

## مطالعه فرآیند استحصال نفت بجا مانده پس از پیشروی آب (توسط تزریق گاز)

ولی احمد سجادیان\*، محمدعلی عمادی،

محمد ظفری، کاوه احمدی

\*پژوهشگاه صنعت نفت

مرکز مطالعات ازدیاد برداشت از مخازن هیدروکربوری

vas6929@yahoo.com

### چکیده

در کشور ایران چندین مخزن نفتی سالیان متمادی تحت تزریق آب قرار داشته و در آینده نیز جهت حفظ فشار مخزن و یا بالابردن بازدهی تولید، مخازن جدیدی تحت انجام فرآیند تزریق آب قرار خواهند گرفت. همچنین رانش قوی آب در بعضی از مخازن نفتی سبب می گردد که در پشت سطح تماس آب و نفت (WOC) میزان قابل ملاحظه ای نفت بجا بماند. در صورتیکه بتوان حتی نیمی از آنرا تولید نمود، معادل تولید از یک مخزن جدید در مقیاس فاصله سطح تماس آب و نفت فعلی و اولیه مخزن بصورت برداشت اولیه و ثانویه خواهد بود.

نتایج آزمایشات تزریق گاز بصورت برداشت ثالثیه بر روی مدل‌های فیزیکی دلالت بر بالابودن بازدهی این فرآیند و امکان تولید قسمت عمده ای از نفت باقیمانده در پشت جبهه آب را دارد. در این مطالعه چگونگی تاثیر پارامترهای مختلف بر فرآیند استحصال نفت بجا مانده در پشت جبهه آب مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شده است.

**واژه های کلیدی:** ازدیاد برداشت، برداشت ثالثیه، سیلابزنی آب، سیلابزنی گاز، تزریق متناوب آب و گاز

### مقدمه

فشار مخازن نفتی به مرور زمان بر اثر تولید کم شده و در نتیجه دبی تولید و کلیه خواص فیزیکی مرتبط با فشار نیز تحت تاثیر قرار می گیرند. تزریق آب/گاز به منظور حفظ فشار اولیه مخزن و یا کم نمودن سرعت افت فشار از دیرباز مد نظر متخصصان بوده است.

با وجود بکارگیری تکنیکهای جدید از نقطه نظر شناسایی ساختار مخزن در پروژه های تزریق آب، هنوز بطور متوسط حدود ۶۰ درصد از نفت اولیه پس از عبور آب در مخزن بجا میماند. با محدود شدن امکان کشف مخازن جدید، بالابردن ضریب برداشت از مخازن موجود در سرلوحه برنامه ریزی شرکت‌های بزرگ نفتی قرار گرفته است.

مطالعات Collins در سال ۱۹۶۶ نشان داد که برای انتخاب یک مخزن بمنظور انجام تزریق آب باید به شکل مخزن، خواص سیال، ضخامت و عمق مخزن، خواص سنگ مخزن، نوع و میزان اشباع سیالات، یکنواخت بودن مخزن، و مکانیسم تولید در مرحله ابتدایی مخزن توجه نمود.

Dullien در سال ۱۹۷۹ بر پایه مشاهداتش در یک سیستم سه فاز شامل گاز-آب-نفت با توجه به تمایل سیالات به آرایش در می نیم انرژی، نشان داد که بعلت کمتر بودن کشش سطحی سیستم گاز/نفت نسبت به کشش سطحی گاز/آب مولکولهای گاز در نزدیکی و تماس با نفت قرار خواهند گرفت.

Dake از دو پارامتر بی بعد (Gravity Number)  $G$  و (End-Point Mobility Ratio)  $M^*$  بصورت ذیل، برای تعریف محدوده حالت پایدار استفاده نمود.

Displacement gravity Number:

$$G = \frac{7.853 \times 10^{-6} K K_{rw} A (\rho_w - \rho_o) \sin \theta}{q_w \mu_w} \quad (7)$$

End-Point Mobility Ratio:

$$M^* = \frac{K_{rw @ Sor} \mu_o}{K_{ro @ Swi} \mu_w} \quad (8)$$

در این مطالعه برای طراحی مقیاس مدل فیزیکی و محدوده دبی های تزریق از معادلات و روابط فوق استفاده گردید.

همچنین برای بدون بعد نمودن زمان آزمایشات روابط (۹) و (۱۰) بکار گرفته شده است (Catchpole, 1966).

$$T^* = \frac{\mu_o \phi (1 - S_{wc}) L}{k \cdot \Delta \rho_{og} \cdot g} \quad (9)$$

$$t_D = \frac{t}{T^*} \quad (10)$$

## انتخاب الگوی قرار گرفتن چاههای تزریقی و تولیدی

اولین مرحله در پروژه های تزریق آب/گاز انتخاب الگوی برای محل چاههای تزریقی می باشد. این انتخاب بر اساس فراهم نمودن ماکزیم تماس ممکن نفت با آب/گاز می باشد تا ضریب بازده حجمی جابجائی  $E_R$  افزایش یابد. برای طراحی الگوی بهینه راهکارهای زیر پیشنهاد شده است:

۱- تبدیل چاههای تولیدی به چاههای تزریقی

۲- حفاری چاههای تزریقی

۳- استفاده از چاههای افقی

برای طراحی الگوی مناسب برای تزریق آب توجه به پارامترهای زیر ضروری می باشد:

ناهمگون بودن مخزن، جهت نفوذپذیری، جهت شکافهای مخزن در صورت وجود، قابل دسترس بودن سیال تزریقی، طراحی و پیش بینی مدت تزریق، ماکزیم تولید، فاصله چاهها. چهار نوع متداول آرایش چاه برای پروژه های تزریق آب/گاز شامل: الگوی تزریقی نامنظم، الگوی تزریقی

Craig نیز در ۱۹۷۱ منحنی های نشانگر میزان کاهش نفت باقیمانده به خاطر حضور گاز، را ارائه کرد. وی اعلام نمود بطور نسبی افزایش کم فشار می تواند گاز باقیمانده را در نفت حل نماید و نتیجه گرفت که می توان در محاسبات سیلابزنی میزان گاز مانده را صفر در نظر گرفت.

## تئوری

ضریب استحصال (Recovery Factor) روش های ازدیاد برداشت و میزان کل نفت قابل استحصال آنرا را می توان از روابط (۱) و (۲) محاسبه نمود:

$$RF = E_D \cdot E_A \cdot E_V \quad (1)$$

$$N_P = N_S \cdot E_D \cdot E_A \cdot E_V \quad (2)$$

که در آن  $E_D, E_A, E_V$  بترتیب بازدهی میکروسکوپی، سطحی، عمودی و  $N_S, N_P$  نیز حجم نفت اولیه در مخزن و حجم نفت قابل استحصال است.

معادله Fractional Flow برای دو سیال امتزاج ناپذیر مثل نفت و آب/گاز،  $(f_{w/g})$  اولین بار توسط Leverett در سال ۱۹۴۱ ارائه گردید.

$$f_{w/g} = \frac{q_{w/g}}{q_t} = \frac{q_{w/g}}{q_o + q_{w/g}} = \frac{1 + \left( \frac{0.001 / 27 k_o A}{\mu_o q_t} \right) \left( \frac{\partial P_c}{\partial X} - 0.433 \Delta \rho \sin \alpha \right)}{1 + \frac{K_o}{K_{w/g}} \frac{\mu_{w/g}}{\mu_o}} \quad (3)$$

در ادامه Buckley & Leverett (۱۹۴۲) معادله زیر را برای محاسبه سرعت حرکت درجه اشباع خاص ارائه نمودند.

$$X = \left( \frac{5.615 q_t}{\phi \cdot A} \right) \left( \frac{df_w}{ds_w} \right)_{s_w} \quad (4)$$

برای الگوی پنج نقطه ای (Five-Spot) و  $S_{gi} = 0$ ، Muskat روابط زیر را برای محاسبه تزریق پذیری سیال پیشنهاد نموده است:

$$I_{base} = \frac{0.003541 h k k_{ro} \Delta P_{base}}{\mu_o \left[ \ln \frac{d}{r_w} - 0.619 \right]} \quad (5)$$

$$\left( \frac{I}{\Delta P} \right)_{base} = \frac{0.003541 h k k_{ro}}{\mu_o \left[ \ln \frac{d}{r_w} - 0.619 \right]} \quad (6)$$

در این سیستم میتوان از دو نوع نگهدارنده مدل به قطره‌های داخلی ۳ و ۲/۵ اینچ استفاده نمود.

۶- در آزمایشاتی که نیاز به میزان مشخصی از درجه اشباع آب باشد، به مدل فیزیکی آب تزریق نموده و با اندازه‌گیری روغن خارج شده از مدل بمحض رسیدن به درجه اشباع مورد نظر تزریق آب قطع می‌گردد.

۷- پس از پایان مرحله ۶، مدل فیزیکی شرایطی معادل شرایط قسمتی از مخزن (که تحت رانش آب بوده) را خواهد داشت.

در این مرحله به منظور مطالعه عملکرد فرآیند تزریق گاز در استحصال نفت بجا مانده در پشت جبهه آب، ورودی به سیستم تزریق گاز اتصال داده شده و گاز با دبی‌های مورد نظر به مدل تزریق گردید. در صورت عدم بروز اشکال کلیه آزمایشات، تزریق گاز تا زمان قطع تولید نفت ادامه می‌یافت. در کلیه مراحل ۵، ۶ و ۷ از فشارجانی بر روی دیواره مدل فیزیکی بمنظور جلوگیری از نشست سیال استفاده گردید.

### شرح آزمایشات با مدل فیزیکی

در این مطالعه در مجموع نه سری آزمایش انجام گرفت و تکرار پذیری آزمایشات هر سری با دقت قابل قبولی تأیید گردید. در آزمایش-۱ تنها آب تزریق شد و از آن به عنوان مرجع برای مقایسه نتایج و راندمان فرایند جابجایی سایر آزمایشها استفاده گردید. در آزمایشهای ۲ و ۵ تأثیر شکاف در سناریوهای مختلف از جمله تغییر خواص سنگ، محل شکاف، جهت شکاف و دبی تزریق مورد بررسی قرار داده شد. در آزمایشات ۳ و ۴ با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها تأثیر دبی تزریق آب مورد مطالعه قرار گرفت و در آزمایش ۶ نیز چگونگی تأثیر وجود آب همراه در فرایندهای جابجایی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داده شد. جزئیات مربوط به هر سری از آزمایشات در جدول-۲ و نتایج حاصل بصورت نمودارهای تولید نفت و یا آب بر حسب زمان در اشکال ۲ الی ۷ آورده شده است.

محیطی، الگوی تزریقی منظم، الگوی تزریقی مرکزی می‌باشد.

### شرح سیستم های آزمایشگاهی

شرح سیستم تحقیقاتی مورد استفاده

سیستم تحقیقاتی مورد استفاده توانائی انجام جابجائی سیال تحت شرایط مخزن از نظر درجه حرارت و فشار را دارا می‌باشد. بطوریکه می‌توان آزمایشات را به روشها و مدل‌های مختلف سیلابزنی روی مغزه‌های نفتی (سنگ آهک - ماسه سنگی) تحت دبی‌های مختلف تزریق انجام داد. شمای کلی سیستم تحقیقاتی مورد استفاده در شکل-۱ و مشخصات اصلی آن در جدول-۱ آورده شده است.

نحوه آماده سازی مدل فیزیکی

برای کلیه آزمایشات مراحل ذیل انجام گرفته است:

۱- ابتدا مدل فیزیکی برای مدت ۴۸ ساعت در دستگاه مخصوص با تولوئن شسته می‌شود.

۲- پس از اطمینان از تمیزی مدل بمنظور خشک شدن برای مدت ۴۸ ساعت در داخل کوره قرار داده می‌شود.

۳- با استفاده از سیستم اشباع، برای مدت ۴ ساعت مدل تحت خلاء قرار گرفته و سپس روغن مورد نظر بر روی آن ریخته می‌شود تا کاملاً در داخل روغن غوطه ور گردد. در پایان با استفاده از فشار سیلندر گاز نیتروژن، برای مدت ۴۸ ساعت فشاری معادل ۱۵۰۰ PSI بر روی سطح مایع وارد می‌گردد تا عمل اشباع تسریع گردد.

۴- در آزمایشات مربوط به مطالعه تأثیر آب همراه، مرحله ۳ با استفاده از آب مورد نظر انجام می‌گرفت و سپس پس از اشباع شدن کامل مدل با آب، با استفاده از تزریق روغن، میزان اشباع آب به  $S_{wc}$  و میزان اشباع نفت به  $S_o=1-S_{wc}$  رسانده شده است.

۵- پس از آماده شدن مدل فیزیکی از نظر اشباع سیالات، مدل فیزیکی داخل محفظه نگهدارنده مخصوص انتقال می‌یابد و اتصالات مربوط به ورود و خروج سیال در سیستم سیلابزنی به محفظه وصل می‌گردد. لازم به تذکر است که

## نتایج مطالعه

چاه تولیدی صورت پذیرد از راندمان بیشتری برخوردار خواهد بود.

۴- پس از تغییر دادن دبی جریان تزریق و یا پس از تبدیل سیال تزریقی از آب به گاز همواره مدت زمانی طول خواهد کشید تا توزیع اشباع سیالات در مخزن با شرایط جدید هماهنگ شود و جریان سیالات با میزان درجه اشباع جدید تطبیق نماید.

۵- هرچه درجه اشباع آب در محیط متخلخل افزایش یابد، راندمان فرآیند استحصال نفت بجا مانده از تزریق گاز کاهش خواهد یافت و لذا میبایستی با توجه به شرایط مخزن و سرمایه در نظر گرفته شده برای پروژه، میزان درجه اشباع آب قبل از تزریق گاز بهینه شود.

۶- با توجه به افزایش تراوایی مخزن در جهت موازی با امتداد شکافها و کاهش راندمان استحصال نفت بعلا رسوخ زودرس آب/گاز به چاه تولیدی، استفاده از الگوی بهینه قرار گرفتن چاههای تزریق و تولیدی به نحوی که جریان در مخزن عمود بر امتداد جهت شکافها باشد، راندمان فرآیند افزایش خواهد یافت.

### علائم و اختصارات:

$k$	= permeability, $L^2$ , md
$P_c$	= capillary pressure, $m/Lt^2$ , kPa
$r$	= radius of curvature
$S^*$	= normalized saturation
$S_g$	= gas saturation
$S_o$	= oil saturation
$S_{or}$	= residual oil saturation
$t_D$	= dimensionless time
$\sigma$	= surface tension, $m/t^2$ , mN/m
$\mu_o$	= oil viscosity
$\rho$	= density, $m/L^2$ , $g/cm^3$

هدف اصلی این پروژه فراهم آوردن اطلاعات آزمایشگاهی عملکرد گاز در استحصال نفت بجا مانده در پشت جبهه آب بود. نتایج حاصل از انجام آزمایشات با مدل فیزیکی در سناریوهای مختلف شامل تغییر پارامترهای دبی تزریق، وجود یا عدم وجود شکاف، جهت شکاف (افقی، عمودی)، میزان درجه اشباع نفت در شروع تزریق آب، میزان درجه آب و نفت در شروع تزریق گاز و فشار تزریق گاز، بصورت ذیل میباشد.

۱- در تصور عمومی مهندسين نفت محل قرار گرفتن آب موجود در مخزن ثابت بوده و در پاره‌ای از مطالعات برای سهولت محاسبات حجم آن به حجم سنگ مخزن اضافه شده و بعنوان فاز غیر متحرک در نظر گرفته میشود. در حالیکه نتایج نشان میدهد که پس از تزریق گاز و بهم خوردن تعادل نیروهای حاکم، امکان بجریان درآمدن و توزیع مجدد آب مخزن بسیار محتمل میباشد.

۲- روش متداول استفاده از منحنی های تراوایی در مطالعات مخازن بر اساس انجام آزمایشات بر روی پلاگهای سنگ مخزن میباشد. با عنایت به روش اندازه گیری تراوایی نسبی در آزمایشگاه که در آن نیروی حاکم بر جریان نیروی گرانشی میباشد. برای مواردی که مکانیزم ریزش ثقلی کنترل کننده میباشد. کاربرد منحنی های مذکور خالی از اشکال نیست. لذا میبایستی منحنی های تراوایی نسبی متناسب با نوع جریان (که عمدتاً جریان پوسته ای میباشد) تهیه و بکار گرفته شود.

۳- تزریق گاز بصورت ثالثیه با هدف استحصال نفت بجا مانده از تزریق آب در صورتیکه قبل از زمان رسوخ آب به

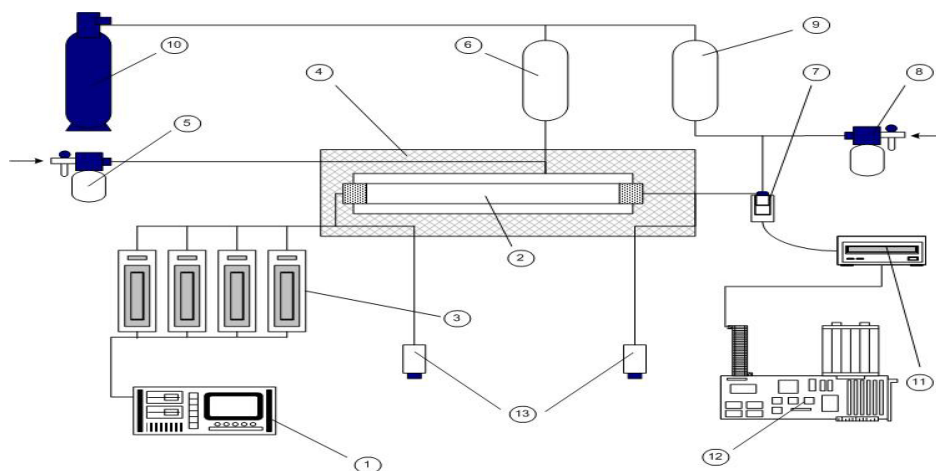
جدول ۱ - مشخصات اصلی سیستم تحقیقاتی مورد استفاده

۷۰۰۰ psi	حداکثر فشار سیال
۷۵۰۰ psi	حداکثر فشار جانبی
۲۱۰ C	حداکثر درجه حرارت
۶۵ و ۷۵ میای متر (۳/۵ و ۱/۳ اینچ)	قطر مدل های فیزیکی
۴۵۰ میلیمتر	طول مدل فیزیکی

جدول - ۲: لیست و مشخصات آزمایشهای سیلاب زنی

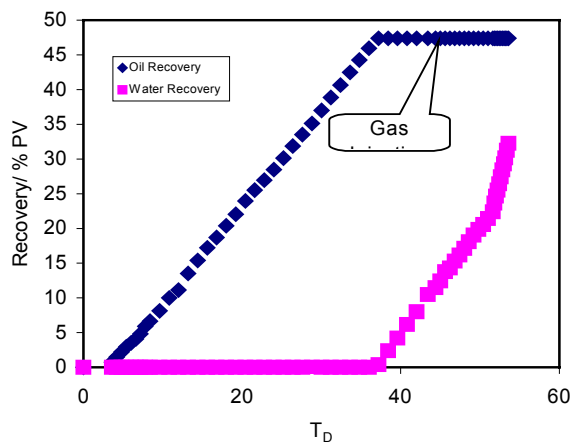
۱. مشخصات مغزه																شماره آزمایش
بعد از تزریق گاز			بعد از آتوزریق آب		قبل از آزمایش											
Sg	Sw	So	Sw	So	Sw	So	دبی تزریق آب (cc/hr)	نوع شکاف	نفوذ پذیری (md)	درصد تخلخل	حجم تخلخل (cc)	حجم کل (cc)	قطر (cm)	طول (cm)	شماره مغزه	
-	-	-	48.6	51.40	0	100	18	*	120	16	292.9997	1831.248	7.2	45	<b>A .۱</b>	1
14.56	46.14	39.3	59.4	40.6	0	100	7		130	15	274.6872	1831.248	7.2	25 20	<b>B1 B2</b>	2
13.48	33.92	52.6	37.9	62.1	0	100	7	*	120	17	277.6828	1633.428	6.8	45	<b>C</b>	3
26.56	49.04	24.4	48.7	51.3	0	100	18	*	125	15.5	253.1813	1633.428	6.8	45	<b>D</b>	4
1.01	31.39	67.6	31.8	68.2	0	100	7	—	170	14.5	236.8471	1633.428	6.8	45	<b>E</b>	5
4.58	49.02	46.4	49.9	50.1	30.8	70.2	16	*	115	14	228.6799	1633.428	6.8	45	<b>F</b>	6

\* بدون شکاف

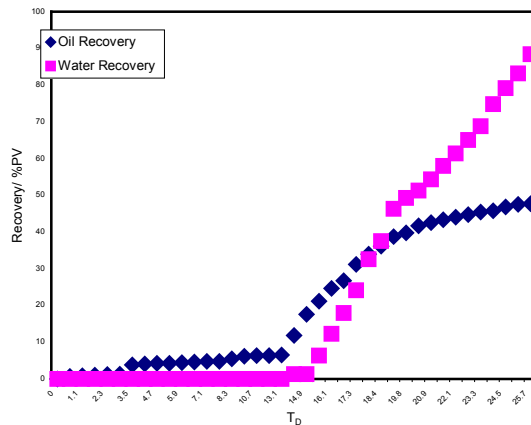


شکل ۱- نمای سیستم تحقیقاتی مورد استفاده.

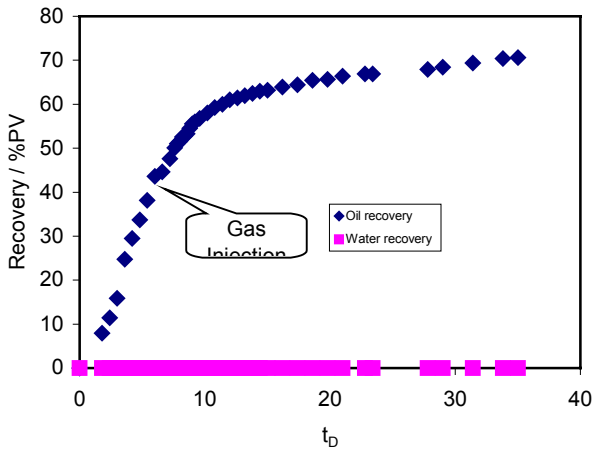
- 1- Computerized HPL, 2- Core Holder, 3- Floating Piston Accumulators (x4), 4- Air bath oven,  
 5- Hydra pneumatic booster for overburden, 6- Buffer cell for overburden, 7- Back Pressure Regulator (BPR)  
 8- Hydra pneumatic, 9- Buffer cell for BPR, 10- Gas Supply, 11- Ionometer, 12- Automated Fraction Controller  
 13- Relative transducers for core inlet/outlet pressure



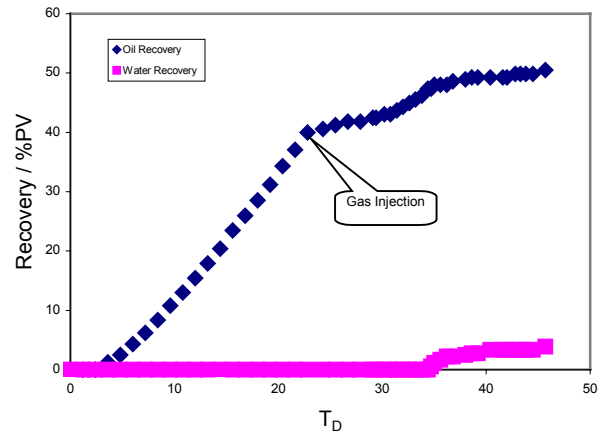
شکل ۳- نمودار ضریب تولید نفت بر حسب زمان در اثر تزریق آب برای آزمایش ۲



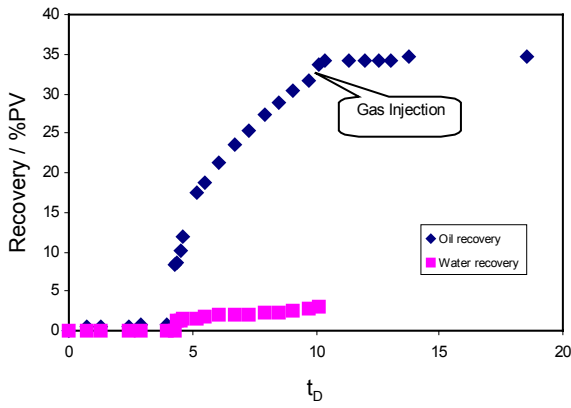
شکل ۲- نمودار تولید آب و نفت بر حسب زمان در اثر تزریق آب برای آزمایش ۱



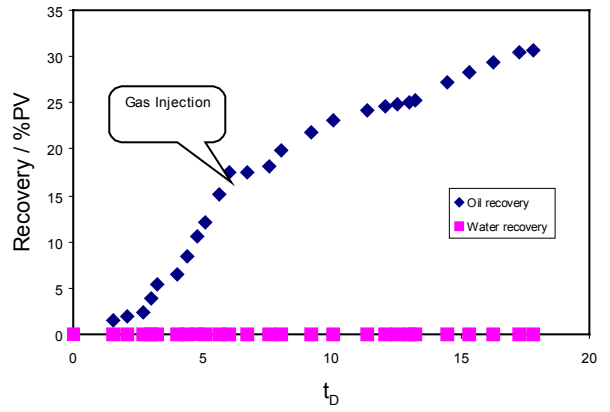
شکل ۵ - نمودار تولید نفت بر حسب زمان در اثر تزریق آب و گاز برای آزمایش ۴



شکل ۴ - نمودار تولید آب و نفت بر حسب زمان در اثر تزریق گاز برای آزمایش ۳



شکل ۷ - نمودار تولید آب و نفت بر حسب زمان در اثر تزریق آب برای آزمایش ۶



شکل ۶ - نمودار تولید آب و نفت بر حسب زمان در اثر تزریق آب و گاز برای آزمایش ۵

[1] Leverett, M.C., "Capillary Behavior in Porous Solids." Petroleum Trans, AIME, vol. 142, pp.152-69, 1941.

[2] Buckley, S. E. and M. C. Leverett., " Mechanism of Fluid Displacement in Sands" *Transactions of the AIME*, 146-149, 1942.

[3] Craig F.F., Jr., "The Reservoir Engineering Aspects of Water flooding", Society of Petroleum Engineers, Monograph, Dallas, 1971.

[4] Catchpole, J.P., and G. Fulford, "Dimensionless Groups." *Ind. and Eng. chem.*, 58, 46, 1966.

[5] Collins, R.E, "Flow of Fluids Through Porous Materials." McGraw Hill Company, New York, 143, 1961.

[6] Dullien, F.A.L, "Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure." Academic Press, New York, 1979.

[7] Dake, L.P., "Fundamentals of Reservoir Engineering", New York; Elsevier, 1978.