كلمة شكر

لا يسعنا ونحن في نهاية المرحلة الدراسية إلا أن نشكر تلك العطاءات الخيرة والعقول النيرة التي دأبت بنكران للذات على بذل كل ما في وسعها من طاقات علمية ودرايات معرفية من أجل تأهيل كل متخرج من كلية هندسة البترول كي ينضم إلى قافلة من يقع على عاتقهم بناء هذا الوطن الكبير والأخذ بيد أمتنا العربية إلى مصاف الأمم المتطورة.

وإن جاز لنا هنا التخصيص نخص بالذكر:

الأستاذ الدكتور عماد سليمان نوفل

الذي زودنا بنصائحه وأمدنا بمعلوماته الواضحة والصحيحة وأرشدنا إرشاد الخيِّر القدير إلى اللب وإخراج هذا العمل إلى يد القارئ.

والشكر كل الشكر لكل أعضاء الهيئة التدريسية في كلية هندسة البترول

أسرة المشروع

مـقـدمــة

تزداد حاجة العالم إلى الطاقة التي لن تلبيها الوسائل الجديدة بتقنين الطاقة , وتطوير وسائل الطاقة البديلة التي لا يتوقع أن تسد أكثر من (% 20–10) من حاجة العالم إلى الطاقة في المدى القريب , لذلك تم البحث عن وسائل و مصادر جديدة لتوليد الطاقة و منها النفط الثقيل الذي يشكل نسبة كبيرة من الاحتياطي النفطي في العالم .

إن وجود النفط الخفيف والمتوسط باحتياطي كبير كان سبباً لقلة الاهتمام بالنفط الثقيل , نظراً لتكاليف استخراجه العالية بالنسبة لاستخراج النفط الخفيف والمتوسط , وصعوبات النقل و التصديرو ارتفاع كلفة حماية البيئة , إلا أن ارتفاع أسعار النفط بعد عام 1973 جعل إنتاج النفط الثقيل مربحاً بالنسبة للبدائل الصناعية عالية الكلفة , حيث لجأت دول عديدة إلى الاستفادة من النفط الثقيل عوضاً عن دفع مبالغ باهظة لاستيراد البدائل الأخرى , كذلك فإن اختصار تكاليف الاستكشاف القليلة نسبياً بالاعتماد على موارد النفط الثقيل التي تم اكتشافها بالصدفة أثناء البحث عن النفط الخفيف , مقارنة مع النفقات الباهظة لاستكشاف النفط العادي في الطبقات الأعمق أو في البحار هو أحد عناصر الاهتمام المباشر لتطوير حقول النفط الثقيل في العالم . وسنتطرق في هذا المشروع الى مكامن النفط الثقيل و استثمارها و كيفية تشكل النفط الثقيل و الطرق الحرارية المستخدمة في زيادة عامل المردود في مكامن النفط الثقيل من خلال تقييم الية عمل هذه الطرق و دراسة امكانية تطبيقها في الحقول السورية واقتراح طرق حرارية تطويرية لاستخدامها في زيادة الإنتاج و ثم سنقوم بإستعراض أمثلة من الحقول السورية .

(الفصل الأول)

(مكامن النفط الثقيل)

الفصل الأول : مكامن النفط الثقيل

❖ **1-1 : ألية التشكل**

- **التشكل الأولي للنفط الثقيل :**

يتشكل النفط الثقيل من المواد العضوية الأولية بتأثير الحرارة و الضغط والتي تتعلق بدورها بسماكة الرسوبيات التي تغطي الصخور من جهة وتطور الأحواض الترسيبية من جهة أخرى،حيث تتحول المواد العضوية تدريجيا إلى نفط عادي ومن ثم إلى نفط خفيف وغاز وذلك خلال فترات زمنيه طويلة. كما أن نوع المواد العضوية الأولية يفسر تواجد تجمعات النفط اللزج الذي بقي في الصخور الأولية ولم يصل إلى مرحلة تشكل النفط الخفيف أو أنه هاجر نتيجة العوامل التكتونية خلال مرحلة التحول وتجمع في المكامن القريبة.

- **التشكل الثانوي للنفط الثقيل :**

- هناك عوامل ثانوية قد تساهم في عملية تشكل تجمعات النفط الثقيل منها:

1- تأثير البكتريا الهوائية أو الكبريتية: تتواجد في المياه ذات المصدر السطحي أو الجوفي، وغياب H_2O يسمح للبكتريا الهوائية بنشاط فعال يساهم في تحويل النفط الخفيف إلى ثقيل وذلك عند درجات حرارة أقل من المطلوبة .

2- تأثير المياه المتحركة ذات المصدر السطحي : حيث أن هذه المياه تسبب غسل المواد الخفيفة بما يتناسب ودرجة انحلالها وذلك عند رشحها في الطبقة وملامستها للنفط حيث تؤدي إلى انخفاض نسبة المواد الخفيفة وازدياد نسبة الإسفلتينات والمواد الثقيلة الموجودة في المكمن وبالتالي إزدياد لزوجة النفط المتبقي ووزنه النوعي

3- الفصل الطبيعي للنفط عن مكوناته:إن الهجرة الطبيعية للنفط في الصخور الطبقية المختلفة المواصفات تسمح بتمرير الغاز والمواد الخفيفة تاركة المواد الثقيلة ترسبات تؤدي إلى إغلاق جيد يمنع إستمرار هجرة النفط .

4- تشكل الإسفلتينات:يحصل ترسب الإسفلتينات خلال هجرة الغاز والمواد الخفيفة أو أثناء إحدى مراحل تكوين النفط وهذه الإسفلتينات المترسبة لا يمكن تمييزها عن الشكل الطبيعي للإسفلتينات الناتجة عن تحول المادة العضوية

❖ 1-2 : وجود المواد الثقيلة في النفط :

يتعلق وجود مثل هذه المواد بعوامل عديدة منها:خواص النفط المنتج،الخواص الترموديناميكية للطبقة،الشروط الهيدروديناميكية للطبقة،الخواص الجيولوجية والفيزيائية للطبقة،طريقة الإستثمار. وأهم هذه العوامل هو مواصفات النفط المنتج والخواص الترموديناميكية للطبقة،فأثناء تغيير الخواص الترموديناميكية للطبقة يمكن للمواد الإسفلتية والبارافينية أن تترسب حول القاع (مما يؤدي إلى تقليل النفوذية) وضمن المعدات الجوفية وخطوط المحطات،ومشكلة الترسب هذه يمكن أن تظهر في الآبار الميكانيكية والذاتية على السواء وتؤدي إلى نقص في إنتاج النفط. فيما يلي نبين مواصفات كل من هذه المواد:

- **المواد البارافينية :**

تكون على شكل بلوري ومتوسط الوزن الجزيئي لها gr/mol(300-400) ودرجة الانصهار c° (-60 50) ،وتتصف بأنها جيدة الإنحلال في المركبات الهيدركربونية العطرية.(الكيروسين،الكوندنسات) وهي عمليا غير قابلة للإنحلال في المركبات الهيدروكربونية العطرية .

- **المواد الراتنجية :**

يتراوح الوزن الجزيئي gr/mol(450-1500)،الكثافة قريبة من الواحد ولها خواص مطاطية و هي عالية اللزوجة،ذات لون غامق وقابلة للانحلال في المركبات الهيدروكربونية الخفيفة والعطرية وغير قابلة للانحلال في الحموض و القلويات أثناء تسخينها في الهواء إلى c°(100-150) تتحول إلى إسفلت.

- **المواد الأسفلتينية :** غير قابلة للانحلال في المركبات الهيدروكربونية الخفيفة ولكنها تنحل في المركبات العطرية،الوزن الجزيئي gr/mol(1500-10000) والكثافة أكبر من الواحد،وأثناء تسخينها إلى درجة حرارة أعلى من c° 300 لا تنصهر بل تتحول إلى فحم كوك وأثناء تسخينها بوجود حمض الكبريت تتصلب وتتحول إلى كربون غير قابل للانحلال حتى في المركبات الهيدروكربونية العطرية.

❖ **1-3 : خصائص النفط الثقيل :**

يتميز النفط الثقيل بنسبة غاز-أولية يقدر بحوالي200 scf/stb أو أقل،وتزداد هذه النسبة خلال الإنتاج عند انخفاض ضغط المكمن تحت ضغط الاشباع.

أما كثافة هذا النوع من النفط والتي تكون أقل من24 API فتنخفض مع الزمن وحتى وقت متأخر من حياة المكمن،وكلما كانت كثافة النفط أكبر كان لونه عاتما أكثر مشيرا إلى وجود الهيدروكربونات الثقيلة و غالبا ما يكون لونه اسودا مخضرا أو بنيا .

ويمكن أن نذكر أهم خصائص النفط الثقيل وسطيا وفق ما يلي:

1- درجة الجودة الأمريكيةAPI قيمتها أقل من (24) والثقيل جدا أقل من (17.5).

2- لزوجة مرتفعة في الحالات العادية للخزانات,أكثر من(CP50).

3- اللون الأسود.

4- محتوى الكبريت أكثر من3% وزنا.

5- محتوى المعدنNi=500 PPM .

6- محتوى الاسفلتين يصل إلى 20% وزنا.

وتختلف النفوط الثقيلة عن بعضها باختلاف الوزن النوعي و اللزوجة معاً كما هو موضح في الجدول التالي (1-1). إن أي نفط ثقيل يمكنه أن يملك بعض هذه الخصائص و لا يوجد شئ مطلق في أي تصنيف .

جدول (1-1) : خصائص الأنواع الرئيسية للنفوط الثقيلة

الأنواع	اللزوجة CP	الوزن النوعي Kg/m^3
النفط العالي اللزوجة	50-1000	890-930
النفط الثقيل 75%نفط و الباقي إسفلت	1000 -20000	930-960
البيتومين مالتا %(75-45) نفط و الباقي إسفلت	20000-100000	960-1000
البيتومين مالتا%(45-25) نفط و الباقي إسفلت	أكبر من 100000	1000-1050
البيتومين مالتا %(25-15) نفط	بلاستيكي	1050-1100
السجيل الزيتي	قاسي	أو أكبر 110-1000

❖ 1-4 : العقبات في استخراج النفط الثقيل و الحلول الممكنة :

1- لزوجة النفط الثقيل عالية جدا وهذا يجعل إرتشاحه عبر الأوساط المسامية صعبة للغاية. ويمكن أن يتم تخفيض اللزوجة باستخدام الحرارة أو المذيبات أو بعض الغازات مثل CO_2 أو بتشكيل مستحلب من النفط مع بعض السوائل بحيث تكون لزوجة المستحلب شبيهة بلزوجة الماء.

ولقد تبين أن رفع درجة الحرارة بمقدار (111°c) يعمل على تخفيض اللزوجة في معظم الأحيان إلى (10 cp أو أقل) بينما استخدام CO_2 والمواد المنشطة سطحياً فيعتبر أقل فاعلية في تخفيض اللزوجة كما أن هناك إمكانية لترسيب الإسفلتينات في حال استخدام المذيبات الخفيفة اللاعضوية, وهذا يؤدي إلى سد مسام الصخر الحامل , و تعتبر المستحلبات الأقل فعالية والأكثر كلفة في حال استخدامها لتخفيض اللزوجة.

2- فقدان الاتصال بين آبار الحقن وآبار الإنتاج و نتيجة لذلك قد يكون من الضروري استخدام ضغوط عالية قد تؤدي إلى تشقق الطبقة الحاملة إن لم تكن هناك سماكة كافية من الغطاء الصخري و يبرز هذا العائق خصوصا في تطوير الحقول الضحلة جدا للنفوط الثقيلة.

3- انفصال قسم من محتويات الطبقة الخازنة للمركبات الهيدوكربونية عن النفط أثناء الاستثمار وتتوضع في مناطق مختلفة على شكل ترسبات (بارافينات - راتنجات) في مسامات الطبقة – داخل مواسير الإنتاج- الأجهزة السطحية .إن حل المشاكل السابقة يتطلب استخدام كميات كبيرة من الطاقة مما يؤدي إلى خفض المردود الاقتصادي في العديد من عمليات استخراج النفط الثقيل حيث أن الحد الأقصى من حفظ الطاقة و الاستفادة منها واجب في عميلة استخراج النفط الثقيل.

❖ 1-5 : تحسين نوعية النفوط الثقيلة :

تحوي معظم النفوط الثقيلة على نسبة عالية من الكبريت و الإسفلتينات ,والهدف من عملية التحسين هو رفع كمية الهدروجين في الخام و تخفيض الوزن الجزيئي و تقليص كمية الكبريتات.

وتعتبر عملية التحسين هذه لبقايا التكرير عملية روتينية في المصافي و لكن و بينما تكون هذه القطفات الثقيلة عبارة عن أجزاء بسيطة (4%) في النفوط التقليدية فإن النفوط الثقيلة تتألف بشكل رئيسي من هذه القطفات . ونتيجة لذلك فإن تكاليف وحدة تحسين النوعية باهظة وتقدر ب (1) مليار دولار للمنشأة التي طاقتها بحدود (100) ألف برميل يوميا. يعتبر الغاز الطبيعي أسهل مصدر للهيدروجين في عمليات التحسين والغاز المرافق أيضا مصدر حيوي بينما المصادر الأخرى لإنتاج الهيدروجين اللازم لعملية التحسين لا تبدو عملية .

- **استثمار النفط الثقيل :**

لدى ارتشاح نفط عادي من خلال الفراغات المسامية يفترض أنه سيحقق قانون الاحتكاك الخطي لنيوتن :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

τ : التوتر الديناميكي للقص (Pa) .

μ : لزوجة السائل (Pa.s).

u : سرعة حركة إحدى طبقات السائل بالنسبة إلى طبقة أخرى (m/s).

y : البعد بين الطبقتين (m).

– إن النفط المذكور يسمى بالسائل النيوتوني .

لدى استثمار الحقول النفطية يلاحظ في بعض الحالات أن هناك إخلال بالقانون الخطي الموضح بالعلاقة السابقة , وبالتالي فإن العلاقة بين τ وتدرج السرعة يمكن أن تكون على الشكل التالي :

$$\tau = \mu' \frac{du}{dn} + \tau_0$$

-

μ' : اللزوجة اللدنة (Pa.s).

τ_o : التوتر السكوني للقص (Pa).

– هذه العلاقة تحققها السوائل غير النيوتونية (النفط الثقيل) مثلاً .

لدى الحساب لهذه العلاقة عند سرعات ارتشاح غير كبيرة فإن العلاقة بين سرعة الارتشاح وتدرج الضغط سيكون لها شكل المنحني الذي ينطلق من نقطة مبدأ الإحداثيات و المنحني نحو محور السرعة .



إن تدرج الضغط البدائي (G) يعتبر المؤشر الأساسي لظهور مثل هذه الصفات اللدنة لدى ارتشاح النفط الثقيل من خلال الفراغات المسامية حيث أنه بعد التغلب عليه يمكن للسائل الحركة .لارتشاح النفط الثقيل في الوسط فإن القانون الخطي سيكون له الشكل التالي :

$$v = \frac{K\left(- G - \frac{dp}{dr} \right)}{\mu'}$$

dp/dr : تدرج الضغط (Pa/m).

يتعلق تدرج الضغط البدائي للسائل الكثيف بالتوتر السكوني للقص ونفوذية الوسط المسامي ويعطى بالعلاقة التالية :

$$G = \frac{a1 \cdot \tau 0}{\sqrt{k}}$$

K : نفوذية الوسط المسامي (m^2)

a1 : عامل بدون واحدة قياس ويتعلق بتركيب الفراغات المسامية

τO : التوتر السكوني للقص(pa) .

- **ملاحظات على إنتاج النفط عالي اللزوجة :**

عند إنتاج الخامات عالية اللزوجة فإنه يجب أن تطبق طرق خاصة تختلف قليلاً أو كثيراً عن الطرق التي تطبق لإنتاج الخامات القليلة اللزوجة لأن زيادة لزوجة النفط المراد إنتاجه تؤدي إلى :

1- زيادة المقاومة الهيدروليكية ضمن مواسير الإنتاج و بالتالي زيادة الحمولة على القضيب الأملس

2-عند وصول النفط إلى رأس البئر فإن كثافته ستزداد و ذلك لتناقص درجة الحرارة وهذا يؤدي إلى زيادة الحمل على قضبان الضخ وقد يؤدي ذلك إلى قطعها .

3-بعد التوقفات القصيرة التي تحدث على البئر فإن هناك صعوبة كبيرة في إعادة تحريك النفط (الذي تكون قد انخفضت درجة حرارته) وإنتاجه .

4- ضرورة استخدام مكبس بقطر كبير للمضخات عوضاً عن استخدام المضخات النابذة التي تصبح قليلة الفعالية في مثل هذه الحالة وبالإضافة إلى هذه الصعوبات المذكورة سابقاً فإن عملية فصل الغاز عن النفط أثناء التجميع و المعالجة تصبح أكثر تعقيداً .

(الفصل الثاني)

(الطرق الحرارية المستخدمة لزيادة عامل المردود)

الفصل الثاني : الطرق الحرارية المستخدمة لزيادة عامل المردود

❖ 2-1 : حقن البخار الساخن : مبدأ و مجال التطبيق :

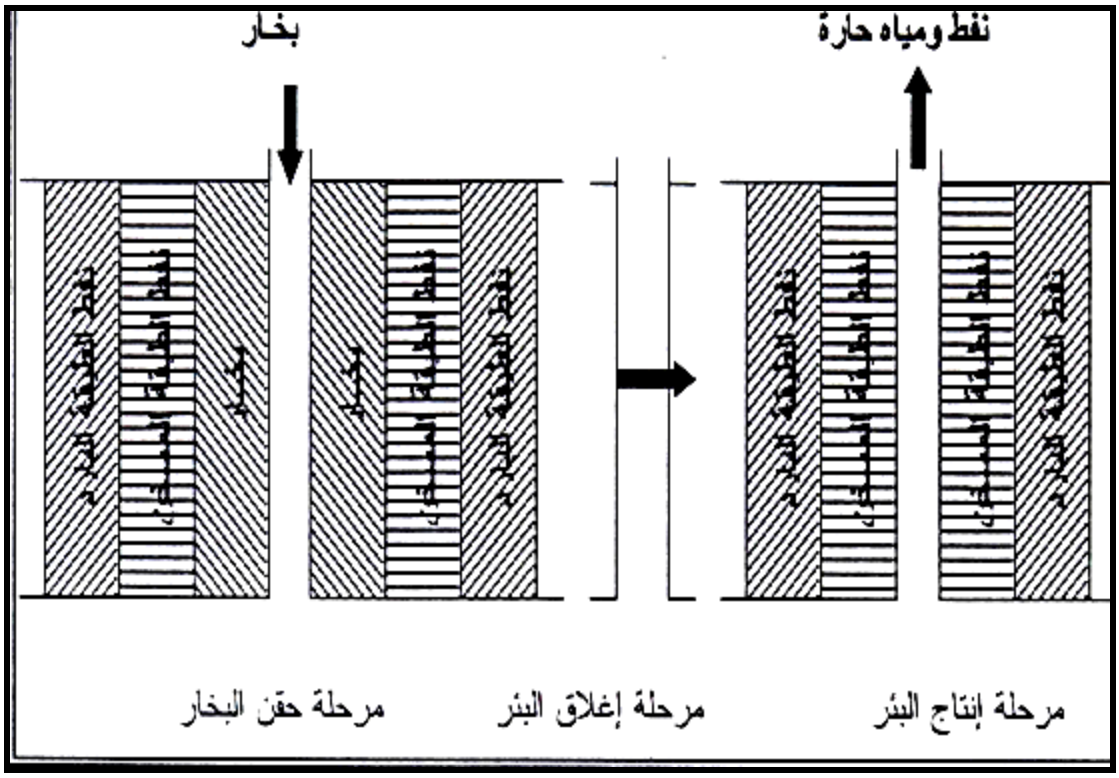
تعتمد هذه الطريقة على الحقن, تحت الضغط, لبخار الماء المصنع على السطح في مولدات للبخار. ويتكثف بعدها في الطبقة بعد أن يرفع حرارة الخام (النفط) ويخفض بالتالي لزوجته, وهذا يتأثر بشكل كبير بارتفاع الحرارة, التي يمكن أن تنخفض بتأثير عشرات العوامل في مجال استخدام حرارة البخار من (200–250°م). وحقن البخار في الخزان أو المكمن النفطي هو تجربة من أجل تغير خصائص النفط في المكان, مثل اللزوجة, كما ذكرنا سابقاً الكثافة, النفوذية النسبية, وكذلك الخصائص السطحية.

ويعتبر تخفيض لزوجة النفط بثبات درجة الحرارة للحوض هاماً, لأن اللزوجة الجديدة أقل منها للقديمة, وذلك نتيجة لاستخدام الطرق الحرارية, بشكل خاص عملية حقن البخار, التي تعتبر عملية واسعة من أجل استثمار طبقات النفط الثقيل والثقيل جداً. وكما تبين التجارب العالمية لاستخدام حقن البخار فإن استخدامها لن يكون فعّالاً في الطبقات العميقة التي تزيد عن (1000م) وتحد من فاعليتها المسامية المنخفضة ونسبة الغضار العالية.

- **2-1-1 : الحقن الدوري للبخار Cyclic Steam Injection:**

إن الحقن الدوري للبخار أو التبليل بالبخار Steam Soak أو الحقن والإنتاج المتناوبين والمعروفين باللغة الأنكلوسكسونية "HUFF AND BUFF" يعتمد على حقن (1000 برميل/ يوم) تقريباً في البئر المنتجة ولزمن محدود, في العادة أسبوعين إلى ثلاثة أسابيع, وبعد ذلك يغلق البئر ليسمح للبخار بالتكثف ولحرارته بالانتشار والتبرد في المكمن, بشكل كاف, وتبلغ هذه الفترة في العادة أسبوع إلى أسبوعين التي يجب تحديدها بعناية. إذ إنه من الضروري تكثيف كامل البخار

في الطبقة بحيث لا ينفلت عند فتح البئر. ومع ذلك يجب عدم السماح لهذه العملية أن تستمر لفترة طويلة للإقلال من الضياع الحراري باتجاه الطبقات المجاورة للأعلى والأسفل, وبالتالي عدم الإقلال من فترة الإنتاج. بعد ذلك يتم فتح البئر للإنتاج.



شكل رقم (2–1) : عملية الحقن الدوري للبخار

وغالباً ما نستعمل طريقة الحقن الدوري للبخار بشكل مساعد لطريقة الحقن المستمر للبخار. وتستخدم هذه الطريقة بشكل ناجح تكنولوجياً واقتصادياً في حقول متعددة من الاتحاد السوفييتي وكذلك الولايات المتحدة مثل Midway و Sunset و Kernriver وكذلك في حقل Duri في أندونيسيا وفي حقول فنزويلا بأمريكا اللاتينية.

- **2-1-2 : الحقن المستمر للبخار (الكسح): Steam Flooding**

تعتمد هذه الطريقة على الحقن المستمر للبخار عبر بعض الآبار (آبار الحقن), وذلك من أجل زيادة كمية النفط المنتج من قبل آبار أخرى (آبار الإنتاج), وتوزع آبار الحقن وآبار الإنتاج بشكل دقيق في الطبقة وذلك تبعاً لخصائص المكمن.

تطبق طريقة الكسح بعد مرحلة تنشيط الآبار بواسطة الحقن الدوري للبخار لتسهيل جريان الموائع في المكمن. إن حرارة المنطقة القريبة من البئر تكون قريبة من حرارة البخار المحقون الذي تنخفض حرارته كلما تحرك بعيداً عن البئر مع تمدده نتيجة انخفاض الضغط, وبعد مسافة معينة يتكاثف البخار ويشكل جبهة من المياه الحارة. يزاح النفط من منطقة البخار بقطرات البخار والغاز. أما في منطقة المياه الحارة فإنه يحصل تغير في مواصفات النفط والصخر نتيجة:

1. التمدد الحراري للنفط وانخفاض لزوجته.
2. انخفاض كمية النفط المتبقي.
3. تغير في النفوذية النسبية نتيجة ذوبان الشموع المترسبة.

تقود هذه التغيرات مجتمعة للحصول على مزيد من النفط.

إن مجال تطبيق طريقة الحقن بالبخار محدود , ولكنها تقبل لرفع عامل المرود للطبقة عندما يكون عمق الطبقة المنتجة لا يتجاوز (1500) مترا وسماكة الطبقة لا تزيد عن (10-5) مترا .

يجب الانتباه إلى أن الطرق الحرارية خطرة لأنه يمكن أن يحصل احتراق في الطبقات , وبالتالي انتشار الحرارة ضمن الطبقة كبير (c˚ 550) , وهذا يؤدي إلى تحرر الغازات وارتفاع الضغط ضمن الطبقة , إضافة إلى فعل جول وتخفيض اللزوجة والكثافة للموائع , لذا يجب اختيار المكامن بشكل

جيد ودقيق بحيث تتحمل هذه الشروط . إن من أهم مزايا هذه الطريقة هو اختصار التشبع بالنفط إلى حدود دنيا % (30- 20) في المنطقة المسخنة بالبخار, ونتيجة لذلك يمكن الحصول على مردود عالي يتجاوز% (77) وبشكل وسطي ما يقارب% (45). أما المشكلة الرئيسية في عملية الدفع بالبخار فتكمن في ضياع الحرارة في الصخور المسخنة إلى الطبقات الواقعة في الأعلى والأسفل من الطبقة المنتجة . من العوامل المفيدة في تقييم عملية حقن البخار (O.S.R) هو العامل البخاري النفطي والذي يعرف بأنه عدد البراميل من النفط المنتج من جراء حقن البرميل الواحد من المياه بشكل بخار, أما بالنسبة لتقييم عمليات الحرق فيعتمد على العامل الهوائي النفطي (A.O.R) (Air Oil Ratio), والذي يعرف بأنه كمية الأقدام المكعبة النظامية من الهواء المحقون لكل برميل من النفط المنتج .

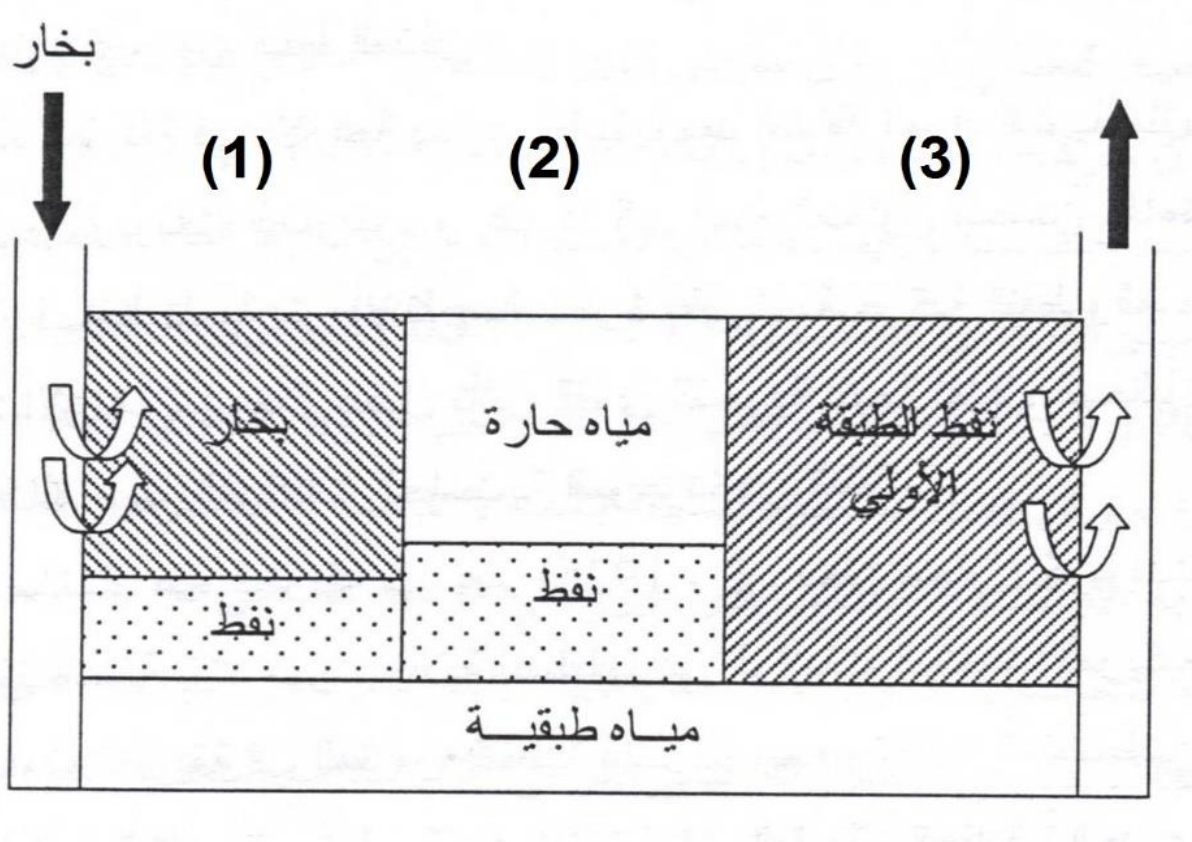
- **وصف الطريقة:** تعتمد طريقة الحقن المستمر للبخار على حقن البخار المشبع في الطبقة.

وفيها يمكن تقسيم المكمن إلى ثلاثة مناطق كما في الشكل السابق هي كما يلي:

المنطقة -1-:نميز ثلاثة أطوار للموائع في هذه المنطقة هي: طور البخار, طور النفط, وطور ماء أحادي.درجة الحرارة التي تسيطر في كل نقطة هي درجة التبخر للماء عند الضغط الطبقي. إذاً تأخذ درجة الحرارة بالانخفاض ببطء حتى تبتعد عن منطقة الحقن, وذلك بشكل متناسب وفق قانون تغير حرارة الإشباع مع الضغط, يتكثف البخار في الطرف السفلي من المنطقة -1- وتكون كمية النفط في هذه المنطقة قليلة, وهي تطابق الإشباع المتبقي وذلك بعد التوزع الهيدروديناميكي للسوائل الحارة وبعد تبخير المحتوى الحجمي.

المنطقة –2–: في هذه المنطقة تتناقص درجة الحرارة بشكل متتالي من الأعلى إلى الأسفل حتى درجة الحرارة الطبيعية للمكمن, ويطابق التشبع بالزيت هنا التشبع المتبقي بعد انتقال الماء الساخن.

المنطقة –3–: يدفع النفط في هذه المنطقة الباردة باتجاه البئر الإنتاجية.



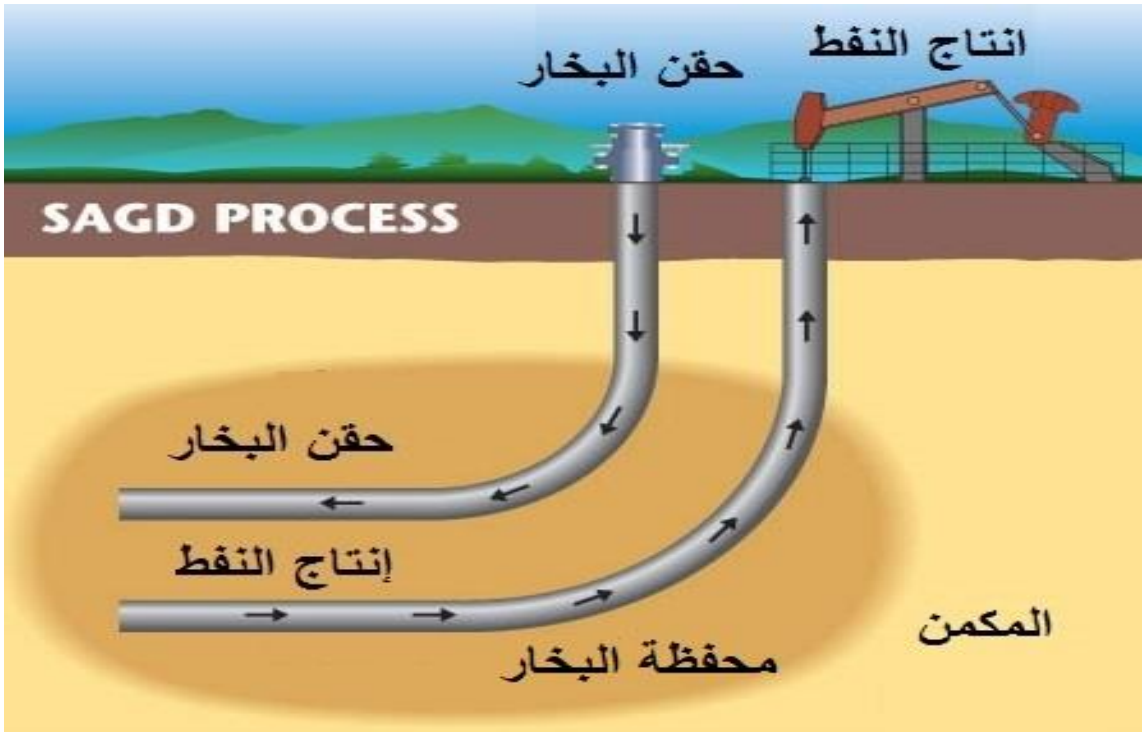
شكل رقم (2–2) : رسم تخطيطي لعملية حقن البخار

- **2-1-3 : طريقة الإنتاج بالجاذبية و بمساعدة البخار Steam-assisted Gravity Drainage (SAGD):**

هي إحدى طرق الاستخلاص المعزز حيث يتم فيها حفر بئرين أفقيين متوازيين إحداهما فوق الآخر، بحيث لا تكون المسافة بين البئرين كبيرة. يتم حقن بخار ذات درجات حرارة وضغوط مرتفعة في البئر الأعلى وذلك بشكل مستمر من أجل رفع درجة حرارة النفط وبالتالي تقليل لزوجته وزيادة حركيته (مثل كلّ الطرق الحرارية الأخرى)، مما يؤدي الى دفع النفط الساخن باتجاه البئر الأسفل ويتم انتاجه منها. في السطح يتم فصل النفط عن الماء والغاز والرمال والشوائب بواسطة فواصل خاصة قبل نقل النفط و تسويقه. تتميز هذه الطريقة في حفر بئرين أفقيين متوازيين، وهذا أصبح ممكن فقط بسبب تقنية الحفر الموجه. اخترع الدكتور روجر بالتر Dr. Roger Butler هذه الطريقة في سبعينات القرن الماضي حيث أنه كان مهندسا لشركة Imperial Oil، وفي عام 1975 انتقل الى Calgary, Albertaلكي يترأس قسم الأبحاث للنفط الثقيل، وقد طوّرَ مفهوم استخدام الآبار الأفقية المزدوجة وحَقن البخار لتَطوير واستخراج أنواع معينة من النفط الثقيل الذي كان معتقداً أنه غير قابل للاستخراج.

آلية عمل طريقة SAGD: يتم حفر بئرين متوازيين ومتجاورين بشكل شاقولي حتى الوصول إلى الطبقة الخازنة، وعندها يتم توجيه البئر أفقياً بحيث يخترق الخزان طولياً بمسافة (1000-3000 قدم) تقريباً، بحيث تكون المسافة بين البئرين من (4-6م). بداية، يحقن البخار الساخن الذي يتم توليده على السطح بواسطة مراجل خاصة (Boilers) في البئرين لمدة تتراوح بين (2-4) أشهر، وبعدها نوقف عملية حقن البخار في البئر الأسفل وتتابع في البئر الأعلى (بئر الحقن). سيقوم البخار الساخن برفع درجة حرارة النفط إلى نقطة تسمح له بالحركة تحت تأثير الجاذبية الأرضية باتجاه الأسفل نحو البئر الأدنى (بئر الإنتاج) الذي سيتم استخراج المزيج عبره وذلك باستخدام مضخات ذات كفاءة عالية

تسمح برفع النفط الثقيل إلى السطح . إن مبدأ العملية يكمن في أن البخار المحقون سيشكل محفظة البخار(Steam Chamber) تنمو شاقولياً وأفقياً في داخل الطبقة الخازنة للنفط. حيث أن البخار والغاز سيرتفعان نحو الأعلى بسبب كثافتهما المنخفضة مقارنة مع النفط الذي سوف يهبط للبئر الأدنى و ينتج عبره بينما البخار سوف يملأ الفراغات التي كان يحتلها .



شكل رقم : (2-3) رسم توضيحي لعملية حقن البخار بتقنيةSAGD

❖ 2-2 : الطرق الكهربائية الحرارية الحديثة :

تستخدم هذه الطرق الطاقة الكهربائية والطاقة الكهرومغناطيسية في حقول النفط الثقيل بهدف رفع حرارته وبالتالي زيادة حركيته على عكس الطرق الحرارية القديمة المستخدمة في تحسين عامل مردود مكامن النفط الثقيل مثل طريقة الحرق في الموضع او الغمر بالبخار الساخن فأن الطرق الكهربائية هي طرق حديثة تم تطويرها من اجل غايات تقنية وتجارية.

وتعزى **اسباب نجاحها** الى النقاط التالية:

1- الطرق الحرارية الكهربائية يتم تطبيقها عند عدم امكانية تطبيق الطرق التقليدية بنجاح.

2- العمق عامل غير مؤثر على فعالية التسخين لذلك تعتبر طريقة ناجحة في الابار ذات الاعماق الكبيرة.

3- هذه الطريقة مناسبة في الابار المغلفة بمواسير تغليف ذات سماكات كبيرة.

4- طريقة ناجحة في تسخين الطبقات ذات النفوذية المنخفضة جدا والتي لا يمكن اجراء عمليات الحقن فيها .

5- تستخدم بنجاح في المكامن قليلة السماكة .

يمكن أن تقسم الطرق الحرارية الكهربائية الى ثلاثة طرق رئيسية إعتماداً على تردد التيار الكهربائي:

A. التسخين بإستخدام تيار ذو تردد منخفض.

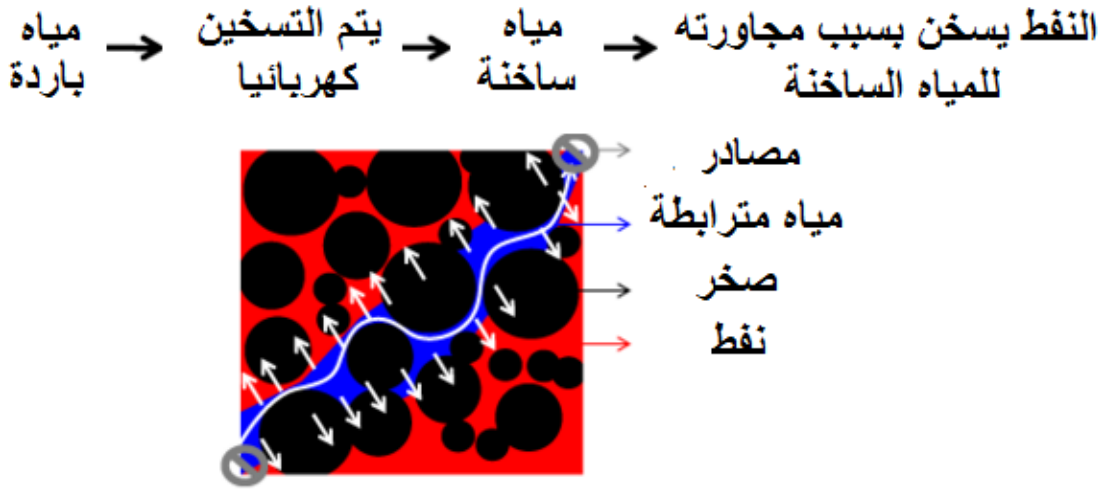
B. التسخين بإستخدام تيار متناوب (التسخين التحريضي).

C. التسخين بإستخدام تيار ذو تردد عالي (المايكرويف).

وسنتكلم عن كل طريقة من الطرق الثلاث بشكل مفصل:

- **1-2-2 : طريقة التسخين بإستخدام تيار ذو تردد منخفض:**

في هذه الطريقة يتم تمرير تيار كهربائي متناوب منخفض التردد في الطبقة الحاملة للنفط الثقيل حيث تتحول الطاقة الكهربائية الى حرارة. تؤدي الحرارة المتولدة في الطبقة الى تقليل لزوجة النفط وبالتالي زيادة حركيته إضافة إلى تمدد النفط وبالتالي زيادة قيمة الضغط الطبقي.



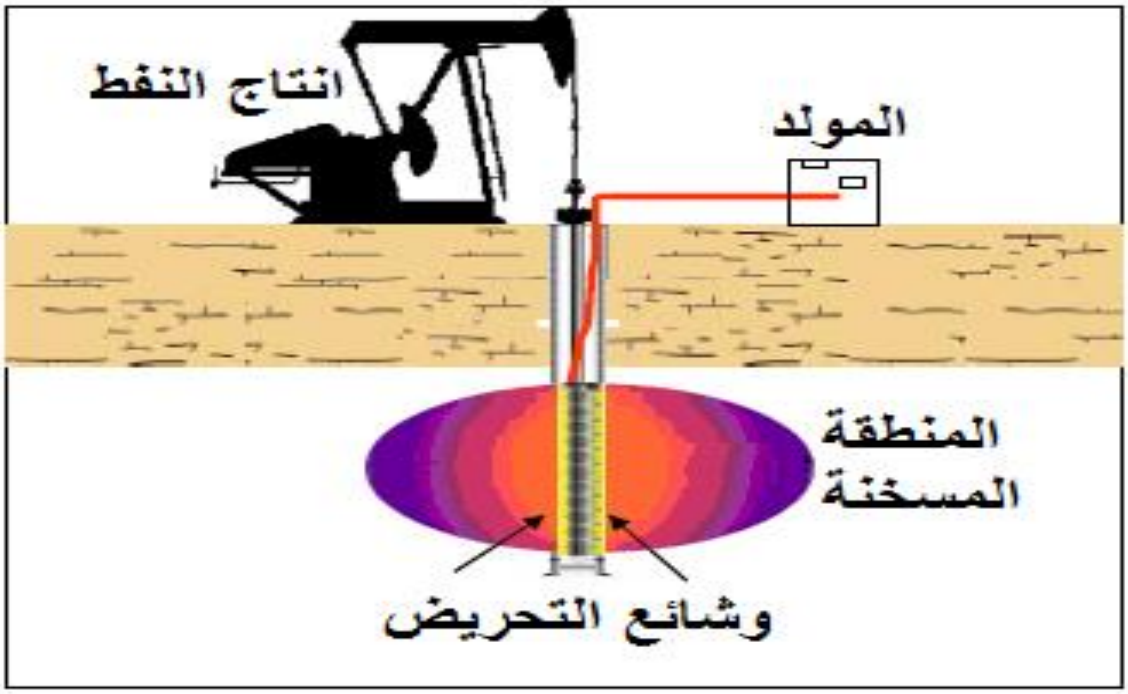
شكل رقم (2-4) : رسم تخطيطي لانتقال الحرارة من المياه الطبقية الى النفط

- **التطبيق الحقلي:**

تطبق هذه الطريقة عن طريق اختيار بئرين منتجتين متجاورتين (او اكثر) احدهما كقطب موجب والاخر كقطب سالب، حيث يكون مسار التيار هو المياه الطبقية والتي تكون ناقلة جيدة للتيار الكهربائي بسبب ملوحتها العالية وبالتالي ناقليتها العالية للتيار الكهربائي. تسخن الطبقة الى درجات حرارة عالية بشرط ان لا ترتفع درجة الحرارة الى درجة اعلى من درجة غليان الماء في شروط الطبقة، للحفاظ على توزع الحرارة. يتم اختيار مواقع الاقطاب الكهربائية بالاعتماد على اعماق الطبقات الحاملة للمياه الطبقية من اجل ضمان الحصول على تسخين كلي افضل.

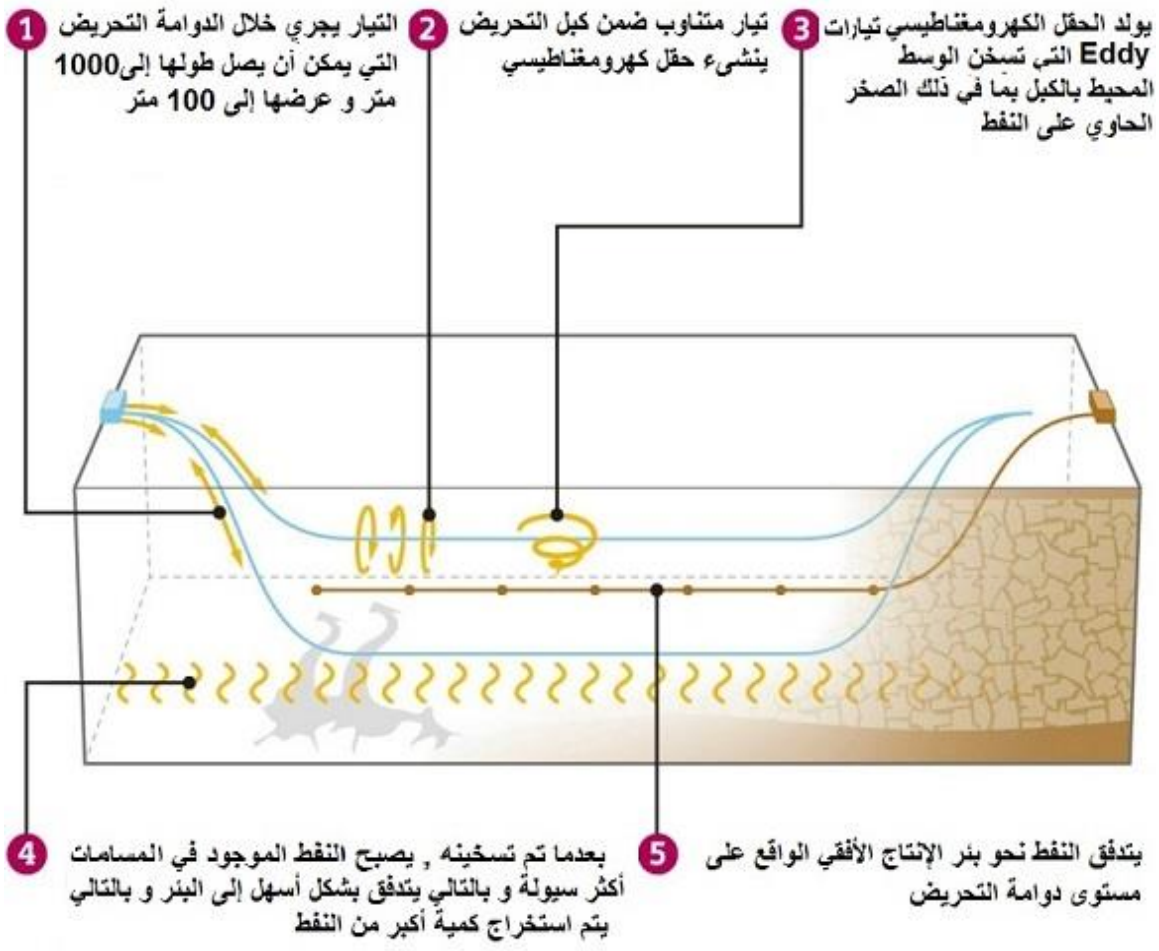
- **2-2-2 : التسخين بإستخدام تيار متناوب (التسخين التحريضي):**

في هذه الطريقة يمر التيار الكهربائي المتناوب في الوشيعة فيولد التيار حقل مغناطيسي تحريضي وهذا الحقل المغناطيسي التحريضي يولد بدوره تيارا كهربائيا متحرضا ثانويا حيث يقوم هذا التيار الثانوي التحريضي بعملية التسخين. تتكون الاداة المولدة لهذا التيار من عدد معين من الوشائع الموصولة مع اسفل مواسير الانتاج ومتوضعة امام المنطقة الحاملة للنفط. يتم تمرير التيار المتحرض في مواسير التغليق (Casing) ويتم تسخينها الى درجات حرارة عالية (يجب عدم رفع الحرارة الى درجة حرارة اعلى من درجة انصهار مواسير التغليف) وبدورها تنقل مواسير التغليف هذه الحرارة الى الطبقة الحاملة للنفط حيث تعمل على تسخين النفط الموجود في الصخر الخازن.



شكل رقم (2-5) : نظام التسخين التحريضي في بئر عمودية

تستخدم طريقة التسخين التحريضي بشكل كبير في تسخين النفط الثقيل في الابار العامودية ولكن بنسبة اقل في الابار الافقية, طريقة التسخين في الابار الافقية فلها المبدأ ذاته ولكن هنالك بعض الاختلافات حيث يمكن ان يصل طول وشيعة التحريض الى 1000 متر وعرضها الى 100 أي انها اطول بكثير من وشيعة التحريض المستخدمة في البئر العامودية .



شكل رقم (2-6) : مبدأ عمل طريقة التسخين التحريضي في بئر أفقية

- من خلال الإطلاع على بعض المراجع العلمية , تمكنا من الحصول على معلومات حول تطبيق هذه الطريقة في عدد من الحقول العالمية , على سبيل المثال نذكر ما يلي :

1.حقل سيبرا، كندا: عمق المكمن 5000 قدم يحتوي على نفط ثقيل (12-18) API ونفوذية قليلة (K<10md) لزوجة النفط عالية (350cp @40ºC).

تم استخدام طريقة التسخين التحريضي في المكمن بطاقة (5-8kw) حيث ازداد الانتاج من 10 براميل في اليوم الى 70 برميل في اليوم وانخفضت الاماهة بنسبة (30-60%)

2.حقل بول، البيرتا، كندا: وهو مكمن نفط ثقيل (10) API حيث تم استخدام طريقة التسخين التحريضي في المكمن بطاقة (10kw) لمدة 10 اشهر حيث ازداد انتاج المكمن بنسبة 50%.

3.حقل جينر، البيرتا، كندا: قامت شركة خاصة باستخدام طريقة التسخين التحريضي في بئر افقي بطاقة (30kw) حيث لم تنخفض نسبة الاماهة بشكل ملحوظ بينما ازدادت انتاجية النفط بسنبة كبيرة.

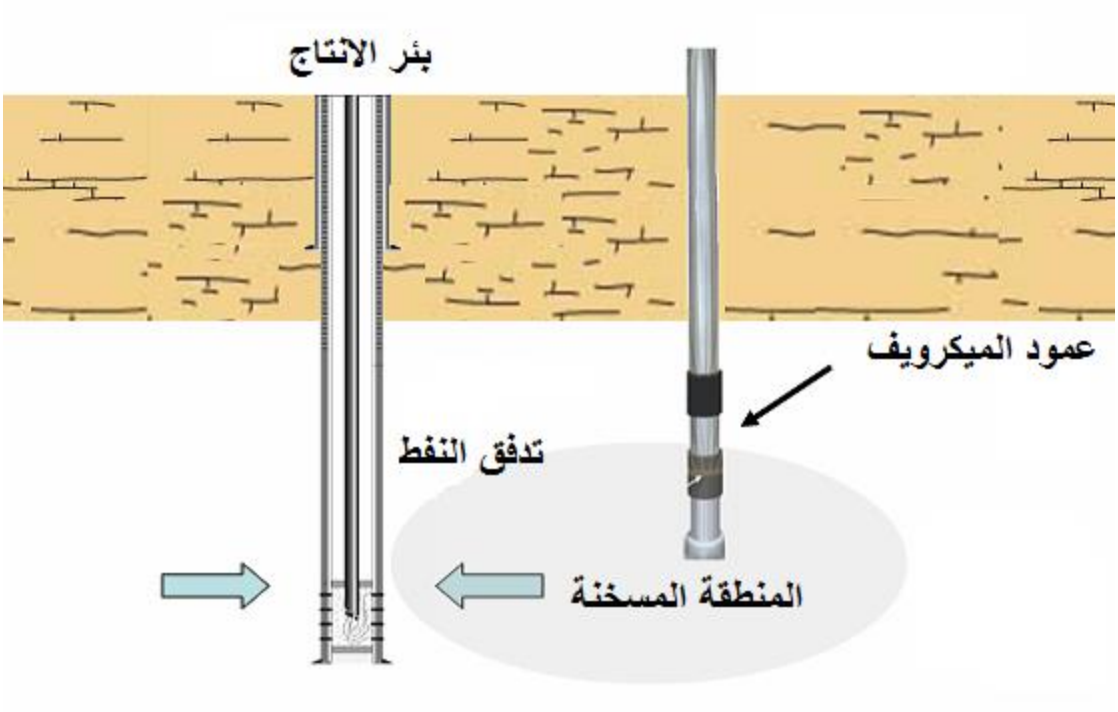
جدول رقم (2-1) : بعض الأمثلة الحقلية الأخرى

اسم الحقل	API	اللزوجة (cp)	العمق (m)	النفوذية (md)	سماكة الطبقة (m)	النتائج
Pelican Lake, Alberta	15	1500@17 ,C	450	1500	4	إزدياد بنسبة 50% في الانتاج التراكمي خلال سنتين
Frog Lake, Alberta	15	1500@17 ,C	450	450	6	إزدياد بنسبة 100% في الانتاج التراكمي خلال سنة واحدة
North slope, Alaskan	18	34@24,C	1023	150	31	إزياد فوري بنسبة20% في الانتاج الحالي
Orinoco, Venzuela	12	1200@52 ,C	1524	600	52	إزدياد بنسبة 50% في الانتاج التراكمي خلال سنتين
Canto Amaro, Brazil	20	20@45 ,C	450	450	10	إزدياد بنسبة 25% في الانتاج التراكمي خلال 6 سنوات

- **3-2-2 : طريقة التسخين باستخدام تيار ذو تردد عالي (المايكرويف):**

مصطلح المايكرويف يطلق عادة على الامواج الكهرومغناطيسية التي يكون ترددها اكبر من (1000MHz) بسبب قصر طول موجة المايكرويف حيث يتراوح طيف هذه الامواج بين (300-300,000MHz) وهذا المجال هو ما يعرف بمجال المايكرويف. يستخدم المايكرويف بشكل كبير في عمليات التسخين في مختلف المجالات مثل تسخين الطعام وصناعة الخزف وغيرها الكثير.

ولكن ما يهمنا حقا هو تطبيقات استخدام المايكرويف في عمليات التسخين اثناء اجراء عمليات الاستخلاص المعزز للنفط الثقيل بهدف زيادة عامل المردود النفطي حيث تستخدم هذه الطريقة كآخر وسيلة للتسخين عند عدم امكانية استخدام الطرق التقليدية.



شكل رقم (2-7) : رسم تخطيطي لنظام التسخين بالميكرويف

تتفاعل امواج المايكرويف مع المواد بثلاثة طرق مختلفة:

أ. مواد ناقلة لأمواج المايكرويف
ب. مواد ماصة لأمواج المايكرويف
ت. مواد عاكسة لأمواج المايكرويف
ث. حيث تكون الحرارة في اعلاها في المواد الماصة لأمواج المايكرويف.

تتفاعل امواج المايكرويف مع بعض المواد بشدة بينما تكون قليلة التفاعل مع مواد اخرى.

النفط الخام لا يمتص امواج المايكرويف بشكل جيد ولكن بخلط بعض المواد مع النفط الخام مثل (الكاربون النشط – اكاسيد الحديد – الميثانول) يصبح اكثر امتصاصا لأمواج المايكرويف وبهذا تصبح فاعلية استخدام امواج المايكرويف اكبر.

ان فاعلية التسخين بطريقة المايكرويف تعتمد على كمية المياه الطبقية الموجودة اسفل النفط، حيث ان امواج المايكرويف عند تردد معين تعمل على تسخين جزيئة الماء فقط حيث تسخن جزيئة الماء بشكل كبير بسبب وجود الحقل الكهرومغناطيسي ومن ثم تنتقل الحرارة من المياه الطبقية الى النفط الثقيل ويتم تسخينه مما يقلل من لزوجته وبالتالي يزيد من حركيته. ان هذه الطريقة مكلفة جدا وهي لا تطبق الا في حالات معينة بسبب التكلفة المرتفعة وفيما يلي جدول يوضح تكلفة استهلاك

قائمة الأسعار	الصباح	وقت الظهيرة	المساء
kW/h	7,67 US cent	13,43 US cent	4,08 US cent
تكلفة كل برميل	15,34-19,17 $	26,85 -33,56 $	8,17-10,20 $

الكهرباء في تركيا من اجل تسخين برميل نفط واحد.

العوامل المؤثرة على عملية التسخين بالمايكرويف:

تتأثر عملية التسخين بأمواج المايكرويف بعدد من العوامل اهمها:

أ. **تصميم مصدر امواج المايكرويف**

ب. **صفات العزل الكهربائي للمواد:** تعتمد صفات العزل الكهربائي للمواد على التردد المستخدم في العملية ودرجة الحرارة والخصائص الكهربائية للمادة.

في التسخين باستخدام المايكرويف تكون الصفة الغالبة هي العزل الكهربائي والحراري للمواد حيث ان الجزيئات المستقطبة المتشكلة بسبب مرور امواج المايكرويف في الطبقة المائية تسعى لان تكون موازية للتيار الكهربائي المتولد وان التناوب في التيار يحرض حركة دورانية للجزيئات المستقطبة بسرعة متناسبة لسرعة التناوب.

ان حركة الجزيئات هذه تسبب زيادة ملحوظة في الحرارة مثل تلك التي تحصل في جهاز المايكرويف المنزلي المستخدم لتسخين الطعام. ان الطبقات الرميلة الخازنة للهيدروكربون قادرة على امتصاص امواج المايكرويف بدرجة كبيرة وترتفع حرارتها الى درجات عالية (-300 400**°C**) بسرعة كبيرة حيث تولد امواج المايكرويف انفجارات صغيرة في الشقوق الضيقة وتسبب في فتحها بدرجة اكبر لتسمح للنفط بالجريان من خلالها الى قاع البئر. ان عمق اختراق امواج المايكرويف للطبقة صغير نسبيا ولكن بالنسبة للسوائل الطبقية ذات الحركية الجيدة او المقبولة فان طاقة امواج المايكرويف كافية للتسخين وزيادة الحركية بدرجة مقبولة اثناء جريان السوائل الطبقية الى البئر المنتجة وبالتالي تزيد من الانتاجية. ان عمق اختراق امواج المايكرويف يتعلق بتردد الموجات حيث بحسب العالم ميلان الذي قام بدراسة تقنية التسخين بالمايكرويف في الطبقات الرملية الخازن للنفط والذي اكتشف ان اكبر عمق اختراق ممكن لأمواج المايكرويف هو 15 متر عند التردد (2450MHz).

نذكر فيما يلي بعض التطبيقات الحقلية لهذه الطريقة و هي :

1.**حقل ساسكاتشوان، كندا:** حيث تم استخدام امواج مايكرويف بتردد (915MHz) لتسخين المياه الطبقية والتي بدورها سخنت النفط مما سبب زيادة في حركية النفط بالنسبة للماء وكذلك سبب زيادة في الانتاج بمقدار 9% عن الانتاج في حالة النفط كان باردا وتسبب كذلك في تخفيض ظاهرة تشكل الألسنة المائية.

2.قام العالم **كومار** بتطبيق هذه الطريقة في عدة ابار افقية وعامودية فوجد ان استخدام طريقة الغمر بالبخار الساخن اضافة الى طريقة المايكرويف تعطي توزع حراري افضل من استخدام كل طريقة على حدة. حيث استخدم امواج مايكرويف بطاقة (60kw) في بئر عامودية ولاحظ زيادة بنسبة 80% في الانتاج التراكمي.

3.قام العالم **اوفايس** بدراسة ثلاثة حقول مختلفة في نوع النفط:

- الحقل الاول يحتوي على نفط متوسط (24 °API)

- الحقل الثاني يحتوي على نفط ثقيل (11 API°)

- الحقل الثالث يحتوي على نفط ثقيل جدا ($7.7\ API^{\circ}$)

بعد تطبيق طريقة المايكرويف على الحقول الثلاثة وجد ان اثناء عمليات التسخين تحدث زيادة كبيرة في الانتاجية والذي يعزى لانخفاض لزوجة النفط حيث يمكن لهذه الطريقة ان تنتج حرارة بمقدار عشر اضعاف الطاقة الكهربائية التي تستهلكها وبهذا وصل العالم الى نتيجة بان طريقة التسخين بالمايكرويف تعمل بفعالية كبيرة في المكامن الخازنة للنفط المتوسط والنفط الثقيل والنفط الثقيل جدا.

❖ 3-2 : الحرق الموضعي In-situ Combustion :

طريقة الحرق الموضعي كانت موضع اهتمام في خمسينات القرن الماضي عندما تم نشر العديد من المقالات عن هذه الطريقة الخاصة و معظم مشاريع الاستثمار الحراري للنفط كانت مرتبطة بهذه العملية . الحرق الموضعي يطبق في المكامن الحاوية على نفوط ثقيلة , حيث يتم تسخينها بمساعدة حقن الهواء و الجزء المحترق من النفط الخام . النفط يقاد الى خارج المكمن بفعل البخار , المياه الساخنة و دفع الغاز وحيث تقل لزوجته .

يتم حقن اما بخار جاف او رطب حيث تنتشر النار من بئر حقن الهواء وصولا إلى بئر الإنتاج , ناقلة النفط و غازات الاحتراق نحو المقدمة . فحم الكوك الناتج عن عملية الاحتراق يبقى خلف النفط المزاح و يعمل كوقود , درجة الحرارة ترتفع بشكل كبير حتى 400°C to 600°C بحيث تكون كافية لتحويل النفط الثقيل الى منتجات خفيفة . إزاحة النفط تكون ناتجة عن عدة عوامل منها المياه الساخنة , البخار , دفع الغاز , التبخر و الهيدروكربونات الخفيفة .

وجد **(Wu and Fulton 1971)** خلال عدة تجارب أنه : عندما تتجاوز الحرارة 345°C (650°F), النفط سوف يخضع إلى عملية تكسير حراري لتكوين جزء متطاير و بقايا شبيهة بالفحم قليلة التطاير . المنتجات المتطايرة تحمل عبر تيار الغاز بينما البقايا الشبيهة بالفحم تحترق كوقود في منطقة الإحتراق . يتم نقل الحرارة المتولدة في منطقة الإحتراق إلى جبهة الإحتراق عبر وسائل التوصيل خلال هيكل التكوين و عبر الحمل الحراري خلال سوائل التبخر .

يعتمد نجاح هذه العملية على عدة بارامترات تم توضيحها من قبل **(Alexander 1962)** و يمكن إجمالها من خلال النقاط التالية :

1- الكمية الأولية من النفط التي تبقى في الصخر كي تحترق .

2- كمية الهواء المطلوبة لحرق النفط الذي يعمل كوقود لهذه العملية .

3- المسافة التي يمكن أن يبقى الإحتراق فعال خلالها بالتزامن مع عملية فقدان الحرارة .

4- حركية الهواء أو الغازات الناتجة عن الإحتراق .

هنالك عقبة كبيرة تم مواجهتها خلال استخدام عمليات الحرق الموضعي و هي عمليات الأكسدة عند درجات حرارة منخفضة **(Low Temperature Oxidation)**تتضمن تفاعلات الأكسجين الإضافية التي تتم عند درجات حرارة أقل من 300 °C , المشكلة تحدث بسبب تركيب الهيدروكربونات المؤكسدة التي تملك قطبية عالية تجعلها ذات لزوجة أكبر.

تطبيق الطرق الحرارية لرفع عامل المردود لمكامن النفط الثقيل أصبحت أكثر شيوعا بالتزامن مع انخفاض الإحتياطي النفطي حيث تقدم طريقة الحرق الموضعي العديد من الفوائد النظرية اذا تم إدماج الخصائص التشغيلية في التصميم و عملية بناء الحقل . هذه العملية لها قدرة على رفع جزئي للنفط داخل الخزان , و بالتالي تقيد المكونات غير المرغوبة للنفط من الحركة جنبا إلى جنب مع النفط , أيضا ليس هناك حاجة لتوليد طاقة من على السطح .

أنواع عمليات الحرق الموضعي :

1- الحرق الموضعي الجاف (أمامي) Dry In-situ Combustion

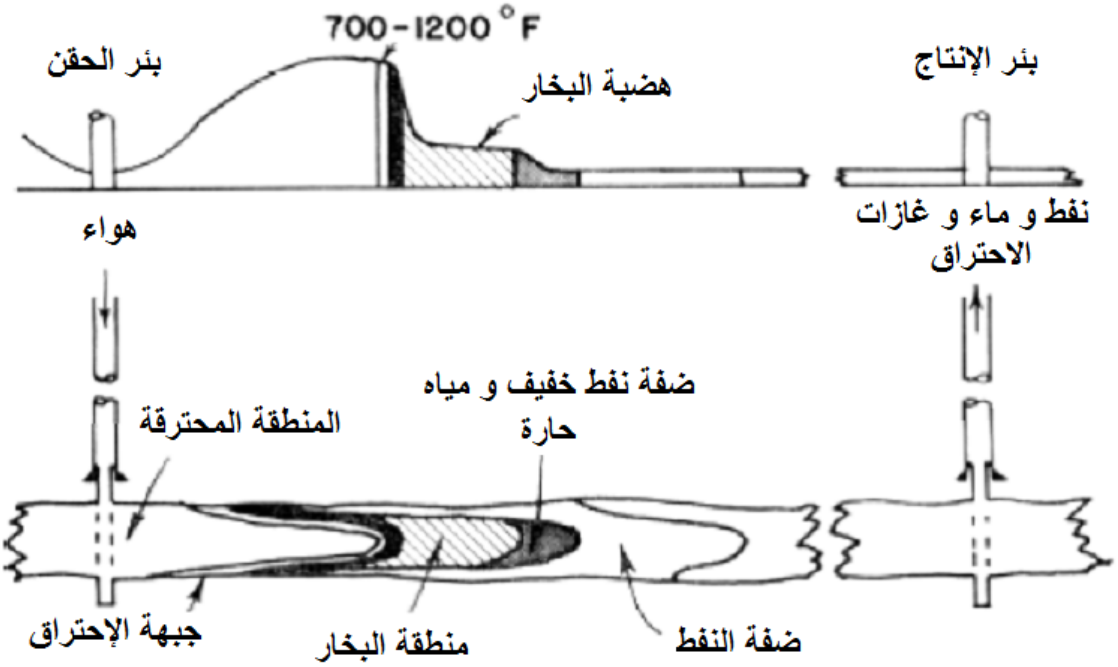
2- الحرق الموضعي الرطب و المروي جزئيا (أمامي) أيضا يعرف ب COFCAW

(combination of forward combustion and water flooding)

3- الحرق الموضعي العكسي Reverse In-situ Combustion

- **2-3-1 : الحرق الموضعي الجاف :**

أكثر الطرق شيوعا للحرق حيث يتم إشعال النفط من خلال حقن الهواء أو أي غاز مؤكسد مناسب في الطبقة , ينتج عن ذلك ما يسمى ب جبهة الإحتراق التي تنتشر خلال المكمن مقللة بذلك لزوجة النفط و تزيد المردود النفطي . يمكن لجبهة الإحتراأن تتحرك بشكل أسرع و الحرارة تصل بفعل التوصيل و الحمل الحراري إلى مناطق متقدمة ضمن الطبقة حيث تبلغ سرعة موجة الحمل الحراري ربع سرعة جبهة الإحتراق .



شكل رقم (2-8) : رسم توضيحي لعملية الحرق الجاف

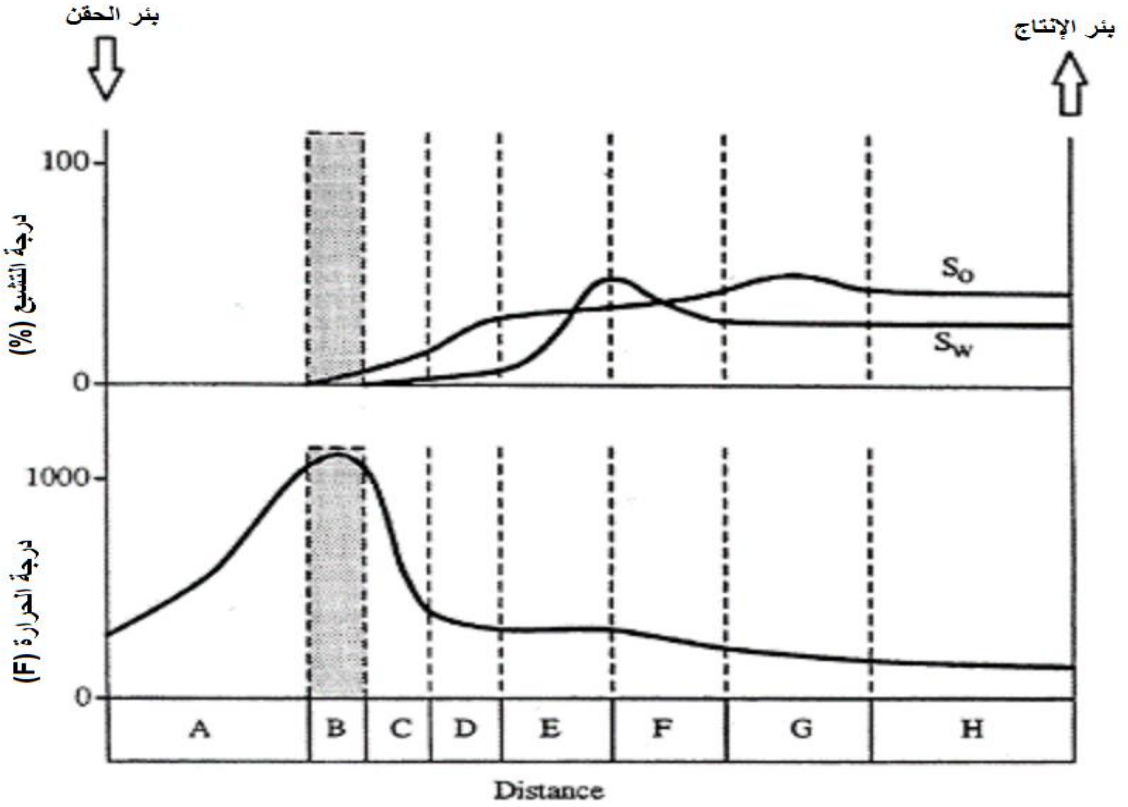
يوضح الشكل السابق عملية الإحتراق : أولا يتم حقن الهواء او اي غاز مؤكسد ضمن التكوين , النفط يشتعل بجوار بئر الحقن و جبهة الإحتراق تنتشر بإتجاه تحرك الغاز . بعد تحرك جبهة الإحتراق لمسافة واضحة نحو أبار الإنتاج , تبقى منطقة محترقة تمتد من بئر الحقن حتى جبهة الإحتراق .

هذه المنطقة تكون جافة و إزدياد درجة الحرارة يكون بفعل حقن الهواء حتى الوصول إلى أقصى درجة حرارة التي تكون في جبهة الإحتراق . حركة جبهة الإحتراق تكون ناتجة عن إحتراق كامل لكل الوقود. يحدث أمام جبهة الإحتراق إنخفاض مفاجيء لدرجة الحرارة بسبب التبخر , في هذه المنطقة تحدث عملية التبخر لكامل المركبات الخفيفة للنفط و الماء تاركة خلفها بقايا النفط. يوجد أمام منطقة التبخر منطقة التكثف أو ما يسمى أيضا (Steam Plateau)حيث تنخفض درجة الحرارة تدريجيا في هذه المنطقة إلى درجة حرارة الطبقة الأولية .

توجد عادة منطقة أو ضفة من النفط الخفيف و المياه العذبة أمام منطقة التكثف و ضفة المياه العذبة تنتج عن تكون الماء بعد إحتراق الهيدروجين الموجود في المواد الهيدروكربونية أما ضفة النفط الخفيف فهي ناتجة عن تكثف المواد الخفيفة من النفط الخام بينما المركبات الثقيلة فهي تستهلك كوقود لعملية الإحتراق.

تنطلق المنتجات الهيدروكربونية و تتحرك بإتجاه مناطق أبرد في الطبقة بسبب الإحتراق الكامل نتيجة لمرور الهواء في الطبقة يجعلها خالية تماما من المواد الهيدروكربونية , كمية الفيول المستهلك و معدل التفاعل في منطقة الإحتراق هما العاملان الرئيسيان اللذان يحددان كفاءة و فعالية هذه العملية .

أقصى مردود نفطي ممكن يكون عبارة عن الفرق بين الإحتياطي النفطي الأولي OOIP في بداية العملية و كمية النفط المستهلك كوقود .



شكل رقم (2-9) : رسم تخطيطي يبين مناطق توزع النفط و نواتج الإحتراق

المنطقة (A) : المنطقة المحترقة التي تحوي الحجوم المحترقة , هذه المنطقة تكون مملوءة بالهواء و من الممكن أن تحتوي على كميات قليلة من بقايا مواد عضوية صلبة غير محترقة . درجة حرارة المنطقة المحترقة تزداد من درجة حرارة الهواء المحقون إلى درجة حرارة جبهة الإحتراق بسبب التدفق المستمر للهواء عبر بئر الحقن .

المنطقة (B) : جبهة الإحتراق و هي تملك أعلى درجة حرارة , تكون رقيقة جدا ليس أكثر من بضع إنشات من السماكة . في هذه المنطقة يختلط الأكسجين مع الفيول و تحدث عملية أكسدة بدرجة حرارة مرتفعة . نواتج تفاعلات الإحتراق هي الماء و أكاسيد الكربون , يطلق على الفيول اسم (فحم الكوك) الذي في واقع الأمر ليس كربون و إنما هيدروكربون بنسب ذرية من H\C تتراوح من 0.2 إلى 0.6 . هذا الفيول يتشكل في منطقة التبخر أو التكسير الحراري أمام جبهة الإحتراق و هو نتيجة التكسير الذي يترسب فوق نسيج الصخر . كمية الفيول المحترقة تعد بارامترا مهما جدا على اعتبار أنها تحدد كمية الهواء اللازم حقنها لحرق حجم معين من المكمن .

المنطقة (C+D) : منطقة التكسر أو التبخر الناتجة عن جبهة الإحتراق و التي يتم فيها تغيير النفط الخام بسبب درجة الحرارة المرتفعة الناجمة عن عملية الإحتراق . المركبات الحفيفة تتبخر و تنتقل للأمام حيث تتكثف و تختلط مع النفط الأصلي .

المنطقة (E) : هضبة البخار , حيث تتكثف بعض الأبخرة الهيدروكربونية . معظم الأبخرة تتكثف بالتزامن مع تكثف البخار , درجة حرارة هضبة البخار تعتمد على الضغط الجزئي للمياه في الطور الغازي . إعتمادا على درجة الحرارة , النفط الأصلي قد يخضع لتكسير حراري خفيف , غالبا ما يسمى (Visbreaking) الذي عادة ما يقلل من لزوجة النفط .

المنطقة (F) : ضفة المياه التي تتواجد على الجزء الأمامي من هضبة البخار حيث درجة الحرارة أقل من درجة حرارة تشبع البخار . ضفة المياه هذه تقلل من الحرارة و التشبع و بالتالي تزيد من التشبع بالنفط .

المنطقة (G) : ضفة النفط , تحتوي على غالبية النفط المزاح بما في ذلك المركبات الخفيفة الناتجة عن التكسر الحراري .

المنطقة (H) : أمام كل هذه المناطق المتأثرة , يوجد المكمن الأصلي غير المجتاح . التشبع بالغاز سوف يزداد بشكل طفيف في هذه المنطقة بينما تكون الحركية كبيرة لغازات الإحتراق .

- **2-3-2 : الحرق الموضعي الرطب :**

هذه الطريقة تعرف ب الحرق الجاف أو المروي جزئيا و تتضمن حقن متناوب بين الهواء و الماء , تم تطوير هذه الطريقة عندما اكتشف أن درجات حرارة المناطق المحترقة سوف تكون عالية جدا بسبب السعة المنخفضة لحقن الهواء التي تقيد حركة كميات من الحرارة , لهذا تم استخدام الماء أثناء أو بعد عملية الحرق للمساعدة في عملية نقل الحرارة من المنطقة المحترقة إلى المناطق الأمامية . إضافة المياه إلى مجرى الهواء المحقون تزيد من الحرارة المحسوسة لتيار الهواء المحقون , الحرارة المحسوسة للهواء الجاف لم تكن كافية للحفاظ على الحرارة و بالتالي فإن إضافة المياه إلى الهواء المحقون زادت من قدرة الهواء في المحافظة على الحرارة و بالتالي زيادة سرعة موجة الحمل الحراري (جبهة نقل الحرارة) التي عادة ما تتبع جبهة الإحتراق . معدل الهواء و الماء يزداد حتى يصل إلى نقطة يتطابق فيها مع سرعة جبهة الإحتراق و بالتالي ينتج أعلى درجة حرارة ممكنة لجبهة الإحتراق خلال عملية الحرق الموضعي الأمامي .

وفقا ل **Dietz and Weijdema (1963)** فإن عملية حقن المياه تهدف للحفاظ على الحرارة و نقلها من المنطقة المحترقة إلى أمام جبهة الإحتراق حيث توجد المناطق الأبرد , أيضا تم اقتراح أن هذه الطريقة مناسبة للطبقات الرقيقة حيث أن إنتقال الحرارة نحو الطبقات المجاورة يكون واضحا , حقن مياه إضافية ينتج جبهة مياه ساخنة تتحرك بسرعة أكبر من سرعة جبهة الإحتراق مما يؤدي لنقل الحرارة نحو مناطق تقع أمام جبهة الإحتراق .

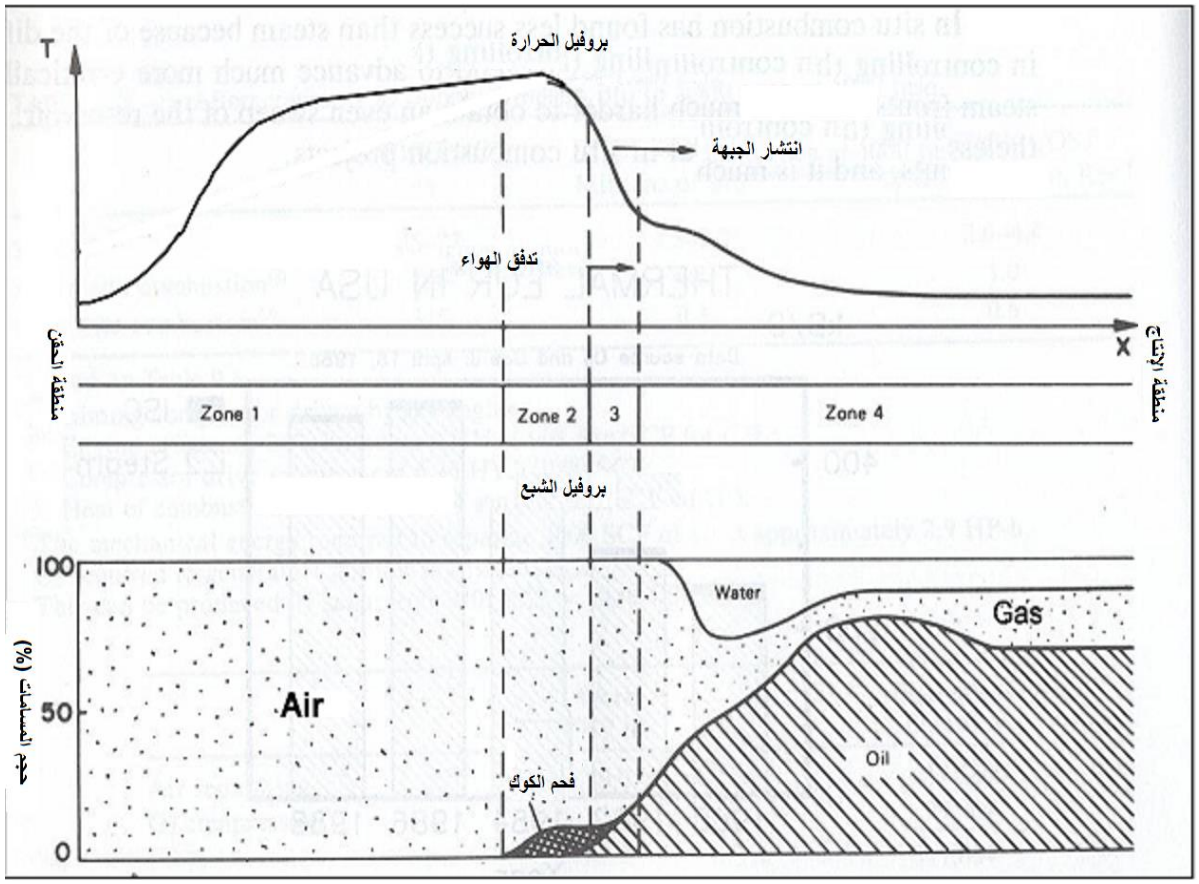
في حال إزدياد معدل (ماء-هواء) فإن الحرارة القصوى في جبهة الإحتراق تنخفض و إضافة المياه أيضا تتسبب في تشكل منطقة بخار كبيرة أمام منطقة الإحتراق و بالتالي تسبب بحرق حجوم إضافية من المكمن مقابل حقن حجم معين من الهواء و يعزى ذلك إلى الإستهلاك المنخفض للفيول في منطقة الإحتراق . الهدف من ذلك هو زيادة سرعة جبهة الإحتراق من خلال زيادة معدل (ماء-هواء) و بالتالي السماح لموجة الحمل الحراري باللحاق بجبهة الإحتراق مما سوف يؤدي إلى أقصى درجة حرارة لجبهة مياه الإحتراق .

هذه الطريقة المعدلة تم تطبيقها في **(Athabasca deposit)** و تم انتاج 29,000 برميل من النفط من الإحتياطي المقدر ب 90,000 برميل .

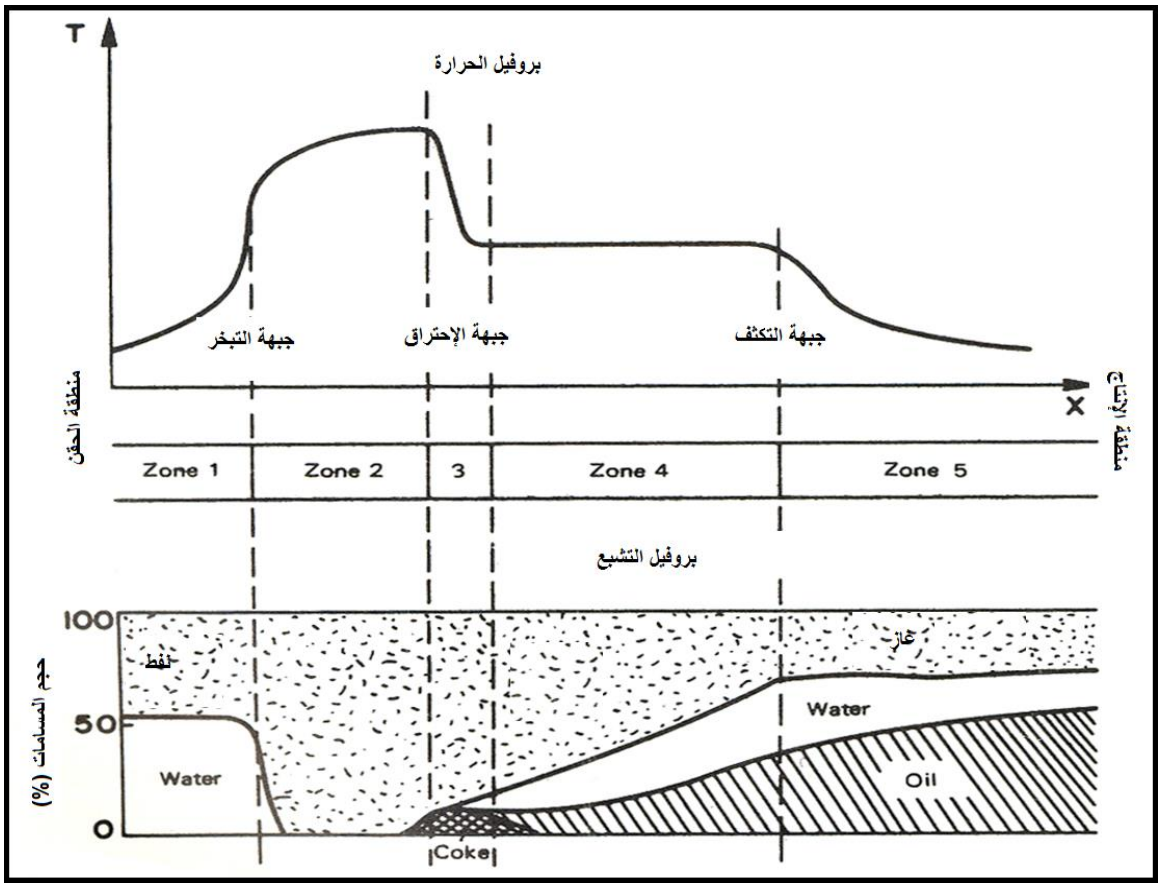
التحديات التقنية :

في حالة المكامن ذات النفوذية القليلة , فإنه من الصعب حقن الهواء و المياه سوية بالمعدلات المطلوبة . في مثل هذه الحالات , تتم عملية الحقن بالتناوب بين الهواء و الماء . يتم التحكم بدرجة حرارة الإحتراق من خلال إجراء تعديلات على نسبة (هواء-ماء) , على سبيل المثال : لزيادة درجة الحرارة يتم تحقيق نسبة منخفضة من (ماء – هواء) و العكس صحيح .

- توضح البروفيلات التالية الفرق بين عملية الحرق الجاف و الرطف حيث يظهر توزع الحرارة و التشبع على طول المسافة بين بئر الحقن و بئر الإنتاج .
- يلاحظ أن معظم الحرارة المتولدة في الحرق الجاف تبقى خلف جبهة الإحتراق و بالتالي لا تساهم في تسخين النفط و تقليل لزوجته لذا تم اللجوء إلى الحرق الرطب لنقل بعض من الحرارة إلى أمام جبهة الإحتراق



شكل رقم (2-10) : الحرق الجاف



شكل رقم (2-11) : الحرق الرطب

- **3-3-2 : الحرق الموضعي العكسي :**

خلال هذه العملية يتم بدء منطقة الإحتراق عند بئر الإنتاج حيث تتحرك جبهة الإحتراق العكسية بالتزامن مع الهواء المحقون من بئر الحقن . جبهة الإحتراق تتحرك مع استهلاك كامل الوقود لأن كمية الوقود فائضة , و بالتالي فإن جبهة الإحتراق تتحرك من البئر المنتج نحو بئر الحقن أثناء جريان النفط خلال منطقة الإحتراق بإتجاه البئر المنتج .

هذه الطريقة مناسبة للمكامن الحاوية على نفوط لزجة جدا لأنه خلال هذه العملية لا تتشكل ضفة نفط و بالتالي فإن مقاومة الجريان تقل مع الزمن . السبب الرئيسي لتطوير هذه الطريقة هو أن الحرق الأمامي أو التقدمي غير فعال على النفوط ذات الحركية القليلة (لزجة) على اعتبار ان الحرق العكسي يولد حرارة بجوار أبار الإنتاج و بالتالي تعطي حركية أكبر للنفوط الثقيلة.

عند الوصول للإشتعال المطلوب , جبهة الإحتراق سوف تغير اتجاهها عندما يصبح الأكسجين بكميات متوفرة و بالتالي تتحرك جبهة الإحتراق بإتجاه البئر المنتجة خلال المناطق المسخنة مسبقا فتصبح عملية حرق أمامية .

التحديات التقنية :

حسب **Dietz and Weijdema (1968)** فإن الحرق العكسي مشابه لعملية الإشتعال التلقائي , التي خلالها يستهلك الأكسجين بالقرب من الحاقن مما سيغير العملية إلى عملية حرق أمامي , و ذكر تاريخيا أنه من الصعب الحفاظ على الحرق العكسي بسبب استنزاف الأكسجين بالقرب من بئر الحقن.

أضاف **Elkins and Lutton (1974)** أن استدامة حقن الهواء في مكمن غير مسخن سوف يؤدي إلى عملية إشتعال تلقائي بجانب بئر الحقن .

إحدى السلبيات الأخرى للحرق العكسي أشير إليها من قبل **Gunn and Krantz (1980)** و هي عدم الإستقرارية الملازمة للعملية التي تنشأ خلال الحرق ضمن القنوات الضيقة و بالتالي حرق غير فعال.

أجريت عدة اختبارات حقلية لهذه الطريقة و كانت النتائج مطابقة للإستنتاجات التي توصل إليها المؤلفين المذكورين أعلاه و بالتالي حكم على هذه الطريقة بالفشل سواء من الناحية التشغيلية أو الإقتصادية . أولا : معظم التفاعلات العادية للنفوط الخامة سوف تؤدي في نهاية المطاف إلى اشتعال تلقائي و إيقاف تلقائي للحرق العكسي . السبب الثاني هو أن تركيز الوقود المستهلك خلال الحرق العكسي و الحرق الأمامي هي متساوية , و كل واحدة منهما مساوية لخطوة واحدة من الحرق الأمامي الجاف ما يعني أن تكلفة الهواء كانت حوالي ضعف تكلفة عملية الحقن الأمامي .

محاسن عملية الحرق :

1- المركبات الخفيفة المتصـاعدة من النفط عند الدرجة c° (400- 600) تعتبر عناصـر مهمة للنفط الثقيل .

2- على اعتبار انه يوجد فرق في مرونة الصخر والسوائل عند هذه الدرجة العالية من الحرارة فان % (10 – 2) من السوائل يزاح من الطبقة تحت تأثير هذا الفرق.

3- يتحول الماء الموجود في الطبقة إلى بخار ويؤثر على النفط كمزيج , و يكون هنا أمام تأثير البخار كمزيج إضافة إلى فعالية الحرق .

4- يتشكل ناتج احتراق غاز ($C O 2$) بنسبة % (15- 5) ويعتبر عاملا جيدا للإزاحة .

5- عند زيادة درجة الحرارة تتولد من النفط مواد منشـطة للتوتر السـطحي وهذه المواد تحسـن من عملية الإزاحة.

معوقات طريقة الحرق الداخلي للطبقة :

1- ازدياد التآكل في المعدات نتيجة تصاعد ($CO2$) مع ($S2H$) (قد تخرج المضخات من الإنتاج بعد 3 أشهر) .

2- تشكل المستحلبات النفطية في الآبار الإنتاجية .

3- ظهور وترسب الرمل في منطقة قاع البئر (المكامن الرملية).

4- حركة الجبهة الغازية غير منتظمة .

5- ازدياد العامل الغازي الذي قد يصل إلى ($m^3 \square m^3$ 2000) أو أكثر .

(الفصل الثالث)

حقول سازابا (سعيدة – زاربة – باباسي)

❖ 3-1 : الخصائص المرنة للنفط الثقيل :

بما أن النفط ثقيل هذا يعني أنه يتمتع بلزوجة عالية أضـف إلى ذلك أن مثل هذه السـوائل تتمتع بوجود بنية داخلية تزداد تماسـكاً مع الزمن مما يجعل عملية تحريكها عند تطبيق ضـغوط صـغيرة عليها غير ممكنة وبمعنى آخر فإن النفط الثقيل يتمتع بوجود إجهادات قص ابتدائية τ_o يمكن معرفة نوعية النفط من خلال رصد تغير قيمة الإنتاجية لأنبوبة أفقية عند تغير الضغط المطبق على طرفي الأنبوبة والنتائج المرصـودة ترسـم على شـكل دليل بياني بين (Δp , Q) كما هو موضـح في(الشكل2-2) الذي يبين أن العلاقة بين الإنتاجية وفرق الضغط بالنسبة للسوائل النيوتونية هي علاقة خطية تخضع لقانون بوازيل التالي :

$$Q = \frac{\pi . R^4 \ \Delta P}{8 . L . \mu}$$

Q : الإنتاجية ، m^3/day .

Δp : فرق الضغط ، Pa .

μ :اللزوجة , Pa.s .

L.R :أبعاد أنبوبة الجريان ، m .

إن المســـتقيم الممثل بالعلاقة (Q,Δp) في هذه الحالة ينطلق من المركز وبالتالي فإن ميل هذا المستقيم يعطى بالعلاقة :

$$tg\ a = \frac{\pi \cdot R^2}{8 \cdot L \cdot \mu}$$

وبالتالي نستطيع تحديد لزوجة السائل المدروس .



الشكل (3-1) علاقة الغزارة بالضغط بالنسبة للسوائل النيوتونية وغير النيوتونية

- أما بالنســبة للســوائل غير النيوتونية المســتقيم لا ينطلق من المركز وبالتالي علاقة بواز يل تأخذ الشكل التالي :

$$Q = \frac{\pi . R^4 \left(\Delta P - \frac{4}{3} \Delta Po \right)}{8 . L . \mu}$$

Δpo :فـرق الضـــــغـط البدائي(Pa) الواجب تطبيقه

على السائل غير النيوتوني حتى يتغلب على إجهاد القص البدائي لكي يبدأ السائل الجريان وفي هذه الحالة فإن ميل المســـتقيم لا يحدد اللزوجة مباشـــرةً وإنما يجب معرفة Δpo حتى نتمكن من تحديد اللزوجة لسائل من العلاقة:

$$\mu = \frac{\pi . R^4 \left(\Delta P - \frac{4}{3} \Delta Po \right)}{8 . L . Q}$$

❖ 2-3 :الخصائص الجيولوجية و الخزنية لحقول سازابا (سعيدة – زرابة – باباسي)

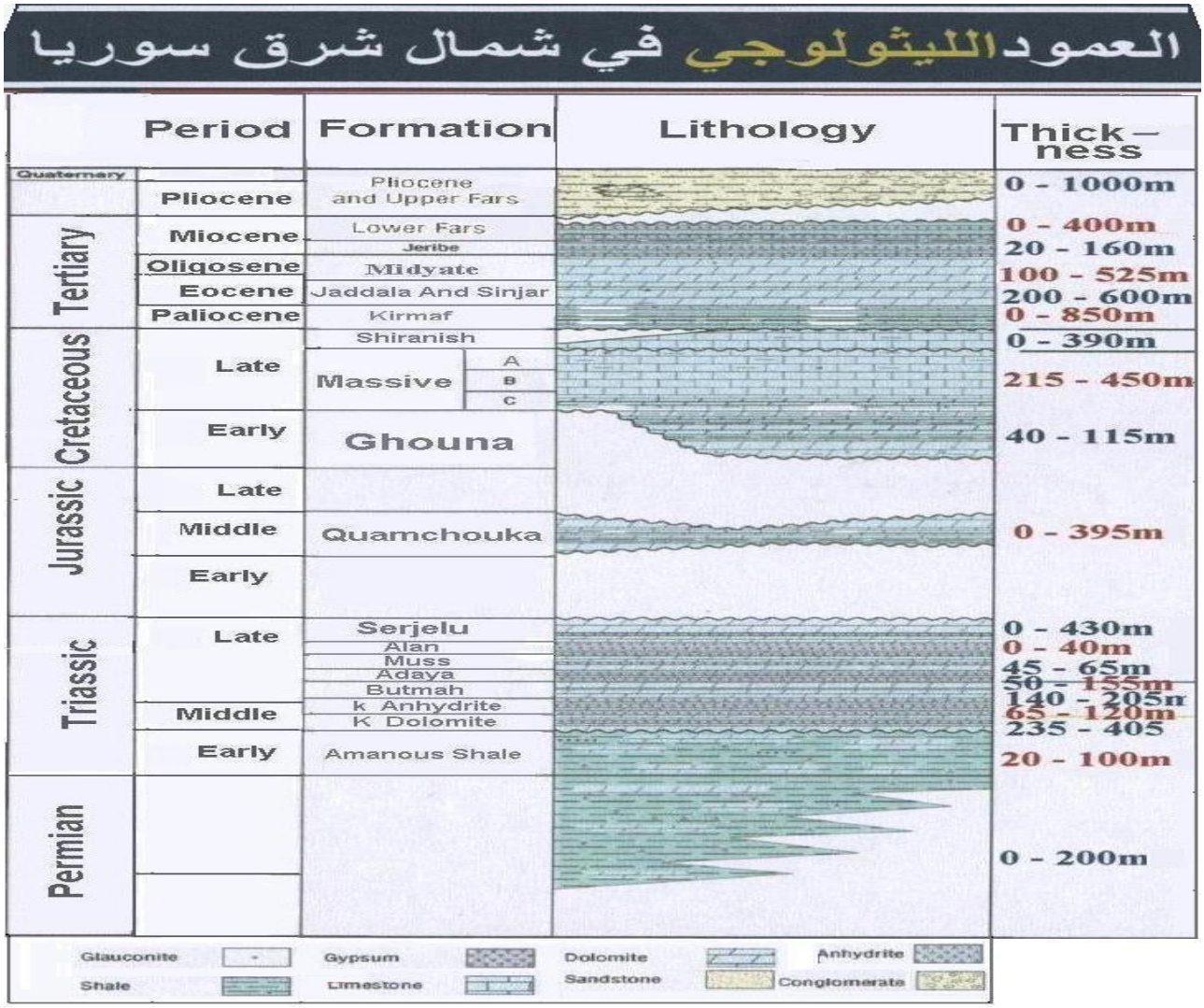
3-2-1 : مواقع التراكيب المدروسة :

تقع تراكيب (سعيدة- زاربة) في القسم الشمالي الشرقي من سورية بجوار الحدود التركية وتبعد حوالي 35 كم إلى الشـرق من مدينة القامشـلي وترتفع حوالي(550) م عن سـطح البحر. وهي تشـكل جزءاً من التراكيب الجيولوجية للوحدة التكتونية المسـماة منخفض ما بين النهرين (منطقة الميزوبوتام)حيث تشـكل هذه التراكيب الأجزاء الغربية من الوحدة بنيوياً ، تشـكل هذه التراكيب وحدة بنيوية واحدة على شكل محدبات ذات محور يأخذ اتجاه شمال شرق – جنوب غرب وتقع امتداد وإغلاقات هذه التراكيب في الأراضي التركية المجاورة.

3-2-2 : الوضـع التركيبي : تم وضـع خارطة تركيبية لأعلى تشـكيلة الشـيرانيش وذلك اعتماداً على المعطيات المأخوذة من نتائج حفر الآبار ومقارنتها مع نتائج المســوحات الجيوفيزيائية في المنطقة .

ويلاحظ أن سطح تشكيلة الشيرانيش يميل باتجاه شمال غرب – جنوب شرق بحدود (3) درجات في القسم الغربي من تركيب سعيدة و(1.5) درجة في القسم الشرقي من هذا التركيب وتبلغ أبعاد تركيب سعيدة عند خط التقاء النفط بالماء(2.5×7.5) كم وهو عبارة عن الجناح الجنوبي لتركيب (شامراو) التركي . أما تركيب زاربة فيمثل الجناح الجنوبي لتركيب (أكرتيبه) التركي وتبلغ أبعاده عند خط التقاء النفط بالماء (2×9.5) كم وهو امتداد لتركيب سعيدة باتجاه الغرب وتعتبر منطقة تراكيب سعيدة – زاربة ذات تكتونية معقدة نوعاً ما . حيث يشكل الفالق الذي يأخذ اتجاه شمال شرق–جنوب غرب والمار بين آبار سعيدة (2) وسعيدة (6) والمستمر باتجاه الشرق حتى تركيب باباسي أكبر فالق تأثرت به هذه التراكيب .حيث تبلغ رميته الوسطية حوالي (150m) .

3-2-3 : العمود الليثولوجي في المناطق المدروسة :



4-2-3 : الوصف الليثولوجي

1- الغضار :يتألف الغضار بشكل عام من صخور لها مواصفات واحدة تقريبا, وتحتوي على شوائب من البيريت,ويعتبر هذا الغضار شديد التهدم,مما يؤدي إلي توسيع قطر البئر في هذه المجالات.

2-الحجر الكلسي:بشكل عام الصخر غضاري وأحيانا عالي الغضارية,يحتوي على شوائب من الغلوكونيت و البيريت,بالإضافة إلى وجود مستحاثات,ويلاحظ بأسفل المقطع ازدياد نسبة المواد الغضارية في الصخر,حيث يتحول إلى حجر كلسي مارلي.

5-2-3 : تشكيلة الشيرانيش:

تعود من حيث العمر إلى عصر أعلى الكريتاسي الأعلى من الحقب الثاني الجيولوجي وتتراوح سماكة هذه التشكيلة بين(140-210m) وتزداد السماكة من الشرق أي من تركيب سعيدة باتجاه الغرب أي باتجاه تركيب زاربة.وتعتبر هذه التشـــكيلة من أهم التشـــكيلات النفطية التي عثر عليها في هذا التركيب,حيث يشــكل الكيرماف الصــخر الخازن للنفط والغاز .يمكن تقســيم هذه التشــكيلة حســب مواصفاتها الصخرية والخزنية إلى ثلاث نطاقات:

1)– النطاق الأول:وهو النطاق الحامل للنفط .ويتألف من حجر كلسي ,وتكون بشكل عام الشوائب المرافقة هي بلورات من البيريت وحبيبات الغلوكونيت وخاصـــة في القســـم العلوي من المقطع , بالإضافة إلى عقد من الشيرت,ومسامات الصخر مشبعة بنفط ثقيل ,بشكل عام تتخلل هذا النطاق طبقات رقيقة من الحجر الكلسي الأبيض لا يحتوي على شواهد نفطية.

2)–النطاق الثاني:يعتبر نطاقا انتقالي بين النفط والماء وهو يحتوي على حجر كلســـي غضـــاري , ويحتوي على عقد من الشيرت ويلاحظ وجود بعض المجالات الرقيقة الحاوية على تكهفات ومسامات ممتلئة بالإسفلت أو النفط الثقيل جدا.

3)–النطاق الثالث:وهو نطاق كتيم في أجزاء من التركيب ومشـــقق حاوي على مياه طبقية في أجزاء أخرى.يتألف من حجر كلسي مارلي وأحيانا بيريتي جزئيا يتداخل

في هذا المقطع طبقات رقيقة من الحجر الكلسي الحواري ,لا توجد أي آثارنفطية في هذا النطاق,وإنما يعتبر حاملا للمياه الطبقية إذا كان مشققا.

الدراسة السحنية لتشكيلة الشيرانيش :

من دراستنا للمقطع الليتولوجي بين أبار حقل سعيدة وزاربة يلاحظ انه استنادا إلى التغيرات السحنية في الاتجاه العمودي والذي يظهر واضحا من دراسة العينات الفتاتية والاسطوانية و القياسات الكهربائية ,يمكن تمييز ثلاث نطاقات من صخور كلسية في طبقة الشيرانيش:

1)-**النطاق الأول :** تبلغ سماكته الوسطية (90m) ويعتبر ذو سحنة متماثلة على طول المقطع ,حيث يتألف من صخور حبيبية أو مبلورة ذات مسامية جيدة (19%) وسطيا,وخالية تقريبا من الشوائب الغضارية (اقل من5%) وتتخلل هذه الصخور طبقات كلسية ذات بنية ناعمة التبلور جدا وكتيمة.

2)-النطاق الثاني : تبلغ سماكته الوسطية (40m) وهو ذو سحنة مغايرة للأولى ,حيث يظهر الحجر الكلسي (نسبة المواد الغضارية 40% وسطيا) ذو البنية الناعمة جدا والمسامية الضعيفة ,لذلك فان المواصفات الخزنية تعتبر سيئة في هذا النطاق.

3)-النطاق الثالث : فيمثل الجزء المتبقي من الشيرانيش, فهو سحنة تختلف عن سحنة النطاقين السابقين حيث يظهر على شكل صخور ذات بنية ناعمة جدا ,وتزداد نسبة المواد الغضارية بين % (20-30) في أطراف تركيبي سعيدة وزاربة ,ويتحول الصخر إلى حجر كلسي غضاري ,أما في الوسط فان الصخر يصبح مارليا.

أما أفقيا فالتغيرات السحنية بين النطاقات الثلاثة أعلاه تعتبر طفيفة :

ا)- **النطاق الأول:** يلاحظ أفقيا أن الصخور الكلسية تكون نقية في تركيب سعيدة, وتزداد نسبة المواد الغضارية تدريجيا باتجاه الغرب حيث تبلغ اعلى نسبة لها في منطقة سعيدة بئر رقم (2),ثم تقل مرة أخرى باتجاه آبار زاربة,أما في أقصى الغرب فيلاحظ ظهور دلمتة (بئر زاربة رقم(3)).

ب)- النطاق الثاني :لا نلاحظ أي تغير سحني للصخور الكلسية الغضارية حيث تحافظ على مواصفاتها باستثناء ظهور نسبة عالية من الشوائب في منطقة سعيدة (101) متمثلة بعقد من الشيرت وبلورات من البيريت وحبات الغلوكونيت.

ج)-النطاق الثالث: تكون سحنة هذا النطاق كلسية غضارية في شرق وغرب المنطقة المدروسة ,أما في المنتصف تتحول السحنة إلى صخور مارلية.

6-2-3 : تشكيلة الماسيف:

تعود هذه التشكيلة من حيث العمر الجيولوجي إلى العصر الكريتاسي العلوي من الحقب الثاني الجيولوجي ,ويقسم إلى ثلاث نطاقات ذات المواصفات الخز نية والليتولوجية المتباينة وهي:

1)-النطاق الأول: تتراوح سماكته ما بين (80-100 m) ,يتألف من حجر كلسي مشبع بنفط ثقيل أو مؤكسد .مع الحجر الكلسي طبقات رقيقة من الحجر الكلسي الأبيض لا يحتوي على شواهد نفطية .

2)- النطاق الثاني: تبلغ سماكتها الوسطية(30m) ويتألف من حجر كلسي ابيض ودولوميت.

ا- مواصفات الحجر الكلسي : يحتوي أحيانا على تشققات حاملة للإسفلت في بعض المجالات .

ب- مواصفات الدولوميت:ضعيف الكلسية متشقق أحيانا ويحتوي على نفط مؤكسد أو إسفلت .

3)- النطاق الثالث: يكون حامل للمياه الطبقية ويتألف هذا النطاق بشكل عام من دولوميت غضاري يحتوي على شوائب من الغلوكونيت البيريت, مشقق أحيانا والشقوق ممتلئة بالكالسيت أو الغضار وأحيانا مواد إسفلتية مؤكسدة.

❖ 3-3 : الخصـــائص البتروفيزيائية للمكمن المحددة من تحاليل العينات الأســـطوانية والقياسات الكهربائية :

الصـخور الخازنة للنفط أو الغاز هي تلك الصـخور التي لها مميزات اسـتيعاب هذه الموائع وإعطائها أثناء اســـتثمار حقول النفط والغاز ، ولعل أهم الخواص الفيزيائية للصـــخر الخازن هي المســـامية والنفوذية . وهاتان الخاصـــتان تلعبان الدور الرئيســـي في تقييم احتياطي النفط والغاز في الصـــخر ، وتحديد طرق الإنتاج الصحيحة للطبقة.

3-3-1 : المسامية : Porosity

هي النسبة المئوية لحجم الفراغات في صخر ما إلى حجم الصخر الكلي أي :

$$m = \frac{Vp}{Vr} 100 = \frac{Vr - Vs}{Vr}$$

حيث V_p : حجم الفراغات الكلية .

V_s : حجم الحبيبات الصلبة في الصخر .

V_r : حجم الصخر الكلي.

وهذه المسامية (m) تحدد المسامية الكلية (المطلقة) لأنها تمثل نسبة حجم الفراغات الكلية إلى حجم الصـــخر الكلي , وحجم الفراغات الكلية هي حجم الفراغات المســـامية المتصـــلة مع بعضـــها وحجم الفراغات (المغلقة أو الميتة) والتي لا تســـتخرج منها الســـوائل إلا بعد إجراء عمليات معينة تؤمن فتح الفراغات المغلقة وجعلها على اتصـال مع الفراغات المتصـلة لذلك تؤخذ المسـامية الفعالة أو المنتجة

والتي تمثل حجم الفراغات المتصـلة مع بعضـها البعض فقط إلى الحجم الكلي .وهي أخفض بحوالي (5-10%) من المسامية الكلية .

إن الصخور الخازنة في حقلي سعيدة وزاربة أغلبها من النوع المسامي المتشقق المتكهف.

ومن خلال دراسة طبقة الشيرانيش ثم تحديد قيمة المسامية الفعالة بالاعتماد على العينات الأسطوانية والقياسـات الجيوفيزيائية البئرية . حيث كانت وسـطي المسـامية الفعالة الأولية 18.3% . ووسـطي المسـامية الكلية 19.45% وحيث أن قيمة الفراغات الثانوية تتراوح بين (0.83-3.9%) ووسـطياً (2.365%).

2-3-3 : النفوذية : Permeability

وهي خاصـة الصـخر لتمرير السـوائل والغازات تحت فارق ضـغط وتقدر بواحدة الدارسـي .حيث أن واحدة النفوذية هي واحدة دارسـي عندما يمر ($1cm^3$) من سـائل لزوجته (1cp)خلال (1sec)عبر عينة صخرية مقطعها ($1cm^2$) ، وطولها (1cm) تحت فارق ضغط قدره (1at).

ونميز ثلاث مفاهيم للنفوذية :

- **نفوذية فيزيائية مطلقة :** وذلك عندما يمر من خلال الصـخر سائل متجانس أو غاز بشرط أن يكونا خاملين كيميائياً بالنسبة للصخر .
- **النفوذيـة الفعالـة (الطوريـة) :** هي مقدرة الصـــخر على تمرير أكثر من مادة (ســـائل- غاز،سائل- ماء) وبآن معاً عبر مساماته .
- **النفوذية النسبية :** هي النسبة بين النفوذية الفعالة والنفوذية المطلقة .

وهناك تفاوت في قيم النفوذية في طبقة الشيرانيش وتتغير من (183-14) ميلي دارسي. أما متوسط قيم النفوذية فهي (69) ميلي دارسي .

3-3-3 : درجة التشبع : Saturation

التشبع هو خاصية الصخور المسامية بأن تختزن في فراغاتها مائع واحد أو عدة موائع . ويعرف عامل التشبع بأنه النسبة بين الحجم الفعلي المشغول من قبل المائع والحجم الكلي لفراغات الوسط الخازن . درجة التشبع من أهم المؤشرات التي يتم على أساسها حساب الاحتياطي النفطي وتحديد نوعية الاستثمار وقد حسبت درجة التشبع من العينات الأسطوانية والقياسات الكهربائية وكان التشبع الوسطي حوالي (70%) .

جدول رقم (3-1) : الخصائص البتروفيزيائية لتشكيلة الشيرانيش في تراكيب سعيدة – زاربة

البئر	النطاق	متوسط المسامية (قياسات كهربائية) %	متوسط النفوذية من المختبر md	متوسط التشبع بالنفط %	سماكة النطاق m
زاربة 2	A	20	40	70	54
	B	20	10	65	55
	C	15	-	0	32
	D	10	-	0	60
زاربة 3	A	22	60	80	48
	B	21	30	75	40
	C	16	10	60	40
	D	8	-	0	63
سعيدة 2	A	15	10	55	50
	B	15	20	60	45
	C	12	-	0	40
	D	10	-	0	58
سعيدة 5	A	17	15	70	53
	B	20	60	80	35
	C	13	كتيم	0	35
	D	7	كتيم	0	40
سعيدة 6	A	21	20	75	59
	B	20	45	70	37
	C	16	20	40	38
	D	8	كتيم	0	43
سعيدة 101	A	20	50	80	54
	B	18	55	75	35
	C	15	كتيم	0	38
	D	8	كتيم	0	25

❖ 4-3: الخواص الفيزيوكيميائية للنفط في حقول(سعيدة- زاربة- باباسي)

يتواجد النفط الثقيل جداً في هذه الحقول في أعلى طبقة الكريتاســـــي وعلى أعماق بحدود (m 1400) بالنسبة لطبقة الشيرانيش و(2000 m) بالنسبة لطبقة الماسيف .

وتبلغ السماكة الوسطية الفعالة لهذه الحقول من (40 m - 20) .

جدول رقم (3-2) : يبين نتائج تحليل عينة نفطية مأخوذة من الآبار: سعيدة(2) وبابا سي (6) في الشروط الطبقية

المؤشر	الوحدة	سعيد (2)	بابا سي (6)
الضغط الطبقي الأولي	Kg / cm^2	140	140
الضغط عند أخذ العينة النفطية	Kg / cm^2	124.7	132
درجة حرارة الطبقة	°C	55	55
ضغط الإشباع	Kg / cm^2	73	122
العامل الغازي	m^3 / m^3	36	69.29
كثافة النفط	g /cm^3	0.85	0.87
اللزوجة	cp	30.95	-

أما مواصفات النفط في الشروط السطحية المأخوذة من الآبار ومن المحطات فهي مبينة في الجدول التالي :

	API	الكثافة g/cm³	اللزوجة St.c			الإسفلتينات %	البارافينات %	العامل الغازي
			20°C	40°C	60°C			
من الآبار	15.2	0.96	3000	1668	339	13.5	2.4	15
من المحطات	14.8	0.96	2820	600	200	12	4.4	15

جدول رقم (3-3) : يبين نسب البرافين والأسفلتين ودرجة الجودة الأمريكية والكثافة النسبية لبعض الأبار في حقول سعيدة– زاربة– باباسي

رقم البئر	الكثافةg/cm³	API	الإسفلتينات %	الراتنجات %	البارافينات %
سعيدة 1	0.981	12.21	22.4	11.8	5.3
سعيدة 2	0.989	11.4	21.4	1	1.2
سعيدة 3	0.982	12.1	22.6	13.2	2.6
سعيدة 5	0.99	10.95	23.86	13.64	2.4
زاربة 1	0.955	16.6	16.6	9.2	4.8
زاربة 2	0.954	16.9	19	12.3	3
زاربة 3	0.969	14.6	17.8	13	2.5
زاربة 4	0.972	14.2	18	12.1	4.2
زاربة 6	0.96	15.8	18	9.8	8.8
باباسي 2	0.984	12.34	21.6	11.65	6.7
باباسي 3	0.972	14.1	19.2	13.87	1.35

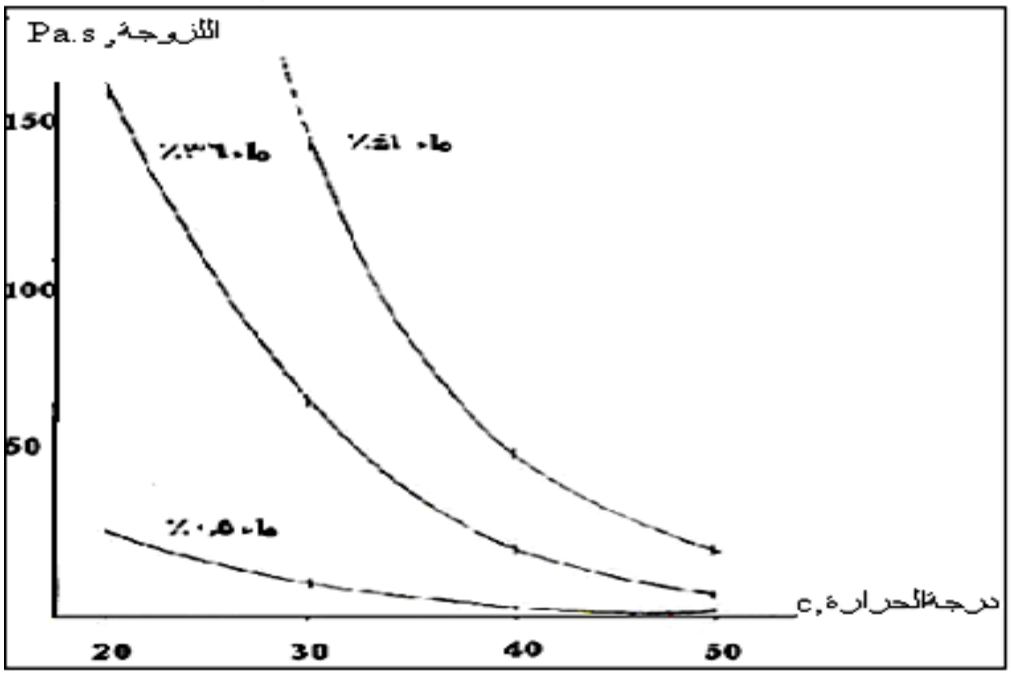
جدول رقم (3-4) : القيم الوسطية للكثافة والإسفلتينات والراتنجات و البارافينات

الحقل	الكثافة g/cm^3	API	الإسفلتينات %	الراتنجات %	البارافينات %
قيم وسطية لأربع آبار في حقل سعيدة	0.986	12.83	21.15	12.88	2.87
قيم وسطية لخمس آبار في حقل زاربة	0.962	14.07	18.83	12.01	4.66
قيم وسطية لست آبار في حقل باباسي	0.977	13.36	21.16	13.41	3.08

يلاحظ من الجدول السابق أن نفط تشكيلة الشيرانيش ينسب إلى النفوط الثقيلة والعالية اللزوجة حيث تصل الكثافة الوسطية النسبية إلى 0.977 ودرجة الجودة الأمريكية API = 13.36 ونسبة الإسفلتينات مرتفعة وتصل القيمة الوسطية إلى 20.38% وزناً في هذه التشكيلة حيث يمكننا القول أن النفط هنا هو نفط إسفلتيني . كذلك يلاحظ أن نسبة الراتنجات مرتفعة نسبياً وتصل إلى 12.767% وزناً والبارافينات إلى 3.45% وزناً .

❖ 3-5: تحليل نتائج القياسات المأخوذة للخواص الفيزيوكيميائية للنفط :

لابد من معرفة الصفات الفيزيوكيميائية للنفط وذلك من أجل وضع وتصميم الطرق الملائمة للاستثمار وبالتالي حل قضايا تكنولوجية هامة والتي تصادفنا أثناء سير عمليات الاستثمار كأجراء عمليات التحسين والعزل التي تجري على الآبار بهدف زيادة إنتاجيتها ومن خلال الجداول التي تبين مواصفات النفط نجد ما يلي :



شكل رقم (3-2) : يبين علاقة اللزوجة الديناميكية بالحرارة في بئر (107) عودة

1- تختلف الخواص الفيزيائية للبترول في الظروف الطبقية عن خواص البترول في الظروف السطحية وذلك بسبب تأثير درجة الحرارة والضغط والغاز المذاب في البترول في الطبقة .

وقد تبين من خلال الدراســـات والأبحاث العلمية أن التحاليل التي تجري على العينات النفطية والمأخوذة بواسطة جهاز آخذ العينات الباطنية تسمح لنا بالحصول على معلومات تعكس الصورة الحقيقية لقيمها في المكمن .

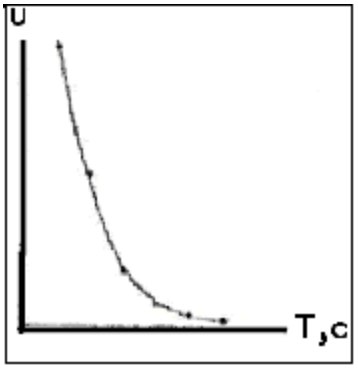
2- يلاحظ من خلال الجداول أن درجة الجودة الأمريكية (API) منخفضة حيث لا تتجاوز 14.5 مما يشير إلى سوء مواصفات النفط المنتج بالإضافة إلى النفوذية السيئة واللزوجة العالية للنفط وهذا ما يؤدي إلى تشكيل مستحلب لزج متماسك تتعذر أحياناً إمكانية استخراجه بالطرق العادية.

3- تتغير كثافة النفط في الظروف الطبقية تبعاً للضغط وكمية الغاز المنحل ودرجة الحرارة وبارتفاع الضغط تزداد الكثافة إلى حد ما.

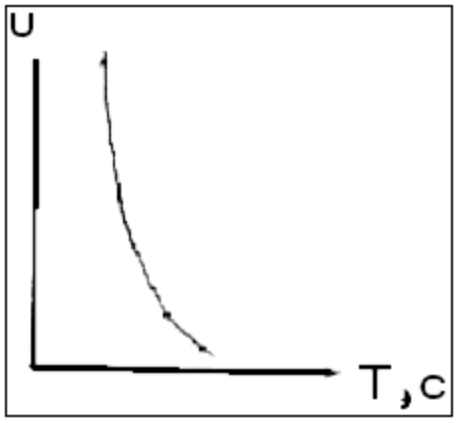
أما بارتفاع كمية الغاز المنحل ودرجة الحرارة فإن الكثافة تقل ويظهر تأثير كمية الغاز المنحل ودرجة الحرارة بصـورة أشـد لذلك فإن كثافة البترول في الشـروط الطبقية هي أقل من كثافة البترول الخالي من الغازات في الشـــروط الســـطحية وبأجراء مقارنة بين قيمة الكثافة في الظروف الطبقية والظروف الســـطحية وجدنا أن قيمة الكثافة وســـطياً في الظروف الطبقية هي بشـــكل وســـطي $0.92g/cm^3$.

4- تختلف لزوجة النفط الطبقي دائماً عن لزوجة النفط في الشـروط السـطحية وذلك بسـبب انحلال كمية من الغاز فيه عند قيم مرتفعة من الضـــغط والحرارة حيث أن لزوجة النفط في الشـــروط الطبقية يمكن أن تكون أقل بعشرات المرات من لزوجة البترول في الظروف السطحية وهذا يمكن ملاحظته من خلال إجراء المقارنة بين قيم اللزوجة للعينات المأخوذة في الظروف الســـطحية والشـروط الطبقية ، حيث نجد أن اللزوجة في الشـروط الطبقية هي بحدود (45cp)بينما تصـل سطحياً إلى عدة آلاف من السنتي بواز .

وتختلف لزوجة النفط في الشـــروط الطبقية من منطقة لأخرى . فكلما كانت العينة المأخوذة في الظروف الطبقية قريبة من خط التقاء النفط بالماء زادت اللزوجة بســـبب تناقص كمية الغازات المنحلة فيه .



شكل رقم (3-3) : يبين علاقة اللزوجة الحركية مع T في بئر زرابة 2



شكل رقم (3-4) : يبين علاقة اللزوجة الحركية مع الحرارة في بئر سعيد (1)

5- يتعلق ضـــغط الإشـــباع بنســـب حجم النفط وحجم الغاز المنحل فيه وكذلك بالتركيب الكيميائي وبدرجة الحرارة للطبقة . وعند الشروط المتساوية فإن ضغط الإشباع سيزداد بازدياد كثافة النفط وزيادة نســـبة المركبات الداخلة في تركيب الغاز وغير القابلة نســـبياً للانحلال في النفط .حيث يزداد ضغط الإشباع بزيادة نسبة غاز الآزوت المنحل في النفط وكذلك بزيادة درجة الحرارة . قد يكون للعينات المأخوذة من نفس الحقل ضـغط إشـباع مختلف نتيجة لاختلاف صـفات وتركيب النفط والغاز للحقل نفســـه . وهذا ما تؤكده نتائج تحليل العينات الباطنية حيث نجد أن ضـــغط الإشـباع لعينتين من نفس الحقل يختلفان (ضـغط الإشـباع لأحدهما $55Kg/cm^2$ بينما للعينة الأخرى $60Kg/cm^2$) .

6- أما عامل حجم النفط فهو في الشروط الطبقية يختلف عنه في الشروط السطحية بسبب ارتفاع درجة الحرارة وكبر كمية الغاز المنحلة في البترول الطبقي .

عامل حجم النفط = النســـبة بين حجم النفط في الشـــروط الطبقية إلى نفس الحجم في الشـــروط السطحية .

جدول رقم (3-5) : بعض المؤشرات المأخوذة للآبار

سعيدة(2) زاربة (19) في الشروط الطبقية

المؤشر	زاربة 19	سعيدة2
عمق الطبقة (m)	1490	1440
درجة الحرارة (C)	58	56
ضغط الإشباع في درجة الحرارة الطبقية (Kg/cm^2)	60	55
كثافة النفط في الشروط الطبقية (g/cm^3)	0.9115	0.9321
عامل حجم النفط Bo	1.13	1.063
عامل الانضغاطية (1/M.Pa)	17.8×10^{-5}	15.6×10^{-5}
عامل الانحلال ($m^3/m^3.MPa$)	0.51	0.6
لزوجة النفط في الشروط الطبقية (cp)	46	49
ضغط الطبقة (Kg/cm^2)	139.5	142

مما تقدم يمكن القول أن نفط التشـــكيلة الشـــيرانيش ينســـب إلى النفوط الثقيلة والعالية اللزوجة والنســب المرتفعة من الإسـفلتينات والراتنجات تعطي الوزن النوعي المرتفع واللزوجة العالية للنفط وهذا الأمر يلعب دوراً كبيراً في اختيار تكنولوجيا إنتاج هذا النوع من النفط يضـــاف إلى ذلك وضـــع خطة مدروســـة وإجراء عمليات التحســـين من خلال تطبيق بعض طرق الإنتاج المدعم (E.O.R).

(الفصل الرابع)

شروط و إمكانية تطبيق الطرق الحرارة المختلفة في الحقول السورية

الفصل الرابع : شروط و إمكانية تطبيق الطرق الحرارية في الحقول السورية

❖ 4-1 : شروط تطبيق الطرق الحرارية :

يجب اختيار الطريقة التي سوف تستخدم في حقل محدد وفي ظروف استثمار معينة بحيث تحقق اكبر زيادة في عامل المردود النفطي في ظل مؤشرات اقتصادية ملائمة , حيث انه يمكن استخدام أكثر من طريقة للحقل المحدد و من اجل اختيار أفضل الطرق يجب معرفة ما يلي :

1- درجة تشبع الطبقات بالنفط والغاز والماء أو درجة استنزافها أو اماهتها .

2- خصائص النفط والمياه الطبقية (اللزوجة ,نسب الكبريت , البرافين , الإسفلت) .

3- عمق الخزان , خصائص الخزان (رملي ,كلسي , نسبة الغضار المتواجد في الصخور , التجانس , استمرار الطبقات و انقطاعها) .

4- نظام دفع المكمن.

5- توزع الآبار المحفورة ووضعها الفني .

6- توافر الوسائل المادية والفنية (نوعها, مواصفاتها, وثمنها).

7- أسعار النفط .

8- الحاجة إلى زيادة الإنتاج .

وعلى أساس نتائج الدراسات المخبرية والتجارب الحقلية والعملية لزيادة المردود التي تمت في العالم فقد تم الحصول على جملة من المعطيات والتصورات حول المقاييس التي تميز خصائص النفط والطبقات التي يمكن أخذها بعين الاعتبار من اجل استخدام الطرق الحرارية .

تم الإطلاع على العديد من المراجع العالمية المنشورة باللغة الإنجليزية فيما يتعلق بهذه الدراسة و الطرق الحرارية التي تم الحديث عنها و وصلنا إلى جدول معتمد يبين المقاييس العالمية المعتمدة لتطبيق الطرق الحرارية السابقة :

Method	API Gravity	Depth, m	Porosity	Thickness, m	Viscosity, cp	Permeability, md
Steamflood	8-13.5	<1500	>20%	>6 m	200-3000	250-1000 md
Insitu Combustion	10-16	<3500	>20%	>3 m	1500-5000	>50 md
Electrical Heating	>7	NC	NC	Thin	>50	NC

- **شروط تطبيق طرق حقن البخار :**

1- الكثافة حسب API : 8-13.5.

2- العمق : يحب أن تكون الطبقة واقعة على عمق أكبر من 1500 متر .

3- المسامية : يحب أن تتجاوز 20% .

4- السماكة : يحب أن تتجاوز 6 متر .

5- اللزوجة : من 200 إلى 3000 cp .

6- النفوذية : من 250 إلى 1000 md .

بعد مقارنة هذه المقاييس مع الخصائص الجيولوجية و الخزنية للطبقات المدروسة ضمن حقول سازابا تم التوصل إلى ما يلي فيما يخص امكانية تطبيق طرق حقن البخار بمختلف أنواعها :

A- الخصائص الفيزيوكيميائية للنفط الموجود في حقول سازابا مطابقة للمعايير المعتمدة.

B- الخصائص الجيولوجية للطبقات المدروسة أيضا ملائمة لشروط تطبيق طرق حقن البخار .

C- الخصائص البتروفيزيائية للطبقات (مسامية و نفوذية) لا تناسب أبدا هذه الطريقة .

حيث نجد أن قيم المسامية و النفوذية منخفضة جدا في حقول سازابا .

- **شروط تطبيق الحرق الموضعي :**

1- الكثافة حسب API : 10-16 .

2- العمق : يجب أن لا يتجاوز عمق الطبقة 3500 متر .

3- المسامية : يجب أن تتجاوز 20 % .

4- السماكة : يجب أن تتجاوز 3 متر .

5- اللزوجة : من 1500 إلى 5000 cp .

6- النفوذية : يجب أن تتجاوز 50 md .

بعد مقارنة هذه المقاييس مع الخصائص الجيولوجية و الخزنية للطبقات المدروسة ضمن حقول سازابا و نوعية النفط فيها تم التوصل إلى ما يلي فيما يخص طرق الحرق الموضعي :

A- الخصائص الفيزيوكيميائية لنفوط حقول سازابا قابلة للتغير تحت تأثير الحرق الموضعي .

B- الخصائص الجيولوجية (عمق – سماكة) أيضا مطابقة لمتطلبات الحرق .

C- الخصائص البتروفيزيائية لا تتناسب أبدا مع شروط تطبيق الطريقة .

تعد طريقة الحرق الموضعي من الحلول غير المرغوبة في المراحل الأولية من الإستثمار المدعم للطبقات حيث يتم الإستعانة بها كأحد الحلول النهائية لإستخراج كميات إضافية من النفط على إعتبار أن الطبقات سوف تصبح غير قابلة للإستثمار بعد حرقها و هذا ما يجعل من طريقة الحرق خيارا مستبعدا و غير مرغوب به إلا في الحالات الطارئة .

- **شروط تطبيق الطرق الكهربائية :**

1- درجة الجودة الأمريكية API : يجب أن تتجاوز 7 .

2- العمق : غير محسوب

3- المسامية : غير محسوبة

4- السماكة : تكون فعالة أكثر في الطبقات الرقيقة

5- اللزوجة : يجب أن تتجاوز 50cp

6- النفوذية : غير محسوبة

نلاحظ أن مجال إستخدام طرق التسخين الكهربائية واسع و غير مرتبط بشروط معينة مما يرجح كفة هذه الطرق على غيرها , لكن بعد الإطلاع على الأمثلة الحقلية في الفصل الثاني تبين أن نجاح هذه الطرق يتطلب نفوذية مرتفعة جدا لذلك نجد أن احتمال فعالية هذه الطرق في حقول سازابا ضئيل جدا.

النتائج و المقترحات

لقد تم التوصل إلى النتائج التالية :

1- طرق حقن البخار الساخن سواء الغمر أو الحقن الدوري قد تعطي نتائج إيجابية بشرط أن يتم معالجة الطبقات و زيادة نفوذيتها قبل حقن البخار .

2- يجب أن تخضع طرق الحرق الموضعي لدراسة مخبرية ممنهجة و مفصلة قبل تطبيقها و الوصول إلى نتائج مرضية و موثوقة قبل المخاطرة بتطبيق احدى هذه الطرق على اعتبار أنها قد تنهي على المكمن بعد حرقه , يفضل أن تطبق في المكامن ذات الحجم الضخم و الواقعة عند أعماق كبيرة .

3- أثبتت طرق التسخين الكهربائية الحديثة جودة في النتائج اذا طبقت بالشكل الأمثل و استخدمت كافة متطلباتها , علاوة على ذلك فإنها سوف تكون بلا جدوى ما لم تستخدم بدقة , كما أنها تتطلب أدوات خاصة و حديثة و مصادر للطاقة و محركات ذات استطاعات عالية مما يجعلها ذات كلفة عالية .

4- وجد أن أبرز العقبات التي قد تمنع تطبيق الطرق المذكورة سابقا هي الخصائص البتروفيزيائية الضعيفة للطبقات المدروسة ضمن حقول سازابا حيث نجد أن قيم النفوذية منخفضة جدا و بدرجة أقل للمسامية مما قد يقلل من جودة النتائج المتوقعة في حال استخدام الطرق الحرارية بمختلف أنواعها .

5- تحتوي تشكيلات الماسيف و الشيرانيش على نفوط ثقيلة جدا و بكميات وفيرة لذلك يتوجب البدء بوضع خطط متقنة و مدروسة لإستثمار هذه الكميات الضخمة عبر تطبيق الطرق الحديثة للإستثمار المدعم و مواكبة التطور .

6- وجد من خلال التحاليل المخبرية و التجارب التي أجريت على العينات الأسطوانية المأخوذة من عدة أبار أن النفوط الموجودة ضمن الحقول المدروسة تتأثر بشكل كبير عند تعرضها لدرجات حرارة عالية مما يزيد من درجة وثوقية و كفاءة هذه الطرق .

7- كلما تعرضت النفوط للحرارة العالية خلال فترات زمنية أطول كلما ازداد تأثرها و قلت لزوجتها لذلك يجب البحث عن الطرق التي تحافظ على حرارة عالية داخل المكمن لأطول مدة زمنية ممكنة.

بناء على النتائج السابقة نقترح ما يلي :

1- ضرورة اتخاذ خطوات جدية و البدء بوضع خطط مستقبلية للإستثمار .

2- إجراء دراسات مخبرية تحاكي الشروط الطبقية لمكامن محددة بهدف توجيه عملية تطبيق هذه الطرق حقليا .

3- محاولة تطبيق احدى الطرق الحرارية في أحد الأبار الواقعة في حقول سازابا ضمن الإمكانيات المتوفرة , بعد إجراء دراسات مخبرية كافية تمكن من وضع تصورات أولية للتطبيق الحقلي لها .

4- معالجة الطبقات و تحسين درجة اتصال المسامات مع بعضها قبل معالجتها حراريا من خلال

(التحميض , التشقيق الهيدروليكي , التفجير) لزيادة تقبل الطبقة للمواد المتفرقة .

5- استخدام طرق أخرى للإستثمار المدعم (حقن CO_2 , حقن البوليمبرات , حقن القلويات , مقللات التوتر السطحي) في حال عدم امكانية تطبيق الطرق الحرارية نظرا لخطورتها و ارتفاع تكلفتها .

المراجع العربية و الإنجليزية :

1- تقارير و دراسات الشركة السورية للنفط (مديرية حقول الرميلان) .

2- الموقع الإلكتروني : الباحثون السوريون (طرق الإستثمار المدعم 2+1)

3- مقالات من شبكة الإنترنت (موقع www.petroly.com)

4- www.insitucombustion.com

5- www.petrowiki.org

6- PDF (Enhancing petroleum recovery from heavy oil field by microwave heating) by SAGDAS ACAR

7- PDF (Insitucombustion) – Chapter16(Reservoir engineering section) by William E.brigham and Louis Castanier

المصطلحات :

Absolute	مطلق	Accumulation	تراكم
Analysis	تحليل	Anticline	محدب
API	درجة الجودة الأمريكية	Aromatic	عطري
Boiling	غليان	Burned	محترقة
Cracking	تكسر	Conductivity	ناقلية
Compressibility factor	عامل الانضغاطية	Clay	غضار
Dissolved	منحل	Distribution	توزع
Wet	رطب	Deposition	ترسيب

Density	كثافة	Development	تطوير
Dissolution	انحلال	Energy	طاقة
Export	تصدير	Exploration	استكشاف
Evaluation	تقييم	Extension	امتداد
EOR	استخلاص مدعم	Effective	فعال
Emulsifier	مستحلب	Efficiency	كفاءة
Evaporation	تبخر	Fluid	مائع
Field	حقل	Forward	أمامي

Friction	احتكاك	Fault	فالق
Formation	تكوين	Generating	توليد
GOC	خط التقاء الغاز بالنفط	GOR	نسبة الغاز في النفط
Heating	تسخين	Heavy oil	نفط ثقيل
Import	استيراد	Investment	استثمار
Isolation	عزل	Invasion	اجتياح
Injection	حقن	Induction	تحريض

Mechanism	ألية	Mobility	حركية
Molecular Weight	وزن جزيئي	Migration	هجرة
Residual Oil	نفط متبقي	Renewable	متجدد
Reverse	عكسي	Reservoir	مكمن
Recovery Factor	عامل المردود	Shows	شواهد
Saturation	تشبع	Soak	غمر
Solubility	ذوبانية	Shear rate	معدل القص
Structure	تركيب	Syncline	مقعر

مقدمة	**(2)**
الفصل الأول :مكامن النفط الثقيل	**(3)**
1-1 : ألية تشكل النفط الثقيل	**(4)**
2-1 : محتوى النفط الثقيل من المركبات الثقيلة	**(5)**
3-1 : خصائص النقط الثقيل	**(6)**
4-1 : عقبات انتاج النفط الثقيل	**(8)**
5-1 : تحسين النفط الثقيل و كيفية استثماره	**(9)**
الفصل الثاني : الطرق الحرارية	**(13)**
1-2 : حقن البخار الساخن	**(14)**
2-2 : الطرق الكهربائية الحديثة	**(21)**
3-2 : الحرق الموضعي	**(30)**
الفصل الثالث : حقول سازابا	**(40)**
1-3 : الخصائص المرنة للنفط الثقيل	**(41)**
2-3 : الخصائص الجيولوجية و الخزنية	**(43)**
3-3 : الخصائص البتروفيزيائية للمكمن	**(48)**
4-3 : الخصائص الفيزيوكيميائية للنفط الثقيل	**(52)**
5-3 : تحليل نتائج القياسات المأخوذة	**(54)**
الفصل الرابع : شروط و إمكانية تطبيق الطرق الحرارية في الحقول السورية	**(59)**
النتائج	**(64)**
المقترحات	**(65)**
المصطلحات	**(66)**