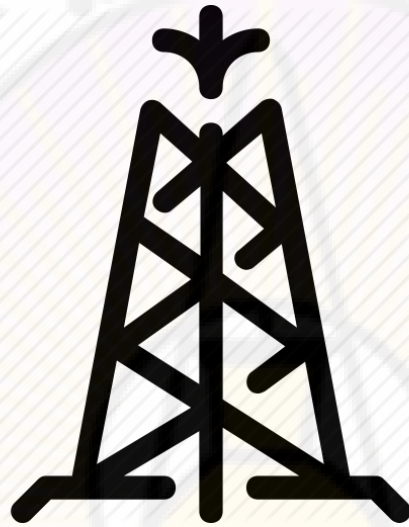




جيولوجيا النفط (ملحق)

سنة رابعة جيولوجية تطبيقية - جيوفيزياء تطبيقية

الدكتور

بشار بغدادي

أستاذ في قسم الجيولوجيا

1447 - 1448 هـ

2025 - 2026 م

جامعة دمشق

جدول المحتويات

2	• تركيب الفحم الهيدروجينية (الهيدروكربون) (Hydrocarbon Composition)
15	• الصخور الأم (Source Rocks)
18	• الصخور الخازنة (Reservoir Rocks)
53	• الصخور المغطية (Cap Rocks أو Seal Rocks)
57	• هجرة النفط (Petroleum Migration)
75	• مفهوم الإغلاق Closure والإصطياد (Trapping and Accumulation)
79	• المصائد النفطية (Petroleum Traps)
86	• المراجع

تركيب الفحم الهيدروجينية (الهيدروكربون) (Hydrocarbon Composition)

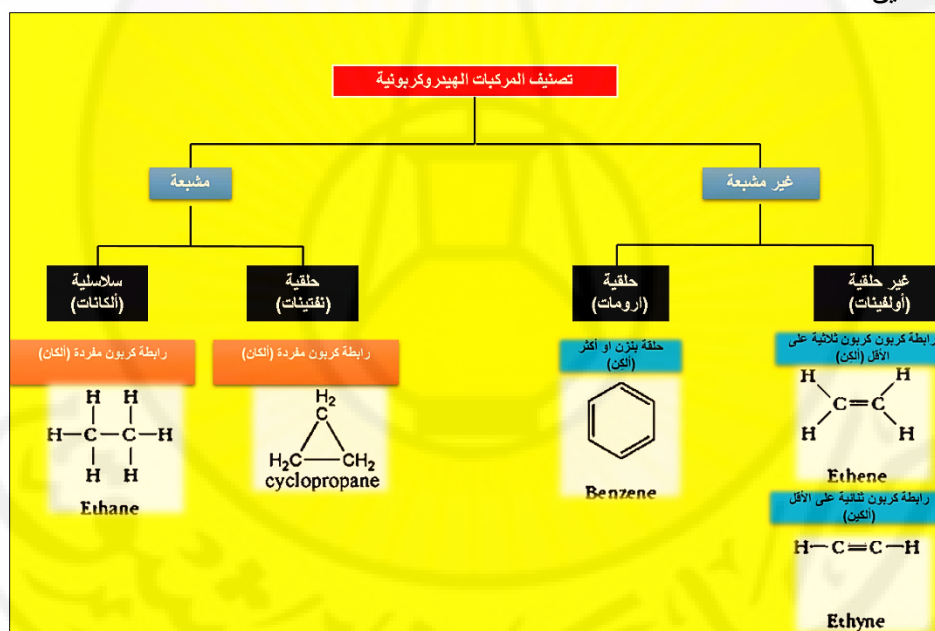
ما هو النفط؟ النفط هو مجموعة الزيوت الخام والغازات الطبيعية التي تشكل عائلة المواد الببتومية غير القابلة للانحلال في المذيبات العضوية وبخاصة في كبريتيد الكربون CS₂ ويمكن القول أن النفط هو الزيوت الخام والغازات الطبيعية أي هي مواع تتواجد في الحالة السائلة أو الغازية ضمن الشروط العادية من الحرارة والضغط STP.

تتألف هذه الموائع من الفحم الهيدروجينية أي من أجسام مركبة بشكل رئيس من الكربون والهيدروجين بالإضافة إلى كميات قليلة من الكبريت والأوكسجين والأزوت.

التركيب الكيميائي

تنقسم الفحم الهيدروجينية (الهيدروكربون) من وجهة النظر الكيميائية إلى ثلاث عائلات رئيسية:

- 1- الفحم الهيدروجينية المشبعة
- 2- الفحم الهيدروجينية غير المشبعة
- 3- الصمغ والأسفلتين



المخطط العام لتصنيف المركبات الهيدروكربونية

1- الفحم الهيدروجينية المشبعة

الألكانات

تعرف هذه العائلة بالألكانات أو البارافينات (الشموع) وهي الأكثر انتشاراً من الناحية الكمية وتشكل 50 إلى 60 % من مجموع المركبات. وهي مركبات عضوية هيدروكربونية مشبعة تحتوي على ذرات كربون وهيدروجين مترابطة بروابط أحادية فقط، وتتبع الصيغة العامة C_nH_{2n+2} ، حيث n عدد ذرات الكربون. تعتبر الألكانات من أبسط أنواع المركبات العضوية، وأبسط ألكان هو الميثان (CH₄) .

يوجد منها 3 أنواع في النفط الخام:

- أ- ألكانات نظامية
- ب- ألكانات متفرعة
- ج- ألكانات حلقية

أ- الألكانات النظامية (البارافينات النظامية) n-alkan

تضم الفحوم الهيدروجينية المشبعة ذات السلاسل الخطية وذات الصيغة C_nH_{2n+2} ، ويشار إليها بحرف "n" للدلالة على أنها سلاسل مستقيمة. تتميز بأن ذرات الكربون فيها مترابطة في سلسلة مستقيمة غير متفرعة. تحتوي فقط على روابط أحادية وتكون الصيغة العامة لها C_nH_{2n+2} . مثال على الألكانات النظامية الميثان، الإيثان، البروبان وغيرها التي تكون سلاسلها مستقيمة.

وتتواجد هذه الفحوم الهيدروجينية في 3 حالات:

- 1- غازية: وتشمل المركبات ذات السلاسل التي يتراوح عدد ذرات الكربون فيها من 1 إلى 4.
- 2- سائلة: وتشمل المركبات ذات السلاسل التي يتراوح عدد ذرات الكربون فيها من 5 إلى 15.
- 3- صلبة (البارافينات الطبيعية): وتشكل المركبات ذات السلاسل التي يزيد عدد ذرات الكربون فيها عن 18.

من بين هذه الألكانات النظامية، تكون هناك سلاسل بأعداد فردية من ذرات الكربون، وهذه تلعب دوراً في تحديد خصائص النفط، حيث تشير نسبتها إلى نوع المادة العضوية الأصلية وظروف التشكل البيئية. أي أن الألكانات ذات الأعداد الزوجية والفردية ضمن الألكانات النظامية تُستخدم كمؤشرات جيوكيميائية للتفسير والتحليل في علوم البترول والتميز بين هذه الأعداد مهم في الدراسات الجيوكيميائية للنفط والغاز.

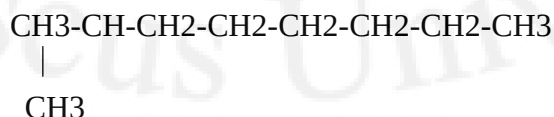
الإلمّ تشير الألكانات النظامية ذات الأعداد المفردة لذرات الكربون؟

هذه الألكانات تولدها الكائنات الحية وهي تمثل دلائل بيولوجية في الأشنات المجهرية تطغى الألكانات النظامية ذات الأوزان الجزيئية المنخفضة (C15 إلى C17) وهي تؤشر لبينة بحرية إذاً، في حين تحتوي النباتات الأكثر تطوراً أي النباتات الراقية على ألكانات نظامية ذات أوزان جزيئية أعلى (C11 إلى C25) وهي تؤشر لبينة قارية، مع الإشارة إلى أن الألكانات الخفيفة (C2 إلى C6) لا تتواجد في الكائنات الحية وتكثر في البترول هي نواتج تحول المادة العضوية بعد توضعها.

ب- الألكانات المتفرعة

هي الألكانات التي تحتوي على ذرات كربون متصلة بشكل غير خطي، حيث توجد تفرعات في السلسلة الرئيسية. هذه التفرعات تؤثر على الخواص الفيزيائية والكيميائية للمركب. الألكانات المتفرعة لها نفس الصيغة الكيميائية العامة للألكانات، لكنها تختلف في تركيبها البنائي. تحتوي على مجموعة متنوعة من الجذور الألكيلية التي يمكن أن تكون ميثيل ($-CH_3$)، إيثيل ($-C_2H_5$)، بروبيل ($-C_3H_7$)، بيوتيل ($-C_4H_9$) وغيرها. هذه الجذور تمثل التفرعات المختلفة التي تتصل بالسلسلة الكربونية الرئيسية، وتختلف باختلاف طول ونوع التفرع. وبناءً على نوع وعدد هذه الجذور، تتنوع الخواص الفيزيائية والكيميائية للألكانات المتفرعة.

مثال: 2- ميثيل الأوكتان



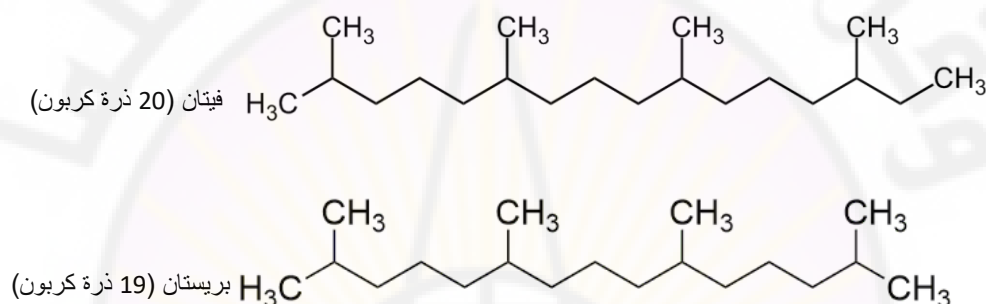
2-Methyloctane C_9H_{20}

تتحدّر بعض أنواع هذه الألكانات من الجزيئات المتواجدة ضمن المادة العضوية الحية كما هو الحال في البريستان (C19) والفيتان (C20) حيث يمكن اعتبارهما كبعض الألكانات النظامية مستحاثات بيوكيميائية، وفيها يتفرع جذر ميتيلي من كل رابع ذرة كربون في السلسلة.

ما هما هذا المركبان؟

- البريستان Pristane ألكان متفرع يحتوي 19 ذرة كربون
- الفيتان Phytane ألكان متفرع يحتوي 20 ذرة كربون

كلاهما مشتق من الفيتول وهو جزء من الكلوروفيل في الكائنات الحية.



بنية الفيتان والبريستان

ما أهمية كل منهما؟

يستخدم كل من الفيتان والبريستان في:

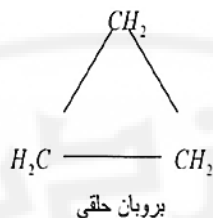
1. تحديد أصل المادة العضوية: غالباً ما تشير النسب المرتفعة من بريستان/فيتان إلى مادة عضوية نباتية (نباتات عليا "قارية")، في حين تشير نسبة بريستان/فيتان منخفضة إلى بيئة بحرية أو ميكروبية.
2. ظروف الترسيب: النسبة بريستان/فيتان تستخدم كمؤشر على ظروف الأكسدة أو الإرجاع أثناء الترسيب.
3. النضج الحراري للزيت أو للكيروجين: مع تقدم النضج الحراري، تتغير نسب المركبات. قد يشير انخفاض بريستان/فيتان إلى نضج أعلى أو تحلل حراري متقدم.

ج- الألكانات الحلقية (النفثينات) C_nH_{2n}

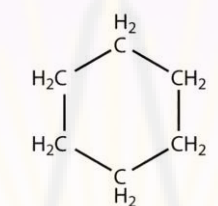
الألكانات الحلقية (Cycloalkanes) هي مركبات عضوية هيدروكربونية مشبعة تحتوي على ذرات كربون مترابطة في بنية حلقية مغلقة، بمعنى أن ذرات الكربون ليست مرتبة في سلسلة خطية بل في حلقة أو حلقات متصلة ببعضها. الصيغة العامة للألكانات الحلقية هي C_nH_{2n} ، حيث يتناقص عدد ذرات الهيدروجين مقارنة بالألكانات النظامية بسبب بنية الحلقة التي تغلق السلسلة. تتميز الألكانات الحلقية بخصائص فيزيائية وكيميائية تختلف عن الألكانات الخطية، وتوجد في الكثير من المركبات الطبيعية والبوليمرات الصناعية.

بالتالي، الألكانات الحلقية هي فئة من الألكانات تمتاز بتركيبها الحلقي المغلق بدلاً من السلسلة المفتوحة. ويمكن لها أن تكون وحيدة الحلقة أو متعددة الحلقات (مثل الهكسان الحلقي)، وقد تحتوي الحلقة على مجموعات فرعية أو جذور مثل الميثيل، الإيثيل، أو جذور ألكيلية أخرى تخرج من ذرات الكربون في الحلقة. هذه الجذور تسمى بالفروع الجانبية، وتؤثر على خواص المركب الكيميائية والفيزيائية كما هو الحال في الألكانات المتفرعة.

لا يمكن للمركب الهيدروكربوني الذي يحتوي على أقل من ثلاث ذرات كربون أن يشكل حلقة نفثينية، لذلك يعد البروبان الحلقي C_3H_6 أصغر الجزيئات النفثينية.



مثال: الهكسان الحلقي - سايكلو هكسان



هكسان حلقي C_6H_{12}

2- الفحوم الهيدروجينية غير المشبعة

الفحوم الهيدروجينية غير المشبعة هي مركبات عضوية تحتوي في تركيبها على ذرات الكربون والهيدروجين فقط، لكنها تختلف عن الفحوم الهيدروجينية المشبعة بوجود روابط ثنائية أو ثلاثية بين ذرات الكربون. هذه الروابط المتعددة تجعلها غير مشبعة بالهيدروجين، أي أنها تحتوي على عدد أقل من ذرات الهيدروجين مقارنة بالفحوم المشبعة.

الأنواع الرئيسية من الفحوم الهيدروجينية غير المشبعة تشمل الألكينات التي تحتوي على رابطة ثنائية ($C=C$) والألكاينات التي تحتوي على رابطة ثلاثية ($C\equiv C$). هذه المركبات تتميز بخواص كيميائية فيزيائية مختلفة عن الفحوم المشبعة، وتلعب دوراً مهماً في الكيمياء العضوية وصناعة البتروكيماويات.

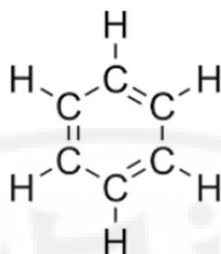
بالتالي، الفحوم الهيدروجينية غير المشبعة هي مركبات هيدروكربونية تحتوي على روابط ثنائية أو ثلاثية تجعلها غير مشبعة بالهيدروجين وتتميز بخواص كيميائية مختلفة عن الفحوم المشبعة.

تضم هذه العائلة الفحوم الهيدروجينية العطرية والنفثينية العطرية وتشكل من 20 إلى 45 % من وزن المادة النفثية. ويمكن فصل هذه العائلة إلى نوعين مختلفين تبعاً لروابطهما الكيميائية.

أ. الفحوم الهيدروجينية غير المشبعة الحلقية. ونميز ضمنها:

- الفحوم الهيدروجينية العطرية (البنزينية) C_2H_{2n-6}

وتتكون البنية الرئيسة للجزيء فيها من حلقة سداسية تتشكل من ست ذرات كربون يرتبط كل منها بذرة هيدروجين واحدة، وتكمل ذرات الكربون غير مشبعة حاجتها من الروابط عن طريق تشكيل روابط ثنائية فيما بينها. يطلق على الحلقة الأروماتية تسمية الحلقة البنزينية حيث يعتبر البنزن أبسط المركبات الأروماتية وأقلها وزناً جزيئياً، من أهم مركباتها التولوينين C_7H_8 والكزيلين C_8H_{10} .



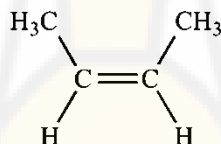
حلقة البنزن C6H6

• الفحوم الهيدروجينية النفطية العطرية:

تتألف من نواة واحدة أو عدة نوى عطرية مضافاً إليها فحوم هيدروجينية نفثينية ذات سلاسل ألكيلية. يستخدم مصطلح **الأروماتية** للدلالة على نسبة الكربون الاروماتي المرتبط بالحلقات البنزينية إلى مجموع نسبة الكربون في جميع المركبات الهيدروكربونية في النفط.

ب. الفحوم الهيدروجينية غير المشبعة وغير الحلقية (الأوليفينات)

هي فحوم قليلة الثبات ولا تتواجد في الزيوت الطبيعية إلا على شكل آثار وهي عبارة عن مركبات هيدروكربونية غير مشبعة وغير حلقية تحوي على رابطة مضاعفة واحدة على الأقل بين ذرات الكربون.



Butylene

يجعل وجود الرابطة المضاعفة وطبيعة البنية السلسلية المرافقة من الأوليفينات مركبات هيدروكربونية ذات قدرة تفاعلية عالية وبالتالي فهي مركبات غير مستقرة.

3- الصموغ والأسفلتين

هي مركبات معقدة ذات أوزان جزيئية عالية غنية نسبياً بالكبريت والازوت والأكسجين وبشكل أقل النيكل والفاناديوم وتشكل الجزء الأكثر ثقلاً من الزيوت الخام.

تبدو هذه الأجسام مؤلفة من نوى عطرية متعددة الحلقات ومن سلاسل ذات ذرات غير متجانسة وتحتوي على مركبات كبريتية وأزوتية وأوكسجينية.

تعتبر الصموغ أكثر قابلية للانحلال في المذيبات العضوية من الأسفلتين بالإضافة إلى أنّ الصموغ هي مواد غير ثابتة وتميل لأخذ بنية الأسفلتين عند تعرضها للضوء.

تشكل هذه الأجسام 20% من الزيوت الخام وتتواجد بكثرة في الخام غير الناضج أو من الزيوت الثقيلة المتخرجة بيولوجياً. تجدر الإشارة إلى أنه ليس هناك ما يقابل الإسفلتين في المواد العضوية الحية، لذا فإن هذه المواد تعد من نتائج التحولات التي تصيب المواد العضوية.

عند الانتقال من مواد خفيفة وبسيطة في النفط إلى مركبات ثقيلة ومعقدة في الراتنجات والأسفلتينات تحدث مجموعة من التغيرات من أهمها:

- 1- ازدياد كل من الوزن الجزيئي والكثافة.
- 2- ازدياد قيمة النسبة C/H. بسبب الزيادة في المركبات المعقدة والغنية بالعناصر الأخرى.
- 3- ازدياد نسب العناصر heteroatoms مثل الكبريت والأكسجين والنيتروجين نتيجة تراكم المركبات المعقدة المحتوية على هذه العناصر.
- 4- ازدياد نسبة الحلقات العطرية.

تؤثر هذه التغيرات في النفوط الخام على خواصها الفيزيائية والكيميائية وسلوكها في العمليات الصناعية والاستخراجية

المجموعات الرئيسية للفحوم الهيدروجينية

تتوزع في ثلاث مجموعات رئيسية:

- 1- الغازات
- 2- الزيوت السائلة
- 3- الرمال الأسفلتية

وقد جرت العادة على تمييز غازات جافة وغازات رطبة ضمن مجموعة نواتج الغازات، وزيوت ثقيلة وزيوت خفيفة ضمن مجموعة الفحوم الهيدروجينية السائلة.

تتركب **الغازات الجافة** بشكل رئيس من الميثان بنسبة تصل إلى 97% ومن نسبة ضئيلة جداً من الفحوم مثل الإيثان (C2) والبروبان (C3).

أما الغازات الرطبة فهي على العكس تتألف من نسبة عالية من الفحوم الأثقل مثل البروبان (C3)، والبيوتان (C4)، والبنتان (C5)، والهكسان (C6)، بالإضافة إلى بعض السوائل الخفيفة.

أما الزيوت الخفيفة فهي تتألف من فحوم هيدروجينية سائلة وخفيفة ومن غازات.

في حين أن الزيوت الثقيلة غالباً ما تحتوي على نسب عالية من الفحوم الهيدروجينية السائلة بالإضافة إلى معلقات صلبة أو مواد ثقيلة مثل الأسفلتينات. أي أن الزيوت الثقيلة هي نتاج فقدان النواتج الخفيفة في الفحوم وذلك:

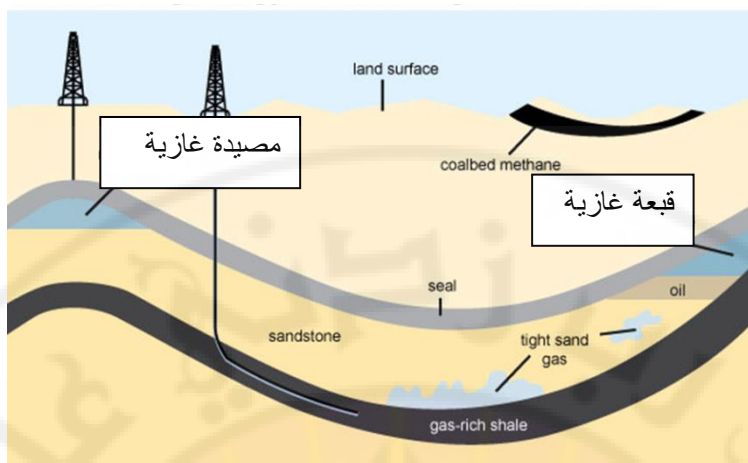
- 1- إما لعدم تمكنها من التشكل (زيوت قديمة – قليلة النضج)
- 2- أو لهجرة هذه المركبات الخفيفة أو تبخرها
- 3- أو لزوالها بسبب فسادها

تسمى النواتج الصلبة تجاوزاً إسفلت كما ونطلق لفظ بارافين على الفحوم الهيدروجينية التي يفوق عدد ذرات الكربون فيها عن C17.

فيما يخص الغازات الطبيعية:

- يتشكل الجزء الأكبر منها من الميثان. وتتواجد هذه الغازات في حالتين:

- 1- وحيدة على شكل مصائد غازية معزولة
- 2- مجتمعة مع مصائد نفطية حيث تشكل قبعة غازية عندما تكون المصيدة مشبعة بالغاز أو تكون منحلة ضمن الطور السائل عندما تكون المصيدة تحت مشبعة بالغاز.



توزع الغازات الطبيعية إما في مصائد معزولة أو كقبة غازية.

التركيب الكيميائي للغازات الطبيعية

○ يعتبر الميثان المركب الرئيس للغاز الطبيعي بنسبة قد تصل إلى 99 وحتى 100 % في حالات معينة، أما المركبات الأخرى كالإيثان والبروبان فهي تدخل في تركيب الغاز بنسبة قليلة جداً.

بالإضافة إلى المركبات الهيدروكربونية فإنه يمكن للغازات الطبيعية أن تحتوي وبنسب مختلفة على غازات أخرى وعلى وجه الخصوص:

○ كبريتيد الهيدروجين H_2S

يتشكل كبريتيد الهيدروجين نتيجة لتحول المادة العضوية في الأعماق الكبيرة بفعل تأثير الميثان على كبريتات الكالسيوم أو كبريتات الحديد، بالإضافة إلى تأثير البكتيريا اللاهوائية التي تقوم بتحويل الكبريتات إلى كبريتيد الهيدروجين خلال تحلل المادة العضوية.

○ ثاني أكسيد الكربون CO_2

في تحولات المادة العضوية وتوليد الهيدروكربون يتشكل غاز ثاني أكسيد الكربون نتيجة عمليات الأكسدة والتخمر وتحلل المركبات العضوية، بالإضافة إلى إزالة التفحم من مكونات المادة العضوية. كما يمكن أن ينتج ثاني أكسيد الكربون من تفكك فلزات الكربونات مثل كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) في ظروف جيولوجية معينة.

○ الآزوت N_2 أو النيتروجين العضوي

وهو أيضاً نتاج الدياجينيز، أي نتيجة تحلل المادة العضوية في الصخور الأم وخاصة البروتينات التي تحوي على مجموعات أمينية ($-NH_2$) وذلك بنتيجة الحرارة والضغط، ويتواجد في حقول نفطية مختلفة من العالم.

نشأة الفحم الهيدروجينية

لفهم ميكانيكية نشأة الفحم الهيدروجينية وخصائص صخورها الأم لابد لنا من مناقشة المواضيع التالية:

- 1- المكونات الرئيسة للمادة العضوية الحية
- 2- أوساط الترسيب التي يتشكل فيها الكيروجين
- 3- التحولات اللاحقة للتشكل

1- المكونات الرئيسة للمادة العضوية الحية

أ- البروتينات

هي بوليميرات الحموض الأمينية ذات درجة انتظام عالية تدخل بشكل خاص في تركيب الخلايا الحيوانية ومؤلفة من الجذر الأميني NH_2 والمجموعة الحمضية $COOH$. تدخل بشكل خاص في تركيب الخلايا الحيوانية.

ب- الكربوهيدرات

تتضمن السكر- والنشاء- والسيللوز، وهي تجمع غلوسيدات (سكريات) وبوليميراتها وهي تؤلف جزءاً هاماً من الأغشية السيللوزية ويعتبر السيللوز نتاج النباتات المتطورة كما يتواجد بشكل رئيس في بعض الحيوانات وغبار الطلع.

ج- الليبيدات (الدهن)

تعد الليبيدات الأسلاف الرئيسة للتراكمات الهيدروكربونية المعروفة في العالم، وتضم كافة المركبات العضوية التي لا تتحلل في الماء بل تتحلل في مذيبات عضوية كالكلوروفورم كما تضم الحموض الدسمة وتكثر في الأشنيات وخاصة المشطورات.

د. اللينين

يعد اللينين السلف الرئيس للفحوم الهيومية وهو يوجد فقط في أوعية النباتات القارية (اليابسة) ويغيب عن العضويات البحرية.

2- أوساط الترسيب والكيروجين

ما تأثير الترسيب وما علاقته بتشكيل المادة العضوية وحفظها؟

- الأوساط الغنية بالمادة العضوية هي أوساط تتحكم فيها طاقة خارجية (الضوء - الشمس) وتكثر فيها العناصر الغذائية. هذه الأوساط قابلة لنمو الكائنات الحية وهي أوساط غير عادية تتواجد في البحار والقارات.
- الأوساط الأكثر قابلية لتكاثر المادة العضوية هي أوساط مائية وتتمثل بالحواف (الهوامش) القارية والمنحدرات والشواطئ واللاغونات والبحار المغلقة والبحيرات. كذلك في المجموعات الرسوبية الدلتاوية المعقدة.
- إن نمط توضع الرسوبات يلعب دوراً هاماً في توزيع وحفظ المادة العضوية فالترسيب السريع يؤدي على تبثر المادة العضوية بين العناصر الحطامية (الرسوبات) مما يوفر انخفاض (انخفاض) سريع وحفظ جيد بهذه المواد العضوية وذلك بإبطال تأثير البكتيريا عليها.
- أما الترسيب البطيء فهو يساعد على تركيز المادة العضوية في بعض الأسرة وفي هذه الحالة فإن ضغط المادة يتطلب وسط مغلق.
- تسهم الفلزات الغضارية إلى حد كبير في تثبيت وحفظ المادة العضوية حيث تقوم بامتصاص بعض المركبات العضوية القطبية مغيرة في ذلك حالة المادة العضوية بشكل يقلل من خطر فسادها في الماء.

وهكذا يمكن تمييز نوعين كبيرين من الأوساط الترسيبية وطبيعة المادة العضوية المرتبطة بها:

- 1- وسط بحري أو وسط بحيري عذب تتشكل فيه المادة العضوية البلانكتونية والأشنيات أو ما يسمى بالمواد السابروبيلية.

2- وسط شديد الملوحة ذو ترسيب سريع للمواد الغضارية غنية بالمادة العضوية الهيومية (الدبالية) أو ما يسمى بالمواد الهيومية.

○ المواد السابروبيلية

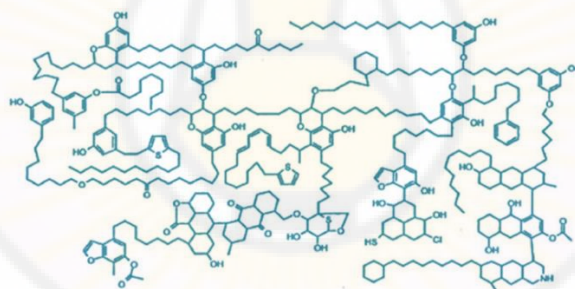
هي سحنات عضوية فقيرة بالمواد الحطامية وتتألف بشكل رئيس من الأشنيات والبلانكتون. كيميائياً هي نواتج تفكك وبلمرة المواد العضوية الليبيدية والدسمة كالأبواغ، والطحالب البلانكتونية المترسبة في الأوحال تحت المائية في أوساط فقيرة بالأوكسجين وهي تتميز بمعدل ذري H/C مرتفع وبتراوح عادة بين 1.3 و 2

○ المواد الهيومية أو الدبالية

هي سحنات عضوية حطامية مؤلفة من بقايا نباتية متطورة وترتبط برسوبات غضارية رملية ومناخ رطب. كيميائياً هي نواتج تشكيلات الخث (Peat) وبشكل رئيس النباتات القارية التي توضع في المستنقعات بوجود الأوكسجين ويتميز الخث بنسبة ذرية H/C حوالي 0.9 أي بالقرب من الحد الأدنى الهام للأسلاف المولدة للنفط وهو يأتي من الخلايا النباتية والمواد الجدارية التي تتكون بشكل رئيس من اللغنين والسليلوز بالإضافة إلى النسيج الأروماتية ذات المقاومة العالية للفساد.

الكيروجين

يقصد بالكيروجين المركبات العضوية للصخور الرسوبية غير القابلة للانحلال في المذيبات العضوية، ويعتبر الكيروجين الشكل الأكثر انتشاراً للمادة العضوية على سطح الأرض. ومن الناحية الكيميائية فالكيروجين هو معقد لجزيئات كبيرة مؤلفة من نوى حلقة تربطها سلاسل قصيرة متعددة الذرات ويمكن أن تحتوي على ليبيدات. أما بنيته فهي غير منتظمة ولا تأخذ ترتيب معين إلا من خلال التحول الحراري.



بنية الكيروجين

أنواع الكيروجين

يمكن تقسيم المواد الكيروجينية حسب خصائصها الكيميائية وتطورها على ثلاثة أنواع (الشكل 1):

1. الكيروجين I

يتصف بكون النسبة H/C مرتفعة وتزيد عن 1.5 ويكون النسبة O/C أقل من 0.1.

يتشكل هذا النوع بمعظمه من الليبيدات الناتجة عن تجمع بقايا الأشنيات أو من التخرّب البيولوجي للمركبات الأخرى. وهو نوع نادر جداً و يتشكل في البحيرات الفقيرة بالأوكسجين وفي بعض البيئات البحرية ضمن شروط خاصة جداً.

يعتبر هذا النوع غني بالزيوت. قدرته على توليد النفط عالية جداً، كما أن قدرته على توليد الغاز عالية جداً أيضاً.

2. الكيروجين II

يتصف بكون النسبة H/C مرتفعة نسبياً ويكون النسبة O/C منخفضة إلى حد ما.

يكثر في الرسوبات البحرية المتشكلة في الأوساط المغلقة. وينتشر في كثير من الصخور الأم و هو ينسب بشكل رئيس إلى المادة العضوية البحرية التي توضع في بيئات مرجعة ذات محتوى متوسط إلى عال من الكبريت و هو يأتي من مصادر متنوعة جداً بما فيها الأشنيات البحرية، الأبواغ، وغبار الطلع، و شموع الأوراق، والراتنجات المستحاثية، و من ليبيدات الخلايا البكتيرية.

يكون غني بالسلاسل النفطية والعطرية. ويحتوي على نسبة أعلى (مقارنةً بالكيروجين I) من النوى متعددة الأرومات والمجموعات الحاوية على الأوكسجين و الكبريت.

لديه قدرة على توليد كميات هامة جداً من النفط والغاز (لكنها أقل من النوع I).

3. الكيروجين III

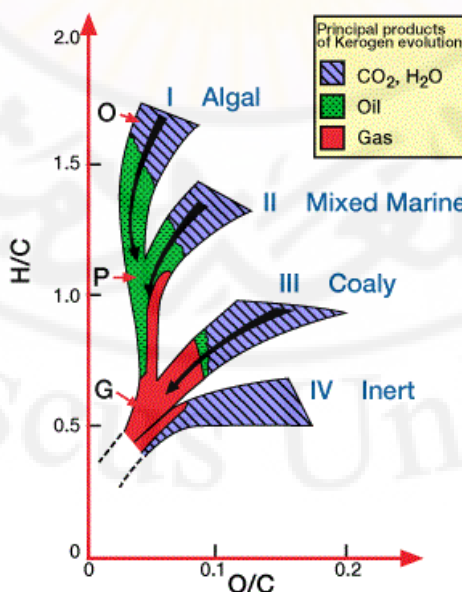
يتصف بكون النسبة H/C منخفضة جداً وعلى العكس فإن النسبة O/C مرتفعة.

ينتج بشكل رئيس من مركبات النباتات القارية المتطورة وهو يتكون من مواد عضوية فقيرة بالمركبات الشمعية والدمية بينما يعد كل من السللوز واللغنين من أهم مركباته. ويحتوي على مجموعات حلقيّة عطرية مع قليل من السلاسل المتفرعة. أي يحتوي الكيروجين III على نسبة عالية من النوى الأروماتية بينما لا تشكل المجموعات المشبعة فيه إلا نسبة ضئيلة، و تكون على شكل سلاسل بارافينية طويلة.

يتصف بقدرة محدودة جداً على توليد النفط، لكنه يمكن أن يولد كميات هامة من الغاز إذا طمر في أعماق مناسبة.

4. الكيروجين IV

هو نوع من المادة العضوية الموجودة في الصخور الرسوبية، يتميز هذا النوع بالنقص الشديد من الهيدروجين مقارنة بالكربون، حيث يحتوي على كميات قليلة جداً من الهيدروجين، ويُعتبر غنياً بالكربون وذو بنية عطرية ومكتفة للغاية. يتميز إذاً بنسب ذرية H/C أدنى من كل أنماط الكيروجين السابقة و نسبة O/C أعلى من كل الأنماط السابقة. ويمكن لهذا الكيروجين أن ينتج كميات قليلة من ثاني أكسيد الكربون والماء ولكنه لا يستطيع أن يولد من المواد الهيدروكربونية سوى كميات ضئيلة من الميثان. يتشكل غالباً في بيئات غنيّة بالأوكسجين مثل مواد الفحم النباتي أو البقايا العضوية المتأكسدة التي تعرضت لتحلل كيميائي واسع. يحتوي هذا الكيروجين بشكل رئيس إذاً على جزيئات عضوية معاد تشكيلها و مواد عضوية ذات أصل متنوع و مؤكسد بشدة.



الأنواع الأربعة للكيروجين (مخطط فان-كريفيلين).

تحولات المادة العضوية

يمكن القول بأن الزيت والغاز هما نتيجة مباشرة للتحولات الكيميائية التي تعانيها المادة العضوية خلال الانطمار كما أن سرعة وكثافة الانطمار (الانخفاس) لهما دور رئيس في نضج المادة العضوية وبالتالي فإن نشأة الفحم الهيدروجينية يجب أن تعزى إلى حوادث الدياجينيز والكاتاجينيز التي تتعرض لها المادة العضوية يمكن القول بأن عملية نشأة الفحم الهيدروجينية هي عملية أكسدة وإرجاع للمادة العضوية تؤدي في وقت واحد إلى إعطاء جسم مرجع غني بالهيدروجين وجسم مؤكسد فقير بالهيدروجين.

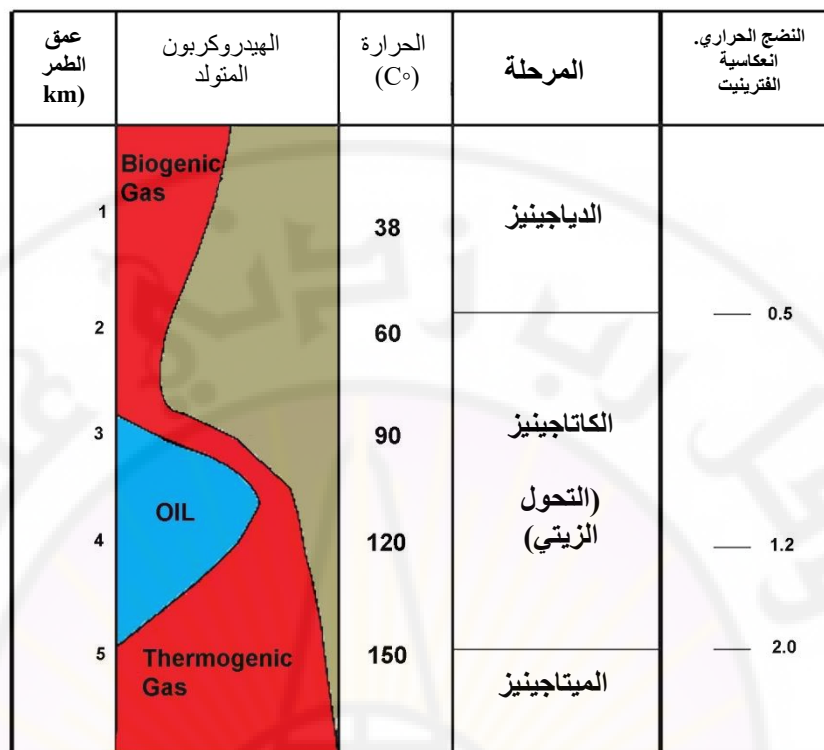
1- التحول (الدياجينيز)

عبارة عن تحولات بيولوجية كيميائية وفيزيائية تصيب هذه المواد في درجات الحرارة المنخفضة. تتم تحولات المادة العضوية والفحوم الهيدروجينية في الرسوبات الناعمة بشكل خاص نتيجة الأفعال البيولوجية (تأثير البكتيريا) وتبدو هذه الأفعال محددة في المناس الأولى من التوضعات، أي تحدث هذه التحولات ضمن ظروف معتدلة من الضغط والحرارة التي لا تتجاوز 50 درجة مئوية. حيث تقوم الكائنات المجهرية الدقيقة في أعلى الرسوبيات باستخدام الأوكسجين الذي يلزمها مباشرة بينما تحتاج الكائنات اللاهوائية للحصول على ما يلزمها من هذا العنصر إلى إرجاع الكبريتات، ويتناقص تأثير فعل البكتيريا مع ازدياد الضغط والحرارة وتشكل الغازات السامة مع نقص الاحتياطي في المادة العضوية وهكذا تقل هذه الأفعال وبشكل غير منتظم مع تزايد العمق إلا أنه وفي شروط منخفضة من الحرارة (أقل من 30%) فإن نشاط الكائنات الدقيقة يمكن أن يمتد إلى ما بين 1000 و 2000 متر عمقاً.

وبالنتيجة فإنه في هذه المرحلة من التحول تؤدي التأثيرات الكيميائية الأولية إلى حدوث انقطاعات في السلاسل القصيرة ضعيفة الارتباط في الجذور العضوية وينتج عن هذا الانقطاع بعض الغازات عضوية المنشأ (Biogenic Gas) وبشكل خاص الميثان وثنائي أوكسيد الكربون إضافة لتشكيل الماء وغازات H₂S ومركبات ثقيلة كالصموغ والاسفلتين الحاوية على NSO.

2- التحول الحراري (الكاتاجينيز)

- يتم في مرحلة الكاتاجينيز تكسر المواد العضوية المحفوظة في الصخور الرسوبية حرارياً، وتغطي هذه المرحلة المجال الحراري الواقع بين الدياجينيز والميتاجينيز وهو ما يتوافق مع المجال الحراري الواقع بين حوالي 50 و 200 درجة مئوية.
- إذا استثنينا بعض التغيرات على بعض المكونات الطينية، فإنه لا تحدث أثناء مرحلة الكاتاجينيز أية تغيرات تذكر على نسيج الصخر وتركيبه الفلزي، وتنحصر التغيرات الرئيسية التي تحدث على المركبات غير العضوية بازدياد ترابطها، واستمرار طرد الماء منها، تناقص المسامية والنفوذية، وازدياد الملوحة في المياه البينية لتقترب من حالة الإشباع. بينما تتعرض المادة العضوية المبعثرة إلى تغيرات كبيرة ويترافق كل من السائل والمتكثفات المتولدة مع كميات هامة من الميثان .
- تنتهي مرحلة الكاتاجينيز عندما تختفي جميع السلاسل الكربونية الأليفاتية من الكيروجين ولا يتشكل بعد ذلك إلا الميثان.
- تعد مرحلة الكاتاجينيز المرحلة الأساسية في تشكل النفط والغاز فيشكل في هذه المرحلة على سبيل المثال حوالي 82% من مجموع الغاز المتشكل في كل المراحل بينما يتشكل 7% فقط من هذا الغاز في مرحلة الدياجينيز وتتولد النسبة الباقية في مرحلة التحول "الميتامورفيزم".
- يسمى المجال العمقي الحراري الذي تبدأ عنده الصخور الأم بتوليد وطرد معظم نفطها بالنافذة النفطية، وتتشكل النافذة النفطية غالباً ضمن المجال الحراري 60-160 درجة مئوية حيث يبدأ تولد النفط في بداية هذا المجال بالازدياد حتى يصل إلى حد أعظمي يبدأ عنده بالتراجع حتى يتوقف نهائياً وهو ما يؤدي إلى تشكل خط منحنى في العلاقة بين كمية النفط المتولدة وكل من الحرارة والعمق.



مخطط التحول الحراري للكبروجين.

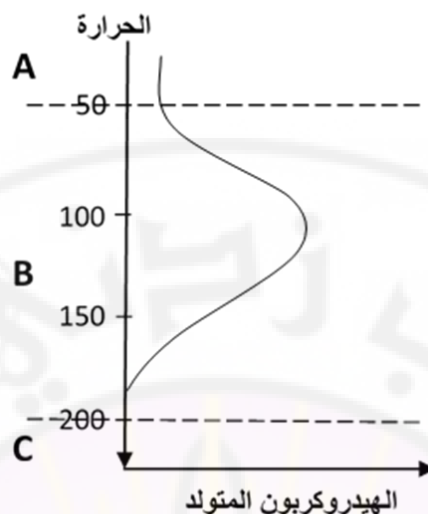
يتحكم في شكل منحنى تولد النفط ثلاثة عوامل: أ- تولد النفط، ب- هجرته من الصخور المولدة، ت- تحوله إلى غاز. أما بالنسبة لأهم عامل يتحكم في كمية النفط المتولدة من الكبروجين فهو النسبة الذرية H/C، ويتوقف توليد المواد الهيدروكربونية بشكل كامل عندما تصبح قيمة النسبة الذرية H/C حوالي 0.2 وتترافق قمة تولد النفط مع محتوى كربوني في الكبروجين يتراوح بين 77 و 87% وزناً.

يدعى المجال الطبقي الواقع فوق وخلال وتحت النافذة النفطية حسب الترتيب:

A- غير الناضج (IMMATURE)

B- الناضج (Mature)

C- فوق ناضج (Postmature).



- يسمى أعلى مجال حراري/عمقي تتشكل فيه الغازات الطبيعية ذات المنشأ الحراري (Thermogenic Gas) سواء من خلال تكسير النفط أو الزيت أو بشكل مباشر من الكيروجين النافذة الغازية وتتراوح بين 50 و أكثر من 200 درجة مئوية.

3- الميتاجينيز (التحول الحراري اللاحق)

تبدأ مرحلة الميتاجينيز في الأعماق الكبيرة وتنتهي حيث تبدأ مرحلة الاستحالة، وهو ما يتوافق مع بداية سحنة الشيست الأخضر في الصخور.

تحدث بين درجات الحرارة 110-120 إلى 200 درجة مئوية انقطاعات جديدة للروابط كربون-كربون C-C في الكيروجين المتبقي وفي الفحم الهيدروجينية المتشكلة في المراحل السابقة حيث تصبح هذه الفحم أكثر خفة وبالتالي تتحول معظمها إلى غازات على شكل ميثان.

وتتغير الفلزات في هذه المرحلة بأشكال مختلفة، فتخسر فلزات الغضار على سبيل المثال مياها بين الورقية وتصل إلى مرحلة تبلور أعلى وتتحول أكاسيد الحديد المائية (كالغوتيت) إلى أكاسيد لامائية (كالهيماتيت) ويتحول تركيب المادة العضوية إلى ميثان وبقايا كربونية فقط.

عامل الزمن

إن عامل الزمن له دور هام في تشكل الفحم الهيدروجينية حيث أن هذا التشكل يتطلب حرارة تزيد قيمتها كلما كان التشكيلات الأم حديثة، كذلك فإن الفحم الهيدروجينية تتشكل في الأحواض الانخفاضية وإلى أكثر من مئة مليون سنة في الأقاليم من نوع الصفائح.

الصخور الأم (Source Rocks)

تعريف الصخور الأم

هي صخور ذات بنية ناعمة تحتوي على نسبة عالية من المادة العضوية وتشكلت في وسط مرجع أي في شروط محددة من الملوحة وقدرة الوسط ويمكن أن نميز من حيث الرسوبات المشكلة للصخر الأم بين:

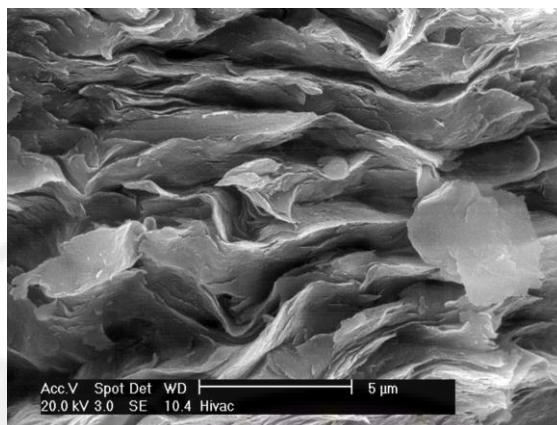
- 1- رسوبات بحرية غنية بالبلانكتون
- 2- رسوبات دلتاوية أو قارية غنية محاذية للبحار غنية بالبلانكتون والأجزاء النباتية
- 3- رسوبات قارية غنية بالفحوم
- 4- رسوبات بحيرية وهي نادرة

الخصائص البتروغرافية للصخور الأم

- 1- **البنية الناعمة:** غنية بالفلزات الدقيقة كالفلزات الغضارية التي تسمح من خلال الانطمار السريع للمادة العضوية بحفظها من الفساد.
- 2- **غنية بالمادة العضوية:** حيث أن وجود المادة العضوية المتداخلة مع الفلزات الغضارية تعزز من قدرة الصخر على حفظ الكيروجين.
- 3- **وجود الفلزات الكبريتيدية:** حيث أن التوضع في وسط مرجع غالباً ما يحفز تشكل الفلزات الكبريتيدية كالبيريت، مع انعدام المستحاثات غير البيلاجية (بحرية) وغياب آثار الكائنات الحفارة القاعية.
- 4- **النسيج المتراس:** ذي مسامية أولية منخفضة نسبياً لكنها مهمة لتخزين المادة العضوية. كما أن النفاذية تكون ضعيفة بشكل يمنع الهجرة المبكرة للهيدروكربون المتولد وتساعد في تراكم الهيدروكربون قبل أن يطرد باتجاه الصخر الخازن.
- 5- **اللون القاتم الرمادي أو البني الداكن إلى الأسود:** الصخور الأم على الأغلب صخور غضارية ناعمة البنية وقائمة اللون ومنتظمة ذات مظهر شبيهي (متورق)، كما يمكن أن تكون أيضاً صخوراً كربونانية تبدو مؤلفة من كلس ناعم تتخلله غضاريات. تتوضع في بيئات مرجعة منخفضة الطاقة عموماً.

تركيب الصخور الأم

- تواجد الفلزات الغضارية أساسي وبكميات هامة يؤدي إلى نشوء ضغوط داخلية عالية تؤدي بدورها إلى خلق تشققات صغيرة تساعد على طرد الموائع المتشكلة وبخاصة الفحوم الهيدروجينية منها.
- يمكن أن تكون الصخور الأم كربونانية أو فوسفاتية يتخلل طبقاتها رقائق ناعمة من الغضار، إلا أن هذه الصخور لا تحتوي من المادة العضوية إلا عُشر ما يمكن أن تحتويه الصخور الأم الغضارية، في حين أنها تحتوي على نفس المقدار من الفحوم الهيدروجينية القابلة للاستخلاص، والمادة العضوية هي عادة سابروبيلية وغنية بالليبيدات.
- أما الفحوم والشبيست البتيومي فهي صخور غنية بالمادة العضوية إلا أنها لا تشكل صخوراً أماً في حالات نادرة (شروط خاصة) وذلك بسبب بقاء الفحوم الهيدروجينية المتشكلة فيها محتجزة ضمنها، عدا الميثان الذي يمكن أن يغادرها.



صورة بالمجهر الإلكتروني لـ صخر أم يوضح البنية الورقية للغضاريات التي تتجمع المادة العضوية بين وريقاتها.

تقييم الصخور الأم

تقييم الصخور الأم هو دراسة العلاقة بين الفحم الهيدروجينية القادمة من تلك الصخور (والتي تعتبر المصدر الرئيسي للنفط والغاز) وبين الآثار المتبقية فيها من المادة العضوية بعد توليد الهيدروكربون وهجرته. هذه العلاقة معقدة وصعبة التحديد بدقة بسبب الهجرات التمايزية لأنواع مختلفة من الفحم الهيدروجينية داخل الصخر الأم.

لذلك، من الطرق الشائعة لتقييم نوعية الصخور الأم هو معرفة العلاقة بين كمية المادة العضوية القابلة للاستخلاص (Extractable Organic Matter - EOM) وكمية الفحم العضوي (Organic Carbon - OC) في الصخر. قياس هذه العلاقة يساعد في التمييز بين الصخور التي يمكن أن تكون مصادر جيدة للنفط والغاز، بناءً على مقدار المادة العضوية ونوعيتها ومدى نضوجها الحراري. وذلك على النحو الآتي:

$\frac{EOM}{OC}$	الكلية EOM	جودة الصخور الأم
5 - 10	ppm 1500	صخور أم ذات نوعية جيدة:
2 - 5	ppm 150 - 1500	صخور أم متوسطة الجودة:
0 - 2	ppm 50 - 150	صخور أم رديئة:

علماً أن:

- $\frac{EOM}{OC}$ مرتفعة تقابل عادةً صخور أم كربونائية
- $\frac{EOM}{OC}$ منخفضة تقابل عادةً صخور أم غضارية

بالتالي، العلاقة بين محتوى المادة العضوية القابلة للاستخلاص وكمية الفحم العضوي توفر مؤشراً هاماً لتقييم قدرة الصخر الأم على توليد الهيدروكربون وما إذا كان قد تم طرد جزء منها (الهجرة) أم لا. وهذا يساعد في فهم إمكانيات توليد النفط والغاز في مناطق مختلفة ويُستخدم في تصميم استراتيجيات الاستكشاف الجيولوجي والنفطي.

أنواع صخور الأم من حيث القدرة التوليدية

1. الصخور الأم المحتملة

هي الصخور التي تحتوي علي مواد عضوية بكميات كافية لتوليد الهيدروكربون إذا ما تعرضت للنضج الحراري الكافي.

2. الصخور الأم الفعالة

هي الصخور التي تعرضت لنضج حراري مناسب وأصبحت مولدة للهيدروكربون في الوقت الحاضر.

3. الصخور الأم قليلة الفعالية

هي الصخور التي توقفت عن توليد الهيدروكربون بسبب انخفاض درجة الحرارة نسبة لارتفاعها بسبب التكتونية او فقد جزء كبير من المادة العضوية قبل نضوجها.

4. الصخور الأم المستهلكة

وهي الصخور التي استنفذت قدرتها على انتاج الهيدروكربون لافتقارها للمواد العضوية او وصولها الي مرحلة النضج الحراري المتزايد.

الصخور الخازنة (Reservoir Rocks)

تعريف

الصخور الخازنة والتي هي صخور تحتوي في بنيتها على فراغات على شكل مسامات أو شقوق متصل بعضها ببعض بواسطة أفنية تسمح بانتقال واختزان الموائع ضمنها.

تقسم الصخور الخازنة الى مجموعتين:

- الأولى صخور حطامية تتضمن رمال وصخور رملية
- الثانية صخور خازنة كربونائية كلسية ودولوميتية

بالنظر الى إحصائيات حقول النفط عالمياً فإن الصخور الخازنة الرملية تحتوي على 60 بالمئة من الاحتياطي أما بالنسبة للصخور الكربونائية فتحتوي على 40 بالمئة.

تتشكل الصخور الحطامية الرملية من تجمع العناصر التي خلفها الحث وتتكون بشكل أساسي من فلز الكوارتز، حيث يشكل ثلثي الصخر. أما الصخور الخازنة الكربونائية تدخل فيها بشكل رئيسي "الكربونات" بنسبة لا تقل عن 50 بالمئة وتتصف الصخور الكربونائية بأنها تتألف من انواع مختلفة من الحبيبات قد يغلب عليها أحياناً المستحاثات.

الخصائص البتروفيزيائية للصخور الخازنة

ترتبط هذه الخصائص بالعلاقة المتبادلة بين الصخر والمائع الذي تحتويه وتتحدد بشكل خاص بسطوح تلامس المادة الصخرية والمائع ضمن فراغاتها. وعادةً ما يعبر عن الخصائص البتروفيزيائية للصخور الخازنة بالمسامية والنفوذية. وعلى الرغم من أن المسامية والنفاذية هما الخاصيتان الأكثر شيوعاً عند الحديث عن البتروفيزياء، إلا أن خاصية إضافية وهي خاصية التبلل تصنف ضمن الخصائص البتروفيزيائية أو التفاعلية (Interfacial Properties) التي لا تقل أهمية

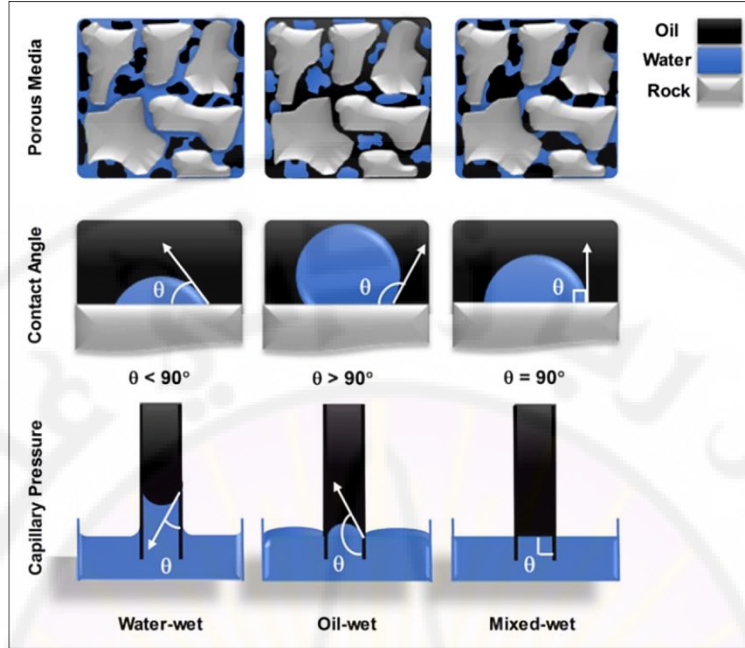
❖ خاصية التبلل

التبلل هو خاصية فيزيائية تحدد كيفية تفاعل سطح الصخر (الصلب) مع السوائل (النفط والماء) الموجودة في المسام. وهو العامل الرئيسي الذي يحدد توزيع الموائع داخل مسام الصخر. ففي الصخور المبللة بالماء (Water-Wet)، يلتصق الماء بسطح المسام، بينما يتواجد النفط في مركز المسام. وفي الصخور المبللة بالنفط (Oil-Wet)، يحدث العكس.

الماء مائع مبلل عموماً للصخر، إلا أنه في حال الصخور الخازنة الكربونائية يمكن للزيت أن يبيلل حواف المسامات حيث تنجذب المركبات القطبية إلى سطوح الفلزات، كما أن الطبقات الرقيقة للمادة العضوية تستطيع أن تبطن حواف المسامات مغيرة بذلك خواص تبلل الصخر.

في حال الغضاريات الغنية بالمادة العضوية يتم ادمصاص المركبات القطبية على سطوح الوريقات الفيليتية وبين السطوح عندما تكون الغضاريات على شكل مونتوريلونيت مثلاً.

بالنتيجة: يمكن للصخور ذات المسامية المرتبطة بفراغات تقل أبعادها عن 50 أنغستروم أن تتبلل بالزيت حيث تعمل المركبات القطبية على تقليل قوى التوتر بين سطوح الماء والزيت وحتى بين الماء والغاز وأن تبلل جدران الفراغات المسامية الحاوية عليها.



خاصية التبلل. في حال الماء مانع مبلل للصخر ($\theta > 90^\circ$) (يسار الشكل)، الزيت مانع مبلل للصخر ($\theta < 90^\circ$) (وسط الشكل)، حالة التبلل المحايد ($\theta = 90^\circ$) (يمين الشكل).

يُستخدم قياس زاوية التماس بين سطح الماء - سطح الفراغ المسامي كمعيار كمي لتحديد درجة التبلل. تُقاس زاوية التماس دائماً عبر الطور المبلل (عادةً الماء) بين السطح الصلب والسطح الفاصل بين السائلين النفط والماء (في حالة الماء مانع مبلل).

حالات التبلل الثلاثة بناءً على زاوية التماس:

1. حالة الماء مبلل (Water-Wet)

- زاوية التماس أقل من 90° درجة.
- في هذه الحالة، تكون قوى التجاذب بين جزيئات الماء والسطح الصلب للصخر أقوى من قوى التجاذب بين جزيئات النفط والسطح. هذا يعني أن الماء هو السائل الذي "يفضل" تبليل الصخر. كلما اقتربت زاوية التماس من الصفر، كان التبلل بالماء كاملاً.
- التوزع في المسام: يلتصق الماء بسطح الصخر، ويشكل طبقة رقيقة تفصل النفط عن السطح الصلب. يتواجد النفط في مركز المسام.
- معظم الصخور الخازنة الرملية (Sandstone) والكربوناتية النظيفة تكون في الأصل مبللة بالماء.

2. حالة النفط مبلل (Oil-Wet)

- زاوية التماس أكبر من 90° درجة.
- في هذه الحالة، تكون قوى التجاذب بين جزيئات النفط والسطح الصلب أقوى من قوى التجاذب بين الماء والسطح. بما أن زاوية التماس تُقاس عبر طور الماء، فإن الزاوية الكبيرة (90° من درجة) تشير إلى أن الماء لا يفضل تبليل السطح، وبالتالي فإن النفط هو السائل المبلل.
- التوزع في المسام: يلتصق النفط بسطح الصخر، ويشكل طبقة رقيقة تفصل الماء عن السطح الصلب. يتواجد الماء في مركز المسام.
- تحدث هذه الحالة عادةً في الصخور الخازنة الكربوناتية التي تحتوي على نفط خام ثقيل أو حامضي، حيث تتفاعل مركبات النفط القطبية مع سطح الصخر.

3. حالة التبلل المحايد (Neutral-Wet or Intermediate-Wet)

- زاوية التماس تكون مساوية لـ 90 درجة
- التوزيع في المسام: لا يفضل أي من السائلين (النفط أو الماء) تبليل السطح بشكل واضح. تتوزع الموائع بشكل متساوٍ تقريباً، وقد تتواجد على شكل كتل أو "بقع" مبللة بالنفط وأخرى مبللة بالماء.
- في هذه الحالة، تكون القوى الشعرية (Capillary Forces) ضعيفة جداً. لا يستطيع أي من السائلين إزاحة الآخر بسهولة عبر القوى الشعرية وحدها. غالباً ما تؤدي هذه الحالة إلى كفاءة إزاحة متوسطة أو غير متوقعة، وتتطلب ضغطاً أكبر لتدفق الموائع.
- المكان ذات التبلل المحايد تُظهر سلوكاً معقداً في النفاذية النسبية.

❖ خاصيتا المسامية والنفاذية والعلاقة بينهما

○ المسامية

المسامية هي خاصية احتواء الصخر على فراغات (مسامات وشقوق).

- **المسامية المطلقة** absolute porosity: هي الحجم المملوء بالمائع (من الصخر) إلى حجم الصخر الكلي.

وتعطى بالعلاقة:

$$\phi = \frac{V_t - V_s}{V_t} = \frac{V_p}{V_t}$$

V_t : الحجم الكلي للصخر

V_s : حجم المادة الصلبة في الصخر

V_p : حجم الفراغات المسامية

- **المسامية الفعالة** Effective porosity فتشمل حجم المسامات المتصلة interconnected pores المشبعة بالماء أو الهيدروكربون القابل للإنتاج.

$$\phi_{\text{Effective}} = \phi_t - (1 - S_w)$$

حيث S_w هي درجة تشبع الصخر بالماء. و $(1 - S_w)$ هي نسبة المسام غير المشبعة بالماء في الصخر والجاهزة للإشباع بالهيدروكربون.

تبلغ قيمة المسامية الفعالة حوالي 20 إلى 25 % من المسامية الكلية أو المطلقة، وقد ترتفع هذه القيمة لتبلغ حوالي 45% مع ازدياد نعومة الحبات التي تعمل على إدخال مفهوم الخاصية الشعرية. ومن الجدير بالذكر أن قيمة المسامية الفعالة ترتبط بشكل وثيق بنعومة الحبات ودرجة تجانس الصخر (الفرز) على النحو الآتي:

- في الصخور ذات التصنيف الجيد (حبيبات متجانسة الحجم ومرتبطة) تزيد المسامية الفعالة مع خشونة الحبات وتقليل احتجاز الموائع.
- في الصخور ذات التصنيف السيء (حبيبات غير متجانسة أو تحتوي على شوائب وسمنتة) قد تقل المسامية الفعالة مع نعومة الحبات، بسبب انسداد الفراغات وقلة اتصالها.
- **المسامية التشققية** (Fracture porosity) تنتج عن وجود تشققات وفواصل في الصخور الخازنة. هذه المسامية تكون عادة ضعيفة القيمة من حيث الحجم مقارنة مع المسامية بين الحبات، لكنها مهمة لأنها تكمل وتحسن الاتصال بين المسامات، مما يعزز النفاذية ويسهم في انتقال الموائع داخل الصخر.

ويمكن تقسيم الصخور بحسب قيم المسامية إلى الأنواع التالية:

- أ. رديئة ذات مسامية أقل من 5%
- ب. فقيرة ذات مسامية بين 5 و 10%
- ت. جيدة ذات مسامية بين 10 و 20 %
- ث. جيدة جداً ذات مسامية تفوق الـ 20 %.

نورد فيما يلي المجالات التي تتراوح ضمنها مسامية الأنواع المختلفة من الصخور:

- أ. الرملية وتتراوح مساميتها من 10 – 40 % وتتوقف على طبيعة الملاط وحالة تماسكه.
- ب. الكلسية والدولوميتية من 5 – 25%.
- ت. الغضارية من 20 – 45 % وتعتمد على المنشأ والعمق.

يمكن تقسيم المسامية من حيث مبدأ تشكلها إلى قسمين: مسامية أولية ومسامية ثانوية.

- **المسامية الأولية أو الأصلية:** original or primary porosity، هي التي تتكون خلال عملية الترسيب، وقبل أن تؤثر عليها عمليات الدياجينيز، وهذه المسامية تقل مع عمق الطمر أو الدفن بسبب زيادة حمولة الصخور (overburden pressure).

في الصخور الرسوبية تكون أعلى قيمة للمسامية الأولية هي 40 % و أقل قيمة هي صفر .

وتتعرض المسامية الأولية إلى تغيير و تحول خلال تكوينها أثناء الترسيب ومن هذه العمليات:

- أ. التراص Compaction
- ب. التملط cementation
- ت. الانحلال solution
- ث. إعادة التبلور recrystallization
- ج. الاستبدال replacement
- ح. التشققات fracturing

عمليات الانحلال و الاستبدال و التشقق قد تؤدي الى زيادة المسامية حيث يتكون ما يعرف بالمسامية الثانوية secondary porosity

إن صفات الوسط المسامي تتأثر بالدرجة الأولى بأبعاد القنوات المسامية. وبناءً على ذلك يمكن تقسيم الأوساط المسامية إلى ثلاثة مجموعات:

- أ. فوق شعيرية أبعادها أكبر من 0.5 مم: تستطيع القنوات والمسامات الكبيرة (فوق الشعيرية) أن تسمح بمرور النفط والماء والغاز من خلالها بحرية أكبر من القنوات الشعيرية التي تؤثر عليها القوى الشعيرية أثناء حركة الموائع الطبقية.
- ب. شعيرية أبعادها من 0.5 إلى 0.0002 مم (0.2 ميكرون): تسمح بحركة الموائع عبرها لكن بشكل أقل فعالية من المسامية فوق الشعيرية.
- ت. تحت شعيرية أبعادها أقل من 0.0002 مم (0.2 ميكرون): القنوات تحت الشعيرية فنتيجة لقوى الشد التي تؤثر على حركة الموائع ضمنها من قبل جدران القنوات المسامية ذات المقاسات الصغيرة وعلى الرغم من أن مساميتها جيدة فيمكننا اعتبارها عملياً غير نفوذة أو ذات نفوذية ضعيفة جداً وتعتبر الصخور الغضارية مثلاً على ذلك.

وبشكل عام فإن المكامن النفطية الجيدة تتكون من صخور ذات قنوات شعيرية وفوق شعيرية.

- **المسامية الثانوية:** هي المسامية التي تنشأ من خلال عمليات التبدل اللاحق التي يخضع لها الصخر مثل عمليات الدلمطة، والانحلال والتشقق. حيث قد تعاني الصخور المتوضعة على أعماق كبيرة (تتجاوز 1000م) من تحولات منيرالوجية وكيميائية كالدلمطة وانحلال الفوسفات ما يؤدي لارتفاع مساميته. كذا فان حوادث التشقق الهيدروليكي (بتأثير ضغط الموائع) يمكن ان تحسن الخصائص الخزنية. في الصخور الرملية مثلاً فان المسامية الثانوية هي نتاج انحلال الفلدسبات او الكربونات وقد تتحسن المسامية نتيجة ذلك لحدود بنسب تصل الى 7 – 8%.

○ النفوذية

- **النفوذية المطلقة:** قابلية الصخر بالسماح للموائع بالمرور من خلاله بحيث يكون هذ الصخر مشبع 100 % بالمائع و هذه النفوذية تعرف بالنفوذية المطلقة و تقاس بوحدة الدارسي .

$$Q = k \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{s}{h} (p_1 - p_2)$$

Q: تدفق المائع في الصخر سم³/ثا.

s: المقطع الصخري سم²

$p_1 - p_2$: الفرق في الضغط بين مدخل العينة ومخرجها

μ : لزوجة المائع (سنتبواز)

k: النفوذية (دارسي أو ميلي دارسي)

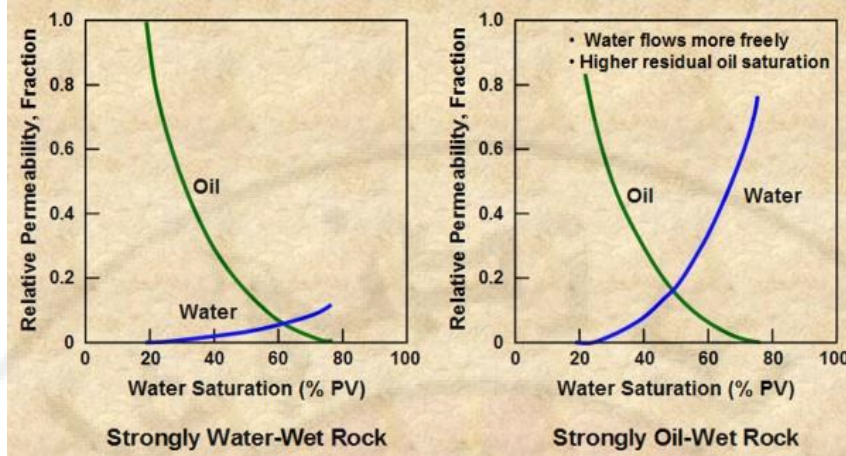
h: طول الوسط المسامي

أما اذا لم تكن الطبقة مشبعة 100 % بالمائع او كان هناك موائع مصاحبة (نفط , غاز , ماء) فان النفوذية المقاسة تكون النفوذية الفعالة:

- **النفوذية الفعالة K_e :** هي قابلية الصخر بالسماح للمائع بالمرور من خلاله بوجود موائع أخرى و بذلك تكون قيمة النفوذية الفعالة محصورة بين الصفر و الـ 100 % .

- و اما **النفوذية النسبية $K_r = \frac{K_e}{K}$** فهي نسبة النفوذية الفعالة الى المطلقة و بذلك تكون قيمتها محصورة بين الصفر و قيمة النفوذية المطلقة . وترتبط بدرجة تشبع الصخر بهذا المائع، و هي تعبر عن نسبة انتقال مائع ما بالنسبة لمائع آخر.

مع التأكيد على أن ذلك يرتبط أيضاً بخاصية التبلل، ففي حال كان الماء مبللاً للصخر، فإن النفوذية النسبية للماء سوف تزداد بزيادة الإشباع المائي إلا أنها ليست بتلك الزيادة التي سوف تبديها كما لو كان الزيت هو المائع المبلل للصخر. ففي حالة ماء-زيت في الصخر، والماء مائع مبلل للصخر، تكون النفوذية النسبية للزيت أعظمية وقريبة من الواحد عندما تكون درجة تشبع الصخر بالزيت مرتفعة (70-80%)، وبالعكس فهي صغرى عندما تكون درجة تشبع الصخر بالزيت قليلة جداً وفي هذه الحالة تكون النفوذية النسبية للماء أعظمية.



العلاقة بين النفوذية النسبية والإشباع. في حال الماء مائع مبل، والإشباع العالي بالزيت تكون النفوذية النسبية للزيت مرتفعة (يسار الشكل)، وفي حال الزيت مائع مبل، تزداد النفوذية النسبية للماء على حساب النفوذية النسبية للزيت بزيادة الإشباع المائي (يمين الشكل).

عوامل مؤثرة في النفوذية

- تتناسب النفوذية طرداً مع أقطار الحبات.
- تتناسب النفوذية طرداً مع درجة التصنيف الحبي.
- تتناقص النفوذية عموماً بشكل بطيء تحت تأثير جريان الموائع بسبب تحطم بعض مكونات الصخر (كالغضار) والتي تقوم بإغلاق أجزاء من الفراغات الدقيقة.
- تخضع النفوذية عموماً لمفاهيم الجريان ثنائية الطور نظراً لأن الصخور الحاملة للنفط تحتوي بشكل عام على مائعين أو ثلاثة (ماء، زيت، غاز).
- عند اختراق مائعان لصخر فإن تدفق أحدهما يختلف عن الآخر وبالتالي هنا يبرز مفهوم النفوذية الفعالة. وإن النفوذية الفعالة لمائع إذاً تعبر عن قدرة الصخر على إمرار هذا المائع بتواجد مائع واحد أو عدة موائع.
- تكون النفوذية لكل مائع في الجريان ثنائي الطور أقل من النفوذية المطلقة.

نمیز نوعين من النفوذية بحسب الاتجاه في الصخر:

- نفوذية أفقية: تعبر عن جريان الموائع بشكل موازي للتطبيق.
- نفوذية عمودية: تعبر عن جريان الموائع بشكل عمودي على مستوى التطبيق.

تكون النفوذية العمودية عموماً أقل من الأفقية بسبب الفلزات الصفائحية (غضار، ميكال...) لتوضعها بشكل مواز للتطبيق.

العلاقة بين المسامية والنفوذية

1. ليس من علاقة خطية بين النفوذية والمسامية فالصخور الكلسية المشققة على سبيل المثال لها مسامية ضعيفة ونفوذية كبيرة وبالعكس فإن الغضار الذي يتصف بمسامية كبيرة يعتبر تقريباً غير نفوذ للسوائل والغازات حيث أن القنوات المسامية لهذا الصخر ذات مقاييس تحت شعيرية. ولكن يمكن القول عموماً أن الصخور ذات المسامية الكبيرة يجب أن يكون لها نفوذية كبيرة أيضاً.
2. تعتمد نفوذية الصخر على المسامية الفعالة فكلما زادت المسامية الفعالة كلما زادت النفوذية.
3. تزداد المسامية الفعالة مع زيادة حجم الحبيبات في الصخور الرملية ذات التصنيف الجيد (الفرز الجيد) well sorted grain packing. أي تتناسب النفوذية طرداً مع مربع قطر الحبات d ودرجة التصنيف الحبي كما تظهر العلاقة التالية:

$$K = b.d^2.e^{-a}.6$$

d: أقطار الحبات
a و b و c: ثوابت
δ: درجة التصنيف الحبي

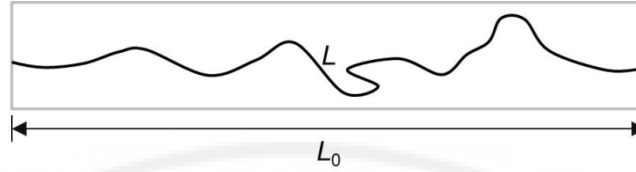
4. إن زيادة النفوذية مع زيادة المسامية الفعالة ليس دائم، و إن هذه العلاقة ليست دائما صحيحة حيث من الممكن ان يقل حجم الحبيبات و تبقى المسامية ثابتة و لكن النفوذية تقل.
5. من العوامل المؤثرة في النفوذية أيضاً معامل التعرج coefficient of tortuosity ، فقيمة هذا المعامل تساوي واحد اذا كانت مسارات المائع داخل الوسط المسامي مستقيمة ، و هذا يعني ان النفوذية تكون عالية، و تقل النفوذية بزيادة قيمة هذا المعامل (أي بزيادة تعرج مسار المائع داخل الوسط لمسامي).
6. في الصخور المكنية الكلسية تكون العلاقة بين المسامية الفعالة و النفوذية متغيرة جدا و لا تعتمد على نوع و درجة التصنيف. قد نجد صخر له مسامية قليلة و لكن حجم المسامات المتصلة كبير و لهذا السبب فان نفاذيته عالية .

على سبيل المثال، فان **العوامل** التي تؤثر على نفاذية الطبقة الخازنة الكلسية على وجهة التحديد هي:

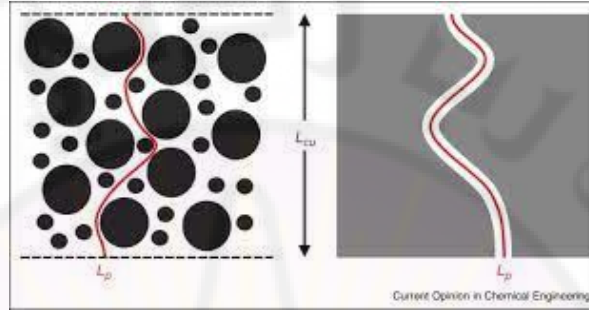
1. صفات المسامات و شكل القنوات و المسارات فيما اذا كانت مستقيمة او متعرجة
2. معدل حجم المسامات.
3. المسامية الفعالة.
4. شكل المسامات.
5. درجة التملط (السمتة) و نوعه.
6. وجود الشقوق و مقدارها.

العلاقة مع عامل التعرج؟ coefficient of tortuosity

هو مقياس يعبر عن مدى التعرج أو تعقيد مسار مرور الموائع داخل مسامات الصخور. يُعرف بأنه نسبة طول المسار الحقيقي الذي يقطعه السائل داخل المسامات (الطريق المتعرج) إلى الطول المستقيم بين نقطتين في الصخر (المسار المباشر). بمعنى آخر، إذا كان السائل يمر عبر مسارات متعرجة داخل الصخر، فإن معامل التعرج يكون أكبر من واحد، حيث يعني كلما زاد التعرج ازدادت صعوبة مرور الموائع. أي أنه من العوامل المؤثرة في النفوذية، فقيمة هذا المعامل تساوي واحد اذا كانت مسارات المائع داخل الوسط المسامي مستقيمة، و هذا يعني ان النفوذية تكون عالية، و تقل النفوذية بزيادة قيمة هذا المعامل (أي بزيادة تعرج مسار المائع داخل الوسط المسامي). بالنتيجة، يتناسب معامل التعرج عكساً مع النفوذية في الصخر.



$$\text{Tortuosity} = L/L_0$$

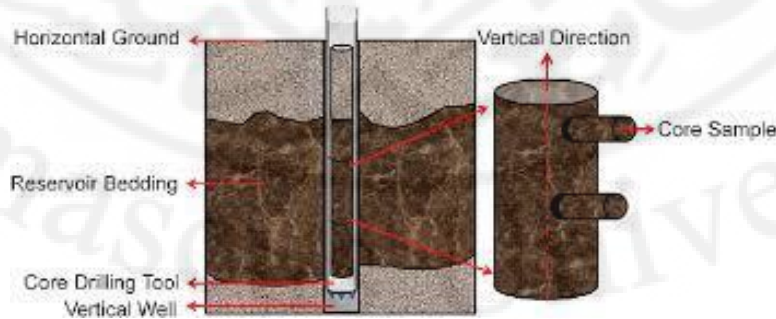


معامل التعرج والعلاقة بين طول المسار المتعرج L وبين الطول لو كان مباشراً L_0 .

قياس المسامية والنفاذية

الطرق المباشرة

- تتم مخبرياً على عينات اسطوانية (plugs) من مواقع مختارة من الصخر.
- يقاس الحجم الكلي للصخر V_t وحجم المادة الصلبة V_s بغمر العينة في الزئبق أو سوائل أخرى تحت الضغط الجوي العادي . حيث لا يخترق الزئبق المسامات مما يمكن حساب المسامية بالمقارنة بين الأحجام.
- ولمعرفة المسامية الفعالة يتم حساب الحجم الفعال بحقن الصخر بالغاز أو بسوائل معينة. قدرة على النفاذ عبر المسامات المتصلة في العينة، وهذا يعكس المسامية التي يمكن أن تساهم في انتقال الموائع.
- يمكن أيضاً حساب المسامية المجهرية بدراسة الشرائح المجهرية بعد حقنها بملونات خاصة تكشف المسامات.
- تحسب النفاذية من قانون دارسي. حيث يتم قياس كمية المائع الذي يمر تحت ضغط معين عبر العينة، وهذا يعطي قيمة النفاذية التي تعبر عن قدرة الصخر على السماح بمرور الموائع.
- قياس المسامية والنفاذية للعينات مخبرياً يتم على عدد كبير من العينات ويؤخذ وسطي القيم المقاسة وذلك لأن الخواص قد تختلف داخل نفس الطبقة أو بين عينات متجاورة.



قياس المسامية بشكل مباشر بأخذ اللباب وانتقاء عينات اسطوانية منه plugs لاجراء الاختبارات عليها.

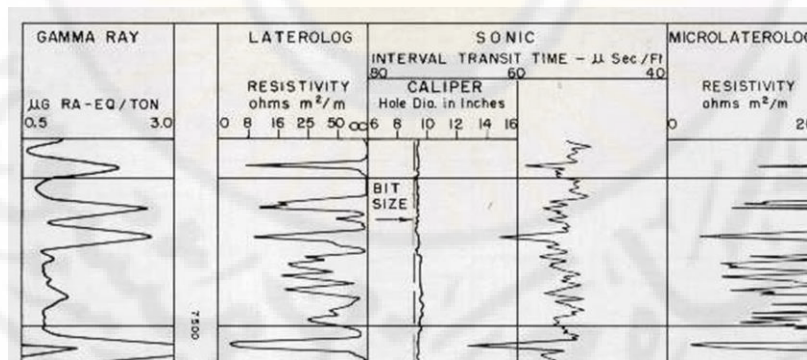
الطرق غير المباشرة

لا تعطي الطريقة المباشرة القيم التي يعطيها نفس الصخر بتواجده على أعماق متعددة كما هو الحال في الواقع الفعلي. حيث يحتوي الصخر المتناسك في المكان على مسامية عالية ونفوذية جيدة تعود إلى الشقوق والكهوف والفجوات الصغيرة ولا يمكن قياسها بالطرق المخبرية المعروفة. حيث قد تطرأ تغيرات على الحالة الفيزيائية والكيميائية للصخر خلال الاستخراج والتجهيز وفقدان بعض الفواصل أو الشقوق المفتوحة التي تساهم في النفوذية الحقيقية. أي أن الحجم الفعلي للمسام والقيم الأدق للنفوذية في العمق الفعلي الذي تتواجد فيه تلك الصخور ستتغير بعد استخراجها وبفحصها مخبرياً.

يتم اللجوء إلى طرق غير مباشرة تعتمد على التفسيرات الكمية للقياسات الجيوفيزيائية البئرية التي تعطي بشكل مباشر أو غير مباشر مسامية الصخر ونفذيته. حيث يمكن من خلال القياسات الجيوفيزيائية البئرية الحصول على معطيات بشأن الخصائص البتروفيزيائية للصخر المدروس، على النحو الآتي:

- قياس النشاط الإشعاعي الطبيعي (Natural Gamma Ray log): يستخدم لتمييز الصخور الحاوية على عناصر مشعة (كالغضار والصخور الغنية باليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم) من الصخور الحاملة للهيدروكربون، مما يساعد في تحديد الطبقات الصخرية المناسبة للخرن.
- منحنيات المقاومة Microlog – Microlaterolog: والتي تستخدم لقياس مقاومة التشكيلات المختلفة في الصخر، مما يساعد في تمييز الصخور الحاملة للهيدروكربون عن الصخور غير المشبعة.
- قياس النيوترون neutron porosity: الذي يركز على حساب كمية الهيدروجين في الصخر، حيث يعبر هذا القياس عن درجة تشبع الصخر بالماء أو النفط أو كليهما، مما يمكن من تحديد نسبة المسامية الفعالة وحجم السوائل المحتجزة.
- قياس الكثافة gamma – gamma وسرعة انتشار الأمواج الصوتية sonic: وهما يعطيان معلومات دقيقة عن طبيعة اللبولوجيا، مثل تماسك ووزن الصخر، وأنواع الفلزات المكونة له.
- قياسات درجة الحرارة البئرية: تعطي معلومات عن التدرج الحراري، وتساعد في تحديد مصادر الحرارة، ومناطق دخول المياه أو فقدان سوائل الحفر، بالإضافة إلى مراقبة فعالية السيمنت خلف الإكساء.

تعطي هذه الطرق قيم مستمرة وموثوقة لحجم كبير من الصخر حول فتحة البئر وضمن الشروط المكنية الطبيعية و تمتاز بقلّة تكاليفها مقارنة بالطرق الأخرى، مما يجعلها أدوات فاعلة وأساسية في دراسة وتحليل المكامن النفطية



السجلات البئرية والخصائص البتروفيزيائية للصخر

الملاحظات الحقلية وتفسيرها قبل البدء بإجراء القياسات بالطرق المباشرة

يقوم الجيولوجيون في الحقل بمحاولة تدوين فكرة أولية عن مسامية الصخر ونفذيته قبل البدء بالقياسات المخبرية أو القياسات الجيوفيزيائية البئرية. حيث يتم تقدير الخصائص بشكل تقريبي اعتماداً على عدة ممارسات وأعمال حقلية، تتمثل بتفحص نواتج الحفر واللباب الصخري بالمجهر لتحديد النسيج الصخري وطبيعته وأبعاد وكثافة الفراغات. حيث تعطي هذه الملاحظات تصوراً مبدئياً عن التركيب الداخلي للصخر. بعدها تتم مقارنة المعطيات التي تم الحصول عليها بجداول مقارنة معيارية لاستنتاج فكرة مبدئية عن الخصائص الخزنوية للصخور المخترقة.

وتتلخص أهم الملاحظات الحقلية التي يقوم بها الجيولوجي في تقدير احتمال وجود تشكيلات خازنة كمايلي:

1. سرعة تقدم الحفر بشكل مفاجئ: تدل على اختراق تشكيلات ضعيفة التماسك أو مسامية.
2. فقدان سائل الحفر (الطفلة أو طينة الحفر): يدل على اختراق طبقات عالية النفوذية وذات ضغوط أقل من الضغوط المطبقة على سائل الحفر.
3. اختلاف درجة ملوحة سائل الحفر: يدل على تسرب مياه عذبة أو مالحة من تشكيلات ذات نفوذية عالية.
4. عدم القدرة على الحصول على كامل اللبابات الصخرية: يعني أن التشكيلة المخترقة غير متجانسة أو مشققة، ما يؤدي إلى ضياع جزء منها أثناء عملية الاستخراج.
5. ملاحظة تغير لون الطين أو اللباب الصخري، مما قد يدل على وجود تأكسد أو إرجاع، وهو ما يعكس حالة التشبع أو تركيبة السوائل داخل الفراغات.
6. رصد وجود الشقوق والكسور داخل اللباب الصخري، حيث تشير الشقوق المفتوحة إلى إمكانية نفاذية مرتفعة، بينما الشقوق المسدودة بفلزات ما قد تخفض النفاذية.
7. تسجيل أصوات أو اهتزازات خلال الحفر، كالصوت الحاد أو التغيرات المفاجئة في مقاومة الحفر، والتي تدل على تغيرات مفاجئة في صلابة أو تركيب الطبقات.

تضيف هذه الملاحظات الحقلية معلومات نوعية مهمة قبل بدء القياسات المخبرية أو الجيوفيزيائية البئرية، حيث تساعد في توجيه الدراسة وتحليل النتائج بشكل أدق. كما تعتمد هذه التقديرات المبدئية على فهم جيد لخصائص المسامية، والنفاذية، والليتولوجيا للصخور، التي تؤثر على قدرات التشكيلة على حجز ونقل الهيدروكربون.

تصنيف الصخور الخازنة

التصنيف اعتماداً على نوعية الصخور ومواصفاتها البتروفيزيائية:

تقسم الصخور الخازنة اعتماداً على نوعية الصخور الخازنة ومواصفاتها البتروفيزيائية إلى:

- الصخور الخازنة الرملية
- الصخور الخازنة الكربونائية
- الصخور الخازنة المشققة

الصخور الخازنة الرملية (Sandstone Reservoirs)

الصخور الخازنة هي صخور ذات مسامية ونفاذية كافية تسمح للزيت والغاز بالتراكم والاستخراج بكميات اقتصادية. تتشكل بشكل عام من الكوارتز إلا أنها يمكن أن تحتوي على نوعيات أخرى من الفلزات التي يؤثر وجودها على جودة الخزانات النفطية والتي ينظر إليها عموماً على أنها صخور ذات مسامية ونفوذية مرتفعتين.

إن الصفات الخزنانية لهذه الصخور تضعف كلما زادت نسبة الحبيبات مختلفة المقاييس وكلما زادت نسبة السمنتة وكذلك كلما زادت نسبة الفلزات سهلة التفكك والتشوه وبالتالي تتأثر جودة الصخور الرملية المترسبة بدايةً في أحواض الترسيب بشكل مباشر أو غير مباشر بالمناطق المصدرية التي تورد نوعيات معينة من الرمال وكذلك ببيئات الترسيب وعمليات الترسيب ومن ثم بالعمليات الدياجينيزية اللاحقة. من جهة أخرى فإن معظم أجسام الأحجار الرملية تتميز بأنها محدودة المقاييس حيث تقل مساحتها غالباً عن 250 كم² كما لا تزيد سماكتها في معظم الأحيان عن 25 م وتكون بأشكال عدسية أو خطية تنقص ثخانتها نحو الأطراف.

تصنيف الخزانات الرملية

يمكن للصخور الرملية أن تصنف إلى أنواع مختلفة تختلف بحسب الهدف من التصنيف لكننا سنتطرق بالعلاقة مع الأهمية البترولية إلى النوعين التاليين من التصنيف:

1) التصنيف اعتماداً على التركيب الفلزي

تقسم خزانات الصخور الرملية اعتماداً على تركيبها إلى 3 أنواع رئيسية:

1. خزانات يسيطر فيها الكوارتز بشكل كامل تقريباً، وهو من أفضل الخزانات الرملية وتحسن صفاته الخزنانية كلما زادت خشونة الحبات وهو يسيطر في الأجزاء الداخلية من جذور القارات cratons وكذلك في الحواف القارية الهادئة تكتونياً وغيرها.
2. خزانات رملية تحتوي على كميات هامة من الفلسبار غير المجوى، تأتي رمال هذه الخزانات من صخور قاعدة غرانيتية أو غنايسية حديثة النهوض ومن صخور مندسة في الأحواض الداخلية والتي تخضع لحت سريع ونقل بطيء. هذا النوع أقل جودة من النوع السابق وذلك لأن الفلسبار يتفكك بسهولة ليتحول إلى فلزات طينية (غضارية).
3. خزانات تتكون من صخور تحتوي على كسارات صخرية متنوعة أو أرضية طينية، يمكن لهذه الصخور أن تأتي من مصادر مختلفة مثل مناطق الأقواس المغماتية والرمل ذات سرعة الترسيب المرتفعة في تيارات العكر وتلك المختلطة بالرماد البركاني. وهذا النوع من أقل أنواع الخزانات الرملية جودةً وذلك لأنه يحتوي على حبيبات وكسارات مختلفة المقاييس كما يمكن للطين أو الغضار أن يتشوه بسهولة تحت تأثير التراص.

2) التصنيف اعتماداً على بيئة الترسيب

تقسم الخزانات الرملية اعتماداً على بيئة الترسيب إلى الأنواع التالية:

1. خزانات الصخور الرملية رحيّة المنشأ

خزانات الصخور الرملية رحيّة المنشأ هي خزانات صخرية تشكلت من ترسيب حبيبات رملية نقلتها الرياح، مثل الكثبان الرملية والصفائح الرملية التي تتراكم في بيئات صحراوية وجافة. تتميز هذه الخزانات بوجود حبيبات رملية عادة ناعمة إلى متوسطة الحجم، تكون منتظمة أو موجهة، ومستوى نضجها عالي بسبب النقل الجوي الطويل الذي يزيل الأرضية الطينية ويزيد من تراص الحبيبات، مما يعزز المسامية والنفاذية فيها.

يتميز هذا النوع:

- مسامية ونفاذية عالية نسبياً تسمح بتخزين وحركة النفط والغاز.
- تصنيف أو فرز جيد جداً
- نقاء فلزي وغالباً غنية بالكوارتز الذي يتحمل التجوية جيداً.
- بنية طبقية منتظمة واضحة بحسب اتجاه الترسيب الريحي.

من مساوئ هذه الخزانات:

- أن المصادر الهيدروكربونية اللازمة لتحويلها إلى خزانات بترولية أقل توفراً من أنواع الخزانات الرملية الأخرى.
- قد تعاني من تداخل بين الطبقات بسبب التغيرات الموسمية في الرياح وتأخذ بنية التطبيق المتصالب (Cross-bedding)، مما يؤدي إلى تعقيد توزيع النفط داخل الخزان.
- كما أن عمليات الدياجينيز اللاحقة يمكن أن تتعقد عندما تغطي هذه الصخور بصخور المتبخرات أو تتناوب معها.
- التصلب أو السمنتة بين الحبيبات قد يخفض النفاذية. وكثيراً ما يكون الملاط من المتبخرات أو الدولوميت أو الغضاريات.



توضعات رحيّة المنشأ والتطبيق المتصالب (Cross-bedding).

2. خزانات الصخور الرملية النهرية:

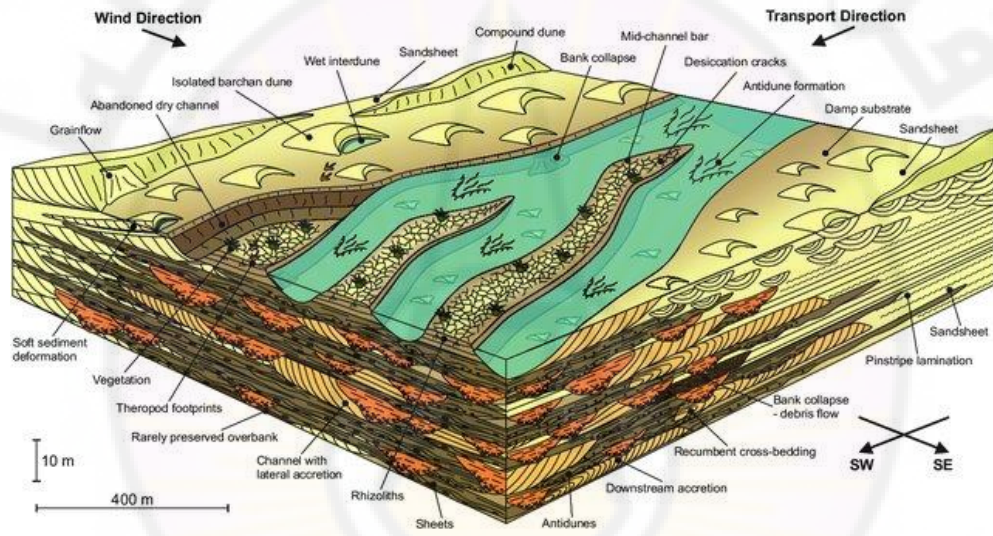
خزانات الصخور الرملية النهرية هي خزانات صخرية تتكون من ترسيب رمال نهرية نتيجة تدفق المياه في الأنهار والجداول، حيث تترسب الحبيبات الرملية ضمن أسرة نهرية وأحواض ترسيبية نهرية وتراكمت سفحية. توجد صخور هذا النوع من الخزانات في التتابعات غير البحرية، ويأخذ الشكل العام لجسم الخزان الرمي النهرية شكل أودية متعرجة قليلة العرض وطويلة ذات قاعدة منحنية وسطح علوي مستوي ونهايات جانبية مفاجئة وتكون متغايرة طبقياً، وتفصل هذه الأودية مساحات واسعة مكونة من طبقات رقيقة من الغرين والشيل والفحوم. تتصف هذه الخزانات بتوزيع غير منتظم للحبات بسبب تغير سرعة التيار النهرية والظروف البنية المتعددة التي تؤثر على التشكل، مما ينتج عنه تشكيل طبقات ذات درجات سمنتة مختلفة.

الخصائص البتروفيزيائية لخزانات الصخور الرملية النهرية تكون جيدة بشكل عام لكن أقل انتظاماً مقارنة بالخزانات الريفية، حيث:

- تتماز بمسامية ونفاذية متوسطة إلى عالية، لكنها تتفاوت بسبب الطبقة المتغيرة والتداخل بين الطبقات.

مساوي هذه الخزانات:

- وجود فوارق في حجم الحبيبات والملاط قد يسبب تقليل النفاذية في بعض الطبقات.
- التعقيد الطبقي وحجم الحبيبات المتفاوت يقلل من انتظام توزع النفط أو الغاز ويصعب التنبؤ بسلوك الخزان.
- وجود طبقات طينية واردة قد يخفض النفاذية ويعيق تدفق السوائل.
- قد تحدث تآكلات أو تغيرات في التشكيلة تؤثر على استقرار الخزان.



تشكل الخزانات الرملية النهرية.

3. الخزانات الرملية الدلتاوية

خزانات الصخور الرملية الدلتاوية هي صخور رسوبية تتشكل في البيئات الدلتاوية حيث تلتقي الأنهار بالمسطحات المائية الكبرى مثل البحار أو البحيرات، وتتراكم الرواسب الرملية هناك بفعل التيارات النهرية والبحرية معاً. تحتوي توضعات الرسوبات الدلتاوية على كثير من الحقول النفطية والغازية المعروفة، ويعود ذلك إلى أن هذه الدلتات تتوضع بين الرسوبات البحرية حيث توجد الصخور الأم والرسوبيات القارية التي تعتبر مصدراً جيداً للصخور الخزانية.

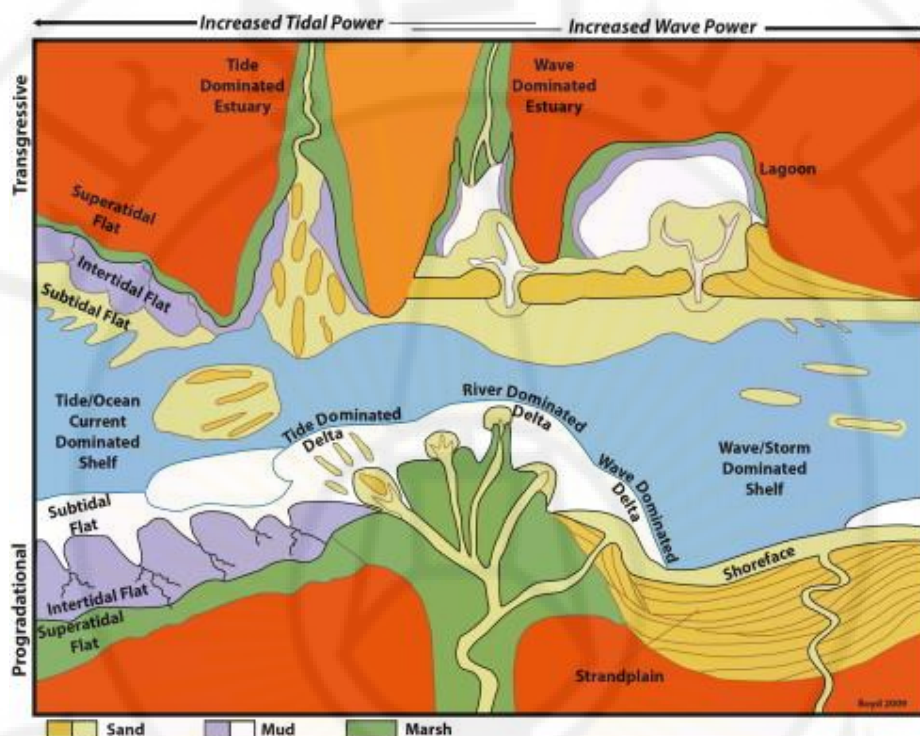
أشكال هذه الخزانات تتميز بتوزيع طبقي غير منتظم وطبقات متداخلة من الرمال والطمي، حيث تميل الرواسب الرملية في الدلتا إلى تكوين أكوام أو شعاب ذات طبقات مائلة مختلفة الاتجاهات حسب الحركات المائية التي تشكل الدلتا. هذا التداخل يؤدي إلى كثافة متغيرة في الحبيبات ومسامية متفاوتة.

الخصائص البتروفيزيائية لهذه الخزانات:

- تمتلك عادة مسامية متوسطة إلى عالية، لكنها قد تكون أقل انتظاماً بسبب التداخل الطبقي ووجود رواسب طينية بين الطبقات الرملية.
- النفاذية جيدة لكنها عرضة للتناقص بفعل وجود الطمي والأرضية الطينية.
- قابلة لتخزين كميات كبيرة من السوائل بسبب التنوع في حجم الحبيبات والتركيب الطبقي.

مساوئ خزانات الصخور الرملية الدلتاوية:

- التعقيد الطبقي العالي بسبب التداخل بين الرواسب الرملية والطمي الذي قد يعرقل حركة النفط ويقلل من سهولة استخراجه.
- وجود طبقات طينية قد يؤدي إلى مشكلات في النفاذية ويؤثر سلباً على إنتاج الخزان.
- التغيرات في توزيع الحبات تجعل توقع السلوك البتروفيزيائي للخزان أكثر صعوبة مقارنة بالخزانات الريفية والنهرية.



الدلتا وتشكل الخزانات الرملية الدلتاوية.

4. الخزانات الرملية المترسبة في المياه العميقة

تتشكل في المياه الأعمق من 200م وهي تترافق عموماً مع صخور الشيل الحاوية على مستحاثات بيئات عميقة وغيرها من التوضعات التي تدل على ترسيب في أعماق كبيرة تحت قاعدة الموج. تمتد بيئات توضع هذه الخزانات من المنحدر القاري وحتى الأعماق السحيقة. تتكون الرسوبات فيها غالباً من رمال منقولة نقلتها تيارات مثل (تيارات العكر). تتنوع قيم المسامية والنفاذية فيها بين قيم متدنية جداً في بعض الحالات ويمكن أن تصل في حالات أخرى إلى 32% للمسامية و1.5 دارسي للنفاذية.

أشكال هذه الخزانات عادةً ما تكون على شكل مراوح أو رواسب متموجة ذات تدرج حبيبي من الكبير إلى الصغير (graded bedding)، مع طبقات متراكبة تتحكم فيها ديناميكيات التيارات البحرية العميقة. تكون الطبقات ناعمة في بعض الأماكن ومتوسطة الحبيبات في أخرى بسبب تأثير عمليات النقل والترسيب المختلفة.

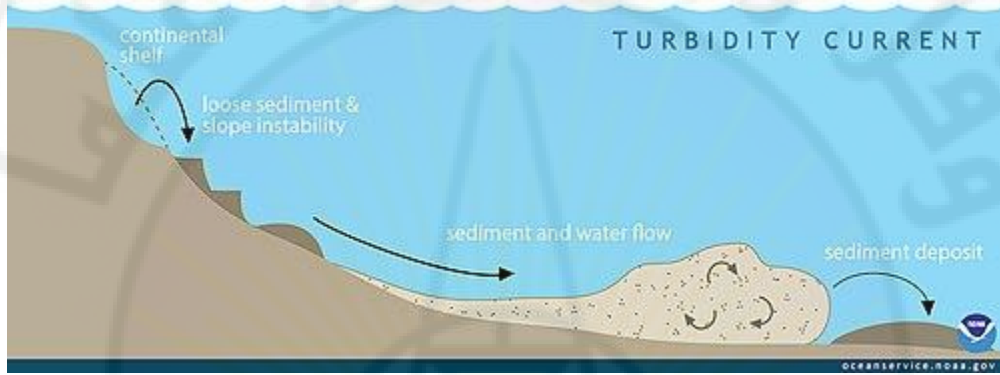
الخصائص البتروفيزيائية لهذه الخزانات:

- تمتاز بمسامية ونفاذية متوسطة وغالباً ما تكون أقل من الخزانات السطحية (النهرية أو الدلتاوية) بسبب ارتفاع نسبة الطمي والأرضية الطينية المترسبة مع الرمال.
- النفاذية قد تتأثر بشكل كبير بسبب الترسيب البطيء وتماسك الأرضية.

- رغم ذلك، يمكن أن تكون هذه الخزانات مهمة لتخزين النفط والغاز خاصة إذا احتوت على طبقات رملية نقية أو متوسطة التراص.

مساوئ هذه الخزانات:

- التعقيد العالي في التكوين الطبقي بسبب التداخل بين الرواسب المختلفة، مما يعقد تقدير حجم الخزان واستغلاله.
- انخفاض النفاذية في بعض الطبقات يمنع الحركة الحرة للهيدروكربون.
- حساسيتها للتملأ أو السمنت بين الحبيبات التي تقلل خواص الخزن والنفاذية.
- صعوبة الوصول إليها واستكشافها بسبب عمق الترسيب.



الرسوبات الرملية العميقة وتيارات العكر.

5. الصخور الخزانية الرملية في البيئات المركبة

تتميز بيئات الترسيب الرملية المائية السابقة بأنها وثيقة الصلة ببعضها فيمكن للبيئة النهرية أن تتدرج نحو الأسفل إلى بيئة دلتاوية وتتدرج الأخيرة جانبياً إلى شاطئية وتتدرج الرسوبات في النظام الشاطئي في الرمال المستمرة في الألفية عبر المنحدر القاري إلى المراوح البحرية العميقة. ويمكن تعريف الصخور الخزانية الرملية في البيئات المركبة أنها صخور رسوبية تتشكل في بيئات ترسيبية معقدة تحتوي على مزيج من العمليات الترسيبية المختلفة مثل النهرية، الدلتاوية، والبحرية العميقة. تتسم هذه الخزانات بتركيب طبقي متداخل يجمع بين خصائص الرسوبات الرملية الناشئة من أكثر من بيئة ترسيبية في آن واحد، مما يؤدي إلى تنوع كبير في توزيع الحبات، المسامية، والنفاذية. إن أكبر الخزانات الرملية النفطية هي عبارة عن خزانات مركبة من كل أو بعض هذه النماذج من البيئات الرملية.

خصائص الصخور الخزانية الرملية في البيئات المركبة:

- تنشأ من تراكم الرمال في بيئات تختلف فيها قوى النقل والترسيب (تيارات نهريّة، تيارات بحرية، رياح، تيارات عكر)، مما ينتج عنه طبقات ذات حبيبات متفاوتة الأحجام وبنية معقدة.
- تتميز بمسامية ونفاذية متباينة تعتمد على مدى تداخل الرواسب الطينية والطيني مع الرمال.
- تحتوي على مزيج من الأشكال الطباقية التي قد تشمل طبقات رملية مائلة، طبقات متدرجة الحبيبات، ومدمجة جزئياً بطبقات طينية.

مميزات هذه الخزانات:

- يمكن أن تخزن كميات كبيرة من النفط والغاز بسبب توافر مسامية معقولة ونفاذية تسمح بحركة الموائع.
- تتمتع بتنوع جيولوجي يزيد فرص وجود مكامن متنوعة ومتصلة في الخزان.
- تجمع خصائص بيئات عدة مما يعزز من احتمالات تواجد احتياطي نفطية كبيرة.

مساوئها:

- تعقيد التوزيع الطبقي والحبيبي يجعل تقييم حجم النفط والغاز وكفاءة الاستثمار أكثر تحدياً.
- ضعف النفاذية في الطبقات المختلطة مع الطمي أو الطين قد يعيق تدفق الهيدروكربون.
- احتمالية وجود مناطق غير منتظمة الصرف داخل الخزان بسبب التداخل الطبقي.

الخصائص الغرانولومترية (الحبيبة) للرمال والصخور الرملية

• أبعاد الحبات

في حال التساوي في أبعاد الحبات، تزداد المسامية بازدياد نعومة الحبات، وفي الرمال شديدة النعومة (سيلت) والغضاريات غير المتماسكة ونتيجة زيادة قوى احتكاك والتصاق الحبات ببعضها تنشأ تقنيات وجسور تحد من التراص مبقية على الفراغات.

زيادة النعومة ← زيادة السطح النوعي ← زيادة قوى الالتصاق للسوائل المبللة (الماء) ← زيادة كمية المياه البينية مقارنة بحجم الزيت في الصخر ← بالنتيجة كمية الزيت المحتجزة في الصخر وغير القابلة للاستثمار تزداد بزيادة نعومة الحبات في حدود السيلت.

بالنسبة للنفاذية، تزداد النفاذية بزيادة أبعاد الحبات حيث يزداد حجم الفراغات والأقنية التي يمكن أن تتحرك ضمنها الموائع. (زيادة أقطار الحبات ← زيادة النفاذية)، أي أنه كلما زاد حجم الحبات، زادت مساحة الممرات المسامية، وبالتالي زادت النفاذية.

ويمكن القول أن النفاذية ترتبط مع مربع قطر الحبات:

$$K = b \cdot d^2 \cdot e^{-a} \cdot \delta$$

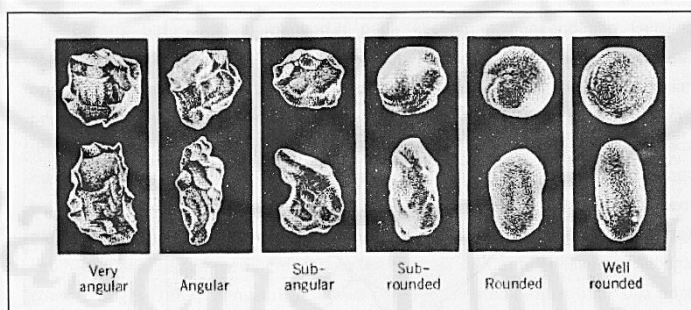
d قطر الحبات

a, b, e ثوابت (نسبة الفراغات، خصائص أخرى)

δ (النسبة بين كثافة ولزوجة المائع)

• أشكال الحبات

- تزداد المسامية بزيادة درجة زاوية الحبات
- تزداد النفاذية مع زيادة توجيه الحبات، وتكون النفاذية أعلى مع اتجاه تطاول الحبات

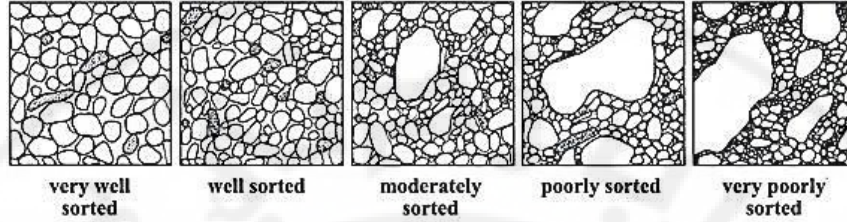


أشكال الحبات اعتباراً من الزاوية (اليسار) وصولاً للمدورة (اليمين)

• درجة التجانس (الفرز)

- التجانس والمسامية

- تكون المسامية قصوى أو عظمى في الرمال المتجانسة الحبات.
- إدخال عناصر ناعمة أو خشنة في وسط متجانس الحبات ينقص المسامية



درجات الفرز. جيد في اليسار، سيء باتجاه اليمين.

- التجانس والنفوذية

- علاقة معقدة
- إذا كان الخليط من نوعين من المركبات تصل النفوذية قيمتها الدنيا عندما يدخل المركبان ذوي الأقطار المختلفة بنسب متساوية في الخليط.
- إذا كان الخليط من مركبات متعددة فإن النفوذية سترتبط بالقطر المتوسط للحبات فحسب.

الخصائص المنيرالوجية (الفلزية)

التركيب المنيرالوجي (الفلزي) للصخور الرملية الخزنة له تأثير كبير على الخصائص البتروفيزيائية للصخور، وذلك كما يلي:

- التركيب الفلزي يؤثر على نوعية المسامية الكلية والفعالة في الصخر، حيث أن وجود فلزات مثل الكوارتز يمنح الصخر مسامية عالية ومسامية مستقرة، بينما وجود فلزات طينية (غضار) يقلل المسامية ويزيد من المسام الثانوية التي قد تكون غير فعالة للسماح بتدفق الموائع.
- تؤثر الفلزات الطينية بشكل كبير على النفاذية، إذ تؤدي إلى انسداد مسام الصخر أو تضيقها، مما يخفض النفاذية، بينما وجود فلزات صلبة كالكوارتز والدولوميت يساهم في زيادة النفاذية.
- التركيب الفلزي يؤثر على خواص الكثافة والمقاومة الكهربائية للصخر، حيث تختلف هذه الخواص بحسب الفلزات المكونة للصخر، مما يؤثر على القياسات الجيوفيزيائية مثل قياسات النيوترون والكثافة وأشعة غاما.
- التوزيع والتركيز المكاني للفلزات المختلفة، وخاصة الطينية منها، يبرز من خلال التباين في نتائج قياسات البتروفيزياء، ويظهر ذلك في تغيرات المسامية والنفاذية على طول التشكيلة.
- التركيب الفلزي للصخر يؤثر أيضا على استجابة الصخور للضغط والحرارة، بحيث أن الصخور الغنية بالفلزات الطينية (الغضارية) قد تتغير خواصها بتغير ظروف الضغط والحرارة أكثر من الصخور الكوارتزية.

بالتالي، التركيب الفلزي للصخور الرملية الخزنة هو عامل رئيسي يتحكم في كفاءة المكنن من حيث المسامية والنفاذية والاستجابة الفيزيائية، كما يؤثر على تفسير البيانات الجيوفيزيائية المتعلقة بالحفر والاستكشاف.

- تأثير الغضاريات

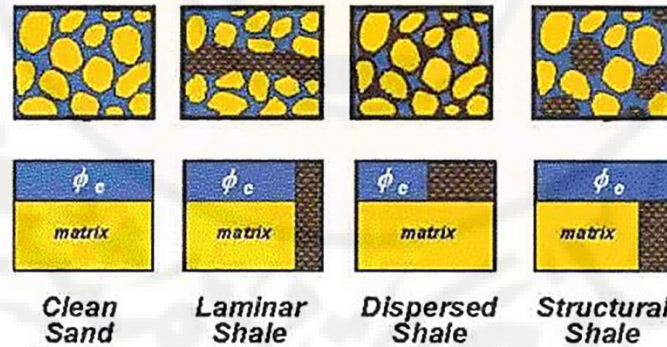
تمتاز الغضاريات بقدرتها على التأثير على الخصائص الخزنية وذلك من خلال:

- ادمصاص أو تبادل الشوارد مع المحاليل الملامسة لها مما يغير في خصائصها الفيزيا-كيميائية.
- ادمصاص جزيئات الماء في بنيتها ما يؤدي لانتفاخها.
- ادمصاص بعض الجزيئات العضوية والاحتفاظ بها.

- أبعادها الصغيرة (أقل من 0.005 مم) تزيد من السطوح النوعية وتتحكم بالتالي بالخصائص الشعرية ما يؤدي لحجز الموائع في السويات الخازنة.
- قدرتها على ادمصاص الماء تحد من التصريف والإنتاج المائي. حيث إن كميات قليلة من الغضار يمكنها زيادة حجم الماء المحجوز في الفراغات. و إن رمالاً غضارية بإمكانها إنتاج زيتاً خالياً من الماء حتى ولو كانت درجة تشبع هذه الرمال بالماء تزيد عن 65%.
- تبادل الشوارد بين الغضاريات والموائع سواء أثناء مرحلة الإنتاج الطبيعي (ارتفاع مستوى الماء) أو أثناء مراحل الإنتاج الثانوي بحقن الموائع يمكن أن تقود إلى تغييرات هامة في خصائص الصخر الخازن كظهور حواجز للنفاذية بسبب انتفاخ الغضاريات.
- بشكل عام فإن ارتفاع محتوى الغضار في الصخر الخازن من شأنه أن يؤدي إلى انخفاض هام في مستوى المسامية والفوذية ما يؤدي لاصطياد الفحم الهيدروجينية في هذه السويات الخازنة.

كيف يؤثر شكل وطريقة توزع الغضاريات على الخصائص الخزنية؟

- **توزع صفائحي (Laminar):** أي تأخذ الغضاريات وضعية صفائح ووريفات ضمن الصخر الخازن، وتؤثر بالتالي سلباً على المسامية الفعالة بالاتجاه العمودي على تلك الصفائح بنتيجة انسداد الفراغات بشكل متعامد على هذه الصفائح مما يقلل من النفاذية.
- **توزع مبعثر (Dispersed):** حيث تكون حبات الغضاريات منثورة ومبعثرة بين حبات الصخر الخازن مما ينتج عنه تناقص المسامية الفعالة بنتيجة امتلاء نسبة من الفراغات المسامية بتلك الغضاريات. وهو التوزع الأكثر سلبية على المسامية الفعالة ويؤدي إلى تناقصها بسبب امتلاء جزء من الفراغات بالغضاريات، ويتسبب ذلك بانخفاض نفاذية الصخر.
- **توزع بنيوي أو هيكلي (Structural):** تكون حبات الغضاريات موزعة كحبات منفصلة متجانسة مع حبات الصخر الأخرى، وهذا النوع من التوزع له أقل تأثير سلبي على المسامية الفعالة، ولا ينقصها بشكل ملحوظ، لأنه لا يملأ الفراغات بنفس درجة التوزعات السابقة. أي تكون الغضاريات موزعة على شكل حبات ضمن الصخر شأنها شأن حبات الصخر الأخرى. وهذا التوزع لا يؤثر سلباً ولا ينقص المسامية الفعالة عموماً.



تأثير طريقة توزع الغضاريات في الصخر الخازن وتأثيره على المسامية الفعالة.

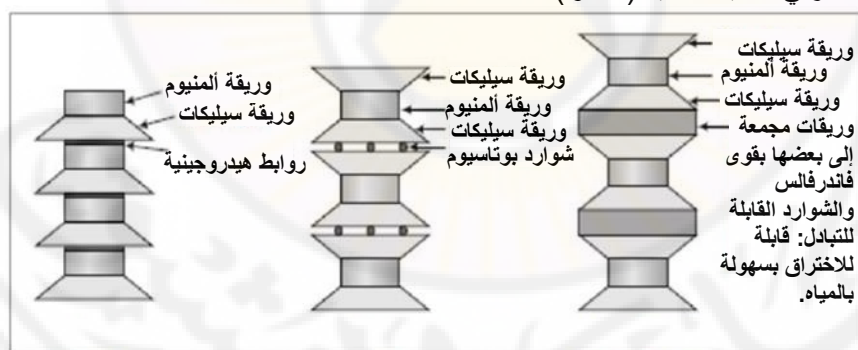
هل يؤثر نوع الغضار وتركيبه في الخصائص الخزنية للصخور الخازنة؟

يؤثر نوع وتركيب الغضار في الصخور الخازنة على الخصائص الخزنية. ويُعتبر كل من الكاولينيت، الإيليت، والمونتموريلونيت هي من أشهر أنواع الفلزات الغضارية، ولكل منها تأثير مختلف:

- **الكاولينيت (Kaolinite)** يتميز بتركيب بلوري متماسك ترتص فيه الطبقات بتباعد منتظم فيما بينها، لا انحناء أو تشوه في بنية الطبقة الواحدة، لذلك فالكاولينيت منخفض النفاذية نسبياً، وقادر على تقليل المسامية قليلاً لكنه أقل

نشاطاً في امتصاص الماء، ولا ينتفخ بوجود الماء، لذا فإن تأثيره على الخواص الخزنية يكون متوسطاً مقارنةً بأنواع أخرى. ويمكن إيجاز خصائصه بما يأتي:

1. نفاذية منخفضة نسبياً
 2. يقلل المسامية بشكل ملحوظ (pore bridging)
 3. أقل نشاطاً في امتصاص الماء (1-5% فقط)
 4. لا ينتفخ في وجود الماء
 5. التأثير الخزني: متوسط (أقل ضرراً)
- الإيليت (Illite) فلز غضاري ذو بنية بلورية ورقية وليفية ومتوسط النشاط، يميل إلى تقليل النفاذية بشكل ملحوظ، ويؤثر على تقليل المسامية الفعالة بسبب قدرته على ملء الفراغات وتعديل توزع المسام. حيث يشكل شبكة مترابطة تسد المسامات الدقيقة، وهو ضعيف القابلية للانتفاخ لكن يزيد من الإشباع المائي. ويمكن إيجاز خصائصه بما يأتي:
 1. تقليل ملحوظ للنفاذية (50-70%)
 2. ملء المسامات الدقيقة وتشكيل شبكة مترابطة
 3. ضعيف القابلية للانتفاخ
 4. يزيد الإشباع المائي
 5. التأثير الخزني: متوسط إلى عالي
 - المونتموريلونيت (Montmorillonite) فلز غضاري عالي النشاط وقادر على الانتفاخ عند وجود الماء، بنيته عبارة عن صفائح مفصولة بطبقات ماء، مما يتسبب في تقليل شديد للمسامية والنفاذية بسبب الانتفاخ وملء الفراغات، وهو الأكثر تأثيراً على الخصائص الخزنية وإمكانية الحركة المائية داخل المكن. قابل للتمدد وتغطية جدران المسامات وسدها ويخفض النفاذية بنسبة 90%. ويمكن إيجاز خصائصه بما يأتي:
 6. ينتفخ بشدة عند امتصاص الماء
 7. يقلل المسامية والنفاذية بنسبة تصل إلى 90%
 8. يغطي جدران المسامات ويسدها
 9. الأكثر ضرراً على إمكانية الحركة المائية
 10. التأثير الخزني: شديد السلبية (الأسوأ)



كاولينيت

إيليت

مونتموريلونيت

بنية الغضاريات: مونتموريلونيت، إيليت، كاولينيت

تأثير عمليات الدياجينيز على الصفات الخزنية للصخور الرملية

تقدر المسامية في جميع الصخور الرملية الخازنة بحوالي 15% لكن يمكن للمسامية الأصلية أن تصل في الرمال المترسبة في الأوساط ذات الطاقة المرتفعة حتى 55% حيث تترافق مع نفوذية مرتفعة جداً قد تصل إلى 100 دراسي. كما يمكن لهذه المسامية أن تنخفض في الرمال المترابطة حتى أقل من 1%. وبالتالي يمكن لقيم المسامية في الصخور الرملية أن تتراوح ضمن قيم متفاوتة جداً. ولا شك أن هذا التفاوت الكبير في المسامية ينعكس بشكل مؤثر جداً على القدرة الخزنية لهذه الصخور وما يمكن أن تحتويه من مواد هيدروكربونية مع العلم أنه يمكن لطبقة رملية مساحتها 1 كم² وسماكتها 1 م أن تحتوي على 15 X 10⁴ م³ من النفط ويمكن لبعض الخزانات ذات المسامية المرتفعة أن تحتوي على نسبة من النفط أعلى من تلك المشار إليها

بكثير وبالتالي يمكننا تصور مدى تأثير التنوع الكبير لقيم المسامية على القدرة الخزنية للطبقات الرملية ذات الامتداد الواسع والسماكة الكبيرة وتزداد أهمية هذا الأمر إذا علمنا ان بعض الدراسات تشير إلى أن كمية النفط التي يمكن استخلاصها من الرمال الخازنة تتناسب طردياً مع مربع سماكة هذه الرمال.

يمكن تلخيص المحصلة النهائية لدياجينيز الحجر الرملي بنتيجتين متعاكستين تماماً، الأولى هي إدخال مواد جديدة إلى الفراغات المسامية ما يؤدي إلى إنقاص كل من النفوذية والمسامية، بينما تتضمن النتيجة المعاكسة خلق فراغات مسامية جديدة من خلال إزالة المواد من جسم الصخر.

أ. تأثير الانحلال

يؤثر انحلال الصخر على إزالة مواد منه وتشكل فراغات جديدة (وبالتالي مسامية ثانوية) كانت مشغولة بهذه المواد وعلى الرغم من أن المسامية الثانوية يمكن أن تحدث في الحجر الرملي عن طريق التشقق والحت ونثقيب الحبات إلا أن إزالة المواد الصلبة تتم بشكل دائم تقريباً عن طريق الانحلال، وتقسم هذه المواد التي يمكن إزالتها بشكل عام إلى مجموعتين:

- مجموعة المواد غير الكوارتزية وهي الأكثر انحلالاً كالكربونات والفلسبارات والقواقع العضوية والبيليت (المتحجرات الدقيقة أو العضويات المتحللة).
- المواد اللاحمة (السمنت) المعاد انحلالها في الأعماق.

تتناسب شدة انحلال الملاط (السمنت) الكربوناتي طردياً مع الضغط وعكساً مع الحرارة وفي المحصلة النهائية فإنها تتناقص مع العمق ولكنها تتعزز بوجود الحموض العضوية المتشكلة أثناء نضج المادة العضوية.

بالمحصلة فإن المسامية الثانوية الناتجة عن الانحلال هامة في مجال عمقي محدد تتراكم فيه معظم العوامل الملائمة للانحلال.

ب. تأثير السمنتة

تتألف معظم الصخور الخازنة الحطامية من حبيبات رملية متماسكة بواسطة ملاط (سيمنت) تختلف نسبته وتركيبه من صخر إلى آخر. ويكون هذا الملاط عادة من الأنواع التالية:

- سيليسي.
- كربوناتي.
- غضاري.

تُعد الملاطات السيليسية والكربوناتية الأكثر انتشاراً بين هذه الأنواع، ويُعتبر السيليكا الأكثر ثباتاً واستقراراً.

تلعب هذه الملاطات دوراً مهماً في تحديد الخصائص البتروفيزيائية للصخور الرملية، حيث تتوضع بين حبيبات الرمل مغلقة جزئياً أو كلاً الفراغات بينها، مما يؤدي إلى:

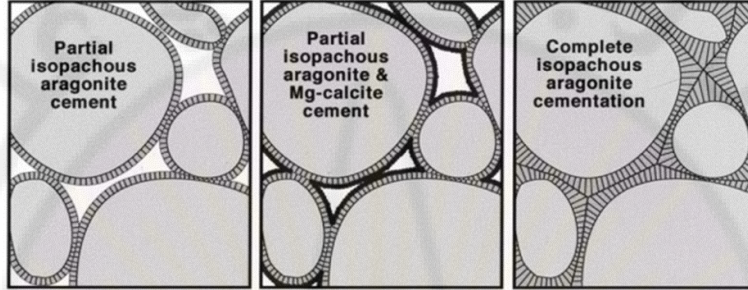
- نقص في المسامية الفعالة نتيجة تقليل حجم الفراغات المتصلة.
- انخفاض في النفاذية بسبب قلة توصيل القنوات المسامية.

يزداد هذا التأثير وضوحاً عندما تكون أبعاد الحبيبات صغيرة، حيث يمكن أن تؤدي إلى فقدان النفوذية الكلية في بعض الحالات.

أما عند ارتفاع درجة اللحام بشكل كبير، فإن ذلك قد يؤدي إلى تشققات داخل الصخر، مما يخلق مسامية ونفاذية ثانوية قد تعزز من حركة السوائل داخل المكن.

علاوةً على ذلك، فإن تشكل الملاط بشكل غير متجانس يؤدي إلى خلق حواجز محلية للنفاذية داخل الصخر، وهذه الحواجز تلعب دوراً هاماً في تكوين المصائد البترولية عن طريق منع أو تأخير هجرة الفحوم الهيدروجينية، خاصة تحت ظروف ضغوط عالية غير عادية في بعض المكامن.

ويتجلى التأثير الأعظمي لعمليات الدياجينيز في الصخور الرملية في إنقاص مساميتها أكثر من زيادتها. وتتأثر حبات الكوارتز النقي في الصخور الرملية بشكل ضعيف جداً بالدياجينيز، في حين تتفكك الحبات الحطامية المكونة من أية فلزات سيليكاتية نارية أخرى لتتحول إلى فلزات غضارية حيث يشكل الغضار أحد أهم أنواع الملاط الدياجينيزي في الصخور الرملية لكن تأثير الفلزات الغضارية المتنوعة على الفراغات المسامية يختلف تماماً من واحد لآخر. فقد تتشكل غضاريات من النمط القابل للانفخاخ مثل السمكتيت والتي تعمل على إنقاص المسامية لدى تعرضها للرطوبة و/أو إنقاص النفوذية أيضاً.



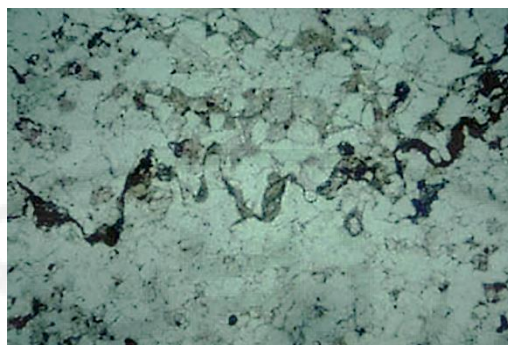
التملط وفقدان المسامية

ت. تأثير الارتصاص

يرتبط تأثير ترصص الصخور الرملية على مساميتها بنسجها وبنسجها الفلزي. يُقصد بالنسج الفلزي مدى استقرار وتجانس الفلزات المكونة للحبيبات بعد التعرض لعمليات دياجينيزية مختلفة. يُعرف الجزء الحبيبي في الصخر بكونه الكمية الكلية من الجسم الصلب للصخر، باستثناء الملاط (السمنت) والامية (الأرضية). في الصخور الرملية الناضجة كيميائياً وفلزياً، مثل الصخور الرملية النظيفة، قد تصل نسبة الجزء الحبيبي إلى مستويات عالية جداً، حيث قد تصل مساميتها إلى حوالي 40%. ولكن عند ازدياد عمق الدفن، يؤدي الضغط المتزايد إلى ترصص الحبيبات ورصفها وتشابكها، مما يقلل بشكل كبير من قيمة المسامية الأولية. كما يسبب الضغط تشوه الحبيبات الهشة وتشكل محاليل ضغط في الأعماق الكبيرة، وهذا يزيد من التحام الحبيبات ويتناقص معه حجم المسامات، ويخفض المسامية بزيادة القطر الحبيبي الوسطي.

تقل نسبة الجزء الحبيبي في الصخور الرملية غير الناضجة فلزياً، كما تكون مساميتها الأولية أقل بكثير من 40%. ويتضح أن المسامية تتناقص أكثر مع زيادة عمق الدفن بسبب قدرة التشوه الكبيرة للفلزات غير الكوارتزية وقابليتها للتفكك. كما يمكن للحبيبات الغلوكونيتية والبيليتية، عند تعرضها للتحميل، أن تنساب بسهولة لتملأ الفراغات المسامية، مما ينعكس سلباً على المسامية والنفاذية.

يُمكن القول أن التراص يعمل على تغيير خواص التوضعات الرسوبية أثناء تصخرها، حيث تلعب التفاعلات الكيميائية الدور الرئيس في تعديل كيمياء بعض الفلزات، وتنشط هذه التفاعلات بارتفاع الحرارة، وتحت تأثير الانطمار يعمل الضغط بالتأثير على نقاط التقاء الحبات وخصوصاً في الصخور الكربوناتية فتتشكل الدروز (Stylolite). حيث تؤدي الضغوط إلى انحلال المادة اللاصقة المتوضعة في الفراغات. وتزداد فاعلية الضغط في عملية الانحلال اعتباراً من 100 م في الصخور الكربوناتية و1000 م في الرمال والصخور الرملية. فتتخرب المسامية في الصخور الرملية مثلاً بالعلاقة مع خصائصها البتروغرافية ويقل تناقص المسامية فيها بازدياد درجة نقاوتها. بالمحصلة تتناقص المسامية والنفوذية في صخر خازن كلما كان موجوداً على أعماق ذات حرارات وضغوط مرتفعة.



الانحلال بالضغط بتأثير التراص وتشكل الستيلوليت.

ث. استحاثة المسامية

تتناقص المسامية الأولية مع زيادة العمق بسبب الانضغاط والتملط، لكن قد يتوقف ذلك التناقص في المسامية في مراحل متقدمة من الدياجينيز نتيجة العوامل الآتية:

- استبدال مياه التشكيلة بمائع حيادي : حيث أن الزيت أو الهيدروكربون مركبات غير تفاعلية توقف التملط مما يحد من فقدان المسامية أثناء الانطمار.
- الظواهر الكيميائية والانحصار : في الطبقات المحصورة (sealed layers) تحت طبقات تبخرية، يتوقف تدفق المياه الجوفية، مما يمنع التفاعلات الكيميائية المعقدة وفقدان المسامية مع العمق بسبب الضغط المفرط. أي يكون الوسط محصوراً ولا يسمح بحركة المياه الجوفية (طبقات محصورة بين طبقات تبخرية).
- تواجد الملاط المبكر : الملاط المبكر يمنع التراص الزائد أحياناً، ويحتفظ بالمسامية حتى حدوث عمليات غسل لاحق يزيل الملاط جزئياً ويحسن الخصائص الخزنية والنفاذية.

بالنتيجة، يتم النظر لذلك على أنه قد تم الاحتفاظ بالمسامية الأولية في الصخر حتى مراحل متقدمة من الدياجينيز وكأن المسامية قد تعرضت للاستحاثة.

الأوساط والتشكيلات الرئيسية للصخور الخازنة الرملية

التشكيلات الرملية الخازنة عموماً امتدادت خطية لأجسام طولانية نسبة طولها لعرضها 3 إلى 1.

لا يزيد طولها عموماً عن 5 كم، سماكتها وسطياً 40 م (تبلغ 100 م في حالات نادرة).

تصنف هذه التشكيلات أو الأجسام إلى 7 أوساط أو تجمعات رسوبية لكل منها خصائصها الجيومترية والرسوبية والنفطية وهي:

الرمال الريحية الصحراوية، الرمال النهرية، التوضعات اللحية، رمال الشواطئ والحواجز، رمال السطاح البحرية، الرمال البحرية العميقة، الرمال الدلتاوية.

1. الرمال الريحية

- تتشكل الرمال الريحية في البيئات الصحراوية، وهي من أفضل أنواع الصخور الحطامية الخازنة بسبب بنيتها الطبقيّة والجيومترية التي تلائم تجمع النفط.

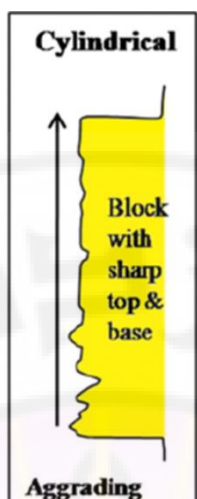
- تتمتع الرمال الريحية بجيومترية المصيدة وغطاءات كافية (Cap Rock) تمنع هروب النفط، وهو أمر أساسي لتشكل مكامن نفطية ناجحة.
- لديها قدرة إنتاجية عالية بسبب خصائصها الفيزيائية، مثل المسامية العالية (قد تصل إلى حوالي 25%) والنفاذية الجيدة التي قد تصل إلى 1 دارسي أو أكثر، مما يسهل حركة النفط داخل الصخر.
- مع ذلك، قد تتوضع في بعض الأحيان على سطوح غير أفقية تماماً وتعتمد خصائصها الخازنة على توزيع المكونات ودرجة الفراغات الداخلية، ومن المهم أيضاً أن تكون الصحارى أو المناطق التي تتوضع فيها خالية من الغضاريات المتورقة التي قد تؤثر على خصائص النفوذية والمسامات.
- الرمال الريحية تفتقد عادةً للتأثيرات السلبية من التشوهات الغضارية المتورقة التي قد تعقد خصائص التوصيل والاحتفاظ بالنفط، وهذا يجعلها بيئة مواتية أكثر من بعض الصخور الحطامية الأخرى.

2. الرمال النهرية

- الرمال النهرية تتوضع في مناطق منعطفات الأنهار ورسوبات الأنهار المنقطة داخل السهول اللحية، حيث تتسبب بفعل تغيرات سرعة الجريان النهرية.
- الأجسام الرملية التي تشكل هذه التشكيلات تكون متباينة الأطوال، حيث تتراوح بين مئات الأمتار إلى عشرات الكيلومترات، ويكون المتوسط حوالي 4 كم.
- سماكة هذه الرواسب الرملية النهرية المنشأ تتنوع بين عدة أمتار (6 م) إلى عشرات الأمتار (75 م)، ومتوسط السماكة بحوالي 30 م.
- المتواليات الرسوبية الناتجة عادةً موجبة الاتجاه، مع تناقص حجم الحبيبات صعوداً في المتوالية، ويُلاحظ أنّ سماكة هذه المتواليات يمكن أن تعادل عمق النهر أثناء حالات الجفاف، وهو أمر منطقي من ناحية ترسيب الرسوبات بحسب تغير ظروف تدفق المياه.

عادةً ما يتم تمييز توضعيات الرمال النهرية كصخور خازنة من خلال القياسات البئرية، حيث تبدي الخصائص الآتية:

- كمية الإشعاع الضعيفة في قياس غاما راي (أشعة غاما) تدل غالباً على توضعيات في وسط عالي الطاقة، حيث الرمال النهرية ذات الطاقة العالية عادةً ما تكون فقيرة بالمواد المشعة مثل الغضار والفلاتر الثقيلة، لذلك يكون الإشعاع منخفض عموماً.
- شكل قياس غاما راي (أشعة غاما) في هذه التشكيلات قد يظهر أشكالاً اسطوانية أو متماثلة أفقياً بسبب الأجسام الرملية الممتدة طولياً في النهر، ومن الطبيعي أن لا يطرأ تغير كبير ملحوظ في الشكل خلال التشكيل الواحد.
- التغيرات في قياس النيوترون والكثافة تعبر عن اختلاف درجات تجانس الحبات والتركيب الصخري، فالاختلاف في المسامية والتماسك يؤدي إلى تغير في قيم هذه القياسات.
- السويات الغضارية أو الطبقات الطينية ضعيفة التطور عادةً ما تقابل سهولاً مغمورة أو بيئات منخفضة الطاقة، حيث تتواجد طبقات من اللغنين والمواد الطينية.



الشكل الأسطواني لقياسات اشعة غاما مقابل توضعات الرمال النهرية

3. توضعات المخاريط اللحقية Alluvial Fans

توضعات المخاريط اللحقية كخزانات نفطية تتميز بما يلي:

- تتشكل في نقاط التقاء الجبال بالسهول، حيث تكون مناطق انتقال ديناميكية تؤدي إلى توضع الرسوبات الناتجة عن انحسار الأنهار.
- تأخذ توضعات المخاريط شكل أحزمة خطية أو السنة رملية تظهر أحيانا بأشكال زاوية بسبب التضاريس وديناميكية التدفق.
- في مناطق التقاء السهل بالجبل، تصل سماكة هذه الأحزمة إلى مئات الأمتار (حتى 300 متر)، مع ميل للطبقات حوالي 30 درجة، وهذا بسبب انحدار السطح وكمية الرسوبات.
- في المناطق الأكثر استقراراً وأبعد عن نقطة التقاء الجبال، تقل الميول لتصل إلى 2-3 درجات، وتشكل السنة رملية واسعة وكبيرة الامتداد، وغالبا ما تكون مكونة من بقايا صخرية مختلفة.
- البنى والامتدادات لهذه التوضعات متباينة بشكل كبير حسب مصادر الرواسب وطريقة الترسيب.
- تتنوع الرسوبات بين قطع مدرجة كبيرة إلى مواد طينية أو غضارية تختلط مع مكونات أخرى، وهذا يعكس التغير في طاقة الوسط والترسيب.
- بشكل عام، يقل حجم الحبيبات باتجاه الأراضي المنخفضة، ويزداد تجانسها نتيجة الفرز بالنقل.
- تبدي هذه المخاريط صلاحية عالية كخزانات نفطية، حيث تتمتع بعدسات رملية أو حصوية ذات مسامية ونفاذية أولية عالية، لا تتأثر كثيراً بالتراص أو التحول أثناء عملية الانطمار، ولا سيما في المناطق الخالية من المواد الناعمة كالطين.

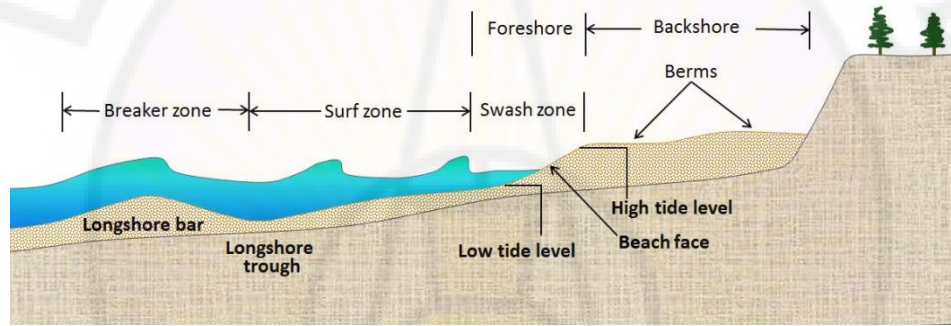


مخروط أو مروحة لحقية

4. رمال الشواطئ أو الحواجز البحرية

وهي بيئات ترسيبية مهمة للنفط والغاز في الأحواض الساحلية. وإن الخصائص الجيولوجية والترسيبية لهذه الرمال الشاطئية كخزانات نفطية ذات القيمة الإنتاجية العالية يمكن إيجازها بما يأتي:

- رمال الشواطئ تشكل من أهم المجموعات الخازنة والمنتجة للنفط بفضل مساميتها ونفاذيتها العالية.
- تأخذ هذه الرمال أشكالاً متطاولة خطية، تتوضع موازية لخط الشاطئ، وتمتد لمسافات طويلة قد تصل إلى 40 كم طولاً و4 كم عرضاً، مع سماكة لا تتجاوز 20 متراً.
- منشأ هذه الرمال حثي، وتتراكم في منطقة تأثير الأمواج، حيث تتشكل على شكل متواليات سالبة باتجاه الأعلى تزداد فيها أقطار الحبيبات ونقاوتها واستدارتها وتجانسها، مع تطبيق أفقي أو قليل الميل نحو البحر.
- باتجاه الأعماق البحرية، تصبح هذه الرسوبات ذات طبقات عدسية مشوبة بالغضار، وتتناقص خصائصها الخزنائية، بينما تتحول باتجاه القارة إلى سحنات بحيرية أو قارية.
- المسامية لهذه الصخور تتراوح عادة بين 15% إلى 20% وقد تصل إلى 30% في طبقاتها العليا.
- النفاذية تكون متباينة جداً بين 50 إلى 2000 ميلي دارسي حسب البنية الطباقية ودرجة التماسك.

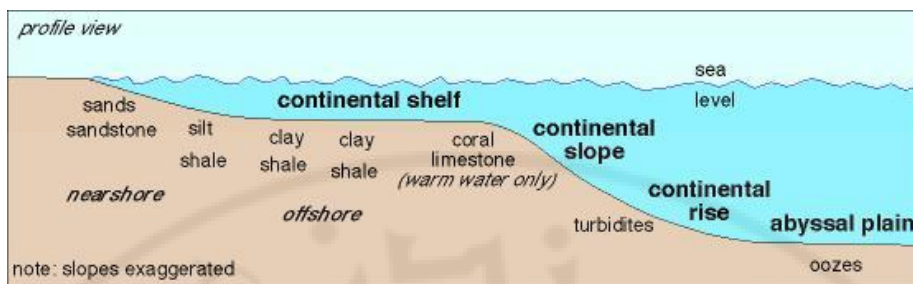


مقطع يوضح نطاق توضع رمال الحواجز البحرية longshore bar.

5. رمال السطحية البحرية

تبدي هذه التوضعات مسامية ونفاذية جيدة تؤهلها لاستقبال وتخزين الهيدروكربون، ولكن تتأثر بتتويع الرواسب وتوزعها داخل البيئة الساحلية البحرية. وتمتاز بما يأتي:

- هي أجسام على شكل حواجز مغمورة في عرض البحر أو كئبان تحت بحرية وغالبا ما تمتاز بأشكال إهليلجية.
- تتناقص نسبة الغضار بشكل منتظم نحو الشاطئ، مما يعطيها خصائص خزائية جيدة.
- تتوافق مع توضعات المد والجزر في المناطق البحرية، حيث تكون توضعات المد واسعة الانتشار لكنها محدودة السماكة، وغالبا تحتوي على طبقات علوية من مواد غضارية ناعمة.
- الرمال المرتبطة بتوضعات الجزر تزداد فيها أقطار الحبات باتجاه الأعلى، مما يزيد احتمال كون هذه الصخور خازنة جيدة.
- المسامية لهذه التوضعات تتراوح بين 15% و28%، والنفاذية بين 80 إلى 3000 ميلي دارسي ضمن سماكات تتراوح بين 6 إلى 90 متر.
- تناقص الخصائص البتروفيزيائية (المسامية والنفاذية) عادةً باتجاه تضاعف نسبة المواد والعناصر الطينية في الرسوبات يلعب دوراً سلبياً في احتجاز الفحوم الهيدروجينية.
- قلة أو عدم وجود غطاء صخري كافٍ في بعض المناطق يقلل من إمكانية تشكل مصائد نفطية ناجحة.

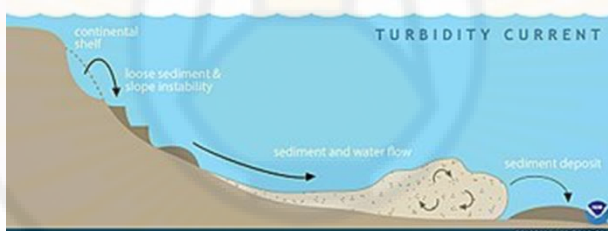


مقطع يظهر السطحية البحرية (continental shelf).

6. التوضعات الحطامية العميقة

طبيعة هذه التوضعات البحرية العميقة كخزان نفطي يحمل صفات تتوافق مع بيئات ترسيب عميقة، وتحديدًا بتدرجها الطبقي ووجود الأغشية الطينية كغطاء حيوي للنفط. يمكن تلخيص خصائص ومواصفات هذه التوضعات بما يأتي:

- تنشأ هذه التوضعات من تيارات العكر والرمال البحرية العميقة التي تنقل الرسوبات وترسيبها في بيئات بحرية عميقة.
- هي توضعات كبيرة وشبه متجانسة، تغطي مساحات واسعة تمتد لعشرات أو حتى مئات الكيلومترات المربعة.
- تتوضع عادةً خلال فترات الجزر حيث يقل مستوى البحر وتتركز الرسوبات بفعل التيارات.
- تظهر هذه التوضعات سحنات ذات خصائص غرانولومترية متدرجة على شكل طبقات، تفصلها طبقات غضارية تعمل كغطاء وتحتوي غالباً على مستحاثات مجهرية تدل على الترسيب في أعماق البحر.
- تأخذ شكل أجسام متطاولة ومتوضعة بعضها فوق بعض، بسماكة حوالي 50 متر وعرض لا يتجاوز 2 كيلومتر.

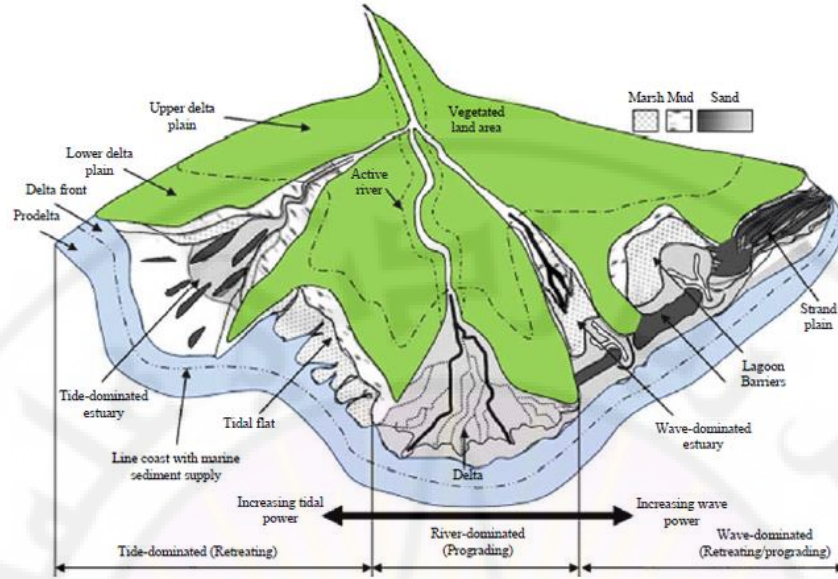


تيارات العكر والتوضعات العميقة.

7. الرمال الدلتاوية

الخصائص الجيولوجية لهذه البيئات وأهميتها كخزانات نفطية تتلخص بما يأتي:

- تجمع الأوساط الدلتاوية بين مختلف الأوساط الرسوبية الأخرى مثل الرمال النهرية، رمال المخاريط اللحفية، ورمال الشواطئ البحرية، بحيث تتداخل وتتمازج بسبب تأثير التجاوزات البحرية والتغيرات في مستوى سطح البحر.
- يسمح هذا التجانس والتداخل بتشكيل وتراكم تشكيلات متنوعة تبدأ من الرمال النهرية وصولاً إلى رمال الحواجز البحرية العميقة المغمورة، مما يخلق بيئات معقدة ومتعددة الطبقات.
- الأوساط الدلتاوية تعتبر بيئات مشجعة لنشأة الفحم الهيدروجينية بسبب الرسوبات العضوية المركزة وتنوع الأكسجة، ما يجعلها مناطق مهمة لتشكيل الهيدروكربون.



الدلتا والتوضعات الرملية المختلفة، رمال دلتاوية، توضعات التيارات البحرية، توضعات المد والجزر، توضعات اللاغونات...

الصخور الخازنة الكربوناتية (Carbonate Reservoir Rocks)

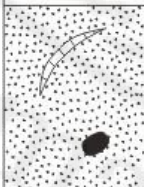
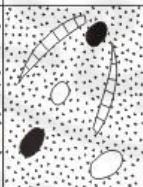
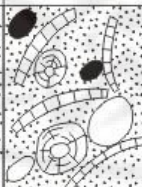
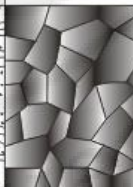
الصخور الخازنة الكربوناتية هي صخور رسوبية تتكون أساساً من فلزات الكربونات مثل الكالسيت والدولوميت، وتتميز بامتلاكها مسامية ونفاذية تسمح بتراكم واستخراج النفط والغاز. هذه الصخور تشكل خزانات مهمة في العديد من التراكمات النفطية. ويمكن اعتبارها أنها تمثل النوع الثاني الأكثر انتشاراً من الخزانات الهيدروكربونية.

لقد تم وضع العديد من التصنيفات للصخور الكربوناتية تختلف فيما بينها باختلاف الباحثين وباختلاف الهدف منها، وهناك العديد من طرائق التصنيف مثل تصنيف فولك (Robert Folk, 1995) الذي اعتمد على العلاقة بين العناصر المكونة، والمواد التي تجمعها مع بعضها البعض، وتصنيف ماسلوف (V. P. Maslov, 1966) وبيتون (Pettihohn, 1975)، لكن أكثر التصنيفات انتشاراً بين جيولوجي النفط هو تصنيف دونهام (R. J. Dunham, 1962) الذي وضع خصيصاً للأهداف النفطية، حيث اعتمد على:

1. دعم الطين أو الحبيبات (mud-supported vs grain-supported).
2. نسبة الطين (less than 10% أو more than 10%).
3. وجود ارتباط بين الحبيبات (كالـ 'Boundstone' التي تدعمها مواد عضوية).

صنّف دونهام الصخور إلى فئات مثل Mudstone، Wackestone، Packstone، Grainstone، و Boundstone، بالإضافة إلى فئة خاصة بالصخور البلورية حيث يصعب التعرف على النسيج الأصلي. هذا التصنيف أكثر عملية في تشخيص الخزانات النفطية لأنه يركز على الخصائص التي تؤثر على المسامية والنفاذية.

يوضح الشكل المرفق بالتفصيل تصنيف دونهام للصخور الكربوناتية.

Depositional texture recognizable					Depositional texture not recognizable
Original components not bound together during deposition			Original components were bound together		
Contains mud (clay and fine silt-size carbonate)		Lacks mud and is grain supported			
Mud-supported				Grain-supported	
Less than 10% grains	More than 10% grains				
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Crystalline
					

تصنيف دونهام

الخصائص والمواصفات العامة للصخور الخازنة الكربوناتية

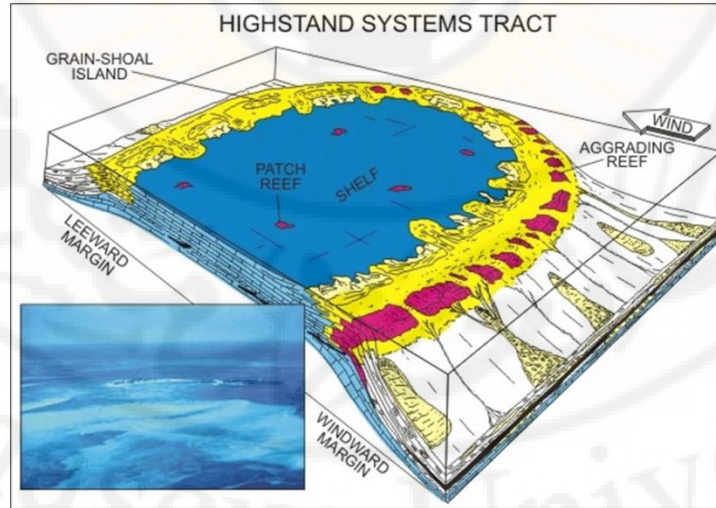
- تأتي الصخور الخازنة الكربوناتية إذاً في المرتبة الثانية بعد الرملية في الانتشار والقدرة على خزن الفحم الهيدروجينية.

- يدخل في تركيبها الكربونات بنسبة لا تقل عن 50% على شكل كالسيت أو دولوميت.
- تتألف من أنواع مختلفة من الحبات (معظمها مستحاثات) بأشكال وأقطار متنوعة يربط بينها ملاط كربوناتي ناعم.
- تتصف هذه الصخور بعدم التجانس الكبير في مساميتها ونفوذيتها.
- عمليات الدلمنة تؤثر بشكل كبير على النفاذية، إيجاباً أو سلباً بحسب الحالة الشقوق في هذه الصخور تزيد من النفوذية

أنواع الصخور الخازنة الكربوناتية

أ- الصخور الخازنة الرصفية

- هي تراكمات مرجانية وكربوناتية تتشكل في بيئات بحرية ضحلة، وتشكل صخوراً خازنة متميزة بخصائص المسامية (مسامية أولية عالية (primary porosity) تصل إلى 20-40%) والنفاذية المرتفعة نسبياً (10-1000 ميللي دراسي) بسبب هياكل العضويات والهياكل المرجانية.
- الحزام الخارجي (Reef Core أو Framework) مكون من صخور كلسية مشادة (framework buildups) التي تعمل عادةً كصخور خازنة رئيسية، حيث أنها غنية بالمياه الضحلة عالية الطاقة، تعمل كخزان رئيسي بفضل مساميتها العالية (حتى 30%) والنفاذية الجيدة، حيث تخزن الفراغات الكبيرة الهيدروكربون بكفاءة عالية.
- النطاق الكربوناتي الحطامي (Reef Talus) أو (Debris Apron) يتكون من ركام مرجاني وحطام كربوناتي متدرجاً (debris flows) حول الحزام الرئيسي، وله دور في نقل الهيدروكربون وتخزينه لكن مساميته (10-25%) ونفاذيته عموماً أقل من الحزام الرئيسي.
- العدسة المركزية أو القاعدة الرصفية (Basal Breccia أو Lagoon) تتكون من كربونات حطامية (كربونات فتاتية) (detrital carbonates) وبقياء عضويات متراكمة في بيئة لاغونية هادئة، تعتبر منطقة ذات مسامية متفاوتة (5-25%)، وقد تؤدي دور الخزان في حالات الدياجينيز البسيط، حيث تحافظ على مسامية جيدة وترتبط بالحزام الرئيسي. أو دور الصخر المغطي تحت ظروف دياجينيز متقدمة (إذا تعرضت للمكرنة (تشكل الطين) مثلاً أو الامتلاء بالمادة العضوية)، مما يمنع تسرب الهيدروكربون ويحصره في الحزام الخارجي. هذا التباين يعتمد على عوامل مثل العمق، الدورات البحرية، والتكتونية، كما في حقول الخليج العربي أي يخضع للظروف الجيولوجية.

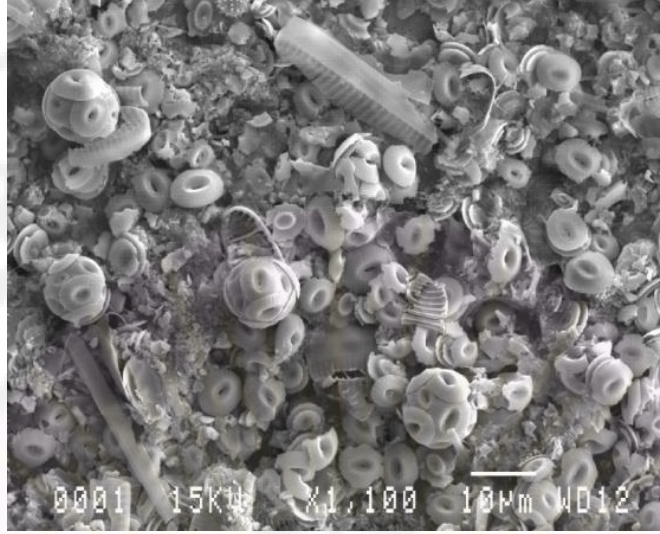


بنية الصخور الخازنة الرصفية.

ب- الصخور الخازنة الحواري

- الحجر الحواري عبارة عن صخر كربوناتي ناعم جداً ومكون من هياكل دقيقة للكوكوليت (coccoliths) يتكون من كربونات الكالسيت.

- يمكن أن تتواجد في بيئات بحرية مختلفة، من المياه الضحلة إلى العميقة.
- غالباً ما تكون ذات مسامية جيدة (قد تصل إلى متوسطة) لكنها ذات نفاذية منخفضة بسبب صغر حجم المسام وصلة الهياكل الدقيقة، مما يجعلها خزانات متوسطة إلى ضعيفة الأداء.
- تنتمي إلى الصخور الخزنة المتوسطة الجودة، مكمل للخرانات الأخرى ذات المسامية الأعلى.



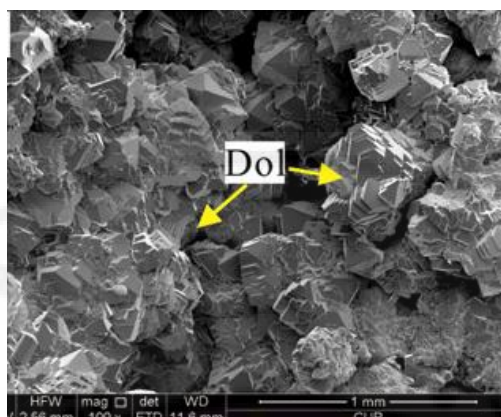
صورة بالمجهر الالكتروني تظهر بنية الصخر الحواري والكوكوليتات.

ت- الصخور الخزنة الدولوميتية

- تشكل حوالي 20 - 30% من الصخور الكربوناتية الخزنة في العديد من الأحواض الرسوبية.
- لها أهمية نفطية خاصة لاحتوائها على مسامية جيدة ذات جيومترية (شكل وحجم وترباط المسام داخل الصخر، أي الهندسة المكانية للمساحة الفارغة pore geometry أو pore structure) مما يسهم في احتجاز وحصر الفحم الهيدروجينية والسوائل الهيدروكربونية.

يمكن تصنيفها إلى أربعة أنواع رئيسية منها:

1- دولوميت أولي (Primary Dolomite): يترسب مباشرة من المحاليل المائية دون انحلال أو استبدال فلزات سابقة مثل الكالسيوم، معاصر للترسيب في بيئات دافئة ضحلة، ذات بنية ناعمة جداً، يعكس ترسيب منتظم و توزيع جغرافي واسع الانتشار. يتشكل بفعل التحول المنيرالوجي السريع للوحول الكربوناتية بفعل الضخ أو نشاط العضويات الدقيقة.



صورة بالمجهر الإلكتروني لبلورات مكتملة الأوجه من دولوميت أولي.

2- دولوميت إيبيجينيزي (Epigenetic Dolomite): يتشكل كنتيجة عملية استبدال ثانوي (secondary replacement) لفلزات الكربونات الأولية مثل الكالسيت في الصخر الكربوناتي بفلز الدولوميت، يحدث ذلك بعد الترسيب الأولي (post-sedimentary) وبعد الدفن جزئياً، عبر تدفق مياه جوفية غنية بالمغنزيوم (Mg-rich fluids) في درجات حرارة منخفضة إلى متوسطة.

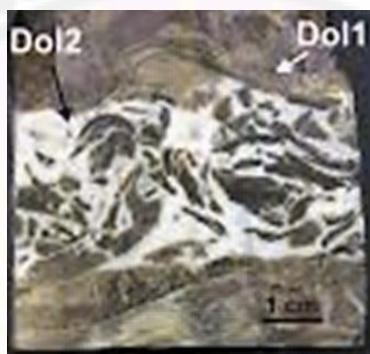
يختلف عن الدولوميت الأولي الذي يتشكل أثناء الترسيب، حيث يرتبط الدولوميت الإيبيجينيزي بظروف متأخرة مثل التعرية أو التدفق الهيدروولوجي، مما يؤدي إلى نسيج بلوري خشن (coarser crystals) وفقدان جزئي للنسيج الأصلي.

يظهر هذا النوع غالباً بحالة دلمنة لبقايا مستحاثية أو غير مستحاثية، ويتبلور في هيئة بلورات كبيرة من الدولوميت، مما يجعله صخوراً خازناً جيداً بفضل زيادة المسامية والثبات.



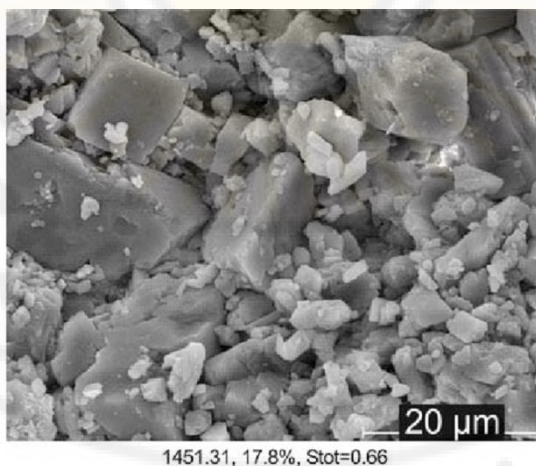
صور بالمجهر الإلكتروني تظهر دولوميت إيبيجينيزي (مشقق).

3- دولوميت بنيوي (Burial Dolomite أو Tectonic Dolomite): يتصف ببنية بلورية واضحة، ويرتبط بالفوالق والتشققات (شقوق تولد مسارات لمحايل (هيدروترمالية) غنية بالمغنزيوم يقوم بالدلمنة)، وهو أقل انتشاراً من النمطين السابقين.



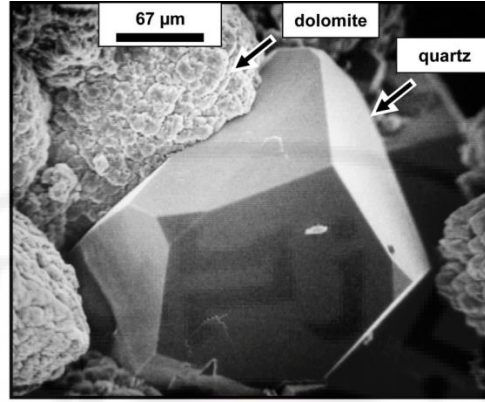
دولوميت بنيوي يملأ الفواصل والشقوق.

4- دولوميت حطامي (Detrital Dolomite): ذو منشأ قاري يأتي من تجوية وتعرية صخور دولوميتية قارة، ويمكن أن يختلط مع صخور مختلفة.



دولوميا حطامية بالمحهر الإلكتروني.

5- دولوميت متأخر أو متأصل (Late or Authigenic Dolomite) : يتشكل خلال مراحل دياجينييز متقدمة وعميقة داخل الطبقات الصخرية. غالباً عند تعرض الصخور لضغط وحرارة مرتفعة نسبياً. يتميز بتركيب بلوري معقد وأحياناً بأحجام بلورات أكبر مقارنة بالدولوميت الأولي.



دولوميت متأخر (صورة بالمجهر الإلكتروني).

6- دولوميت مبلور سرجي (Saddle dolomite): نوع خاص من الدولوميت المبلور ، يُعرف بأشكاله "السرجية" أو المنحنية المميزة للبلورات. ينتج في ظروف دياجينيز أعمق وأشد حرارة، وغالباً في طبقات الكربونات التي تعرضت لعمليات تكسير أو تغيير جيولوجي كبير. قليل الانتشار نسبياً في الصخور الخازنة النفطية بسبب الظروف الخاصة اللازمة لتشكله.



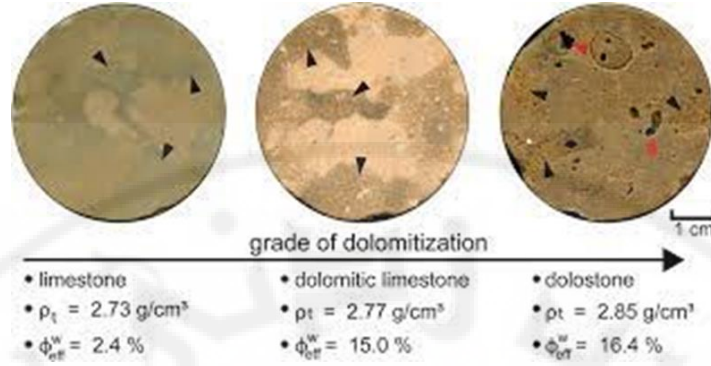
دولوميت سرجي.

هذان النوعان الأخيران يرتبطان بأحداث دياجينيز لاحقة وعميقة في السجل الجيولوجي، وتتميز بإعادة تبلور أو تغيير في تركيب الدولوميت الأصلي، وهي عملية تحدث تحت تأثيرات حرارية وضغطية مرتفعة نسبياً، مما يؤدي إلى تغييرات في التبلور والمسامية الخاصة بالصخر. لهذا السبب فإن هذين النمطين الأخيرين يعتبران أقل شيوعاً في الصخور الخازنة للنفط مقارنة بالدولوميت الأولي والإبيجينيزي التي تتشكل في ظروف أكثر ملائمة لخصائص الهيدروكربون.

العلاقة بين المسامية والدلمة

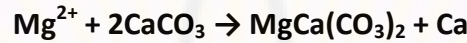
تتشكل المسامات بفعل الدلمة نتيجة:

- استعاضة فلز الكالسيوم بفلز الدولوميت ← (بلورة أعلى كثافة) ← زيادة المسامية بنسبة 13%. علماً أن:
- الدولوميت بحذ ذاته أقل مسامية، إلا أن فرق الحجم ضمن جملة مغلقة يعني تناقص حجم البلورات وخلق فراغات إضافية.



لاحظ زيادة الدلمتة من اليسار لليمين، وزيادة الكثافة، وارتفاع المسامية

- تستخدم حادثة الدلمتة الكربونات الموجودة في الوسط أولاً
- يتم انحلال الكالسيت وتحوليه إلى معينات من الدولوميت أكثر كثافة من الكالسيت (زيادة المسامية)



- تراص هذه المعينات يجعل منها متصلة ببعضها البعض
- باستمرار الدلمتة واستبدال معظم الكالسيت بالدولوميت فإن المسامية تبدأ بالازدياد
- أما في حال كون شوارد الكربونات والمغنيزيوم الضرورية للتحويل قادمة من مصدر خارجي فتستمر الدلمتة بعد استنفاد الشوارد المحلية ما يؤدي إلى زيادة حجم المعينات و تتشكل بالتالي بنية كثيفة غير مسامية.

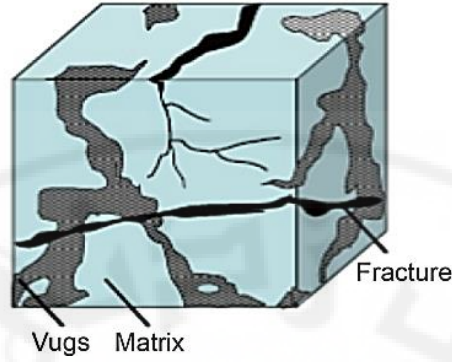
هذا، وتتناسب نوعية المسامات في الصخور المدلمتة مع:

- درجة الدلمتة: الفراغات بين البلورية تتشكل طالما أن الدولوميا المتشكلة لم تصل إلى درجة عالية من النقاوة والتراص.
- أبعاد بلورات الدولوميت: حيث أنه هناك علاقة بين أبعاد البلورات ونوعية الرسوبات المدلمتة:
- الوحول المدلمتة ذات بنية بلورية كثيفة غير مسامية. (قد تزيد الدلمتة).
- الرمال الوحلية المدلمتة تتميز بمسامية 4.8% (قياساً بغير المدلمتة).

- الصخور الرصيفية والكالكارينيت (الميكريتية) لها مسامية تبلغ 12% ونفوذية في حدود 30 ميلي دارسي (بفعل الدلمتة). لا سيما وأن أبعاد بلورات الدولوميت لها دور تأثير كبير على تجانس الاتصال بين الفراغات.

الخزانات المشققة (Fractured Reservoirs)

الخزانات المشققة هي صخور خازنة تحتوي على تشققات طبيعية (natural fractures) تؤثر بشكل كبير على خصائصها الخزنية وامتلاكها للمسامية والنفاذية. وتعمل الشقوق على إيجاد نفوذية عالية في حين تبقى المسامية ضعيفة (تبقى المسامية الأولية (matrix porosity) منخفضة نسبياً). أي تزيد الشقوق من قدرة الصخر على انتاج فحوم هيدروجينية فتوفر مسارات تدفق سريعة للهيدروكربون، مما يزيد من القدرة الإنتاجية للخزان بشكل كبير. فنفوذية شق عرضه 0.25 مم تزيد عن 5000 دارسي (في شروط مثالية) حيث تتناسب النفاذية مع مكعب عرض الشق تقريباً.



خزان مشقق.

خصائصها وصفاتها

- تظهر الشقوق في الصخور شديدة التراص (tight rocks) مثل الصخور الرملية المضغوطة، والدولوميتية، والحجر الكربوناتي ناعم الحبيبات (micritic limestone)، والشيرت (chert)، والغضاريات، وأحياناً الصخور البركانية والانفصالية (volcanics and intrusives).
- تحتوي على مسامية أولية (جزء من الفراغات بين الحبيبات) أقل من 10% بالإضافة إلى مسامية ثانوية عالية تتمثل في التشققات والفواصل.
- النفاذية في هذه الخزانات غالباً ما تكون مرتفعة جداً أو متفاوتة بحسب الاتجاه (anisotropic) بسبب شبكة التشققات التي تسمح بمرور السوائل بشكل أسرع وأكبر من نفاذية مكونات الصخر نفسه.
- تساعد تشققاتها في تخزين كميات أكبر من النفط أو الغاز وفي تسهيل تدفق هذه الموائع عبر الخزان.
- يكون عرض الشقوق ونفوذيتها أعلى كلما كانت أحدث، حيث أن حركة المياه المحملة بالأملاح عبرها يؤدي إلى إغلاقها تدريجياً بفعل ترسب الملاط الكربوني أو السليكا (mineral precipitation) من المحاليل.

أسباب التشققات

- التغيرات الحرارية والضغطية في العمق (thermal/pressure-induced fracturing) أو الضغط الداخلي (overpressure) في العمق ينتج عنه تمدد حراري غير متساوي أو ضغط تفاضلي أثناء الدفن يقود لظهور التشققات.
- الحركات التكتونية مثل الطي والفوالق تسبب حدوث تشققات في الصخر. حيث تحدث بشكل خاص بجوار الفوالق وفي الأجزاء العليا من الطيات على وجه الخصوص.
- عمليات التجوية الكيميائية والفيزيائية تؤدي إلى تشكيل الشقوق نتيجة ضعف بعض الفلزات أو تحللها (Mineral dissolution).
- الانكماش الناتج عن فقدان المياه أو السوائل من الصخور أثناء الدياجينيز (dewatering shrinkage cracks)، وهو أمر شائع في الصخور الطينية والكربونات.

بالتالي، الخزانات المشققة تمثل نوعاً مهماً من الخزانات في علم جيولوجية النفط، حيث تلعب التشققات دوراً رئيسياً في تحسين قدرات تخزين وتوصيل النفط والغاز داخل الصخور الخازنة.

الصخور المغطية (Cap Rocks أو Seal Rocks)

تعريف

هي طبقات كثيفة تمنع من حركة وانتقال الفحوم الهيدروجينية في الاتجاه العمودي على التطبيق وبالتالي فهي تعاكس في تأثيرها الصخور الخازنة. وليست بالضرورة كل الصخور غير الخازنة هي صخور مغطية فبعضها يمكن أن يتصرف كصخر أم، وليس بالضرورة أن تكون هذه الصخور غير نفوذة للماء.

الخصائص البتروفيزيائية والجيولوجية للصخور المغطية

- **عدم النفوذية:** خاصية تؤدي إلى ضغط دخول عالي وأعلى من ضغط الطبقات المجاورة عموماً. ارتفاع الضغط هذا سببه:

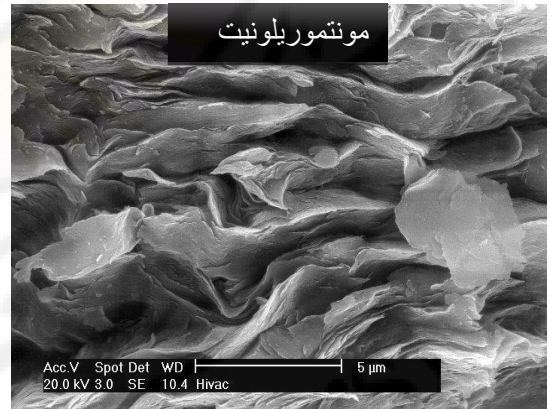
- المسامية الصغيرة (أقل من 5%) المؤدية إلى تشكل القوى الشعرية
- الضغوط العالية للموائع الحبيسة بين الحبات

- **اللدونة (Ductility):** خاصية ميكانيكية تسمح للصخر بالتشوه "بلاستيكياً" دون تكسر ما يسمح للصخر بالمحافظة على خصائصه الغطائية وذلك عند تعرض هذه الصخور إلى التشوهات البنيوية.

ترتبط كل من عدم النفوذية واللدونة بالخصائص المنيرالوجية والهيدروجيولوجية والبنيوية لهذه الصخور

أ- الخصائص المنيرالوجية (الفلزية)

- أي طبيعة و توزع الفلزات أو البلورات المكونة للصخر المغطي.
- المونتموريلونيت مثلاً يُظهر بفضل بنيته الورقية خصائص غطائية تفوق خصائص الكاولينيت.
- يلعب الدياجينيز دوراً هاماً في تحديد خصائص الصخر الغضاري المغطي فتقل المسامية بازدياد عمق التوضع وتتعلم المسامية ابتداءً من عتبة 1200 م حيث لا يتبقى إلا مسامية ناعمة جداً. واعتباراً من 2000 م تبدأ ظواهر التشقق (micro-fracturing) بسبب الضغوط التفاضلية التي تؤدي إلى تغير في عدم نفوذية الغضار.



البنية الورقية للمونتموريلونيت مقابل الكاولينيت

ب- الخصائص الهيدروجيولوجية

- تؤدي المياه إلى ارتفاع الضغوط الداخلية في الصخر، مما يعزز عدم النفاذية ويمنع هجرة الهيدروكربونا، وهذه المياه تكون:
- المياه الحبيسة (connate/formation water) في الصخر وهي محصورة داخل المسامات الدقيقة منذ الترسيب، تخلق ضغطاً داخلياً عالياً يفوق ضغط الخزان المجاور، مما يعمل كآلية إضافية للغطاء، تؤدي إلى ارتفاع الضغوط الداخلية.

- المياه الهيكلية (structural water) مدمجة كيميائياً في تركيب الفلزات (خاصة المونتموريلونيت والجص) أي مياه تدخل في تركيب الفلزات وبخاصة في المونتموريلونيت والجص (الذي يتحول إلى أنهدريت).
حيث أن:

المونتموريلونيت: يحتوي مياهاً بين الطبقات (interlayer H₂O) تشكل <20% من وزنه، مما يمنحه لدونة وتمدداً عند الرطوبة.

الجص (CaSO₄·2H₂O): يتحول إلى أنهدريت (CaSO₄) عند دفن <800-1000 م، بفقدان المياه بين البلورية ومكتسباً نفاذية أقل (>0.01 ميلي دارسي).

ج- الوضع البنيوي

يؤثر الوضع البنيوي على الخصائص البتروفيزيائية للصخور المغطية، حيث:

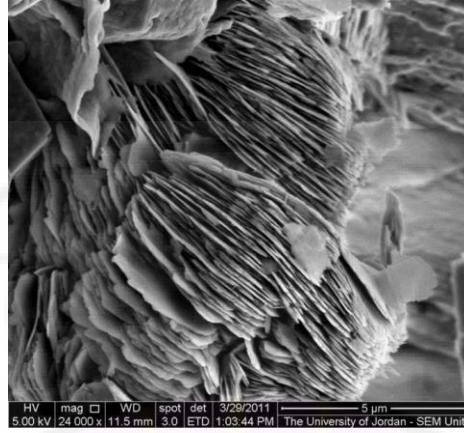
- يزداد التأثير كلما كانت الصخور أقل لدونة. إذ تنكسر تحت الضغط التكتوني فاقدةً سلامتها الغطائية بواسطة الشقوق (fractures).
- الشد يفقد الصخر خصائصه الغطائية. فالتشوه الهش (brittle deformation) يُضعف الصخر ويفقده خصائصه الغطائية بسبب تشكل ممرات تسرب (leakage paths).
- الانضغاط يعمل على الحفاظ على هذه الخصائص وتعزيزها عبر إعادة الإغلاق الذاتي (self-sealing) أو الالتئام (healing).

الأنواع الرئيسية للصخور المغطية

- الغضاريات (Shales): وهي الأكثر انتشاراً (70% تقريباً من غطاءات الحقول العالمية)
- الصخور الملحية: هي الأكثر فعالية وتعرف بعدم نفوذيتها للماء والغاز (>10⁻⁶ ميلي دارسي) مثر الأنهدريت.

1. الغضاريات

- تتمتع بعدم النفاذية العالي والدونة الجزئية.
- يعود عدم النفوذية لنعومة الحبات (أقل من 2 ميكرومتر) وبالتالي نعومة الفراغات (أقل من 0.01 ميكرومتر) ما يولد قوى شعرية عالية.
- هناك علاقة بين ضغط الدخول المرتفع وأبعاد هذه الفراغات. حيث يزداد ضغط الدخول بتناقص حجم الفراغات وتزايد الضغوط الداخلية.
- تتناقص نفوذية الغضاريات مع عمق الترسيب بفعل التراص والتملط حتى ظهور التشققات الصغيرة التي تزيد في نفوذية الصخر محلياً (يكون هذا الازدياد كبيراً كلما كانت القوى البنيوية أكثر تأثيراً).
- خاصية الدونة هي نتيجة التوزع الورقي للفلزات كما في المونتموريلونيت.



صورة بالمجهر الالكتروني تظهر التوزع الورقي للغضاريات.

2. الصخور الملحية

تتمتع بمجموعة من الخصائص:

- تتكون من بلورات مثل الهاليت (halite) أو فلزات تبخرية أخرى ذات كثافة منخفضة (≈ 2.16 غ/سم³) ومقاومة ميكانيكية ضعيفة، مما يجعلها لدنة تحت الضغط. وتتميز ببنياتها البلورية بأنها ذات تماسك داخلي مرتفع فهي بالتالي ذات ضغط داخلي مرتفع.
- تتبلور أولاً من مياه مشبعة بالأملاح مثل مياه بحرية مشبعة بالأملاح في بيئات تبخير (evaporative basins).
- غالباً ما يؤدي الدياجينيز إلى طرد المياه منها مثل تحول الجص لأنهدريت، ما يزيد تماسكها. مثل تحول الجص إلى أنهدريت عند أعماق أكبر من 800 م مما يزيد التماسك والكثافة (2.96 غ/سم³).
- بسبب لدونتها العالية فإن هذه الصخور تفتقر لمسامية فعالة ($> 1-5\%$) كما تفتقر لنفوذية جيدة حيث أن نفاذيتها شبه معدومة (أقل من 10^{-6} ميللي دارسي)، وتعمل كصخور مغطية (seals).
- تتصف هذه الصخور بلدونة عالية تسمح بإعادة تماسكها (self-healing) في المناطق المعرضة للقوق والتشققات.
- خاصة اللدونة هي المسؤولة عن الانبثاقات الملحية (salt diapirs) وعن هجرة الملح (halokinesis) نتيجة الكثافة المنخفضة مقارنة بالصخور المحيطة.
- يعتبر الانهدريت هو الأكثر انتشاراً كصخر مغطي مثالي.



صور عينات من الفلزات التبخرية: جص (Gypsum) و أنهدريت (Anhydrite).

3. غطاءات مختلفة

- يمكن أن تقوم بعض الصخور الكربونائية أو الأحجار السلتنية بدور الغطاء.
- يكون ذلك شائعاً في الأحواض ذات التكتونيك الضعيف أو المعدوم.
- يضعف هذا الدور (أي الخاصية الغطائية) بزيادة الدروز في حالة الصخور الكربونائية.

- السويات الحاملة للماء التي يزيد ضغطها عن ضغط الطبقات الأكثر عمقاً يمكنها أن تشكل غطاءات فعالة بالرغم من مساميتها الضعيفة لكنها لا تقوم بهذا الدور إلا اذا كانت مغطاة بطبقات ذات ضغط عالي.
- بعض التشكيلات غير الخازنة لا تشكل بالضرورة صخوراً مغطية. كونها تسمح بحركة الموائع ضمنها. وتسمى هذه الصخور بالغطاءات الكاذبة.



هجرة النفط (Petroleum Migration)

من المرجح أن البترول والغاز الطبيعي لم يتكونا في الصخور التي يتواجدان فيها، بل هاجرا إليها؛ وذلك لأن صخور المكامن تتميز بالنفاذية والمسامية اللذان لا يساعدان على حفظ المادة العضوية الأصلية، إذ تتلف هذه المواد بفعل الأكسدة الناتجة عن نفاذية صخور المكامن، مما يتطلب طمرها بطبقات سميكة من الرسوبيات الناعمة لحفظها من الأكسدة. ومن ثم فإن البترول لابد أن يكون قد هاجر من بيئة صخور المصدر المرجعة إلى صخور المكامن.

ولا شك أن وجود البترول والغاز في الطبقات العليا للمصادر التركيبية أو الطبقة يؤكد الهجرة الرأسية والجانبية للخامات، كما أن الرشح البترولي يؤكد حركة الزيت من أعماق كبيرة إلى سطح الأرض. نلاحظ كذلك وجود البترول والغاز والماء في صخور المكامن المسامية والنفاذة في ترتيب طبقي تبعاً للوزن النوعي لهذه المواد، فيكون الماء أسفلها والغاز أعلاها، ما يدل على حرية حركتها رأسياً وأفقياً. ومن ناحية أخرى فإن وجود البترول في بعض الحالات القليلة في صخور نارية أو متحولة يؤكد هجرته إلى مثل هذه الصخور، إذ يستحيل عملياً أن يتكون البترول في تلك الصخور التي تملأ تماماً من الكائنات العضوية.

تمثل الهجرة المرحلة الثانية في النظام البترولي (petroleum system) بعد التولد (generation) وقبل التراكم (accumulation)، وتحدث بفعل قوى مثل الطفو (buoyancy) الناتجة عن الكثافة المنخفضة للهيدروكربون مقارنة بالمياه المحيطة، مدفوعة بالضغط التفاضلية (differential pressure) والقوى الشعرية (capillary forces)، عبر مسافات قد تصل إلى عشرات أو مئات الكيلومترات، وهي تعبير عن انتقال المواد الهيدروكربونية السائلة (النفط) والغازية من صخور المصدر (source rocks) حيث تتكون، عبر مسارات نفوذة (carrier beds)، إلى صخور الخزان (reservoir rocks) حيث تتراكم. هذه العملية بطيئة جيولوجياً (ملايين السنين) وتعتمد على توافر ممرات هجرة (migration pathways) غير محكومة بصخور مغطية.

من أهم الدلائل على هجرة الهيدروكربون:

1. تواجد الكثير من التراكبات الهيدروكربونية في أعماق ضحلة غير كافية لتحويل المادة العضوية إلى كميات ونوعيات مناسبة من النفط والغاز.
2. تراكم المواد الهيدروكربونية النفطية والغازية في القمم البنيوية.
3. تواجد بعض التراكبات النفطية في صخور نارية أو متحولة.
4. وجود الآبار البترولية غزيرة التدفق.
5. تعدد المستويات الخازنة في الحقل الواحد حيث لا توجد ولو حالة في الأحواض الغنية جداً ينحصر فيها النفط في صخور خازنة من عمر واحد ويفوق عدد المستويات الخازنة في الحالة العامة عدد المستويات الصخرية التي يمكن الاعتقاد بأنها تمثل الصخور المولدة.
6. تواجد معظم التجمعات النفطية في صخور يستبعد أن تكون قادرة على حفظ المواد العضوية وذلك كالحجر الرملي الذي يعد من أكثر الصخور الخازنة شيوعاً.
7. وجود الشواهد التي تدل على وجود تراكبات نفطية سابقة حيث تظهر في العديد من المصادات الجافة بقع نفطية ثقيلة. لا يمكن إزالتها بالمذيبات العضوية العادية مما يدل على أن هذه الصخور كانت تحتوي سابقاً على تراكبات بترولية وأن هذا النفط قد هاجر من مكانه بسبب تدفق المياه أو عن طريق أية آلية أخرى.
8. وجود النفط في الفجوات والكسور التي تكونت بعد دفن وتصلب الصخور المضيفة.
9. وجود التسربات النفطية السطحية.

تصنيف هجرة الهيدروكربون

يمكن تقسيم هجرة المواد الهيدروكربونية إلى أنواع مختلفة بحسب مجموعة من الأسس، وفيما يلي أهم أنواع الهجرات وفقاً لتلك الأسس:

1. على أساس طبيعة الحركة، أو الهجرة، حيث يميز بين الأنواع التالية:

- أ. هجرة حرة Free Migration
- ب. هجرة على شكل محاليل Solution Migration
- ت. هجرة بالانتشار Diffusion Migration

2. اعتماداً على مدى الهجرة، ويميز هنا بين:

- أ. هجرة محلية Local Migration
- ب. هجرة إقليمية Regional Migration

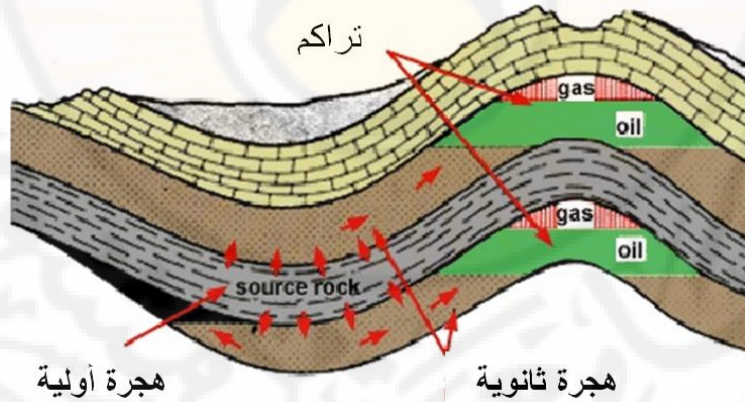
3. اعتماداً على طريق أو اتجاه الهجرة:

- أ. هجرة جانبية Lateral migration
- ب. هجرة رأسية Vertical migration

4. اعتماداً على مكان وزمن الهجرة ويميز هنا بين:

- أ. هجرة أولية Primary migration
- ب. هجرة ثانوية Secondary migration
- ت. هجرة ثالثة Tertiary migration

تحدث الهجرات الأولية فور تشكل الفحوم الهيدروجينية اعتباراً من الصخور ذات البنية الناعمة التي تشكلت فيها نحو الصخور الخزنة ولمسافات قليلة (1 - 15 م). بينما تحدث الهجرات الثانوية ضمن الصخور النفوذة ولمسافات وطويلة وخلال فترات زمنية كبيرة، أما الهجرة الثالثة فهي مصطلح يعبر عن حركة الفحوم الهيدروجينية اعتباراً من أماكن تراكمت فيها سابقاً.



الهجرة الأولية والهجرة الثانوية.

إذاً، فإننا نميز بين:

- الهجرة الأولية (Primary Migration) وهي خروج الهيدروكربون من صخور المصدر الناعمة منخفضة النفاذية (أقل من 1 ميلي دارسي) إلى الطبقات المجاورة النفوذة، بفعل الضغط الناتج عن الضغط/الحرارة أثناء الدفن أو الطمر.
- الهجرة الثانوية (Secondary Migration) حركة الهيدروكربون داخل الصخر الخازن (مثل الصخور الرملية أو الكربوناتية) باتجاه أعلى حتى تصطدم بصخر غطاء (cap rock).

- الهجرة الثالثة: (Tertiary Migration) تسرب من تراكم معرض للكسر أو التصدع إلى السطح (leakage).

أهمية دراسة الهجرة

- دراسة هجرة النفط ذات أهمية كبيرة في الاستكشاف البترولي، حيث:
 - تساعد في معرفة نوعية الهيدروكربون المطرود من صخر الأم، مما يحدد نوع النفط أو الغاز الموجود في المكن.
 - تعطي معلومات حول كفاية وكمية الهيدروكربون المطرود ومدى استمرارية هذه العملية.
 - توفر تقديراً زمنياً لزمان بداية ونهاية الهجرة، وهو ضروري لفهم تطور المكن وحالته الراهنة.
 - تحدد مسارات الهجرة التي سلكها النفط، مما يساعد في تتبع مناطق التركيز وزيادة فرص العثور على مكن.
 - تكشف عن الحواجز والعوائق التي قد تمنع أو تعرقل هجرة النفط، مثل الطبقات العازلة أو الانكسارات.
 - تقدر المسافات التي قطعها النفط من الصخر الأم إلى الخزان، مما يؤثر على جودة وتوزيع المكونات النفطية.
 - تدعم فهم العلاقة بين الغاز والنفط، والتأثيرات التكتونية والجیولوجية على حركة النفط داخل الأرض.
 - تساعد في تقييم احتمال وجود تسربات أو فقدان للهيدروكربون أثناء الهجرة، وهو أمر مهم في التقييم الاقتصادي.
- بالتالي، دراسة هجرة النفط لا تقتصر على تتبع حركة النفط فقط، بل تتضمن تحليل شامل لعمليات التشكل، التخزين، وفقدان النفط، مما يعد أساساً لنجاح عمليات الاستكشاف والاستخراج.

الهجرة الأولية (Primary Migration)

حركة الهيدروكربون من صخور الأم المولدة الناعمة (الطينية) منخفضة النفاذية فور تولده ضمن الصخر الأم باتجاه الطبقات النفوذة المجاورة، وتتفاوت فعالية هذه الهجرة حسب حجم الجزيئات. حيث تختلف قدرة المركبات الهيدروكربونية على الحركة باختلاف نوعية تلك المركبات. فالقطر الجزيئي الفعال لمركب مثل الميثان يبلغ حوالي 3.8 أنغستروم في حين أنه يبلغ في الأسفلتينات بين 50 إلى 100 أنغستروم، والوزن الجزيئي للميثان يبلغ 16 في حين أنه يتجاوز الـ 5000 في الأسفلتين.

أهم الآليات المقترحة لهجرة المواد الهيدروكربونية:

1. الهجرة على شكل محلول.

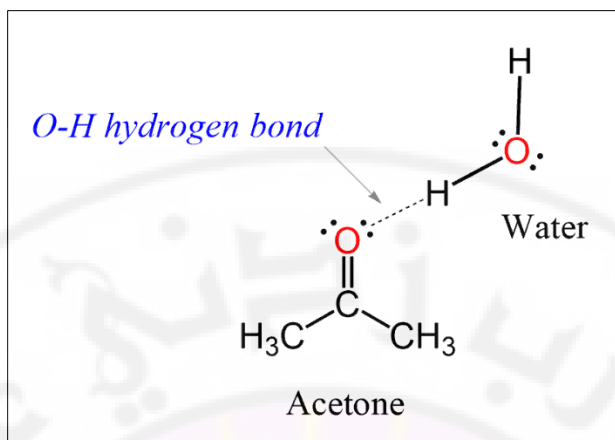
ويميز فيها بين:

أ. الهجرة على شكل محلول حقيقي

الهجرة على شكل محلول حقيقي للمركبات الهيدروكربونية تعني انتقال جزيئات الهيدروكربون وهي منحلة فعلاً في طور مائي (عادة ماء مالح) وليس كطور نفطي أو غازي منفصل. تعتمد على انحلال بعض المركبات الهيدروكربونية في الماء تحت ظروف ضغط وحرارة معينة داخل الصخور الأم أو التشكيلات الرسوبية.

المبدأ

المركبات الهيدروكربونية بشكل عام مركبات غير قطبية، ولذلك فإن انحلالها في الماء (مركب قطبي) ضعيف جداً عند الظروف العادية بسبب اختلاف قطبيتها. ومع ذلك، فإن بعض مركبات الهيدروكربون القطبية أو المحتوية على مجموعات قطبية يمكن أن تكون قابلة للذوبان في الماء، مما يسمح لها بالهجرة بشكل محلول حقيقي ضمن الماء الموجود في الفراغات الصخرية. هذه الهجرة (على شكل محلول) تعني قدرة هذه المركبات على التنقل في محلول مائي خلال الصخور الأم أو الصخور الخازنة.



مثال عن مركب عضوي قطبي (الأسيتون) بسبب وجود مجموعة الكربونيل $C=O$ ، الأوكسجين شديد السالبة الكهربائية يجذب الإلكترونات الرابطة $C=O$ مكوناً قطب سالب، الكربون في $C=O$ يصبح قطب موجب ما يخلق ثنائية قطبية، O في $C=O$ قطب سالب و H في H_2O قطب موجب. يمكن للأسيتون الهجرة منحللاً بالماء على شكل محلول حقيقي.

العوامل المساعدة

- وجود الماء في الفراغات الصخرية وضغط ودرجة حرارة مرتفعة تساهم في زيادة الانحلالية لبعض المركبات القطبية.
- وجود عوامل تعزز الذوبان أو الانحلال (مثل المركبات العضوية أو الحموض) تساعد على تحلل وتفكك بعض المركبات، مما يزيد من ذوبانها.
- الخواص الكيميائية والتركيب الجزيئي للمركبات الهيدروكربونية، حيث المركبات ذات القطبية الأعلى تذوب بشكل أفضل.

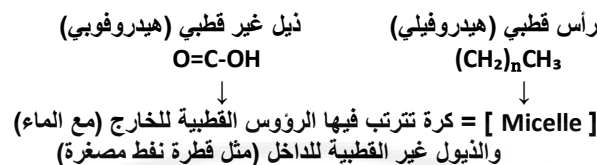
المعوقات

- الغالبية العظمى من المركبات الهيدروكربونية هي مركبات غير قطبية، وبالتالي مقاومتها للذوبان في الماء تعوق الهجرة على شكل محلول.
- اختلافات الضغط ودرجة الحرارة يمكن أن تقلل من الانحلالية أو تجعل الهجرة غير فعالة. فزيادة التشبع الغازي للماء يقلل من قابلية انحلال المركبات الهيدروكربونية فيه.
- تفاعل المركبات مع المكونات الأخرى في الصخور مثل الفلزات الطينية (الغضاريات) قد يقلل من كمية الهيدروكربون القابلة للهجرة في المحلول. وذلك بفعل التأثير الكهربائي العكسي الذي تمارسه تلك الفلزات والتصاق بعض المركبات الهيدروكربونية فيها.
- الانحلال محدود جداً مقارنة بالهجرة النفطية الغازية أو السائلة، فالهجرة بالمحلول مجرد جزء صغير من طرق الهجرة.

باختصار، على الرغم من ضعف انحلال معظم المركبات الهيدروكربونية في الماء بسبب اختلاف قطبيتها، فإن وجود مركبات قطبية قابلة للذوبان في الماء يسمح لهجرة جزئية على شكل محلول عبر المياه الصخرية، وهذه الهجرة تعتمد على درجة الحرارة، الضغط، وجود عوامل محفزة كيميائية، وبنية المركبات الكيميائية نفسها.

ب. الهجرة على شكل محاليل غروية ومذيلات

هجرة المركبات الهيدروكربونية على شكل محاليل غروية (Colloidal solutions) ومذيلات **Micelles** (جزيئات هيدروكربونية ذات رأس قطبي محب للماء **Hydrophilic** وذيل غير قطبي كاره للماء **Hydrophobic**) تمثل طرقاً مهمة لهجرة نسب معينة من المركبات الهيدروكربونية خلال الصخور الرسوبية. كما في المخطط التالي:



بنية مذيل Micelle

- تتشكل المحاليل الغروية عندما تتجمع جزيئات صغيرة (1-100 نانومتر) من المركبات الهيدروكربونية في وسط مائي معزولة بطبقة سطحية من الماء أو المذلات مما يمنعها من الاتحاد لتشكل طور منفصل (مثل النفط الحر). يسمح ذلك بالتالي بهجرة هذه الجزيئات الصغيرة بشكل معلق داخل المياه الطبقية.
- المذيلات هي مركبات لها قدرة على الترابط مع مركبات قطبية وغير قطبية، وتسهل حركة المركبات الهيدروكربونية سواء على شكل مجموعات "hydrophobic" كارهة للماء (التي ترفض الماء) أو "hydrophilic" المحبة للماء التي تفضل الارتباط مع الماء، مما يؤثر على قدرة الهيدروكربون على الهجرة داخل الشبكات المائية والرسوبية.

العوامل المساعدة

- وجود مواد عضوية أو مركبات كيميائية تعمل كمذيلات طبيعية داخل الصخور الأم والمكمن.
- وجود الماء في الفراغات الصخرية مع درجات حرارة وضغط مناسبين لتكوين واستقرار هذه المحاليل الغروية.
- نشاط التيارات المائية وحجم التشققات التي تسمح بمرور المحاليل الغروية والمذيلات.
- يجب أن تكون هذه الجسيمات أصغر بكثير من حجم الفراغات المسامية، لكي تتمكن من أن تتحرك بسهولة أكبر، مما يسهل هجرة الهيدروكربون.

المعوقات

- الطبيعة غير القطبية للمركبات الهيدروكربونية تجعل ذوبانها في الماء ضعيفاً بشكل عام، مما يحد من نسبة الهجرة بهذه الطريقة.
- الظروف المسيطرة غير المستقرة (مثل تغيرات درجة الحرارة أو الضغط) قد تسبب تحلل وإعادة تجمع هذه المحاليل، مما يعيق الهجرة المستمرة.
- التفاعلات مع الفلزات أو الغضاريات داخل الصخور قد تؤثر على استقرار المذيلات والمحاليل الغروية.
- إذا كان حجم الغرويات أو جزيئات الهيدروكربون المنحلة والمذيلات أكبر أو قريب من حجم الفراغات المسامية في الصخر، فمن شأن ذلك أن يعيق أو يمنع مرور هذه الجسيمات، مما يقلل من كفاءة الهجرة.
- التأثير الكهربائي العكسي يمكن أن يسبب تجمع أو تشتت الجسيمات، وبالتالي يؤثر على مسارات تدفق الموائع داخل الخزان. حيث تحمل عادةً الصخور والفلزات الغضارية شحنات كهربائية على أسطحها، ويؤدي ذلك إلى تشكل طبقة كهربائية مزدوجة (Electric Double Layer) حول الجسيمات. هذا التأثير يولد قوى جذب أو تنافر بين جزيئات الغرويات والمذيلات، وبين هذه الجزيئات والأسطح الصخرية، مما يؤثر على استقرار المحاليل الغروية وقدرتها على الهجرة.

باختصار، هجرة الهيدروكربون على شكل محاليل غروية ومذيلات تعتمد على قدرات هذه المركبات على تشكيل حالة مستقرة تسمح لها بالانتقال مع المياه ضمن الصخور، وهذا النوع من الهجرة يُعد هاما في نقل مركبات قطبية أو ذات وزن جزيئي صغير داخل النظام النفطي.

2. الهجرة على شكل أطوار هيدروكربونية سائلة أو غازية منفصلة

المبدأ

تحدث الهجرة بدفع الهيدروكربون بالماء في المسامات بفعل قوى الطفو وفروق الضغط، حيث يتغلب الهيدروكربون على قوى التوتر السطحي والقوى الشعرية. ويهاجر الغاز بسهولة أكبر من النفط بسبب كثافته المنخفضة ولزوجته الأقل وقدرته على تجاوز المسامات الضيقة الممتلئة بالماء. وتصل نسبة انحلالية الغازات في المياه في الأعماق الكبيرة إلى 5% ويمكن لهذه الغازات أن تتحرر عندما يخف الضغط مهاجرة على شكل طور غازي منفصل، كما يمكن لهذه الغازات المنحلة والمضغوطة أن تساهم في رفع انحلالية المركبات الهيدروكربونية السائلة.

العوامل المساعدة

- ارتفاع تشبع المسام بالزيت أو الغاز (تجاوز التشبع الحرج)
- وجود ضغط متزايد في الصخور الأم يساعد على دفع الهيدروكربون نحو الفراغات المسامية.
- بنية مسامية عالية ونفاذية جيدة تسمح بمرور الأطوار المنفصلة بسهولة بين المسامات.
- نوع تبلل الصخور: في الصخور المحبة للزيت تزداد قابلية الحركة للهيدروكربون، وفي الصخور المحبة للماء غالباً ما يحتاج الهيدروكربون إلى ضغط أكبر للحركة.
- فروق الكثافة (الطفو) بين الهيدروكربون والماء، بالإضافة إلى القوى الشعرية.

المعوقات

- انخفاض النفوذية أو وجود مسامات دقيقة جداً يصعب على جزيئات النفط أو الغاز اختراقها.
- سيطرة تبلل الماء: الماء يلتصق بجدران المسامات، فيعوق تشكل وعبور الطور الهيدروكربوني. يحتاج الهيدروكربون في هذه الحالة إلى ضغط أعلى لتجاوز قوى التوتر السطحي والقوى الشعرية الموجودة بسبب الماء الملتصق، مما يقلل من سهولة وتدفق هجرة النفط داخل الصخور.
- انخفاض فروق الضغط أو غياب القوى الدافعة (الضغط، الطفو) يؤدي إلى احتجاز الهيدروكربون داخل المسامات.
- وجود حواجز جيولوجية أو مصائد غير فعالة قد يمنع استمرار الهجرة أو احتجاز النفط والغاز في أماكن غير منتجة.
- فقدان الهيدروكربون أثناء الهجرة بسبب التشبع غير الكافي أو الاحتجاز الشعري.

بالمحصلة، تتطلب هجرة الهيدروكربون كطور منفصل تحقق مجموعة عوامل فيزيائية وجيولوجية لتمكن الطور من الحركة، وتتحكم الطبيعة التبللية للصخر وقيم النفوذية النسبية والحواجز الجيولوجية في مدى كفاءة ونجاح هذه الهجرة

أشكال إضافية للهجرة

1. الهجرة على شكل قطرات نفطية

المبدأ

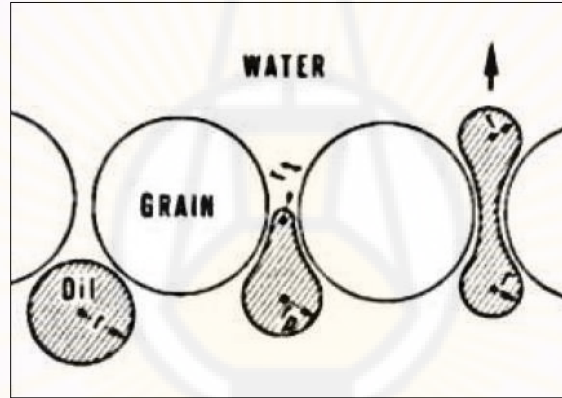
- تحدث هذه الهجرة عندما يتصاعد ضغط النفط الناتج عن توليده في الصخور العميقة بفعل تراكم الرواسب وزيادة عمق الطمر. هذا الضغط يدفع قطرات النفط للتحرك ومحاولة تجاوز الاختناق المسامي. يمكن للنفط أن ينجح في الهجرة عبر مسامات صخرية أصغر حجماً منه إذا تجاوز الضغط الشعري (capillary pressure) الحد المطلوب، والذي يرتبط بحجم قطرات النفط وقطر المسام.
- الضغط الشعري هو القوة التي تمنع سريان النفط بسبب قوى التوتر السطحي والاحتكاك في المسامات.
 - قطر المسام الأصغر يعني ضرورة وجود ضغط شعري أعلى لتجاوز الاختناق.

العوامل المؤثرة

- حجم القطرات النفطية : كلما كانت القطرات أصغر، زادت قدرتها على المرور خلال فراغات مغلقة أو ضيقة، مما يسهل الهجرة.
- قطر المسام : كلما كانت المسامات أكبر، أقل ما يحتاجه النفط من ضغط لتجاوز الاختناق.
- الضغط الشعري : يرتبط بعوامل التوتر السطحي، ويزداد مع صغر حجم المسام أو زيادة احتكاك السطوح.
- عمق الطمر : مع زيادة العمق يزداد الضغط وترتفع درجة حرارة الصخور، مما يعزز توليد الهيدروكربون ويزيد الضغط الداخلي المطلوب لدفع الهجرة.
- توليد الهيدروكربون : يزيد من الضغط الشعري الداخلي والضغط الانحصاري في الصخور الناتج عن تولد المزيد من المركبات الغازية والسائلة.

كيف تتجاوز قطرات الزيت الاختناق؟

- عند تجاوز الضغط الشعري المطلوب، تبدأ القطرات بالتحرك عبر المسامات، حيث تدفعها قوى الطفو والضغط للاختراق خلال الممرات الضيقة.
- ينجم عن هذا التوازن بين حجم القطرة وحجم المسامات وقوى الضغط الشعري أداءً فعالاً يسمح بالهجرة حتى عبر المسام الضيقة.
- قد تنساب القطرات النفطية على طول جدران المسام أو تتجمع مؤقتاً عند نقاط الاختناق قبل تجاوزها.



انتقال القطرة النفطية عبر الاختناق المسامي ضمن صخر ميلل بالماء. يقاوم الضغط الشعري قوى التعويم حتى يتساوى نصفي القطرين الدراخليين لانحناء القطرة النفطية في النهايتين السفلية والعلوية.

2. الهجرة بالانتشار

هجرة النفط أو الغاز بالانتشار (Diffusion) تشير إلى انتقال جزيئات الهيدروكربون من الأماكن ذات التركيز العالي إلى الأماكن ذات التركيز المنخفض (عبر تدرج التراكيز)، بهدف معادلة التراكيز في الصخور. هذا النوع من الهجرة يعتمد على فرق التركيز وليس على حركة الطور الكتلي.

كمثال معروف، يحتاج غاز الميثان حوالي 140 مليون سنة لينتقل رأسياً مسافة حوالي 1470 متراً بواسطة الانتشار. وهذا يوضح أن الهجرة بالانتشار في العموم عملية بطيئة جداً ولا تسهم بشكل كبير في انتقال الهيدروكربون عبر الصخور.

لذلك، فإن دور الهجرة بالانتشار محدود جداً مقارنة بآليات الهجرة الأخرى مثل الهجرة بالطور الحر (سائلة أو غازية) أو الهجرة على شكل محاليل غروية. وعادةً ما تكون الهجرة الفعالة للهيدروكربون هي نتيجة لقوى الطفو والضغط التي تدفع الطور الهيدروكربوني عبر مسامات الصخور.

يوضح هذا أن الانتشار هو آلية ثانوية في هجرة النفط والغاز، ويقتصر على مراحل أو مسافات صغيرة؛ بينما الهجرة بالطور الحر تعتبر الأساس في حركة السوائل والغازات الهيدروكربونية داخل الرسوبات.

3. الهجرة عن طريق تشقق الصخور

تعتمد هجرة الهيدروكربون عبر تشقق الصخور على وجود ضغوط داخلية متزايدة في الموائع المحصورة ضمن المسامات الصغيرة (جيوب الغاز المضغوط *overpressured gas pockets*) في الصخور الكثيفة وعميقة الطمر، والغنية بالمادة العضوية.

مع توليد الهيدروكربون في الصخور عميقة الطمر بفعل زيادة الحرارة والضغط، يتراكم الضغط داخل هذه المسامات والجيوب الضيقة. هذا الضغط التراكمي أو الضغط الداخلي للموائع يدفع لتشكيل شقوق صغيرة أو تشققات في الصخور، خصوصاً في المناطق التي تعاني من ضعف النفاذية. تسمح هذه الشقوق للسوائل والغازات المحتبسة بالهروب والهجرة بسرعة أكبر من خلال مسارات ذات مقاومة ضئيلة مقارنة بالمسامات الدقيقة العادية. يسمح ذلك للهيدروكربون بالتحرك رأسياً أو أفقياً لمسافات طويلة، مع تجاوز العوائق الشعرية والمسامية.

باختصار، دور الضغوط الداخلية المتولدة من هيدروكربون فوق مضغوطة (*overpressured hydrocarbons*) في الصخور ذات المادة العضوية العالية هو توليد شقوق تساعد في تخفيف الضغط وتفتح قنوات للهجرة، ما يسهل حركة النفط والغاز في الصخور الثقيلة والعميقة التي يصعب دخولها بالطرق العادية.

ويمكن للضغط الداخلي للسوائل في الصخور أن يصل في الصخور الموجودة على عمق 3100م إلى حوالي 750 Kg/cm^2 أي أكثر بحوالي 2.5 مرة من الضغط الصخري الساكن على نفس العمق.

تعود تلك الشقوق للالتحام بفعل الضغط الصخري الكبير، لتتراكم الضغوط من جديد مع استمرار توليد الهيدروكربون لتتكرر العملية من جديد ويتم تأمين مسارات للهيدروكربون سواء غازياً أو سائلاً ليتحرك على شكل أطوار متصلة أو مستمرة. ويمكن القول أن الشقوق الدقيقة المتشكلة بفعل التوليد وتمدد السوائل والغازات تشكل ميكانيكية أساسية في الهجرة الأولية وخصوصاً على أعماق تزيد عن 2000 متر.

الهجرة الثانوية (Secondary Migration)

تعريف

الهجرة الثانوية للهيدروكربون هي حركة الهيدروكربون داخل الصخور الخزنة ذات المسامية الجيدة، وتتم هذه الحركة على مسافات كبيرة داخل الصخور الحاملة (خارج الصخور الأم). تتم غالباً بشكل رأسي أو جانبي، حيث تتحرك أو تهجر السوائل والغازات نحو المصائد الطبيعية بفضل قوى مثل الطفو، الضغط، والفارق في درجة التشبع.

أما **الهجرة الثالثة** فهي مرحلة لاحقة بعد التراكم الأولي في الخزان (كما ذكر سابقاً)، وتتم خلال تغييرات تكتونية أو ضغوط جيولوجية تسبب إعادة توزيع الهيدروكربون داخل الخزان، أو دفعها نحو مناطق تجمع جديدة أو تحررها من خزاناتها الأصلية مما يؤدي إلى إعادة هجرة إضافية قد تغير من توزيع الاحتياطيات النفطية أو الغازية في الحوض.

تصنيف الهجرة الثانوية

تصنف الهجرة الثانوية للهيدروكربون حسب اتجاه الحركة إلى نوعين رئيسيين:

1. الهجرة الثانوية الرأسية، حيث يتحرك الهيدروكربون عمودياً من الطبقات السفلى إلى الطبقات العليا بسبب قوى الطفو والضغط. تعد هذه الحركة أساسية لنقل النفط والغاز من الصخور الأم إلى الصخور الخزنة.
2. الهجرة الثانوية الأفقية، وهي حركة الهيدروكربون داخل الصخور الحاملة أو المكامن في اتجاهات أفقية نتيجة وجود اختلافات في الضغط أو وجود مسارات ذات نفاذية مختلفة، وتتميز هذه الهجرة بأنها تعيد توزيع الموانع داخل الخزانات النفطية.

هذا التصنيف يعكس كيفية حركة الهيدروكربون في الطبقات الرسوبية، ويؤثر بشكل مباشر على مواقع تراكم النفط والغاز وشكل المصائد النفطية.

كما تصنف الهجرة الثانوية للهجرة الثانوية للهيدروكربون بحسب المسافات التي تقطعها إلى نوعين رئيسيين:

1. الهجرة الثانوية المحلية وهي الهجرة التي تحدث على مسافات قصيرة داخل نفس الحوض أو الطبقة الصخرية أو ضمن مكمن واحد، حيث يتحرك الهيدروكربون من مناطق التركيز أو التولد إلى مناطق قريبة نسبياً في الصخور الخزنة.
2. الهجرة الثانوية الإقليمية وهي الهجرة التي تحدث على مسافات أكبر تغطي مناطق أو أحواض صخرية واسعة، حيث ينتقل الهيدروكربون عبر عدة طبقات أو تشكيلات جيولوجية للوصول إلى مواقع التراكم البعيدة مثل المصائد النفطية الكبيرة أو مكامن النفط والغاز المتباعدة جغرافياً.

هذا التصنيف يعكس طبيعة توزيع الهيدروكربون داخل النظام الجيولوجي ويساعد في فهم مدى انتشار النفط والغاز وتأثيره على اكتشاف المكامن وتطويرها.

تصنف الهجرة الثانوية أيضاً وفقاً لمواصفات الطريق الذي تسلكه المواد الهيدروكربونية (في المسامات، القنوات الشعرية، الصدوع، سطوح عدم التوافق...)، وقد تصنف أحياناً وفق مجموع الأسس السابقة، على سبيل المثال، هجرة رأسية محلية ضمن الصدوع.

آلية وعوامل الهجرة الثانوية

- تتعتمد الهجرة الثانوية للهيدروكربون على عدة آليات مهمة تتحكم في حركة الموائع داخل الصخور الحاملة، حيث:
- تحدث الهجرة الثانوية عندما يتحرك الهيدروكربون (نفطاً أو غازاً) داخل صخور الخزان من مناطق ذات ضغط مرتفع إلى مناطق ذات ضغط منخفض.

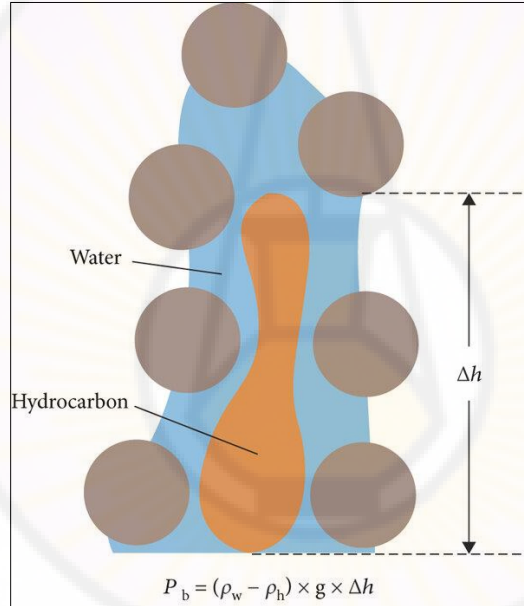
- هذه الحركة تتأثر وتتحكم فيها عدة قوى وآليات مثل الطفو، الضغط الشعري، والجريان الهيدروديناميكي للموائع داخل المساحات المسامية والشقوق.

1. الديناميك الفيزيائي وهيدروديناميك الموائع

يُقصد بالديناميك الفيزيائي في هجرة النفط دراسة وتفسير حركة الموائع الهيدروكربونية (النفط والغاز) داخل الصخور الحاملة بناءً على القوانين الفيزيائية التي تحكم انتقال الموائع في المسامات والمكامن. يشمل هذا الديناميك تأثير العوامل كالضغط، درجة الحرارة، التوتر السطحي، وقوى الطفو، إضافة إلى النفوذية النسبية والتبلل، والتي تحدد كيفية تدفق النفط والغاز خلال الصخور المسامية.

1. قوى الطفو

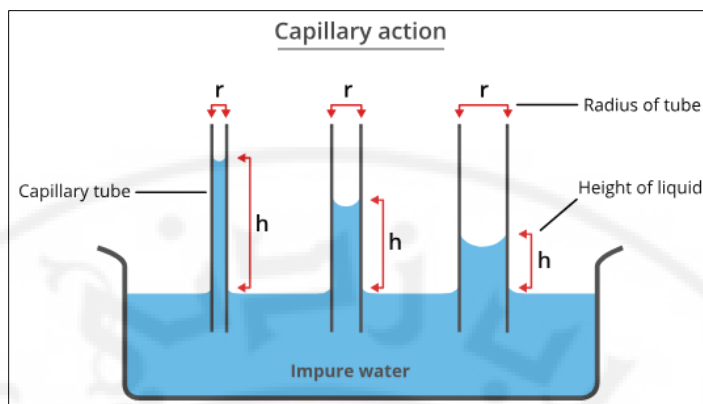
- الطفو هو القوة الدافعة الأساسية للهجرة الثانوية، ويحدث بسبب اختلاف الكثافة بين المركبات الهيدروكربونية الثقيلة والأخف (كالنفط أو الغاز) والماء المحيط بها.
- تجعل هذه القوة الهيدروكربون يرتفع في الصخور باتجاه المناطق ذات الضغط الأقل أو المكامن الطبيعية.



هجرة الزيت بتأثير قوى الطفو على الماء في الفراغات المسامية للصخر.

2. قوى الضغط الشعري

- قوى الضغط الشعري هي التي تمنع تحرك السوائل داخل المسامات الدقيقة، وهي نتيجة لقوى التوتر السطحي الموجودة بين الموائع وجدران المسامات.
- يجب على الهيدروكربون توليد ضغط شعري يتجاوز هذه القوة لكي يبدأ بالهجرة. يؤثر حجم المسام بشكل مباشر على قوة الضغط الشعري؛ فالمسام الأصغر تحتاج لضغط أكبر لتجاوزها.



يتحرك الماء نحو الأعلى بفعل الخاصية الشعرية. يتناسب ارتفاع الماء عكساً مع نصف قطر الأنبوب الشعري. الأنبوب الشعري الضيق يحتوي على الماء بمستوى أعلى بينما الأنبوب الشعري الأوسع يحتوي على الماء بمستوى أدنى.

3. الجريان الهيدروديناميكي للموائع

- يشير إلى حركة الهيدروكربون تحت تأثير فروق الضغط الهيدروليكي عبر مسالك المسام والمسالن التشققية.
- هذا الجريان هو نتيجة تفاعل القوى السابقة، ويساعد على تحريك النفط والغاز عبر الصخور في صورة طورية منفصلة أو محاليل.

تخضع هذه العوامل الثلاث لمعاملات هامة تؤثر في عملها:

- جودة الصخور الحاملة (المسامية والنفاذية).
- طبيعة التبلل (محب للماء أو محب للنفط).
- الفروق في الضغط والحرارة داخل الحوض.
- وجود التشققات أو الكسور التي تسهل مرور الموائع.

بالتالي، الهجرة الثانوية هي عملية معقدة تتحكم فيها قوى متشابكة منها الطفو والضغط الشعري والجريان الهيدروديناميكي، والتي تحدد في النهاية إمكانية انتقال وتراكم الهيدروكربون ضمن الصخور الحاملة.

كيف يمكن للهجرة الثانوية أن تتعزز أو أن تتم إعاقته بالعلاقة بين الجريان تحت السطحي وبين القوى الفيزيائية كالطفو وفرق الكثافة مثلاً؟

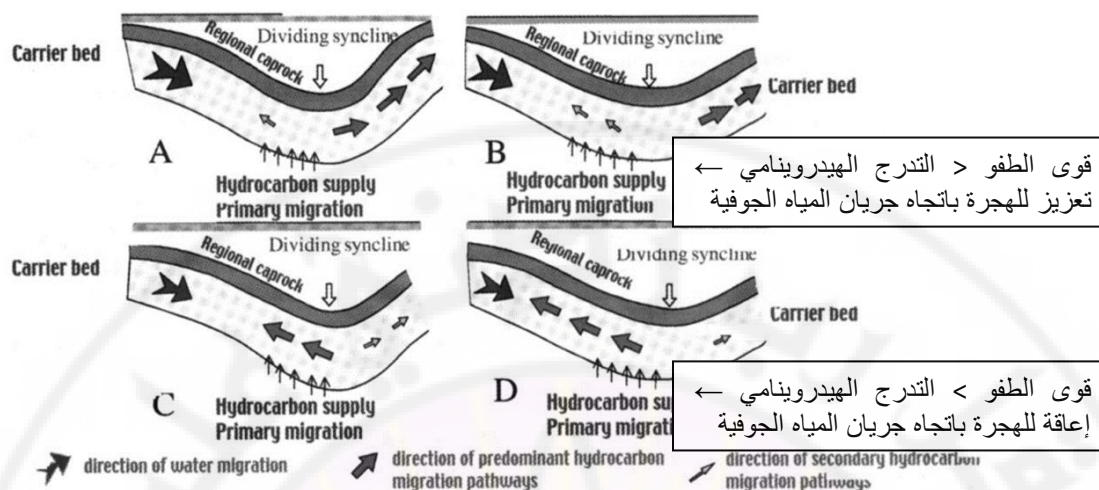
إن انتقال الفحوم الهيدروجينية بشكل عام يكون من مناطق الضغط المرتفع باتجاه مناطق الضغط المنخفض، حيث يهاجر النفط أولاً بشكل منفصل عن المياه الطبقة تحت تأثير دافعة أرخميدس والتي تزداد فعاليتها كلما كان فرق الكثافة بين الزيت والماء أكبر (عموماً أقل من 1 للزيت وأكثر من 1 للماء) وينتقل الزيت بشكل أحادي الطور في الصخور المبللة بالماء.

تتحرك المياه الطبقة تالياً بشكل يساعد أو يعيق حركة الفحوم الهيدروجينية، فالترج الهيدرودينامي إما أن يتوافق ودافعة أرخميدس أو أن يعاكسها ما يؤثر على حركة وتبعثر واصطياد الفحوم. حيث أنه:

إذا كانت قوى الطفو Buoyancy < التدرج الهيدرودينامي ← إعاقه للهجرة باتجاه جريان المياه الجوفية (Unfavorable إعاقه للهجرة)

قوى الطفو Buoyancy > التدرج الهيدرودينامي ← تعزيز للهجرة باتجاه جريان المياه الجوفية (Favorable تعزيز للهجرة)

بالتالي: التدرج الهيدرودينامي إما أن يكون قوياً وأقوى من الطفو ويفرض اتجاه الهجرة على الهيدروكربون، أو يكون ضعيفاً فيكون تأثيره على قوى الطفو ضعيفاً.



العلاقة بين الجريان تحت السطحي وقوى الطفو للهيدروكربون

ويمكن أن تقوم المياه بدور ناقل للزيوت على شكل محاليل غروية أو غازات منحلة

تزداد إمكانية انتقال الفحوم على شكل أطوار منفصلة كلما ازداد التدرج الهيدروينامي وكلما زادت كثافة النفط - سيجري جريان الماء تقريباً.

II. أبعاد الحبات والقوى الشعرية

أبعاد الحبات المكونة للفراغات التي يفترض للزيت أن يمر عبرها تحدد قوى التوتر السطحي أي الخاصة الشعرية والتي تتناسب عكسا و حجم الحبات، كلما قل حجم الحبات - قل حجم الفراغ المسامي - زادت قوى التوتر السطحي - و قلت إمكانية انتقال الزيوت عبرها.

أي أن القوى الشعرية تعاكس في تأثيرها عمل دافعة أرخميدس والتدرجات الهيدرودينامية.

III. الديناميك الكيميائي

يقصد به مجموع العوامل الكيميائية مثل:

الامتزاز والادمصاص، التآكل الحيوي، التفاعلات الكيميائية (هيدروكربون وموانع مرافقة مع الصخور المحيطة)، تفاعلات الإرجاع بين الهيدروكربون والموانع المصاحبة، انحلال فلزات وترسيبها وتأثير ذلك على المسامية والهجرة.

حيث تؤدي الهجرة الثانوية للفحوم عبر الصخور المسامية النفوذة إلى اختلافات فيزيوكيميائية، فتزداد أثناء الهجرة نسبة الفحوم الهيدروجينية غير القطبية في المادة المهاجرة نتيجة ادمصاص المركبات القطبية بين سطوح الزيوت والفلات أو الزيوت والماء. والنتيجة تكون تناقص نسب المركبات العطرية والأسفلتين والصمغ.

تفسير ذلك كله هو الانحلالية الكبيرة لهذه المركبات (القطبية) بالماء

بالنتيجة يزداد النظير C12 بنسبة 0.004 أي يحدث اغتناء الزيت الخام بالنواتج الخفيفة خلال الهجرة وتتراكم هذه النواتج في السويات العليا.

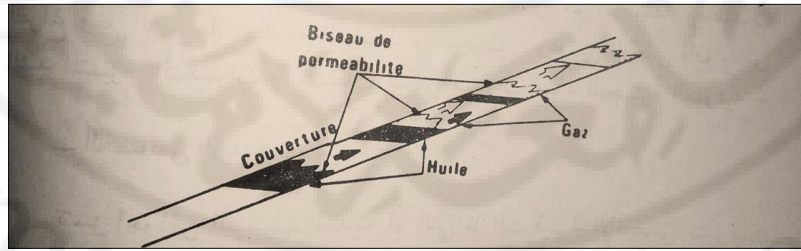
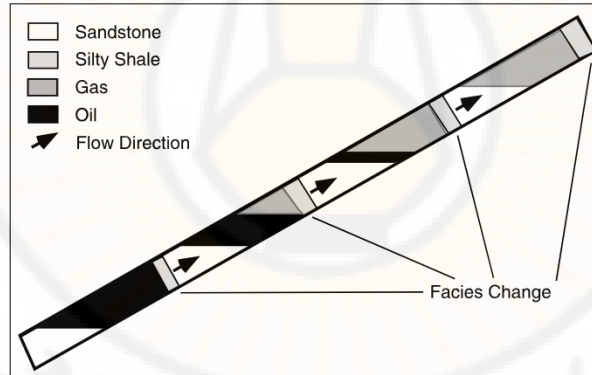
الأشكال الرئيسية للهجرات الثانوية

الهجرة الخطية

الهجرة الجانبية أو الخطية للنفط في الصخور الخزنة هي حركة النفط داخل طبقات الصخور الخزنة بشكل أفقي أو على طول الطبقات الصخرية. فبعد أن يهاجر النفط من الصخور المولدة إلى الصخور الخزنة خلال الهجرة الأولية، يتحرك النفط داخل الصخور الخزنة بنتيجة عوامل عدة مثل فروق الضغط، قوى الطفو، الخاصية الشعرية، ووجود مسامات وشقوق تسمح له بالتنقل والتجمع في أماكن جديدة. حيث يمكن للنفط أن ينتقل إلى أماكن ذات ضغط أقل أو نفاذية أفضل، وأحياناً يتجمع عند مصائد جيولوجية تمنع هروبه. هذه الهجرة تعتمد بشكل كبير على نفاذية الصخور الخزنة ومساميته والتي تسهل أو تعيق حركة النفط أفقياً، إضافة إلى التأثيرات الهيدروديناميكية والضغط.

خصائص الهجرة الخطية

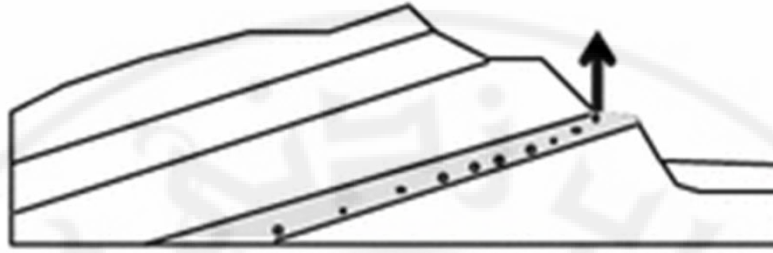
- تحدث في الجزء العلوي من السويات المستمرة في مناطق التقائها مع الغطاءات الكتيمية.
- تزداد السيالة والانسائية كلما كانت سطوح الالتقاء أكثر اتساعاً.
- يلعب هذا النمط من الهجرة دوراً هاماً في تشكيل التجمعات النفطية في قمة وأعلى جوانب المناطق الإقليمية المرتفعة وذلك اعتباراً من صخور أم أكثر عمقا ومطمورة في قلب المقعرات المجاورة.
- تبدو هذه الهجرات مستمرة لمسافات كبيرة تصل لعشرة كيلومترات .
- في حال كون الصخور الخزنة متقطعة ومحددة في أجزاءها العلوية بحواجز للنفاذية فإن الهجرة ستأخذ نمطاً معيناً بحيث تتراكم الفحم الخفيفة في السويات العليا كما في حالة الهجرات العمودية. يسمى ذلك اصطلياً بالتمايز (Seal leakage from traps with gas caps). حيث غالباً ما يحدث ذلك في المصائد ذات القبة الغازية وذات التغير الجانبي في السحنة حيث يتسرب الغاز عبر السويات السحنية التي تسمح بهروب الغاز ولكن ليس النفط ليتراكم الغاز في سويات ضحلة في حين يكون النفط أكثر عمقا.



اصطياد بالتمايز. يتراكم الغاز في السويات العليا في حين يتراكم النفط في السويات الأدنى في طبقة وحيدة الميل ذات حواجز للنفاذية في سوياتها الأعلى (تغير سحني جانبي).

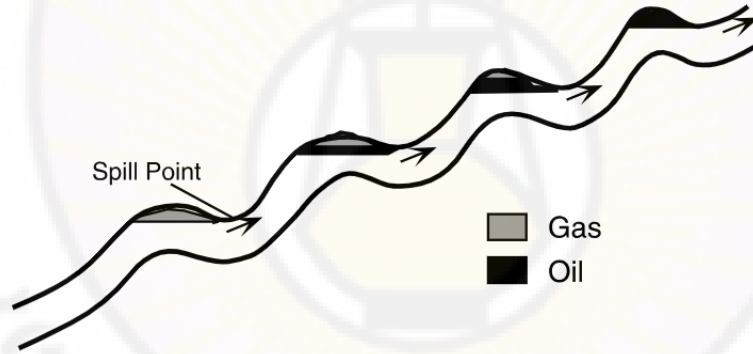
- في حال كون الصخور الخزنة مستمرة حتى السطح أو بالقرب منه فإن الهجرة الخطية ستعمل على انتشار الفحم الهيدروجينية بشكل واسع على شكل دلائل سطحية تظهر مع سويات لطبقات مائية تكون أحياناً مشبعة بالرمال الاسفلتية.

- إن وجود سطوح تجاوزية فوق سويات حطامية يشكل أيضا ممرات مفضلة لانتقال الفحوم الهيدروجينية يمكن أن تؤدي دورا رئيسا في التجمعات النفطية الهامة.



سوية خازنة (طبقة وحيدة الميل) ذات تقاطع مع سطح الأرض تعمل على انتشار الهيدروكربون مشكلةً دلائل سطحية.

- في حال تتابع الطيات المحدبة فإن الهجرات الخطية يمكن أن تؤدي لاصطياد الفحوم الهيدروجينية بالتباين Differential entrapment. حيث أن وصول الهيدروكربون لطية دنيا يؤدي لتناقص الضغط وتحرر الغاز ليشكل قبعة تأخذ بالاتساع دافعةً النفط الذي يدنوها للأسفل، والذي بدوره سيتحرك باتجاه الطية الأعلى ذات الضغط الأقل انخفاضاً عند بلوغه نقطة الهروب (spill point). ما يؤدي بالنتيجة لتراكم النفط في السويات الأعلى من التتابع الطي في حين يتراكم الغاز في السويات الأدنى من ذات التتابع.



اصطياد بالتباين في طبقة ذات تتابع من الطيات. تناقص الضغط ينجم عنه اتساع حجم الغاز وهروب النفط للطية الأعلى وتشكل مصيدة ثانية مشبعة بالنفط في حين أن الغاز في الطية الدنيا.

- في حال الاصطياد بالتباين فإن تغذية السويات الخازنة تأتي من الصخور الأم العميقة، فتمتلئ المكدبات المغلقة القريبة من الصخر الأم (أي الأكثر انخفاضاً) أولاً بحيث يشغل الغاز الجزء العلوي من الحجم المغلق دافعا بذلك الزيت إلى النقاط الأخرى من السوية.
- عندما تصل هذه الزيوت إلى حدود الإغلاق (نقطة الهروب) فهي تنتقل حسب نفس السوية إلى البنية المجاورة الأكثر ارتفاعاً.
- بالنتيجة يتجمع الغاز في الطيات الأعمق في الجزء المركزي من الحوض بينما تتجمع الزيوت في التراكيب العليا في هوامش الحوض.

لتحقيق ما سبق يجب أن تتوفر العوامل التالية:

1. استمرارية جدية للصخور الخازنة والمغطية.
2. تتابع الطيات.
3. انعدام الفوالق أو أي عامل يؤدي لهروب الفحوم الهيدروجينية عبر الغطاء.
4. سيالة كافية من الفحوم الهيدروجينية.

الهجرات الشاقولية (هبوطاً أو صعوداً)

- تشبه هذه الميكانيكية ميكانيكية الهجرة الأولية.
- بالتالي لا تتحقق الهجرة الأولية إلا عندما يكون ضغط الفحم الهيدروجينية المحصورة في فراغات الصخر كافياً للتغلب على الإغلاق الجيوميكانيكي للوسط.
- يتحقق ذلك إما بزيادة ضغط الموائع أو انخفاض شدة الإغلاق خاصة تحت تأثير القوى النيبوية في تقنيات المحدبات.

من أنماط الهجرات الشاقولية:

- الهجرة بالهبوط

هي حركة الهيدروكربون إلى أسفل بسبب زيادة الضغط من الطبقات العليا أو تأثير الجاذبية، وهي أقل شيوعاً لكنها تحدث في ظروف معينة عندما يكون الضغط في الطبقات الأعلى مرتفعاً جداً بحيث يدفع الموائع إلى الأسفل.

أين تحدث هذه الهجرة وكيف؟

- تميل الفحم الهيدروجينية المتشكلة في التوضعات التجاوزية غالباً إلى الهجرة باتجاه الأسفل ضمن حدود انتقال ضعيفة مغذية بذلك المصائد الطباقية.
- في هذا النمط من الهجرات يرجح أن تلعب الصخور الأم التجاوزية دور الغطاء إضافة لكونها صخور أم، أي عندما يكون ضغط الدخول فيها مرتفع.
- كما أن الهجرة باتجاه الأسفل تزداد عندما تتواجد سطوح تعرية ذات مسامية عالية. ووجود سويات ذات موائع عالية الضغط تعلو الطبقة الحاوية على الهيدروكربون.
- هذا النمط من الهجرة نادر ويتطلب شروط خاصة ومعقدة واستثنائية، يمكن تسميتها الهجرة المدفوعة بالجاذبية، و عادةً ما تتفوق قوى الطفو على قوى الجاذبية لذلك فهذه الهجرة نادرة ومحدودة.

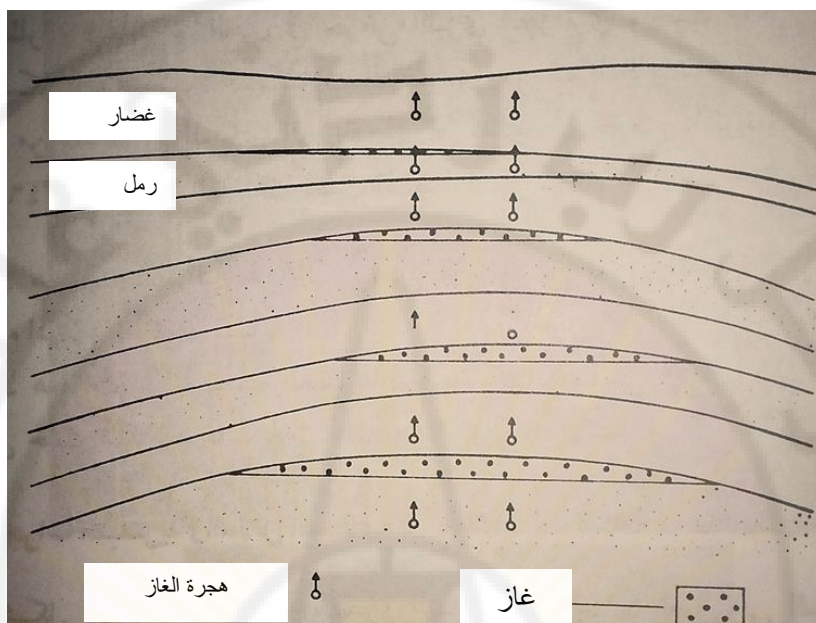
- الهجرة بالارتقاء

وفيها يتحرك النفط والغاز صعوداً بفعل قوى الطفو الطبيعية وخفة الهيدروكربون مقارنة بالماء، وهي الأكثر شيوعاً. تحدث عندما تتحرك الفحم الهيدروجينية عبر مسارات منخفضة المقاومة مثل التشققات، الفوالق، والطبقات المصدعة، نتيجة لقوى الطفو، الجاذبية، والاختلافات في الكثافة والضغط.

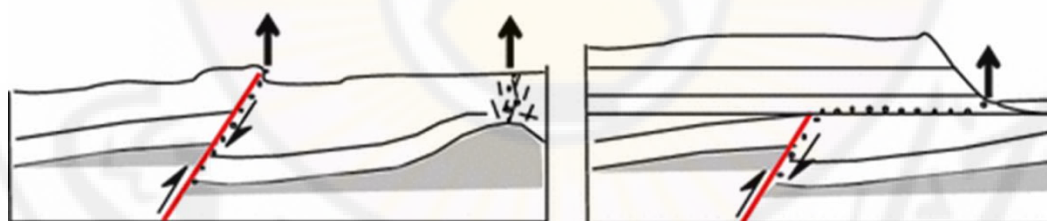
أين تحدث هذه الهجرة وكيف؟

- تحدث عبر الغطاءات المتطبقة على طول امتداد التكرسات والتشققات.
- تقوم الفوالق والمناطق المصدعة المرافقة بتصريف الفحم الهيدروجينية.
- تلعب الفوالق دور مزدوج في هذه الهجرة، فهي تشكل أحياناً مسارات لانتقال الزيوت والغازات خاصة عندما تكون حديثة التشكل، وأحياناً تشكل مانعاً أمام حركة الفحم عندما تكون مغلقة.
- غالباً ما تكون الفوالق سبباً في تبعثر الفحم الهيدروجينية وظهور الدلائل السطحية.
- في حال غياب الفوالق، تشكل مناطق الضعف في الغطاءات نقاطاً لهروب الفحم. وذلك عندما يكون ضغط الدخول فيها أدنى من الضغط الذي يؤثر به المائع وهذا ما يحدث في سقف التجمعات النفطية.
- كلما كانت الفحم أخف تزداد قدرتها على الهجرة بالارتقاء بالتالي فإن هذا النمط من الهجرات ينطبق بشكل خاص على الغازات.
- تزداد هذه القدرة كلما كان ضغط الدخول في الطبقات الكتيمية (المغطية) أضعف.
- تلعب الخصائص البتروفيزيائية للغطاءات دوراً رئيسياً في حركة الفحم الهيدروجينية.
- بما أن قدرة الغطاءات على حجز الفحم تعتمد على درجة تراصها بالتالي فهذه القدرة تزداد مع العمق.
- لا تحجز السويات قليلة العمق سوى أعمدة صغيرة من الزيت والغاز.
- بحسب هذه الهجرات فإننا نجد فحوماً هيدروجينية خفيفة أو غازات خفيفة في الطبقات العليا و زيوتاً في الأجزاء العميقة. أي توزعاً عمودياً للفحوم مخالفاً لتوزيع هذه الفحم حسب نشأتها. باستثناء الغازات مبكرة التشكل.

- غالبا ما تصادف السويات المشبعة في الصخور الخازنة الأقرب إلى الصخور الأم و ذلك في حال كونها مغطاة بشكل جيد.
- أما الصخور الخازنة الواقعة في الأعلى وغير المغذاة فتشكل طبقات مائية ذات محتوى قليل من الفحم الهيدروجينية الغازية.



الهجرات العمودية عبر الغطاءات الغضارية



هجرة بالارتقاء عبر التكسرات والفوالق

الهجرة التبعية والدلائل السطحية

الهجرة التبعية للهيدروكربون هي عملية انتقال الجزيئات الهيدروكربونية في الطبقات السطحية أو القريبة من السطح، حيث تتحرك على شكل جزيئات أو قطرات صغيرة موزعة في الوسط الطبيعي، ويرتبط شكل هذه الهجرة بانتشار الهيدروكربون بشكل غير مركز في الصخور.

الدلائل السطحية للنفط تشمل الشواهد والأدلة التي تظهر على سطح الأرض أو بالقرب منه والتي تشير إلى وجود النفط في الطبقات الرسوبية تحت السطحية، مثل وجود بقع زيتية على الصخور والسوائل النفطية في الينابيع، والغازات المنبعثة بشكل طبيعي في بعض المناطق والتي يمكن ملاحظتها بشكل أسهل في الأوساط المائية، بالإضافة إلى تغير لون التربة أو وجود خواص جيولوجية تشير إلى تراكم مواد عضوية واحتجاز الهيدروكربون.

هذه الدلائل تعد مؤشرات مهمة للاستكشاف النفطي، حيث يسهل رصدها وتحليلها لتحديد مواقع مستقبلية للتنقيب عن النفط والغاز.

وغالباً ما تتعرض هذه الدلائل السطحية للفساد والتخرب نتيجة مجموعة من العوامل تتلخص بما يأتي:

1. التعرض لعوامل التعرية والطقس التي تؤدي إلى تفتت وتوزيع المواد النفطية المشبعة على مساحة واسعة مما يقلل قيمتها كدليل.
2. التلوث البيئي من مواد كيميائية أو بترولية غير طبيعية تغطي أو تغير من تركيبة الدلائل السطحية.
3. التداخل مع النشاطات البشرية مثل الزراعة والصناعة والبناء مما يؤدي إلى اختلاط المواد النفطية مع مواد أخرى أو إزالة الترسبات النفطية.
4. تؤدي عمليات التفاعل الكيميائي والبيولوجي إلى تحلل المواد النفطية، مثل التأكسد أو الهجوم الميكروبي. حيث تتخرب النواتج السائلة بالأكسدة و البلمرة وتعطي نواتج ثقيلة ولزجة أو صلبة ذات لون أسود ولها القدرة على مقاومة العوامل الجوية لفترات زمنية معينة. وتلعب البكتيريا والكانونات الدقيقة دور العامل الرئيس في تخرب الفحم الهيدروجينية السائلة. حيث تقوم البكتيريا بشكل خاص بنزع الألكانات النظامية والفحوم الهيدروجينية غير الحلقية (برستيان ...) وتحطيم بنيات أخرى من المركبات النفطية المشبعة.
5. قد تغير الظروف الجيولوجية مسار أو تركيز البنيات السطحية للنفط، فالهزات الأرضية أو التدفقات المائية قد تغسل المواد وترتبها من جديد.
6. تفقد الفحم الهيدروجينية الأجزاء الخفيفة منها (لاسيما الغازات) في الغلاف الجوي.
7. قد تحترق هذه الغازات بشكل طبيعي مشكلةً ألسنة من اللهب دائمة الاشتعال.

اتجاه ومسافة الهجرة الثانوية

الهجرة الثانوية هي مرحلة حيوية في دورة حياة النفط حيث ينتقل الهيدروكربون من منطقة تشكله في الصخور الأم إلى الصخور الخازنة التي يمكن أن تتراكم فيها. دراسة اتجاه ومسافة الهجرة الثانوية مهمة لأنها تؤدي إلى تحديد أماكن تركيز النفط والغاز بدقة، مما يساعد في تحديد مواقع التنقيب والاستغلال الاقتصادي للمكامن.

دراسة مسار واتجاه هجرة النفط تعتبر ذات أهمية كبيرة ضمن مفهوم جيولوجية النفط، لأنها تمثل المرحلة التي ينتقل فيها النفط من صخور المصدر التي تكون فيها إلى الصخور الخازنة التي يتجمع فيها، أي المصائد النفطية.

أهمية دراسة مسار واتجاه الهجرة

إن دراسة مسار واتجاه هجرة النفط ضرورية لفهم دورة تكون النفط الجيولوجية، ولتحديد المصائد النفطية بشكل دقيق، مما يؤدي إلى نجاح استكشاف النفط واستغلاله بفعالية. يساهم هذا الفهم في تقليل المخاطر في التنقيب وتعظيم الاستفادة الاقتصادية من الموارد النفطية الطبيعية. وبالتالي فإن دراسة مسار واتجاه الهجرة مهمة للأسباب الآتية:

- تساعد في فهم كيفية انتقال النفط عبر طبقات الأرض من الصخور الأم (Source Rocks) إلى الصخور المسامية الخازنة (Reservoir Rocks)، مما يساهم في تحديد مواقع تجمعات النفط المحتملة.
- معرفة مسار الهجرة يساعد على توقع أماكن وجود النفط وتحديد مواقع الحفر والاستكشاف الناجحة، وبالتالي تحسين استغلال الموارد النفطية وتقليل المخاطر الاقتصادية.
- تتعلق الهجرة بمفاهيم الضغط والتراص وشقوق الصخور، إذ يؤثر الفرق في الضغط والمسامية ومداخل ومخارج طبقات الصخور على اتجاه حركة النفط (رأسياً وأفقياً).
- تؤثر عوامل مثل وجود طبقات غطاء عازلة (Seals) والضغط الهيدروستاتيكي على توقف أو استمرار هجرة النفط نحو المصائد، وبالتالي تعتبر هذه العوامل حرجة في تشكل مكامن النفط الناجحة.

العوامل المتحكم في مسار واتجاه الهجرة الثانوية

- **أبعاد الحوض وشكله:** تؤثر خصائص الحوض الجيولوجية مثل عرضه وطوله وعمقه والطبقات التي يحتويها على مسارات الهجرة والمسافات التي يقطعها الهيدروكربون.
- **الصفات الفيزيائية والكيميائية للمركبات الهيدروكربونية:** يؤثر وزن الجزيئات، الضغط، واللزوجة والكثافة على قدرة الهيدروكربون على الهجرة. الغازات الأخف مثل الميثان تتحرك أسرع وأبعد من السوائل الثقيلة.
- **التركيب الليثولوجي للصخور:** الصخور ذات النفاذية العالية والمسامية الكبيرة تسمح بحركة أسهل وأطول للهيدروكربون، بينما الصخور الكثيفة المعقدة تعيق الحركة.
- **هيدروكربون غازي أو نفطي:** الغازات الهيدروكربونية تتحرك بوتيرة أسرع وعلى مسافات أطول كونها أقل كثافة ولزوجة مقارنة بالسوائل. في حين أن السوائل (النفط) تتحرك بشكل أبطأ وعلى مسافات أقصر، وتتطلب قوى دفع أكبر مثل الضغط الشعري لتتجاوز المسام الضيقة.
- **طبيعة الهجرة:** الهجرة الخطية (الأفقية) تحدث داخل الطبقات الصخرية وتميل إلى أن تكون مسافة الهجرة فيها أقصر. في حين أن الهجرة الرأسية تحدث عادةً نتيجة الطفو والضغط، وغالباً ما تمتد لطول طبقات الحوض مما يجعلها ذات مسافات أطول. بشكل عام، يمكن القول إن الهجرة الرأسية تميل إلى تغطية مسافات أكبر وغالباً ما تكون مسيطرة في العملية، لكنها تتكامل مع الهجرة الخطية لتشكيل المكامن النفطية النهائية. كل هذا يتوقف على الظروف الفيزيائية والكيميائية للصخور والنفوط داخل الحوض.

إنّ فهم هذه العوامل يمكن أن يساعد الجيولوجيين في توقع أماكن تراكم النفط والغاز داخل الأحزمة الرسوبية وتحسين الاستراتيجيات الاستكشافية والإنتاجية.

مفهوم الإغلاق Closure والإصطياد (Trapping and Accumulation)

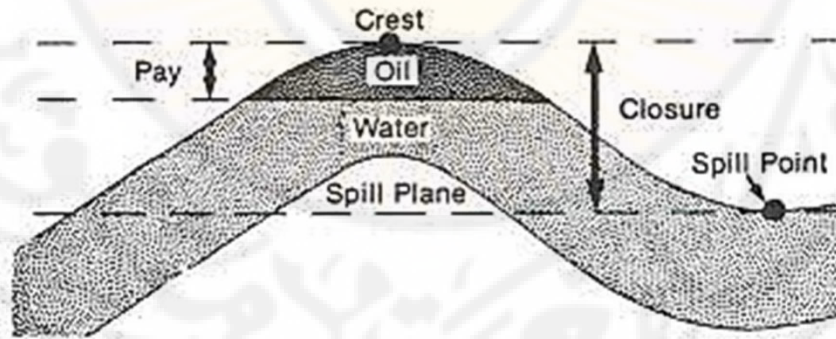
الإغلاق

يُشير الإغلاق إلى الحاجز البنيوي أو الطبقي الذي يحد من حركة الهيدروكربون، مثل سطح مقعر نحو الأسفل في الغطاء الصخري أو تشكيلات ذات ضغط دخول مرتفع. هذا الحاجز يجبر السوائل على الارتفاع والتجمع في الجزء العلوي من المصيدة، مما يحولها إلى مكمن فعال، ويقال عن بنية بأنها مغلقة وتشكل مصيدة عندما يحدّ هذه البنية حاجز يجبر الفحوم الهيدروجينية على التجمع في الأجزاء العليا منها، قد يتحقق هذا الحاجز بوجود سطح ذي تقعر نحو الأسفل لغطاء أو لتشكيلات ذات ضغط دخول مرتفع. فالمصيدة تسمح إذاً بتجمع الزيت والغاز في الجزء العلوي منها وتشكل في هذه الحالة مكماً ويكون السطح السفلي لتجمع الفحوم الهيدروجينية على شكل مستوي أفقي يفصل بين هذه الفحوم والطبقة المائية ويسمى بالمستوى المائي.

وتكون البنية مغلقة عندما تتوفر فيها الشروط التالية:

- وجود صخر مسامي ونفوذ (صخر المكمن أو الصخر الخازن) يسمح بتجمع النفط والغاز داخله.
- وجود صخر غير نفوذ (صخر الغطاء) يغطي صخر المكمن بحيث يمنع هجرة النفط والغاز خارجه.
- وجود إغلاق رأسي (Closure) وهي المسافة الرأسية بين قمة المصيدة وسطح التصريف (نقطة تماس النفط/الماء أو الغاز/الماء)، بحيث يكون هذا الإغلاق كافٍ لحجز وتثبيت تجمع الهيدروكربون.
- وجود بنية جيولوجية تحدد حدود المكمن مثل طية، صدع، قبة ملحية، أو اختلافات في الطبقات الرسوبية تمنع الحركة الجانبية للنفط والغاز.
- استمرارية وتوافق بين هذه العناصر بحيث تمنع هروب الهيدروكربون وتحقق تجمعاً يمكن استثماره اقتصادياً.

وبالتالي، تعتبر البنية مغلقة عندما يشكل تركيبها الجيولوجي والحواسز الصخرية إغلاقاً كاملاً يمنع تسرب النفط والغاز، مما يؤدي إلى تشكل مصيدة نفطية قابلة للاكتشاف والإنتاج.



بنية مغلقة. Crest قمة البنية، Spill Point نقطة التصريف، Spill Plane مستوى التصريف، Pay نطاق الإشباع الهيدروكربوني، Closure الإغلاق.

الإغلاق وديناميكية المياه الجوفية

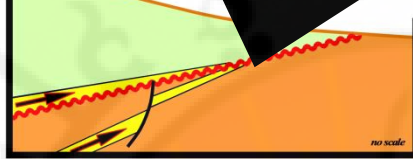
- إذا كان التدرج الهيدرودينامي يعاكس في اتجاهه سيالة الفحوم الهيدروجينية—إعاقة الهجرة ودعم للإغلاق
- إذا كان موافق لاتجاه سيالة الفحوم الهيدروجينية—تقليل من فعالية الإغلاق أو إزالة تأثيره

في حالة الاصطياد بالطي

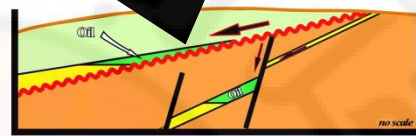
التدرج الهيدرودينامي يكون مواز للطبقات—دفع التجمعات النفطية خطياً—المستوي الأسفل للتجمعات أو مستوى التقاء زيت-ماء يكون مائل (المستوي المائي مائل)

يتعلق الميل بفرق الكثافة: فرق كثافة أقل يعني جريان الهيدروكربون مثل جريان الماء تقريباً وبالتالي ميل كبير، قد يقود لغسل المصيدة (كنس المصيدة).

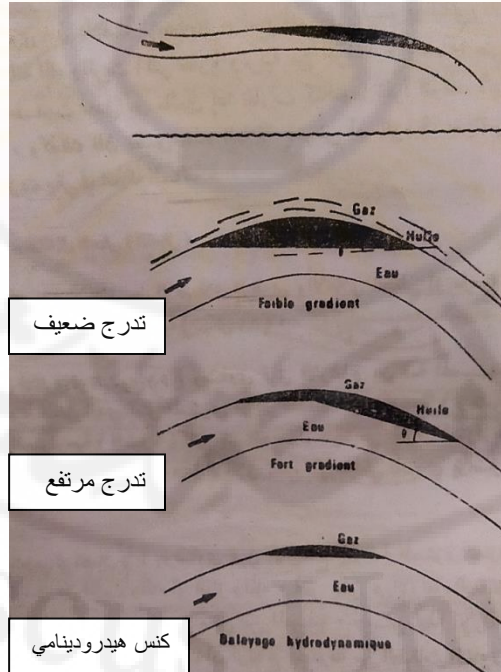
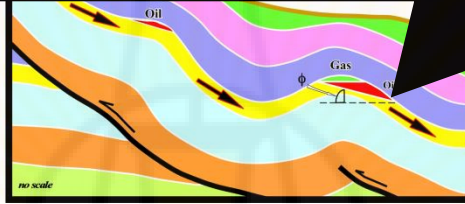
تأثير سلبي للجريان الهيدروديناميكي (اتجاه السهم) على طول اتجاه هجرة الهيدروكربون. لا يوجد اصطباذ في طبقات الصخور الخزنة (الصفراء) أوفي الكتل المتصدعة.



تأثير إيجابي للجريان الهيدروديناميكي بعكس اتجاه هجرة الهيدروكربون، ويحدث اصطباذ في نهايات طبقات الصخور الخزنة وفي أسفل جدران الكتل الفالقية



تأثير جريان الحامل المائي باتجاه الأسفل في مصيدة بنيوية، جدار التراكم: مستوى التقاء زيت-ماء يميل باتجاه الجريان بحسب علاقة هيرت. $t.g.\Phi = d_h / d_v \times d_w / (d_w - d_h)$



اصطباذ الفحوم الهيدروجينية في محذب وفي تقبب بسيط

$$\text{tg}\Theta = \frac{dh}{dx} \cdot \frac{dw}{dw - dh}$$

Θ : الزاوية بين مستوي الزيت-ماء والمستوي الأفقي

$\frac{dh}{dx}$: الميل الهيدروليكي

dW : كثافة الماء

dh : كثافة الفحوم الهيدروجينية

وفق هذه المعادلة، يكون ميل الزاوية بين مستوي الزيت-ماء والمستوي الأفقي خاضع لعاملين اثنين متعاكسين، هما $\frac{dh}{dx}$ أي قوى الجاذبية، و $\frac{dW}{dW-dh}$ أي قوى الطفو. تفوق قوى الجاذبية على قوى الطفو مرهون بفرق الكثافة (زيت-ماء) وبالتالي سيقود إذا تحقق لعملية كنس هيدرودينامي للمصيدة.

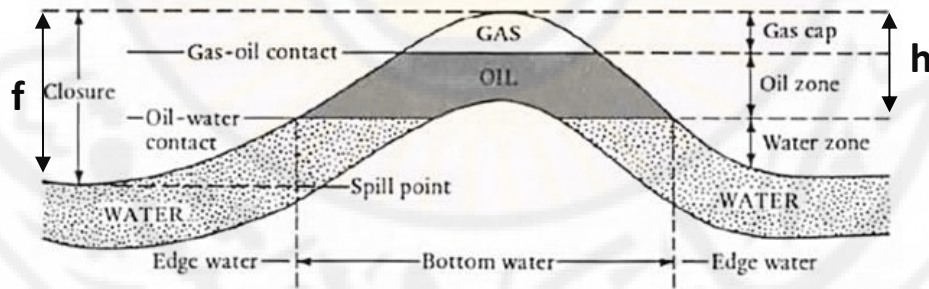
ونميز في الإغلاق بين:

- الإغلاق النظري (البنوي) (f)

يساوي فرق الارتفاع بين قمة المصيدة ومنحني التسوية المغلق الذي يمثل المستوي الأكثر انخفاضاً في المصيدة. يقاس من المعطيات الجيولوجية البنوية التي يتم الحصول عليها من الطرق الاهتزازية أو من الآبار، وتسمح معرفة قيمة هذا الإغلاق بتقدير الاحتياطي الذي يؤمل وجوده في المصيدة.

- الإغلاق العملي (الفعال) (h)

يساوي فرق الارتفاع بين قمة المستوي الخازن والمستوي الفاصل بين الزيت والماء أو الغاز والماء. وهو يعبر عن الارتفاع الحقيقي المشبع بالفحوم الهيدروجينية في حجم مغلق من المصيدة. ويمكن أن يختلف عن الإغلاق البنوي حيث أن ارتفاع مجموعة من الطبقات الخازنة المشبعة والمنفصلة عن بعضها البعض بغطاءات متعددة وذات مستويات مائية مختلفة يمكن أن يفوق الإغلاق البنوي. أما إذا كان مستوي الماء واحداً بالنسبة لمجموعة الطبقات المشبعة، فإن الإغلاق العملي سيبقى أدنى من الإغلاق البنوي أو مساوياً له في أفضل الحالات.



الإغلاق والنطاق المشبع

معامل الامتلاء Percent fill

هو نسبة حجم الهيدروكربون في المصيدة إلى إجمالي حجم الإغلاق، معبراً عنه كنسبة مئوية. وهو يدل على مدى اكتمال امتلاء المصيدة بالنفط والغاز، وتتأثر بعوامل مثل نضج الصخور الأم، ومسارات الهجرة، وسلامة الإغلاق. يمكن أن يتراوح معامل المصيدة من الصفر (فارغ) إلى ممتلئ تماماً (مملوء حتى "نقطة الهروب" (Spill point)). يعكس هذا المعامل إذاً مدى امتلاء المصيدة بالنفط أو الغاز ويمكن استخدامه لتقدير كمية الموارد المحتملة في الحقل النفطي. وهو تعبير عن مدى كفاءة وفعالية الإغلاق في حبس النفط داخل الخزان النفطي، وهو مؤشر مهم في تقييم جدوى اقتصادية المكنن النفطي.

كيف يتم حسابه؟

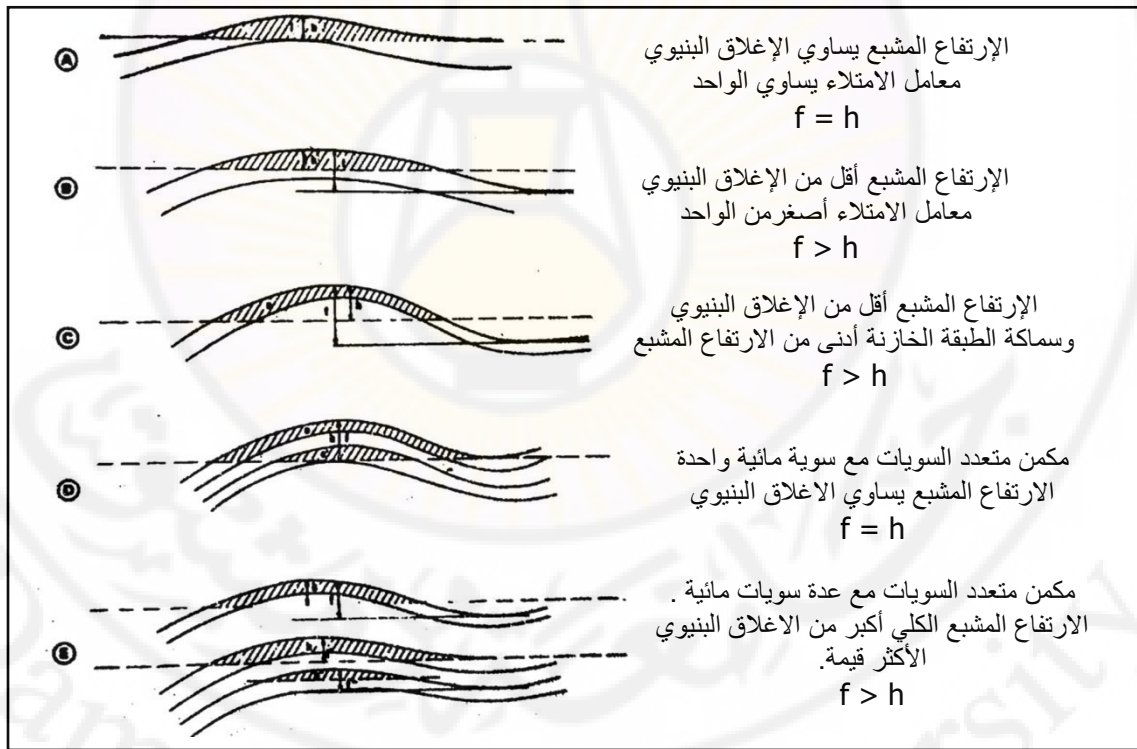
يمكن التعبير عنه بعدة طرق: يُمكن حسابه كنسبة ارتفاع عمود الهيدروكربون إلى ارتفاع إغلاق المصيدة. أو المساحة الحاملة للهيدروكربون إلى مساحة إغلاق المصدة، أو حجم الهيدروكربون إلى الحجم الكلي للمصيدة.

ما علاقة معامل الامتلاء بالإغلاق؟

تعتمد المصيدة النفطية عادةً على وجود إغلاق جيولوجي محكم، مثل طبقة غير نفوذة أو فاصل صخري يحجز النفط والغاز ويمنع هروبهما. جودة وكمال هذا الإغلاق تحدد مدى قدرة المصيدة على الاحتفاظ بالموائع وبالتالي تؤثر على معامل الامتلاء. إغلاق محكم وفعال يؤدي إلى معامل امتلاء عالي، أي تجمع أكبر لكميات النفط والغاز، بينما إغلاق ضعيف يسمح بتسرب جزء من الهيدروكربون ويجعل معامل الامتلاء أقل.

ويُمكن مناقشة الحالات الآتية للعلاقة بين الإشباع الهيدروكربوني والإغلاق البنيوي ومعامل الامتلاء:

1. الإرتفاع المشبع يساوي الإغلاق البنيوي $f = h$ ، معامل الامتلاء يساوي الواحد.
2. الإرتفاع المشبع أقل من الإغلاق البنيوي $f < h$ ، معامل الامتلاء أصغر من الواحد.
3. الإرتفاع المشبع أقل من الإغلاق البنيوي $f < h$ ، وسماكة الطبقة الخزّانة أدنى من الإرتفاع المشبع.
4. ممكن متعدد السويات مع سوية مائية واحدة $f = h$ ، الإرتفاع المشبع يساوي الإغلاق البنيوي.
5. ممكن متعدد السويات مع عدة سويات مائية $f > h$ ، الإرتفاع المشبع الكلي أكبر من الإغلاق البنيوي الأكثر قيمة.



حالات مختلفة للإغلاق والعلاقة مع معامل الامتلاء.

المصادر النفطية (Petroleum Traps)

تعريف المصيدة النفطية

المصيدة النفطية هي تركيب جيولوجي يتكون من صخور ذات مسامية ونفاذية تسمح بتراكم النفط والغاز كمخزون داخله (صخر المكن)، ويتميز بوجود غطاء صخري كثيم (صخر الغطاء) يحجز النفط والغاز ويمنع هجرتهما خارج هذا الحيز. وبذلك تُعد المصيدة موقع تجمع النفط والغاز الطبيعي تحت سطح الأرض، مما يسمح باستكشافها واستخراجها بكفاءة.

عناصر المصيدة النفطية

تشمل عناصر المصيدة النفطية أربعة مكونات أساسية ضرورية لتراكم الهيدروكربون بكميات اقتصادية:

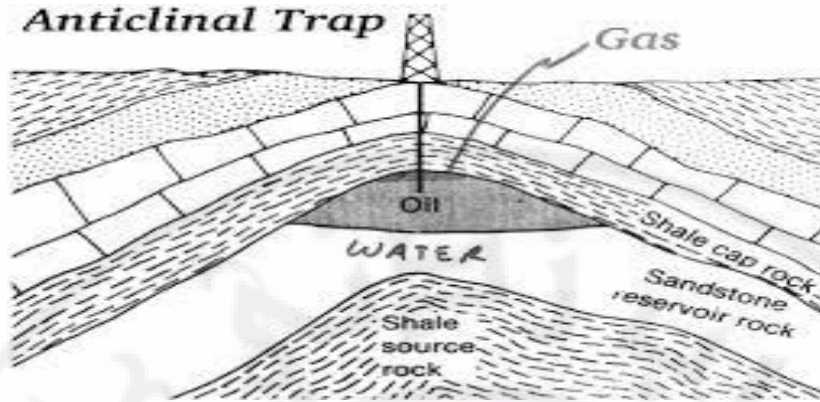
1. صخور المكن أو الصخر الخازن (Reservoir rock) : تسمح بتجمع النفط في مسامها، كما تتميز بنفاذيتها التي تسمح بحرية حركة النفط. مثال عنها الحجر الرملي، الحجر الكلسي المسامي (المتشقق). حيث يأتي النفط من خلاله ويتم حجزه.
2. صخور الغطاء (Seal rock أو Cap rock): صخر غير نفوذ يغطي صخور المكن ويمنع تسرب الهيدروكربون. تشكل طبقة غير كثيمة (مثل الشيل أو الجص) تغطي صخور المكن لمنع التسرب الرأسي للهيدروكربون. تعمل كحاجز فعال ضد الهروب.
3. صخور أم (Source rock): تتميز بكونها غنية بالمواد العضوية التي تعد المصدر الرئيسي لتوليد النفط، تقع عادة أسفل أو قرب المكن لتسهيل الهجرة القصيرة. ومن الأمثلة على هذه الصخور : الشيل، والحجر الكلسي الناعم.
4. بنية الإصطيد (Trap Configuration): وهي التركيب الجيولوجي (البنوي أو الطبقي) الذي يجمع العناصر السابقة ويحد من الهجرة الأفقية أو الرأسية، مثل الطيات أو الصدوع. يضمن الإغلاق الفعال للاحتجاز الاقتصادي.

أنواع المصادر النفطية

1. المصادر البنيوية (Structural Traps)

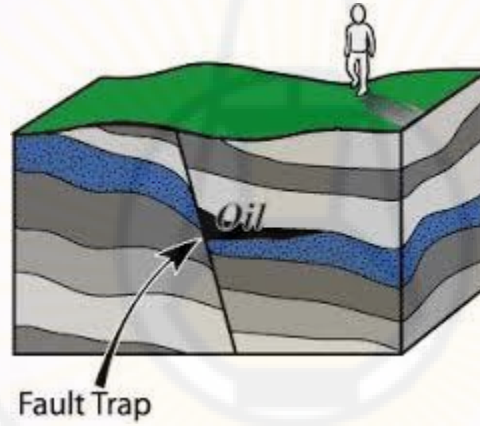
تتشكل نتيجة الحركات الأرضية التي تغير وضع الطبقات وتتضمن:

- **الطيات (Folds) :** مثل القباب والطيّات المحدبة حيث يتجمع النفط عند نقاط الانحناء العليا. تتشكل عندما تطوى الطبقات الصخرية للأعلى، مشكلة ما يشبه بنية قبابية الشكل. يتم حجز الهيدروكربون في قمة القبة.



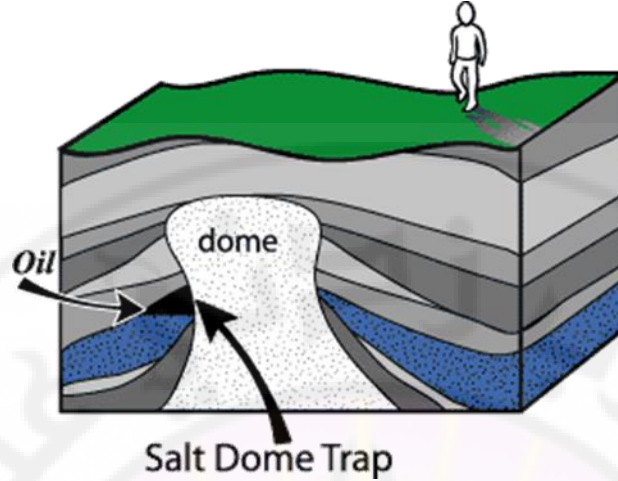
مصيدة نفطية في طية

- **الصدوع أو الفوالق (Faults):** تعمل الفوالق على وضع الطبقات غير النفوذة في طريق الطبقات الحاملة للنفط. وبالتالي تحقق الفوالق شرط الإغلاق و يتجمع النفط في الطبقة الحاملة للنفط. وتشكل الطبقة غير النفوذة في الطرف المقابل من الفالق صخوراً مغطياً.



مصيدة نفطية بفعل فالق.

- **القباب الملحية (Salt Dome Traps):** تتشكل مصائد القباب الملحية نتيجة تحرك كتل من الملح أو الطين إلى أعلى، ويندر وجود القباب الطينية، لكن القباب الملحية ظاهرة جيولوجية منتشرة، وهي تتكون نتيجة اختلاف كثافتي الملح والطبقة الرسوبية التي تعلوه، فالمالح أقل كثافة، وبالتالي سيندفع إلى أعلى، ويتسبب في "تقرب" الطبقات الرسوبية التي تعلوه، فإذا وجد بها البترول فإنه يتحرك نحو الجوانب الخارجية للطبقة الملحية، وينحصر بين الطبقات الرسوبية من جهة والقبة الملحية من جهة أخرى. ويؤدي النمو غير المنتظم للقباب الملحية إلى تكوين مصائد متعددة متتالية ومتنوعة كما في حقل الدمام. وأهم أسباب تكوين مصائد القباب الملحية هي اندفاع غازات مصاحبة لنشاط بركاني، ينتج عنها ترسيب الأملاح من المحاليل المائية، ثم اندفاع الكتل الملحية إلى أعلى، أو صعود المحاليل الملحية الحارة إلى أعلى من خلال ثغرات ضعيفة في الطبقات، ثم انخفاض درجات حرارتها تدريجياً مسببة ترسيب الملح، وتزايد كميته وحجمه تدريجياً نتيجة استمرار عمليات التبريد والتبلور Crystallization، ما يؤدي إلى انبثاق واختراق القباب الملحية للطبقات الرسوبية التي تعلوها وتوغلها فيها.



مصيدة نفطية بفعل انبثاق ملحي

2. المصائد الطبقيّة (Stratigraphic Traps) والمصائد الترسيبيّة (Lithological Traps)

هي المصائد التي تتكون نتيجة تغييرات جانبية في خصائص الصخر الرسوبي مثل المسامية والنفاذية دون تأثير بنيوي مباشر، أو نتيجة عدم استمرارية الصخور أو تغيرات ليثولوجية تدريجية أو حادة بين الطبقات. ومن أهم المصائد الطبقيّة تلك التي يحاط فيها الصخر الخازن (النفوذ) بأخر غير نفوذ مثل الغضار الصفحي (الشيل)، وبذلك يكون التغير في النفاذية أساس تكوين المصيدة.

تنشأ هذه المصائد إذا بسبب تغييرات في خصائص الطبقات الرسوبية نفسها دون تأثير مباشر من الحركات الأرضية، مثل:

- تغير في سمك الطبقات أو تغير في نوع الصخور.
- وجود طبقات رملية نفوذة مغطاة بطبقات غير نفوذة تعمل كغطاء يحجز النفط.
- ترسب أنواع مختلفة من الصخور تؤدي إلى إنشاء حواجز طبيعية داخل الصخور الخازنة.

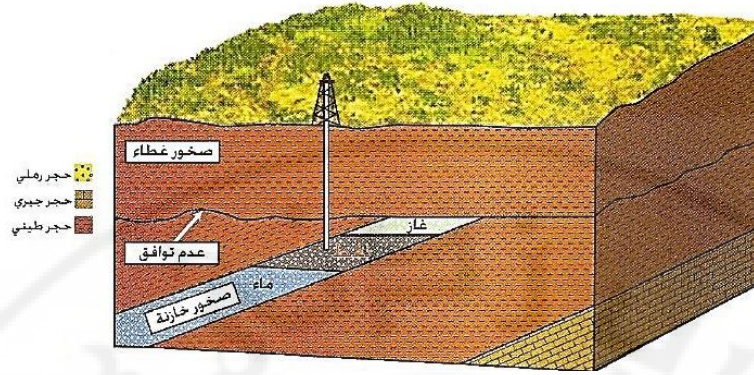
وتعتبر المصائد الترسيبيّة نوع فرعي من المصائد الطبقيّة، تنشأ بسبب اختلافات في نوع الحجر الرسوبي أو تغييرات في خصائصه الفيزيائية والكيميائية التي تؤثر على نفاذيته ومساميتها، مثل وجود عدسات رملية محاطة بصخور أقل نفاذية.

تُعد هذه المصائد صعبة التنبؤ والاستكشاف مقارنةً بالمصائد البنيوية لكنها غنية في بعض الحقول الكبرى وتحتوي على احتياطيّات نفطية أو غازية هائلة، حيث تتطلب دراسات ليثوستراتيغرافية دقيقة باستخدام السيزميك ثلاثي الأبعاد.

ويُمكن تقسيم المصائد الستراتيغرافية عموماً إلى:

1. مصائد مصاحبة لسطح عدم توافق (Unconformity Traps)

مصائد تتكون بفعل عمليات رفع أو نهوض للطبقات التي تتعرض بعد ذلك لعمليات التجوية والتعرية ومن ثم ترسيب طبقات تعلوها مباشرة تصلح كطبقة غطاء، ويشكل السطح الفاصل بين الطبقات القديمة (المتآكلة) والطبقات الحديثة سطح عدم توافق يعمل كغطاء فعال للاحتجاز. تبدأ العملية برفع طبقات رسوبية تحتوي على صخور خازنة، فتتعرض للتجوية والتعرية مما يخلق سطحاً غير منتظم. يلي ذلك ترسيب طبقات جديدة غير نفوذة (مثل الشيل) مباشرة فوق السطح المتآكل، فيحجز الهيدروكربون المهاجر أسفل هذا السطح، فيتحقق الاصطياد والتراكم.



مصيدة استراتيغرافية.

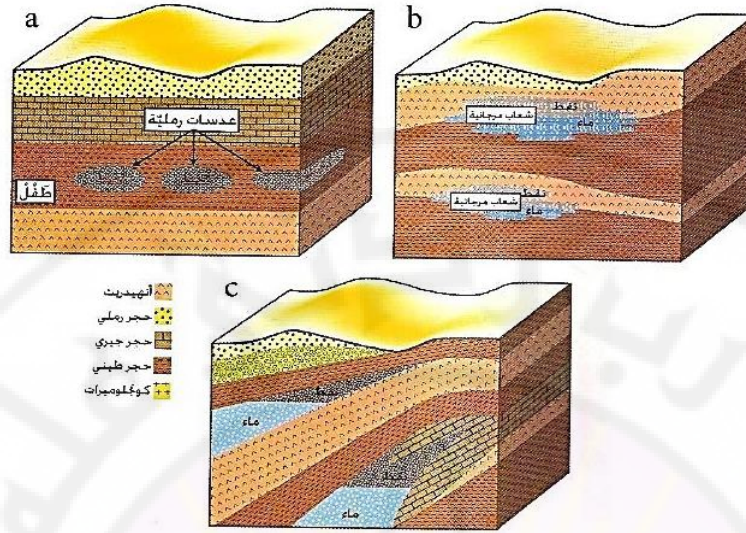
2. مصادن غير مصاحبة لسطح عدم توافق، ومن أنواعها:

أ. **مصادن ترقق للطبقة الخازنة Pinch-out** ، عندما يتضاءل سمك قطاع سميك من صخور ذات مسامية ونفاذية، ويدمج هذا القطاع في صخر طيني غير نفوذ يتم اصطياد البترول في الجزء المسامي والنفوذ من القطاع. حيث يعمل الصخر غير النفوذ كحاجز جانبي طبيعي. تنشأ هذه المصادن في بيئات ترسيبية مثل الرواسب النهرية أو الدلتا، حيث يتضاءل القطاع الرملي المسامي تدريجياً داخل محيط طيني. تجمع الهيدروكربون المهاجر في الطرف السميك، محصوراً بين الصخور غير النفوذة أعلى وأسفل وجانبياً عند نقطة الـ "pinch-out".

ب. **مصادن شعب مرجانية Reef Traps**. وفي مصادن الشعاب المرجانية تحاط الصخور الكربوناتية المرجانية ذات المسامية والنفاذية بصخور غير نفوذة مثل الشيل. تسمح هذه الإحاطة الطبيعية باحتجاز الهيدروكربون داخل البنية المرجانية نفسها، مما يجعلها تشكل مصادن فعالة اقتصادياً.

ت. **مصادن القنوات Channels** وهي عبارة عن وسط بيئي لنقل الرمال على شكل قنوات طويلة ذات مسامية ونفاذية عالية (كما في الدلتات)، يتم اصطياد البترول والغاز فيها. تشكل القنوات الرملية الطويلة ذات المسامية والنفاذية العاليتين في بيئات مثل الدلتات أو الأنهار القديمة وسطاً لنقل الرواسب. يُحجز البترول والغاز داخل هذه القنوات بفضل إحاطتها بصخور غير نفوذة مثل الشيل، مما يمنع الهجرة الجانبية.

ث. **مصادن الحواجز Barrier Bar Traps** وهي كتل رملية أو حصوية، وتظهر غالباً بشكل جزيرة على الشاطئ، ورمالها غالباً نظيفة وجيدة الفرز Well-sorted. وهناك حواجز رملية محاطة بغضار صفحي بحري، أو غضار صفحي من بحيرات شاطئية، تكون مصادن نفطية. تنشأ في بيئات ترسيبية ضحلة مائية مثل الشواطئ المفتوحة، حيث تتراكم الرمال النظيفة جيدة الفرز بفعل التيارات البحرية كحواجز تمنع اختراق الأمواج. يحيط بها الغضار الصفحي (الشيل) من الجانبين أو أسفلها، فيعمل كحاجز ليجتمع النفط والغاز في النواة الرملية.



مصادر ترسيبية.

3. المصائد الدياجينيزية (Diagenetic Traps)

يلعب الدياجينيز (diagenesis) دوراً حاسماً في تحديد نوعية الخزان داخل المصيدة البترولية، إذ يعدل المسامية والنفاذية للصخور الرسوبية، ويخلق تباينات جانبية تحد من هجرة الهيدروكربون. يمكن للمحاليات الجوفية أن تحسن من خصائص الخزان محلياً عبر توليد مسامية ثانوية (secondary porosity) بنقص الترسيب الكيميائي أو انحلال الفلزات مثل الكالسيت أو الفلسبار، بينما يقلل التملط (cementation) أو الارتصاص المتأخر من النفاذية عبر إغلاق المسام.

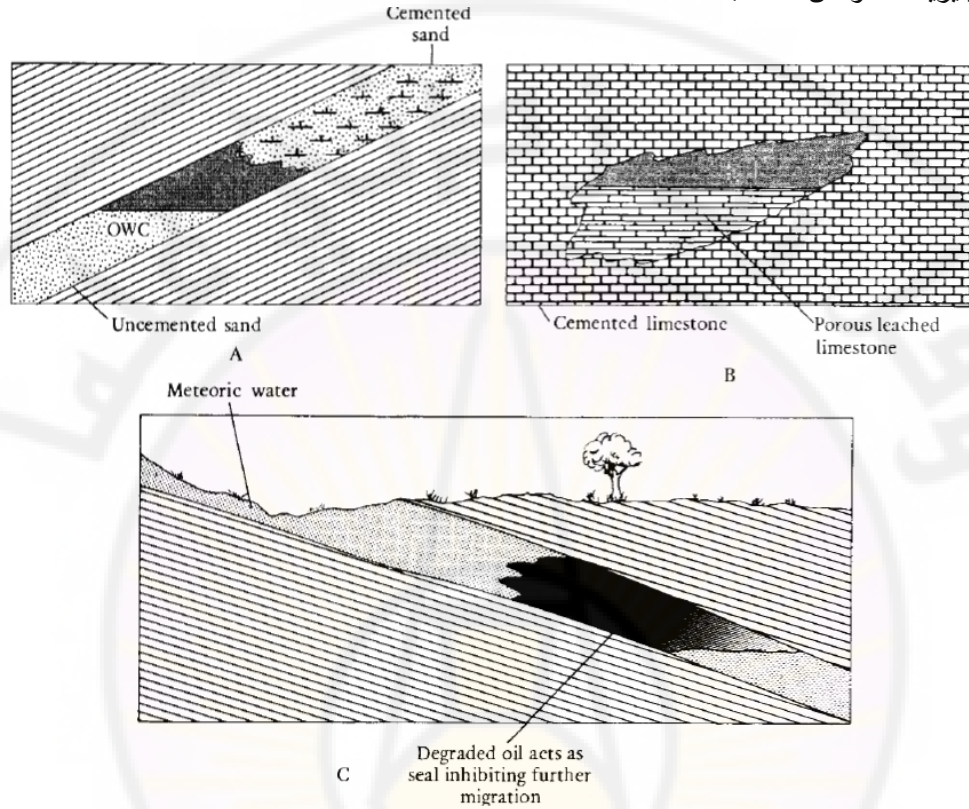
آليات الدياجينيز في تشكيل مصائد نفطية

تنشأ المصائد الدياجينيزية من تغييرات جانبية (lateral heterogeneity) ناتجة عن الدياجينيز، مما يخلق حواجز إغلاق عبر آليات متعددة:

- الحماية المبكرة للخزان:** يصعد النفط أو الغاز عبر حامل نفوذ (carrier bed) ليصل نطاقاً متملطاً جزئياً، فيمنع الإشباع الهيدروكربوني المبكر (early hydrocarbon charge) التملط الإضافي، محافظاً على المسامية الأولية في المناطق السفلية بينما تتملط المناطق العلوية.
- تطوير المسامية الثانوية:** تحل المحاليل الحمضية أو القلوية الملاط في الصخر المتملط، مما يولد خزانات عالية المسامية محاطة بطبقات محكمة الإغلاق.
- الدلمة الثانوية:** تندفق محاليل حارة (hydrothermal fluids) على طول الصدوع أو القباب يحول الكالسيت إلى دولوميت أكثر مسامية، مشكلاً خزانات غير منتظمة تشغل حيزاً أصغر من الحجر الكلسي الأصلي مع حواجز دولوميت محكمة.
- تكوين غطاء عضوي:** أثناء الهجرة نحو السطح، يتعرض النفط للأوكسدة البكتيرية في المناطق الضحلة المتأثرة بمياه الأمطار (meteoric water)، مما ينتج بقايا قطرانية (tarry residue) تعمل كغطاء عضوي يعيق الهجرة الإضافية.

النُدرة والتداخل

تعد المصائد الدياجينيزية النقية (purely diagenetic) نادرة، إذ غالباً ما تتداخل مع العوامل الستراتيغرافية أو البنيوية مثل الصدوع أو عدم التوافقات، وتُصنف كفرع من المصائد الستراتيغرافية. يكتشفها التنقيب عبر التحليل البتروغرافي والنمذجة الدياجينيزية للأحواض الناضجة.

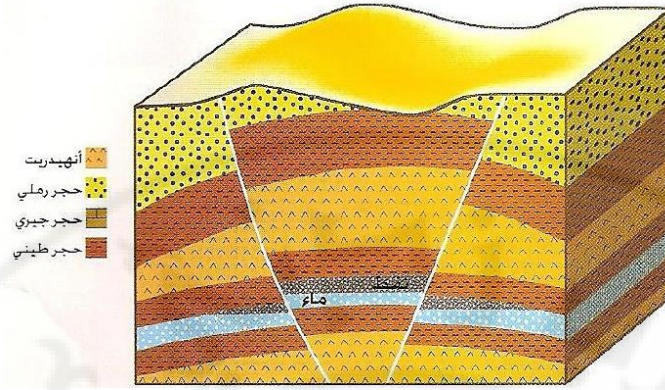


المصائد الدياجينيزية الناتجة عن: A- التملط، B- المحاليل، C- تآكل النفط الضحل.

3. المصائد المختلطة أو المركبة (Combination Traps)

تتكون من تداخل وعمل أكثر من نوع من المصائد المذكورة أعلاه، فتجمع بين عوامل تركيبية وترسيبية معاً لتكوين مصيدة فعالة. تكون هذه المصائد أكثر استقراراً وأقل عرضة للتسرب مقارنة بالأنواع النقية، حيث تعمل العوامل المتعددة معاً لتشكيل إغلاق محكم. تنشأ من تداخل عوامل متعددة، مثل طية (anticline) مع ترقق طبقي أو صدع يعزز الإغلاق الجانبي، أو قبة ملحية مصحوبة بشعاب مرجانية. هذا التداخل يوسع حجم الاحتياطي المحتمل ويحسن كفاءة الخزان.

تشكل أكبر نسبة من الحقول العملاقة عالمياً (حوالي 40-50%)، وتتطلب استكشافاً متكاملأ باستخدام السيزميك ثلاثي الأبعاد لفهم التفاعلات والتداخلات المعقدة.



مصيدة مركبة.

تساعد هذه التصنيفات في فهم طرق استكشاف النفط وتوجيه عمليات الحفر والتنقيب بأكثر درجات الكفاءة وتقليل المخاطر في الحفر والتنقيب. تعد المصائد البنيوية الأكثر شيوعاً واستخداماً في استكشاف النفط والغاز، تليها الطبقات والترسيبية التي تعتمد بشكل أكبر على دراسة طبقات الصخور وتركيبها.

باختصار، المصيدة النفطية هي نظام جيولوجي معقد يتألف من صخور خزانات وصخور غطاء مع تكوين جيولوجي مناسب يحجز النفط والغاز، وتنقسم إلى مصائد بنيوية وطبقية وترسيبية وأخرى مختلطة، ولكل نوع خصائصه الجيولوجية التي تحدد طريقة تكوينه واستدامته كخزان نفطي .

المراجع

- بغدادي، ب. 2023. الجيوكيمياء 2. منشورات جامعة دمشق.
- القاضي، م. 1996. جيولوجيا النفط. منشورات جامعة دمشق.
- Selley R. C. 1989. Elements of Petroleum Geology (2nd Edition). San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, Toronto: Academic Press.. ISBN 0 12 636370 6. *Geological Magazine*. 1999;136(3):331-340. doi:10.1017/S0016756899362646
- Selley, R. C., and Sonnenberg, S. A. 2015. Elements of Petroleum Geology (3rd Edition). Elsevier. Amsterdam, 507 p.
- Websites.