

تأثير CO₂ على عمليات الازاحة في النموذج و النفط المحضرين مخبرياً عند الشروط المشابهة لحقل عليان

د. جورج عبد الأحد م. أحمد سعيد

ملخص البحث

لقد أثبت عملياً أن عامل المردود النفطي لبعض المكامن النفطية الكربونية لا يتعدى (28%) لذلك من الضروري البحث عن طرق أخرى تمكن من استثمار هذه المكامن بأعلى مردود ممكن. يستخدم حالياً في حقل عليان حقن المياه خلف منطقة تماس بهدف المحافظة على الضغط الطبقي إلا أن هذه الطريقة لم تعطِ زيادة ملحوظة في عامل المردود البالغ حالياً (15%) فقط لذلك اختيرت إحدى الطرق الثالثة المستخدمة في عمليات تحسين استعادة النفط و هي استخدام CO₂ في عمليات الازاحة لهذه الدراسة . من أجل ذلك حضر نطف مشابه للنفط الطبقي من حيث اللزوجة والكثافة بإضافة الكيروسين بنسب مختلفة إلى النفط المفصول من إحدى محطات التجميع في الحقل كما تم تشكيل نموذج صخري يحاكي الطبقة المدروسة مكون من الرمل و المارل بنسب مختلفة من كل منهما كما حضر نموذج مائي مالح يحاكي الماء الطبقي. أجريت عمليات الازاحة على النموذج المشبع بالنفط المحضر بواسطة غاز CO₂ بنسب مختلفة منه كما أجريت عملية الازاحة على نموذجين مختلفي الطول بالماء المحضر و الغاز ، كما أجريت عمليات الازاحة الامتزاجية و اللامتزاجية بواسطة الحقن المستمر لـ CO₂ على النموذج الأساسي في هذه الدراسة.

The effect of CO₂ on displacement processes in the model and oil that were prepared in laboratory at such similar conditions to Alian field

Summary

28% , so it is necessary to search for other methods which enable to invest these reservoirs at high recovery factor.

Now in Alian field, water injection is used behind the contact zone to keep the layer pressure, but this method doesn't give a clear increasing to the recovery factor that reaches now (15%) only. For this, CO₂ injection process was chosen as one of thirdly methods which is used in enhanced oil recovery processes that is : using CO₂ in displacement processes of this study.

For this , another oil that was similar to layer oil in viscosity and density was prepared in laboratory by adding kerosene in different ratios to the oil separated from one of field collecting stations .Also, a rocky model was formed that was like the studied layer; it consisted of marl and sand with different ratios from each one of them . And a salty watery model similar to the layer water was prepared.

Displacement processes were done on the model that was saturated by oil prepared by CO₂ in different ratios. And displacement process was done also on two models of different length by prepared water and gas.

Miscibility and immiscibility displacement processes were also done by continuous injection of CO₂ on the basic model of this study.

القسم النظري:

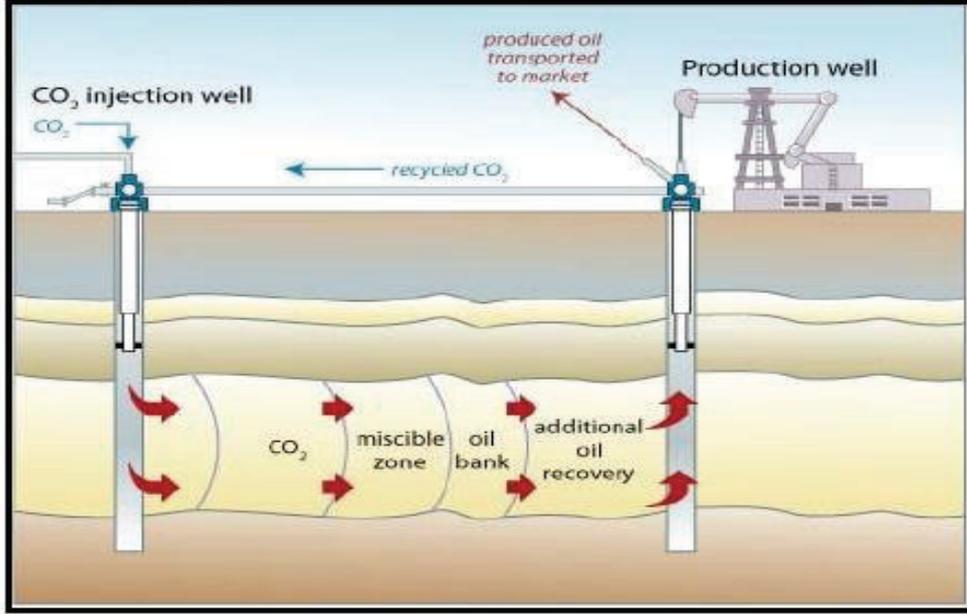
1-1- مقدمة : يتم إنتاج النفط إما بالطرق الأولية أو بالطرق الثانوية أو بالطرق الثالثة المسماة EOR تركز دراستنا على استخدام إحدى الطرق الثالثة في تحسين استعادة النفط EOR ،وهي استخدام غاز CO2 والتي بدأ في استخدامها بين عامي 1970-1980 [1].

1-2- دور الامتزاجية في استعادة النفط :

يستخدم غمر الماء للمحافظة على الضغط الطبقي وينتج عن ذلك نشوء توتر سطحي بين الماء والنفط مع تغير في النسبة الحركية وهذا يحد من كمية النفط المستعادة مما يجعل النفط على شكل قطرات داخل الماء المبلل للمسامات و يؤدي إلى حجزه وجعل الماء يتحرك داخل المسامات المبللة بالنفط مما يقود إلى تشكل الأصابع اللزجة وينتج عن ذلك زيادة نسبة الماء المنتجة إلى النفط و بقاء كميات ضخمة من النفط في الخزان . يمكن التغلب على هذه المشاكل بغمر الخزان بمائع امتزاجي كالغاز الذي يقلل من التوتر السطحي و تجميع الهيدروكربونات في ظروف الخزان . يوضح الشكل (1-1) الاستعادة الامتزاجية بـ CO2 .

1-3-الإزاحة الامتزاجية :

هي امتزاج مائعان بكل النسب بحيث يصبحا طوراً واحداً مثل الكيروسين والبنزين ، أما في الموائع غير الامتزاجية مثل النفط والماء فإنه يوجد على الأقل طوران منفصلان بواسطة سطح مشترك رقيق جداً . إن إزاحة المائع بواسطة مائع آخر غير ممتزج تؤدي إلى تشبع متبقي من السائل المزاح ويكون هذا مناسباً لنشوء توتر سطحي بينهما . يحدث نوعان من الامتزاجية عند استخدام CO2 هما :



الشكل (1-1) الازاحة الامتزاجية بـ CO₂

الامتزاجية عند التماس الأول: تحدث هذه الامتزاجية إذا تشكل طور وحيد عند امتزاج CO₂ مع النفط الخام بكل النسب عند ضغط وحرارة محددة لتحقيق مثل هذه الامتزاجية فإن الضغط يجب أن يكون أكبر من قيمة تسمى الكريكوندينبار ، حيث أن كل مزيج النفط والمذيب فوق هذا الضغط يكون في طور واحد .

الامتزاجية المتعددة التماس (الامتزاجية الديناميكية): تحدث هذه الامتزاجية عندما تكون ظروف الامتزاجية متحسنة في الموقع من خلال تعديل CO₂ والنفط الخام ، وتنتج بواسطة نقل كتلة من العناصر الناتجة من التماس المتعدد بين النفط والمائع المحقون، تحدث عند هذه الامتزاجية ثلاث عمليات : تبخير الغاز ، تكثيف الغاز ، تبخير وتكثيف للغاز . [2]

تتم العملية الأولى عند انتقال الهيدروكربونات الخفيفة والمتوسطة من طور النفط إلى طور غاز CO₂. أما العملية الثانية فتتم عند انتقال الهيدروكربونات الخفيفة و المتوسطة من طور CO₂ الغني بهذه الهيدروكربونات إلى طور النفط . أما العملية الثالثة فتتم عند الانتقال في كلا الاتجاهين ، يستمر نقل الكتلة بين CO₂ والنفط حتى يصبح المزيج غير

مميز في النهاية لخواص المائع . تسبب هذه الآلية استعادة النفط تحت ضغط عال كاف لإنجاز الامتزاجية ، يحتاج CO₂ إلى ضغط عال ليصل إلى الكثافة التي تجعله مذيباً للهيدروكربونات الخفيفة الموجودة في النفط الخام هذا الضغط يعرف بالضغط الإمتزاجي الأصغري الذي يؤدي لحدوث الامتزاجية بين CO₂ والنفط الخام بكل النسب من خلال عملية التماس المتعدد .

يتم استخدام غاز CO₂ في عمليات EOR بطرق مختلفة وأهم الطرق الرئيسية لاستخدامه هي :الحقن المستمر،الحقن الدوري (الحلقي) والمسماة Huff and Puff والحقن المتعاقب لـ CO₂ مع الماء .

عادة ما يبقى ثلثي النفط في الطبقات النفطية بعد تطبيق طرق الإنتاج الأولية و الثانوية على شكل نفط خيطي. [3]

درس الباحثان Melrose and Bradner [4] التشبع بالنفط المشبع كجزء من قوى اللزوجة والقوى الشعرية كما أن النقطة التي تسيطر مع آلية الإزاحة تتغير بين هذه القوى من خلال ربط آلية الإزاحة الميكروسكوبية إلى العدد الشعري وبيننا أن توزع المائع المتبقي في الوسط المسامي المتجانس تابع للقوى الشعرية وأن الاستعادة تتناقص واقترحوا المعادلة التالية :

$$Nca = \frac{Uw \cdot \mu w}{\sigma \omega \cdot \Phi} \quad (1-1)$$

أن النسبة $Uw / \sigma \omega$ تساوي سرعة دارسي Vw ، لزوجة الماء ، ϕ مسامية الوسط .

وجد الباحثان Wagner and Leach [5] أن فعالية الكسح الحجمية تزداد عندما يكون التوتر السطحي أقل من (0.7% mN/m).

أما Gunn and Slattery [6] فقد حددا أن العدد الشعري لاستعادة النفط المتبقي من المسامات هو (2.23×10^{-3}) وبيننا أن تحرك المتبقي يكون أسهل من القنوات المسامية في حالة التبلل المائي أو التبلل الوسطي أكثر من التبلل الصخري بالنفط

وضع الباحثون Erlich, Hasiba and Raimondi [7] معادلة للعدد الشعري تأخذ بعين الاعتبار عدد تابنر والنفوذية المطلقة كما يلي :

$$Nca = \frac{|\Delta p| \cdot k}{\sigma \cdot \Phi} \quad (2-1)$$

حيث أن النسبة $|\Delta p|/\sigma$ تعبر عن عدد تابنر، K نفوذية المطلقة للوسط ، σ التوتر السطحي ، وفي معادلة دارسي فإن العدد الشعري هو النسبة بين سرعة دارسي واللزوجة وبين التوتر السطحي من الموائع كما بحث العديد من العلماء حجز وتجميع قطرات النفط في الفراغات المسامية وبينوا أن الحجز يحدث عند تساوي قوى اللزوجة مع القوى الشعرية أي تحقيق الثباتية الهيدروديناميكية [8]، و العدد الشعري المستخدم للفراغات المسامية هو:

$$Nca = \frac{\Delta p \cdot Xc}{\sigma} \quad (3-1)$$

حيث : Δp هبوط الضغط عبر القنوات الشعرية، Xc عرض الاختناق الشعري . بحث Shyeh-Yung [9] عمليات غمر CO₂ المستمرة وتأثيرها على (EOR) تحت الضغط الإنتاجي الأصغري واستنتج ما يلي :
يزداد التشبع بالنفط المتبقي بشكل خيطي وتتناقص حركية CO₂ بتناقص الضغط .
تزداد عملية الإزاحة الفيزيائية وآليات الاستخلاص مع زيادة الضغط حيث تظهر آلية الإزاحة لتسيطر على العملية عند الحقن الأولي للفراغات المسامية بينما تظهر عمليات الاستخلاص لتسيطر فيما بعد .

3- تكون حركية CO₂ في نظام الامتزازية المتعددة أقل بسبب وجود النفط المتبقي .
استنتج Stern [10] أن التشبع العالي بالنفط المتبقي غالباً ما يكون في الغمر المستمر لـ CO₂ وإن مرور النفط يكون نتيجة لتأثيرات الضغط وعزل المسامات في عمليات الغمر التالية. واستنتج أيضاً أن الامتزازية تتحسن بشكل جيد في المسامات القصيرة نسبياً . عند وجود التبلل المختلط للصخر فإن تأثير إغلاق كتلة الماء يكون قليلاً أما في التبلل

المائي حيث معدلات WAG عالية فإن تأثير إغلاق كتلة الماء يكون كافياً لمنع مرور النفط وهذا يؤدي لانخفاض في استعادة النفط [11].

1-4- القوى الشعرية و اللزوجة :

درس Craig تأثير عزل الجاذبية على دفع الغاز الإمتزاجي واستنتج أن (8%) من المرور يحدث في النظام الخطي وإن إجمالي العزل يؤثر بشكل أكثر مع معدل الحقن الوسطي أكثر منه مع التغيرات في معدلات الحقن [12].
وجد Moore and Slobod [13] أنه عندما تسيطر قوى اللزوجة في عمليات الامتزاج فإن معدل التدفق يكون متناسباً مع مربع نصف قطر القناة . أظهر Stalkup [14] تأثير النسب الحركية إضافة لمعدلات اللزوجة/ الجاذبية على فعالية الإزاحة الحجمية وبيّن أنه عندما تتم السيطرة على معدل اللزوجة/ الجاذبية إلى حد معين مع معدل الجريان عندها يمكن أن يحدد العامل الذي يؤثر على الاستعادة .

1-5- الغمر اللامتزاجي

الغمر اللامتزاجي تقنية في EOR لتحسين استعادة النفط بواسطة وسائل حقن مائع غير ممتزج مع الطور المزاح في هذه الحالة يحدد النفط المزاح والطور المزاح ببعض المواد الكيميائية . لذلك يشير الغمر اللامتزاجي إلى الحقن الكيميائي وأهم المواد الكيميائية المستخدمة فيه : العامل القلوي، مخفضات التوتر السطحي . البوليمر .

القسم العملي

1-1- اختيار وتحضير النموذج الصخري المناسب :

يتم هنا اختيار وتحضير النموذج الصخري المناسب الذي يحقق نفوذية ومسامية موافقة لنفوذية ومسامية الطبقة المنتجة في حقل عليان . وقد استخدم في تحضير النموذج مادتي المارل و الرمل . وقد تم تحضير النموذج الصخري حسب الخطوات التالية :

تنخل المادتين المذكورتين بعد طحنهما، باستخدام جهاز المناخل الهزازة بحيث يتم الحصول على حبيبات متجانسة الأقطار . أقطار فتحات المناخل المستخدمة $(34,43,63,75) \mu\text{m}$.

تحضر مجموعات مختلفة من المادتين المدروستين حسب أقطار المناخل و تؤخذ منهما نسب مختلفة للطور الأساسي والثانوي على شكل خلطات .

يتم إجراء الخلط بشكل جيد و بنفس المدة لكل الخلطات المحضرة ، وبعد ذلك يتم حشو كل خلطة ضمن نموذج معدني اسطواني بطول وقطر محدد من مصنع من الستانلس ستيل ومجهز بمصافي وصمامات عند المدخل والمخرج .

تتم عملية الحشو بشكل منتظم من حيث ميكانيكية وزمن عملية تراص الحبيبات الصخرية وذلك على الشكل التالي :

يتم تجزئة كل خلطة يراد قياس نفوذيتها إلى عدة حجوم متساوية ، ويوضع كل جزء داخل النموذج المعدني الذي يوضع بشكل عمودي باستخدام قمع.

ينقل بعد ذلك النموذج ليوضع عمودياً ويثبت على الصحن الرجّاج لجهاز المناخل الهزازة ، ويشغل الجهاز بواسطة المؤقت الزمني لمدة 15 دقيقة .

يضغط جزء الخلطة الموجود داخل النموذج باستخدام مكبس معدني لعدة مرات متساوية لكل المراحل اللاحقة ثم يعاد ملء النموذج من جديد بحجم جديد من الخلطة المحضرة .

تكرر الخطوتان السابقتان حتى يتم ملء النموذج .

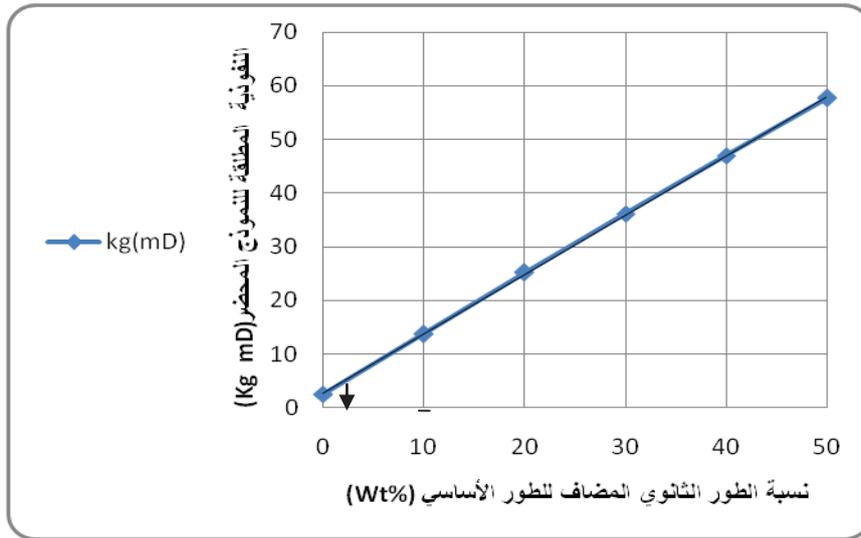
5. بعد إتمام حشو النموذج تقاس نفوذية كل خلطة ضمن كل مجموعة ، وهذا التسلسل من المراحل يتم على كامل الخلطات المحضرة .

6. ترسم العلاقة البيانية بين النفوذية المطلقة Kg والنسبة المئوية الوزنية للرمل المضاف في المجموعة .

7. من تقاطع قيمة النفوذية الوسطية للحقل المدروس مع الدليل البياني المرسوم وبإسقاطه على محور السينات نستطيع تحديد النسبة المطلوبة من المادة المحددة

للحصول على نموذج يعطي النفوذية الموافقة لنفوذية الحقل المدروس وقد تم الحصول على المنحني المبين في الشكل (1-2) .

8. بناءً على قيمة النفوذية المتوسطة لحقل عليان المعتمدة في الحقل وعلى القياسات المخبرية للعينات في مخبر فيزياء الطبقة فإن النفوذية التي اعتمدت في الدراسة هي (4.2mD) وبناءً على ذلك فإن النسب الواجب أخذها من المارل والرمل هي (98) أساسي و(2) ثانوي .



الشكل (1-2) تغير النفوذية المطلقة بالعلاقة مع نسبة الرمل في الخلطة

1-2- تحضير نموذج كيميائي للمياه الطبقيّة :

تم تحضير المياه اللازمة لعمليات الازالة في المخبر بناءً على تركيز شوارد (Ca,Na,Cl) الموجودة في المياه الطبقيّة المستخرجة مع النفط في حقل عليان حيث أن هذه المياه تحتوي على التراكيز التالية للشوارد المعدنية المذكورة:



3-1- تحضير النموذج الطبقي لعمليات الازاحة :

تتم عدة عمليات تحضيرية على النموذج الصخري قبل البدء بعمليات الازاحة تتضمن تفريغ النموذج وإشباعه بالكيروسين حيث توصل المضخة المكبسية مع النموذج حسب المخطط الموضح بالشكل (3-1) وتتم هاتان العمليتان وفق الخطوات التالية :

يغلق الصمامان (X , Y) وتفتح الصمامات (R,Z,Q) .

يفرغ النموذج والخط الواصل مع المضخة عن طريق الوصلة المتصلة مع الصمام (Z) لمدة لا تقل عن ساعة ثم يغلق الصمامان (R,Z) .

يفتح الصمام (X) فينتقل الكيروسين عبر الخط الواصل مع النموذج حتى يصل الكيروسين إلى الصمام (R) .

تؤخذ القراءة على تدرجة الاسطوانة،حيث أن الكيروسين قد ملأ الخط وأصبح عند الصمام السفلي (R) للنموذج والضغط على المقياس هو الضغط الجوي .

يفتح الصمام السفلي للنموذج فيبدأ الكيروسين بالتغلغل في الفراغات المسامية للنموذج الصخري وتستمر هذه العملية إلى أن تتوقف عملية التغلغل عند ذلك يغلق الصمام (X) وتؤخذ القراءة على تدرجة الاسطوانة فيكون الفرق بين القراءتين هو حجم الكيروسين الداخل في هذه المرحلة .

تصفر المسطرة المدرجة الخاصة بالمضخة،ثم يفتح الصمام العلوي للنموذج مع متابعة الإشباع عن طريق حقن الكيروسين بواسطة المكبس ببطء شديد بحيث يبقى الضغط هو الضغط الجوي حتى بدء خروج أول قطرة كيروسين من الصمام العلوي عند ذلك يغلق الصمام العلوي للنموذج و يرفع الضغط فيه حتى القيمة (80 bar) ويغلق الصمام السفلي للنموذج و تؤخذ القراءة على المسطرة ويكون هو حجم الكيروسين الداخل في هذه المرحلة .

7- يضاف حجم الكيروسين في المرحتين إلى بعضهما ويكون الناتج مساوياً لحجم الكيروسين الذي أشبع به النموذج ويساوي إلى حجم الفراغات المسامية له .

1-4- تجفيف النموذج من الكيروسين :

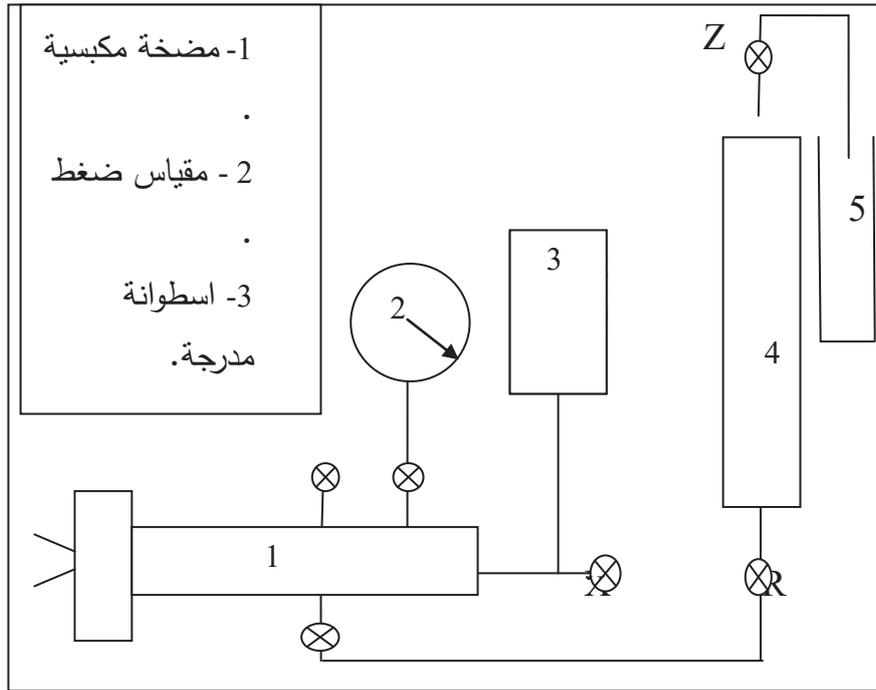
يوضع النموذج شاقولياً ويوصل بمضخة تفريغ عن طريق الصمام السفلي له وتتشغل لمدة من الزمن حتى يتوقف خروج الكيروسين ، بعد ذلك يوضع النموذج في فرن التجفيف لمدة 24 ساعة بهدف تجفيفه بشكل كامل من الكيروسين .

1-5- إشباع النموذج بالمياه لتحقيق المياه المترابطة: تتم عملية الإشباع هذه كما

تم إشباع النموذج بالكيروسين في الفقرة (1-3) مع استبدال الكيروسين بالمياه

1-6- إزاحة المياه من النموذج :

تتم عملية إزاحة المياه من النموذج بواسطة الكيروسين بضغط إزاحة يحدد بناء على النفوذية المطلقة باستخدام الغاز والسائل من خلال منحنى معايرة [15] و كانت قيمة هذا الضغط (400 Psi) .



الشكل (1-3) مخطط إشباع النموذج بالسائل (نפט، ماء، كيروسين)

ويستقبل الماء الخارج بواسطة أنبوب مدرج وتستمر عملية الازاحة لمدة حتى يتوقف خروج المياه و بذلك نتأكد من خروج كامل كمية المياه المتحركة ، يقرأ حجم الماء الخارج ويطرح من حجم الفراغات المسامية فيكون الناتج مساوياً لحجم المياه المتبقية والتي تسمى المياه المترابطة وعادة ما يتم حقن الكيروسين بحجم يساوي ثلاثة أضعاف حجم الفراغات المسامية ثم يجفف النموذج لمدة (24) ساعة.

النتائج :

$$V=F \times L=5.065 \times 75=379.8 \text{ Cm}^3$$

حجم الكيروسين الذي أشبع به النموذج ويساوي إلى حجم الفراغات المسامية له و يساوي

$$V_k=55.17 \text{ Cm}^3$$

المسامية بناءً على عملية الإشباع %14.53

المسامية المتوسطة المعتمدة في الحقل هي %13.3 .

يلاحظ أن الفرق في المسامية المشكلة والمسامية المعتمدة هو %1.23 وهذا الفرق بسيط ويعود إلى تشبع الحبيبات الصخرية المكونة للنموذج بجزء من الكيروسين .

$$V_w=43.85 \text{ Cm}^3$$

$$V_{ws}=55.17-43.65=11.32 \text{ Cm}^3$$

$$S_{wi}=11.32/55.17=20.52\%$$

$$S_{oi}=100-20.52=79.48\%$$

بمقارنة درجة التشبع بالنفط التي حصلنا عليها للنموذج مع متوسط التشبع بالنفط لحقل

عليان و المساوية (78.74) نجد أن الفرق يساوي (0.74) أي بخطأ نسبي هو

$$9.83E-3$$

عليها عن طريق إشباع النموذج بالنفط كأساس للدراسة .

1-7- تحضير النفط بالمواصفات الفيزيائية لحقل عليان - طبقة الماسيف :

تم في المخبر تحضير النفط بنفس الصفات الفيزيائية للنفط الطبقي لحقل عليان الذي

يستخرج من طبقة الماسيف ، وذلك من حيث اللزوجة والكثافة بطريقة المعايرة الوزنية ،

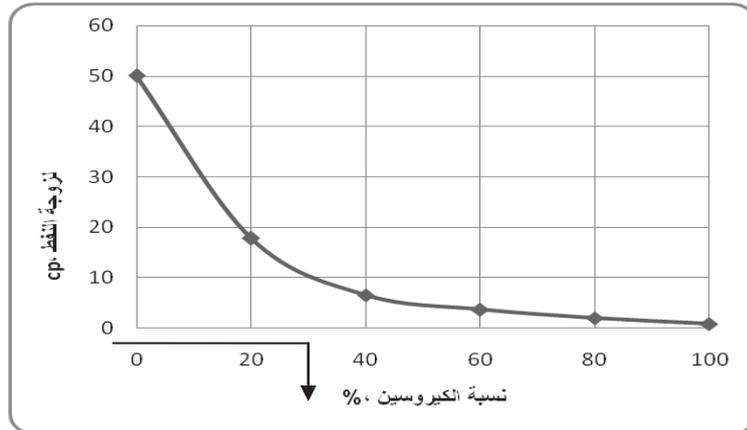
باستخدام الكيروسين لتخفيض لزوجته ، حيث استخدم نפט أخذ من محطة تجميع النفط لحقل عليان .

أضيف الكيروسين بنسب وزنية مختلفة إلى النفط وقيست كل من الكثافة واللزوجة عند درجة حرارة الطبقة البالغة 70 oC والتوتر السطحي للمزيج عند درجة الحرارة 15 oC حتى تم التوصل إلى الكثافة واللزوجة المناسبين ،جدول (1-1) .

الجدول (1-1) نتائج المعايرة الوزنية لتحضير النفط

النوتر السطحي mN /m	كثافة النفط , g/cm3	لزوجة النفط, cp	نسبة الكيروسين %
29	0,9238	50	0
27,9	0,8873	17,75	20
26,9	0,8508	6,5	40
26,4	0,8162	3,67	60
26,1	0,7798	2,01	80
25,8	0,7431	0,87	100

نتيجة لهذا العمل رسمت العلاقة بين لزوجة النفط المحضر ونسبة الكيروسين بحيث نستطيع تحديد نسبة الكيروسين اللازمة المقابلة للزوجة المطلوبة ، وباعتبار أن لزوجة نפט حقل عليان - طبقة الماسيف Cp 8,8 ، لذلك نجد من خلال الشكل (1-4) أن نسبة الكيروسين هي : (33% gr) .



الشكل (1-4) لزوجة النفط المحضر بالعلاقة مع نسبة الكيروسين

1-8- اشباع النموذج بالنفط :

تتم عملية اشباع النموذج بالنفط باستخدام التجهيزات الموضحة بالشكل (1-2) .
اجراءات العمل :

يغلق الصمامان (Y, X) وتفتح الصمامات (R,Z,Q) ويملأ الخزان (2) بالنفط .
يفرغ النموذج والخط الواصل مع المضخة عن طريق الوصلة المتصلة مع الصمام (Z) لمدة لا تقل عن ساعة ثم يغلق هذا الصمام.
يفتح الصمام (X) فينتقل النفط عبر الخط الواصل مع النموذج ويبدأ بالتغلغل داخل النموذج مع مراقبة مستوى النفط في الخزان حتى يتوقف هبوط النفط عند ذلك يغلق الصمام (Q).

يسحب مكبس المضخة للخلف ويتم الانتظار قليلا.

يغلق الصمام (X) ثم يفتح الصمام (Q).

يضغط المكبس للأمام وعند وصول المكبس لنهايته الأمامية يغلق الصمام (Q) ويعاد فتح (X) من جديد .

تكرر الخطوات من 5 حتى 7 لإعادة ملئ قميص المضخة بالنفط من جديد.

يتابع حقن النفط حتى يرتفع الضغط في النموذج إلى (80bar) فيكون النموذج قد أشبع تماماً بالنفط وبذلك يصبح النموذج جاهز لوصلة مع محطة الإزاحة من خلال الصمام (Y) وإجراء تجارب الإزاحة عليه .

1-9- تجهيز المحطة لتجارب الإزاحة وآلية العمل عليها:

يوضح الشكل (1-5) مخططاً توضيحياً لمحطة الحقن المصنعة محلياً التي استخدمت في أثناء العمل المخبري .

آلية العمل على المحطة :

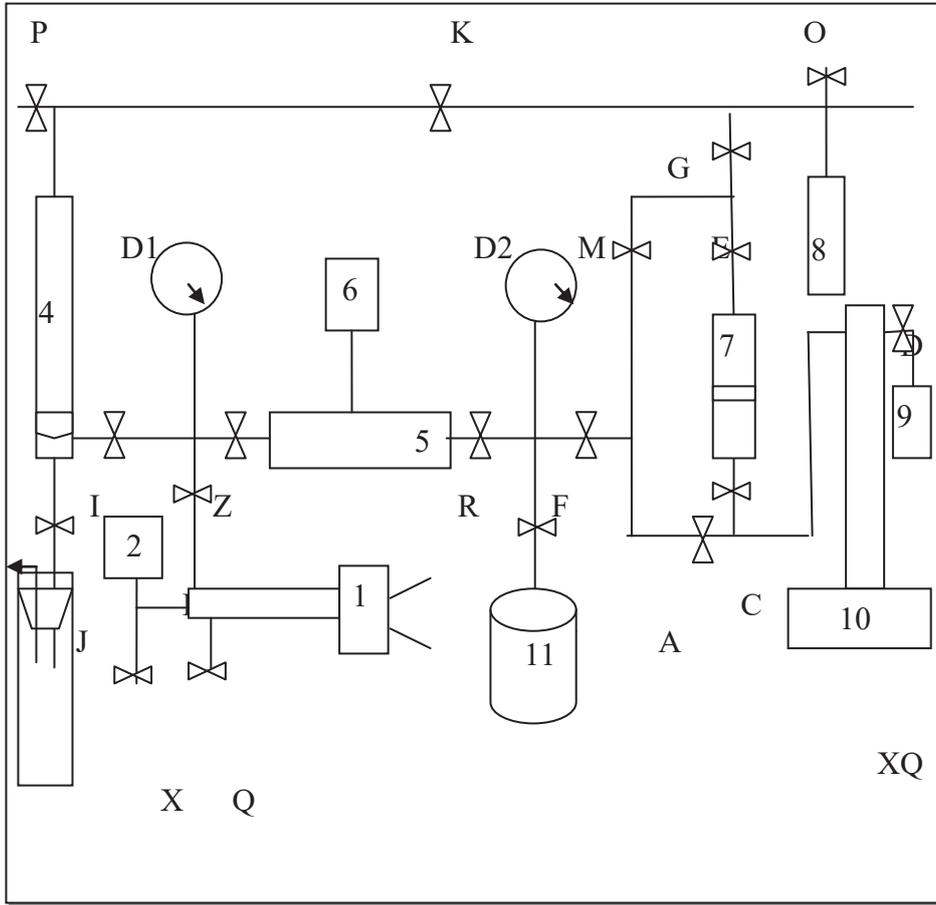
يوضع النموذج في مكانه ضمن جهاز رفع الحرارة.

2- يوصل حساس الحرارة (Sensor) ليلاصق النموذج .

3- تملأ اسطوانة الضغط المعاكس الخلفية (4) بالنفط كما يلي :

تغلق الصمامات (Z, X, Q) ويفتح الصمامان (L, I) و توصل مضخة تفريغ مع الصمام (J) و تشغل لمدة من الزمن ثم يغلق هذا الصمام وتوقف المضخة .
يفتح الصمام (X) فيتحرك النفط المحضر والموجود في الخزان (2) ليملاً الخط بين الصمام (Z) والاسطوانة (4) .
يسحب مكبس المضخة للخلف ويغلق الصمام (X).
يدفع المكبس للأمام حتى يصل النفط إلى أسفل الصمام الإبري بالاسطوانة (4).
تكرر عملية سحب المكبس ودفعه حتى يتم حقن (3) أضعاف حجم قميص المضخة من النفط وعند الانتهاء يغلق الصمام (L).
4- يفتح الصمام (K) ليرتفع الضغط حتى ضغط اسطوانة الهواء (8).
5- تملأ الاسطوانة (7) بالمادة الفعالة المراد حقنها وكذلك بالماء المزيج (المادة الفعالة أعلى المكبس والماء أسفل المكبس). حيث تملأ الاسطوانة من الأسفل لرفع المكبس إلى أعلى الاسطوانة (7) حسب التسلسل التالي:
تغلق الصمامات (D, G, R) وتفتح الصمامات (A, C, E, M, F, N) . وتوصل مضخة تفريغ مع الصمام (N) وتشغل لمدة من الزمن ثم يغلق هذا الصمام والصمام (M) وتوقف المضخة .يفتح الصمام (D) فيتحرك الماء الموجود في الوعاء (9) ليملاً الخط الواصل مع الصمام (N) .
يضغط على زر إعادة ملئ قميص المضخة (Refill) ثم يغلق الصمام (D) ويعطى أمر Run وهو بدء حقن الماء المسحوب أسفل مكبس الاسطوانة (7) .
تكرر العملية السابقة حتى يتم حقن (300 Cm³) ثم يغلق الصمام (C).
6- إملاء الاسطوانة (7) من الأعلى بالمادة الفعالة المراد حقنها ويتم حسب التسلسل التالي:
تفتح الصمامات (M, N, D) ثم يفتح الصمام (G) ببطء لطرد الماء من الخط وإنزال المكبس في الاسطوانة ثم يغلق الصمامان (G, D) وتوصل مضخة تفريغ مع الصمام (N) وتشغل لمدة من الزمن ثم يغلق هذا الصمام.

يفتح الصمام (D) فتتحرك المادة الفعالة الموجودة في الوعاء (9) لتملأ الخط الواصل مع الصمام (N) وأعلى الاسطوانة (7) .
يضغط على زر إعادة ملئ قميص المضخة (Refill) ثم يغلق الصمام (D) و يعطى أمر Run وهو بدء حقن الماء المسحوب أعلى مكبس الاسطوانة (7) .
تكرر العملية السابقة حتى يتم حقن الحجم المراد إملاء الاسطوانة به ثم يغلق الصمامان (A,F) .



الشكل (5-1) مخطط محطة الحقن

- 7- تضبط حرارة النموذج على القيمة (70 C) (درجة حرارة الحقل المدروس) باستخدام جهاز تحكم بدرجة الحرارة موصول مع السخان الكهربائي ضمن جهاز رفع الحرارة وتفتح الصمامات (Z,R,N) وتستمر عملية التسخين حتى تصل درجة حرارة النموذج إلى حرارة الطبقة ويغلق عند ذلك الصمام (N).
- 8- يفتح الصمام (K) ليرتفع الضغط حتى ضغط اسطوانة الهواء (8).
- 9- يرفع الضغط داخل الاسطوانة (4) حتى يصبح مساويا للضغط الطبقي (159 atm) من خلال المضخة المكبسية أو من خلال الصمام (K)، وتقرأ قيمته على المقياس اليساري الكبير للضغط (D1) ثم يغلق الصمام (L) الذي يبقى مغلقاً طيلة فترة التجربة وهنا ينتظر فترة من الزمن حتى يصبح الضغط على مدخل النموذج و مخرجها واحداً ويلاحظ ذلك من خلال ثبات الضغط على المقياس (D2) .
- 10- يفتح الصمام (P) لتنفيس الضغط الزائد.
- 11- يفتح الصمام (C) ويرفع الضغط في الاسطوانة (7) حتى قيمة أعلى من الضغط الطبقي بقليل ثم يفتح الصمام (F) والصمام (N) ببطء بحيث يتم غسل الجزء المحصور بين الصمامين (N,R) من النفط مع المحافظة على الضغط الطبقي ثابتاً ، وبعد خروج الماء من الصمام (N) يغلق هذا الصمام ويكون الضغط في هذه الحالة متساوياً على مدخل النموذج ومخرجه ويلاحظ ذلك على المقياسين D1,D2 .
- 12- يفتح الصمام (J) بسرعة لتسريب الكمية الإضافية من النفط في اسطوانة الضغط المعاكس (4) بحيث تغلق إبرة الصمام تلقائياً، وبعد انتهاء خروج النفط يوضع أنبوب اختبار مدرج تحته، ويتم التحكم بسرعة خروج السائل من خلال قيمة فرق الضغط بين مدخل النموذج و مخرجه .
- 13- تؤخذ القراءة على مضخة الحقن الكهربائية وتبدأ عملية الحقن للمادة الفعالة (المادة المزيجية) وتستمر التجربة حتى يتم حقن (2.5) مرة من حجم الفراغات المسامية للنموذج .

ملاحظات :

عند حساب كمية النفط الحقيقية الخارجة من النموذج يطرح حجم معين من هذه الكمية و المساوية للحجم الميت بين نهاية النموذج (الصمام Z) و الصمام (J) حيث يكون هذا الحجم مملوءاً بالنفط قبل بدء التجربة .

عند الإزاحة بالمياه المعالجة بمادة معينة بنسبة معينة من حجم الفراغات المسامية تملأ الاسطوانة (7) بهذه المياه وبعد حقن النسبة المطلوبة يغلق الصمام (R) و يتم التخلص من الكمية المتبقية من خلال الصمام (N) حيث يرفع المكبس في تلك الاسطوانة حتى تخرج كامل الكمية و تفرغ بمضخة التفريغ ثم يعاد المكبس للأسفل من خلال الصمام (G) بعد اغلاق الصمام (N) ويفرغ هذا الجزء من خلال الصمام (N) ويملاً بالماء النقي ويغسل الخط على مدخل العينات ثم يغلق هذا الصمام وتتابع عملية الازاحة بالمياه غير المعالجة.

عند استخدام غاز CO₂ كمادة مزيحة تملأ الاسطوانة (7) بالغاز ثم يحول إلى سائل تحت الضغط عند حرارة الجو ، وتحقق النسبة المطلوبة منه ثم تعاد الخطوة (2).

10-1- النتائج المخبرية للمواد المحقونة :

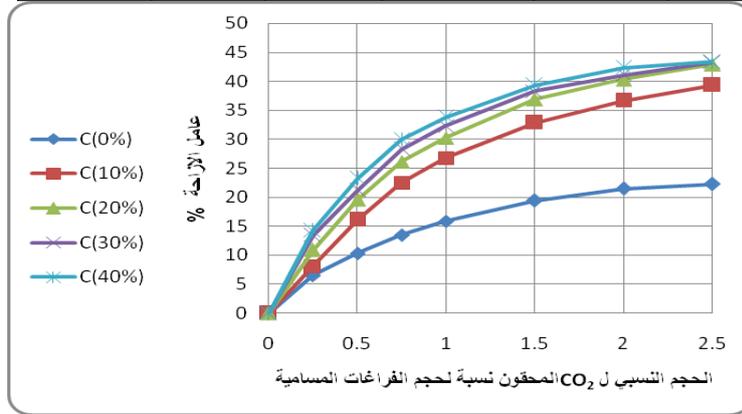
1-10-1- نتائج حقن غاز CO₂ بنسب مختلفة:

تمت عملية الازاحة بحقن دفعة من CO₂ بنسب مختلفة من حجم الفراغات المسامية ثم الماء عند ضغط 2261 Psi (الضغط الطبقي الحالي في الحقل) وقد كانت النتائج مبينة كما في الجدول (2-1) والشكل (6-1):

الجدول (2-1) نتائج حقن CO₂ مع الماء

الحجم النسبي لـ CO ₂ المحقون	نسبة CO ₂ المحقون إلى حجم الفراغات المسامية %				
	0	10	20	30	40
0	0	0	0	0	0
0.25	6.52	8.12	10.91	13.41	14.24

0.5	10.34	16.09	19.56	21.18	23.19
0.75	13.52	22.51	26.13	28.25	29.89
1	15.84	26.75	30.26	32.28	33.75
1.5	19.41	32.81	36.87	38.31	39.35
2	21.47	36.65	40.31	41.08	42.32
2.5	22.23	39.34	42.89	43.27	43.32



الشكل (1-6) عامل الازاحة بالعلاقة مع الحجم النسبي للحقن عند كافة النسب
لـ CO_2

1-10-2- نتائج حقن الماء والغاز في نموذجين مختلفين طولاً :

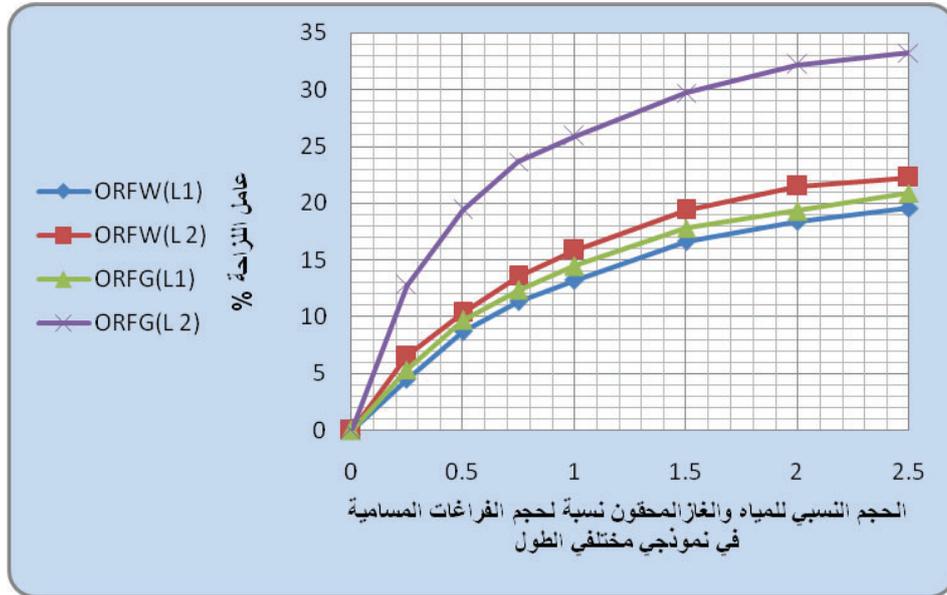
تمت عملية الازاحة بحقن الماء والغاز بطريقة الازاحة الامتزاجية عند الضغط الطبقي الحالي للحقل في نموذجين مختلفين طولاً بهدف معرفة تأثير عامل الطول على عامل الازاحة وقد كانت النتائج مبينة كما في الجدول (1-3) والشكل (1-7):

الجدول (1-3) نتائج حقن الماء في نموذجين مختلفي الطول

الحجم النسبي للماء والغاز المحقون	عامل الازاحة بالماء و الغاز عند طولين مختلفين للنموذج			
	ROFg	ROFg	ROFw	ROFw
	(L1=6 cm)	(L2=70 cm)	(L1=6 cm)	(L2=70 cm)

تأثير المحضرين مخبرياً عند الشروط المشابهة لحقل عليان CO₂ على عمليات الازاحة في النموذج و النفط

0	0	0	0	0
0.25	5.32	12.76	4.52	6.52
0.5	9.67	19.38	8.67	10.34
0.75	12.35	23.63	11.34	13.52
1	14.46	25.87	13.21	15.84
1.5	17.78	29.71	16.63	19.41
2	19.31	32.16	18.41	21.47
2.5	20.89	33.23	19.57	22.23



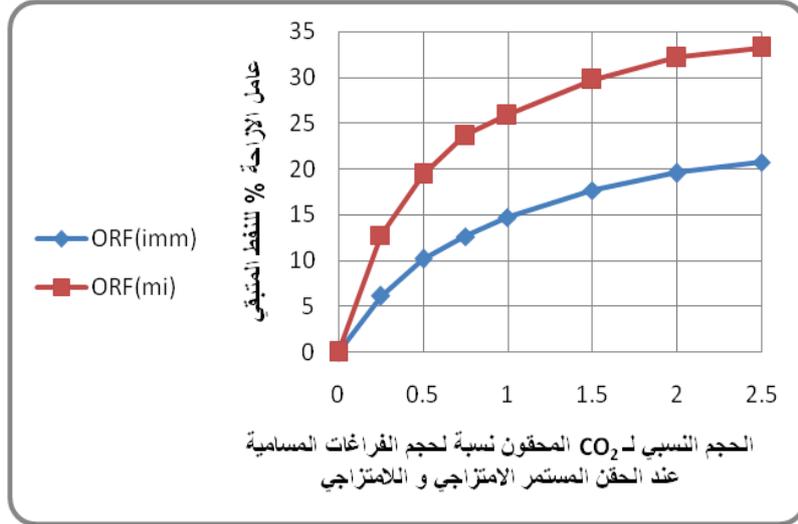
الشكل (7-1) عامل الازاحة بواسطة الماء والغاز بالعلاقة مع الحجم النسبي للمياه والغاز المحقون من أجل أطوال مختلفة للنموذج الطبقي

1-10-3- نتائج الحقن المستمر لـ CO₂ الإمتزاجي واللامتزاجي:

تمت عملية الحقن المستمر بـ CO₂ بعملية الازاحة الامتزاجية عند ضغط 2261 Psi واللامتزاجية عند ضغط (500 Psi) وهو أقل ضغط لا يتم عنده الامتزاج مع النفط على النموذج المعتمد (L=70 cm) بعد الازاحة بالمياه وكانت نتائج الازاحتين كما في الجدول (4-1) والشكل (8-1) .

الجدول (4-1) نتائج حقن CO₂ المستمر الإمتزاجي واللامتزاجي

الحجم النسبي CO ₂ المحقون	عامل الازاحة بالحقن المستمر لغاز CO ₂ عند الازاحة الامتزاجية واللامتزاجية للنموذج المعتمد	
	ORF(imm)	ORF(mi)
0	0	0
0.25	6.12	12.76
0.5	10.17	19.38
0.75	12.65	23.63
1	14.72	25.87
1.5	17.64	29.71
2	19.58	32.16
2.5	20.71	33.23



الشكل (8-1) عامل الازاحة عند الحقن المستمر الإمتزاجي واللامتزاجي لـ CO₂

النتائج:

يلاحظ من الشكل (1-5) زيادة عامل الازاحة مع زيادة نسبة CO₂ المحقونة حتى النسبة 20% من حجم الفراغات المسامية (عامل الازاحة 42.89%) وبعد ذلك نجد أن الزيادة تصبح صغيرة جداً مع زيادة نسبة غاز CO₂ المحقون ، ويمكن تفسير ذلك بأن زيادة كمية CO₂ المحقونة يمكن أن تؤدي إلى ظاهرة العبور ، حيث يحدث جريان للغاز فقط دون التأثير على جريان النفط ، وبالتالي لن يؤدي إلى زيادة ملحوظة في عامل الازاحة.

عامل الازاحة في النموذج الطويل أفضل منه في النموذج القصير عند حقن الماء والغاز شكل (1-6) ، حيث يزداد حجم القنوات المسامية المشاركة بعمليات الازاحة نتيجة تغلغل كل من الماء والغاز في تلك القنوات (الماء في الجزء السفلي للنموذج والغاز في الجزء العلوي) وعدم حدوث هذه المشاركة في النموذج القصير بسبب حادثة العبور الناتجة عن صغر قيمة اللزوجة والكثافة لكل من الماء والغاز مقارنة مع النفط ، كما يلاحظ أن عامل الازاحة عند استخدام الغاز أفضل منه عند استخدام الماء وهذا يعود لصغر قيمة نفوذية الصخر، حيث يستطيع الغاز التغلغل ضمن تلك القنوات الضيقة والعمل على إزاحة النفط منها على العكس من الماء ذي اللزوجة العالية مقارنة مع الغاز.

عامل الازاحة في الغمر الإمتزاجي أفضل منه في الغمر اللامتزاجي شكل(1-7) ويعود ذلك للتأثير الايجابي لـ CO2 الذي امتزج مع النفط على خواص النفط من حيث تقليل اللزوجة و زيادة حجمه الناتج عن انحلال الغاز فيه .

يعطي الغمر الإمتزاجي المستمر لـ CO2 عامل إزاحة جيداً (33.23) في عمليات الازاحة إلا أن كمية CO2 الكبيرة والمستخدمه في عمليات الازاحة تجعله غير اقتصادياً .

يلاحظ من منحنيات الازاحة عند حقن CO2 و الماء شكل(1-5) ثباتية في المنحني عند النسب العاليه للحقن النسبي للسوائل الكلية وهذا يعود إلى قيام غاز CO2 بدوره في إزاحة النفط من النموذج عند المرحلة الأولى من الحقن مما يؤكد دوره الايجابي الكبير في ذلك من حيث تأثيره على خواص النفط كما ذكر سابقاً وتحسين ظروف انفصاله عن سطح الصخر من خلال تشكيل مواد مخفضة للتوتر السطحي غير ثابتة عند جبهة الازاحة .

كما ذكر في السلوك الطوري تحدث عمليات الانتقال المتبادل بين طوري النفط وغاز CO2 ، ففي عملية دفع غاز التبخير تتم عملية نقل كتلة من المركبات الهيدروكربونية الخفيفة التي تتبع بمركبات هيدروكربونية ثقيلة من النفط إلى طور CO2 الذي أصبح أكثر غنى بالهيدروكربونات الفعالة ليصبح ممتزجاً بشكل كلي بالنفط ، أما في عملية دفع غاز التكثيف تحدث عملية نقل المركبات الهيدروكربونية الخفيفة من الهيدروكربونية الخفيفة التي تغني غاز CO2 إلى داخل طور النفط ليصبح أكثر غنى بالهيدروكربونية الخفيفة ، أما في عملية دفع غاز التبخير و التكثيف فيحدث نقل الكتل بين الطورين مما يجعل النفط أكثر غنى بالمركبات المتوسطة ، إن هذه العمليات تعمل على دفع النفط وجعله أكثر سهولة للحركة باتجاه مخرج النموذج (باتجاه آبار الإنتاج) .

إن التأثير الايجابي لغاز CO2 على عملية الاستعادة والمتمثل بانتفاخ النفط وتخفيض كل من اللزوجة والتوتر السطحي الذي يجعل النفط يغير شكله ويتحرك داخل الفراغات المسامية بشكل أسهل واستخلاص المركبات الخفيفة كل هذا أدى إلى زيادة تشبع

تأثير المحضرين مخبرياً عند الشروط المشابهة لحقل عليان CO₂ على عمليات الازاحة في النموذج و النفط

الفراغات المسامية بالنفط وخلق جبهة نفطية أكثر حركية مسببة لزيادة عامل الازاحة في عمليات الازاحة المخبرية التي تمت.

المراجع :

- 1- Brock, W.R. and Bryan, L.A.: "Summary Results of CO₂ EOR Field Tests,1972-1987," paper SPE 18977 presented at the 1989 SPE Joint Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium and Exhibition, Denver, CO, March 6-8.
- 2-Zick, A.A.: "A Combined Condensing and vaporizing Mechanism in the Displacement of Oil by Enriched Gases," paper SPE 15493 presented at the 1986 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, October 5-8.
- 3-Vello, Kuuskraa, and Robert, Ferguson. :Advanced Resources International, national Energy Technology Laboratory Storing CO₂ with Enhanced Oil Recovery DOE/NETL-402/1312/02-07-08 February 7, 2008 .
- 4- Melrose, J.C. and Bradner, C.F.: "Role of Capillary Forces in Determining Microscopic Displacement Efficiency for Oil Recovery by Waterflooding," Journal of Canadian Petroleum Technology (October-December 1974), 54-62.
- 5- Wagner, O.R. and Leach, R.O.: "Effect of Interfacial Tension on Displacement Efficiency," paper SPE 1564 presented at the 1966 SPE Annual Meeting, Dallas, TX, October 2-5.
- 6- Gunn, S.O. and Slattery, J.C: "Interfacial Tension Required for Significant Displacement of Residual Oil," paper SPE 5992, SPEJ (April 1979) 83-95.
- 7- Erlich, R., Hasiba, H.H. and Raimondi, P.: "Alkaline Waterflooding for Wettability Alteration - Evaluating a Potential Field Application," paper SPE 4905 presented at the 1974 SPE Annual California Regional Meeting, San Francisco, CA, April 4-5.

- 8- Arriola, A., Willhite, G.P. and Green, D.W.: "Trapping of Oil Drops in a Noncircular Pore Throat," paper SPE 9404 presented at the 1980 SPEAIME Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX, September 21-24.
- 9- Shyeh-Yung, J-G.J.: "Mechanisms of Miscible Oil Recovery: Effects of Pressure on Miscible and Near-Miscible Displacements of Oil by Carbon Dioxide," paper SPE 22651 presented at the 1991 SPE Annual Conference and Exhibition, Dallas, TX, October 6-9.
- 10- Stern, D.: "Mechanisms of Miscible Oil Recovery: Effects of Pore-Level Fluid Distribution," paper SPE 22652 presented at the 1991 SPE Annual Conference and Exhibition, Dallas, TX, October 6-9.
- 11- Green, D.W. and Willhite, G.P.: *Enhanced Oil Recovery*, SPE, Richardson, TX, 1998.
- 12- Craig, F.F. Jr. et al.: "A Laboratory Study of Gravity Segregation in Frontal Drives," Trans., AIME (1957) 210, 275-282.
- 13- Moore, T.F. and Slobod, R.C: "The Effect of Viscosity and Capillarity on the Displacement of Oil by Water," Producers Monthly (August 1956) 20-30.
- 14- Crane, F.E., Kendall, H.A. and Gardner, G.H.F.: "Some Experiments of the Flow of Miscible Fluids of Unequal Density Through Porous Media," SPEJ (December 1963) 277-80.

15- د. عبد الأحد، جورج. ود. نوفل، عماد 1996-1997 - فيزياء الطبقة النفطية و الغازية (1) القسم العملي، الطبعة الثانية ، منشورات جامعة البعث.