الفهرس

مقدمة البحث..... ٥

الفصل الأول – الحفر الموجه ٨

Directional Drilling ٨

١-١ أسباب حفر الآبار الموجهة:..... ٨

2- بروفيلات الآبار الأفقية:..... ١٣

2-1-الآبار ذات قوس الانحناء القصير (Short radius)..... ١٤

2-2- الآبار ذات قوس الانحناء المتوسط (Medium radius)..... ١٤

2-3-الآبار ذات قوس الانحناء الطويل (Long radius)..... ١٥

١-٢ أدوات تمييل الآبار..... ١٦

١-رأس الحفر النفاث (Badger Bit) (التمييل النفثي):..... ١٧

٢-ريشة الحفر المائلة (whipstock):..... ١٨

٣- أداة التمييل (Rebel Tool):..... ١٩

٤-وصلة التمييل ومحرك الإزاحة الموجبة (Bent sub & Mud motor):..... ٢٠

٥-تشكيلات قاع البئر الموجهة (DBHA):..... ٢٣

٨- المحركات المغمورة في قاع البئر (المحركات الجوفية)..... ٣٢

8-1-المحرك الجوفي (PDM)الشكل (1-22):..... ٣٢

الفصل الثاني- تقنيات استخراج النفط الثقيل..... ٣٨

Producing Techniques Heavy Oil..... ٣٨

٢-١ تحديات التعامل مع النفط الثقيل:..... ٣٨

٢-٢ تصنيف النفط الثقيل:..... ٤٠

٢-٢-١ تصنيف النفط حسب التركيب الكيميائي:..... ٤٠

٢-٢-٢ تصنيف النفط حسب نسبة الكبريت ٤١
٢-٢-٣ التصنيف حسب الكثافة (تصنيف النفط الثقيل): ٤١
٢-٢-٤ تصنيف النفط الثقيل حسب درجة (API) ٤٢
٢-٣ العناصر الرئيسية في النفط الثقيل: ٤٢
٢-٣-١ المواد البارافينية: ٤٢
٢-٣-٢ المواد النفتينية: ٤٢
٢-٣-٣ المواد الإسفلتية: ٤٢
٢-٤ العوامل المؤثرة على تشكل النفط الثقيل: ٤٣
٢-٤-١ تأثير المياه القابلة للحركة ذات المنشأ السطحي: ٤٣
٢-٤-٢ تأثير البكتريا الهوائية: ٤٣
٢-٤-٣ التفكك الطبيعي للنفط إلى المواد المتشكل منها ٤٣
٢-٤-٤ تشكل الاسفلت ٤٣
٢-٤-٥ أماكن تواجد النفط الثقيل وأسباب اللجوء إليه: ٤٣
٢-٤-٦ مواصفات المكامن الحاوية على نفط ثقيل: ٤٤
٢-٧ المشاكل الفنية والتقنية لإنتاج النفط الثقيل: ٤٥
٢-٧-١ مشاكل في الإنتاج: ٤٥
٢-٧-٢ مشاكل في النقل: ٤٥
٢-٧-٣: مشاكل في التصفية: ٤٦
٢-٨ تقنيات خاصة لتعزيز الإنتاجية: ٤٦
٢-٨-١ المعالجات الحرارية: ٤٦
٢-٨-٢ حفر الآبار الأفقية: ٤٧
٢-٨-٣ حقن البوليميرات القابلة للامتزاج بالماء: ٤٧
الفصل الثالث – تقنيات الإنتاج المتقدم للنفط الثقيل ٤٩

Advanced Production Technologies ٤٩
٣-١تقنية انتاج النفط البارد الثقيل مع الرمل: ٤٩
٣-١-١ مبدأ ومتطلبات العمل: ٤٩
٣-١-٢ الإيجابيات: تمتاز تقنية انتاج النفط البارد الثقيل مع الرمل CHOPS، بما يلي: ٥٠
٣-١-٣ السلبيات: كذلك يمكن أن يتأثر استثمار حقول النفط اللزج ببعض السلبيات جراء استخدام تقنية CHOPS، ومنها ٥١
٣-١-٤ شروط نجاح تقنية الـ CHOPS ٥٢
٣-١-٥ مواصفات المكامن المناسبة لتطبيق تقنية الـ CHOPS ٥٢
٣-١-٦ المعدات المستخدمة في تطبيق تقنية الـ CHOPS ٥٣
٣-٢ تقنية التصريف بالجاذبية بمساعدة البخار (SAGD): ٥٦
٣-٢-١ مبدأ ومتطلبات العمل ٥٦
٣-٢-٢ إيجابيات تطبيق تقنية SAGD ٥٧
٣-٢-٣ سلبيات تطبيق تقنية SAGD ٥٧
٣-٢-٤: الحلول المقترحة لزيادة فعالية الـ SAGD: ٥٨
٣-٢-٥: شروط نجاح تطبيق تقنية SAGD ٥٨
٣-٣: تقنية التوترات النبضية (Pulsed Techniques /Vibration Simulate): ٥٩
٣-٣-١ آلية العمل: ٥٩
٣-٣-٢ ميزات تطبيق تقنية التوترات النبضية: ٦٠
3-3-3: سلبيات تقنية التوترات النبضية: ٦١
٣-٣-٤: شروط نجاح التوترات النبضية: ٦١
تطبيق عملي ٦٣
دراسة إمكانية استخدام التقنيات الحديثة في إنتاج النفط الثقيل في الحقول السورية ٦٣
النتائج والمقترحات ٦٨

خاتمة البحث..... ٧٠
المراجع ٧١

مقدمة البحث

على الرغم من توفر النفط الخام التقليدي في كثير من الأماكن في العالم، واكتشاف مزيد من الاحتياطيات من هذا الخام، وتحسن عمليات استخراج النفط من باطن الأرض، إلا أن **النفط غير التقليدي** يكتسب أهمية كبيرة لكونه أحد الاحتياطيات الكبيرة المؤكدة من الطاقة في المستقبل، كما أنه يتوزع في كثير من الأماكن في العالم، وفي كثير من الدول العربية وفي سوريا كذلك.

ويمثل النفط الثقيل، والثقيل جداً، والزيت الصخري، وزيت رمال القار من أهم أنواع هذا النفط غير التقليدي في سوريا.

تشير الدراسات التي أجرتها هيئة المسوحات الجيولوجية الأمريكية إلى أن إجمالي احتياطيات النفط الخام الثقيل والثقيل جداً المؤكدة والقابلة للاستخلاص في العالم تقدَّر بنحو ٤٣٤ بليوناً وهي أكبر من الاحتياطات المؤكدة والقابلة للاستخراج من النفط التقليدي (الخفيف).

وعلى النقيض من النفط الخفيف، فإن استخراج النفط الثقيل والثقيل جداً مكلِّف وصعب الإنتاج.

نشأ النفط الخام من مواد عضوية تشكَّلت من مخلفات كائنات حية تعرَّضت إلى ضغط وحرارة مرتفعين، وبفعل النشاط البكتيري تشكّلت السوائل البترولية عبر ملايين السنوات، وقد انتقلت هذه السوائل من خلال الطبقات الرسوبية لتتجمع في مصائد في باطن الأرض.

أما النفط الثقيل والثقيل جداً، فيعتقد الباحثون أنه قد تشكَّل بسبب التحلل الحيوي للنفط التقليدي. فعند توفر درجة حرارة تتراوح ما بين ٦٥ – ٨٠ درجة مئوية، تنشط بعض أنواع البكتيريا المحللة للنفط الخفيف، وتشكِّل نفطاً ثقيلاً جداً يتواجد على أعماق قريبة من سطح الأرض لا تتجاوز مئات قليلة من الأمتار، ويكون هذا النفط لزجاً جداً، وفي بعض الأحيان صلباً وغير قابل للجريان.

كذلك فإن عمليات استخراج النفط التقليدي من الآبار ينجم عنها متبقيات من النفط، وتحت أفضل الظروف التشغيلية لاستخراج النفط يبقى أكثر من خمسين بالمائة من النفط في مناطق المكامن وبين الصخور في باطن الأرض بعضها على شكل نفط ثقيل.

ويصنف معهد البترول الأمريكي النفط حسب كثافته إلى عدة أنواع هي:

النفط الخفيف: درجة كثافته حسب API أكثر من 31.1° وتكون كثافته النوعية أقل من ٠.٨٧.

النفط المتوسط: درجة كثافته API بين 22.3° إلى 31.1° وتكون كثافته النوعية بين ٠.٨٧ – ٠.٩٢.

النفط الثقيل: درجة كثافته API أقل من 22.3° وتكون كثافته النوعية أعلى من ٠.٩٢ ويتميز بلزوجته العالية وهي أعلى من ١٠ سنتي بواز.

يشير الجدول –١– إلى القيم المتوسطة لبعض خواص النفط الثقيل مقارنة مع النفط التقليدي الخفيف، وذلك كما يلي:

الجدول (١) متوسط قيم مواصفات النفط الثقيل (اللزج) مقارنة بالنفط التقليدي

الخصائص	النفط الثقيل (غير التقليدي)	النفط الخفيف (التقليدي)
درجة الكثافة $^{\circ}$API	٨.٥	٣٨.٥
اللزوجة (سنتي ستوك– عند الدرجة 60° C)	٤٠٠٠	٤
الكبريت (وزناً %)	٤.١	٠.٤
نيتروجين (جزء بالمليون)	٩٤	١
فاناديوم (جزء بالمليون)	٤٥٠	٥
درجة الحموضة (ملغ KOH /غ)	٤.٣	٠.٠٥

كما يُصنف النفط الثقيل حسب درجة كثافته API إلى نفط ثقيل درجة كثافته بين 22.3° إلى ١٠°، ونفط ثقيل جداً درجة كثافته أقل من ١٠°.

وكذلك، فإن استخراج النفط الثقيل جداً مكلِّف إلَّا أن تكلفته أقل من تكلفة استخراج النفط الثقيل جداً، إذ يتطلَّب النفط الثقيل استثمارات مالية كبيرة في استخراجه ونقله ومعالجته وتكريره. كذلك فإن تكريره في مصافي النفط صعب جداً، نظراً للزوجته العالية ومحتواه المرتفع من الأسفلتينات، وارتفاع نسبة بعض المعادن الثقيلة والشوائب فيه، كالكبريت والفناديوم والنيتروجين، بالإضافة إلى أضراره البيئية الخطرة، وهذا يتطلَّب حلولاً تقنية خاصة لاستثمار هذا الخام الطبيعي المهم لاستخلاص المشتقات النفطية منه.

وعند التعامل مع النفط الثقيل لابد من أن نضع في الحسبان ما يلي:

- يختلف إنتاج النفط التقليدي عن إنتاج النفط الثقيل، إذ يستلزم هذا الأخير استخدام طرق خاصة لتعزيز الإنتاجية، كحقن البخار **والمعالجة الحرارية** والكيميائية وغيرها من الطرق التي أثبتت قدرتها على استخراج هذا النوع من النفط.
- ولزيادة معدلات استخراج هذا الخام من الآبار وتحسين الإنتاجية، يتم اللجوء إلى **حفر الآبار الأفقية** التي تتفرَّع من الآبار العمودية، حيث تصل الآبار الأفقية إلى طبقات المخزون النفطي الثقيل، كما تُتبع طريقة الإنتاج البارد للنفط الثقيل بالرمل، حيث يتم ضخ السوائل في فوهة البئر المخلوطة بالرمل من أجل زيادة النفاذية للطبقات المحتوية على النفط الثقيل ولمنع ترسب الأسفلت وغلق الثقوب مما يسمح للنفط بالتدفق.
- كذلك قد يتم اللجوء إلى طرق خاصة للرفع الصناعي لتحسين ضخ النفط من الآبار، لذا يتم تجهيز الآبار ببعض التقنيات مثل: المضخات التكهفية (اللولبية) لقدرتها على ضخ وإنتاج النفط الثقيل مع الرمال.

ومن هنا كان **الهدف من هذا البحث**: تحسين استخراج النفط الثقيل في سوريا والتي تحتوي على كميات كبيرة من النفط المؤكد القابل للاستخراج، مع استخدام تقنيات الحفر الأفقي لزيادة سطح الارتشاح وتسهيل ارتشاح النفط الثقيل من الطبقات ثم تطبيق دراسة أفضل التقانات المتقدمة والمعتمدة في العالم، وأهمها:

- تقنية انتاج النفط البارد الثقيل مع الرمال (CHOPS: Cold Heavy Production with Sand).
- تقنية التصريف بالجاذبية بمساعدة البخار (SAGD: Seam Associated Gas Drainage).
- التوترات النبضية .(Pulsed techniques /vibration simulate)

تم إنجاز هذا البحث على ثلاثة فصول:

١- الفصل الأول: الحفر الموجه Directional Drilling

٢- **الفصل الثاني**: النفط الثقيل Heavy Oil

٣- **الفصل الثالث**: تقنيات إنتاج النفط الثقيل المتقدمة Advanced Production Technologies.

الفصل الأول – الحفر الموجه

Directional Drilling

الحفر الموجه هو تقنية لتوجيه البئر على طول مسار محدد مسبقاً إلى هدف في قاع البئر يقع على مسافة واتجاه معينين من السطح.

يتم التخطيط لحفر الآبار النفطية والغازية في معظم الحالات بشكل شاقولي بحيث تصل إلى الهدف النهائي لها بأقصر زمن وبالتالي بأقل كلفة ممكنة. ولكن لا توجد فعلياً بئر شاقولية تماماً، إذ سوف تنحرف البئر عن الشاقول المار بالفوهة، ويمكن أن يكون انحراف البئر طبيعياً بسبب الشروط الجيولوجية، وقد يخطط منذ البداية لحفر البئر بشكل مائل باتجاه محدد، وتُقسم الآبار حسب قيمة زاوية ميلها إلى:

١–آبار شاقوليه (Vertical wells): وهي تلك الآبار التي لا تتجاوز زاوية ميلها عن الشاقول$5° \leq \alpha$ ولا توجد ضرورة لتحديد اتجاه الميل لأن قعر البئر سوف يقع بالتأكيد ضمن المنطقة المحددة له.

٢–آبار مائلة (Inclined wells): حيث تكون زاوية ميلها عن الشاقول كبيرة ($\alpha > 5°$) ويحصل الميل هذا بشكل خارج عن الإرادة لأسباب عديدة.

٣–آبار موجهة (Directional wells): وهي من النوع المائل ولكن يخطط لها مسبقاً ويحدد اتجاهها للوصول إلى هدف معين وقد تكون الآبار المائلة والموجهة مستقيمة (مائلة خطياً) مع المحافظة على زاوية سمت ثابتة وقد تكون متعرجة، أي تتغير زاوية الميل وزاوية السمت وقد تحفر عدة آبار موجهة من بئر واحدة (من موقع واحد لجهاز الحفر) وتسمى الآبار المتشعبة أو الآبار متعددة القيعان (Multi–lateral wells) ويحفر هذا النوع في البحار.

٤–الآبار الأفقية (Horizontal wells): وهي إحدى الحالات الخاصة للآبار الموجهة، حيث تتكون من جذع شاقولي في بدايتها، يليه الجذع المائل وينتهي بجذع أفقي في نهايتها يخترق الطبقة المنتجة لمسافات طويلة.

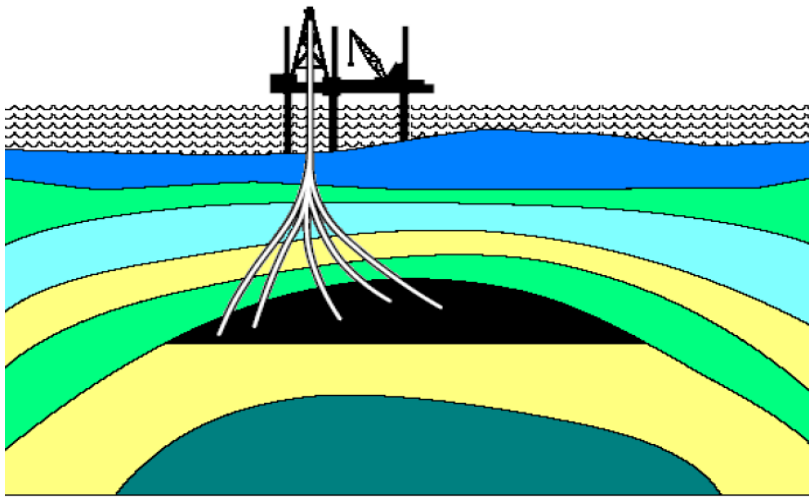
١–١ أسباب حفر الآبار الموجهة:

يوجد أسبابٌ عديدة لحفر الآبار الموجهة نذكر منها ما يلي:

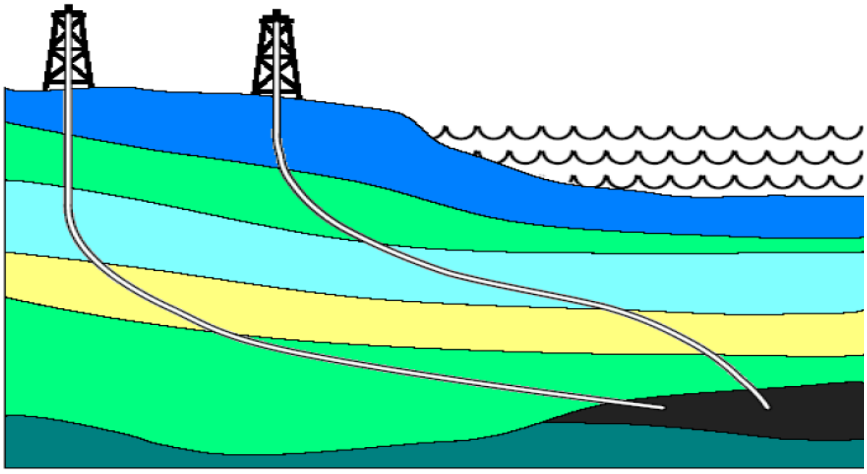
- **تطوير الحفر البحري (Offshore development):**

إن جميع الحقول البحرية يمكن تطويرها من خلال حفر عدد من الآبار (Offshore multi well drilling) من منصة واحدة (في المياه العميقة، الشكل (١–١) أو من الجزر الاصطناعية (في المياه الضحلة جداً، الشكل (١–

٢)) حيث تعتبر هي الطريقة الأكثر اقتصادية لتطوير الحقول البحرية بحيث تتقاطع هذه الآبار مع المكمن على امتداد مساحته من موقع ثابت لمنصة الحفر.



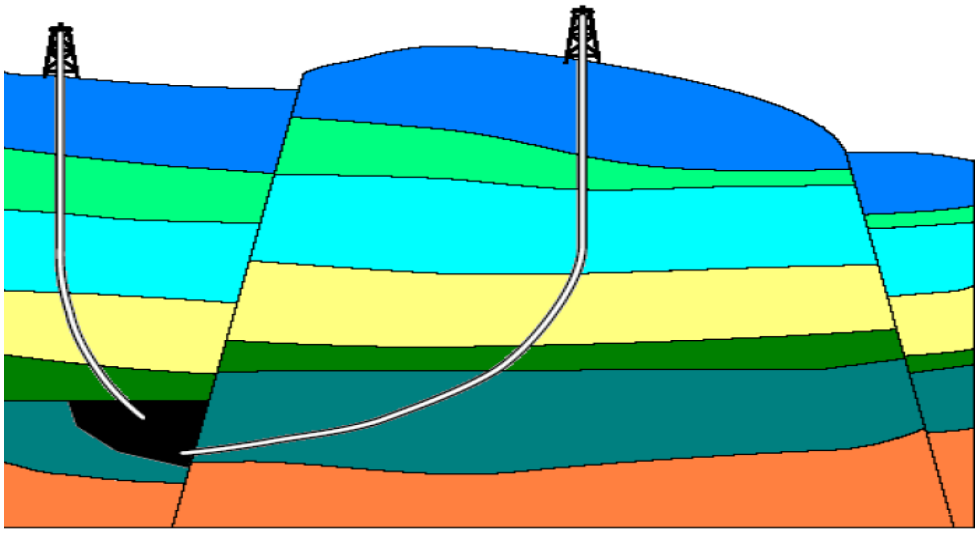
الشكل (١-١) الحفر البحري متعدد الآبار.



الشكل (١-٢) الحفر البحري من الجزر الاصطناعية

- **اختراق التراكيب الجيولوجية المقطوعة بفالق (Faull drilling):**

إن الآبار التي تحفر من خلال الفالق تكون غير مستقرة وذلك بسبب تأثيرات الانزلاق والقص التي تتعرض لها مواسير التغليف لذلك يتم حفر بئر موازية للفالق ثم يتم تغيير اتجاه البئر لقطع فالق عند الطبقة الهدف.

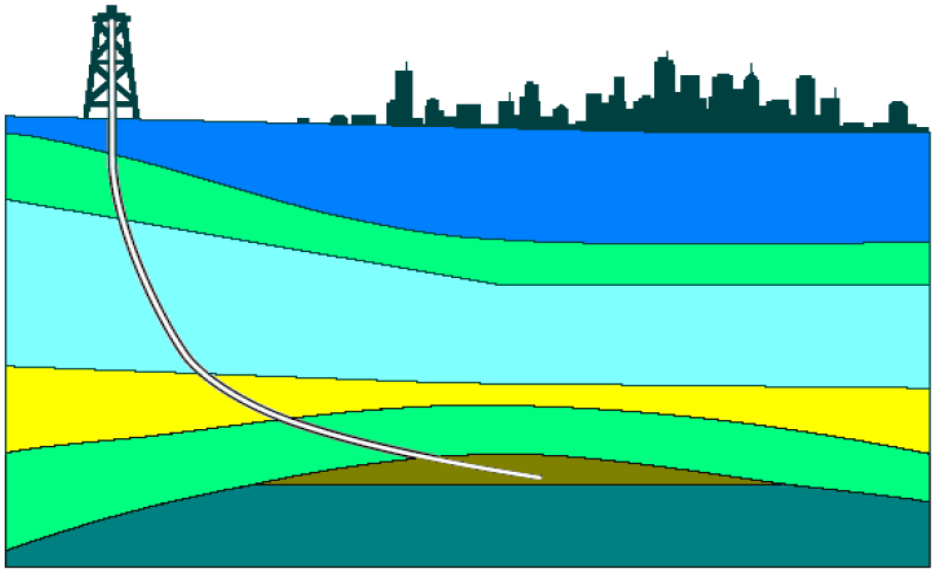


الشكل (١-٣) حفر الطبقات المقطوعة بفالق.

- **في المواقع التي يتعذر الوصول إليها بالحفر الشاقولي والمقيدة نتيجة وجود عقبات:**

Inaccessible and restricted

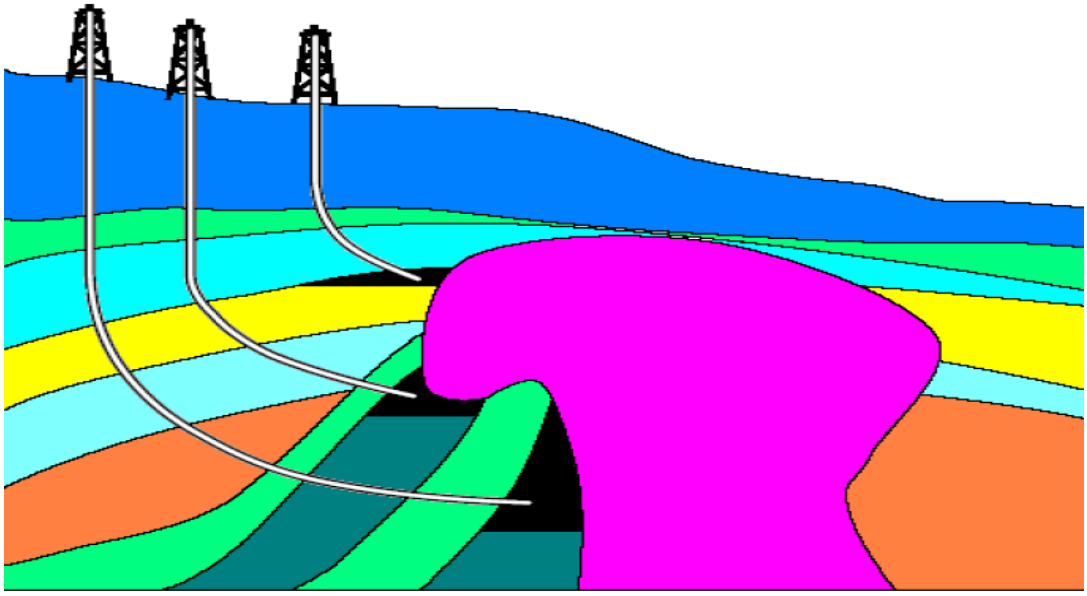
قد يكون الحفر الشاقولي غير ممكن لبلوغ النطاقات المنتجة وذلك بسبب بعض العقبات السطحية (تواجد مكمن نفطي أسفل منطقة سكنية، أو منشأة صناعية أو أسفل بحيرة، سلسلة جبلية،) في هذه الحالة يمكن حفر بئر مائلة بشكل موجه من جهاز حفر متمركز على مسافة ما.



الشكل (١-٤) الحفر المائل لاستثمار المكامن تحت الأنهار والمناطق السكنية

- **حفر القبب الملحية (Salt dome drilling)**

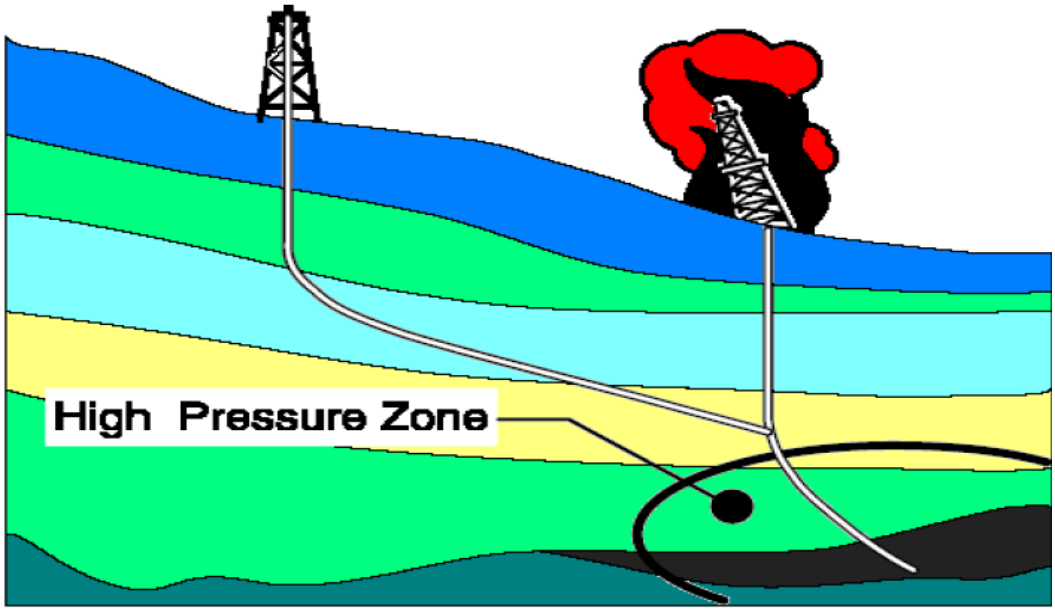
عندما تتواجد طبقات خازنة للمركبات الهيدروكربونية أسفل طبقة الملح فإن الخبرة العملية أثبتت أنه من الضروري حفر بئر موجهة وذلك لتلافي المشاكل التي تسببها الطبقات الملحية (على سبيل المثال، تَقَوُّض مواسير التغليف بسبب الإجهادات الناتجة عن زحف الملح) يتم الحفر بشكل موجه بجانب القبة الملحية ومن ثم التمييل بزاوية مناسبة نحو أسفل الملح وصولاً إلى المكمن.



الشكل (١-٥) تجاوز القبب الملحية

- **آبار النجدة (Relief of wells):**

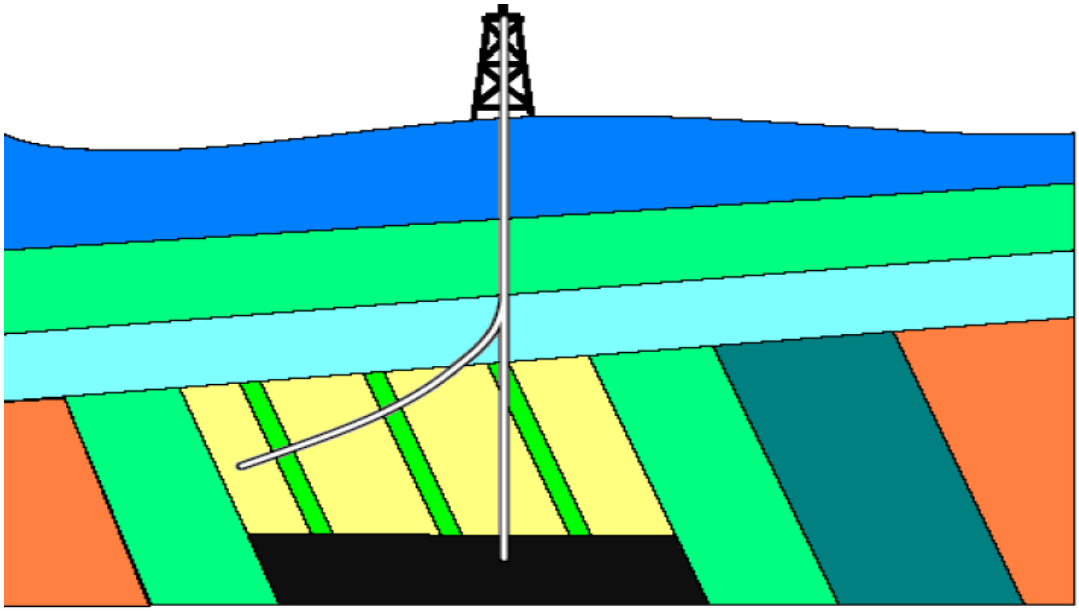
عند حدوث اندفاع للموائع الطبقية، تتضرر المعدات والتجهيزات حيث تصعُب السيطرة على البئر المندفعة. عندها يكون من الممكن قتل البئر المندفعة بحفر بئر مائلة وموجَّهة تسمى بئر النجدة تتقاطع مع البئر المندفعة أعلى القاع بعدة أقدام حيث يضخ سائل حفر بوزن نوعي كبير لقتل البئر المندفعة.



الشكل (١-٦) بئر النجدة.

- **حفر المكامن الرملية متعددة النطاقات (Multiples sands):**

بهدف اختراق الخزانات المفصولة عن بعضها بحواجز كتيمة يتم حفر بئر مائلة، حيث يتم استثمار هذه النطاقات ببئر واحدة دون الحاجة لحفر بئر خاصة لكل نطاق.

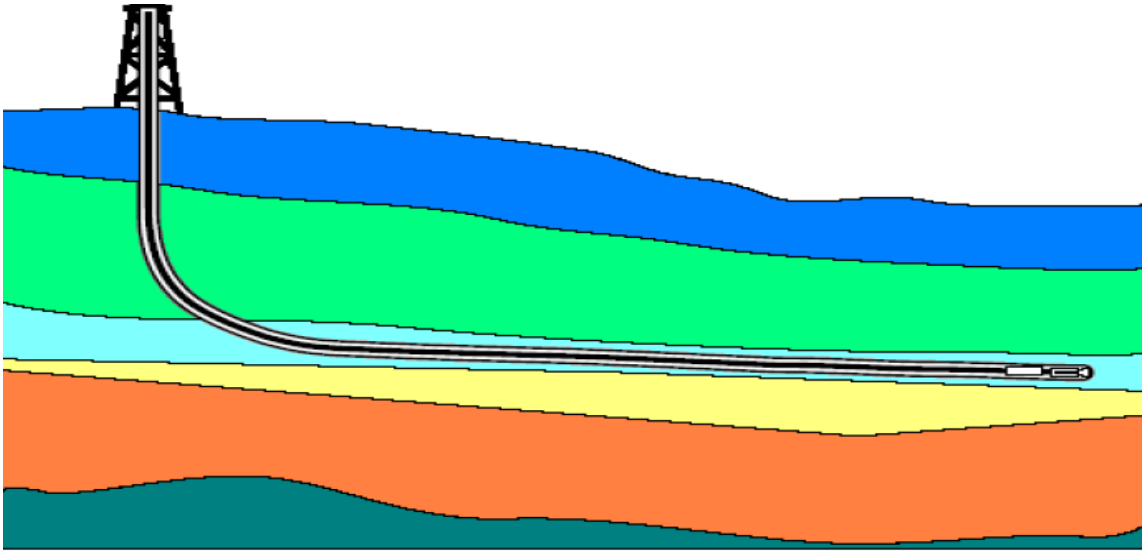


الشكل (١-٧) مكمن رملي متعدد النطاقات.

- **حفر الآبار الأفقية (Horizontal wells):**

يعتبر حفر الآبار الأفقية الشكل (1-8) تطبيق خاص للحفر الموجه، ويستخدم بهدف زيادة الإنتاجية للعديد من التشكيلات الحاملة للمواد الهيدروكربونية مثل الحالات التالية:

- ❖ المكامن المتشققة (الطبقات الكرواتية).
- ❖ استثمار النطاقات النفطية الرقيقة، لتلافي تشكل المخاريط المائية والغازية لإن معدل الإنتاج مرتفع عند أقل فارق ضغط مطبق.
- ❖ زيادة إنتاجية المكامن ذات النفوذية المنخفضة، من خلال زيادة سطح الارتشاح (جذع أفقي طويل).
- ❖ استثمار المكامن المقطوعة بحواجز كتيمة.



الشكل (1-8) بئر أفقية

2- بروفيلات الآبار الأفقية:

عموماً نميز ثلاثة نماذج للآبار الأفقية الشكل (1-9):

- ❖ الآبار ذات قوس الانحناء القصير (Short radius).
- ❖ الآبار ذات قوس الانحناء المتوسط (Medium radius).
- ❖ الآبار ذات قوس الانحناء الطويل (Long radius).

2-1-**الآبار ذات قوس الانحناء القصير** (Short radius).

يسمح بالحفر أفقيا وبشكل وسطي .ft 00، (٨240 m) وشدة انحراف (وبمسار منحني نصف قطره (6–12 m، 20–40 ft).

- **ايجابيات الآبار ذات قوس الانحناء القصير:**
  - دقة تحديد المقطع الأفقي للبئر.
  - سرعة الوصول للجذع الأفقي.
  - يحفر بدءاً من بئر محفورة بشكل مسبق.
- **سلبيات الآبار ذات قوس الانحناء القصير:**
  - طول قصير للجذع الأفقي، لا يتجاوز ١٠٠ متر.
  - الحاجة لمعدات حفر خاصة وغالية الثمن.
  - عدم إمكانية إجراء القياسات الكهربائية وعمليات التلبيب.
  - إنهاء البئر بقاع مفتوح فقط.
  - عزم الانحناء كبير.

2-2– **الآبار ذات قوس الانحناء المتوسط** (Medium radius).

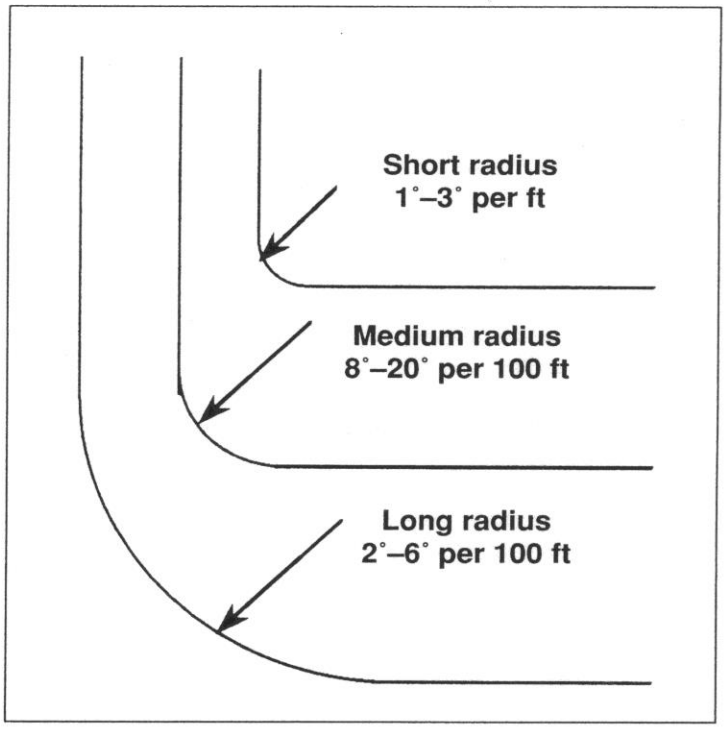
يسمح بالحفر أفقيا وبشكل وسطي .ft 00، (٣٠900 m) وشدة انحراف (وبمسار منحني نصف قطره (40–200 m، 125–700 ft).

- **ايجابيات الآبار ذات قوس الانحناء المتوسط:**
  - عزم الانحناء قليل.
  - طول الجذع الأفقي يصل حتى ١٠٠٠ متر.
  - إمكانية الإنهاء والتغليف بشكل طبيعي.
- **سلبيات الآبار ذات قوس الانحناء المتوسط:**
  - صعوبة إجراء القياسات الكهربائية.
  - صعوبة عمليات الإصلاح.
  - احتكاك مواسير الحفر بجدران البئر وتعرضها لإجهادات كبيرة.

2-3-**الآبار ذات قوس الانحناء الطويل** (Long radius).

يسمح بالحفر أفقيا وبشكل وسطي .3500 ft،((1070 m وشدة انحراف (وبمسار منحني نصف قطره (1000–2000 ft. ،300–1800 m)

- **ايجابيات الآبار ذات قوس الانحناء الطويل:**
  - سهولة في عمليات الحفر مع إمكانية استخدام معدات عادية بكلفة غير كبيرة أي لا تتطلب استخدام محركات جوفية (Pump–down motor) (PDM)
  - طول المقطع الأفقي كبير يصل حتى ١٥٠٠ متر.
  - إمكانية إجراء القياسات الكهربائية.
  - إمكانية تنفيذ مختلف عمليات الإنهاء والإصلاح.
- **سلبيات الآبار ذات قوس الانحناء الطويل:**
  - إمكانية حدوث الاستعصاء كون طول المقطع المائل كبير.
  - قلة دقة تحديد العمق الشاقولي الحقيقي (TVD) لإن التمييل يبدأ عند مسافة بعيدة عن الهدف.



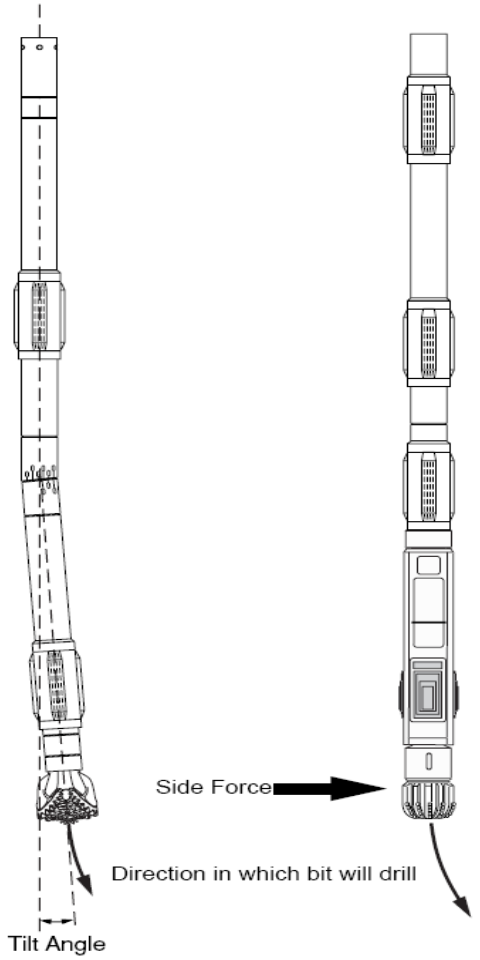
الشكل (١ –٩) بروفيلات الآبار الافقية

١-٢ أدوات تمييل الآبار

يوجد العديد من الأدوات والتقنيات التي يمكن استخدامها لتغيير اتجاه رأس الحفر. يمكن بواسطة هذه الأدوات والتقنيات تغيير زاوية الميل أو زاوية السمت أو كلتيهما معاً. تعمل هذه الأدوات والتقنيات على إحدى المبدأين التاليين الشكل (1-10):

المبدأ الأول: تشكيل زاوية تمييل لرأس الحفر (Bit tilt angle)، عن محور تشكيلة الحفر السفلية (BHA) فوق رأس الحفر مباشرة.

المبدأ الثاني: التأثير على رأس الحفر بقوة جانبية (Side force).



الشكل (1-10) مبدأ تمييل رأس الحفر.

بتشكيل زاوية التمييل لرأس الحفر أو بتعريضه لقوة جانبية، سيتابع حفر الصخور بزاوية تُخرجه عن المسار الحالية للبئر.

الأدوات الرئيسية المستخدمة من أجل هذا الهدف هي:

١) رأس الحفر النفاث (Badger Bit).
٢) ريشة الحفر المائلة (Whip stock).
٣) أداة التمييل (Rebel Tool).
٤) وصلة التمييل مع محرك الإزاحة الموجبة (BentSub and PDM).
٥) تشكيلات قاع البئر الموجهة (DBHA).
٦) أنظمة الحفر الموجه غير الدوار (SDS).
٧) أنظمة الحفر الموجه الدوار (RSS).
٨) المحركات المغمورة في قاع البئر (المحركات الجوفية)

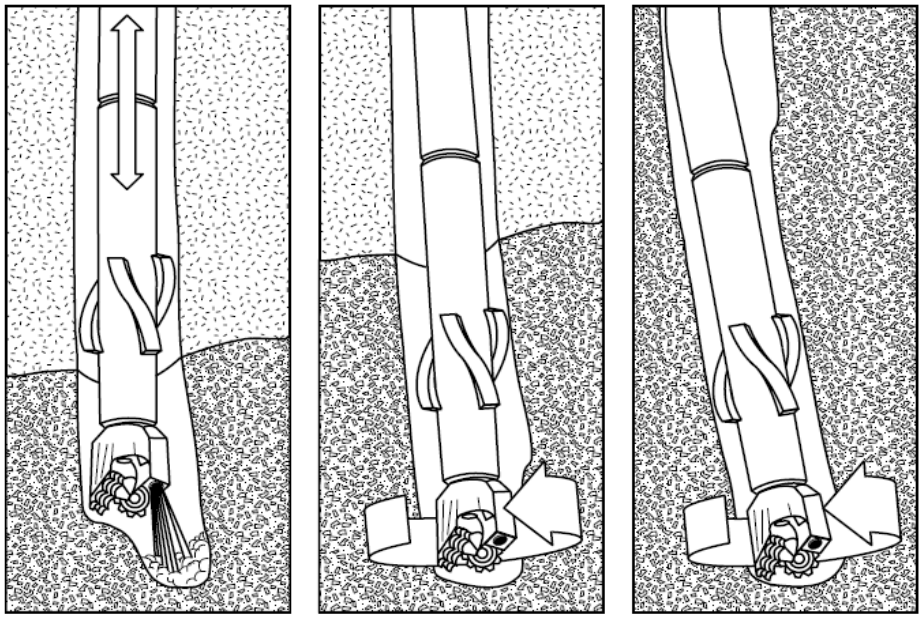
١-رأس الحفر النفاث (Badger Bit) (التمييل النفثي):

يستخدم هذا الرأس طاقة سائل الحفر لتغيير اتجاه رأس الحفر، حيث يخرج سائل الحفر من خلال فتحة وحيدة واسعة من فتحات خروجه من رأس الحفر. يتم وصل رأس الحفر مع تشكيلة الحفر بواسطة أعمدة الحفر، حيث يجب أن يكون عمود حفر واحد على الأقل مصنوع من معدن غير قابل للمغنطة ومزوّد بممركز (Stabilizer)، الشكل (١-١١).

يجب أن يكون رأس الحفر موجهاً بشكل صحيح، حيث يتم توجيه فتحة خروج سائل الحفر بالاتجاه الذي ينبغي أن يحفر به رأس الحفر. يتم ضخ سائل الحفر عبر رأس الحفر، خلال توقف تشكيلة الحفر عن الدوران، حيث يتم إحداث تجويف في الطبقة الصخرية على قاع البئر بالقرب من فتحة خروج سائل الحفر الواسعة. ومع استمرار ضخ سائل الحفر مع تحريك تشكيلة الحفر (مواسير وأعمدة ورأس الحفر) للأعلى والأسفل (رفع وإنزال) سيتبع رأس الحفر التجويف المتشكل في الصخر. عندما يأخذ التجويف شكل إسفيني، يتم سحب رأس الحفر النفاث من البئر ويستبدل بآخر ذو قطر صغير يسمى الرأس القائد (Pilot)، متصل بتشكيلة حفر تقليدية لمتابعة الحفر عبر التجويف الإسفيني المتشكل لحفر مسار جديدة للبئر.

هذه التقنية مناسبة للحفر في التشكيلات الصخرية الطرية ولكنها تتطلب مراقبة مستمرة، حيث يمكن أن تحدث تغيرات سريعة في زاوية الميل.

بعد البدء بحفر المسار الجديدة للبئر يتم رفع (سحب) رأس الحفر القائد واستبداله برأس حفر عادي جديد تقليدي بقطر كامل لمتابعة حفر المسار المائلة للبئر.



الشكل (١-١١): تمييل البئر برأس حفر نفاث.

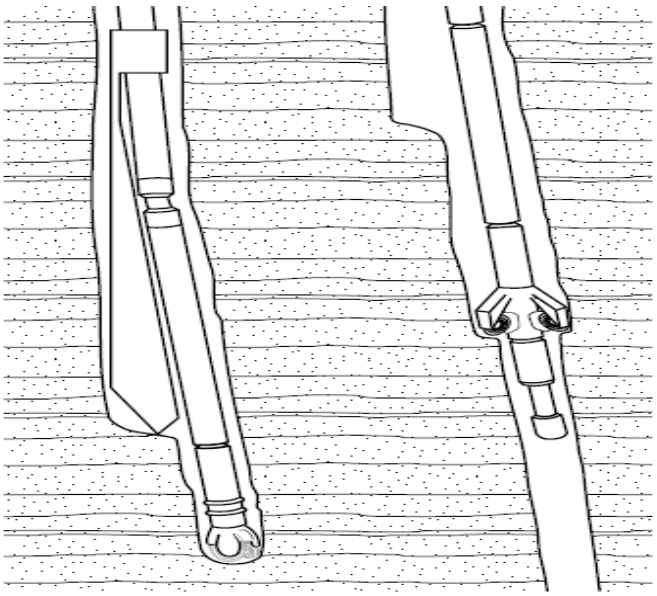
٢-ريشة الحفر المائلة (whipstock):

عبارة عن أداة فولاذية على شكل شفرة حادة، تتوفر بعدة أشكال وأحجام، يتم إنزالها في البئر حتى تغرس بالقاع عند نقطة تمييل البئر (KOP)، الهدف من ريشة الحفر تمييل تشكيلة قاع البئر (BHA)عن طريق تشكيل قوة جانبية (Side force) وتميل رأس الحفر بالاتجاه المطلوب.

عادة يتم استخدام ريشة الحفر في الآبار المبطنة (المدعمة) لتشكيل تجويف جانبي في البئر المحفورة، حيث يتم تثبيت الريشة في مكان تمييل البئر لها، ثم يتم استخدام مجموعة أدوات طحن (لاختراق مواسير التبطين والاسمنت) وبالتالي تشكيل حفرة جانبية، بعد اختراق مواسير التبطين وتشكيل الحفرة الجانبية يتم إنزال تشكيلة حفر برأس حفر بقطر صغير للبدء بحفر الجزء المائل من البئر، حيث تحتوي هذه الريشة مجرى مائل.

بعد تشكيل المسار المائل، نقوم بسحب الريشة وتوسيع الجزء المائل عن طريق كشطه بالقطر الكامل، ثم يتم إنزال تشكيلة الحفر التقليدية.

تعتبر ريشة الحفر من أولى الأدوات المستخدمة في تمييل الآبار وما تزال مستخدمة حتى الآن، ولكن التحكم باتجاه وميل البئر يكون محدود.



الشكل (١-١٢): آلية التمييل بريشة الحفر.

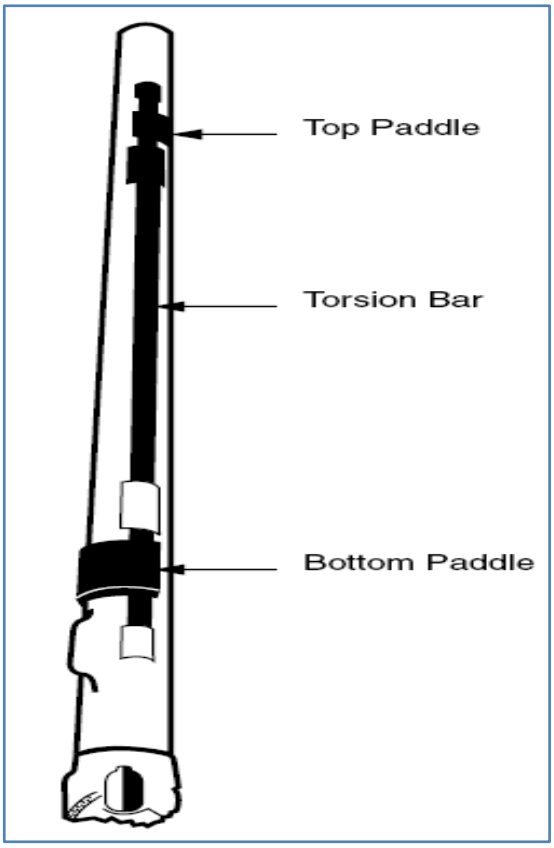
٣- أداة التمييل (Rebel Tool):

هذه الأداة مصممة بحيث يمكن تطبيق قوة جانبية على رأس الحفر لينحرف لليمين أو لليسار، فهي استخدمت بداية لتغيير زاوية سمت مسار البئر. لا يمكن استخدامها لبناء أو تخفيض زاوية ميل البئر، بل تستخدم لدى حفر الجزء المماسي لتصحيح اتجاه ميلان البئر.

هذه الأداة عبارة عن عمود حفر قصير من حيث (الأبعاد والصلابة)، وتوضع مباشرةً فوق رأس الحفر. جسم هذه الأداة يحتوي أخدود مقطوع على كامل طولها، وبداخله قضيب فتل يمكنه الدوران بحرية ويتصل عند طرفيه بقارنات مقوسة الشكل، يتمحور هذا القضيب ضمن تجاويف مخروطة في جسم العمود (الأداة)، عند دوران مجموعة مواسير الحفر، تدور القارنة العلوية نحو الجهة السفلى للبئر وتتعرض لقوة دفع نحو الداخل، تنتقل هذه القوة عبر محور الفتل لتشكل قوة دفع نحو الخارج على القارنة السفلية، مما يولد قوة دفع جانبي على رأس الحفر باتجاه التشكيلة الصخرية المحفورة

من إيجابيات هذه الأداة:

- ❖ تغيير اتجاه البئر بشكل تدريجي.
- ❖ الاستمرار بعملية الحفر الدوراني.
- ❖ أرخص من الحفر باستخدام محرك جوفي.

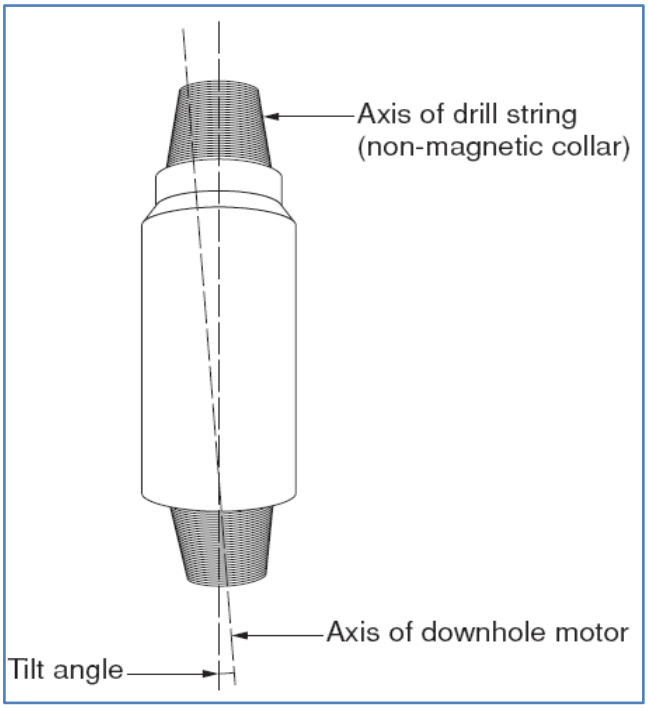


الشكل (١-١٣): أداة التمييل (Rebel Tool).

٤-وصلة التمييل ومحرك الإزاحة الموجبة (Bent sub & Mud motor):

من أكثر أدوات التمييل شيوعاً، هي وصلة التمييل مع محرك الإزاحة الموجبة (PDM) وهو محرك جوفي يعمل بطاقة سائل الحفر. وصلة التمييل (BentSub) هي ماسورة قصيرة، بقطر يساوي تقريباً قطر أعمدة الحفر ولها شرارات وصل مسننة في طرفيها.

يتم تصنيع وصلة التمييل بحيث يكون محور الشرار السفلي مائل بشكل بسيط (أقل من ثلاث درجات) عن محور الشرار العلوي. لدى وصلها مع تشكيلة الحفر (BHA) تتشكل زاوية ميل (Tilt angle) لمكونات تشكيلة الحفر (BHA) أسفل هذه الوصلة وكذلك يميل محور رأس الحفر عن محور تشكيلة الحفر الموجودة فوق وصلة التمييل، وبالتالي من غير الممكن تدوير رأس الحفر بواسطة تدوير تشكيلة الحفر من السطح.

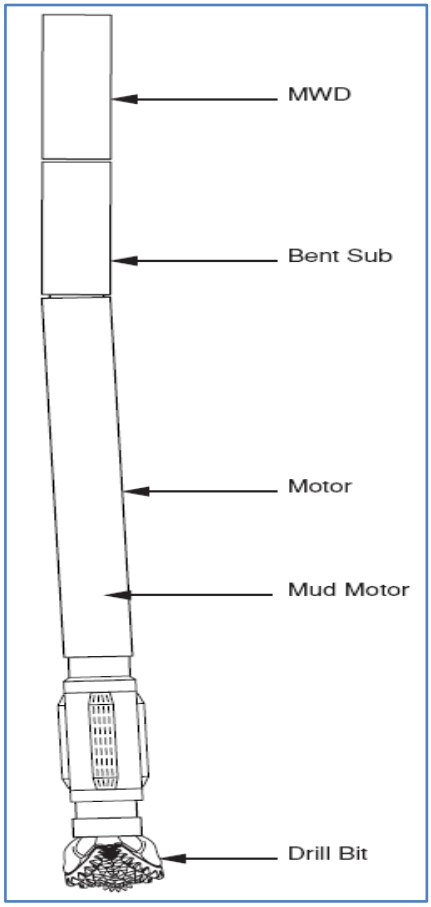


الشكل (1-14): وصلة التمييل (BentSub).

ولكن في حال تم تدوير التشكيلة من السطح فإن ذلك سيلغي تأثير زاوية التمييل وبالتالي لا يتم الحفر بالاتجاه المناسب والمخطط له. لذلك يتم استخدام محرك توربيني أو محرك إزاحة موجبة (PDM) مع وصلة التمييل الشكل (1-15).

محرك الإزاحة الموجبة، وهو محرك يعمل بطاقة سائل الحفر (Mud motor)، ويستخدم لحفر عدد آبار أكبر مما يمكن حفره بواسطة توربينات الحفر. يتم وصل المحرك الجوفي (MM)أو (PDM)مع تشكيلة الحفر (BHA) تحت وصلة التمييل (Bent sub)، أي بين رأس الحفر ووصلة التمييل (BS). عند دوران سائل الحفر داخل تشكيلة الحفر فإن المحور الداخلي للمحرك المتصل مع رأس الحفر مؤدياً لتدوير رأس الحفر، وبالتالي لا داعٍ لتدوير تشكيلة مواسير الحفر من السطح في حال وجود المحرك الجوفي (PDM) في تشكيلة قاع البئر (BHA).

استخدام المحركات الجوفية التي تعمل بطاقة سائل الحفر((PDM) والمحركات التوربينية)، قليل خارج نطاق الحفر الموجه لأنها معدات غالية الثمن وتتعرض لاستهلاك وتآكل كبير.



الشكل (١-١٥): وصلة التمييل والمحرك الجوفي.

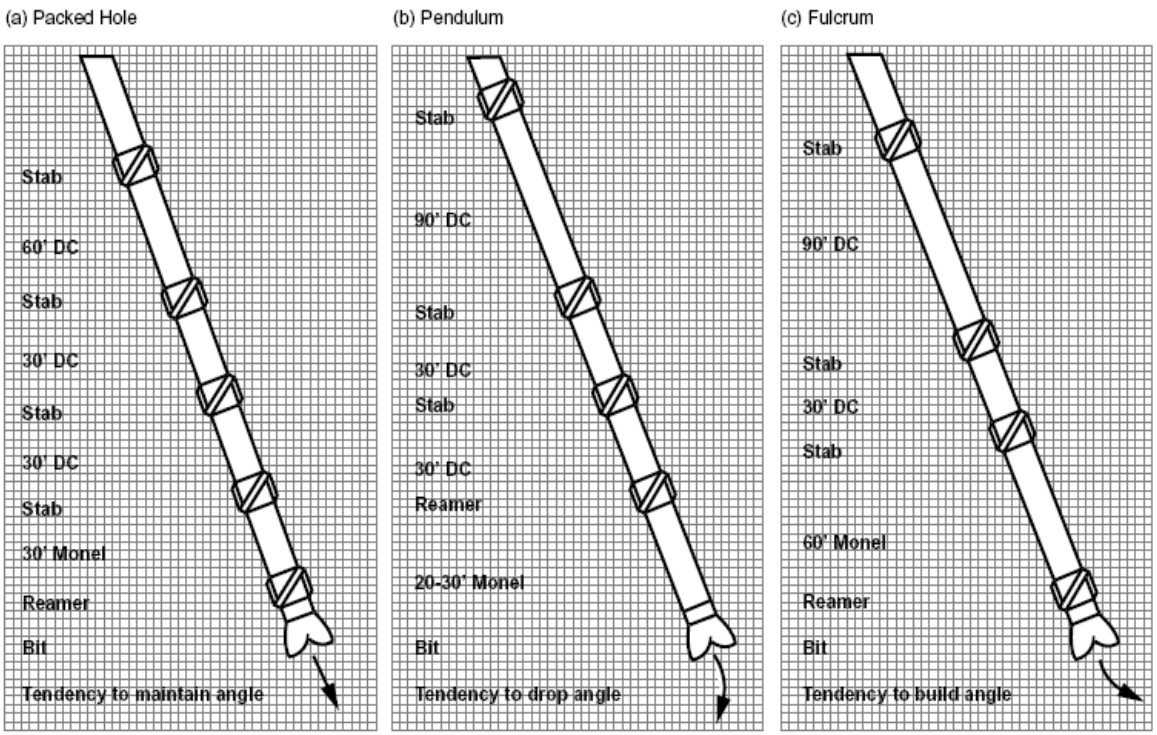
يتم إنزال أجهزة المسح الموجه (MWD) ضمن تشكيلة قاع البئر (BHA) فوق وصلة التمييل (BS) مباشرة. وبذلك يتم تقييم ومراقبة مسار البئر بشكل دوري خلال تمييل البئر.

طبعاً من خلال ما سبق ذكره، فإن وصلة التمييل ومحرك الإزاحة الموجبة يستعمل فقط في حفر الأجزاء المائلة من البئر، جزء بناء زاوية الميل (BUILD UP) وجزء تخفيض الزاوية (DROP OFF). يتم استخدام تشكيلة حفر تقليدية لحفر الأجزاء المستقيمة من البئر (Straight portions)، حيث يتم رفع تشكيلة الحفر المائل وإنزال تشكيلة حفر خطي مستقيم، ويعاد إنزال المحرك ووصلة التمييل لدى حفر الأجزاء اللازمة لتغيير زاوية الميل، وهذا الرفع والإنزال لاستبدال التشكيلات يزيد زمن وكلفة الحفر.

٥-تشكيلات قاع البئر الموجهة (DBHA):

تستخدم عادةً تشكيلة قاع البئر التقليدية في الحفر الدوراني، لحفر الآبار الشاقولية أو حفر الجزء المماسي (الخطي) من مقطع البئر المائلة (الموجهة). كما يمكن حفر الجزء المماسي باستخدام تشكيلة موجهة (Steerable Assembly). كما تستخدم تشكيلة قاع البئر التقليدية (BHA) لزيادة أو إنقاص أو تثبيت زاوية الميل بطريقة الحفر الدوراني. لكن من الصعب ضبط معدل بناء أو إنقاص زاوية الميل.

كل أجزاء تشكيلة الحفر تكون مرنة بدرجة معينة، حتى أعمدة الحفر الثقيلة تتميز بمرونة محدودة. وبالتالي لدى تطبيق الحمل على رأس الحفر تتعرض أجزاء تشكيلة الحفر للانحناء مما يسبب تمييل رأس الحفر بزاوية ما. هذه الزاوية تتعلق بصلابة أعمدة الحفر والحمل المطبق على رأس الحفر وعدد الممركزات وأماكن تثبيتها على أعمدة الحفر.



الشكل (١-١٦): تشكيلات حفر قاع البئر الموجهة.

a. تشكيلة الحفر القاسية (Packed Hole Assembly):

هذه التشكيلة قاسية جداً، تتألف من أعمدة حفر وممركزات موزعة عليها للحد من الانحناء والحفاظ على مسار رأس الحفر. عادةً ما تستخدم هذه التشكيلة في حفر القسم المماسي من البئر الموجهة. في الواقع من الصعب جدا الحصول على تشكيلة تحافظ على زاوية واتجاه القسم المماسي، لكن في الغالب يتم استخدام أعمدة الحفر القصيرة غير القابلة للمغنطة وتثبت عليها مجموعة من الممركزات والكواشط. تشكيلة حفر قاع البئر القاسية النموذجية موضحة بالشكل (1-16،a).

b. تشكيلة النواس (Pendulum Assembly):

مبدأ هذه التشكيلة يعتمد على أن وزن أعمدة الحفر غير المعلق (أي المتروك على رأس الحفر) يشكل قوة جانبية تؤدي إلى توجيه الدقَّاق إلى الجهة السفلى للبئر. إن معدل الانخفاض في زاوية الميل يعتمد على الحمل المتروك على رأس الحفر (WOB) وعدد دورات رأس الحفر (rpm)، عدد وأماكن تثبيت الممركزات والكواشط (Reamers) والمسافة بين رأس الحفر والكاشط (الشكل 1-16،(b))

تشكيلة النواس الرئيسية لتخفيض زاوية الميل تتكون من:

Bit-Monel DC-reamer-DC-stab-DC-stab-90' DC-stab

يتم زيادة معدل تخفيض زاوية الميل (باستخدام تشكيلة النواس) من خلال:

- تطبيق حمل أقل على رأس الحفر.
- زيادة عدد الدورات وضغط المضخة في التشكيلات الصخرية الطرية (حيث الفعل النفثي والكشط ممكن).
- استخدام أعمدة حفر بقطر كبير أسفل الكاشط، بينما فوق الكاشط تكون أعمدة الحفر بقطر صغير.

c. تشكيلة نقطة الارتكاز (Fulcrum Assembly):

مبدأ هذه التشكيلة يعتمد على وضع كاشط بالقرب من رأس الحفر وتطبيق حمل كبير عليه. لدى تطبيق الحمل على رأس الحفر فان أعمدة الحفر فوق الكاشط ستنحني مما يجعل الكاشط يستند على الجانب السفلي للبئر، أي يشكل نقطة ارتكاز (Fulcrum) وبالتالي يتجه رأس الحفر نحو الأعلى. معدل زيادة الميل يعتمد على الحمل المتروك على رأس الحفر، قطر الأعمدة، أماكن تثبيت الممركزات والكواشط فوق الكاشط الأول. تشكيلة نقطة الارتكاز الأساسية لتمييل البئر تتكون من: الشكل (1-16،c)

Bit-sub-reamer-Monel DC-DC-stab-DC-stab-90' DC-stab

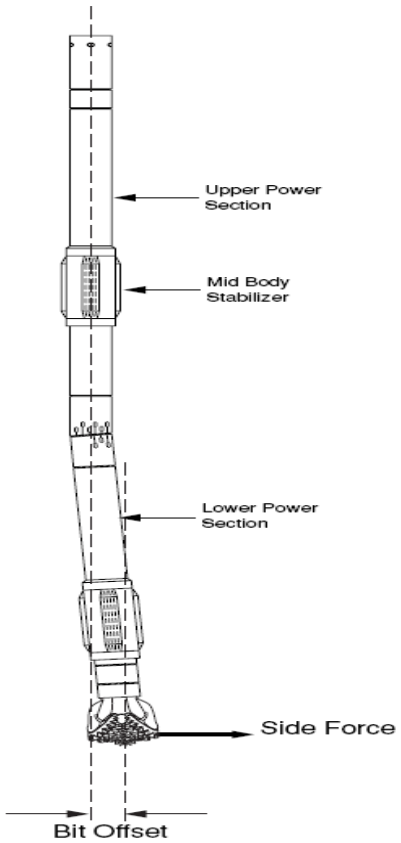
يتم زيادة معدل بناء زاوية الميل (باستخدام تشكيلة نقطة الارتكاز) من خلال:

- ❖ تطبيق حمل كبير على رأس الحفر.
- ❖ تقليل عدد الدورات وضغط المضخة في التشكيلات الصخرية الطرية.
- ❖ استخدام أعمدة حفر بقطر صغير.

6-نظام الحفر الموجه (غير الدوراني) (Seerable Drilling System= SDS):

يسمح بتغيير كل من زاوية الميل وزاوية الاتجاه (السمت) أو إحداهما، بدون الحاجة لرفع مواسير الحفر لتغيير تشكيلة قاع البئر(BHA) . يتكون هذا النظام من:

رأس حفر- محرك جوفي ممركز (PDM) - ممركز- أجهزة المسح الجيوفيزيائي الموجه لقياس اتجاه وميلان البئر وإرسال القيم إلى السطح، الشكل (١-١٧).



الشكل (١-١٧): نظام الحفر الموجه غير الدوراني.

يتم تغيير الاتجاه بتطبيق زاوية ميل (Tilt angel) قريبة من رأس الحفر باستخدام وصلة خاصة (Navigation sub) على المحرك الجوفي (PDM). حيث تؤدي هذه الوصلة نفس دور وصلة التمييل (Bent sub) عند دوران رأس الحفر بواسطة (PDM).

بما أن زاوية الميل (Tilt angle) قريبة جداً من رأس الحفر أكثر بكثير من حالة (Bent sub) فيمكن تدوير التشكيلة بتدوير كامل مواسير الحفر من السطح.

لحفر الجزء المائل يتم تدوير رأس الحفر بواسطة المحرك الجوفي (PDM)، عن طريق ضخ سائل الحفر فقط. بينما لحفر الجزء الخطي (Straight line) يتم ضخ سائل الحفر وتدوير تشكيلة مواسير الحفر من السطح، لدى استخدام الوصلة الخاصة (Navigation sub) مع المحرك الجوفي (PDM) لحفر جزء بناء أو تخفيض زاوية الميل (بدون تدوير مواسير الحفر)، تسمى العملية بالحفر الموجه أو الحفر بالانزلاق (Oriented or sliding drilling). ولدى حفر الجزء الخطي المستقيم بتدوير تشكيلة مواسير الحفر يسمى بالحفر الدوراني (Rotary drilling).

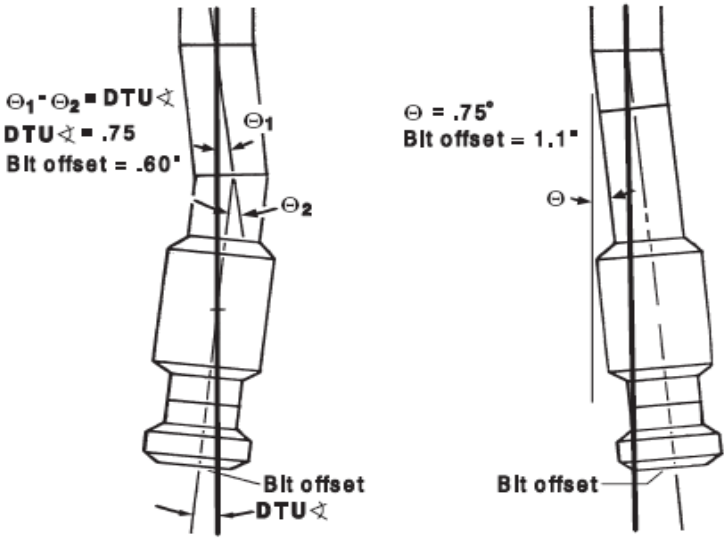
- ❐ يؤثر على عملية التمييل في هذه التقنية:
  - ❖ قرب الوصلة الخاصة (NS) من رأس الحفر، وزاوية ميلها Tilt angle.
  - ❖ قياس المحرك الجوفي والمسافة بينه وبين مكان تثبيت أول ممركز فوق المحرك الجوفي PDM.
- ❐ يستخدم نظام الحفر الموجه (SDS):
  - ❖ وجود صعوبة في تغيير اتجاه البئر باستخدام تقنيات أخرى.
  - ❖ وجود صعوبة في ضبط الجزء المماسي من البئر الموجهة، (وجود تشكيلات صخرية مقبّبة ومتطبّقة).
  - ❖ لدى حفر البروفيلات التي تتطلب تغييراً مستمراً لتشكيلة الحفر.
- ❐ **المكونات الأساسية لتقنية (SDS):**
  - ❖ رأس الحفر: غالباً ثلاثي التروس المخروطية أو ألماسي (PDC) ويفضل الألماسي لتقليل عدد مرات رفع تشكيلة الحفر لاستبدال الدقّاق المستهلك.
  - ❖ المحرك الجوفي: يؤمن تدوير رأس الحفر من خلال ضخ سائل الحفر في الأجزاء المائلة غير الخطية من البئر. يمكن تزويده بوصلة خاصة (NS) ذات غلاف خارجي مائل.
  - ❖ الوصلة الخاصة (NS): تقوم بتحويل المحرك الجوفي العادي (Standard Mud Motor) إلى محرك جوفي موجه (Steerable Motor)، تكون مائلة بزاوية محددة وتوضع بالقرب من رأس الحفر حيث تسمح بالحفر الدوراني والموجه بدون استهلاك كبير في المحرك الجوفي أو رأس الحفر.

❖ وتصمم بشكل يضمن تمركز قوى التمييل على قاع البئر المقابل لرأس الحفر وليس جوانب رأس الحفر (قطر البئر). وذلك لزيادة فعالية رأس الحفر في تقطيع وتفتيت الصخر. نميز نوعين للوصلة الخاصة (NS):

1. Double Tilted Universal joint (DTU).
2. Tilted Kick-Off sub (TKO).

كلا النوعين يؤمن ميل رأس الحفر، لحرف مسار البئر عن الشاقول بالاتجاه المطلوب.

الوصلة (DTU) تتضمن زاويتين متعاكستين لتحقيق ميلان رأس الحفر بخطوة محددة. الشكل (١-١٨).



الشكل (١-١٨): الوصلة الخاصة (DTU).

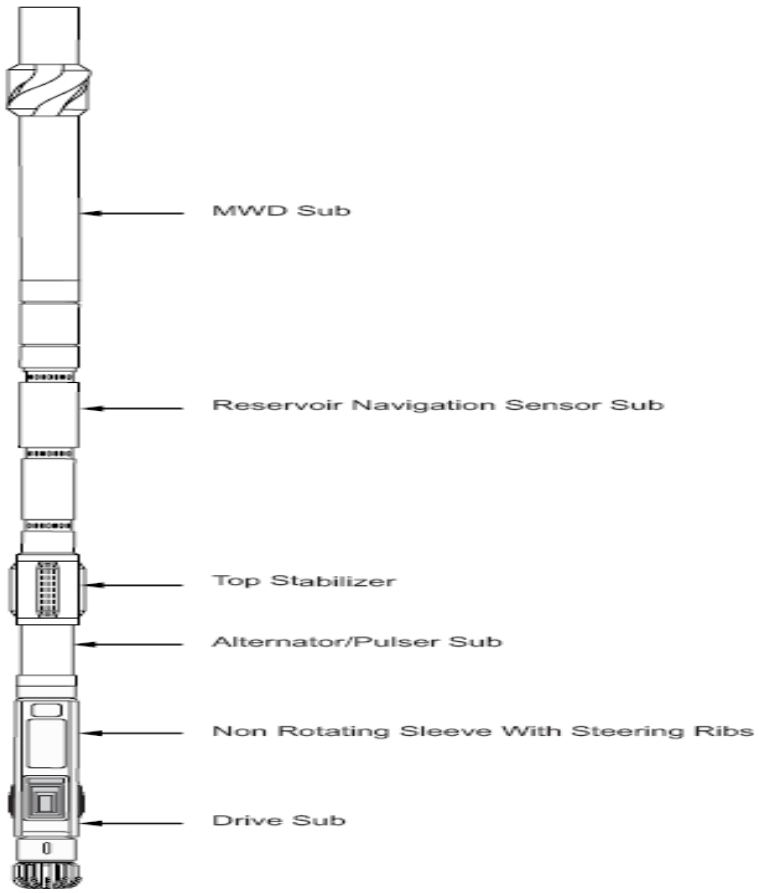
❖ ممركزات خاصة: يستخدم ممركزان ضمن تشكيلة (SDS)، ممركز يثبت على المحرك الجوفي ويكون بقطر أصغر بقليل من قطر البئر (ويشكل جزء أساسي من المحرك الجوفي)، والممركز العلوي مشابه لممركزات تشكيلة الحفر العادية وبقطر أصغر بقليل من قطر البئر. حجم الممركزين والمسافة بينهما تُضبط لتقليل ظاهرة الطنين في حالتي الحفر الدوراني والموجه.

❖ أجهزة قياس الميل والسمت: يستخدم مع نظام (SDS)، أدوات القياس الجيوفيزيائي خلال الحفر (MWD) بحساسات لقياس الميل والسمت والتركيب البتروفيزيائي، كما تسمى (LWD) أي القياسات خلال الحفر. الحساسات البتروفيزيائية تمكننا من قياس تغير خواص الطبقات المخترقة (مسامية، مقاومية، تركيب ليتولوجي) وتحديد فيما إذا توجد حاجة لتغيير اتجاه البئر.

استخدام مجموعة (MWD) يفيد في توجيه حفر البئر حسب متطلبات ومقترحات مهندسي المخزون.مصطلح (Geosteering) يستخدم عندما يكون نظام الحفر الموجه(SDS) مقرون باستخدام أجهزة قياس بتروفيزيائية و جيوفيزيائية (MWD) لزوايا الميل والاتجاه.

٧-نظام الحفر الموجه الدوراني (Rotary Steering System = RSS):

تعتمد هذه التقنية على ذات المبدأ بتمييل رأس الحفر عن محور البئر بالطريقة السابقة (SDS). في حالة (SDS) تدور تشكيلة المواسير لدى حفر الجزء الخطي فقط ولا تدور عند حفر الجزء المائل، لكن في هذه الطريقة (RSS) يمكننا تدوير تشكيلة مواسير الحفر في جميع أجزاء البئر المائلة والخطية. وهذا يؤمن تنظيف أفضل لقاع البئر من الفتاتات الصخرية المحفورة وتسهيل رفع هذه الفتاتات إلى السطح. في تقنية (SDS) تميل الفتاتات لتتراكم حول مواسير الحفر مسببة استعصاءها بسبب عدم دورانها.



الشكل (١-١٩): نظام الحفر الموجه الدوراني (RSS).

تم تطوير العديد من الأدوات التي تسمح بدوران تشكيلة مواسير الحفر خلال حفر الآبار المائلة، من قبل شركات نفطية عالمية وشركات خدمة آبار النفط والغاز. من هذه الأدوات نذكر:

1. Auto Trak RCLS System.
2. Auto Trak G3 Rotary Steerable System.
3. AziTrak Rotary Steerable System.

نظام الحفر الموجه الدوراني (Auto Trak RCLS System)، مكون من مجموعة سطحية وجوفية.

- **المجموعة الجوفية:**

تتكون من:

- ❐ وحدة التوجيه (Steerable Unit) توجد ضمن الوصلة غير الدوارة (Non-Rotating Sleeve)، لضبط اتجاه رأس الحفر. يقوم المحور القائد المار عبر الوصلة غير الدوارة بتدوير رأس الحفر. حيث تكون الوصلة غير الدوارة مفصولة عن المحور القائد لذلك لا تتأثر بدوران تشكيلة مواسير الحفر.

تحتوي الوصلة غير الدوارة على:

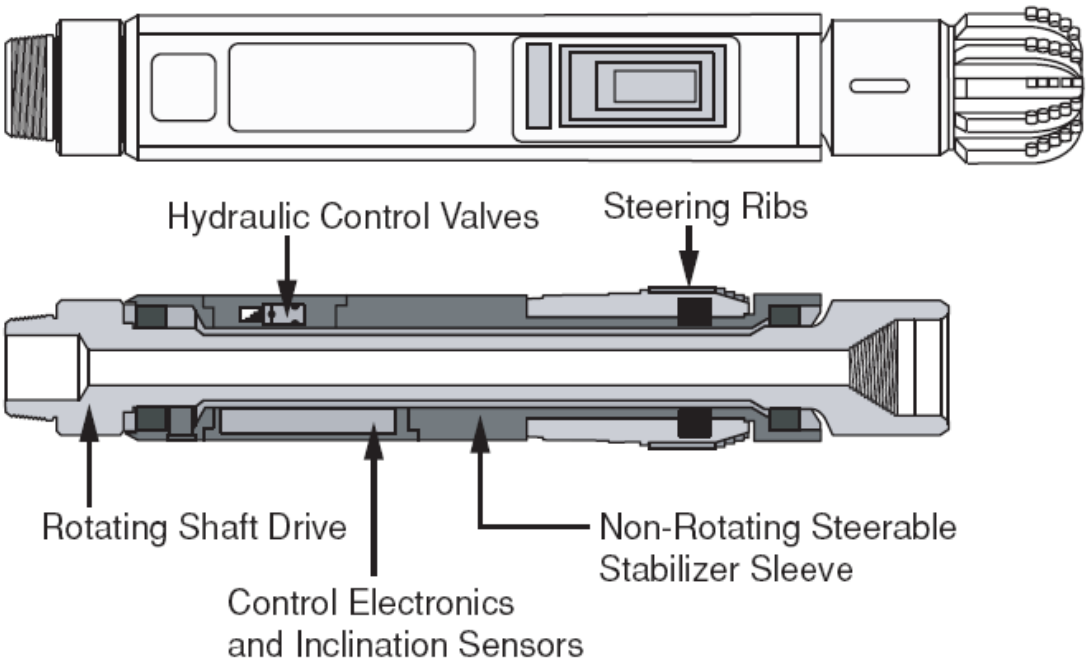
١) ثلاثة أذرع توجيه (نتوءات قصيرة) (Ribs) تعمل هيدروليكياً.

٢) جهاز قياس الميل بالقرب من رأس الحفر (Inclinometer).

٣) السابرة الإلكترونية.

٤) مكابس (تعمل تحت تأثير ضغط سائل الحفر) للتحكم بالقوى المؤثرة على أذرع التوجيه (Pistons).

يتم تطبيق قوى هيدروليكية مختلفة على كل مكبس متصل بذراع لتوجيه رأس الحفر بالاتجاه المطلوب، وبمعدل بناء الزاوية المبرمج وفق مسار البئر المخطط له. يتم ضبط القوى المؤثرة على الأذرع والتحكم بها من السطح بإرسال أوامر على شكل نبضات هيدروليكية تتلقاها وحدة التحكم الالكتروني الجوفية.

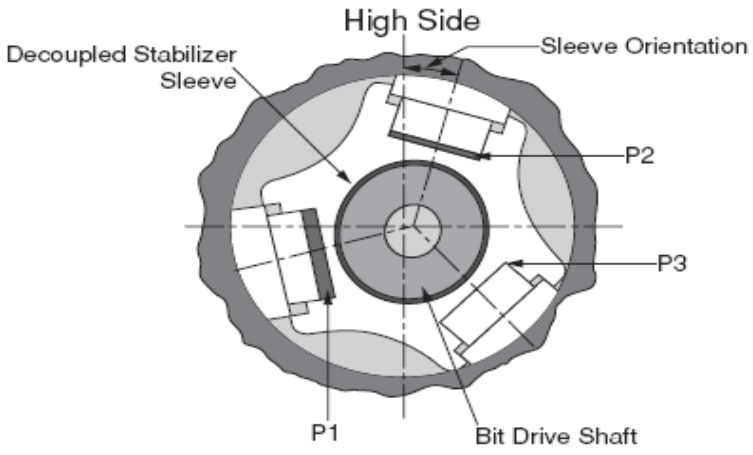


الشكل (١-٢٠): الجزء غير الدوار من جهاز التوجيه الدوراني.

يقوم المعالج (Micro-Processing) الموجود داخل النظام (Auto Trak RCLS) بحساب قيمة الضغط التي يجب تطبيقها على كل مكبس، للحصول على زاوية وجهة الميل المطلوبة. تحديد شدة القوى المطبقة على أذرع التوجيه مع الأخذ بعين الاعتبار معدل التمييل وحدوده يتم بشكل أوتوماتيكي.

❐ السابرة الالكترونية (Electronic Probe):

تؤمن الربط بين المكونات الجوفية والسطحية للنظام، كما تحتوي أدوات قياس الميل وحساسات الاهتزازات. كما تؤمن الربط بين جهاز قياس الميل القريب من رأس الحفر ووحدة التوجيه لإظهار تغير الميل والسمت بشكل ثلاثي الأبعاد على الشاشة السطحية.



الشكل (١-٢١): أذرع التوجيه في نظام (Auto Trak RCLS).

❐ الوصلة الخاصة (Navigation Reservoir) وأدوات القياس (MWD):

وتستخدم لقياس المقاومة الكهربائية ومحتوى (GR)، مما يؤمن تحديد المؤشرات الليتولوجية واتجاه وميل البئر في التشكيلة الصخرية المخترقة على مسافة تصل إلى خمسة أمتار حول الجهاز بدقة (400 KHZ). بينما في الحفر الأفقي تصل مسافة الرصد إلى (٧٥) متر من رأس الحفر لدى استخدام جهاز بدقة (2 MHZ).

- **المجموعة السطحية:**

تتكون من منظومة الكمبيوتر السطحي (Surface Computer System)، والصمام الميكانيكي (By-Pass Actuator).

يقوم نظام الحواسيب على السطح بترجمة الإشارات المستقبلة من أدوات وأجهزة القياس الجوفية، من خلال المعالج المركزي ووحدة ترجمة (Decoding) المؤشرات المقاسة في البئر. القسم الجوفي مبرمج لتلقي نبضات سائل الحفر السلبية المرسلة عن بعد بواسطة الصمام الميكانيكي (By-Pass Actuator).

الصمام الميكانيكي يرسل الأوامر إلى الأجهزة الجوفية من خلال النبضات السالبة في سائل الحفر. يثبت هذا الصمام على العمود القائم لسائل الحفر (Standpipe) حيث يحدث النبضات السالبة في سائل الحفر المتجه نحو مواسير الحفر.

٨- المحركات المغمورة في قاع البئر (المحركات الجوفية)

(Down hole motors):

يتم استخدام هذه المحركات الجوفية لتدوير رأس الحفر بشكل مباشر ودون الحاجة لتدوير تشكيلة مواسير الحفر. وهي على نوعين:

8-1-المحرك الجوفي (PDM)الشكل (1-22):

هو عبارة عن محرك يعمل بتأثير سائل الحفر داخل البئر، ويستخدم لتدوير رأس الحفر بدون الحاجة لتدوير تشكيلة الحفر. ويعمل بطاقة سائل الحفر أو الغاز أو الهواء ويتألف من (٤) أجزاء أساسية:

١) صمام تفريغ (Dump valve): عبارة عن صمام جانبي يسمح بملء أو تفريغ مواسير الحفر عن الرفع أو الإنزال.

٢) مجموعة المحرك (Motor assembly): تتألف من قسم ساكن من المطاط ويحتوي تجويف بشكل حلزوني بمقطع عرضي ذو شكل إهليجي (بيضوي). يمر عبر التجويف (محور فولاذي صلبsolid steel shaft) ذو شكل حلزوني متموج. الطرف العلوي للقسم الدوار (المحور الفولاذي) يشكل نهاية حرة بينما النهاية السفلية تكون مثبتة بقضيب توصيل (rodconnecting).

٣) قضيب التوصل(connecting rod): مجهز بمفصل عام بكلا طرفيه ليلائم الدوران غير المتمركز (eccentric rotation) للقسم الدوار ونقل هذا الدوران إلى المحور القائد (Drive shaft).

٤) مجموعة المحور القائد والمحامل(Bearing and drive shaft) : تتألف من مساند (مضاجع) شعاعية ومساند انضغاطية تسمح بدوران سلس للمحور القائد. يتم تشحيم المساند بسائل الحفر، المحور القائد يتصل مع وصلة رأس الحفر (Bit sub) وتشكل وصلة رأس الحفر القسم الخارجي الدوار الوحيد من المحرك (Mud sub).

المحرك النموذجي يحتوي ثلاث مجموعات من المساند المحيطة بمحور القيادة: مجموعتين من المحامل الشعاعية (القطرية) علوية وسفلية. مع مجموعة مساند انضغاط محورية. المساند المحورية تتأثر بالحمل المطبق على رأس الحفر والضغط الهيدروليكي الذي يتعرض له المحرك، وهي عبارة عن مجموعة كرات متلامسة ببعضها عن طريق أخاديد. يختلف عدد المساند حسب قياس المحرك.

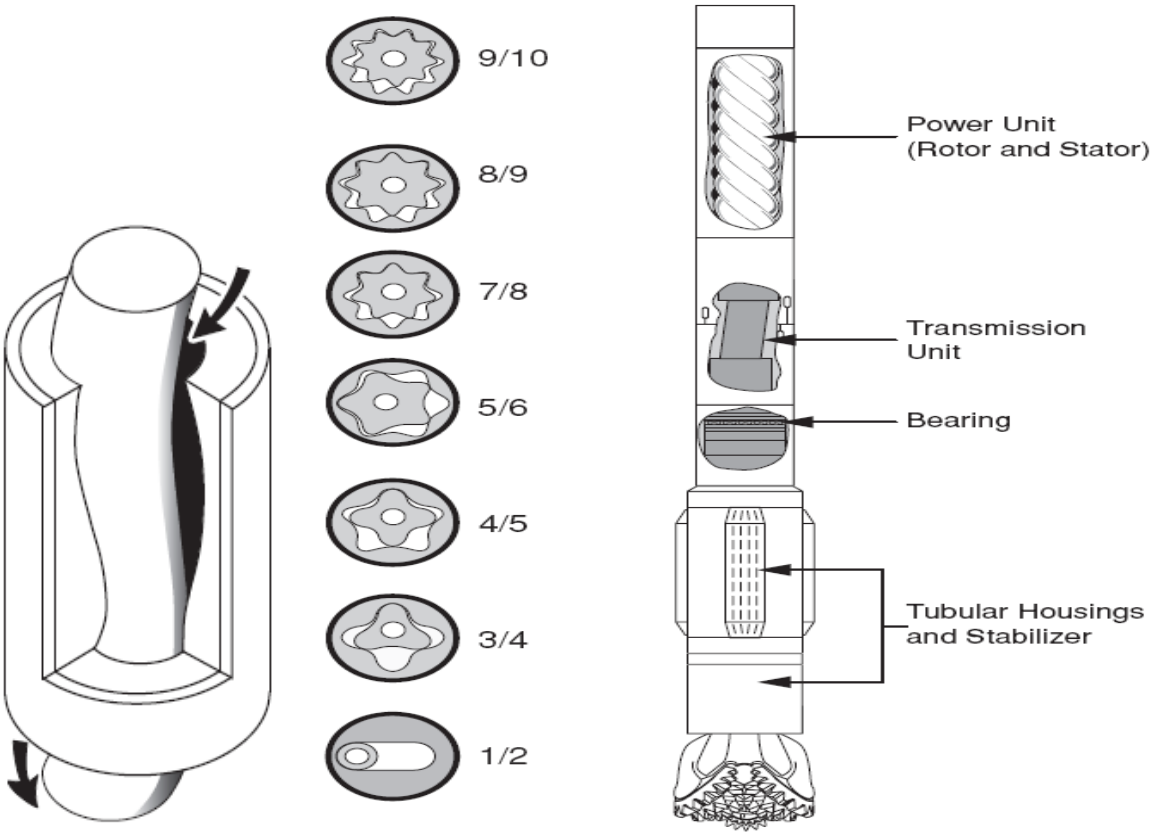
المساند القطرية العلوية والسفلية، مصنوعة من التنغستين والكربون، وهي تتحمل الإجهاد الناتج عن الدوران غير المتمركز للمحور القائد مقابل الأحمال الجانبية. التصميم الأصلي للمساند العلوية القطرية، يسمح بمرور كمية قليلة من سائل الحفر للتبريد وتزليق مجموعة المساند، تدفق بحدود (١٠-٢٠٪) حسب مقدار انخفاض ضغط رأس الحفر والمحرك.

يتجمع سائل الحفر من خلال فتحات بمحور القيادة ويخرج من خلال فتحات رأس الحفر. في بعض المحركات تستخدم مساند ألماسية (Diamond bearing) وهنا يتم توجيه أكثر من ٢٠٪ من كمية سائل الحفر لتبريدها حسب شروط البئر.

تستخدم حاليا محركات إزاحة موجبة متعددة الطوابق (عادة ٣ طوابق). عند ضخ سائل الحفر ومروره عبر المحرك فإنه يمر عبر التجاويف (تجاويف بين الروتر والستاتور) بتأثير الضغط. فيدور المحور القائد باتجاه عقارب الساعة، وبالتالي ينتقل الدوران إلى رأس الحفر عبر محور القيادة.

عادةً نستخدم وصلة مائلة Bent sub فوق المحرك PDM لتمييل البئر، أو يمكن استخدام غلاف مائل للمحرك (BENT PDM HOUSING). استخدام المحرك ذو الغلاف المائل يتطلب تعديل مجموعة قضيب التوصيل،لإعطاء المحرك انحناء بسيط للحصول على نفس التأثير باستخدام وصلة التمييل.

لدى استخدام المحركات الجوفية يجب الانتباه إلى العزم المعاكس(Reactive torque) ، حيث تتجه تشكيلة الحفر للدوران باتجاه معاكس لاتجاه دوران رأس الحفر. القسم الدوار يدور باتجاه اليمين، بينما يخضع القسم الساكن لقوة دوران نحو اليسار حسب نوع الطبقة المحفورة وطول تشكيلة الحفر، فإن مواسير الحفر ستتعرض للالتواء مما يسبب التأثير على اتجاه دوران رأس الحفر. هذا العزم المعاكس يزداد بازدياد(WOB) وبازدياد ضغط المضخات، فلذلك يجب على الحفار (Directional Driller) أن يأخذ ذلك بعين الاعتبار تشكل هذا العزم لدى استخدام وصلة التمييل (Bent sub).



الشكل (1-22): مجموعة المحرك الجوفي (PDM).

أنماط مجموعة قضيب التوصيل (Connecting rod assembly Types):

طالما أن المحور الدوار له شكل حلزوني (spiral shape) فإنه لا يدور بشكل متمركز بل يشكل حركة صعود وهبوط (back and front motion). هذه الحركة يمكن أن تتحول إلى حركة متمركزة لتنتقل إلى رأس الحفر عبر وصلة القيادة (drive sub) يتحقق ذلك عبر قضيب التوصيل. وله عدة أشكال:

❖ **الوصلة العامة (universal joint):**

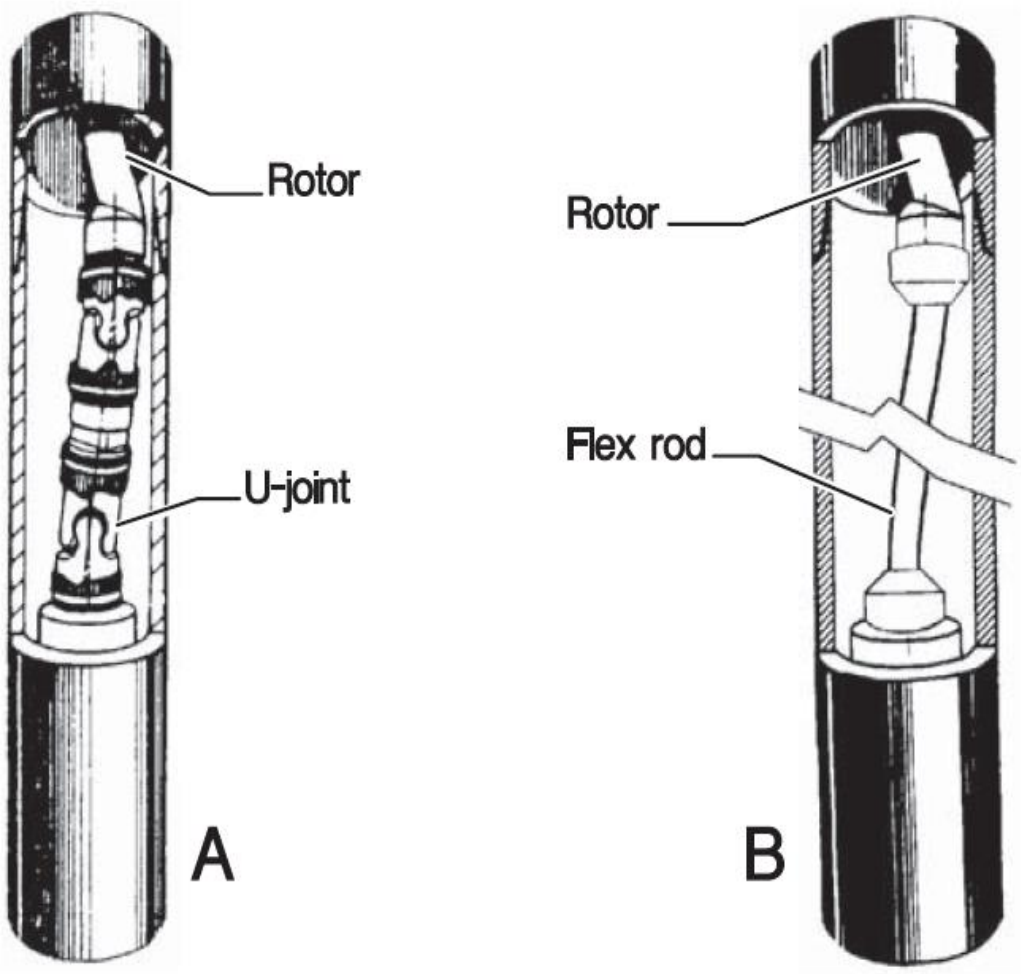
تستخدم في تطبيقات صناعية كثيرة منها (PDM)، وتتألف من وصلتين على شكل حرف(U) كل منهما مملوءة بالشحم، معزولتان بأنبوب من المطاط المقوى المقاوم وذلك لمنع تلوثهما بسائل الحفر. الحركة التراجعية (back) لمجموعة الوصلات العامة، تعبر عن نقص في المتانة الكافية لتطبيق العزم الأكبر، تم تلافي هذه المشكلة بالجيل الجديد، للمحركات ذات العزم المرتفع (High torque PDM) خاصة لدى استعمالها مع رؤوس حفر من نوع PDC وذلك تبعا لصعوبات التصنيع.

❖ **القضيب المرن(Flex rod) :**

تم تطوير تقنية حديثة لمجموعة قضيب التوصيل بدلاً من (U–Joint) وهي عبارة عن استعمال قضيب ملتوي مصنوع من الفولاذ أو التيتانيوم. هذه التقنية صيانتها سهلة وغير مكلفة وقليلة الأعطال كونها لا تحتاج عوازل مطاطية ولا عمليات تشحيم حيث يكون القضيب محدد بدرجة انحناء جانبي مسموح بها.

هذه التقنية تستعمل في المحركات ذات النمط (Navi –drills) ذات الأحجام الصغيرة.

هناك تطبيق جديد يتضمن تركيب قضيب مرن ملتوي (flex rod) داخل الروتر المجوف PDM موجه قصير وذو عزم عالي(Short ،(high torque steerable PDM .



الشكل (١–٢٣) يوضح أنماط مجموعة قضيب التوصيل.

أنماط المحركات الجوفية ذات الإزاحة الموجبة (TYPS OF PDM'S):

١) النمط وحيد التجويف :١/٢(تجويف بالروتر/تجويفين بالستاتور): يعطي عزم منخفض (Low Troque)، بينما سرعة الدوران تكون عالية high speed. العزم يتناسب مع معدل انخفاض الضغط عبر المحرك (pressure drop). هذه المحركات لها استخدامات جيدة مع رؤوس الحفر PDCأو TSP، ويمكن أن يستخدم للحفر الموجه عندما يكون قصيراً.

٢) المحركات عديدة التجاويف (MULTI-LOBE MOTORS): لها عزم عالي وسرعة قليلة فتستخدم مع رؤوس حفر من نوع التروس المخروطية (Roller cone bits) وللتلبيب coring. كما تستخدم مع (PDC bits) ذات القواطع العريضة والتي تحتاج إلى عزم عالي.

المحركات متعددة التجاويف لها تطبيقات جيدة في الحفر المائل كونها قصيرة وذات سرعة منخفضة وعزم عالي. خصوصا مع الوصلة المائلة (Bent sub) كأداة تمييل.

شروط استخدام محركات PDM:

١) بازدياد الضغط على السطح يتوقف المحرك الجوفي لتلافي ازدياد الاحتكاك والتآكل.

٢) يجب المحافظة على أدنى محتوى لسائل الحفر من الرمل.

٣) درجة الحرارة الحدية (١٣٠ درجة سيلزيوس) أكثر من ذلك يتمدد القسم الساكن.

٤) مجال انخفاض الضغط عبر المحرك خلال العمل (50-800Psi).

٥) مجال تآكل المساند المسموح بها (1-8mm) وذلك حسب قياس المحرك.

٨-٢- توربين الحفر (Turbodrill) الشكل (1-24):

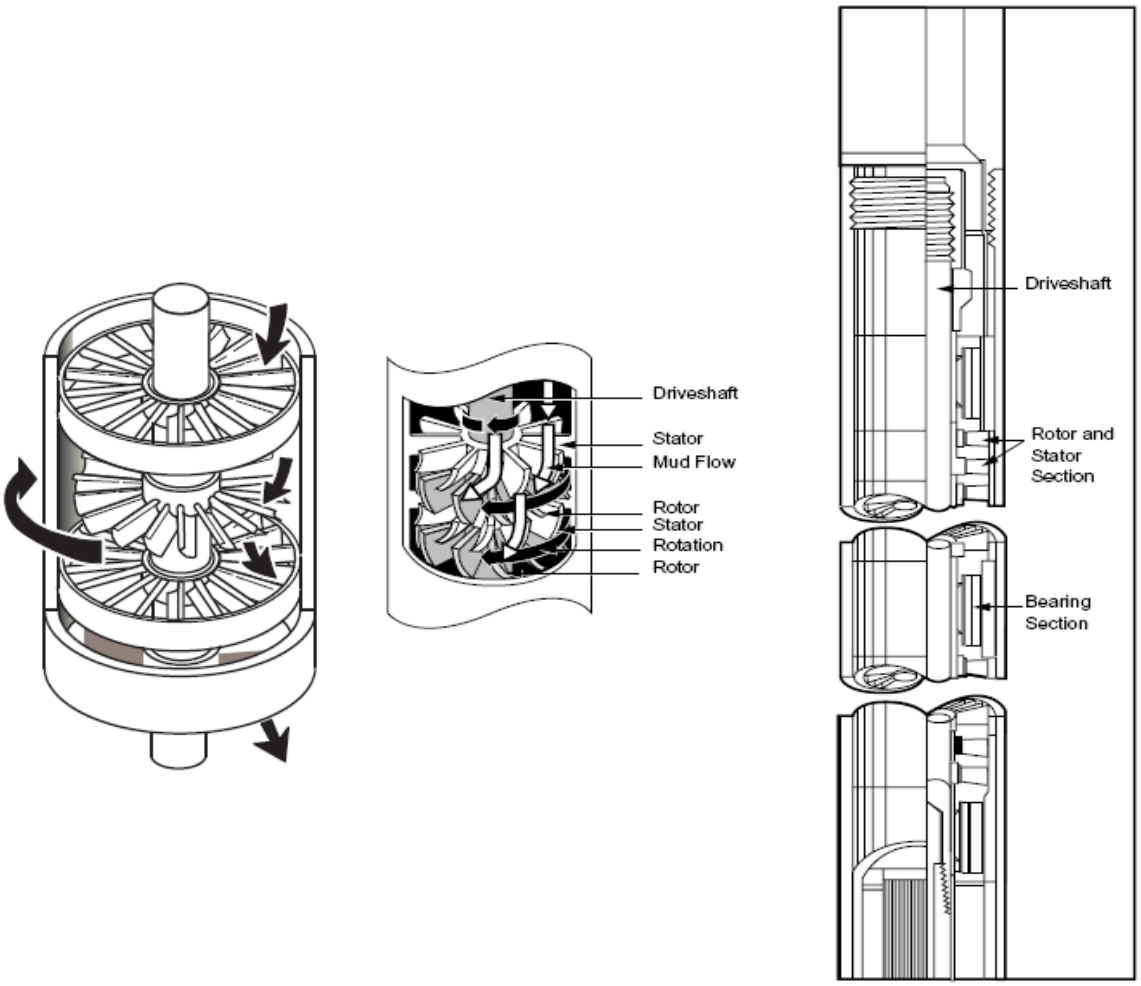
أول المحركات الجوفية المستخدمة في عمليات الحفر، هي توربين حفر Torbin=Turbodrill)، يختلف عن محرك الإزاحة الموجبة بأنه يعمل فقط بطاقة سائل الحفر. وهذا التوربين يتألف شفرات دوارة (قسم دوار)، وشفرات ساكنة (قسم ساكن)، مركبة باتجاه يميني لاتجاه جريان السائل. كل زوج شفرات (دوارة- ساكنة) يسمى طابق(Satge).ويمكن لهذا التوربين إن يكون متعدد الطوابق (multistage)، كما يحتوي التوربين على قسم المضاجع (المحامل)،محور قائد، وصلة تدوير رأس الحفر.

الشفرات الدوارة تتصل بمحور قيادة (Drive shaft)، بينما الشفرات الساكنة تتصل بغلاف التوربين الخارجي وتوجه تدفق سائل الحفر إلى الشفرات الدوارة (rotors)التي ترتبط بمحور دوار. تدور الشفرات في القسم الدوار

على الدوران وبالتالي يدور المحور القائد الدوار باتجاه عقارب الساعة، وهذا يؤدي إلى تدوير رأس الحفر drill (bit) عبر وصلة رأس الحفر (Bit sub).

يمكن استخدام التوربين في الحفر المائل، كما يمكن استخدام في الحفر غير المائل كطريقة بديلة للحفر الدوراني كونها طريقة تتميز بما يلي:

١) تقليل معدل تآكل مواسير الحفر ومواسير التبطين (التغليف).
٢) تطبيق عزم قليل لتدوير رأس الحفر.
٣) إمكانية تدوير رأس الحفر بسرعة عالية (RPM) وبالتالي معدل اختراق عالي.
٤) عادة يستخدم التوربين مع رأس حفر(PDC) .



الشكل (١-٢٤) يبين أجزاء توربين الحفر

الفصل الثاني– تقنيات استخراج النفط الثقيل

Heavy Oil Producing Techniques

على الرغم من توفر النفط الخام التقليدي في كثير من الأماكن في العالم، واكتشاف مزيد من الاحتياطيات من هذا الخام، وتحسن عمليات استخراج النفط من باطن الأرض، إلا أن النفط غير التقليدي يكتسب أهمية كبيرة لكونه أحد الاحتياطيات المؤكدة من الطاقة في المستقبل، كما أنه يتوزع في كثير من الأماكن في العالم، ومن أهم أنواعه النفط الثقيل، والثقيل جداً، والزيت الصخري، وزيت رمال القار.

تشير الدراسات التي أجرتها هيئة المسوحات الجيولوجية الأمريكية إلى أن إجمالي احتياطيات النفط الخام الثقيل والثقيل جداً المؤكدة والقابلة للاستخلاص في العالم تقدَّر بنحـو ٤٣٤ بليوناً وهي أكبر من الاحتياطات المؤكدة والقابلة للاستخراج من النفط التقليدي (الخفيف).

وهذا كان من الأسباب المهمة لتطوير طرق استخراجه والعمل على تقنيات إنتاج واستثمار لم تكن موجودة من قبل، وكذلك البحث عن مكامن أخرى حديثة للنفط غير التقليدي.

٢–١ تحديات التعامل مع النفط الثقيل:

في وقتنا الحالي، ونظرًا للطلب المتزايد يومًا بعد يوم للطاقة بأنواعها المختلفة والتناقص التدريجي القائم في احتياطات النفط الخام التقليدي الخفيف والمتوسط حول العالم، فإنّ البحث عن موارد أخرى غير تقليدية أصبح ضرورة قصوى لا يمكن تجاهلها، لذلك اجتذب النفط الثقيل ومياه القطران اهتمام شركات النفط والطاقة كمصدر موثوق يمكن الاعتماد عليه في هذه الحالة.

تختلف أنواع النفط الخام الموجودة حول العالم إذ يوجد ما يزيد عن ١٥٠ نوعاً، ويتم تصنيفها وفقًا لمقياس الكثافة الذي وضعه معهد البترول الأمريكي (API)، وهو عبارة عن معيار يشير إلى الكثافة أو الجاذبية النوعية للنفط بتدرجات تتراوح بين ١٠ إلى ٥٠، حيث يدل الرقم المرتفع على نفط أخف وزنًا وأكثر سيولة والعكس صحيح.

وبالنسبة للنفط الثقيل فإنّه يحصل على رقم الكثافة أقل من ٢٠ وبالتالي فإنّه سائل كثيف وسميك (عالي اللزوجة) ويتدفق بصعوبة، وذلك بسبب تكوينه الكيميائي فهو يتكون من سلاسل طويلة من جزيئات الكربون والهيدروجين.

ويتميز هذا النوع من النفط بتكاليفه المنخفضة بالنسبة لمصافي التكرير، لكن عملية المعالجة والتكرير تتطلب تكاليف مرتفعة مقارنةً بالنفط الخام المعروف الذي ينتج عنه أنواع الوقود المختلفة مثل الديزل والبنزين والكيروسين، بينما ينتج عن النفط الثقيل مشتقات تدخل في الصناعات البلاستيكية والبتروكيماويات وفي تزفيت الطرق، ويمكن معالجته أيضًا ليصبح وقودًا يستخدم في وسائل النقل والتطبيقات الأخرى.

أهم التحديات والقيود المرتبطة بالنفط الثقيل:

- يرتبط استغلال مكامن النفط الثقيل بمجموعة من القيود والمخاطر التي تحد بعض الشيء من الانتشار الكبير لهذا الاستغلال، على سبيل المثال تعتبر تكاليف استخراج رمال القطران التي يستخرج منها النفط الثقيل **ذات تكلفة عالية** إذا ما تم مقارنتها مع مصادر النفط التقليدي.
- علاوةً على الضرر الذي تلحقه تلك الرمال بالمعدات والآلات كونها تسبب تأكلاً سريع فيها بسبب خواصها الكيميائية.
- من ناحية أخرى، تُفسر الرغبة المنخفضة لاستخدام النفط الثقيل كمصدر للطاقة نتيجة **تكاليف الاستخراج والمعالجة المرتفعين** مقارنةً بالنفط التقليدي الخفيف، إذ يُحرق ما يعادل برميل من النفط للحصول على الحرارة اللازمة لإنتاج برميلين من النفط الثقيل المسترد، وهذا يعني خفض كمية النفط القابل للاستخراج من البئر بنسبة ثلث الكمية.
- الحاجة إلى **كميات المياه المستخدمة** والتي قد تكون موردًا نادرًا في بعض الأماكن.
- وكذلك **الانبعاثات الكربونية** الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري للحصول على الطاقة المطلوبة للقيام بعمليات الإنتاج.
- تحتاج عملية **نقل النفط الثقيل** بواسطة الأنابيب إلى **طاقة إضافية** لتسخينه ليصبح قابلًا للإسالة بالمعدل المطلوب، وهذا يعني حرق كميات إضافية من الوقود.

- معدلات **الاسترداد من حقول النفط الثقيل منخفضة جدًا مقارنةً بمعدلات** الاسترداد من الحقول التقليدية، إذ يُنتج كل بئر حوالي ٥ إلى ١٠٠ برميل نفط ثقيل يوميًا مقابل ١٠ آلاف برميل تقريبًا نفط خفيف لكل بئر يوميًا، لذا لسد الطلب يتعين على الشركات المشغلة البحث واستثمار المزيد من الآبار، وهذا يزيد بدوره تكاليف التطوير بشكل كبير.
- كذلك فإن عمليات استخراج النفط التقليدي من الآبار ينجم عنها متبقيات من النفط، فتحت أفضل الظروف التشغيلية لاستخراج النفط يبقى أكثر من خمسين بالمائة من النفط في مناطق المكامن وبين الصخور في باطن الأرض بعضها على شكل نفط ثقيل.

٢-٢ تصنيف النفط الثقيل:

يتنوع النفط حسب الخواص الفيزيائية والكيميائية وحسب خواصه يتم تحديد الطريقة التي تُستخدم في تصفيته ونقله، ويقسم النفط بالاعتماد على خواصه:

١) حسب التركيب الكيميائي

٢) حسب نسبة الكبريت

٣) حسب الكثافة

٤) حسب ال API

٢-٢-١ تصنيف النفط حسب التركيب الكيميائي:

يعتمد مبدأ هذا التصنيف على العلاقة بين الكثافة والتركيب الهيدروكربوني للنفط، ويقسم إلى:

١) نفط بارافيني.

٢) نسبة البارافين عالية ونسبة النفتين منخفضة.

٣) نفط نفتيني.

٤) نسبة بارافين قليلة ونسبة الكبريت والأوكسجين والنتروجين عالية.

٥) نفط متوسط.

يوضح الجدول التالي (2-1) تصنيف النفط حسب معياري اللزوجة والكثافة.

الجدول (2–1) تصنيف النفط حسب معايري اللزوجة والكثافة

أنواع النفط الثقيل	اللزوجةCP	الكثافة Kg / m3
نفط ذو لزوجة عالية	1000 – 50	930 – 890
نفط ثقيل: 75% نفط – 25% اسفلت	20000 – 1000	960 – 930
بيتومين مالتا: (45%- 75%) نفط – الباقي اسفلت	100000 - 20000	1000 – 960
بيتومين مالتا: (25%- 40%) نفط– الباقي اسفلت	أكثر من 100000	1050 – 1000
بيتومين مالتا: (15% - 25%) نفت – الباقي اسفلت	قاسي (بلاستيك)	1100 – 1050
الصخر الزيتي	قاسي جدا	أكثر من 1100

٢–٢–٢ تصنيف النفط حسب نسبة الكبريت

١–نفط خام جيد: نسبة الكبريت من ٠.٥٪ إلى ١.٤٪ من الوزن.

٢–نفط خام متوسط: نسبة الكبريت من ١.٥٪ إلى ٣٪ من الوزن.

٣– نفط خام سيء: نسبة الكبريت أكبر من ٣٪ من الوزن.

٢–٢–٣ التصنيف حسب الكثافة (تصنيف النفط الثقيل):

١– نفط خفيف كثافته g/cm^3 ٠.٨٢٨ بالدرجة ٦٠ فهرنهايت.

٢– نفط متوسط: كثافته g/cm^3 (٠.٨٢٨ – ٠.٨٨٤) بالدرجة ٦٠ فهرنهايت.

٣– نفط ثقيل: كثافته أكبر من g/cm^3 (٠.٨٨٥) بالدرجة ٦٠ فهرنهايت.

النفط الثقيل يقسم بدوره إلى:

- نفط ثقيل خفيف: كثافته g/cm^3 (٠.٨٨٥ – ٠.٩)
- نفط ثقيل متوسط: كثافته g/cm^3 (٠.٩ – ٠.٩٥)
- نفط ثقيل ثقيل: كثافته أكبر من g/cm^3 ٠.٩٥

٢-٢-٤ تصنيف النفط الثقيل حسب درجة (API)

١-نفط ثقيل: ٢٤> API.

٢-نفط متوسط: ٣٥ > 24 <API.

٣-نفط خفيف: ٣٥ < API.

ومن أجل النفط الثقيل جدا ١٧.٥ > API.

٢-٣ العناصر الرئيسية في النفط الثقيل:

٢-٣-١ المواد البارافينية:

بلورية الشكل، متوسط وزنها الجزيئي (٣٠٠ - ٤٠٠)، درجة الذوبان (٥٠ - ٦٠)° س، تنحل بشكل جيد في المواد الخفيفة مثل الكيروسين والكوندنسات والغازولين ولكن لا تنحل في المواد العطرية.

٢-٣-٢ المواد النفتينية:

الوزن الجزيئي (٤٥٠ - ١٥٠٠)، الوزن النوعي قريب من ١، لدنة ومرنة وقابلة للتمدد، عالية اللزوجة، لونها قاتم، لا تنحل في الحموض ولا المواد القلوية، تنحل في المواد الهيدروكربونية الخفيفة والمواد العطرية، عند ارتفاع درجة الحرارة (١٠٠ - ١٥٠) °س تتحول إلى أسفلت.

٢-٣-٣ المواد الإسفلتية:

لا تنحل في المواد الهيدروكربونية الخفيفة، الوزن الجزيئي (١٥٠٠ - ١٠٠٠٠)، الوزن النوعي أكثر من ١، عند ارتفاع درجة الحرارة حتى ٣٠٠ °س لا تذوب بل تتبدل إلى فحم وعند ارتفاع درجة الحرارة وبوجود حمض الكبريت تصبح صلبة جدا تتحول إلى كربون وهذا الكربون لا ينحل حتى في المواد العطرية.

٢-٤ العوامل المؤثرة على تشكل النفط الثقيل:

٢-٤-١ تأثير المياه القابلة للحركة ذات المنشأ السطحي:

تقوم بعملية نزع وغسل المواد الخفيفة من النفط وهذا يتعلق بدرجة انحلالها في النفط. وهذا يؤدي إلى زيادة نسبة المواد الثقيلة والأسفلت في النفط وبالتالي تزداد كثافة ولزوجة النفط.

٢-٤-٢ تأثير البكتريا الهوائية:

تتواجد في المياه سطحية المصدر وعند عدم وجود H2S تقوم هذه البكتريا بتبديل النفط الخفيف إلى نفط ثقيل وذلك عند درجة حرارة أقل من5°C.

٢-٤-٣ التفكك الطبيعي للنفط إلى المواد المتشكل منها

الهجرة الطبيعية للنفط ضمن طبقات الأرض العميقة ذات الخواص المختلفة تؤدي إلى انفصال الغاز والمواد الخفيفة عن النفط وتبقى المواد الثقيلة التي تترسب وتغلق طريق الهجرة وتتوقف هجرة النفط باتجاه الأعلى.

٢-٤-٤ تشكل الاسفلت

يتشكل بطريقتين:

- يترسب عند هجرة الغاز والمواد الخفيفة من النفط
- أو خلال مرحلة من مراحل تشكل النفط

٢-٤-٥ أماكن تواجد النفط الثقيل وأسباب اللجوء إليه:

يتواجد النفط الثقيل بكثرة في دول العالم وأهم هذه الدول:

كندا، روسيا، الولايات المتحدة الأمريكية، فنزويلا، البرازيل، المكسيك، الأرجنتين، الإكوادور، أندونيسيا، ماليزيا، الصين، إيران، سورية.

في البداية لم يكن له أهمية بسبب:

١- وجود النفط الخفيف والمتوسط

٢- الكلفة الباهظة لاستخراجه ونقله وتصفيته

٣- قلة عامل المردود

مقارنة عامل المردود:

بشكل عام عامل المردود لحقول النفط الثقيل في الشرق الأوسط هو ٢٠ % بينما قيمة عامل المردود لحقول النفط الثقيل لا تتعدى ١ %.

زادت أهمية النفط الثقيل بعد العام ١٩٧٤ حيث ازداد سعر برميل النفط في السوق العالمية وبدأت الدول تهتم بإنتاجه.

فمثلا: كانت كندا تنتج في العام ١٩٧٤ حوالي ٧٥٠٠٠ برميل يومياً من النفط الثقيل، وبعد ١٠ سنوات زاد الإنتاج ليصبح ٣٠٠٠٠٠ برميل يومياً، ومع زيادة سعر برميل النفط في السوق العالمية كان لابد من التفكير في استخدام طرق حديثة لرفع عامل مردود حقول النفط الثقيل وبدأت دول في العالم أهمها الولايات المتحدة الأمريكية وكندا بالتفكير بتطوير وابتكار طرق جديدة لتحسين إنتاج ورفع عامل مردود حقول النفط الثقيل عن طريق استخدام تكنولوجيا متطورة تضمن استخراج النفط الثقيل بأقل كلفة ممكنة.

٢-٤-٦ مواصفات المكامن الحاوية على نفط ثقيل:

١- بشكل عام تكون حقول النفط الثقيل على أعماق قليلة نسبياً ٥٠% من طبقات النفط الثقيل تقع على عمق أقل من 915m.

٢- نفوذية الطبقة تقترب من ١ دارسي (١٠٠٠ ميلي دارسي) أو أكثر.

٣- مسامية الطبقة عالية وتقترب من 30%.

٤- نسبة إشباع النفط % 80 – 50.

٥- سماكة الطبقة متغيرة ضمن مجال واسع:

مثلا في ألبيرتا (كندا) وكاليفورنيا (الولايات المتحدة الأمريكية) وفنزويلا سماكة الطبقة تتراوح بين (١٥ – ١٠٠) م والكثافة أقل من ١٧.٥ API.

وتتغير لزوجة النفط الثقيل أيضا ضمن مجال واسع:

ففي حقل أتاباسكا في كندا تتغير من عدة سنتي بواز إلى عدة ملايين سنتي بواز نسبة الكبريت أكثر من ٣٪ (نسبة وزنية) المواد المعدنية (٢٠٠ ميلي غرام إلى عدة آلاف ميلي غرام/ ليتر).

ويتميز النفط الثقيل في فنزويلا بنسبة الأسفلت العالية والتي تقترب من ٢٠ % إن النفط الثقيل وبالرغم من أهميته وتعويل كبرى الشركات العالمية عليه مستقبلاً نظراً لما يقدر من احتياطات عالمية كبيرة إلا أن هناك مشاكل مترتبة على ذلك، منها:

٢-٧ المشاكل الفنية والتقنية لإنتاج النفط الثقيل:

٢-٧-١ مشاكل في الإنتاج:

تتعلق بحركة النفط من الطبقة باتجاه البئر وترتبط بالنفط وبالطبقة. بسبب اللزوجة العالية حيث تكون حركة النفط صعبة وبطيئة جداً نضطر إلى تقليل اللزوجة بالطرق الحرارية وهي فعالة جداً أو باستخدام المواد الكيميائية وهي أقل فعالية أو باستخدام غاز CO_2 وهو ذو فعالي أقل وكلفة كبيرة أوعن طريق تشكيل مستحلب من النفط مع بعض الموائع تكون لزوجته قريبة من لزوجة الماء ولكن بالطريقتين الأخيرتين لدينا احتمال ترسب الأسفلت، ما يسبب سد المنافذ وتقليل النفوذية بسبب عدم وجود اتصال هيدروديناميكي بين بئر الحقن وبئر الإنتاج.

وهذا كله يؤدي إلى عدم إعطاء معدل إنتاج مقبول اقتصادياً ونضطر إلى تطبيق ضغط حقن عالي وبالتالي قد يتسبب بتشقق الطبقة ونتيجة لذلك يختلط الماء المحقون مع النفط وبهذا نفقد السيطرة على جبهة الإزاحة وتزداد نسبة الإماهة بشكل سريع.

٢-٧-٢ مشاكل في النقل:

تتعلق بحركة النفط في الأنابيب من الحقل باتجاه المصافي وموانئ التصدير.

ضخ النفط الثقيل يحتاج لمضخات باستطاعات عالية بسبب حركته البطيئة الناتجة عن اللزوجة العالية وهذه العملية قد تؤدي إلى تشكيل مستحلب ذو لزوجة عالية جداً من الصعب ضخه وفصله ويحدث هذا عند النقل

على وسادة مائية أو ضمن غلاف مائي على جدران الأنبوب وعند توقف الضخ لأسباب عدة يسبب التوقف اختلاط النفط بالماء.

أيضاً بسبب لزوجة النفط يتم إنتاج الرمل مصاحباً للنفط وهذا يسبب مشاكل في النقل في الأنابيب عن طريق التآكل في الجدران الداخلية للأنابيب

٢-٧-٣: مشاكل في التصفية:

تتعلق بتحسين نوعية النفط وتقطيره في المصافي حيث يحتوي النفط الثقيل على نسبة عالية من الكبريت والأسفلت وهدف عمليات التحسين هو:

رفع نسبة الهيدروجين وتقليل الوزن النوعي وتقليل نسبة الكبريت في النفط العادي نحتاج فقط لتحسين نسبة ٤٪ لأن نسبة المواد المذكورة قليلة وهو ذو نوعية جيدة ولا نحتاج دائما لتحسينه لكن بالنسبة للنفط الثقيل هذا العمل إلزامياً وضرورياً وهو مكلف جدا (بناء وحدة معالجة بطاقة ١٠٠ ألف برميل/يوم، كلفته ١ مليار دولار) ويختلف إنتاج النفط التقليدي عن إنتاج النفط الثقيل اذ يستلزم الأخير طرق خاصة لتعزيز الإنتاجية وزيادة عامل المردود.

٢-٨ تقنيات خاصة لتعزيز الإنتاجية:

٢-٨-١ المعالجات الحرارية:

يتطلَّب استخراج النفط الثقيل، استخدام تقنيات خاصة، تعرف بعمليات الاستخلاص البترولي المعزّز. وقد استخدمت بعض تلك التقنيات منذ ستينيات القرن الماضي. ففي حقل "كيرن ريفر" النفطي، استخدمت طريقة التسخين بالبخار لإجبار النفط على التحرك. كما استخدمت هذه الطريقة في حقل "ألبيرتا" الكندي الغني بالرمل القطراني، وحزام "أورينوكو" في فنزويلا وبعض حقول النفط الثقيل في الشرق الأوسط.

وتعتمد هذه الطريقة على تسخين بعض السوائل كالماء أو بعض المذيبات الهيدروكربونية، وضخ بخارها في البئر، وفي العادة يتم تخصيص بئر لحقن البخار الساخن بشكل مستمر، ومن بئر أخرى يتم استخراج النفط الثقيل الذي تم استخلاصه، كما يمكن أن يتم ضخ البخار بشكل متقطع في البئر نفسه، وهو مايسمى (Huff

and Puff)، ثم التوقف لاستخراج النفط. وتكرَّر هذه العملية بشكل دوري، إلا أن من سلبياتها ضياع الحرارة داخل الطبقات الصخرية بسبب التوقف المتكرر عن ضخ البخار الساخن في البئر.

٢-٨-٢ حفر الآبار الأفقية:

لزيادة معدلات استخراج هذا الخام من الآبار وتحسين الإنتاجية، يتم اللجوء إلى حفر الآبار الأفقية التي تتفرَّع من الآبار العمودية، حيث تصل الآبار الأفقية إلى طبقات المخزون النفطي الثقيل، كما تُتبع طريقة الإنتاج البارد للنفط الثقيل بالرمل، حيث يتم ضخ السوائل في فوهة البئر المخلوطة بالرمل من أجل زيادة النفاذية للطبقات المحتوية على النفط الثقيل ولمنع ترسب الأسفلت وغلق الثقوب مما يسمح للنفط بالتدفق.

٢-٨-٣ حقن البوليميرات القابلة للامتزاج بالماء:

بهدف تخفيض حركية المياه في الطبقة المنتجة مقابل حركية النفط مما ينعكس إيجاباً على كمية النفط المستخرجة وبالتالي زيادة عامل المردود النفطي وفي الشكل (2-1) نبين مراحل عملية حقن البوليمير، تتم عملية حقن البوليميرات وفق التسلسل التالي:

١- حقن دفعة مياه عذبة (Fresh Water): ويتم حقنها مسبقاً قبل حقن دفعة محلول البوليمير. تسمى هذه الدفعة (Pre Flush) الغاية منها تهيئة الطبقة لعملية حقن محلول البوليمير بهدف تخفيف ملوحتها، وذلك تفادياً لانخفاض لزوجة محلول البوليمير المحقون بتأثير الشوارد المعدنية الموجودة فيها.

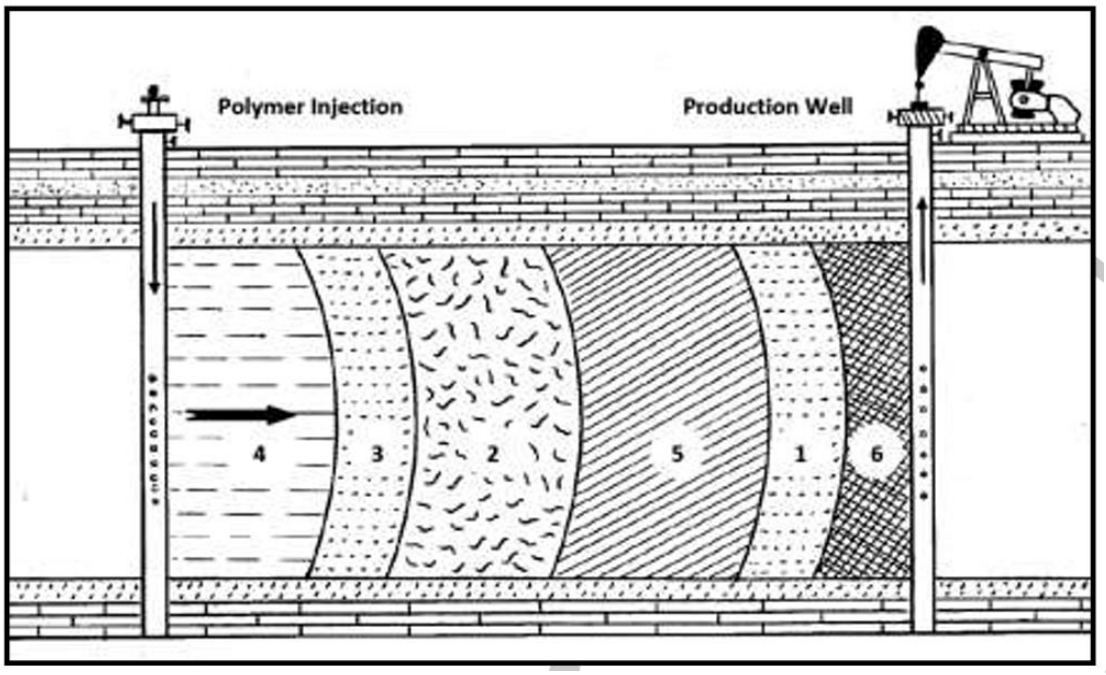
٢- دفعة محلول البوليمير (Polymer Slug): ويتم حقنها بعد تحضيرها على السطح باستخدام مياه عذبة.

٣- دفعة أخرى من المياه العذبة: يتم حقن هذه الدفعة بعد حقن محلول البوليمير، وذلك لحمايته من تأثير ملوحة سائل الإزاحة الذي يتم حقنه أخيراً بشكل مستمر.

٤- سائل الإزاحة (Drive water): وهو عبارة عن مياه ذات مصادر متعددة (مياه طبقية- مياه بحر – مياه نهر .... إلخ)، ويتم حقنها بشكل مستمر لتأمين حركة محلول البوليمير بالطبقة. تخضع هذه المياه قبل حقنها لعدد من المعالجات هما:

- معالجة ميكانيكية: وتهدف إلى نزع الشوائب الميكانيكية الصلبة كي لا تؤثر سلباً على نفوذية الطبقة المنتجة، وتتم عن طريق إمرار المياه عبر نوعين من الفلاتر: خشنة (Coarse Filters)، وناعمة. (Fine Filters)

- معالجة كيميائية: وتتم باستخدام مجموعة من الإضافات مثل: مواد نزع الأوكسجين، (Oxygen Scavenger)، مانع تشكل القشور (Scale Inhibitor)، مضاد بكتيريا (Bactericide) مانع تآكل (Corrosion Inhibitor).



م

الشكل (2-1) مراحل عملية حقن محلول البوليمر

١- دفعة مياه عذبة محقونة مسبقاً، ٢-محلول البوليمير، ٣- دفعة أخرى من المياه العذبة

٤- سائل الإزاحة، ٥- النفط الإضافي المستخلص بحقن البوليمير، ٦- النفط الأولي

الفصل الثالث – تقنيات الإنتاج المتقدم للنفط الثقيل

Advanced Production Technologies

يعتبر النفط الثقيل من الموارد الحيوية للطاقة لكنه يمثل تحدياً تقنياً بسبب لزوجته العالية وكثافته الكبيرة. إن الإنتاج التقليدي للنفط يكون غير كافي للنفط الثقيل لذلك تم تطوير تقنيات الإنتاج المتقدم التي تسمح بزيادة معدل الإنتاج وتحسين استرجاع النفط.

ولعل من أحدث التقنيات التي انتشرت مؤخراً وأثبتت فعاليتها في إنتاج النفط اللزج واستثمار حقول النفط اللزج في العالم وخصوصاً في فنزويلا وكندا:

١- **تقنية انتاج النفط البارد الثقيل مع الرمل** (CHOPS cold heavy oil production with sand)

٢- **تقنية التصريف بالجاذبية بمساعدة البخار** (SAGD steam Assisted Gravity Drainage)

٣- **تقنية التوترات النبضية** (vibration simulate-pulsed techniques)

٣-١تقنية انتاج النفط البارد الثقيل مع الرمل:

هي تقنية غير حرارية تستخدم لإنتاج النفط الثقيل من المكامن الرملية غير المتماسكة وتعتمد على الإنتاج المتعمد لرمل مع النفط لزيادة معدلات التدفق.

٣-١-١ مبدأ ومتطلبات العمل:

١- **الإنتاج البارد (cold production)** بخلاف التقنيات الحرارية يتم استخراج النفط مع الرمال بشكل طبيعي أو شبه طبيعي في ظروف درجة حرارة المكمن.

٢- **تحريض تدفق الرمل يتم تصميم إكمال البئر (well completion)** بطريقة تسمح بدخول الرمال من التشكيلات الصخرية الى جوف البئر هذا التدفق المتعمد يؤدي إلى تكوين قنوات عالية النفاذية تعرف باسم ثقوب الدود، هذه الثقوب تمتد لمسافة طويلة داخل المكمن مما يخلق شبكة من المسارات ذات المقاومة المنخفضة وهذا يسهل تدفق النفط الثقيل اللزج نحو البئر.

٣- **النفط الرغوي (foamy oil):** عند انخفاض الضغط حول البئر تتحرر فقاعات الغاز الصغيرة داخل النفط الثقيل مما يخلق ما يسمى بالنفط الرغوي والذي يساعد في تدفق النفط والرمل معاً نحو البئر.

٤- **استخدام مضخات التكهفية المتعاقبة – الدورانية اللولبية (PCP: Progressive Cavity Pumps):** نظراً لزيادة كمية الرمل المنتج يتم استخدام مضخات خاصة قادرة على التعامل مع السوائل التي تحتوي على نسب عالية من المواد الصلبة دون ان تتآكل او تتعطل وهي هنا المضخات الدورانية –اللولبية.

٣-١-٢ الإيجابيات: تمتاز تقنية انتاج النفط البارد الثقيل مع الرمل CHOPS، بما يلي:

١- زيادة معدل الإنتاج بسرعة كبيرة في البداية بسبب:

أ- تدفق الرمال مما يقلل من مقاومة الجريان.

ب-تشكل منطقة عالية النفاذية حول البئر.

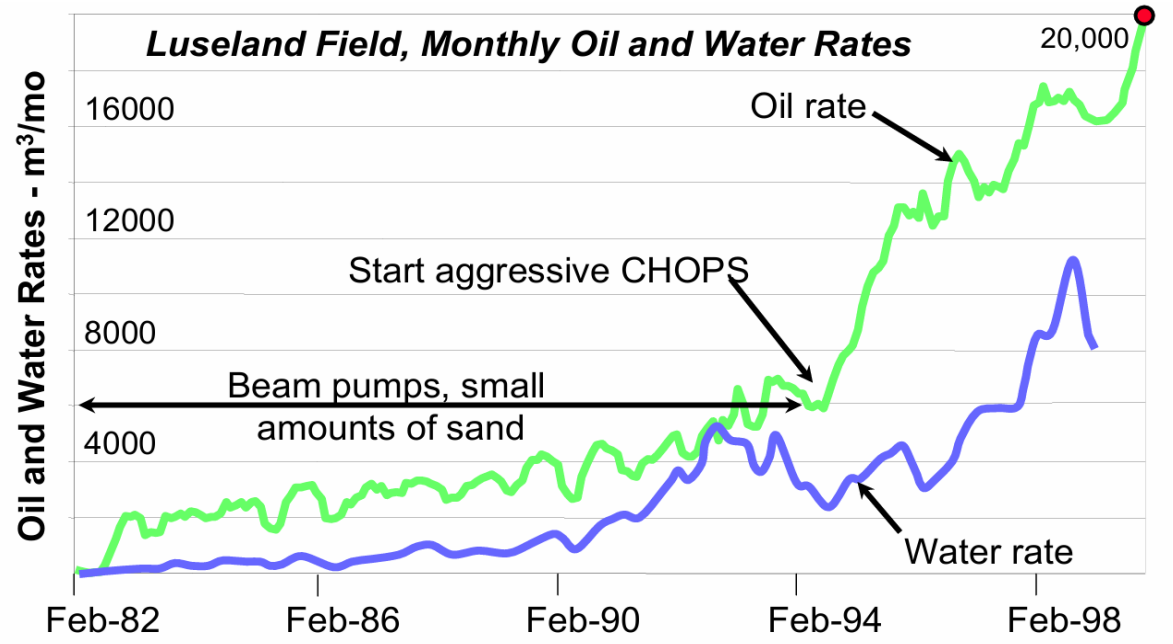
ت-النفط الرغوي يحسن التدفق.

٢- عدم الحاجة لإضافة مواد كيميائية.

٣- تحسين النفاذية للخزان بمرور الوقت.

٤- منخفضة التكاليف ومناسبة للخزانات الرملية الرقيقة.

ويشير الرسم البياني الى تحسين انتاج النفط بعد تطبيق الـCHOPS.



الشكل (3–1) تحسين انتاج النفط بعد تطبيق ال.choops

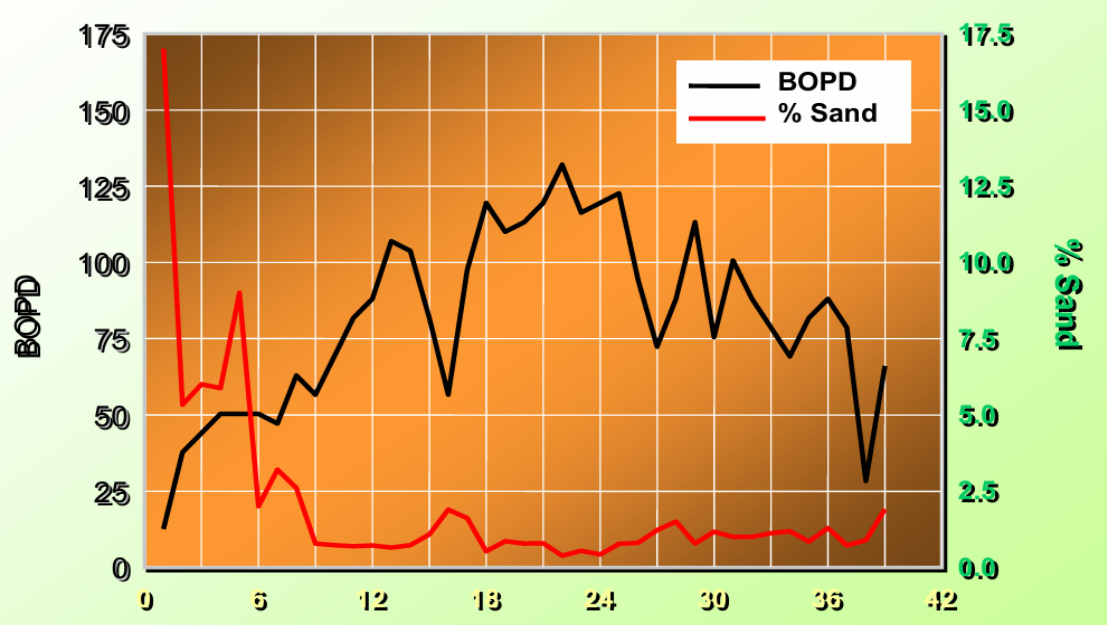
٣–١–٣ السلبيات: كذلك يمكن أن يتأثر استثمار حقول النفط اللزج ببعض السلبيات جراء استخدام تقنية CHOPS، **ومنها**

١– تآكل المعدات مع الزمن بسبب الرمل.

٢–مشاكل متعلقة بإدارة المخلفات الرملية

٣–انحدار الإنتاج مع مرور الوقت بعد النضوب الأولي.

يشير الرسم البياني سلوك البئر CHOPS بين انتاج النفط والرمل مع الزمن.



الشكل (3–2) سلوك البئر بين انتاج النفط والرمل مع الزمن

٣–١–٤ شروط نجاح تقنية الـ CHOPS

١– وجود آلية النفط الرغوي.

٢– عدم وجود ماء حر

٣– مكامن ذات نفوذية منخفضة الى متوسطة ورمال غير متماسكة.

٤– توفر مضخات تكهفية– دورانية (PCP)

٥– توفير نظام متكامل لمعالجة الرمال

٣–١–٥ مواصفات المكامن المناسبة لتطبيق تقنية الـ CHOPS

١– الآبار الأفقية فقط.

٢– المسامية لا تقل عن (28 – 30)%

٣– النفوذية من D (2–4)

٤– لزوجة النفط 140 cp وما فوق

٥- الضغط الابتدائي للمكمن 6 – 7MPa

٣-١-٦ المعدات المستخدمة في تطبيق تقنية الـ CHOPS

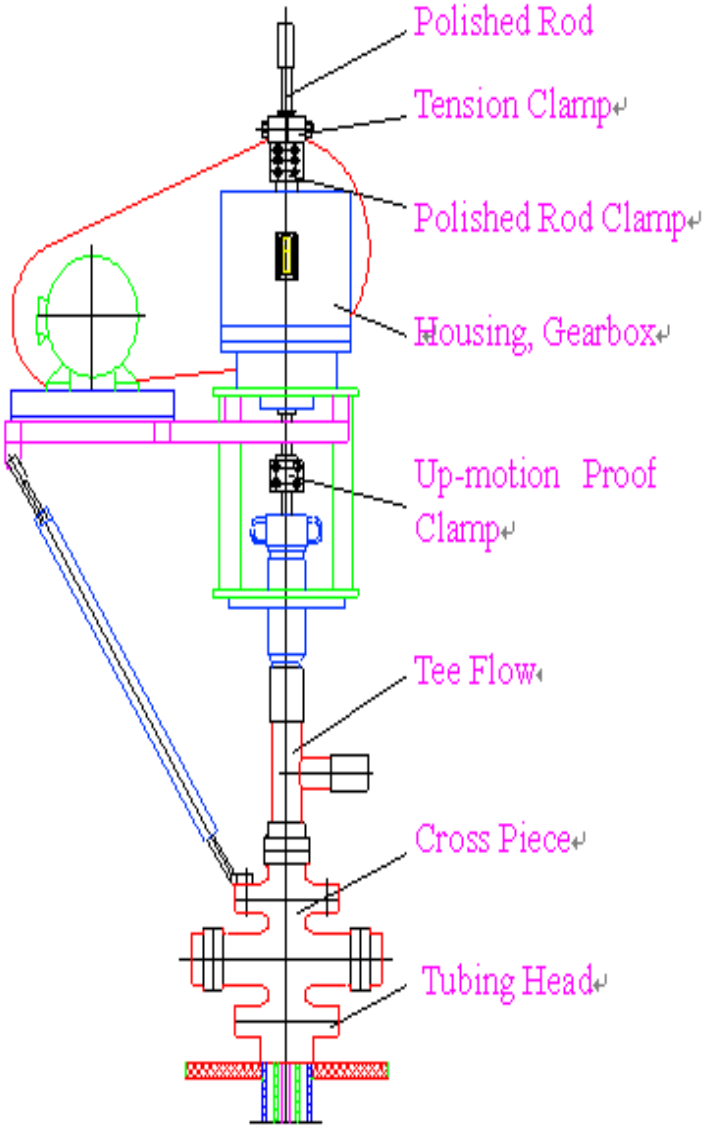
تمتاز تقنية الـ CHOPS بعدم احتياجها الى معدات كثيرة ومعقدة مقارنة بالطرق الحرارية وغيرها، يستخدم:

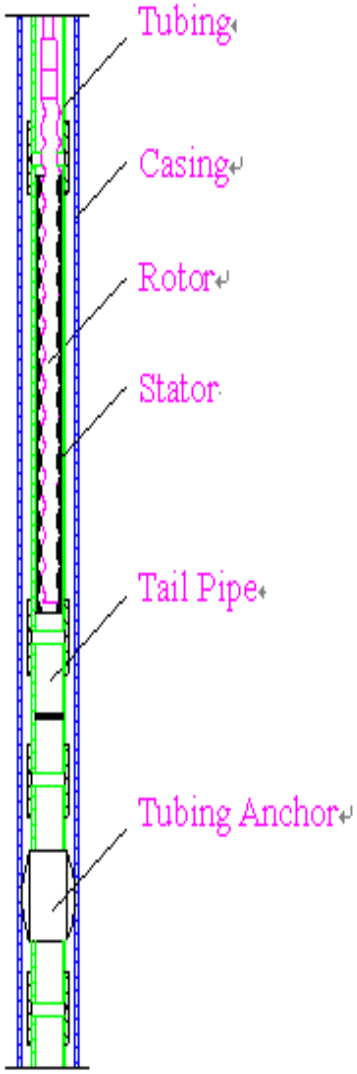
أ- آبار الإنتاج

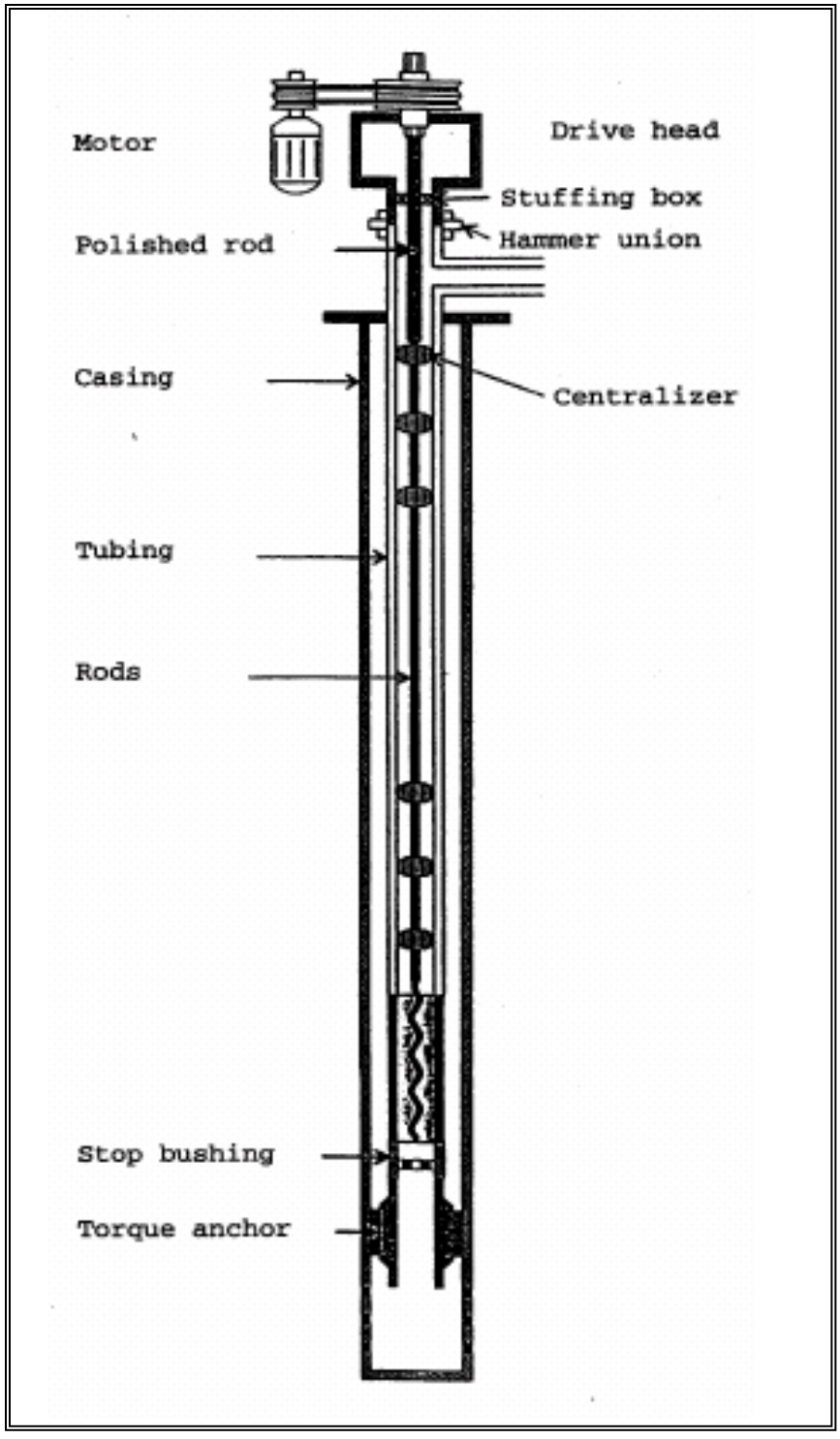
ب-نظام معالجة الرمال وفصلها أعلى السطح

ت-المضخات التكيفية المتعاقبة

وتتميز المضخة بمبدأ عمل بسيط اذ تتكون من جزأين ثابت ومتحرك، الجزء المتحرك (Rotor) يكون على شكل محور حلزوني معدني إما الجزء الثابت (Stator) هو الجزء الساكن يحيط بجزء الدوار عادة ما يصنع من مادة كالمطاط (كوشوك) يكون مجوفاً بشكل حلزوني مزدوج وعند دوران الجزء المتحرك داخل الثابت تكون تجاويف محكمة الإغلاق ومع استمرار الدوران المتحرك تتحرك هذه التجاويف الى الأمام محملة بسائل دون تغير في حجمه أو شكله مما يضمن تدفق ثابت ومستمر.


Polished Rod
Tension Clamp
Polished Rod Clamp
Housing, Gearbox
Up-motion Proof Clamp
Tee Flow
Cross Piece
Tubing Head


Tubing
Casing
Rotor
Stator
Tail Pipe
Tubing Anchor



الشكل (٣-٣) المضخات التكهفية المتعاقبة – اللولبية PCP: Progressive Cavity Pumps

٣-٢ تقنية التصريف بالجاذبية بمساعدة البخار (SAGD):

هي إحدى أكثر الطرق فعالية في إنتاج النفط الثقيل من الأكمات التي يصعب الوصول إليها تعتمد بشكل أساسي على استخدام الحرارة لتقليل لزوجة النفط ليتمكن من الجريان ضمن مسمات الصخور باتجاه البئر ليتم إنتاجه لاحقاً.

٣-٢-١ مبدأ ومتطلبات العمل

١- يتم بحفر بئرين أفقين متوازيين داخل طبقة الرمال النفطية بحيث يكون البئر الأول (بئر الحقن) فوق البئر الثاني الذي (بئر الإنتاج) بمسافة تتراوح بين (٥-٧) م.

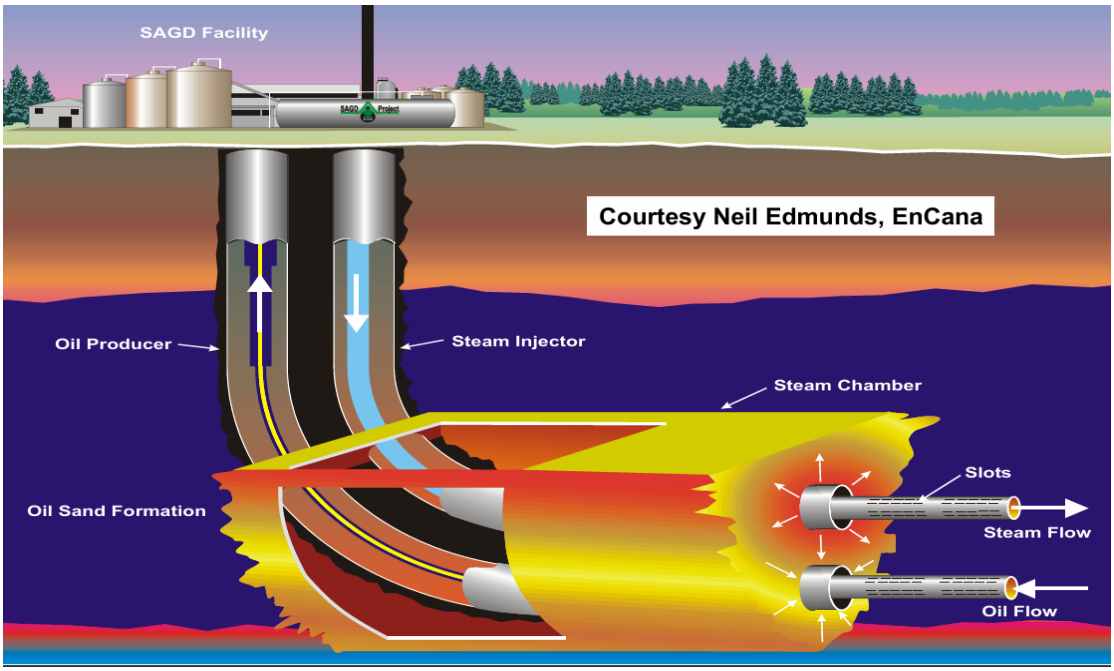
٢- حقن البخار: يتم ضخ بخار عالي الضغط والحرارة باستمرار من خلال البئر العلوي ينتشر هذا البخار في الطبقة الصخرية مكوناً ما يشبه غرفة البخار.

٣- تسخين النفط: تعمل حرارة البخار على تسخين النفط الثقيل المحيط مما يؤدي إلى كسر السلاسل المعقدة في تركيبه وبالتالي خفض لزوجته العالية وتحويله من مادة شبه صلبة إلى سائل يتدفق بسهولة.

٤- التصريف بجاذبية: بفعل الجاذبية الأرضية ينزلق النفط المسخن في البخار المكثف (الماء) إلى الأسفل باتجاه البئر السفلي.

٥- الإنتاج: يتم جمع هذا الخليط وضخه من البئر السفلي إلى السطح ليتم نقله لاحقاً ومعالجته.

ويبين الشكل (3-4) تكوين غرفة بخار لبئرين أفقين مزدوجين



الشكل(3-4) تكوين غرفة بخار لبئرين أفقين مزدوجين – إنتاج النفط الثقيل بتقنية SAGD

٣-٢-٢ إيجابيات تطبيق تقنية SAGD

١- زيادة استرجاع النفط من الخزانات العميقة بنسبة تصل الى ٦٠٪ للطبقات السميكة.

٢- تحسين الكفاءة الإنتاجية على المدى الطويل.

٣- انخفاض مشاكل تآكل المعدات مقارنة بتقنية إنتاج النفط الثقيل مع الرمال CHOPS

٤- إمكانية استخلاص البيتومين (النفط غير الناضج) من الطبقات العميقة.

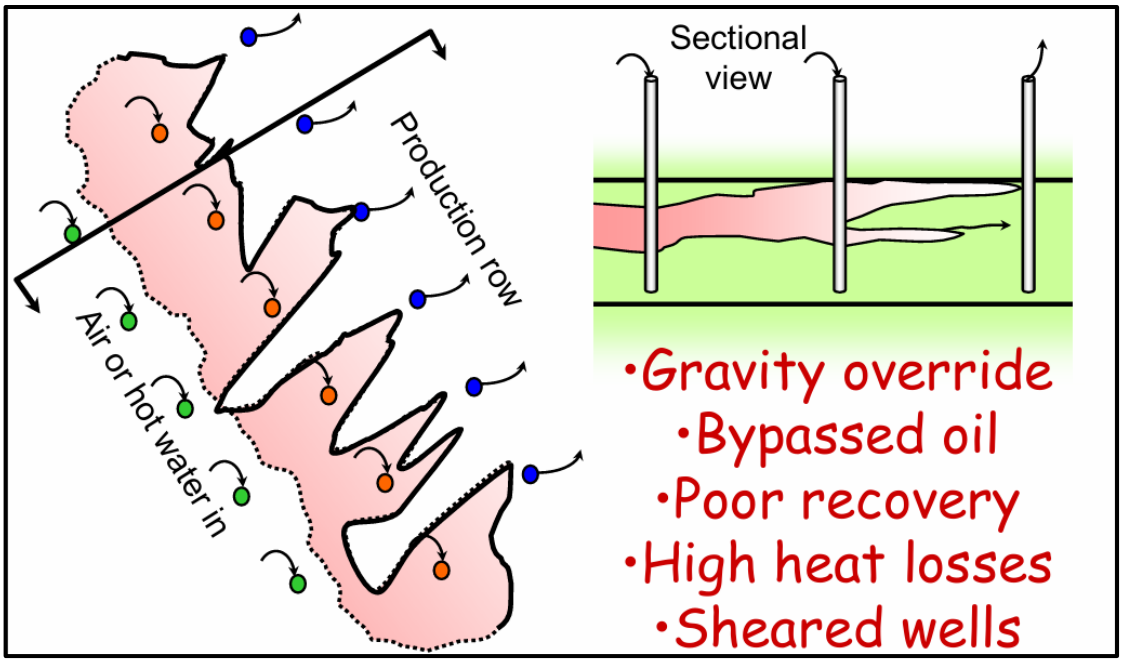
٣-٢-٣ سلبيات تطبيق تقنية SAGD

١- تكلفة عالية لإنتاج البخار والحاجة إلى معدات كثيرة.

٢- استهلاك كبير للطاقة من أجل تسخين البخار.

٣- صعوبة التحكم في توزيع الحرارة داخل الخزان وفقدان حرارة مرتفع وخصوصاً في الطبقات قليلة السماكة.

٤- مبدأ التجاوز بالجاذبية قد يؤدي إلى نفط متروك لا يمكن استخراجه، الشكل (٣-٥).



الشكل (٣-٥) مناطق تحتجز النفط الثقيل أثناء العمل بتقنية SAGD

٣-٢-٤: الحلول المقترحة لزيادة فعالية الـ SAGD:

١- زيادة حجم غرفة البخار لتحسين انتقال الحرارة وتوزيعها بشكل جيد.

٢- استخدام وسائل مساعدة مع البخار مثل حقن غاز N2 لتقليل فقدان الحرارة.

٣- حقن مذيبات هيدروكربونية وغاز وبخار لزيادة الفعالية في الطبقات الرقيقة وهذا ما يسمى SAGD-GS

٣-٢-٥: شروط نجاح تطبيق تقنية SAGD

١- الخصائص الجيولوجية للمكمن:

- نفاذية عالية أكثر من D (١-٢) من أجل السماح للبخار بالانتشار وتدفق النفط المسخن.
- سماكة الطبقة تزيد عن 15 – 20 m لضمان النجاح الاقتصادي وتكوين غرفة بخار فعالة.
- تجانس المكمن: غياب الفواصل الصخرية والطبقات الطينية المستمرة التي قد تعيق صعود البخار او هبوط النفط.

- عمق المكمن: يجب أن يكون المكمن عميق بما يكفي لتحمل ضغط حقن البخار دون أن يؤدي إلى تشقق الطبقة المغطية للمكمن ولا يؤدي لفقد الحرارة.

٢- العوامل التشغيلية والفنية:

- مرحلة التسخين الأولي: النجاح في انشاء اتصال حراري بين البئرين في البداية عبر تدوير البخار.
- رفع جودة البخار يزيد من كفاءة الاستخلاص.
- الحفاظ على مسافة عامودية بين بئر الحقن العلوي وبئر الانتاج السفلي وتكون عادة أكبر من 5m.
- توزيع الحرارة باستخدام أدوات التحكم في التدفق لضمان توزيع البخار وعدم اختراق البخار.

٣-٣: تقنية التوترات النبضية (Pulsed Techniques /Vibration Simulate):

تعد هذه التقنية والمعروفة في مجال صناعة النفط (بتقنية البلازما أو النبضات الهيدروليكية) من أحدث الطرق المستخدمة في الاستثمار المدعم (EOR) وتهدف بشكل أساسي لحل مشكلة اللزوجة وضعف النفاذية في المكمن.

٣-٣-١ آلية العمل:

١- توليد النبضات (Downhole Pulses Generation)

يتم إنزال أداة خاصة عبر كابل (wire line) الى داخل البئر بمحاذاة الثقوب في منطقة الإنتاج تقوم هذه الأداة بتفريغ طاقة كهربائية ذات جهد عالي مخزنة في مكثفات لإنشاء قوس بلازما في أجزاء من الثانية.

٢- إحداث موجات الصدمة:

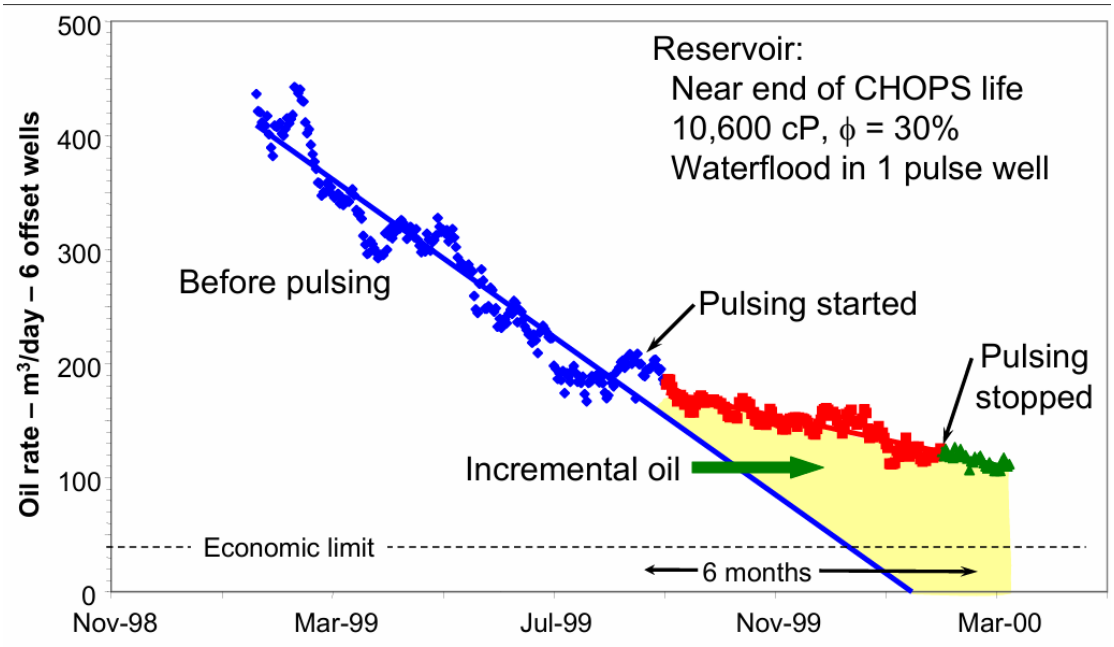
يؤدي تفريغ الطاقة المفاجئ الى توليد:

أ- موجات صوتية ميكانيكية: تنتشر بعمق داخل المكمن وتعمل على تفتيت الرواسب وفتح المسامات المسدودة.

ب–اهتزازات رنينية: تؤدي هذه الموجات الى تذبذب جزيئات الهيدروكربونات مما يقلل من نوى الالتصاق بين الصخر والنفط.

٣–تأثير الموجات على خواص النفط فيزيائيا وكيميائيا.

- خفض اللزوجة: الطاقة الناتجة يمكنها كسر السلاسل الهيدروكربونية الطويلة والمعقدة في النفط الثقيل إلى سلاسل أصغر مما يجعله أكثر سيولة
- زيادة النفاذية: تخلق النبضات ثقوبا دقيقة في الصخور مما يسهل تدفق النفط اللزج نحو البئر.
- التغلب على ظاهرة جامين: تساعد النبضات في تحريك قطرات النفط العالقة في أعناق المسامات المطبقة نحو البئر. وفي الشكل (3–5) نبين تطبيق تقنية التوترات النبضية



الشكل (3–5) زيادة إنتاج النفط الثقيل بتطبيق تقنية التوترات النبضية مخبرياً

٣–٣–٢ ميزات تطبيق تقنية التوترات النبضية:

١– صديقة للبيئة: لا تتطلب حقن كميات كبيرة من المياه أو الكيماويات كما في التركيز الهيدروليكي.

٢- كفاءة العمل: تزيد من عدد الآبار القديمة او الناضجة التي تحسنت إنتاجيتها بعد انخفاض انتاجيتها بسبب كثافة النفط الخام العالية او انسداد المسام.

٣- تأثير طويل الأمد بحيث يتحسن الإنتاج لمدة تتراوح بين (٦-١٢) شهر بعد جلسة معالجة قصيرة.

٤- يمكن اعتمادها كتقنية لاحقة لـ CHOPS وSAGD لزيادة كفاءة الإنتاج وبالتالي زيادة عامل المردود النفطي.

3-3-3: سلبيات تقنية التوترات النبضية:

تشمل تحديات فنية وتشغيلية:

١- محدودية نطاق التأثير إذ أن التأثير الفعال لنبضات بتركيز في المنطقة المحيطة بالبئر بمساحة دائرة نصف قطرها بين $(15 - 40)m$

٢- كفاءة تحويل الطاقة: أكدت الأبحاث أن جزء كبير من الطاقة المستخدمة يقدر ب 60% يفقد في عمليات التشتت المائي او التحويل الحراري.

٣- مجهدة اقتصادياً اذ تتطلب رأس مال كبير ومعدات معقدة واستهلاك عالي للطاقة الكهربائية.

٤- تتطلب دراسة دقيقة وتطبيق آمن وحذر وغير قابل للخطأ كونها تتعامل مع طاقة عالية ومواد هيدروكربونية قابلة للاشتعال والانفجار.

٥- خطر تلف معدات البئر: النبضات القوية والمتكررة قد تسبب إجهاداً ميكانيكياً لمواسير التغليف (Casing) مما يؤدي إلى حدوث تشققات غير مرغوب فيها أو تسربات.

٣-٣-٤: شروط نجاح التوترات النبضية:

١- الخصائص الجيولوجية للمكمن.

أ. نوع الصخور: تُعد المكامن الصخور الرملية (Sandstone) هي الأكثر استجابة، حيث تساعد مرونة الحبيبات على نقل الموجات الصوتية والميكانيكية بفعالية. كما تُطبق في بعض المكامن الكلسية (Limestone) المتشققة لتحفيز فتح الشقوق.

ب. النفاذية (Permeability): تُفضل في الآبار التي تعاني من انخفاض النفاذية في المنطقة المحيطة بالبئر نتيجة "تلوث الطبقة" (Formation Damage) بسبب تراكم الرواسب أو الطين.

ت. التجانس: التقنية فعالة جداً في المكامن غير المتجانسة (Heterogeneous) عمودياً حيث تساعد النبضات في توجيه تدفق السوائل نحو المناطق الأقل نفاذية التي لا تصل إليها المياه في عمليات الحقن التقليدية.

٢- خصائص النفط والسوائل:

١- النفط الثقيل والمتوسط: تُطبق في الحقول التي تحتوي على نفط تتراوح كثافته بين API $(15 - 25)$، حيث تعمل الموجات على تكسير الجزيئات الكبيرة وتقليل لزوجة النفط موضعياً.

٢- نسبة تشبع المياه: تُستخدم غالبًا في الآبار "الناضجة" التي تحتوي على نسبة عالية من المياه (High Water-Cut)، حيث تساعد النبضات في تحريك النفط المحجوز (Stranded Oil) داخل المسام التي تجاوزتها المياه.

٣- المواصفات الهندسية للبئر:

- الحالة الميكانيكية: يجب أن يكون البئر مغلفاً ومثقباً (Cased and Perforated) بفتحات تثقيب سليمة، حيث يتم إنزال جهاز توليد النبضات عبر الكابل (Wireline) ووضعه مقابل الثقوب (Perforations) مباشرة.
- العمق والضغط: أثبتت الدراسات أن التقنية تعمل بكفاءة في أعماق تصل إلىm 3500 وعند ضغوط طبقية تصل إلى $(5000\ psi، 3MPa)$
- قطر البئر: تتطلب أن يكون قطر البئر كافيًا لمرور أداة البلازما، والتي يبلغ وزنها غالبًا حوالي $70\ kg$ وطولها يتناسب مع معدات الـ Wireline القياسية.

تطبيق عملي

دراسة إمكانية استخدام التقنيات الحديثة في إنتاج النفط الثقيل في الحقول السورية

اعتمد هذا البحث على مجموعة من **المؤشرات الخزنية والبيانات الحقلية** المستخلصة من الجداول المرفقة، والتي تمثل خصائص عدد من الحقول السورية المنتجة للنفط الثقيل مثل: صفيح، ديلع، الفهدة، هنادي، عمالة، رصيف، شمال العويج، نور، منصورة، ج.رصافة، وهاب وغيرها. وقد شكّلت هذه المؤشرات قاعدة بيانات أساسية لتحليل **ملاءمة المكامن السورية لتطبيق تقنيات الحفر الموجّه وتقنيات الإنتاج المتقدم**، وقد تضمّنت الجداول معلومات تفصيلية حول:

• السماكة الفعالة للطبقة	• المسامية
• التشبع بالنفط	• العامل الحجمي
• الضغط الطبقي (الأولي والحالي)	• اللزوجة
• الكثافة وفقاً لدرجةAPI	• الاحتياطي الجيولوجي والقابل للإنتاج
• نسبة المياه	• عدد الآبار المنتجة
• معدل الاستنزاف والمردود الأولي والحالي	

وقد أتاح تحليل هذه المؤشرات تقييم الوضع الإنتاجي الحالي للحقول السورية، وتحديد **نقاط الضعف** التي تعيق إنتاج النفط الثقيل، مثل:

- انخفاض المردود الأولي (يتراوح بين ١–١٠٪ في معظم الحقول).
- ارتفاع اللزوجة في بعض الحقول إلى عشرات أو مئات السنتي بواز.
- انخفاض API إلى قيم بين ١١–٢٠، مما يؤكد أن النفط ثقيل أو ثقيل جدًا.
- ارتفاع نسبة المياه في بعض الحقول إلى أكثر من ٥٠.%
- تفاوت المسامية والنفاذية بين الحقول، مما يؤثر على اختيار التقنية المناسبة

الجداول (٣-١) الصفات الخزنية لحقول حقل الثورة – دراسات ٢٠١٨

الحقل	الطبقة	عام الاستكشاف	عام الانتاج	المساحة كم٢	متوسط السماكة الفعالة (م)	متوسط المسامية (%)	متوسط التشبع بالنفط (%)	العامل الحجمي	API	لزوجة (س.ب)	المردود الاولي (%)
صفيح	كامشوكا	1979	1983	9.15	8	14.5	65	1.03	17		5
	ك.د	1979	1983	21.2	12	12	80	1.04	17.5	60	10
ديلع	ك.د	1990	1991	7.6	مسامي٨	مسامي١١	مسامي٩٣	1.16	19	2.5	34
					شقي١٠	شقي١	شقي٩٥				
الفهـــــدة	ر.شيرت	2000									16
	أ.حيان	1978	1990	5.67	8	21	60	1.07	20		10
	كامشوكا	1978	1987	10.5	مسامي٥	مسامي٣	مسامي٦٥	1.07	20	32	20
					شقي٣٧	شقي١	شقي٨٥				
هنادي	ك.د	2005	2005	8.86	7	6	70	1.07	23		25
عمالة	ك.د	1979	1983	5.75	10.5	8	78	0.99			10
رصيف	ك.د	1989	1990	7.5	م٣+ش٢٠	م٨+ش١	م٨٠+ش٨٥	1.04	17		14
شمال العويج	ك.د	1988	1996	5	مسامي٧	مسامي٩	مسامي٩٠	1.16	11		12
					شقي١٢	شقي١	شقي٩٥				
نور	ك.د	1996	1996	12.55	مسامي١,١	مسامي٨	مسامي٧٠	1.16	21.6		20
					شقي٢٠	شقي١	شقي٩٠				
منصورة	أ. رمل	2005	2005	1.5	9	16	75	1.07	17.5		20
ج.رصافة	ك.د	2004	2004		8	12	70	1.25	19.44		20
وهـاب	ك.د	1978	1990	8	12	10	80	1.02	13.8	600	10
	كامشوكا			6.8	م٢+ش٢٣	م١٢+ش٠,٥	م٦٠+ش٨٥	1.03	12.4		20

الحقل	ضغط الطبقي		ضغط الاشباع ض.ج	حرارة الطبقة	عدد الآبار			تراكمي نفط م.م٣ حتى ٢٠١٨	احتياطي متبقي م.م٣	مردود حالي %	معدل استنضاب (%)
	الاولي ض.ج	الحالي ض.ج			كلي	منتج	عامل				
صفيح					4	0	0	0.013	0.322	0.2	4.0
	183	86	15	76.5	39	17	17	1.809	0.541	7.7	7.70
ديلع	186.4	175	172	81	24	10	10	1.656005	1.431	34.3	10.8
الفهـــــدة		78			7	1	1	0.023511	0.184	1.8	0.5
		77			13	9	9	0.213961	0.320	4.0	3.6
	140	132	52.5	69	15	9	7	1.072456	0.376	14.8	0.9
هنادي		172			3	2	2	0.044163	0.625	1.7	0.7
عمالة					3	0	0	0.007132	0.370	0.2	1.9
رصيف					3	0	0	0.010364	0.099	1.3	9.5
شمال العويج	192				2	0	0	0.001382	0.346	0	0
نور		203			2	0	0		0.246	0.0	0.0
منصورة	143				4	0	0	0.008448	0.295	0.6	2.8
ج.رصافة	276	260			6	2	1	0.097898	0.420	3.8	0.3
وهـاب	177	178	20	78	14	11	11	0.345242	0.405	4.6	2.2
		115			34	22	20	0.367828	0.364	10.1	2.2

نستطيع من خلال دراستنا للمؤشرات الخزنية المدونة في السجلات السابقة، أن نتوصل إلى ما يلي:

١. **السماكة الفعالة والمسامية والتشبع بالنفط:** تساعد في تحديد حجم النفط القابل للإنتاج، وتقييم جدوى الحفر الأفقي الذي يحتاج إلى طبقات ذات سماكة كافية (≤ ١٠–١٥ م) وهناك العديد من الحقول التي يمكن استخدام الحفر الأفقي تبعاً لسماكة الطلقة المنتجة فيها، مثل: تشكيلة الكيروشينا دولوميت: في حقول الصفيح وعمالة ورصيف ونور ووهاب، وتشكيلة الكامشوكا: في حقلي الفهدة ووهاب.

٢. تتمتع أغلب حقول النفط التابعة لمنطقة حقول الثورة والموضحة في الجداول باللزوجة والكثافة العاليتين حيث سجلت أعلى كثافة (أقل درجة API) في شمال العويج: ١١ والوهاب: ١٢.٤–١٣.٨، بينما أعلى لزوجة في هذه الحقول كانت في الصفيح: ٦٠ سنتي بواز والفهدة: ٣٢ والوهاب: ٦٠٠.

٣. ترافقت اللزوجة العالية (المسجلة) مع نقص في المردود ١٠٪ في الصفيح والوهاب.

٤. **عدد الآبار ومعدل الاستنزاف:** يوضح مدى استثمار الحقل سابقًا، ويكشف عن الحقول التي تحتاج إلى إعادة تطوير شبكة الآبار أو تقنية الحفر والإنتاج بما يزيد معامل المردود من الطبقات.

٥. طريقة الإنتاج المستخدمة في استثمار هذه الحقول هو المضخات العمودية Sucker Rod Pumping وإن استخدامها لم يمكّن من استثمار هذه الحقول بالمردود المطلوب، لذا لا بد من تحسين تقنية الإنتاج في هذه الحقول.

٦. تشكل اللزوجة العالية للنفط الموجود في حقول الثورة وطبقات الكيروشينا دولوميت وبالسماكة ٩ م ذات المسامية الشقية، من المبررات لاستخدام تقنية الحفر الأفقي بما يزيد من ارتشاح النفط اللزج إلى الآبار.

٧. **لم يتم تجريب طرقاً متطورة في استثمار حقول النفط اللزج هذه.**

٨. **بينما الاحتياطي الجيولوجي والقابل للإنتاج:** الذي يساعد في تحديد جدوى الاستثمار نجد أن بعض الحقول تمتلك احتياطيات كبيرة غير مستثمرة بالشكل الأمثل بسبب ضعف الطرق التقليدية، كما في

ديلع ١.٤ م م٣ وصفيح ٠.٨٦ م م٣. مما يستدعي تجريب طرقاً وتقنيات حديثة مثل **SAGD** وCHOPS وغيرها.

النتائج والمقترحات

١. لا بد من توفر البيانات والمعطيات الحقلية المحدثة، وفي بحثنا تمت الاستعانة بالمؤشرات الخزنية الواردة في الجداول السابقة، والتي شملت بيانات تفصيلية عن السماكة الفعالة، المسامية، التشبع بالنفط، اللزوجة، درجةAPI ، الضغط الطبقي، والاحتياطي القابل للإنتاج لعدد من الحقول السورية المنتجة للنفط الثقيل، وبأحدث البيانات لعامي ٢٠١٧-٢٠١٨.

٢. لا بد من الاطلاع وتجريب التقنيات المستخدمة عالمياً في مجال إنتاج النفط الثقيل واستثمار مكامنه، والتدرب على تنفيذ المشاريع الاستثمارية المشابهة عند توفر شروط استخدامها.

٣. ومن خلال تحليل هذه البيانات، نخلص إلى النتائج التالية:

a. **إن الحقول الأكثر ملاءمة لتطبيق الحفر الأفقي** (مثل صفيح، ديلع، نور).

b. يمكن اختيار التقنية التالية لزيادة استخراج النفط الثقيل، وذلك كما يلي:

i. **CHOPS** للمكامن الرملية غير المتماسكة ذات اللزوجة المتوسطة.

ii. **SAGD** للمكامن السميكة ذات الاحتياطي الكبير.

iii. التوترات النبضية للآبار ذات النفاذية المنخفضة، وهي كثيرة في الجداول المعروضة.

٤. مقارنة المؤشرات السورية مع التجارب العالمية (كندا، فنزويلا، الولايات المتحدة) لتأكيد إمكانية تطبيق نفس التقنيات في سورية.

٥. **يزيد الحفر الموجّه والحفر الأفقي** الإنتاجية في المكامن السورية ويقلل من عدد الآبار المستخدمة وبشكل خاص في الآبار التي تحوي على النفط اللزج الموجود في الطبقات ذات السماكات المتوسطة والعالية، وهذا ما وجدناه في تشكيلات الكامشوكا في الفهدة وديلع ونور، شمال العويج في منطقة حقول الثورة.

٦. تتوافر كما هو واضح في الجداول الكثير من الحقول النفطية ذات النفط اللزج والنفط شديد اللزوجة. وهذا ما يستدعي دراسة إمكانية استخدام الطرق والتقانات الحديثة في لإنتاج النفط الثقيل ومنها الطرق المذكورة في بحثنا: SAGD & Pulsed Techniques،CHOPS .

٧. وقد أظهرت الجداول أن بعض الحقول مثل، ديلع تمتلك سماكات جيدة ومسامية مرتفعة، مما يجعلها مناسبة للحفر الأفقي.

٨. تقنية **CHOOPS**مناسبة جدًا للحقول السورية ذات الرمال غير المتماسكة، وتحقق زيادة سريعة في الإنتاج مع كلفة منخفضة نسبيًا.، وهو ما يتناسب مع مواصفات حقل المنصورة.

٩. تقنية **SAGD**هي الأكثر فعالية في المكامن السميكة (≥ ٢٠ م)، ويمكن أن ترفع عامل المردود إلى أكثر من ٥٠٪ كما في التجربة الكندية، ومن الممكن تجريب تطبيقها على الرصيف ونور والوهاب.

١٠. تقنية **التوترات النبضية** فعّالة في الآبار الناضجة ذات النفاذية المنخفضة، وتُعد تقنية داعمة يمكن دمجها مع CHOOPS أو.SAGD

١١. **من المهم دوماً:** إعداد الجدوى الاقتصادية مع مقارنة تطبيقات المتقدمة في إنتاج النفط **الثقيل (اللزج) واختيار الطريقة الأمثل والأكثر جدوى.**

خاتمة البحث

يمثّل النفط الثقيل أحد أهم الموارد الهيدروكربونية غير التقليدية التي يمكن أن تشكّل ركيزة أساسية لتعزيز الأمن الطاقي في سورية، خاصة في ظل التراجع الكبير في إنتاج الحقول التقليدية. وقد أثبتت الدراسة أن التحديات المرتبطة بإنتاج النفط الثقيل — وعلى رأسها اللزوجة العالية، وانخفاض النفاذية، وضعف الطاقة الطبيعية للمكمن — ليست عوائق مستعصية، بل يمكن تجاوزها عبر **دمج الحفر الموجّه والحفر الأفقي مع تقنيات الإنتاج المتقدم** التي أثبتت نجاحًا عالميًا في ظروف جيولوجية مشابهة.

لقد أظهرت التجارب الدولية، ولا سيما في **ألبيرتا الكندية** وكاليفورنيا **الأمريكية** وحزام **أورينوكو الفنزويلي**، أن الاستثمار في النفط الثقيل يصبح مجديًا اقتصاديًا عند تطبيق تقنيات مثل **CHOPS** وSAGD والتوترات **النبضية**، وأن الحفر الأفقي هو العامل الحاسم الذي يرفع الإنتاجية ويزيد مساحة التلامس مع المكمن، مما يضاعف معدلات التدفق ويقلل عدد الآبار المطلوبة.

وبتحليل المؤشرات الخزنية للحقول السورية — من سماكة فعالة، مسامية، تشبع نفطي، لزوجة، API، ضغط طبقي، احتياطي قابل للإنتاج — يتضح أن العديد من الحقول السورية تمتلك **خصائص ممتازة** تؤهلها لتطبيق هذه التقنيات، وأن ضعف المردود الحالي (١–١٠٪) ليس ناتجًا عن فقر في المكامن، بل عن **قصور في التقنيات المستخدمة**.

وعليه، فإن تطوير إنتاج النفط الثقيل في سورية لم يعد خيارًا تقنيًا فحسب، بل ضرورة اقتصادية واستراتيجية.

المراجع

١- تقارير المخزون ودراسات الشركة السورية للنفط، ٢٠١٧-٢٠١٨

٢- د. يوسف الفرج، مقرر هندسة الحفر، الجامعة السورية الخاصة، ٢٠٢١.

3- SLB; The Defining Series: Heavy Oil- Published: 03/17/2016

4- Understanding Heavy Crude Oil: Characteristics، Extraction، and Impacts، Al-Kindi، F.; Al-Aamri، J.; Al-Amri، M.; Al-Aamri، A.; Burns، S. (19 April 2015).

5- *3D VSP Benefits in Heavy Oil Field in South Oman*. doi:10.3997/2214-4609.201412209. ISBN 978-94-6282-144-6

6- SPE Enhanced Oil Recovery Conference 2011، EORC 2011. Vol. 1. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/143300-MS