دراسة مخبرية لتركيب وخواص سوائل الحفر النانوية المستخدمة في حفر الطبقات المنتجة للنفط

د.م. مصطفى المصري – قسم الهندسة البترولية – كلية الهندسة الكيميائية والبترولية – جامعة حمص

الملخص:

إن أفضل طريقة لتقليل تخريب المنطقة المجاورة للبئر المخترقة للمكمن، الناتجة عن دخول الطور الصلب وفاقد الرشح، هي تشكيل قشرة طينية (كعكة حفر) رقيقة ومتينة، ذات نفاذية منخفضة. حيث أن تلوث المكمن يقلل من إنتاجية البئر ويقلل من معدل الاختراق بشكل كبير.

تم تحضير سائل حفر نانوي باستخدام البنتونايت النانوي (NB)، فكانت خواصه الريولوجية سيئة. تم تحسين هذه الخواص الريولوجية بمعالجته بكميات مختلفة من الإضافات الكيميائية (PAC, Starch, Xanthan Gum)، كما كانت خواصه الارتشاحية جيدة ومحققة لمتطلبات (API)، لكن كان فاقد الرشح معكر (يحتوي على جزيئات نانوية) تسبب تلوث المنطقة المجاورة للبئر. لدى خلط البنتونايت النانوي والبنتونايت التقليدي وتحضير سائل حفر بتركيب (75% Bent + 25% NB)، تم الحصول على فاقد رشح نظيف (غير معكر)، ولدى معالجة هذا السائل بكميات مختلفة من الإضافات الكيميائية الآنفة الذكر، تم تحسين جميع الخواص الجريانية والارتشاحية والحصول على قشرة طينية (كعكة حفر) رقيقة جداً ومتماسكة. وكان أفضل سائل نانوي حصلنا عليه مكون من (75% Bent + 25% NB + 1 g PAC) وهو يكافئ التركيب (75% Bent + 25% NB + 3 % PAC).

تبين أن سوائل الحفر الذكية النانوية، تمتلك القدرة على تكوين كعكة طينية رقيقة وغير نفوذه لمنع تغلغل سوائل الحفر ضمن الطبقة عبر جدران وقاع البئر.

الكلمات المفتاحية:

البنتونايت النانوي، سوائل الحفر الذكية، الطبقة المنتجة، الإضافات الكيميائية لسائل الحفر.

Laboratory study of the composition and properties of nano-drilling fluids used in drilling oil-producing formations

Abstract:

The best way to minimize damage to the reservoir surrounding the wellbore, caused by the intrusion of solid phase and mud loss, is to form a thin, durable, low-permeability mud cake. Reservoir contamination significantly reduces well productivity and the rate of penetration.

A nano-drilling fluid was prepared using nano-bentonite (NB), resulting in poor rheological properties. These properties were improved by treating it with varying amounts of chemical additives (PAC, starch, xanthan gum). Its filtration properties were good and met API requirements, but the filtration mud loss was cloudy (containing nanoparticles), causing contamination of the area surrounding the well. When nano-bentonite and conventional bentonite were mixed to prepare a drilling fluid with a composition of (75% Bentonite + 25% NB), a clean (non-turbid) filtration mud loss was obtained. Treating this fluid with varying amounts of the aforementioned chemical additives improved all flow and filtration properties, resulting in a very thin and cohesive mud cake. The best nano-fluid obtained was composed of (75% Bentonite + 25% NB + 1 g PAC), which is equivalent to the composition (75% Bentonite + 25% NB + 3% PAC).

It turns out that smart, nano-based drilling fluids have the ability to form a thin, impermeable mud cake to prevent drilling fluids from penetrating the formation through the walls and bottom of the well.

Keywords:
Nano-bentonite, smart drilling fluids, production formation, chemical additives for drilling fluid.

1. المقدمة:

يهدف هذا البحث، إلى دراسة مدى قابلية استخدام الغضار النانوي في سائل الحفر ذو الأساس المائي لتقليل تخريب المنطقة المجاورة للبئر أثناء اختراق الطبقات المنتجة.

وتأتي أهمية هذه الدراسة لتركيب سائل الحفر ذو الأساس المائي القائم على تقنية النانو باستخدام الغضار النانوي في تحضيره، ولدراسة تأثير الغضار النانوي على الخواص الريولوجية (الجريانية) لسائل الحفر ومدى تلويثه للطبقة الحاملة، ومقارنته مع أداء سائل الحفر التقليدي.

كما وتخص هذه الدراسة سوائل الحفر المستخدمة لعمليات الحفر التقليدية، حيث تعتبر أنها صلة الوصل بين المكمن النفطي وتصميم برنامج انهاء البئر.

الدراسة تتطلب اجراء تجارب عملية وتقييم سوائل الحفر ويمكن اجراء الاختبارات في مخابر سوائل الحفر التي توفر جميع المعدات اللازمة، وقد يتطلب مراكز أبحاث تقنية النانو لإعداد المواد النانوية وتوصيفها.

ولتحقيق هذا الهدف فإن هذه الدراسة تتضمن عرض لسوائل الحفر (وظائفها وخواصها وأنواعها)، الأجهزة المخبرية المستخدمة في قياس خواص سائل الحفر، تطور تقنية النانو وخصائصه ومن ثم إعداد وتحضير سوائل الحفر النانوية.

2. مبررات البحث:

أثناء عملية الحفر يعتبر مائع الحفر أول مائع غريب يتصل بالمكمن، حيث تسبب الإضافات الصلبة المستخدمة في تحضير سائل الحفر أضراراً شديدة على المكمن وذلك بسبب فاقد الرشح. ينتج عن عملية الحفر فتاتات صغيرة وجزيئات صغيرة الحجم صخرية وأخرى غروية، يمكن أن تلحق الضرر بالمكمن الهيدروكربوني، وبالتالي يجب أن يكون سائل الحفر قادراً على تكوين قشرة طينية جيدة ورقيقة

مثل كعكة الحفر (كعكة طينية خارجية تتكون على جدار البئر وذلك لحماية المنطقة المجاورة في الفراغ الحلقي مقابل المكمن – الطبقة المنتجة).

إن التفاعل بين المواد الصلبة والسوائل مع المكمن قد يؤدي إلى تهدم جدران البئر وانتفاخ الغضار الموجود في مسامات الطبقة الخازنة، وإن انسداد المسامات سيخلق حاجزاً أمام تدفق الهيدروكربونات، وبالتالي سيؤدي إلى تخريب المكمن وستزيد التكلفة الناتجة عن عملية التحريض عند بدء الإنتاج. حيث أن تغلغل راشح سائل الحفر في مسامات الصخر الخازن سيؤدي إلى مشكلة خطيرة، نظراً لأن التفاعل بين المياه وحبيبات الغضار سيؤدي إلى انتفاخها من جهة وتشكل مستحلبات على حدود تماس الراشح المائي مع النفط الموجود في الطبقة، حيث أن سوائل الحفر التقليدية تشكل كعكة حفر سميكة، وبالتالي فهي غير فعالة لإغلاق سطح الصخر ومنع ارتشاح السوائل تحت فارق الضغط بسبب نفوذيتها المرتفعة. يؤدي انتفاخ الغضار إلى اعاقة تدفق الموائع الهيدروكربونية وبالتالي ستنعكس سلباً على عملية الإنتاج. ومن هذه المشاكل الناجمة عن انتفاخ الغضار في الطبقة إغلاق المسامات، ولدى انتفاخ الغضار المشكل لجدران البئر، يسبب استعصاء تشكيلة الحفر الذي قد يسبب فقدان البئر بشكل كامل.

سائل الحفر ذو الأساس النفطي يؤدي إلى مشاكل كثيرة، استخدامه غير اقتصادي وغير صديق للبيئة، وبالتالي سيكون من المفضل استخدام السائل المائي إذا أمكن من اختراق الطبقة المنتجة دون تلويث. وبالتالي فإن استخدام سوائل الحفر التقليدية يؤدي إلى تشكيل كعكة حفر غير فعالة ولا تمنع الارتشاح وتلويث المكمن كما تؤدي إلى عدم استقرار حفرة البئر وغير فعالة من حيث التكلفة بالإضافة للمشاكل البيئية.

3. هدف البحث:

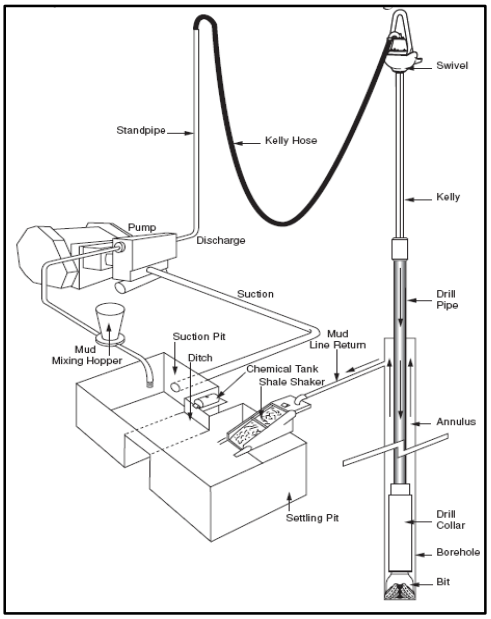
يعد تقليل نفوذية القشرة الطينية المتشكلة (كعكة الحفر)، هو أكثر الطرق فعالية لمنع الاتصال بين الصخور المكونة للطبقة المنتجة وسائل الحفر، لذلك يهدف البحث الى تطوير سائل الحفر الطبيعي ذو الأساس المائي من خلال استخدام مواد نانوية واضافات كيميائية، التي من الممكن أن تساهم في تشكيل سائل حفر عالي الجودة (يشكل كعكة حفر رقيقة وكتيمة) دون المساس بمتطلبات الخصائص الريولوجية للسائل.

4. سوائل الحفر: (وظائفها – خواصها – أنواعها): [1,2,8]

تعتبر سوائل الحفر هي المفتاح الرئيسي لنجاح عملية حفر آبار النفط والغاز، لذلك يجب أن تتناسب نوعية وخواص سائل الحفر مع ظروف الحفر لتحقيق أفضل أداء، لذا فأن التقدم والفعالية في عمليات الحفر يتوقفان إلى حد كبير على استخدام سائل الحفر المناسب الطبقات التي يراد حفرها.

إن سائل الحفر يطلق على أي سائل يستخدم في أعمال الحفر الدوراني ويتم ضخه بواسطة مضخات خاصة به ويجري عبر مجموعة مواسير الحفر حتى قاع البئر. سوائل الحفر تشمل الغازات والزيت والسوائل وتتكون سوائل الحفر العادية من مواد غضارية غروية معلقة في الماء وغالباً ما تكون مادة البنتونايت ويطلق عليها بعض الأحيان طين الحفر. حيث يؤمن سائل الحفر القيام بوظائفه خلال عمليات الحفر: تزييت وتبريد رأس الحفر ومجموعة مواسير الحفر، إزاحة ونقل الفتاتات الصخرية من قاع البئر إلى السطح، حمل الفتاتات الصخرية المحفورة وبقاؤها معلقة خلال توقف دوران سائل الحفر، تشكيل ضغط معاكس لضغط الطبقات الصخرية المشكلة لجدران البئر، تغطية جدار البئر بطبقة غير نفوذه (Mud Cake)، المساعدة في حت الصخور على قاع البئر وتشغيل توربين الحفر في الحفر التوربيني. يتمكن سائل الحفر من القيام بالوظائف المذكورة من خلال ضبط خواصه: الكثافة، اللزوجة، قوة الهلام، فاقد الرشح.

يتم خلط وتحضير السائل في خزانات خاصة تسمى (Mud pit)، ثم تقوم المضخات عبر خط السحب بضخ سائل الحفر من خلال الأنبوب القائم (Stand pipe) والخرطوم المرن (Kelly hose)، إلى منظومة الرأس الهيدروليكي (Swivel) المعلق بالخطاف المتصل مع قلم الحفر(Kelly)، الذي ينقل الحركة الدورانية وسائل الحفر إلى مجموعة مواسير وأعمدة الحفر التي تنتهي برأس الحفر عند قعر البئر. يخرج سائل الحفر من رأس الحفر عبر فالات خاصة، ويبدأ بالعودة إلى السطح، عبر قاع البئر ويصعد إلى الفراغ الحلقي بين مجموعة مواسير الحفر وجدران البئر محملاً بنواتج الحفر، ويخرج من البئر عبر الخط الراجع ماراً عبر شبكة المناخل الهزازة لفصل فتاتات الحفر عن سائل الحفر. بينما السائل النظيف يعود إلى خزانات سائل الحفر.



الشكل (1): معدات دورة سائل الحفر.

1.4. أنواع سوائل الحفر : [1,2,8]

سوائل الحفر الطبيعية (مزيج عادي من الماء العذب والغضار)، تسمى بالسوائل الطبيعية أو العادية، حيث يمكن تحضيرها على السطح من الماء والغضار (بنتونايت) يمكن استخدام بنتونايت صودي بنسبة تتراوح بين (3%–8%)، ويمكن أن تصل الى (30%–40%) في حالة كون البنتونايت ذو مردود منخفض. يمكن معالجة هذه السوائل كيميائياً، حيث أن الهدف من المعالجة هو تحسين خواص السائل الأصلي فقط، خاصة فيما يتعلق بالخواص الجريانية وليس للحصول على سوائل خاصة. يتم تأمين خواص السائل عن طريق مزج (بنتونايت + ماء) ويتم تحسين خواص السائل الأصلي عن طريق إضافة بعض المواد مثل مقللات اللزوجة ومقللات فاقد الرشح وغيرهما من المواد لتي تؤثر على خواص السائل الأصلي. أما سوائل الحفر الممنعة، فهي تختلف عن السوائل المعالجة أنها تعالج مسبقاً (أي قبل استخدامها) بمواد كيميائية تمنع تأثير أي عامل عليها. ومنها السوائل ذات الأساس الكلسي الجيرية والجصية.

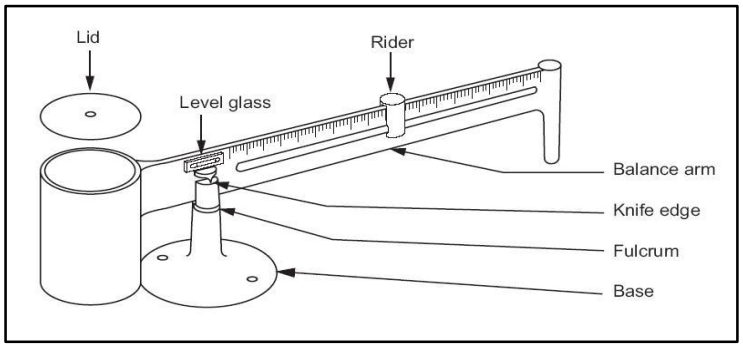
سوائل الحفر ذات الأساس النفطي: يكون الطور الأساسي هو النفط ومن سلبيات هذا النوع: ذات كلفة عالية، صعوبة تخزينها حيث أنها تتميز بدرجة عالية من الخطورة (قابلة للاشتعال). ولها نوعان: مستحلبات عكسية (من نوع ماء في الزيت، وسوائل الحفر النفطية السوداء.

5. الأجهزة المخبرية المستخدمة في قياس خواص سائل الحفر:[1,8]

تتواجد في مخبر سوائل الحفر الأجهزة والمعدات اللازمة لتحضير سوائل الحفر، وقياس خواصها. من أهم الأجهزة المخبرية المستخدمة في قياس خواص سائل الحفر:

1.5. جهاز قياس كثافة سائل الحفر:

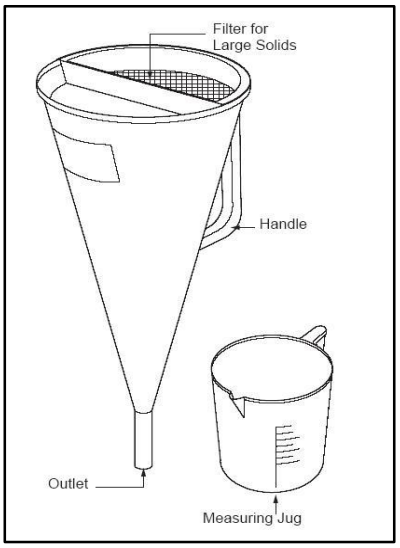
يوضح الشكل رقم (2) جهاز قياس كثافة سائل الحفر، حيث يملأ الكأس بشكل كامل بعينة سائل الحفر، ويوضع الغطاء (Lid) فوق الكأس (يجب أن يخرج بعض سائل الحفر من خلال الثقب الموجود في الغطاء)، بعد ذلك يوضع ذراع الميزان على القاعدة الخاصة به ويتم تعيير القطعة المعدنية (Rider) على الذراع حتى يصبح الذراع متوازن بشكل مستوي، عندئذ يمكن قراءة الكثافة بشكل مباشر على المقياس المدرج من الجهة اليسرى للقطعة المعدنية.



الشكل (2) يبين جهاز قياس كثافة سائل الحفر.

2.5. قمع مارش (Marsh Funnel) لقياس لزوجة سائل الحفر:

يستخدم قمع مارش الموضح في الشكل (3)، ليعطي فقط مؤشر على التغير في اللزوجة. يتم سكب عينة سائل الحفر داخل قمع مارش ويسجل الوقت من أجل عبور ربع جالون (أي ما يقارب 960 mL) من خلال القمع ضمن وعاء القياس المدرج (من أجل الماء وعند درجة حرارة 75 F فإنه يملك لزوجة بواسطة قمع مارش 26 sec).



الشكل (3) يبين جهاز قمع مارش

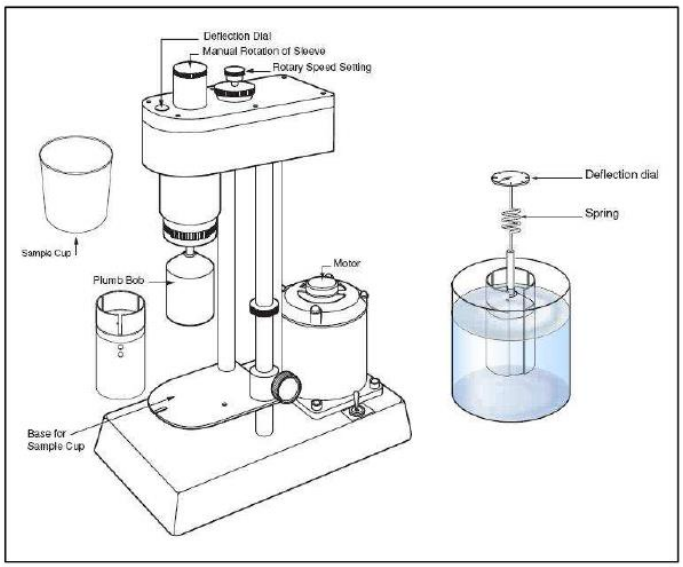
3.5. جهاز فان الدوار: موضح بالشكل رقم (4)، حيث يستخدم هذا الجهاز لتحديد قيمة لزوجة سائل الحفر، ويتم فيه تقييم اللزوجة من خلال قص عينة سائل الحفر عند سلسلة من معدلات الدوران المحددة وقياس إجهاد القص للسائل عند هذه المعدلات المختلفة. العنصر الأساسي في هذا الجهاز هو الثقل الشاقولي (Plumb Bob) المتصل مع النابض (Spring) ومؤشر القياس، واسطوانة يمكن أن تدور عند معدل سرعات دوران مختلفة. الثقل الشاقولي يعلق داخل الاسطوانة والكل يكون مغمور في عينة سائل الحفر، عندما تدور الاسطوانة الخارجية فإن سائل الحفر بين الاسطوانة والثقل الشاقولي سوف يتعرض للقص وعندها يقيس المؤشر قيمة القراءة عند معدل القص.

يجرى الاختبار عند سرعات مختلفة للدوران (3 r.p.m – 300 – 600). يتم وضع السرعة على (600 r.p.m) ويتم الانتظار حتى يستقر المؤشر وتقرأ القيمة على المقياس. يتم تغيير السرعة إلى (300 r.p.m) وتؤخذ القراءة ثانية. وعندها يمكن حساب اللزوجة ونقطة الخضوع بالعلاقات الآتية:

$$\eta_p = \phi_{600} - \phi_{300} \qquad (cp) \qquad (1)$$

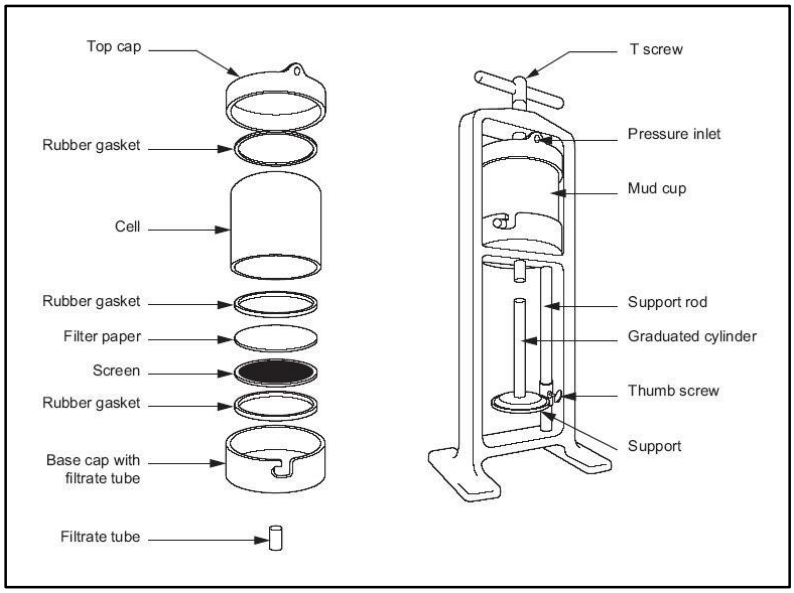
$$\tau_D = (\phi_{300} - \eta_p) * 4.88 \quad \left(\frac{mg_f}{cm^2}\right) \qquad (2)$$

ϕ_n: القراءة على الجهاز عند عدد الدورات (n)



الشكل (4) يبين جهاز قياس اللزوجة (فان الدوار).

4.5. جهاز قياس فاقد الرشح: موضح في الشكل (5).



الشكل (5) يبين جهاز قياس فاقد الرشح.

يتألف جهاز قياس فاقد الرشح من خلية سائل الحفر وتركيبة الضغط بالإضافة لأداة الترشيح وحسب (API) فإن الاختبار يتم عند درجة حرارة الوسط المحيط وضغط (100 psi). حيث يتم إغلاق الخلية من الأسفل بواسطة غطاء يكون مناسباً لوضع شبكة (Screen)، ثم يوضع على الشبكة ورقة الترشيح (Filter paper) والتي تكون مثبتة بواسطة مانعة تسرب، يتم وضع اسطوانة مدرجة أسفل الشبكة لتجميع الراشح، يطبق ضغط (100 psi) لمدة (30 min) وعندئذ يمكن قياس حجم الراشح بـ (cm^3) وبعد تفريغ الضغط في الخلية نقيس سماكة كعكة الراشح المترسبة على ورقة الترشيح.

6. تطور تقنية النانو وخصائصه:[9,10,11,13,16,19]

في السنوات القليلة الماضية، هناك كلمة صغيرة مع إمكانيات كبيرة. هذه الكلمة هي النانو (Nano) وأدت إلى تحول كبير في كل الجوانب الحياتية من العلوم والهندسة والاقتصاد والعلاقات الدولية. انتقل النانو من عالم المستقبل إلى عالم الحاضر، حيث دخلت الإبداعات المتعلقة بتقنية النانو في الصناعة النفطية.

النانو هو عبارة عن وحدة قياس صغيرة جداً يساوي واحد من مليون من الميلمتر $[1nm = 10^{-9}m]$ أي انه تستحيل رؤيته بالعين المجردة أو بعض المكبرات البسيطة ويستخدم النانو في القياسات الذرية من أجل تحديد أحجام جزيئات المادة فيها، بناء على ذلك يمكن تعريف تقنية النانو على انها العلم الذي يدرس إمكانية تغيير المادة على مستوى النانو وذلك لإنتاج مواد جديدة. إن أصل كلمة (النانو) مشتق من الكلمة الإغريقية (نانوس) وهي كلمة إغريقية تعني القزم ويقصد بها كل ما هو صغير وتقنية النانو تعني تقنية المواد متناهية الصغر أو التكنولوجيا المجهرية الدقيقة. وعلم النانو هو دراسة المبادئ الأساسية للجزيئات والمركبات التي لا يتجاوز قياسها ال 100 نانومتر.

تم تطبيق تقنية النانو في عدة مجالات في الصناعات النفطية ومنها: تم استخدام الروبوتات النانوية التي تعتمد على تقنية النانو الخاصة بالمكامن، كما أصبحت الجسيمات النانوية أكثر شيوعا للاستخدام في تطوير موائع الحفر، وخصوصاً موائع الحفر التي أساسها الماء، وبسبب خواصها الكيميائية والميكانيكية والكهربائية والحرارية والهيدروديناميكية المختلفة تماما والمحسنة بدرجة كبيرة والتفاعل الفعال للمواد النانومترية، فإن الجسيمات النانوية ينظر إليها على أنها مادة مشجعة للاختيار للحصول على تطوير لموائع الحفر، التي يعول عليها للتطبيقات في حقول النفط والغاز.

7. القسم العملي:(الدراسة المخبرية):

1.7. سوائل الحفر النانوية: [6,7,17,20]، يحتوي سائل الحفر النانوي على مادة مضافة على الأقل بحجم جسيم في مجموعة من 1 إلى 100 نانومتر حيث أن الجسيمات النانوية أبعادها من رتبة 10^{-9} من المتر. يمكن تصنيف سوائل الحفر النانوية (وذلك حسب عدد الإضافات النانوية في السائل): إلى سوائل نانوية بسيطة (تحتوي مادة مضافة جزيئية واحدة بحجم نانوي) وسوائل نانوية مركبة (تحتوي على أكثر من مادة بحجم النانو).

يعد تثبيت جزيئات النانو في سائل الحفر أمراً ضرورياً أثناء تحضير السوائل وذلك من أجل إعداد سائل حفر متجانس ومستقر يحتوي مواد نانوية، حيث تؤدي القوى السطحية العالية لجزيئات النانو إلى التلبد السريع للجزيئات المشتتة ميكانيكياً عندما يتوقف التحريض الميكانيكي، مما يؤدي إلى تكتل الجزيئات.

سوف تتسبب قوة الجاذبية في ترسيب الجسيمات بمجرد توقف سائل الحفر عن الدوران، لذلك هناك حاجة إلى تعزيز خصائص لزوجة السائل من أجل إنشاء حواجز حول جزيئات النانو ومنع التكتل.

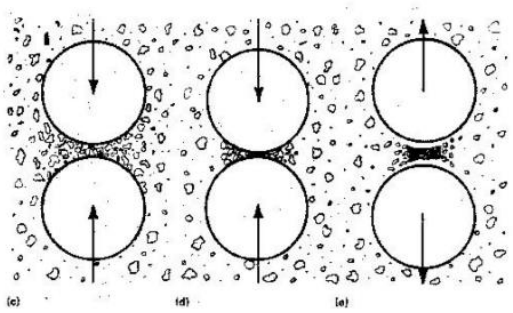
المواد الكيميائية والبوليميرات قادرة على توفير الاستقرار على المدى الطويل للسوائل ذات الأساس النانوي، ولكنها غير اقتصادية لذلك كان تحديد مادة مضافة إلى السائل ذات اقتصادية وصديقة للبيئة جزء ضروري في تحضير السائل. يعد الاستقرار طويل المدى للسوائل النانوي مهماً حتى تتمكن من الحفاظ على الخواص الريولوجية لإنجاز مهامها الوظيفية أثناء الحفر. وبالتالي فإن سائل الحفر العادي ذو الأساس المائي غير قادر على تكوين كعكة طينية فعالة وغير قادرة على حماية المكمن النفطي من التخريب والمتضمنة فقدان كمية كبيرة من سائل الحفر المرتشح من خلال جدران البئر نتيجةً تشكيل كعكة حفر غير قادرة على تلييس جدران البئر بفعالية تامة.

2.7. منهجية العمل المخبري:

يتضمن البحث بشكل رئيسي التجارب المخبرية على سائل الحفر وفق التالي:

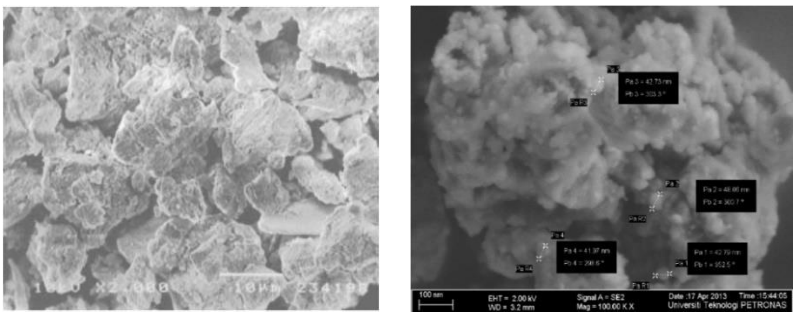
- تحضير الجسيمات النانوية وتوصيفها.
- تشخيص سائل الحفر:
  - قياس الخواص الريولوجية لسائل الحفر المحضر.
  - قياس فاقد راشح سائل الحفر وقدرة تشكيل كعكة الحفر.
- اختبار تلويث الطبقة المنتجة.

تحضير الجسيمات النانوية وتوصيفها: تستخدم معدات لتحضير البنتونايت النانوي بجزيئات ذات أبعاد تبلغ من 1−100 نانو متر. يمثل الطحن بالكرات احدى الطرق الميكانيكية لإنتاج الجسيمات النانوية. تستخدم المطحنة ذات الكرات، لتقليل حجم الجسيمات إلى مقياس النانو، حيث يعتمد المبدأ الأساسي في أجهزة الطحن بالكرات على الطاقة المنقولة للعينة أثناء وجودها ضمن وسيط الطحن. ويعتمد على الاصطدام بين كرات الطحن بسحق العينة بينهما مما يقلل من حجمها كما في الشكل (6).



الشكل (6): المبدأ الأساسي للطحن بالكرات.

يتم استخدام اعدادات الطحن التالية لإنتاج عينات البنتونايت النانوية لاستخدامها في تحضير سوائل الحفر وتقييمها: توضع كمية (30 غرام) من البنتونايت في حوجلة المطحنة (التي تحتوي 100 مل ايزو بروبانول كوسيط طحن)، كما تحتوي كرات من الزريكون (ذات قطر 10 مم ووزن 300 غرام). حيث زمن الطحن (24 ساعة، توقف 15 دقيقة كل ساعة) بسرعة $(400\ rpm)$، يتم استرداد العينة المطحونة وكرات الطحن، ثم يتم تسخين عينة البنتونايت في الفرن (100 ℃) لمدة 18 ساعة لإزالة الشوائب المتبقية من وسيط الطحن. ثم يتم تصوير العينة باستخدام المجهر الإلكتروني FESEM لتحديد حجم الجسيمات النهائية من المنتج. [9,10,13,14]



الشكل (7): بنية البنتونايت (تحت المجهر الالكتروني) قبل الطحن (يسار) وبعد الطحن (يمين).



الشكل (8): بنية البنتونايت قبل الطحن (يمين) وبعد الطحن (يسار).

وبسبب عدم توفر المطحنة ذات الكرات والمجهر الالكتروني في مخبر سوائل الحفر، تم استخدام عينات بنتونايت نانوي محضرة في مخابر هيئة الطاقة الذرية.

تشخيص سائل الحفر: يتضمن:

- قياس الخواص الريولوجية لسائل الحفر باستخدام مقياس اللزوجة (فان الدوار)، من أجل حساب اللزوجة البلاستيكية، نقطة الخضوع وقوة الهلام.
- قياس فاقد راشح سائل الحفر وسماكة كعكة الحفر.

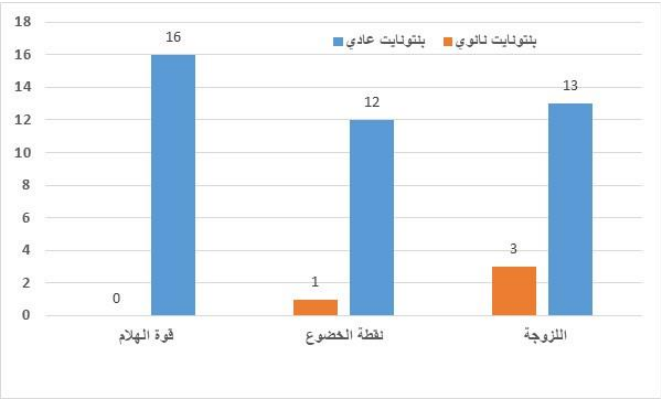
اختبار تلويث الطبقة المنتجة: تستخدم تجربة فاقد راشح سائل الحفر كمحاكاة عملية الحفر واستخدام سوائل الحفر في ظروف قاع البئر.

2.7. تحضير سائل الحفر النانوي:

تم تحضير سائل حفر تقليدي (المكونات 35غرام بنتونيت (Bent) و350 مل ماء مقطر)، وسائل حفر نانوي (المكونات 35غرام بنتونيت نانوي (NB) و350 مل ماء مقطر). كانت النتائج كما هو موضح بالجدول (1) والشكل (9).

الجدول (1): الخواص الريولوجية لسائل الحفر

قراءة الجهاز – الخواص الريولوجية	بنتونايت (Bent)	بنتونايت نانوي (NB)
600 RPM	38	7
300 RPM	25	4
اللزوجة البلاستيكة (CP)	13	3
نقطة الخضوع (Lb_f/ft^2)	12	1
قوة الهلام (10 sec)	12	0
قوة الهلام (10 min)	16	0



الشكل (9): مقارنة الخواص الريولوجية لسائل الحفر بالبنتونايت العادي والنانوي.

يقارن الشكل (9) الخواص الريولوجية (اللزوجة البلاستيكية ونقطة الخضوع وقوة الهلام) لسائل الحفر النانوي مقابل سائل الحفر التقليدي. أظهرت التركيبة الأولية لسائل الحفر باستخدام البنتونايت النانوي وحده (دون أي إضافات) خواص ريولوجية منخفضة. يمكن تفسير ذلك بالتغيرات الهيكلية للمونتموريلونيت الموجود في البنتونايت الناجم عن التشوه الميكانيكي عن طريق الطحن بالكرات بطاقة عالية، عملية الطحن الميكانيكية تتسبب في تقليل حجم الحبيبات وتغيير التشكيل في جزيئات البنتونايت ايضاً، حيث تحولت من جسيمات صفائحية ذات بلورات سداسية من المونتوريلونيت الى تجمع من الجسيمات المستديرة تقريباً وبأحجام في نطاق النانو متر، وقد أدى ذلك الى تغيير خصائص التهلم في البنتونايت وبالتالي انخفاض الأداء الريولوجي.

بعد ترك سائل الحفر لمدة 24 ساعة، حدث اندماج لمكونات سائل الحفر وتراكمت في القاع. ويعود ذلك إلى التكتل السهل والسريع للجزيئات النانوية، حيث تؤدي القوى المتولدة على سطحها إلى الاندماج السريع لهذه الجزيئات المشتتة ميكانيكاً بمجرد إيقاف الخلط. القوى السطحية تولد كتل متجمعة، متبوعة بقوى الجاذبية التي تؤدي إلى ترسيب مكونات سائل الحفر. كما يظهر بالشكل التالي.



الشكل (10): سائل الحفر النانوي الأولي (يسار)، وبعد 24 ساعة من توقف الخلط (يمين).

تم إضافة مكونات جديدة لسائل الحفر النانوي لتحسين خواصه الريولوجية، لتطابق مواصفة معهد البترول الأمريكي الخاصة بالبنتونايت (API Specification 13A)، الجدول (2) [4,5]. تم إضافة مواد مختلفة بتراكيز متزايدة حتى تصبح مواصفات سائل الحفر النانوي مطابقة للمواصفة المطلوبة (API Specification 13A). المواد المضافة (البوليمير السيللوزي PAC، وبوليمير Xanthan gum والنشا Starch).

جدول (2): المواصفات الريولوجية لسائل الحفر حسب API

Property	الخاصية	API Specification 13A
Viscometer 600 rpm	600 rpm	30 min
Viscometer 300 rpm	300 rpm	23 min
PV (CP)	اللزوجة البلاستيكية (CP)	7 min

YP (Lb_f/ft^2)	نقطة الخضوع (Lb_f/ft^2)	50 max
YP/PV Ratio	نسبة (YP/PV)	3 max
Filtration (mL/30 min)	فاقد الرشح (mL/30 min)	15 max

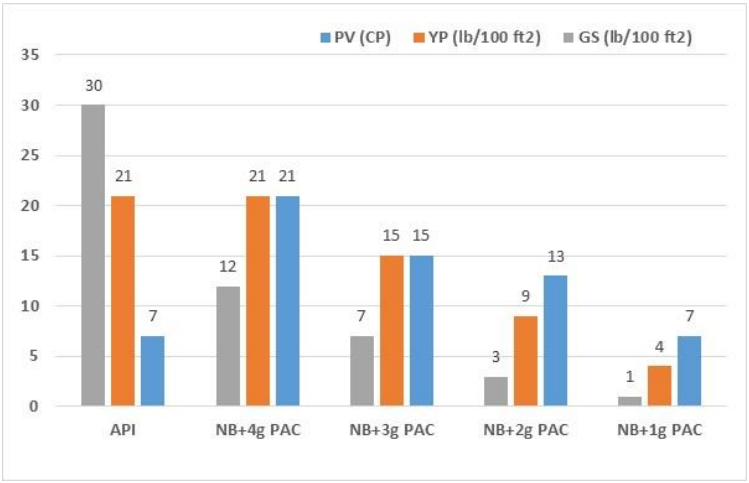
3.7. الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (PAC):

تم تحضير سائل حفر نانوي (35 g NB + 350 mL Water)، واضفنا له السيللوز الصناعي (PAC) بنسب مختلفة، وكانت نتائج القياسات المخبرية وفق الجدول (3).

الجدول (3): الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (PAC).

الخاصية	NB+1g PAC	NB+2g PAC	NB+3g PAC	NB+4g PAC
600 rpm	18	33	45	63
300 rpm	11	21	30	42
PV	7	13	15	21
YP	4	9	15	21
GS 10sec	0	1	2	5
GS 10min	1	3	7	12

يوضح الجدول (3) الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام البنتونايت النانوي وتراكيز مختلفة من ال (PAC). كما نلاحظ من الشكل (11) أنه كلما كان تركيز ال (PAC) أكبر اقتربت خواص سائل الحفر النانوي من مواصفات (API)، حيث يعمل ال (PAC) كرافع لزوجة ومقلل فاقد رشح ويمنع اندماج الجزيئات النانوية. إضافة ال (PAC) لوحده غير كافية حيث تبقى قوة الهلام منخفضة كثيراً، وبالتالي يجب إضافة إضافات أخرى لسائل الحفر لتعديل خواصه وجعلها مطابقة لمواصفات ال API.



الشكل (11): الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (PAC).

لاحظنا مخبرياً تمثل الكمية (4 g) الحد الأقصى لمقدار ال (PAC) الذي يمكن إضافته إلى سائل الحفر النانوي، لأن مكونات سائل الحفر تبدأ بالتكتل بمجرد تجاوز التركيز (4 غرام). عند تركيز ال (PAC) أقل من (5 غرام) يبقى سائل الحفر مستقر ولم يلاحظ أي اندماج لمكوناته بعد ترك سائل الحفر سكاناً لمدة 24 ساعة.



الشكل (12): سائل الحفر النانوي بعد الخلط (يسار)، وبعد 24 ساعة (يمين) بقي السائل ثابت.

4.7. الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (Starch):

تم تحضير سائل حفر نانوي (35 g NB + 350 mL Water)، واضفنا له النشا (Starch) بنسب مختلفة، وكانت نتائج القياسات المخبرية وفق الجدول (4).

الجدول (4): الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (Starch)

الخاصية	NB + 1 g Starch	NB + 2 g Starch	NB + 3 g Starch
600 rpm	19	22	25
300 rpm	12	14	16
PV	7	8	9
YP	5	6	7
GS 10sec	2	3	5
GS 10min	20	25	29

من الجدول (4)، نلاحظ أن ال (Starch) له تأثير أقل على الخواص الريولوجية لسائل الحفر مقارنةً ب ال (PAC)، لكنه يحسن قوة الهلام أكثر من ال (PAC). بقي سائل الحفر مستقراً أيضاً بعد الخلط، ولم يلاحظ عليه أي اندماج على غرار ال (PAC). يجب استخدام إضافات أخرى لتحسين خواص سائل الحفر الريولوجية.

5.7. الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (Xanthan gum):

تم تحضير سائل حفر نانوي (35 g NB + 350 mL Water)، واضفنا له (Xanthan Gum) بنسب مختلفة، وكانت نتائج القياسات المخبرية وفق الجدول (5).

يعمل ال (Xanthan gum) كرافع لزوجة لسائل الحفر مما يحسن الخواص الريولوجية وقوة الهلام بشكل فعال. ومع ذلك بدأت مكونات سائل الحفر النانوي بالاندماج عندما وصل تركيز ال (Xanthan gum) إلى (2 غ).

الجدول (5): الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (Xanthan gum)

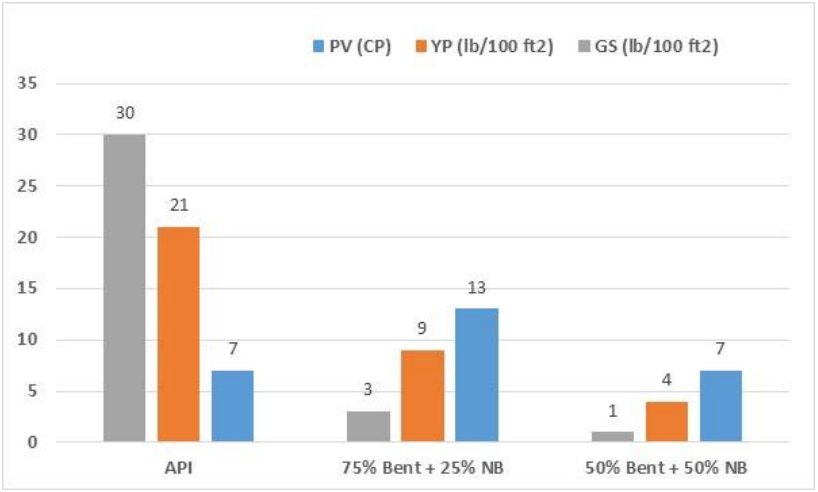
الخاصية	NB + 1 g Xanthan
600 rpm	22
300 rpm	16
PV	6
YP	10
GS 10sec	5
GS 10min	25

6.7. الخواص الريولوجية لسائل الحفر التقليدي بإضافة بنتونايت نانوي مع إضافات كيميائية أخرى:
تم اضافة بنتونايت نانوي بتراكيز مختلفة لسائل الحفر التقليدي (WBM) (المكونات 35غرام بنتونيت و350 مل ماء مقطر)، وتم قياس قيم خواصه الريولوجية.

الجدول (6): الخواص الريولوجية لسائل الحفر التقليدي بإضافة بنتونايت نانوي.

الخاصية	50% Bent + 50% NB	75% Bent + 25% NB
600 rpm	22	31
300 rpm	15	23
PV	7	8
YP	8	12
GS 10sec	1	5
GS 10min	5	18

نلاحظ من الجدول (6) والشكل (13)، أن وجود البنتونايت والبنتونايت النانوي غير كافي لتحقيق المواصفات الريولوجية المطلوبة حسب ال (API)، لذلك يجب إضافة مواد أخرى إلى سائل الحفر لتحسين خواصه الريولوجية.



الشكل (13): الخواص الريولوجية لسائل الحفر التقليدي بإضافة بنتونايت نانوي مقارنة مع ال (API).

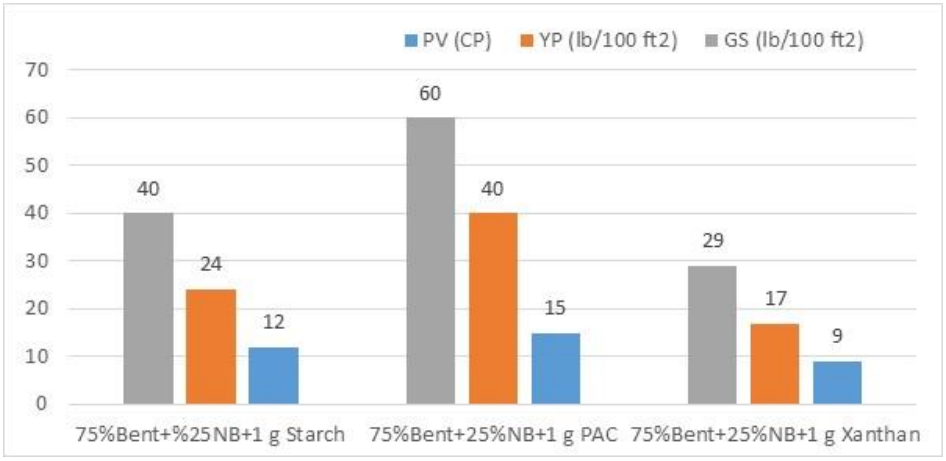
تم اضافة عدة مواد بتراكيز مختلفة لسائل الحفر التقليدي (WBM) (بوجود البنتونايت النانوي)، وتم قياس قيم خواصه الريولوجية.

الجدول (7): الخواص الريولوجية لسائل الحفر التقليدي بإضافة بنتونيت نانوي مع إضافات أخرى

الخاصية	75% Bent + 25% NB + 1 g Xanthan	75% Bent + 25% NB + 1 g PAC	75% Bent + 25% NB + 1 g Starch
600 rpm	35	70	48

300 rpm	26	55	36
PV	9	15	12
YP	17	40	24
GS 10sec	11	30	15
GS 10min	29	60	40

من التراكيب المدروسة في الجدول (7) والموضحة بالشكل (14)، نلاحظ أن الخواص الريولوجية لسائل الحفر تحسنت حتى يتمكن من القيام بوظائفه أثناء عمليات الحفر وأفضلها للسائل الذي يحتوي (PAC) مع البنتونيت والبنتونيت النانوي، وسنقوم بدراسة خواصها الارتشاحية.



الشكل (14): مقارنة الخواص الريولوجية لسائل الحفر التقليدي بإضافة بنتونيت نانوي مع إضافات أخرى.

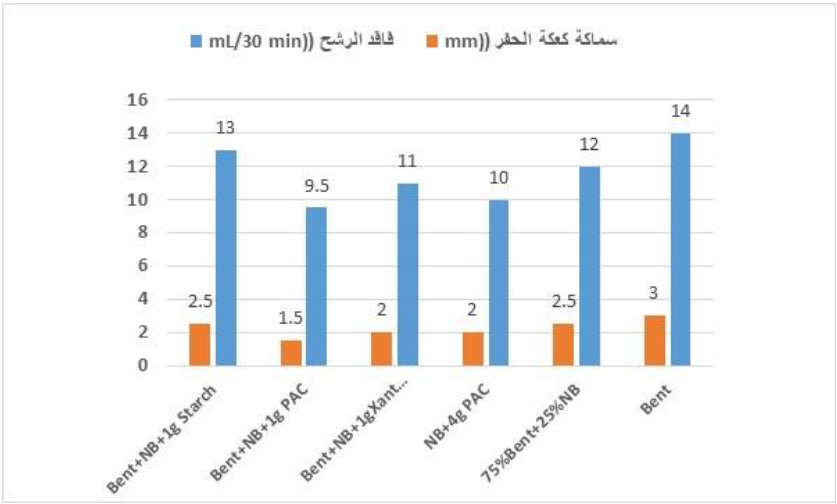
7.7. اختبار فاقد الرشح عند ضغط منخفض ودرجة حرارة منخفضة (LPLT):

تم قياس حجم فاقد الرشح لسائل الحفر التقليدي (WBM)، ولسوائل الحفر النانوية (ذات التراكيب المدروسة وفق التجارب المخبرية)، والتي تحقق المواصفات الريولوجية حسب (API). حيث تم تلخيص النتائج في الجدول (8).

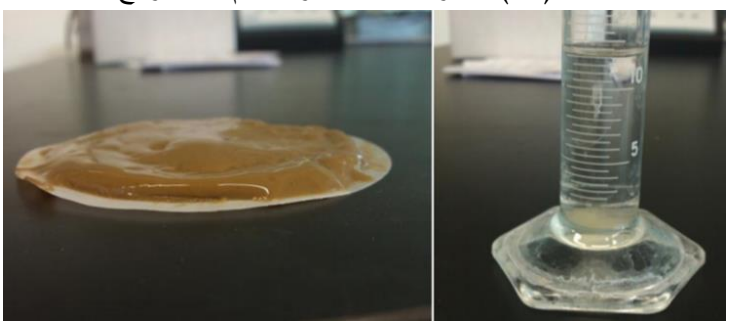
الجدول (8): ملخص اختبارات الارتشاح لسوائل الحفر النانوية

تركيب سائل الحفر	فاقد الرشح (mL/30 min)	معدل انخفاض حجم فاقد الرشح	سماكة كعكة الحفر (mm)
Bent	14	---	3
75% Bent + 25% NB	12	14 %	2.5
NB+4g PAC	10	28 %	2
75% Bent + 25% NB + 1 g Xanthan	11	21 %	2
75% Bent + 25% NB + 1 g PAC	9.5	32 %	1.5
75% Bent + 25% NB + 1 g Starch	13	7 %	2.5

سائل الحفر التقليدي (Bent) يعتبر نموذج مقارنة من أجل الخواص الارتشاحية. من أجل هذا السائل، حجم فاقد الرشح (14 mL) مع قشرة طينية بسماكة (3 mm)، كما موضح بالشكل (15) والشكل (16).



الشكل (15): مقارنة كعكة الحفر وحجم فاقد الرشح.



الشكل (16): القشرة الطينية (كعكة الحفر) وفاقد الرشح لسائل الحفر التقليدي.

أظهرت اختبارات الارتشاح، ان بعض سوائل الحفر النانوية لها المقدرة على تخفيض فاقد الرشح بمقدار يصل حتى (32 %) في حالة سائل الحفر ذو التركيب (75% Bent +25% NB +1 g PAC) حيث (1 g PAC) تكافئ تركيز (3 %). كما تبين من خلال هذه التجارب، أن سماكة كعكة الحفر الناتجة عن الارتشاح (فيما يخص السوائل النانوية مقارنة بالسوائل التقليدية)، تكون بسماكة أقل في حالة السوائل النانوية بمقدار من (1 mm) الى (1.5 mm). كما نستنتج ان سوائل الحفر النانوية المكونة من البنتونايت النانوي مع بعض الإضافات (NB+4g PAC)، تقلل فاقد الرشح الى قيم أدنى من قيمة فاقد رشح سائل الحفر المعياري (مكون من بنتونايت فقط) بمقدار 28%. لكن كان فاقد الرشح غير نظيف وبالتالي فإن حبيبات البنتونايت النانوية ذات الحجم الصغير جداً استطاعت العبور من

خلال فتحات ورقة الترشيح وهذا يتوافق مع ما تم التوصل اليه في الدراسات المرجعية [3,14,15]. يمكن ملاحظة تلوث الراشح بهذه الحبيبات النانوية وعكارته من خلال الشكل التالي:



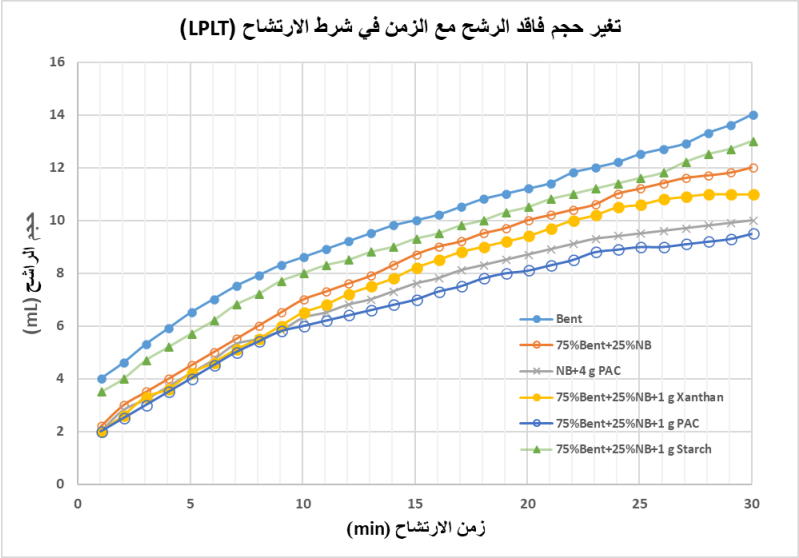
الشكل (17): كعكة الحفر رقيقةً (يسار)، فاقد الرشح المعكر (يمين) لسائل الحفر النانوي المكون من (NB+4g PAC).

يمكن تلافي حدوث هذه الظاهرة لسائل الحفر النانوية عند اختراقها للطبقات الغضارية، كون أبعاد الفراغات المسامية من رتبة النانو وبالتالي لا تستطيع الجزيئات النانوية عبورها. حسب نظرية تشكل كعكة الحفر الداخلية [7,17]، فإن حجم الحبيبات التي تشكل الكعكة تكون ذات أبعاد تساوي أو أكبر قليلاً من حجم مسامات الطبقة وهذا يساهم في تشكل كعكة الحفر الفعالة بشكل أسرع وبالتالي يقل حجم فاقد الرشح. في سوائل الحفر المكونة من خليط بنتونيت وبنتونايت نانوي، فاقد الرشح نظيف بدون شوائب.



شكل (18): كعكة حفر رقيقة (يسار) وفاقد رشح نظيف (يمين) لسائل حفر مكون من خليط من البنتونايت العادي والبنتونايت النانوي (75% Bent + 25% NB).

تم رسم نتائج القياسات المخبرية لتجارب الارتشاح حسب المنحنيات البيانية التالية:



الشكل (19): حجم الراشح مع الزمن.

من الشكل (19)، نلاحظ، بشكل عام، انخفاض بمعدل ازدياد حجم الراشح بعد مرور زمن مقداره (10) دقائق. وهذا يفسر بالتشكل الفعال لكعكة الحفر وانخفاض نفوذيتها.

مناقشة النتائج:

من النتائج المخبرية نلاحظ أن سوائل الحفر النانوية، قادرة على تقليل فاقد الرشح وبالتالي يقل تلوث المنطقة المجاورة للبئر أثناء عمليات الحفر، نظراً لأحجام الجسيمات النانوية الصغيرة جداً والتي تكون أصغر بكثير من أحجام مسامات المكمن، فإن سوائل الحفر النانوية قادرة على تقليل غزو السوائل إلى الحد الادنى ومنع مشاكل عدم ثبوتية جدران البئر وخاصةً في الطبقات الغضارية. وهذه النتائج تتوافق مع النتائج في الدراسات المرجعية [12,18] حيث تم استخدام مواد سيليكاتية نانوية واضافات كيميائية أخرى بأبعاد نانوية.

يعد تخفيض فاقد الرشح في سوائل الحفر النانوية امراً مهماً، حيث ان هذا الفاقد هو أحد العوامل الرئيسية التي تسبب تخريب المكمن وتلويث المنطقة المجاورة للبئر. حيث يسبب هذا الفاقد ادخال الحبيبات الصلبة الصغيرة الى الطبقة وبالتالي تشكيل كعكة الحفر الداخلية. في سوائل الحفر النانوية

يقل التأثير المتبادل بين سائل الحفر وجدران البئر في الطبقات الغضارية، ويقل اغلاق مسامات الطبقة الخازنة الناتج عن هدرجة الغضار وانتفاخه. ومع ذلك يتطلب هذا المزيد من الاختبارات باستخدام ورق الترشيح ذو حجم مسامات أصغر.

اثبتت اختبارات الارتشاح التي تم اجراؤها ترسيب كعكة الحفر رقيقة ومتماسكة، على ورق الترشيح بواسطة سائل الحفر النانوي مقارنةً بالسائل التقليدي، حيث يلعب سائل الحفر النانوي دوراً مهماً في الحد من المشاكل المتعلقة بكعكة الحفر، كون كعكة الحفر الرقيقة المتماسكة التي ترسبها السوائل النانوية تتمتع بالقدرة على تقليل مشكلة الالتصاق التفاضلي وبالتالي هي مناسبة لاختراق التشكيلات الجيولوجية المعرضة لوجود مشاكل الالتصاق التفاضلي اثناء الحفر.

في تطبيقات حفر الآبار الموجهة والأفقية وذات الامتداد الكبير، تزداد مشاكل عزم الدوران والسحب والتعليق اثناء الحفر الناجم عادةً عن احتكاك تشكيلة الحفر مع جدران البئر. لذلك يلعب سائل الحفر النانوي دوراً مهماً في تقليل المشاكل المتعلقة بعزم الدوران والاستعصاء من خلال تقليل مقاومة الاحتكاك بين المواسير وجدران البئر، نتيجة تشكل كعكة الحفر (قشرة طينية) متماسكة ورقيقة تساعد في تزليق مواسير الحفر وبالتالي منع مشاكل تعليق والتصاق مواسير الحفر.
تم حساب كل من قيمة اللزوجة البلاستيكية ونقطة الخضوع وفق العلاقتين الرياضيتين (1) و (2) المذكورتين في سياق البحث، حيث تم تكرار القياس المخبري ثلاث مرات لكل من القراءات (600 rpm) و (300 rpm).

ثم تم حساب قيمة المتوسط الحسابي (بجمع القيم وتقسيمها على ثلاثة)، ثم تم حساب التباين (S^2) وفق العلاقة:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{n} x_i)^2}{n}}{n-1} \qquad (3)$$

حيث: (n) تمثل عدد مرات القياس، (x_i): قيمة القياس.

أخيراً يحسب الانحراف المعياري بالعلاقة:

$$S = \sqrt{S^2} \qquad (4)$$

تم برمجة هذه الخطوات باستخدام (Microsoft Excel)، والشكل (20) يوضح مثال، حيث القيم المقاسة هي قراءة جهاز فان الدوار عند (600 rpm) في أحد التجارب.

القيم المقاسة	مربع القيم المقاسة	عدد القيم	المتوسط الحسابي
37	1369	3	38
38	1444		
39	1521		
مجموع القيم	مجموع مربع القيم	التباين (s2)	الانحراف المعياري
114	4334	1	1

الشكل (20): واجهة برنامج حساب المتوسط الحسابي والانحراف المعياري للقيم التجريبية.

كما تم اتباع نفس المنهجية لدى قياس حجم فاقد راشح سائل الحفر. بشكل عام كانت قيم الانحراف المعياري في جميع التجارب تتراوح بين الصفر والواحد.

النتائج والمقترحات:

تم في هذا البحث استقصاء تطبيقات الغضار النانوي في سوائل الحفر ذات الأساس المائي، لتقليل تلوث الطبقات المنتجة وتخفيض فاقد الرشح. حيث قمنا باستخدام البنتونايت النانوي مع بعض الإضافات الكيميائية لتحضير سائل الحفر النانوي.

تم اجراء تجارب مخبرية لدراسة تأثير البنتونايت النانوي على الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي، وعلى تلوث الطبقات المنتجة مقارنة بسائل الحفر التقليدي، من خلال تجربة فاقد الرشح. وهذه النتائج تتوافق مع النتائج المرجعية [15,18].

أثبتت نتائج التجارب المخبرية (خواص ريولوجية، فاقد الرشح) التي تم تنفيذها، مقدرة السائل النانوي على تحضير سوائل حفر ذكية (Smart Drilling Fluids) مناسبة لعمليات الحفر وانهاء الآبار.

نتيجة أبعاد جزيئات الغضار النانوي الدقيقة جداً، يتم تقليل درجة تلوث الطبقات المنتجة المخترقة من خلال نقصان فاقد الرشح وتشكل كعكة حفر (قشرة طينية) رقيقة ومتماسكة.

أظهرت تجارب فاقد الرشح (LPLT)، مقدرة سائل الحفر النانوي على تخفيض فاقد الرشح وتشكل كعكة حفر (قشرة طينية) رقيقة ومتماسكة.

سوائل الحفر النانوية المحضرة من البنتونايت النانوي فقط وبعض الإضافات مثل: (PAC, Xanthan Gum, Starch)، فاقد رشحها منخفض لكنه معكر (يحوي حبيبات بنتونايت نانوي).

لدى استخدام البنتونايت النانوي كإضافة للبنتونايت التقليدي في سوائل الحفر ذات الأساس المائي مثل (75% B + 25% NB + 3 % PAC)، تم الحصول على كعكة حفر رقيقة ومتماسكة وفاقد رشح قليل وغير معكر، وبالتالي يمكن استخدام هذا السائل لدى اختراق الطبقات الخازنة لتقليل تلوثها بفاقد راشح سائل الحفر.

نقترح اجراء تجارب مخبرية لقياس فاقد الرشح لسوائل الحفر النانوية (مكونة من بنتونايت نانوي وبنتونايت تقليدي وبعض الإضافات الكيميائية) في الشروط الطبقية (HPHT).

المراجع العلمية:

1. د. مرهج، أحمد – سوائل الحفر – كلية الهندسة الكيميائية والبترولية – منشورات جامعة حمص، 2008.

2. د. نصور، طاهر و د. مسرور، سليمان – هندسة الحفر3 – كلية الهندسة الكيميائية والبترولية – منشورات جامعة حمص، 2009.

3. AS. Ali et MM Elhusseiny. A Comparative Evaluation of Nanoparticle-Based Drilling Fluids for HPHT Wells: A Meta-Analytical Approach. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition - onepetro.org. 2025.

4. Amanullah, M., Al-Arfaj, M.K., and Al-Abdullatif, Z. Preliminary Test Results of Nano-based Drilling Fluids for Oil and Gas Field Application. SPE/IADC, 2011.

5. Amanullah, M. and Al-Tahini, A.M. Nano-Technology- Its Significance in Smart Fluid Development for Oil and Gas Field Application. SPE, 2009.

6. Cai, J., Chenevert, M.E., Sharma, M.M. and Friedheim, J. Decreasing Water Invasion into Atoka Shale Using Nonmodified Silica Nanoparticles. SPE, 2011.

7. Duha D. et al. Development of smart bentonite drilling fluids introducing iron oxide nanoparticles to the reservoirs of Upper Assam. Upstream Oil and Gas Technol, 2021.

8. Hossain, M.E. and Al-Majed, A.A. Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering, John Wiley & Sons and Scrivener Publishing Company, Austin, 2012.

9. Kong, X. L. and Ohadi, M. M. Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry–Overview of the Recent Progress. SPE, 2010.

10. Nabhani, N., Emami, M. and Moghadam, T. A. B. Application of Nanotechnology and Nanomaterials in Oil and Gas Industry. AIP Conference Proceedings, 2011.

11. Riley, M. et al. Wellbore Stability in Unconventional Shale – The Design of a Nano-particle Fluid. SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, 2012.

12. Martin, C. et al. Designing smart drilling fluids using modified silicate improve drilling operation in geothermal wells. Geothermic, 2023.

13. Mohamad, A.I. et al. A review on the effect of nanoparticle in drilling fluid on filtration and formation damage. Journal of petroleum science and engineering, 2022.

14. Mohamad, A.I. et al. The influence of nanoparticle size, concentration, and functionalization on drilling fluid filtration properties. Physicochemical and engineering aspects, 2024.

15. Mohammad, B. et al. Impact of low-molecular-weight poly sodium salt on filtration and rheological parameters of nanoparticles enhanced drilling fluids. J. Vinyl Add Technol, 2022.

16. MN. Yahya et al. Nanoparticles in Drilling Fluid. Exploring the World of Drilling, 2024.

17. O. Johnpaul et al. Programmable nanoparticles for smart drilling mud systems in over-pressured shale formation. SPE Nigeria annual international conference, 2025.

18. U. Abdullatif et al. Smart nano clay to reduce water-based mud filter cake. University Technology PETRONAS, 2022.

19. V. Gokarn et al. Nanoparticles in drilling fluids: A review of Types, Mechanisms, Applications, and Future Prospects. MDPI, 2024.

20. Y. Tian et al. Leveraging a novel Nano composite for enhanced drilling fluid efficiency. Scientific Reports, 2025.