

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية

د. م. مصطفى المصري - م. لمى مكوي

جامعة البعث - كلية الهندسة الكيميائية و البترولية - قسم الهندسة البترولية

ملخص:

تمثل عملية حفر الآبار الخطوة العملية الأولى في الصناعة النفطية، التي يمهدها لها بعمليات الإستكشاف الجيولوجي و الجيوفيزيائي. الجدوى الإقتصادية للصناعة النفطية تتبع بشكل كبير متانة و جودة إنجاز البئر و تتميز عملية الحفر بكلفتها العالية نظراً للمواد التي تستهلكها (المعدنية و الكيميائية)، و الزمن الكبير اللازم لإنجازها. تزداد هذه الكلفة بازدياد عدد المشاكل و الصعوبات التي تحدث أثناء الحفر و طرق معالجتها. يتم تقييم درجة نجاح حفر الآبار بمدى انخفاض كلفتها أولاً، ثم بمدى تأثيرها على المكنم الذي يشكل الهدف النهائي لها (تلويث الطبقة المنتجة). إذاً لبدء عملية استثمار المكنم يجب انجاز حفر البئر بأقل كلفة ممكنة و أدنى درجة تلويث للمكنم.

و نتيجة لأهمية التأثير المتبادل بين سائل الحفر و جدران البئر و لفهم آلية هذا التأثير و آثاره على استمرار عملية الحفر و طريقة التحكم و السيطرة على المشاكل الناتجة عنه، يجب دراسة ظاهرة إرتشاح سائل الحفر في الوسط الصخري المشكل لجدران البئر. و تكتسب هذه الدراسة أهميتها العملية لأنها تشكل المفتاح الأساسي لحل العديد من المشاكل المتعلقة بعمليات الحفر. حديثاً بدأ الاعتماد على طريقة المحاكاة و النمذجة الرياضية التي تمكننا من التقليل من مشاكل عمليات الحفر المتعلقة بثبوتية جدران البئر و تلوث المنطقة المجاورة للبئر نتيجة إرتشاح سائل الحفر، و ذلك من خلال ما توفره هذه الطريقة من قدرة تنبؤية تساعد على فهم أفضل لآلية الارتشاح بشرط توفر المعطيات اللازمة لحل النموذج الرياضي المعايير، بطريقة تحليلية أو رقمية. من هذا المنطلق نتناول في بحثنا دراسة لظاهرة إرتشاح سائل الحفر و إمكانية صياغة نموذج رياضي للإرتشاح السكوني و الحركي لهذا السائل.

كلمات مفتاحية: بئر نفطية، سائل الحفر، ارتشاح، محاكاة، نمذجة.

**Using of Modeling to study the effect of some parameters on the
Drilling Mud Filtration Phenomena of Oil and Gas Wells**

Summary:

Drilling well process present the first practical step in petroleum industry, which prepared by geophysical and geological surveying. The rentability of oil industry is relied to the quality and strength of well construction, where the drilling process is characterized by their high cost because the large consummation of chemical and metallic materials. This cost increase with the augmentation of the problems occur during drilling. The success degree of well drilling is evaluated by the low cost and the effect on the target formation. We study the phenomena of mud filtration due to the importance of the exchangeable effect between drilling mud and borehole; and the necessary to understand the mechanism of mud filtration. The practical importance of this study shown as a key to treat the problems of drilling well process.

Recently, simulation and modeling are used to decrease the mud drilling problems as borehole stability and the sidewall pollution, and achieve the best possible rentability. This method provides predictive capacity help us to better understanding of mud filtration mechanism. By the suitable input data, we can solve the calibrated mathematical model analytically or numerically. We present in this research the formulation of mathematical model of static and dynamic mud filtration.

Key Words: Oil Well, Drilling Mud, Filtration, Simulation, Modeling.

مقدمة:

يلعب سائل الحفر دوراً هاماً في عمليات حفر الآبار النفطية و الغازية، كونه يقوم بالوظائف التي تساعد في نجاح هذه العمليات. لا يمكن إنجاز أي بئر مهما كان العمق النهائي المقرر لها و الهدف من حفرها (آبار للأبحاث الجيولوجية، آبار للحصول على المياه، آبار النفط و الغاز) دون الاستعانة بهذا السائل، و بما أن عملية حفر الآبار لا يمكن مراقبتها بشكل مباشر، فإنه و من خلال فحص خواص سائل الحفر الخارج من البئر يمكن أن نستدل على سير عملية الحفر. إن أي تغير في خواص سائل الحفر الخارج من البئر، سوف يعقبه بالمقابل تغير في وضعية البئر و مجريات عملية الحفر. يقوم سائل الحفر أثناء دورانه في البئر بوظائف ذات طبيعة هيدروديناميكية، هيدروستاتيكية و فيزيوكيميائية متزامنة، تضمن استمرار عملية الحفر حتى تحقيق الهدف النهائي لها. و ترتبط هذه الوظائف بعلاقة متبادلة مع مجموعة من الخواص و المؤشرات (الجريانية، الارتشاحية،...الخ) و التي يمكن قياسها و التحكم بها وفق مقتضيات عملية الحفر.

و تعتبر مهمة اختيار نوع سائل الحفر و تركيبه لكل مرحلة من مراحل الحفر من أصعب مهام مهندس سائل الحفر، و ذلك لارتباط نوع سائل الحفر و مكوناته بالشروط الجيولوجية و الترموديناميكية البئر.

و خلال دوران سائل الحفر في البئر فان هذا السائل يتلامس مع الصخور المكونة لجدران البئر، و لفترة كافية لحدوث أشكال مختلفة من التأثير المتبادل بينهما، يدوم على الأقل طيلة فترة الحفر.

و نتيجة لأهمية التأثير المتبادل بين سائل الحفر و جدران البئر و لفهم آلية هذا التأثير و آثاره على استمرار عملية الحفر و طريقة التحكم و السيطرة على المشاكل الناتجة عنه، يجب دراسة ظاهرة ارتشاح سائل الحفر في الوسط الصخري المشكل لجدران البئر.

و تكتسب هذه الدراسة أهميتها العملية لأنها تشكل المفتاح الأساسي لحل العديد من المشاكل المتعلقة بتخطيط عمليات الحفر و اختيار المؤشرات الضرورية لمشروع حفر البئر بمراحله المختلفة. حيث أن سائل الحفر هو المائع الذي يساعد المعدات في حفر

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية

الآبار، و يستخدم لهذه الغاية منذ زمن بعيد. و يعتبر الماء من أقدم سوائل الحفر المعروفة، و لا يزال يستخدم حتى يومنا هذا كمبرك أساسي لمعظم أنواع سوائل الحفر المعروفة حتى الآن.

الهدف من البحث:

يهدف البحث الى صياغة نموذج رياضي، يعبر عن ظاهرة ارتشاح سائل الحفر في الوسط الصخري المشكل لجدران البئر. ثم تحويل هذا النموذج الرياضي إلى نموذج رقمي باستخدام طريقة الفروق المنتهية. و بالتالي دراسة تأثير سماكة و نفوذية كعكة الحفر على حجم الراشح.

1. مفهوم البئر و عملية الحفر:

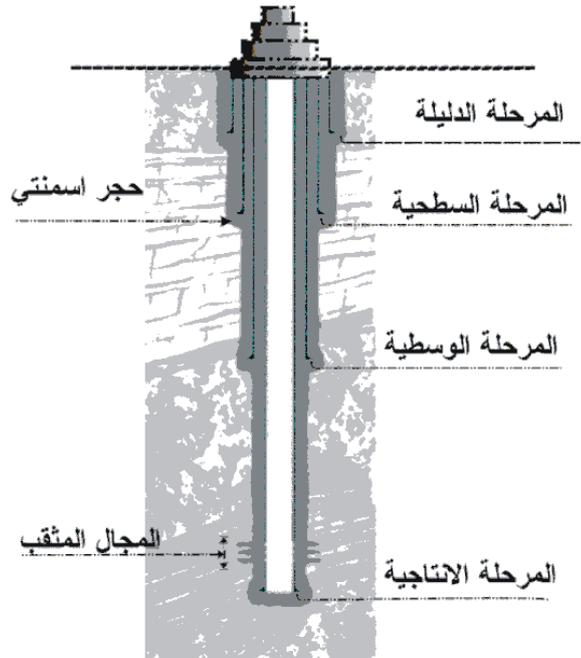
عملية الحفر هي عبارة عن تحطيم للصخور المكونة للطبقات الارضية التي يخترقها البئر، حيث يتم تحطيم الصخور على قاع البئر نتيجة تأثير الحمل على رأس الحفر، و دوران رأس الحفر على القاع في آن واحد، فبتأثير الحمل تنغرس أسنان رأس الحفر في الصخر، و بتأثير دوران رأس الحفر يتم تقطيت الصخور على القاع. فالبئر هي بناء معدني خاص ذات شكل اسطواني قطرها أقل بكثير من طولها، الجزء العلوي على السطح يسمى فوهة البئر، اما الجزء السفلي يسمى قعر البئر و السطح الاسطواني يسمى جدران البئر.

يتم انجاز البئر عن طريق عملية الحفر التي تضم مجموعة اعمال يتم بواسطتها اختراق الطبقات الصخرية من سطح الارض حتى العمق المقرر للبئر (حت الصخر على القاع - رفع الفتاتات الصخرية - تغليف - سمننة).

و من أجل فهم عناصر دورة سائل الحفر في البئر من الضروري التعرف على هيكلية الآبار و برنامج بناء البئر. يعتبر برنامج تغليف البئر (Casing program) أهم جزء من برنامج بناء البئر و يحدد عدد مواسير التغليف و قطرها بالتوافق مع قطر البئر لكل مرحلة. حيث أن جميع الآبار التي تحفر لإنتاج النفط و الغاز (أو لحقن الموائع في

الطبقة)، يتم تدعيم جدرانها الصخرية بمجموعة من الأنابيب المعدنية تدعى مواسير التغليف (Casing). يتم تبطين هذه المواسير بالإسمنت، كي تمتلك متانة كافية لتأدية وظائفها الرئيسية في: الحفاظ على ثبوتية (استقرار) جدران البئر، و منع التلوث، و عزل الطبقات الحاملة للمياه عن الطبقات المنتجة، و التحكم بضغط الآبار خلال عمليات الحفر و الإنتاج و الإصلاح، كما أنها تشكل قاعدة محكمة لتثبيت المعدات المختلفة التي تنزل في البئر أو التي تجهز بها فوهته أثناء الحفر (كأجهزة منع الانفجار B.O.P) أو أثناء الإنتاج (كشجرة الميلاد و مواسير الإنتاج). و عملية التغليف هي عبارة عن سلسلة من العمليات الضرورية التي يتم بموجبها إنزال مواسير التغليف في البئر، و ذلك حسب قطر رأس الحفر الذي حفرت به حتى عمق محدد، أي استبدال جدران البئر الصخرية بجدران معدنية أكثر مقاومة (الشكل 1). و يضم برنامج تغليف آبار النفط و الغاز المراحل الآتية: [1]

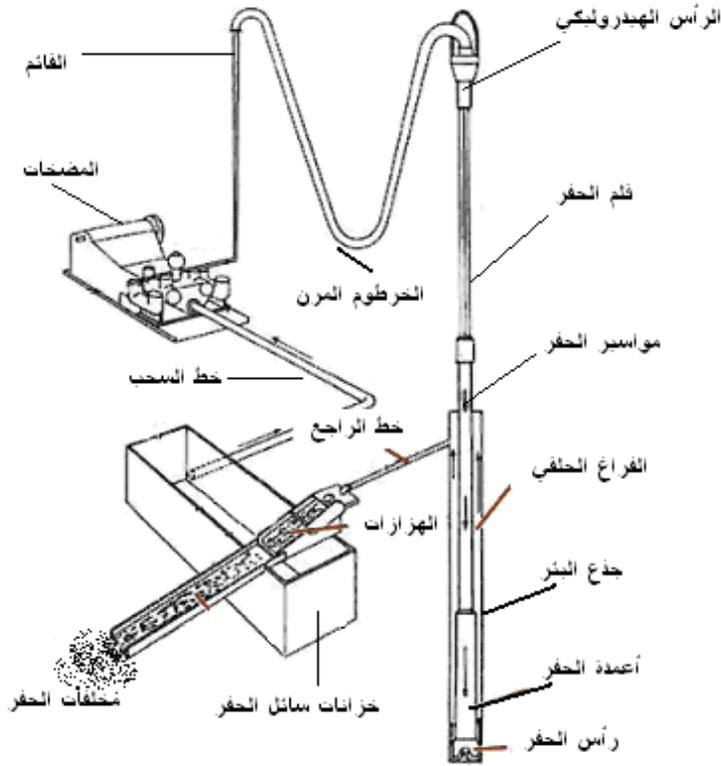
- مواسير التغليف الدليلة (conductor casing).
- مرحلة التغليف السطحية (surface casing).
- مرحلة التغليف الوسطية (Intermediate casing).
- مرحلة التغليف الإنتاجية (production casing).



الشكل (1): مخطط برنامج تغليف البئر.

1.1 . دورة سائل الحفر: (Mud Circulating System)

إن سائل الحفر المستخدم لحفر البئر، يعاد إستخدامه و تدويره في البئر بعد تنقيته من نواتج الحفر و ضبط خواصه بشكل مستمر، مما يتطلب وجود معدات خاصة حول البئر، مهمتها تحضير هذا السائل و ضخه في البئر و تنقيته بعد عودته من حفرة البئر محملاً بنواتج الحفر. الشكل (2) يوضح أهم عناصر الطريق التي يسلكها سائل الحفر أثناء دورانه المتكرر خلال عملية تعميق البئر.



الشكل (2): عناصر دورة سائل الحفر. [2]

في البداية، و قبل البدء بحفر مرحلة جديدة يتم خلط و تحضير سائل الحفر في خزانات خاصة تسمى (Mud pit)، ثم تقوم المضخات (Pumps)، عبر خط السحب بضخ سائل الحفر من خلال الأنابيب القائم (Stand pipe) و الخرطوم المرن إلى منظومة الرأس الهيدروليكي (Swivel) المعلق بالخطاف المتصل بإحكام مع قلم الحفر (Kelly)، الذي ينقل الحركة الدورانية و سائل الحفر إلى مجموعة مواسير الحفر (Drill pipe) التي تنتهي برأس الحفر عند قعر البئر (Drill bit) الذي يحت الصخر على قاع البئر (borehole).

يخرج سائل الحفر من رأس الحفر عبر فالات نفث خاصة (Jet Nozzles)، و يبدأ رحلة العودة إلى السطح، عبر قاع البئر و يصعد إلى الفراغ الحلقي بين مجموعة

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية

مواسير الحفر وجدران البئر في الفراغ الحلقي (annulus)، محملاً بنواتج الحفر، و يخرج من البئر عبر ماسورة الراجع (mud return line) و ينفلت فوق شبكة المناخل الهزازة التي تتحرك حركة ترددية لفصل فتاتات الحفر عن سائل الحفر (shale shaker). فتاتات الحفر المنزلقة (shale slide) تتجه إلى خزان تجميع خاص (reserve pit) لتجميع نواتج الحفر مجهزة وفق معايير بيئية محددة، بينما السائل النظيف يعود إلى خزانات سائل الحفر عبر خط الساقية.[2]

و بشكل دوري يقوم الجيولوجيين بأخذ عينات من الفتاتات الصخرية المحجوزة على المناخل الهزازة، لدراسة و تقييم التشكيلات على العمق الذي اقتلعت منه، بينما يقوم مهندس الحفر بدراسة خواص السائل الراجع، لمعرفة التغيرات التي طرأت على خواص سائل الحفر ليصار إلى تشخيص أسبابها و إعادة ضبطها.

2.1. وظائف سائل الحفر و خواصه:

تتكون سوائل الحفر بشكل عام من:

1. الطور الأساس (الطور المشتمت): و هو المائع الذي يشكل الجزء الأساسي لسائل الحفر (الماء، الهواء، النفط).
2. الطور الصلب (الطور المتشتمت): الذي يمكن أن يكون فعالاً (كالغضار) أو خاملاً (المواد المثقلة أو السادة).
3. المواد المضافة:

- محاليل كهروليتيية متشردة أو غير متشردة تدخل إلى سائل الحفر من نواتج الحفر أو تضاف للسائل لضبط خاصية محددة (مثل PH) أو للتحكم بوظيفة محددة.
- مواد كيميائية تضاف لضبط الخواص المختلفة بشكل صلب أو سائل أو منحل.

و قد يتم استخدام مائعين أو أكثر أي منهم يصلح أن يكون أساساً لسائل الحفر (نفط و ماء أو ماء و هواء)، و لتحديد أساس سائل الحفر، يفترض أن يكون أحد المائعين

منشئت ضمن الآخر، و يكون الطور المشتت هو أساس سائل الحفر، كمستحلب نפט في الماء (أساس مائي) أو مستحلب عكسي ماء في النفط (أساس نفطي) أو رذاذ ماء في الهواء (أساس هوائي). مهما كان نوع سائل الحفر المستخدم، فان أهمية سائل الحفر بالنسبة للبئر تبرز من خلال تأديته لمجموعة كبيرة من الوظائف، التي تضمن استمرار عمليات إنجاز البئر بشكل آمن و بسرعة اقتصادية. هذه الوظائف هي: [1]

- تنظيف قعر البئر من الفتاتات الصخرية الناتجة عن الحفر و رفعها إلى السطح.
- تبريد و تزييت معدات الحفر.
- تحقيق ضغط معاكس على جدران البئر لمنع تدهم الصخور أثناء الحفر و لمنع الموائع الطبقية من الدخول إلى حفرة البئر.
- تشغيل توربين الحفر في حالة الحفر التوربيني.
- المحافظة على الفتاتات عالقة ضمنه و منعها من السقوط في حالة توقف دورانه.
- و حتى يتمكن أي نوع من أنواع سوائل الحفر القيام بهذه الوظائف، لا بد من امتيازه بمجموعة من الخواص الفيزيائية (وزن نوعي) و الكيميائية (درجة PH) و المؤشرات الجريانية (اللزوجة) و الارتشاحية (فاقد الرشح)، و التي يمكن لمهندس الحفر قياسها و التحكم بها باستخدام إضافات كيميائية حسب متطلبات حفر البئر. إضافة إلى هذه الوظائف و الموصفات التي يمتاز بها سائل الحفر فانه يجب إن يخضع لمجموعة من الشروط الفنية و البيئية التي تضمن الاستثمار الآمن و طيلة فترة إنجاز البئر. من أهمها:

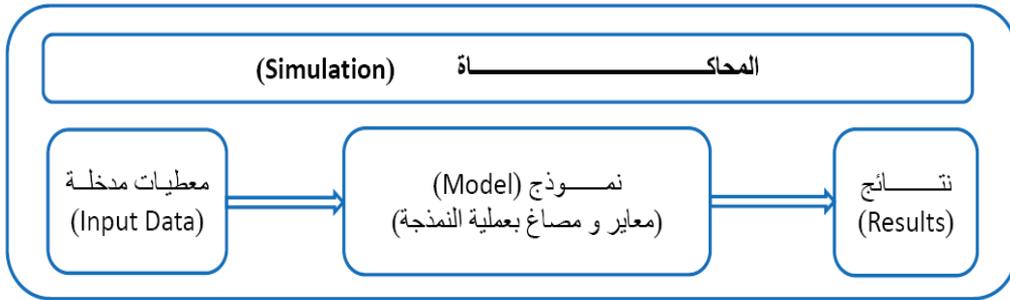
- أن لا يؤثر على الطبقات المخترقة، و أن لا يتأثر بالصخور المخترقة التي يصادفها (ملح، انهدرت و غضار).
 - أن لا يسبب تآكل معدات الحفر داخل البئر و على السطح.
 - أن يكون سهل التحضير و الحفظ و التنظيف من الرمل و الفتاتات الصخرية.
 - أن لا يعيق إجراء القياسات الجيوفيزيائية داخل البئر (أن يتمتع بناقليه كهربائية).
 - أن يتمتع بدرجة أمان جيدة (أي غير قابل للاحتراق و غير خطر على العمال).
- إن معرفة العلاقة بين خواص سائل الحفر و مكوناته في شروط جيولوجية – تقنية

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية

محددة للحفر، تمكننا من الحصول على أفضل تكنولوجيا لحفر البئر.

2. مفهوم النمذجة و المحاكاة: (Simulation and Modeling Concept)

المحاكاة تشير الى العلم الذي يربط بين المفاهيم الفيزيائية و الأسس الرياضية لعملية أو ظاهرة ما، مدعومة بالبرمجة الحاسوبية لتطوير أداة قادرة على التنبؤ بسلوك و أداء هذه الظاهرة تحت ظروف عملية مختلفة. أما النمذجة فهي تمثل عملية صياغة النموذج المناسب لعملية المحاكاة، هذا النموذج الرياضي يصاغ بشكل يمكن حله تحليلياً أو رقمياً لإعطاء نتائج يمكن تحليلها و الحكم على دقتها من خلال معايرة الموديل، و يمكن إظهار الترابط بين عمليتي النمذجة و المحاكاة من خلال الشكل (3). [3]



الشكل (3): الترابط بين النمذجة و المحاكاة.

3. ارتشاح سوائل الحفر: (Drilling mud filtration)

هي عملية يتم من خلالها ارتشاح الطور المشتت لسائل الحفر عبر الوسط النفوذ (التشكلات الصخرية لجدران البئر) بينما يترسب الطور المتشتت (الصلب) على سطح هذا الوسط. القوة المحركة لهذه العملية هي فارق الضغط بين البئر و الطبقة النفوذة. كنتيجة لهذه العملية تتشكل حول جذع البئر عدة مناطق تتميز بخصائصها الفيزيائية:

- نطاق كعكة الحفر (Mud cake)، و التي تتشكل نتيجة تراكم الطور الصلب على سطح الوسط النفوذ، بينما يتابع الطور السائل تغلغله في الوسط النفوذ. و حسب

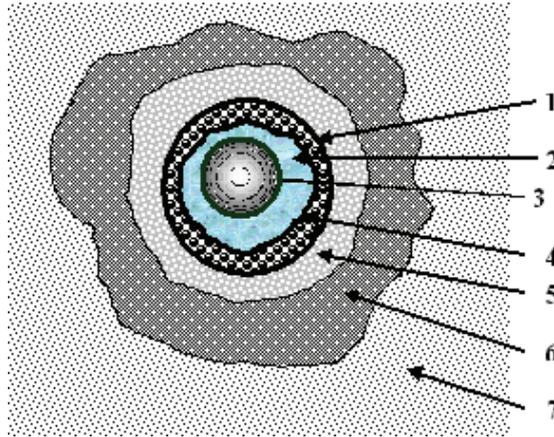
العلاقة بين قطر حبيبات الطور الصلب و قطر مسام الوسط النفوذ يمكن للطور الصلب أن يتغلغل لمسافة معينة في مسام الصخر.

• نطاق الكعكة الداخلية (احتشاء الطور الصلب)، و التي تتجم عن تغلغل جزء من الطور الصلب إلى الفراغ المسامي المجاور لجذع البئر. عمق هذا النطاق محدد بالعلاقة بين أبعاد الطور الصلب لسائل الحفر و بين أبعاد المسام و فارق ضغط الارتشاح.

• نطاق تغلغل راسح سائل الحفر: و هو الجزء المحيط بجذع البئر و الذي وصل إليه الطور المشنت لسائل الحفر. عمق هذا النطاق محدد بعدد كبير من العوامل نذكر منها: الخواص الفيزيائية للطبقة، خواص السائل الطبقي، خواص الراشح (لزوجة، كثافة،..) و كذلك خواص كعكة الحفر إضافة إلى ظروف و زمن عملية الارتشاح.

و من وجهة نظر جيوفيزيائية (تغير درجة التشبع بالمائع الطبقي و تغير درجة التشبع بالمياه) فان عملية الارتشاح تقسم المنطقة المجاورة لجذع البئر إلى: [4]

- المنطقة المغسولة: درجة التشبع بالماء أعظمية.
- المنطقة الانتقالية: درجة التشبع بالماء تقل مع العمق (متغيرة).
- المنطقة غير المغزوة: درجة التشبع بالماء ثابتة و تساوي درجة التشبع الأولية.



الشكل (4): جذع البئر أثناء الحفر.

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية

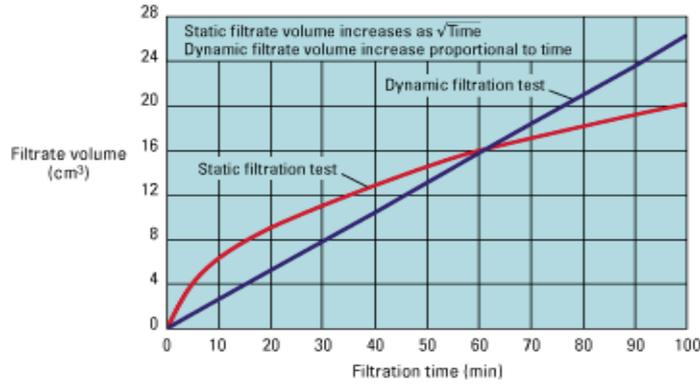
1. جدران البئر.
2. الفراغ الحلقي.
3. مواسير الحفر.
4. كعكة الحفر.
5. نطاق الكعكة الداخلية.
6. نطاق غزو الراشح.
7. الصخر النفوذ (غير المغزو بالراشح).

1.3. أشكال ارتشاح سائل الحفر:

الارتشاح عملية مستمرة مع الزمن و حجم الراشح يزداد مع مرور الزمن. و هنا يمكن تمييز شكلين لهذه العملية:

الارتشاح السكوني (Static Filtration): يحصل عند توقف سائل الحفر عن الدوران حيث تستمر كعكة الحفر بالتراكم على جدران البئر. و الراشح المنفصل في هذه الظروف يسمى فاقد الرشح السكوني.

الارتشاح الحركي (Dynamic Filtration): يحصل أثناء حركة سائل الحفر على تماس مع الوسط النفوذ، تيار سائل الحفر سوف يؤدي إلى تآكل كعكة الحفر و تقليل سماكتها بالمقارنة مع الشكل السكوني، و ذلك حتى الوصول إلى حالة التوازن (كمية الحبيبات المتوضعة تتساوى مع كمية الحبيبات المنزوعة بتيار السائل)، في شروط ترموديناميكية محددة. و الشكل (5) يوضح بيانياً الفرق بين حركية الارتشاح السكوني و الحركي في ذات ظروف الارتشاح و لنفس سائل الحفر، حيث يتبين بعد مرور فترة من الزمن، أن فاقد الرشح الحركي يصبح أكبر من السكوني لأن سماكة كعكة الحفر أكبر و لن تتعرض للتآكل.



الشكل (5): أشكال إرتشاح سائل الحفر. [2]

2.3. الآثار السلبية لارتشاح سائل الحفر:

إن ارتشاح الطور المائي لسائل الحفر سوف يؤدي لظهور مشاكل تعيق عمليات الحفر و تنعكس على إنتاجية البئر لاحقاً نذكر منها:

- **التأثير على ثبوتية جدران البئر:** فالطبقات ضعيفة التماسك سوف تنهار و تتهدم باتجاه البئر و كذلك الطبقات القابلة للانفخاخ سوف تندفع باتجاه البئر، و في حال اختراق مجالات ملحية سوف تتحلل في سائل الحفر. و جميع هذه الآثار تترافق مع حالات من استعصاء مجموعة مواسير الحفر و ما قد ينجم عن ذلك من تأخير في إنجاز البئر و تكلفة مادية إضافية.
- **التأثير على النفوذية الطبيعية للمجالات المنتجة:** إن تغلغل الطور المائي في الوسط المسامي النفوذ، و كذلك الطور الصلب لسائل الحفر يؤدي إلى:
 - اختصار القطر الإرتشاحي الفعال للقنوات المسامية، نتيجة انفخاخ الحبيبات الغضارية المبعثرة في الفراغ المسامي أو امتزاز العناصر الكيميائية على سطوح هذه القنوات.
 - إغلاق قنوات الوسط المسامي، بسبب تغلغل الطور الصلب لسائل الحفر إلى مسافات كبيرة أو ترسب نواتج تفاعل راشح سائل الحفر مع المياه الطبقيّة.

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية

- **نقص حركية السوائل الطبقيّة،** في نطاق تغلغل راشح سائل الحفر و ذلك بسبب تشكل المستحلبات المعقدة اللزجة على حدود تماس الراشح مع المائع الطبقي. كما أنه في نطاق التغلغل تزداد درجة التشبع بالماء مقللة من النفوذية النسبية للنفط عند وضع البئر في الإنتاج.
- **التأثير على نتائج الدراسات الجيوفيزيائية البئرية،** و لا سيما قياس المقاومة الكهربائية و الدراسات الصوتية.

3.3. تقييم عملية الارتشاح:

يتم تقييم عملية الارتشاح السكوني وفق معايير معهد البترول الأمريكي (API)، بكمية الراشح المنفصلة مقدرة بوحدة (cm^3) عبر فلتر قياسي ($7.1 inch^2 = 45.8 cm^2$) و ضغط ($100 Psi$) خلال 30 دقيقة. و تقاس سماكة كعكة الحفر و تقدر بالبوصة أو بالميليمتر.

أما الارتشاح الحركي فيتم تقييمه بحجم الراشح المنفصل عبر واحدة السطح خلال واحدة الزمن عند شروط ترموديناميكية محددة. و قد اصطلح على تسمية فاقد الرشح في هذه الشروط بالغزارة النوعية، و تقدر بوحدة $(\frac{cm^3}{Sec. cm^2})$. [2] ، [5]

عادةً يتم استخدام جهاز قياسي (باروئيد، BM-6)، لدراسة تأثير الضغط و درجة الحرارة و دوران سائل الحفر على ارتشاح سوائل الحفر في الوسط النفوذ. بناءً على النتائج المخبرية للتجارب المنفذة على هذا الجهاز تم رسم المنحنيات في الشكل السابق (الشكل 5).



الشكل (6): جهاز قياس رشح سائل الحفر مع اسطوانة الغاز و منظم الضغط.[4]

و من الضروري في كثير من الحالات إجراء دراسة خاصة لكعكة الحفر (سماكة، انضغاطية، نفوذية...)، و ذلك لأهمية هذه الدراسة في التحكم بعملية ارتشاح سائل الحفر و كذلك لضمان نجاح عمليات الإسمنت لاحقاً.[7]

4. نمذجة و محاكاة عملية إرتشاح سائل الحفر:

تتأثر عملية إرتشاح سائل الحفر بعدد كبير من العوامل: مثل الخواص الليتولوجية و الفيزيائية للوسط النفوذ، خواص و تركيب المائع الطبقي، خواص و تركيب سائل الحفر. بالإضافة لخواص كعكة الحفر و نطاق تغلغل الطور الصلب، ظروف الارتشاح (درجة حرارة، فارق ضغط). كما يعتبر زمن الارتشاح و شكله (سكوني، حركي) و سرعة جريان السائل و خواصه التدفقية من العوامل المؤثرة على عملية الإرتشاح.

هذا الكم الكبير من المؤثرات على حركية ارتشاح سائل الحفر، تجعل من نمذجة هذه العملية في غاية الصعوبة و التعقيد. بيد أنه من الممكن تبسيط المسألة و تقييد القسم الأكبر من هذه العوامل بهدف إبراز دور العوامل الأكثر أهمية.[7]

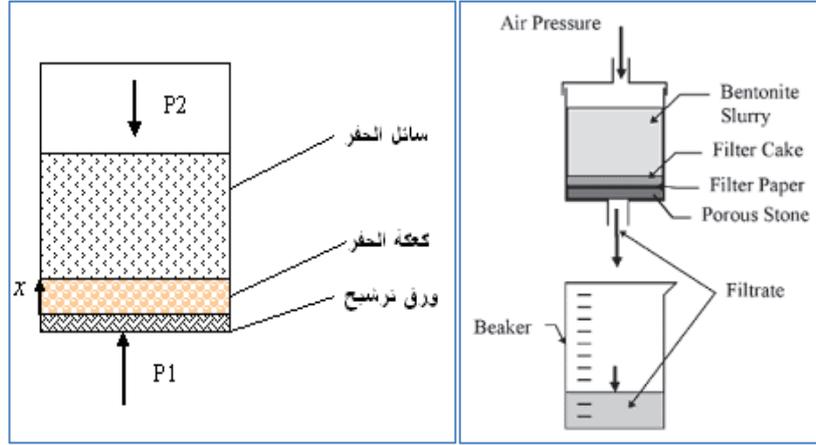
من المعروف أن سرعة الارتشاح الخطي للماء أو النفط عبر وسط مسامي بتأثير فارق الضغط تحدد بعلاقة دارسي التالية:

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{l} \quad (1)$$

حيث:

- (v): سرعة الارتشاح. (cm/Sec).
 (Q): الغازرة. (cm^3/Sec).
 (A): سطح الارتشاح. (cm^2).
 (μ): لزوجة الراشح التحريكية. ($Pa \cdot Sec$).
 (ΔP): فرق الضغط. (Pa).
 (l): طول الوسط النفوذ. (cm).
 (K): نفوذية الوسط المسامي. (cm^2).



الشكل (7): شكل يحاكي عملية الارتشاح السكوني. [2] ، [4]

لكي نستفيد من علاقة دارسي في إبراز أهم العوامل المؤثرة على ارتشاح سوائل الحفر يمكن إفتراض التبسيطات التالية: الارتشاح سكوني و حجم الراشح الأولي الموافق لفترة تشكل كعكة الحفر مهمل، كعكة الحفر غير انضغاطية (ذات مسامية و حجم ثابتين أو إن تغيراتهما مهملة). أي أن فاقد الرشح يعتمد فقط على نفوذية كعكة الحفر. بتطبيق قانون دارسي نحصل على:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{K_c}{\mu} \frac{\Delta P}{x} \quad (2)$$

حيث:

(V): حجم الراشح. (cm^3). (t): زمن الارتشاح. (Sec)

(x): سماكة كعكة الحفر. (cm). (K_c): نفوذية كعكة الحفر. (cm^2)

إذا كانت نسبة حجم كعكة الحفر إلى حجم الراشح ثابتة خلال فترة الارتشاح أي أن: ($\frac{A \cdot x}{V} = \varepsilon$)، ندخل هذه النسبة في العلاقة (2) فنحصل على:

$$\frac{dV}{dt} = A^2 \frac{K_c}{\mu} \frac{\Delta P}{V \varepsilon} \quad (3)$$

من هذه العلاقة نحصل على النموذج الرياضي التالي:

$$V dV = A^2 \frac{K_c}{\mu} \frac{\Delta P}{\varepsilon} dt \quad (4)$$

هذا النموذج الرياضي عبارة عن معادلة تفاضلية، يعبر هذا الموديل عن تغير حجم راشح سائل الحفر مع الزمن في حالة الارتشاح السكوني.

بالمكاملة حسب الشروط ($\{t = 0\}, \{V = 0\}$)، ($\{t = t\}, \{V = V\}$) نحصل على حجم راشح سائل الحفر:

$$V = A \sqrt{\frac{2 K_c \Delta P t}{\mu \varepsilon}} \quad (5)$$

من هذه العلاقة نستنتج أن حجم الراشح يتناسب طردياً مع الجذر التربيعي لجداء الزمن و نفوذية كعكة الحفر و فارق الضغط، و عكساً مع الجذر التربيعي للزوجرة الراشح.

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية

نلاحظ أنه يمكن كتابة العلاقة (5) على الشكل التالي:

$$V = \alpha \sqrt{t} \quad (6)$$

أي أن حجم راشح سائل الحفر يتناسب طردياً مع الجذر التربيعي للزمن. و بفرض أن $(\alpha = Const)$ ، أي أن بقية العوامل المؤثرة ثابتة خلال فترة الارتشاح، و بذلك يمكن إيجاد العلاقة التالية ذات التطبيقات العملية:

$$V_2 = V_1 \sqrt{\frac{t_2}{t_1}} \Leftrightarrow V_{30 \text{ min}} = 2 V_{7.5 \text{ min}} \quad (7)$$

في حالة الإرتشاح الحركي (الديناميكي)، تكون سماكة كعكة الحفر ثابتة و بالتالي يكتب النموذج الرياضي بالشكل التالي:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{K_c}{\mu} \frac{\Delta P}{x} \quad (8)$$

أي أن: حجم راشح سائل الحفر في حالة الارتشاح الحركي يعطى بالعلاقة:

$$V = A \frac{K_c}{\mu} \frac{\Delta P}{x} t \quad (9)$$

حيث يتغير حجم الراشح طردياً مع الزمن.

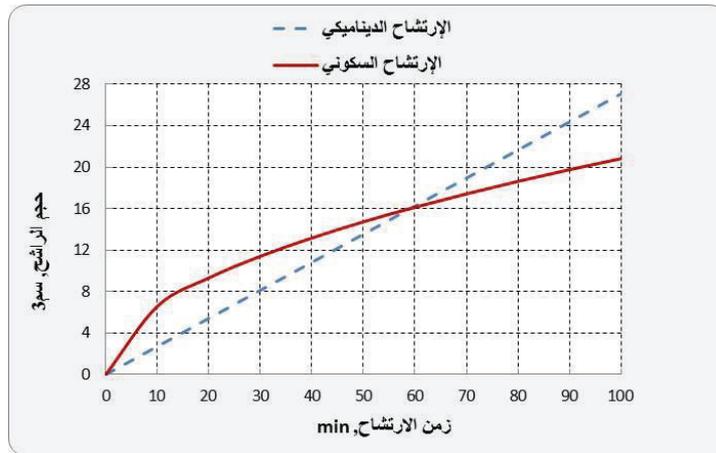
1.4 محاكاة تجربة ارتشاح سائل الحفر:

نلاحظ مما سبق أن النموذجين (4) و (8) تم حلها بطريقة تحليلية. نقوم باستخدام هذين النموذجين لإجراء محاكاة لتجربة ارتشاح سائل الحفر باستخدام القيم التالية للمؤشرات:

الجدول (1): قيم المؤشرات اللازمة لحساب حجم راشح سائل الحفر (و المستنتجة).

$A (cm^2)$	$K_c (mD)$	$\Delta P (Psi)$	$\mu (CP)$	$x (cm)$	ε
45.8	0.01	100	1	0.7	4

نحسب حجم الراشح في حالة الارتشاح السكوني باستخدام العلاقة (5)، و في حالة الارتشاح الحركي باستخدام العلاقة (9).
 نلاحظ أن المنحنيات المحسوبة رياضياً في الشكل (8)، تتطابق مع المنحنيات التجريبية في الشكل (5)، عند قيم (x, ε) الموضحة في الجدول (1). هذا يعني أنه يمكن تقدير حجم راشح سائل الحفر باستخدام النموذج الرياضي في حالتي الارتشاح السكوني و الحركي عند الشروط المخبرية.

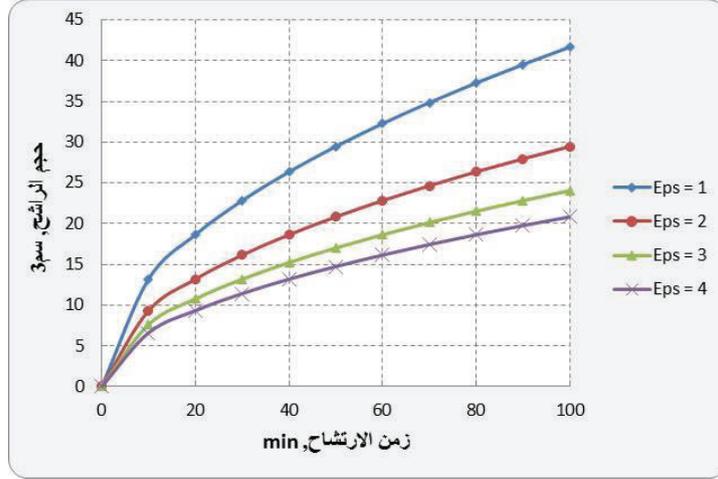


الشكل (8): تغير حجم الراشح (المحسوب رياضياً) مع الزمن.

دراسة تأثير المعامل (ε) على حجم راشح سائل الحفر:

لدراسة هذا التأثير قمنا بحساب حجم راشح سائل الحفر بالعلاقة مع الزمن، عند قيم مختلفة للمعامل $(\varepsilon = \frac{A \cdot x}{V})$. و الشكل (9) يوضح النتائج.

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية



الشكل (9): تأثير المعامل (E) على حجم راشح سائل الحفر.

من الواضح أن حجم الراشح يتناقص بازدياد قيمة (E)، و ذلك نتيجة لازدياد سماكة كعكة الحفر التي تعيق عملية الارتشاح.

عملياً، خلال حفر البئر و لدى اختراق تشكيلة صخرية ما، سيبدأ سائل الحفر بالارتشاح حيث لا توجد كعكة حفر (الراشح الأولي) الذي يتبع نفوذية الطبقة المختترقة مباشرة عند فارق ضغط محدد. حيث يمكن استخدام النموذج (9) لمحاكاة هذه الظاهرة و دراسة تغير حجم راشح سائل الحفر الأولي بالعلاقة مع نفوذية الطبقات المختترقة و عمق الارتشاح. باستخدام النموذج (المعدل) التالي:

$$V_0 = A \frac{K \Delta P}{\mu x} t \quad (10)$$

حيث:

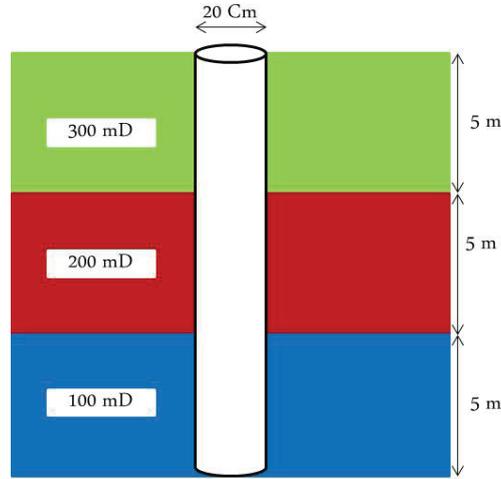
(V_0) : حجم راشح سائل الحفر الأولي (m^3).

(K) : نفوذية الوسط المسامي الصخري (mD).

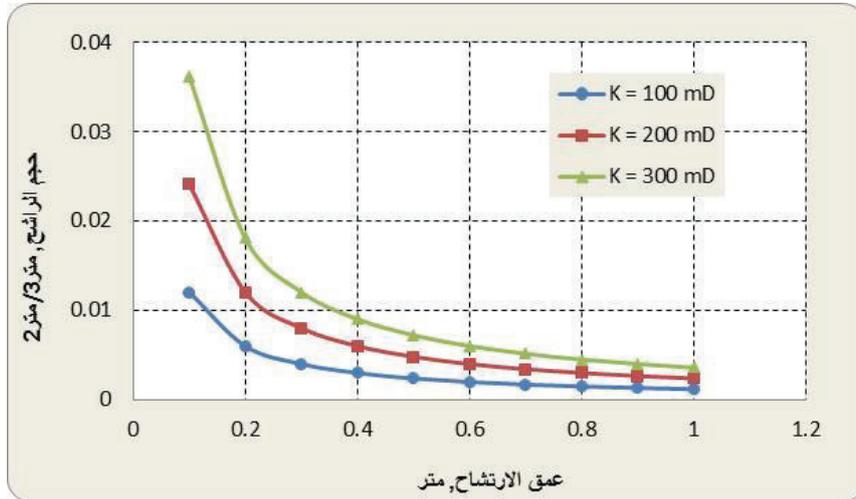
(x) : عمق الارتشاح (m).

تطبيق:

ليكن لدينا المقطع البئري الموضح بالشكل (10)، البئر ذو قطر (20 cm) يخترق ثلاث طبقات بنفوذيات مختلفة (100, 200, 300 mD)، باستخدام سائل حفر ذو أساس مائي و فرق الضغط المطبق يعادل (2 at). حسبنا حجم الراشح الأولي خلال واحدة السطح بالعلاقة مع عمق الارتشاح خلال زمن قدره (30 min)، و حصلنا على المنحنيات الموضحة بالشكل (11).



الشكل (10): مقطع لبئر يخترق ثلاث طبقات بنفوذيات مختلفة.



الشكل (11): تغير حجم الراشح الأولي بالنسبة لنفوذية الطبقة المخترقة و عمق الارتشاح.

نلاحظ من الشكل (11)، أن حجم راشح سائل الحفر في الطبقة ذات النفوذية العالية، يكون أكبر عند نفس عمق الارتشاح و بالتالي تزداد درجة التشبع بالماء في المنطقة المجاورة للبئر في الطبقات الصخرية ذات النفوذية العالية. القيم المحسوبة هي لسائل حفر عادي (ماء و بنتونايت)، غير معالج بمقلات فاقد الرشح.

2.4. تطوير النموذج الرياضي لحساب حجم راشح سائل الحفر:

كما لاحظنا أن النموذج الرياضي (4)، تم الحصول عليه بفرض العديد من التبسيطات، التي مكنتنا من حله بطريقة تحليلية باستخدام بعض الشروط الحدية، بهدف محاكاة الشروط المخبرية المطبقة في تجربة قياس حجم راشح سائل الحفر. باعادة صياغة المعادلة (2):

$$dV = A \frac{K_c \Delta P}{\mu} \frac{dt}{x} \quad (11)$$

خلال عملية حفر البئر، تتأثر ظاهرة الارتشاح بمؤشرات كعكة الحفر و بالخواص الليتولوجية و الفيزيائية للوسط الصخري المسامي المخترق أيضاً. لذلك يجب صياغة نموذج رياضي أكثر شمولية لنحاكي به عملية الارتشاح التي تحدث في البئر. بالاعتماد على العاملين الأساسيين (x, K) :

- (x) يمثل سماكة كعكة الحفر مخبرياً. حقلياً يهمننا عمق اختراق راشح سائل الحفر للمنطقة المجاورة للبئر، حيث تكون سماكة كعكة الحفر صغيرة مقارنةً بعمق الإرتشاح. بالإضافة لذلك فإن كعكة الحفر تتشكل داخل البئر و تكون ثابتة خلال عملية الحفر و دوران سائل الحفر، بينما عمق الإرتشاح يكون متغيراً (و تتشكل كعكة داخلية). نعبر عن عمق الارتشاح رياضياً كما يلي:

$$\frac{A \cdot x}{V} = A \frac{dx}{dV} \Rightarrow x = \frac{V}{dV} dx \quad (12)$$

بالتعويض في (11)، نجد:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A K_c \Delta P}{\mu V} \frac{dV}{dx} \quad (13)$$

و لتمثيل عملية الارتشاح البئرية بشكل أدق، فإننا نأخذ بعين الاعتبار نفوذية الوسط المسامي و حجم راشح سائل الحفر الأولي:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \bar{K} \Delta P}{\mu V_0} \frac{dV}{dx} \quad (14)$$

نلاحظ أن النموذج الرياضي (14)، عبارة عن معادلة تفاضلية جزئية (PDE) تتضمن تغير حجم راشح سائل الحفر مع كل من الزمن (t)، و عمق الإرتشاح (x). مع الأخذ بعين الاعتبار حجم راشح سائل الحفر الأولي، و نفوذية الوسط المسامي و كعكة الحفر (\bar{K}).

5. النموذج الرقمي:

نلاحظ أن النموذج الرياضي (14)، عبارة عن معادلة تفاضلية جزئية من الدرجة الأولى بالنسبة لعمق الإرتشاح و الزمن. و من الصعوبة بمكان إيجاد حل تحليلي (analytical) دقيق كون الشروط الحدية و البدائية تكون غالباً غير دقيقة أو غير متوفرة.

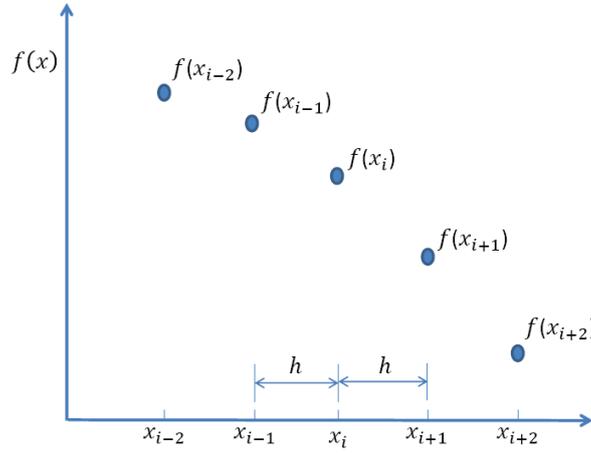
لذلك يمكن استخدام الطرق الرقمية التقريبية (approximative)، و الطريقة الأكثر شيوعاً في مجال الدراسات النفطية هي طريقة الفروق المنتهية (finite – difference method) التي تستخدم لتقريب المشتقات و حسابها. [3]

1.5. مفهوم الفروق المنتهية:

تتميز التطبيقات النفطية، بظواهر ذات طبيعة مجزأة أي أن قيم توابع النماذج الرياضية تكون معروفة فقط عند نقاط معينة حيث أنه من خلال القياسات الحقلية، تتم قياسات لمؤشرات معينة في نقاط معينة خلال فترات زمنية محددة. و بالتالي فإن هذه المؤشرات

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية

تكون معروفة فقط عند لحظة ما و مكان محدد (لحظة و مكان القياس). في العديد من التطبيقات نحتاج لمعرفة قيم مشتقات التتابع لحل المشكلة المدروسة حيث تكون قيم التتابع وحدها غير كافية. إن طريقة الفروق المنتهية تمكننا من حساب تقريبي للمشتقات و توابعها عند نقاط محددة. كما هو واضح في الشكل (12). [6]



الشكل (12): النقاط المجزأة المستخدمة في تقريب الفروق المنتهية.

الفروق المنتهية المتقدم (forward)، يعطى بالعلاقة التالية:

$$\Delta f(x_i) = f(x_{i+1}) - f(x_i) \quad (15)$$

الفروق المنتهية المتراجع (backward)، يعطى بالعلاقة التالية:

$$\nabla f(x_i) = f(x_i) - f(x_{i-1}) \quad (16)$$

الفروق المنتهية المركزي (central)، يعطى بالعلاقة التالية:

$$\delta f(x_i) = f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}) \quad (17)$$

معاملات الفروق المنتهية للنقاط المجزأة، ترتبط بمعاملات المشتقات للتتابع المستمرة

حسب سلسلة تايلور:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{(x - x_0)}{1!} \frac{df}{dx} + \frac{(x - x_0)^2}{2!} \frac{d^2f}{dx^2} + \dots \quad (18)$$

بشكل عام، يمكن صياغة سلسلة تايلور بالشكل التالي:

$$f(x) = f(x_0) + \sum_{i=1}^n \frac{(x - x_0)^i}{i!} \frac{d^i f}{dx^i} \quad (19)$$

نحسب المشتق الأول كما يلي:

$$\begin{aligned} n = 1 \Rightarrow f(x) &= f(x_0) + (x - x_0) \frac{df}{dx} \Rightarrow \frac{df}{dx} \\ &= \frac{f(x) - f(x_0)}{(x - x_0)} \end{aligned}$$

حسب الشكل (12)، نلاحظ أن: $(x - x_0) = h$.

$$\frac{df}{dx} = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{(x_{i+1} - x_i)} = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h} \quad (20)$$

و بالتالي:

$$\frac{df}{dx} = \frac{\Delta f(x_i)}{h} = \frac{\nabla f(x_i)}{h} \quad (21)$$

وبذلك يتم ايجاد قيمة المشتق بدلالة الفروق المنتهية.

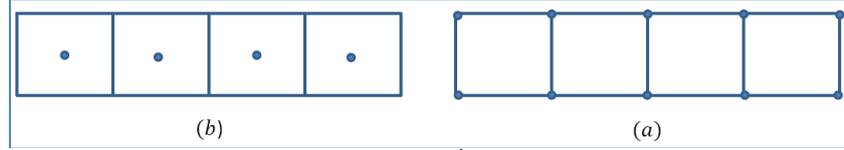
2.5. صياغة النموذج الرقمي:

أول خطوة لصياغة النموذج الرقمي تتضمن إجراء عملية التجزئة باستخدام طريقة الفروق المنتهية، و بما أن دراستنا تتضمن ارتشاح سائل الحفر في وسط مسامي (أحادي البعد)، فإن اختيار شبكة التجزئة أحادية البعد بالإحداثيات الديكارتية ذات النقاط المركزية يناسب الموديل الرياضي المستنتج في المعادلة (14).

نعتبر الوسط الصخري المسامي مكون من، (Discrete Volume Elements) عدة عناصر حجمية مجزأة، و بالتالي يتم حساب التغيرات لكل عنصر حجمي خلال مجالات زمنية مجزأة (Discrete time intervals). العناصر الحجمية تمثل (Grid blocks) و المجالات الزمنية تسمى (Timesteps). حسب الشكل (13، a) الذي يمثل شبكة تجزئة ذات (نقاط زاوية) (Corner Point Grid block)، تكون قيم

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية

المؤشرات المدروسة محسوبة عند زوايا الخلية (البلوك). بينما الشكل (13، b) يمثل شبكة تجزئة ذات (نقاط مركزية) (Central Point Grid block)، تكون قيم المؤشرات المدروسة محسوبة في مركز الخلية (البلوك). [3]



الشكل (13): أنماط شبكة التجزئة.

المعادلة (14)، تمثل النموذج الرياضي لارتشاح سائل الحفر في وسط مسامي أحادي البعد. باستخدام الفرق المنتهي المتقدم للمشتق الأول بالنسبة للمسافة و الزمن، نجد:

$$\frac{V_i^{t+\Delta t} - V_i^t}{\Delta t} = \frac{A \bar{K} \Delta P}{\mu V_0} \frac{V_i^t - V_{i-1}^t}{\Delta x} \quad (22)$$

الحل الصريح أو المباشر (Explicite)، لحساب حجم راشح سائل الحفر عند كل خطوة زمنية بالعلاقة مع عمق الاختراق، نجد:

$$V_i^{t+\Delta t} - V_i^t = \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{A K_c \Delta P}{\mu V_0} (V_i^t - V_{i-1}^t) \quad (23)$$

بإعادة الترتيب و التجميع:

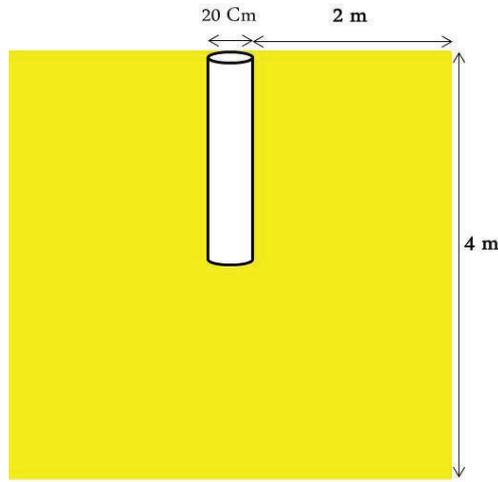
$$\begin{aligned} V_i^{t+\Delta t} &= (M + 1) V_i^t - M V_{i-1}^t ; M \\ &= \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{A K_c \Delta P}{\mu V_0} \end{aligned} \quad (23 - 1)$$

3.5. النموذج ثنائي البعد (2D):

نعيد كتابة النموذج الرياضي أحادي البعد (14)، بالإحداثيات الديكارتية لحالة ارتشاح في وسط ثنائي الأبعاد:

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{A \bar{K} \Delta P}{\mu V_0} \right)_x \frac{dV}{dx} + \left(\frac{A \bar{K} \Delta P}{\mu V_0} \right)_y \frac{dV}{dy} \quad (24)$$

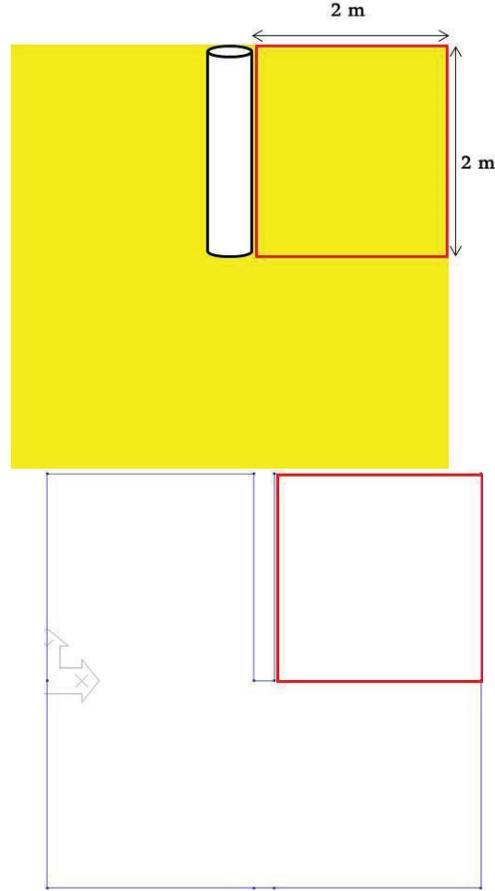
و بتطبيق طريقة الفروق المنتهية، كما في حالة النموذج أحادي البعد (1D)، نحصل على الحل الرقمي لحساب حجم رشح سائل الحفر. بعد ذلك أجرينا عملية المحاكاة باستخدام الحل الرقمي للنموذج (24)، لدراسة عملية إرتشاح سائل الحفر ذو الأساس المائي، المستخدم لاختراق طبقة صخرية (حجر رملي مثلاً) ببئر ذات قطر (20 cm)، التي تخترق الطبقة حتى منتصفها. الشكل (14).



الشكل (14): النموذج الجيومتري المدروس.

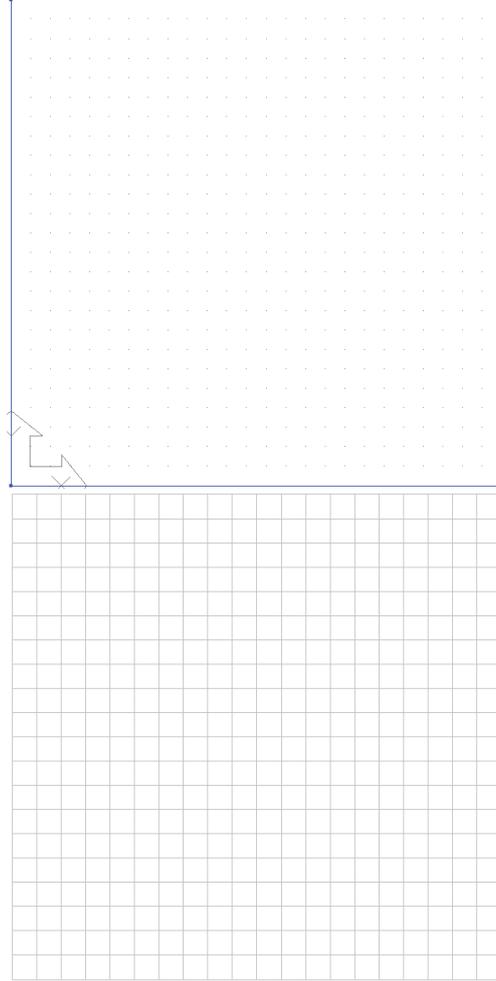
تم اختيار جزء من الطبقة (المجاور للبئر)، لإجراء عملية المحاكاة. كون تأثير سائل الحفر يكون سلبياً على جدران البئر، بينما على قاع البئر له تأثير ايجابي متمثل في ازدياد سرعة الحفر نتيجة تقليل فارق الضغط المطبق، كما أن كعكة الحفر على قاع البئر تتخرب بشكل مستمر بفعل أسنان رأس الحفر.

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية



الشكل (15): الجزء الجيومتري المدروس من الطبقة.

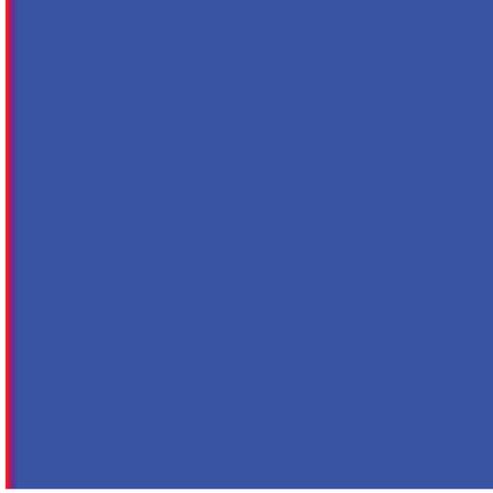
تم إدخال النموذج الرقمي المدروس في برنامج محاكاة (GID Simulator)، باعتماد شبكة تجزئة بإحداثيات ديكارتية (x, y) .



الشكل (16): شبكة التجزئة الجيومترية بالإحداثيات الديكارتية.

كشروط حدية، تم إعتبار أن جدران البئر تتعرض لفرق ضغط بمقدار (2 at)، ناتج عن سائل الحفر ذو الأساس المائي المستخدم حيث تتشكل كعكة الحفر بسماكة (2 cm) حسب الشكل (17). كما تم اعتبار أن راسح سائل الحفر المائي يملأ مسامات كعكة الحفر، و حجم المياه المتواجدة في الطبقة المدروسة تساوي درجة التشبع الأولية بالمياه الطبقيّة.

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية



الشكل (17): كعكة الحفر المتشكلة على جدران البئر نتيجة فارق الضغط.

لإجراء هذه المحاكاة استخدمنا القيم التالية للمؤشرات الداخلة في الحساب:

الجدول (2): معطيات الإدخال لمحاكاة إرتشاح سائل الحفر. [7]

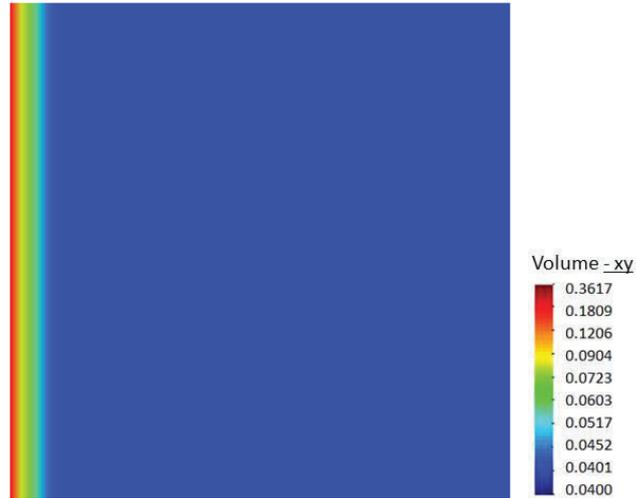
\bar{K}		A		ΔP (at)	μ (CP)	V_0 (m^3/m^2)
K (mD)	K_c (mD)	D_w (m)	h (m)	2	1	0.04
300	0.03	0.2	2			

تم ادخال المعطيات المذكورة لإجراء الحسابات بالنموذج الرقمي الذي توصلنا اليه باعتماد شبكة التجزئة الجيومترية الموضحة بالشكل (16).

الأشكال (18) و (19)، تظهر نتائج المحاكاة حيث نلاحظ بشكل عام:

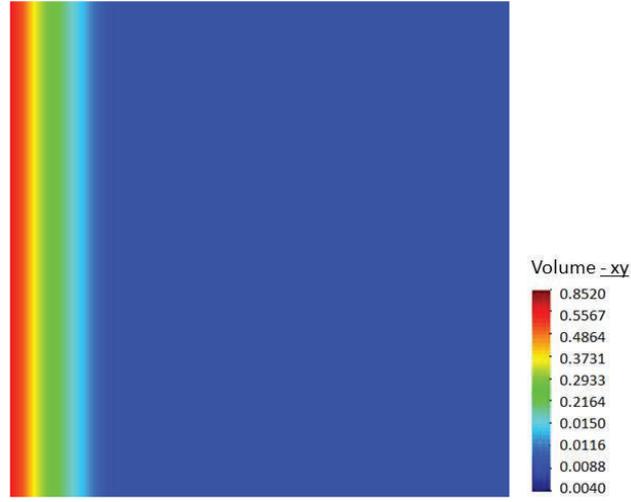
- عمق الإرتشاح يزداد مع الزمن، حيث يصل راشح سائل الحفر لمسافة أكبر داخل الطبقة مع الزمن خلال عملية الحفر.
- حجم راشح سائل الحفر يكون أكبر في المنطقة المجاورة للبئر، ثم يتناقص هذا الحجم تدريجياً بالابتعاد عن جدران البئر.

هذه النتائج تتوافق مع الدراسات التجريبية التي تثبت أن رشح سائل الحفر يزداد مع الزمن و بالتالي يزداد عمق الارتشاح في الطبقة المحفورة. و بذلك نكون قادرين بواسطة هذا النموذج معرفة العمق الذي سيصل اليه رشح سائل الحفر عند أي لحظة خلال الحفر و عند أي عمق. و بالتالي نتمكن من ضبط خاصية الإرتشاح لسائل الحفر المستخدم لدى حفر الآبار، من أجل تلافي تلوث الطبقات الحاملة للمواد الهيدروكربونية من جهة و تفسير نتائج القياسات الجيوفيزيائية البئرية و إجراء التصحيحات اللازمة عليها. كل هذا يساهم في تقليل زمن الحفر و بالتالي تقليل الكلفة الإجمالية لعمليات الحفر.



الشكل (18): تغير حجم رشح سائل الحفر (m^3/m^2) حول جدران البئر.
(t= 30 min)

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و الغازية



الشكل (19): تغير حجم راسح سائل الحفر (m^3/m^2) حول جدران.
(t= 60 min)

النتائج و المقترحات:

من خلال ما تم إنجازه في هذا البحث، نستنتج ما يلي:

1. تم الإعتماد على المفهوم الفيزيائي لقانون دارسي، للحصول على النموذج الرياضي و بالتالي النموذج الرقمي، لإرتشاح سائل الحفر حول جدران البئر بالحالتين (أحادية البعد، ثنائية البعد).
2. النموذج الرياضي الذي حصلنا عليه، المتمثل بالمعادلة (14) عبارة عن معادلة تفاضلية جزئية (المشتق من الدرجة الأولى لتغير الحجم بالنسبة للمسافة و الزمن)، يأخذ بعين الإعتبار حجم الراشح الأولي و نفوذية الوسط المسامي. و هذان عاملان غير مأخوذين بعين الاعتبار في النموذج الرياضي (4)، الذي يحاكي التجربة المخبرية لإرتشاح سائل الحفر.

3. تحويل النموذج الرياضي إلى نموذج رقمي (المعادلة 23)، تم باستخدام طريقة الفروق المنتهية، التي مكنتنا من إيجاد الحل التقريبي للمشتقات.
4. تم الاعتماد على طريقة الفروق المنتهية لإيجاد الحل الرقمي بشكل صريح (Explicite) كون القيمة الوحيدة المجهولة هي حجم راشح سائل الحفر و باقي القيم معلومة.
5. النموذج الحاسوبي حصلنا عليه من خلال برمجة النموذج الرقمي باستخدام بيئة البرمجة (Microsoft Visual Basic)، و الربط مع برنامج المحاكاة (Gid Simulator)، لإظهار النتائج بشكل ثنائي البعد. هذا يمكننا من سهولة و سرعة حساب حجم الراشح في أي نقطة حول البئر عند زمن محدد.
6. التطبيق الذي تم من خلاله استخدام النموذج المصاغ رقمياً بطريقة الفروق المنتهية، يعكس قدرة هذا النموذج على إيجاد تغيرات حجم راشح سائل الحفر ضمن الطبقة المخترقة بالعلاقة مع الزمن، و هذا ما نصبو إليه خلال عمليات الحفر، حيث تكون معرفة عمق الإرتشاح و حجمه حول جدران البئر ضرورية:
 - لضبط خواص سائل الحفر.
 - للمساعدة في تفسير القياسات الجيوفيزيائية البئرية.

بناءً على ما تم استعراضه و الوصول إليه، نقترح ما يلي كي نقرب أكثر من عكس واقع عملية حفر الآبار النفطية و الغازية:

1. تطوير الموديل الرياضي المصاغ و بالتالي الرقمي، ليعبر عن ظاهرة إرتشاح سائل الحفر ضمن الشروط البئرية و خاصة درجة الحرارة.
2. صياغة الموديل الرياضي المعبر عن ارتشاح سائل الحفر في وسط مسامي غير متجانس و الربط مع السلوك الميكانيكي للصخور المشكلة لهذا الوسط المسامي.
3. تنفيذ نموذج تجريبي لبئر نفطية لتنفيذ عدة تجارب مخبرية عليه، للتمكن من رصد و ضبط جميع المؤشرات التي تؤثر على عملية الارتشاح.

أما في مجال صياغة الحل الرقمي للنموذج الرياضي، نقترح ما يلي:

- استخدام طرق رقمية أخرى لصياغة النموذج الرقمي (عناصر منتهية، حجوم منتهية).
- إيجاد الصيغة الضمنية (Implicite) و مقارنتها بالصيغة الصريحة (Explicite) التي اعتمدها في بحثنا.

المراجع العربية:

1. نصور، طاهر. 1993 – سوائل الحفر. جامعة البعث، كلية الهندسة الكيميائية و البترولية، 392.
2. مرهج، أحمد. 2008 – سوائل الحفر. جامعة البعث، كلية الهندسة الكيميائية و البترولية، 294.

المراجع الأجنبية:

3. ODEH A.S, 1982 – An overview of mathematical modeling of the behavior of hydrocarbon Fluids. Society of industrial applied mathematics review 24, No.3, 263.
4. Rabia H, 1985 – Oil well Drilling Engineering: Principles and Practice. University of Newcastle upon Tyne, Boston, 331.
5. Calçada L, Scheid C, Waldmann A, Martins A, 2011 – Analysis of Dynamic and Static Filtration. Brazilian Journal of Petroleum and Gas, 666.
6. Basic Conceptions of Modeling and simulation, 2000 – Heriot-Watt University, Edinburgh, Vol.5, NO.3, 159–170.
7. Jianghui Wu, Carlos Torres-Verdin, and Mojdeh Delshad, 2004 – Numerical Simulation of Mud-Filtrate in Deviated Wells. SPE, U. of Texas at Austin, 143–154.

استخدام النمذجة لدراسة تأثير بعض المؤشرات على إرتشاح سوائل حفر الآبار النفطية و
الغازية
