



منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

التشقيق الهيدروليكي وأثاره البيئية المحتملة

Hydraulic Fracturing
and its Potential
Environmental Effects

دولة الكويت : تموز / يوليو 2017

جميع حقوق الطبع محفوظة، ولا يجوز إعادة النشر أو الاقتباس دون إذن خطي مسبق من المنظمة، 2017.

منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

ص.ب 20501 الصفاة الكويت 13066

هاتف (+965) 24959000 - فاكسميلي (+965) 24959755

P.O. Box 20501 Safat Kuwait 13066

Tel.: (+965) 24959000 – Fax.: (+965) 24959755

Website : www.oapecorg.org

Email: oapec@oapecorg.org

Email: oapec@oapec.fasttelco.com



منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)

التشقيق الهيدروليكي وأثاره البيئية المحتملة

Hydraulic Fracturing and its Potential
Environmental Effects

دولة الكويت : تموز / يوليو 2017





مقدمة

تعتبر عملية التشقيق الهيدروليكي من العمليات الهامة التي تساهم في رفع معدلات إنتاج آبار النفط والغاز، ورفع مُعامل إنتاجية الآبار أحياناً، وتبرز أهميتها في إنتاج النفط التقليدي من الصخور ذات النفاذية المنخفضة. لكن هذا النوع من العمليات اكتسب أهمية فائقة وشهرة واسعة في عمليات إنتاج الهيدروكربونات من مصادر غير تقليدية وعلى رأسها زيت وغاز السجيل (ما يعرف بالنفط والغاز الصخري)، حيث شهدت الصناعة البترولية خلال السنوات القليلة الماضية زخماً في إنتاج النفط والغاز حملت لواءه الولايات المتحدة الأمريكية التي كان لها قصب السبق في استغلال مكامن زيت وغاز السجيل والصخور منخفضة النفاذية، مدعومة في ذلك بتطور تقنيات الحفر الأفقي والتشقيق الهيدروليكي. وحاولت بعض الدول أن تحذو حذو الولايات المتحدة مثل الصين والأرجنتين وروسيا، لكن التجربة الأمريكية في هذا المجال لها خصوصيتها بسبب الانتشار الواسع لعمليات التشقيق الهيدروليكي فيها، مما أكسب الشركات العاملة في هذا المجال خبرة لا يستهان بها ساهمت في إيجاد فرص عمل جديدة، وتمكنت الشركات من الالتفاف على بعض العوائق التقنية فحفرت عدة آبار من موقع واحد، وزادت من طول الجذوع الأفقية، ورفعت سرعة الحفر، وتحكمت أكثر فأكثر في عمليات التشقيق، وتبنت مراقبة النشاطات الزلزالية الموضعية الدقيقة Microseismic Activities، إلى ما هنالك من أمور تقنية أخرى.

من ناحية أخرى، ظهر تخوّف واسع من النتائج البيئية لعمليات التشقيق الهيدروليكي وتباينت وجهات النظر في هذا المجال بسبب الطلب على الطاقة من جهة، والآثار البيئية السلبية أحياناً من جهة أخرى.

تأمل الأمانة العامة من خلال هذه الدراسة أن تسلط الضوء على بعض التفاصيل المتعلقة بالتشقيق الهيدروليكي من النواحي التقنية والبيئية والاقتصادية، وترجو أن يكون فيها من المعلومات ما يعود بالفائدة على الباحثين والمهتمين بالصناعة البترولية بشكل عام.

والله ولي التوفيق،،،

الأمين العام

عباس علي النقي



ملخص تنفيذي

لعبت عمليات التشقيق الهيدروليكي دوراً بارزاً خلال السنوات القليلة الماضية في رفع معدلات إنتاج النفط والغاز في الولايات المتحدة الأمريكية مما كان له تأثير ملحوظ على العرض والطلب العالميين. من جهة أخرى، أثارت النتائج البيئية السلبية الناتجة عن هذه العمليات عاصفة من ردود الفعل القوية في بعض مناطق العالم وصلت إلى حد خروج مظاهرات تطالب بإيقاف ومنع التشقيق الهيدروليكي.

بدأت هذه الدراسة في تسليط الضوء على منشأ النفط وخصائصه البتروفيزيائية، وطبيعة الصخور الرسوبية التي تحمله، وتصنيفها وتوزعها، كما جرى بيان أنواع المصائد التقليدية وتصنيف المصائد غير التقليدية الحاملة لزيوت وغاز السجيل (النفط والغاز الصخري).

انتقلت الدراسة بعدها إلى تعريف التشقيق الهيدروليكي وسير عملية التشقيق مركزة على سوائل التشقيق وأنواعها ومواصفاتها ومكوناتها، وذلك لسبر كميات المياه التي تستخدم في عمليات التشقيق ومصادرها ومحتواها من المواد الكيميائية وطريقة التخلص منها، تمهيداً للنظر في التأثيرات البيئية المحتملة لهذا النوع من العمليات.

وبينت الدراسة الدور الذي تلعبه عمليات التشقيق الهيدروليكي متخذة من الولايات المتحدة الأمريكية مثالاً، كما ضربت أمثلة أخرى من السعودية والكويت والصين.

انتقلت الدراسة بعدها للخوض في شأن التأثيرات البيئية فنظرت في عدد الآبار التي يتم تشقيقها وكميات المياه اللازمة لها والتعامل مع المياه المنتجة وتأثير ذلك على مصادر المياه وعلى مياه الشرب. وبحثت في

موضوع الزلازل الناتجة عن عمليات التشقيق ثم في موضوع تلوث الهواء وتلوث التربة وتأثيراتها المحتملة على البيئة والمجتمع عموماً.

بعدها تم الانتقال إلى الناحية الاقتصادية فحاولت الدراسة تبيان البعد الاقتصادي للتشقيق الهيدروليكي والتكاليف المرتبطة بالعمليات المختلفة المتعلقة به، مع ضرب أمثلة عن ذلك.

وختمت الدراسة بخلاصة ومجموعة من الاستنتاجات.

تمهيد

التشقيق الهيدروليكي Hydraulic Fracturing هو تقنية قديمة ظهرت في مطلع الأربعينات من القرن الماضي واستخدمت تجارياً منذ ذلك الحين لتطوير آبار النفط والغاز في العديد من الدول المنتجة للبترول، لكن الأضواء سُلطت عليها مؤخراً بعد انتشار استخدامها في حقول زيت وغاز السجيل وغيرها من الحقول ذات النفاذية المنخفضة. وربما كانت عمليات التحميض Acidizing التي شاعت في ثلاثينات القرن الماضي هي السبب وراء استخدام تقنية التشقيق الهيدروليكي إذ لاحظ بعض القائمين على عمليات التحميض أنه عند حقن الحمض بضغط مرتفع، سرعان ما ترتفع قدرة المكمن على تقبل المزيد من الحمض، لذلك يُعتقد أن عمليات التحميض الأولى كانت في بعض الأحيان عمليات تحميض وتشقيق في آن معاً. أما أول عملية تشقيق مباشرة لم ترتبط بالتحميض فتتمت عام 1947 في حقل غاز Hugoton غربي كنساس في الولايات المتحدة الأمريكية.

يستخدم البعض تعبير (التكسير) أو (التصديع) الهيدروليكي للإشارة إلى نفس العملية، وإن كان تعبير (التشقيق) هو الأقرب للصواب، ذلك أن هذه التقنية لا تكسر الصخر ولا تصدّعه، وإنما تُنشئ فيه شقوقاً دقيقة تتسع بالكاد للمواد الداعمة من حبيبات رمل أو ما شابهها، بل وغالباً ما تكون مهمتها توسيع الشقوق المجهرية الموجودة أساساً في صخور المكمن إلى قطر لا يتجاوز في معظم الأحيان 1 ميليمتر.

أي أن هذه التقنية تعني وفق المفهوم البسيط حقن مائع ما (غالباً الماء مع إضافات أخرى) تحت ضغط مرتفع في طبقة منخفضة النفاذية لتشكيل شقوق أو توسيع شقوق موجودة في صخر المكمن بهدف السماح للنفط أو الغاز المحتبس في المسامات بالحركة نحو البئر. فالتشقيق الهيدروليكي من الناحية الفعلية عبارة عن عملية توسيع لمساحة الصخر المتصل مع البئر.

تتبع أهمية التشقيق الهيدروليكي من فكرة بسيطة، وهي وجود مكمّن بمسامية مرتفعة ويحتوي على كمية كبيرة من الهيدروكربونات، لكن نفاذية الصخور في المكمّن منخفضة جداً تمنع حركة هذه الهيدروكربونات، لذلك يجب تشقيق هذا الصخر لتتحرك الموائع (نפט - غاز) ضمن الأفتنية المتشكلة.

وغالياً ما يتم من خلال التشقيق تحفيز المكمّن الغازي الذي تقل نفاذيته عن 1 ملي دراسي، أو المكمّن النفطي الذي تقل نفاذيته عن 10 ملي دراسي¹، بينما تتراوح نفاذية الصخور الكربوناتيّة عموماً بين 0.1 - 1 ملي دراسي، وتنخفض في حالة مكامن السجيل إلى أقل من ذلك بكثير لتصل نحو 0.0001 (أو 10⁻⁴) وحتى 0.000001 (أو 10⁻⁶) ملي دراسي.

ساهم التقدم المتسارع في تقنيات الاستكشاف والحفر في تحقيق عدد كبير جداً من اكتشافات البترول التقليدية خلال عقود طويلة من عمر الصناعة البترولية، كما ساهم ارتفاع سعر النفط التقليدي في إعادة تقييم المصادر التي اعتبرت يوماً خارج نطاق الجدوى الاقتصادية.

وبرز التشقيق الهيدروليكي في السنوات الأخيرة كفتح تقني بعد أن تم استخدامه في الآبار الأفقية بالتزامن مع تطوير سوائل تشقيق فعالة وزهيدة الكلفة، وتطور تقنيات القياس الكهربائي البثري، وهذا ما سمح بإنتاج كميات كبيرة من النفوط والغازات من مكامن كانت صخورها حتى الأمس القريب تعتبر صخوراً مولدة للنفط والغاز، أو صخور غطاء، أو صخوراً كتيمة، بل وكان ينظر إلى الكثير منها على أنها تمثل خط الصفر في القياسات الكهربائية، وهذا ما سوف يوضح لاحقاً في هذه الدراسة.

عمدت هذه الدراسة إلى النظر إلى الولايات المتحدة الأمريكية كمثال عن فعاليات ونتائج وآثار عمليات التشقيق الهيدروليكي نظراً للعدد الكبير من الآبار التي تم استخدام هذه التقنية فيها، والتي كان لها نتائج واضحة في تغيير منحى إنتاج النفط والغاز في البلاد بحيث أثرت على سوق النفط العالمي كما هو معروف.



تبرز عند إعداد هذا النوع من الدراسات عدة عوائق، من بينها مشكلة تعريب الكلمة أو التعبير الأجنبي بعيداً عن الترجمة الحرفية التي غالباً لا تسمن ولا تغني من جوع. وقد تم في هذه الدراسة الاستعانة بعدد من المعاجم المعروفة في المكتبة العربية، مثل: معجم الطاقة الصادر عن منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)، وقاموس الاقتصاد والتجارة الصادر عن دائرة المعاجم في مكتبة لبنان عام 1985، والمعجم الجيولوجي الصادر عام 2013 عن هيئة المساحة الجيولوجية السعودية. وعند ورود كلمة أو تعبير أجنبي يحتاج إلى ترجمة أو تعريب غير شائع الاستخدام، تم إدراج الكلمة الأجنبية بعد اللفظ العربي المقابل ليكون المعنى أوضح للقارئ. كما أدرج في نهاية الدراسة جدول يضم تعريب كل المصطلحات التي قابلت الباحث خلال إعداد الدراسة.





قائمة المحتويات

3	.....	مقدمة
5	.....	ملخص تنفيذي
7	.....	تمهيد
11	.....	قائمة المحتويات
15	.....	قائمة الأشكال
16	.....	قائمة الجداول
17		الفصل الأول: منشأ النفط، والخصائص البتروفيزيائية لمكامن النفط والغاز، وأنواع المكامن وصخورها
19	.....	1-1: منشأ النفط
19	.....	1-1-1: نظرية الأصل اللاعضوي
20	.....	1-1-2: نظرية الأصل العضوي
24	.....	2-1: طبيعة الصخور الرسوبية
25	.....	1-2-1: تصنيف الصخور الرسوبية
26	.....	1-1-2-1: الصخور ذات المنشأ الميكانيكي
27	.....	2-1-2-1: الصخور ذات المنشأ الكيميائي
28	.....	3-1: توزع الصخور الرسوبية
30	.....	4-1: الخصائص البتروفيزيائية لمكامن النفط والغاز
30	.....	1-4-1: المسامية
30	.....	1-1-4-1: المسامية الكلية
30	.....	2-1-4-1: المسامية الفعالة
31	.....	3-1-4-1: المسامية الأولية
31	.....	4-1-4-1: المسامية الثانوية
32	.....	2-4-1: النفاذية
36	.....	5-1: السجيل والصخور منخفضة النفاذية
36	.....	1-5-1: السجيل
39	.....	2-5-1: الصخور الكربوناتيية
39	.....	3-5-1: الصخور الرملية
39	.....	1-3-5-1: قطر المسامات وشكلها
39	.....	2-3-5-1: بنية الصخر
40	.....	3-3-5-1: محتوى الصخر من الطين
41	.....	6-1: أنواع المصائد
41	.....	1-6-1: المصائد التركيبية
41	.....	2-6-1: المصائد الستراتيغرافية (السحنية)
42	.....	3-6-1: المصائد المركبة
43	.....	7-1: تصنيف مصائد زيت (غاز) السجيل والصخور منخفضة النفاذية
45		الفصل الثاني: التشقيق الهيدروليكي
47	.....	1-2: لمحة عامة
49	.....	2-2: تعريف التشقيق الهيدروليكي
49	.....	3-2: عملية التشقيق

يتبع: قائمة المحتويات

52	4-2: سوائل التشقيق الهيدروليكي
53	1-4-2: الموصفات العامة لسائل التشقيق
54	2-4-2: مكونات سائل التشقيق الهيدروليكي
54	1-2-4-2: الماء
55	2-2-4-2: مواد التحكم بالطين
56	3-2-4-2: مواد خافضة للاحتكاك
57	4-2-4-2: المواد المخثرة Gelling Agents
59	5-2-4-2: مواد التشابك Crosslinkers
60	6-2-4-2: المكسرات Breakers
60	7-2-4-2: مثبتات اللزوجة Viscosity Stabilizer
60	8-2-4-2: الصادات Buffers
60	9-2-4-2: منشطات التوتر السطحي Surfactants
61	10-2-4-2: المبيدات والمعمقات Biocides/ Bactericides
61	11-2-4-2: الأحماض Acids
62	12-2-4-2: موانع التآكل Acid Corrosion Inhibitors
67	5-2: أنواع أخرى من سوائل التشقيق
67	1-5-2: السوائل المركبة
68	2-5-2: سوائل التشقيق غير التقليدية
69	1-2-5-2: مستحلب ذو أساس من الماء والميثانول وغاز CO ₂
69	2-2-5-2: أنظمة الميثانول المخثر
69	3-2-5-2: سوائل ذات أساس من ثاني أكسيد الكربون السائل
70	6-2: أهمية الماء في عمليات التشقيق
71	1-6-2: كمية المياه اللازمة لعمليات التشقيق
77	الفصل الثالث: دور التشقيق الهيدروليكي في تطوير المصادر الغير التقليدية
79	مثال (1): الولايات المتحدة الأمريكية
79	1-3: احتياطات النفط والغاز في الولايات المتحدة الأمريكية
82	2-3: إنتاج النفط والغاز في الولايات المتحدة الأمريكية
84	مثال (2): المملكة العربية السعودية
85	البنر A
86	البنر B
87	مثال (3): دولة الكويت
87	مثال (4): الصين
91	الفصل الرابع: الآثار البيئية لعمليات التشقيق الهيدروليكي
93	1-4: الآثار البيئية لعمليات التشقيق الهيدروليكي على المياه
93	1-1-4: عدد الآبار التي يتم تشقيقها في الولايات المتحدة
96	2-1-4: التأثير على وفرة مصادر المياه
97	3-1-4: أنواع المياه المستخدمة في عمليات التشقيق الهيدروليكي
99	4-1-4: نسبة استهلاك المياه في التشقيق الهيدروليكي



يتبع: قائمة المحتويات

101	2-4: تأثير المياه المسترجعة من عمليات التشقيق
109	3-4: التعامل مع المياه المنتجة
111	1-3-4: حقن المياه
112	2-3-4: محطات المعالجة المركزية
112	3-3-4: إعادة استخدام المياه في عمليات تشقيق جديدة
114	4-4: تأثير عمليات التشقيق على مياه الشرب
119	الفصل الخامس: تأثير عميات التشقيق الهيدروليكي على الطبيعة
121	1-5: الزلازل
122	1-1-5: كيف يمكن للتشقيق الهيدروليكي أن يتسبب في الزلازل؟
124	2-1-5: التشقيق الهيدروليكي والنشاط الزلزالي المحرّض
127	الفصل السادس: تأثير عميات التشقيق الهيدروليكي على الصحة
131	1-6: تلوث الهواء
133	2-6: تلوث التربة
134	3-6: التأثير على المجتمع
139	الفصل السابع: كلفة التشقيق الهيدروليكي
146	1-7: التكاليف المرتبطة بالحفر
146	2-7: التكاليف المرتبطة بتغليف الآبار
146	3-7: التكاليف المرتبطة بمضخات التشقيق
147	4-7: كلفة سوائل التشقيق
147	5-7: كلفة المواد الداعمة
148	6-7: كلفة عمليات التشقيق في بعض منظومات زيت وغاز السجيل
148	1-6-7: منظومة Bakken
149	2-6-7: منظومة Eagle Ford
149	3-6-7: منظومة Marcellus
149	4-6-7: منظومة Permian
153	الخلاصة والاستنتاجات
157	جدول المصطلحات الواردة في الدراسة
163	اختصارات
164	المراجع
175	Preface

قائمة الأشكال

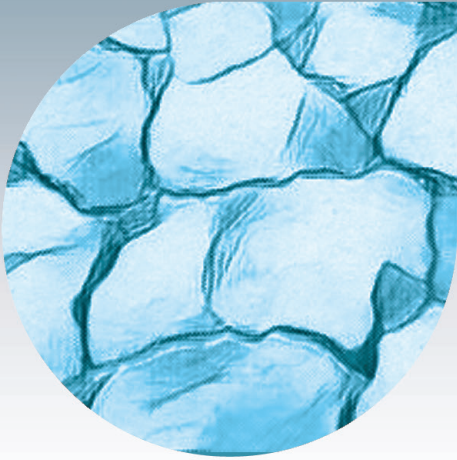
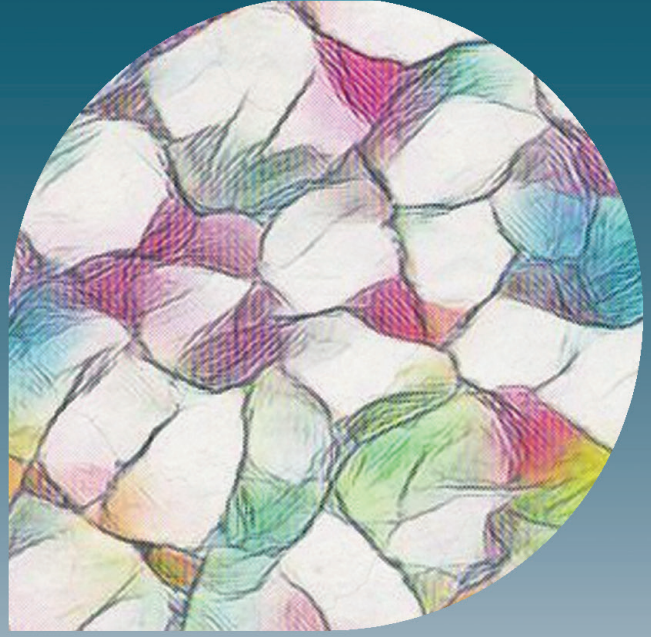
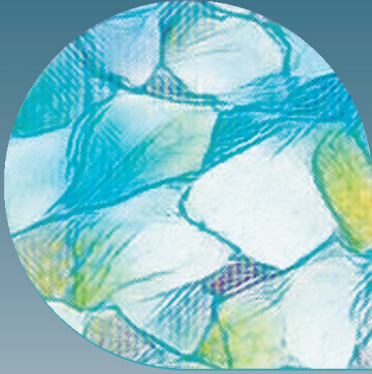
- الشكل 1: نسب توزع المواد العضوية في صخور السجيل 22
- الشكل 2: نضوج المواد العضوية وتحولها إلى بترول 23
- الشكل 3: تصنيف الصخور الرسوبية من حيث المنشأ 28
- الشكل 4: نسب الصخور الرسوبية في القشرة الأرضية 29
- الشكل 5: نسبة كل نوع من الصخور الرسوبية إلى إجمالي الصخور الرسوبية 29
- الشكل 6: تأثير ترتيب الحبيبات على المسامية 31
- الشكل 7: عناصر معادلة دارسي 33
- الشكل 8: مقارنة النفاذية بين مختلف أنواع المكامن 40
- الشكل 9: بعض أنواع المصائد البترولية 42
- الشكل 10: موقع عملية تشقيق هيدروليكي في الولايات المتحدة عام 1949 48
- الشكل 11: الضغط اللازم لعمليات التشقيق الهيدروليكي حسب عمق البئر 51
- الشكل 12: سوائل التشقيق المستخدمة في ولاية شمال داكوتا الأمريكية 67
- الشكل 13: كميات المياه اللازمة للحفر والتشقيق الهيدروليكي في بعض منظومات غاز السجيل 73
- الشكل 14: احتياطيات النفط الأمريكي 80
- الشكل 15: احتياطيات الغاز الأمريكي 81
- الشكل 16: المعدل اليومي لإنتاج النفط الأمريكي سنوياً 82
- الشكل 17: الغاز الطبيعي المسوق سنوياً في الولايات المتحدة الأمريكية 83
- الشكل 18: إنتاج زيت السجيل في الولايات المتحدة 84
- الشكل 19: بيانات الإنتاج اليومي خلال سنتين في أحد آبار Haynesville لغاز السجيل 97
- الشكل 20: نسبة الماء المستهلك في عمليات التشقيق مقارنة بإجمالي كميات المياه المستخدمة في بعض الولايات خلال عامي 2011 و2012 100
- الشكل 21: كميات المياه المستخدمة في عمليات التشقيق في تكساس وشمال داكوتا 102
- الشكل 22: نسبة الماء إلى النفط في بعض آبار زيت السجيل في الولايات المتحدة 105
- الشكل 23: مخطط لاستراتيجيات التعامل مع المياه الناتجة عن عمليات التشقيق الهيدروليكي 110
- الشكل 24: مقياس الزلازل حسب مدى قوة الهزة 121
- الشكل 25: توزع بعض الزلازل حسب قوتها ومنشئها 122
- الشكل 26: تكاليف الحفر والإكمال عام 2014 لآبار اليابسة في بعض مناطق الولايات المتحدة 144
- الشكل 27: كلفة عمليات الحفر والإكمال للآبار في خمس منظومات في الولايات المتحدة الأمريكية 145
- الشكل 28: نسبة تكاليف التشقيق الهيدروليكي إلى إجمالي كلفة البئر في أربع منظومات في الولايات المتحدة الأمريكية 150



قائمة الجداول

- الجدول 1: تصنيف النفاذية حسب قيمتها..... 33
- الجدول 2: تأثير قطر القناة أو الشق على النفاذية..... 35
- الجدول 3: قيم الضغط اللازمة لعمليات التشقيق الهيدروليكي..... 50
- الجدول 4: المواد الكيميائية الأكثر شيوعاً في سوائل التشقيق الهيدروليكي..... 63
- الجدول 5: كميات المياه اللازمة للحفر والتشقيق الهيدروليكي في بعض منظومات غاز السجيل..... 71
- الجدول 6: كميات المياه اللازمة لتشقيق البئر الواحد حسب الولاية..... 72
- الجدول 7: أعماق تشكيلات السجيل في بعض الدول العربية..... 74
- الجدول 8: كمية الماء اللازمة للتشقيق مقارنة بكمية الماء اللازمة للحفر..... 75
- الجدول 9: نسبة احتياطي غاز السجيل الأمريكي من إجمالي احتياطي الغاز الطبيعي..... 81
- الجدول 10: مكونات عملية التشقيق لكل مرحلة في البئر A/السعودية..... 86
- الجدول 11: مقارنة بين حقل Dagang الصيني ومنظومتي Eagle Ford و Bakken..... 88
- الجدول 12: نتائج التشقيق الهيدروليكي على بعض آبار حقل Dagang في الصين..... 89
- الجدول 13: عمليات التشقيق المسجلة في بعض الأحواض الجيولوجية في الولايات المتحدة الأمريكية 2000-2010..... 95
- الجدول 14: إنتاج بعض آبار زيت السجيل في الولايات المتحدة..... 104
- الجدول 15: كميات المياه المنتجة خلال عشرة أيام بعد التشقيق الهيدروليكي في بعض التشكيلات في الولايات المتحدة الأمريكية..... 105
- الجدول 16: كمية المواد الكيميائية في سوائل التشقيق الهيدروليكي..... 106
- الجدول 17: تحليل عينة من مياه مسترجعة بعد التشقيق في ولاية بنسلفانيا..... 107
- الجدول 18: استراتيجيات التعامل مع المياه المنتجة من عمليات التشقيق الهيدروليكي في بعض أحواض الولايات المتحدة الأمريكية..... 111
- الجدول 19: عدد الصهاريج اللازمة لعملية التشقيق الهيدروليكي..... 132
- الجدول 20: التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي في منظومة Bakken..... 148
- الجدول 21: التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي في منظومة Eagle Ford..... 149
- الجدول 22: التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي في منظومة Marcellus..... 149
- الجدول 23: التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي في منظومة Permian..... 150





الفصل الأول

منشأ النفط، والخصائص البتروفيزيائية لمكامن النفط والغاز، وأنواع المكامن وصخورها

نظراً لأن التشقيق الهيدروليكي يهدف في الدرجة الأولى إلى إحداث تغيير فيزيائي في صخور المكامن يسمح بتدفق النفط أو الغاز بكميات تجارية، فلا بد من استعراض منشأ النفط وعلاقته بالخصائص البتروفيزيائية للصخور المولدة ولصخور المكامن، لبيان الأسباب التي تقود إلى استخدام هذه التقنية.



الفصل الأول

منشأ النفط، والخصائص البتروفيزيائية للمكامن النفط والغاز، وأنواع المكامن وصخورها

1-1: منشأ النفط

ظهرت العديد من النظريات التي تبحث في منشأ النفط* وأصله منذ اكتشاف النفط والحفر بحثاً عنه لاستخدامه بشكل تجاري، حيث شهدت مدينة باكو² حفر أول بئر للنفط عام 1549، وفي القرن التاسع عشر في عام 1848 حفر المهندس الروسي ف.ن. سيمونوف بئراً في شبه جزيرة أسفيرون شمال شرق باكو، وتلا ذلك في عام 1858 حفر أول بئر تجاري للنفط في أمريكا الشمالية، وتحديداً في حقل Oil Springs، الواقع في ولاية أونتاريو في كندا، أما بئر الكولونيل ديريك الشهير³ في تيتوسفيل في بنسلفانيا، فقد حفر فعلياً في عام 1859.

ومن أشهر النظريات التي حاولت تفسير منشأ النفط، نظريتا الأصل العضوي، والأصل اللاعضوي.

1-1-1: نظرية الأصل اللاعضوي

وهي أقدم نظرية في هذا المجال، وكان أتباع النظرية النبتونية† من أوائل من تبنوا فكرة الأصل اللاعضوي للنفط، واعتبروا أن الصبّات البازلتية

* ما ينطبق على النفط ينطبق على الغاز عموماً من حيث المنشأ، لذلك قد تستخدم كلمة النفط في هذه الدراسة للإشارة إلى حالتي النفط والغاز إلا إذا دعت الضرورة للتمييز بينهما.
† Neptunism نظرية قامت على أن الصخور كلها نشأت من تبلور الأملاح في المحيطات القديمة، ولاقت هذه النظرية رواجاً في القرن الثامن عشر ومطلع القرن التاسع عشر.

(Basaltic Sills) هي نطف أو بيتومين متصلب. ويرى مؤيدو هذه النظرية اليوم أن هناك العديد من الأسباب التي تدعم موقفهم، ومن أهمها حسب رأيهم:

1- وجود غاز الميثان على كواكب أخرى من المجموعة الشمسية، أو العثور عليه في بعض النيازك والشهب التي تصل إلى الأرض.

2- وجود بعض المركبات والعناصر المعدنية في الهيدروكربونات بنسب تتماشى مع نسب هذه العناصر في الوشاح الأعلى من الأرض (Upper Mantle) أكثر مما تتماشى مع نسبها في القشرة الأرضية أو في قيعان المحيطات.

3- وجود الهيليوم وبعض العناصر النبيلة الأخرى في المكامن الهيدروكربونية⁴.

وعلى خطى أصحاب النظرية النبتونية، أعلن العالم الروسي مندلييف (Mendeleev) نظريته حول الأصل اللاعضوي للنفط في اجتماع الجمعية الروسية للكيمياء في 15 تشرين الأول/أكتوبر 1876، ونصت النظرية على أن البترول تشكل في أعماق الأرض نتيجة الحرارة المرتفعة والضغط الهائل، مما أدى إلى إيجاد تفاعل كيميائي بين الماء وكربيد الحديد Fe_3C * الموجود في الوشاح الأعلى من طبقات الأرض⁵.

وبالرغم من محاولة التبرير العلمي التي اتبعتها أنصار النظرية اللاعضوية، إلا أن التطبيق الفعلي على أرض الواقع لم يسهم باكتشاف تجمعات تجارية من النفط أو الغاز استناداً لها.

1-1-2: نظرية الأصل العضوي

تنص هذه النظرية على أن البترول تشكل نتيجة تحلل البقايا الحيوانية والنباتية المطمورة التي تعرضت لضغوط ودرجات حرارة مرتفعة لفترة طويلة بمعزل عن الهواء.

* Cementite

وترى أن هناك عدة شروط لا بد من توفرها حتى تتشكل تجمعات الهيدروكربون، وهي:

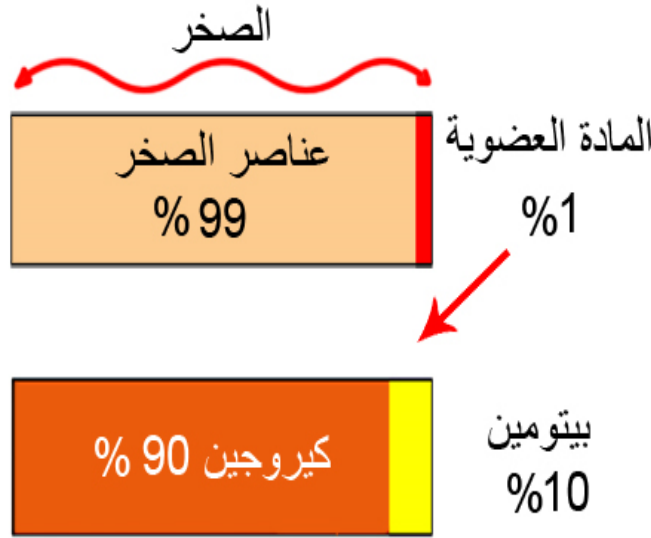
- 1- وجود الحوض الترسيبي.
- 2- تراكم الرسوبيات التي تحتوي على نسبة مرتفعة من المواد العضوية، وهذه الرسوبيات هي العامل الأهم في تشكل ما يسمى الصخور الأم أو الصخور المولدة Source Rocks، والتي تشكل عملياً هدف عمليات التشقيق الهيدروليكي في حقول النفط غير التقليدي وخاصة حقول زيت وغاز السجيل.
- 3- الزمن، حيث تمر ملايين السنين لارتفاع الحرارة والضغط بما يكفي لتحويل المواد العضوية في الصخر الأم إلى نפט وغاز، وهذا ما يطلق عليه تعبير: النضج الحراري Thermal Maturity.
- 4- هجرة النفط من الصخور الأم نتيجة الضغط المرتفع وعامل الطفو Buoyancy، نحو الطبقات الأعلى حيث يكون الضغط أقل، وهنا يتدخل عامل هام آخر هو:
- 5- التوقيت: حيث يجب توفر مكنن رسوبي تشكل قبل هجرة النفط أو الغاز.

يذكر أن معظم إن لم نقل كل اكتشافات النفط والغاز المعروفة في العالم، تم العثور عليها استناداً إلى نظرية الأصل العضوي، بينما تشير بعض المصادر إلى حالات نادرة عثر فيها على غاز الميثان استناداً إلى نظرية الأصل اللاعضوي.

هذا المنشأ العضوي يحتاج إلى صخور رسوبية تتمتع بمواصفات معينة وشروط ترسيبية خاصة دقيقة، ومكان البترول بدورها يجب أن تتمتع بمواصفات بتروفيزيائية تسمح بتجمع النفط والغاز فيها.

تبلغ نسبة المادة العضوية في صخور السجيل Shale حوالي 1%، وقد ترتفع هذه النسبة أو تنخفض حسب الظروف الترسيبية. ويشكل الكيروجين Kerogen نحو 90% من هذه المادة العضوية، بينما يشكل البيتومين Bitumen 10% منها كما هو مبين في الشكل 1، وتشير العديد من الدراسات إلى أن البيتومين هو كيروجين تعرض للتحويل الحراري. وعملية التحويل هذه ترفع نسبة محتوى الكربون في البيتومين الذي يهاجر نتيجة الضغط المرتفع ليشكل النفط أو الغاز⁶.

الشكل 1: نسب توزع المواد العضوية في صخور السجيل



معدل عن Colin Barker، 1979

وهنا لا بد من الإشارة إلى أن الغاز الطبيعي قد يكون ذا منشأ عضوي أو حراري، حيث يتشكل الغاز ذو المنشأ العضوي في درجات الحرارة المنخفضة عند أعماق تقل عن 1000 م، بينما يتشكل باقي الغاز عند أعماق أكبر.

يبين الشكل 2 مراحل نضوج المادة العضوية وتحولها إلى نפט أو غاز، ويلاحظ من الشكل أن أحد مؤشرات النضج الحراري (عاكس الفترنيت R_o)* تزداد قيمته مع ازدياد العمق والحرارة، كما ترتفع النسبة المئوية الوزنية للكربون ضمن الكيروجين⁷.

الشكل 2: نضوج المواد العضوية وتحولها إلى بترول

عاكس الفترنيت R_o %	توليد البترول	وزن الكربون في الكيروجين %
0.2		65
0.3		70
0.4		75
0.5		
0.6	نفط	80
	ذروة توليد النفط	
	غاز رطب	
1.0	غاز رطب جاف	85
1.2	ذروة توليد الغاز الرطب	
	ذروة توليد الغاز الجاف	
1.35	حد النفط	90
2.0	حد الغاز الرطب	
3.0	حد الغاز الجاف	
4.0		95
5.0		

معدل عن Peter Link، 1982

يعتبر النضج الحراري أحد أهم المؤشرات المستخدمة لتقييم منظومات زيت وغاز السجيل، ويستخدم عاكس الفترنيت (وهو ضرب من الفحم الحجري اللماع ضمن مجموعة الماسرال الفحمية Coal Maceral Group) كأحد طرق تقييم هذا النضج، فمثلاً تشير بعض الأبحاث إلى أن قيمته تزيد عن 1.4% في منظومة Barnett Shale ضمن حوض Fort Worth في الولايات المتحدة الأمريكية⁸.

* Vitrinite Reflectance تشير له بعض المصادر العربية باسم معامل الانعكاس.

2-1: طبيعة الصخور الرسوبية

لا تعرف الصناعة البترولية إلا عدداً محدوداً من مكامن البترول ضمن الصخور النارية، مقارنة بالعدد الهائل من مكامن الصخور الرسوبية في معظم الحقول المعروفة في العالم حتى اليوم. لذلك سوف يتم التفصيل في شأن الصخور الرسوبية، مع الاكتفاء بالإشارة سريعاً إلى بقية أنواع الصخور.

الصخور بالتعريف هي تجمع لعنصر أو أكثر من المعادن والفلزات، وتقسم الصخور حسب منشأها إلى ثلاثة أنواع، هي:

- الصخور النارية Igneous
- الصخور الاستحالية أو المتحولة Metamorphic
- الصخور الرسوبية Sedimentary

تشكلت الصخور النارية من تصلب المواد الذائبة التي خرجت من باطن الأرض، والتي تدعى المهل أو الماغما Magma، والتي بردت عند وصولها إلى سطح الأرض عبر البراكين، ومنها الرماد البركاني، والصببات البازلتية، أو تلك التي بردت تحت سطح الأرض خلال حركتها نحو الأعلى، مثل صخور الغرانيت، ويرى البعض أن الصخور النارية تشكل نحو 65% من القشرة الأرضية Crust⁹.

أما الصخور المتحولة فقد تشكلت من صخور أخرى تحت سطح الأرض تحولت إلى صخور مختلفة نتيجة الضغط والحرارة والتفاعلات الكيميائية، ومنها على سبيل المثال الرخام الناتج عن تعرض الحجر الجيري والكوارتز للحرارة¹⁰.

تسببت العوامل التكتونية خلال الأزمنة الجيولوجية الغابرة في تغيير القشرة الأرضية حيث ظهرت الصخور الرسوبية كنتيجة للتغيرات الميكانيكية



والكيميائية التي تعرضت لها صخور القارات، وفي العصر الراهن تغطي طبقة رقيقة من الرسوبيات معظم سطح الأرض.

تشكلت الصخور الرسوبية كما يشير الاسم نتيجة تراكم (ترسب) وتراص عناصر ومعادن وفلزات وصخور أخرى ومتعضيات وبقايا نباتية، أو تشكلت نتيجة تغيرات كيميائية.

تلعب القياسات الكهربائية البئرية دوراً في غاية الأهمية لمعرفة الخصائص البتروفيزيائية للصخور ومحتواها من الموائع، ويحتاج تحديد موقع مكامن النفط والغاز إلى تفهم طبيعة هذه الصخور التي يمكن أن تولد أو تخزن هذه الهيدروكربونات، وبالتالي فإن تصنيف هذا النوع من الصخور يعتبر من الخطى الهامة على طريق عمليات الاستكشاف والإنتاج.

1-2-1: تصنيف الصخور الرسوبية

حاول الجيولوجيون من أمد بعيد تصنيف الصخور الرسوبية بناء على أسس طبيعية، لكن أغلب التصنيفات تعثرت أمام عوائق متعلقة بمنشأ الصخور، لذلك كانت التصنيفات العديدة التي ظهرت تعكس فكر وخبرة من أوجدوها، دون أن يفلح تصنيف معين في أن يحظى بقبول عالمي. ولعل كتاب لويس بيرسون* "الصخور والعناصر الصخرية" الذي نشر في مطلع القرن الماضي عام 1908، كان أول محاولة لتصنيف الصخور لاقت رواجاً في العالم، حيث نزع فيه إلى تصنيف مبسط للصخور استناداً إلى خصائصها الفيزيائية وتركيبها، واعتبر أن الصخور الرسوبية إما أن تكون حطامية (فتاتية) أو غير حطامية¹¹. ثم تتابعت المحاولات في هذا المجال، حتى عام 1948 حين نشرت مجلة[†] الجيولوجيا ثلاثة أبحاث منفصلة لثلاثة جيولوجيين

* Louis V. Pirsson, Rocks and Rock Minerals.

† Journal of Geology.

أمريكيين، وشكلت التصانيف التي اقترحوها عماداً لكل النقاشات المعاصرة حول تصنيف الصخور الرسوبية.

تصنف الصخور الرسوبية حسب سبب نشوءها إلى صخور ذات منشأ ميكانيكي أو آلي، وصخور ذات منشأ كيميائي تضم معها الصخور ذات المنشأ العضوي.

1-2-1: الصخور ذات المنشأ الميكانيكي

وهي صخور تكونت نتيجة لعوامل الحث والتعرية أو التجوية Weathering لصخور أخرى أو لهياكل الحيوانات في المناطق المعرضة للعوامل الطبيعية من رياح وحرارة وأمطار، مما أدى إلى تفتت الصخر الأصلي وانتقال النواتج إلى مكان آخر وترسيبها مشكلة صخوراً جديدة، ومن هذه الصخور:

- الصخور الرملية
- الصخور الغضارية والتي تشكل نحو نصف الصخور الرسوبية على الأرض
- الكونغلوميرا

يشار للصخور ذات المنشأ الميكانيكي عادة بالصخور الفتاتية أو الحطامية* Clastic، وهي تتكون عملياً من حبيبات منفصلة يجمعها اسمنت أو ملاط Cement مثل كربونات الكالسيوم أو السيليكا التي تترسب من المحاليل المائية، ويساهم الملاط في تماسك هذه الصخور بعد أن تتعرض للضغط من الرسوبيات التي تعلوها بالتدريج. تعتمد مواصفات هذا النوع من الصخور على تركيب الحبيبات، ونسبتها في الصخر، وحجمها، وترتيبها، وتركيب الملاط الذي يجمع الحبيبات، ونوعية السوائل الموجودة في مسامات الصخر.

* كلمة Clastic من الأصل الإغريقي Klastos، وتعني المكسور أو المحطم.

1-2-1-2: الصخور ذات المنشأ الكيميائي

تتشكل هذه الصخور عند ترسب المواد من محلول فوق مشبع Supersaturated، وتنقسم بدورها إلى صخور كربونائية، وصخور تبخرية، وصخور سيليسية.

وأهم المواد التي تكون هذه الصخور، هي¹²:

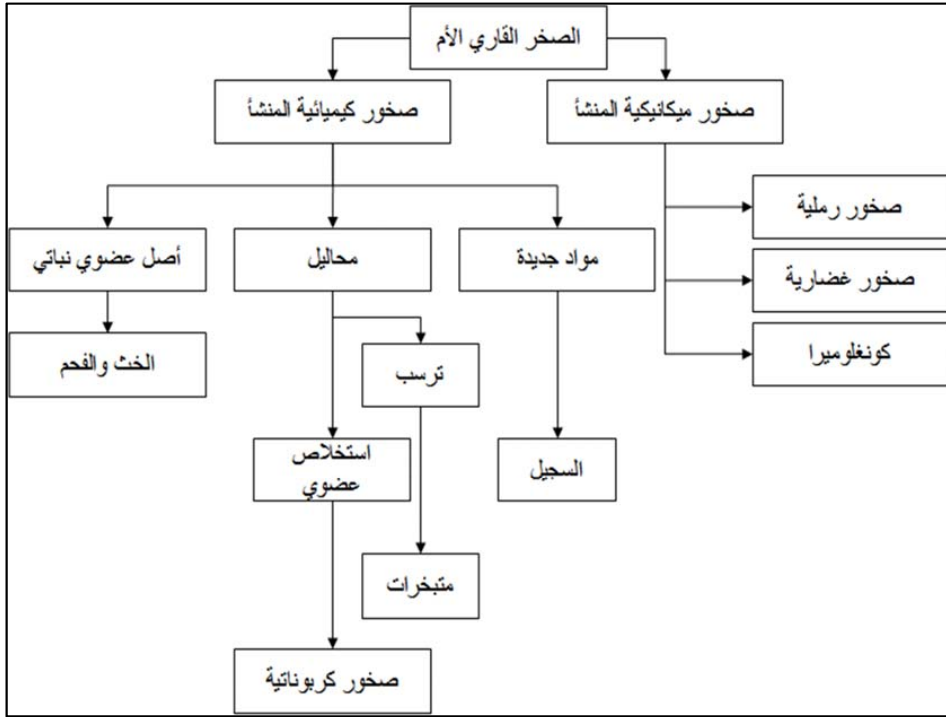
- الكوارتز SiO_2 : وهو أحد أكثر العناصر وجوداً في القشرة الأرضية، وتتميز حبيباته بالقساوة المرتفعة، وبعدم تأثرها بالمواد الكيميائية.
- الكالسيت أو كربونات الكالسيوم $CaCO_3$ ، وهو مكون رئيسي في الصخور الكربونائية، كما يعتبر الملاط الأساسي في الصخور الرملية.
- الصلصال أو الطين Clay، وهو منتج ثانوي لعمليات التعرية.
- فتات الصخور Fragments، وهي فتات لم تتعرض لعمليات التعرية لفترة كافية.
- الدولوميت $(Ca,Mg)CO_3$ وهو عنصر يمكن أن يحل مكان الكالسيت في الصخور الجيرية.
- الفيلدسبار، أو الميكا (Mica، Feldspar)، وهي عناصر لم تتعرض للتعرية.
- الملح أو الهاليت (NaCl) والجص $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ ، وتنتج عن تبخر مياه البحر وتبلور هذه العناصر.
- كما توجد أحياناً مكونات عضوية مثل الفحم Coal، أو الخث Peat وهو نسيج نباتي متحلل جزئياً ذو بنية ليفية.

وعموماً، فإن كل الصخور التي تحتوي على كربونات الكالسيوم يشار لها باسم الحجر أو الصخر الجيري Limestone أو تسمى بالصخور الكربونائية، أما تلك التي تحتوي على كربونات الكالسيوم والمغنيزيوم فتسمى الصخور الدولوميتية Dolomites. أما الصخور السيليسية فهي صخور نتجت عن تحلل الهياكل العضوية

التي تحتوي على عنصر السيليكات كمكون رئيسي، مثل صخور الشرت Chert، أو صخور الدياتوميت Diatomite التي تشبه الطباشير وتحتوي على عنصر الأوبال ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) الذي عادة ما يوجد في بقايا الأشنيات الميتة، وتعرف هذه الصخور أيضاً باسم التريبوليت Tripolite نسبة إلى مدينة طرابلس الليبية حيث توجد تجمعات منها¹³.

يلخص الشكل 3 تصنيف الصخور الرسوبية من حيث المنشأ حسبما ذكر سابقاً.

الشكل 3: تصنيف الصخور الرسوبية من حيث المنشأ

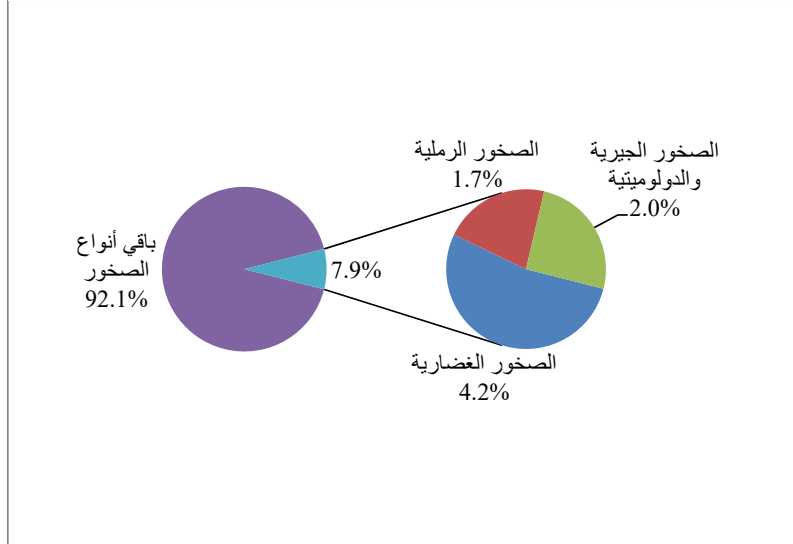


معدل عن: Dresser Atlas، 2009

3-1: توزع الصخور الرسوبية

تشكل الصخور الرسوبية نحو 8% من صخور القشرة الأرضية عموماً، حيث تمثل الصخور الغضارية 4.2%، والصخور الرملية 1.7%، والصخور الكربوناتيية (الجيرية والدولوميتية) 2%، كما هو موضح في الشكل 4.

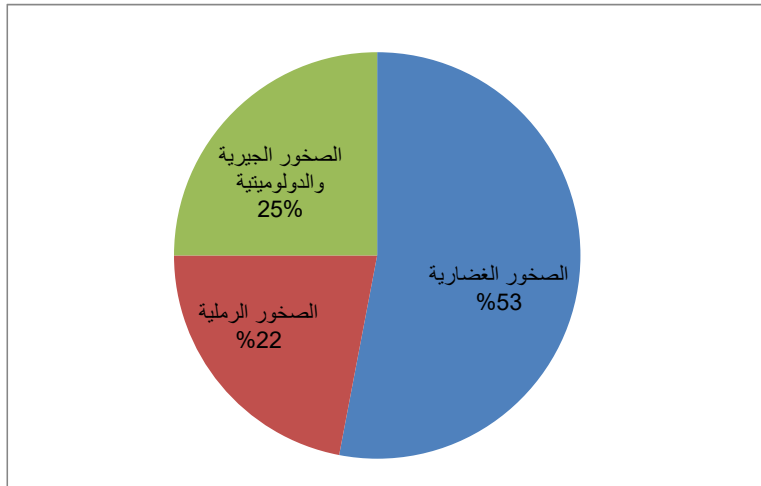
الشكل 4: نسب الصخور الرسوبية في القشرة الأرضية



إدارة الشؤون الفنية، أوابك، استناداً إلى بيانات من Peters، 2012

وتعتبر الصخور الغضارية (السهيل) أكثر الصخور الرسوبية انتشاراً، حيث تشكل أكثر من 53% من إجمالي الصخور الرسوبية في العالم، كما هو مبين في الشكل 5.

الشكل 5: نسبة كل نوع من الصخور الرسوبية إلى إجمالي الصخور الرسوبية



إدارة الشؤون الفنية، أوابك، استناداً إلى بيانات من Peters، 2012

4-1: الخصائص البتروفيزيائية لمكامن النفط والغاز

يميل الكثيرون تبسيطاً للواقع إلى اعتبار أن صخور المكنن هي كل صخور تتمتع بمسامية كافية لاحتواء النفط والغاز، ونفاذية ملائمة لحركة هذه الهيدروكربونات. لكن المنظور الهندسي للمكانن يبين أنه بالرغم من أهمية المسامية والنفاذية، إلا أن هناك عناصر أخرى تدخل في الاعتبار، مثل: ضغط المكنن، ونوعية الموائع في الصخر، والطور الذي توجد فيه هذه الموائع، وسلوك هذه الموائع خلال حركتها، وقابلية التبلل للصخر، والعديد من العناصر الأخرى¹⁴.

1-4-1: المسامية

المسامية هي المؤشر الأساسي على قدرة الصخر على احتواء الموائع، وتمثل نسبة حجم الفراغات (المسامات) في صخر ما، إلى الحجم الكلي للصخر، ويعبر عنها بالمعادلة الرياضية التالية:

$$\phi = \frac{V_p}{V_b}$$

حيث:

ϕ : المسامية، V_p : حجم المسامات، V_b : حجم الصخر الكلي.

تقسم المسامية بدورها إلى نوعين: المسامية الكلية، والمسامية الفعالة.

1-1-4-1: المسامية الكلية

وتمثل كل الفراغات في صخر ما، سواء كانت هذه الفراغات متصلة أو معزولة عن بعضها.

2-1-4-1: المسامية الفعالة

تمثل فقط المسامات المتصلة ببعضها، أي أن المسامية الفعالة تكون دوماً أقل من المسامية الكلية، أو مساوية لها في أحسن الأحوال، وتهتم هندسة المكامن بالمسامية الفعالة.

كما يمكن تصنيف المسامية إلى مسامية أولية، ومسامية ثانوية.

1-4-1-3: المسامية الأولية

وهي المسامية التي تكونت خلال عملية تشكل الصخر.

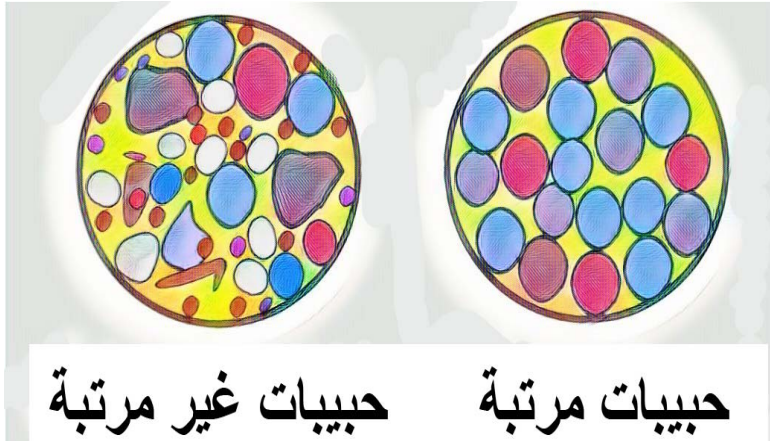
1-4-1-4: المسامية الثانوية

وهي المسامية التي تكونت بعد عملية الترسيب وانطمار التشكيلات.

تعتبر المسامية في الصخور الرملية عملياً مسامية ثانوية، بينما تكون المسامية أولية في الصخور الكربونائية، وهذا لا ينفي وجود مسامية ثانوية في الصخور الكربونائية أو مسامية أولية في الصخور الرملية.

تتأثر المسامية الثانوية في الصخور الرملية بالعديد من العوامل، مثل التطبيق Packing، والترتيب Sorting، والسمنتة Cementing، حيث يصف التطبيق ترتيب حبيبات الرمل بالنسبة لبعضها البعض، وكلما كانت الحبيبات مرتبة بزوايا أقرب إلى 90° كلما كانت المسامية أعلى. وتكون الصخور ذات الحبيبات المرتبة أعلى مسامية من تلك ذات الحبيبات ضعيفة الترتيب، وهذا يتعلق عموماً بشكل الحبيبات إذ كلما كانت أكثر كروية وانتظاماً، كلما كانت المسامية أعلى، كما هو مبين في الشكل 6.

الشكل 6: تأثير ترتيب الحبيبات على المسامية



أما السمنتة، فتساهم في تخفيض المسامية كونها تشغل حيزاً من حجم الفراغات بين حبيبات الصخر، وعادة ما تترابط حبيبات الرمل في الصخور الرملية بملاط من الكوارتز أو الكربونات.

كما تحتوي كل الصخور الرسوبية على كميات متفاوتة من الماء تسمى المياه الطباقية Formation Water، تحتل بدورها حيزاً من مسام الصخر، وهناك قسم منها غير قابل للحركة يدعى بالمياه المترابطة Connate Water، ولا يمكن إنتاج هذا القسم من المياه.

وهناك نوع آخر من المسامية يدعى مسامية الشقوق، لكن هذا النوع من المسامية غالباً ما يكون منخفضاً جداً لا يتعدى 1-2% في حال وجوده.

2-4-1: النفاذية

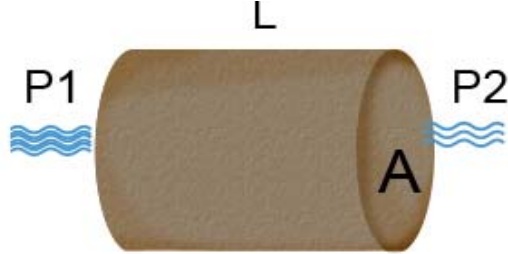
تقدّم أن المسامية الفعالة تصف المسامات المتصلة ببعضها البعض، هذه المسامات تشكل عملياً ما يشبه الشبكة ثلاثية الأبعاد، تسمى قدرة هذه الشبكة على نقل الموائع ضمنها بالنفاذية. تعتبر النفاذية أحد أهم العوامل في تحديد قدرة مكامن ما على الإنتاج، وتوصف رياضياً في عينة صخرية ما (الشكل 7)، بمعادلة دارسي:

$$k = \frac{Q\mu}{A\left(\frac{\Delta P}{L}\right)}$$

حيث:

K: النفاذية، Q: معدل جريان السائل في وحدة الزمن، μ : لزوجة السائل، A: مساحة مقطع العينة الصخرية، L: طول العينة الصخرية المدروسة، ΔP : مقدار هبوط الضغط بين مدخل ومخرج السائل في العينة.

الشكل 7: عناصر معادلة دارسي



إدارة الشؤون الفنية، أوابك

تقدر النفاذية بوحدة: دارسي، وبالتعريف فإن الصخر تكون نفاذيته 1 دارسي عندما يمر عبره سائل أحادي الطور لزوجته 1 سنتي بواز cp عند الدرجة 20° مئوية، بمعدل جريان 1 سم³/ثانية من خلال مقطع مساحته 1 سم² ضمن تدرج ضغط يعادل 1 ضغط جوي/سم. أما الواحدة الأكثر شيوعاً واستخداماً في الصناعة البترولية فهي: ملي دارسي md.

هناك عملياً العديد من التصنيفات للنفاذية، وغالباً ما ينتج الاختلاف في التصنيف عن الحقل نفسه أو نوعية المكمن ومحتواه من الموائع، ويمكن عموماً تصنيف النفاذية حسبها هو مبين في الجدول 1:

الجدول 1: تصنيف النفاذية حسب قيمتها

النفاذية md	التصنيف
1 - 15	ضعيفة إلى منخفضة
15 - 50	متوسطة
50 - 250	جيدة
250 - 1000	جيدة جداً
أكثر من 1000	ممتازة

إدارة الشؤون الفنية، أوابك، استناداً إلى Dresser Atlas، 2009

كما يمكن حسب الخبرة العملية القول إن الممكن الذي تقل نفاذيته عن 1 ملي دراسي يحتاج إلى تحفيز* Stimulation لإنتاج الغاز، والممكن الذي تقل نفاذيته عن 10 ملي دراسي يحتاج إلى تحفيز لإنتاج النفط.

إن النفاذية المشار إليها هي نفاذية المادة اللاحمة للصخر (مادة الترابط) Matrix، بينما تتمتع بعض المكامن الأخرى وخاصة الكربوناتية منها بما يسمى نظام نفاذية الشقوق Fractures والأقنية Channels والفجوات Vugs، وهذا النوع من الأنظمة يرفع النفاذية بشكل ملحوظ، إذ قد تصل نفاذية القناة التي قطرها نحو ربع ميليمتر (0.254 ملم) إلى 20 دارسي، بينما تصل نفاذية شق بنفس القطر إلى أكثر من 54 دارسي.

يتم حساب النفاذية باستخدام معادلات تجريبية Empirical لكالتالي:
الحالتين:

$$k \text{ (darcy)} = 0.2 \times 10^8 \times d^2$$

$$k \text{ (darcy)} = 0.544 \times 10^8 \times d^2$$

حيث يقدر القطر d بوحدة البوصة.

ولبيان أهمية التشقيق الهيدروليكي عند الإنتاج من المكامن ذات النفاذية المنخفضة يمكن بتطبيق المعادلتين السابقتين الوصول إلى الجدول 2 الذي يبين أن زيادة قطر القناة أو الشق بمقدار 10 أضعاف، يساهم في رفع النفاذية بمقدار 100 ضعف.

* التحفيز قد يكون عملية تحميض أو تشقيق هيدروليكي أو غير ذلك.



الجدول 2: تأثير قطر القناة أو الشق على النفاذية

النفاذية (دارسي)		القطر (بوصة)
شق	قناة	
54	20	0.001
5440	2000	0.01
544000	200000	0.1

إدارة الشؤون الفنية، أوابك

تعتبر النفاذية في المكامن من الخواص البتروفيزيائية المرتبطة بالاتجاه، بمعنى أن التطبيق المنقطع $Cross \text{ Bedding}$ أو العلامات المتموجة $Ripple \text{ Marks}$ ، أو البنى الحيوية المضطربة $Bioturbation$ ، إضافة إلى السمنتة وترتيب الحبيبات وحجمها، كلها تساهم مجتمعة في التأثير على النفاذية، وعادة تكون النفاذية الموازية لاتجاه توضع الحبيبات (وهو ما يشار له بالنفاذية الأفقية) أعلى من النفاذية المتعامدة على ذلك الاتجاه (النفاذية العمودية). وغالباً ما تتراوح نسبة النفاذية الأفقية إلى النفاذية العمودية (Kh/Kv) بين 1.5 - 3، وقد تصل إلى 10 في بعض الأحيان، أي أن النفاذية الأفقية تصل إلى 10 أضعاف النفاذية العمودية.

إلا أنه ليس من النادر وجود حالات تكون النفاذية العمودية أعلى من نظيرتها الأفقية، وخاصة في حالة الصخور الرملية النظيفة غير المتماسكة التي تأثرت بعمليات التشقق أو عمليات التفلق والتكسر الطبيعي $Jointing$ ، حيث يمكن للشقوق أن تمتلئ بالطين أو غيره من المواد التي قد تشكل عائقاً طبيعياً أمام النفاذية الأفقية، وهذه الحالة تؤثر على أداء المكامن بشكل كبير، حيث يمكن أن تساهم في حدوث ظاهرة تشكل المخاريط المائية أو الغازية $Coning$ خلال الإنتاج.

وبطبيعة الحال تكون النفاذية مطلقة Absolute عند وجود سائل واحد في المكمن، لكن هذه الحالة نظرية إذ أن المكمن يحتوي على الماء والنفط والغاز، مما يقود إلى استخدام النفاذية الفعالة Effective لسائل ما في وجود موائع أخرى ضمن الوسط نفسه، وهذا ما يقود بدوره إلى تعريف النفاذية النسبية: وهي النسبة بين النفاذية الفعالة لسائل ما في وسط معين والنفاذية المطلقة لنفس السائل في حال وجوده لوحده في نفس الوسط¹⁵.

يقود ما تم استعراضه عن المسامية والنفاذية إلى التساؤل حول العلاقة بينهما، والواقع أن النفاذية قد تزداد في الأوساط عالية المسامية، لكن هذه ليست قاعدة، إذ توجد صخور عالية المسامية لكنها غير نفوذة أو ذات نفاذية منخفضة جداً، وهناك صخور ذات مسامية منخفضة إلا أنها تتمتع بنفاذية مرتفعة مثل الصخور المتشققة أو التي تكونت بها أقنية دقيقة بسبب ذوبان بعض العناصر المشكلة لها. لذلك ترتبط النفاذية بناقلية Connectivity المسامات أكثر من ارتباطها بالمسامية عموماً.

5-1: السجيل والصخور منخفضة النفاذية

لما كان موضوع الدراسة عن التشقيق الهيدروليكي الذي شاع استخدامه في إنتاج زيت وغاز السجيل من الصخور الكربوناتيّة منخفضة النفاذية ومن طبقات السجيل، فيمكن إيجاز بعض المعلومات عنهما فيما يلي:

1-5-1: السجيل

السجيل أو الطّفّل Shale هو صخر رسوبي، يتكون بشكل رئيسي من جسيمات الطين والغرين المتصلب ويمتلك خاصية التورق أو التصفح Fissility، بحيث تنفصم الرقائق الطينية موازية للتطبيق. تتشكل البنية الرقائقية في السجيل بتأثير ضغط الصخور التي تعلوه فينتج عن ذلك تصلب رقائق من الطين والغرين فوق بعضها البعض.



تتشكل صخور السجيل عبر ترسب مكوناتها في بيئة مائية هادئة (مياه بطيئة الحركة)، وتوجد غالباً في البحيرات أو المستنقعات أو السبخات أو على أطراف دلتا الأنهار وفي السهول الفيضية Floodplains، كما توجد في الجروف القارية ضمن المياه العميقة الهادئة نسبياً.

يؤدي تراكم هذه المكونات عبر ملايين السنين إلى انضغاطها Compaction فوق بعضها مشكلة الصخر الذي يتميز بمسامية مرتفعة لكن نفاذيته شبه معدومة. ولو تعرضت هذه الصخور إلى حرارة عالية وضغط مرتفع فإنها تمر بمرحلة من التحول Metamorphism تحولها إلى صخور متطبقة يسهل فصل طبقاتها عن بعضها البعض تبدأ من الفيليت Phyllite، مروراً بالشيست Schist وصولاً إلى النيس Gneiss.

السجيل والصلصال Clay هما شينان مختلفان عملياً، وإن كان البعض يستخدمون الاسمين لوصف كلا النوعين، لكن هناك اختلافاً تقنياً بينهما، يمكن تبسيطه بأن السجيل هو غضار تعرض للسمنتة فتحول إلى صخر، أما الصلصال فهو ليس صخراً متماسكاً، بل حبيبات فائقة النعومة مجتمعة مع بعضها، يتكون هذان النوعان من حبيبات دقيقة جداً تشكل مزيجاً من العناصر المكونة للوحل أو الطين Mud.

بسبب هذه البنية الرقائقية وحجم الحبيبات الصغيرة، يكون لهذا النوع من الصخر مساحة سطحية هائلة مقارنة بنفس الحجم من صخر آخر كالصخور الرملية مثلاً. هذا السطح الكبير يسمح بوجود كميات كبيرة من المياه ضمن البنية المعدنية للصخر. ويتسبب الحجم الدقيق للحبيبات بالإضافة لقوى الترابط الشعرية Capillary Forces في الاحتفاظ بهذه المياه، لذلك تكون صخور السجيل عادة ذات مسامية عالية، لكنها نفاذيتها معدومة أو شبه معدومة¹⁶.

وهناك نوعان عامان للسجيل، السجيل الأسود أو الغامق اللون Dark Shale وهو سجل فيه نسبة مرتفعة من المواد العضوية، والسجيل الفاتح اللون Light Shale، وتكون نسبة المواد العضوية فيه منخفضة.

ذكر سابقاً في تمهيد هذه الدراسة أن السجيل كان يعتبر خط الصفر في القياسات الكهربائية البئرية، ولتوضيح هذه النقطة يمكن التنويه إلى أن القياسات الجيوفيزيائية الكهربائية Geophysical Well Logging تعتبر أحد أهم الطرق لتحديد الآفاق الستراتيغرافية للصخور الغضارية أو محتوى الصخور من الطين والصلصال (السجيل) في الآبار، وعادة ما يجري قياس أشعة غاما Gamma Ray Log لهذه الغاية، حتى بات هذا النوع من القياس يعرف باسم مقياس السجيل Shale Log.

يتكون الإشعاع الطبيعي للعناصر غير المستقرة من أشعة ألفا α ، وبيتا β ، وغاما γ ، لكن الخبرة العملية قادت العاملين في الصناعة البترولية إلى قياس أشعة غاما فقط.

تتمتع بعض الصخور الرسوبية بنشاط إشعاعي طبيعي بسبب وجود بعض العناصر غير المستقرة، مثل اليورانيوم Uranium، والثوريوم Thorium، ونظير البوتاسيوم-40 Potassium-40 Isotope 40، كل هذه العناصر تصدر أشعة غاما بنسب مختلفة¹⁷.

تتميز صخور السجيل بارتفاع استجابتها لمقياس أشعة غاما الذي يحدد النشاط الإشعاعي الطبيعي للتشكيلة، وذلك بسبب حبيباتها فائقة النعومة التي تمتاز العناصر الثقيلة. لذلك عند الحصول من القياسات الكهربائية على ما يؤكد وجود السجيل بنسبة مرتفعة في مقطع ما من البئر، كان ينظر لقيمة هذا القياس (الذي يقدر عادة بوحدات API) على أنه خط الصفر بحيث أن كل قيمة لأشعة غاما تساويه أو تزيد عنه فالصخر عندها كتيم لا يرجى أن يعثر

فيه على النفط أو الغاز أو أي موائع متحركة. وبالطبع فقد ساهم التشقق الهيدروليكي لاحقاً في تغيير هذه النظرة ضمن آبار زيت وغاز السجيل.

1-5-2: الصخور الكربوناتيّة

هي صخور تتكون بشكل رئيسي من كربونات الكالسيوم، وتتشكل في بيئة ترسيبية بحرية ضحلة، تناسب الأحياء المائية ذات القواقع Shells حيث يمكنها استخلاص ما تحتاجه من كربونات الكالسيوم من الماء. كما أن بعض هذه الصخور يمكن أن تتشكل من الترسيب المباشر لكربونات الكالسيوم. وتختلف نفاذية هذا النوع من الصخور حسب الظروف الترسيبية والعمق وحسب انخفاس Rift الحوض الترسيبي وتعرض الصخور للانضغاط .Compaction

1-5-3: الصخور الرملية

سبقت الإشارة إلى الصخور الرملية في بداية هذا الفصل، ويمكن الإشارة إلى أن أهم العوامل التي تؤثر على نفاذية هذا النوع من الصخور هي¹⁸:

1-3-5-1: قطر المسامات وشكلها

حيث تنخفض النفاذية مع نقصان قطر المسار الذي تتحرك ضمنه الموائع، أما شكل المسامات فقد لا يكون له ذلك التأثير الواضح مثل القطر، وإن كانت خشونة السطح الداخلي للمسام تساهم في إعاقة حركة الموائع.

1-3-5-2: بنية الصخر

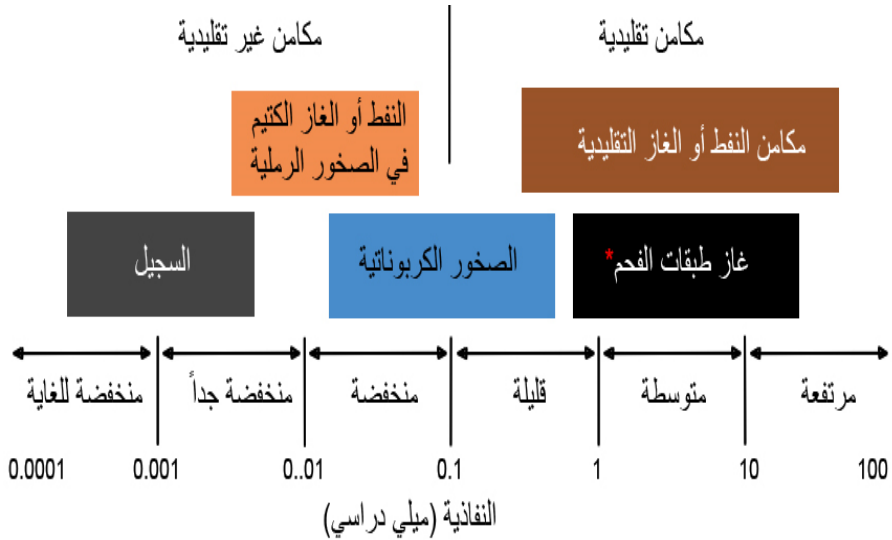
فكلما كان حجم الحبيبات أصغر، كلما نقصت النفاذية، والعكس بالعكس، كمان أن الحبيبات الأكثر كروية ضمن بنية الصخر تؤدي إلى وجود نفاذية أعلى.

3-3-5-1: محتوى الصخر من الطين

وهذا يتعلق بنوع الطين نفسه، فالإليت Illite يخفض المسامية قليلاً لكنه يقضي على النفاذية بشكل كامل تقريباً، بينما يكون تأثير الكاولينيت Kaolinite أخف وطأة. كما أن وجود الطين الفتاتي Detrital Clay يساهم بدوره في تخفيض النفاذية.

إضافة إلى ما سبق، تتأثر كل أنواع الصخور المذكورة بوجود الشقوق التي تساهم في رفع النفاذية بشكل ملحوظ، وهذا عملياً هو الهدف الذي تسعى له عمليات التشقيق الهيدروليكي. يبين الشكل 8 مقارنة بين جودة نفاذية مكامن النفط والغاز التقليدية وغير التقليدية¹⁹، ويلاحظ منه أن مجال النفاذية في حالة مكامن النفط والغاز غير التقليدية يقل عن 0.1 ملي دراسي في الصخور الكربوناتيّة والرملية، ويكون أقل من ذلك بكثير في حالة صخور السجيل.

الشكل 8: مقارنة النفاذية بين مختلف أنواع المكامن



*غاز طبقات الفحم يصنف ضمن الغازات غير التقليدية بسبب نوعية اختزان الغاز في المكمن المصدر: معدل عن CSUR، 2016.

6-1: أنواع المصائد

يشير وجود مكمّن مشبع بالهيدروكربونات إلى مصيدة قادرة على إيقاف هجرة هذه الهيدروكربونات، والمصيدة بالتعريف هي "منطقة محاطة بحدود Boundaries تتوضع في طريق حركة الموائع، حيث يؤمن النطاق العازل (أو صخر الغطاء Cap Rock) في أعلى المكمّن غطاءً يوقف حركة الموائع، وعادة ما يكون هذا الغطاء من صخور السجيل، أو الصخور التبخيرية كالصخور الملحية.

وهناك من ناحية التعريف فرق بين المصيدة والمكمّن، فالمكمّن عادة هو طبقة صخرية واحدة، بينما المصيدة هي عدة طبقات صخرية يشكل المكمّن أحد عناصرها. تصنف المكامن حسب محتواها من الموائع إلى: مكامن نפט، أو مكامن غاز، أو مكامن نפט وغاز، أو مكامن متكثفات. بينما تصنف المصائد إلى: تركيبية، وستراتيغرافية، ومختلطة أو مركبة²⁰.

1-6-1: المصائد التركيبية

تكونت هذه المصائد نتيجة للحركات الأرضية التي أدت لتشكيل التضاريس مثل الزلازل أو عمليات الطي، ومنها:

- أ- مصائد الفوالق
- ب- مصائد القباب الصخرية
- ت- مصائد الطيات المحدبة

2-6-1: المصائد الستراتيغرافية (السحنية)

وتنتج عن تغير في السحنة يؤدي إلى انخفاض أو انعدام نفاذية الصخر، ومنها:

- أ- مصائد العدسات الرملية Sandstone Lenses

ب-مصائد المراوح الترسيبية Fans قرب الشواطئ القديمة

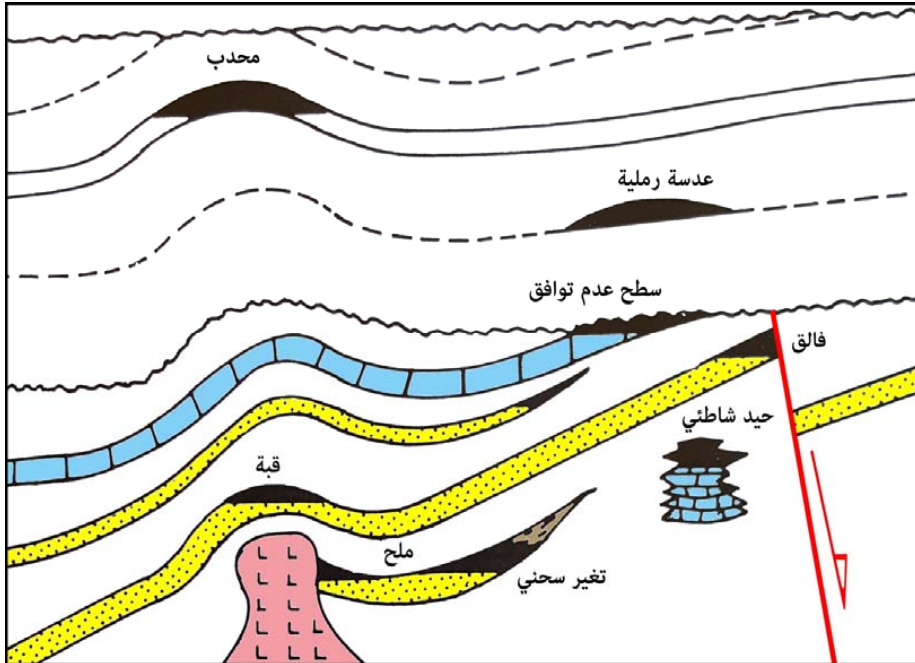
ت-مصائد الحيد الصخري المرجاني Reef

1-6-3: المصائد المركبة

وهي مصائد تتكون من نوعين أو أكثر من الأنواع سابقة الذكر، مثل المحدبات التي تعرضت للحت والتعرية، أو المصائد المترافقة مع القباب الملحية Salt Domes، أو المصائد المرتبطة بسطوح عدم توافق Unconformity.

يبين الشكل 9 بعض أنواع المصائد التركيبية والسحنية والمركبة.

الشكل 9: بعض أنواع المصائد البترولية



معدل عن Cossé، 1993

ويمكن الإشارة هنا إلى أن أكثر من 90% من الحقول العملاقة في العالم هي من نوع المصائد التركيبية المحدبة، وهي وإن كانت تمثل أقل من

1% من إجمالي عدد الحقول المعروفة، إلا أنها تحتوي على أكثر من ثلثي احتياطي العالم من النفط.

1-7: تصنيف مصائد زيت (غاز) السجيل والصخور منخفضة النفاذية

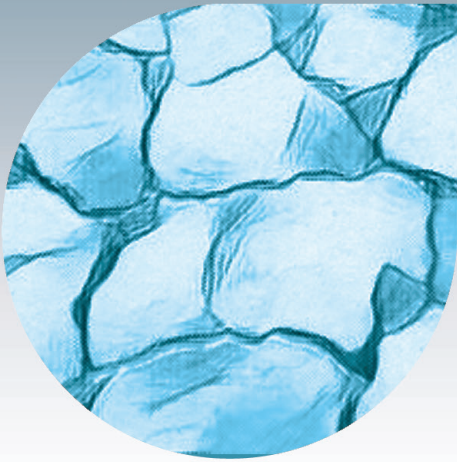
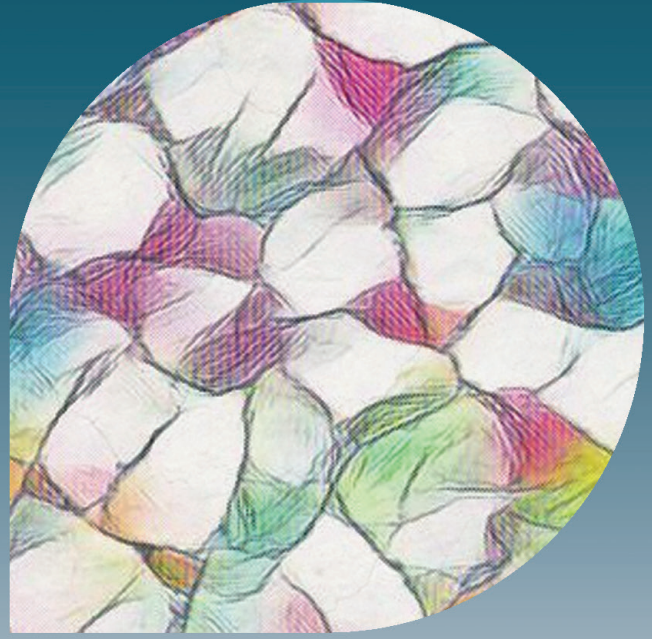
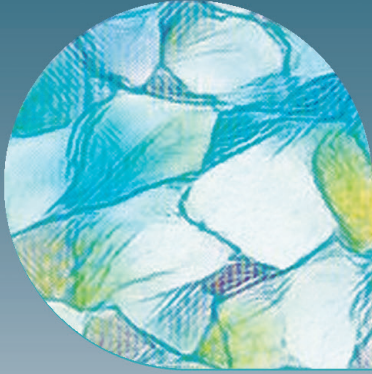
بعد مرور أكثر من مئة عام على اكتشاف النفط والغاز، امتلكت الصناعة البترولية العديد من الأدوات وراكمت كمّاً كبيراً من الخبرة التي مكنتها من تفهم المصادر التقليدية للنفط والغاز والتعامل معها، لكن حالة زيت وغاز السجيل* تختلف بسبب قرب العهد باستثمارها، ويندرج تحت ذلك اختلاف التصنيف عن المصائد العادية، إذ عادة ما يتم التصنيف حسب المنظومات Plays استناداً إلى الحقول التي تم تطويرها وقد يصل الأمر إلى اعتبار كل بئر وحدة متفردة يجب التعامل معها على هذا الأساس²¹.

تعرف المنظومة الفعالة لزيت السجيل حسب طريقة وإجراءات استثمارها خلال سنوات تطويرها، وتتوزع المنظومات الفعالة المعروفة على 137 موقعاً ضمن 84 حوضاً في الأمريكتين، وروسيا وشمال أفريقيا، وخاصة ضمن أحواض الرواسخ Cratons، والألسنة Forelands، وأحواض الصدوع القارية Continental Rifts. ويتبين من متابعة أعمارها الجيولوجية أن منظومات زيت السجيل ضمن أحواض الرواسخ Cratons غالباً ما توجد في صخور حقبة الباليوزويك Paleozoic، أما في أحواض الصدوع القارية فقد تم العثور على منظومات تمتد من حقبة الباليوزويك حتى حقبة السينوزويك Cenozoic وخاصة عصور الكريتاسي، والجوراسي الأدنى، والديفوني الأعلى وحتى في دور الميوسين²².

* تم استخدام تعبير مكامن زيت وغاز السجيل للإشارة إلى مكامن السجيل إضافة لمكامن الصخور منخفضة النفاذية التي شاعت تسميتها باسم مكامن النفط الكتميم رغم أن النفط لا يكون كتيماً.

يتجمع زيت السجيل وزيت الصخور منخفضة النفاذية ضمن أو قرب الصخور المولدة للنفط و/أو الغاز بدون وجود مصيدة فعلية ذات حدود واضحة، لذلك وحسب العلاقة الفراغية بين المكمن وبين الصخر الأم يمكن تصنيف منظومات زيت السجيل وزيت الصخور منخفضة النفاذية إلى ثمانية أنواع²³:

- 1- منظومة فوق الصخور الأم، تشابه حالة المكامن التقليدية وتكون الصخور المولدة تحت المكمن، مثل منظومة Cleveland في حوض Anadarko.
- 2- منظومة أسفل الصخور الأم، وهي حالة لا يد فيها لقوة الطفو إذ يهاجر النفط فيها لمسافة قصيرة نحو الأسفل بسبب فروقات شاذة في الضغط، مثل منظومة Three Forks الدولوميتية منخفضة النفاذية في حوض Williston.
- 3- منظومة قرب الصخور الأم، وفيها تمايز أفقي واضح بين الصخور الأم وصخور المكمن حيث يهاجر النفط جانبياً، ومنها منظومة Granite Wash الحطامية منخفضة النفاذية في حوض Anadarko.
- 4- منظومة بين الصخور الأم، حيث يحيط عدد من هذه الصخور بصخور المكمن، مثل حالة منظومة Bakken في حوض Williston.
- 5- منظومة ضمن الصخور الأم يغلب عليها وجود الصلصال، وهنا يتكون النفط ويتجمع في نفس المكان، وتكون هناك طبقات سجيلية متناوبة عمودياً مع طبقات رقيقة من الرمل أو الكربونات تقل سماكتها عن 1 متر، مثل منظومة Montney في حوض Alberta في كندا.
- 6- منظومة ضمن الصخور الأم مع نسبة أقل من الصلصال، تشابه سابقتها لكن الطبقات المتناوبة ضمن صخور السجيل تكون أكثر سماكة.
- 7- منظومة ذات طبقات متناوبة Interbedded بين الصخور الأم، مثل منظومة Wolfcamp في حوض Permian.



الفصل الثاني

التشقيق الهيدروليكي



الفصل الثاني

التشقيق الهيدروليكي

2-1: لمحة عامة

اعتمدت الخطوات الاستكشافية الأولى للصناعة البترولية على البحث عن التسربات الطبيعية للنفط والغاز نحو السطح، وركزت عمليات التنقيب اللاحقة على البحث عن مكامن يسهل إنتاج النفط والغاز منها، أي تلك المكامن الضحلة ذات النفاذية العالية. وخلال عقود طويلة من عمر الصناعة البترولية، تم اكتشاف عشرات الآلاف من هذا النوع من المكامن التقليدية في مختلف أنحاء العالم. لكن عدداً ليس بالهين من هذه المكامن بات في طور النضوج ومنها ما تم استنزابه Depleted، وهذا ما دفع بالصناعة البترولية إلى البحث عن تقنيات تساهم في إنتاج النفط والغاز من مكامن غير تقليدية تتطلب تقنيات خاصة لاستغلال مصادرها.

ومع توجه عدد كبير من الشركات نحو هذا النوع من المصادر، كان لابد للتقنيات المستخدمة في الإنتاج من أن تواكب هذا التحرك، وربما كانت تقنية التشقيق الهيدروليكي أحد أبرز هذه التقنيات التي حظيت بنصيب وافر من الاهتمام.

التشقيق الهيدروليكي عملياً ليس بالأمر الجديد في الصناعة البترولية، فقد استخدم منذ أربعينات القرن الماضي (الشكل 10) لرفع معدل الإنتاج من الآبار البترولية، ومع التطورات المتتالية، بات التشقيق الهيدروليكي من التقنيات الأساسية المستخدمة في إنتاج النفط والغاز.

الشكل 10: موقع عملية تشقيق هيدروليكي في الولايات المتحدة عام 1949



المصدر: موقع شركة Halliburton

وتشير الجمعية الكندية للمصادر غير التقليدية CSUR إلى أن أكثر من مليون بئر قد تم تحفيزها بالتشقيق الهيدروليكي منذ أربعينات القرن الماضي²⁴.

لعبت التطورات التقنية في مجالات مختلفة كالحفر الأفقي والحفر الموجه دوراً بارزاً في العمليات الهندسية تحت السطحية، وهنا لا بد من الإشارة إلى أن البحث عن سبيل لتوفير الطاقات المتجددة كان له شيء من الفضل في تطوير وتفهم آلية التشقيق الهيدروليكي، فقد شهدت سبعينات القرن المنصرم عدة تجارب قام بها علماء من مختبر Los Alamos National في الولايات المتحدة الأمريكية لاستخلاص طاقة الحرارة الجوفية من باطن الأرض، حيث حفر بئران وصولاً إلى صخور الركيزة في منطقة Fenton Hill في ولاية New Mexico، بلغ عمق الأول 2800 م، وبلغت درجة حرارة الصخور عند ذلك العمق 195° مئوية، بينما حفر الثاني إلى 3500 م، وصولاً إلى صخور درجة حرارتها 235° مئوية. وتم استخدام التشقيق الهيدروليكي للحصول على نطاق متشقق يمكن من خلاله تدوير المياه لاستخلاص حرارة الصخور²⁵، واستمرت التجربة حتى عام 1992.

ساهمت تلك التجربة ومثيلاتها في توسيع آفاق المعرفة حول منظومة الشقوق وآلية التشقيق الهيدروليكي، إذ أن المفهوم السائد عن خلق شقوق جديدة في الصخر، تم استبداله بمفهوم تحفيز الشقوق الموجودة أساساً ضمن بنية الصخر، ويمكن اعتبار التشقيق الهيدروليكي تقنية تتغلب على قوة الكتلة الصخرية، فتنمّي الشقوق والصدوع الموجودة أساساً في الصخر أو قد تخلق شقوقاً جديدة في بعض الحالات²⁶، لكن عدة أبحاث في مطلع ثمانينات القرن الماضي توصلت إلى أن إيجاد أو خلق شقوق جديدة ليس بالأمر السائد كنتيجة لعمليات التشقيق الهيدروليكي²⁷.

2-2: تعريف التشقيق الهيدروليكي

التشقيق الهيدروليكي ضمن مفهوم الصناعة البترولية هو: عملية نقل للطاقة إلى الصخور باستخدام سوائل مختلفة لخلق شقوق جديدة أو توسيع شقوق موجودة أساساً في صخور خازنة للهيدروكربونات.

يهدف التشقيق الهيدروليكي كما يشير التعريف إلى السماح للنفط أو الغاز بالتحرك بحرية وسهولة من التشكيلة أو الطبقة الخازنة باتجاه البئر، وهذا ما يشار له غالباً باسم عملية التحفيز Stimulation.

تعمل الصناعة البترولية منذ بضعة عقود خلت وحتى اليوم على محاولة تطوير تقنيات وطرق فعالة وزهيدة التكلفة لعمليات التحفيز، وقد شملت عمليات التطوير عدة مناحٍ منها سوائل التشقيق، والمعدات السطحية والمعدات الجوفية وبرامج الكمبيوتر التي تعنى بمحاكاة عمليات التشقيق، وغيرها. لكن الصورة العامة لعملية التشقيق الهيدروليكي لم تتغير فعلياً عما كانت عليه قبل عشرات السنين.

3-2: عملية التشقيق

بعد حفر البئر وإكماله وتحديد النطاقات المنتجة ضمن البئر، يتم تثقيب مواسير التغليف مقابل هذه النطاقات (في حالة البئر المغلّف)، ثم يجري عزل النطاق المثقب عن باقي البئر باستخدام باكر Packer، ويتم ضخ سائل

بضغط مرتفع يكفي لتشقيق الصخر. وبطبيعة الحال فإن مقدار الضغط اللازم يختلف حسب نوع الصخور وعمقها وخواصها الميكانيكية، مما يستوجب إجراء عمليات محاكاة تستخدم فيها كل البيانات المتاحة في سبيل تقدير الضغط اللازم للعملية، وهو معيار من المهم تحديده بمنتهى الدقة، إذ أن استخدام ضغط أقل من اللازم يعني أن عملية التشقيق لن تحدث، كما أن استخدام ضغط أعلى من اللازم قد يؤثر على المكنن ككل ويتسبب في تهشم صخوره وقد تكون له نتائج كارثية تصل إلى حد تداعي البئر وفقدانه.

عموماً، تذكر شركة Halliburton الرائدة في عمليات التشقيق الهيدروليكي أن الضغط اللازم لتشقيق الصخر يتراوح بين 0.5- 1 رطل/البوصة المربعة لكل 1 قدم من عمق البئر²⁸، وبتحويل هذه البيانات إلى الجملة المترية (الجدول 3) يلاحظ أن بئراً بعمق 5000 متر، سيحتاج إلى ضغط يتراوح بين 566- 1131 بار، وبالطبع تستلزم هذه الضغوط المرتفعة استخدام معدات قوية جداً وذات موثوقية عالية.

الجدول 3: قيم الضغط اللازمة لعمليات التشقيق الهيدروليكي

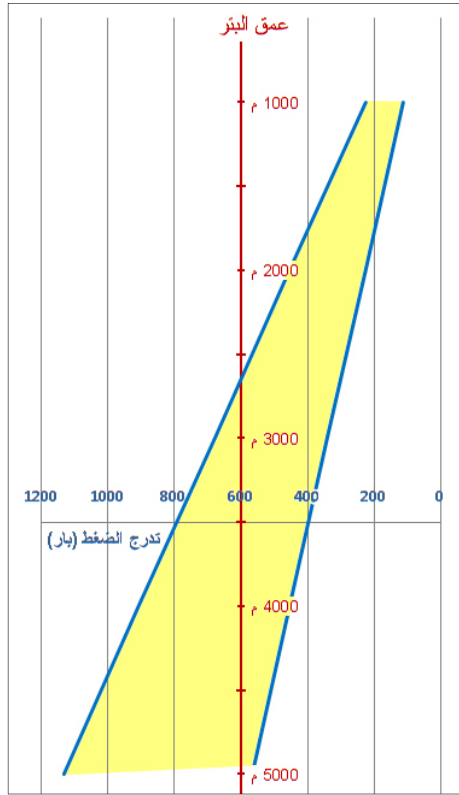
مجال ضغط التشقيق (بار)*		عمق البئر (م)
إلى	من	
226	113	1000
452	226	2000
679	339	3000
905	452	4000
1131	566	5000

إدارة الشؤون الفنية، أوابك، استناداً إلى تقديرات Halliburton

* 1 بار يعادل تقريباً 1 ضغط جوي

يبين الشكل 11 مخططاً عاماً لتدرج الضغط اللازم لعملية التشقيق في آبار سجليل مختلفة الأعماق حسب بيانات Halliburton، لكن هذه الضغوط تختلف من حقل لآخر ومن مكنم لآخر، ومن الطبيعي أن تختلف من بئر لآخر. وتذكر دراسة لشركة أرامكو السعودية²⁹ أن ضغط تشقيق المرحلة الأولى لأحد آبارها الغازية المنتجة من الصخور الكربوناتيية منخفضة النفاذية بلغ نحو 545 بار، لتشكيلة على عمق يقارب 670 متر.

الشكل 11: الضغط اللازم لعمليات التشقيق الهيدروليكي حسب عمق البئر



إدارة الشؤون الفنية، أوابك، استناداً إلى تقديرات Halliburton

بعد توقف عملية ضخ السائل وتشكل الشقوق المطلوبة أو توسع الشقوق الموجودة، يتم حقن مواد تمنع إغلاق الشقوق المتشكلة، وغالباً ما

يستخدم الرمل لهذه الغاية، كما أن الأعم أن يكون الرمل جزءاً من سائل التشقيق نفسه أي أنه يمزج مع الماء ويحقن معه خلال عملية التشقيق بعد إجراء تجربة تقبل Injectability على البئر. عند بدء عملية الإنتاج يسترجع جزء من السوائل التي استخدمت لعملية التشقيق، حيث يتم تجميعها للتخلص منها أو قد تستخدم في عمليات تشقيق أخرى.

2-4: سوائل التشقيق الهيدروليكي

يعتمد اختيار نوع السائل المناسب لعملية التشقيق على خواص المكنن، ومع أن الماء هو السائل الأكثر شيوعاً في عمليات التشقيق، إلا أن بعض أنواع صخور المكامن تحتوي على مواد يمكن وصفها بأنها حساسة للماء، وخاصة الطمي والطين، مما يستوجب استخدام موائع أخرى، فقد تستخدم الغازات مثل ثاني أكسيد الكربون، أو النتروجين، أو البروبان، أو تستخدم سوائل ذات أساس زيتي، وكلها تصمم لتحقيق الغرض نفسه. وعادة ما يتم إجراء اختبارات حقلية تجريبية لمعرفة مدى ملائمة سائل التشقيق للمكنن قبل الشروع في العملية الفعلية.

يشكل الماء السائل الأكثر استخداماً في التشقيق الهيدروليكي لعدة أسباب، من أهمها أنه متوفر بكثرة مقارنة بالمواد الأخرى، كما أن كلفته زهيدة، إضافة إلى أنه آمن لا يحترق أو ينفجر أو يتسبب بالتسمم أو الاختناق. وفي أغلب الأحيان يتم استخدام الماء المتاح من المصادر القريبة من موقع البئر، مثل الأنهار أو البحيرات في حال وجودها، وقد تحفر آبار مخصصة للحصول على الماء، أو يمكن في بعض الحالات استخدام المياه غير الصالحة للشرب أو قد يعاد استخدام المياه التي تم استرجاع جزء منها من عمليات تشقيق سابقة.

2-4-1: المواصفات العامة لسائل التشقيق

من الضروري أن يتمتع السائل المستخدم بالعديد من المواصفات، ومنها المواصفات العامة التالية:

- 1- آمناً للاستعمال لا يسبب الأذى أو التسمم للعاملين الذين يكونون على اتصال مباشر معه.
- 2- غير ضار بالبيئة في حال حدوث تسرب أو تهريب خلال العملية.
- 3- قابلاً للتكسر في الظروف المكمية بحيث تسمح لزوجته لاحقاً بخروج السائل من الشقوق.
- 4- لا يؤدي إلى الإضرار بالناقلية الأولية للصخور الأساسية أو بنفاديتها.
- 5- سهل التحضير والمزج والتخزين.
- 6- رخيص الثمن.

يستند اختيار السائل المطلوب لعملية تشقيق معينة إلى العديد من الخيارات مثل كمية السائل المطلوبة، ثم لزوجة هذا السائل، إذ تلعب اللزوجة دوراً هاماً خلال عملية التشقيق من خلال مساهمتها في إيجاد شقوق ذات سعة كافية لدخول المواد الداعمة* في الشقوق وحملها إلى نهاية الشق المتشكل، ويجب أن تكون اللزوجة كافية لحمل الرمل، وقادرة على المساهمة في التحكم بكمية الماء الذي سيفقد من سائل التشقيق ضمن الصخور.

لذلك تعتبر اللزوجة من ضمن أهم العناصر في مواصفات سائل التشقيق عند وضع تصميم عملية التشقيق، إذ أنها لن تؤدي الغرض المطلوب منها إذا كانت أقل من اللازم، أما إذا ارتفعت عن المطلوب فسوف ترتفع تكلفة العملية إجمالاً ويرتفع ضغط الحقن مما قد يسبب مشاكل تقنية سواء للمعدات السطحية أو الجوفية، وتنخفض ناقلية الصخور حيث تستخدم العديد

* تستخدم الصناعة البترولية كلمة Proppant (العنصر الداعم/المواد الداعمة أو اختصاراً: الداعم) للإشارة إلى الرمل أو حبيبات السيراميك المستخدمة في التشقيق الهيدروليكي.

من المواد لرفع اللزوجة، وهذه المواد قد تبقى في الشقوق بعد تكسر سائل التشقيق.

2-4-2: مكونات سائل التشقيق الهيدروليكي

تختلف مكونات سائل التشقيق الهيدروليكي من مكنم لأخر، ويجري تحديدها إما اعتماداً على التجارب المخبرية، أو اعتماداً على برامج المحاكاة Simulations، وكثيراً ما يتم إلقاء اللوم على سائل التشقيق عند فشل عملية تشقيق ما، وهذا ليس بالمستغرب بسبب تعدد العوامل التي تؤثر على التركيب والنسب المثالية للمواد التي تتم إضافتها إلى السائل. كما أنه ليس من المستغرب أن العديد من المكونات المستخدمة في التشقيق الهيدروليكي تعرف باسمها التجاري فقط حيث تعتبر الشركات المصنعة أن التركيب الكيميائي لهذه المواد سر تجاري يدخل ضمن الأسرار التي تسعى للحفاظ عليها في سوق المنافسة، كما أن معظم هذه المواد لها استخدامات صناعية أخرى بعيدة كل البعد عن الصناعة البترولية، كما سيشار له في مكانه.

رغم ذلك فإن العديد من المراكز العلمية تمكنت من سبر غور معظم المكونات المستخدمة، وفيما يلي عرض³⁰ لأكثر هذه المكونات شيوعاً:

1-2-4-2: الماء

يعتبر الماء المكون الأساسي ضمن سائل التشقيق الهيدروليكي، وتختبر نوعيته وجودته بمنتهى الدقة، وعادة ما تتم فلترة الماء حتى 50 ميكرون (μ) لمعالجة الشقوق المدعمة Propped، وقد تتم فلترة الماء في بعض الحالات إلى 2 ميكرون.

ورغم أن الماء العذب هو الذي يستخدم عادة، إلا أن ماء البحر قد يجري استخدامه مع عنصر تخثير* Gelling Agent للتحكم باللزوجة،

* استخدمت كلمة التخثير بمعنى التحويل إلى هلام.

لكن السيئة المباشرة لاستخدام ماء البحر هي احتواؤه على نسبة من الكبريتات التي يمكن أن تتفاعل مع المياه المترابطة في الصخر لتشكل معها قشوراً Scales تساهم في خفض نفاذية المكمن بدل زيادتها. وعند العمل على إعادة استخدام الماء المسترجع بعد عملية التشقيق إثر وضع المكمن أو البئر على الإنتاج، لا بد من معالجته للتخلص من المواد الكيميائية المستخدمة. لهذه الأسباب وغيرها يفضل العاملون في الصناعة البترولية عدم استخدام ماء البحر في عمليات التشقيق إلا عند عدم وجود مصدر آخر متاح.

يذكر هنا أن شركة أرامكو السعودية تعمل على تطوير تقنية تستفيد من مياه البحر في عمليات التشقيق الهيدروليكي، وقد بينت التجارب المخبرية والتجارب الحقلية المحدودة التي قامت بها حتى مطلع عام 2017 إمكانية الحصول على سائل تشقيق مستقر عند درجات الحرارة العالية والضغط المرتفعة، إضافة إلى التوافق مع كل من موائع التشكيلة والمواد الأخرى المضافة لمياه البحر، كما أمكنها الوصول إلى مرونة معقولة للحد من تشكل القشور³¹.

2-2-4-2: مواد التحكم بالطين

يستخدم كلوريد البوتاسيوم KCL كمنبثب يضاف إلى الماء لمنعه من التأثير على المواصفات الفلزية الدقيقة لصخور المكمن، ويتراوح تركيز كلوريد البوتاسيوم في سائل التشقيق بين 2%-8% حسبما تقتضيه الحاجة وبما يناسب نوعية المكمن المراد تشقيقه، حيث يتم تحديد النسبة المثالية للتركيز عبر التجارب المخبرية.

كما تستخدم منبثبات عضوية أحياناً بدل كلوريد البوتاسيوم لتؤدي نفس الغرض، إلا أن كلوريد البوتاسيوم يعطي نتائج أفضل منها، كما أنه أفضل من باقي الأملاح التي قد تستخدم لنفس الغاية مثل كلوريد الصوديوم NaCl أو

كلوريد الكالسيوم $CaCl_2$. يستخدم كلوريد البوتاسيوم أيضاً في صناعة الأسمدة ومعالجة المواد الغذائية.

3-2-4-2: مواد خافضة للاحتكاك

وهي مواد تضاف إلى الماء لتشكيل ما يسمى بالماء الزلق Slikwater، والهدف منها هو تخفيض الاحتكاك الذي ينشأ عند حقن الماء في البئر. تضاف هذه المواد بحيث يتراوح تركيزها في الماء بين 0.025% وحتى 0.02%، ومن أكثرها استخداماً:

- **بولي أكريليك أسيد***: وهو مادة صناعية غير سامة، مرتفعة الوزن الجزيئي، تباع على شكل مسحوق أبيض، أو تمزج بنسبة 50% مع زيت معدني، مما يجعلها سهلة التداول. ولكن هذه المادة تتأثر بشكل كبير بالأيونات الموجبة ثنائية التكافؤ $Divalent\ Cationic\ Ions$ ، مما يجعلها تتفكك بسهولة في وجود الكالسيوم Ca أو المغنيزيوم Mg أو الحديد Fe ، وتفكك في حال استخدامها في الماء العسر $Hard\ Water$. تستخدم هذه المادة أيضاً كمادة لاصقة ومألئة في الصناعات الدوائية ومواد التجميل والأصبغة.
- **بولي أكريل أميد†**: وهي مادة غير سامة بدورها، لكن تصنيعها بشكل غير صحيح يترك بعض الجزيئات غير المتبلرة مما يجعلها مادة سامة للأعصاب. يعتبر مركب بولي أكريل أميد أقل انحلالية في الماء من بولي أكريليك أسيد، لكنه أقل تأثيراً بالأيونات الموجبة ثنائية التكافؤ، والشكل التجاري منه يكون على هيئة محلول معلق في زيت معدني بتركيز 50%. يستخدم البولي أكريل أميد أيضاً كمادة مرسبة في

* Polyacrylic acid

† Ployacrylamid



محطات معالجة المياه، ويستخدم في صناعة الورق وصناعة العدسات الطبية للعيون.

- **بولي أكريل أميد المماه جزئياً***: وهو أكثر المواد المستخدمة شيوعاً لتخفيض الاحتكاك، ويتمتع بقابلية عالية للذوبان في الماء، ويسوق على شكل محلول معلق في زيت معدني بتركيز 50%. ويستخدم أيضاً في صناعة الورق ومحطات معالجة المياه، وهو أرخص المواد المستعملة في تخفيض الاحتكاك.

- **أكريل أميد سلفونات البروبان والميثيل†**: يتميز هذا المركب بأنه أقل قابلية للترسب عند وجود الأملاح المعدنية موجبة الشحنة، كما يتمتع بثباتية عالية ضمن مجال واسع من تغير درجة الحموضة pH، ويفيد جذر السلفونات SO_3^- الموجود في المركب في منع تشكل القشور. يسوق المركب أيضاً على هيئة محلول معلق في زيت معدني بتركيز 50%، ومن استخداماته الأخرى تصنيع الجل الخاص بأجهزة تخطيط القلب، ويستخدم كمادة تمنح مرونة للإسمنت، كما يستخدم كمادة مرسبة Coagulants في محطات معالجة المياه.

4-2-4-2: المواد المخثرة Gelling Agents

وهي مواد تضاف إلى سائل التشقيق فتشكل معه هلاماً لرفع لزوجته، مما يساهم في توسيع الشقوق المتشكلة ويسمح لها باستيعاب كمية أكبر من المواد الداعمة، وتعمل هذه المواد على الحد من فقدان السوائل مما يرفع بالتالي من فعالية العملية، كما أنها تحسن قدرة المواد الداعمة على الحركة وتساهم في تخفيض الاحتكاك. ومن بعض المواد المستخدمة في هذا المجال:

* Partially Hydrolyzed polyacrylamid

† Acrylamidomethylpropane sulfonate

- الغوار* : وهي مادة طبيعية تشبه الصمغ تستخلص من نبتة الغوار (من الفصيلة البقولية)، حيث تطحن البذور لتشكل مسحوق الغوار، الذي يضاف بنسب معينة إلى سائل التشقيق للحد من فقدان السائل.
- هيدروكسيل إيثيل سيليلوز† : وهي مادة طبيعية تستخلص من السيليلوز الموجود في النباتات وتذوب في الماء كلياً.
- منشط التوتر السطحي للدونة اللزجة‡ : وهي سوائل خالية من البوليميرات تولّد اللزوجة عبر تكوين جزئيات سطحية، ومن أهم ميزاتها أنها لا تؤثر على ناقلية الشقوق.
- الرغوة§ : يتم تشكيلها من مواد لا تمتزج بالماء، مثل النتروجين، أو ثاني أكسيد الكربون، أو مواد هيدروكربونية كغاز البروبان والديزل والمتكثفات. وتمتلك الرغوة المتشكلة قدرة كبيرة على الحد من فقدان السائل، وتساهم بشكل جيد في نقل المواد الداعمة، كما أنها تتكسر بسهولة دون الحاجة لعمليات معقدة. يتم التحكم بلزوجة الرغوة عبر تغيير نسبة المواد المضافة إلى الماء في المزيج، فعلى سبيل المثال قد تصل نسبة النتروجين أو غاز ثاني أكسيد الكربون إلى 65-80%، وقد تضاف بنسب أقل لتشكيل ما يدعى باسم "الموائع النشطة"، وتستخدم لتخفيض كمية المياه المحقونة في الطبقة، كما أن استرجاعها بعد عملية التشقيق يكون أسهل. ويمكن الإشارة إلى أن غاز ثاني أكسيد الكربون يمكن أن ينحل في النفط، مما يساهم في تخفيض لزوجته. لكن هذه المواد عموماً تتميز بخطورة نسبية إذ يتحتم التعامل مع الغاز المضغوط، أو مع موائع قابلة للاشتعال.

* Guar

† HydroxyEthyl Cellulose

‡ ViscoElastic Surfactant

§ Foam



- السوائل ذات الأساس النفطي*: وعادة ما تستخدم في الطبقات التي يمكن أن تتضرر بوجود الماء، وفي أول بئر استخدم فيه هذا النوع من السوائل، شكّل الغازولين السائل الأساسي، بينما كان زيت النخيل هو المادة المختّرة، واستخدمت أحماض نفثينية Naphthenic Acid كمادة تشابك† واستخدام Crosslinker، بينما تستخدم حالياً مواد ذات أساس معدني كمادة تشابك³²، مثل الألمنيوم Al، والزركونيوم Zr، واليورون B، والتيتانيوم Ti، وتستخدم كذلك أستيرات الألمنيوم والفوسفات Aluminum phosphate-esters. إلا أن استخدام النفوط له محاذيره، إذ قد تكون عملية التختّر أشدّ مما هو مرغوب به عند استخدام نפט خام مرتفع اللزوجة، أما استخدام المشتقات النفطية مثل الديزل لنفس الغرض، فقد تقف الكلفة المرتفعة عائقاً أمامه، خاصة وأن هذه المشتقات يجب أن تستخدم قبل إضافة أي مواد محسّنة لها في المصافي، ناهيك عن مخاطرها على الصحة والسلامة.

5-2-4-2: مواد التشابك Crosslinkers

تستخدم لزيادة الوزن الجزيئي لبوليمير ما عبر إنشاء رابطة تساهمية ضمنه في بنية ثلاثية الأبعاد، وهذا يرفع من لزوجة السائل، كما يرفع من قدرته على نقل المواد الداعمة. ومن بين هذه المواد حمض البوريك Boric Acid، وهو الأكثر شيوعاً في عمليات التشقيق الهيدروليكي، لكنه غير مفيد في المكامن التي تزيد درجة حرارتها عن 121° مئوية، كما أن درجة الحموضة للوسط الذي يستخدم فيه يجب أن لا تزيد عن 8 (pH ≥ 8)، لذلك تستخدم مواد تشابك من التيتانيوم والزركونيوم تتحمل درجات حرارة تصل إلى 177° مئوية، كما تكون ثابتة في أوساط تتراوح درجة حموضتها بين 3.5-10.8.

* Oil Based Fluids

† التشابك هو إنشاء روابط تساهمية تشاركية بين نوعين من البوليميرات أو ضمن البوليمير نفسه.

6-2-4-2: المُكسّرات Breakers

وتستخدم بنسب معينة لتسهيل تخفيض اللزوجة والسماح باسترجاع السائل المحقون في الطبقة بعد انتهاء عملية التشقيق. وتستخدم العديد من المواد لهذه الغاية كالمواد المؤكسدة مثل بيروسلفات الأمونيوم وبيروكسيد الكالسيوم والمغنزيوم، وتستخدم الأحماض لنفس الغاية مثل حمض هيدروكلوريك (حمض كلور الماء) HCl، كما تستخدم بعض أنواع الإنزيمات لكن استخدامها محدود عند درجات حرارة أقل من 65° مئوية. يمكن إضافة المكسّرات مع سائل التشقيق أو قد تحقن لاحقاً بعد انتهاء العملية.

7-2-4-2: مثبتات اللزوجة Viscosity Stabilizer

من المواد الأخرى المستخدمة في سوائل التشقيق الهيدروليكي، مواد مثبّئة للزوجة مثل الميثانول Methanol بتركيز 5-10% من حجم السائل، وثيوسلفات الصوديوم Sodium Thiosulfate. وتعمل على كسح الجذور الحرة كالأكسجين من سائل التشقيق والتي قد تسبب تفكك البوليميرات المستخدمة.

8-2-4-2: الصادّات Buffers

ومهمتها ضبط درجة الحموضة في السائل الأساسي بحيث يمكن التحكم بباقي العناصر المستخدمة. وكون العديد من الصادّات تذوب ببطء، فمن الوارد استخدامها لتأخير عملية التشابك لفترة معينة تسمح بتقليل الاحتكاك ضمن الأنابيب خلال عملية الحقن، ومن المواد المستخدمة كصادّات: بيكربونات الصوديوم، كربونات الصوديوم، هيدروكسيد الصوديوم، حمض الفورميك، أكسيد المغنزيوم، وغيرها.

9-2-4-2: منشطات التوتر السطحي Surfactants

وهي مواد تضاف لتخفيض التوتر السطحي للسائل مما يسهل عملية استرجاعه، والهدف الرئيسي منها هو جعل سطح الصخر مبللاً بالماء Water Wet مما يتيح مجالاً أكبر لحركة المواد الهيدروكربونية.



ومن هذه المواد إيثيلين غليكول مونوببوتيل إيثر*، وببوتيلين غليكول مونوببوتيل إيثر†.

10-2-4-2: المبيدات والمعقمات Biocides/ Bactericides

يتم إضافة المبيدات والمعقمات (مبيدات البكتيريا) للحد من الهجمات الأنزيمية وهجمات البكتيريا الهوائية على البوليمرات المستخدمة لتخثير سائل التشقيق، إذ أن عدم السيطرة على نمو الكائنات الدقيقة سوف يؤدي إلى تحلل البوليمر بسرعة تمنعه من إتمام عمله. ومن الأسباب الأخرى لاستخدام المبيدات والمعقمات منع دخول البكتيريا اللاهوائية إلى المكنن، لأنها يمكن أن تساهم في إنتاج غاز كبريتيد الهيدروجين وترفع بالتالي من درجة الحموضة في البئر والمكنن على حد سواء. كما يمكن لهذه الكائنات في وجود الماء أن تشكل طبقة تعيق جريان الهيدروكربونات أو توقفه أحياناً. ومن بين هذه المواد المستخدمة: الأمينات الرباعية Quaternary Amines، والأميدات Amides، والألدهيدات Aldehydes، وثاني أكسيد الكلور ClO_2 ، وطيف آخر واسع من المبيدات الحيوية الفعالة المستخدمة في الصناعة. ويمكن استخدام الأشعة فوق البنفسجية UV كمطهر لقتل البكتيريا وتثبيط نشاط الأنزيمات التي تفرزها البكتيريا. ويرتبط الاختيار المناسب للمبيدات أو المعقمات بنوع البكتيريا التي يمكنها أن تتحوّل لتقاوم مبيداً ما³³.

11-2-4-2: الأحماض Acids

وغالباً ما تستخدم في التشكيلات الكربوناتيّة لإذابة الصخر وتشكيل أفنية ضمنه، كما تستخدم الأحماض لتنظيف ثقوب مواسير التغليف والمنطقة المجاورة لها من الإسمنت قبل البدء بعملية التشقيق. وتستعمل كما ذكر سابقاً

* Ethylene glycol monobutyl ether

† Butylene glycol monobutyl ether

ضمن المكسّرات أيضاً. وبطبيعة الحال تخفف الأحماض بالماء بحيث تصل إلى تركيز معيّن حسبما يقتضيه الحال في كل عملية.

12-2-4-2: موانع التآكل Acid Corrosion Inhibitors

نظراً لاستخدام الأحماض في مزيج السائل المستخدم للتشقيق، فهي قد تؤثر على مواسير الإنتاج والتغليف والمعدات الجوفية الأخرى، كما تؤثر حتى على الخزانات السطحية المستخدمة في عملية التشقيق، لذلك من الضروري استخدام موانع التآكل للحد من التأثير الأگال Corrosive للحموض. وغالباً ما تعرف هذه المواد باسمها التجاري، لكن معظمها يتكون بشكل رئيسي من³⁴:

- الكحول الإيزوبروبيلي، إيزوبروبانول*، C_2H_7OH ، وهو يعمل كمادة مرطبة للأنايبب والمعدات.
- الكحول الميثيلي، ميثانول†، CH_3OH ، وهو أيضاً يعمل كمادة مرطبة للمعدات حيث يشكل غلافاً يحد من تأثير الأحماض عليها.
- حمض الفورميك المعروف باسم حمض النمل‡، $HCOOH$.
- أسيت ألدهيد§، CH_3CHO .

يبين الجدول 4 بعض المواد الكيميائية المستخدمة كإضافات إلى سوائل التشقيق الهيدروليكي، لكن هذا لا يعني أنها المواد الوحيدة المستخدمة، إذ تقدم الصناعة بشكل مستمر مركبات مختلفة بأسماء تجارية جديدة.

* Isopropanol

† Methanol

‡ Formic Acid

§ Acetaldehyde

الجدول 4: المواد الكيميائية الأكثر شيوعاً في سوائل التشقيق الهيدروليكي

المادة الكيميائية	عمل المادة	الهدف من استخدامها
2-Butoxyethanol	منشط توتر سطحي	مثبت
Acetaldehyde	مانع تآكل	حماية المواسير
Acetic Acid	التحكم بالحديد	منع ترسب الأكاسيد المعدنية
Ammonium bisulfite	ضبط درجة الحموضة	ضبط درجة الحموضة للحفاظ على فعالية بقية المكونات
Ammonium Persulfate	مانع تآكل	نزع الأكسجين من الماء لمنع الأكسدة والتآكل
Borate Salts	عنصر تكسير	تأخير تكسر الهلام
Boric Acid	مادة تشابك	الحفاظ على اللزوجة في الحرارة العالية
Calcium Chloride	مادة تشابك	الحفاظ على اللزوجة في الحرارة العالية
Citric Acid	عنصر تكسير	مثبت
Copolymer of Acrylamide and Sodium Acrylate	مثبت للطين	منع إماهة الطين وانتفاخه وحركته
Ethanol	التحكم بالحديد	منع ترسب الأكاسيد المعدنية
Ethylene Glycol	مانع ترسب	منع تشكل قشور في الأنابيب
Formic Acid	منشط توتر سطحي	مثبت ومرطب
Glutaraldehyde	مادة تشابك	مثبت ومرطب
Guar Gum	مخفض احتكاك	مثبت ومرطب
Hydrochloric Acid	مادة مخترة	مثبت ومرطب
Hydrotreated Light Petroleum Distillate	مانع الرغوة	مثبت ومرطب
Isopropanol	مانع تآكل	حماية المواسير
Lauryl Sulfate	مبيد	الحد من نمو البكتيريا في الماء
Magnesium Oxide	مادة مخترة	تثبيت الرمل
Magnesium Peroxide	حمض	إذابة العناصر وتشكيل شقوق في الصخر وتنظيف المواسير
	مادة تشابك	حامل للسائل لحمض البوريك أو للزيرون
	مخفض احتكاك	حامل لمادة Polyacrylamide لتخفيض الاحتكاك
	مادة مخترة	سائل حامل للمادة المخترة
	مانع تآكل	مثبت وعنصر ترطيب
	مانع الرغوة	مثبت ومرطب
	منشط توتر سطحي	مثبت ومرطب
	مانع الرغوة	منع تشكل الرغوة في سائل التشقيق
	منشط توتر سطحي	زيادة لزوجة سائل التشقيق
	عنصر تكسير	تأخير تكسر الهلام
	عنصر تكسير	تأخير تكسر الهلام

التشقيق الهيدروليكي وأثاره البيئية المحتملة

المادة الكيميائية	عمل المادة	الهدف من استخدامها
Methanol	مانع تآكل	مثبت وعنصر ترطيب
	مادة تشابك	مثبت ومرطب
	مخفض احتكاك	مثبت ومرطب
	مادة مخثرة	مثبت ومرطب
	منشط توتر سطحي	مثبت ومرطب
Naphthalene	منشط توتر سطحي	حامل لمواد تنشيط التوتر السطحي
Petroleum Distillate	مادة تشابك	حامل للسائل لحمض البوريك أو للزيركون
	مخفض احتكاك	حامل لمادة Polyacrylamide لتخفيض الاحتكاك
	مادة مخثرة	سائل حامل للمادة المخثرة
Phosphonic Acid Salt	مانع ترسب	منع تشكل قشور في الأنابيب
Polyacrylamide	مخفض احتكاك	ترليق الماء لتخفيض الاحتكاك
Polysaccharide Blend	مادة مخثرة	تثبيت الرمل
Potassium Carbonate	ضبط درجة الحموضة	ضبط درجة الحموضة للحفاظ على فعالية بقية المكونات
Potassium Hydroxide	ضبط درجة الحموضة	ضبط درجة الحموضة للحفاظ على فعالية بقية المكونات
Potassium Metaborate	مادة تشابك	الحفاظ على اللزوجة في الحرارة العالية
Quaternary Ammonium Chloride	مييد	الحد من نمو البكتريا في الماء
Sodium Carbonate	ضبط درجة الحموضة	ضبط درجة الحموضة للحفاظ على فعالية بقية المكونات
Sodium Chloride	عنصر تكسير	مثبت
Sodium Chloride	مثبت	منع إماهة الطين وانتفاخه وحركته
Sodium Erythorbate	التحكم بالحديد	منع ترسب الأكاسيد المعدنية
Sodium Hydroxide	ضبط درجة الحموضة	ضبط درجة الحموضة للحفاظ على فعالية بقية المكونات
Sodium Polycarboxylate	مانع ترسب	منع تشكل قشور في الأنابيب
Sodium Tetraborate	مادة تشابك	الحفاظ على اللزوجة في الحرارة العالية
Tetrakis Hydroxymethyl-Phosphonium Sulfate	مييد	الحد من نمو البكتريا في الماء
Tetramethyl Ammonium Chloride	مثبت	منع إماهة الطين وانتفاخه وحركته
Thioglycolic Acid	التحكم بالحديد	منع ترسب الأكاسيد المعدنية
Triethanolamine Zirconate	مادة تشابك	الحفاظ على اللزوجة في الحرارة العالية
Zirconium Complex	مادة تشابك	الحفاظ على اللزوجة في الحرارة العالية

المصدر: منظمة FracFocus*

* هي منظمة أمريكية غير حكومية تدار من قبل اللجنة المصغرة للنفط والغاز، ومجلس حماية المياه الجوفية في الولايات المتحدة الأمريكية. وقد أنشأت موقعا الكترونيا يهدف إلى توعية العامة حول المواد الكيميائية المستخدمة في عمليات التشقيق الهيدروليكي

<https://fracfocus.org>

يضاف إلى ما ذكر أعلاه المواد الداعمة التي تتكون من السيليكا أو الكوارتز (الرمال) لمنع انغلاق الشقوق وهي مواد تستخدم بكميات كبيرة عادة، فعلى سبيل المثال قامت شركة Schlumberger بعملية تشقيق من تسع مراحل على أحد الآبار في مدينة Poltava في أوكرانيا، استخدمت فيها 1200 طن من المواد الداعمة³⁵ مع 35 ألف برميل من سائل التشقيق، وذلك ضمن جذع جانبي لم يتجاوز طوله 1000 م.

تختلف أقطار حبيبات المواد الداعمة حسب الحاجة، وعادة ما تبلغ نحو 0.5 ملم، ويشيع عموماً استخدام مواد داعمة بقطر يتراوح بين 53-59 ميكرون بينما استخدمت شركة Halliburton في بعض الحالات مواداً داعمة بقطر 149 ميكرون، وتعمل منذ عام 2015 على الترويج لمواد داعمة بقطر أقل من ذلك بكثير يصل إلى 25 ميكرون (0.025 ملم)³⁶.

يلاحظ مما سبق أن هناك عدداً كبيراً من المواد الكيميائية التي تساهم في تشكيل سائل التشقيق بنسب مختلفة إذ يحتوي **الجدول 4** السابق على أسماء 59 مادة، لكن العدد الفعلي أكبر من ذلك بكثير، إذ أكدت دراسة نشرتها مجلة "سياسة الطاقة" في عام 2016 أن عدد المواد الكيميائية المستخدمة في التشقيق الهيدروليكي³⁷ يزيد عن 1347 مادة، كما يقدر أن 11-16% من المواد الكيميائية المستخدمة يشار لها بالاسم التجاري فقط عندما تضطر الشركات بقوة القانون إلى الإفصاح عما تستخدمه في عمليات التشقيق.

عموماً تميل شركات الخدمة المختصة بعمليات التشقيق الهيدروليكي إلى تطوير عدد مختلف من السوائل للوصول إلى أقصى فعالية ممكنة، متوسّمة في ذلك أن يتمتع السائل بالخصائص العامة التالية:

1- أن تكون له لزوجة كافية لإيجاد شقوق بعمق مناسب ضمن المكمن أو التشكيلة.

2- أن تكون له قدرة كافية على السير لأبعد مسافة ضمن الصخر للحصول على أطول شقوق ممكنة.

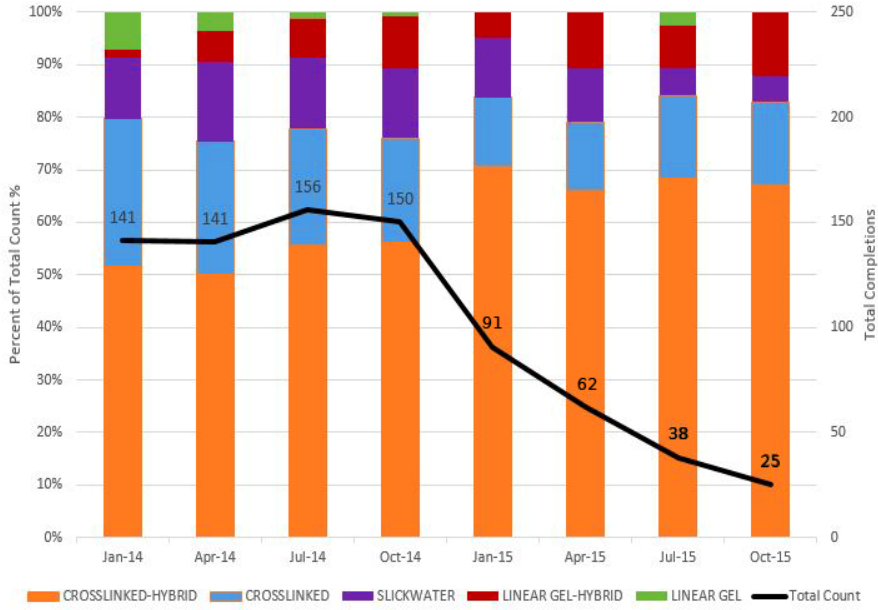
3- أن يكون قادراً على حمل كمية كافية من المواد الداعمة ونقلها لداخل الشقوق.

4- أن لا يحتاج لكمية كبيرة من المواد المخثرة وذلك لتسهيل عملية تفكك السائل لاحقاً واسترجاعه من المكمن أو التشكيلة بعد انتهاء عملية التشقيق.

يمكن من خلال التمعّن في هذه الخصائص ملاحظة أن تركيب سائل التشقيق ليس بالأمر السهل، إذ يجب أن يصمم بخواص محددة بدقة ليناسب كل بئر بل وكل تشكيلة منتجة على حدة، وبالتالي فإن كل سائل تشقيق لمشروع ما سيكون مختلفاً عن السوائل الأخرى، وسوف تكون له إيجابياته وسلبياته التي يصعب أن تتشابه مع باقي السوائل.

لا تحتوي سوائل التشقيق الهيدروليكي بالضرورة على كل المواد التي ذكرت فيما سبق، وغالباً ما يتم تسمية نوع السائل المستخدم حسب المواد الغالبة على تركيبه، فعلى سبيل المثال يطلق اسم السائل الهجين المتشابك Crosslinked-Hybrid على السائل الذي يحتوي على مواد التشابك مع الهلام، وهو أكثر أنواع السوائل استخداماً. ويليه السائل المتشابك Crosslinked، ثم سائل الماء الزلق Slikwater، وهكذا. يبين الشكل 12 مثلاً عن الأنواع المستخدمة من سوائل التشقيق³⁸ في ولاية North Dakota في الولايات المتحدة الأمريكية، ويلاحظ منه إضافة إلى أنواع السوائل المستخدمة أن عدد عمليات الإكمال الشهرية تراجع بشكل ملحوظ بين عامي 2014 و2015.

الشكل 12: سوائل التشقيق المستخدمة في ولاية شمال داكوتا الأمريكية



المصدر: Scott Rothbarth، 2016

2-5: أنواع أخرى من سوائل التشقيق

رغم البساطة النسبية للفكرة العامة لسوائل التشقيق، إلا أن هناك أنواعاً كثيرة منها، ولعل مرّد ذلك هو:

- تنوع المكامن سواء من ناحية التركيب الليثولوجي أو التركيب الفلزي.
- اختلاف المواعن الموجودة أساساً في المكامن.
- الهدف النهائي من عملية التشقيق حسب التصميم الخاص بكل مكامن.
- إمكانيات المضخات المستخدمة أو المتاحة في الموقع.

2-5-1: السوائل المركبة

تعتبر السوائل المركبة Composite Fluids نموذجاً عن السوائل التي تدخل في تكوينها مواد ذات اسم تجاري غير معروف التركيب، ومن بين

الشركات التي تقدم هذا النوع من السوائل شركة Schlumberger على سبيل المثال، والتي تعرّف منتجها بأنه: مزيج من ألياف معينة، وإضافات أخرى مع مواد داعمة، تدخل جميعها ضمن سائل جاهز يحمل الاسم التجاري: BroadBand³⁹. وتذكر أن هذا النوع من السوائل يستخدم في عمليات إكمال التشقيق وإعادة التشقيق ويمكن استخدامه في مكامن السجيل أو الصخور الكربونائية أو المكامن منخفضة النفاذية، وهو فعال ضمن درجات حرارة تتراوح بين 43°- 149° مئوية. ومن فوائده:

- 1- رفع معدل الإنتاج على المدى القصير والبعيد، ورفع معامل الاستخلاص بأكثر من 20% مقارنة بسوائل التشقيق العادية.
- 2- تخفيض كميات المياه والمواد الداعمة اللازمة لكل مرحلة تشقيق بنحو 25%.
- 3- رفع معدل إنتاج النفط والغاز.

يلاحظ أن هذه الفوائد بغض النظر عن النسب والأرقام، لا بد أن تتوفر في أي سائل تشقيق مستخدم، ومن المؤكد أن Schlumberger ستدرس كل البيانات المتاحة لأي بئر قبل أن تحضر السائل المناسب وتقدمه للشركة المهتمة بمنتجاتها، حالها في ذلك كحال أي مصنع لسوائل التشقيق المركبة.

2-5-2: سوائل التشقيق غير التقليدية

تستخدم سوائل التشقيق غير التقليدية Unconventional Fracturing Fluids عادة في مكامن الغاز منخفضة النفاذية (ما يعرف بالغاز الكثيم Tight Gas) وفي تشقيق آبار غاز طبقات الفحم Coal Beds، كما تستخدم في المكامن التي تحتوي على قوى ترابط شعري مرتفعة وخاصة في مكامن الغاز التي يكون الضغط فيها أعلى من ضغط الإشباع* Undersaturated Reservoir حيث يكون التشبع الأولي بالماء أقل من المتوقع.

* Bubble Point Pressure.

ومن هذه السوائل، يمكن الإشارة إلى:

2-5-2-1: مستحلب ذو أساس من الماء والميثانول وغاز CO₂

تتميز بعض التشكيلات الصخرية بقدرتها على الاحتفاظ بالماء حتى لو كانت نسبته في سائل التشقيق منخفضة مثل السوائل الرغوية التي يدخل في تكوينها غاز ثاني أكسيد الكربون. لذلك يتم الاستعاضة عن 40% من الماء الداخل في تركيب هذه السوائل بما يقابلها من الميثانول، ويشكل الهلام 25% من مكوناتها. يتميز هذا النوع بانخفاض نسبة المخلفات الناتجة عن استخدامه في المكمن، مما يجعل عملية تنظيف البئر سهلة وسريعة. كما يمكن استخدامه في المناطق الباردة حيث أن وجود الميثانول يخفض درجة التجمد للمستحلب إلى حدود (-40°) مئوية، وهي عملياً أقل درجة حرارة يمكن للمعدات أن تعمل ضمنها⁴⁰.

2-5-2-2: أنظمة الميثانول المختر

وهي كما يشير الاسم تستند إلى تخثير الميثانول بعناصر معينة، وتستخدم في المكمن التي يمكن أن تتأثر سلباً بوجود المياه. تتميز هذه الأنظمة بانخفاض التوتر السطحي مما يسهل استرجاعها من المكمن، كما أنها تحتفظ بفاعليتها ضمن طيف واسع من درجات الحرارة. ومن مساوئها أنها قابلة للاشتعال بسبب وجود الميثانول⁴¹.

2-5-2-3: سوائل ذات أساس من ثاني أكسيد الكربون السائل

هذا النوع من السوائل يستحق فعلاً أن يسمى بالسوائل غير التقليدية، وقد استخدم بنجاح في مكمن للغاز الكتيم في كندا، وفي عدة مكمن في الولايات المتحدة الأمريكية⁴².

تعتمد سوائل التشقيق التقليدية على اللزوجة لمنع تسرب السائل من الشقوق باتجاه المكمن، حيث تتكون سدادة أو كعكة Cake من السلاسل

البوليميرية الطويلة تمنع التسرب كما أن اللزوجة تسمح بالتحكم بقياسات الشقوق، ذلك أن قطر الشقوق المناسب يتطلب نقل المواد الداعمة وإبقائها ضمن الشقوق المتشكلة.

لكن ثاني أكسيد الكربون المسال ذو لزوجة منخفضة، كما أنه ذو حرارة منخفضة جداً إذ يوجد في الحالة السائلة (حسب الضغط) عند درجة تقارب -51° مئوية. لذلك يتم حقنه بضغط مرتفع أعلى من ضغط المكمن، حيث يصادف منطقة ذات ضغط أقل من ضغطه وحرارة أعلى من حرارته مما يجعله يتمدد متسبباً في تشقيق التشكيلة.

ومن بين هذه السوائل يمكن ذكر الرغوة التي أساسها ثاني أكسيد الكربون السائل، حيث يستخدم غاز النتروجين لتغويز Gasification ثاني أكسيد الكربون السائل بنسبة 75% من النتروجين، مما يرفع من لزوجة الرغوة مقابل استخدام ثاني أكسيد الكربون السائل لوحده. كما أن استخدام النتروجين يخفض الكلفة مقابل استخدام ثاني أكسيد الكربون السائل فقط.

وهناك أنواع أخرى من سوائل التشقيق غير التقليدية مثل غاز البترول المسيل المخثر LPG، حيث يتم رفع لزوجته وإضافة المواد الداعمة له. ويتميز هذا النوع من السوائل بأنه من الممكن استرجاعه بشكل شبه كلي من المكمن وبسرعة عالية، وخاصة عند وجود خط أنابيب جاهز لنقل الغاز المنتج⁴³.

2-6: أهمية الماء في عمليات التشقيق

رغم استخدام سوائل تشقيق ذات أساس نفطي أحياناً، إلا أن السائل الأكثر استخداماً لتحضير سائل التشقيق هو الماء. وتواجه عملية التشقيق الهيدروليكي تحدياً كبيراً يتمثل في كمية المياه اللازمة لها، ويمكن النظر إلى هذا التحدي من زاويتين:



- الأولى هي إيجاد كميات المياه الكافية لعمليات الحفر والتشقيق.
- الثانية هي التخلص من المياه المحملة بالمواد الكيميائية والتي يجري استخراجها بعد انتهاء عملية التشقيق ووضع البئر على الإنتاج.

2-6-1: كمية المياه اللازمة لعمليات التشقيق

تحتاج عملية التشقيق لكميات من الماء تختلف حسب طبيعة المكنم، وتبين خلال إعداد هذه الدراسة أنه من الصعوبة بمكان التوصل إلى أرقام دقيقة حول كميات المياه التي تستخدمها شركات الخدمة المتخصصة، كما أن المراجع المتاحة تقدم تقديرات مختلفة بناء على ما يتوفر لديها من معطيات.

ويمكن تبيان هذا الاختلاف من خلال المثال* المبين في الجدول 5 لتقديرات كميات المياه اللازمة لحفر وتشقيق آبار غاز السجيل في الولايات المتحدة الأمريكية، حيث يشير الرقم (1) إلى بيانات منظمة FracFocus المشار إليها آنفاً، بينما يشير الرقم (2) إلى بيانات قدمتها مؤسسة Chesapeake Energy⁴⁴ في عام 2011.

الجدول 5: كميات المياه اللازمة للحفر والتشقيق الهيدروليكي في بعض منظومات غاز السجيل

المنظومة	كمية الماء اللازمة لحفر البئر برميل	كمية الماء اللازمة لتشقيق البئر برميل	كمية الماء الإجمالية للبئر برميل	نسبة الماء اللازم للتشقيق/إجمالي كمية المياه
Barnett (1)	12,718	73,126	85,844	85%
Barnett (2)	7,949	120,817	128,766	94%
Fayetteville (1)	1,908	92,203	94,110	98%
Fayetteville (2)	2,067	155,791	157,857	99%
Haynesville (1)	31,794	85,844	117,638	73%
Haynesville (2)	19,076	158,970	178,046	89%
Marcellus (1)	2,544	120,817	123,361	98%
Marcellus (2)	2,702	174,867	177,569	98%

المصدر: (1) FracFocus (2) Chesapeake Energy

* تختلف واحدة البيانات المقدمة حسب الجهة بين غالون أو متر مكعب أو برميل، وتم في هذه الدراسة توحيد البيانات لسهولة المقارنة، باستخدام معاملات التحويل المعتمدة فيدرالياً في الولايات المتحدة كون معظم الأمثلة عنها. وهي تعتبر أن كل 1 متر مكعب من الماء يعادل 8.4 برميل، أو 264.2 غالون أمريكي.

ويمكن لتسليط الضوء على المزيد من الاختلافات في تقدير كميات المياه اللازمة لعمليات التشقيق الهيدروليكي، النظر إلى الجدول 6 الذي يبين كميات المياه اللازمة لتشقيق البئر الواحد حسب الولاية، وذلك حسب تقديرات وكالة حماية البيئة الأمريكية⁴⁵

الجدول 6: كميات المياه اللازمة لتشقيق البئر الواحد حسب الولاية

الولاية	الحوض	تقديرات EPA برميل	تقديرات أخرى برميل
Colorado	Denver	12,835	92,207
North Dakota		68,065	69,947
Oklahoma		82,404	95,382
Pennsylvania		136,769	141,481
Texas	Fort Worth	123,396	143,077
Texas	Salt	99,834	127,176
Texas	Western Gulf	120,103	146,252
الوسطى		10,942	91,913

المصدر: EPA، 2016

وفي الولايات المتحدة الأمريكية، ذكرت لجنة المياه الحكومية State Water Commission في منطقة شمال داكوتا أن عمليات الحفر والتشقيق ضمن تشكيلة Bakken في المنطقة تحتاج إلى حوالي 72,240 برميل من الماء للبئر الواحد، ويبدو أن هذا الحجم من الماء هو لعملية تشقيق من مرحلة واحدة فقط، كما تشير اللجنة إلى أن عمليات التشقيق الهيدروليكي في المنطقة في عام 2012 استهلكت ما يزيد عن 126 مليون برميل من الماء⁴⁶.

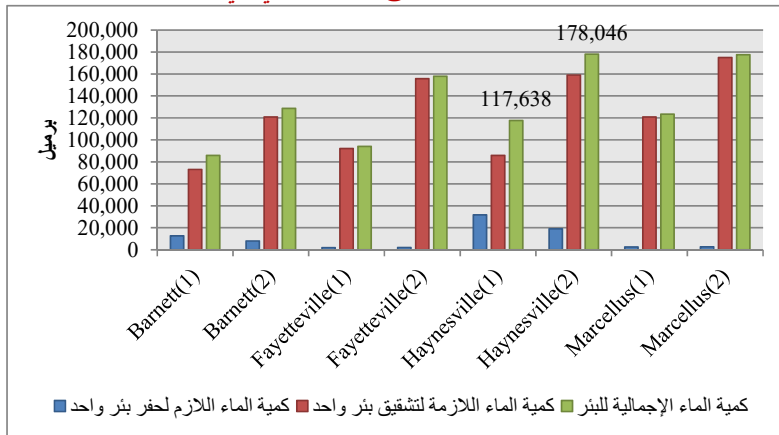
وفي ولاية بنسلفانيا، أشارت دراسة أعدت في جامعة بنسلفانيا الحكومية إلى أن عملية التشقيق للبئر العمودي تحتاج إلى ما يتراوح بين 37,800-110,880 برميل من الماء، بينما يحتاج البئر الأفقي إلى ما يتراوح بين 151,200-302,400 برميل⁴⁷.

وتشير الجمعية الكندية للمصادر غير التقليدية⁴⁸ إلى أن 126,000-37,800 برميل من الماء قد تلزم لتشقيق بئر أفقي عميق على عدة مراحل، أما في الآبار الضحلة وعند تشقيق نطاق واحد فقط، فتكون كمية الماء أقل من ذلك بكثير وربما تتراوح بين 168- 840 برميل فقط.

ويمكن على سبيل التبسيط القول إن مرحلة التشقيق الواحدة للبئر الواحد تحتاج وسطياً إلى أكثر من 150 ألف برميل من الماء، مع أن بعض الحالات في منظومة Eagle Ford احتاجت إلى 420 ألف برميل⁴⁹. ولا بد من التأكيد ثانية على أن هذه الكمية من المياه (والمواد الكيميائية) هي لبئر واحد فقط، بينما بلغ عدد الآبار في منظومة Eagle Ford حوالي 14 ألف بئر في أواخر عام 2015⁵⁰.

وبتوضيح بيانات **الجدول 5** (كميات المياه اللازمة للحفر والتشقيق الهيدروليكي في بعض منظومات غاز السجيل) في **الشكل 13**، يلاحظ أن فارق التقديرات قد يزيد عن 60 ألف برميل من الماء كما في حالة منظومة Haynesville. ويتبين أيضاً أن كمية المياه اللازمة لعملية الحفر تعتبر هامشية مقارنة مع كمية المياه اللازمة للتشقيق والتي تشكل معظم كمية المياه الإجمالية اللازمة لكل بئر وتتراوح بين 73% إلى 98%.

الشكل 13: كميات المياه اللازمة للحفر والتشقيق الهيدروليكي في بعض منظومات غاز السجيل



(1) بيانات منظمة FracFocus (2) بيانات Chesapeake Energy إدارة الشؤون الفنية، أوابك، اعتماداً على بيانات الجدول 5

يبين ما سبق مدى صعوبة الحصول على رقم دقيق لكميات المياه المستخدمة في التشقيق الهيدروليكي، وعلى وجه العموم تعتبر كميات المياه اللازمة في عمليات إنتاج زيت وغاز السجيل أحد أهم العوائق التي تواجه الصناعة البترولية عموماً، وتبدو بشكل أكثر وضوحاً في منطقة الشرق الأوسط أو في دول شمال أفريقيا التي تفكر في دخول معترك هذه الصناعة، فحتى لو توفرت كميات المياه الهائلة اللازمة لحفر العدد الكبير من الآبار اللازمة لاستثمار مكنن سجليي، فهناك عمليات التشقيق الهيدروليكي التي تحتاج لكميات أكبر بكثير من كميات مياه الحفر، ومن المعلوم أن هذه المياه لا تتوفر بالكميات الكافية في العديد من الدول في المنطقة.

وبالرغم من وجود أبحاث حول تقنيات لإمكانية استخدام كميات أقل من المياه في عمليات التشقيق الهيدروليكي، إلا أن هذه الأبحاث لا زالت في مراحل مبكرة جداً، ونشير الدلائل الأولى لها إلى أنه من شبه المستحيل تطبيق التقنيات المنظورة على أعماق كبيرة، ويمكن هنا الإشارة إلى أن أعماق طبقات السجيل⁵¹ التي تم تقييمها في بعض الدول العربية تزيد أحياناً عن 4000 م، كما هو مبين في الجدول 7:

الجدول 7: أعماق تشكيلات السجيل في بعض الدول العربية

الدولة	الحوض	التشكيلة	العمق (م)
الجزائر	غدامس/بيركن	فراسنيان	3048-2438
		تنزوفت	4419-3048
تونس	غدامس	فراسنيان	2896-2590
		تنزوفت	2590
ليبيا	غدامس/بركين	فراسنيان	2896-2743
		تنزوفت	3353-3276
	سرت	سرت/رشمة	3352
		إيتل	4115
	مرزق	تنزوفت	1981
مصر	أبو الغراديق	الخطاطبة	3658
	العلمين - الناطور		4267
	الشوشان- مطروح		3962

المصدر: حمش، 2016



كما أن منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا (MENA) هي أكثر مناطق العالم جفافاً ولا يزيد نصيب الفرد فيها من المياه عن 1200 متر مكعب يومياً، مقابل 7000 متر مكعب تمثل المتوسط اليومي في باقي العالم حسبما يشير لك البنك الدولي⁵².

إن كمية المياه اللازمة لعمليات التشقيق ليست بالهينة، فقد جرى استخدام أكثر من 75 مليون متر مكعب وسطياً في ولاية تكساس عام 2012 لعمليات التشقيق، ويمكن من خلال بيانات الجدول 5، استخلاص الجدول 8 الذي يوضح أن كمية مياه التشقيق تعادل ما بين 6-75 ضعفاً من كميات المياه اللازمة لحفر البئر الواحد.

الجدول 8: كمية المياه اللازمة للتشقيق مقارنة بكمية المياه اللازمة للحفر

المنظومة	الماء اللازم للتشقيق/ الماء اللازم للحفر
Barnett (1)	575%
Barnett (2)	1520%
Fayetteville (1)	4833%
Fayetteville (2)	7538%
Haynesville (1)	270%
Haynesville (2)	833%
Marcellus (1)	4750%
Marcellus (2)	6471%

إدارة الشؤون الفنية، أوابك، اعتماداً على بيانات الجدول 5

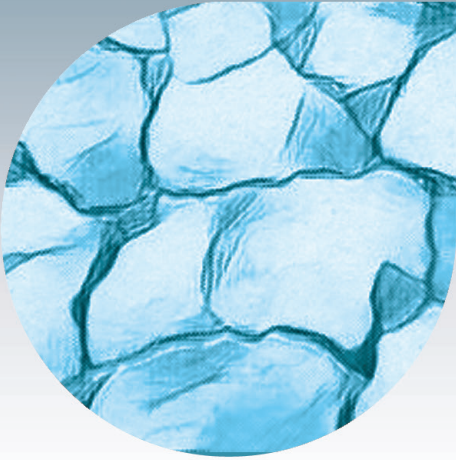
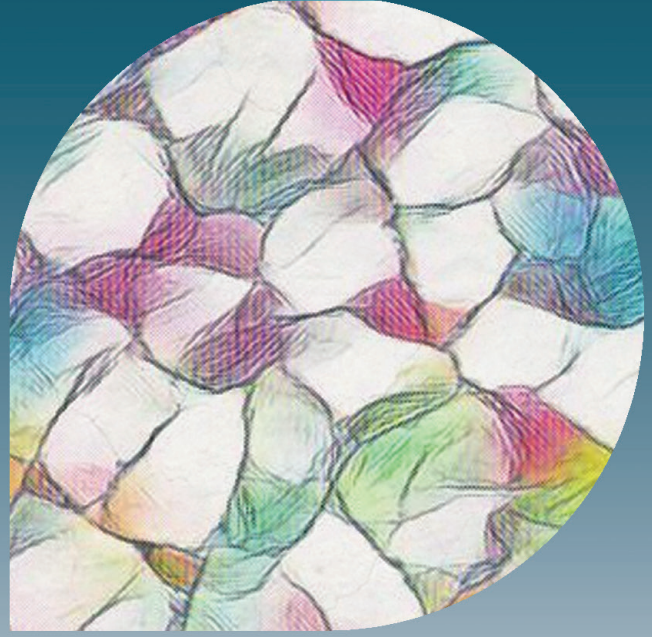
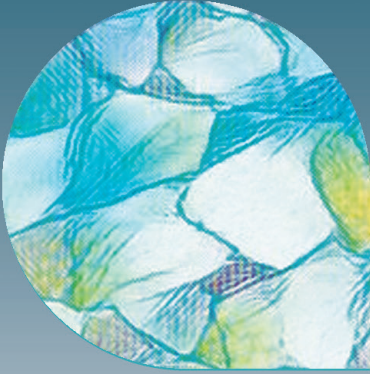
ومن الغني عن الذكر أن هذه الوفرة في المياه ليست متاحة بالكميات الكافية في العديد من الدول في المنطقة.

وفي حال التفكير في استخدام مياه محطات التحلية كمصدر للمياه اللازمة لعمليات التشقيق، فلا بد من النظر في أمرين هاميين:

- 1- ما هي استطاعة محطات التحلية الموجودة في بلد ما، أي ما هي كميات المياه التي يمكن إنتاجها من المحطة، وكم تبلغ الكمية التي يمكن سحبها من الاستخدام اليومي للبلد.
- 2- كلفة هذه المياه مقارنة بالعائد الاقتصادي المتوقع من زيت السجيل.

تستخدم محطات التحلية عادة في البلدان الفقيرة بمصادر المياه السطحية أو الجوفية الصالحة للشرب أو للاستخدام اليومي، وبالتالي تصبح محطات التحلية المصدر الوحيد الذي يغذي شريان الحياة بالمياه، وربما تمتلك بعض تلك المحطات استطاعة احتياطية لمواجهة النمو المتزايد في الطلب نتيجة النمو السكاني أو التوسع العمراني، لكن المعروف أن مشاريع تنمية عدد هذه المحطات أو زيادة عددها هي مشاريع شبه مستمرة، مما يعني أنها من الصعب عليها عملياً أن تمد يد العون لعمليات التشقيق الهيدروليكي، فتشقيق بئر للنفط في منظومة Eagle Ford في الولايات المتحدة، يحتاج لنحو 193,200 برميل من الماء لمرحلة تشقيق واحدة كما ورد سابقاً، وهذا يعادل على سبيل المثال ربع الإنتاج اليومي لمحطة "الشويخ" لتحلية الماء في دولة الكويت*. كما يمكن الإشارة هنا إلى أن جمهورية العراق دعت الشركات المتخصصة لتقديم عروضها لمشروع استراتيجي لتحلية مياه البحر، حيث من المخطط تنفيذ المشروع على مرحلتين لتحلية نحو 5 مليون ب/ي من ماء البحر ونقلها عبر شبكة أنابيب إلى حقول الجنوب في البصرة، وميسان، وذي قار⁵³، وبالتالي فإن نفس البئر المشار له يمكن أن يستهلك لمرحلة تشقيق واحدة أكثر من 70% من طاقة محطة التحلية اليومية المزمع إنشاؤها.

* حسب بيانات إدارة الإحصاء والمعلومات/ وزارة الماء والكهرباء في دولة الكويت، النشرة الإحصائية لشهر أكتوبر 2016.



الفصل الثالث

دور التشقيق الهيدروليكي في تطوير المصادر غير التقليدية

للقوف على أهمية التشقيق الهيدروليكي للصناعة البترولية يمكن الاستعانة بمثال واضح عن تأثر إنتاج النفط والغاز في الولايات المتحدة الأمريكية بهذه التقنية.

كما سوف تتم الإشارة على عجلة إلى مثال عن عمليات التشقيق في المملكة العربية السعودية، ودولة الكويت، ويتم التعرّيج بعد ذلك على مثال عن عمليات التشقيق في الصين.



الفصل الثالث

دور التشقيق الهيدروليكي في تطوير المصادر غير التقليدية

مثال (1): الولايات المتحدة الأمريكية

1-3: احتياطات النفط والغاز في الولايات المتحدة الأمريكية

شهدت احتياطات النفط الأمريكي⁵⁴ تراجعاً واضحاً بعد أن بلغت أعلى قيمة لها في عام 1970 (43 مليار برميل) كما هو مبين في الشكل 14، واستمر هذا التراجع حتى عام 2008، حيث بلغت الاحتياطات 20.6 مليار برميل، أي أن الاحتياطات انخفضت إلى النصف خلال أقل من 40 عاماً من الإنتاج.

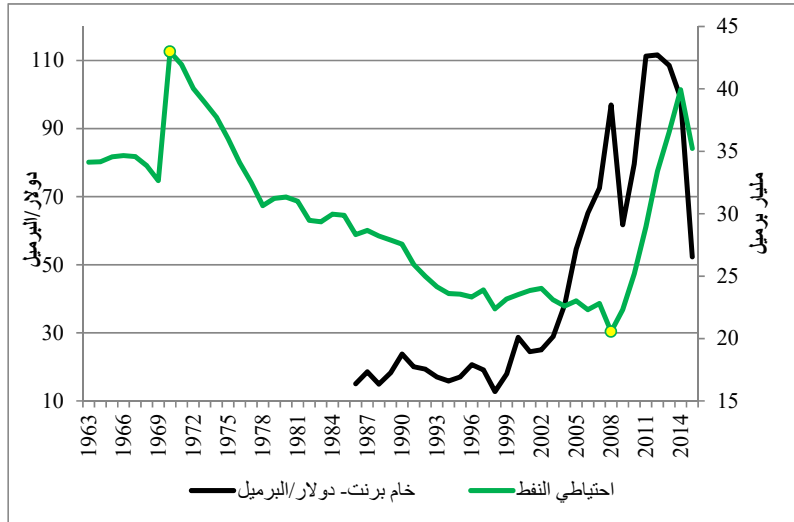
وشهدت احتياطات الغاز بدورها تراجعاً مماثلاً (الشكل 15)، من 8294 مليار متر مكعب عام 1967 إلى 4828 مليار متر مكعب عام 1993، وإن كانت احتياطات الغاز قد تراجعت بشكل أكبر من احتياطات النفط نتيجة تأثرها بانخفاض أسعار النفط⁵⁵ التي تراوحت بين 14.4 دولار/البرميل عام 1986، و12.7 دولار/البرميل عام 1998.

لكن هذه الصورة تغيرت بشكل متسارع بعد اكتساب أسعار النفط لدفع قوي عند ارتفاع الأسعار إلى أكثر من 90 دولار/البرميل في عام 2008، إذ ساهم ذلك في إعادة تقييم المصادر المتاحة في البلاد، وشجع على التوجه الحديث نحو استغلال مكامن زيت وغاز السجيل، فارتفعت احتياطات النفط إلى 39.9 مليار برميل في مطلع عام 2015، وبلغت احتياطات الغاز أكثر من 11 تريليون متر مكعب.

وهنا لا بد من الإشارة إلى أن أسعار الغاز في الولايات المتحدة كانت متقلبة، فما بين عامي 1995 و1999 بلغ السعر الفوري للغاز وسطياً 2.23 دولار/مليون و ح ب*، لكنه ارتفع إلى 4.68 دولار/ مليون و ح ب بين عامي 2000 و2004، ووصل السعر إلى 15.38 دولار/مليون و ح ب في أواخر عام 2005، ثم انخفض بالتدريج إلى أقل من 8 دولار/و ح ب، ليعود في عام 2008 إلى حد تجاوز 12 دولار/مليون و ح ب⁵⁶.

ومع تراجع سعر النفط منذ منتصف عام 2014، تراجعت تقديرات الاحتياطي الأمريكي ثانية، إذ قدرت في مطلع عام 2016 بنحو 35.3 مليار برميل، أي أن تقديرات احتياطي النفط الأمريكي فقدت خلال عام واحد أكثر من 4.6 مليار برميل، وهذا عائدٌ على الأغلب إلى تراجع نشاط الحفر بسبب انخفاض أسعار النفط، إضافة إلى تراجع حجم الاحتياطيات المؤكدة التي يمكن إنتاجها اقتصادياً. وتراجعت كذلك احتياطيات الغاز إلى نحو 9.2 تريليون متر مكعب، أي أن احتياطيات الغاز فقدت نحو 17% من تقديراتها.

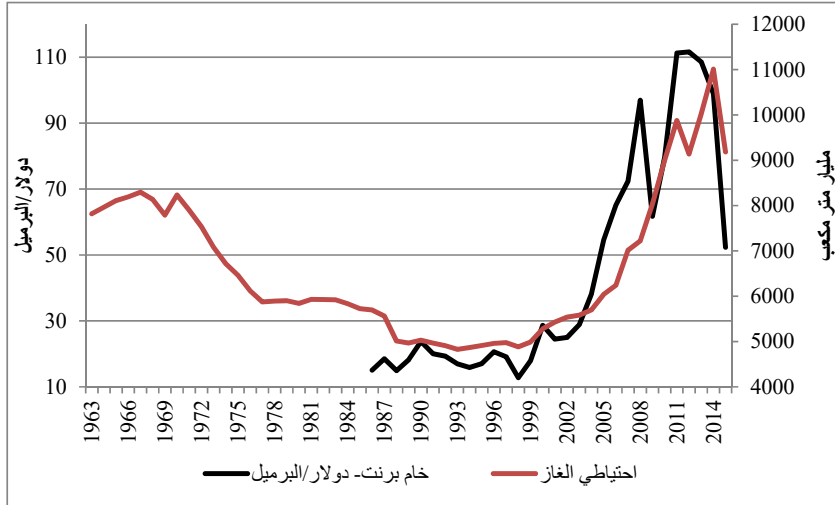
الشكل 14: احتياطيات النفط الأمريكي



مصدر البيانات: EIA، 2016

* وحدة حرارية بريطانية BTU

الشكل 15: احتياطات الغاز الأمريكي



مصدر البيانات: EIA، 2016

تشير بيانات إدارة معلومات الطاقة الأمريكية⁵⁷ إلى أن احتياطي زيت السجيل والمكامن منخفضة النفاذية مثل 33.4% من إجمالي احتياطي النفط الأمريكي في عام 2014، أي ما يزيد عن 13 مليار برميل، وشكل نحو 33% من إجمالي احتياطي النفط في عام 2015 بما يقارب 11.6 مليار برميل.

كما أن احتياطي غاز السجيل مثل ما يتراوح بين 33.7 إلى 45.5% من إجمالي احتياطي الولايات المتحدة من الغاز الطبيعي بين عامي 2012 و2015، كما هو مبين في الجدول 9.

الجدول 9: نسبة احتياطات غاز السجيل الأمريكي من إجمالي احتياطات الغاز الطبيعي

العالم	إجمالي احتياطي الغاز	احتياطي غاز السجيل	نسبة غاز السجيل من الإجمالي
	مليار متر مكعب		%
2012	9137	3081	33.7
2013	10024	3790	37.8
2014	11011	4756	43.2
2015	9183	4182	45.5

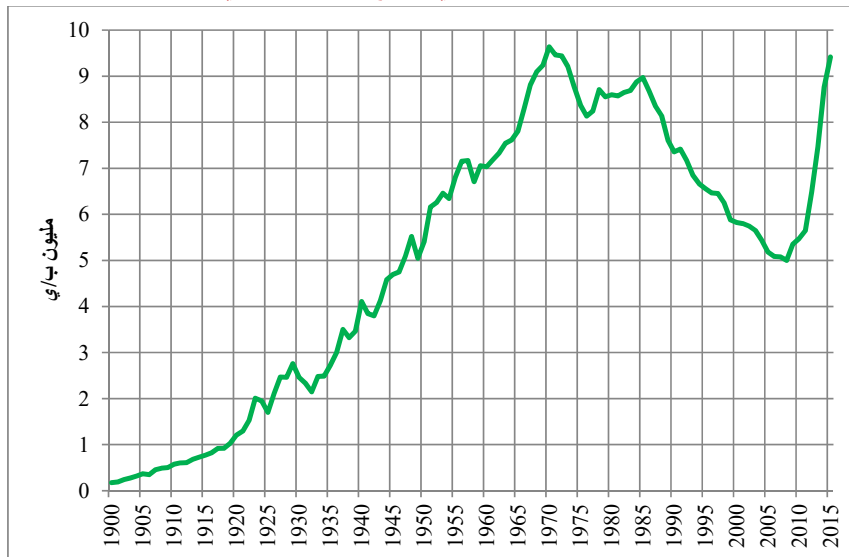
مصدر البيانات: EIA، 2016

2-3: إنتاج النفط والغاز في الولايات المتحدة الأمريكية

تتيح قاعدة بيانات إدارة معلومات الطاقة الأمريكية الوصول إلى بيانات الإنتاج منذ مطلع القرن العشرين الماضي، وأمكن بالتالي إعداد **الشكل 16** الذي يبين معدلات الإنتاج اليومي من النفط في الولايات المتحدة الأمريكية لكل سنة منذ عام 1900، حيث يظهر بوضوح أن عام 1970 شهد أعلى معدل إنتاج للنفط في الولايات المتحدة خلال القرن العشرين، إذ بلغ نحو 9.64 مليون ب/ي، ليبدأ بعدها بالتراجع إلى نحو 5 مليون ب/ي في عام 2008، ويعود إلى التزايد ثانية مع انطلاق ما دعي باسم (ثورة السجيل) والتي لم تكن لتنتج لولا الدور البارز الذي لعبه التشقيق الهيدروليكي في عمليات الإنتاج.

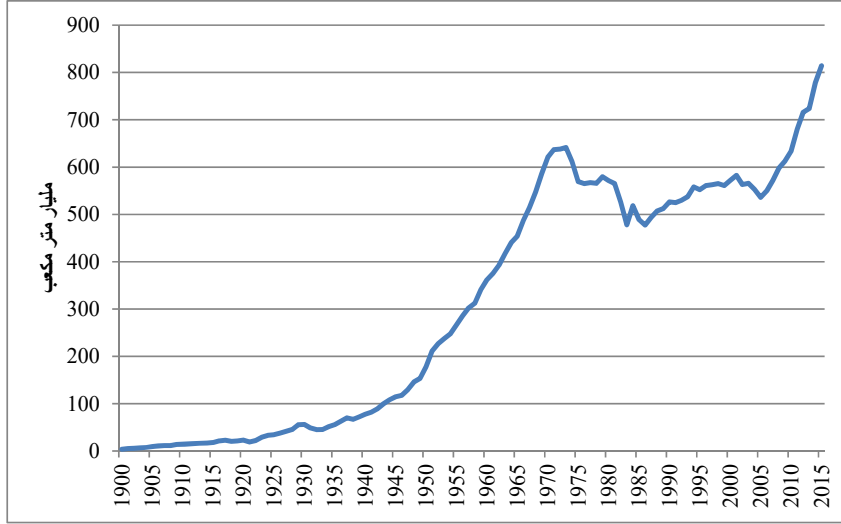
وشهدت كميات الغاز الطبيعي المسوق نفس منحنى النفط تقريباً، حيث بلغت ذروتها عام 1973 بما يزيد عن 641 مليار متر تم تسويقها في ذلك العام، وتراجعت إلى نحو 536 مليار متر مكعب عام 2005. ثم بدأت الكميات بالتزايد بشكل تدريجي لتصل إلى أكثر من 814 مليار متر مكعب عام 2015 كما هو مبين في **الشكل 17**.

الشكل 16: المعدل اليومي لإنتاج النفط الأمريكي سنوياً



المصدر: EIA، 2016

الشكل 17: الغاز الطبيعي المسوق سنوياً في الولايات المتحدة الأمريكية



المصدر: EIA، 2016

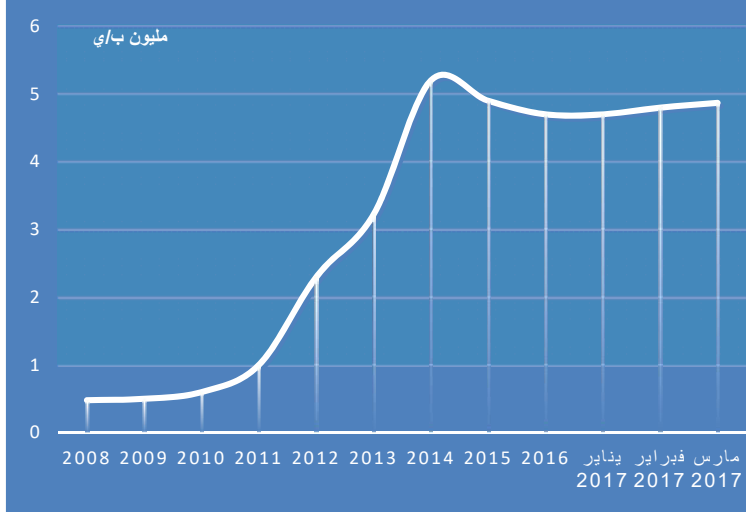
وتذكر إدارة معلومات الطاقة أن إنتاج زيت السجيل الأمريكي ارتفع من أقل من 1 مليون ب/ي عام 2010 إلى 2.3 مليون ب/ي عام 2012، وبلغ 3.22 مليون ب/ي في عام 2013، أي ما يزيد عن 43% من إجمالي إنتاج النفط، بينما بلغت النسبة 52% في عام 2015 حيث أنتج 4.9 مليون ب/ي من زيت السجيل مقابل 4.5 مليون ب/ي من النفط التقليدي.

يبين الشكل 18 معدل تنامي إنتاج زيت السجيل* في الولايات المتحدة منذ عام 2008، وحتى نهاية الربع الأول من عام 2017، وتنتضح من خلاله ومن خلال الأرقام السابقة أهمية تقنية التشقيق الهيدروليكي، إذ لولا هذه التقنية المترافقة مع الحفر الأفقي، لكان إنتاج النفط الأمريكي 4.5 مليون ب/ي فقط في عام 2015 حسب بيانات إدارة معلومات الطاقة، وربما أقل لاحقاً.

* تم جمع البيانات من عدة مصادر متاحة على موقع EIA، وخاصة:

Annual Energy Outlook 2017 و Supply, Demand, and Export Outlook for North American Oil and Gas

الشكل 18: إنتاج زيت السجيل في الولايات المتحدة



المصدر: إدارة الشؤون الفنية، أوبك، اعتماداً على البيانات الشهرية من EIA، لعدة سنوات

كما أن نسبة غاز السجيل من إجمالي الغاز المسوق بين عامي 2014 و2015 زادت ووسطياً عن 50%، أي أن التشقيق الهيدروليكي ساهم في إنتاج أكثر من 400 مليار متر مكعب من إجمالي* كميات الغاز التي بلغت 814 مليار متر مكعب في عام 2015.

مثال (2): المملكة العربية السعودية

لا يقتصر استخدام التشقيق الهيدروليكي على حقول زيت وغاز السجيل، فهو يستخدم في حقول النفط والغاز من قبل ظهور التوجه الأمريكي نحو ذلك النوع من الهيدروكربونات.

ومن ضمن استخداماته تشقيق المكامن ذات النفاذية المنخفضة لرفع معامل الإنتاجية، كما هو مبين في المثال التالي المستخلص من ورقة أعدها Al-Anazi وآخرون، ونشرتها مجلة التكنولوجيا في شركة أرامكو السعودية عام 2013⁵⁸:

* هناك تقديرات أخرى (OGJ) ترى أن إجمالي الغاز المسوق في الولايات المتحدة عام 2015 لم يزد عن 767 مليار متر مكعب وبالتالي يكون التشقيق الهيدروليكي قد ساهم في تسويق نحو 383 مليار متر مكعب من الغاز.



يوجد الغاز الحر في السعودية ضمن أحد الحقول A* بشكل رئيسي في تشكيلة يمتد عمرها بين عصري البيريومي الأعلى والترياسي، وقد حفرت في الحقل عدة آبار، لكنها لم تنتج الغاز بالمعدل المطلوب. تقسم التشكيلة المنتجة بدورها إلى أربع دورات ترسيبية، منها ثلاث غنية بالغاز (A, B, C)، والرابعة (D) عبارة عن أنهيدريت.

يتميز المكنم B بثلاث سحنات ترسيبية Facies تتكون من الحجر الحبيبي السري مع حبيبات من الطين العقدي Oolitic Peloidal Grainstone، والحجر الجيري السري المدعم مع نسبة منخفضة من الطين Mud-lean Oolitic Peloidal Packstone، وحجر الدولوميت المنخرب Burrowed Dolostone، وتعتبر السحنة الأولى هي الأكثر شيوعاً في المكنم.

يتصف المكنم بأنه غير متجانس Heterogenous، وتظهر به إجهادات وشوادات في الموائع Anomalous. المسامية الأولية للتشكيلة محدودة عموماً وترتبط جودة المكنم بعملية الدلمتة، وانحلال بعض الكربونات والملاط (الأنهيدريت). أي أن المكنم إجمالاً معقد من الناحية الليثولوجية. تتراوح مسامية المكنم بين 12.5% إلى 16.6%، وتتراوح النفاذية بين 0.196 ملي دارسي إلى 5.88 ملي دارسي.

البئر A

حفر البئر A في عام 2007 كبئر أفقي مفتوح القاع Open Hole، لكن المواصفات الخزنوية الضعيفة أدت إلى إغلاق البئر حتى نهاية عام 2011 حيث تم فتح نافذة فيه من خلال مواسير التغليف، وحفر جذع جانبي من خلالها بطول 1086 م. جرى تشقيق البئر على مرحلتين باستخدام حمض كلوريد الهيدروجين HCl بتركيز 15%، ومستحلب حمضي بتركيز 28%. يبين الجدول 10 الكميات التي استخدمت لكل مرحلة في تشقيق البئر، والتي ساهمت في وضع البئر على الإنتاج خلال عملية التنظيف بمعدل بلغ 1.2 مليون م³/ي، وبضغط جرياني على رأس البئر تجاوز 200

* لا تذكر الورقة التي أخذ منها المثال الاسم الصحيح للحقل أو الآبار، وتستعيض عنه برمز ما، وهو أمر متبع في العديد من الشركات.

ضغط جوي* . ويلاحظ من خلال الجدول 10 أيضاً أن الحجم الكلي للسوائل المستخدمة خلال عملية التشقيق كان صغيراً جداً مقارنة مع الحجم المستخدم في آبار زيت وغاز السجيل في الولايات المتحدة الأمريكية، كما هو ورا د سابقاً في الجدولين 5 و6 من هذه الدراسة.

الجدول 10: مكونات عملية التشقيق لكل مرحلة في البئر A/السعودية

الحجم (برميل)	المكون
48	حمض حمضي 15% HCl
870	وسادة تشقيق حمضية
821	مستحلب حمضي 28%
197	نظام تحويل حمضي-1
197	نظام تحويل حمضي-2
2133	الحجم الكلي

المصدر: AI-Anazi وآخرون، 2013

البئر B

حفر البئر B عام 2004 كبئر عمودي لإنتاج الغاز من مكن حطامي عميق، ثم جرى إغلاقه بسبب إنتاجته المنخفضة. جرى لاحقاً حفر جذع جانبي من البئر بطول 198 م، وتم وضع خطة لتشقيق البئر على ثلاث مراحل، لكن المرحلة الأولى لم تكلل بالنجاح لأسباب تقنية، إذ كان من المفترض حقن الحمض بمعدل خمسة براميل في الدقيقة (ب/د)، لكن أعلى معدل حقن تم التوصل له كان 0.6 ب/د، فتم إلغاء هذه المرحلة، وأنجزت مرحلتان فقط من التشقيق بحمض الهيدروكلوريد نتج عنهما وضع البئر على الإنتاج بمعدل 1 مليون م³/ي، وزاد الضغط الجرياني على رأس البئر عن 180 ضغط جوي.

* 1 atm ≈ 14 psi

مثال (3): دولة الكويت

شهد عام 2015 استخدام عملية التشقيق الهيدروليكي على خمسة آبار أفقية تخترق تشكيلة مودود في الكويت، والتي كانت قد حفرت في نهاية الألفية الأولى، لكن تلك الآبار لم تنتج رغم المحاولات المتعددة لإكمالها كأبار بقاع مفتوح، وذلك بسبب ارتفاع معدل الغاز/النفط (GOR). وجرت محاولة لاستخدام التشقيق بالحمض، لكن الغاز منع حركة النفط. وفي نهاية عام 2014 قامت شركة Halliburton باستخدام تقنيات خاصة بها (Hydra-Jet™ SPT) * لتشقيق النطاقات منخفضة النفاذية من التشكيلة ضمن تلك الآبار، وبينت الدراسات الخاصة بالعملية أنها قادرة على إيجاد شقوق بطول يتراوح بين 3-6 م، وهو ما يلزم لربط الآبار مع الشقوق الطبيعية في التشكيلة.

تم اختبار العملية على البئر الأول فوصل الضغط على رأس البئر إلى 500 رطل/البوصة المربعة (psi)، وأنتج البئر بمعدل أولي بلغ 1500 ب/ي، ثم استقر خلال ثلاث سنوات عند معدل 1000 ب/ي. مما دفع شركة نفط الكويت إلى تطبيق التقنية على بقية الآبار والتي استقر إنتاجها بدوره عند معدل 1000 ب/ي، وأكدت شركة Halliburton أن تكلفة تلك العمليات قد تم استردادها خلال أسبوع واحد من الإنتاج⁵⁹.

مثال (4): الصين

تكمن أهمية هذا المثال من الصين في أنه يستعرض دراسة⁶⁰ لاستخدام ما يسمى "التشقيق الهجين" أو التشقيق غير التقليدي لإنتاج النفط من مكامن شبه كتيمة[†] في حقل Dagang ضمن حوض Bohai شمال شرق الصين. أعدت الدراسة التي

* تقنية تجعل فوهة نقل سائل التشقيق تتحني باتجاه جدار البئر عند حقن السائل، مما يركز الضغط على المنطقة المطلوب تشقيقها.

† يشار غالباً للنفط/أو الغاز المنتج من هذه المكامن بأنه نفط/أو غاز كتيم، وهو مجرد تعبير اصطلاحي شاع استخدامه ويقصد به أن صخور المكامن ذات نفاذية منخفضة جداً تكاد تكون شبه كتيمة، أما النفط والغاز فليس من خصائصها عملياً أن تكون كتيمة أو غير كتيمة.

استقي منها المثال* من قبل مؤسسة البترول الوطنية الصينية CNPC بالتعاون مع جامعة الجنوب الغربي للبترول SWPU.

تنوضع حجوم كبيرة من احتياطات النفط الصيني في مكامن شبه كريمة تقل النفاذية فيها عن 0.1 ملي دارسي، وهي بهذا تشابه نظيرتها في منظومات زيت السجيل الأمريكي، ويبين الجدول 11 مقارنة بين حقل Dagang الصيني ومنظومي Eagle Ford، و Bakken الأمريكيتين:

الجدول 11: مقارنة بين حقل Dagang الصيني ومنظومي Eagle Ford، و Bakken

Eagle Ford	Bakken	Dagang	البيان
3600-1200	3300-2500	4600-2900	العمق (م)
60-20	18-2	150-75	السمائة (م)
7-3	14-10	6-2	محتوى الكربون الكلي (%)
12-2	12-2	12-5	المسامية (%)
1-0.01>	1-0.01	1-0.001	النفاذية (ملي دارسي)
0.87-0.82	0.83-0.81	0.9-0.87	كثافة النفط (غ/سم ³)

المصدر: Zhang و Guo، 2016

اكتشف حقل Dagang عام 1965 وبذلت العديد من الجهود لتطوير احتياطياته وإنتاجه من النفط والتغلب على مشكلة نسب الإماهة العالية في الآبار. ومن بين التقنيات التي استخدمت في الحقل تقنية التشقيق الثانوي الهجين[†]، وتختلف هذه التقنية عن التشقيق التقليدي حسبما تشير له الدراسة بأنها تتبع إجراءات مستقلين، الأول هو عملية تشقيق تقليدية يعقبها إغلاق البئر لمدة ساعة على الأقل لضمان أن المواد الداغمة قد استقرت في الشقوق، والثاني هو عملية تشقيق أخرى (مرحلة ثانية) تضمن رفع ناقلية الصخر. يبين الجدول 12 نتائج تطبيق هذه التقنية على بعض آبار الحقل.

* كل ما كتب عن هذه التقنية هنا تم استقاؤه من الدراسة المشار إليها.

† Secondary Hybrid Fracturing

الجدول 12: نتائج التشقيق الهيدروليكي على بعض آبار حقل Dagang في الصين

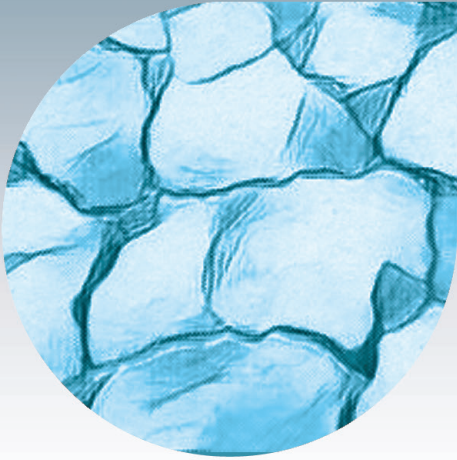
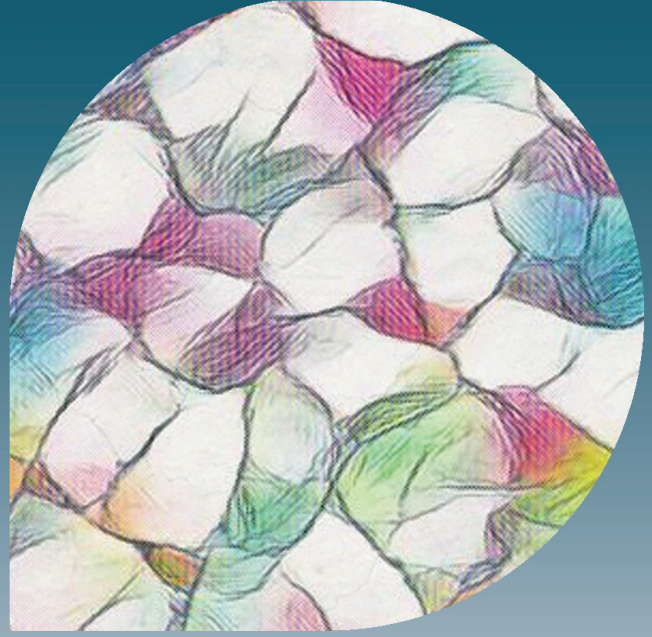
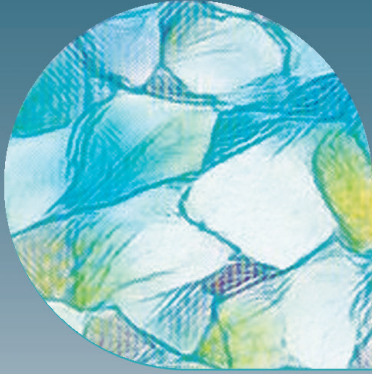
معدل الإنتاج (ب/ي)		النفاذية (ملي دارسي)	البنر
بعد التشقيق	قبل التشقيق		
212.9	4.49	0.29	G1
205.4	1.24	0.77	G6
189.6	1.32	0.684	G3
148.7	15.17	0.287	K26
39.9	6.44	0.044	G9-1
37.2	2.11	0.71	K17-2
35.9	1.32	0.42	K17-1
32.8	0.23	0.24	K9
32.1	0.57	0.27	Gi3
28.0	0.08	0.55	GLOB
18.4	0.27	0.08	GIO
6.4	0.01	0.255	G92

المصدر: معدل عن: Zhang و Guo ، 2016.

يمكن من خلال البيانات التي تم استعراضها ملاحظة أن التشقيق الهيدروليكي في الولايات المتحدة الأمريكية ساهم في:

- 1- مضاعفة تقديرات احتياطي النفط.
 - 2- رفع تقديرات احتياطي الغاز بنحو ثلاثة أضعاف تقريباً.
 - 3- إيقاف تراجع إنتاج النفط والغاز وعكس منحنيات الإنتاج بشكل واضح.
- كما ساهم التشقيق الهيدروليكي في مثالي المملكة العربية السعودية في إنتاج الغاز من آبار كانت قد أغلقت سابقاً بسبب اعتبارها غير منتجة. وتم إنتاج النفط من آبار أفقية في الكويت كانت قد حفرت وبقيت خارج الإنتاج لنحو 15 عاماً.

أما في حقل Dagang في الصين، فيلاحظ من الجدول 12 أن تقنية التشقيق الهيدروليكي تم تطبيقها على آبار كانت جافة (0.01 ب/ي) أو شبه جافة (15 ب/ي) لكنها انتقلت إلى الإنتاج بمعدلات مختلفة ربما تكون بعضها اقتصادية أو غير اقتصادية وهذا مبحث آخر.



الفصل الرابع

الآثار البيئية لعمليات التشقيق الهيدروليكي

تثير عمليات التشقيق الهيدروليكي العديد من التساؤلات حول تأثيراتها البيئية سواء على مصادر المياه بشكل مباشر أو على التكوينات الجيولوجية أو على المنطقة المجاورة للحقول التي تستخدم فيها. ويحاول هذا الفصل تسليط الضوء على بعض هذه التساؤلات مسترشداً بالوضع في الولايات المتحدة الأمريكية كونها الدولة صاحبة الخبرة الأشمل في هذا المجال.



الفصل الرابع

الآثار البيئية لعمليات التشقيق الهيدروليكي

4-1: الآثار البيئية لعمليات التشقيق الهيدروليكي على المياه

4-1-1: عدد الآبار التي يتم تشقيقها في الولايات المتحدة

حتى تتضح الصورة أكثر، لا بد من النظر إلى العدد الفعلي من الآبار التي يتم تشقيقها في الولايات المتحدة الأمريكية التي اتخذت مثلاً في هذه الدراسة، وهنا يُستغرب عدم وجود تقارير واضحة بهذا الشأن خاصة وأن الولايات المتحدة تقود ركب التشقيق الهيدروليكي، إذ تشير وكالة حماية البيئة الأمريكية إلى هذه النقطة قائلة: "إن تحديد المنظور القومي لنشاطات التشقيق الهيدروليكي في الولايات المتحدة أمرٌ في غاية التعقيد بسبب شح المعلومات من مصدر مركزي واحد... كما تسود حالة من عدم اليقين بشأن البيانات المتوفرة، فلا يعرف على وجه الدقة إن كانت البيانات تمثل كل الآبار في الولايات المتحدة، أو تمثل الآبار الجديدة ذات الإنتاجية العالية فقط، وهل هي عن الآبار المنتجة من المكامن التقليدية أم غير التقليدية".

ونتيجة لهذا التعقيد الذي أشارت له الوكالة، ولعدم تمكنها من وضع يدها على أرقام صريحة محددة، فقد تبنت تقديراً ينص على أن ما يتراوح بين 25-30 ألف بئر خضعت لعمليات التشقيق الهيدروليكي سنوياً بين عامي 2011 و2014، ناهيك عن عدد كبير من الآبار التي أجريت عليها عمليات إعادة التشقيق⁶¹.

بينما تظهر سجلات منظمة FracFocus رقماً أقل من تقديرات وكالة حماية البيئة، إذ تقدر أن 22,400 عملية تشقيق أجريت سنوياً بين مطلع عام 2011 حتى شهر آذار/مارس 2015.

وتقدر قاعدة البيانات التجارية *Drillinginfo أن 12,800 بئر حفرت وشققت عام 2000، بينما ارتفع العدد إلى 21,600 بئر عام 2005، ونحو 23,000 بئر عام 2012. وتشير نفس قاعدة البيانات إلى أن عدد الآبار الأفقية التي غالباً ما استخدم فيها التشقيق الهيدروليكي كان 344 بئراً عام 2000، و 1810 آبار عام 2005، بينما بلغ 14,500 بئراً عام 2012.

أما إدارة المساحة الجيولوجية الأمريكية USGS فقد ذكرت في دراسة⁶² لها صدرت عام 2015 أن حوالي 722,000 عملية تشقيق تم إجراؤها بين عامي 2000 و2010 كما هو مبين في الجدول 13، فيمكن نظرياً اعتبار أن الرقم الواسطي لعمليات التشقيق كان نحو 72,000 عملية سنوياً.

وبالعودة إلى دراسة إدارة المساحة الجيولوجية تبين أنها لا تمتلك مصادرها الخاصة لإثبات عدد عمليات التشقيق، إذ حصلت بدورها على الأرقام من قاعدة بيانات تجارية تعود لشركة IHS.

* قاعدة بيانات تجارية موثوقة تعتمد عليها وكالة حماية البيئة الأمريكية في العديد من تقاريرها.



الجدول 13: عمليات التشقيق المسجلة في بعض الأحواض الجيولوجية في الولايات المتحدة الأمريكية خلال الفترة 2000-2010

عدد عمليات التشقيق	الحوض
255,186	Appalachian
79,069	Gulf Coast
67,879	Permian
56,182	Uinta-Piceance
47,284	Southwestern Wyoming
44,683	Bend Arch-Fort Worth
34,913	Anadarko
28,567	Arkoma
21,322	San Joaquin
20,440	Denver
16,156	Cherokee Platform
14,802	San Juan
9,797	Michigan
8,955	Raton -Sierra Grande Uplift
8,401	Black Warrior
7,905	Williston (including Bakken)

المصدر : Gallegos and Varela، 2015

يلاحظ بالتالي أنه من الصعوبة بمكان تحديد العدد الدقيق للآبار التي يتم تشقيقها سنوياً أو تلك التي تم بالفعل تشقيقها، لكن أرقام وكالة حماية البيئة (25- 30 ألف بئر سنوياً) يمكن أن تمثل تقديراً وسطياً مقبولاً، خاصة وأن تتبع عدد الآبار التي يتم تشقيقها ليس هدفاً بحد ذاته، لكنه أداة تساهم في تقدير كميات المياه المستخدمة سنوياً إضافة إلى كميات المياه التي يتم استرجاعها وإنتاجها من الآبار. وتكمن أهمية هذه النقطة في أن هذه المياه المسترجعة غالباً ما تكون ملوثة سواء بكيمياويات سائل التشقيق أو بالملوثات الطبيعية الأخرى.

4-1-2: التأثير على وفرة مصادر المياه

يحتاج التشقيق الهيدروليكي إلى كميات كبيرة من الماء كما ذكر سابقاً، أما خلال سير عملية الإنتاج فإن كميات المياه اللازمة في الحقول أو الآبار تكون محدودة عادة إلا إذا احتاج البئر لتكرار عملية التشقيق بسبب تراجع معدل إنتاجه، وهذه الحالة تمثل في الواقع الوضع الأغلب والأعم بالنسبة لآبار زيت وغاز السجيل إذ يتراجع إنتاجها بسرعة كبيرة مقارنة بالآبار التي تنتج من مكامن تقليدية.

يعود السبب الرئيسي في تراجع معدل الإنتاج من مكامن أو بئر ما إلى انخفاض الضغط الطبقي تدريجياً، ويبلغ متوسط تراجع معدل الإنتاج السنوي للبئر التقليدي حوالي 6% من معدل الإنتاج الأولي، أما في آبار زيت السجيل فقد يصل التراجع إلى 30% في أول سنتين، وهناك حالات تراجع فيها معدل الإنتاج بنسبة 40-50% في السنة الواحدة.

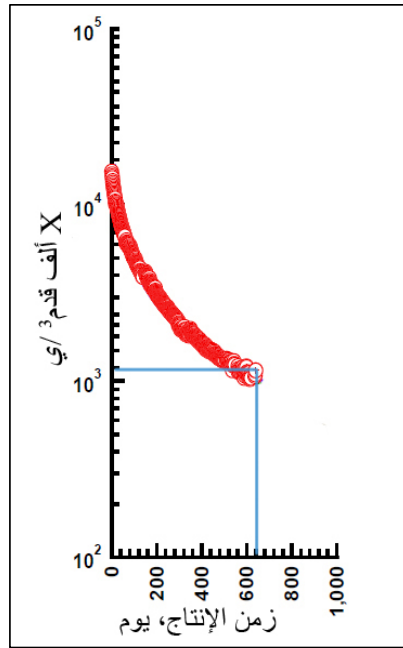
ولتوضيح ذلك يمكن الافتراض* أن بئراً ينتج من مكامن تقليدي وبئر زيت سجيل وضعا على الإنتاج معاً بمعدل 100 ب/ي، فإن بئر النفط التقليدي قد ينتج بمعدل 88.4 ب/ي بعد سنتين، بينما سينتج بئر زيت السجيل بمعدل لا يتجاوز 49 ب/ي بعد سنتين⁶³.

يبين الشكل 19 مثلاً واقعياً لتراجع معدل إنتاج أحد آبار غاز السجيل في Haynesville Shale في الولايات المتحدة الأمريكية⁶⁴، حيث يبدو بوضوح تراجع المعدل من أكثر من 10 مليون قدم³/ي (283 ألف م³/ي) إلى 1 مليون قدم³/ي (28.3 ألف م³/ي) خلال أول سنتين من عمر البئر، أي أن معدل إنتاج البئر انخفض إلى عشر إنتاجه الأولي خلال سنتين فقط.

* مجرد افتراض لحالة مثالية لا تأخذ بعين الاعتبار أي متغيرات فنية أو اقتصادية، الهدف منه توضيح الصورة فقط.

وهنا يلعب العامل الاقتصادي دوره في تحديد متابعة الإنتاج من البئر على وضعه الراهن، أو محاولة رفع معدل إنتاجه إذا كان المعدل الحالي غير مجدٍ اقتصادياً، وبالطبع فإن المقصود برفع معدل الإنتاج في هذه الحالة هو إعادة تشقيق البئر، وبالتالي استخدام المزيد من المياه.

الشكل 19: بيانات الإنتاج اليومي خلال سنتين في أحد آبار Haynesville لغاز السجيل



المصدر: معتل* عن Dilhan و MacNaughton، 2013

4-3-1: أنواع المياه المستخدمة في عمليات التشقيق الهيدروليكي

تستخدم في عمليات التشقيق ثلاثة أنواع من المياه حسب المصدر:

- 1- المياه السطحية
- 2- المياه الجوفية
- 3- المياه المعاد استخدامها من عمليات تشقيق سابقة

* تم إبقاء المخطط بوحدة قدم³/ي كما ورد في المرجع المشار إليه، وسواء تم رسم المخطط بنفس الوحدة أو بوحدة م³/ي، سيبقى الشكل المنحني واحداً.

تحاول الشركات لأسباب عملية واقتصادية استخدام المياه القريبة قدر الإمكان من موقع الحقل في حال توفرها نظراً لأن عملية نقل المياه قد تكون مرتفعة التكاليف، وعادة ما تقوم الشركات بتأمين مياهها بشكل شخصي كأن تحفر آباراً خاصة لإنتاج المياه اللازمة لعملها أو تقوم بنقل المياه بالصحاريج من أقرب نقطة تتوفر فيها الكميات اللازمة للعمل. لكن العديد من الشركات تقوم أيضاً باستخدام مياه الشبكة العامة وخاصة في المناطق الصحراوية أو شبه الجافة في الولايات الجنوبية كما هو الحال في غرب تكساس.

وقد أشارت وكالة حماية البيئة الأمريكية EPA في تقرير لها* إلى أن 5% فقط من كميات المياه تأتي من المياه المعاد استخدامها، مع ميل إلى زيادة استخدام هذا النوع من المياه في المناطق التي يصعب التخلص فيها من المياه المنتجة⁶⁵.

ومن الغني عن الذكر أن تأثير استخدام كميات كبيرة من المياه في التشقيق الهيدروليكي على كميات المياه السطحية أو الجوفية يعتمد على التوازن بين السحب من مصادر المياه وبين وفرة هذه المصادر. وتشير وكالة حماية البيئة إلى أن منطقة غرب تكساس على سبيل المثال تعتبر من أكثر المناطق تائراً بهذه النقطة بسبب ارتفاع كميات المياه المستخدمة من جهة، وقلة مصادر المياه وتباعد مواسم الأمطار من جهة أخرى. ونتيجة لشح

* بعد فترة من انطلاق (ثورة السجبل) في الولايات المتحدة الأمريكية، تعالت العديد من الأصوات شاكية من تلوث المياه في المناطق المجاورة للحقول، وازدادت حدة وتيرة هذه الأصوات حتى عام 2009 حين وجه الكونغرس دعوة إلى وكالة حماية البيئة الأمريكية EPA لإجراء دراسة عن التشقيق الهيدروليكي في آبار النفط والغاز وعلاقته بمياه الشرب. بدأت الدراسة عملياً في عام 2010 وتضمنت عدة عناصر من أهمها مشاريع بحثية مستقلة قامت بها الوكالة عن طريق باحثيها أو عن طريق متعاقدين معها، وشملت تحليل البيانات المتاحة ووضع السيناريوهات المتعلقة بها، إضافة إلى التحاليل المخبرية ومراجعة العديد من الحالات التي اشتكت من التلوث. امتدت الدراسة على فترة طويلة كانت وكالة حماية البيئة خلالها تنشر تقارير متابعة تبين فيها سير العمل، وغالباً ما تضمنت إشارة إلى أن مزارع التلوث الناتج عن التشقيق الهيدروليكي غير مؤكدة. لكن التقرير النهائي للدراسة لم يصدر إلا في شهر كانون الأول/ديسمبر عام 2016، أي بعد ست سنوات من بدء الدراسة. وقد ذكرت وكالة حماية البيئة الأمريكية في تقريرها أنها حاولت من خلال الدراسة الإجابة عن الأسئلة التالية:

- 1- ما هو التأثير المحتمل لسحب كميات كبيرة من المياه الجوفية أو السطحية على مياه الشرب؟
- 2- ما هي الآثار المحتملة لحوادث انسكاب سوائل التشقيق الهيدروليكي قرب الآبار على مصادر مياه الشرب؟
- 3- ما هو تأثير عمليات التشقيق الهيدروليكي (الحقن) على مصادر مياه الشرب؟
- 4- هو التأثير المحتمل لانسكاب المياه المسترجعة والمنتجة على مصادر مياه الشرب؟
- 5- ما هو التأثير المحتمل الناتج عن المعالجة غير الصحيحة للمياه المسترجعة والمنتجة على مصادر مياه الشرب؟

مصادر المياه غربي الولايات المتحدة فقد بدأت بعض الولايات بالفعل في مزج مياه الشرب العذبة بمياه معالجة لتلبية الطلب المتنامي.

وذهب تقرير وكالة حماية البيئة إلى أن نشاطات التشقيق الهيدروليكي وما تستجره من المياه من الشبكة العامة سوف يزيد العبء على هذه الشبكات ويرفع وتيرة الحاجة إلى مزج المياه العذبة بغيرها، إذ بالرغم من أن معظم الآبار التي احتاجت للتشقيق الهيدروليكي قد حفرت بعيداً عن مصادر الشبكة العامة للمياه بين عامي 2000 و2013، إلا أن 21,900 بئراً حفرت على بعد لا يزيد عن 1.6 كم من أحد مصادر المياه (خزان أرضي، ينبوع، بئر ماء)، وأشار التقرير إلى أن 6,800 مصدر لمياه الشرب تخدم 8.6 مليون نسمة سنوياً حفرت آبار مجاورة لها. كما أن 3.8 مليون نسمة من سكان الضواحي الذين يحصلون على مياه الشرب من مصادر خاصة (آبار ماء أو ينابيع ضمن أراضيهم) حفر بئر واحد على الأقل قريباً منهم.

وتسبب سحب المياه لاستخدامها في عمليات التشقيق الهيدروليكي في جفاف آبار مياه الشرب تماماً في مدينة Barnhart في ولاية تكساس، وجفت الآبار أيضاً في مدينة Carlsbad في نيو مكسيكو عام 2013.

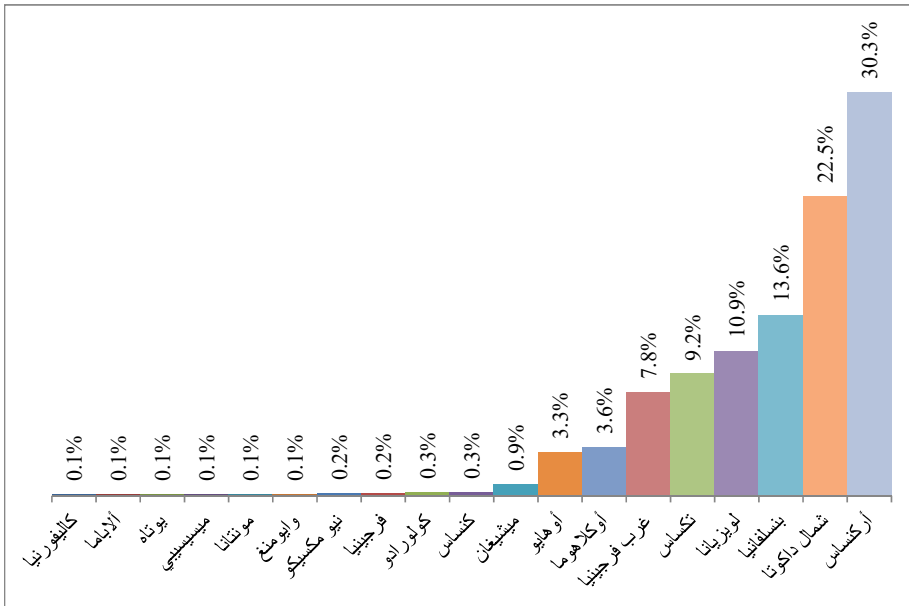
4-1-4: نسبة استهلاك المياه في التشقيق الهيدروليكي

لابد قبل السير قدماً من الإجابة على سؤال هام هو: كم تبلغ نسبة الماء المستهلك في عمليات التشقيق الهيدروليكي مقارنة مع استخداماته الأخرى؟

في معرض الإجابة على هذا السؤال تؤكد وكالة حماية البيئة أن كميات المياه المستهلكة في عمليات التشقيق الهيدروليكي تشكل 0.1% فقط من كميات المياه المستخدمة عموماً، لكن هذا الرقم ليس معبراً تماماً عن واقع الحال في كل مكان، إذ يبين الشكل 20 أن بعض الولايات استهلكت أكثر من 30% من المياه لعمليات التشقيق الهيدروليكي مقابل نحو 70% لكل الاستخدامات الأخرى من شرب وري وصناعات الخ.

وحتى هذه القيم الوسطية التي تم استخلاصها من جداول استخدامات المياه المدرجة في دراسة وكالة حماية البيئة⁶⁶ لا تمثل الواقع الفعلي بشكل دقيق لجميع عمليات التشقيق، فعلى سبيل المثال بلغ استخدام المياه للتشقيق حوالي 169% في مقاطعة Van Buren في ولاية أركنساس، وفي مقاطعة Mountrail في ولاية شمال داكوتا، كانت كميات المياه المستخدمة للتشقيق معادلة تقريباً (98.3%) من كل كميات المياه المستخدمة في مجالات الحياة الأخرى بين عامي 2011 و2012، أما في مقاطعة McMullen في ولاية تكساس فشكلت كميات المياه المستخدمة للتشقيق الهيدروليكي أكثر من ثلاثة أضعاف ونصف (350.4%) من الاستخدامات الأخرى للمياه.

الشكل 20: نسبة الماء المستهلك في عمليات التشقيق مقارنة بإجمالي كميات المياه المستخدمة في بعض الولايات خلال عامي 2011 و2012



إدارة الشؤون الفنية، أوباك، بناء على قيم وسطية استخلصت من جداول استخدامات المياه حسب المقاطعة في دراسة EPA، 2016

4-2: تأثير المياه المسترجعة من عمليات التشقيق

لا يرقى الشك إلى أن مصادر المياه تمثل إشكالية قد تعيق تطوير مصادر زيت وغاز السجيل سواء من ناحية وفرة أو ندرة هذه المصادر، أو التأثير السلبي عليها نتيجة عملية التشقيق بحد ذاتها أو نتيجة إدارة المياه المسترجعة بعد وضع البئر على الإنتاج. وربما تساهم التطورات التقنية المتسارعة في الحد من التأثيرات السلبية، لكن إدارة المياه عموماً تتأثر بأكثر من التطورات التقنية فقط، إذ أن كلفة معالجة المياه والتخلص منها، والنواظم البيئية والوضع الجيولوجي للحقل أو لمكان تصريف المياه، كلها عوامل تضاف إلى مشكلة المياه.

مع تراجع أسعار النفط بعد عام 2014، ومحاولة الشركات الحد من النفقات قدر الإمكان، ومع التطورات التقنية المتلاحقة، كان من المتوقع أن تتراجع كميات المياه المستخدمة في عمليات التشقيق، لكن الواقع أثبت العكس، إذ أن كمية المياه المستخدمة ارتفعت، وهذا ما يمكن ملاحظته جلياً من خلال المثال المبين في الشكل 21، حيث ارتفع وسطي كمية المياه المستخدمة في عملية التشقيق الواحدة في تكساس من 110 آلاف برميل إلى أكثر من 145 ألف برميل، كما ارتفعت في شمال داكوتا إلى حدود 130 ألف برميل⁶⁷.

هناك العديد من التبريرات التي تحاول تفسير ارتفاع كميات المياه المستخدمة في التشقيق للبئر الواحد، مثل زيادة طول الجنوع الأفقية المحفورة، لكن هذا التبرير غير كافٍ عملياً وأغلب الظن أن جزءاً لا يستهان به من السبب يعود إلى أن العديد من الشركات حفرت المكامن ذات المواصفات الخزنينة الجيدة في البداية، بينما اتجهت لاحقاً إلى النطاقات ذات المواصفات الخزنينة الأقل جودة والتي تحتاج إلى مراحل تشقيق أكثر وكميات مياه أكبر.

الشكل 21: كميات المياه المستخدمة في عمليات التشقيق في تكساس وشمال داكوتا



المصدر: معدل عن Scott Rothbarth، 2016

عند وضع البئر على الإنتاج بعد انتهاء عملية التشقيق كلياً أو جزئياً، فإن أول ما يتم إنتاجه هو جزء من كميات الماء التي استخدمت لعملية التشقيق، ويتم عادة تخزين الماء المنتج (المياه الطبقيّة والمياه الراجعة) على السطح في منشآت تخزين قد تكون بركاً مفتوحة أو خزانات مغلقة، وهذا الماء إما أن يحقن في الآبار أو يعالج للتخلص من الملوثات ويتم تصريفه، أو يعاد استخدامه، وقد يترك أحياناً في البرك المفتوحة حتى يتبخر أو يتسرب إلى باطن الأرض. ويمكن أن تحدث تسربات على موقع البئر نتيجة للأخطاء البشرية أو تعطل المعدات أو تسريب الأنابيب، خاصة أن بعض شبكات الأنابيب تصل عدة آبار بخطوط مشتركة إلى برك التجميع. أما في الحقول التي لا تتوفر فيها منشآت سطحية للتخلص من المياه، فيجري عادة نقل المياه بالصهاريج، ويمكن لهذه الصهاريج أن تتعرض لحوادث تؤدي إلى تسريب حمولتها.

تختلف مواصفات المياه المنتجة وحجمها من بئر لآخر ومن تشكيلة لأخرى، كما تتغير مواصفاتها وكمياتها مع تغير الزمن. فعامل الإنتاج يتضمن كمية المياه المحقونة ونوع الهيدروكربونات المنتجة وموقع التشكيلة المنتجة ضمن المكمن. أما تأثير التشكيلة المنتجة فيتعلق بضغط هذه التشكيلة، وبنوعيتها وتأثير ذلك على الضغط الشعري لصخورها، وعلاقتها مع باقي التشكيلات في المكمن. وهناك أيضاً عوامل أخرى مثل تكامل المعدات البئرية، أو الاتصال الهيدروجيولوجي بين الآبار.

يرى (Byrnes، 2011) ⁶⁸ أن العمليات التي تسمح للنفط أو الغاز بالحركة ترتبط بالشروط المتعلقة بسطح الشقوق، حيث يتم جريان السائل على طول الشق عبر ثلاث مراحل:

- 1- إجبار السائل على التسرب ضمن المكمن، وذلك فور بدء عملية الحقن.
- 2- تسرب السائل ضمن المكمن عند إغلاق البئر بعد عملية التحفيز نتيجة للضغط الشعري.
- 3- تحرك السائل من المكمن بعد فتح البئر وتخفيض الضغط فيه.

يعتمد طول المرحلة الثالثة (وبالتالي كمية المياه المنتجة) على عدة عوامل مثل كمية السائل المحقون في البئر، النفاذية الكلية والنفاذية الفعالة للتشكيلة، خواص الضغط الشعري لصخور المكمن، الضغط قرب سطح الشقوق.

تشكل المياه التي تم استخدامها في عمليات التشقيب الهيدروليكي (المياه الراجعة*) جزءاً من المياه المنتجة، بينما تشكل المياه المرافقة (المياه التي يتم إنتاجها مع الهيدروكربون من المكمن) الجزء الآخر. تطلق تسمية (المياه المنتجة) على كلا النوعين، وهذه المياه المنتجة ترتفع ملوحتها تدريجياً خلال الإنتاج بسبب ارتفاع نسبة المياه المرافقة، مما يزيد من صعوبة التمييز بين النوعين المنتجين من المياه.

* Flowback water.

ومثلها مثل كميات المياه المستخدمة في التشقيق من شبه المستحيل تحديد رقم يعبر عن وسطي كميات المياه المسترجعة من كل بئر، وإن كانت الصناعة البترولية قد عرضت نسباً مختلفة في هذا المجال، إذ يتم في المتوسط استرجاع ما يتراوح بين 15-30-40-75% من هذه المياه، أي أن بئراً احتاج إلى 100 ألف برميل من الماء لتشقيقه قد ينتج ما يتراوح بين 15,000-75,000 برميل من مياه التشقيق مع باقي المياه الطبقيّة التي يتم إنتاجها.

يبين المثال الموضح في **الجدول 14** والمستخلص من بيانات نشرتها شركة Hart Energy⁶⁹ عام 2016 كميات المياه الفعلية التي تم إنتاجها من بعض آبار زيت السجيل في الولايات المتحدة بين شهري تموز/يوليو ونشرين الأول/أكتوبر 2016، ويلاحظ أن كميات المياه المنتجة شكلت 84% من إجمالي إنتاج السوائل من البئر في بعض الحالات، أي أن كل 100 برميل من السائل المنتج كان منها 84 برميل ماء.

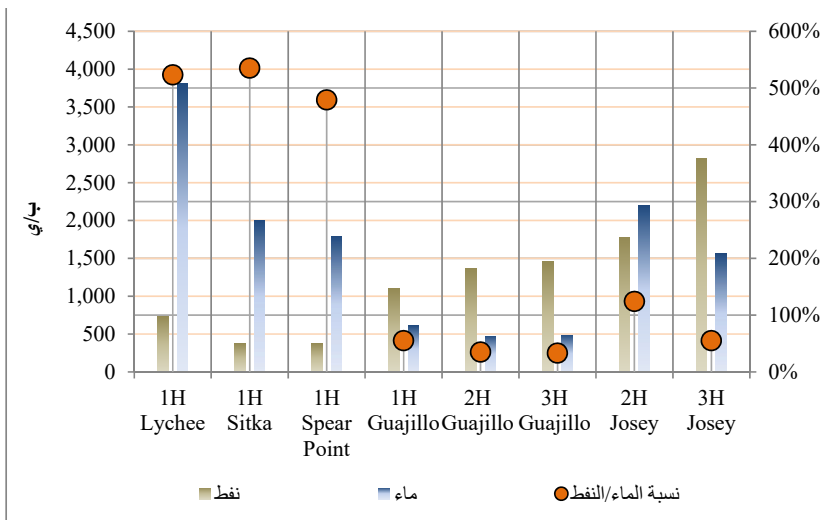
ويوضح الجدول أن كميات المياه تجاوزت خمسة أضعاف كميات النفط في بعض الآبار في منطقة نيو مكسيكو، وكانت أقل من ذلك في مناطق أخرى، لكن نسبة الماء إلى النفط لم تقل عن 33% كما هو موضح في **الشكل 22**.

الجدول 14: إنتاج بعض آبار زيت السجيل في الولايات المتحدة

البنر	المنطقة	برميل		نسبة الماء/إجمالي السائل %
		نفط	غاز	
#1H Lychee BWS State Com	نيو مكسيكو	729	29	%84
#1H Sitka BSI State Com		373	7	%84
#1H Spear Point 1H	جنوب تكساس	374	3	%83
#1H Guajillo Unit 12 South	تكساس	1105	29	%36
#2H Guajillo Unit 12 South		1364	34	%26
#3H Guajillo Unit 12 South		1455	37	%25
#2H Josey	جنوب تكساس	1772	38	%55
#3H Josey		2813	65	%36

مصدر البيانات: Hart Energy، 2016

الشكل 22: نسبة الماء إلى النفط في بعض آبار زيت السجيل في الولايات المتحدة



مصدر البيانات: Hart Energy، 2016

أما الجدول 15 فيبين كميات المياه المنتجة خلال عشرة أيام بعد التشقيق الهيدروليكي⁷⁰ في بعض التشكيلات في الولايات المتحدة الأمريكية.

الجدول 15: كميات المياه المنتجة خلال عشرة أيام بعد التشقيق الهيدروليكي في بعض التشكيلات في الولايات المتحدة الأمريكية

التقدير الأعلى	التقدير الأدنى	المياه المنتجة خلال 10 أيام (برميل)		كمية المياه المستخدمة للتشقيق (برميل)	التشكيلة
		التقدير الأعلى	التقدير الأدنى		
نوعية الإنتاج: غاز جاف					
29	9	31,794	9,538	108,100	Barnett
22	7	31,794	9,538	143,073	Marcellus
5		7,949		171,688	Haynesville
نوعية الإنتاج: غاز، نفط، متكثفات					
48		31,794		66,768	Mississippi Lime
37	11	31,794	9,538	85,844	Cleveland/Tonkaw
27	8	31,794	9,538	117,638	Niobrara
26	8	31,794	9,538	120,818	Utica
21	6	31,794	9,538	152,612	Granite Wash
20	6	31,794	9,538	155,791	Eagle Ford

المصدر: Mantell، 2013

ورغم أن العديد من المصادر تشير إلى أن محتوى سائل التشقيق من المواد الكيميائية لا يمثل أكثر من 0.5-1% من السائل*، إلا أن كمية سائل التشقيق الكبيرة تعني بالتالي وجود كمية كبيرة من المواد الكيميائية، فلو طبقت النسبة العامة 0.5% مثلاً على بيانات كميات المياه المستخدمة في التشقيق من الجدول 5 (كميات المياه اللازمة للحفر والتشقيق الهيدروليكي في بعض منظومات غاز السجيل)، سيلاحظ على سبيل المثال في الجدول 16 أن كل بئر في منظومة Marcellus في الولايات المتحدة الأمريكية يحتاج إلى نحو 874 برميل من المواد الكيميائية، وإذ جرى استرجاع 40% من كمية المياه المحقونة، فهذا يعني نظرياً وجود نحو 336 برميل من المواد الكيميائية ضمن المياه المسترجعة، وبعض هذه المواد كما ذكر هي مواد سامة، كما أن هذا الماء قد يكون محملاً بمواد أخرى من التشكيلة المنتجة نفسها، وقد يحتوي على كميات من النفط إذ نادراً ما تصل فعالية الفواصل المستخدمة على رؤوس الآبار إلى 100%. ومع أن هذه النسب هي نسب نظرية†، إلا أنها قد تساهم في إعطاء تصوّر عن حجم تلوث الماء المسترجع.

الجدول 16: كمية المواد الكيميائية في سائل التشقيق الهيدروليكي

المنظومة	كمية الماء اللازمة لتشقيق البئر برميل	حجم المواد الكيميائية برميل
Barnett (1)	73,130	366
Barnett (2)	120,817	604
Fayetteville (1)	92,207	461
Fayetteville (2)	155,795	779
Haynesville (1)	85,848	429
Haynesville (2)	158,970	795
Marcellus (1)	120,817	604
Marcellus (2)	174,871	874

إدارة الشؤون الفنية، أوابك، بناء على بيانات الجدول 5، بافتراض أن المواد الكيميائية تشكل 0.5% من كمية السائل

* هذه نسبة عامة فهناك تقارير عن تراكيز تبلغ أضعاف هذا الرقم في بعض الحالات.

† جرى اعتبار أن المواد الداخلة في تركيب سائل التشقيق هي مواد سائلة بهدف التبسيط



يبين الجدول 17 نتائج نموذجية لتحليل عينة مياه مسترجعة من بئر جرى تشقيقه في ولاية بنسلفانيا الأمريكية⁷¹ عام 2010، ويلاحظ أن كمية المعادن المختلفة المنحلة في الماء تزيد عن 195 كغ في المتر المكعب أو 23 كغ في البرميل.

الجدول 17: تحليل عينة من مياه مسترجعة بعد التشقيق في ولاية بنسلفانيا

المادة	مغ / ل
ألنيوم	3
باريوم	6,500
كاليوم	18,000
كلوريد	116,900
حديد	60
ليثيوم	150
مغنزيوم	1,300
منغنيز	5
صوديوم	48,000
سترونيوم	4,000
سلفات	130
إجمالي المواد المنحلة	195,048

المصدر: Keister، 2010

إضافة إلى ذلك لوحظ أن نسبة النظائر المشعة الطبيعية في المياه المنتجة مرتفعة مقارنة مع تلك الموجودة في المياه العادية⁷². ويعود سبب ذلك على الأغلب إلى أن صخور السجيل تحتوي على نسب مرتفعة من العناصر المشعة الطبيعية مقارنة مع باقي أنواع الصخور، وتنتقل هذه العناصر إلى المياه المنتجة بعد تلامسها مع صخور المكن.

كما أن اندفاع الآبار قد يكون أحد أسباب تلوث المياه الجوفية أو السطحية، ويمكن الدلالة على ذلك من خلال مثال عن اندفاع بئر الغاز PHC في مقاطعة Clearfield ضمن ولاية Pennsylvania يومي 3 و4 يونيو/حزيران 2010، حيث تسبب عدم الالتزام بمعايير الأمان خلال التشقيق الهيدروليكي للبئر في اندفاع

132 ألف لتر من سائل التشقيق (أكثر من 1100 برميل) إلى السطح مع كميات من الغاز لم يتم تحديدها. وقد بينت التحقيقات اللاحقة أن الاندفاع حصل خلال حفر السدادة الاسمنتية المستخدمة لعزل أحد مراحل التشقيق، كما أن مانع الاندفاع على رأس البئر لم يكن يعمل⁷³.

وسجلت إدارة حماية المياه في ولاية بنسلفانيا عدة حوادث لتسرب المياه من بحيرات التجميع وصل بعضها إلى 1850 برميل⁷⁴.

وفي دراسة قامت بها جامعة Duke في ولاية شمال كارولينا في الولايات المتحدة⁷⁵، تبين أن حوادث انسكاب المياه خلال عمليات التشقيق الهيدروليكي في شمال داكوتا قد تسببت في تلوث واسع النطاق للتربة والمياه السطحية، حيث تم العثور على مواد كيميائية مختلفة مثل الأمونيوم، والسيلينيوم، والرصاص. كما لاحظت الدراسة ارتفاع نسبة المواد الكيميائية في الجداول القريبة من مواقع الانسكاب بحيث أصبحت مياهها غير صالحة للشرب. وقد عثر على آثار من المواد الكيميائية في أحد مواقع الدراسة بعد أربع سنوات من حصول الانسكاب.

تبين الأرقام السابقة أهمية معالجة المياه المسترجعة من عمليات التشقيق، مع التنويه إلى أن المكنن نفسه يساهم في تلويث المياه، كما أن المياه المنتجة ليست مياه التشقيق فقط، بل تمتزج بالمياه الطباقية والتي تحتوي بدورها على عناصر كيميائية مختلفة، وخاصة في آبار السجيل التي تشكل الهدف الرئيسي لعمليات التشقيق، وتشير دراسة أعدتها مؤسسة Chesapeake Energy⁷⁶ لتقييم المياه المنتجة من آبار زيت وغاز السجيل التي تديرها، إلى أن:

- ◀ المياه الطباقية المنتجة تختلف بين منظومات السجيل وتختلف من بئر إلى آخر.
- ◀ تؤثر الحرارة العالية والضغط المرتفع على مكونات سائل التشقيق ويمكن لها أن تسبب مشاكل تتعلق بسلامة التعامل مع هذه السوائل بعد إنتاجها.

◀ هناك علاقة وثيقة بين محتوى السائل من المواد الصلبة المنحلة فيه، وبين كلٍ من الكلوريد والشحنات الموجبة ثنائية التكافؤ، وتراكم هذه العناصر مرتبطة ببعضها ومرتبطة بكمية المياه.

◀ تركيز المواد في سائل التشقيق المنتج يتعلق بتركيز هذه المواد الموجود بشكل طبيعي في المكن.

ويمكن التنويه هنا إلى أن أحد الأمثلة التي قدمتها الشركة في الدراسة أشارت إلى أنها استخدمت أكثر من 126 ألف برميل من الماء لحفر وتشقيق بئر واحد، واستخدمت نحو 109 آلاف برميل من الماء لتشقيق بئر آخر.

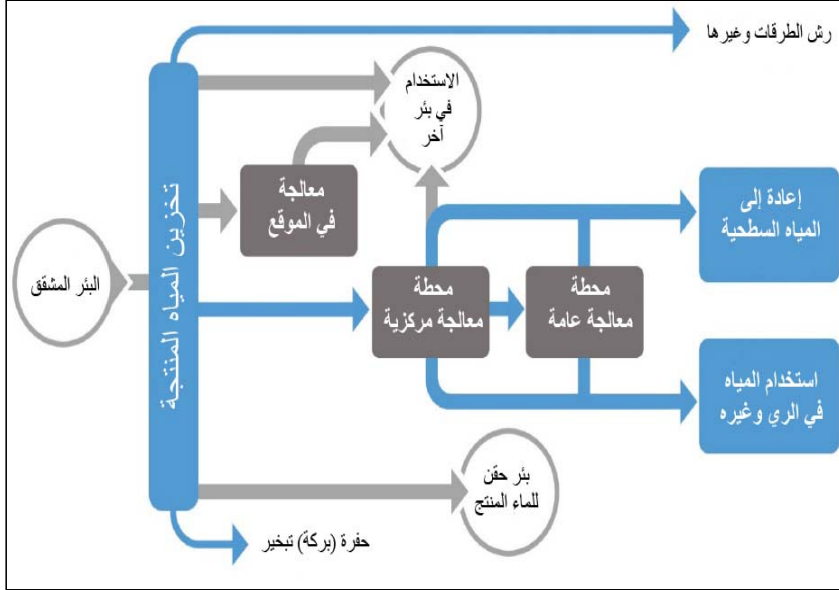
لذلك يعتبر التخلص من المياه أحد التحديات التي تساهم في إضافة المزيد من التكاليف إلى عمليات إنتاج زيت أو غاز السجيل، ويجري تحميل هذه التكاليف على تكلفة ما يتم إنتاجه من الزيت أو الغاز.

3-4: التعامل مع المياه المنتجة

رغم أن طرق التعامل مع المياه المنتجة ليس من أولويات هذه الدراسة، إلا أن التطرق للموضوع ولو بشكل جزئي يمكنه أن يعكس مدى الصعوبات التي تواجهها الصناعة البترولية في هذا المجال، كما يمكنه أن يثري الفكرة العامة حول التأثيرات البيئية للتشقيق الهيدروليكي.

تتبع الشركات عدة استراتيجيات في مجال التعامل مع المياه المنتجة، ولعل أكثر هذه الاستراتيجيات شيوعاً هي عملية حقن الماء في آبار مخصصة لذلك، وقد يعاد استخدام المياه المنتجة كما ذكر سابقاً مع تطبيق مستويات مختلفة من المعالجة على هذه المياه، كما تتبع طرق أخرى تختلف حسب الشركة وحسب الحقل الذي تديره، ويبين **الشكل 23** بعض الطرق التي يتم التعامل من خلالها مع المياه المنتجة.

الشكل 23: مخطط لاستراتيجيات التعامل مع المياه الناتجة عن عمليات التشقيق الهيدروليكي



المصدر: EPA، 2015

ويبين الجدول 18 استراتيجيات التعامل مع المياه في عشرة أحواض لزيت وغاز السجيل في الولايات المتحدة الأمريكية حسب دراسة وكالة حماية البيئة التي أقرت بشح المعلومات المتاحة لها في هذا المجال، وإن كانت البيانات المتوفرة تؤكد أن إعادة الحقن هي الطريقة الأكثر استخداماً، بينما تحتل عملية المعالجة في محطة مركزية الترتيب الأخير بين الطرق المتبعة.

الجدول 18: استراتيجيات التعامل مع المياه المنتجة من عمليات التشقيق الهيدروليكي في بعض أحواض الولايات المتحدة الأمريكية

المعالجة في محطة مركزية	الحقن في آبار خاصة	إعادة الاستخدام	نوع الإنتاج	التشكيلة	الحوض
	$\leq 50\%$		غاز سجيل	Antrim	Michigan
$> 50\%$ و $< 10\%$	$> 50\%$ و $< 10\%$	$\leq 50\%$	غاز سجيل	Marcellus/Utica (PA)	
$> 10\%$	$> 50\%$ و $< 10\%$	$\leq 50\%$	زيت/غاز سجيل	Marcellus/Utica (WV)	
$> 10\%$	$\leq 50\%$	$> 50\%$ و $< 10\%$	زيت/غاز سجيل	Marcellus/Utica (OH)	Appalachian
$> 10\%$ *	$\leq 50\%$	$> 50\%$ و $< 10\%$	غاز كتيم#	Granite Wash	
	$\leq 50\%$	$> 10\%$	نفط كتيم#	Mississippi Lime	
$> 10\%$ *	$\leq 50\%$	$> 10\%$	زيت/غاز سجيل	Woodford; Cana; Caney	Anadarko
$> 10\%$ *	$> 50\%$ و $< 10\%$	$> 50\%$ و $< 10\%$	غاز سجيل	Fayetteville	Arkoma
$> 10\%$ *	$\leq 50\%$	$> 10\%$	غاز سجيل	Barnett	Fort Worth
$> 10\%$ *	$\leq 50\%$	$> 10\%$	زيت/غاز كتيم#	Avalon/Bone Springs, Wolfcamp, Spraberry	Permian
	$\leq 50\%$	$> 10\%$	غاز كتيم#	Haynesville	TX-LA-MS Salt
$> 10\%$	$\leq 50\%$	$> 10\%$	زيت/غاز سجيل	Eagle Ford, Pearsall	West Gulf
$> 10\%$	$\leq 50\%$	$> 10\%$	زيت/غاز سجيل	Niobrara	Denver Julesburg
$> 10\%$	$> 50\%$ و $< 10\%$	$> 10\%$	غاز كتيم#	Mesaverde/Lance	Piceance; Green River
	$\leq 50\%$	$> 10\%$	زيت سجيل	Bakken	Williston

* تتم المعالجة في محطات مملوكة للشركة المالكة للحقل
النفط أو الغاز الكتيم تعبير مجازي عن إنتاج النفط أو الغاز من الطبقات ذات النفاذية شديدة الانخفاض، لكنها ليست من السجيل
المصدر: معدل عن EPA، 2015

1-3-4: حقن المياه

يشير تقرير نشره مخبر* Argonne National Laboratory عام 2009، أن الصناعة البترولية في الولايات المتحدة الأمريكية أنتجت عام 2007 أكثر من 21 مليار برميل من الماء⁷⁷، تم حقن 40% منها في آبار حقن مخصصة لذلك. وتعتبر هذه تقنية الحقن من أسهل وأرخص الوسائل للتخلص من المياه المنتجة ما لم يكن هناك حاجة لنقل هذه المياه إلى موقع آبار الحقن. وفي نفس المقام تشير بيانات وكالة حماية البيئة إلى أن عدد آبار الحقن بلغ أكثر من 27,137 بئراً بين عامي 2012 و2014، وبلغ معدل حقن الماء في البئر الواحد نحو 1284 ب/ي.

* مخبر أبحاث غير ربحي يتبع لإدارة الطاقة في جامعة شيكاغو الأمريكية.

2-3-4: محطات المعالجة المركزية

وهي محطات تستقبل المخلفات الصناعية من منشآت أخرى وتقوم بمعالجتها بهدف التخلص منها بشكل آمن أو إعادة استخدامها. وحتى عام 2015 كان عدد محطات المعالجة المركزية التي تقبل التعامل مع المياه المسترجعة من عمليات التشقيق 73 محطة، منها 39 محطة في ولاية بنسلفانيا، بينما تتوفر محطتان في ولاية تكساس تعملان على إزالة كل المواد الصلبة المنحلة في المياه TDS*.

3-3-4: إعادة استخدام المياه في عمليات تشقيق جديدة

يمكن أن تتم معالجة المياه المنتجة من عمليات التشقيق وإعادة استخدامها في عمليات تشقيق جديدة، وفي بعض الأحيان يكتفى بترقيد المياه المنتجة فقط وهذا يرتبط بنوعية المياه اللازمة للعملية. وهي تقنية يمكن أن تساهم مبدئياً في تخفيض كلفة التعامل مع المياه المنتجة. لكن إعادة استخدام هذه المياه سيؤدي في النتيجة إلى ارتفاع محتواها من الأملاح والمواد المنحلة الأخرى والمواد الطبيعية المشعة، مما يعني أن هذه المياه لا بد أن تخضع في النهاية لعمليات المعالجة التي ربما تزداد صعوبة بسبب ارتفاع نسبة الشوائب. لذلك تؤخذ عدة نقاط بعين الاعتبار عند تبني تقنية إعادة استخدام المياه المنتجة، ومنها:

- كميات المياه المنتجة مقارنة مع كميات المياه اللازمة للعمليات المستقبلية.
- نوعية المياه المنتجة ومتطلبات معالجتها الحالية واللاحقة في حال إعادة استخدامها.
- الكلفة والفائدة الاقتصادية من إعادة استخدام هذه المياه مقارنة مع استخدام مصادر أخرى أو اتباع تقنية أخرى للتخلص من المياه.

* Total Dissolved Solids Removal.

- توفر التقنيات والبنية التحتية اللازمة لإعادة استخدام المياه أو معالجتها.
- التشريعات والقوانين البيئية في المنطقة.

وربما تكون الكلفة هي أبرز هذه النقاط، حيث يجري تقييم كلفة نقل المياه من موقع البئر إلى موقع منشآت المعالجة ثم العودة بها إلى موقع البئر الجديد، مقارنة مع كلفة التخلص من هذه المياه مباشرة عبر تقنية أخرى. ويقدر تقرير نشره مكتب استصلاح الأراضي التابع لوزارة الداخلية الأمريكية⁷⁸ أن كلفة نقل المياه بالصهاريج تراوحت بين 0.5-8 دولار لكل برميل في عام 2014.

ويمكن الإشارة هنا إلى تقرير نشره معهد تكنولوجيا الغاز* في منتصف عام 2012، وبين فيه أربعة سيناريوهات⁷⁹ متعلقة بالتخلص من المياه، تم ربطها مع الكلفة الوسطية لكل منها، وهي:

- ◀ **السيناريو الأول:** النقل المباشر للمياه للتخلص منها في آبار الحقن العميقة، وتتراوح تكلفة هذه العملية ما بين 1.5-3.5 دولار/البرميل.
- ◀ **السيناريو الثاني:** يتضمن المعالجة الحقلية للمواد الصلبة العالقة في المياه، وإزالة الزيوت والشحوم والبكتيريا (التعقيم) والبوليميرات قبل إعادة استخدام هذه المياه في عمليات تشقيق هيدروليكي جديدة، وتتراوح التكاليف المباشرة لهذه العملية ما بين 1-5 دولار/البرميل.
- ◀ **السيناريو الثالث:** المعالجة في محطة قريبة من الحقل (لمسافة لا تزيد عن 45 كم)، وتتضمن نفس عمليات المعالجة المذكورة في السيناريو السابق، إضافة إلى إمكانية إزالة الكالسيوم والماغنسيوم والباريوم وغيرها من العناصر قبل إعادة استخدام المياه في عمليات تشقيق هيدروليكي جديدة، وتتراوح التكاليف المباشرة لهذه العملية بين 0.5-4 دولار/البرميل.

* منظمة تكنولوجية غير ربحية، مقرها في ولاية إلينوي الأمريكية.

◀ السيناريو الرابع: يتضمن المعالجة الأساسية إضافة إلى نزع المعادن باستخدام التبخير والتقطير، وتتراوح التكاليف المباشرة لهذه العملية ما بين 4- 6.5 دولار/البرميل.

وبطبيعة الحال هناك تكاليف غير مباشرة أيضاً يجري أخذها بعين الاعتبار⁸⁰، وتضاف إلى التكاليف السابقة، مثل تكاليف شق وصيانة الطرق، وتكاليف معالجة تسربات المياه في حال حدوثها.

4-4: تأثير عمليات التشقيق على مياه الشرب

إن لكلٍ من الخطط أو الاستراتيجيات التي تمت الإشارة إليها آنفاً محاذيرها ومخاطرها التي يمكن أن تؤثر على مصادر المياه خلال كل مرحلة من المراحل، فقد تتسرب المياه خلال عمليات النقل أو المعالجة أو تتعرض المنشآت للتعطل، إلى غير ذلك من الأسباب التي تؤدي إلى التأثير على المياه السطحية أو الجوفية.

وعند البحث في شأن تأثير عمليات التشقيق على مياه الشرب، يواجه الباحث (كما هو متوقع) بآراء مختلفة ومتضاربة تعكس غالباً وجهة نظر المستفيد (أو المتضرر) من عمليات التشقيق، كما تعكس في بعض الحالات منظوراً جيوسياسياً لا يخفى على الباحث.

لقد ساهم التشقيق الهيدروليكي بلا ريب في رفع معدل إنتاج النفط والغاز في الولايات المتحدة الأمريكية، لكنه في الوقت نفسه أثار التساؤل عن تأثير هذه العمليات على مصادر المياه، وخاصة على مصادر المياه الخاصة كالأبار القريبة من مواقع التشقيق الهيدروليكي.

وانصب الاهتمام في هذا المجال على احتمال أن تؤدي هذه التقنية إلى اتصال الشقوق من البئر الخاضع لها وصولاً إلى أحواض المياه المجاورة بحيث توجد سبيلاً يمكن للنفط والغاز أن يهاجرا من خلاله.



في معرض الإجابة على هذا التساؤل لا بد من النظر إلى كل حالة على حدة، إذ أن طبقات السجيل تكون عادة بعيدة في باطن الأرض عن الأحواض المائية التي تلوها، وعندما يتم تشقيق الجزء العميق منها فمن المستبعد أن تصل الشقوق الناتجة عن عمليات التشقيق إلى الأحواض المائية. أما عندما يتم تشقيق النطاقات العلوية أو الضحلة من صخور السجيل فتزداد احتمالية اتصال الشقوق مع الحوض المائي.

في تقرير لها عن التشقيق الهيدروليكي في مكامن غاز طبقات الفحم* أعدته عام 2002، نفت وكالة حماية البيئة الأمريكية⁸¹ وجود تأثير على أحواض المياه، وذكرت أن الأدلة والبيانات التي توفرت لها لا تبرر متابعة دراسة الموضوع أساساً.

لكن الشواهد توالى من عدة أماكن، وفي عام 2009 اشتكى سكان مقاطعة Pavilion في ولاية وايومنغ من تغير رائحة وطعم مياه الشرب الواصلة إلى منازلهم، وعزوا ذلك إلى عمليات التشقيق الهيدروليكي في آبار الغاز المنتشرة حولهم. فسارعت وكالة حماية البيئة إلى فتح تحقيق في الموضوع خلصت شواهده الأولية إلى وجود مواد كيميائية سامة في مياه الشرب، لكن التحقيق توقف في عام 2013 وتم تحويله إلى سلطات الولاية بدون نشر النتائج النهائية⁸². إلا أن المسؤول الذي كلفته وكالة حماية البيئة بالملف، والذي بات باحثاً في جامعة ستانفورد نشر في شهر آذار/مارس 2016 دراسة كاملة عن الموضوع في مجلة "الجمعية الكيميائية الأمريكية"[†] ضمنها نتائج التحقيق التي بينت أن مياه الشرب في مقاطعة Pavilion كانت ملوثة بمخلفات عمليات التشقيق الهيدروليكي التي نتجت عن ترقيد المياه في البرك⁸³.

* تستخدم تقنية التشقيق الهيدروليكي في مكامن غاز طبقات الفحم CBM كما تستخدم في مكامن زيت وغاز السجيل وغيرهما.

† American Chemical Society Journal.

وفي دراسة قامت بها جامعة Duke في عام 2011، تبين أن 60 موقعاً في نيويورك وبنسلفانيا وجدت فيها آثار للتلوث بغاز الميثان في مياه الشرب، ولحظت الدراسة أن آبار المياه التي تقع على بعد يقل عن 1 كم من مواقع التشقيق الهيدروليكي بلغت فيها نسبة غاز الميثان 17 ضعف تلك النسبة في الآبار البعيدة عن مواقع التشقيق⁸⁴.

وقد سجلت الصناعة البترولية عام 2013 حادثة غريبة في مجال اندفاع الآبار، وذلك في ولاية نيو مكسيكو، إذ كانت شركة Encana تجري عملية التشقيق الهيدروليكي على أحد آبارها الذي يبعد أقل من 800 م عن بئر عمودي لشركة Parko Oil وينتج باستخدام الضخ التقليدي، حيث تسبب ارتفاع ضغط التشقيق في البئر الأول في اندفاع 200 برميل على الأقل من سائل التشقيق عبر البئر الثاني، وتم تدارك الموقف وإيقاف عملية التشقيق التي أثرت على بنية وتكامل البئر المنتج⁸⁵. يوضح هذا الحدث (بغض النظر عن أسبابه الفنية) تأثير الاتصال الهيدروديناميكي بين الطبقات في باطن الأرض على انتقال الموائع ضمن الشقوق الطبيعية أو ضمن الصخور النفاذة، كما يمكن اعتباره مؤشراً على صحة كثير من الشكاوى حول تلوث مياه الشرب*.

عموماً، وبعد هذه الأمثلة التي تم استعراضها، لا بد من التنويه إلى أن وكالة حماية البيئة في تقريرها الصادر في عام 2016 ذكرت أن عمليات التشقيق الهيدروليكي يمكن لها أن تسبب تلوث مصادر المياه في بعض الحالات، وتتراوح هذه الحالات من مجرد تلوث بسيط مؤقت، إلى حالات شديدة تصبح فيها المياه غير صالحة للشرب أو الاستخدام⁸⁶.

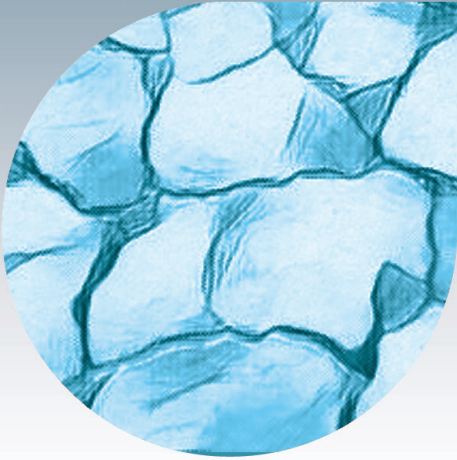
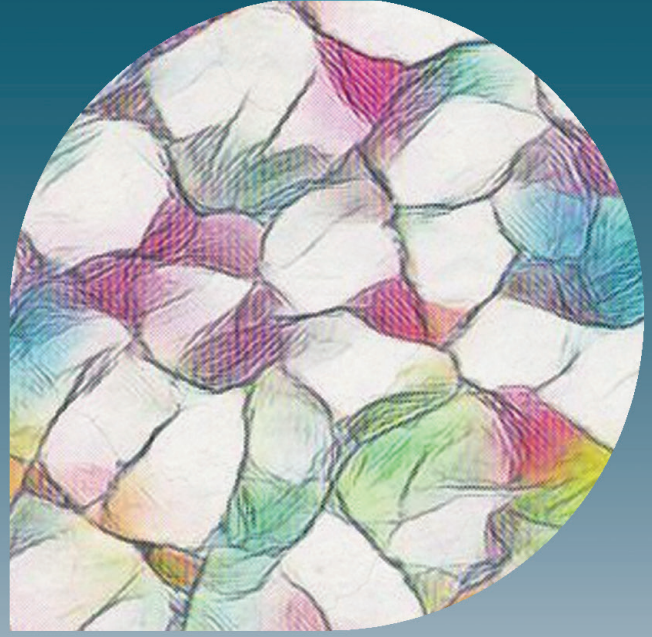
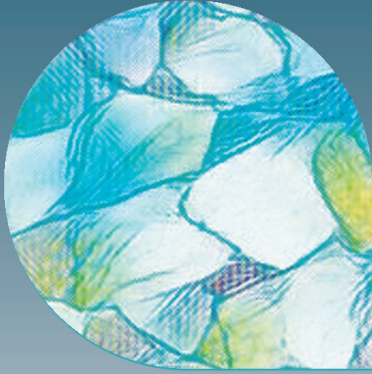
* تتبع معد هذه الدراسة لقاءً مع أحد مسؤولي شركة Parko Oil على محطة KRQE التلفزيونية، ذكر فيه أن البئر المصمم لتحمل ضغوط لا تتجاوز 150 رطل/البوصة المربعة، تعرض لضغط زاد عن 2000 رطل/البوصة المربعة نتيجة عمليات التشقيق المجاورة. اللقاء متاح على موقع اليوتيوب على الرابط: <https://www.youtube.com/watch?v=DPdKZHfAwbq>



لكن لا بد من التنويه أيضاً إلى أن معهد البترول الأمريكي* رفض بشدة تقرير وكالة حماية البيئة مؤكداً أن الصناعة البترولية تتبنى مجموعة من معايير الأمن والسلامة خلال كل خطوة من خطوات عمليات التنشيق الهيدروليكي للعمل على حماية مصادر مياه الشرب⁸⁷.

* يمثل معهد البترول الأمريكي في هذه الحالة مصالح الشركات العاملة في الصناعات البترولية كونها تتبنى المعايير والقياسات التي يصدرها





الفصل الخامس

تأثير عمليات التشقق على الطبيعة

سلط الفصل الرابع الضوء على تأثير عمليات التشقق على المياه ومصادرها، ويتابع الفصل الخامس البحث في تأثير التشقق الهيدروليكي على نواح أخرى في الطبيعة مثل تأثيره على إحداث الزلازل أو التأثير على المنظر العام لمنطقة ما.



الفصل الخامس

تأثير عمليات التشقيق على الطبيعة

1-5: الزلازل

تعالت خلال السنوات القليلة الماضية كثير من الأصوات التي أنحت باللائمة على عمليات التشقيق الهيدروليكي في إحداث زلازل قريباً من مواقع التشقيق، وتفرق النظرة بين منكر ومؤيد، مما يدفع لتسايط الضوء على هذه النقطة. وقبل المتابعة في هذا الأمر، لابد من توضيح أن مدى قوة الهزة⁸⁸ Magnitude المشار إليه فيما سيأتي، هو مقياس يختلف عن مقياس ريختر المعروف، ذلك أنه يعتمد على مقارنة قوة الهزة* مع الطاقة المتحررة عنها مقدرة بما يكافؤها من المتفجرات (TNT)، كما هو مبين في الشكل 24.

الشكل 24: مقياس الزلازل حسب مدى قوة الهزة

قوة الهزة	الطاقة المتحررة (مكافئ متفجرات)
10	56 تريليون كغ
9	1.8 تريليون كغ
8	56 مليار كغ
7	1.8 مليار كغ
6	56 مليون كغ
5	1.8 مليون كغ
4	56 ألف كغ
3	1.8 ألف كغ
2	56 كغ

المصدر: معدل عن إدارة المساحة الجيولوجية في أركنساس

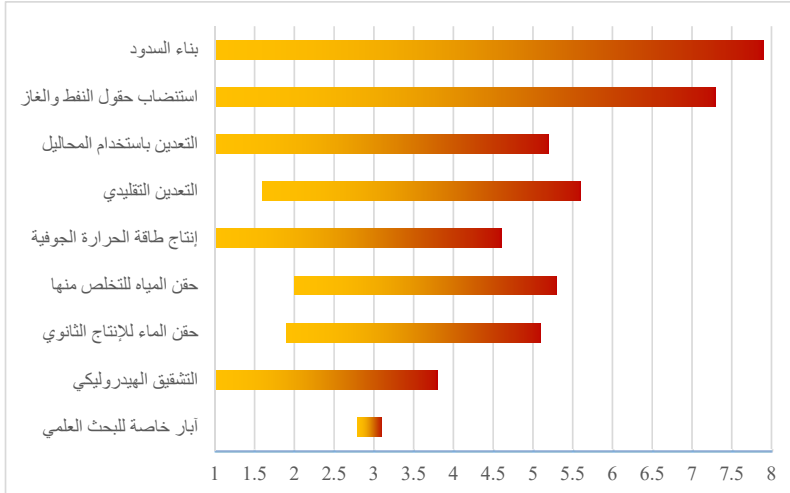
* سيشار لمدى قوة الهزة في هذه الدراسة بالرمز M (Magnitude) متميماً لها عن مقياس شدة ريختر.

1-1-5: كيف يمكن للتشقيق الهيدروليكي أن يتسبب في الزلازل؟

تعرف الحركات النشطة التي تصيب بعض المناطق على سطح الأرض بالزلزالية Seismicity أو النشاط الزلزالي، وعندما ترتبط هذه الزلازل بالنشاطات البشرية، تدعى بالنشاطات الزلزالية المحثوثة أو المحرّضة Induced Seismicity. ورغم أن أصابع الاتهام تشير بكثرة إلى الصناعة البترولية كأحد مسببات الزلزالية الحثية، إلا أن صناعات أخرى سبق وأن وضعت تحت مجهر البحث في هذا المجال، ومنها صناعة التعدين Mining، وإنتاج الطاقة الحرارية الجوفية، والبناء، والتفجيرات النووية الاختبارية تحت سطح الأرض⁸⁹.

وفي هذا المجال قام باحثون من جامعتي⁹⁰ Durham و Keele البريطانيتين بدراسة 198 من الزلازل التي تم رصدها بين عامي 1929 و 2013، وقسمت حسب قوتها والمنشأ الذي تسبب بها إلى تسع شرائح يبينها الشكل 25، والذي يلاحظ منه أن حقن المياه للتخلص منها تسبب بهزات تراوحت قوتها بين 2- 5.3 M، وتسببت عمليات التشقيق الهيدروليكي بهزات تراوحت قوتها بين 1- 3.8 M.

الشكل 25: توزيع بعض الزلازل حسب قوتها ومنشأها



المصدر: إدارة الشؤون الفنية، أوابك، بناء على بيانات من دراسة Richard et al 2013

ولم تسلم عمليات الإنتاج التقليدي للنفط من الاتهام في بعض الأحيان، إذ تشير دراسة نشرتها الجمعية الأمريكية للزلازل* في عام 2016 إلى أن هناك العديد من الشواهد التي تربط بين مجموعة من الزلازل التي ضربت لوس أنجلوس في ولاية كاليفورنيا في القرن الماضي بين عامي 1920 و1935، وبين إنتاج النفط من حقول قريبة من مراكز هذه الزلازل⁹¹.

لكن دراسات سابقة أشارت إلى موضوع النشاطات الزلزالية المحرصة، وأنحت أحدها باللائمة على حقن سوائل مخلفات عسكرية في منطقة Rocky Mountain في ولاية كولورادو في ستينات القرن الماضي، حيث حقنت السوائل في بئر عمقه 3671 م، مما نتج عنه حدوث هزة Denver Earthquake والتي بلغت قوتها **M 4.8** واعتبرت إحدى أكثر الهزات الأرضية تدميراً في تلك المنطقة، وقد منع لاحقاً استخدام ذلك البئر⁹².

لا تزال آلية تأثير عمليات الحقن على تحريض حدوث الهزات الأرضية غامضة بعض الشيء، وإن كانت أكثر التفسيرات شيوعاً تتعلق بما يمكن تسميته إعادة إحياء الفوالق Faults Rejuvenation، ذلك أن الفالق أو الصدع يتحرك عندما تتغلب إجهادات القص Shear Stress على قوى الاحتكاك بين السطوح والتي تمنع الفالق من الحركة، ويؤدي تحرك الفوالق إلى إحداث الزلازل. وهذا التفسير يعني أن عمليات الحقن سواء للتشقيق أو لتخزين المياه، يمكنها أن تعمل وفق عدة آليات⁹³:

- 1- زيادة إجهاد القص نتيجة عمليات الحقن التي تسبب اضطراب الضغط وانتقال موجات منه عبر الصخر.
- 2- مرور السوائل عبر المسام يؤدي إلى تشوه الصخر Deformation أو انتفاخه Inflation، وهذا يزيد من الضغط على سطح الفالق.
- 3- تخفيض الاحتكاك بين سطح الفالق والسطوح المجاورة نتيجة وجود الماء.

* Seismological Society of America.

يمكن دعم هذا التفسير بالاستناد إلى أن حركة المهل Magma في البراكين تؤدي إلى حدوث نشاطات زلزالية بسبب الإجهادات الهائلة التي تنتج عن حركتها، كما تدعمه بعض الشواهد التي تشير إلى حدوث هزات ميكروية وحركات للفوالق قرب الحقول التي تستخدم للحصول على طاقة الحرارة الجوفية⁹⁴ Geothermal Fields.

2-1-5: التشقيق الهيدروليكي والنشاط الزلزالي المحرّض

تصاعدت وتيرة المخاوف من الزلازل المرتبطة بإنتاج النفط والغاز في مطلع القرن الحادي والعشرين بعد أن ارتفع عدد الزلازل في المناطق المجاورة لحقول النفط والغاز، وخاصة في أو كلاهوما، وأركنساس، وأوهايو، وكولورادو، وتكساس حسبما بينته دراسة⁹⁵ أجرتها المساحة الجيولوجية في كنساس والمرتبطة بدورها بجامعة كنساس.

تذهب هذه الدراسة إلى أن التشقيق الهيدروليكي يشكل قطب الرحي في الجدل الدائر حول الزلزالية المحرّضة في الولايات المتحدة الأمريكية، وتؤكد أن الزلازل المكروية Microearthquakes ذات مدى القوة الصغير جداً تحدث فعلياً خلال التشقيق الهيدروليكي، حيث يعمل الجيولوجيون عادة على تحديد تلك الهزات لمساعدتهم على تحري موقع الشقوق المتشكلة من جهة، ولقياس مدى الإجهاد Stress الذي يتعرض له الصخر من جهة أخرى.

أما الزلازل التي يمكن الشعور بها فلم توثق إلا أعداد قليلة جداً منها، وتتضمن خمس هزات في أوهايو سجلت في شهر آذار/مارس عام 2014، وتراوحت قوتها بين 2.1-3 M. وسجلت سلسلة من الهزات في بريطانيا عام 2011 كان مدى أقواها 2.3، كما سجلت سلسلة هزات تراوحت قوتها بين 2.2-3.8 M في منطقة نائية من حوض Horn River في كولومبيا البريطانية في كندا بين عامي 2009 و2011.

ويعتقد أيضاً أن التشقيق الهيدروليكي كان السبب وراء الزلزال⁹⁶ الذي ضرب جنوب وسط أو كلاهوما عام 2011 ووصلت قوته إلى 2.9 M.



وتشير المساحة الجيولوجية الأمريكية إلى أن عدد الهزات التي ضربت أوكلاهوما بين 2009 و2014 بلغ وسطياً 40 هزة في السنة، بينما كان المعدل 1-3 هزات في السنة بين عامي 1978-2008، وليس من المستهجن ربط ذلك مع 4500 بئر تم إجراء عمليات التشقيق الهيدروليكي عليها في الولاية خلال السنوات الأخيرة.

ويبدو أن عملية التشقيق بحد ذاتها نادراً ما تتسبب بهزات أرضية محسوسة، ذلك أن عملية الحقن الفعلية تستمر فترة محدودة فقط وتؤثر على الصخور المحيطة بنطاق الحقن من البئر. لكن الذي يمكن أن يكون له التأثير الأكبر في هذا المجال هو حقن الماء للتخلص منه ذلك أنها عملية تستمر لفترة طويلة وغالباً ما يرافقها هزات محرّضة.

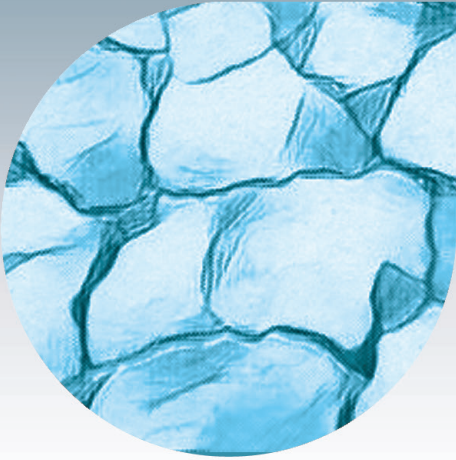
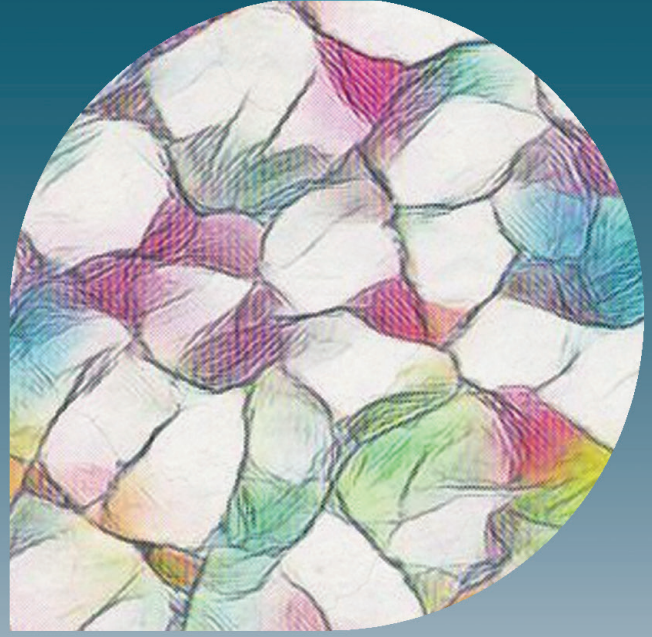
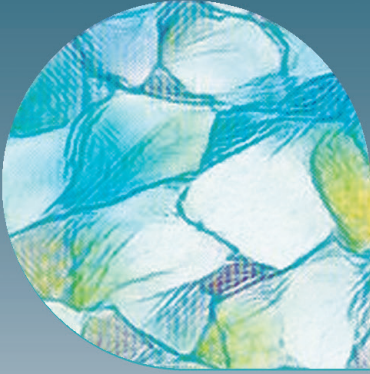
وهذا لا يعني أن كل عملية حقن للمياه سوف تؤدي إلى هزة أرضية، فهناك عشرات بل مئات آلاف آبار الحقن في العالم وقليل منها تم ربط حقن المياه فيه بالزلازل، لكن هذا لا ينفي في الوقت نفسه إمكانية حدوث الهزات الأرضية نتيجة الحقن، إذ توثق عدة مصادر ومنها دراسة (Zoback, 2012)⁹⁷ أن النشاطات الزلزالية في غرب كولورادو في مطلع السبعينات من القرن الماضي ارتبطت بحقن المياه للتخلص منها في حقل Rangely للنفط القريب من منطقة Rocky Mountain، كما سجلت عدة هزات صغيرة إلى متوسطة في المناطق الداخلية من الولايات المتحدة الأمريكية في عام 2011، والتي يبدو أنها ارتبطت بالتخلص من المياه المرافقة لإنتاج غاز السجيل، مثل مدينة Guy في أركنساس التي تعرضت لسلسلة هزات في 27 شباط/فبراير 2011 بلغ مدى أقواها **M 4.7**. وفي آب/أغسطس 2011 تم ربط هزة بلغت قوتها **M 5.3** بعمليات التخلص من المياه المرافقة لعمليات إنتاج غاز طبقات الفحم في مدينتي Trinidad و Raton المتجاورتين على الحدود بين كولورادو ونيو مكسيكو، وتلتها خمس هزات أخرى تراوحت قوتها بين **2.5** إلى **M 4**. وفي شهر كانون الأول/ديسمبر 2011 تم رصد عدة هزات يبدو أنها ارتبطت

بحقن المياه في مدينة Youngstone في أوهايو، بلغت قوة أحدها M 4، كما حامت الشوك في الخامس من تشرين الثاني/نوفمبر 2011 حول هزة قوتها M 5.6 يعتقد أنها ارتبطت بدورها بعمليات حقن المياه للتخلص منها في أو كلاهما⁹⁸.

يزيد عدد الآبار التي تستخدم لعمليات التخلص من المياه في الولايات المتحدة الأمريكية عن 172,000 بئر، يتم استخدام حوالي 20% منها للتخلص من المياه المرافقة لإنتاج النفط والغاز، حيث تحقن المياه المنتجة والمياه الراجعة من عمليات التشقيق في تكوينات صخرية عميقة تختلف عن تلك التي تم إنتاج المياه منها. بينما تستخدم بقية الآبار لعمليات الحقن المرافقة للاستخلاص البترولي المعزز، أي في نفس التكوينات التي تم إنتاج المياه منها، وذلك بهدف المحافظة على الضغط الطبقي للمكامن المنتجة⁹⁹.

يمكن مما سبق استنتاج أن الهزات إن نتجت فلن تنتج عن عمليات الحقن بهدف الاستخلاص البترولي المعزز لأن الهدف منها المحافظة على الضغط الأولي للمكامن أو محاولة رفع الضغط الذي انخفض أساساً بسبب عمليات الإنتاج، وهذا ما يعني أن عمليات التخلص من المياه في الطبقات العميقة هي المسؤولة غالباً عن هذا النوع من الزلازل. وربما يمكن دعم هذا الاستنتاج بما قرره هيئة التعاون في كنساس في شهر آذار/مارس عام 2015 حيث طلبت من الشركات¹⁰⁰:

- 1- الحد من كميات المياه المحقونة في خمس مناطق ضمن حوض Arbuckle المائي العميق في الولاية، بعد أن تبين ارتفاع النشاطات الزلزالية في تلك المناطق.
- 2- تزويد المساحة الجيولوجية بأعمق الآبار التي تستخدم للحقن.
- 3- في حال الحقن في آبار أعمق من الحوض المائي، يجب أن تسمت الآبار من القاع وصولاً إلى حدود عمق الحوض المائي.
- 4- تقديم تقارير دورية تفصيلية تبين مدى التزام الشركات بما سبق.



الفصل السادس

تأثير عمليات التشقيق الهيدروليكي على الصحة

تتوجه كثير من نظرات الشك إلى عمليات التشقيق الهيدروليكي بكونها تؤثر على الصحة العامة سواء بشكل مباشر أو غير مباشر، ولئن كان لبعض هذه العمليات آثار واضحة، فإن بعض الناس يببالغون في ذلك فينظرون إلى الأمر من زاوية ضيقة ترى أن زيادة إنتاج النفط أو الغاز عموماً تؤثر على الصحة، دون أن ينظروا إلى زاوية أهمية الطاقة في الحياة. وهذا ما سوف يتم بحثه في هذا الفصل.



الفصل السادس

تأثير عمليات التشقيق الهيدروليكي على الصحة

عند النظر في تأثير عمليات التشقيق الهيدروليكي على البيئة عموماً وعلى الصحة بشكل خاص، لا بد من توخي الحذر في عرض آراء المؤيدين أو المعارضين لهذا النوع من العمليات، ذلك أن الحياة الإنسانية هي ما يوضع على المحك عند الخوض في هذا المجال.

شهد عام 2013 تحول قرية Balcombe الواقعة في West Sussex في المملكة المتحدة إلى خطوط الجبهة الأمامية للوقوف ضد حفر بئر في أراضيها خطط له أن يحفر إلى عمق 900 م، وذلك بعد انتشار موجة إعلامية تحذر من أن "البئر سيشقق هيدروليكيًا مع ما للتشقيق من مخاطر على الصحة والبيئة". تسببت المظاهرات التي قامت بتأخير موعد الحفر الذي تولته شركة Cuadrilla للنفط¹⁰¹، وقامت الحكومة البريطانية لاحقاً بتشكيل وحدة جديدة ضمن وزارة الطاقة والتغير المناخي دعيت باسم: مكتب الغاز والنفط غير التقليديين* (OUGO) بهدف تنظيم الصناعة الجديدة نسبياً على البلاد، وتشجيع الشركات على العمل في هذا المجال، بعد تشجيع سابق لها أقرت من خلاله تخفيضاً ضريبياً بمعدل 30% على إنتاج غاز السجيل من الآبار الواقعة على اليابسة¹⁰².

لقد استعرضت هذه الدراسة أنفاً بعض التأثيرات البيئية لعمليات التشقيق الهيدروليكي، ولا بد أن لهذه العمليات تأثيراً محتملاً على الصحة، ذلك أن هناك ترابطاً بين التأثيرات البيئية والتأثيرات الصحية. هذا المنطق

* Office for Unconventional Gas and Oil.

الاستنتاجي هو ما حرك التخوف من التأثيرات الصحية إلى الواجهة، مدفوعاً بالتأثيرات البيئية التي يمكن رؤيتها وملامستها بشكل محسوس.

وفي هذا السياق ذكرت دراسة نشرتها مجلة *An International Journal* عام 2011 أن من بين 353 مادة كيميائية تم تحديدها ضمن المواد المستخدمة في مجمل عمليات إنتاج الغاز غير التقليدي، تم التأكيد على أن 75% من هذه المواد تسبب أضراراً للجلد والعيون والجهاز التنفسي والجهاز الهضمي، كما أن 40-50% من هذه المواد يمكن أن تؤثر على الدماغ أو الجهاز العصبي والمناعي والدوراني والكلية، و37% منها قد تؤثر على الغدد الصماء، و25% يمكن أن تكون مسرطنة أو تسبب تشوهات الأجنة¹⁰³.

إضافة لما سبق، قامت مجموعة بحثية من كلية الطب العام في جامعة كولورادو في عام 2011 بدراسة تأثير مشاريع الغاز على مدينة صغيرة (*Battlement Mesa*) غربي كولورادو، ورأت أن التأثيرات المحتملة تنتج من ثلاثة احتمالات، هي:

- 1- التعرض للمواد الكيميائية (وهذا تمت الإشارة له سابقاً)
- 2- التعرض للمواد غير الكيميائية مثل النشاطات الصناعية (الضجيج المرافق للآليات، الازدحام الناتج عن عمليات النقل..)
- 3- التغيرات المجتمعية (Witter et al, 2013)¹⁰⁴.

ولاحظت الدراسة أن القوانين في ولاية كولورادو تسمح بحفر الآبار على بعد 30 م من الأبنية السكنية في المناطق قليلة الازدحام، وعلى بعد 100 م في المناطق المكتظة سكانياً، بينما سجل السكان الذي يعيشون على بعد 500-700 م من مواقع الآبار عدة شكاوى حول أعراض قصيرة الأمد تمثلت في الصداع والغثيان والتهاب المجاري التنفسية ونزف أنفي خلال عمليات إكمال الآبار. كما ذكرت أن كل بئر يحتاج إلى ما يتراوح بين 40 و280 عملية نقل بالمركبات المختلفة كل يوم مع ما لهذا من تأثير على الطرقات وعلى مستخدميها.

أما فيما يخص الضجيج، فتنص القوانين في الولاية على ألا يزيد عن 55 ديسيبل (decibels) خلال النهار*، و50 ديسيبل خلال الليل†، وذلك على بعد 100 متر من موقع العمل. لكن الدراسة بينت أن مستوى الضجيج كان 60 ديسيبل على بعد 150 متر في أحد الاتجاهات، وبلغ 69 ديسيبل في اتجاه آخر على بعد 300 متر‡. ويؤدي التعرض للضجيج المتواصل (بين 30- 70 ديسيبل) إلى عدة أعراض مثل الأرق واضطراب النوم والتعب وصعوبة في التعلم وتغير في المزاج وتراجع في الأداء، وقد يقود إلى أمراض مثل ارتفاع ضغط الدم أو آفات قلبية.

6-1: تلوث الهواء

تحتاج عملية التشقيق كما تقدم إلى كميات كبيرة من المياه التي تنقل إلى موقع البئر بالصهاريح، وللوقوف على عدد هذه الصهاريح اللازمة تم أخذ بيانات كميات المياه اللازمة لكل عملية تشقيق حسب ما هو وارد في **الجدول 5** من هذه الدراسة، وافترض أن سعة الصهاريح الواحد تبلغ 159 برميل من الماء (5000 غالون) وهي من السعات السائدة التي تصنف ضمن السعات الكبيرة، فيمكن الوصول إلى **الجدول 19** الذي يبين نظرياً عدد الصهاريح اللازمة لكل عملية تشقيق حسب المنظومة§.

يبين هذا الجدول أن عملية التشقيق على مرحلة واحدة تحتاج إلى 460-1100 صهاريح من المياه (حسب المنظومة)، كما أن بعض الآبار تحتاج لكميات أكبر من المياه، فقد تقدم أن أحد آبار احتاج إلى 420 ألف برميل من الماء¹⁰⁵، أي ما يعادل أكثر من 2600 صهاريح لمرحلة تشقيق

* شدة صوت مطحنة الحبوب الصغيرة في المنزل

† شدة صوت الثلاجة في المنزل

‡ شدة صوت المكثفة الكهربائية

§ يمكن تسميتها: عدد نقلات المياه اللازمة أو عدد الرحلات الضرورية لتوفير كمية المياه المطلوبة

واحدة، ناهيك عن أن بعض الآبار قد تحتاج لتشقيق على عدة مراحل تصل أحياناً إلى 20 مرحلة.

الجدول 19: عدد الصهاريج اللازمة لعملية التشقيق الهيدروليكي

عدد الصهاريج ساعة 159 برميل (5000 غالون)			كمية الماء الإجمالية للبنر (برميل)	كمية الماء اللازمة لتشقيق البنر (برميل)	كمية الماء اللازمة لحفر البنر (برميل)	المنظومة
إجمالي	تشقيق	حفر				
540	460	80	85,844	73,126	12,718	Barnett (1)
810	760	50	128,766	120,817	7,949	Barnett (2)
592	580	12	94,110	92,203	1,908	Fayetteville (1)
993	980	13	157,857	155,791	2,067	Fayetteville (2)
740	540	200	117,638	85,844	31,794	Haynesville (1)
1,120	1,000	120	178,046	158,970	19,076	Haynesville (2)
776	760	16	123,361	120,817	2,544	Marcellus (1)
1,117	1,100	17	177,569	174,867	2,702	Marcellus (2)

المصدر: إدارة الشؤون الفنية، أوباك، (1) هي تقديرات كميات المياه حسب FracFocus، (2) هي تقديرات كميات المياه حسب Chesapeake Energy

هذه الأرقام الكبيرة لعدد الصهاريج أو لعدد نقلات المياه اللازمة لعمليات التشقيق تعني فيما تعنيه انتشار كميات كبيرة من نواتج عمل محركات الناقلات في محيط البئر والطريق الموصل له، وفي هذا المجال ذكرت دراسة طبية نشرتها مجلة JAMA* في عام 2016 أنها رصدت ارتفاعاً ملحوظاً في نوبات الربو في مناطق التشقيق الهيدروليكي لإنتاج غاز السجيل في ولاية بنسلفانيا. ومن بين 27401 حالة تم رصدها، كان هناك 76% من النوبات الخفيفة، و7% من النوبات المتوسطة، بينما بلغ عدد نوبات الربو الشديدة 4782 حالة¹⁰⁶، أي 17% من إجمالي الحالات التي تمت متابعتها. وذكر تقرير آخر¹⁰⁷ أن نسبة الأوزون قريباً من آبار ولاية Wyoming بلغت 124 ppm (جزء بالمليون) وهو أعلى بكثير من معايير وكالة حماية البيئة الأمريكية التي ترى أن الحد الأعلى يجب ألا يزيد عن 75 ppm.

* Journal of American Medical Association.

بدورها أشارت دراسة (Witter et al, 2013) إلى ارتفاع مستويات المركبات العضوية الطيارة في الجو (VOC) خلال عمليات إكمال الآبار في مقاطعة Garfield في كولورادو وخاصة عند بدء الإنتاج بعد عمليات التشقيق الهيدروليكي.

من ناحية أخرى، يتعرض العاملون خلال عمليات التشقيق لاستنشاق جزء من المواد الداعمة التي تحتوي على نسبة من السيليكا المتبلورة (Crystalline Silica) والتي يقل قطرها عن 10 ميكرون، وهذا يعتبر أحد مسببات السحار الرملي (Silicosis) وهو داء يأخذ بالرئتين مسبباً التهابات وصعوبة في التنفس ويحد من قدرة الرئتين على استخلاص الأكسجين. ويمكن للسيليكا المتبلورة أن تكون أحد أسباب الإصابة بسرطان الرئة، كما تم ربطها إلى أمراض أخرى مثل السل والانسداد الرئوي المزمن (COPD)*، وبعض حالات قصور المناعة الذاتية (NIOSH, 1986)¹⁰⁸. وفي دراسة قام بها المعهد القومي للصحة والأمن الصناعي[†] في الولايات المتحدة، تمت دراسة 116 حالة من بين العمال، وتبين أن 47% تعرضوا لكمية أعلى من الحد المسموح به من السيليكا وهو 0.1 ملغ/م³ من السيليكا المتبلورة، وتعرض 79% منهم لأكثر من 0.05 ملغ/م³، وتعرض 9% منهم إلى 10 أضعاف الحد المسموح به، وتعرض عامل واحد إلى 25 ضعف الحد المسموح (NIOSH, n.d)¹⁰⁹.

6-2: تلوث التربة

يرتبط تلوث التربة المباشر بحالات انسكاب سوائل التشقيق أو غيرها في محيط البئر، أما التلوث غير المباشر فيتعلق بما يجري تحت سطح الأرض من تسرب لهذه السوائل إلى مصادر المياه ومنها إلى التربة المحيطة.

وفي دراسة أصدرها مركز الأبحاث الأمريكية للبيئة والسياسة[‡] عام 2013، ذكر أن عمليات التشقيق الهيدروليكي قد لوثت المياه الجوفية والمياه السطحية كالأنهار

* Chronic Obstructive Pulmonary Disease.

† The National Institute for Occupational Safety and Health

‡ Environment America Research & Policy Center.

والبحيرات والجدول نتيجة التسربات أو الانسكابات لسوائل التشقيق أو نتيجة اندفاع الآبار أو تسرب غاز الميثان وغيره من الآبار نحو المياه الجوفية. حيث تم خلال خمس سنوات من عمر الدراسة تسجيل 340 حالة تسرب وانسكاب في ولاية كولورادو لوثت المياه الجوفية، وتم تسجيل 161 حالة لتأثر آبار مياه الشرب بعمليات التشقيق في ولاية بنسلفانيا بين عامي 2008 و2013، أما في نيو مكسيكو فقد سجلت - حسبما تشير له الدراسة- 743 حالة تلوث للمياه الجوفية أثرت على 90% من سكان المنطقة (Ridlington et al, 2013)¹¹⁰.

ويرى البعض أن عدد حوادث التسرب والتلوث أكبر من ذلك لكن بعض السكان المحليين قد لا يقدمون شكاوى بشأنها لعدة أسباب من بينها أنهم يحصلون على مقابل مالي لقاء التنقيب في أراضيهم وصل في مطلع عام 2017 إلى 60,000 دولار لكل أكر*، أي ما يعادل نحو 14,800 دولار لكل 1000 متر مربع (White, 2017)¹¹¹.

3-6: التأثير على المجتمع

يقود العرض السريع السابق لآثار التشقيق الهيدروليكي على البيئة والصحة إلى تصور مفاده أن هذه العملية ربما تكون شراً مطلقاً ومصدراً جديداً يضاف إلى مصادر الخطر التي تكتنف الحياة على الأرض، لكن هناك آراء أخرى لا بد من استعراضها حتى تكتمل الصورة، وهي التأثير الاجتماعي، ذلك أن عمليات التشقيق الهيدروليكي تسببت في نشوء جدل علمي واجتماعي أفرز وجهات نظر متباينة حول الموضوع. إذ يرى البعض أن المخاطر المحتملة (Risk) للتشقيق الهيدروليكي هي مجرد مفهوم تجريبي يتم التعبير عنه كمياً بأنه: "احتمال حصول ضرر بحجم معين"، وبالتالي فإن هذا المفهوم التجريبي للمخاطر المحتملة لا يمكن أن يشكل أساساً لصنع القرار. لذلك فإن السؤال الذي يجب طرحه هو: ما هو حجم المخاطر التي يمكن أن يتقبلها شخص أو مجتمع ما معني بصناعة القرار؟ ففي حين أن المخاطر عموماً هي

* 1 acre= 4,046.86 m².

مفهوم تجريبي، لكن المخاطر المقبولة تتضمن مفهوماً معيارياً ينطوي على قيم والتزامات ملموسة.

ويشير (Kirkman, 2014)¹¹² في بحثه حول "المخاطر المقبولة في سياق سياسات التشقيق الهيدروليكي" إلى أن إدراك المخاطر يرتبط عملياً بتحليل قيمة المنفعة (Utility Value) للناس قبل وبعد اتخاذ القرار، أي أن هذا ما يحدد إذا كانت المخاطر مقبولة أو إذا كانت الفائدة العائدة على المجتمع والناس تستحق المخاطرة. ويتابع الباحث مؤكداً أن هناك معضلة أخلاقية عند التفكير في اتخاذ قرار التشقيق الهيدروليكي، إذ من المفترض أن الخبراء هم من يساهمون من خلال معرفتهم العلمية في إعطاء الصورة الصحيحة لصناع القرار، لكن المجتمع والسكان وخاصة المقيمين قريباً من الحقول لهم بعض الحق في التحكم بالمخاطر التي ربما يتعرضون لها.

لم تنحصر وجهات النظر المختلفة في الولايات المتحدة الأمريكية فحسب، إذ وصل الجدل حول الموضوع إلى بعض دول أوروبا التي أزمعت البحث في إمكانية استغلال طاقاتها المحتملة في صخور السجيل، ويرى (Engelder, 2014)¹¹³ في بحثه "الجدل حول عمليات التشقيق في أوروبا" أن السبب الرئيسي للمخاوف التي انتشرت في الولايات المتحدة (وانتقلت إلى أوروبا) كان نتاج مزيج من الأخطاء المبكرة للصناعة البترولية في مجال التشقيق الهيدروليكي من جهة، إضافة إلى معلومات خاطئة نقلت بشكل مقصود من بعض الناشطين الذي يسعون للاستفادة من هذه المخاوف.

ويشير الباحث إلى أن الجميع يطالبون بأن تكون صناعة التشقيق الهيدروليكي آمنة بشكل مطلق قبل أن يقبلوا بها، لكن الواقع أن مفهوم الأمن بحد ذاته ليس مفهوماً مطلقاً، إذ أن 1000 شخص يموتون سنوياً بسبب حوادث السير في ولاية بنسلفانيا الأمريكية، بينما مات بضعة أشخاص فقط في حوادث مرتبطة بعمليات التشقيق بين

عامي 2006 و2014، وبالرغم من ذلك فإن قيادة السيارات لازالت تعتبر أكثر أماناً في بنسلفانيا من عمليات التشقيق الهيدروليكي* .

أما الأخطاء المبكرة للصناعة البترولية والتي تسببت في انتشار المخاوف حول التشقيق الهيدروليكي فيرى Engelder أنها:

1- عدم تحديد محتوى المياه من المواد الكيميائية قبل البدء لعمليات التشقيق، ذلك أن العديد من العناصر مثل الحديد والمغنيزيوم والبوتاسيوم، وحتى غاز الميثان توجد منحلة في المياه، لكن تحديد نسبها بعد عمليات التشقيق فقط أعطى الانطباع بأن التشقيق هو المسؤول عنها. وقررت ولاية بنسلفانيا أن وجود الغاز في المياه على بعد 300 م من البئر الخاضع للتشقيق يعتبر مسؤولية الشركة العاملة.

2- ترك قاع مفتوح بدون تغليف (Open Hole) بطول وصل إلى 1600 م أحياناً في بعض الآبار التي حفرت مبكراً في مناطق لم يكن فيها إلا عدد محدود من آبار المياه. وهذا أمر لم يعد يجري إذ غالباً ما يتم تغليف كامل البئر وخاصة المراحل الإنتاجية منه.

3- استخدام تقنية الحفر بالهواء في المقاطع العمودية من تشكيلة Marcellus، حيث تسبب ضغط الهواء في نقل غاز الميثان إلى آبار الماء المجاورة للحقل، كما تسبب في تعكير المياه وهو أمر تسبب بخوف السكان.

4- إقرار قانون في عام 2005 سمح للشركات بالحفاظ على سرية الإضافات التي تستخدمها في سوائل التشقيق، وهذا ما جعل الناس تخشى من تلوث المياه الجوفية بمواد كيميائية سامة.

5- التخلص من المياه بكميات كبيرة تسببت في حدوث هزات أرضية صغيرة في ولايتي أوهايو وتكساس، وهنا تؤكد إدارة المساحة الجيولوجية الأمريكية أن

* لابد شكك أن قيمة حياة الإنسان أكبر بكثير من أن تكون مجرد رقم في إحصائية من هذا النوع، لكن كان لابد من إيراد وجهة النظر الأخرى التي تمثل عملياً مصالح الشركات العاملة في مجال التشقيق الهيدروليكي.

هناك علاقة بين الكميات المحقونة من المياه وبين حجم الهزة الأرضية، لكنها ترى أن هذه الكميات لا تكفي للتسبب بهزات كبيرة مدمرة.

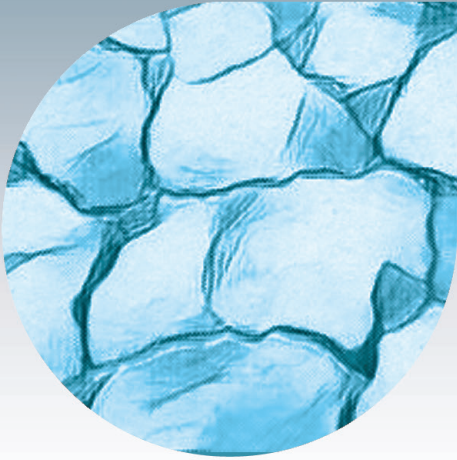
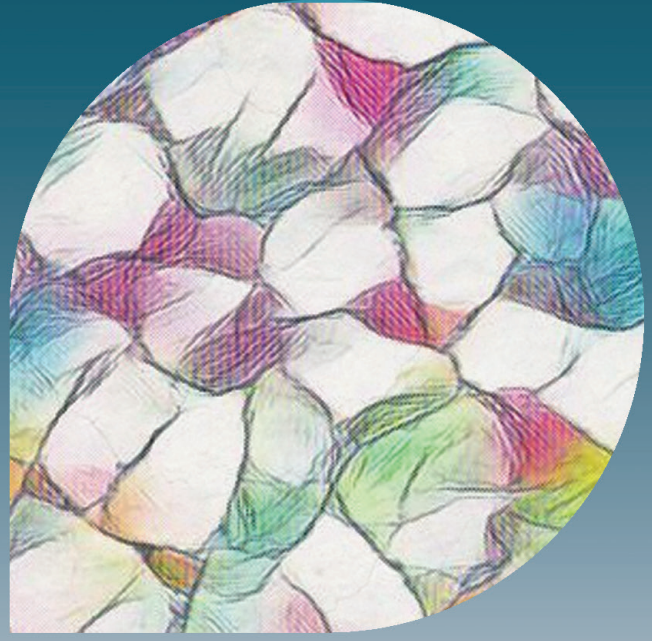
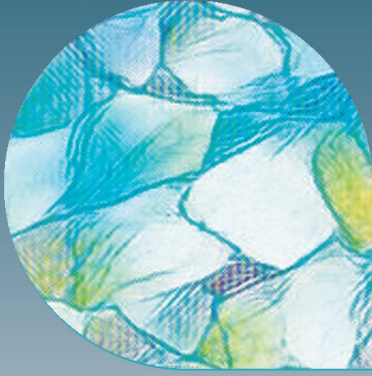
6- تصريف المياه إلى برك قد يتمزق الغطاء العازل في قعرها ويسمح بتسرب هذه المياه ووصولها إلى المياه الجوفية في المنطقة.

أما فيما يخص المعلومات الخاطئة، فيرى Engelder أن القلق المبرر من الأخطاء السابقة قد تم توظيفه من قبل البعض للتلاعب بمخاوف الناس إما بسبب عدم المعرفة العلمية الكافية للناشطين البيئيين، أو لأسباب أخرى سياسية وإعلامية، بل وعزى بعضها إلى حب الشهرة.

يلاحظ مما سبق أن هناك أكثر من منظور لتأثيرات التشقيق الهيدروليكي على البيئة والصحة، وليس من قبيل المبالغة القول إن لكلٍ هدفه وكلٌ ينظر إلى نصف الكأس الذي يناسب توجهاته، لكن المؤشرات العلمية تؤكد أن عدم تكامل منظومة الحفر والتغليب والتشقيق والإنتاج ربما يؤدي إلى آثار ونتائج لا تحمد عقباها.







الفصل السابع

كفة التشقيق
الهيدروليكي



الفصل السابع

كافة التشقيق الهيدروليكي

عند المقارنة بين مشاريع النفط والغاز ومدى جاذبيتها للمستثمرين ومدى مساهمتها في الأسواق تظهر للمتابع العديد من النقاط المرجعية Benchmark مسعرة بالدولار/البرميل، وتختلف هذه النقاط حسب المصدر الذي ينشرها.

ومن بين المعايير المستخدمة للمقارنة مجموعة متنوعة من نقاط التعادل Breakeven Points* تستعمل على نطاق واسع، لكنها قد تعطي صورة ضبابية يصعب جلاؤها أحياناً لعدة أسباب، من أهمها:

- 1- لا يوجد تعريف مقبول من الجميع لهذه النقاط.
- 2- لكل مصدر من مصادر الإنتاج (حقل أو مكمن أو حتى بئر) معيار (أو برميل مرجعي) لا ينطبق على غيره في مكان آخر من العالم.
- 3- النقاط المرجعية تختلف باختلاف الوقت واختلاف أسعار الطاقة.

وقد ساهم تذبذب أسعار النفط خلال السنوات القليلة الماضية في زيادة إبهام هذه النقاط، إذ كانت أسعار خام برنت أعلى من 100 دولار/البرميل بين عامي 2011 و2014، وازداد إنتاج النفط الأمريكي خلال تلك الفترة بشكل ملحوظ (كما تم بيانه في الشكل 16 من هذه الدراسة) من 5.6 مليون ب/ي عام 2011 إلى نحو 8.8 مليون ب/ي عام 2014، وسارعت وسائل الإعلام المهتمة بالصناعة البترولية إلى التبشير بأن الولايات المتحدة سوف تتفوق على المملكة العربية السعودية في معدلات الإنتاج.

* يشار لها في بعض المراجع تحت مسمى أسعار التعادل أو تكاليف التعادل، كما سوف يتم إيضاحه لاحقاً.

رأى العديد من المحللين خلال تلك الفترة أن أسعار النفط اللازمة للحفاظ على زخم الإنتاج الأمريكي تتراوح بين 60-90 دولار/البرميل¹¹⁴، وحين تراجعت أسعار النفط إلى ما دون 60 دولار/البرميل كان من المتوقع خروج العديد من الاستثمارات من مجال زيت وغاز السجيل بسبب التراجع الطبيعي السريع في عمر آبار هذا النوع من الهيدروكربونات مقارنة بالنفط والغاز التقليديين، وبالتالي فإن خروج أي استثمارات سوف يترجم على أرض الواقع إلى تراجع في الإنتاج، وهذا ما جعل الكثيرين يعتبرون أن مجال 60-90 دولار/البرميل يمثل نقطة تعادل لمشاريع زيت وغاز السجيل. كما نظر المحللون إلى مشاريع زيت وغاز السجيل على أنها ستوازن سوق النفط والغاز العالمي كونها قادرة على الاستجابة بسرعة لتغيرات الأسعار¹¹⁵.

وبالتالي عندما هبط سعر خام برنت من 108 دولار/البرميل في منتصف عام 2014 إلى 32 دولار/البرميل في مطلع عام 2016، كان من المتوقع أن يتراجع إنتاج زيت السجيل، لكن الواقع بين أن هذا التبسيط لم يكن دقيقاً إذ استمرت العديد من الشركات في الإنتاج، وخاصة تلك التي لم تجد سوى متابعة الإنتاج (رغم الخسائر التي تمنى بها) كمصدر للسيولة التي تمكنها من دفع أقساط قروضها بانتظار تحسن أسعار النفط.

هذه الملاحظات وغيرها تدفع إلى إعادة النظر في شأن نقاط التعادل والتي تعرّف بأنها: مزيج من تكاليف المشروع، وأسعار السوق بحيث تكون القيمة الصافية الحالية للمشروع $Net\ Present\ Value$ صفراً، أو هي النقطة التي تتعادل عندها العوائد $Revenues$ والتكاليف $Expenses$ *. وبالتالي فإن اعتماد مفهوم نقاط التعادل قد لا يكون لوحده كافياً لتوضيح اقتصاديات التشقيق الهيدروليكي، وربما يكون من الأجدى النظر في تكاليف

* هناك العديد من التعاريف الأخرى لنقاط التعادل ولكنها تقع خارج نطاق اهتمام هذه الدراسة.

عملية التشقيق نفسها، حيث من الشائع أن كلفة عمليات تطوير الآبار تستجيب لعدة عوامل، منها:

1- زيادة فعالية عمليات الحفر والإكمال، أي أن الكلفة تنخفض مع زيادة هذه الفعالية.

2- حفر آبار بجذوع طويلة وعمليات إكمال معقدة سيؤدي إلى زيادة التكاليف.

3- تغيير أسعار النفط والغاز يؤثر على كلفة الآبار من خلال تأثيره على نشاطات الحفر عموماً، فترجع أسعار النفط في عام 2014 أدى إلى كبح جماح العديد من المشاريع، مما خفض الطلب على الحفارات وعلى خدمات الآبار، وهذا تسبب في انخفاض كلفة الحفارات وانخفاض كلفة الخدمات.

بالرغم من أهمية هذه النقاط، إلا أن كلفة عمليات التطوير تعتبر أقل شفافية من مجرد ربطها بهذه النقاط فقط.

ونظراً لأن هذه الدراسة أخذت الولايات المتحدة الأمريكية مثلاً عن عمليات التشقيق الهيدروليكي، فقد تم اعتماد بيانات تقرير أعدته إدارة معلومات الطاقة الأمريكية¹¹⁶، يتضمن نتائج دراسة قامت بها شركة IHS لصالح إدارة معلومات الطاقة. ورغم أن التقرير نشر في شهر آذار/مارس 2016، إلا أن التكاليف المدرجة فيه كانت عن عام 2014، لكنها تمثل من حيث المبدأ ركناً يمكن الاستناد إليه لتوضيح تفاصيل التكلفة لكل مرحلة من مراحل العمل على الآبار، وتحديد كلفة عمليات التشقيق الهيدروليكي التي تتضمن بشكل رئيسي تكاليف سائل التشقيق والمضخات والمواد الداعمة.

ركز التقرير المذكور (بالإضافة للمغمورة واليابسة عموماً) على عدة مناطق منتجة لزيوت وغاز السجيل في خمس منظومات رئيسية ضمن الولايات المتحدة الأمريكية وهي: Eagle Ford، وBakken، وMarcellus، وDelaware، وMidland.

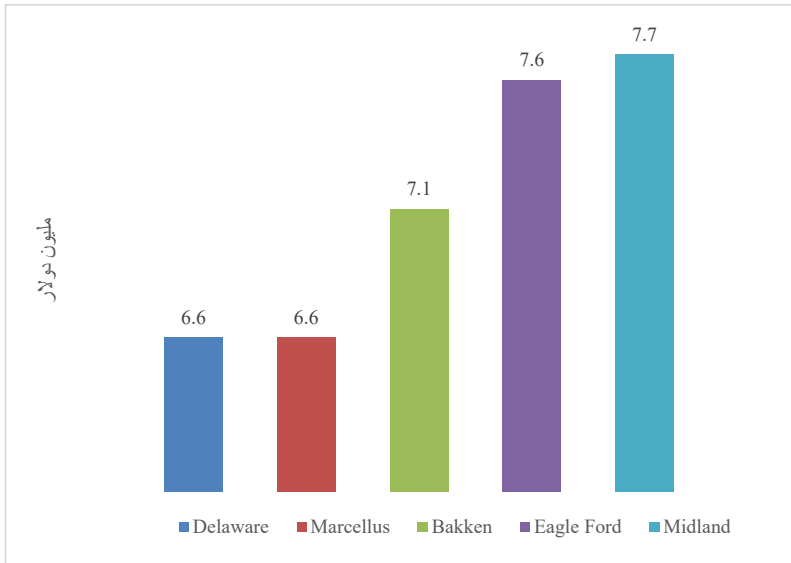
اعتمد هذا التقرير على المعايير التالية في تحديد كافة عمليات تطوير

الآبار:

- 1- كلفة الحصول على الموقع وأجرة الأرض.
- 2- التكاليف الرأسمالية للحفر والإكمال والمعدات.
- 3- النفقات التشغيلية.
- 4- الكلفة التشغيلية وكلفة عمليات النقل.

وخلص التقرير إلى أن الكلفة الرأسمالية للبئر تتراوح بين 4.9-8.3 مليون دولار، منها 2.9-5.6 مليون دولار تمثل تكلفة عمليات الإكمال. وبطبيعة الحال تختلف هذه التكاليف من منطقة لأخرى، لكن هذه الأرقام تمثل متوسط ما تم الوصول إليه، حيث بينت أن تكاليف الآبار في المناطق المذكورة في عام 2014 تراوحت بين 6.6 إلى 7.7 مليون دولار كما هو مبين في الشكل 26.

الشكل 26: تكاليف الحفر والإكمال عام 2014 لآبار اليابسة في بعض مناطق الولايات المتحدة

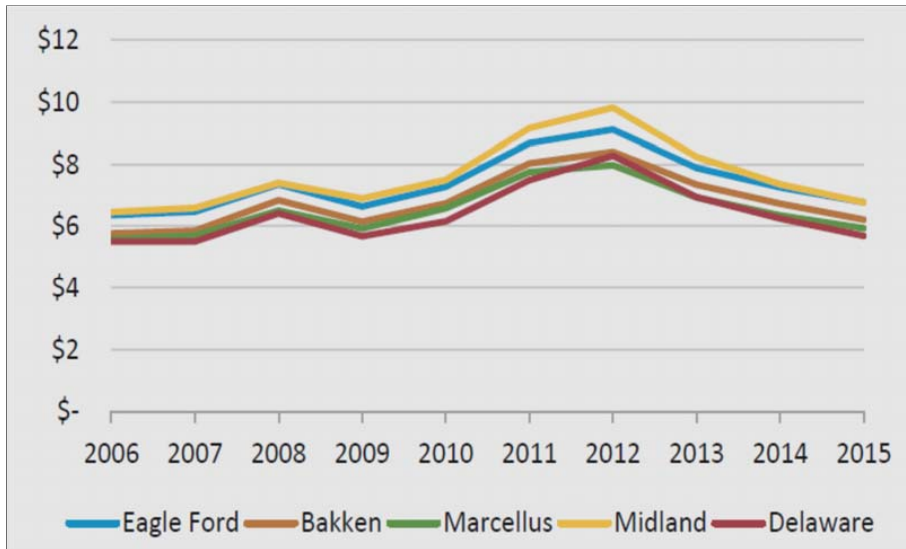


إدارة الشؤون الفنية، أوبك، بناء على بيانات EIA، 2016

يلاحظ من الشكل السابق أن هناك فوارق بين تكاليف الآبار عام 2014 تصل إلى 1 مليون دولار أحياناً، وهذا أمر طبيعي في ضوء المتغيرات المرتبطة بكل منطقة من المناطق، وربما لا يشكل 1 مليون دولار رقماً كبيراً بحد ذاته في الصناعة البترولية، لكن أهميته تبرز جلية عند حفر عشرات أو مئات الآبار في كل حقل.

يبين الشكل 27 كلفة الآبار (الحفر والإكمال) في المناطق الخمس المذكورة خلال عشر سنوات، ويلاحظ منه أن كلفة الآبار انخفضت بعد عام 2012، حيث يعزو التقرير ذلك إلى التطورات التقنية في عمليات الحفر والإكمال.

الشكل 27: كلفة عمليات الحفر والإكمال للآبار في خمس منظومات في الولايات المتحدة الأمريكية



المصدر: EIA، 2016

ولا غضاضة في تفصيل بعض التكاليف الوسطية المرتبطة بالحفر والتغلييف والتشقيق:

1-7: التكاليف المرتبطة بالحفر

تعتمد هذه التكاليف على:

- 1- كفاءة وفعالية عملية الحفر.
- 2- أعماق الآبار.
- 3- أجره الحفارة في اليوم.
- 4- أسعار سوائل الحفر وأسعار الوقود.

ترتبط أجره الحفارة وأسعار الوقود بالظروف العامة للأسواق ونشاطات الحفر أكثر مما ترتبط بتصميم البئر نفسه، وتشكل نحو 12-19% من إجمالي كلفة البئر.

2-7: التكاليف المرتبطة بتغليف الآبار

تعتمد هذه التكاليف على:

- 1- أسعار مواسير التغليف المرتبطة بدورها بأسعار الفولاذ والحديد.
 - 2- قطر البئر وعمقه، وهو من أكثر المتغيرات تأثيراً ضمن المنظومة الواحدة أو ضمن الحقل.
 - 3- نوع التشكيلة ومحتواها من الموائع والضغط التي تؤثر على مواسير التغليف.
 - 4- تصميم عملية التغليف، وعدد المقاطع وهل هناك آبار قاع مفتوح أم لا.
- تشكل كلفة مواسير التغليف 9-15% من إجمالي كلفة البئر.

3-7: التكاليف المرتبطة بمضخات التشقيق

تختلف هذه النفقات وتتباين بشكل كبير من حالة لأخرى، لكنها عموماً ترتبط ببضع نقاط منها:

- 1- الطاقة اللازمة لعملية التشقيق، أو ما يسمى القدرة الحصانية (Horsepower).
- 2- عدد مراحل عملية التشقيق.

تحدد القدرة الحصانية اعتماداً على ضغط المكمّن أو التشكيلة، وقساوة الصخور ومعدل الحقن الأعظمي اللازم. للتمكن من تشقيق المكمّن، يجب أن يكون ضغط الحقن أعلى من ضغط المكمّن، مع مراعاة أن الضغوط المرتفعة تؤدي إلى إجهاد في الصخر وقد تتسبب في تهدم البئر. ولا شك أن الضغوط الأعلى تعني كلفة أكثر، كما أن عدد المراحل المرتبط عملياً مع طول المقطع الأفقي يعني كلفة أعلى لأن عملية الحقن سوف تتكرر في كل مرحلة. تمثل القدرة الحصانية 14- 41% من إجمالي كلفة البئر.

7-4: كلفة سوائل التشقيق

تعتمد هذه التكاليف على:

- 1- كمية المياه اللازمة للعملية.
- 2- نوع وكمية المواد الكيميائية اللازمة.
- 3- نوع سائل التشقيق (هلام، مياه زلقة، الخ).

وغالباً ما يتم تحديد نوع سائل التشقيق من خلال معرفة نوعية إنتاج المنظومة، إذ يستخدم سائل تشقيق هلامي مثلاً في مكامن إنتاج النفط، بينما تستخدم المياه الزلقة في مكامن الغاز.

ترتبط كلفة المياه بحال المنطقة التي يتم العمل فيها، إذ تتعلق بوفرة المياه، ونوعية المصدر وظروف الطقس خلال العمل. كما أن المياه التي تنتج لا بد من التخلص منها، وعادة ما يتم إدراج تكاليف التخلص من المياه المنتجة في أول شهر أو شهرين من عمر البئر ضمن التكاليف الرأسمالية، وتشكل نحو 5- 19% من إجمالي كلفة البئر.

7-5: كلفة المواد الداعمة

تحدد تكاليف المواد الداعمة من خلال:

1- سعر هذه المواد في الأسواق.

2- نوعية ونسب مزيج المواد الداعمة في حال استخدام أكثر من نوع.

تشكل كلفة نقل المواد الداعمة إلى الحقل وتخزينها جزءاً كبيراً من إجمالي كلفة هذه المواد، وكلما كان سعر هذه المواد أقل كلما كانت الكميات المستخدمة منها أكثر. وعادة ما يتم استخدام المواد الداعمة الصناعية (المرتفعة الثمن مقارنة مع الرمل) في الآبار العميقة ذات الضغوط المرتفعة. تتراوح كلفة المواد الداعمة بين 6-25% من إجمالي كلفة البئر.

6-7: كلفة عمليات التشقيق في بعض منظومات زيت وغاز السجيل

من الصعب جداً الوقوف على رقم يمكن اعتباره ممثلاً للكلفة المباشرة لعمليات التشقيق الهيدروليكي في ضوء اختلاف طبيعة وظروف ومواصفات كل حقل وكل بئر، لذلك تم فيما يلي أخذ عدة أمثلة من بعض منظومات زيت وغاز السجيل في الولايات المتحدة الأمريكية تبين نسبة تكاليف التشقيق إلى إجمالي كلفة البئر*.

1-6-7: منظومة Bakken

تقدر كلفة البئر الوسطية في هذه المنظومة بنحو 7.8 مليون دولار، ويبين الجدول 20 التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي فيها:

الجدول 20: التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي في منظومة Bakken

النسبة من إجمالي الكلفة	مليون دولار	كلفة البئر الوسطية (7.8 مليون دولار)
25%	1.9	كلفة مضخات التشقيق والمعدات
11%	0.86	كلفة سوائل التشقيق والتخلص من المياه الراجعة
10%	0.78	كلفة المواد الداعمة
45.4%	3.58	المجموع

إدارة الشؤون الفنية، أوبك، بناء على بيانات EIA، 2016

* المجاميع قد لا تتطابق بسبب تدوير بعض الأرقام.

2-6-7 منظومة Eagle Ford

تقدر كلفة البئر الوسطية في هذه المنظومة بنحو 7.5 مليون دولار، ويبين الجدول 21 التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي فيها:

الجدول 21: التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي في منظومة Eagle Ford

النسبة من إجمالي الكلفة	مليون دولار	كلفة البئر الوسطية (7.5 مليون دولار)
22%	1.65	كلفة مضخات التشقيق والمعدات
13%	0.98	كلفة سوائل التشقيق والتخلص من المياه الراجعة
13%	0.98	كلفة المواد الداعمة
48%	3.61	المجموع

إدارة الشؤون الفنية، أوابك، بناء على بيانات EIA، 2016

3-6-7 منظومة Marcellus

تقدر كلفة البئر الوسطية في هذه المنظومة بنحو 6.4 مليون دولار، ويبين الجدول 22 التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي فيها:

الجدول 22: التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي في منظومة Marcellus

النسبة من إجمالي الكلفة	مليون دولار	كلفة البئر الوسطية (6.4 مليون دولار)
28%	1.78	كلفة مضخات التشقيق والمعدات
15%	0.96	كلفة سوائل التشقيق والتخلص من المياه الراجعة
15%	0.96	كلفة المواد الداعمة
58%	3.7	المجموع

إدارة الشؤون الفنية، أوابك، بناء على بيانات EIA، 2016

4-6-7 منظومة Permian

تقدر كلفة البئر الوسطية في هذه المنظومة بنحو 7.5 مليون دولار، ويبين الجدول 23 التكاليف الوسطية المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي فيها:

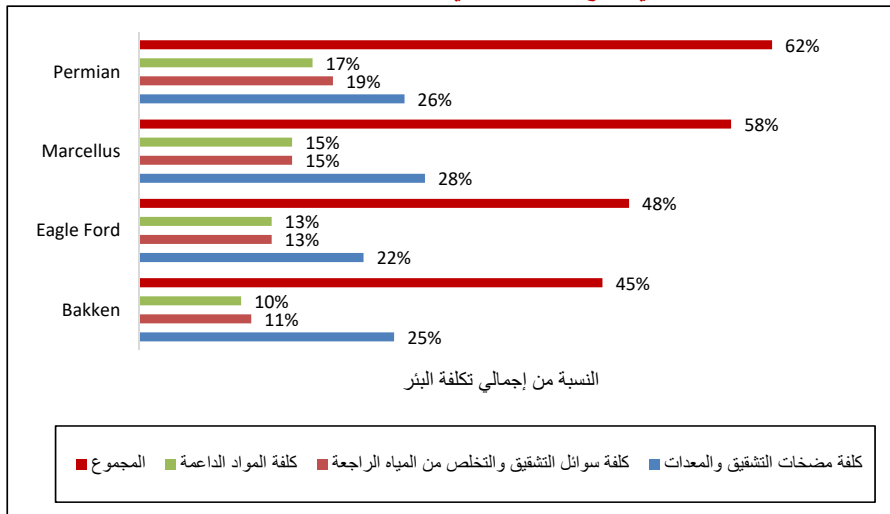
الجدول 23: التكاليف الوسيطة المباشرة لعملية التشقيق الهيدروليكي في منظومة Permian

النسبة من إجمالي الكلفة	مليون دولار	كلفة البئر الوسيطة (7.5 مليون دولار)
26%	1.95	كلفة مضخات التشقيق والمعدات
19%	1.43	كلفة سوائل التشقيق والتخلص من المياه الراجعة
17%	1.28	كلفة المواد الداعمة
62%	4.65	المجموع

إدارة الشؤون الفنية، أوابك، بناء على بيانات EIA، 2016

يمكن تلخيص بيانات الجداول السابقة في الشكل 28 لتوضيح تكاليف عمليات التشقيق الهيدروليكي في أربع منظومات في الولايات المتحدة الأمريكية، ويلاحظ من الشكل أن كلفة مضخات التشقيق وباقي المعدات المرتبطة بها تمثل نحو ربع تكلفة البئر الإجمالية وتتراوح بين 22-26%، وتتراوح كلفة المواد الداعمة بين 10-17%، أما سوائل التشقيق وكلفة معالجة المياه الراجعة فتتراوح بين 11-19%.

الشكل 28: نسبة تكاليف التشقيق الهيدروليكي إلى إجمالي كلفة البئر في أربع منظومات في الولايات المتحدة الأمريكية



إدارة الشؤون الفنية، أوابك، بناء على بيانات الجداول 18-21، EIA، 2016

يبين ما سبق أن عملية التشقيق الهيدروليكي تستأثر بالنصيب الأكبر من تكاليف حفر وإكمال آبار النفط والغاز في المنظومات المذكورة، إذ أن كلفتها تتراوح بين 45-62% من إجمالي كلفة البئر الواحد، أي أنها وسطياً تمثل أكثر من نصف تكلفة البئر الواحد.

ولجلاء الصورة أكثر أمكن التوصل لبعض المعلومات المتاحة لمعدل الإنتاج الأعظمي المتوقع من البئر EUR في منظومة Eagle Ford، حيث قدرت إدارة معلومات الطاقة في عام 2014* أن معدل الإنتاج الأعظمي من البئر في المنظومة بلغ نحو 168 ألف برميل¹¹⁷. ونظراً لأن كلفة البئر الوسطية بلغت 7.5 مليون دولار، وكلفة التشقيق الهيدروليكي بلغت 3.61 مليون دولار للبئر في ذلك العام كما هو مبين في الجدول 21 السابق، فيمكن تقدير كلفة البرميل الوسطية بحوالي 44.6 دولار، وكلفة التشقيق الوسطية بنحو 21.5 دولار/البرميل.

لكن هذه التكاليف هي تكاليف رأسمالية فقط، وتبقى التكاليف التشغيلية والإدارية وتكاليف النقل (تراوحت عام 2016 بين 3.11-3.52 دولار/البرميل)¹¹⁸ والضرائب (تراوحت عام 2016 بين 5.03-6.42 دولار/البرميل) وغيرها، لذلك لا يمكن اعتبار أي من الرقمين السابقين معبراً عن التكلفة الحقيقية أو عن نقطة التعادل، كما يضاف لذلك أن الإنتاج الأعظمي من البئر يختلف من منطقة لأخرى بشكل كبير، وتراوح في المثال المذكور هنا بين 80 ألف برميل وحتى 334 ألف برميل.

أما فيما يخص سوق التشقيق الهيدروليكي عموماً، فقد لوحظ أن التقديرات المتعلقة به تختلف اختلافاً كبيراً حسب الجهة التي تتولى البحث في هذا الشأن، وهذه الجهات غالباً ما تكون معاهد أبحاث تسويقية تستهدف شريحة المستثمرين بالدرجة الأولى، ومنها على سبيل المثال مؤسسة

* استخدمت بيانات عام 2014 لأن تحليل التكاليف خلال الدراسة استند إلى معلومات EIA عن ذلك العام.

Markets and Markets التي قدرت أن قيمة سوق التشقيق الهيدروليكي¹¹⁹ بلغت 41.5 مليار دولار عام 2014، بينما يتوقع أن تصل إلى 72.7 مليار دولار في عام 2019 وذلك عند معدل نمو سنوي يقارب 11.8%. وترى المؤسسة أن نضوب الحقول التقليدية على اليابسة وفي المياه الضحلة هو ما دفع بالشركات إلى التنقيب في المياه العميقة ودفعها للاستثمار في المصادر غير التقليدية حيث يلعب التشقيق الهيدروليكي دوراً أساسياً في الإنتاج.

وترى مؤسسة Mordor Intelligence أن قيمة سوق التشقيق¹²⁰ بلغت 53.13 مليار دولار عام 2013، ويتوقع أن تصل إلى 79.5 مليار دولار عام 2020.

بينما ترى مؤسسة Global Markets Insights أن حجم السوق¹²¹ كان 24 مليار دولار عام 2015، وسوف يصل إلى 68 مليار دولار عام 2024. يلاحظ من خلال الأمثلة السابقة أن هناك بوناً شاسعاً في تقدير الحجم الحالي والمستقبلي لسوق التشقيق الهيدروليكي، وهذا ينطبق عملياً على اقتصاديات العملية وتقنياتها إذ ترى كل مؤسسة الأمر من منظور البيانات المتاحة لها.

يقود كل التحليل السابق للموضوع إلى أن هناك عشرات النقاط التي يجب أخذها بعين الاعتبار عند النظر في اقتصاديات التشقيق الهيدروليكي مثل: الاحتياطي، عمق المكن، الضغط، درجة الحرارة، كمية المياه اللازمة، وفرة المياه، طريقة التخلص من المياه الراجعة، كلفة النقل، الضرائب، أسعار النفط والغاز، وغيرها الكثير. ولا بد من دراسة حالة كل حقل وكل مكن وأحياناً كل بئر على حدة للوقوف على جدوى الاستثمار في هذه التقنية أو لا.

الخلاصة والاستنتاجات

- استخدم التشقيق الهيدروليكي منذ أربعينيات القرن الماضي لتحفيز الإنتاج من آبار النفط والغاز، لكنه احتل مكانة متميزة خلال السنوات القليلة الماضية لعدة أسباب مثل التخوف من تعثر إمدادات النفط والغاز لأسباب فنية أو جيوسياسية، وارتفاع أسعار الطاقة وازدياد الطلب عليها، مما دفع الصناعة البترولية إلى البحث عن سبل جديدة لإنتاج الطاقة من مصادر غير تقليدية طالما أن هذه المصادر قادرة على المنافسة اقتصادياً مع المصادر التقليدية. وزاد من أهمية التشقيق التوجه الغربي عموماً والأمريكي خصوصاً نحو محاولة الاكتفاء الذاتي من النفط والغاز للتحرك من الاعتماد على الشرق الأوسط كمصدر رئيسي للواردات الهيدروكربونية، وهذا ما ثبت أنه لم يحصل، ولا توجد أية مؤشرات على أنه سيحصل في المدى المنظور.
- تستند آلية التشقيق الهيدروليكي إلى حقن مائعٍ بضغط مرتفع ضمن البئر يعمل على توسيع الشقوق الطبيعية الموجودة في صخور المكمن أو يوجد شقوقاً جديدة في بعض الأحيان، وهذا ما يزيد من مساحة الصخر التي يمكن للموائع (نفط و/أو غاز) التحرك عبرها نحو البئر. وتتم المحافظة على هذه الشقوق مفتوحة باستخدام مواد داعمة (الرمال الطبيعي أو حبيبات السيراميك وغيرها) تحقق مع سائل التشقيق.
- تحتاج عمليات التشقيق إلى كميات لا يستهان بها من المياه تصل في بعض الأحيان إلى أكثر من 400 ألف برميل للبئر الواحد، وبسبب التراجع الكبير في إنتاجية آبار زيت وغاز السجيل (75-85% خلال أول ثلاث سنوات) إضافة إلى تراجع معدلات الإنتاج في المنظومة

ككل (30-45% سنوياً) فإن الآبار تحتاج إلى إعادة تشقيق، أو يجب حفر آبار جديدة للحفاظ على معدلات الإنتاج مما يعني المزيد من عمليات التشقيق التي تحتاج بدورها لكميات إضافية من المياه.

- تجري محاولات عديدة لإمكانية استخدام كميات أقل من المياه في عمليات التشقيق الهيدروليكي، إلا أن الأبحاث في هذا المجال لا تزال في مراحل مبكرة جداً، وتشير أغلب الدلائل الأولى إلى أنه من شبه المستحيل تطبيق التقنيات المنظورة على أعماق كبيرة، ولما كانت كميات النفط والغاز التي تم التكهن بها في بعض الدول العربية تقع على أعماق تزيد أحياناً عن 4000 م، فإن إنتاجها سوف يحتاج إلى استخدام كميات كبيرة جداً من المياه.

- يدخل في تركيب سائل التشقيق مجموعة كبيرة من الإضافات الكيميائية المتنوعة، ورغم أن نسبة المواد الكيميائية صغيرة عادة (نحو 0.5%) إلا أن كمية المياه الكبيرة تعني أن كمية المواد الكيميائية المستخدمة مرتفعة بدورها. وغالباً ما تحتفظ الشركات بأسماء المواد المستخدمة في عمليات التشقيق كنوع من الأسرار التجارية التي تحاول عدم كشفها، مما جعل الرأي العام في العديد من دول العالم يتخوف من عمليات التشقيق عموماً.

- بينت مختلف الدراسات أن عمليات التشقيق يمكن عملياً أن تشكل خطراً على البيئة لو تسربت سوائل التشقيق إلى المياه الجوفية أو السطحية، ويمكن أن تلوث التربة لو انسكب سائل التشقيق أو المياه الراجعة على السطح. لكن الواقع أن معظم إن لم تكن كل الصناعات الأخرى تحمل عامل المخاطرة في طياتها، فضمن صناعة الذهب على سبيل المثال يحتاج المنجم السطحي الواحد إلى ما يتراوح بين 500 - 800 ألف برميل من الماء يومياً، وعادة تولد هذه الصناعة 20 طناً من المخلفات

مقابل كل 10 غرامات من الذهب، وهذه المخلفات غنية بالسيانيد السام المستخدم لاستخلاص المعدن من الفلز. وحتى عام 2000 كانت صناعة الجلود تستهلك 252 مليار برميل من الماء سنوياً¹²².

- من غير المعقول وغير الممكن تقزيم الأثر البيئي لإنتاج النفط والغاز عموماً ولعمليات التشقيق الهيدروليكي على وجه الخصوص، لكن من غير المعقول أيضاً تضخيم تلك الآثار وكأن عمليات التشقيق الهيدروليكي هي المسؤول الأوحده عن كل ما يصيب البيئة من أضرار، فذلك يعني غض النظر عن بقية الصناعات في مختلف المجالات الإنسانية. لذلك من الضروري التأكيد على أن كل عملية صناعية لها آثارها الجانبية، وتكمن الاستجابة المنطقية المستدامة لذلك في محاولة التوفيق بين مدى حاجة المجتمعات البشرية لهذه العملية وبين الحد قدر الإمكان من تلك الآثار.

- لا يمكن على الصعيد العملي تحديد نقطة مرجعية تعبر عن كلفة عمليات التشقيق الهيدروليكي، فتوفر مصادر المياه والبنى التحتية والمعدات والخبرات والنظام الضريبي وتكاليف الطاقة وغيرها، تختلف من مكان لآخر ضمن الولايات المتحدة الأمريكية، فكيف بباقي دول العالم. لكن من الوارد الاستئناس بمجال مالي يعكس صورة عن نسبة تكاليف التشقيق الهيدروليكي مقارنة بتكاليف عملية الحفر الإجمالية، وقد وجدت هذه الدراسة من خلال الأمثلة التي تتبعتها أن كلفة عملية التشقيق تراوحت بين 45-62% من كلفة البئر.





جدول المصطلحات الواردة في الدراسة

Absolute Permeability	النفاذية المطلقة
Acre	وحدة قياس للمساحة تعادل 4.046 متر مربع
Anaerobic Bacteria	بكتريا لا هوائية
Anomalous	شواذات، تغيرات
Bactericides	معقّمات (قاتلة للبكتريا)
Basaltic Sills	الصباط البازليّة
Benchmark	نقطة مرجعية
Biocides	مبيدات
Bioturbation	البنية الحيوية المضطربة (بيئة ترسيبية)
Bitumen	البيتومين (مركب عضوي)
Blowout	اندفاع البئر
Breakers	المكسّرات
Breakeven Points	نقاط /تكاليف/أسعار التعادل
Bubble Point Pressure	ضغط الإشباع
Buffers	الصادّات (مواد تتحكم بالحموضة)
Burrowed Dolostone	حجر الدولوميت المنخرب
Cake	كعكة، سداة
Casing	تغليف (تبطين) الآبار
CBM: Coal Bed Methane	غاز طبقات الفحم
Cement	اسمنت/ ملاط
Cementite/ Fe ₃ C	السمنتيت (كربيد الحديد)
Central Processing Station	محطة معالجة مركزية
Channels	الأقنية

Chert	صخور الشرت (الصوان)
Circulatory System	الجهاز الدوراني
Clastic Rocks	الصخور الحطامية/ الفتاتية
Clay	الصلصال/الطين
Coagulants	مادة مرسيبة
Coal maceral group	مجموعة الماسرال الفحمية (فحم لقاع)
Compaction	انضغاط (الصخور)
Composite Fluids	الموائع المعقدة
Coning	المخاريط (مائية أو غازية)
Connate Water	المياه المترابطة
Continental Rift	الصدع القاري
COPD: Chronic Obstructive Pulmonary Disease	الانسداد الرئوي المزمن
Corrosion Inhibitors	موانع التآكل
Corrosive	أكّال، مخرّش
Cratons Basins	أحواض الرواسخ
Cross Bedding	التطبق المتقاطع (صخر)
Crosslinker	مواد تشابك
Crust	القشرة الأرضية
Crystalline Silica	سيليكاً متبلورة
Deformation	تشوه
Depleted	حقل مستنضب
Diatomite/ Tripolite	صخور الدياتوميت/التريبوليت
Divalent Cationic Ions	أيونات (شوارد) ثنائية التكافؤ
Dolomite	الصخور الدولوميتية
Effective Permeability	النفاذية الفعالة



Effective Porosity	المسامية الفعالة
Empirical Equations	المعادلات التجريبية
Emulsion	مستحلب
Endocrine	الغدد الصماء
Expenses	التكاليف
Facies	سحنات ترسيبية
Faults Rejuvenation	إعادة إحياء الفالق (تنشيط الفالق)
Fissility	خاصية التورق/التصفّح (صخر)
Floodplains	السهول الفيضية (بيئة ترسيبية)
Flowback Water	المياه الراجعة (المنتجة بعد التشقيق)
Foam	رغوة
Forelands Basins	أحواض الألسنة الصخرية
Formation Water	المياه الطبقيّة
Fractures	الشفوق
Fragments	فتات الصخر
Gas Oil Ratio (GOR)	نسبة الغاز في النفط
Gasification	تغويز، حقن غاز ضمن سائل ما
Gelling Agent	عنصر/مادة تخثير
Geothermal Fields	حقول الحرارة الجوفية
Guar	الغوار، صمغ نبات الغوار
Hard Water	الماء العسر
Heterogeneous	غير متجانس
Horsepower	القدرة الحصانية (طاقة)
Hybrid	هجين
Hybrid Fracturing	التشقيق الهجين

Hydrodynamic Connection	الاتصال الهيدروديناميكي
Hypertension	ارتفاع ضغط الدم
Igneous Rocks	الصخور النارية
Immune Deficiency	قصور المناعة الذاتية
Immune System	الجهاز المناعي
Induced Seismicity	النشاط الزلزالي المحرض
Inflammation of Respiratory Tract	التهاب المجاري التنفسية
Inflation	انتفاخ
Initial Connectivity	الناقلية الأولية
Insomnia	الأرق
Interbedded	صخر يتميز بطبقات متناوبة
Isotopes	نظائر
Jointing	التفلق / التكسر الطبيعي
Kerogen	الكروجين (مركب عضوي)
Limestone	الصخور الكربوناتية/الجيرية
Magma	المهل (الماغما) صهارة باطن الأرض
Magnitude	مدى قوة الهزة
Marginal	هامشي
Matrix	المادة لاحمة (مادة الترابط في الصخر)
Metamorphic Rocks	الصخور الاستحالية
Metamorphism	تحول (الصخور)
Microearthquakes	زلازل مكروية (ضئيلة الشدة)
Mining	التعدين، استخراج المعادن من باطن الأرض
Mud	الوحل
Mud-lean Oolitic Peloidal Packstone	حجر جيرى سرني مدعم مع نسبة منخفضة من الطين



Naphthenic Acid	أحماض نفتينية
Nervous System	الجهاز العصبي
Net Present Value	القيمة الصافية الحالية
Oil Based Fluids	سوائل ذات أساس نفطي
Oolitic Peloidal Grainstone	حجر حبيبي سرئي مع حبيبات من الطين العقدي
Open Hole Well	بئر ذو قاع مفتوح
Packer	باكور، جهاز عزل ضمن البئر
Packing	التطبيق (صخر منطبق)
Partially Hydrolyzed	مماه (متميه) جزئياً
Peat	الخت/ نسيج نباتي متحلل جزئياً
Permeability	النفاذية
Play	منظومة
Porosity	المسامية
Proppant	مواد داعمة (حبيبات رمل أو سيراميك)
Propped Fractures	شقوق مدعمة
Revenues	العوائد
Richter Scale	مقياس ريختر
Ripple Mark	العلامات المتموجة على الصخر
Salt Dome	قبة ملحية
Scales	قشور
Sedimentary	الصخور الرسوبية
Seismicity	الزلائية، النشاط الزلزالي
Shale	السجيل (صخر غضاري)
Shear Stress	إجهاد القص
Silicosis	السحار الرملي (داء رئوي)

Sleeping Disorder	اضطراب النوم
Solubility	انحلالية، قابلية الذوبان
Sorting	الترتيب (حبات الرمل)
Source Rocks	الصخور الأم/ الصخور المولدة للنفط
Spill	انسكاب
Stimulation	التحفيز/التنشيط (مكمن أو بئر)
Supersaturated	فوق مُشبع (محلول)
Surfactant	منشط التوتر السطحي
Thermal Maturity	النضج الحراري (مادة عضوية)
Total Porosity	المسامية الكلية
Ultimate Recovery	الإنتاج الأعظمي
Unconformity	سطح عم توافق
Undersaturated Reservoir	مكمن ضغطه أعلى من ضغط الإثباع
Upper Mantle	الوشاح (جزء من طبقات الأرض)
Utility Value	قيمة المنفعة
Viscosity Stabilizer	مثبتات اللزوجة
Vitrinite Reflectance	عاكس الفترنيت /معامل الانعكاس (مؤشر النضج الحراري)
Vugs	الفجوات، نوع من المسامية
Water Wet	صخر يميل للتبلل بالماء



اختصارات

AGS: Arkansas Geological Survey	إدارة المساحة الجيولوجية في أركنساس
AMS: American Chemical Society	الجمعية الكيميائية الأمريكية
ANL: Argonne National Laboratory	مخبر غير ربحي يتبع إدارة الطاقة في جامعة شيكاغو
API: American Petroleum Institute	معهد البترول الأمريكي
BTU: British Thermal Unit	وحدة حرارة بريطانية
CSUR: Canadian Society of Unconventional Resources	الجمعية الكندية للمصادر غير التقليدية
EARPC: Environment America Research & Policy Center	مركز الأبحاث الأمريكية للبيئة والسياسة
EIA: Energy Information Administration	إدارة معلومات الطاقة الأمريكية
EPA: Energy Protection Agency	وكالة حماية البيئة الأمريكية
FracFocus	منظمة أمريكية غير حكومية تدار من قبل اللجنة المصغرة للنفط والغاز، ومجلس حماية المياه الجوفية في الولايات المتحدة الأمريكية
GTI: Gas Technology Institute	معهد تكنولوجيا الغاز، منظمة تكنولوجية غير ربحية، مقرها في ولاية إلينوي الأمريكية
JOG: Journal of Geology	مجلة الجيولوجيا
MENA: Middle East and North Africa	منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا
NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health	المعهد القومي الأمريكي للصحة والأمن الصناعي
OUGO: Office for Unconventional Gas and Oil	مكتب النفط والغاز غير التقليديين (في بريطانيا)
SWC: State Water Commission	لجنة المياه الحكومية الأمريكية
USGS: United States Geological Survey	إدارة المساحة الجيولوجية الأمريكية

المراجع

- ¹ Z.P. Bezan and V.T. Chau, *Estimation of Hydraulic Crack Spacing from Gas Flow History Observed at Wellhead*. In: Congrui Jin, Gianluca Cusatis (Editors): *New Frontiers in Oil and Gas Exploration*, Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- ² Natig Aliyev, *The History of Oil in Azerbaijan*, Azerbaijan International Magazine, 1994. Available at: http://www.azer.com/aiweb/categories/magazine/22_folder/22_articles/22_historyofoil.html
- ³ تركي حمش، مبادئ التنقيب وإنتاج النفط والغاز، الملتقى الرابع والعشرين لأساسيات صناعة النفط والغاز، أوابك، الكويت، 2017.
- ⁴ Sephton. A. S & Hazen R.M, *On the Origins of Deep Hydrocarbons*. Reviews in Mineralogy & Geochemistry. Vol.75, 2013.
- ⁵ Uliana G. Romanova and Gennady V.Romanov, *The Origin of Petroleum: The Mystery Remains*, Geoscience New Horizons, Geoconvention, Calgary, Canada, 2015.
- ⁶ Colin Barker, *Organic Geochemistry in Petroleum Exploration*, University of Tulsa Publications, 1979.
- ⁷ Peter K. Link, *Basic Petroleum Geology*, OGCI Publications, Oil & Gas Consultants International, inc.1982. 5th Printing 1998.
- ⁸ Brian J. Cardott, *Introduction to Vitrinite Reflectance as a Thermal Maturity Indicator*, AAPG, 2012.
- ⁹ Ekwere J. Peters, *Advanced Petrophysics*, Department of Petroleum and Geosystems Engineering, the University of Texas in Austin, USA, 2012.
- ¹⁰ المصدر السابق 9.
- ¹¹ Robert Louis Folk, *Sedimentary Rocks*, Encyclopedia Britannica. Retrieved on 24/7/2016. Available at: <https://www.britannica.com/science/sedimentary-rock>
- ¹² Dresser Industries Incorporation, *Well Logging and Interpretation Techniques*, Dresser Atlas, USA, 2009.
- ¹³ Antonides, Lloyd E., *Diatomite*, USGS, Minerals, 1997. Retrieved August 2016. Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/250497.pdf>



14 المصدر 7.

15 Dresser Industries Incorporation, *Well Logging and Interpretation Techniques*, Dresser Atlas, USA, 2009.

16 David E. Johnson and Kathryn E. Pile, *Well Logging in Nontechnical Language*, 2nd Edition, Penn Well Publishing Company, 2002.

17 المصدر السابق 16.

18 Wilson, M. D, Pittman, E. D., *Authigenic clays in sandstones: recognition and influence on reservoir properties and paleoenvironmental analysis*. Journal of Sedimentary Petrology, vol. 47, no. 1, 1977.

19 Canadian Society for Unconventional Resources, *Understanding Tight Oil*, Available at:
http://www.csur.com/sites/default/files/Understanding_TightOil_FINAL.pdf,
Retrieved: 24/8/2016

20 René. Cossé, *Basics of Reservoir Engineering*, Edition Technip, Institute Français De Pétrole. 1993.

21 Scot Evans and Stan Cullick, *Improving Returns on Tight Gas*. Oil and Gas Financial Journal, volume 4, issue 7, July 2007.

22 Zhang, X.S., Wang, H.J., Ma, F. et al. *Classification and Characteristics of Tight Oil Plays*. Springer Open Access, Petroleum Science Journal, volume 13, issue 1, February 2016.

23 المصدر السابق 22.

24 Canadian Society for Unconventional Resources, *Understanding Hydraulic Fracturing*, Available at:
http://www.csur.com/sites/default/files/Hydr_Frac_FINAL_CSUR.pdf,
Retrieved: 7/9/2016

25 Jefferson W. Tester, *The Future of Geothermal Energy*, Massachusetts Institute of Technology, 2006

26 Charles Fairhurst, *Fractures and Fracturing: Hydraulic Fracturing in Jointed Rock*, Fairhurst, INTECH, 2013.

27 Batchelor, A. S., R. Baria, and K. Hearn, *Microseismic detection for Camborne Geothermal Project*, The Institution of Mining and Metallurgy in association with the Institution of Mining Engineers, London, 1983.

- ²⁸ Halliburton, *Hydraulic Fracturing, over 60 Years of Successful Performance Focused on the Environment*. No Date.
- ²⁹ Ataur R. Malik et al: *Overcoming Open Hole Multistage Acid Fracturing Challenges in Saudi Arabian Carbonate Reservoirs with Swellable Packers, Best Practices and Dynamic Evaluation*. The Saudi Aramco Journal of Technology, Summer 2016.
- ³⁰ Carl Montgomery, *Fracturing Fluids Components*, in: *Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*, book edited by Andrew P. Bunger, John McLennan and Rob Jeffrey, 2013.
- ³¹ Zillur Rahim, *Hydraulic Fracturing*, Society of Petroleum Engineers, Journal of Petroleum Technology, 1/3/2017. Available at: <https://www.spe.org/en/jpt/jpt-article-detail/?art=2718>
- ³² Halliburton, *Fracturing Fluid Systems*, 2013. Available at: http://www.halliburton.com/public/pe/contents/Data_Sheets/web/H/H05667.pdf
- ³³ Halliburton, *CleanStream® Ultraviolet Light Bacteria Control Process*, 2012. Available at: <http://www.halliburton.com/en-US/ps/stimulation/fracturing/water-based-gel-systems/cleanstream-%20ultraviolet-light-bacteria-control-process.page>
- ³⁴ Frac Focus, *Chemical Use in Hydraulic Fracturing*, 2016. Available at: <https://fracfocus.org/chemical-use/what-chemicals-are-used>
- ³⁵ OGJ Editor, *Ukraine Nine-Stage Frac Could Set European Mark*, Oil and Gas Journal, 5/7/2013. Available at: <http://www.ogj.com/articles/2013/07/ukraine-nine-stage-frac-could-set-european-mark.html>
- ³⁶ Stephen Rassenfoss, *Seeking Big Oil Production Gains by Fracturing with Microproppant*, SPE, Journal of Petroleum Technology, 1/3/2017. Available at: <https://www.spe.org/en/jpt/jpt-article-detail/?art=2715>
- ³⁷ Konschnik K and Dayalu A, *Hydraulic Fracturing Chemicals Reporting: Analysis of Available Data and Recommendations for Policymakers*, Journal of Energy Policy, ISSN: 0301-4215, 2016.
- ³⁸ Scott Rothbarth, *Operators Maximize Production Through Hydraulic Fracture Design in Challenging Market*, Digital H₂O, August, 2016. Available at: <http://www.digitalh2o.com/blog/operators-maximize-production-through-hydraulic-fracture-design-challenging-market>



- ³⁹ Schlumberger, *Composite Fracturing Fluids Enhance reservoir contact*, www.slb.com/BroadBand
- ⁴⁰ Gupta, D.V.S., *Unconventional Fracturing Fluids for Tight Gas Reservoirs*, paper presented at SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, Texas, 2009.
- ⁴¹ المصدر السابق 40.
- ⁴² المصدر السابق 40، 41.
- ⁴³ Loree, D.N. and Mesher, S.T., *Liquefied Petroleum Gas Fracturing System*, US Patent Application 2007204991, 2007.
- ⁴⁴ Mantell, M. (2011). *Produced water reuse and recycling challenges and opportunities across major shale plays*. Chesapeake Energy Corporation. EPA Hydraulic Fracturing Study Technical Workshop #4 Water Resources Management. March 29- 30, 2011.
- ⁴⁵ EPA, *Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States*, EPA-600-R-16-236Fb, December, 2016.
- ⁴⁶ North Dakota State Government Commission: *Facts About North Dakota, Fracking & Water Use*, February 2014. Available at: <http://www.swc.nd.gov/4dlink9/4dcgi/GetContentPDF/PB-2419/Fact%20Sheet.pdf>
- ⁴⁷ *Water Withdrawals for Development of Marcellus Shale Gas in Pennsylvania*, College of Agricultural Science, The Pennsylvania State University, 2010. Available at: <http://pubs.cas.psu.edu/FreePubs/pdfs/ua460.pdf>
- ⁴⁸ Canadian Society for Unconventional Resources, *Understanding Hydraulic Fracturing*, Available at: www.csug.ca/images/CSUG_publications/CSUG_HydraulicFrac_Brochure.pdf.
- ⁴⁹ Chris Faulkner, *The Water Problem*, Oil & Gas Middle East, January 2014. Available at: <http://www.breitlingenergy.com/breitling-energy-ceo-chris-faulkner-featured-january-2014-issue-oil-gas-middle-east/>
- ⁵⁰ J. David Hughes, *Eagle Ford Reality Check: The Nation's Top Tight Oil Play After a Year of Low Oil Prices*, Post Carbon Institute Publications, December 2015.
- ⁵¹ تركي حمش، تطوير مصادر زيت السجيل عربياً وعالمياً، أوابك، مجلة النفط والتعاون العربي، المجلد 42، العدد 157، 2016.

⁵² WBI: *Where Middle East and North Africa Water Leaders Engage*, World Bank, 21/3/2011. <http://wbi.worldbank.org/wbi/stories/where-middle-east-and-north-africa-water-leaders-engage>

⁵³ وزارة النفط العراقية، الموقع الرسمي، 2016/11/5.

<https://oil.gov.iq/index.php?name=News&file=article&sid=1312>

⁵⁴ EIA, *U.S. Crude Oil and Natural Gas Proved Reserves, Year-end 2015*, Release Date: 14/12/2016.

⁵⁵ EIA, *Spot Prices for Crude Oil and Petroleum Products, Brent Spot Price FOB*, Release Date: 1/5/2017.

⁵⁶ Michael Ratner and Mary Tiemann, *An Overview of Unconventional Oil and Natural Gas Resources and Federal Actions*. In: Amber L. Tuft (Editor): *Unconventional Oil and Shale Gas, Growth, Extraction and Water Management Issues*, Nova Science Publishers, New York, 2015.

⁵⁷ EIA, *Shale Natural Gas Proved Reserves and Production, 2012-15*, Available at: https://www.eia.gov/naturalgas/crudeoilreserves/pdf/table_13.pdf

⁵⁸ Hamoud A. Al-Anazi, et al, *Successful Implementation of Horizontal Multistage Fracturing to Enhance Gas Production in Heterogeneous and Tight Gas Condensate Reservoirs: Case Studies*. The Saudi Aramco Journal of Technology, Spring 2013. P:2-9.

⁵⁹ Halliburton, *Creating Precise Microfractures that Connected Natural Fractures, Case Study: Kuwait Oil Company now produces more than 1,000 barrels of oil per day from wells that had not produced anything for 15+ years*. 12/2/2015. Available at: http://www.halliburton.com/public/pe/contents/Case_Histories/web/S_through_Z/SurgiFrac.pdf

⁶⁰ Zhihong Zhao Songgen He Jianchun Guo (Southwest Petroleum University) and Shengchuan Zhang (China National Petroleum Corp.), *Hybrid fracturing pilot increases China's Dagang tight oil production*, Oil and Gas Journal, Volume 114, Issue 6, 6/6/2016.

⁶¹ المصدر 45.

⁶² Tanya J. Gallegos and Brian A. Varela, *Trends in Hydraulic Fracturing Distributions and Treatment Fluids, Additives, Proppants, and Water Volumes Applied to Wells Drilled in the United States from 1947 through 2010—Data Analysis and Comparison to the Literature*, USGS, Scientific Investigations Report 2014–5131, 2015.



- ⁶³ تركي حمش، تطوير مصادر زيت السجبل عربياً وعالمياً، أوابك، مجلة النفط والتعاون العربي، المجلد 42، العدد 158، 2016.
- ⁶⁴ Dilhan ILK/ DeGolyer and MacNaughton, *Perspectives on the Well Performance Analysis and Forecasting in Unconventional Resources*, A Presentation in the SPE PRMS Workshop, Brisbane, Australia, 13/11/ 2013.
المصدر 45، 61.
- ⁶⁶ المصدر السابق 45، 61، 65.
- ⁶⁷ Scott Rothbarth, *Operators Maximize Production Through Hydraulic Fracture Design in Challenging Market*, Digital H₂O, 2016. Available at: <http://www.digitalh2o.com/blog/operators-maximize-production-through-hydraulic-fracture-design-challenging-market>
- ⁶⁸ Alan P. Byrnes, *Role of Induced and Natural Imbibition in Frac Fluid Transport and Fate in Gas Shales*, Technical Workshops for Hydraulic Fracturing Study: Fate & Transport, Arlington, VA, USA, March 28-29, 2011. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/roleofinducedandnaturalimbibitioninfracfluid.pdf>
- ⁶⁹ Hart Energy, *Water Management Activity Highlights: Unconventional Oil and Gas Center*, November, 2016.
- ⁷⁰ Mantell, ME, *Recycling and Reuse of Produced Water to Reduce Freshwater Use in Hydraulic Fracturing Operations*, Technical Report, U.S. Environmental Protection Agency, 2013. Available at: <http://www2.epa.gov/hfstudy/summary-technical-workshop-water-acquisition-modeling-assessing-impacts-through-modeling-and>
- ⁷¹ Keister, T. *Marcellus Hydrofracture flowback and produced wastewater treatment, recycle, and disposal technology*. The Science of Marcellus Shale, Lycoming College in Williamsport, PA. January 29, 2010.
- ⁷² U.S. Environmental Protection Agency, *Development of Rapid Radiochemical Method for Gross Alpha and Gross Beta Activity Concentration in Flowback and Produced Waters from Hydraulic Fracturing Operations*, Report No. EPA/600/R-14/107. 2014.
- ⁷³ Tom Barnes, *2 Drillers Fined for Pennsylvania Gas Well Blowout*, Post-Gazette Harrisburg Bureau, 14/7/2010.
- ⁷⁴ Environmental XPRT, *PA DEP, DEP Fines Atlas Resources for Drilling Wastewater Spill in Washington County*, 17/8/2010.

- ⁷⁵ Avner Vengosh Nancy Lauer and Jennifer Harkness, *Contamination in North Dakota Linked to Fracking Spills*, 27/4/2016. Available at: <https://nicholas.duke.edu/about/news/ContaminationinNDLinkedtoFrackingSpills>
- ⁷⁶ Debra McElreath, *Comparison of Hydraulic Fracturing Fluid Composition with Produced Formation Water following Fracturing – Implications for Fate and Transport*. Proceedings of the Technical Workshops for the Hydraulic Fracturing Study: Fate and Transport, EPA, 2011. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/epa600r11047.pdf>
- ⁷⁷ Clark, CE; Veil, JA, *Produced Water Volumes and Management Practices in the United States*, Argonne National Laboratory, Technical Report, 2009. Available at: <http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2009/07/64622.pdf>
- ⁷⁸ Dahm, K; Chapman, M, *Produced Water Treatment Primer: Case Studies of Treatment Applications*, Technical Report, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Water Treatment Group, U.S. Department of the Interior, August, 2014. Available at: http://www.usbr.gov/research/projects/download_product.cfm?id=1214.
- ⁷⁹ GTI, *Techno-economic Assessment of Shale Gas Water Management Solutions*, June 2012. Available at: http://www.gastechnology.org/reports_software/Documents/GTI-120004-Abstract-ExecutiveSummary-TOC.pdf
- 80 المصدر 63.
- ⁸¹ U.S. Environmental Protection Agency. *Draft Evaluation of Impacts to Underground Sources of Drinking Water by Hydraulic Fracturing of Coalbed Methane Reservoirs*. EOA 816-D- 02-006, August 2002.
- ⁸² Gayathri Vaidyanathan, *Fracking Can Contaminate Drinking Water*, Scientific American Magazine, 4/4/2016. Available at: <https://www.scientificamerican.com/article/fracking-can-contaminate-drinking-water/>
- ⁸³ Dominic C. DiGiulio and Robert B. Jackson, *Impact to Underground Sources of Drinking Water and Domestic Wells from Production Well Stimulation and Completion Practices in the Pavilion, Wyoming, Field*. Environ. Sci. Technology. 50 (8), American Chemical Society, 29/3/2016.
- ⁸⁴ Stephen G. Osborn, Avner Vengosh, Nathaniel R. Warnerb, and Robert B. Jacksona, *Methane Contamination of Drinking Water Accompanying Gas-Well Drilling and Hydraulic Fracturing*. Proceedings of the National Academy of Science, PNAS, vol. 108, no. 20,17/5/2011.



- ⁸⁵ Tina Jensen, *Fracking fluid blows out nearby well*, Earthworks, 19/10/2013. Available at: https://www.earthworksaction.org/media/detail/fracking_fluid_blow_out_near_by_well
- ⁸⁶ U.S. Environmental Protection Agency, *Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States*, EPA-600-R-16-236Fb, December, 2016.
- ⁸⁷ Reid Porter, API: EPA Distorts Science in Hydraulic Fracturing Study, News and Policy Issues, American Petroleum Institute, 13/12/2016. Available at: <http://www.api.org/news-policy-and-issues/news/2016/12/13/epa-distorts-science-in-hydraulic-fractu>
- ⁸⁸ Arkansas Geological Survey, Geohazards, Earthquakes, General Information. Available at: http://www.geology.ar.gov/geohazards/eq_geninfo.htm
- ⁸⁹ National Research Council, *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies*: National Academy of Sciences, 2012. Available at: <http://dels.nas.edu/Report/Induced-Seismicity-Potential-Energy-Technologies/13355>
- ⁹⁰ Richard Davies, Gillian Foulger, Annette Bindley and Peter Styles. *Induced Seismicity and Hydraulic Fracturing for the Recovery of Hydrocarbons*. Marine and Petroleum Geology, Volume 45, August 2013.
- ⁹¹ Hough, Susan E. et al., *Potentially Induced Earthquakes During the Early Twentieth Century in the Los Angeles Basin*, Bulletin of the Seismological Society of America, 106(6):2419, 2016.
- ⁹² Hsieh, P.A., Bredehoeft, J.D., *A Reservoir Analysis of the Denver Earthquakes: a case of induced seismicity*. Journal of Geophysical Research 86, 1981.
- ⁹³ المصدر 90.
- ⁹⁴ Marie Keiding, Thóra Árnadóttir, Sigurjón Jónsson and Andy Hooper. *Plate Boundary Deformation and Man-Made Subsidence Around Geothermal Fields on the Reykjanes Peninsula, Iceland*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 194(4):139-149 · July 2010.
- ⁹⁵ Rex C. Buchanan, K. David Newell, Catherine S. Evans, Richard D. Miller, and Shelby L. Peterie, *Induced Seismicity: The Potential for Triggered Earthquakes in Kansas*, Kansas Geological Survey, The University of Kansas, Public Information Circular 36, April 2014, Revised Aug. 2015.

- ⁹⁶ Austin A. Holland, *Earthquakes Triggered by Hydraulic Fracturing in South-Central Oklahoma*, Bulletin of the Seismological Society of America, v.103, no. 3, 2013. Available at: ftp://seis.es.uwo.ca/pub/ktiampo/Rachele/Inducedseismicity_diffusion.pdf
- ⁹⁷ Mark D. Zoback, *Managing the Seismic Risk Posed by Wastewater Disposal*. Earth Magazine, Vol. 57, no.4, April 2012.
- ⁹⁸ USGS and Oklahoma Geological Survey, *Earthquake Swarm Continues in Central Oklahoma*, 22/10/2013. Available at: <https://archive.usgs.gov/archive/sites/www.usgs.gov/newsroom/article.asp-ID=3710.html>
- ⁹⁹ EPA, *Class II wells—Oil and gas related injection wells (class II)*. U.S. Environmental Protection Agency, 2012. Available at: <http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/class2/>
- ¹⁰⁰ KCC, *KCC Issues Order Reducing Disposal Volumes in Portions of Harper and Sumner Counties* (news release): Kansas Corporation Commission, 19/3/2015 Available at: <http://www.kcc.state.ks.us/pi/press/15-01.htm>, (Accessed 20/2/2017).
- ¹⁰¹ Cuadrilla Resources, official website, *Cuadrilla takes action to minimize impact of Balcombe protest camp and calls on protestors to remain peaceful*. Media resources, Press Release: 16/8/2013. Available at: <http://cuadrillaresources.com/media-resources/press-releases/cuadrilla-takes-action-to-minimise-impact-of-balcombe-protest-camp-and-calls-on-protestors-to-remain-peaceful/> (Accessed: 21/2/2017).
- ¹⁰² Nick Boles and George Osborne, HM Treasury, Department for Communities and Local Government, Budget 2013, *Shale gas: government unveils plan to kick start investment with generous new tax breaks*. 19/7/2013. Available at: <https://www.gov.uk/government/news/shale-gas-government-unveils-plan-to-kick-start-investment-with-generous-new-tax-breaks> (Accessed: 21/2/2017).
- ¹⁰³ Theo Colborn, Carol Kwiatkowski, Kim Schultz, and Mary Bachran, *Natural Gas Operations from a Public Health Perspective*, Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal Vol. 17, Iss. 5, 2011.
- ¹⁰⁴ Roxana Z. Witter, Lisa McKenzie, Kaylan E. Stinson, Kenneth Scott, Lee S. Newman, and John Adgate, *The Use of Health Impact Assessment for a Community Undergoing Natural Gas Development*, US National Library of Medicine, National Institute of Health, American Public Health Association, v.103(6); Jun 2013.



- ¹⁰⁵ Chris Faulkner, *The Water Problem*, Oil & Gas Middle East, January 2014. Available at: <http://www.breitlingenergy.com/breitling-energy-ceo-chris-faulkner-featured-january-2014-issue-oil-gas-middle-east/>
- ¹⁰⁶ Sara G. Rasmussen, Elizabeth L. Ogburn, and Meredith McCormack, *Association Between Unconventional Natural Gas Development in the Marcellus Shale and Asthma Exacerbations*. Journal of American Medical Association, Intern Med.; 176(9):1334-1343, 2016.
- ¹⁰⁷ Joe Hoffman, *Potential Health and Environmental Effects of Hydrofracking in the Williston Basin, Montana*. Geology and Human Health, Department of Earth Sciences, Montana State University, 2012.
- ¹⁰⁸ NIOSH, *Occupational Respiratory Diseases*. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS Publication, No. 86-102, 1986.
- ¹⁰⁹ NIOSH, *Worker Exposure to Silica during Hydraulic Fracturing*, 1-800-321-OSHA (6742), No Date, Available at: https://www.osha.gov/dts/hazardalerts/hydraulic_frac_hazard_alert.html
- ¹¹⁰ Elizabeth Ridlington (Frontier Group), John Rumpler (Environment America Research & Policy Center), *Fracking by the Numbers: Key Impacts of Dirty Drilling at the State and National Level*, October 2013.
- ¹¹¹ David White, *Oil Price Stability in mid-\$50s Restoring Confidence in Shale Country*, World Oil Magazine, 3/7/2017.
- ¹¹² Robert Kirkman, *Acceptable Risk and Policy Context of Hydraulic Fracturing*, Work Shop: Risks and Policies of Hydraulic Fracturing: Assessment and Deliberation. Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, November 13-14, 2014.
- ¹¹³ Terry Engelder, *The Fracking Debate in Europe*, Work Shop: Risks and Policies of Hydraulic Fracturing: Assessment and Deliberation. Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, November 13-14, 2014.
- ¹¹⁴ Wood Mackenzie, *Oil prices: North American oil plays - breakeven analysis*, October 2014.
- ¹¹⁵ Krane, J., Agerton, M., 2015. *OPEC Imposes 'Swing Producer' Role upon U.S. Shale: Evidence and Implications*, IAEE Energy Forum, Q3 2015. Available at: <https://iaee.org/en/publications/fullnewsletter.aspx?id=36>

- ¹¹⁶ EIA, *Trends in U.S. Oil and Natural Gas Upstream Costs*, 23/3/2016. Available at: <https://www.eia.gov/analysis/studies/drilling/>
- ¹¹⁷ EIA, Annual Energy Outlook, 2014.
- ¹¹⁸ Wall Street Journal, Graphics, *Barrel Breakdown*, 15/4/2016. Available at: <http://graphics.wsj.com/oil-barrel-breakdown/>
- ¹¹⁹ Markets and Markets, *Hydraulic Fracturing Market - Global Trends and Forecasts to 2019*. Abstract available at: <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/hydraulic-fracturing.asp> Retrieved: 27/3/2017.
- ¹²⁰ Mordor Intelligence, *Global Hydraulic Fracturing Market Outlook (2015-2020)*. Abstract Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/hydraulic-fracturing-market-industry?gclid=CO-dhLmL9tICFYYaGwodspUEQw> Retrieved: 27/3/2017.
- ¹²¹ Global Markets Insights, *Hydraulic Fracturing Market: rice Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2016 – 2024*. Abstract available at: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/hydraulic-fracturing-market> Retrieved: 27/3/2017.
- ¹²² V. John Sunder et al: *Water Management in Leather Industry*, Journal of Scientific and Industrial Research, Vol. 60. June 2001.



Hydraulic Fracturing and its Potential Environmental Effects

Preface

Hydraulic Fracturing (HF) is a longstanding technique emerged in the early 1940s, it was soon adopted to develop oil and gas wells in many countries.

Recently, HF gained much focus after its wide use in tight oil and gas fields. Acid jobs in the 1930s may have been the cause behind using HF, as operators noticed that when injecting acid at high pressure, the reservoir acceptability eventually increases. Thus, it is believed that early acid jobs were also indirect fracturing jobs. However, the first recorded direct HF job took place in 1947 in Hugoton gas field, West Kansas, USA.

Some authors use the term Breaking or Cracking to denote the same technique, but fracturing is more accurate terminology as HF doesn't break or crack the rock, it rather creates tiny fissures or enlarges the microscopic existing ones to diameters that mostly don't exceed 1 mm.

Simply speaking, HF is a process to inject a fluid (mostly water with other additives) at high pressure in a low permeability formation to create/enlarge fractures, this allows trapped oil and/or gas to flow towards the well bore. In other words, HF is an act of increasing the area of rocks linked to the well. Accordingly, the importance of HF stems from a simple idea: a highly porous reservoir with reasonable volume of hydrocarbons, but the permeability is too low to allow the hydrocarbons to move, therefore the reservoir rocks must be fractured to allow the fluids to move.

As a rule of thumb, a gas reservoir with less than 1 millidarcy and an oil reservoir with less than 10 millidarcy must be stimulated. Carbonate rocks permeability ranges between 0.1- 1 millidarcy, while permeability of shale reservoir could be as low as 10^{-4} to 10^{-6} millidarcy.

Rapid advances in exploration and drilling techniques have contributed to a very large number of conventional oil discoveries, the rise in conventional oil prices has contributed to the re- evaluation of resources that were once considered out of economic viability.

This study has focused on USA experience to show the effectiveness, results and consequences of HF. USA was taken as an example because of the numerous number of wells fractured in different basins which has led to an obvious change in the USA oil production trend line, this in turn has influenced the global oil markets.

It concluded that HF needs large amounts of water that could reach 400 thousand barrels per well. Due to the obvious decline in shale oil/ gas wells production, re-fracking and/ or drilling mean more water requirements. It showed that using HF in very deep formations is still out of reach of current technologies.

A variety of chemicals are used in HF fluids. Although the proportion of chemicals is usually small (about 0.5%), the large amount of water means that the amount of chemicals used is also high. Companies often keep the names of the materials used in the HF processes as a commercial secret, this has made public opinion in many countries stands against HF.

Many studies have shown that HF fluids if leaked into groundwater or surface water, might form a potentially serious hazard to the environment, and can contaminate the soil in case of spillage. However, it is a fact that most if not all other industries have the same risk factor.

It is unreasonable and not possible to ignore the environmental impact of oil and gas production in general and HF in particular, but it is also unreasonable to exaggerate these effects as if hydraulic operations are solely responsible for all damage to the environment. It is therefore necessary to emphasize that each industrial process has its side effects, the logical and sustainable response is to try to reconcile the extent to which human societies need this process and to minimize such potential effects.

In practical terms, it is not possible to define a pinch mark that reflects the cost of HF. The cost of water sources, infrastructure, equipment, expertise, taxation, energy costs, etc., are different from one place to another within the United States of America, and within the rest of the world. However, it is possible to draw attention to a fiscal range that reflects the share of the costs of HF compared to the costs of the total drilling.

This study through the examined examples showed that the cost of the HF in general ranges from 45 to 62% of the total cost of the well.





منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)