

## تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الإزاحة في حقل سازابا النفطي

د.م. عماد سليمان نوفل\*

م. أيمن أحمد شقوف\*\*

### ملخص البحث

حقن غاز ثاني أكسيد الكربون كطريقة من طرق الاستثمار المدعم للنفط يتم التفكير بها حالياً لحقل سازابا ، حيث يبلغ الاحتياطي الجيولوجي لهذا الحقل /٢٥٣,٦/ مليون متر مكعب من النفط والاحتياطي القابل للإنتاج /١٧,٧٥/ مليون متر مكعب من النفط وبمردود حالي مقداره %/3.43 فقط ، النفط المنتج من هذا الحقل هو من النوع الثقيل واللزج، تتراوح كثافته بين /١٢-١٥/ بدرجة الجودة الأمريكية (API °) ولزوجته /٣٠/ سنتي بواز .

تصبح إزاحة النفط بالغاز فعالة جداً عندما تقترب خصائص الغاز والنفط المزاح من بعضها لتصبح متماثلة، أي عندما يحقق الطورين امتزاجية كاملة.

يعتبر ضغط الامتزاج الأصغري أقل ضغط تحصل عنده الامتزاجية بين الطورين

لهذا فان تحديده ضروري جداً في عمليات حقن الغاز.

إن اختبار الأنبوب البسيط لتحديد ضغط الامتزاج الأصغري، هو احد التقنيات المستخدمة على نطاق واسع، ومقبولة جداً، في الصناعة النفطية ويعطي النتائج الأكثر موثوقية، لهذا تعتبر الطريقة الأساسية المعتمدة لتحديد قيمة ضغط الامتزاج الأصغري.

تعتبر العلاقات التجريبية لتحديد ضغط الامتزاج الأصغري سريعة ومنخفضة التكلفة إذا ما قورنت بطريقة اختبار الأنبوب البسيط التي تحتاج إلى إجراء ستة إزاحات عند ستة ضغوط مختلفة، والزمّن المطلوب لأداء إزاحة واحدة هو أكثر من ٨ ساعات عمل، وهذا يعني أننا نحتاج إلى أسبوع كامل من العمل التجريبي لقياس قيمة واحد لضغط الامتزاج الأصغري

\* الوكيل العلمي بكلية الهندسة الكيميائية والبترولية - جامعة البعث

\*\* طالب دكتوراه و مهندس في الشركة السورية لنقل النفط - رئيس محطة تل البيضا لضخ النفط

## **Determination of Minimum Miscibility Pressure at carbon dioxide injection for increase of the oil recovery Factor in sazaba-field**

### **Abstract**

carbon dioxide Gas injection as an Enhanced oil recovery method is being considered for the Sazaba-field, where to attain the geological reserves for the field is 253.6 MMm<sup>3</sup> of oil and recoverable reserves is 17.75 MMm<sup>3</sup> of oil , and actual oil recovery is only of 3.43% , the oil produced of the field is of heavy type and viscid , density's to range between 12-15 °API and viscosity 30 cp,

Is become oil displacement in gas very effective when to approach the gas properties and oil Displaced from the same and they become similar , which when the two phases are achieve of miscibility complete.

The Minimum Miscibility Pressure is consider less pressure and by which the miscibility is achieved, for this, its Determination is very necessary in gas injection processes.

The slim tube test is one of the most widely used techniques and is accepted as a standard means to measure The Minimum Miscibility Pressure in the petroleum industry, for this, that method above consider the essential method for estimate of The Minimum Miscibility Pressure.

The experimentally correlations for estimate of The Minimum Miscibility Pressure is consider as a rapid and low cost method if its compare with using slim tube test , which it is needing to perform six displacements at six different pressures, The time required to perform one displacement is more of 8 h. This means all week of experimental work is necessary to one measure the Minimum Miscibility Pressure.

#### ١- مقدمة:

يقع حقل سزابا النفطي شمال شرق سوريا ويبعد حوالي ٣٥ كم إلى الشرق من مدينة القامشلي على الحدود السورية التركية، اكتشف الحقل عام ١٩٧٥ ووضع بالإنتاج عام ١٩٨٣، تتألف الطبقة المنتجة الشيرانيش من صخور كربوناتية مارلية مسامية-متشققة غير متجانسة بالمواصفات الخزينة بالمقطع والمساحة، والنفط المنتج منها من النوع الثقيل و اللزج.[1]

بدأ القائمون على الصناعة النفطية في أوائل الخمسينات بالتفكير جديا باستخدام الغمر الامتزاجي في عمليات الاستثمار المدعم للنفط ( EOR ) ، وكانت البداية باستخدام البروبان والغاز الطبيعي كمذيبات ، ولكنهم نظروا لهذه العملية بأنها غير مجدية في ذلك الوقت ، بسبب اللزوجة والكثافة المنخفضة لتلك الغازات والتي يمكن أن تؤدي إلى كفاءة كسح حجميه منخفضة، ونتيجة لرفض هذه المذيبات آنذاك ، فقد تم التفكير باستخدام حقن غاز CO<sub>2</sub> في أعمالها.[ 8 ]

كان المشروع الأول لحقن CO<sub>2</sub> في حقل ريتشي (Ritchie) عام ١٩٦٤ وكان مشروعاً صغيراً، والمشروع الأكبر لحقن CO<sub>2</sub> نفذ عام ١٩٧٢، بعده نفذت بنجاح في عدة مناطق من العالم ، في الولايات المتحدة وخاصة في ( Permian Basin )،في كندا، هنغاريا ، تركيا ، ترينيداد ، البرازيل ، ينفذ اليوم حوالي ٧٨ عملية حقن حول العالم لـ CO<sub>2</sub> ، منها سبع وستون عملية في الولايات المتحدة ، اثنتان في كندا ، اثنتان في تركيا ، خمسة في ترينيداد ، واحدة في البرازيل . [9]

هناك أكثر من مئة مشروع EOR باستخدام حقن CO<sub>2</sub> موزعة كما يلي:

خمسة وثمانون مشروعاً في الولايات المتحدة ، ثمانية مشاريع في كندا، ثلاثة مشاريع في هنغاريا ، مشروعان في تركيا ، خمسة مشاريع في ترينيداد ، مشروعاً واحداً في البرازيل.[10]

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الإزاحة في حقل سارابا النفطي

حقن الغاز القابل للامتزاج داخل أي مكمن نفطي، هو من أكثر تقنيات الاستثمار المدعم للنفط استخداما والتي تطبق بشكل واسع في إنتاج النفط بالعالم. تصبح إزاحة النفط بالغاز فعالة جدا عندما تتماثل كلا من خصائص الغاز المزيج والنفط المزاح ، ويحقق الطوران - في هذه الحالة - امتزاجية كاملة بحيث يختفي الحد الفاصل بين السائل والغاز .

تهدف الإزاحة الامتزاجية إلى إزاحة أكبر كمية ممكنة من النفط ، مما يجعل درجة التشبع بالنفط المتبقي بأقل قيمة ممكنة.[4]

يعتبر ضغط الامتزاج الأصغري ( MMP ) المفهوم الهام والمساعد في وصف عمليات حقن الغاز الامتزاجية، وأحد أهم المؤشرات في عملية حقن CO<sub>2</sub> القابل للامتزاج ، والذي عنده يشكل كل من الغاز المحقون والنفط الأولي طور واحد مما يجعل عملية الإزاحة كفوءة.[7]

## ٢- هدف ومبررات إجراء البحث :

يهدف هذا البحث إلى تحديد ضغط الامتزاج الأصغري بالطريق التحليلية لدى حقن CO<sub>2</sub> لزيادة عامل مروود النفط كطريقة من طرق الاستثمار المدعم للنفط .  
تم إجراء عمليات إصلاح وتحسين على آبار حقل سارابا النفطي وكانت النتائج غير مرضية بسبب عدم ازدياد كمية النفط المنتجة بالشكل المأمول منها، حيث كان عدد عمليات التحسين المجراة على آبار الحقل خلال عام ٢٠١٠ هي ٥٢ عملية ومجموع كمية النفط المنتجة بفعلها هي فقط ١٦٣٣٧ م<sup>٣</sup>. [1]

## ٢-١ - الاستثمار المدعم للنفط:

الاستثمار المدعم للنفط EOR كمفهوم انتاج متطور يشمل عملية حقن مواد غير موجودة عادة في المكمن ، لاستخراج كمية النفط المتبقية بعد عمليات الإنتاج الأولية والثانوية، وغير القابلة للاستخراج بالطرق التقليدية.

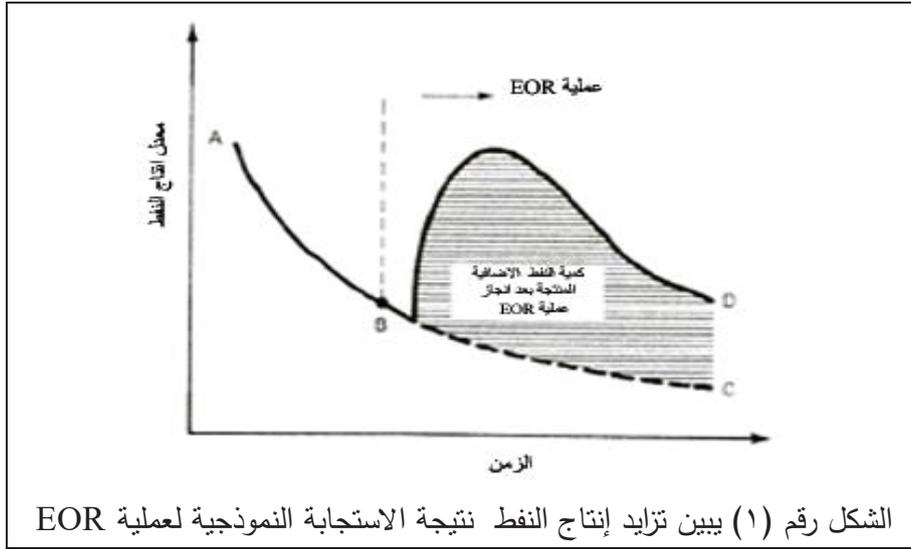
يعتبر حقن CO<sub>2</sub> طريقة من طرق EOR وأكثرها استخداما حول العالم والمقياس التقني العام لنجاح مشروع EOR هو تزايد كمية النفط المستخرجة من المكمن، في

الشكل (١) يهبط معدل إنتاج النفط بدءاً من النقطة A حتى النقطة B، ثم يبدأ مشروع EOR، فتتزايد كمية النفط المنتجة من B إلى D، و لولا انجاز مشروع EOR لكان النفط المستخرج هو من النقطة B إلى النقطة C بذلك تكون المنطقة المظللة على المنحني البياني هي كمية النفط الإضافية المستخرجة بفعل مشروع EOR.[13]

٢٠	المسامية %
٧٠-١	النفوذية ، ميلي دارسي
٣٠	لزوجة النفط ، سنتي بواز
٢٧	السماعة الفعالة ، م
٧٦	درجة التشبع بالنفط %
٧٨	المساحة ، كم <sup>٢</sup>
١٤٢	الضغط الطبقي الأولي ، ضغط جوي
١٢٨,٦	الضغط الطبقي الحالي ، ضغط جوي
٥٦	درجة الحرارة الطبقيّة ، درجة مئوية
٦٠	ضغط الإشباع ، ضغط جوي
١,١٣	عامل حجم النفط
١٥-١٢	الكثافة °API
١٤٠٠	عمق المكنن ، متر
٣٦	نسبة غاز/نفط ، م <sup>٣</sup> / م <sup>٣</sup>
٢٥٣,٦	الاحتياطي الجيولوجي من النفط ، مليون متر مكعب
٠,٠٧٣	الاحتياطي الجيولوجي من الغاز ، مليار متر مكعب
٧	المردود النهائي %
١٧,٧٥	الاحتياطي القابل للإنتاج من النفط ، مليون متر مكعب
٣,٤٣	المردود الحالي %
٩,٠٥٩	الاحتياطي المتبقي القابل للإنتاج من النفط ، مليون متر مكعب

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الازاحة في حقل سازابا النفطي

الجدول رقم (١) يبين الخصائص الجيولوجية والبتروفيزيائية لطبقة الشيرانيش في حقل سازابا. [1]



الشكل رقم (١) يبين تزايد إنتاج النفط نتيجة الاستجابة النموذجية لعملية EOR

٢-١- شروط استخدام طريقة حقن غاز  $CO_2$  :

- ١- يجب أن يكون عمق الطبقات المراد معالجتها بهذه الطريقة تقع على أعماق كافية أكثر من ٦٠٠ متر بحيث يمكن الوصول إلى ضغط الامتزاج الاصغري لغاز  $CO_2$  مع النفط .
- ٢- كثافة النفط اكبر من ٩٠٠ كغ/م<sup>٣</sup>.
- ٣- درجة التشبع بالنفط اكبر من ٢٥%.
- ٤- المسامية اكبر من ١٥%.
- ٥- النفوذية اكبر من ١ ميلي دارسي.
- ٦- عدم تجانس مقبول.
- ٧- عدم وجود قبة غازية وبتركيز عال للغاز الحر.
- ٨- وجود مصدر لغاز  $CO_2$  لايزيد بعده ٧٠٠ كم عن مكان الحقن لتقليل الكلفة الاقتصادية.
- ٩- تأمين عملية تخزين غاز  $CO_2$  لا يؤثر على البيئة.

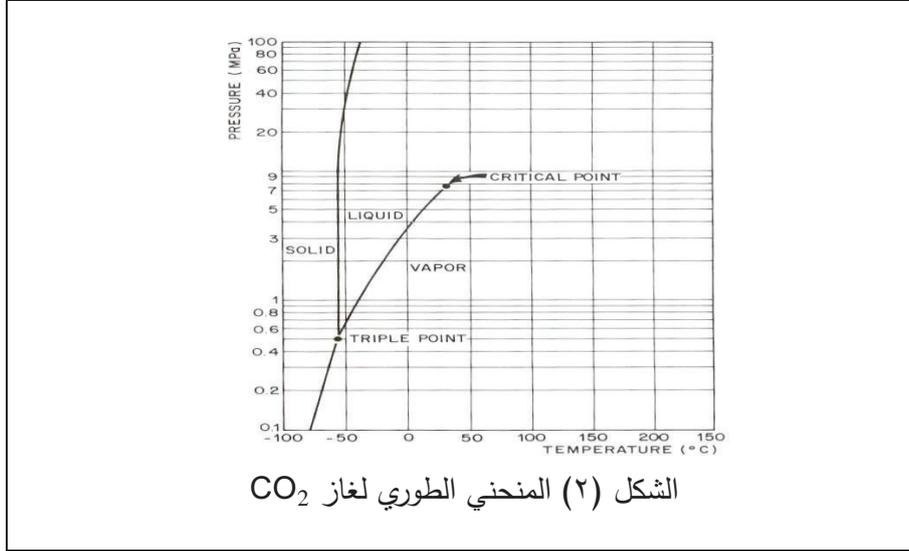
- ١٠٥- تجهيز آبار الحقن وآبار الإنتاج بتجهيزات خاصة لهذه العملية.  
١١- ألا يكون تجهيز وتأمين غاز CO<sub>2</sub> مكلف وغير اقتصادي. [10]

#### ٢-٢- الخصائص العامة النفط الثقيل:

- ١- اللزوجة اكبر من ٣٠ سنتي بواز في شروط المكمن .
  - ٢- ضعيف أو عديم الحركة في شروط المكمن .
  - ٣- لونه داكن.
  - ٤- كثافته بدرجة الجودة الأمريكية (°API) اقل من ٢٠ .
  - ٥- يحتوي نسبة عالية من المواد البارافينية والراتنجية والإسفلتية. [15]
- ٢-٣- خصائص غاز ثاني أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>):

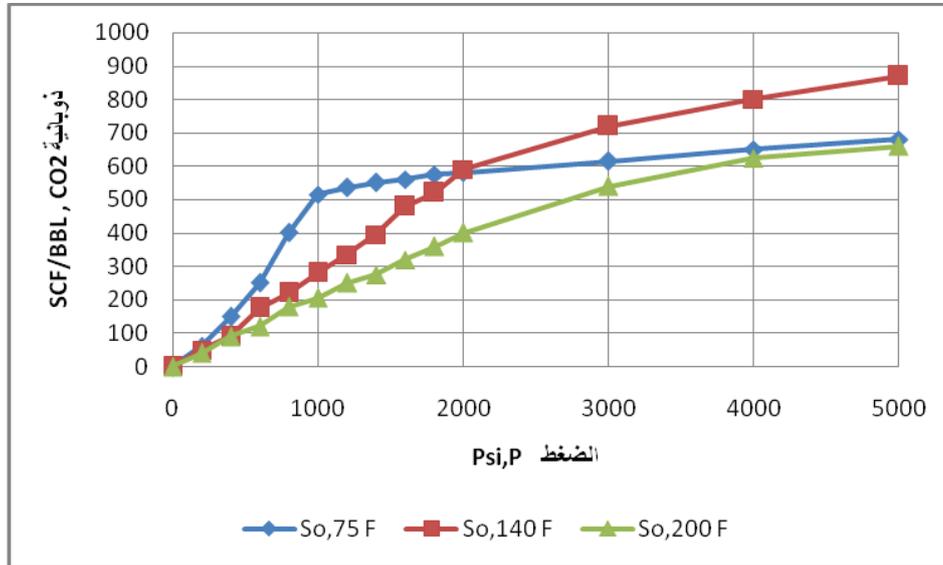
يعتبر غاز ثاني أكسيد الكربون غازاً لا لون له ولا رائحة في الشروط العادية ، ويتحول إلى غاز سام إذا زادت نسبته في الجو عن 10%. ووزنه الجزيئي 44,01g/mole، يعتبر غاز CO<sub>2</sub> غازاً في الشروط العادية ويمكن أن يصبح سائلاً عند ضغوط أعلى من الضغط الحرج (73 Kgf/Cm<sup>2</sup>) وحرارة أقل من 31°C أما إذا احتوى على بعض الغازات الهيدروكربونية فإن هذه الدرجة ترتفع وتصبح 40 °C وتبلغ كثافته النسبية بالنسبة للهواء: 1,529 (للـهواء=١) عند (0 °C) و (1 atm). تبلغ لزوجة CO<sub>2</sub> عند الشروط الحرجة من الضغط ودرجة الحرارة (0.0335cp) وهي تتغير مع تغير الضغط ودرجة الحرارة. [12]

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الإزاحة في حقل سازابا النفطي



٢-٣-١- الخواص الذوبانية لغاز CO<sub>2</sub> في النفط :

يذوب CO<sub>2</sub> بشكل كبير في السوائل الهيدروكربونية ، وقد بنيت الأبحاث والتجارب أن هناك ثلاثة عوامل تتحكم بذوبان CO<sub>2</sub> في النفط وهي الضغط ودرجة الحرارة وتركيب النفط الخام.



الشكل رقم (٣) ذوبانية غاز CO<sub>2</sub> في النفط الخام بدلالة الضغط والحرارة،

تفوق ذوبانية CO<sub>2</sub> في النفط ذوبانيته بالماء ب ٤-١٠ مرات، وتفوق أيضا ذوبانية غاز الميثان ، كما أن ذوبانيته في النفط الخفيف أعلى منها في النفط الثقيل لأن وجود المركبات الثقيلة تعيق عملية الذوبان ، وإن احتواء غاز ثاني أكسيد الكربون لغاز الميثان أو الآزوت يخفض من ذوبانيته في النفط .

وهكذا نجد أن ضغط ذوبان CO<sub>2</sub> في النفط (وهو الضغط اللازم لإذابة كمية معينة من CO<sub>2</sub> في النفط) يتأثر بالعوامل التالية :

أ- يزداد ضغط ذوبان CO<sub>2</sub> في النفط بازدياد درجة الحرارة لأنه بازدياد درجة الحرارة نحتاج إلى ضغط أكبر لذوبان غاز ثاني أكسيد الكربون في النفط .

ب- يتعلق ضغط ذوبان CO<sub>2</sub> بنوعية النفط حيث يكون في النفط الخفيف أقل منه في النفط الثقيل لأن قابلية التغلغل لغاز CO<sub>2</sub> في النفط الخفيف أكبر من النفط الثقيل وبالتالي تكون الذوبانية في النفط الخفيف أسرع منها في النفط الثقيل .

ج- يتعلق ضغط ذوبان غاز CO<sub>2</sub> بوجود الشوائب ونوعيتها فيزداد بازدياد نسبة الميثان (CH<sub>4</sub>) والآزوت (N<sub>2</sub>) في غاز CO<sub>2</sub>.

د- يزداد ضغط ذوبان غاز CO<sub>2</sub> في النفط بازدياد ضغط الإشباع . [2]

طور Lange علاقة لحساب مؤشر قابلية الذوبان للغازات والتي يمكن أن تستخدم لمجال واسع من الغازات والنفوط الخام ودرجات الحرارة والضغط، حيث تعتمد هذه العلاقة على تمثيل الصفات الفيزيائية والكيميائية للنفط الخام والغاز المحقون كما يلي:

$$\begin{aligned}\delta_{gi} &= 0.122 \rho_{ri} \sqrt{p_{ci}} \\ \rho_r &= \rho_i / p_{ci} \quad \dots\dots\dots(1) \\ \delta_{gas} &= \sum_{i=1}^N (v_i \delta_{gi})\end{aligned}$$

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الإزاحة في حقل سارايا النفطي

حيث أن :

$$\rho_{ri} = \text{الكثافة المصغرة للمكون (i) في الغاز المحقون، lb/ft}^3$$

$$P_{ci} = \text{الضغط الحرج للمكون (i) في الغاز المحقون، Psia}$$

$$\bar{\delta}_{gi} = \text{مؤشر قابلية الذوبان للمكون (i) في الغاز المحقون، (cal/cm}^3)^{0.5}$$

$$\bar{\delta}_{gas} = \text{مؤشر قابلية الذوبان للغاز المحقون، (cal/cm}^3)^{0.5}$$

$$\rho_i = \text{كثافة المكون (i) في الغاز المحقون عند ضغط ودرجة حرارة الحقن، lb/ft}^3$$

$$\rho_{ci} = \text{الكثافة الحرجة للمكون (i) في الغاز المحقون، lb/ft}^3$$

$$v_i = \text{الكسر الحجمي للمكون (i) في الغاز المحقون. [10]}$$

إن قابلية الذوبان للنفط الخام تعتمد على وزنه الجزيئي وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\delta_{oil} = 0.0697 M - 0.00556(T - 460) \dots \dots \dots (2)$$

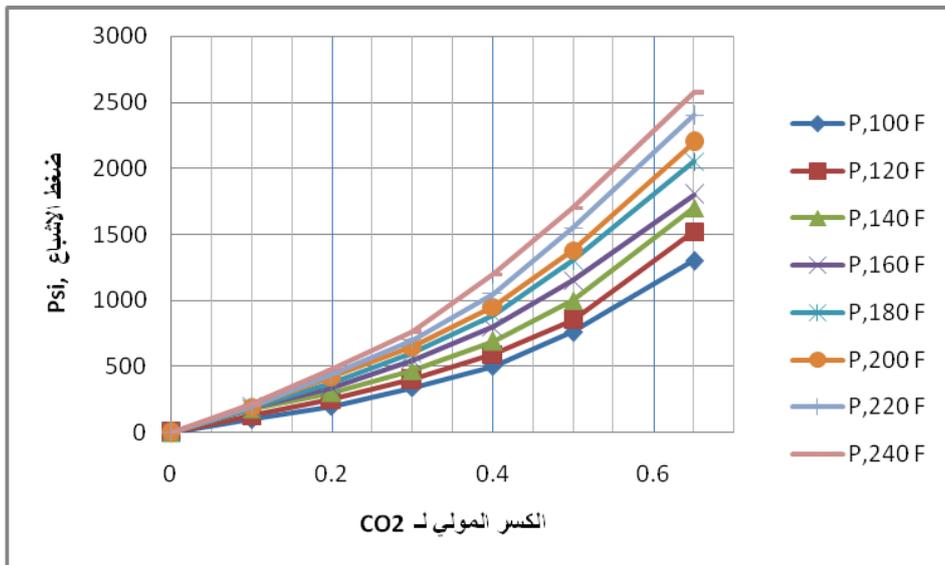
حيث أن :

$$T = \text{درجة الحرارة ، } ^\circ\text{R}$$

$$M = \text{الوزن الجزيئي لنفط المكن}$$

يشير Lange الى ان الامتزاجية تحدث عندما يكون الفرق بين قابلية الذوبان للنفط

$$|\delta_{oil} - \delta_{gas}| \leq 3 \pm 0.4 \text{ أي عندما يكون } 3 \text{ (cal/cm}^3)^{0.5} \text{ والغاز المحقون حوالي}$$



الشكل رقم (٤) الكسر المولي لذويانية غاز CO<sub>2</sub> بالعلاقة مع الحرارة والضغط

٢-٣-٢- آلية تأثير الغمر باستخدام CO<sub>2</sub> على النفط :

- يساعد على انتفاخ النفط الخام وبالتالي زيادة حجمه.
- يخفض لزوجة النفط.
- يخفض كثافة النفط ، أما عند الضغوط العالية فإنه يحدث العكس حيث ينقص حجم النفط وبالتالي تزداد كثافته.

• يحقق الامتزاجية مع النفط عند ضغوط بين (100-300 bar).

• يخفض التوتر السطحي بين النفط والماء مما يؤدي إلى إزاحة أكثر فعالية. [13]

٢-٤- تحديد ضغط الامتزاج الاصغري MMP :

الاختلاف في النظرات التقريبية التجريبية والعديدية في تحديد MMP أدت إلى وجود بعض الاختلاف في القيم ، ومن اجل التقدير الدقيق لقيمة MMP نحن بحاجة في بعض العلاقات التجريبية إلى معرفة التركيب الدقيق للنفط والذي يتضمن كل المكونات الثقيلة، وهناك علاقات تجريبية أخرى تعتمد فقط على قيمة درجة الحرارة. [5]

يعتبر جهاز الأنبوب البسيط الامتزاجي لقياس قيمة ضغط الامتزاج الاصغري

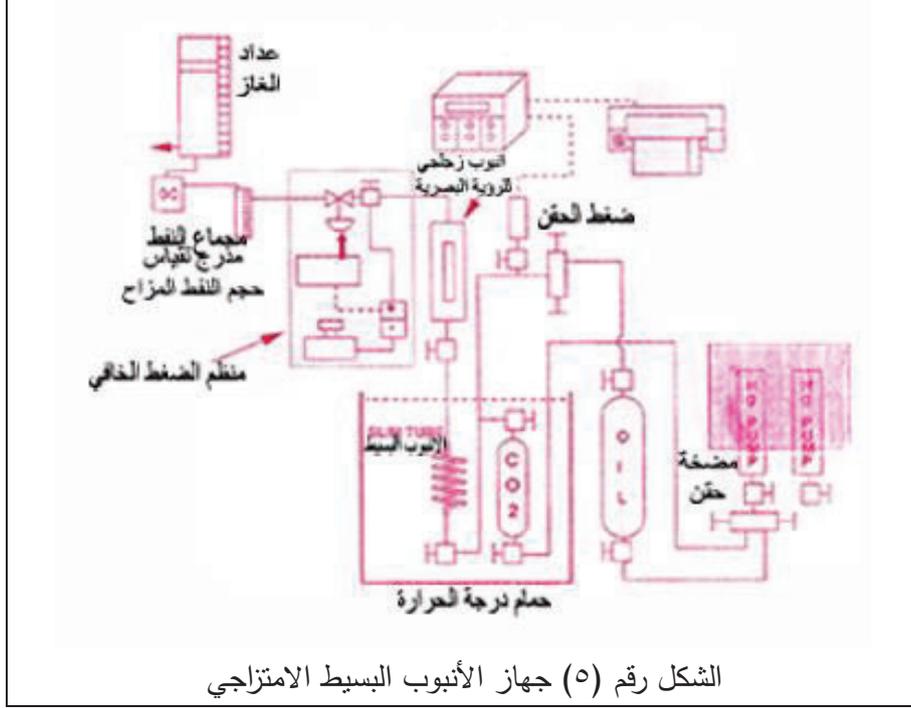
MMP ، ذو دقة عالية فهو معتمد في الصناعة النفطية ، ومعيار لتحديد دقة العلاقات

التجريبية المستخدمة لتحديد قيمة MMP. [11]

٢-٤-١- جهاز الأنبوب البسيط الامتزاجي :

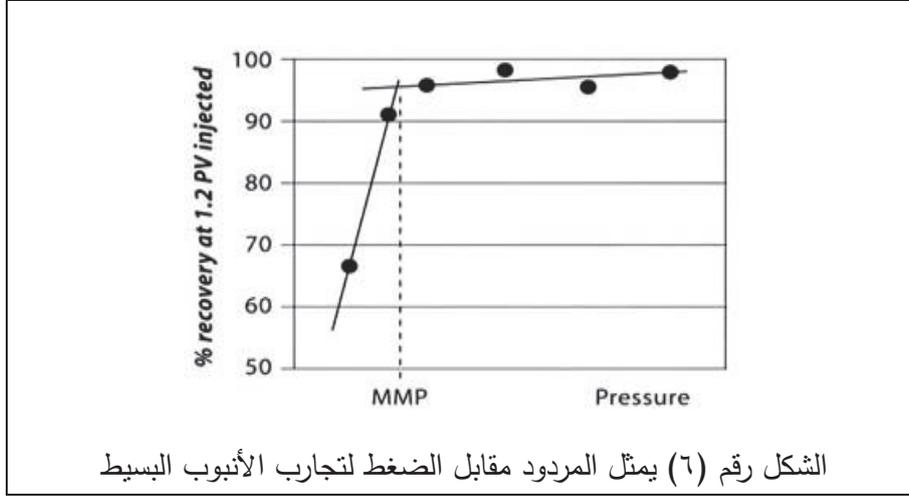
هو أنبوب ضيق بطوله بين (40-5 m) مليء بالرمل ، ويجب أن يكون قطر الأنبوب صغيرا بما فيه الكفاية لقمع ظاهرة تشكل الأصابع اللزجة، القطر الأصغر هو (0.25 in) ، و قطر حبيبات الرمل يجب أن تكون أقل من (١,٠) من القطر الداخلي للأنبوب وهو مزود بأنبوب زجاجي شفاف يسمح بالرؤيا البصرية للتدفق من خلاله من خلال تغير تدرج اللون للطور المتدفق. [6]

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الإزاحة في حقل سائبا النفط



يُشبع الأنبوب البسيط -المُنظف مسبقاً- بالنفط بواسطة مضخة عالية الضغط عند درجة حرارة الممكن وفوق ضغط نقطة الفقاعة، ثم يزاح النفط بحقن الغاز داخل الأنبوب عند ضغط ثابت، يُحافظ منظم الضغط الخلفي على ضغط ثابت داخل المنظومة ، وسرعة حقن الغاز عموماً هي بين (1.5-2.5 m/h)، تنتهي الإزاحة بعد حقن ١,٢ من حجم المسامات بالغاز (1.2 pv) والمردود عند هذه النقطة يشار إليه بالمردود النهائي. [16]

حجم النفط المتدفق تتم مراقبته بشكل مستمر باستخدام تدريجات قياس الحجم على مجموع النفط ، والغاز المتدفق يُقاس بعدد الغاز الرطب، ثم تكرر التجربة عند ضغوط مختلفة متزايدة ويتم في كل تجربة قياس حجم النفط المسترجع مقابل الضغط المطبق، تمثل القيم على منحنى بياني والذي يظهر انكسار للخط الواصل بين النقاط ، حيث تمثل قيمة الضغط عند نقطة الانكسار قيمة MMP. [11]



الشكل رقم (٦) يمثل المردود مقابل الضغط لتجارب الأنبوب البسيط

#### ٢-٤-٢ طرق حساب MMP واختيار الطريقة الأفضل :

إن العوامل التي تؤثر على قيمة MMP هي:

- ١- درجة حرارة المكمن بازديادها تزداد قيمة MMP .
- ٢- خصائص النفط ومواصفاته:

- بازدياد قيمة المكونات  $C_{7+}$  في تركيب النفط تزداد قيمة MMP .
- تزداد قيمة MMP مع زيادة الوزن الجزيئي للنفط واحتواء النفوط على نسبة تراكيز أعلى من  $C_1$  و  $N_2$  .
- تقل قيمة MMP بزيادة النسبة المئوية للمكونات المتوسطة ( $C_2-C_6$ ) في النفط. [14]

#### ٣- تركيب الغاز المحقون:

- بازدياد نسبة تراكيز  $C_1$  و  $N_2$  في الغاز المحقون تزداد قيمة MMP .
- وجود غاز كبريت الهيدروجين في الغاز المحقون يخفض قيمة ضغط الامتزاجية ولكن بمقدار صغير. [3]

نستعرض فيما يلي وباختصار العلاقات التجريبية المستخدمة في تحديد قيمة

:MMP

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الإزاحة في حقل سارايا النفطي

### ١ - علاقة Orr and Metcalfe :

تعتمد فقط على مؤشر ربط وحيد لتحديد MMP للمكونات النقية هو درجة الحرارة

بالعلاقة التالية:

$$MMP_{pure} = 1833.7217 + 2.2518055 (T - 460) + 0.01800674 (T - 460)^2 - \frac{103949.93}{T - 460} \quad ..(3)$$

حيث أن:

$$T = \text{درجة الحرارة ب } ^\circ\text{R}$$

MMP = ضغط الامتزاجية الاصغري ب Psia . [5]

### ٢ - معهد استعادة النفط ، كندا Petroleum Recovery Institute

تعتمد العلاقة فقط على مؤشر ربط وحيد لتحديد MMP للمكونات النقية هو درجة

الحرارة بالعلاقة التالية:

$$MMP_{pure} = 1071.82893 \times 10^b$$
$$b = \left[ 2.772 - \left( \frac{1519}{T} \right) \right] \quad \dots\dots\dots(4)$$

حيث أن :

$$T = \text{درجة حرارة الطبقة ، } ^\circ\text{R} .$$

MMP = ضغط الامتزاجية الاصغري Psia . [16]

### ٣ - علاقة Renge-Robison المعدلة:

تعتمد العلاقة على عدة مؤشرات ربط هي درجة الحرارة، الوزن الجزيئي لـ C<sub>7+</sub> في

النفط، كمية الكسور المتوسطة و CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S في النفط، كمية الميثان في النفط، كمية

C<sub>2+</sub> في الغاز المحقون، الوزن الجزيئي لـ C<sub>2+</sub> في الغاز المحقون.

$$MMP = 43.664 - 4.542 \times \alpha + 0.689 \times \alpha^2 - 0.132 \times \beta$$

$$\alpha = \frac{X_{C2-C6}^{1.72785} \times X_{C1}^{0.1}}{(1.8 \times T + 32)^{0.5} \times M_{C7+}} \dots\dots\dots(5)$$

$$\beta = Y_{C2+}^{(1.064 + 0.00686 M_{C2+})}$$

حيث أن:

MMP = ضغط الامتزاجية الاصغري ، Mpa .

$X_{C2-C6}$  = كمية الكسور المتوسطة في النفط من محتوى C2-C6 و  $CO_2$  و  $H_2$  ، % mol .

$X_{C1}$  = كمية الميثان في النفط ، % mol .

T = درجة الحرارة ، °C .

$M_{C7+}$  = الوزن الجزيئي لـ  $C_{7+}$  ، g/mol .

$Y_{C2+}$  = كمية  $C_{2+}$  في الغاز المحقون ، % mol .

$M_{C2+}$  = الوزن الجزيئي لـ  $C_{2+}$  في الغاز المحقون ، g/mol [3].

#### ٤ - علاقة Alston :

تعتمد العلاقة على عدة مؤشرات ربط هي درجة الحرارة،الوزن الجزيئي لـ  $C_{5+}$  في النفط، كمية الكسور المتوسطة في النفط، كمية الكسور القابلة للتطاير وتركيب  $CO_2$  المتدفق، لمنظومة النفط/  $CO_2$  النقي يعطى بالعلاقة التالية:

$$MMP = 0.000878(T - 460)^{1.06} (M_{C5+})^{1.78} \left[ \frac{X_{vol}}{X_{int}} \right]^{0.136} \dots\dots\dots(6)$$

أما لمنظومة النفط/  $CO_2$  المشوب فيعطى بالعلاقة التالي:

$$MMP_{imp} = MMP \left[ \frac{87.8}{T_{pc}} \right]^{168.893 T_{pc} - 460} \dots\dots\dots(7)$$

درجة الحرارة الحرجة للغاز المحقون تعطى بالعلاقة:

$$T_{pc} = \sum \omega_i \times T_{ci} - 460 \dots\dots\dots(8)$$

حيث أن:

MMP = ضغط الامتزاج الاصغري لـ  $CO_2$  النقي، Psia

$MMP_{imp}$  = ضغط الامتزاج الاصغري لـ  $CO_2$  المشوب ، Psia

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الإزاحة في حقل سارابا النفطي

$$w_i = \text{الكسر الوزني للمكون (i) في الغاز المحقون.}$$

$$T = \text{درجة حرارة المنظومة ، } ^\circ\text{R}$$

$$T_{ci} = \text{درجة الحرارة الحرجة للمكون (i) في الغاز المحقون، } ^\circ\text{R}$$

$$M_{C5+} = \text{الوزن الجزيئي لكسور } C_{5+} \text{ في النفط.}$$

$$X_{int} = \text{الكسر المولي للمكونات المتوسطة (} H_2S, CO_2, C_2-C_4 \text{) في النفط.}$$

$$X_{vol} = \text{الكسر المولي للمكونات القابلة للتطاير (} C_1 \text{ و } N_2 \text{) في النفط.}$$

من العلاقتين (6) و (7) نلاحظ انه تزداد قيمة ضغط الامتزاجية الاصغري عند زيادة نسبة  $C_1$  أو  $N_2$  في  $CO_2$  وتقل قيمته عند زيادة نسبة  $C_2$  و  $C_3$  و  $C_4$  أو  $H_2S$  في  $CO_2$  ، ويجب الإشارة إلى أن الباحثون في هاتين العلاقتين خصصوا قيمة موحدة لدرجة الحرارة الحرجة لكل من  $H_2S$  و  $C_2$  في الغاز المحقون وهي  $585.0^\circ\text{R}$  [16].

#### ٥ - طريقة Sebastian :

اقترح تصحيحا لتعديل قيمة MMP لـ  $CO_2$  النقي بواسطة الكمية المتعلقة بدرجة

الحرارة الحرجة للمول ( $T_{cm}$ ) للغاز المحقون كما يلي:

$$MMP_{imp} = [C] MMP$$

$$C = 1 - A[0.0213 - 0.000251A - 2.35(10^{-7})A^2]$$

$$A = \frac{T_{cm} - 87.89}{1.8} \dots\dots\dots(9)$$

$$T_{cm} = \sum y_i (T_{ci} - 460)$$

حيث أن : MMP = ضغط الامتزاجية الاصغري لـ  $CO_2$  النقي ،  $Psia$

$MMP_{imp}$  = ضغط الامتزاجية الاصغري لـ  $CO_2$  المشوب،  $Psia$

$$Y_i = \text{الكسر المولي للمكون (i) في الغاز المحقون.}$$

$$T_{ci} = \text{درجة الحرارة الحرجة للمكون (i) في الغاز المحقون } ^\circ\text{R.}$$

عدل الباحث في هذه العلاقة قيمة درجة الحرارة الحرجة لـ  $H_2S$  من  $212^\circ\text{F}$  إلى

$125^\circ\text{F}$  وذلك لإعطاء نتائج أفضل . [16]

### ٦- علاقة Cronquist :

تعتمد العلاقة على عدة مؤشرات ربط هي درجة الحرارة، الوزن الجزيئي لـ  $C_{5+}$  في النفط، النسبة المئوية المولية للميثان ( $C_1$ ) والنتروجين ( $N_2$ ) كما يلي:

$$MMP = 15.988(T - 460)^4 \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$A = 0.744206 + 0.0011038 M_{C_{5+}} + 0.0015279 y_{C_1-N_2}$$

حيث أن:  $T =$  درجة حرارة المكنن ، °R

$Y_{C_1-N_2} =$  المولات % لكل من الميثان والنتروجين في الغاز المحقون.

$M_{C_{5+}} =$  الوزن الجزيئي لـ  $C_{5+}$  في النفط. [16]

### ٧- علاقة Yuan et al :

تعتمد العلاقة في حساب MMP لـ  $CO_2$  النقي على عدة مؤشرات ربط هي درجة الحرارة، الوزن الجزيئي للكسر  $C_{7+}$  في النفط، النسبة المئوية المولية ( $C_M$ ) للمكونات المتوسطة ( $C_2-C_6$ ) في النفط كما يلي:

$$(MMP)_{pure CO_2} = a_1 + a_2 M_{C_{7+}} + a_3 C_M + \left[ a_4 + a_5 M_{C_{7+}} + \frac{a_6 C_M}{(M_{C_{7+}})^2} \right] (T - 460) +$$

$$\left[ a_7 + a_8 M_{C_{7+}} + a_9 (M_{C_{7+}})^2 + a_{10} C_M \right] (T - 460)^2 \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$a_1 = -1463.4, a_2 = 6.612, a_3 = -44.979, a_4 = 21.39$$

$$a_5 = 0.11667, a_6 = 8166.1, a_7 = -0.12258 \quad \text{حيث أن :}$$

$$a_8 = 0.0012283, a_9 = -4.052 \times 10^{-6}, a_{10} = -9.2577 \times 10^{-4}$$

$T =$  درجة الحرارة ، °R

$M_{C_{7+}} =$  الوزن الجزيئي للكسر  $C_{7+}$  في النفط ، g/mol

$(C_M) =$  النسبة المئوية المولية للمكونات المتوسطة ( $C_2-C_6$ ) في النفط، % mol

لاختيار الطريقة الأفضل والأدق لحساب MMP قمنا بحساب قيم MMP بكافة

الطرق السابقة الذكر ومقارنتها مع القيم الدقيقة لـ MMP المقاسة بواسطة الأنبوب البسيط

والعلاقة التي ستكون نتائجها اقرب إلى قيم MMP المقاسة سيتم اعتمادها في حساب

قيمة MMP لحقل سارابا النفطي.

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الإزاحة في حقل سارابا النفطي

C <sub>1</sub> %	C <sub>2</sub> -C <sub>6</sub> %	M <sub>C7+</sub>	T, °C	C <sub>2+</sub>	M <sub>C5+</sub>	C <sub>2</sub> -C <sub>4</sub> %	M <sub>C2+</sub>
55	22	209	98.33	14	171.75	18	37.25
50	22	250	121.11	10	216.49	20	33.51
49	23	250	121.11	0	250	10	0
57	26	183.6	84.22	0	183.6	10	0
55	22	209	98.33	16	171.29	20	37.71
50	23	250	121.11	10	215.96	21	34.04
49	23	250	121.11	0	250	21	0
46	25	240.68	115.93	18	200.91	22	39.77
42	1	302	150	35	257.9	1	44.1
42	1	302	150	38	257.9	1	44.1
42	1	302	150	46	257.9	1	44.1
33	24	215	101.67	47	175.09	20	39.91
33	24	215	101.67	47	175.09	20	39.91
39	27	258	125.56	24	219.81	23	38.19
31	27	271	132.78	23	233.66	23	37.34
37	25	294.97	146.09	23	257.63	21	37.34
31	27	271	132.78	23	233.66	23	37.34
44	31	231	110.56	27	192.27	27	38.73
33	26	121.91	49.95	15	84.54	10	37.37
23	33	141.74	60.97	41	99.88	29	41.86
24	30	141.99	61.11	41	100.13	26	41.86
54	24	132.12	55.62	17	92.35	20	39.77
22.92	32.08	257.7	125.39	41.47	215.7	27.9	42
23.64	30.36	254.4	123.56	41.47	212.4	26.1	42
45.85	24.68	143.7	62.06	18.12	103.81	20.66	39.89
26.57	30.25	245.43	118.57	12	206	27	39.43
54.26	24.12	238.15	114.53	17.88	198.15	20.2	40
6	28	175	79.44	43	133.66	24	41.34
33	26	209.81	98.78	16	173.06	19	36.75
33	26	209.81	98.78	16	173.06	19	36.75
33	26	209.81	98.78	16	173.06	19	36.75
33	26	209.81	98.78	16	173.06	19	36.75
33	26	209.81	98.78	16	173.06	19	36.75
32	25	252.21	122.34	0	252.21	21	0
32	25	252.21	122.34	10	222.14	21	30.07
32	25	252.21	122.34	10	208.11	21	44.1
32	25	252.21	122.34	10	194.09	21	58.12
32	25	252.21	122.34	5	222.14	21	30.07
31	27	270	132.22	0	270	23	0
31	27	270	132.22	10	239.93	23	30.07
31	27	270	132.22	20	239.93	23	30.07
46	25	240.68	115.93	18	200.91	21	39.77
46	25	240.68	115.93	18	200.91	21	39.77
32	25	252.21	122.34	28	210.68	21	41.53

الجدول رقم (٢) يبين خصائص نפט المكمن والغاز المحقون

علاقة Yuan Mpa	علاقة Cronquist Mpa	علاقة Alston Mpa	علاقة Renge Robison Mpa	معهد استعادة النترول Mpa	علاقة Orr Mpa	MMP المقاسة بالأنبوب البسيط Mpa
9.560	25.258	19.231	39.156	23.331	17.826	39.99
12.944	38.278	34.269	40.977	31.701	21.411	41.369
12.944	46.557	48.518	43.664	31.701	21.411	43.437
7.703	24.150	20.610	43.664	19.070	15.770	43.437
9.588	25.263	18.924	38.229	23.439	17.876	39.99
12.944	38.155	33.894	40.955	31.701	21.411	41.369
12.944	46.557	43.861	43.664	31.701	21.411	43.437
12.146	32.356	28.126	37.113	29.690	20.587	37.235
17.760	56.618	83.915	26.085	44.369	26.274	26.752
17.760	56.618	83.915	23.977	44.369	26.274	25.166
17.760	56.618	83.915	18.050	44.369	26.274	18.961
10.055	22.202	18.918	19.388	24.557	18.382	16.547
10.055	22.202	18.918	19.388	24.557	18.382	18.478
13.644	36.793	34.535	34.358	33.492	22.129	33.274
14.812	39.406	39.315	35.060	36.522	23.317	32.922
17.069	52.742	53.072	35.092	42.511	25.587	34.474
14.812	39.406	39.315	35.060	36.522	23.317	32.922
11.340	28.956	24.074	32.549	27.687	19.747	35.954
3.752	7.843	3.117	38.443	10.719	10.499	36.051
4.926	9.040	4.054	21.641	13.068	12.278	22.201
4.941	9.135	4.165	21.638	13.100	12.300	23.601
4.344	10.276	3.866	37.253	11.889	11.433	38.001
13.616	31.265	30.221	22.435	33.423	22.102	22.105
13.327	30.427	29.393	22.415	32.680	21.805	23.504
5.046	11.121	5.068	36.737	13.317	12.447	37.611
12.550	28.922	27.098	39.908	30.705	21.005	36.611
11.934	33.727	28.078	37.135	29.160	20.367	37.907
7.099	11.560	7.276	21.205	17.716	15.062	24.58
9.650	21.413	18.181	38.337	23.588	17.944	40.3
9.650	21.413	18.181	38.337	23.588	17.944	35.584
9.650	21.413	18.181	38.337	23.588	17.944	37.28
9.650	21.413	18.181	38.337	23.588	17.944	40.838
9.650	21.413	18.181	38.337	23.588	17.944	41.568
13.136	41.272	42.440	43.664	32.191	21.608	41.575
13.136	34.351	33.856	41.119	32.191	21.608	38.976
13.136	31.531	30.144	40.509	32.191	21.608	38.273
13.136	28.945	26.625	39.748	32.191	21.608	37.735
13.136	34.351	33.856	42.618	32.191	21.608	39.672
14.721	49.135	50.651	43.664	36.282	23.224	45.492
14.721	40.803	41.050	41.128	36.282	23.224	40.734
14.721	40.803	41.050	37.478	36.282	23.224	37.418
12.146	32.356	28.305	37.113	29.690	20.587	35.563
12.146	32.356	28.305	37.113	29.690	20.587	37.618
13.136	32.030	30.810	31.344	32.191	21.608	31.247

جدول رقم (٣) نتائج قيم MMP المقاسة والمحسوبة بالعلاقات المختلفة

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الاذاحة في حقل سازابا النفطي

قمنا بحساب ضغط الامتزاج الاصغري MMP بالعلاقات المختلفة الواردة في هذه المقالة ومقارنتها بقيم MMP المقابلة لها والمقاسة بالأنبوب البسيط بعدها قمنا بحساب الانحراف المطلق المتوسط وكانت قيمه لمختلف العلاقات المستخدمة لحساب MMP كما يلي:

- ١- علاقة Orr and Metcalfe : الانحراف المطلق المتوسط كان % 41.22
  - ٢- معهد استعادة البترول ، كندا: الانحراف المطلق المتوسط كان % 33.97
  - ٣- علاقة Renge –Robison المعدلة: الانحراف المطلق المتوسط كان % 4.41
  - ٤- علاقة Alston: الانحراف المطلق المتوسط كان % 49.93
  - ٥- علاقة Cronquist : الانحراف المطلق المتوسط كان % 36.50
  - ٦- علاقة Yuan et al: الانحراف المطلق المتوسط كان % 64.15
- مما سبق نستنتج أن أفضل علاقة وأدقها لحساب MMP هي علاقة Robison – Renge ، والتي سنستخدمها في حساب ضغط الامتزاجية الاصغري للحقل المدروس.
- ٢-٤-٣- حساب MMP للحقل المدروس:

تم حساب ضغط الامتزاجية الاصغري باستخدام علاقة Renge – Robison

comp	mol %	(M <sub>i</sub> )	mol %
N2	3.09	28.013	0.7
CO2	73.27	44.010	0.6
C1	21.62	16.043	33.4
C2	1.19	30.070	5
C3	0.51	44.097	5.5
Ic4	0.06	58.123	2.1
C4	0.14	58.123	3.9
IC5	0	72.500	2
C5	0	72.150	2.8
C6	0	86.177	4.4
C7	0	100.204	9.7
C8	0	114.231	8.8
C9	0	128.258	7.8
C10	0	142.285	8.5
C11	0	156.312	0.2
H2S	0.12	34.080	4.6

جدول رقم (٤) تركيب النفط والغاز لحقل سازابا-طبقة الشيرانيش

$$\alpha = \frac{30.9^{1.72785} \times 33.4^{0.1}}{(1.8 \times 56 + 32)^{0.5} \times 42.193} = 1.097$$

$$\beta = 1.9^{(1.064 + 0.00686 \times 0.699)} = 1.986$$

$$MMP = 43.664 - 4.542 \times 1.097 + 0.689 \times 1.097^2 - 0.132 \times 1.986 = 39.25 \text{ MPa}$$

C <sub>1</sub> %	C <sub>2</sub> -C <sub>6</sub> %	M <sub>C7+</sub>	T, °C	C <sub>2+</sub>	M <sub>C2+</sub>	MMP MPa
33.4	30.9	42.193	56	1.9	0.699	39.25

جدول رقم (٥) نتائج حساب MMP لحقل سزابيا

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الإزاحة في حقل سارابا النفطي

### ٣- النتائج والمقترحات:

- ١- إن علاقة Renge –Robison المعدلة لحساب ضغط الامتزاجية الاصغري والتي عدلت بالاعتماد على نظرية التماس المتعدد الامتزاجي تأخذ بعين الاعتبار عدد كبير من البارامترات التي تؤثر على MMP .
- ٢- إن علاقة Renge –Robison المعدلة تاخذ بعين الاعتبار تركيب النفط والغاز وذلك في عملية دفع الغاز.
- ٣- إن علاقة Renge –Robison المعدلة قابلة للتطبيق بمجال واسع وأكثر دقة بكثير من العلاقات الأخرى.
- ٤- تبين نتائج MMP المقاسة بالأنبوب البسيط أن قيمة MMP تزداد بازدياد درجة الحرارة وتتنقص بعض الشيء بزيادة قيمة الوزن الجزيئي لـ  $C_{2+}$  في الغاز المحقون.
- ٥- تحديد مواصفات النفط والغاز المحقون بشكل جيد لإعطاء قيمة دقيقة لضغط الامتزاجية الاصغري.

المراجع العلمية المعتمدة بالبحث:

آ – باللغة العربية

- ١- تقارير الشركة السورية للنفط - مديرية حقول الجبسكة. لعامي ٢٠١٠-٢٠١١
- ٢- عبد الأحد، جورج . نوفل، عماد، ١٩٩٧ بحث دراسة التأثير المتبادل بين النفط الطبقي الثقيل و المواد المقللة للتوتر السطحي و CO<sub>2</sub> . مجلة جامعة البعث،

ب – باللغة الإنكليزية:

- 3-MAKLAVANI,A.M;VATANI,A;MORADI,B;TANGNSIRIFARD,J 2010 New Minimum Miscibility Pressure (MMP) Correlation For Hydrocarbon Miscible Injections Brazilian Journal Of Petroleum And Gas A Publication Of The ABPG Brazilian Association Of R&D In Petroleum And Gas , vol .4n.1.11-18 .
- 4- Nedjad, M; Reza,A; Mohsen,V 2007 Determination Of Minimum Miscibility Pressure By Analytical Method Chemical Engineering, Iran. J. Chem. Chem. Eng , vol . 26, No.3.
- 5- RUDYK,S; SOGAARD,E; ABBASI,W; JORGENSEN,L 2009 Determination Of Minimum Miscibility Pressure In Supercritical Extractor Using Oil Saturated Sample AIDIC Conference Series Editor Sauro Pierucci Servizi Srl , ISSN 2036-5969 , vol.9.12.
- 6- Høier , L ; Whitson,C 1998 Annual Techn. Conf and Exhibition of Soc Petroleum Engineers SPE paper 49269 New Orleans, Vol.27-30.
- 7- YUAN,H ; RUSSEL, T 2002 Simplified Method For Calculation Of Minimum Miscibility Pressure or Enrichment Annual Techn. Conf. and Exhibition of Soc Petroleum Engineers , SPE paper 77381San Antonio , vol .1-8.
8. DERRIL, J. ;STEPHENSON, V 2002 Economic Feasibility of Horizontal CO2 EOR Projects in Alberta Climate Change and Greenhouse Gas (GHG) Technology , vol.4-7.
- 9- MORITIS, G 2002 Oil & Gas Journal ,vol. 68 – 69.
- 10- TEKNICA 2001-Enhanced Oil Recovery . Teknica Petroleum Services , New Orleans,253 P

تحديد ضغط الامتزاج الأصغري عند استخدام حقن غاز ثاني أكسيد الكربون لتحسين عامل الإزاحة في حقل سارابا النفطي

- 11-MATHIASSEN, M 2003- CO2 As Injection Gas For Enhanced Oil Recovery And Estimation Of The Potential On The Norwegian Continental Shelf. Norwegian Petroleum irectorate,Norwegian,96 P
- 12- REMSON,D 2008 CO2 Enhanced Oil Recovery Overview NETL Office Of Systems, Analyses And Planning , DOE 1318 ,vol.1-62.
- 13- DONALSON,E; CHAILINGARIAN, G;FU TEN,T 1997- Enhanced Oil Recovery . University Of Southern California,Los Angeles, California USA ,423P
- 14- DONALSON,E; CHAILINGARIAN, G;FU TEN,T 1989- Enhanced Oil Recovery Processes And Operations . University Of Southern California,Los Angeles, California USA,604 P
- 15-DANESH,A 1998-PVT And Phase Behavior Of Petroleum Reservoir Fluids. Elsevier Science All Rights Reserved, Netherlands,388P
- 16- TAREK ,A 2007- Equations of State and PVT Analysis . Gulf Publishing Company , Houston, Texas Gpc,549P.