

مطالعه و بررسی فرایند آشام مجدد بین ماتریس ها در فرایند ریزش ثقلی در ناحیه مورد تهاجم گاز

پژوهش نفت

سال هجدهم
شماره ۵۷
صفحه ۴۳-۳۰، ۱۳۸۷

حسن نادری* و ولی احمد سجادیان

پژوهشگاه صنعت نفت، مرکز مطالعات و پژوهش های اکتشاف و تولید

چکیده

در مخازن شکافدار، مکانیزم ریزش ثقلی یکی از فرایندهای مهم تولید نفت می باشد که با افزایش زمان تولید و ازدیاد فاصله سطح تماس نفت/گاز در شکافها، نسبت سطح تماس نفت/گاز در ماتریسها، نقش آن مهم تر خواهد شد. فرایند مطرح در مکانیزم ریزش ثقلی، آشام مجدد نفت تولید شده از ماتریسهای بالایی توسط ماتریسهای زیرین می باشد. آشام مجدد نفت در ناحیه مورد تهاجم گاز در مخازن شکافدار انجام می گیرد که همراه با فرایند پیوستگی موئینگی به عنوان تأثیر متقابل ماتریسها نامیده می شود. در این تحقیق با انجام آزمایشهای آشام مجدد در آزمایشگاه، این مکانیزم و عوامل موثر بر آن بررسی شده اند.

مقدمه

بخش عمده نفت تولیدی در دنیا از مخازن کربناته شکافدار می باشد. در ایران اکثر مخازن از این نوع می باشند. مکانیزم ریزش ثقلی، عمده ترین مکانیزم موثر در تولید نفت از مخازن شکافدار می باشد. این مخازن از دو محیط متفاوت شامل سیستم ماتریسها (تخلخل زیاد/ نفوذپذیری کم) و دوم از شبکه شکافها (نفوذپذیری زیاد/ تخلخل کم) تشکیل شده اند. با شروع تولید و افت فشار، سطح تماس نفت/گاز در شکافها از سطح تماس نفت/گاز در ماتریس پیشی گرفته و در نتیجه با گذشت زمان اختلاف این دو سطح تماس بیشتر می شود. این امر سبب می شود تا ناحیه مورد تهاجم گاز (ناحیه ای که در داخل ماتریسها، نفت و در داخل شکافها، گاز است) گسترش یابد. اصلی ترین مکانیزم تولید در ناحیه مورد تهاجم گاز، فرایند ریزش ثقلی می باشد. در این ناحیه به محض غلبه نیروی ثقل بر نیروی موئینگی، نفت از ماتریس خارج می شود. به طور عمده ناحیه مورد تهاجم گاز از ماتریسهای بر روی هم تشکیل می شود و عامل موثر در حداکثر تولید از ماتریسهای بر روی هم، چگونگی ارتباط موئینگی و

واژه های کلیدی: ریزش ثقلی، آشام مجدد، تزریق گاز، پدیده بلوک به بلوک

آمدن الگوی واقعی تر از جریان در محیط‌های متخلخل شکافدار خواهد شد. نسبت نیروهای گرانشی و موئینگی را اصطلاحاً عدد موئینگی می‌نامند که کنترل کننده جریان بین شکاف و ماتریس می‌باشد:

$$N_{Ca} = \frac{v\mu}{\sigma}$$

همچنین، نسبت نیروی جاذبه به موئینگی را عدد باند می‌نامند که نمایانگر توزیع فازهای ترکننده و غیر ترکننده در محیط متخلخل شکافدار خواهد بود:

$$B_o = \frac{g\Delta\rho k}{\sigma}$$

برآیند این نیروها هم در شکاف و هم در سنگ سبب حرکت سیال در جهت خاص خواهد شد. ساختار خلل و فرج محیط و شکل هندسی آن نیز عامل تعیین کننده در مکانیزم آشام مجدد می‌باشد. در صورتیکه بتوان برای فرایند آشام مجدد از راه حل یک بعدی در جهت عمود بر شکاف استفاده کرد، آنگاه نسبت نیروهای همرفت به نفوذ با عدد پکلت به صورت ذیل بیان می‌شود:

$$P_e = \frac{vL}{\alpha_c}$$

که در آن α_c ضریب نفوذ موئینگی می‌باشد و به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\alpha_c = \frac{KK_r}{\mu_w} \frac{\partial P_c}{\partial S_w}$$

اکثر مطالب در مورد آشام مجدد، برای توسعه و بهبود مدل‌های موجود می‌باشد. Pery [۱] در مطالعاتش در مورد فرایند ریزش در یک دسته ماتریس، فرض کرد که نفت خارج شده از ماتریس‌های بالایی توسط فرایند آشام جذب ماتریس‌های پایینی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی انجام شده برای یک دسته ماتریس هشت تایی (که کاملاً اشباع شده در حالت اولیه بودند) اختلاف زمانی قابل توجه در تولید را نشان داد.

عمل متقابل بین ماتریس‌ها می‌باشد. پیوستگی موئینگی و آشام مجدد از فرایندهای مهم در مکانیزم ریزش ثقلی هستند. در این تحقیق سعی شده تا با انجام آزمایش‌های متفاوت، عامل‌های موثر در فرایند آشام مجدد، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند (چگونگی فرایند جذب نفت خارج شده از ماتریس‌های فوقانی توسط ماتریس‌های زیرین را اصطلاحاً آشام مجدد می‌نامند). وجود و یا عدم وجود این فرایند، عامل اصلی در میزان نفت قابل تولید و قابل حرکت به سمت چاه تولیدی می‌باشد. در صورت عدم فعال بودن این فرایند، نفت خارج شده از هر ماتریس، سریعاً خود را از طریق شبکه شکاف‌ها به سطح تماس نفت/گاز رسانده و از آن طریق از مسیر شکاف‌های افقی به چاه تولیدی راه می‌یابد. در این صورت دبی تولید از N ماتریس موجود در ناحیه مورد تهاجم گاز، معادل N برابر هر یک از آنها می‌باشد. اما در صورت فعال بودن فرایند آشام مجدد، نفت خارج شده از هر ماتریس به طور کامل و یا جزئی جذب ماتریس زیری شده و نفت آشام شده، مسیر حرکت خود را از طریق محیط متخلخل مربوط به ماتریس‌ها به سطح تماس نفت/گاز می‌رساند. با توجه به اینکه نفوذپذیری ماتریس‌ها تا چند صد برابر از نفوذپذیری شبکه شکاف‌های عمودی کمتر است، به همین نسبت سرعت حرکت نفت در داخل محیط متخلخل از سرعت حرکت نفت در داخل شکاف‌های عمودی کمتر خواهد بود. این امر سبب خواهد شد تا با گذشت زمان، فاصله سطح تماس نفت/گاز در شکاف‌های عمودی و ماتریس افزایش و در نتیجه ناحیه عملکرد فرایند ریزش ثقلی و متعاقب آن آشام مجدد، گسترش یابد. در فرایند آشام مجدد نفت داخل ماتریس، عملکرد نیروهای موثر در محیط‌های متخلخل شکافدار یکسان نبوده و متأثر از محل تماس نفت با ماتریس و شرایط فیزیکی ماتریس و سیال داخل آن می‌باشد. تأثیر عوامل موثر در فرایند آشام مجدد را به صورت پارامترهای بدون بعد شامل عدد موئینگی^۱ (N_{Ca})، عدد باند^۲ (B_o) و عدد پکلت^۳ (P_e) می‌توان بررسی کرد. الگوهای جریان و توزیع درجه اشباع فازهای مختلف متأثر از عملکرد توأم نیروهای موئینگی، گرانشی و جاذبه می‌باشد و لذا ارزیابی دقیقتر این پارامترها سبب به‌دست

1. Capillary Number
2. Bond Number
3. Peclet number

و جاذبه کنترل می‌شود. نفتی که در ماتریس و در محیط مورد تهاجم گاز واقع شده است از درون ماتریس به درون سیستم شکاف‌ها و ماتریس‌های پائینی ریزش می‌کند که این به علت نیروی ثقل نفت می‌باشد. اصولاً مقداری نفت که از ماتریس‌های بالایی به سمت ماتریس‌های پایینی ریزش می‌کند از سطوح بالا و یا از اطراف ماتریس‌ها وارد ماتریس‌ها می‌شود و یا می‌تواند در ناحیه تماس بین ماتریس‌ها جریان یابد. در حالت بدون آشام مجدد، دبی ریزش ثقلی برای یک ستون که از N ماتریس تشکیل شده با حالتی که شامل N ماتریس منفرد است برابر می‌باشد. برای حالت آشام مجدد دبی ریزش ثقلی برابر دبی یک ماتریس می‌باشد. در عمل ماتریس‌های مخازن شکافدار همه به صورت افقی و جدا از هم نمی‌باشند. سطوح تماس بین ماتریس‌ها و شیب ماتریس‌ها باعث می‌شود که تفاوت در دبی را نسبت به یک ماتریس منفرد و یا یک ستون کاملاً از هم مجزا شده مشاهده کرد. وقتی نفت به صورت قطرات در قسمت بالایی و یا سطوح یک ماتریس که تخلیه شده قرار می‌گیرد، این نفت با یک دبی قابل مقایسه با حالت ماکزیمم دبی ریزش ثقلی، جذب ماتریس می‌شود. به‌طور کلی همه یا قسمتی از نفتی که از ماتریس‌های بالایی ریزش می‌کند داخل ماتریس‌های پایینی نفوذ می‌کند که این باعث تأخیر زمانی در بازیافت نهایی نفت می‌شود. هنگامی که میزان اشباع به میزانی که برای رسیدن به جریان پایدار مورد نیاز است افزایش یابد، نفت از بین ماتریس‌ها بدون هیچ تغییری در میزان و توزیع سیال در ماتریس عبور می‌کند.

معادلات جریان سیال

برای محاسبات انتقال پذیری^۴ شکاف عمودی، تخمین و محاسبه ضخامت فیلم و دبی حجمی فیلم ریزشی روی سطح عمودی ماتریس‌های پائین‌تر، که تحت تأثیر جاذبه می‌باشد لازم است. با فرض اینکه ریزش فیلم نفت گرانیوی باشد و حالت جریان، قائم و پایدار باشد، با نادیده گرفتن

سعیدی فرایند جریان بلوک به بلوک^۱ را با یک ستون ماتریس‌هایی که با هم در تماس نبودند مورد مطالعه قرار داد. وی نتیجه گرفت که دبی بازیافت تحت این سیستم خیلی کمتر از یک گروه ماتریس که به صورت مجزا می‌باشد هست. همچنین سعیدی در سال ۱۹۸۷ بیان کرد که نفت آشام شده ترجیح می‌دهد از میان ماتریس‌های اشباع شده عبور کند بدون آنکه عمل جابجا کردن نفت درجا را انجام دهد [۲].

Coats [۳] در ۱۹۸۹ کار مطالعه شبیه‌سازی عددی را بر روی موضوع آشام مجدد انجام داد. شکاف‌ها بین یک دسته ماتریس ۶ تایی در حالت افقی فرض شده بود و در حالت دیگر نسبت به افق ۱۱ درجه شیب داشت. محاسبات Coats برای شکاف‌های شیب داده شده بین ماتریس‌ها، آشام مجددی را نشان نداد. Fung [۴] در ۱۹۹۱ در مدل تخلخل دوگانه^۲ بررسی آشام مجدد را انجام داد و در معادله موازنه جرم، پارامتر آشام مجدد و ضریب آن را وارد کرد.

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده می‌تواند برای محک زدن تئوری‌های مربوط به آشام مجدد به‌کار گرفته شود. همچنین در تهیه روابط حاصل از ترکیب حل تحلیلی- تجربی^۳ موجود کارایی خواهد داشت. جریان چند فازی در محیط متخلخل شکافدار می‌تواند به‌طور کامل با محیط متخلخل بدون شکاف تفاوت داشته باشد. پارامترهای موثر در خواص محیط‌های متخلخل شکافدار شامل فشار موئینگی، ارتباط موئینگی بین ماتریس‌های مجاور، تراوایی نسبی شکاف و جریان آشام به صورت همسو و مخالف می‌باشد. تمامی پارامترهای مذکور بر میزان انتقال سیال بین شکاف و ماتریس تأثیرگذار می‌باشند. تنها با وجود نیروی کشش موئینگی، امکان جذب نفت تماس یافته با سطوح ماتریس‌ها فراهم می‌باشد. فشار موئینگی در مخازن خود نیز متأثر از عواملی همچون تراوایی، ساختار فضای خالی، نسبت اندازه گلوگاه، سوراخ و کشش سطحی بین سیالات (نفت/ گاز/ آب) می‌باشد. نیروی جاذبه می‌تواند عامل اصلی کنترل‌کننده جریان جابجایی عمودی فازهای مختلف باشد. توزیع اشباع سیالات در ضخامت مخزن با تعادل بین نیروی موئینگی

1. Block-to-Block
2. Dual Porosity
3. Semi-analytical model
4. Transmissibility

میزان دبی و زمان در اشکال به صورت بدون بعد نشان داده شده است. برای این منظور میزان نفت تولید شده بر حجم فضای خالی (PV) تقسیم و زمان آزمایشها بر زمان لازم برای تخلیه کل فضای خالی با حداکثر دبی ریزش (T^*) تقسیم شده است، تا تولید بر حسب PV و زمان بدون بعد T_D به دست آید.

تجهیزات مورد نیاز کار آزمایشگاهی

آزمایش آشام مجدد با استفاده از نفت و هوا به عنوان سیالات آزمایش و در شرایط محیط، انجام گرفت. دستگاهها و وسایل شامل پمپ مکش، سیستم اشباع، میکروپمپ (برای تزریق نفت) و ظروف اندازه گیری مقدار نفت تولیدی می باشد. مدل های مغزه ها در یک نگهدارنده قابل دید قرار داده شدند. در آزمایشها، مقدار نفت چکیده شده و ریزش شده به صورت تابعی از زمان اندازه گیری شدند. برای داشتن شرایط یکسان برای همه آزمایشها، از مدلی با ترشوندگی یکسان استفاده شد. شکل شماتیک آزمایشگاهی و وضعیت بلوکها در کنار هم در آزمایشهای آشام مجدد در شکل ۱ نشان داده شده است.

خواص سنگ

سه نوع رخنمون ماسه سنگی برای مغزهها (با مشخصات L_1, L_2, L_3) و مدل (G_1) حاوی گلوله های شیشه ای برای مطالعه، به عنوان مدل های مورد آزمایش به کار گرفته شدند. تخلخل مدلها بوسیله روش اشباع سازی اندازه گیری شد. دستگاه اندازه گیری نفوذپذیری به کمک هوا و سیستم داری برای اندازه گیری نفوذپذیری نمونه های ماسه سنگی و مدل G_1 مورد استفاده قرار گرفتند. اعداد نفوذپذیری مطلق، به وسیله معادلات کلینکن برگ^۲ تبدیل و تصحیح شده اند [۶]. روش تزریق جیوه برای اندازه گیری فشار مؤینگی مدل های ماسه سنگی (شکل ۲) به کار برده شد. نفوذپذیری نسبی آنها به صورت آزمایشگاهی و تجربی با روش ناپایدار^۳ اندازه گیری شدند (شکل ۳) [۶].

تأثیر فرایند آشام مجدد، معادله ناویر استوکس به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left[\frac{\mu_0 \partial v}{\partial Z} \right] = (\rho_0 - \rho_g)(g)$$

که ρ_0 و ρ_g به ترتیب دانسیته نفت و گاز می باشند. با توجه به شرایط مرزی و انتگرال گیری از معادله فوق:

$$Z=0 \quad v=0$$

$$\Rightarrow v = \frac{\Delta \rho \cdot g}{\mu} \left[\frac{Z^2}{2} - Z \cdot t_f \right]$$

$$Z=t_f \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

(t_f ضخامت فیلم می باشد)

همچنین از معادله بالا می توان ضخامت فیلم t_f ، و شدت جریان حجمی بر واحد ضخامت فیلم q ، را به دست آورد:

$$t_f = \left[\frac{3\mu \bar{v}}{\Delta \rho \cdot g} \right]^{1/2}$$

$$q = \frac{\Delta \rho \cdot g \cdot t_f^3}{3\mu}$$

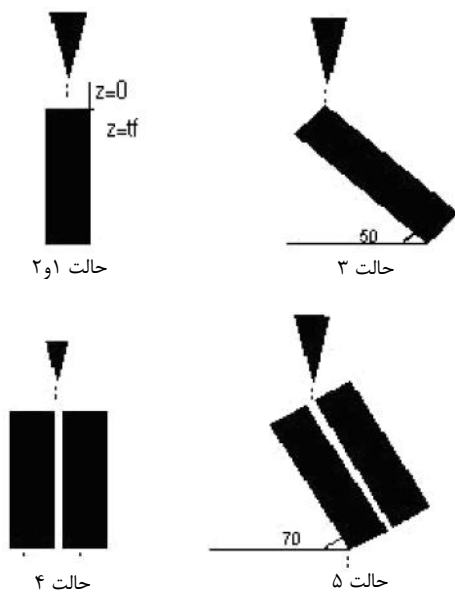
در این رابطه \bar{v} سرعت متوسط جریان فیلم است.

مراحل انجام آزمایشها

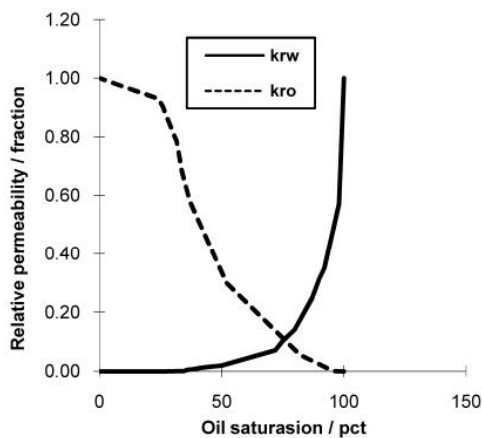
در این تحقیق با انتخاب مدل های فیزیکی مختلف (جدول ۱ و ۲) سعی شد تا تأثیر خواص فیزیکی محیط متخلخل مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. همچنین با انجام آزمایشها در حالت های مختلف از درجه اشباع مدل، نحوه قرار گرفتن مدل (عمود یا مایل بودن مدل) و تغییر خواص نفت، انتخاب دو نفت مختلف، میزان تولید نفت در حالت های مختلف با هم مقایسه شد (جدول ۳).

برای مطالعه تأثیر شکاف قائم و محل ریزش نفت از ماتریس های فوقانی، آزمایشها چنان طراحی شد که نفت هم بر روی سطح فوقانی ماتریس و هم بر روی شکاف عمودی بین ماتریسها، ریزش کند. مدل هایی که اسم آنان با حرف G مشخص شده مدل هایی هستند که از ذرات ریز شیشه تشکیل یافته اند و مدل های دیگر از سنگ مشابه سنگ مخزن تشکیل شده اند. برای فراهم آوردن امکان استفاده از نتایج آزمایشها برای شرایط مختلف،

1. Core holder
2. Klinkenberg
3. Unsteady state



شکل ۱-ب- وضعیت قرار گرفتن بلوکها



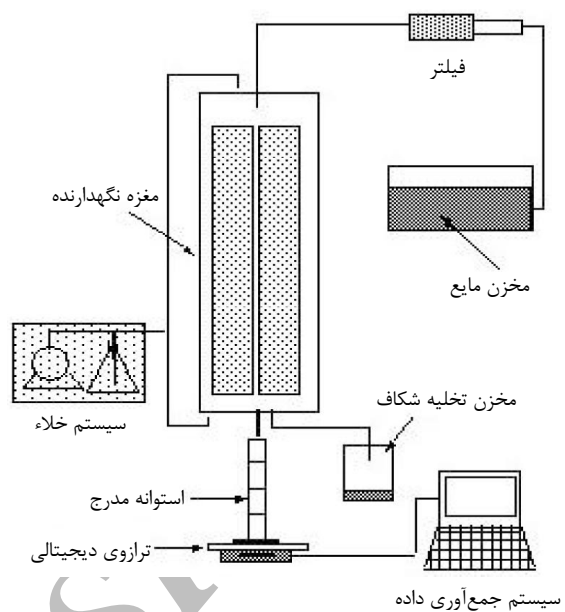
شکل ۳- نفوذ پذیری نسبی شاخص مدل‌های ماسه سنگی (L)

قرمز و از هوا به عنوان گاز مخزن (فاز غیر ترکنده) در شرایط آزمایشگاه استفاده شده است.

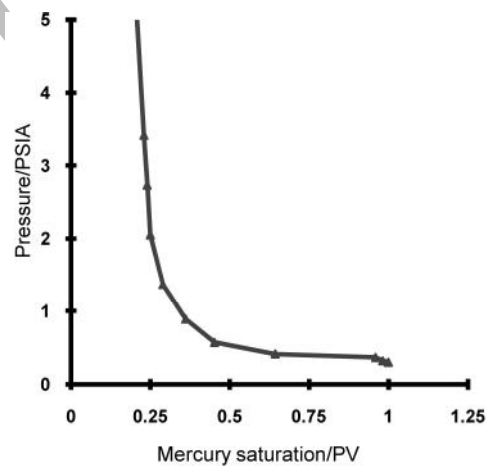
سیستم آزمایشگاهی

آزمایش‌های مکش با پنج نوع ماتریس به شرح ذیل انجام گرفت (شکل ۱).

۱- مدل گلوله‌های شیشه‌ای اشباع شده (G_3) در حالت قائم



شکل ۱-الف- شکل شماتیک دستگاه آزمایش



شکل ۲- فشار موئینگی شاخص مدل‌های ماسه سنگی (L)

مدل G_1 , مدل استوانه‌ای با نفوذپذیری بالا ۴۲ داری و تخلخل بالا ۳۳/۹٪ می‌باشد. با توجه به توزیع ابعاد، ذرات ($280-210 \mu m$) به صورت خیلی هموزن می‌باشند. خواص فیزیکی مدل‌ها، زمان مشخصه^۱ آن‌ها T^* و دبی مشخصه آن‌ها q^* در جدول ۱ آورده شده‌اند.

خواص سیالات

نفت Oil-2 به عنوان نفت مخزن (فاز ترکنده) در تمام آزمایش‌ها به کار برده شده است. خواص فیزیکی سیالات مورد آزمایش در جدول ۲ آمده‌اند. نفت ریزشی^۲ به رنگ

1.Characteristic time
2.Trickled

جدول ۱- خواص فیزیکی مدل‌های مورد آزمایش

مدل	ابعاد (cm)	تخلخل (%)	تراوایی (D)	T^* (min)	q^* (cc/min)
$G_5^{\#}, *$	$R=1/250, Z=29/5$	۳۵/۲۰	۴۲/۸۱۲	۳۰/۵۲	۱/۶۷
L_1+	$X=3/329, Y=2/950, Z=22/25$	۲۲/۲۵	۷۶۲	۲۳/۵۲	۳/۴۶۶
L_2+	$X=3/925, Y=2/377, Z=33/5$	۲۲/۶۰	۷۵۳	۲۱/۱۹۷	۳/۳۴۵
L_3+	$X=3/918, Y=2/511, Z=34/5$	۲۲/۴۹	۷۵۹	۲۱/۷۴۰	۳/۵۵۵

+ مدل‌های مکعبی، * مدل‌های استوانه‌ای و # مدل‌های شفاف

جدول ۲- خواص فیزیکی سیال مورد آزمایش

سیال	کشش سطحی (mN/m)	دانسیته (gr/cc)	گرانروی (cP)
هوا	-----	$1/2 \times 10^{-3}$	۰/۰۱۸
نفت	۳۰/۵۰	۰/۸۴۲	۶/۲۰

تخلیه شد. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نمودار کل نفت تولید شده در اثر ریزش، کمی بالاتر از میزان نفت آشام شده قرار گرفته است.

در هر زمان، کل تخلیه نفت از مدل معادل اختلاف بین نفت تولید شده و نفت آشام شده خواهد بود. سه فرایند تولید، آشام و تخلیه مدل بر حسب زمان در شکل ۵ نشان داده شده است که نمایانگر پدیده همسو بودن فرایند تولید و آشام می‌باشد. تا قبل از تولید به میزان ۹۳/۵٪ از کل نفت موجود در مدل، نشانه‌ای از نفت جذب شده در نفت تولیدی مشاهده نشد. میزان بالای تولید نفت اولیه قبل از نفوذ فاز آشام شده، نشانگر پیستونی بودن فرایند جابجایی نفت می‌باشد.

آزمایش دوم: ماتریس تخلیه شده در شرایط قائم

در این حالت، ابتدا اجازه داده شده تا ماتریس L_1 به میزان ۹۴/۰۸٪ از نفت اولیه خود را تخلیه کند و پس از آن نفت به صورت قطره با دبی ۳/۴۵ cc/h (معادل دبی شاخص مدل ۳/۴۵ cc/h) بر روی سطح بالایی مدل چکیده شد. مکانیزم‌های ریزش، آشام و انباشته شدن / تخلیه شدن از فرایندهای اصلی در آشام مجدد می‌باشند. به دلیل توزیع مجدد سیال در داخل ماتریس تقریباً ۴ دقیقه طول کشید تا تولید نفت شروع شود. تجمع نفت در داخل ماتریس با

۲- مدل ماسه سنگی غیر اشباع (L_1) در حالت قائم

۳- مدل ماسه سنگی (L_1) با زاویه 50°

۴- دو ماتریس ماسه سنگی اشباع شده کنار هم (L_3, L_2) با ترک‌های قائم

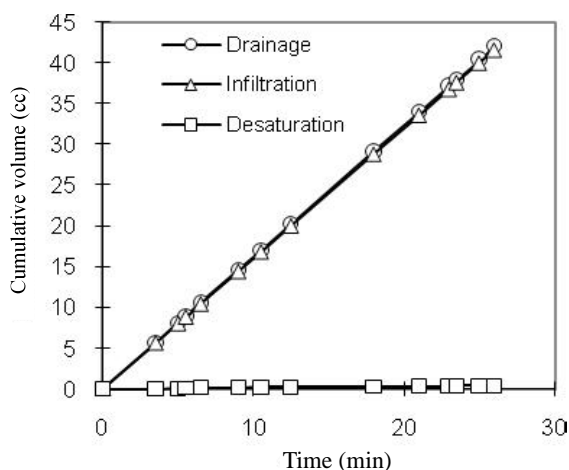
۵- دو ماتریس ماسه سنگی اشباع شده کنار هم (L_3, L_2) با زاویه 70° همراه با ترک بین آن‌ها

در انتهای هر بار آزمایش، محیط متخلخل (مدل مورد آزمایش) با متیلن کلرید و استن به کمک پمپ تزریق شستشو داده شده و در انتها، حلال باقی مانده با تزریق گاز نیتروژن به درون محیط متخلخل پاک می‌شدند.

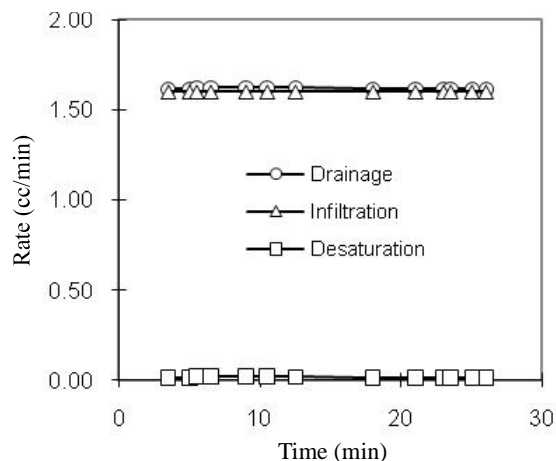
شرح آزمایش‌ها

آزمایش اول: ماتریس در شرایط قائم و کاملاً اشباع شده

آزمایش آشام مجدد بر روی مدل G_5 انجام شد. در حالیکه مدل با نفت به طور کامل اشباع و در شرایط قائم قرار داشت. نفت رنگی شده (قرمز) به صورت قطره قطره بر روی سطح بالایی آن با دبی ۱/۶۵ cc/min چکیده می‌شد. با توجه به اینکه دبی ریزش نفت بر روی مدل کمی کمتر از دبی شاخص ریزش ثقلی مربوط به مدل $q^* = 1/77$ cc/min بود، قسمت کوچکی از بالای مدل



شکل ۵

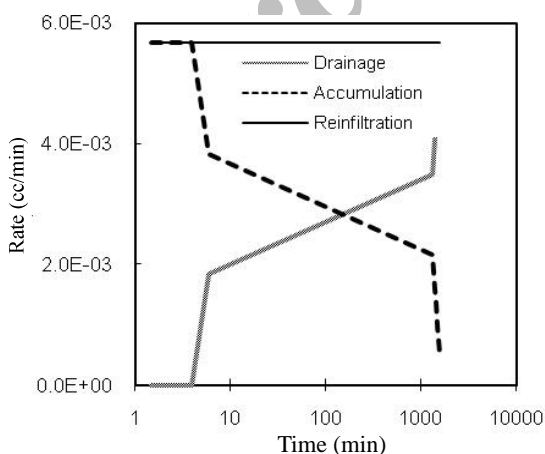


شکل ۴

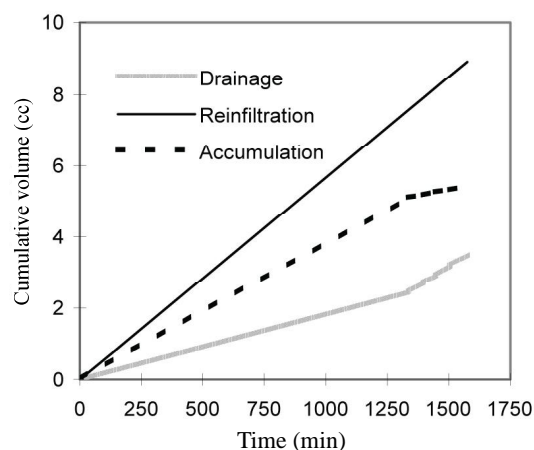
شکل های ۴ و ۵- میزان ریزش از بلوک و ریزش بر روی بلوک و کم شدن درجه اشباع برای حالت اول از سری اول آزمایش ها

به کار گرفته شده است. در مرحله دوم (۴ تا ۶ دقیقه) کاهش شدید در دبی جذب و در همان حال، افزایش شدید در دبی تولید مشاهده می شود. در مرحله بعدی (۶ تا ۱۳۳۶ دقیقه) به مرور دبی جذب ماتریس کم می شود. در آخرین مرحله بعد از ۱۳۳۶ دقیقه، میزان دبی جذب، سریع به مقدار حداقل خود کاهش یافت و دبی تولید نیز با همان شدت به میزان حداکثر خود افزایش یافت.

حداکثر دبی $3/45 \text{ cc/h}$ از زمان صفر شروع شده و به مرور با شروع تولید نفت و بالا رفتن دبی تولید نفت، دبی آشام و افزایش اشباع نفت، کاهش می یابد. با توجه به شکل های ۶ و ۷ چهار مرحله را در این فرایند می توان شناسایی کرد. در مرحله اول (زمان بین ۰-۴ دقیقه) میزان دبی جذب نفت در داخل ماتریس تقریباً معادل میزان دبی قطرات ریخته شده بر روی مدل می باشد. به عبارت دیگر تمام نفت جذب شده، به منظور بالابردن درجه اشباع ماتریس



شکل ۷



شکل ۶

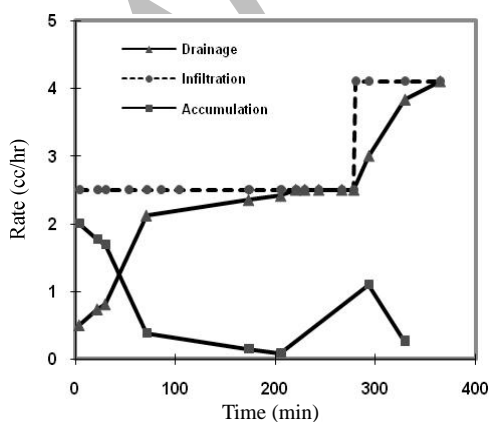
شکل های ۶ و ۷- میزان ریزش از بلوک و ریزش بر روی بلوک و کم شدن درجه اشباع برای حالت دوم از سری اول آزمایش ها

آزمایش چهارم: دو ماتریس اشباع شده در مجاور هم در شرایط قائم

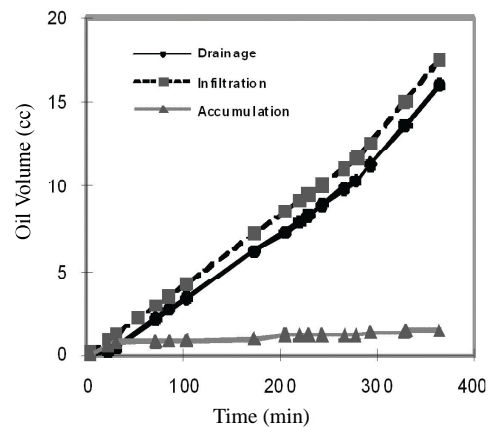
در این حالت، دو مدل ماسه‌ای اشباع شده (L_2, L_3) با یک شکاف عمودی ۱mm (بازشدگی) بین آنان مورد استفاده قرار گرفت. نفت قرمز شده به صورت قطره قطره مستقیماً بر بالای شکاف با دبی ۹/۶ cc/h ریخته شد. در مقایسه با دبی شاخص ۳/۳۴۵ cc/h و ۳/۵۵۵ cc/h به ترتیب برای ماتریس‌های (L_2, L_3)، تمام نفت‌های ریخته شده بر بالای شکاف، جذب ماتریس‌ها شده و تولید نفت تنها از سطح پائینی دو ماتریس مشاهده شد. برعکس قدرت انتقال بسیار بالای شکاف عمودی در مقایسه با سنگ ماتریس‌ها، به علت کم بودن فشار نفت در داخل ماتریس، به نسبت فشار نفت در داخل شکاف، نفت چکیده شده، ترجیحاً حرکت خود را از داخل ماتریس‌ها ادامه داده است.

در طول ۳۰۰ دقیقه اول، میزان کمی از نفت‌های چکیده شده برای ایجاد پل‌های مایع در داخل شکاف به کارگرفته شده، که در نتیجه آن بین نمودارهای تولید نفت و آشام نفت فاصله‌ای دیده می‌شود. از زمان ۳۰۰ دقیقه به بعد یک شرایط پایدار (یکسان شدن دبی آشام و دبی تولید) ایجاد می‌شود. به محض اینکه سیستم پایدار شد، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین فرایند آشام و فرایند تولید مشاهده نشد (شکل ۱۰، ۱۱).

آزمایش سوم: ماتریس تخلیه شده در شرایط مورب
ماتریس L_1 با زاویه 50° ، شیب داده شده و سپس اجازه داده شد تا مدل به صورت ریزش ثقلی آزاد تا رسیدن به میزان اشباع ۹۴/۸۶٪ تخلیه شود. سپس نفت به صورت قطره قطره با دو دبی مختلف یکی کمتر و یکی بیشتر از دبی شاخص مدل بر روی آن چکیده شد. در طول ۲۷۸ دقیقه اول، نفت به صورت قطره قطره بر روی سطح بالایی مدل با دبی ۲/۵ cc/h و سپس با دبی ۴/۱ cc/h ریخته شد. در مرحله دوم آزمایش، قسمتی از نفت ریخته شده بر روی مدل به صورت پوسته بر روی جداره مدل به حرکت درآمد. میزان گزارش شده نفت تولیدی، مجموع نفت بیرون آمده از مدل و نفت تولید شده به وسیله حرکت پوسته‌ای می‌باشد (دبی آشام ۳/۴۵ cc/h و جریان پوسته‌ای بر روی دیواره ۰/۵۵ cc/h). فاصله بین نمودارهای تولید نفت و آشام نفت (شکل ۸) معادل حجم نفت جمع شده در داخل ماتریس می‌باشد. در ابتدای فرایند جذب، میزان درجه اشباع در داخل ماتریس، ناپایدار شده و با گذشت زمان، دبی آشام کاهش و دبی تولید افزایش می‌یابد (شکل ۹). به محض اینکه دبی تولید و دبی آشام برابر شدند، فرایند آشام متوقف شده و درجه اشباع به حالت پایدار در می‌آید.

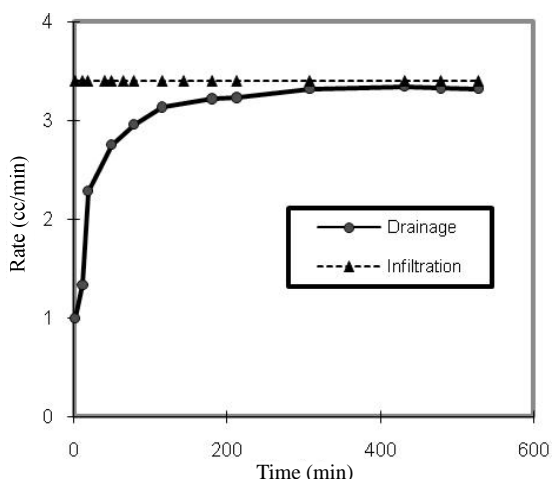


شکل ۹

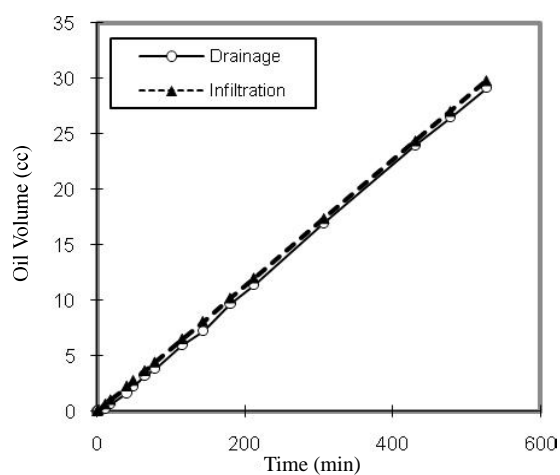


شکل ۸

شکل‌های ۸ و ۹- میزان ریزش از بلوک و ریزش بر روی بلوک و کم شدن درجه اشباع برای حالت سوم از سری اول آزمایش‌ها



شکل ۱۱



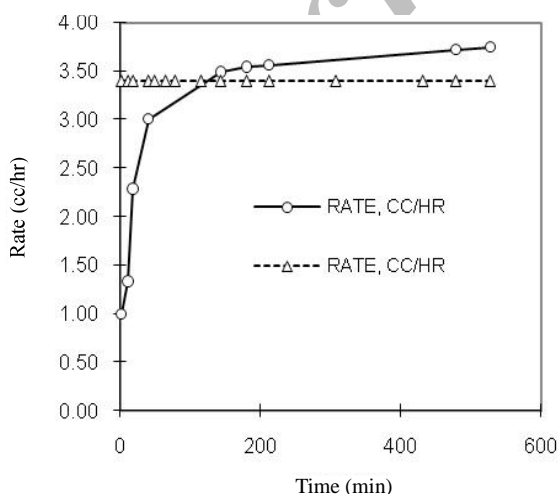
شکل ۱۰

شکل های ۱۰ و ۱۱- میزان ریزش از بلوک و ریزش بر روی بلوک و کم شدن درجه اشباع برای حالت چهارم از سری اول آزمایش ها

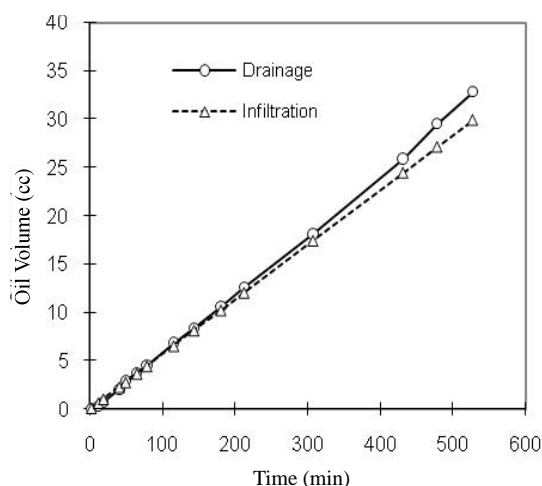
برای ایجاد پل های نفتی و پوسته نفت در داخل شکاف به کار رفته است (شکل های ۱۲ و ۱۳). آزمایش ها نشان داد مقدار کمی تخلیه از گوشه بالایی ماتریس بالایی در مدت صد دقیقه اول آزمایش به وقوع پیوسته است. حالت پایدار بعد از ۱۰۰ دقیقه پس از یکی شدن دبی تولید و دبی آشام تشکیل می شود. خلاصه شرایط آزمایش های ۱ تا ۵ و درصد اشباع اولیه سیال در جدول ۳ آمده است.

آزمایش پنجم : دو ماتریس اشباع شده در کنار هم به صورت مایل

در این آزمایش سیستم مورد استفاده همانند حالت چهارم بوده و به اندازه 70° شیب داده شده است. نفت تولید شده (بی رنگ) از پایین ماتریس ها به طور عمده از نفت اولیه موجود در ماتریس ها که به وسیله نفت ریخته شده (رنگ قرمز) جایگزین شده، می باشد. در مرحله اول آزمایش (۰ تا ۱۰۰ دقیقه) میزان کمی از نفت ریخته شده



شکل ۱۳



شکل ۱۲

شکل های ۱۲ و ۱۳- میزان ریزش از بلوک و ریزش بر روی بلوک و کم شدن درجه اشباع برای حالت پنجم از سری اول آزمایش ها

جدول ۳- مشخصات آشام مجدد سیال در بلوک

محل ورود	بلوک	درصد اشباع اولیه	موقعیت (انحراف عمودی)	دبی	آزمایش
سطح بالایی بلوک	G_5	۱۰۰	عمودی (۰)	۱/۶۵ cc/min	۱
سطح بالایی بلوک	L_1	۹۴/۰۸	عمودی (۰)	۳/۴۶ cc/hr	۲
گوشه بالایی بلوک	L_1	۹۴/۰۸	مایل (۴۰)	۴/۱ cc/hr ($t > ۳۲۲$ min) ۲/۷ cc/hr ($t < ۳۲۲$ min)	۳
بالای شکاف عمودی	L_2/L_3	۱۰۰	عمودی (۰)	۶/۹ cc/hr	۴
بالای شکاف مایل	L_2/L_3	۱۰۰	در کنار هم (۲۰)	۶/۹ cc/hr	۵

سری دوم آزمایش‌ها

در این سری از آزمایش‌ها برای شناسایی اثر بلوک‌ها بر روی یکدیگر، از چهار نمونه سنگ شنی مشخصات جدول ۱ استفاده شد. مشخصات سیالات مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

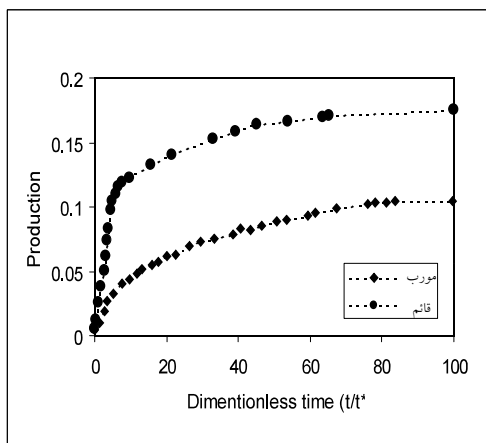
در ۸ آزمایش اولیه، چهار مدل L_4, L_3, L_2, L_1 در دو حالت قائم و مورب (زاویه ۳۰ درجه نسبت به قائم) تحت فرایند ریزش ثقلی تخلیه شدند. منحنی تولید بر حسب زمان در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نشان داده شده است. سپس به منظور نشان دادن تأثیر میزان سطح تماس بر فرایند آشام مجدد در سه حالت تماس کامل، ۵۰ درصد تماس و بدون تماس، میزان تولید نفت برای حالت‌های مختلف قرارگیری ماتریس‌ها بر روی هم (L_4 بر روی L_3 ، L_5 بر روی L_1) در دو حالت قائم و مورب آزمایش انجام شد. منحنی میزان نفت تولیدی بر حسب زمان در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، میزان تولید از ماتریس L_4 در حالت قائم معادل ۰/۱۶ P.V و در حالت مایل ۰/۰۶ P.V می‌باشد. همچنین کم شدن تولید در اثر فرایند ریزش ثقلی برای ماتریس L_3, L_2, L_1 به علت شیبدار شدن آن به ترتیب در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نشان داده شده است. میزان نفت تولیدی از مدل‌ها در حالت عمودی و مایل

به ترتیب $L_4 < L_3 < L_1 < G_5$ می‌باشد. در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ نتایج آزمایش‌های ریزش ثقلی بین دو ماتریس و در حالت قائم و مورب با سطوح تماس ۱۰۰٪ و ۵۰٪ و بدون تماس، آورده شده است. همانگونه که انتظار می‌رفت اگر چه سطح تماس ۱۰۰٪ بیشترین میزان تولید را داشته است، اما فاصله میزان تولید برای حالت ۵۰٪ تماس با ۱۰۰٪ تماس به مراتب اختلاف کمتری نسبت به حالت بدون تماس دارد. این امر بیانگر این مطلب می‌باشد که با سطح تماس ۵۰٪ برای شرایط آزمایش انجام شده می‌توان تأثیری معادل ۹۰٪ در تولید نسبت به حالت تماس کامل را ایجاد نمود. نتایج حاصل برای ماتریس G_5/L_1 در دو حالت قائم و مورب با سطوح تماس ۱۰۰٪، ۵۰٪ و بدون تماس همانند نتایج حاصل برای ماتریس‌های L_4/L_3 بوده که در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ نشان داده شده است. تأثیر مورب بودن ماتریس‌ها در میزان تولید از ماتریس‌های بر روی هم نیز در شکل‌ها نشان داده شده است که برای کلیه حالت‌ها در وضعیت قائم یا توجه به افزایش ارتفاع مفید ماتریس‌های بر روی هم، میزان تولید به مراتب بیشتر از حالت مورب می‌باشد.

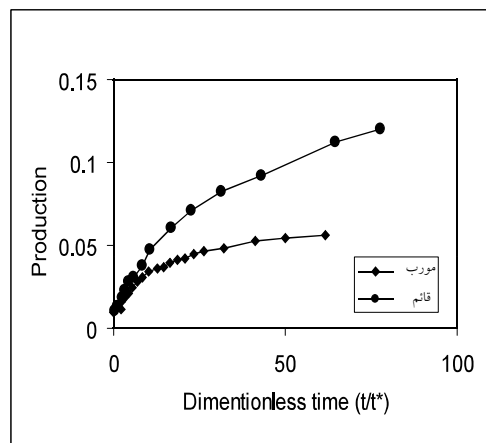
برای سری دوم آزمایش‌ها، اشباع نهایی نفت در تخلیه تنهای هر بلوک در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- اشباع نهایی سیال در بلوک

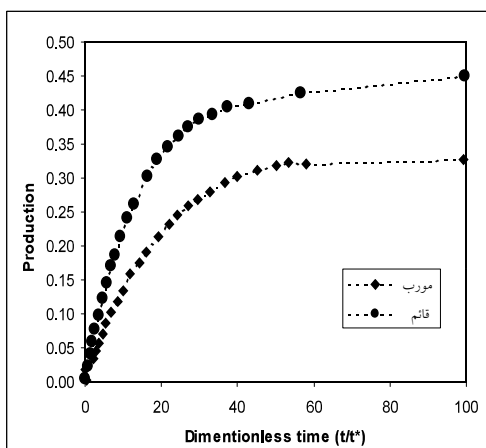
توضیحات	بلوک L_1	بلوک G_5	بلوک L_3	بلوک L_4	حالت
شکل‌های ۱۴-۱۷	۵۵	۴۹	۸۳	۸۲	قائم
شکل‌های ۱۴-۱۷	۶۷	۶۳	۹۱	۹۴	مورب



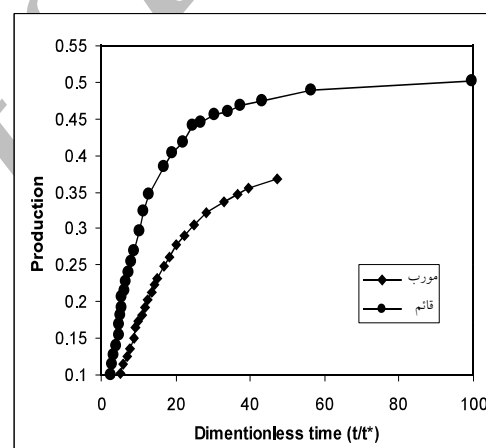
شکل ۱۵- مقایسه بازیابی ریزش ثقلی برای بلوک I_3 در حالت قائم و مورب



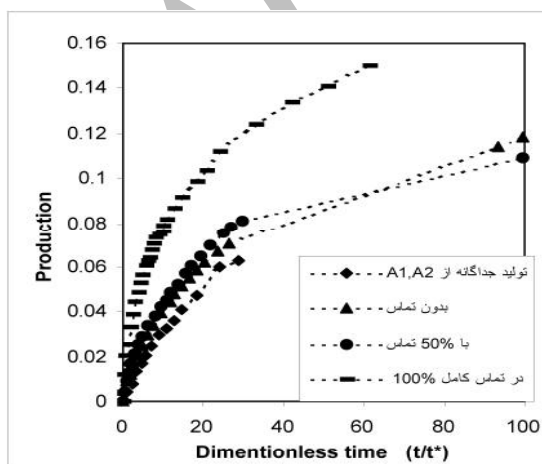
شکل ۱۶- مقایسه بازیابی ریزش ثقلی برای بلوک I_4 در حالت قائم و مورب



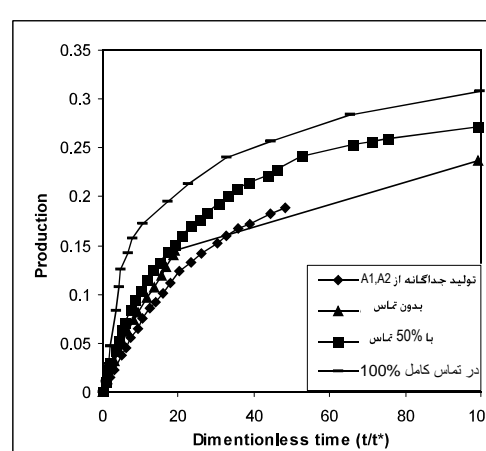
شکل ۱۷- مقایسه بازیابی ریزش ثقلی برای بلوک I_1 در حالت قائم و مورب



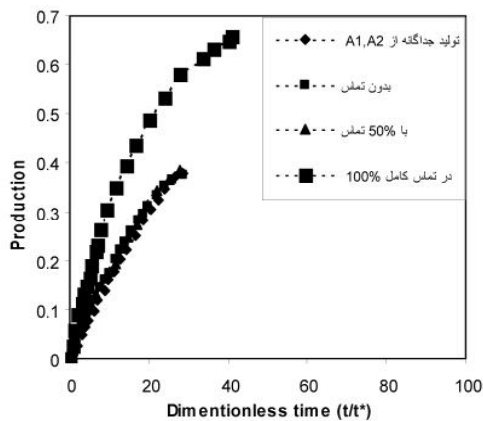
شکل ۱۸- مقایسه بازیابی ریزش ثقلی برای بلوک G_3 در حالت قائم و مورب



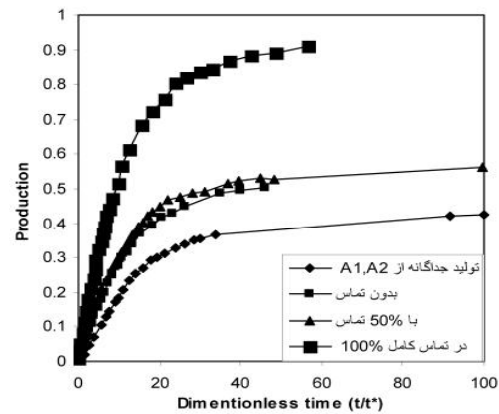
شکل ۱۹- مقایسه بازیابی برای بلوک‌های I_3 و I_4 به صورت مورب در حالت‌های جدا از هم، با تماس ۱۰۰٪، ۵۰٪ و بدون تماس



شکل ۱۸- مقایسه بازیابی برای بلوک‌های I_3 و I_4 به صورت عمودی در حالت‌های جدا از هم، با تماس ۱۰۰٪، ۵۰٪ و بدون تماس



شکل ۲۱- مقایسه بازیابی برای بلوک‌های L_1, G_3 به صورت مورب در حالت‌های جدا از هم، با تماس ۱۰۰٪، ۵۰٪ و بدون تماس



شکل ۲۰- مقایسه بازیابی برای بلوک‌های L_1, G_3 به صورت عمودی در حالت‌های جدا از هم، با تماس ۱۰۰٪، ۵۰٪ و بدون تماس

هرگاه نفت ریخته شده بر روی مدل مساوی یا بیشتر از دبی شاخص مدل باشد، پس از گذشت از مرحله گذرا، درجه اشباع نفت در داخل قسمت تخلیه شده مدل به حداکثر خود ($1-S_{gc}$) می‌رسد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که ایجاد پوسته نفت بر روی جداره ماتریس سبب می‌شود تا فشار موئینگی بر روی دو طرف سطح صاف پوسته صفر شود. به عبارت دیگر فشار نفت و گاز در دو طرف پوسته با هم برابر می‌شود. نفت در پوسته در تماس با نفت داخل ماتریس می‌باشد و فشار نفت در هر نقطه از پوسته که به فاصله h از پایین ماتریس باشد به اندازه Δp_{gh} از فشار گاز کمتر بوده و از این رو سبب کشیده شدن نفت از پوسته به داخل ماتریس می‌شود. نفت خارج شده از ماتریس‌های بالایی در یک مجموعه ماتریس ابتدا در صورتی که دبی آن کمتر از شاخص دبی ماتریس زیرین باشد، به طور کامل آشام و در صورتی که بیشتر از آن باشد، اختلاف دو دبی به صورت جریان پوسته‌ای بر روی جداره ماتریس پائینی جریان می‌یابد. در حالت‌های سیستم‌های شیبدار، عملکرد شبیه سیستم عمودی بوده و نفت جاری شده به طرف ماتریس‌ها، ترجیحاً از داخل محیط‌های متخلخل عبور می‌کند. نقش اصلی شیب در این فرایند، کاهش ارتفاع موثر از ارتفاع ماتریس به میزان $(1 - \sin \theta)$ می‌شود که در آن θ همان زاویه انحراف از قائم می‌باشد.

تکرار آزمایش‌ها بیانگر $\pm 5\%$ تغییرات در نتایج انجام

بحث بر روی نتایج آزمایش

در فرایند آشام مجدد، نیاز به بالا بودن ارتفاع نقطه ریزش نفت نسبت به سطح ایستایی فشار موئینگی می‌باشد. هرگاه شیب لایه، سطوح غیر قابل نفوذ و شکاف‌های باز به طوری باشند که ناحیه تماس نفت جاری شده از لایه‌های فوقانی در ارتفاع پایین‌تر از ارتفاع ایستایی قرار گیرد، نیروی موئینگی قادر به فعال کردن فرایند آشام مجدد نخواهد بود. وقتی که سرعت ریزش نفت بر روی ماتریس بیش از سرعت شاخص ریزش آن باشد، اختلاف آن به صورت جریان پوسته‌ای بر روی جداره مدل جاری خواهد شد. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته، نشان می‌دهد که نفت اولیه تقریباً به صورت پیستونی توسط نفت آشام شده، جایگزین می‌شود. هرگاه نفت، بر روی ماتریس تخلیه شده ریخته شود، درجه اشباع ماتریس، در بالای مدل (نزدیک سطح فوقانی آن) شروع به افزایش می‌کند. نفت پس از تشکیل یک فیلم روغن بر روی سطح فوقانی به صورت جریان توده‌ای به سمت پایین حرکت می‌کند و به تدریج اشباع نفت، نفوذپذیری نسبی نفت و دبی ریزش نفت تا زمانی که نفت چکیده شده بر روی مدل کمتر از دبی شاخص مدل باشد، افزایش می‌یابد. پس از یک مدت زمان گذرا، درجه اشباع نفت و توزیع آن در مدل چنان تغییر می‌یابد که بتواند معادل نفت وارده شده به مدل را از آن خارج کند و لذا هیچگاه مدل به اشباع کامل نمی‌رسد.

خواهد یافت. در حالی که در نواحی پائین تر هنوز درجه اشباع نفت به مراتب کمتر می باشد. میزان اختلاف بین نفت آشام شده و نفت تخلیه شده از ماتریس، کنترل کننده میزان تغییر در درجه اشباع نفت داخل ماتریس، می باشد. پس از طی شدن یک فاصله زمانی (که بستگی به شرایط اشباع اولیه و خواص فیزیکی سنگ و سیال ماتریس و میزان دبی نفت ریزش شده دارد) میزان درجه اشباع و نحوه توزیع نفت در داخل ماتریس چنان تنظیم می شود که می تواند نفت آشام شده را به همان میزان تخلیه کند و از آن زمان به بعد سیستم در حالت پایدار خواهد بود.

۵- به علت وجود گرادیان فشار از جدار ماتریس به سمت داخل آن که در اثر نیروی موئینگی ایجاد می شود، حتی اگر نفت ریزش شده بر روی شکاف بین دو ماتریس مجاور هم ریخته شود با توجه به اینکه قطرات نفت به مراتب از ضخامت شکاف بیشتر است سبب اتصال آن به یک و یا هر دو دیواره شکاف و در نتیجه مکش آن به داخل ماتریس می شود.

۶- در آزمایش های انجام شده بر روی یک ماتریس در حالت قائم و مورب مشاهدات نشان می داد که حتی در حالت مورب هم نفت ریخته شده بر روی دیواره ماتریس تمایل به ادامه حرکت از ناحیه متخلخل را داشته و تنها در شیب های زیاد، قسمتی از آن به صورت پوسته نسبتاً ضخیم بر روی جداره حرکت می کند.

۷- در صورتی که تماس بین دو ماتریس بتواند ارتباط موئینگی لازم را در ماتریس های بر روی هم بر روی هم برقرار کند میزان کل تولید معادل میزان تولید از یک ماتریس با ارتفاعی برابر ارتفاع مجموعه ماتریس ها می باشد. البته میزان دبی ریزش نفت کاهش می یابد و میزان افت دبی ریزش ثقلی نفت در رابطه خطی با میزان تماس بین دو ماتریس ندارد به طوری که با ۵۰ درصد تماس نمی توان انتظار نصف شدن دبی را داشت بلکه به مراتب کاهش کمتری در دبی مشاهده می شود (به منظور صرفه جویی در وقت، آزمایش ها قبل از رسیدن به تولید نهایی قطع شده است).

گرفته بود. همانگونه که نشان داده شده است در شرایط مورب، میزان نفت باقیمانده در بلوک بیشتر است. این امر بر اساس معادلات حرکت سیال به دلیل تغییر در مقدار نیروی جاذبه سیال می باشد.

نتیجه گیری

۱- شرط لازم برای ایجاد پدیده آشام مجدد، قرار گرفتن ارتفاع محل تماس نفت ریزشی در ارتفاع بالاتر از ارتفاع ایستایی برای سیالات و ماتریس مذکور می باشد. در غیر این صورت نیروی موئینگی برای مکش وجود نخواهد داشت.

۲- برای دو ماتریس بر روی هم، نفت خارج شده از ماتریس بالایی، از طریق سطح فوقانی و سطوح جانبی ماتریس زیرین آشام و در نتیجه تأخیر زمانی در ریزش ثقلی از ماتریس زیرین (در صورتی که از ابتدا کاملاً اشباع باشد) و یا تغییر درجه اشباع در ماتریس زیرین (در صورتیکه در شروع آزمایش تخلیه شده باشد) را ایجاد می کند.

برای این منظور، ابتدا یک پوسته مسطح از نفت بر روی جداره ماتریس تشکیل می شود (که فشار موئینگی آن حدود صفر می باشد) و این امر سبب برقراری یک گرادیان فشار نفت برای مکش آن به داخل ماتریس می شود.

۳- برای حالتی که ماتریس زیرین از نفت کاملاً اشباع می شود، در صورتی که نفت خارج شده از ماتریس (یا ماتریس های فوقانی) بیشتر از دبی شاخص ماتریس پائینی باشد $(q^* = \frac{KA\Delta P}{\mu})$ به اندازه q^* آشام و مابقی از روی سطوح جداره آن سر ریز می کند. در صورتی که نفت خارج شده از ماتریس / ماتریس های فوقانی کمتر از q^* باشد، تمامی آن آشام ماتریس پائینی شده و سرعت کاهش درجه اشباع ماتریس زیرین به همان اندازه کاهش می یابد. البته پس از یک دوره گذرا سیستم به حالت پایدار رسیده و هر چه نفت از ماتریس بالایی آشام می شود، همان مقدار نیز از ماتریس زیرین تخلیه می شود.

۴- وقتی نفت بر روی یک ماتریس تخلیه شده ریزش کند میزان درجه اشباع در نزدیکی محل ریزش سریعاً افزایش

علائم و نشانه‌ها	زیرنویس‌ها
α_c : ضریب نفوذ موئینگی	g: فاز گاز
K: تراوایی ماتریس (داریسی D)	w: فاز تر کننده
K_r : تراوایی نسبی ماتریس	o: نفت
μ : گرانروی (cp)	
v: سرعت سیال (ft/s)	
ρ : دانسیته سیال (lb/ft ³)	
σ : کشش سطحی (dyne/cm)	
g: شتاب ثقلی (lbf)	
L: طول مغزه (ft)	
P_c : فشار موئینگی (psi)	
S_w : اشباع فاز تر (%)	
Z: ارتفاع ماتریس (ft)	

منابع

- [1] Lefebvre du Prey E., Gravity and capillary effects on imbibition in porous media, paper SPE 6192, SPE Journal, pp. 195-206, June 1978.
- [2] Saidi A.M., Reservoir engineering of fractured reservoirs- fundamental and practical aspects, TOTAL Edition Press, Paris, 1987.
- [3] Coats K.H., Implicit compositional simulation of single-porosity and dual-porosity reservoirs, SPE 18427, SPE Symposium on Reservoir Simulation, Houston, 1989.
- [4] Fung, Larry S.K. and Collins D.A., An evaluation of the improved dual porosity model for the simulation of gravity effects in naturally fractured reservoirs, JPCT, Vol. 30, No. 3, pp. 36-43, 1991.
- [5] Sajjadian V.A., Danesh A. and Tehrani D.H., Laboratory studies of gravity drainage mechanism in fractured carbonate reservoir-capillary continuity, SPE 54003, 8th Abu Dhabi international petroleum exhibition and conference, UAE, 11-14 Oct. 1998.
- [۶] سجادیان و.ا.، نادری ح.، عمادی م.ع. و همکاران تهیه مدل مناسب جهت تطبیق نتایج آزمایشگاهی مکانیزم ریزش ثقلی، پژوهشگاه صنعت نفت، گزارش داخلی ۴۴۲۰۰۳۰۱، ۱۳۷۵.
- [۷] سجادیان و.ا.، نادری ح.، نغز گوی کهن م. و همکاران مطالعه و بررسی شبه توابع جهت بهبود شبیه‌سازی مکانیزم ریزش ثقلی، پژوهشگاه صنعت نفت، گزارش داخلی ۴۴۲۰۰۳۰۲، ۱۳۷۷.