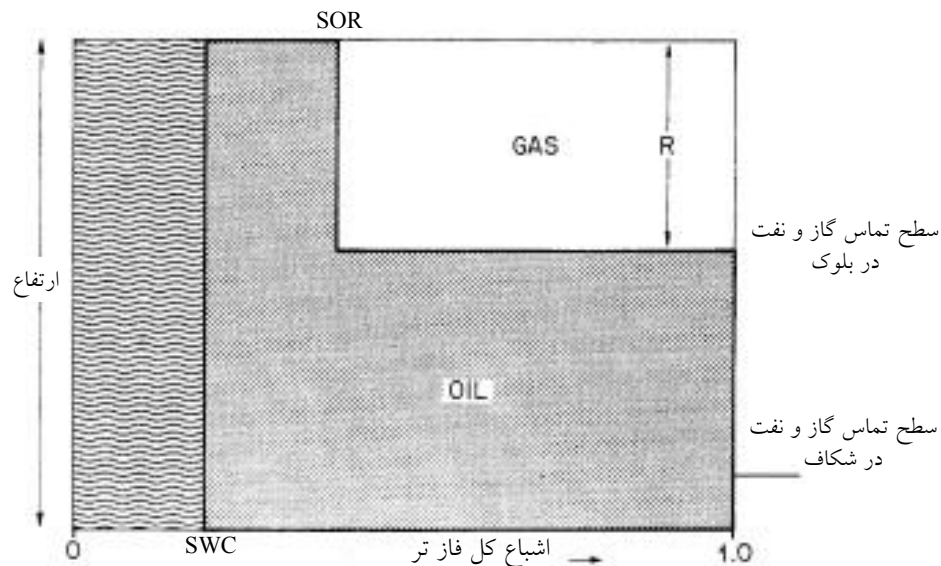
که $\Delta\rho$ اختلاف چگالی بین دو فاز نفت و گاز، $K_{ro} = S_o^3$ و $K_{rg} = (1 - K_{ro})$ می‌باشد.

مدل ریاضی

برای مدل‌سازی آزمایش‌های انجام شده، مفهوم فشار مویبگی برای بلوک تنها، در شکل ۲ نشان داده شده است. برای بلوک تنها سطح تماس بین گاز و مایع در شکاف عمودی تعریف می‌شود که پس از تخلیه شکاف عمودی و احاطه بلوک توسط گاز، مسیر حرکت گاز از بالا به پایین در نظر گرفته شده است که با خارج شدن مایع از پایین بلوک؛ گاز از بالا وارد بلوک می‌شود. حرکت سیال بر اساس قانون بقای اندازه حرکت به رابطه داری منجر می‌شود که در آن سرعت حرکت گاز در داخل بلوک برابر خارج شدن سیال از آن می‌باشد.

برای به دست آوردن رابطه‌ای بین تولید و زمان در یک بلوک از فرضیات زیر استفاده شده است:

- بلوک همگن می‌باشد. (۲) سنگ در مجاورت جریان گاز کاملاً نفت دوست می‌باشد. (۳) جهت جریان همواره از بالا به پایین و به صورت عمود می‌باشد. بنابراین نفت از انتهای بلوک خارج می‌شود و گاز از بالای بلوک وارد می‌شود. (۴) نفوذپذیری گاز در نفت در نظر گرفته شده است. (۵) درصد فاز گاز بحرانی (S_{gc}) در بلوک صفر فرض می‌شود. (۶) گاز به داخل بلوک در ناحیه‌ای که نفت تخلیه شده وارد می‌شود. (۷) بلوک توسط گاز احاطه شده است. برای یک بلوک تنها، به ارتفاع H ، تغییر سطح گاز و مایع با متغیر R بیان می‌شود که در آن R از ۰ تا H تغییر می‌یابد.



شکل ۳- فشار مویینگی در بلوک

و برای $t > H/v$

$$P_o(H) = P_g(0) + Hg\rho_g \quad (۶)$$

بر اساس یکسان بودن شرایط مرزی برای شکاف و ماتریس با قرار دادن مقادیر مرزی در معادله ۳ خواهیم داشت.

$$\frac{\phi(1-s_{or}-s_{wc})}{2.3097k} \left[\frac{\mu_o}{kr_o}(H-R) + \frac{\mu_g}{kr_g}R \right] \frac{dR}{dt} + gR\Delta\rho = vtg\Delta\rho - Pc \quad (۷)$$

در معادله ۷ متغیر P_c تابع اشباع سیال در بلوک می باشد.

آشام مجدد

دسته بلوک‌ها شامل چندین بلوک مجزا می باشد و تنها بخشی از مایع تولیدی از هر بلوک توسط بلوک زیرین به صورت آشام مجدد جذب می شود، سعیدی و تهرانی [۱۰] برای این آشام هیچ گونه مقاومتی در نظر نگرفته اند و تنها تغییردهنده، درصد اشباع مایع در بلوک های بخش گاز زده می باشد ($S_o = I - S_{gc}$). برای بالا بردن دقت محاسبات لازم است تا منحنی آشام به همراه منحنی های پس ماند برای اشباع های متوالی اندازه گیری شود، محققین برای این آزمایش ها منحنی های آشام نفت و گاز را ارائه نکرده اند. لذا در محاسبات $S_{wc} = 0$ و $S_{gc} = 0$ فرض شده است. بنابراین هنگام آشام مجدد هیچ گونه مقاومتی در مقابل حرکت نفت به داخل بلوک وجود ندارد. لذا امکان دارد درصد اشباع مایع در بلوک به مقدار اولیه نیز برسد.

رابطه فشار مویینگی برای بلوک برابر است با

$$P_c = P_{th} - \delta \ln(S_o - S_{or}) / (1 - S_{or}) \quad (۴)$$

$$P_c \geq P_{th}$$

ارتفاع مبنا بین ۳۵ cm تا ۴۱ cm تغییر می کند. چگالی نرمال دکان در دمای آزمایش (۷۶ °F) برابر 0.724 g/cm^3 می باشد و محققین مقدار $h_{th} = 40/93 \text{ cm}$ و $\delta = 0.1702 \text{ psi}$ و $S_{or} = 0.26$ گزارش کرده اند [۷].

در طول مدت تخلیه، در بالای بلوک، هیچ گونه نفتی وارد نمی شود. بنابراین $U_o = 0$ ، در ارتفاع مبنا $S_g = 0$ و $U_g = 0$ است.

شرایط مرزی

مطابق با فرضیات انجام شده، سرعت V برای تغییرات سطح مایع و گاز (GOC) در شکاف عمودی در دست است. این تغییرات به صورت داده ورودی بر اساس سطح بر حسب زمان در داده های ورودی می آید، به علاوه فشار سیال در داخل شکاف نیز وارد می شود تا شرایط مرزی هر بلوک اعمال شود.

در زمان $t=0$ سطح تماس در بالای بلوک و در زمان $t=H/v$ در انتهای آن قرار دارد و برای هر زمان مقدار $P_g(0) - P_o(H)$ معین می باشد (شکل ۳).

برای $0 < t < H/v$

$$P_o(H) = P_g(0) - vtg\rho_g + (H-vt)g\rho_o \quad (۵)$$

فشار مویینگی در شکافها

فشار مویینگی به طور عمومی بر اساس معادله یانگ-لاپلاس بیان می شود. به طوری که P_c عبارت است از اختلاف فشار بین فاز گاز و مایع و r_1 و r_2 شعاع انحناى دو فاز در مجاورت هم می باشد. این در واقع تعریف استاتیکی از فشار مویینگی است. در شرایط دینامیکی باید اثر گرانشی سیال را نیز لحاظ کرد. به علاوه پدیده پیوستگی در فشار مویینگی نیز بعد از یانگ مطرح شد.

$$P_c = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (10)$$

فشار مویینگی در شکافهای افقی یکی از مهمترین مسایل پدیده ریزش ثقلی (مخازن شکاف دار) می باشد. زیرا مقدار آن متناسب با اضافه تولید دسته بلوکها می باشد. به طور کلی فشار مویینگی بلوک تحت تأثیر عامل پیوستگی کاهش می یابد.

$$P_c = P_c^o - f(P_{cf}) \quad S_o > S_{or} \quad (9)$$

P_c^o = فشار مویینگی برای بلوک تنها

بعضی از محققین مقدار کاهش را ناچیز پنداشته و برابر صفر در نظر گرفته اند [۱۱ و ۱۲]. هوری و همکاران نیز مقدار ثابتی برای آن تعریف کرده اند [۱۳]. این مقدار ثابت عموماً بر اساس ضخامت شکاف تعریف شده یا معادل فشار ماتریس در نظر گرفته شده است.

$$P_{cf} = 2 \sigma / t \quad (10)$$

سجادیان و همکاران برای شرایطی که پیوستگی وجود دارد فشار مویینگی را متناسب با ارتفاع شکاف از سطح (GOC) اعلام کرده اند و در صورت عدم پیوستگی مقدار آن را ناچیز در نظر گرفته اند [۱۴].

دین دورک و فیروزآبادی فشار مویینگی در شکاف را مستقل و تابعی از جریان شکاف دانسته و آن را با معادله ای شبیه محیط سنگ و متناسب با درصد اشباع سیال در شکاف توصیف کرده اند [۶].

$$P_{cf} = P_{cf}^o - \delta_f \left[\ln \left(\frac{S_o - S_{of}}{1 - S_{of}} \right) \right]^{nf} \quad P_{cf} > P_{cf}^o \quad (11)$$

در این مطالعه بر اساس اینکه فشار مویینگی در شرایط جریانی در بلوک بلند در هر نقطه $P_c = \Delta \rho gh$ می باشد و در هنگام جدا شدن بلوکها از یکدیگر، فشار در آن نقطه صفر

می شود ($P_c = 0.0$) دامنه تغییراتی برای فشار مویینگی تعریف شده است. این دامنه تغییرات را می توان متناسب با عرض شکاف در نظر گرفت. از لحاظ تئوری هر تابعی که در این محدوده تعریف شده باشد را می توان برای همخوانی سیستم استفاده کرد.

در شرایط ایده آل، فشار مویینگی $P_{cf} = \Delta \rho gh$ برای عرض شکاف برابر صفر می باشد و مقدار عرض شکاف متناسب با فشار طبقاتی اعمال شده می باشد. به طور معمول می توان تغییرات عرض شکاف را بر اساس نیروی وارده بر سنگ مورد آزمایش قرار داد. در شکل ۷، تغییرات عرض شکاف نسبت به فشار طبقاتی برای سنگ بریا نشان داده شده است [۱۳]. در شرایط حقیقی با فرض اینکه در عرض نهایی شکاف (۰/۰۴ mm) $P_{cf} = \Delta \rho gh$ باشد. عرض شکاف در آزمایشها سبب می شود تا در صدی از فشار مویینگی در شکاف بر بلوک اعمال شود. رابطه تجربی زیر برای فشار مویینگی شکاف پیشنهاد می شود، به طوری که بتوان با تغییر در اندازه فشار مویینگی بر اساس رابطه ۷، تولید از دسته بلوکها را همخوان کرد.

$$P_{cf} = \Delta \rho gh \left[1 - So \left(\frac{t_h}{t} \right) \right]^n \quad (12)$$

به طوری که:

t: عرض شکاف

t_h : عرض نهایی شکاف حاصل از فشار طبقاتی

So: اشباع نفت

h: ارتفاع شکاف از پایین دسته بلوک

n: ضریب برازش

تراوایی در شکافهای افقی

در این مطالعه بر اساس رابطه دین دورک و فیروزآبادی مقدار تراوایی مطلق شکاف برای فاز مایع به هنگامی که جریان در امتداد شکاف نباشد، برابر $K_f = 3.5 \times 10^5 RPT^{0.5}$ در نظر گرفته شده است. مقدار تراوایی در شکاف در هنگام پیوستگی، مقدار بزرگی است که عملاً تأثیری بر روی مقدار تولیدی از بلوک ندارد [۶]. در نتیجه، مقدار ریزش از بلوک، مستقل از تراوایی و تراوایی نسبی در شکاف افقی است.

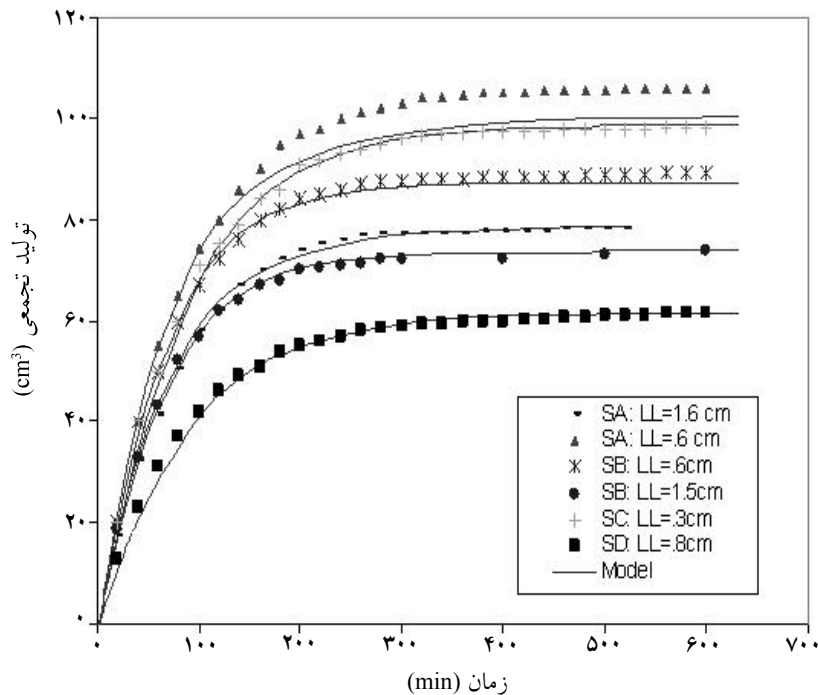
بحث

در این تحقیق هدف آن بود که با مشخص کردن متغیرهای هر بلوک به تنهایی و سپس با استفاده از نتایج تولید، روابط حاکم بر دسته بلوک‌ها مشخص شود.

برای مطالعه ریزش از یک دسته بلوک، لازم بود تا مشخصات هر بلوک و ریزش از آن به تنهایی مورد مطالعه قرار گیرد تا مشخصات فیزیکی سنگ همخوان شود. بدین منظور پنج آزمایش اول مورد بررسی قرار گرفتند. متغیرهای مورد برآزش، فشار مویینگی تراوایی هر بلوک در نظر گرفته شد تا بتوان تولید نهایی و شیب منحنی تولید را همخوان کرد. فشار مویینگی در ارتفاع مبنا (P_{ch}) تعیین کننده سقف تولید از بلوک و تغییر در تراوایی تنظیم کننده شیب منحنی تولید می‌باشد.

در آزمایش اول برای بلوک SA مقدار فشار مویینگی مبنا P_{ch} و تراوایی مطلق (K) و تراوایی نسبی (Kr) بر اساس منحنی تولید برای سطح مایع ۱/۶ cm در شکاف عمودی برآزش شدند. سپس مقادیر تولید در سطح مایع ۰/۲۵ cm پیش‌بینی و با نتایج تجربی مقایسه شدند (شکل ۴). در آزمایش دوم بلوک SB در سطح مایع ۱/۵ cm در شکاف عمودی مورد برآزش قرار گرفت و سپس در سطح مایع ۰/۶ cm مقادیر تولید مورد پیش‌بینی قرار گرفت. آزمایش‌های

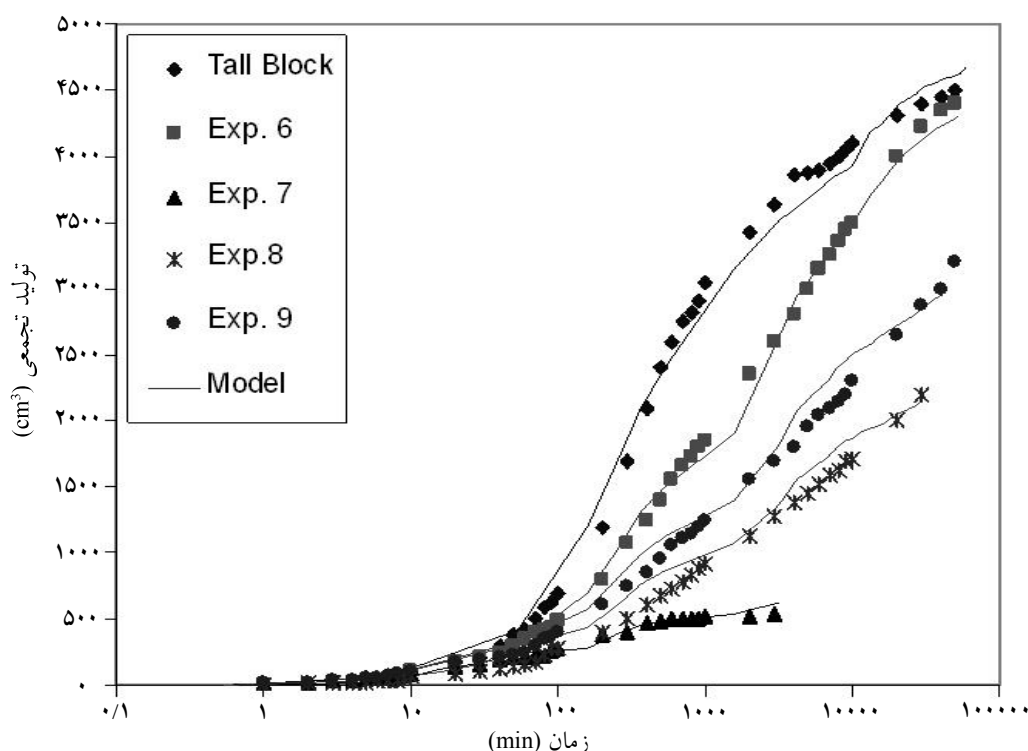
سوم و چهارم مشخصه‌های بلوک‌ها SC و SD بر اساس نتایج تجربی برآزش شدند. تولید از بلوک بلند (TALL) در آزمایش پنجم مورد مطالعه قرار گرفت و مشخصه‌های بلوک برآزش شد. با توجه به ثابت بودن خواص سنگ و سیال به لحاظ ترشوندگی شیب منحنی، فشار مویینگی PC در تمام آزمایش‌ها $\delta = 0.1702 \text{ psi}$ می‌باشد، مقدار ارتفاع مبنا به عنوان متغیر مورد برآزش برای هر بلوک در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۴ نتایج همخوانی در تولید را برای بلوک‌های تنها نشان می‌دهد، مقدار محاسبه شده اشباع نهایی سیال در بلوک‌ها نیز در جدول ۲ آورده شده است. در آزمایش ششم چهار بلوک کوچک ۴۵/۴۹ cm به طور مستقیم بر روی هم قرار گرفتند. هیچ‌گونه جداکننده‌ای مانع خطوط انتقال سیال از بالا به پایین نمی‌باشد بلکه تنها در اثر شکست، مسیر جریان‌ها تغییر یافته یا با تأخیر روبرو شده‌اند. عرض شکاف در این آزمایش برابر ۰/۰۸ mm در نظر گرفته شد. این آزمایش به علت عدم وجود جداکننده، یکی از شاخص‌های مطالعه می‌باشد. مقایسه منحنی‌های تولید برای بلوک بلند (TALL) و دسته بلوک‌ها، بیانگر یک زمان تأخیر در تولید می‌باشد. تولید نهایی از دسته بلوک در آزمایش ششم برابر بلوک بلند می‌باشد ولی شیب تولید آن‌ها متفاوت می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۴- نمودار همخوانی نتایج آزمایشگاهی با مدل در بلوک‌های SA, SB, SC, SD

جدول ۲- مقدار ارتفاع مبنا و اشباع سیال نهایی حاصل از مدل برای آزمایش‌های ۱ تا ۸

| زمان آزمایش min | So % | سطح مایع در شکاف cm | ارتفاع مبنا h_{th} (cm) | آزمایش |
|--------------------|----------------|------------------------|------------------------------|--------|
| ۱۰۵۱ | ۹۶/۲۴ ۹۵/۳۳ | ۱/۶ ۰/۲۵ | ۳۴/۵۲۷ | ۱ |
| ۱۰۵۱ | ۹۶/۴۸ ۹۵/۸۳ | ۱/۵ ۰/۶ | ۳۴/۸۳۱ | ۲ |
| ۱۰۵۱ | ۹۵/۴۱ | ۰/۳ | ۳۴/۵۷۴ | ۳ |
| ۱۰۵۱ | ۹۷/۱۰ | ۰/۸ | ۳۶/۴۶۵ | ۴ |
| ۱۵۰۰ | ۸۵/۱۷ ۸۴/۷۴ | ۱/۱ ۰/۶ | ۳۳/۷۳۴ | ۵ |



شکل ۵- نتایج حاصل از مدل برای تولید از دسته بلوک‌ها و مقایسه با تولید بلوک بلند

را در نظر می‌گیریم. مقدار فشار موینگی در هر تخلخلی برابر است با $P_c = \Delta \rho g h$. ایجاد شکاف سبب می‌شود تا این مقدار تغییر یابد. اگر عرض شکاف‌ها آن قدر زیاد شود که دو بلوک هیچ گونه تماسی با هم نداشته باشند، اعم از تماس مستقیم بلوک‌ها یا پل‌های مایع ایجاد شده بین دو بلوک، آن گونه که فیروز آبادی و همکاران نشان داده‌اند، فشار موینگی در شکاف به صفر تقلیل می‌یابد. در صورت ارتباط بین بلوک‌ها مقدار فشار موینگی در شکاف، درصدی از $P_c = \Delta \rho g h$ می‌باشد. برای مدل‌سازی استحصال سیال از بلوک، متغیرهای

آزمایش هفتم با سه جداکننده $1/2$ mm، آزمایش هشتم با سه جداکننده $0/25$ mm و در آزمایش نهم از پنج جداکننده $0/1$ mm استفاده شده که دارای سطح مقطع $(2/5 \times 2/5 \text{ mm}^2)$ می‌باشند. این آزمایش‌ها به همراه آزمایش ششم بیانگر تأثیر عرض شکاف بر روی تولید از بلوک می‌باشد. شکل ۵، نتایج حاصل از همخوانی آزمایش‌های دسته بلوک‌ها را نشان می‌دهد. به‌طور کلی مقدار تولید از دسته بلوک‌ها با افزایش عرض شکاف، کاهش یافته است. برای تحلیل فشار موینگی در شکاف افقی، حدفاصل فشار موینگی در بلوک بلند که شکاف افقی در آن وجود ندارد

فشار مخزن بر اساس جنس سنگ و تغییرات عرض شکاف همچون شکل ۷، برای سنگ بریا قابل تعیین می‌باشد. متغیر n برای تطبیق نتایج آزمایشگاهی می‌باشد و به صورت تجربی به دست می‌آید، و همواره مثبت است.

شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، فشار مویینگی شکاف‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ فشار مویینگی شکاف بین بلوک‌های C و D را در عرض‌های مختلف نشان می‌دهد. در واقع با کم شدن عرض شکاف، تغییرات فشار مویینگی به اشباع سیال به حداقل خود می‌رسد به عبارت دیگر همچون فضای تخلخل سنگ عمل می‌کند.

شکل‌های ۸ تا ۱۱ تغییرات فشار مویینگی تغییر یافته بلوک را بر اساس معادله ۷ نشان می‌دهد. بر این اساس در اشباع‌های بالاتر از Sor که امکان تخلیه سیال از بلوک می‌باشد، این امر با کاهش فشار مویینگی تحقق می‌یابد.

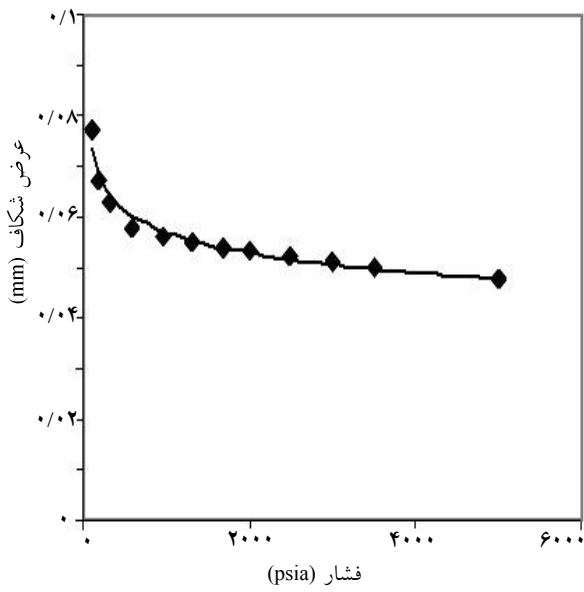
فیروزآبادی و همکاران با وزن کردن هر بلوک در پایان آزمایش، اشباع سیال داخل بلوک را به دست آورده‌اند. شکل ۶ مقادیر محاسبه شده درصد اشباع باقی مانده بلوک‌ها را بر حسب مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد. اختلاف کمی در نتایج مدل‌سازی و مقادیر آزمایشگاهی دیده می‌شود که عمدتاً حاصل از فرضیات ساده‌سازی در حرکت سیال گاز به داخل بلوک می‌باشد. اگرچه حرکت سیال از بالا به پایین فرض شده ولی عملاً در هنگام تخلیه شکاف، گاز از همه جوانب به سمت بلوک هجوم می‌آورد به علاوه همواره فیلم نازکی از مایع بر روی سطح بلوک جریان دارد. در نظر گرفتن این عوامل، به همراه پدیده نفوذ گاز^۱ در داخل بلوک سبب می‌شود تا بین مقادیر تجربی و مدل ارائه شده اختلاف ایجاد شود.

فشار مویینگی و تراوایی بلوک نقش تعیین کننده دارند. در تمام آزمایش‌ها یک بلوک و شکاف در نظر گرفته شد و سعی گردید معادلات ساده حرکت سیال از بلوک به شکاف منحنی تولید به دست آید. برای بیان تغییرات در فشار مویینگی بلوک، از تعریف فشار مویینگی در شکاف استفاده شد. این فشار مویینگی با برداری در خلاف فشار مویینگی بلوک، سبب کاهش آن می‌شود. با استفاده از این تعریف می‌توان مقدار تولید نهایی و شیب تولید از دسته بلوک‌ها را به دست آورد. معادله ۱۱ تابع تجربی مبتنی بر نتایج آزمایش‌ها می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مقدار تولید از دسته بلوک‌ها در مقایسه با یک بلوک بلند، تابعی از عرض شکاف‌هاست. در آزمایش‌های انجام شده، عرض شکاف‌ها با استفاده از جداکننده‌ها حاصل شده‌اند. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که فشار مویینگی در شکاف، تابعی از اشباع سیال و ارتفاع شکاف افقی از سطح تماس گاز و مایع در شکاف عمودی می‌باشد GOC.

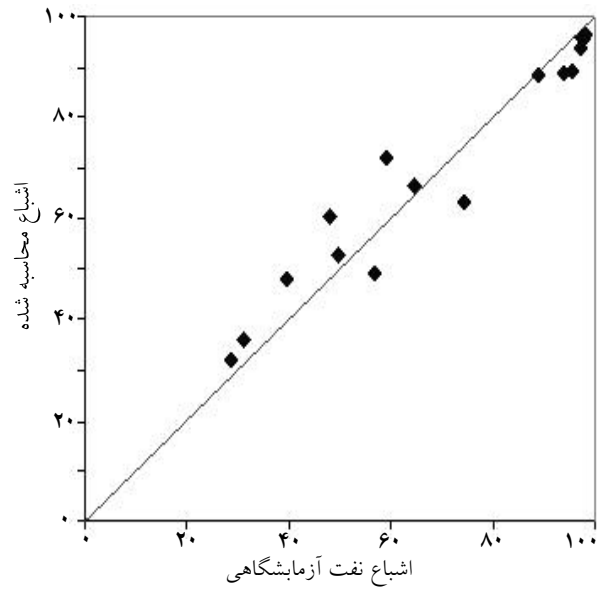
هنگامی که فشار مویینگی در شکاف افقی برابر فشار تخلخل باشد، بر اساس منحنی شکل ۷ که تغییرات عرض شکاف را با فشار وارد شده به آن را نشان می‌دهد، می‌توان عرضی را در نظر گرفت که این عرض را با th نشان می‌دهیم. در این عرض، فشار مویینگی شکاف افقی برابر $P_{cf} = \Delta\rho gh$ است. فشار مویینگی در آن تابعی از نسبت عرض شکاف به عرض مینا و اشباع سیال می‌باشد. جدول ۳، مقدار th/t و درصد اشباع سیال در هر بلوک را در پایان آزمایش نشان می‌دهد. مقدار th/t بر اساس مطالعه شکاف‌های سنگ مخزن در مغزه‌های گرفته شده و تصحیح عرض آن در

جدول ۳- مقادیر محاسبه شده اشباع سیال برای بلوک‌های کوتاه در پایان هر آزمایش

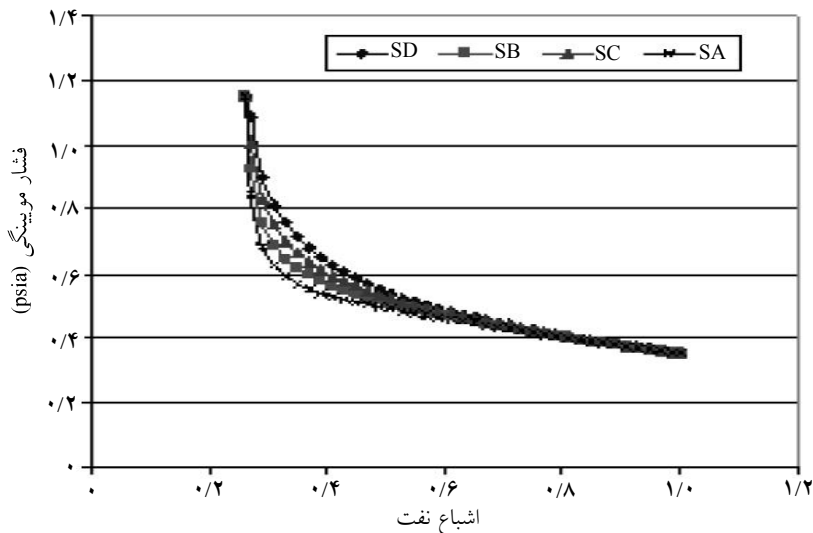
| n | th/t | SD | SC | SB | SA | زمان | آزمایش |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | | | | | min | |
| ۰/۱۹۲ | ۰/۹۷۵ | ۹۶/۲۵ | ۴۷/۹۸ | ۳۵/۸۵ | ۳۱/۸۸ | ۵۶۰۰۰ | ۶ |
| ۲۲ | ۰/۰۶۵ | ۹۴/۱۶ | ۸۹/۲۴ | ۸۸/۵۹ | ۸۸/۵۷ | ۱۱۷۵۰ | ۷ |
| ۵/۷ | ۰/۳۱۲ | ۹۵/۷ | ۷۱/۸۴ | ۶۶/۵۰ | ۶۳/۵ | ۳۰۴۹۰ | ۸ |
| ۰/۹۷ | ۰/۷۸ | ۹۵/۲۵ | ۶۰/۴۶ | ۵۳/۰۲ | ۴۹/۰۳ | ۵۰۴۷۰ | ۹ |



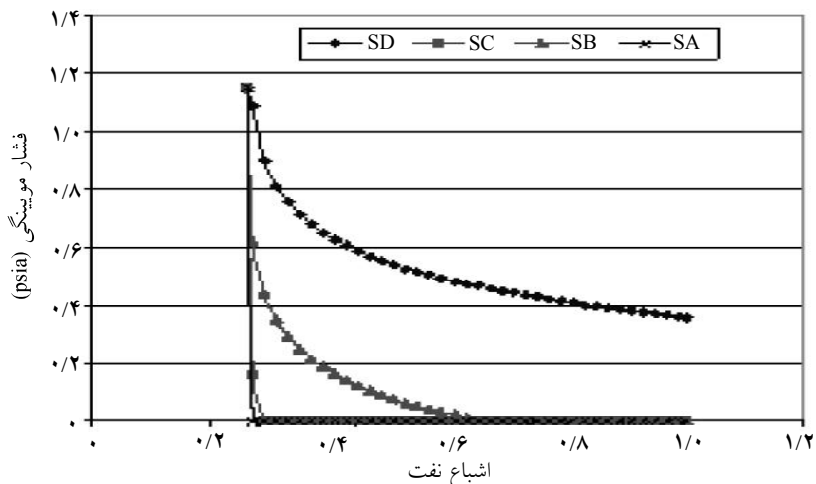
شکل ۷- نمودار تغییرات عرض شکاف بر حسب فشار طبقاتی [۱۳]



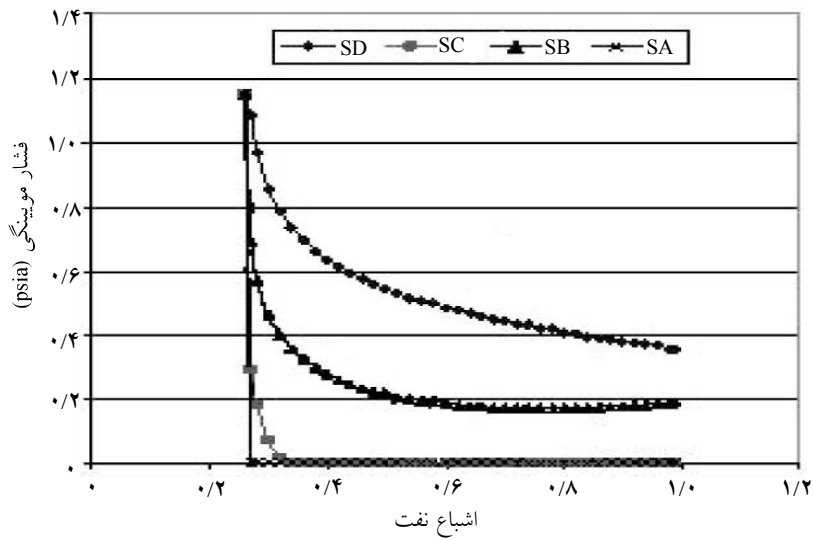
شکل ۶- نمودار همخوانی نتایج آزمایشگاهی برای اشباع سیال باقی مانده در بلوک در آزمایش های نهم تا دوازدهم



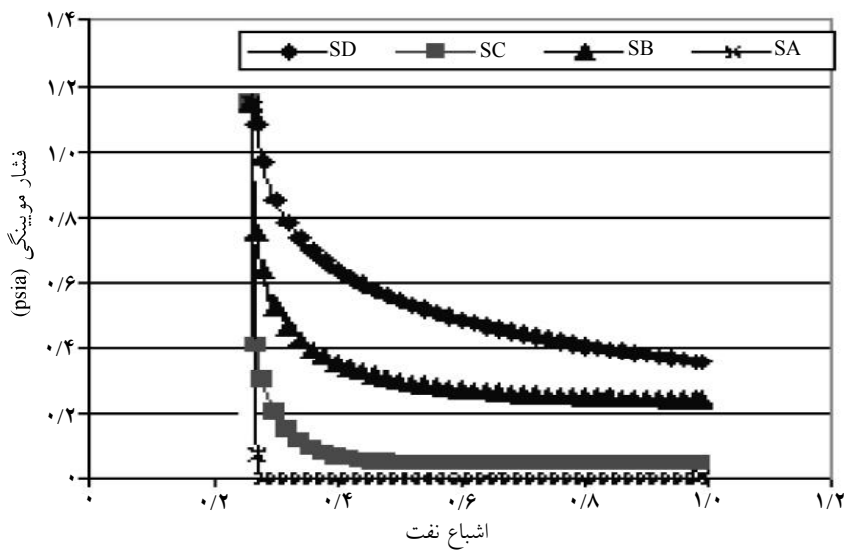
شکل ۸- فشار مویبگی تغییر یافته در بلوکها برای آزمایش ۶



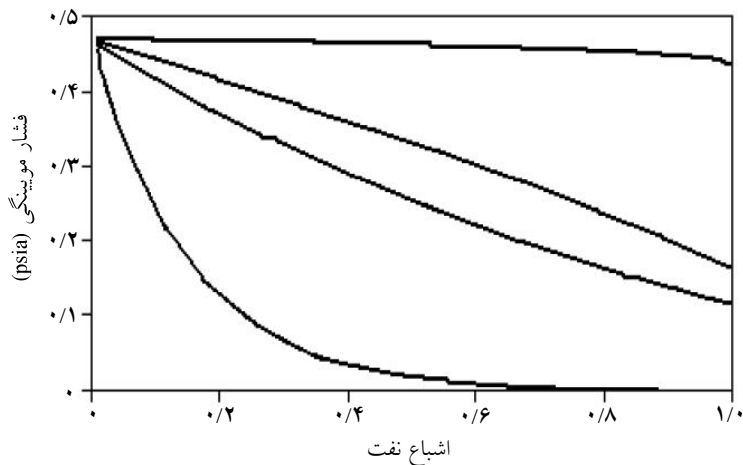
شکل ۹- فشار مویبگی تغییر یافته در بلوکها برای آزمایش ۷



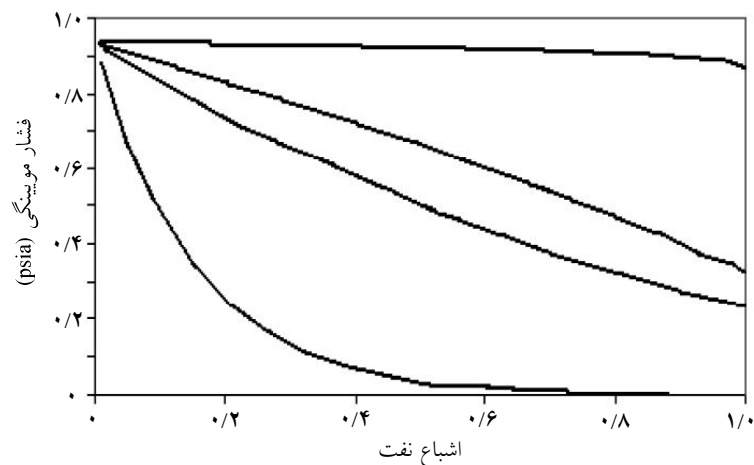
شکل ۱۰- فشار مویبگی تغییر یافته در بلوک‌ها برای آزمایش ۸



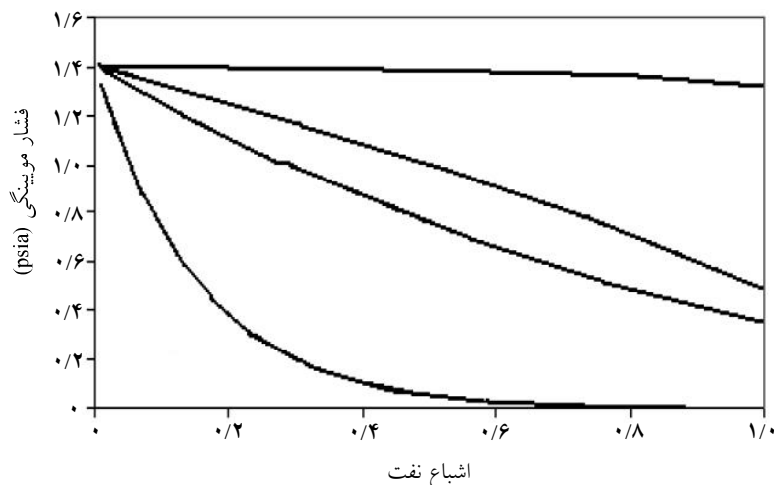
شکل ۱۱- فشار مویبگی تغییر یافته در بلوک‌ها برای آزمایش



شکل ۱۲- فشار مویبگی شکاف بین بلوک‌های C و D در عرض‌های مختلف



شکل ۱۳- فشار مویینگی شکاف بین بلوک‌های B و C در عرض‌های مختلف



شکل ۱۴- فشار مویینگی شکاف بین بلوک‌های A و B در عرض‌های مختلف

نتیجه‌گیری

مقدار تولید از دسته بلوک‌ها در اثر پدیده ریزش ثقلی متناسب با (۱) فشار مویینگی در سنگ و (۲) فشار مویینگی در شکاف است. فشار مویینگی در شکاف PC_r بین دو مقدار حدی جدا بودن بلوک‌ها (۰) و یا پیوستگی کامل بلوک‌ها ($\Delta\rho gh$) تغییر می‌یابد. تغییرات فشار مویینگی متناسب با عرض شکاف و ارتفاع آن از سطح تماس گاز و نفت می‌باشد. مقدار تراوایی در شکاف، بسیار بزرگتر از تراوایی بلوک می‌باشد. لذا در این مطالعه سرعت انتقال سیال در شکاف، نقش اساسی در همخوانی نتایج ندارد. مقدار تولید نهایی از دسته بلوک‌ها به عرض شکاف وابسته می‌باشد که با تعریف فشار مویینگی در شکاف می‌توان آن را بیان کرد.

علائم و نشانه‌ها

- A: سطح مقطع بلوک (ft^2)
- f: شکاف
- g: گاز
- H: ارتفاع بلوک (ft)
- h: ارتفاع شکاف از GOC و ft
- k: تراوایی مطلق (mD)
- k_r : تراوایی نسبی
- l: طول بلوک (ft)
- n: ضریب برآزش
- o: نفت
- P: فشار (psi)
- P_c : فشار مویینگی (psi)

| | |
|--|---------------------------------------|
| t: زمان (روز) | P_{th} : فشار موینگی مینا |
| t_h : عرض نهایی شکاف حاصل از فشار طبقاتی | h_{th} : ارتفاع مینا |
| u: سرعت حرکت سیال در بلوک (ft/day) | δ/L : فشار موینگی مینا در شکاف |
| v: حجم (bbl یا ft^3) | P_c^o : فشار موینگی در بلوک تنها |
| μ : گرانروی (cP) | Q: دبی (bbl/day) |
| μ : تخلخل | S_{wc} : اشباع آب همزاد |
| $\Delta\rho g$: اختلاف چگالی فازها (psi/ft) | S: اشباع سیال |
| σ : کشش سطحی (dynes/cm) | S_{or} : اشباع نفت باقی مانده |
| δ : شیب فشار موینگی در سنگ | S_o : اشباع متوسط نفت در بلوک |
| | t: عرض شکاف (ft) |

منابع

- [۱] سجادیان و.ا، نادری ح.، عمادی م.ع. و نفرگوی کهن م.، تهیه مدل ریاضی مناسب جهت تطبیق نتایج آزمایشگاهی مکانیزم ریزش ثقلی، گزارش داخلی IR970A1294-04، پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۷۴.
- [2] Firoozabadi A. & Hauge J., "Capillary pressure in fractured porous media", JPT, pp. 184-791, June 1990.
- [3] Luan Zhi-An, "Some theoretical aspects of gravity drainage in naturally fractured reservoir", SPE 28641, pp.25-28, Sep. 1994,
- [4] Firoozabadi A. & Markeset T., "An experimental study of capillary and gravity cross flow in fractured porous media", SPE 24918, 67th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington D.C., October 4-7, 1992.
- [5] Firoozabadi A. & Markeset T., "An experimental study of gas-liquid transmissibility in fractured porous media", SPE 24919, 67th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington D.C., October 4-7, 1992.
- [6] Dindourk B. & Firoozabadi A, "Computation of gas-liquid drainage in fractured porous media recognizing fracture liquid flow", JCPT, pp. 39-49, 1995.
- [7] Firoozabadi A. & Markeset T., "Fracture-liquid transmissibility in fractured porous media", SPE 24919, SPER 1995.
- [8] Firoozabadi A. & Markeset T., "Miscible displacement in fractured porous media: Part I-experiment", SPE 27743, Ninth Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, 17-20 April 1994.
- [9] Firoozabadi A., & Hauge J., "Capillary pressure in fractured porous media", JPT, pp. 784-791, Jun 1990.
- [10] Saidi A.M., Tehrani D.H. & Wit K., "Mathematical simulation of fractured reservoir performance, Based on physical model experiments", Proc. 10th World petroleum conference, Bucharest, 1979.
- [11] Kazemi H. & Merrill L.S., "Numerical simulation of water imbibition in fractured cores", SPE, pp. 175-182, 1979.
- [12] Festoy S. & Van Golf Racht T.D., "Gas gravity drainage in fractured reservoirs through new dual continuum approach", SPERE, pp. 271-78, Aug. 1989.
- [13] Horie T., Firoozabadi A. & Ishimoto K., "Capillary continuity in fractured reservoirs", SPE 18282, Presented at the 63rd SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, October 2-5, 1988.
- [14] Sajadian V.A., Danesh A. & Tehrani D.H., "Laboratory studies of gravity drainage mechanism in fractured carbonate reservoir capillary continuity", SPE 49497 in Proceeding of the 1998 Dhahi Conference and Exhibition, U.A.E., 11-14 October 1998.