

بررسی تأثیر کشش میان سطحی بر منحنی های تراوایی نسبی در فرایند ریزش ثقلی

محمد رضا اصفهانی، حسن کریمیایی و سید مجید هاشمی
مرکز مطالعات اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده

نسبی، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. لذا به منظور شبیه سازی فرایند ریزش ثقلی، آزمایشات متعدد کشش میان سطحی با استفاده از دستگاه سانتیفریوژ با قابلیت اعمال دما برای مقادیر مختلف انجام گرفت. همچنین به منظور مقایسه و نیز یافتن مقادیر منحنی های تراوایی نسبی به روش جابجایی غیر یکنواخت، آزمایشاتی انجام گرفت که مطابقت خوبی بین این نتایج و نتایج حاصل از سانتیفریوژ حاصل گشت. استفاده از داده های آزمایشگاهی منحنی های تراوایی نسبی برای مقادیر مختلف کشش میان سطحی و مقایسه این منحنی ها، تأثیر قابل توجه کشش میان سطحی بر راندمان جابجایی سیال و نیز مقادیر تراوایی نسبی را تأیید می کند. با کاهش کشش میان سطحی، تراوایی نسبی فازها افزایش و مقدار مایع پسماند در سنگ کاهش می یابد.

ریزش ثقلی یکی از مهمترین فرایندهای تولید در مخازن است که در آن نیروی جاذبه به عنوان نیروی اصلی رانش عمل می کند. در بسیاری از مخازن عظیم جنوب ایران که حدود نیم قرن عمر دارند، مکانیزم اصلی تولید، ریزش ثقلی است. تراوایی نسبی به عنوان یکی از مهمترین عوامل در طی این فرایند، نقش قابل توجهی را ایفا می کند. یکی از عامل های بسیار مهم و تأثیر گذار بر مقادیر تراوایی نسبی، عامل کشش سطحی است. در واقع در اکثر پروژه های ازدیاد برداشت به منظور استحصال هیدروکربن بیشتر، سعی می شود تا کشش میان سطحی بین فازها را تقلیل دهند. در کلیه مکانیسم های تولید از جمله ریزش ثقلی معمولاً با مقادیر مختلف کشش میان سطحی مواجه هستیم. در این مطالعه اثر کشش میان سطحی بر منحنی های تراوایی

Study on Effect of Interfacial Tension on Relative Permeability Curves in Gravity Drainage Mechanism

M.R. Esfahani, H. Karimaie and S. M. Hashemi

Research Institute of Petroleum Industry
P.O.Box:18745-4163,Tehran,Iran

ABSTRACT

Gravity drainage is one of the most important production processes in all reservoirs, where the gravity force is the main driving mechanism. Gravity drainage is responsible for production from various gigantic reservoirs south Iran which have over a half century old. Relative permeability is one of the most important and effective parameters in this process.

Also it is a strong function of Interfacial Tension (IFT). Actually in most of EOR projects, production increased by decreasing IFT between fluids, and all of the production mechanisms (e.g. gravity drainage) are encountered with different values of IFT. In this paper we study the effect of IFT on relative permeability curves. In order to simulate the gravity drainage process, various experiments were performed

utilizing a centrifuge apparatus. Different IFT values were obtained by applying different temperatures. Relative permeability curves were also obtained by conducting tests by unsteady-state method. These results are analogous with the ones by centrifuge method.

The relative permeability curves for different

IFT values were plotted utilizing the experimental data. Comparison of these curves demonstrate the pronounce effect of IFT on displacement efficiency of fluid and relative permeability curves. As the IFT decreases, the relative permeability increases and hence reduces the residual saturation of fluid in the sample.

مقدمه

منحنی های ریزش ثقلی و تراوایی نسبی به فهم بیشتر و بهتر این مکانیزم، کمک می کند.

یکی از عامل های مهم و تاثیرگذار بر مقادیر تراوایی نسبی عامل کشش میان سطحی است. در واقع در اکثر پروژه های ازدیاد برداشت سعی بر این است که کشش میان سطحی بین فازها را تقلیل دهند. برای مثال در پروژه های تزریق آب با افزودن مواد فعال کننده سطحی به آب تزریقی، کشش میان سطحی بین فاز آب و نفت کاهش داده می شود. همچنین یکی از اهداف تزریق گاز با فشار بالا و یا تزریق گازهای غنی شده در مخازن نفت، کاهش کشش میان سطحی بین فازهای گاز و مایع و در نتیجه جابجایی مقدار بیشتری از مایع می باشد.

کشش میان سطحی یکی از عواملی است که روی مقادیر تراوایی نسبی فازها و نیز مقادیر اشباع بحرانی تاثیر قابل توجهی دارد و چشم پوشی از آن سبب ایجاد خطای چشمگیری در نتایج محاسبات و مطالعات مخازن خواهد شد.

در طی این مطالعه، با انجام آزمایشات مختلف از دو روش سانتریفوژ و جابجایی در حالت ناپایدار به بررسی تاثیر کشش میان سطحی بر منحنی های تراوایی نسبی پرداخته ایم و آزمایش های مختلف و با استفاده از دستگاه سانتریفوژ با قابلیت اعمال دما و با مقادیر کشش میان سطحی متفاوت، انجام گرفت. همچنین به منظور مقایسه و نیز یافتن مقادیر تراوایی نسبی به روش جابجایی در حالت ناپایدار، آزمایشاتی انجام شد که مطابقت خوبی بین این نتایج و نتایج حاصل از سانتریفوژ

ریزش ثقلی، یکی از مهمترین مکانیزم های تولید نفت در مخازن شکافدار است. ریزش ثقلی، فرایندی است که در آن نیروهای جاذبه به عنوان نیروی اصلی رانش عمل می کنند. به عبارت دیگر فرایند فوق، جابه جایی یک فاز توسط فاز دیگر است که در آن نیروهای جاذبه، نقش عمده و اصلی را ایفا می کنند. این مکانیزم می تواند در مراحل اولیه تولید (در جایی که انبساط کلاهک گازی وجود دارد) و یا در مراحل تکمیلی که در آنها گاز از یک منبع خارجی به مخزن تزریق می شود، فعال باشد. در بسیاری از مخازن عظیم جنوب کشور، مکانیزم تولید ریزش ثقلی از بالا و رانش آب از پایین می باشد. مقالات زیادی درباره درصد بهره دهی زیادتر مخازنی با مکانیزم تولید ریزش ثقلی، به چاپ رسیده است. Katz [۱] در سال ۱۹۴۲ میلادی درصد بهره دهی ۹۰٪ را در یک قسمت مخزن Oklahoma City Wilcox Sand آمریکا از طریق ریزش ثقلی گزارش کرده است. Haldorsen [۲] و همکاران نیز بازدهی ۶۰٪ را از طریق مکانیزم ریزش ثقلی برای مخزن Prudhe Bay آمریکا عنوان کردند. همچنین مطالعاتی که توسط King and Stiles [۳] بر روی مخزن East Texas انجام گرفت، مبین راندمان بالای جا به جایی (حدود ۸۷٪) توسط فرایند ریزش ثقلی است. متأسفانه مکانیزم ریزش ثقلی به اندازه مکانیزم های دیگر روشن نیست. تراوایی نسبی و فشار مؤثر دو عامل عمده ای هستند که چگونگی تولید را در این حالت نشان می دهند. لذا داشتن اطلاعات کافی در مورد

ادامه پیدا می کند تا نمونه کاملاً عاری از هر گونه هیدروکربن و آب و سیالات حفاری شود.

مغزه های شسته شده نیز به مدت ۴۸ ساعت در کوره حرارتی با دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد خشک می شوند. برای اندازه گیری تخلخل و نفوذپذیری مطلق از دستگاه اندازه گیری تخلخل و نفوذپذیری مطلق نسبت به هوا در شرایط محیط استفاده شده است. جدول ۱ مشخصات فیزیکی و پتروفیزیکی نمونه های مورد استفاده را نشان می دهد.

سیالات مورد استفاده

برای به دست آوردن مقادیر کشش میان سطحی مختلف از روش اعمال دما استفاده شد. بدین معنی که چون محلول آب و لوتیدین (L) در دماهای مختلف دارای کشش میان سطحی مختلفی می باشند و با توجه به اینکه دمای بحرانی آن $34/1^{\circ}\text{C}$ است، لذا از دماهای 40°C ، 45°C و 50°C استفاده شد. انتخاب این دماها به این دلیل بود که بتوان رفتار محلول را در حوالی نقطه بحرانی آن یعنی نقاطی که کشش میان سطحی بسیار پائین است، مشاهده کرد. مشخصات فیزیکی سیالات مورد استفاده در جدول ۲ آمده است.

حاصل گشت. در مسیر انجام آزمایش ها، سعی شد تا سیستم سنگ و سیال مورد آزمایش، ثابت باشند تا مقایسه بهتری بتوان انجام داد.

تهیه و آماده سازی مغزه ها

در کلیه آزمایش های انجام شده، سعی شد تا نمونه های منتخب به لحاظ تراوایی، یکنواخت و همگن باشند که این مهم با تهیه مقاطع نازک از نمونه ها و بررسی آنها با میکروسکوپ توسط واحد زمین شناسی صورت گرفت. همچنین از مغزه هایی با تراوایی یکنواخت و دانه بندی مستحکم استفاده شده زیرا نمونه های با دانه بندی غیر مستحکم به دلیل تعدد آزمایش ها و در نتیجه تعدد مراحل آماده سازی احتمال متلاشی شدن مغزه را به همراه دارد.

به منظور خارج ساختن هیدروکربن های سبک و سنگین از داخل نمونه مغزه، آن را با یک حلال نفتی در تماس قرار داده و پس از حل شدن مواد هیدروکربنی و آب در حلال فوق، نمونه مغزه در دستگاههای شستشوی مخصوص (Soxhlet Dean Stark) انجام می گیرد. مطابق با روش استاندارد ASTM شستشو با حلال مناسب (تولوئن) آنقدر

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و پتروفیزیکی نمونه ها

شماره نمونه	نفوذپذیری مطلق (میلی داریسی)	تخلخل (%)	طول (سانتی متر)	سطح مقطع (سانتی متر مربع)
۱	۱۰۲	۱۹	۵/۰۱۵	۱۱/۳۸
۲	۱۳۱	۱۸	۵/۱۱۸	۱۱/۱۴۵
۳	۱۹۰	۱۹	۴/۸۲۰	۱۱/۰۹

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سیالات مورد استفاده

درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$)	کشش میان سطحی (mN/m)	دانسیته (Kg/m^3)	ویسکوزیته (mPa.s)
۵۰	۰/۲۵۴	۲۴/۸	۱/۱
۴۵	۰/۱۶۴	۲۱/۰	۱/۱
۴۰	۰/۰۸۰	۱۶/۰	۱/۱
۳۴/۶	۰/۰۰۴	۴/۹	۰/۶

انجام آزمایش های تراوایی نسبی به روش جابجایی غیر یکنواخت (ناپایدار)

برای انجام آزمایشات تراوایی نسبی همراه با دما، دستگاهی طراحی شده است که قسمتهای اصلی آن عبارتند از:

۱- محفظه نمونه نگهدار از جنس فولاد ضد زنگ که لاستیک نگهدارنده مغزه، داخل آن قرار می گیرد و توسط فشار هیدرولیکی می توان فشار پشت لاستیک را به اندازه مورد نظر بر روی نمونه، اعمال کرد.

۲- دستگاه کنترل کننده فشار تزریق که شامل فشارسنجهایی با دقت بالا (1 Psi) و یک منبع تغذیه فشار مناسب است. فشار مناسب توسط تنظیم کننده های فشار قابل تنظیم می باشد.

۳- حمام هوای گرم با تنظیم و کنترل دقیق دما که کل دستگاه مغزه نگهدار به همراه خطوط تزریق در داخل آن قرار می گیرد.

برای انجام آزمایش، ابتدا نمونه ها به وسیله حلال تولوئن شسته و کاملاً خشک شد و در دستگاه اشباع کننده قرار گرفت (نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت با محلول سنگین تر W-Rich phase اشباع می شوند). سپس نمونه را در داخل مغزه نگهدار قرار داده و دمای حمام روی عدد مورد نظر تنظیم شد. سپس با اعمال فشار پشت لاستیک (Over Burden) و فشار تزریق، محلول سنگین تر را از مغزه عبور دادیم. این عمل به دلیل اطمینان یافتن از اشباع کامل نمونه مغزه و نیز اطمینان از عدم وجود پدیده تورق رس (Swelling) می باشد. سپس محلول سبک تر را به داخل نمونه تزریق و مقادیر حجم و زمان را ثبت کردیم. بادر دست داشتن مقادیر فوق و استفاده از روش گرافیکی جونز-راسل می توان مقادیر تراوایی نسبی را محاسبه کرد. لازم به ذکر است که نمونه شماره ۱ پس از دو بار آزمایش در دماهای 40°C و 45°C شکست و امکان انجام آزمایش در دمای 50°C را نیافتیم.

ابتدا محلول لوتیدین و آب را به نسبت وزنی ۲۸٪/ [۴] مخلوط می کنیم. این محلول در دمای پائین تر از $34/1^{\circ}\text{C}$ تشکیل یک فاز را می دهند. به منظور جداسازی فازها محلول را داخل آون و در دمای 40°C قرار داده تا پس از گذشت حدود ۱ ساعت دو فاز کاملاً از یکدیگر جدا شوند. در این حالت، فاز سنگین نسبت به آب غنی تر (W-Rich phase) و در پائین قرار گرفته و فاز سبک تر نسبت به لوتیدین غنی تر (L-Rich phase) و در بالا قرار گرفته است. سپس نمونه ها را توسط فاز سنگین تر و در داخل اشباع کننده به مدت ۴۸ ساعت اشباع می کنیم. فاز سبک تر را به منظور جابجایی در ظرف جداگانه ای نگهداری می کنیم. برای دماهای 45°C و 50°C نیز عملیات فوق را مجدداً تکرار می کنیم.

نحوه انجام آزمایش های سانتریفوژ

ابتدا سانتریفوژ را در دمای معین تنظیم و پس از قرار دادن نمونه های اشباع در باکت و ایجاد تعادل وزنی در آنها، سیال جابجا کننده (L-Rich phase) را در اطراف نمونه و داخل نمونه نگهدار می ریزیم به طوری که کلیه فضای اطراف نمونه را اشغال کند. ضمناً به دلیل اینکه بتوان سطح تماس دو سیال را مشاهده کرد، سیال سبک تر را با پودر آبی رنگی مخلوط می کنیم. افزودن این پودر تنها خاصیت کشش سطحی را به نصف کاهش داده و بر خواص دیگر بی تاثیر است. کلیه آزمایش ها در دور ثابت 2000rpm انجام شد. از آنجا که در زمانهای شروع آزمایش دبی تخلیه بسیار بالا است لذا در فواصل زمانی بسیار کوتاه (هر دو دقیقه) قرائتها انجام شد ولی پس از گذشت چند دقیقه و کند شدن دبی تخلیه، قرائتها به فاصله زمانی ۱۰ دقیقه انجام گرفت. آزمایش هنگامی به پایان می رسد که مقدار تولید، ثابت شده باشد. پس از اتمام آزمایش، نمونه ها مجدداً شستشو شدند و کلیه مراحل آماده سازی برای آزمایش های بعدی انجام پذیرفت.

برای محاسبه تراوایی نسبی با داشتن منحنی های تولید و با فرض اینکه تراوایی نسبی از معادلات کوری تبعیت می کنند، $(Krw = S_w^n)$ مقدار توان n (Corey Exponent) برای نمونه ها به شرح جدول ۴ محاسبه شده است.

جدول ۴ - مقادیر n بر حسب IFT در آزمایش سانتیفوژ

کشش میان سطحی (mN/m) / توان کوری	۰/۲۵۴	۰/۱۶۴	۰/۰۸
نمونه شماره ۱	۱/۵۵	۱/۵	۱/۴۵
نمونه شماره ۲	۱/۵	۱/۴۵	۱/۴

همانگونه که از جدول ۴ مشخص است با کاهش کشش میان سطحی توان n نیز کاهش می یابد. لذا می توان گفت هر چه مقدار کشش میان سطحی کمتر باشد در صد نهایی تولید افزایش و توان n کاهش می یابد و نهایتاً در حالت امتزاجی کامل، توان n برابر ۱ خواهد شد. با توجه به مطالب مذکور، نتایج را به شرح زیر می توان خلاصه کرد:

در آزمایش های انجام شده با کاهش کشش میان سطحی:

۱- تولید نهایی افزایش می یابد.

۲- میزان (نرخ) تولید افزایش می یابد.

۳- شاهد کاهش توان n (Corey Exponent) خواهیم بود.

۴- منحنی های تراوایی نسبی به سمت خطی شدن میل می کنند.

مدل سازی نتایج حاصل از آزمایش های تراوایی

نسبی با روش سانتیفوژ

ریزش ثقلی به عنوان فرایندی که در آن فاز غیر ترشونده، فاز ترشونده را جا به جا کرده و نیروی جاذبه نیز به عنوان عامل اصلی عمل کننده می باشد، شناخته شده است. با استفاده از مفاهیم تراوایی نسبی و معادله پیوستگی و نیز معادله دارسی می توان روابط ریاضی حاکم بر این فرایند را مورد تجزیه و

نتایج

نتیجه آزمایش های تراوایی نسبی با روش سانتیفوژ

منحنی های درصد بازیافت نسبت به زمان در دماهای مختلف که دارای کشش میان سطحی های متفاوت هستند در نمودار های ۱ و ۲ رسم شده است. در صد بازیافت نهایی برای هر دو نمونه نیز در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- در صد بازیافت نهایی برای نمونه ها در

آزمایش سانتیفوژ

کشش میان سطحی (mN/m) / در صد بازیافت نهایی	۰/۲۵۴	۰/۱۶۴	۰/۰۸
نمونه شماره ۱	۵۳	۵۷	۶۴
نمونه شماره ۲	۵۵	۶۰	۶۶

با توجه به جدول ۳، با کاهش کشش میان سطحی، در صد تولید نهایی افزایش می یابد. نمودارهای ۱ و ۲ نیز که در آنها سه منحنی بازیافت برای هر نمونه در یک شکل رسم شده اند موید این واقعیت می باشند. لذا از منحنی های درصد تولید نسبت به زمان و جدول فوق می توان نتیجه گرفت که با کاهش کشش میان سطحی یا به عبارت دیگر با نزدیک شدن به حالت امتزاجی کامل، مقدار بازیافت در نمونه ها افزایش می یابد.

نمودار های ۳ و ۴، منحنی های تراوایی نسبی فاز ترشونده حاصل از آزمایش سانتیفوژ می باشند. در رسم این منحنی فرض بر این است که فاز ترشونده کل فضای حجم منافذ را اشغال کرده و دارای پیوستگی نیز می باشد. لذا منحنی های فوق از مبداء شروع می شوند. همانگونه که از این منحنی ها مشخص است هر چه کشش میان سطحی کمتر باشد منحنی تراوایی نسبی برای هر دو نمونه به سوی خطی شدن حرکت می کنند. به عبارت دیگر می توان گفت درجه انحنای این منحنی ها بستگی به مقدار کشش میان سطحی دارد و هر چه این مقدار کمتر باشد درجه انحنای منحنی ها کمتر و بالعکس می باشد.

داشت:

حال متغیر های بدون بعد را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$T_D = \frac{K\Delta\rho R}{\phi\mu_w L \int_0^1 w^2(t) dt} \quad (10)$$

$$Z_D = \frac{z}{L} \quad (11)$$

لذا خواهیم داشت:

$$f_w = \frac{\frac{1}{N_{gv}} \frac{\mu_{nw} K_{rw}}{K_{mw} \mu_w} + K_{rw} + N_c K_{rw} J \frac{\partial S_w}{\partial Z_D}}{1 + \frac{\mu_{nw} K_{rw}}{K_{mw} \mu_w}} \quad (12)$$

که در معادله فوق:

$$N_{gv} = \frac{\Delta\rho g}{\mu_w k} \quad \text{gravity number} \quad (13)$$

$$N_c = \sigma \frac{\sqrt{\phi/k}}{\Delta\rho g L} \quad \text{capillary number} \quad (14)$$

در یک دبی تزریق ثابت، مقدار تولید برابر خواهد بود با:

$$N_p = R = t_D / N_{gv}$$

با صرفه نظر کردن از نیروهای موئینگی، پس از میان بر

(Breakthrough) خواهیم داشت:

(16)

$$N_p = 1 - \int_0^{S_{oe}^*} (1 - Z_{S_o^*}) dS_o^* = 1 - S_{oe}^* + f_{oD}(S_{oe}^*) t_D$$

که در معادله فوق S_{oe}^* درجه اشباع در انتهای خروجی مغزه است.

از حل دو معادله اخیر زمان میان بر حاصل می شود.

حال اگر فرض کنیم تراوایی نسبی از حل معادلات Corey

پیروی می کنند، خواهیم داشت:

$$K_{rw} = S_w^n$$

$$N_p = 1 - S_{oe} + (S_{oe}^n) t_D$$

تحلیل قرار داد. لذا با در نظر گرفتن معادله دارسی خواهیم

$$\bar{U}_{nw} = \frac{KK_{rw}}{\mu_{nw}} \text{grad}(P_{nw} - \rho_{nw}gz) \quad (1)$$

$$\bar{U}_w = \frac{KK_{rw}}{\mu_w} \text{grad}(P_w - \rho_wgz) \quad (2)$$

معادله پیوستگی فازها:

$$\phi \frac{\partial S_w}{\partial t} + \text{div}u_w = 0 \quad (3)$$

$$\phi \frac{\partial S_{nw}}{\partial t} + \text{div}u_{nw} = 0 \quad (4)$$

$$S_{nw} + S_w = 1 \quad (5)$$

$$P_{nw} - P_w = P_c = \sigma \sqrt{\frac{\phi}{K} P_c} \quad (6)$$

همچنین در جابجایی یک بعدی در حالت پایدار خواهیم

داشت:

$$\vec{U} = \vec{U}_w + \vec{U}_{nw} = U \quad (7)$$

با جایگزینی معادلات ۱ و ۲ در معادله ۷ خواهیم داشت:

$$u = \frac{KK_{rw}}{\mu_w} \text{grad}(P_w - \rho_wgz) - \frac{KK_{nw}}{\mu_{nw}} \text{grad}(P_{nw} - \rho_{nw}gz) \quad (8)$$

با استفاده از تعریف جریان کسری خواهیم داشت:

$$f_w = \frac{u_w}{u}$$

$$f_w = \frac{\frac{\lambda_w}{\lambda_{nw}} + \frac{\lambda_w}{ut} \left[\Delta\rho gz + \frac{\partial P_c}{\partial z} \right]}{1 + \frac{\lambda_w}{\lambda_{nw}}} \quad (9)$$

که در معادله فوق :

$$\lambda_w = \frac{KK_{rw}}{\mu_w}, \lambda_t = \lambda_o + \lambda_w \text{ و } \lambda_{nw} = \frac{KK_{nw}}{\mu_{nw}}$$

اعداد جدول ۵ با برآزش منحنی K_T (نمودار های ۵ و ۶) و امتداد آنها تا محور اشباع، به دست آمده است. همانگونه که از جدول ۵ مشخص است با کاهش کشش میان سطحی، مقدار اشباع باقیمانده فاز تر شونده کاهش می یابد و به عبارت دیگر می توان گفت راندمان جابجایی با کاهش کشش میان سطحی افزایش می یابد.

اعداد جدول ۵ نشان می دهند که با کاهش کشش میان سطحی، شاهد افزایش تراوایی نسبی فاز غیر تر شونده در نقاط انتهایی خواهیم بود. این نتایج تطابق خوبی با نتایج حاصل از آزمایشهای Amafule & Handy [۶] دارد.

همچنین با کاهش کشش میان سطحی شاهد خطی شدن منحنی ها نیز خواهیم بود. با توجه به مطالب مذکور، نتایج آزمایش های جابجایی به طور خلاصه عبارتند از:

۱- در مقادیر کشش میان سطحی زیر 1 mN/m ، منحنی های تراوایی نسبی، شدیداً به مقادیر کشش میان سطحی بستگی دارند.

۲- تراوایی های نسبی هر دو فاز در یک درجه اشباع مشخص با کاهش کشش میان سطحی، افزایش می یابند.

۳- با کاهش کشش میان سطحی، مقدار اشباع باقیمانده فاز تر شونده، کاهش می یابد.

۴- با کاهش کشش میان سطحی، تراوایی نسبی فاز غیر تر شونده در نقاط انتهایی، افزایش می یابد.

۱- با کاهش کشش میان سطحی، منحنی های تراوایی نسبی به سمت خطی شدن میل می کنند.

۲- تطابق خوبی بین نتایج حاصل از آزمایش ها به روش سانتیفریژ و جابجایی وجود دارد.

و چون در انتهای خروجی شرایط مرزی برابر خواهد بود با $Z_D = 1$ لذا خواهیم داشت:

$$1 = n(S_{oe}^{n-1})t_D \Rightarrow S_{oe} = \left(\frac{1}{nt_D}\right)^{\frac{1}{n-1}}$$

بنابراین:

$$R = Z \left[1 - \frac{n-1}{n} \left(\frac{Z}{nT}\right)^{\frac{1}{n-1}} \right]$$

$$\left(\frac{Z}{nT}\right)^{\frac{1}{n-1}} \left[1 - (1-M)Z \frac{dZ}{dT} \right] - 1 + Z = 0$$

لذا با استفاده از حل معادلات دیفرانسیلی فوق با روش عددی و با بهره گیری از روش رانگ کاتا، با انجام عملیات سعی و خطا می توان بهترین مقدار n را به دست آورد و سپس مقادیر تراوایی نسبی را نیز محاسبه کرد.

نتایج آزمایش های تراوایی نسبی با روش جابجایی (حالت ناپایدار)

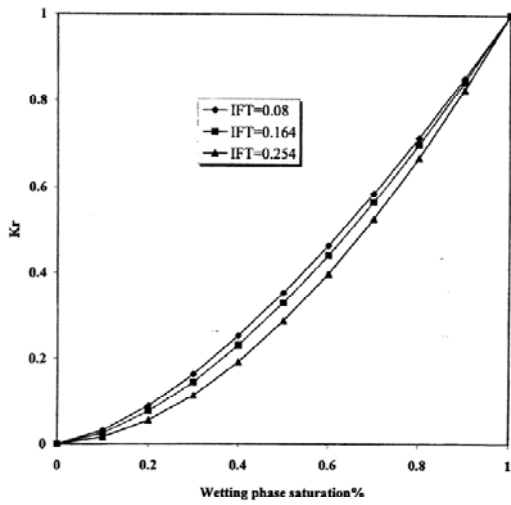
کلیه آزمایش های همانند آزمایش های سانتیفریژ، بدون حضور فاز سوم انجام شد.

داده های نقاط انتهایی در جدول ۵ آمده است.

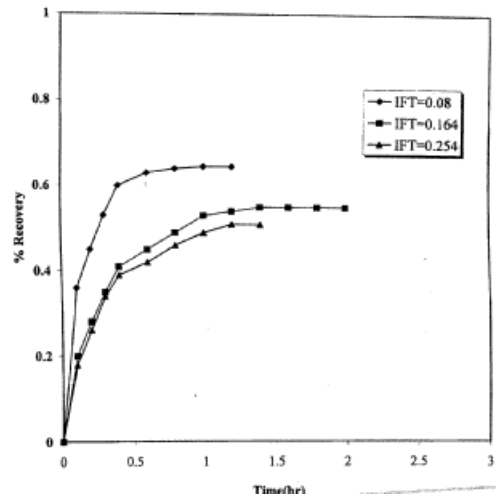
جدول ۵- داده های نقاط انتهایی با استفاده

از آزمایش جابجایی

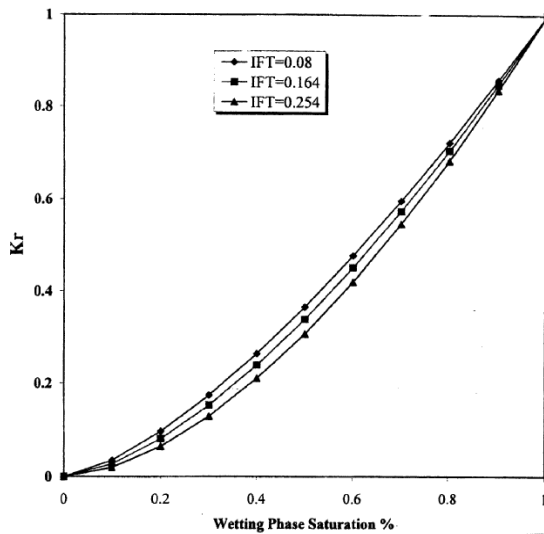
شماره نمونه	۱	۲
کشش میان سطحی	۰/۱۶۴ ۰/۰۸	۰/۱۶۴ ۰/۰۸
کشش میان سطحی	۰/۲۵۴	۰/۲۵۴
اشباع آب باقیمانده	۱۰ ۷	۴ ۷/۵
نقاط انتهایی برای فاز لوتیدین	۰/۸۷ ۰/۹	۰/۹۲ ۰/۹۵
فاز لوتیدین	-	۰/۸



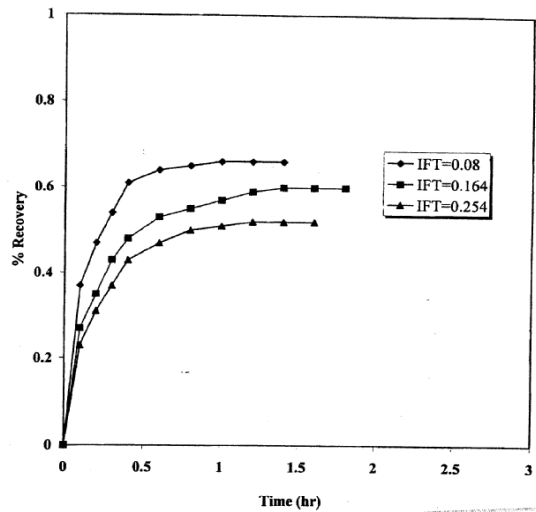
نمودار ۳- اثر کشش میان سطحی بر منحنی های تراوایی نسبی-نمونه شماره ۱ (روش سانتریفیوژ)



نمودار ۱- اثر کشش میان سطحی بر منحنی های تولید-نمونه شماره ۱



نمودار ۴- اثر کشش میان سطحی بر منحنی های تراوایی نسبی-نمونه شماره ۲ (روش سانتریفیوژ)



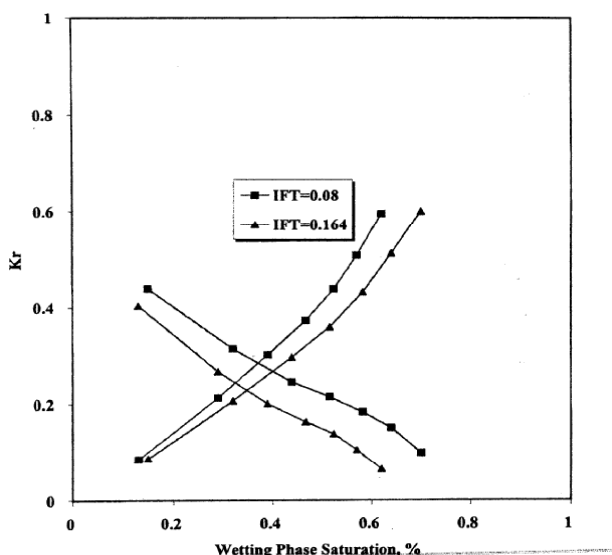
نمودار ۲- اثر کشش میان سطحی بر منحنی های تولید-نمونه شماره ۲

بحث و نتیجه گیری

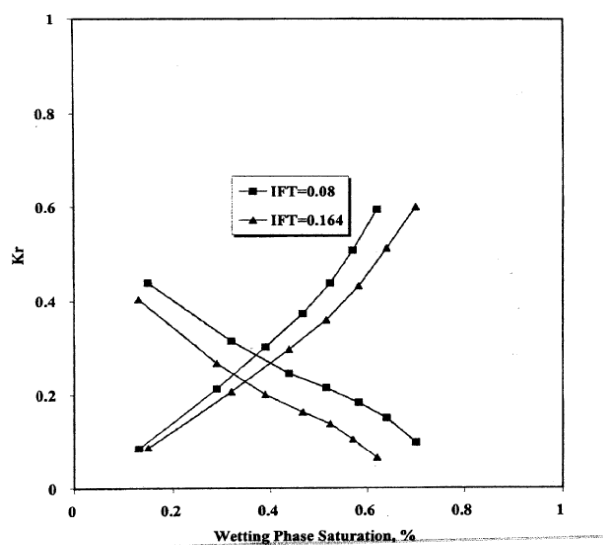
در این مطالعه اثر کشش میان سطحی بر منحنی های تراوایی نسبی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. لذا به منظور شبیه سازی فرایند ریزش ثقلی، آزمایش های متعددی با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ که قابلیت اعمال دما را نیز دارد با مقادیر مختلف کشش میان سطحی انجام گرفت. همچنین به منظور مقایسه و نیز یافتن مقادیر منحنی های تراوایی نسبی به روش جابجایی غیر یکنواخت، آزمایش هایی انجام گرفت که مطابقت خوبی بین این نتایج و نتایج حاصل از سانتریفیوژ به دست آمد.

با استفاده از داده های آزمایشگاهی، منحنی های تراوایی نسبی برای مقادیر مختلف کشش میان سطحی به دست آمده مقایسه این منحنی ها موید تاثیر قابل توجه کشش میان سطحی بر راندمان جابجایی سیال و نیز مقادیر تراوایی نسبی است. با کاهش کشش میان سطحی تراوایی نسبی فازها افزایش و مقدار مایع پسماند در سنگ کاهش می یابد. همچنین منحنی های تراوایی نسبی با کاهش کشش میان سطحی تمایل به خطی شدن داشته و در نهایت به صورت قطری می شوند. در این شرایط مقدار تولید و راندمان جابجایی به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. این میزان در نمونه های مختلف سنگ با مشخصات فیزیکی مختلف، متفاوت بوده ولی روند تغییرات یکسان می باشد.

همچنین به منظور اطمینان از تکرار پذیری نتایج، آزمایش ها بر روی چند نمونه از سنگ مخزن با تراوایی های مختلف و با استفاده از چند سیال با کشش سطحی های مختلف و در دماهای ۳۴/۱، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد انجام گرفت. نتایج حاصل موید صحت نتایج بوده و تکرار پذیر بودن آنها را نشان می دهد.



نمودار ۵- اثر کشش میان سطحی بر منحنی های تراوایی نسبی - نمونه شماره ۱ (روش جابجایی)



نمودار ۶- اثر کشش میان سطحی بر منحنی های تراوایی نسبی - نمونه شماره ۲ (روش جابجایی)

منابع

- [1] Katz, D.L.: "Possibilities of Secondary Recovery for the Oklahoma City Wilcox Sand"
Trans. AIME(1942)146, 28-53.
- [2] Haldorsen, H.H., Rego, C.A., Chang D.M. : "An Evaluation of Prudho Bay Gravity
Drainage Mechanism by Complementary Techniques" paper No. SPE 13651.
- [3] King and Stilles, J.H. : "A Reservoir Study of Hawkins Woodbine field" paper No. SPE
2972.
- [4] Williams, J.K. and Dawe, R.A. : "Near Critical Condensate Fluid Behaviour in Porous
Media-A modeling Approach" SPERE 4 (April 1989).
- [5] Jones, S.C. and Roszelle, W.O. : "Graphical Techniques for Determining Relative
Permeability from Displacement Experiments" JPT, 807, May 1978.
- [6] Amaeful & Handy : "The Effect of Interfacial Tensions on Relative Oil/Water
Permeability of Consolidated Porous Media" SPE, June 1982.