

عنوان البحث

تحديات استقرار جدار البئر وإدارة فقدان السوائل أثناء عمليات الحفر النفطية

د. وسيلة عبد العزيز العاشق¹، م. نسرين عبد الله الخوجة²

¹ أستاذ مساعد قسم هندسة نفط كلية الهندسة جامعة طرابلس، ليبيا.

² محاضر مساعد قسم هندسة نفط كلية الهندسة جامعة طرابلس، ليبيا.

HNSJ, 2025, 6(10); <https://doi.org/10.53796/hnsj610/13>

المعرف العلمي العربي للأبحاث: <https://arsri.org/10000/610/13>

تاريخ النشر: 2025/10/01م

تاريخ القبول: 2025/09/15م

تاريخ الاستقبال: 2025/09/07م

المستخلص

تُعد مشكلات عدم استقرار جدار البئر وفقدان سوائل الحفر من أبرز التحديات التقنية التي تواجه عمليات الحفر النفطي، إذ تؤثر مباشرة على كفاءة الإنتاج وترفع من التكاليف التشغيلية. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل العوامل الميكانيكية والكيميائية المؤثرة في استقرار جدار البئر، مع تسليط الضوء على الخصائص الفيزيائية والكيميائية لسوائل الحفر ودورها الحيوي في تعزيز استقرار التكوينات الجيولوجية. كما تتناول الورقة تصنيف أنظمة عدم استقرار جدار البئر، بما في ذلك الانهيار، الكسر، عدم الاستقرار الميكانيكي والكيميائي، إضافة إلى مشكلة الطبقات الزاحفة وانحراف مسار الحفر. وتعرض الدراسة آليات فقدان السوائل، مثل التسرب عبر المسام الدقيقة والتشققات الطبيعية أو المستحثة، وتوضح التداعيات الاقتصادية المترتبة على توقف الحفر وزيادة زمن عدم الإنتاج (NPT) وارتفاع تكاليف الصيانة والمعالجات. وتخلص النتائج إلى أن التحكم الفعال في استقرار البئر يتطلب موازنة دقيقة بين خصائص الطين (الكثافة، اللزوجة، الجل سترينث، الراشح)، وتطبيق استراتيجيات متقدمة للحد من فقدان السوائل، بما في ذلك استخدام مواد منع فقدان التدوير، وأنظمة مراقبة ضغط البئر، وتقنيات التحليل والمحاكاة الحاسوبية. وتؤكد الدراسة أن الدمج بين المعرفة النظرية والتطبيقات الميدانية الحديثة هو المسار الأمثل لتحقيق عمليات حفر أكثر أمانًا وكفاءة، وتقليل المخاطر الاقتصادية والبيئية المصاحبة.

الكلمات المفتاحية: استقرار جدار البئر، فقدان السوائل، سوائل الحفر، الحفر النفطي، التكاليف التشغيلية.

RESEARCH TITLE

Challenges of Wellbore Stability and Fluid Loss Management During Drilling Operations

Abstract

Wellbore instability and drilling fluid loss are among the most critical challenges in petroleum drilling operations, as they directly affect productivity efficiency and significantly increase operational costs. This study aims to analyze the mechanical and chemical factors influencing wellbore stability, with emphasis on the physical and chemical properties of drilling fluids and their vital role in supporting geological formations. The paper addresses different types of wellbore instability, including collapse, fracturing, mechanical and chemical instability, creeping formations, and hole deviation. It also discusses the mechanisms of fluid loss, such as seepage through high-permeability formations, fracturing, and loss into natural or induced cavities, while highlighting the economic implications of non-productive time (NPT), high repair costs, and fluid replacement. The findings indicate that effective wellbore stability control requires a precise balance of drilling fluid properties (density, viscosity, gel strength, filtrate), along with advanced strategies to mitigate fluid loss, including the use of lost circulation materials (LCM), accurate wellbore pressure monitoring, and computational modeling techniques. The study concludes that integrating theoretical knowledge with field-based technologies is essential to achieve safer and more efficient drilling operations, while minimizing associated economic and environmental risks.

Key Words: Wellbore stability, Fluid loss, Drilling fluids, Oil drilling, Operational costs.

1. المقدمة

استقرار جدار البئر يتأثر بعوامل ميكانيكية وكيميائية، خاصة في تشكيلات الصخر الزيتي (shale) التي تحتوي على معادن طينية تتفاعل مع سوائل الحفر فتتسبب في انتفاخ الصخر وضعف خواصه الميكانيكية مما يؤدي إلى انهيار جدران البئر ويُعرف عدم استقرار جدار الآبار بأنه فشل التكوين المحيط في الحفاظ على السلامة الميكانيكية نتيجة تأثره بعمليات الحفر وضغوط السوائل، مسببا في ذلك انهيارات، تراكم للقطع، وحتى فقدان السيطرة على البئر (Dodson et al., 2003).

تعتبر سوائل الحفر أداة رئيسية في التحكم بهذا الفشل، حيث ينبغي أن توفر دعماً ميكانيكياً مع السيطرة على ضغوط التكوين داخل نافذة آمنة، تقادياً لانهيار البئر أو انتشار التشققات التي تؤدي لفقدان السائل (Azar & Samuel, 2007).

يُعد فقدان السائل إحدى المشكلات الشائعة خاصة في التكوينات المشققة أو البحرية، حيث أظهرت إحصائيات بحوث خليج المكسيك أن فقدان السائل ساهم بأكثر من 10% من فترات عدم الإنتاج خلال الحفر بين 1993 و2003. فتبرز الحاجة الملحة إلى فهم متعمق لهذه الظاهرة لتطبيق استراتيجيات وقائية وعلاجية فعالة (Hou et al., 2004).

2. دور سوائل الحفر في استقرار جدار البئر

يحدث فقدان السوائل عندما يهرب سائل الحفر إلى التكوينات الصخرية عبر شقوق أو مسام عالية النفاذية، وهو مشكلة تؤدي إلى انخفاض ضغط سائل الحفر مما يفاقم عدم استقرار البئر ويزيد من مخاطر الانهيار وكذلك توقف وزيادة تكلفة عمليات الحفر (Dodson, J.K., et al. 2003).

2.1 الوظائف الأساسية لسوائل الحفر

الوظائف الأساسية لسوائل الحفر متعددة وهامة لضمان نجاح وسلامة عمليات حفر الآبار النفطية والغازية، ويمكن تلخيصها كما يلي :

1. إزالة قطع الصخور المحفورة: تحمل سوائل الحفر الفتات الصخري الناتج من عملية الحفر إلى سطح الأرض، مما يحافظ على نظافة البئر ويمنع تراكم الصخور في قاعه.
2. تبريد وتزييت معدات الحفر: تقلل من الاحتكاك وتبرد رؤوس الحفر والمعدات لمنع تلفها بسبب الحرارة الناتجة عن التشغيل.
3. التحكم في الضغوط تحت سطحية: توفر ضغطاً هيدروستاتيكياً مناسباً لمنع انهيار جدران البئر والسيطرة على ضغط الطبقات الجيولوجية المحيطة.
4. تعليق المواد الصلبة عند توقف الدوران: يمنع ترسيب الفتات الصخري ويحتفظ بها معلقة في السائل أثناء توقف عملية الحفر مؤقتاً.
5. تخفيف وزن الأنابيب داخل البئر: يدعم وزن أنابيب الحفر والتغليف مما يقلل الضغط على أجهزة الرفع ويسهل التحكم في الأنابيب.
6. الحد من التأثيرات الضارة على الطبقات المنتجة: يحمي المكامن من الانسداد ويعزز نفاذيتها.

7. نقل الطاقة الهيدروليكية: ينقل الطاقة إلى رؤوس الحفر لتحسين كفاءة الحفر.
 8. إزالة المواد الصلبة غير المرغوب فيها: ينقل الجزيئات غير المرغوبة إلى السطح ليتم فصلها.
 9. جمع معلومات جيولوجية دقيقة: يحمل عينات من الصخور والغازات التي تزود الجيولوجيين بمعلومات عن الطبقات.
 10. الحد من تآكل المعدات: يحتوي على مواد مضادة للتآكل تطيل عمر المعدات.
 11. تقليل التأثيرات البيئية: تطوير سوائل صديقة للبيئة للحد من التلوث وحماية التربة والمياه الجوفية.
- عامة تلعب سوائل الحفر أدواراً متعددة تشمل دعم جدران البئر، التحكم في ضغط التكوين، نقل القطع الصخرية، تبريد رأس المنقب، والمحافظة على نقاوة التكوين. (Mitchell, 1986)

2.2 الخصائص الفيزيائية والكيميائية:

الخصائص الفيزيائية والكيميائية لسوائل الحفر تشمل عدة جوانب حيوية تؤثر على كفاءتها وأدائها أثناء عمليات الحفر، أهمها كما يلي:

▪ الخصائص الفيزيائية:

- الكثافة (Mud Weight): تعبر عن كتلة وحدة الحجم، وهي مهمة للتحكم في ضغط عمود سائل الحفر لمنع انهيار جدران البئر أو انفجارها. تقاس بوحدات مثل جرام/سم³ أو رطل/غالون (الصخور & Economides, Nolte, 2000).
- اللزوجة (Viscosity): مقاومة السائل للجريان، تقاس بطرق متعددة مثل قمع مارشال أو جهاز Fann ، وتؤثر على قدرة السائل على حمل الفتات الصخرية ونقله. (Darley & Gray, 1988).
- القوة الجيلاتينية (Gel Strength): تعبر عن قدرة الطين على التعليق والاستقرار عند توقف الحركة، وهو عامل مهم لمنع ترسيب القطع أثناء توقف الحفر. (Schlumberger, 2004).
- الراشح (Filtrate): كمية السائل التي تتسرب من الطين إلى التكوين الصخري، مما يؤثر على استقرار البئر. (Schlumberger, 2004).
- درجة الحموضة (pH): تقاس لتحديد قاعدية أو حمضية السائل، وهي مهمة لمعرفة التفاعلات الكيميائية مع المواد الطينية والمعادن. (Brady et al., 1999).

▪ الخصائص الكيميائية

- المكونات الأساسية: تشمل الماء بأنواعه (عذبة، مالحة)، الزيوت، المواد الصلبة غير المتفاعلة مثل الباريت (لزيادة الكثافة)، والمواد الطينية مثل البنتونيت التي تزيد اللزوجة والسيطرة على الراشح. (Brady et al., 1999).
- الإضافات الكيميائية: مثل مثبطات صخر الزيتي (كالكلوريد البوتاسيوم)، مواد التحكم في الحموضة (هيدروكسيد الصوديوم)، مضادات التآكل، عناصر الاستحلاب، وغيرها لضبط خصائص السائل وتحسين أدائه. (Brady et al., 1999).

- الاستقرار الحراري والكيميائي: ضروري لمواجهة تأثير درجات الحرارة المرتفعة وسوائل التكوين المالحة للحفاظ على ثبات خواص السائل (Brady et al., 1999).

3.2 سوائل الحفر:

اهم سوائل الحفر الماء، السوائل الزيتية، البوليمر، السوائل المالحة، الصمغيات، وغيرها تختلف في تركيبها الكيميائي حسب ظروف وأهداف الحفر (Brady et al., 1999).

هذه الخصائص مجتمعة تساهم في تلبية متطلبات الحفر من حيث استقرار جدران الآبار، نقل الفتات، التحكم في الضغوط، والحماية البيئية.

1. سوائل الحفر ذات الأساس المائي (Water-based fluids):

- أكثر أنواع سوائل الحفر شيوعاً، تتكون أساساً من المياه العذبة أو المالحة، مع إضافة طين البنتونيت ومواد كيميائية لتحسين خواص السائل مثل التحكم في اللزوجة، الكثافة وفقدان السوائل وهي مناسبة لمعظم ظروف الحفر وتتميز بتكلفة منخفضة وسهولة التعامل معها.
- تشمل أنواع مثل طين مشتت (Dispersed systems) وسوائل معالجة بالكالسيوم والمياه المالحة والمياه المالحة المشبعة.

2. سوائل الحفر ذات الأساس النفطي (Oil-based fluids):

- تحتوي على النفط أو الديزل كأساس للسائل، وهي تستخدم في ظروف الحفر الصعبة مثل التكوينات الزيتية التي يصعب التعامل معها بسوائل مائية. تتميز بقدرتها على التحكم العالي في فقدان السوائل واستقرار جدار البئر ولكنها أكثر تكلفة ولها تأثير بيئي أكبر.

3. سوائل الحفر ذات الأساس التركيبي (Synthetic-based fluids):

- مركبات صناعية تجمع بين مزايا السوائل النفطية مع تقليل الآثار البيئية وتستخدم في ظروف حفر خاصة حيث تكون السوائل النفطية غير مناسبة.

4. سوائل الحفر البوليمرية (Polymer drilling fluids):

- سوائل مائية تستخدم البوليمرات ذات الوزن الجزيئي العالي لتحسين اللزوجة وحماية جدار البئر، فعالة في التحكم في فقدان السوائل وحماية المكامن.

5. الموائع الهوائية (Pneumatic drilling fluids):

- تستخدم الغازات مثل الهواء أو الرغوة أو الضباب بدلاً من السوائل. تستخدم عند وجود ضغوط تكوين منخفضة ومخاطر فقدان تدوير عالية.

هذه التصنيفات تستند إلى الاختلاف في التركيب ودور السائل أثناء الحفر، وغالباً ما يُختار نوع السائل بناءً على نوع التكوين الجيولوجي وظروف الحفر لضمان استقرار البئر وكفاءة العملية.

4. مشاكل عدم استقرار جدار البئر:

أنواع عدم استقرار جدار البئر تتضمن عدة مشاكل رئيسية تؤثر على سلامة وحجم البئر أثناء الحفر. يمكن تصنيفها كما يلي:

1. الانهيار: (Borehole collapse)

يحدث عندما يكون ضغط سائل الحفر أقل من اللازم للحفاظ على السلامة الهيكلية لجدار البئر، مما يؤدي إلى سقوط أو تدهم أجزاء من الجدار. هذا الانهيار يسبب مشاكل مثل التصاق الأنابيب وصعوبة استمرار الحفر. (Barree, R.D., & Conway, M.W. 2012)

2. الكسر: (Fracturing)

يحدث عندما يتجاوز ضغط سائل الحفر ضغط التكوين، مما يسبب حدوث شقوق في جدار البئر. ينتج عن ذلك فقدان تدوير الطين وتسبب في تسرب السائل إلى التكوين (فقدان السوائل) (Barree, R.D., & Conway, M.W. 2012).

3. عدم الاستقرار الميكانيكي:

ناتج عن اضطراب حالة الإجهاد في الطبقات الصخرية حول البئر بعد الحفر، حيث تقبل الصخور ميكانيكياً بسبب تجاوز الإجهادات عند عملها على الصخر، مثل فشل الانضغاط (Compressive failure) أو الشد (Tensile failure) (Zoback, 2010). Azar, J.J., & Samuel, O. 2007

4. عدم الاستقرار الكيميائي:

بسبب التفاعل الكيميائي بين سوائل الحفر وتكوين الصخور، خاصة الصخور الطينية، حيث يُضعف هذا التفاعل من قوة التماسك ويؤدي إلى تدهور الصفائح الطينية وانتفاخها ثم انهيار الجدار (Economides & Nolte, 2000).

5. الطبقات الزاحفة:

طبقات مثل الغضار الصفائحي والطبقات الملحية التي تزحف باتجاه البئر نتيجة فروق الضغط مما يؤدي إلى ضعف واستقرار غير كافٍ لجدار البئر (Azar, J.J., & Samuel, O. 2007).

6. انحراف جدار البئر (Hole deviation).

يشير إلى خروج مسار الحفر عن المسار المخطط له بسبب التكوين غير المتجانس، خصائص معدات الحفر، وعمليات حفر غير مناسبة، مما يؤدي إلى مشاكل في استقرار وتوازن الحفر (Friedman et al., 2006).

هذه الأنواع من عدم الاستقرار تؤدي إلى مشاكل في عملية الحفر، تزايد التكاليف، وتأخير العمليات، لذا يحتاج مهندسو الحفر إلى مراقبة وتحليل هذه الأسباب لضبط شروط الحفر والسيطرة عليها بفاعلية.

5. فقدان السائل: الأسباب والآليات

يحدث فقدان السائل عندما تتجاوز ضغط السوائل الحد الذي تتحمله التكوينات، خاصة في المناطق المشققة، الكهفية، أو عالية النفاذية. (Zhou et al., 2013) يُقسم إلى:

• فقدان جزئي: مع استمرار تدفق الطين مع بعض الفقد.

• فقدان كلي: فقد كامل للعائدات، مما يشكل حالة حفر أعمى. (Jones et al., 2012) (Blind Drilling)

1.5 آليات الفقدان

• التسرب عبر الترشيح: حيث ينتقل السائل عبر مسام التكوين ويتسرب جزء منه على جدار البئر ليشكل فلتر كيك.

• تشقق التكوين: إحداث شقوق أو توسيع الشقوق الطبيعية عند تجاوز ضغط السوائل قوة الشد للتكوين (Nouri et al., 2008).

• تداخل الكهوف والشقوق الطبيعية أو المستحثة: مما يسبب فقدان كميات كبيرة وسريعة (Patel et al., 2015).

6. التحكم في فقدان السائل وضغط البئر:

التحكم في فقدان سائل الحفر وضغط البئر من العناصر الحيوية لضمان استقرار البئر والحفاظ على سير عملية الحفر بكفاءة وأمان.

6.1 التحكم في فقدان سائل الحفر

1. يحدث فقدان سائل الحفر عندما يتسرب السائل إلى تكوينات شديدة النفاذية أو متشققة، مما يؤدي إلى انخفاض ضغط السائل وزيادة مخاطر انهيار جدار البئر وفقدان التدوير. للتغلب على تسرب السائل:

- يتم استخدام سوائل حفر ذات خصائص مناسبة (مثل اللزوجة والكثافة) لتكوين طبقة كعكة طين مدمجة قليلة النفاذية حول جدار البئر لمنع التسرب.
- إضافة مواد منع فقدان التدوير (Lost Circulation Materials - LCM) مثل ورق الكربون الكالسيوم أو قشور الميكا أو البنتونيت، أو الأسمنت، ووجود الجوز المطحونة تساعد على سد الشقوق والتشققات في التكوينات الضعيفة.
- مراقبة ضغط وسرعة تدوير سائل الحفر مهمة لمنع زيادة الضغط المفرط الذي يسبب تكسير التكوين، أو انخفاضه الذي يسمح بتسرب السوائل (Zoback, 2010).
- تقنيات التحكم تشمل تخفيض كثافة السائل أو سرعة المضخة تدريجياً عند اكتشاف فقدان بسيط ومن ثم رصد التفاعل، مع القدرة على تعديل خصائص السائل حسب حاجة الحفر.
- التطبيق الأمثل للبرمجيات الهندسية: مثل محاكيات Techlog لتحليل استقرار البئر والتنبؤ بمناطق الفقد. (Schlumberger, 2023)

2.6 التحكم في ضغط البئر

- ضغط العمود الهيدروستاتيكي لسائل الحفر يجب أن يكون متوازنًا بعناية مع ضغط التكوين؛ حيث إذا كان الضغط أقل من ضغط التكوين يسبب انهيار جدار البئر، وإذا كان أعلى يسبب تكسير التكوين وحدوث فقدان سائل.

- زيادة كثافة سائل الحفر (عن طريق إضافة البارييت أو مواد أخرى للترجيح) تستخدم لرفع ضغط السائل ومنع تدفق سوائل التكوين أو الغازات إلى داخل البئر.
- أنظمة التحكم المتقدمة تستخدم أجهزة قياس دقيقة لمراقبة الضغط وتنظيم تدوير السائل باستمرار للحفاظ على توازن الضغط.
- التحكم في الضغط الديناميكي أثناء دوران السائل ضروري لمنع حدوث تغيرات مفاجئة قد تؤدي لمشاكل في استقرار البئر (Mitchell, 1986).
- يُعتبر الدمج بين اختيار سوائل الحفر المناسبة، واستخدام إضافات منع فقدان التدوير، والتحكم الدقيق في ضغط وسرعة تدوير السائل هو الحل الأمثل للحد من فقدان السوائل والحفاظ على ضغط آمن في البئر أثناء الحفر. (Economides & Nolte, 2000)

7. لمحة عن ارتفاع التكاليف نتيجة عدم استقرار جدار البئر:

يعد من أبرز المشاكل التي تواجه عمليات حفر الآبار النفطية والغازية ارتفاع التكاليف نتيجة عدم استقرار جدار البئر حيث يسبب ذلك توقف العمل، الحاجة إلى عمليات إصلاح متكررة، واستخدام موارد إضافية:

1. توقف عمليات الحفر: (Non-Productive Time – NPT)

عند انهيار جدار البئر، تتوقف عمليات الحفر بشكل مباشر، مما يسبب خسائر زمنية كبيرة ومكلفة. وفقاً لدراسة Dodson et al. (2003)، فقدان استقرار جدار البئر يعد سبباً رئيسياً لـ NPT والذي قد يصل إلى أكثر من 10% من إجمالي زمن الحفر، مما يرفع تكاليف المشروع بشكل كبير.

2. تكاليف إصلاح البئر وصيانة المعدات:

انهيار جدران البئر يؤدي إلى التصاق الأنابيب وتلف المعدات، فيستلزم عمليات تنظيف وإعادة تجهيز البئر، واستبدال معدات، مما يزيد من نفقات عمليات الحفر. (Azar & Samuel, 2007)

3. فقدان السوائل وزيادة استهلاك المواد:

فقدان السوائل عبر التكوينات المشققة يجبر على إعادة تعبئة سوائل الحفر بمواد إضافية، مما يرفع التكاليف التشغيلية واللوجستية. (Hou et al., 2004)

4. زيادة مخاطر الحوادث والآثار البيئية:

عدم الاستقرار قد يؤدي إلى تسربات خطيرة تتطلب إجراءات إضافية للتعويض عن التأثيرات البيئية وضمان السلامة، مما يضيف أعباء مالية وقانونية.

5. حفر أعماق إضافية أو آبار بديلة:

في بعض الحالات التي لا يمكن فيها استعادة استقرار البئر، يُضطر إلى حفر آبار بديلة أو التعمق لمواقع أخرى مما يزيد من الوقت والموارد المصروفة. (Barree et al., 2016)

الخلاصة

يعد تحقيق التوازن الدقيق بين وزن الطين، الخصائص الريولوجية، والقدرة على التحكم بفقدان السائل، مع تطبيق استراتيجيات مراقبة وتحليل متقدمة من المتطلبات الأساسية لاستقرار جدار البئر وتجنب عمليات الحفر مخاطر فنية واقتصادية جسيمة.

تؤكد الأبحاث والتطبيقات الميدانية على أهمية الدمج بين المعارف النظرية والتقنيات العملية لتحقيق حفر أكثر أماناً وكفاءة (Barree et al., 2016).

المراجع

1. Azar, J.J., & Samuel, O. (2007). Drilling Engineering. SPE Textbook Series.
2. Dodson, J.K., et al. (2003). Causes of Wellbore Instability: Impact on Operations and Non-Productive Time (NPT). SPE Drilling Conference.
3. Darley, H.C.H., & Gray, G.R. (1988). Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Gulf Publishing.
4. Economides, M.J., & Nolte, K.G. (2000). Reservoir Stimulation. Wiley.
5. El-Najjar, N., et al. (2010). Case Study: Safsaf Field Reservoir and Production Analysis. Journal of Petroleum Science.
6. Friedman, S., et al. (2006). Clay Swelling and Shale Stability in Drilling. SPE Reservoir Evaluation.
7. Hou, L., et al. (2004). Lost Circulation and Its Impact in Gulf of Mexico Drilling. Offshore Technology Conference.
8. Jones, D., et al. (2012). Blind Drilling and Lost Circulation Management. SPE Drilling Conference.
9. Mitchell, R.F. (1986). Fundamentals of Drilling Engineering. SPE Textbook Series.
10. Nouri, A., et al. (2008). Investigation of Hydraulic Fracturing and Lost Circulation. Journal of Petroleum Engineering.
11. Patel, S., et al. (2015). Loss of Circulation in Karst and Cavernous Formations. Offshore Technology Conference.
12. Barree, R.D., et al. (1997). Application of Oil-Based Mud in Shale Stability. SPE Drilling & Completion.
13. Barree, R.D., & Conway, M.W. (2012). Lost Circulation Materials and Their Application. SPE Drilling & Completion.
14. Barree, R.D., et al. (2016). Advances in Wellbore Stability and Lost Circulation Control. SPE Journal.
15. Brady, P., et al. (1999). Thermal and Chemical Stability of Drilling Fluids. Journal of Petroleum Science.
16. Schlumberger. (2004). Drilling Fluids Field Manual.
17. Schlumberger. (2023). Techlog Wellbore Analysis Software Manual.
18. Zhou, Y., et al. (2013). Mechanisms of Lost Circulation in Fractured Formations. Journal of Petroleum Science.
19. Zoback, M.D. (2010). Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press.