أسس علم الرسوبيات

الدكتور محمد عبد الغني عثمان مشرف

النشر والمطابع - جامعة الملك سعود

المحتويات

صفحة

تقديم الطبعة الثانية ..... ز
مقدمة الطبعة الثانية ..... ط
تقديم الطبعة الأولى ..... ك
مقدمة الطبعة الأولى ..... س
كلمة شكر ..... ف

الفصل الأول: تعريف بعلم الرسوبيات ١
- مقدمة ٣
- علاقة علم الرسوبيات بالعلوم الأخرى ٤
- علم الرسوبيات عند العرب ٨
  - محمد بن الحسن الكرخي ٩
  - أبو الريحان البيروني ٩
  - أبو علي الحسين بن سينا ١٠

الفصل الثاني: الخصائص الطبيعية للحبيبات ١٣
- مقدمة ١٥
- حجم الحبيبة ١٦

- طرق القياس الحجمي للحبيبات ١٨
١ - القياس المباشر ٢٠
٢ - استعمال المناخل ٢١
تمثيل التحليل الحجمي الحبيبي ٢٣
٣ - سرعة الاستقرار ٣٤
٤ - استخدام المجهر الإلكتروني أو الأشعة السينية ٣٤
● شكل الحبيبة ٣٥
- الاستدارة والتكور ٣٥
● النسيج السطحي للحبيبات ٤٢
● الطراز ٤٦
● التعبئة ٤٧
● النفاذية ٤٨
● المسامية ٥١
- تشكل المسام ٥٥
المسامية الأولية (مسامية الترسيب) ٥٦
نشأة المسامية الأولية ٥٧
تأثير حجم الحبيبات على المسامية ٥٧
تأثير التصنيف على المسامية ٥٨
تأثير شكل الحبيبة (التكور والاستدارة) على المسامية ٥٩
العلاقة بين الطراز والمسامية ٥٩
تأثير عملية الدموج (الإحكام) على المسامية الأولية ٦٣
المسامية الثانوية (مسامية بعد الترسيب) ٦٤
نشأة المسامية الثانوية ٧٠
- دموج وإحكام الطين ٧٣
- دموج وإحكام الرمل ٧٦
- ملخص عملية الدموج والإحكام ٧٨

الفصل الثالث: التجوية ٨١
● مقدمة ٨٣
● الدورة الرسوبية ٨٥
● التجوية الفيزيائية ٨٨
- نمو البلورة ٨٨
- التجوية بالصقيع ٨٩
- التجوية بالملح ٩٠
- التجوية بأشعة الشمس ٩١
● التجوية الكيميائية ٩٣
١ - أللاّتريت ٩٩
٢ - البوكسيت ١٠٠
٣ - طين الصين ١٠١
● التجوية الحيوية وتكوين التربة ١٠٢

الفصل الرابع: النقل والترسيب ١٠٧
● مقدمة ١٠٩
● النقل والترسيب بالماء ١١٠
(أ) النقل والترسيب الكيميائي ١١١
(ب) النقل والترسيب الفيزيائي ١١٣
- ميكانيكية النقل الفيزيائي ١١٦
١ - الحمل المعلق ١١٦
٢ - الحمل الطبقي ١١٧
- النقل وعلاقة سرعة التيار بحجوم الحبيبات ١٢١
(جـ) عمليات النقل والترسيب الفيزيائي المائية ١٢٤
١ - رواسب تيارات السحب أو الجر ١٢٤
٢ - رواسب تيارات العكر ١٢٨

٣ ـ رواسب الماء العالقة ١٣٣
● النقل والترسيب بالهواء ١٣٤
١ ـ رواسب تيارات الهواء الزاحفة ١٣٦
٢ ـ الكثبان الرملية ١٣٨
(أ) كثبان البارخان ١٣٨
(ب) كثبان نجمية ١٣٩
(جـ) كثبان طولية ـ أو كثبان السيف ١٤٠
(د) كثبان مستقيمة ١٤١
٣ ـ رواسب الهواء العالقة ١٤٣
● النقل والترسيب بالثلاجات ١٤٤
● النقل والترسيب بالجاذبية الأرضية ١٤٧

الفصل الخامس: البِنْيَات الرسوبية ١٥١
● مقدمة ١٥٣
● التطبق ١٥٤
● تشكيل الطبقات وأنظمة التدفق ١٥٩
أولاً: البنيات الرسوبية الأولية (الفيزيائية) ١٦١
(أ) ـ المجموعة الأولى: بِنْيَات قبل الترسيب ١٦٤
١. أسطح عدم التوافق ١٦٤
٢. القنوات ١٦٥
٣. الغرف ـ و ـ الملء ١٦٧
٤. بِنْيات علامات القاع ١٦٧
(ب) المجموعة الثانية: بِنْيات أثناء الترسيب ١٧٢
١. التطبق المصمت ١٧٣
٢. التطبق المستوي ١٧٤
٣. التطبق المترقق ١٧٩

٣ ـ رواسب الماء العالقة ١٣٣
● النقل والترسيب بالهواء ١٣٤
١ ـ رواسب تيارات الهواء الزاحفة ١٣٦
٢ ـ الكثبان الرملية ١٣٨
(أ) كثبان البارخان ١٣٨
(ب) كثبان نجمية ١٣٩
(جـ) كثبان طولية ـ أو كثبان السيف ١٤٠
(د) كثبان مستقيمة ١٤١
٣ ـ رواسب الهواء العالقة ١٤٣
● النقل والترسيب بالثلاجات ١٤٤
● النقل والترسيب بالجاذبية الأرضية ١٤٧

الفصل الخامس: البِنْيَات الرسوبية ١٥١
● مقدمة ١٥٣
● التطبق ١٥٤
● تشكيل الطبقات وأنظمة التدفق ١٥٩
أولاً: البنيات الرسوبية الأولية (الفيزيائية) ١٦١
(أ) ـ المجموعة الأولى: بِنْيَات قبل الترسيب ١٦٤
١. أسطح عدم التوافق ١٦٤
٢. القنوات ١٦٥
٣. الغرف ـ و ـ الملء ١٦٧
٤. بِنْيات علامات القاع ١٦٧
(ب) المجموعة الثانية: بِنْيات أثناء الترسيب ١٧٢
١. التطبق المصمت ١٧٣
٢. التطبق المستوي ١٧٤
٣. التطبق المترقق ١٧٩

٤ . التطبق المتدرج ١٨٢
٥ . التطبق المتقاطع ١٨٥
٦ . التطبق النيمي والترقق المتقاطع ١٩٠
(جـ) المجموعة الثالثة : بِنْيَات بعد الترسيب ١٩٧
١ . بِنْيات طوابع الثقل ١٩٩
٢ . الدرنات الكاذبة ٢٠٠
٣ . التطبق الملفوف أو المطوي ٢٠٠
٤ . الترقق المطوي ٢٠٤
٥ . الهوابط والانزلاقات ٢٠٧
(د) المجموعة الرابعة : بِنْيات رسوبية متنوعة ٢٠٨
١ . بِنْيات الشقوق المختلفة ٢٠٨
٢ . بِنْية آثار المطر ٢١٢
٣ . بِنْية قواطع الرمل ٢١٢
٤ . بِنْية الملح الكاذبة ٢١٣
ثانيًا : البِنْيات الرسوبية الحيوية ٢١٣
ثالثًا : البِنْيات الرسوبية الثانوية (الكيميائية) ٢٢٠
١ . الدرنات ٢٢١
٢ . ـ مخروط ـ في ـ مخروط ٢٢٦
٣ . ـ الجيود ٢٢٨
٤ . ـ الدرن الشعاعي ٢٣٠
٥ . ـ الزوائد الصخرية ٢٣٣
● خاتمة ٢٣٨

الفصل السادس : الرواسب المجلوبة النشأة ٢٣٩
● مقدمة ٢٤١
أولاً : مكونات الصخور الرسوبية ٢٤١

١ . مكونات رواسب أرضية ٢٤١
٢ . مكونات كيميائية غير نقية (غير عادية) ٢٤٢
٣ . مكونات كيميائية نقية (عادية) ٢٤٢
ثانيًا : أصناف الرواسب ٢٤٤
١ . الرواسب الكيميائية ٢٤٤
٢ . الرواسب العضوية ٢٤٤
٣ . الرواسب الأرضية ٢٤٤
٤ . الرواسب الفتاتية النارية ٢٤٤
٥ . الرواسب المتخلفة ٢٤٤
ـ تصنيف الرواسب المنقولة ٢٤٨
● أولاً : صخور الوحل ٢٥٠
ـ أحجار الطين النقية ومعادن الطين ٢٥٨
● ثانيًا : أحجار الرمل ٢٥٩
ـ تسمية وتصنيف الرمل ٢٦١
ـ وصف أحجار الرمل ٢٦٦
الكوارتزيت ٢٦٦
الأركوز ٢٦٨
الواكي ٢٧٠
● دراسة أحجار الرمل تحت المجهر ٢٧٥
● التركيب المعدني لأحجار الرمل ٢٨٠
١ ـ المرو ٢٨٢
(أ) المصدر ٢٨٣
(ب) التثابت المتباين ٢٨٩
٢ ـ الفلسبار ٢٩٠
(أ) أنواع التغييرات ٢٩٠
(ب) المصدر ٢٩٥

٣ ـ الْكِسَر الصخرية ٢٩٧
● حركية الألواح ٣٠١
٤ ـ المعادن الإضافية ٣٠٢
٥ ـ المعادن الثقيلة ٣٠٥
٦ ـ الميكا ٣٠٩
٧ ـ الجلوكونيت ٣١١
● إعادة دورة الحبيبة ٣١٢
ـ تأثير عمليات النشأة المابَعْدِيَّة على مسامية أحجار الرمل ٣١٤
١ ـ رحلة التأكسد والاختزال ٣١٥
٢ ـ مرحلة السمنتة والالتحام ٣١٧
٣ ـ مرحلة الحد الفاصل بين النشأة المابَعْدِيَّة والتحول المنخفض ٣٢١
٤ ـ مرحلة ما بعد النشأة المابَعْدِيَّة ٣٢١
● ثالثًا: صخور الحصى ٣٢٣
(أ) المُدَمْلَكَات ٣٢٤
(ب) البريشيات الرسوبية ٣٢٨
● رابعًا: صخور الفتات النارية ٣٢٩

الفصل السابع: الرواسب الحوضية النشأة ٣٣٣
● مقدمة ٣٣٥
● صخور الكربونات ٣٤٠
ـ معادن الكربونات ٣٤١
معدن الكلسيت ٣٤١
معدن الأراجونيت ٣٤٢
معدن الدلوميت ٣٤٤
معدن السدريت ٣٤٤
ـ مكونات صخور الكربونات ٣٤٥

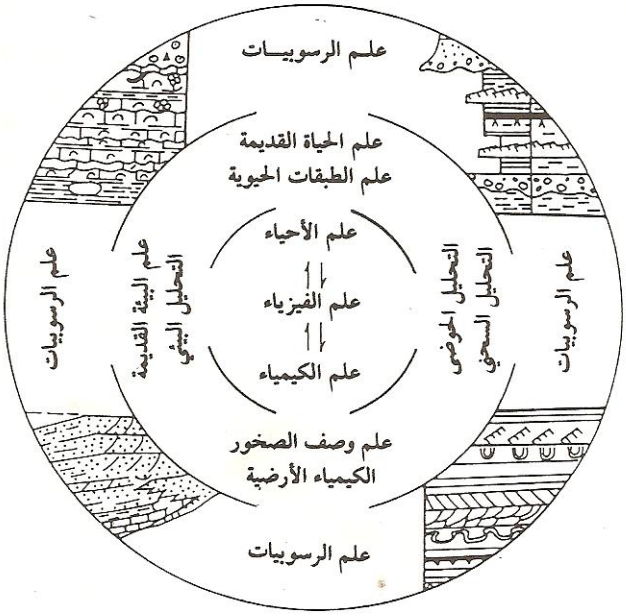
١ ـ الحبيبات ٣٤٦
٢ ـ راسب الأرضية ٣٥٠
٣ ـ اللاحم ٣٥١
ـ تصنيف وتسمية صخور الكربونات ٣٥١
ـ تصنيف فولك لأحجار الجير ٣٥٢
ـ تصنيف دنهام لأحجار الجير ٣٦١
أولاً : أنواع أحجار الجير الرئيسة ٣٦٣
ـ النشأة المابَعْدِيَّة ونشوء المسامية في صخور الكربونات ٣٧٢
١ ـ عملية التبلور النتوئي ٣٧٥
٢ ـ عملية تجدد التبلور ٣٧٦
٣ ـ عملية الحل والذوبان ٣٧٧
٤ ـ عملية التسلكن ٣٧٧
ثانيًا : أحجار الدلوميت ٣٧٨
التدلمت المبكر ذو النشأة المابَعْدِيَّة ٣٨٠
التدلمت المتأخر ذو النشأة المابَعْدِيَّة ٣٨٢
● الصخور الشِّعَابية ٣٨٤
● حجر الفحم الطبيعي ٣٨٦
● صخور البخر ٣٩٠
ـ صخور ومعادن كبريتات الكالسيوم ٣٩٢
ـ صخر الملح ٣٩٥
● صخور سليكونية ٣٩٧
● صخور الفوسفوريت ٣٩٩
● صخور الحديد الرسوبية ٤٠٤
● عُقَيْدات المنجنيز ٤١٠
● صخر الأستروماتوليت ٤١٤

١ ـ الحبيبات ٣٤٦
٢ ـ راسب الأرضية ٣٥٠
٣ ـ اللاحم ٣٥١
ـ تصنيف وتسمية صخور الكربونات ٣٥١
ـ تصنيف فولك لأحجار الجير ٣٥٢
ـ تصنيف دنهام لأحجار الجير ٣٦١
أولاً: أنواع أحجار الجير الرئيسة ٣٦٣
ـ النشأة المابَعْدِيَّة ونشوء المسامية في صخور الكربونات ٣٧٢
١ ـ عملية التبلور النتوئي ٣٧٥
٢ ـ عملية تجدد التبلور ٣٧٦
٣ ـ عملية الحل والذوبان ٣٧٧
٤ ـ عملية التسلكن ٣٧٧
ثانيًا: أحجار الدلوميت ٣٧٨
التدلمت المبكر ذو النشأة المابَعْدِيَّة ٣٨٠
التدلمت المتأخر ذو النشأة المابَعْدِيَّة ٣٨٢
● الصخور الشِّعَابية ٣٨٤
● حجر الفحم الطبيعي ٣٨٦
● صخور البخر ٣٩٠
ـ صخور ومعادن كبريتات الكالسيوم ٣٩٢
ـ صخر الملح ٣٩٥
● صخور سليكونية ٣٩٧
● صخور الفوسفوريت ٣٩٩
● صخور الحديد الرسوبية ٤٠٤
● عُقَيْدات المنجنيز ٤١٠
● صخر الأستروماتوليت ٤١٤

الفصل الثامن: السِّحْنات والبيئات الرسوبية ٤١٩
● مقدمة ٤٢١
● معاملات السِّحْنة ٤٢٥
ـ الشكل الحجمي لِلسِّحْنة ٤٢٥
ـ معرفة نوعية صخر السِّحْنة ٤٢٦
ـ معرفة البِنْيات الرسوبية السائدة في السِّحْنة ٤٢٧
ـ معرفة أنظمة التيارات القديمة ٤٢٧
ـ تعريف أحافير السِّحنة ٤٢٨
● الدورات الترسيبية والتتابع الترسيبي ٤٣٠
● تصنيف البيئات الرسوبية ٤٣١
● وصف البيئات الرسوبية ٤٣٤
أولاً: البيئات القارية ٤٣٥
البيئات الصحراوية ٤٣٥
البيئات النهرية ٤٤٩
البيئات البحيرية ٤٦٩
البيئات المثلجية ٤٧٥
ثانيًا: البيئات الإنتقالية (شاطئية بحرية) ٤٧٨
بيئات الدلتا ٤٧٨
بيئات الحواجز الرملية ٤٨٧
ثالثًا: البيئات البحرية ٤٩٥
بيئات الأرصفة القارية ٤٩٥
بيئات شعابية ٥٠٥
بيئات الْعَكر ٥١٨
بيئات لُجِّيَّة ٥٢٨

المراجع ٥٣٣
أولاً: المراجع العربية ٥٣٣
ثانيًا: المراجع الأجنبية ٥٣٥
ثالثًا: المراجع الإضافية ٥٨٦
ثبت المصطلحات العلمية ٥٩٥
أولاً: عربي - إنجليزي ٥٩٥
ثانيًا: إنجليزي - عربي ٦٤٩
كشّاف الموضوعات ٧٠٣

الفصل الأول



تعريف بعلم الرسوبيات

● مقدمة ● علاقة علم الرسوبيات بالعلوم الأخرى ● علم الرسوبيات عند العرب

مقدمة

يقصد بعلم الرسوبيات، دراسة جميع أنواع الرواسب ذات النشأة الفتاتية والكيميائية من حيث وصفها وخصائصها ومعرفة بيئات ترسيبها. وتشمل هذه الدراسة التغييرات المتأخرة التي تحدث في الصخور الرسوبية بعد ترسيبها، ومدى تأثر هذه الرواسب بخصائص البيئة المحيطة والملمة لها. ويعرَّف الراسب بالجسيمات الصخرية أو المعدنية التي تترسب في وسط مائي أو ما تحمله الرياح من حبيبات صخرية تستقر فيما بعد على أسطح الأرض أو تحت سطح المسطحات المائية المختلفة.

وسنحاول في هذا الفصل أن نقدم للدارس فكرة شاملة عن علم الرسوبيات وتاريخ تطوره وعلاقته بالعلوم الأخرى عامة وبعلوم الأرض خاصة.

يمتد تاريخ علم الرسوبيات إلى العصر الحجري عندما استخدم الإنسان حجر الصّوّان لطحن الحبوب وإشعال النار، وحجر الطين في بناء سكنه الذي يقيه الحر والبرد ويوفر له الأمان والاطمئنان وما إلى ذلك من أمور متعددة. ولكن تحضر ومدنية الإنسان في العصور المتأخرة جعلته يكتشف أهمية أنواع الصخور الرسوبية اقتصاديًا، فمثلاً: استخدمت الرمال في صناعة الزجاج، والحجر الجيري في صناعة الأسمنت والطين في صناعة الخزف والفحم الحجري كمصدر للطاقة وتم استغلال المعادن الاقتصادية الموجودة في الصخور الرسوبية مثل الحديد والفوسفات وغيرها صناعيًا واقتصاديًا. كما استخرج النفط والغاز الطبيعي والماء من خزّانات الصخور الرسوبية التي تحتويها لتلبية حاجات التنمية الاقتصادية والاجتماعية.

ولقد وضع، أسس الجيولوجيا الرسوبية الحديثة، علماء ذوو مكانة علمية منذ زمن بعيد ومن بين هؤلاء الرجال نذكر على سبيل المثال ليوناردو فينشي وهتن وسميث. إن ما كتبه كل من سوربي (Sorby, 1853, 1908) وشارل لايل (Lyell, 1865) في نهاية القرن التاسع عشر عن العمليات الحديثة التي تنشأ عنها تكوين الرواسب الحديثة، يمكن الاستفادة منها واستخدامها في تفسير البنيات والأنسجة الرسوبية التي تحملها الرواسب القديمة، كما يمكن التوصل إلى معرفة بيئات الرواسب القديمة إذا أدركنا خصائص ومميزات بيئات الترسيب الحديثة.

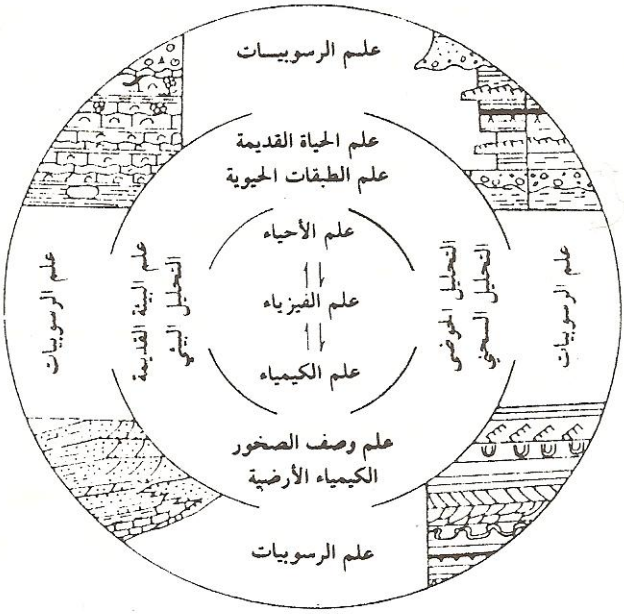
وأفاد (Selley, 1976, 1990, 1992) أن نشأة علم الرسوبيات الحديث لم يصدر من

اتحاد مفهوم علم الطبقات ودراسة هذه الرواسب تحت المجهر (بتروغرافية الرواسب) ولكن يبدو أنه تطور من اتحاد بين احتياجات ومفاهيم الجيولوجيا البنائية وعلم البحار. فلقد كان ولا يزال علماء الجيولوجيا البنائية يبحثون عن خصائص ترشدهم للتمييز عما إذا كانت الطبقات الموجودة في مناطق تكتونية، هل هي مقلوبة أم في وضعها الطبيعي. ويجب معرفة ذلك عند رسم خرائط الجيولوجيا الاقليمية. والذي يساعد على تحديد ذلك هي البنيات الرسوبية مثل شقوق التقلص (شقوق الطين) وعلامات النيم والتطبق المتدرج. وقد شملت دراسة (Shrock, 1948) تفاصيل هذا الموضوع بصورة متكاملة. ومن بين علماء الجيولوجيا البنائية الذين أسهموا في إيضاح العلاقة الموجودة بين الرسوبيات والجيولوجيا البنائية، العالم (Eduard Bailey, 1930) عندما كتب ورقة بحثه بعنوان: (إضاءة جيدة على الترسيب وتشكيل الصخور (New Light on Sedimentation and Tectonics). ولقد شاركت دراسات أخرى في تقويم وتأسيس علم الرسوبيات ومن أهم هذه الدراسات صناعة الزيت وشركات البترول والأبحاث التي قامت بها الجامعات في هذا المضمار ومعاهد علم البحار. وجميع هذه الدراسات وفرت الكثير من المعطيات والمعلومات المتعلقة بالرواسب الحديثة وبالمقارنة يمكن معرفة وتفسير خصائص ومميزات الرواسب القديمة.

علاقة علم الرسوبيات بالعلوم الأخرى

يوضح الشكل (١) والجدول (١) العلاقة بين علم الرسوبيات والعلوم الأساسية الأخرى مثل علم الأحياء، وعلم الفيزياء، وعلم الكيمياء. ويجدر بنا أن نلخص ما كتبه (Selley 1976, 1992) في هذا المضمار كالتالي:

- إن تطبيق أحد هذه العلوم الأساسية في دراسة الرواسب يعطي خطوطاً عريضة للبحث في علوم الأرض بشكلٍ عام وفي علم الرسوبيات بشكلٍ خاص. ويساعد هذا على تحديد مكانة علم الرسوبيات بين محتويات علم الجيولوجيا.
- يتضمن علم الأحياء دراسة الحيوانات والنباتات، وبالمقارنة يمكن تطبيق ذلك على أحافيرها الموجودة في الرواسب القديمة. وقد يهتم علم الحياة القديمة (Paleontology) بدراسة مستفيضة ومستقلة لنشأة وأشكال وبنيات وتقسيم [illegible]



شكل (١ . أ) . علاقة علم الرسوبيات بالعلوم الأساسية الأخرى.

جدول ١ . علاقة أفرع علم الرسوبيات بالعلوم الأخرى

علم الأحياء	علم الحياة القديمة	
	علم الأحياء الطبقية	
	علم البيئة القديمة	
	التحليل البيئي	
	التحليل السحني	
	التحليل الحوضي	
علم الفيزياء		
	دراسة الصخور	دراسة خصائص المسامية والنشأة المابَعْدِيَّة
	تحت المجهر	
علم الكيمياء	الكيمياء الجيولوجية	

(عن : Selley, 1976)

الأحافير. ويستلزم ذلك إستبعاد الأحافير من المفهوم الرسوبي.

● إن لدراسة الأحافير في إطار رواسبها فائدتان، الأولى أن علم الطبقات (Stratigraphy) يعتمد على تعريف النطاقات الطبقية الحيوية وعلى دراسة علاقتها بالوحدات الطبقية الصخرية. وبذلك تصبح دراسة الطبقات الحيوية (Biostratigraphy) الجيدة ضرورية للتحليل الرسوبي والتحليل الجيولوجي البنائي الإقليمي. والفائدة الثانية من دراسة الأحافير يتضمن مفهوم سلوكيات هذه الأحافير عندما كانت حية ومواطنها والعلاقة فيما بينها وخصائص أماكن وجودها. ويعني هذا معرفة بعلم البيئة القديمة (Paleoecology) التي كانت تعيش فيها هذه الأحياء. وحين يتم الاحتفاظ بهذه الأحافير في أماكن استيطانها فإن ذلك يساعد على تفهم وتحليل البيئة القديمة التي ترسبت فيها الرواسب الحاوية على هذه الأحافير، (Ager, 1963). وقد أشار (Selley, 1978) بأن التحليل البيئي (Environmental analysis) يتضمن تحديد البيئة الترسيبية للراسب.

ولكي نحدد البيئة الترسيبية لصخر رسوبي فإنه يتضح لنا أهمية تعريف وتفسير خصائص الأحافير التي يحتويها هذا الصخر، وعلى سبيل المثال: تشير الطبقة الغنية بجذور النباتات (Root bed) إلى بيئة قارية، وتدل طبقة الشُّعْب المرجانية على بيئة بحرية وهكذا. ومع ذلك يعتمد علم الرسوبيات التطبيقي على دراسة الشقف الصخرية المستحصل عليها من الآبار الثقبية ولكن في مثل هذه المشاريع تحت السطحية يلعب علم الأحافير الدقيقة الدور الرئيس في معرفة الطبقات الرسوبية وبيئات ترسيبها. وتعتبر الأحافير العينية والمجهرية عنصرًا أساسيًّا في بناء بعض الصخور الرسوبية (مثل أحجار الجير). لذا يعتبر شِقا علم الحياة القديمة (دراسة الأحافير الكبيرة والأحافير الدقيقة) ذي أهمية عظمى بالنسبة لعلم الرسوبيات.

كما يعتمد التحليل البيئي على تفسير الخصائص الطبيعية للصخر الرسوبي. ويشتمل ذلك معرفة حجوم الحبيبات وأنسجتها والبنيات الرسوبية. ويتضمن مفهوم القوى المائية دراسة حركة السائب (Fluid movement) وتختص القوى المائية بالعلاقة الموجودة بين تدفق السائب والحبيبات الصلبة. وقد أشار (Allen, 1970b) إلى إمكانية دراسة هذه الأنظمة الطبيعية باستخدام النظريات الرياضية والتجارب المختبرية أو في

الدراسة الحقلية في البيئات الرسوبية الحديثة. كما يمكن تطبيق هذه الخطوط التحليلية في المعاملات الطبيعية للرواسب القديمة وذلك لتحديد عمليات السوائب (Fluids) التي تتحكم في ترسيب هذه الرواسب.

وتستلزم دراسة التحليل البيئي تطبيق علم الكيمياء في دراسة الرواسب. حيث تدل المعادن الفتاتية للصخور القارية على مصادرها وتاريخ ترسيبها السابق. كما يمكن من دراسة المعادن ذات النشأة المحلية (Authigenic minerals) التعرف على بيئة ترسيب الصخر وتاريخ النشأة المابَعْدِيَّة اللاحق.

ومن هنا يمكننا القول إن التحليل البيئي لراسب ما يشتمل على تطبيق علم الأحياء والفيزياء والكيمياء على الصخور الرسوبية.

يشكل التحليل السحني (Facies analysis) فرع من أفرع علم الرسوبيات الإقليمي والذي يتضمن ثلاثة تمارين. حيث يجب تجميع رواسب منطقة ما في سحنات تعرف بصخورها وبنياتها الرسوبية وأحافيرها. و يستنبط من ذلك بيئة كل سحنة وتوضع السحنات ضمن إطار زمني مستخدمين علم الطبقات الحيوية (Biostratigraphy).

ويتشابه التحليل السحني مع التحليل البيئي في استخدام علم الأحياء والفيزياء والكيمياء للتعرف على خصائص الصخور الرسوبية. إلا أن التحليل السحني، وعلى مقياس إقليمي واسع النطاق، يشتمل على دراسة جميع أحواض الترسيب كجزء متكامل. وهنا تصبح أهمية الفيزياء الجيولوجية (Geophysics) مرتبطة ليست فقط بالغطاء الرسوبي ولكن بفهم الخصائص الطبيعية والعمليات المتعلقة بالقشرة الأرضية التي تشكلت منها الأحواض الرسوبية.

لقد استخدمت مصطلحات علم خصائص الصخور (Petrology) ودراسة الشرائح الصخرية تحت الجهر (Petrography) بشكل تطبيقي متبادل لكي تعطى دراسة الصخور تحت المجهر (Carozzi, 1960; Folk, 1974). وتشتمل هذه الدراسة الخصائص الطبيعية وهي من خصائص المسامية والنفاذية للصخر نفسه وهذه متعلقة بالدراسة المعدنية للصخور.

ويستفاد من دراسة مكونات الصخر الرسوبي في اكتشاف مصادر الصخور القارية وفي معرفة بيئات العديد من صخور الكربونات وتكشف دراسة الشرائح

الصخرية تحت المجهر عن عمليات النشأة المابَعْدِيَّة أو التغيرات التي يتعرض لها الراسب بعد ترسيبه وتكوينه. وتوضح دراسة نشأة المعادن المابَعْدِيَّة (Diagenesis) الكثير من التفاعلات الكيميائية التي تحدث بين مكونات الصخر الرسوبي والسوائب التي تتدفق بين مساماته. وتقع أهمية دراسة النشأة المابَعْدِيَّة لما ينتج عنها من ازدياد أو انخفاض في نسبة مسامية ونفاذية الصخر. وهذا له علاقة وطيدة بدراسة خزانات المياه (Aquifers) ومخازن الهيدروكربونات أو الفحوم الهيدروجينية (Hydrocarbon reservoirs) وتساعد دراسة التغيرات المعدنية المابَعْدِيَّة التي تحدث في الصخر الرسوبي على تفهم عمليات النشأة المابَعْدِيَّة والتي تتشكل عنها رواسب معدنية متعددة مثل كبريتيد الزنك والرصاص. ويستخدم مصطلح جيوكيمياء الرسوبيات (Sedimentary geochemistry) في تطبيق الدراسة الكيميائية البحتة على الصخور الرسوبية. ويتم ذلك في دراسة الرواسب الكيميائية والرواسب ذات التَّمعْدن الدقيق والتي يصعب دراستها تحت المجهر. ونذكر هنا بعض هذه الرواسب مثل معادن الطين والفوسفات وصخور البخر.

وتهتم دراسة الكيمياء الأرضية العضوية بتكوين ونضوج الفحم الحجري وخام الزيت والغاز الطبيعي.

وسوف يظهر لنا من دراسة الفصول القادمة كيف أن العلوم الأساسية مثل الأحياء والفيزياء والكيمياء تلعب دورًا كبيرًا في تحديد مفهوم علم الرسوبيات وفي تحقيق الفائدة المرجوة منه. . لذا يجب أن ندرك حقيقة الأمر وهي أن علم الرسوبيات يعتمد كلية على هذه العلوم الأساسية في الوصول إلى معرفة الغاية المرجوة منه.

علم الرسوبيات عند العرب

لقد كان لعلم الرسوبيات نصيب عند علماء العرب والمسلمين ومن بين هؤلاء العلماء كلٌ من محمد الكرخي وأبي الريحان البيروني وأبي علي ابن سينا. ونوجز فيما يلي ما ساهم به هؤلاء العلماء في حقل علم الجيولوجيا عامة وما يتعلق بعلم الرسوبيات خاصة:

محمد بن الحسن بن الحاسب الكرخي

لا نعرف عن هذا العالم العربي إلا أنه قد عاش في القرن الخامس الهجري ولم يصلنا من كتبه غير كتابه المسمى «أنباط المياه الخفية» الذي طبع في الهند سنة ١٣٥٩هـ. وقد تحدث فيه عن كيفية استخراج المياه الجوفية والعلامات الدالة على وجود الماء والأجهزة الهندسية المستخدمة في بناء القنوات. يقول الكرخي في كتابه «أنباط المياه الخفية»:

«في الأرض حركات دائمة، منها طلب الأبنية للوقوع والانهدام والميل عن سمت الاستقامة، وكذلك الجبال والقلاع تنهار قليلا وتتفتت طلباً للمركز والأرض الرخوة في تربتها حركة دائمة، وهي طلب أجزائها الصلابة باعتماد بعضها على بعض. وأعظم هذه الحركات المذكورة انتقال المياه العظيمة وجريان الأودية القوية من أرض إلى أرض في الأزمنة الطويلة، فإذا اجتمعت موادها في ناحية من نواحيها وارتفعت حتى بعد سطحها من المركز وساوى ذلك بعد الوضع المحاذي له الذي يقابله، ثم بعد المساواة زاد عليه، تحركت الأرض طلبا للمعادلة المذكورة. فتتغير لذلك عروض البلاد ومطالعها وأنصاف نهارها، ويعتبر ذلك سبب انتقال البحار وظهور عيون وغيض عيون ولا يكون ذلك دفعة واحدة في ساعة واحدة بل يكون على التدريج كانتقال العمارات من الأرض لأرض» (الكرخي، ١٣٥٩هـ).

ونلاحظ من النص السابق أن الكرخي قد بين فكرة التوازن الأرضي، كما أشار إلى الدورة التضاريسية التي تنتهي عند اكتمالها بما يعرف بشبه السهل ثم تتلوها عملية إعادة التوازن الأرضي فتبعث التضاريس من جديد لتبدأ دورة تضاريسية أخرى.

أبو الريحان البيروني

وهو من أعظم العلماء العرب المسلمين الذين أسهموا في تطور الفكر الجيولوجي. وقد درس البيروني آراء السابقين حول فكرة تبادل اليابس والماء، وحاول أن يربط بين المعرفة النظرية والعملية، ويظهر هذا من خلال نصَّين من أهم النصوص المنسوبة إليه،

أو لهما يتعلق ببادية العرب في شمال شبه الجزيرة العربية، ويتعلق الثاني بتفسيره لأصل سهول الهند الممتدة جنوب الهيملايا:

١ ـ «ينتقل البحر إلى البر، والبر إلى البحر في أزمنة، إن كانت قبل كون الناس في العالم فغير معلومة، وإن كانت بعده فغير محفوظة لأن الأخبار تنقطع اذا طال الأمـد عليها، وخاصة في الأشياء الكائنة جزءا بعد جزء، بحيث لا تفطن لها إلا الخواص. فهذه بادية العرب وقد كانت بحرا فانكبس حتى أن آثار ذلك ظاهرة عند حفر الآبار والحياض بها، فإنها تبدى أطباقًا من تراب ورمال ورضراض، ثم فيها من الخزف والزجاج والعظام ما يمتنع أن يحمل على دفن قاصد إياها هناك بل تخرج منها أحجار إذا كسرت كانت مشتملة على أصداف وودع ومايسمى آذان السمك، إما باقية على حالها وإما بالية قد تلاشت وبقى مكانها خلاء متشكلا بشكلها».

٢ ـ «وأرض الهند من تلك البراري، يحيط بها من جنوبها بحرهم المذكور (المحيط الهنـدي) ومن سائـر الجهـات تلك الجبال الشوامخ، وإليها مصاب مياههـا بل لو تفكرت عند المشاهدة فيها وفي أحجارها المدملكة الموجودة إلى حيث يبلغ الحفر، عظيمة بالقرب من الجبال وشدة جريان مياه الأنهار، وأصغر عند التباعد وفتور الجري، ورمالا عند الركود والاقتراب من المفايض والبحر، لم تكـد تصور أرضهم إلا بحرا في القديم وقد انكبس بحمولات السيول». (البيروني، ١٩٥٨م).

أبو علي الحسين بن سينا

اشتهر ابن سينا بأبحاثه الطبية والفلسفية، ولكن له بعض الأبحاث العلمية المتعلقة بالأرض والكون ذات قيمة كبيرة، كما يمكن أن نعتبر ابن سينا هو مؤسس علم الأرض عندما نستعرض أعماله وأبحاثه في مجال الجيولوجيا والجيومورفولوجيا. ونجد في كتابات ابن سينا مجموعة من النصوص التي تضيف الكثير من حيث انتقال اليابس والماء، ويؤكد في جميع كتاباته على عنصر الزمن، وأن ذلك يتم ببطء وعلى مدى فترات طويلة. ومن تلك النصوص نختار نصَّين في غاية الأهمية:

١ ـ «ويجوز أن يعرض للبحر أيضا أن يفيض قليلاً قليلاً على بر مختلط سهل وجبل ثم ينضب عنه، فيعرض للسهل منه أن يستحيل طيناً ولا يعرض ذلك للجبل وإذا استحال طيناً كان مستعدًا لأن يتحجر عند الانكشاف ويكون تحجره تحجرًا سافيًا قويًا، وإذا وقع الانكشاف على ما تحجر وبما كان المتحجر القديم، في حد ما، استعد للتفتت، ويجوز أن يكون ذلك يعرض له عكس ما عرض للتربة من أن هذا يرطب ويلين عودًا ويعود ترابًا وذلك يستعد للحجرية، كما إذ نقعت أجرة وتراباً وطيناً في الماء ثم عرضت الأجرة والطين والتراب على النار عرض للأجرة أن زادها الاستنقاع استعداداً للتفتت بالنار ثانياً وللتراب والطين استعداداً لاستحجار قوى».

٢ ـ «والجبال تكونها من أحد أسباب تكون الحجارة، والغالب أن تكونها من طين جف على طول الزمان، تحجر في مدد لا تضبط، فيشبه أن تكون هذه المعمورة قد كانت في سالف الأيام غير معمورة بل مغمورة في البحار فتحجرت، أما بعد الانكشاف قليلاً قليلاً في مدد لاتفي التأريخيات بحفظ أطرافها، وأما تحت المياه لشدة الحرارة المختفية تحت البحر، والأولى أن يكون بعد الانكشاف وأن تكون طينتها تُعِينها على التحجر، إذاً تكون طينها لزجة، ولهذا ما يوجد في كثير من الأحجار إذا كسرت أجزاء الحيوانات المائية كالأصداف وغيرها».

وقد أدرك ابن سينا هنا فكرة تغيرات مابعد الترسيب وهي التغييرات اللازمة لتحويل الرسوبيات إلى صخور. (ابن سينا، ١٩٦٥م).

ولمزيد من المعلومات عن الجيولوجيا عند العرب إقرأ كتاب «أساسيات علم الجيولوجيا»، تأليف الدكتور محمد يوسف حسن وآخرين (١٩٨٣م، ص ص ٢١ ـ ٢٣) وكتاب «إسهام علماء المسلمين الأوائل في تطور علوم الأرض» تأليف النجار والدفاع (١٤٠٩هـ/١٩٨٨م).

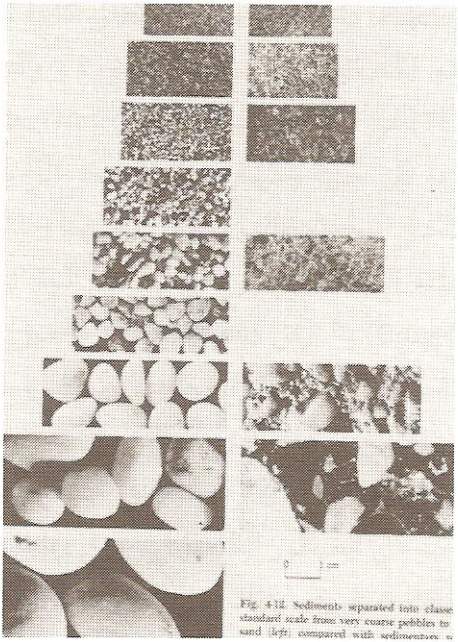


Fig. 4.12. Sediments separated into classe
standard scale from very coarse pebbles to
sand (left), compared with sediments o

الخصائص الطبيعية للحبيبات

● مقدمة ● حجم الحبيبة ● شكل الحبيبة ● النسيج السطحي للحبيبات ● الطراز ● التعبئة ● النفاذية ● المسامية ● العلاقة بين الطراز والمسامية.

مقدمة

يقصد بدراسة الخصائص الطبيعية للحبيبات الرسوبية (Sedimentary grains) معاينة خصائص هذه الحبيبات من حيث الحجم (Size) ، والشكل (Shape) ، وترتيب الجزيئات المعدنية (Fabric) داخل أي صخر، وتطلق كلمة نسيج (Texture) بصفة عامة على دراسة هذه الخصائص للجسيمات الرسوبية. وتختلف أنسجة الرواسب (Texture of sediments) عن البنيات الرسوبية (Sedimentary structures) في أن الأولى تمثل العلاقة الموجودة بين حُبَيْبة وحُبَيْبة داخل الصخر الواحد، بينما الأخيرة تتعلق بالبنيات الكبيرة الشكل والحجم والتي يمكن دراستها وملاحظتها على الطبيعة في الحقل. ومن بين أمثلة البنيات الرسوبية علامات النيم (Ripple marks) التطبق المتقاطع (Cross-bedding) والترقق (Lamination). وأفضل طريقة لدراسة عناصر النسيج الرسوبي هي استعمال عدسة مكبرة أو المجهر وكلاهما يستعمل في تكبير وتوضيح الجسيمات الصخرية. وتتم مثل هذه الدراسة باستعمال عيِّنة صخرية صغيرة في حالة استعمال العدسة المكبرة أو معاينة شريحة صخرية في حالة استعمال المجهر. وعادة تتم دراسة البنيات الرسوبية على الصخور الظاهرة في الحقل وقليل من هذه البنيات يمكن دراستها باستعمال عينات صخرية. وذلك مثل الترقق المتقاطع (Cross-lamination) أو التطبق المتدرج (Graded bedding).

ويعتقد أن معظم الرواسب الحديثة التكون، يوجد بها نسبة عالية من الفراغات أو المسام (Pores) وقد تصل نسبة المسام في حجر الرمل (Sandstone) وقت الترسيب ما بين ٢٠ ـ ٥٥٪ من نسبة الحجم العام للصخر نفسه. بينما قد تصل إلى نسبة ٨٠٪ من نسبة الحجم العام لصخر الغرين (Silt) أو الطين (Clay) عند وقت الترسيب (Pettijohn, 1975 and Selley, 1976) وهذه الظاهرة في الصخور الرسوبية تتناقص جذريا مع حالتها في الصخور النارية والمتحولة والتي قد تحتوي على نسبة ضئيلة من المسام الفراغية عند تكوينها (Pettijohn, 1975). ومع مرور الزمن تمتلىء الفراغات في الصخور الرسوبية بمحاليل المعادن الثانوية مثل الكربونات أو السليكا أو معادن الطين. ويؤثر هذا على مسامية الصخور فتنخفض درجة المسامية ويسمى النسيج الناشىء عن هذا التغير بالنسيج المتغير (Diagenetic textures). وهذه الأنسجة الناشئة

ما هي إلا تبلورات معدنية متأخرة التكوين. ويحتمل أن تبقى هذه المتبلِّورات المعدنية الجديدة لدرجة أن الترتيب الداخلي الرسوبي الأصلي يصعب رؤيته تحت المجهر. أو قد ينعدم، وفي معظم الحالات يبقى الترتيب الداخلي الأصلي على هيئة أثر باهت يمكن تقصِّيه تحت المجهر.

حجم الحُبَيْبة Grain Size

لقد أصبح من الطبيعي جداً لعلماء الجيولوجيا وخاصة علماء الرسوبيات (Sedimentologists) الحصول على معلومات جيولوجية واسعة النطاق والاستفادة من دراسة التحليل الحجمي لجسيمات (Particles) أو حبيبات (Grains) الرمل أو حجر الرمل. لذا نجد الكثير من المراجع العلمية المتخصصة تشير إلى طرق متعددة لأخذ حجوم حبيبات الرواسب (Grain sediments) وتفسير هذه الحجوم، بينما نجد القليل منها قد توسعت في دراسة الخصائص الطبيعية الأخرى للحبيبات مثل الشكل (Shape) الاستدارة (Roundness) أو التكور (Sphericity).

وإن من أبسط الطرق المتبعة في تقسيم حبيبات الرواسب يظهر في تحديد العلاقة الحجمية بين كل من الحصباء أو الزلط (Gravels) والرمل (Sands) والوحل (Mud) ويعتبر مقياس تدرج الحبيبات (Grade scale) للعالم ونتورث (Wentworth) للحبيبات (جدول ٢) هو الأكثر استعمالاً بين علماء الجيولوجيا، (Wentworth, 1922). أما مقياس فآي (Phi scale) الذي اقترحه كرومباين (Krumbein, 1934) فهو يحتفظ بالأسماء التدريجية في مقياس ونتورث ولكنه يحوِّل الحدود المتدرجة (Grade boundaries) إلى قيمة فآي (Phi = ∅) باستعمال اللوغاريتم (للأساس ٢) للقطر فتصبح المعادلة للمقياس فآي كالتالي:

فآي = − لو٢ قطر (مم)؛ $\text{Phi } (\varnothing) = -\log_2 \text{diam (mm)}$

وتظهر العلاقة بين كل من مقياس ونتورث ومقياس فآي المتدرجيْن في (الشكلين ١ب، ٢).

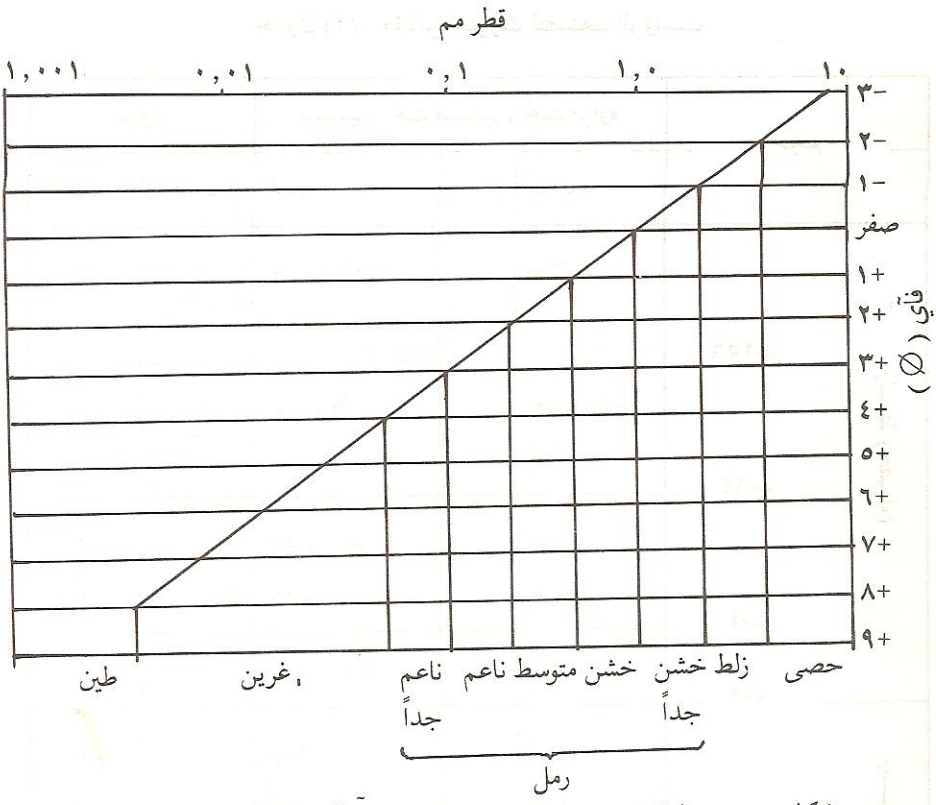
ولقد ذكر وَالي (Whalley, 1972) أن من السهل فهم محتويات حجم الحبيبة ولكن من الصعب أن نجد طرقًا صحيحة لقياس الجسيمات أو الحبيبات. فالشكل (٣)

جدول (٢). مقياس ونتورث لتصنيف الرواسب

مزواه		مستدير، تحت مستدير، تحت مزاوه			حجم	
تجمع	فتات	تجمع		فتات		
الدبش	كتل	جلاميد زلط جلاميد مُدَمْلَكَات		جلاميد	٢٥٦مم	زلط (حصباء)
رواهص مزواه	—	كبب زلط كبب مُدَمْلَكَات		حصى كبير أو كِبَبْ	٦٤مم	
	—	حصى زلط حصى مُدَمْلَكَات		حصى صغير	٤مم	
	—	حبيبات زلط		حَصِيَّات	٢مم	
- ١مم - خشن - $\frac{١}{٢}$مم -	—	رمل حجر رمل		رمل	$\frac{١}{١٦}$مم	رمل
—	—	غرين حجر طين		غرين	$\frac{١}{٢٥٦}$مم	طين غريني وحل
	—	طين صفحي		طين		طين

(عن: Wentworth, 1922)

يوضح لنا الطرق المختلفة والمتبعة حاليا في قياس حجم الحبيبات المختلفة مثل حبيبات الزلط، الرمل، الغرين (Silt) والطين (Clay). وأوضح (الحمدان، ١٩٧٥) أن معرفة حجم الحبيبة أوالجسيم تتم عن طريق معرفة طول قطرها إن كانت حبيبة دائرية

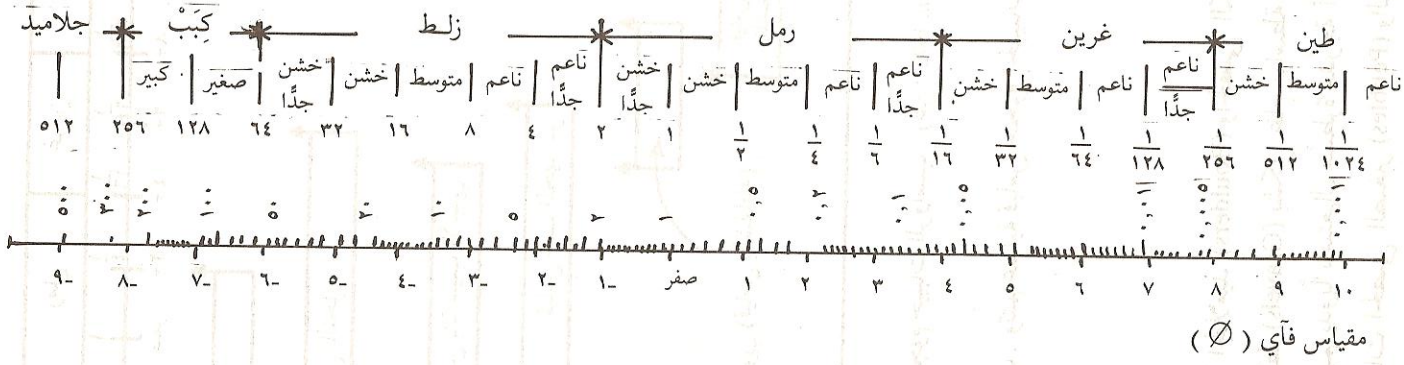


شكل (١ب). العلاقة بين مقياس ونتورث ومقياس فآي، (عن: Selley, 1976)

ومنتظمة الشكل بينما يتم تحديد حجم أي حبيبة غير منتظمة الشكل عن طريق أخذ المتوسط الحسابي لأقطارها المتعددة الأطوال. والطريقة الشائعة في قياس حجوم الحبيبات تعتمد على التقدير البصري ومقارنتها بعينات حبيبات معروفة أحجامها. وتكتسب هذه الطريقة بالخبرة المستمرة، وفي معظم الأحيان تعطي نتائج معتمدة. ويمكن قياس حجوم حبيبات كل من الرواسب الملتحمة الصلبة (Indurated sediments) أو الرواسب غير المتماسكة (Unconsolidated sediments) بإحدى الطرق التالية:

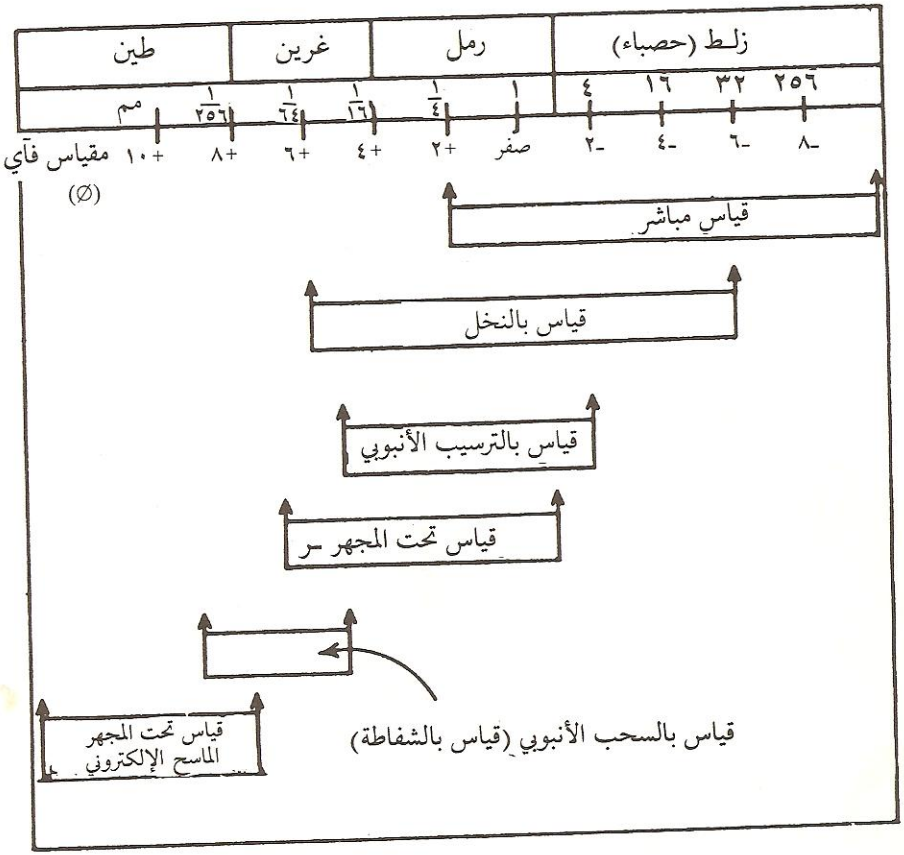
طرق القياس الحجمي للحبيبات Methods of grain size measurements

حيث إن الحبيبات تختلف في أحجامها فإن هناك طرقًا مختلفة تستعمل لقياس



شكل (٢). تحويل مقياس فآي إلى مقياس التدرج الحجمي بالمليمترات.

(عن: Pettijohn, 1975)



شكل (٣). الطرق المتعددة لقياس حجوم حبيبات الرواسب. (عن: Pettijohn *et. al*, 1972)

أحجام حبيبات وجسيمات الرواسب. وتتم عملية قياس حجوم الحبيبات كما هو موضح في الشكل (٣) وعلى النحو التالي:

١ ـ القياس المباشر

تتم معرفة حجوم كل من الجلاميد (Boulders) والحصى الكبير (Cobbles) والحصى الصغير (Pebbles) أو الزلط (Gravels) بشكل عام بواسطة القياس المباشر وذلك بقياس أقطار حبيبات كل منهم يدوياً باستعمال مِسْطرة مُدَرَّجة أو شريط معدني مدرج. وفي حالة قياس قطر حبيبات الحصى الصغير (Pebbles) والتي يصل معدل

قطرها إلى ٢ مم يمكن استعمال المجهر والمثبت عليه مقياس خاص يسمى «Eye piece micrometer» وبه تدريج خاص (الحمدان ١٩٧٥م، ص ٤٤).

٢ ـ استعمال المناخل

يتم فرز حجوم حبيبات الرمل وأيضا فرز الغرين (Silt) عن الطين (Clay) باستعمال المناخل المخصصة. وهذه الطريقة بُدىء في تطبيقها منذ عشرات السنين ولا تزال تعتبر من أفضل الطرق وأكثرها استعمالاً حيث تستخدم في معرفة حجوم حبيبات الرمل أو حبيبات حجر الرمل الهش أو غير الملتحم الحبيبات (Friable or uncemented) بينما تتم طريقة تحديد حجم حبيبات حجر الرمل المتماسك أو الملتحم الحبيبات (Cemented sandstone) عن طريق عمل شريحة صخرية له واستخدام المجهر في تحديد حجوم هذه الحبيبات، وتعتبر هذه الطريقة القياسية المباشرة لقياس حجوم الحبيبات على الشريحة الصخرية هي الطريقة المثلى والأكثر استعمالاً بعد أن استخدمها فريدمان (Friedman, 1958) والتي يمكن بواسطتها تحديد الحجم المتوسط (Mean size) للحبيبات وأيضا يمكن قياس تصنيف (Sorting) حبيبات الرمل.

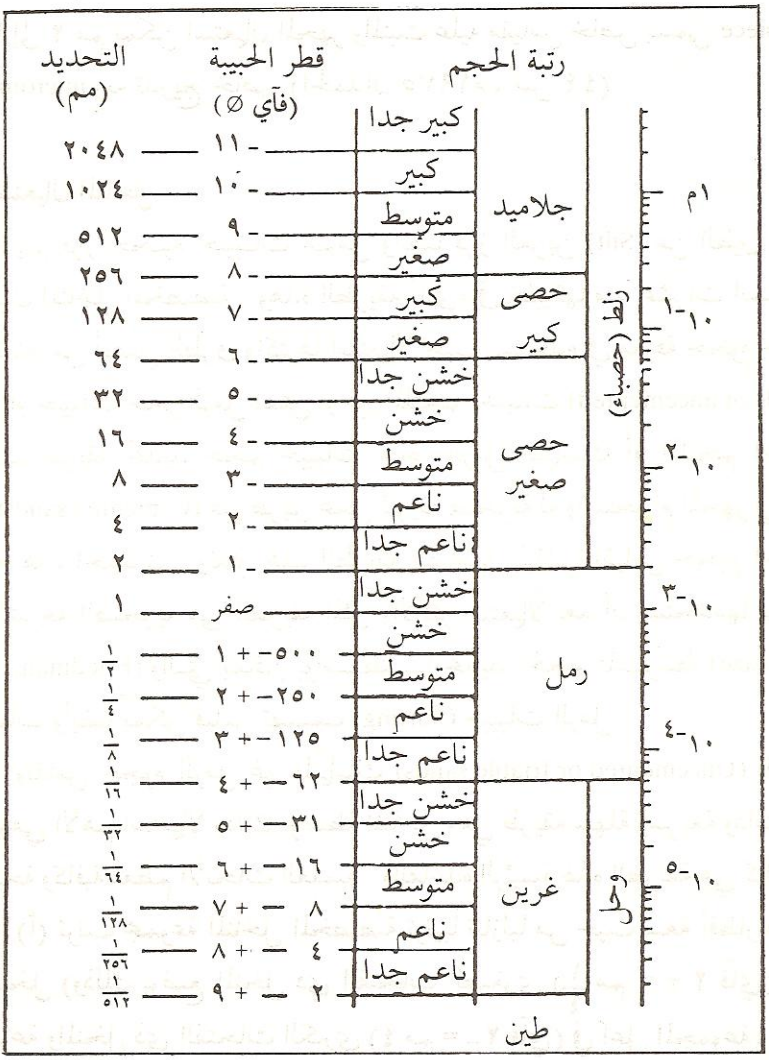
وتقاس حجوم الرمل غير المتماسك (Uncemented or friable sands) بالطريقة المثلى وهي الأهم استعمالاً وذلك بواسطة المناخل وهي طريقة سهلة وسريعة وذات نتائج صحيحة وكافية لمعظم الأبحاث العلمية. والقاعدة الرئيسة لهذه الطريقة هي كالتالي:

(أ) ترتب مجموعة المناخل المخصصة ترتيباً تنازلياً من حيث سعة أقطار فتحات كل منخل (وذلك بوضع المنخل ذي الفتحات الصغرى ($\frac{1}{4}$ مم = + ٢ فآي) أسفل المجموعة والمنخل ذي الفتحات الكبرى (٤ مم = ـ ٢ فآي) في أعلى المجموعة، مشابهًا بذلك لترتيب مقياس ونتورث للحجوم)، (شكل ٤).

وقد تكون الفترة الحجمية بين المناخل (Size interval) كالتالي:

يمكن استعمال مناخل ذات فتحات قطرية تَفْرُقْ فيما بينها بواحد فآي على سبيل المثال يصبح الترتيب ١، ٢، ٣، ٤، . . . . . فآي، أو ذات فتحات قطرية تَفْرُقْ فيما بينها بنصف فآي حيث يصبح الترتيب $\frac{1}{2}$، ١، $١\frac{1}{2}$، ٢، $٢\frac{1}{2}$، ٣، $٣\frac{1}{2}$ . . . فآي.

ولكن كثير من الدراسات العليا والأعمال البحثية المتقدمة يستوجب الأمر استخدام



شكل (٤). ترتيب تنازلي لسعة أقطار فتحات المناخل بمقياس كل من فآي والملليمترات.

مناخل ذات فتحات قطرية تفرق فيما بينها بربع فآي، فيصبح ترتيب المناخل $\frac{1}{4}$، $\frac{1}{2}$، $\frac{3}{4}$، ١، $١\frac{1}{4}$، $١\frac{1}{2}$، $١\frac{3}{4}$، ٢، $٢\frac{1}{4}$، $٢\frac{1}{2}$، $٢\frac{3}{4}$، ٣، ..... فآي، وذلك للحصول على نتائج حجمية أكثر دِقَّة وأقرْب للحقيقة.

(ب) تؤخذ عينة رمل معروفة الوزن (وليكُنْ ٥٠ جرام) وتمرر خلال مجموعة المناخل المعروفة سِعَة فتحاتها.

(جـ) تثبت مجموعة المناخل المحتوية على عينة الرمل على الجهاز المختص وتُهز ميكانيكياً لمدة ما بين ١٥ ـ ٢٠ دقيقة.

(د) تفرغ بدقة الأحجام التي تستقبل في كل منخل على صفحة من الورق ثم توزن وتحسب النسبة المئوية لكل مجموعة من الوزن الكلي للعينة.

(هـ) تُدَوَّنْ هذه الأوزان المئوية ثم تحسب النسبة التجمعية لها كما في الجدول رقم (٣).

(و) يرسم المدرج التكراري (Histogram) والمنحنى التواتري (Frequency curve) والمنحنى التجمعي أو التراكمي (Cumulative curve) من هذه الأوزان (شكل ٥) ومن ثم تستخرج مقاييس الحجم (Size parameters) لهذه العينة الرملية (راجع الحمدان، ١٩٧٥م، ص ص ٥٤ ـ ٦٧ وفولك Folk, 1974). ويتم تمثيل التحليل الحجمي الحبيبي كالتالي:

تمثيل التحليل الحجمي الحبيبي

لقد تطرق لهذا الموضوع بالتفصيل باحثين عدة، أمثال كل من:

Trask (1930), Krumbein (1934), Krumbein and Pettijohn (1938), Inman (1952), Folk and Ward (1957), Folk (1966 and 1974) والحمدان (١٩٧٥م).

ولقد أوضحت أبحاث البحَّاثة السابقين إلى أن هناك عدة طرق لإبراز نتائج التحليل الحجمي الحبيبي ولكن يعتمد استخدام إحدى هذه الطرق على طبيعة ونوعية غرض الدراسة، لذا يستلزم الأمر من الباحث معرفة كل الطرق حتى يتمكن من اختيار الأفضل والأنسب لدراسته. وربما تعمل رسوم التحاليل الحجمية للحبيبات مباشرة باستخدام وحدة المليمترات، وفي هذه الحالة تستعمل أوراق الرسم البياني المعروفة بالورق ذي التقسيم اللوغاريتمي الحسابي المنتظم (Logarithmic-base paper) أو في حالة استخدام وحدة الفاي يستعمل ورق الرسم البياني المسمى بالورق ذي التقسيم الحسابي المنتظم (Arithmetic-base paper). وتعتبر الحالة الثانية الأريح

رقم العينة *SAMPLE NO.: W 76* التاريخ *DATE: Dec. 2, 1994*

الوزن الأوّلي *INITIAL WEIGHT: 60.60 gm* فترة النخل *SIEVING TIME: 15 Min*

الوزن النهائي *FINAL WEIGHT: 60.57 gm*

الخطأ *Error: 0.03 gm*

النسبة المئوية للخطأ *% Error: 0.05*

متوسط حجم الحبيبات *Mean M_z: 1.23 Medium sand* رمل متوسط الخشونة

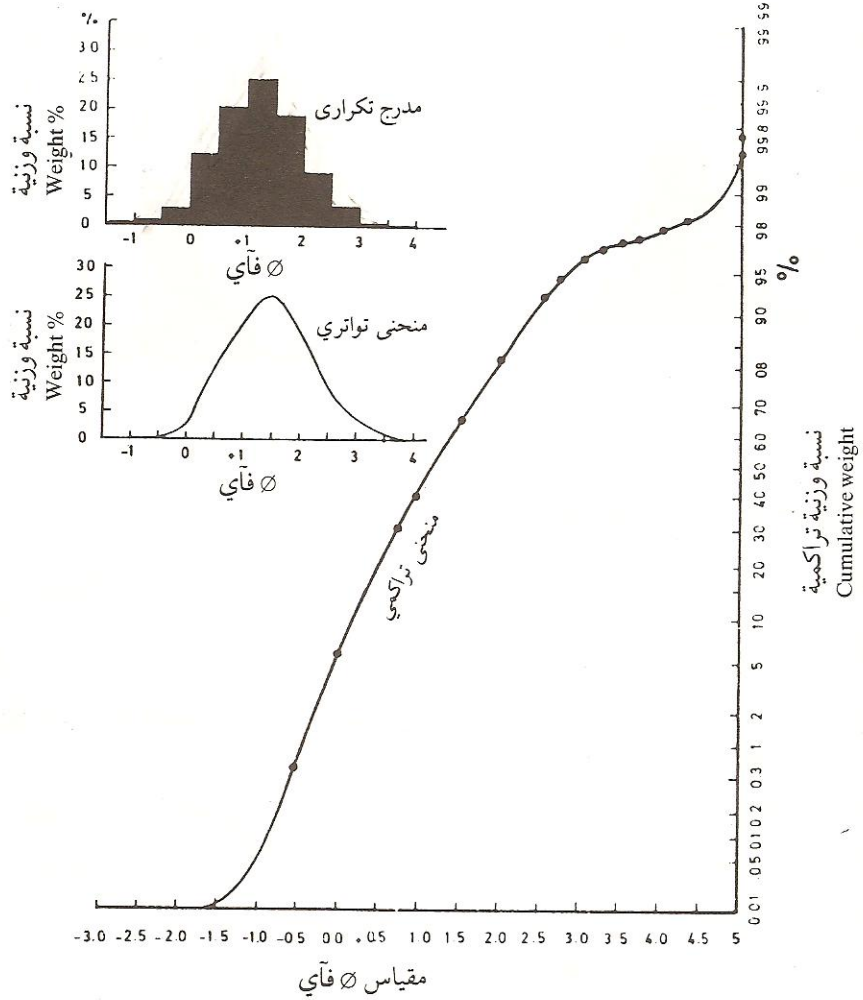
معامل التصنيف البياني الشامل σ_I: 0.85 Moderately sorted تصنيف معتدل

معامل الحيود البياني الشامل *Sk_I: 0.01008 Fine Skewed* حيود ناعم

معامل التفرطح البياني K_6: 0.998 Mesokuric تفرطح عادي

النخل بوحدة فآي *Sieve (Ø units)*	الوزن بالجرامات *Weight in gms*	نسبة الوزن *Weight %*	الوزن المتراكم *Cumulative Wt.*	نسبة الوزن المتراكم *Cum. Wt. %*	ملاحظات *Remarks*
−2.00					
−1.50					
−1.00	*0.025*	*0.04*	*0.025*	*0.04*	
−0.50	*0.375*	*0.62*	*0.40*	*0.66*	
0.00	*2.92*	*4.82*	*3.32*	*5.5*	
0.50	*8.75*	*14.4*	*12.07*	*19.9*	
1.00	*12.6*	*20.8*	*24.67*	*40.7*	
1.50	*15.08*	*24.9*	*39.75*	*65.6*	
2.00	*11.46*	*18.92*	*51.21*	*84.5*	
2.50	*5.13*	*8.5*	*56.34*	*93.0*	
3.00	*2.12*	*3.5*	*58.46*	*96.5*	
3.50	*0.71*	*1.18*	*59.17*	*97.64*	
4.00	*0.36*	*0.60*	*59.53*	*98.23*	
pan طبق الاستقبال	*1.04*	*1.72*	*60.57*		

جدول ٣. نموذج تدوين التحليل الحجمي

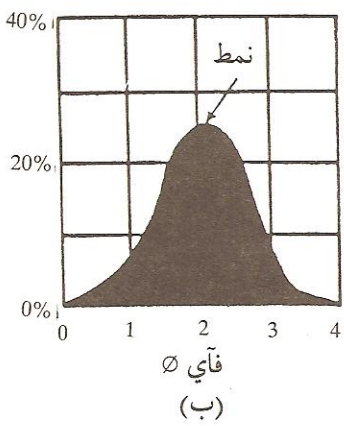


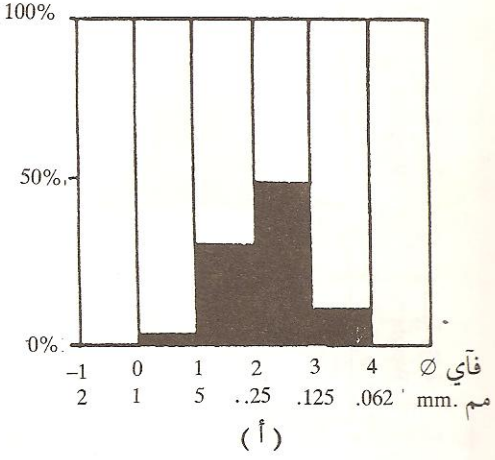
شكل (٥). تمثيل التحليل الحجمي الحبيبي.

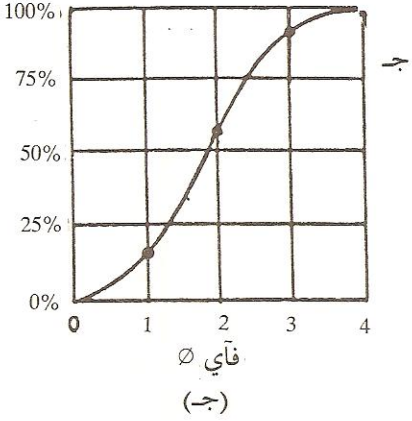
والأدق قراءة (Folk, 1974) ويمكن إيجاز طرق إظهار نتائج التحليل الحجمي الحبيبي والتي استفاض في شرحها كل من (Folk, 1974) والحمدان (١٩٧٥م)، وهي كما يلي:

(أ) المدَرَّج التكراري Histogram

يتكون من عدة أعمدة متراصة بشكل مجاور (شكل ٦ أ) ويمثل كل عمود نسبة مئوية لحجم تدريجي تحتويه العينة المفحوصة. وبالرغم من أنه يسهل إعداد رسم المدَرَّج التكراري وأيضاً يعطي معلومات عامة عن خصائص الراسب إلا أنه لا يمكن







شكل ٦ . تمثيل التحليل الحجمي الحبيبي: ببي
(أ) مُدَرَّج تكراري
(ب) منحنى تواتري
(جـ) منحنى تراكمي
(عن: Folk, 1974)

استخدامه في تحديد أي معاملات حجمية مثل معامل الحجم الحبيبي الوسيط أو معامل الحجم الحبيبي المتوسط أو معامل التصنيف أو . . . إلخ . ويجب أن ندرك أن شكل رسم المدَرَّج التكراري يتأثر بنوعية اختيار الفترة الحجمية (Size interval) بين المناخل إذا كانت ربعية أو نصفية أو . . . إلخ . كما أنه ربما يظهر رسم مُدَرَّج تكراري آخر لو حللت نفس العينة باستعمال طقم مناخل أخرى. إلا أن هذه الطريقة تعطي صورة جيدة عن التوزيع الحجمي للرواسب المدونة على خريطة أو في قطاع طبقي حيث يسهل مقارنة جميع المدَرَّجات التكرارية بالنظر إليها فقط وهذا لا يستدل عليه من النظر إلى رسوم المنحنيات التراكمية لنفس العيِّنات .

(ب) منحنى التواتر Frequency curve

يتشكل منحنى التواتر عندما نلطف أو نبتر أطراف أو زوايا مضلّعات المدرج التكراري (شكل ٦ ب) حيث نحصل على منحنى أملس يمر فوق تلك الأعمدة التكرارية. وبالرغم من عدم إمكانية قراءة أية معاملات حسابية حجمية من منحنى التواتر إلا أنه يعتبر أكثر دقة من المدرج التكراري لأن شكله لا يتأثر بالحدود غير العادية لأصناف الحجوم. ويمكن تصور شكل منحنى التواتر برسم إطار منحني شكل الجرس الذي يظهر بصورة مستمرة والتي تحل محل رسم الأعمدة التكرارية المتقطعة. ويوضح الشكل (٧أ، ب، جـ) أنواع المنحنيات التواترية النموذجية والتي تظهر عليها مواقع كل من النمط (Mode) والقطر الوسيط (Median) والحجم المتوسط (Mean size). ومن الشكل السابق يمكن تعريف النمط بأنه أعلى نقطة لرتبة حجمية تقع على قمة منحنى التكرار.

وبما أن شكل منحنى التواتر يعمل بصورة مستقلة عن الفترات المنخلية المستخدمة لذا فإنه يعكس صورة حجمية أفضل عن العينة من الصورة التي يبرزها المدرج التكراري.

(جـ) منحنى التراكم Cumulative curve

لقد بين الحمدان (١٩٧٥م) طريقة رسم منحنى التراكم حيث يتم بناؤه بطريقة تماثل بناء المدرج التكراري فيما عدا أن المضلعات العمودية توضع فوق بعضها وكل منها على الجانب الأيمن من الصنف الذي يسبقه حتى يصبح لدينا منحنى خطي كما في الشكل (٦ جـ). ويستلزم الأمر هنا أن يكون المقياس الرأسي ١٠٠٪ والمقياس الأفقي للحجم يكون إما بالمليمتر أو لوغاريتمي بوحدة الفاي. وعادة يأخذ منحنى التراكم للعينة المحللة شكل الحرف (S) بصورة تقريبية. ويجب أن يمر خط المنحنى من خلال جميع النقاط الحجمية التراكمية، والموقعة على ورقة الرسم البياني كما يجب عدم استعمال المنحنى الفرنسي (المطاطي) من أجل تمليس أو تعديل خط منحنى التراكم (Folk, 1974). وتعود فائدة رسم منحنى التراكم لعينة راسب ما، إلى إمكانية استخراج قِيَمْ جميع المعاملات الحجمية للحبيبات منه لتلك العينة، مثل معاملات القطر الوسيط (Median) والحجم المتوسط (Mean) والتصنيف (Sorting) ومقاييس الإنحراف

(Skewness) والتفرطح (Kurtosis). ويتم استخراج المعاملات الحجمية باستخدام المعادلات الحسابية التي وضعها العالمان (Folk and Ward, 1957) وهي كما يلي :

١ ـ الحجم الحبيبي الوسيط Median grain size

وهو الحد الذي يفصل منتصف العينة عن الأخرى وهو يعادل ما يُقْرأ على المنحنى التراكمي عند نقطة تقاطع النسبة المئوية الخمسين (٥٠٪) مع منحنى التوزيع . (شكل ٦ جـ) .

٢ ـ الحجم الحبيبي المتوسط Graphic mean

والذي يستخرج باستخدام المعادلة التالية :

$$M_z = \frac{\varnothing 16 + \varnothing 50 + \varnothing 84}{3}$$

٣ ـ معامل التصنيف البياني الشامل Inclusive graphic standard deviation

والذي يبين نوعية تصنيف العينة من خلال درجة تصنيف المواد المترسبة حول الحجم المتوسط والتي يمكن منها معرفة اتجاه جميع الحبيبات سواء أكانت ذات رتبة حجمية حبيبية واحدة أم أنها خليط من جميع الحجوم . وتستخدم المعادلة التالية في استخراج قيمة تصنيف حبيبات العينة المدروسة :

$$\sigma_I = \frac{\varnothing 84 - \varnothing 16}{4} + \frac{\varnothing 95 - \varnothing 5}{6.6}$$

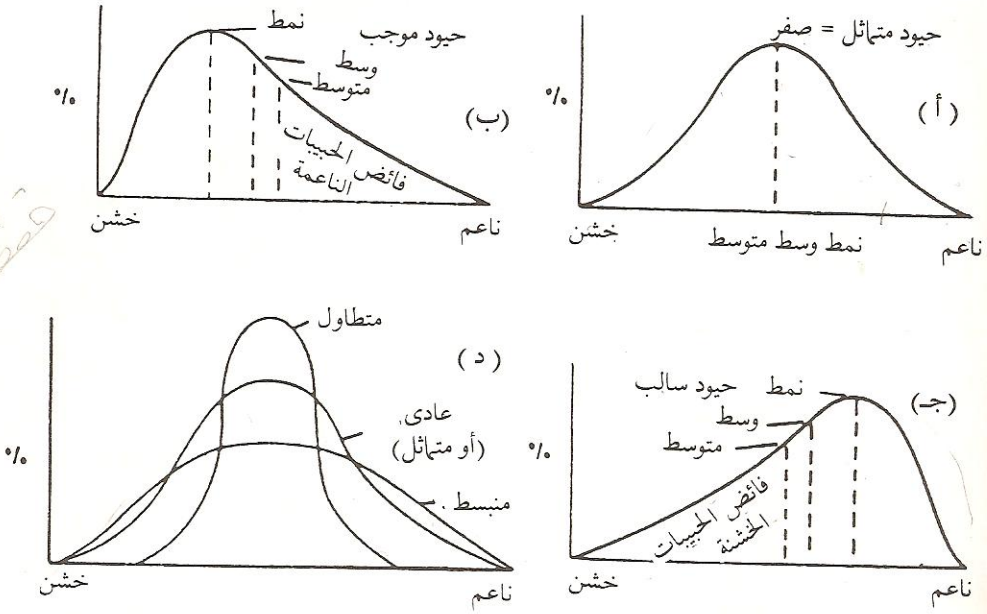
وعند استخراج قيمة التصنيف يمكن معرفة رتبة تصنيف العينة وذلك بمقارنتها بمقياس التصنيف الذي وضعه العالم (Folk, 1974).

σ_I under 0.35 $\varnothing$ = very well sorted	تصنيف جيّد جدًّا
0.35 – 0.50$\varnothing$ = well sorted	تصنيف جيّد
0.50 – 0.71$\varnothing$ = moderately well sorted	تصنيف جيّد بشكل معتدل
0.71 – 1.0$\varnothing$ = moderately sorted	تصنيف معتدل
1.0 – 2.0$\varnothing$ = poorly sorted	تصنيف رديء
2.0 – 4.0$\varnothing$ =very poorly sorted	تصنيف رديء جدًّا
over 4.0$\varnothing$ = extremely poorly sorted	تصنيف رديء للغاية

٤ ـ معامل الحيود (أو الانحراف) البياني الشامل Inclusive graphic skewness

ويشير هذا المعامل إلى الجانب الذي تشغله أغلبية حبيبات العينة من حيث الخشونة والنعومة ويظهر ذلك بوضوح من الشكل (٧ أ، ب، جـ). ويستخرج مقياس الحيود باستخدام المعادلة التالية:

$$SK_I = \frac{\varnothing 84 + \varnothing 16 - 2\varnothing 50}{2[\varnothing 84 - \varnothing 16]} + \frac{\varnothing 95 + \varnothing 5 - 2\varnothing 50}{2[\varnothing 95 - \varnothing 5]}$$



شكل (٧). «أ، ب، جـ»: منحنيات أنواع الحيود. (عن: Friedman and Sanders, 1978)
«د»: منحنيات أنواع التفرطح. (عن: Selley, 1976)

وعند استخراج قراءة مقياس حيود راسب ما، يمكن مقارنته بالقراءات التي وضعها العالم (Folk 1974) حتى يتم تحديد نوعية حيود تلك العينة وفي أيّ اتجاه:

SK_I from + 1.00 to + 0.30 strongly fine-skewed	حيود شديد النعومة
+ 0.30 to 0.10 fine-skewed	حيود ناعم
+ 0.10 to − 0.10 near-symmetrical	حيود متقارب التماثل
− 0.10 to − 0.30 coarse-skewed	حيود خشن

حيود شديد الخشونة — 0.30 to — 1.00 strongly coarse-skewed

٥ ـ معامل التفرطح البياني Graphic kurtosis

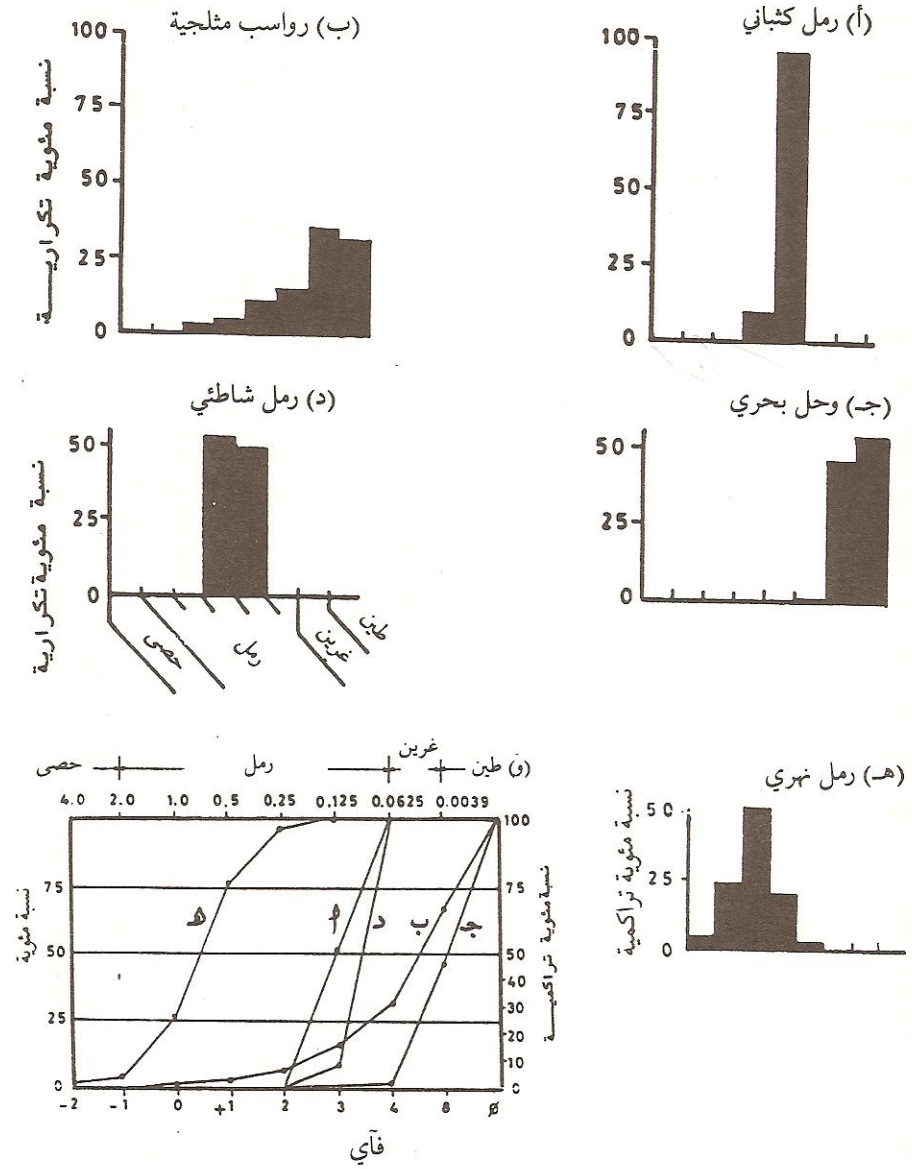
ويشير هذا المعامل إلى درجة تَقَمُّمْ منحنى التفرطح الناجم عن أغلبية رتب حجوم عينة الراسب. والمعادلة التي وضعها العالم فولك (Folk, 1974) لاستخراج هذا المقياس هي كالتالي:

$$K_G = \frac{\varnothing 95 - \varnothing 5}{2.44\,[\,\varnothing 75 - \varnothing 25\,]}$$

ويوضح الشكل (٧د) أنواع التفرطح الحجمي الحبيبي كما تظهر من المنحنيات التكرارية. وعند استخراج مقياس التفرطح من المنحنى التراكمي للعينة يمكن مقارنته بالمقاييس التي وضعها العالم (Folk, 1974) في هذا الشأن والتي تحدد لنا نوعية التوزيع التفرطحي لهذه العينة، وهو كالتالي:

تفرطح منبسط جدًّا	K_G Under 0.67 very platykurtic
تفرطح منبسط	0.67-0.90 platykurtic
تفرطح عادي	0.90-1.11 mesokurtic
تفرطح مرتفع	1.11-1.50 leptokurtic
تفرطح مرتفع جدًّا	1.50-3.00 very leptokurtic
تفرطح مرتفع للغاية	Over 3.00 extremely leptokurtic

وتعتبر النماذج التي أوضحها العالم (Selley, 1976) عن رسوم المُدَرَّجات التكرارية لعدة عينات مأخوذة من بيئات رسوبية مختلفة (شكل ٨ أ، ب، جـ، د، هـ) يمكن إرفاقها هنا لإعطاء الطالب فكرة عامة عن العلاقة الموجودة بين المُدَرَّج التكراري ونوعية البيئة الرسوبية المرتبطة به. كما يمكن إيضاح ذلك برسوم المنحنيات التراكمية (Cumulative curves) (شكل ٨ و) لنفس العينات التي استخدمها العالم سالي ودوَّن معطياتها الحجمية الحبيبية والبيئة الرسوبية ذات العلاقة في الجدول (٤). وتعكس رسومات المنحنيات التراكمية فائدة عظمى حيث يمكن عمل عدة منحنيات على ورقة



شكل ٨. (أ، ب، جـ، د، هـ) مُدَرَّجات تكرارية تُظْهِر رتب حجمية لرواسب مختلفة من بيئات ترسيب مختلفة، (و) منحنيات تراكمية لنفس عينات المدرَّجات التكرارية.

(عن: Selley, 1976)

جدول (٤). مُعْطِيَات حجمية حبيبية لرواسب حديثة مُجْدْوَلَة حسب النسبة الوزنية والنسبة التراكمية

حجم الحبيبة			عينة أ: رمل ريحي من كثبان		عينة ب: راسب مثلجي مجروف		عينة جـ: وحل بحري عميق		عينة د: رمل شاطئي		عينة هـ: رمل نهري	
المقياس	مم	فآي ∅	نسبة وزنية	نسبة وزنية تراكمية	نسبة وزنية	نسبة وزنية تراكمية	نسبة وزنية	نسبة وزنية تراكمية	نسبة وزنية	نسبة وزنية تراكمية	نسبة وزنية	نسبة وزنية تراكمية
حَصِيَّات	٤	-٢	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٧٩	٠,٧٩	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٣,٨٧	٣,٨٧
خشن جدًّا	٢	-١	٠,٠٠	٠,٠٠	١,٨٤	١,١٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٥	٠,٠٥	٢٢,٧٥	٢٦,٦٢
خشن	١	٠	٠,٠٢	٠,٠٢	٣,٥٠	١,٦٦	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٤٤	٠,٤٩	٥٠,٦٨	٧٧,٣٠
متوسط	٠,٥	١	٩,٠٠	٩,٠٢	٧,٤٠	٣,٩٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٥١,٨٩	٥٢,٣٨	٢٠,٢٤	٧٠,٥٤
ناعم	٠,٢٥	٢	٩٠,٢٦	٩٠,٢٨	١٨,٠٥	١٠,٦٥	٠,٠٠	٠,٠٠	٤٧,٥٧	٩٩,٩٥	٢,٢٠	٩٠,٧٤
ناعم جدًّا	٠,١٢٥	٣	٠,٧٢	١٠٠,٠٠	٣١,٧٣	١٣,٦٨	١,٠٩	١,٠٩	٠,٠٧	١٠٠,٠٢	٠,٢٤	٩٠,٩٨
غرين	٠,٠٦٢٥	٤	٠,٠٠	١٠٠,٠٠	٦٧,٢٦	٣٥,٤٧	٤٥,٨٧	٤٦,٩٦	٠,٠١	١٠٠,٠٣	٠,٠٢	١٠٠,٠٠
طين	٠,٠٠٣٩	٨	٠,٠٠	١٠٠,٠٠	١٠٠,٠٠	٣٢,٧٣	٥٣,٠٤	١٠٠,٠٠	٠,٠٠		٠,٠٠	
المجموع			١٠٠,٠٠		٩٩,٩٨		١٠٠,٠٠		١٠٠,٠٣		١٠٠,٠٠	

(عن: Folk & Ward, 1957 ؛ Shelley, 1976)

بيانية واحدة، وفي نفس الوقت تظهر اختلافات التصنيف لهذه العينات بيسر ووضوح. وكلما اقترب المنحنى من الشكل الرأسي كلما عاد ذلك إلى تحسين التصنيف في هذه العينة، حيث تكون النسبة الرئيسة لهذا الراسب واقعة ضمن رتبة حجمية واحدة. أما النسب الخشنة والناعمة للعينة فإنها تشغل نهايتي المنحنى كما هو واضح من الشكل (٨ و).

وقد استفاد الباحثون:

Mason and Folk (1958); Stewart (1958); Friedman (1961, 1967); Hails (1967); Passega (1957, 1964); Moiola and Weiser (1968) من المعاملات الحجمية وتمييز بيئات رسوبية عديدة وذلك بواسطة التحليل الحجمي للحبيبات المأخوذة من رواسب حديثة وإظهار علاقة التغيرات الثنائية (Bivariant grain-size parameters) بين كل معاملين حجميين وذلك عندما توقع قيم نقاط كل معامل مقابل المعامل الآخر على ورقه رسم بياني؛ فمثلا ترسم قيم معامل الحجم المتوسط مقابل قيم معامل التصنيف أو قيم معامل التصنيف مقابل قيم مقياس الانحراف، أو قيم مقياس الانحراف مقابل قيم الحجم المتوسط... وهكذا. (انظر نماذج الأشكال في كل من: «Stewart (1958); Mason and Folk (1958); Friedman (1961, 1967); Moiola and Weiser (1968); Amaral and Pryor (1977); Moshrif (1980).

كما استطاع العالم فيشر (Visher 1965, 1972) تحليل نتائج التوزيعات الحجمية كما تظهر من منحنيات تراكمية لعينات فتاتية حديثة وربطها بطرق النقل الثلاث الرئيسة، وهي التعلق والقفز والزحف أو التدحرج ويمكن مراجعة ذلك في الفصل الرابع.

ولقد تمكن بعض الباحثين أمثال: Amaral and Pryor (1977) and Moshrif, (1980; 1989) من تطبيق هذه التحاليل الحجمية الحبيبية ولكن على رواسب قديمة واستطاعوا تمييز بيئات الترسيب للرواسب ذات العلاقة.

وحيث إن الوضع هنا لايتسع للشرح المفصل عن التحليل الحجمي الحبيبي وغيرها من التمارين العملية في هذا المقرر فإن المؤلف يقوم حاليا بإعداد كتاب عملي لدراسة الرواسب والصخور الرسوبية وذلك لاستخدامه في تدريس عملي لهذه المادة

وتدريس عملي آخر لمادة الصخور الرسوبية، وإن شاء الله سيكون في متناول طالب العلم قريباً.

٣ ـ سرعة الاستقرار Settling velocity

تستخدم هذه الطريقة لفصل حجوم جسيمات حبيبات الرواسب الناعمة مثل الرمل الناعم، الغرين، الطين إذا احتوت سرايا في عينة واحدة. توضع العينة الرسوبية لتحليل حجوم حبيباتها في أنبوب زجاجي (مخبر زجاجي) مليء بسائل (مثل الماء). فتنـ
أن رواسب العينة ستستقر في قاع الأنبوب متدرجة من حيث حجوم حبيباتها تنازلياً إ
الأعلى، أي أن الحجوم الأصغر تستقر أخيراً في قاع الأنبوب ثم يليها الحجوم الأصغر فالأصغر حتى تنتهي أخيراً بالطين في أعلى الأنبوب. وهناك طرق متعددة لقياس زمن وصول الحجوم المختلفة إلى نقطة الاستقرار وكمياتها. ولا يستلزم الأمر هنا شرحها ولكن باختصار يمكن القول إن هذه الطريقة تعتمد في إيضاحها على قانون ستوك (Stokes law) القائل بأن:

$$W = \left[\frac{(P_1 - P)g}{18\,\mu}\right] d^2$$

حيث W = سرعة الاستقرار (Settling velocity)

$(P_1 - P)$ = الفرق بين ثقل (Density difference) الحبيبة والسائل.

g = ازدياد سرعة الهبوط نتيجة للجاذبية.

μ = لزوجه السائل.

d = قطر الحبيبة أو الجسيم (Particle).

وحيث إن هذه الطريقة سريعة وصحيحة النتائج فقد أصبحت شائعة الاستعمال حالياً. ويمكن استعمالها أيضًا لقياس حجوم حبيبات الرواسب المحتوية على حبيبات من حجوم الرمل الخشن إلى الطين. ويستلزم الأمر هنا معرفة مدى تأثير شكل الحبيبة (Roundness and sphericity) بالإضافة إلى تأثير الاحتكاك السطحي للحبيبة على سرعة الاستقرار.

٤ ـ استخدام المجهر الإلكتروني أو الأشعة السينية

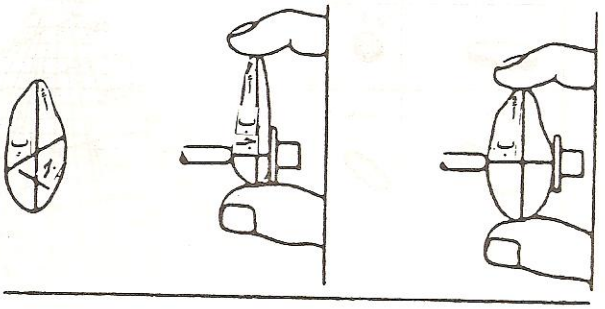
يقتصر استخدام هذه الطريقة في معرفة حجوم الجسيمات الدقيقة (Particles)

مثل حجر الغرين (Siltstone) أو حجر الطين (Claystone) والتي يتعذر معرفة حجوم جسيمات كل منهما عن طريق استخدام طريقة المناخل. وهذه الطريقة ذات مستوى متقدم أعلى من مستوى هذا المقرر لذا لايلزم شرحها هنا.

شكل الحبيبة

الاستدارة والتكور

أجريت عدة محاولات للتعرف على شكل الحصى الصغير أو حبيبات الرواسب. ولتحديد شكل حبيبة صخرية ما، يجب معرفة استدارة (Roundness) وتكور (Sphericity) هذه الحبيبة. وقد وصفت أشكال الحبيبات أو الحصى الصغير (Pebbles) طبقاً لمنهاج وضعه العالم زِنْج (Zingg 1935) شكل (٩). ويعتمد هذا المنهاج على استخراج النسب فيما بين علاقة قياس كل من طول (Length) وعرض (Breadth) وسمك (Thickness) الحبيبة أو الحصى الصغير. ويمكن وصف هذه المقاييس بالمحاور أو الأقطار الثلاثة للحبيبة وهي كالتالي:



شكل ٩. المحاور أو الأقطار الثلاثة للحبيبة.

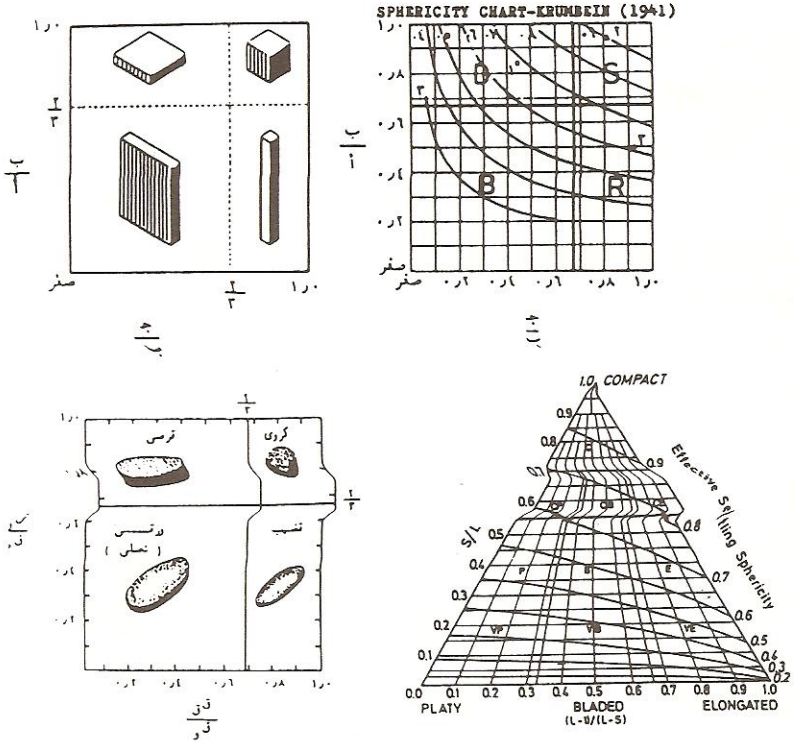
أ = القطر الأكبر (Long diameter = d_L) انظر شكل (٩).

ب = القطر الأوسط (Intermediate diameter = d_I)

جـ = القطر الأصغر (Short diameter = d_S)

ويمكن إيضاح منهاج التصنيف الذي وضعه العالم زنج (١٩٣٥) لدراسة أشكال الحبيبات أو الحصى الصغير عن طريق إيجاد العلاقة بين أقطار الحبيبة، $\frac{ب}{أ} = (\frac{d_I}{dL})$

و $\frac{\text{جـ}}{\text{ب}} = (\frac{d_s}{d_I})$. وقد تمكن زنج باستخدام العلاقة بين أقطار الحبيبة من إيجاد أربع رتب (Classes) رئيسة لأشكال الحبيبات أو الحصى الصغير في الرواسب وهي كالتالي : كروية (Equant, Spherical) ، قرصية (Oblate, Disc و Tabular) ؛ ورقية ـ نصلية (Blade) أو قضيبية الشكل (Prolate, Rod, Roller) انظر الشكل (١٠) والجدول (٥) .



شكل ١٠ . منهاج تصنيف شكل الحبيبة برتبها الأربعة الذي وضعه زِنْج (١٩٣٥م) .

ويتحكم في شكل الحصى الصغير أو الحبيبة كلٌ من نوعية الصخر الأب للحبيبة والأحداث المتعاقبة تاريخياً التي تعرضت لها هذه الحبيبة . فمثلاً حبيبات صخور الشست (Schist) والاردواز (Slate) سوف تبدأ حياتها (بعد انفصالها من الصخر الأم) بأشكال رتب القرص (Disc, Tabular) أو الورق (Blade) ، بينما حبيبات الصخور ذات المعدن الواحد من الكوارتزيت (Quartzite) أكثر احتمالاً بأن تبدأ حياتها على شكل كرة

جدول (٥). يوضح العلاقة بين أقطار حبيبة ما وتحديد الرتب الأربعة للحبيبة.

(عن: Zingg, 1935)

الرتبة	$\frac{ب}{أ} = (\frac{d_I}{d_L})$	$\frac{جـ}{ب} = (\frac{d_S}{d_I})$
كروية	أكبر من $\frac{٢}{٣}$	أكبر من $\frac{٢}{٣}$
قرصية	أكبر من $\frac{٢}{٣}$	أصغر من $\frac{٢}{٣}$
ورقية	أصغر من $\frac{٢}{٣}$	أصغر من $\frac{٢}{٣}$
قضيبية	أصغر من $\frac{٢}{٣}$	أكبر من $\frac{٢}{٣}$

(Sphere) أو تحت كروي (Subspherical) وكلما ابتعدت الحبيبات (أو الحصيات الصغرى) عن مصدرها صغرت أحجامها وأجدر بأن تصبح كروية أو ورقية الشكل حسب ما توصل إليه العالم ميال (Miall, 1970). وقد أجريت عدة محاولات لربط أشكال الحبيبات ببيئات الترسيب (Cailleux and Tricart 1959). وقد اقترح سامز (Sames, 1966) عدة خصائص للتمييز بين حبيبات البيئات النهرية (Fluvial environment) والشاطئية القليلة العمق (Littoral zone) مستخدماً مزيج من خاصية الاستدارة والتكور لهذه الحبيبات. وقد خصصت هذه الدراسة على العينات الصخرية ذات المعدن الواحد من الظّر (Chert) والكوارتزيت.

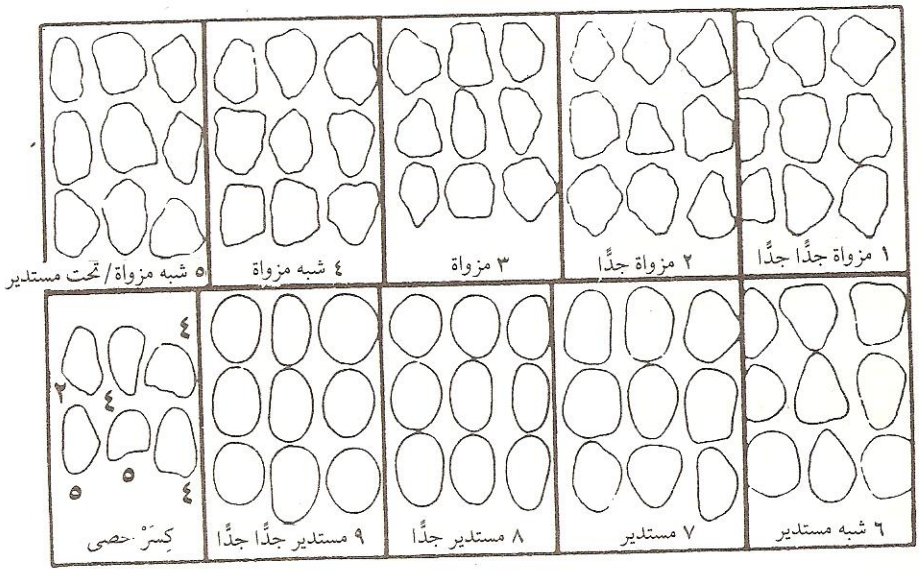
وحيث يصعب قياس المحاور الثلاثة (Long, Medium and Short) للحبيبات ذات الحجم الرملي، لذا فإن أشكالها تحدد بقياس معامل التكور (Coefficient of sphericity) وهو مقياس الدرجة التي تقترب منها الحبيبة إلى الشكل الكروي. وقد اقترح كل من (Sneed and Folk 1958; Wadell 1935) معاملات تكور متنوعة.

وكان اقتراح سنيد وفولك (١٩٥٨) يتضمن ربط العلاقتين للمحاور $\frac{ق\ جـ}{ق\ أ} = (\frac{d_S}{d_L})$ و $\frac{ق\ أ - ق\ ب}{ق\ أ - ق\ جـ} = (\frac{d_L - d_I}{d_L - d_S})$ على شكل مثلث (انظر الشكل ١٠) مقسم إلى عدة مساحات شكلية ومخطط بأقصى حد للتكور. ومن الملاحظ أن معظم محاور الشكل معتمدة على اندماج الأقطار الثلاثة الرئيسة للحبيبة. وقد تستعمل هذه العلاقة بين

المحاور لإيجاد خصائص أشكال حبيبات موجودة في بيئات ترسيبية مختلفة. وقد يعزى اختلاف أشكال الحبيبات إلى عامل المسافة الممتدة على طول النهر وفي اتجاه المصب.

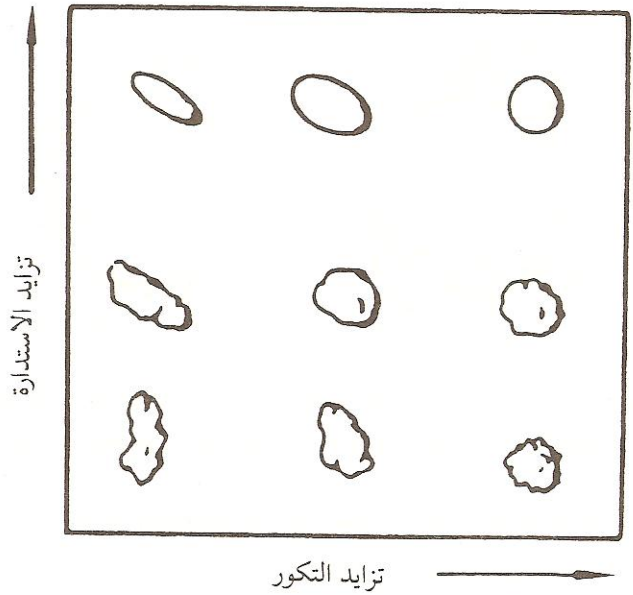
يتضح لنا من الشرح السابق أن التكور (Sphericity) عبارة عن مقياس الدرجة التي تقترب بها الحبيبة من الشكل الكروي. ولتحديد هذه الخاصية يجب إيجاد العلاقة النسبية بين المحاور الثلاثة الرئيسة للحبيبة.

ولا يمكن استخدام طريقة قياس العلاقة النسبية بين أطوال المحاور الثلاثة للحبيبات الرملية لإيجاد شكل هذه الحبيبات. ولكن يمكن تحديد أشكال حبيبات الرمل بالإشارة البصرية ومقارنة معامل التكور كما هو موضح في شكل (١١). ويؤدي هذا المقياس البصري إلى تحديد مدى اقتراب الحبيبة من شكل الاستدارة. وقد اقترحت عدة معاملات للتكور في (Sneed and Folk 1958; Wadell 1935).

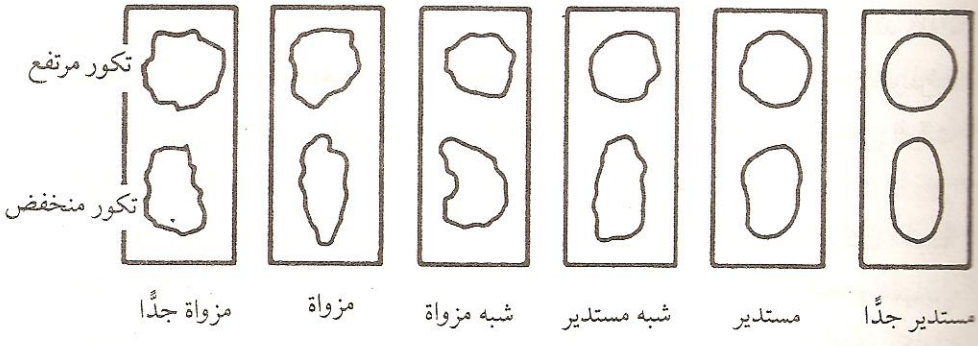


شكل (١١). مقياس بصري يحدد مدى اقتراب الحبيبة من شكل الاستدارة.

الخاصية الثانية لشكل الحبيبات هي استدارة الحبيبات وهي عبارة عن درجة انحناء أركان الحبيبة (شكل ١١، ١٤) وهذه مستقلة تمامًا عن خاصية تكور الحبيبة (شكل ١٢). ولقد عُرِّف مقياس الاستدارة (شكل ١٣) بواسطة (Russel and Taylor, 1937) وأيضا بواسطة (Powers, 1953). وقد أشارت عدة دراسات إلى أن تكور

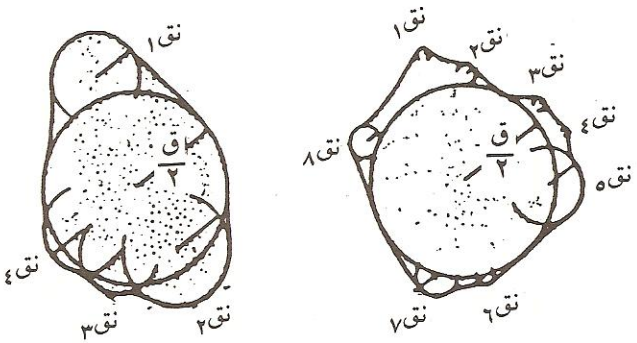


شكل (١٢) استقلالية استدارة الحبيبة عن تكورها
(عن : Selley 1976)



شكل (١٣) . مقياس استدارة الحبيبات . (عن : Powers, 1953)

واستدارة الرواسب تزداد كلما ابتعدت عن منطقة مصدرها (Laming, 1966) . وقد أجرى الباحث كونن عدة تجارب على تحتت (أو سحج) الحصى والرمل بواسطة طرق ريحية ومائية متعددة (Kuenen 1956 a, b, 1959; 1960) وأشارت هذه الدراسات



شكل (١٤). طريقة تحديد استدارة الحبيبة عن طريق قياس معدل أنْصَاف أقطار منحنيات أركان الحبيبة مقسومة على نصف قطر دائرة الحبيبة. (عن: Pettijohn, 1975)

التجريبية إلى أن التغيير في درجة تحتت (أو سحج) شكل الحبيبات على طول مجرى الأنهار والسواحل يعود إلى التصنيف في الشكل كما هو الحال في الاستمرارية في التحتت. وقد أكدت هذه التجارب إلى أن النشاط الهوائي (أو الريحي) أكثر تكاملاً في تحقيق الاستدارة الميكانيكية للحبيبة من النقل المائي عبر نفس المسافة. ولكن هناك بعض المؤشرات المؤكدة بأن المحاليل الكيميائية تعمل بأهمية كعامل استدارة. وهذا مرئي من تزوى (Angularity) حبيبات الرمل الناعم جداً أو الغرين. وقد أكد ذلك الباحثان (Margolis and Krinsley, 1971) باستنتاجاتهما أن الاستدارة الجيدة والمرئية عامة في حبيبات الرمل الريحي عائدة إلى تضافر أثر التحتت (السحج) في نفس الوقت مع ترسيب مادة السليكا على سطح الحبيبات.

وقد عرفت الاستدارة كمعدل أنْصَاف أقطار منعطفات (منحنيات) أركان الحبيبة مقسمة على نِصْف قطر أكبر دائرة للحبيبة (شكل ١٤). وقد استخدم مقياس الاستدارة على النحو التالي: مزواة، تحت مزواة، تحت مستدير، مستدير وكامل الاستدارة (شكل ١٣). وذلك حسب الصيغة التالية:

$$\text{استدارة الحبيبة} = \frac{\Sigma \dfrac{\text{نق}_1 + \text{نق}_2 + \text{نق}_3 + \ldots}{\text{ن}}}{\text{ق}/2}$$

حيث نق = أنصاف أقطار المنعطفات الفردية .
ق = قطر أكبر دائرة للحبيبة .
ن = عدد منعطفات أو أركان الحبيبة .

ومن المعروف أن معظم الاستدارة تتحقق أثناء انتقال الحبيبة عبر الكيلومترات القليلة الأولى، لذا نلاحظ أن الزلط المزوي أو تحت المزوي لايمكن نقله عبر أكثر من كيلومترين ولا يزيد على ٢٤ كيلومترًا بواسطة النهر (Pettijohn 1975) هذا بالإضافة إلى أن رواسب الزلط الموجودة في الأماكن البعيدة من المصدر لاتظهر استدارتها مما ينجم عن هذا محدودية الاستفادة منها كمؤشر أو كدليل على تدفق التيار القديم .

كما أظهرت جميع التحاليل الحقلية والمخبرية أن استدارة الرمل تحدث من خلال عمليات بطيئة جداً ولا تشبه عمليات استدارة الزلط . كما أثبت بالتجربة (Kuenen, 1960) أن نشاط النقل الريحي (الهوائي) أكثر العوامل تأثيرًا على استدارة الرمل من النقل المائي عبر نفس المسافة . لذا نجد أن استنتاج كونن ينص على أن النقل النهري عديم التأثير على استدارة الكوارتز أو الفلسبار . وربما كان نشاط نقل الشاطىء أكثر تأثيرًا في الاستدارة ولكن عمومًا لا يعتقد بأنه شديد الفعالية على معدل الاستدارة في الرمال . ويعتبر النشاط الهوائي عبارة عن تحت ميكانيكي محكم للرمل حتى حجم ٠,١ مم قطرى، وهذا النشاط يصبح صفراً عندما تصل حبة الرمل إلى أقل من ٠,٠٥ مم . لذا تعتبر في معظم الأوقات استدارة رمل الكوارتز مؤشر واضح للنقل الهوائي في تاريخ الحبيبة . ولقد أشار كل من (Russell and Taylor, 1937) إلى أن الأنهار لا تقوم باستدارة الرمل ولكن التناقص الملحوظ في حجم الحبيبات ناتج عن التكسر المتتابع للحبيبات أثناء سير الانتقال . ويجب أن نتذكر أن استدارة رمل الكوارتز عندما تكتسب لا تفقد . هذا بالإضافة إلى أن رمل الكوارتز عامة معرض لأكثر من دورة ترسيب . لذا فإن الاستدارة الملحوظة لأي من الرواسب ربما تكون موروثة من فترات النقل المبكرة . وبالمثل ينطبق هذا على حصى الكوارتزيت وعروق الكوارتز .

النسيج السطحي للحبيبات Surface Textures

تشير الأنسجة السطحية للحبيبات إلى ما يظهر على سطح حبيبة الرمل من علامات دقيقة وهذه تكون مستقلة في تكوينها عن حجم وشكل (أو تكور) واستدارة الحبيبة. وعامة تشتمل هذه العلامات على خاصية كل من التثلج (التصقع) والخطوط والخدوش والتضاريس وما أشبه ذلك.

ويمكن رؤية بعض هذه العلامات بالعين المباشرة والبعض تحتاج إلى مجهر وفي كثير من الأحيان تحتاج إلى مجهر ماسح إلكتروني لرؤيتها وفحصها بوضوح. ويعتقد أن كثيراً من هذه العلامات تمثل أهمية تكوينية (Krinsley *et al.*, 1973) . فمثلا ظهور خاصية التثلج على سطح حبيبة رمل عائد إلى نشاط هوائي (أو ريحي)، كذلك ظهور خطوط مستقيمة ومنظمة على سطح حبيبة رمل أو جلاميد أو حصى تدل على تعرض هذه الحبيبات إلى زحف جليدى أو بيئة جليدية.

كما أن حبة الرمل أو الحصى قد ترث شكلها (أو تكورها) واستدارتها من رواسب سابقة (أو مبكرة) ومن أصول مختلفة كذلك الحال بالنسبة للفتات أو الحبيبة فقد ترث علامات الأنسجة السطحية التي تحملها. ولكن يتطلب قليل من عمليات التحتت أو النقل لكي تعمل على تغيير هذه التفاصيل السطحية إذا ما قورنت بالحاجة الكبيرة لهذه العوامل لتقوم بتغيير استدارة أو تكور أو حجم الحبيبة. لذا نجد أنه من السهل محي أو إزالة العلامات السطحية لحبيبة أو فتاتة ما.

إن الأنسجة السطحية للحبيبات متنوعة ولكن يمكن إجمالها في مجموعتين: تظهر حبيبات المجموعة الأولى بشكل معتم أو مطفية أو ثلجية السطح. هذه الخواص تشير إلى البريق السطحي للحبيبة، والتي تدل على انتظام في انعكاس الضوء من على سطح الحبيبة. إن تناثر أو تبعثر الضوء من على سطح الحبيبة ينتج عنه بريق معتم أو مطفي. كما أن انطفاء أو عتمة سطح الحبيبة ربما يحدث نتيجة للعمليات الميكانيكية التي تسبب في بَرْى أو تآكل سطح الحبيبة وخاصة إذا كان عامل التحتت حبيبات ناعمة. وهذا يتمثل في إظهار سطح الحبيبات بالعتمة أو الانطفاء إذا تعرضت لحت هوائي (أو ريحي) مثل حبيبات منكشفات الكوارتزيت وفتات الوجْهُريحيات (Ventifacts) ومن المحتمل

أيضا أن عتمة أو انطفاء الحبيبة يكون نتيجة تغلف (تَكَسٍّ) سطحها بِالدُّهْن الصحراوي (Desert varnish) .

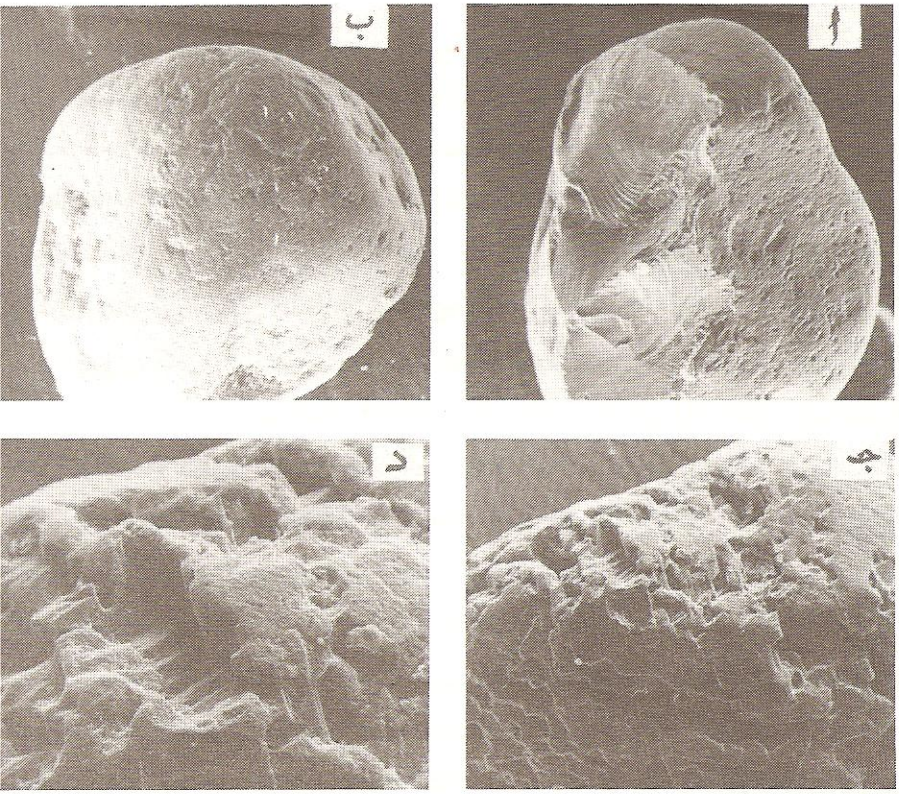
إن تعرض الحبيبة لعمليات الاختزال والأكسدة في البيئة الصحراوية وتحت شمس الصحراء ينتج عنه تصاعد محلول السليكا من داخل الحبيبة وترسب هذه المحاليل على سطح الحبيبة مما يعطي الحبيبة بريقًا مطفيًّا أو مثلجًا.

تشتمل المجموعة الثانية على علامات تحتويها أسطح حبيبات الحصى والجلاميد وهذه العلامات عبارة عن خطوط منتظمة، وخدوش، وحُفَر، وغيرها من علامات التضاريس. وتتكون الخطوط المستقيمة والمنتظمة والموجودة على سطح حبيبات الحصى نتيجة نشاط الزحف الجليدي، وربما تدل الخدوش الهلالية على سطح حبيبات الحصى والكوارتزيت على تعرض هذه الحبيبات لتيارات نهرية ذات سرعة عالية.

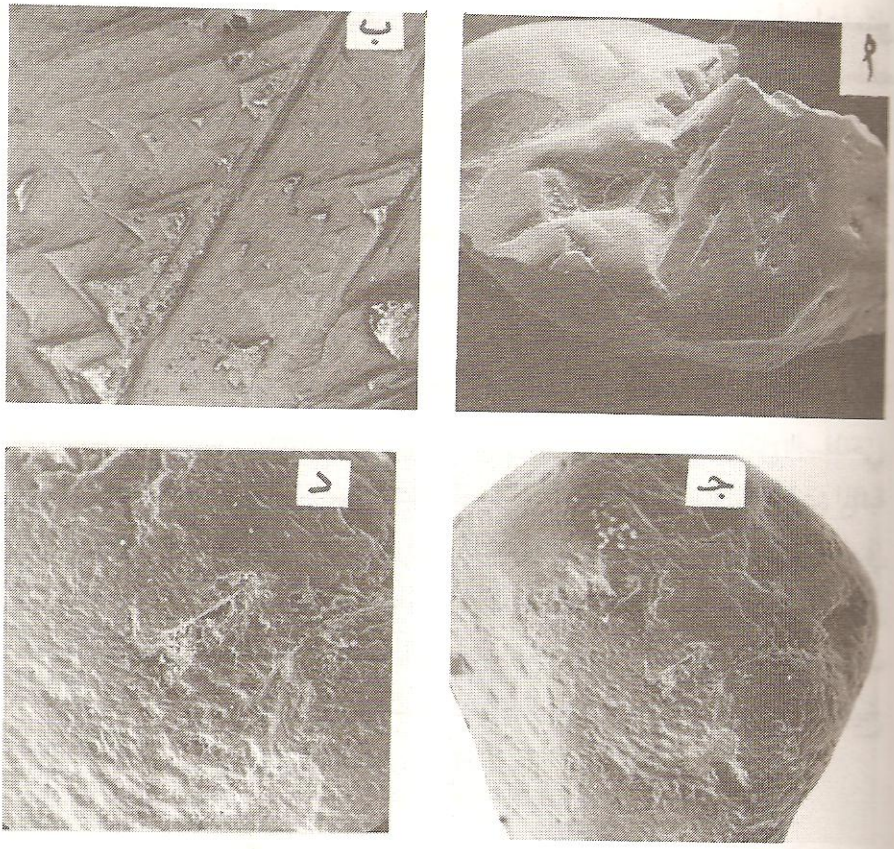
يحتوي كثير من الحبيبات على حفر سطحية وهذه ربما تكونت نتيجة تآكل أجزاء من أسطح الحبيبات بسبب تنوع في محلول تكوين الصخر غير المتجانس. إن خشونة حبيبات الصخر الناري تختص بإظهار حُفر وعلامات سطحية بينما في الصخور الناعمة مثل الكوارتزيت، الشِّيرت (الظَّر) وأحجار الجير، تكون علامات التآكل أكثر نعومة حتى ولو كانت هذه الأحجار ذات حبيبات خشنة ويعود هذا إلى نوعية وتجانس مكونات الصخر.

تساعد دراسة أسطح الحبيبات تحت المجهر الماسح الإلكتروني على رؤية أنواع كثيرة من تآكل النسيج السطحي لهذه الحبيبات. من بين هذه العلامات الحُفَر التي تأخذ شكل الرقم (٧). ويزداد وجود هذا النوع من الحُفَر طرديًّا بزيادة اضطراب في الأمواج البحرية وأن الاضطراب المتزايد في تيار العكر يساعد على كثرة وجود هذه العلامات على أسطح حبيبات الرمل من رواسب العكر، كذلك تكسر الحبيبات الرملية إذا تعرضت إلى ضغط الزحف الجليدي ويكون مكسرها غير منتظم أو محاري الشكل. بينما أسطح حبيبات الكثبان الرملية تكون محتوية على حُفَر بهيئة أطباق مقلوبة إلى أعلى، وحادة ومنتظمة إلى حد ما ومرتبة بشكل موازٍ بعضها البعض وتظهر بمظهر مُثَلّجْ ومعتم. إن هذه الأسطح تناقض الأسطح اللامعة لحبيبات رواسب الأنهار والشواطيء. إن كثيرًا من الحُفَر الموجودة على كثير من أسطح حبيبات الرمل والمرئية تحت المجهر الماسح الإلكتروني تكونت نتيجة تأثير المحاليل على أسطح حبيبات

الكوارتز مثلاً ويشار إليها بِحَفْر المحاليل أو شقوق المحاليل والتي تكونت بسبب التآكل الكيميائي على امتداد مستويات المكسر المعدني لهذه الحبيبات. (انظر نماذج النسيج السطحي لبعض حبات رمل البياض والوسيع، شكلا ١٥، ١٦).



شكل (١٥). نسيج سطحي لحبات رمل من متكوني البياض والوسيع كما تظهر تحت المجهر الماسح الإلكتروني. لاحظ في (أ) سطح معتم أو مطفي مع كثير من الحُفَرْ والخدوش وحواف حادة ومكسر محاري ولكن سطح ناعم حول الأطراف (مكبرة ٩٥ مرة)، (ب) سطح صقيعي أو ثلجي مع عدة خدوش ونعومة عند حافة الحبيبة. كِلا السطحين (أ، ب) يعكس تأثير الرياح في حبات الرمل المترسب في بيئة صحراوية (مكبرة ٩٥ مرة)، (جـ) تضاريس غير منتظمة مع حُفَر بشكل رقم (٧) وسلالم في أعلى اليسار (مكبرة ١٣٠ مرة)، (د) إيضاح لمنطقة السلالم مأخوذة من (جـ)؛ (مكبرة ٢٣٥ مرة) وهذا النوع من النسيج ينتج من تأثير تيارات نهرية مرسبة لهذه الحبيبات.
(عن: Moshrif, 1978)



شكل (١٦). نسيج سطحي لحبات رمل من متكوني البياض والوسيع كما تظهر تحت المجهر الماسح الالكتروني. لاحظ في (أ) علامات الرقم (٧) بشكل متعمق (مكبرة ١٣٠ مرة)، (ب) علامات الرقم (٧) بشكل بارز تظهر بشكل مثلث (مكبرة ١٧٠٠ مرة) وتدل كلا الحالتين على ترسيب نهري لهذه الرواسب ومدى تأثير عملية النشأة المابعدية في هذه الرواسب، (جـ) سطح ثلجي مع كثير من الحُفَر والتآكلات السطحية (مكبرة ٧ مرة) كما هي موضحة في (د)، (مكبرة ٦٧٠ مرة) تنتج هذه الحُفَر من تأثير عملية النشأة المابعدية مشكلة نسيج ناعم منتظم حيث تشير هذه العلامات إلى بيئة صحراوية أو ريحية. (عن: Moshrif, 1978)

لاشك أن دراسة علامات النسيج السطحي للكثير من الحبيبات تعكس أصل وتاريخ هذه الحبيبات ولكن انتقال الحبيبات من الشاطيء إلى الكثبان وبالعكس أو

تعرض هذه الحبيبات إلى أكثر من دورة ترسيب وتصخر، لذا فإن دراسة أسطح مثل هذه الحبيبات تحت المجهر الماسح الالكتروني ربما تعطي صورة معقدة تاريخيًا لهذه الحبيبات أثناء عمليات التصخر والتي تتخللها أنواع متعددة من التغييرات الكيميائية، وأن العلامات السطحية القديمة (أو السابقة) ربما تُمحَى (تُبرَى) وتحل محلها علامات سطحية جديدة. لذا فإن إعادة تكوين تاريخ حبيبة ما من دراسة علاماتها السطحية يعطى فكرة ظاهرية فقط. ولا يعتمد عليها بمفردها في معرفة بيئة الترسيب (Moshrif, 1978).

لقد عرف الباحثون Krinsley and Doornskamp (1973); Krinsley and Funnell (1965); Krinsley and Cavallero (1970) كثيراً من علامات التآكل السطحي للحبيبة والتي تكونت نتيجة تعرض الحبيبة لعمليات بيئية متنوعة مثل البيئات المائية (نهرية، بحرية) ثلجية، وريحية (هوائية) أو صحراوية. وحيث إن الحبيبات في المنكشفات والتحت سطحية في المناطق المدارية (Tropics) تكون علامات التآكل السطحية فيها عرضة للتغير بواسطة المحاليل أو بواسطة اللحام الثانوي الكوارتزي فإن أنسجة السطح لحبيبات كوارتز قديم العمر تعطي أو تكشف بشكل قليل عن تاريخ ترسيبها أو قد لا تدل أبداً على هذا التاريخ (Selley, 1976, 1994).

الطراز Fabric

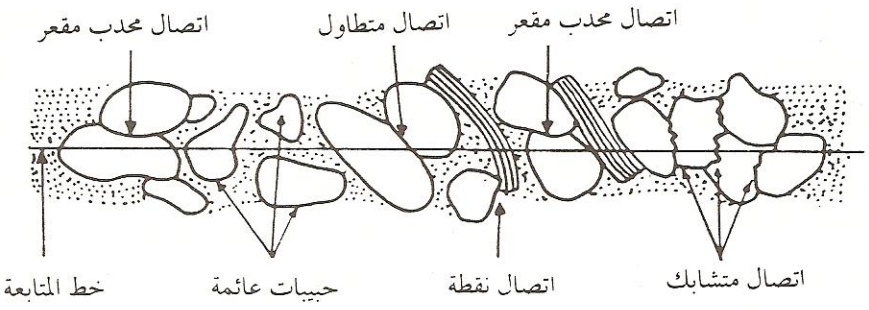
إن الهدف الرئيس لدراسة طراز الرواسب الفتاتية هو إعادة بناء اتجاه التيار السائد أثناء فترة ترسيب الرواسب، هذا بالاضافة إلى أن الطراز يلعب دورًا مهمًا في الخصائص الطبيعية للصخور مثل انتقال وتوصيل كل من الحرارة، والتيار الكهربائي والسوائل والذبذبات الصوتية بين أجزاء الصخر، ويقصد بطراز الصخر طبيعة ترتيب وضع الفراغات الداخلية للصخر وكيفية توجيه مكونات الصخر. إن عناصر الطراز لأي صخر رسوبي قد تكون بلورة مفردة أو حصى أو حبة رمل أو أحفورة صدفية أو أي من المكونات الجزئية الأخرى.

من حيث النشأة يوجد نوعان من الطراز. طراز التشوه وطراز بناء الإضافة. يتكون طراز التشوه (Deformational fabric) نتيجة الضغط الخارجي على الصخر

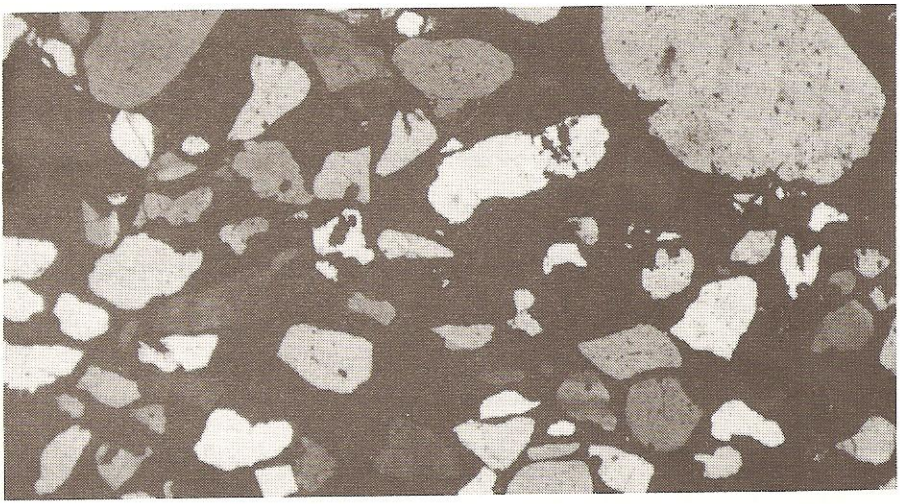
والـذي ينتـج عنه إدارة أو تحريك عناصر مكونات الصخر تحت الضغط وربما تنمو عناصر جديدة موجهة بواسطة هذا الضغط. هذا النوع من الطراز يتمثل بصورة جيدة في الصخور المتحولة. أما طراز بناء الإضافة (Apposition fabric) فيتكون أثناء فترة ترسيب مكونات الصخر ويشار إليه بالطراز الأولي (Primary fabric) وهذا النوع من الطراز هو ما تحتويه الصخور الرسوبية بالرغم من أن خاصية تراص أو تماسك الصخور الرسوبية مصحوبة بانخفاض في المسامية حيث تشكل ظاهرة تشوه، وهذه تغير الطراز الأوَّلي. هذا التشوه ربما حدث نتيجة خاصية الالتحام أو السمنته المبكرة. والمراحل المتعـددة لهذه العمليـة ربما سجلت في بعـض الدرنـات (Concretions) الصخرية (Oertal & Curtis, 1972). وقد سجل طراز بناء الإضافة أو الطراز الأولي تجـاوبًا أو رد فعل (كالمحاور الطويلة للحبيبات) مع نطاق القوة، مثل القوة المغناطيسية الأرضية أو النطاق المغناطيسي. وتميل معظم القطع غير الكروية إلى أن تستقر أو (تنبسط) على وضعها الأكثر ثباتًا بحيث تكون أبعادها الطويلة موازية لسطح الترسيب وهذا نتيجة ردود فعلها مع قوى الجاذبية. ولكن قد تتغير أوضاع هذه العناصر تحت تأثير تدفق السوائل وربما تعيد ترتيبها أو توجيهها استجابة لهذه الحركة.

التعبئة Packing

تتم عملية التعبئة عن طريق كيفية ترتيب عناصر أو مكونات الصخر والتي يكون فيها كل عنصر مُسْنَدًا ومثبتًا في مكانه داخل نطاق الجاذبية الأرضية بواسطة مماس (Tangential) أو نقـطة اتصال مع العناصر المجاورة (Graton and Fraser, 1935). وتبرز أهمية دراسة التعبئة لعدة أسباب؛ منها أن التعبئة المتقاربة تؤدي إلى انخفاض في كل من حجم الفراغ وأبعاد الفراغات ومن ثم تشكل أهمية في تغيير كل من مسامية ونفـاذية الصخر. كما أن التعبئة المفككة لها تأثير عكسي. وبالرغم من أن الاتصال المبدئي بين الحبيبات يكون بمثابة مماس (أو اتصال نقطة: Tangential contact) لكن هذه الاتصالات سرعان ما تتغير بواسطة حركة السوائل الجوفية، مما يؤدي إلى تقارب نقاط الاتصال بين الحبيبات ومما ينتج عنه اتصالات متعددة بين الحبيبات مثل اتصال متطاول (Long contact)، اتصال مقعر ـ محدب (Concavo-convex contact) واتصال متشابك (Sutured contact)، (شكل ١٧ أ، ب، جـ).



شكل (١٧ أ). أنواع الاتصالات المختلفة بين الحبيبات. (عن: Pettijohn, 1975)



شكل (١٧ب). اتصال نقطة بين حبات الرمل كما تظهر تحت المجهر في حجر رمل متكون الوسيع/ خشم الحلال شرق مدينة الرياض. (عن: Moshrif, 1980)

النفاذية Permeability

تعرَّف نفاذية الصخر بمقدرة السائل أو الغاز على الحركة أو التدفق داخل الصخر المسامي. ويتحكم في النفاذية عدة متغيرات (أو عوامل). وهذه المتغيرات تشتمل على:

١ ـ المسامية المؤثرة للصخر.

٢ ـ مقاسات أبعاد الفراغات (من حيث سِعَتْها).

شكل (١٧ جـ). اتصال متطاول (أو مستقيم) واتصال محدب مقعر كما يظهر تحت المجهر في حجر رمل البياض/ جبل المياه شرق مدينة الرياض. يشير السهم إلى الحد الفاصل بين السليكا الأولية والسليكا الثانوية. (عن: Moshrif, 1980)

٣ ـ أبعاد الممرات بين الفراغات.

٤ ـ قوة الجاذبية الشعرية بين الصخر والسائل المتدفق.

٥ ـ لزوجة السائب ومعدل الضغط.

ويتم الحصول على نفاذية صخر ما باستخدام قانون دارسي (Darcy's Law) الذي ينص على أن نفاذية صخر مسامي يمكن التعبير عنها بمعرفة كمية السائل Q سم^3/ثانية، المتدفق خلال مساحة قطاع عرضي معطى C (سم^2) وعبر طول القطاع L (بوحدة السنتمتر). وتنسب كمية الفرق في الضغط بين الغلافين الجوي والأرضي (ويرمز له بالحرف P) إلى التناسب العكسي مع لزوجة السائل (Fluid viscosity = V) مستخدمين وحدة سنتبويزز (Centipoises). ويعبر عن قانون دارسي بالمعادلة التالية:

$$Q = K \frac{CP}{VL}$$

حيث K هي النفاذية المراد استخراجها. ولقد دلت نتائج بحث (Krumbein and Monk, 1942) على أن النفاذية تتناسب طرديًّا مع حجم الحبيبات لنفس الصخر أي

تزداد النفـاذية بزيادة حجم الحبيبات. كما دلَّ البحث نفسه على أن النفاذية تختلف باختلاف مربع الحجم المتوسط (Mean size) وبشكل عكسي مع لوغاريتم معامل التصنيف.

كما أن شكـل الحبيبات (تكورها) يؤثر على النفاذية بحيث إن حبيبات الرمل المنخفضة التكور تميل إلى أن تكون مساميتها مرتفعة وتعبئتها مفككة ومن ثم تزداد نفاذيتها.

وتعتمد أيضًا نفاذيـة صخر ما على تعبئة أو ترتيب وترابـط حبيبـات الصخـر. لأن أي تغيـر في التعبئـة لكي تزيـد من المسامية سـوف يصحبـها زيـادة في النفاذيـة (Von Engelhardt and Pitter, 1951).

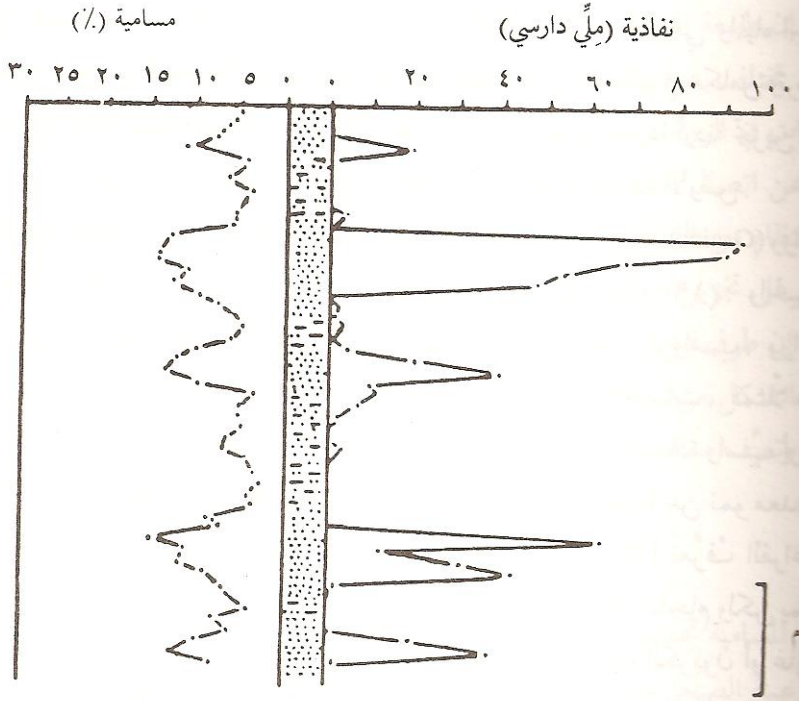
نظريًّا، النفـاذية مستقلة عن المسامية بالرغم من أن الصخر المصمت (عديم المسامية Nonporous) أيضًا يكون غير منفذ (Nonpermeable) إلا أنه إذا كان الصخر عالي المسـامية ليس من الضروري أن يكون منفذًا. فمثلاً الصخور ذات الحبيبات الناعمة فهي عالية المسامية إلا أنها منخفضة النفاذية (جدول ٦ وشكل ١٨). ولقد درست العلاقة بين كل من المسامية والنفاذية وحجم الحبيبة من قِبَلْ العديد من العلماء.

جدول (٦). مقياس النفاذية في أنواع مختلفة من الرواسب غير الملتحمة النفاذية (مقاسة بالدّارسي).

مواد	زلط نظيـف	رمل نظيف، خليط من الرمل والزلط.	رمل ناعم جدًّا، غرين، خليط من الرمـل، الغـرين والطين، رواسب الثلاجات، طين طبقي إلخ . . .	طين عديم التجوية.
خصائص الجريان (الانسياب).	مخازن جيدة النفاذية.		مخازن رديئة النفاذية.	عديم النفاذية (مصمت).

10^{5} 10^{4} 10^{3} 10^{2} 10^{1} 10^{0} صفر 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} 10^{-5}

وبعد اكتشاف العالم دارسي (H. d'Arcy) هذه العلاقة في عام ١٨٥٦م أصبح يعبَّر عن معامل النفاذية بوحدة دارسي. فمثلا لو قلنا إن رملاً ما له واحد دارسي من النفـاذية فهـذا يعني أن هذا الـرمل يعطي ١ سم^3 من تدفق السائل المحتوى عليه



شكل (١٨). مدى العلاقة بين النفاذية والمسامية في حجر الرمل والطين. (عن: Selley, 1976)

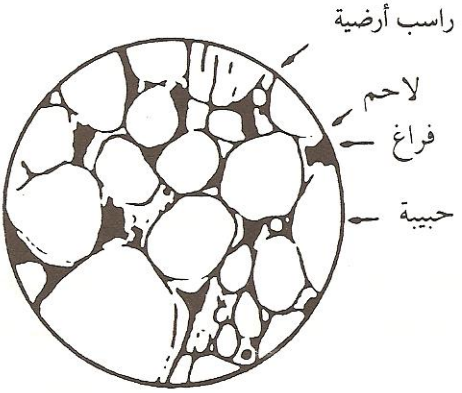
وبلزوجة ١ سِنْتبويزْ (1 Centipoise) في الثانية خلال ١ سم^2 لقطاع عرضي وتحت ضغط جوي (1 atmosphere) لكل ١ سم طول، والرمال الحديثة تحتوي ما بين ١٠ - ١٠٠ دارسي. وإذا كانت نفاذية صخر أقل من واحد دارسي فإنه يعبَّر عنه بالمِلِّيدارسي (One Darcy = 1000 millidarcy).

المسامية Porosity

بينما يظهر الجيولوجيون اهتمامهم بدراسة الصخور فإن الجيولوجي التطبيقي يعطي كل اهتمامه لدراسة ومعاينة الثغور والفراغات داخل الصخور. ويطلق على دراسة الفراغات الصخرية معرفة طبيعة الصخر (Archie 1950) من خلال دراسة الخصائص الطبيعية للمسامات. وتتلخص هذه الخصائص في الوصف التفصيلي لكل من حجم الفراغات وأبعادها ونوعيتها وأصل نشأتها. وتكون دراسة الفراغات الموجودة

داخل الصخور مهمة جدًّا إذا أردنا البحث عن الزيت والغاز الطبيعي والمياه الجوفية وأيضا في التوصل لمعرفة أماكن حواجز النفاذية القطرية والتي تتحكم في مكامن وترسيب معادن الخامات منخفضة الحرارة. كما أن هذه الدراسة ضرورية إذا أردنا تخزين الغاز في أعماق الأرض أو أردنا تصريف السوائل عديمة الفائدة في جوف الأرض.

وكما هو معروف لدينا أن الصخر الرسوبي يتكون من حبيبات (Grains) وراسب أرضية (Matrix) ومادة لاحمة (Cement) وفراغات (Pores) (شكل ١٩). والحبيبات عبارة عن جسيمات فتاتية والتي تشكل الجزء الأكبر من إطار الرواسب. وراسب الأرضية عبارة عن حتات أو فتات الصخور التي ترسبت مع الحبيبات، فمثلاً عامة تكون مادة راسب أرضية صخور المُدَمْلَكات من الرمل وربما تكون مادة راسب أرضية أحجار الرمل من الغرين والطين. واللحام (أو المادة اللاحمة) عبارة عن نمو معدن ما بعد انتهاء عملية الترسيب ويتم ذلك في فراغات الرواسب. لذا تُعرَّفْ الفراغات بالثقوب الفارغة والتي لم تشغل بالحبيبات أو مادة راسب الأرضية أو اللحام ولكن يمكن لهذه الفراغات أن تكون مليئة بالغازات كالنيتروجين وثاني أكسيد الكربون أو غازات الكاربوهيدرون مثل الميثان. وأيضًا يمكن للفراغات أن تكون مشغولة بالسوائل (مثل النفط والمياه). وربما تحتوي الفراغات على كِلا الاثنين معًا (الغاز والسائل) وذلك في حالات متماثلة من الحرارة والضغط.



شكل (١٩). مقطع في صخر رسوبي يحتوي على حبيبات، راسب أرضية، مادة لاحمة وفراغات.
(عن: Selley, 1976, 1994)

إن طبيعة الرواسب الفتاتية واحتوائها على نسبة متوسطة إلى عالية من الفراغات تجعلها تختلف عن الصخور المتبلورة والتي تعتبر عديمة الفراغات. ويعزى وجود الفراغات في الرواسب الفتاتية إلى أن اتصال عناصر المكونات الفتاتية ببعضها البعض عبارة عن اتصال نقطة تماس (Tangential contact) وليس اتصال متقارب ومتكامل. هذا النظام من الفراغات يشكل ممرات قنوية لتمرير السوائب خلال الصخور وأيضا يساعد على تخزين السوائل والغاز.

إن طرق قياس حجم الفراغات ومقدرة الصخر على التخزين دُرست ووُصِفت في أبحاث كل من: Müller (1967), Curtis (1971), Von Engelhardt (1960).

وتعرَّف مسامية صخر ما بالمعادلة التالية:

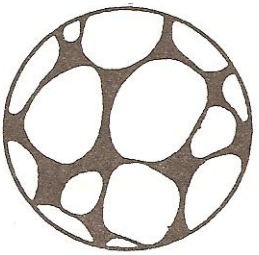
$$\text{المسامية} = \frac{\text{الحجم الكلي للفراغات}}{\text{حجم عينة الصخر}} \times ١٠٠$$

أي أن المسامية تحسب بأخذ النسبة الموجودة بين المجموع الكلي للفراغات إلى مجموع حجم عينة الصخر مضروبة في مائة لكي تعطي النسبة المئوية للمسامية. وتكون نسبة المسامية صِفْرًا في عينة الشيرت (حجر الصوان أو الظر) غير المتشقق بينما تكون ١٠٠٪ إذا أُخِذَتْ العينة من مغارة أو كهف. وبشكل مثالي تتراوح كمية المسامية في الرواسب بين ٥ ـ ٢٥٪، ولكن عندما تصل نسبة المسامية في الصخر بين ٢٥ ـ ٣٥٪ فهذه نسبة ممتازة إذا وجدت في مستودع المياه وفي خزان النفط.

هناك تمييز مهم يجب أن ندركه بين المسامية الكلية لصخر ما وبين مساميته الفعَّالة أو المؤثرة. إن المسامية المؤثرة أو الفعَّالة (Effective porosity) عبارة عن كمية الفراغات المتصلة ببعضها البعض والمتوفرة في الصخر. ومن حيث الأهمية الاقتصادية فإن المسامية المؤثرة هي التي تؤخذ في الحسبان من حيث قياس كمية المسامية في الصخر. كذلك فإن المسامية الفعَّالة هي التي تعطي الصخر خاصية النفاذية (Permeability). انظر (Blatt et al. 1980) لمعلومات أكثر عن المسامية والنفاذية. كما تعطي المراجع التالية طرق قياس كل من المسامية والنفاذية: Curtis (1971), pp. 335-364, Müller (1967a), Selley (1982).

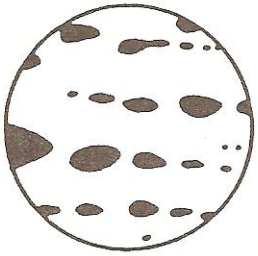
إن كُلاًّ من حجم الحبيبة وشكلها (تكورها) وتصنيفها وتعبئتها (ترابطها)، يؤثر على معامل النفاذية للرمل غير المتماسك (Pettijohn 1975). شكل (٢٠) يوضح مفهوم العلاقة بين كل من المسامية المؤثرة والنفاذية في أنواع مختلفة من الصخور.

(أ)



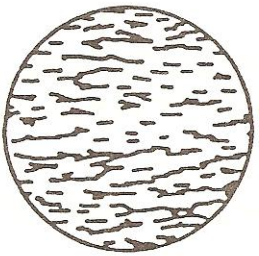
رمل غير مسمنت وخالي من راسب الأرضية أدى ذلك إلى ارتفاع في نسبة المسامية والنفاذية مثال أنموذجي: كمستودع مياه أو كخزان هيدروكربون.

(ب)



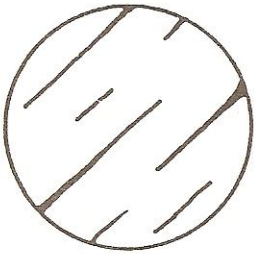
لابة حويصلية ذات فجوات متناثرة ومتباعدة تعكس مسامية عالية، ولكن ذات مسامية فعّالة منخفضة، ونفاذية منخفضة.

(جـ)



حجر طين يظهر مسامية متوسطة ولكن بسبب انخفاض الجاذبية الشعيرية لضيق الممرات بين الفراغات أدى ذلك إلى انخفاض في نفاذية الصخر.

(د)



حجر جير مشقق ذو مسامية ونفاذية معتدلة عند مستوى واحد.

شكل (٢٠). العلاقة بين كل من المسامية المؤثرة والنفاذية في أنواع مختلفة من الصخور.

(عن: Selley, 1976)

تشكل المسام

تتطلب دراسة صخر المكمن معرفة الخصائص الطبيعية للمسامات الموجودة في الصخر من حيث الكمية والنوعية وأصل نشأة مساماته.

إن طرق دراسة المسامات متعددة ويمكن فحصها ووصفها مباشرة من سطح الصخر المصقول مستخدمين عدسة مكبرة أو مجهر ستيرويوسكوبى، أو من خلال دراسة القطاعات الصخرية مستخدمين مجهر بتروجرافي، أو باستخدام المجهر الماسح الإلكتروني، (Selley, 1982). ومن خلال دراسة المسامات بالطرق السابقة اتضح أنه توجد أنواع مختلفة ومتعددة من المسامات، ولقد تمكن الباحث (Levorsen, 1967) من وصف المسامية بشكل تفصيلي، كما قام الباحثان (Choquette and Pray, 1970) بربط وصف المسامية مع عناصر أصل نشأتها، أما الباحث (Robinson, 1966) فقد وضح العلاقة القائمة بين نوعية المسامية وبتروجرافية الصخر الحامل لهذه المسامية. ولقد أدرك الباحث (Murray, 1960) أن المسامية تنقسم إلى صنفين رئيسين، الصنف الأول المسامية الأولية وهي التي وجدت مع ترسيب الصخر أو بعد ترسيب الصخر مباشرة، والصنف الثاني المسامية الثانوية وهي التي تكونت بعد انتهاء الترسيب نتيجة أسباب متنوعة. وجدول (٧) يوضح تصنيف أنواع المسامية.

جدول (٧). تصنيف أنواع المسامية.

زمن التكوين	النـــوع	أصل النشـأة
١ ـ أولي أو أثناء الترسيب	أ ـ بين الجسيمات أو بين الحبيبات	نتيجة عملية الترسيب
	ب ـ داخل الجسيمات	
٢ ـ ثانوي أو بعد الترسيب	أ ـ بين البلورات	نتيجة عملية السمنتة
	ب ـ ثغرية أو تحدبية	
	جـ ـ قالبية	نتيجة المحاليل
	د ـ ثقبية	
	هـ ـ مكسرية	نتيجة حركة تكتونية، الدموج والإحكام أو طرد الماء

(عن: Selley, 1976)

١ ـ المسامية الأولية «أصلية» (مسامية الترسيب)

يقصد بمسامية الترسيب أو المسامية الأولية تلك المسامية التي وجدت أثناء استقرار الرواسب في حوض الترسيب. وتشتمل المسامية الأولية على أنموذجين أساسيين، الأول، مسامية بين الحبيبات أو بين الجسيمات (شكل ٢١ أ، جدول ٧). وهذا الأنموذج عبارة عن فراغات تحدث بين حبيبات الصخر وتقع أهمية هذه المسامية بأنها توجد مبدئيًّا في أغلبية جميع الصخور الرسوبية. وبشكل عام تتناقص نسبة هذا الأنموذج (مسامية بين الحبيبات) نتيجة تغيرات النشأة المابعدية (Diagenesis) في كثير من صخور الجير ولكن تظل هي المسامية الشائعة في أحجار الرمل.

شكل (٢١). أنواع المسامية الأولية في الصخور الرسوبية. (عن: Selley, 1976, 1994)

والأنموذج الثاني، مسامية داخل الحبيبات ويكثر هذا النوع من المسامية في صخور الرمل الجيري وخاصة إذا كانت أغلبية حبيباته مكونة من بقايا هياكل حيوانية، فتصبح هذه الحبيبات أو بعضها محتوية على مسامات فراغية. فمثلاً الثقوب أو الحُفَر الموجودة داخل أحافير الأمونيتات والرخويات والمرجانيات والحزازيات وغيرها من الأحافير الدقيقة هي عبارة عن مسامات تنتسب في تصنيفها إلى هذا الأنموذج (شكل ٢١ب، جدول ٧).

إن هذا الصنف من المسامية غالبًا ما ينعدم أو يتناقص نسبيًّا بعد انتهاء عملية الترسيب عن طريق تخلخل وملء هذه الفراغات بالجير الناعم والذي يشكل جزءاً من مادة أرضية الصخر الحاوي. ويضاف إلى ذلك أيضًا أن عدم ثبات محتويات حبيبات

الجير من الناحية الكيميائية قد يؤدي إلى تغيير أو دمار هذا النوع من المسامية عن طريق التغيرات المابعدية والتي يتعرض لها الصخر بعد الترسيب، (Selley, 1982).

(أ) نشأة المسامية الأولية (أو الأصلية)

بما أن المسامية الأولية تتأثر بتماثل كل من حجم الحبيبات، وشكل تكور واستدارة الحبيبات، وتصنيف الحبيبات، وطريقة ترسيب وترابط الرواسب، وأيضا كيفية إحكام ودمج الرواسب أثناء وبعد عملية الترسيب لذا فإنه يمكننا القول إن المسامية الأولية هي دالة طراز الرواسب عند وقت الترسيب، وتتغير نتيجة كل من عملية الأحكام أو الدموج (Compaction) والتغيرات المابعدية والتي تحدث بعد الترسيب.

(ب) تأثير حجم الحبيبات على المسامية

لقد أشار كل من (Rogers and Head, 1961) في بحثهما أن حجم الحبيبات سواء كان متقاربًا أم غير متقارب له أهمية عظمى من حيث مدى تأثيره على نسبة مسامية الصخر. وأن نسبة المسامية ترتفع كلما أخذت أحجام الحبيبات نفس المقاس (أي مقاس واحد) فلو كان لدينا صخر يتكون من حبيبات متقاربة الحجم وأضفنا له حبيبات رمل أخرى ذات مقاس أكبر أو أصغر فإن مسامية الصخر الأصلية سوف تنخفض داخل حدود معينة تتناسب مباشرة مع كمية الرمل المضافة (انظر: Gaither, 1953; Fig. 2) ثم تثبت عندما يصبح الخليط يتكون من حبيبات متقاربة الحجم. واستنتج الباحثان (Füchtbauer and Reineck 1963, Fig. 4) أن إضافة الطين إلى الصخر المعنِي يزيد من نسبة مساميته. ومهم جدا أن نتذكر أنه لاتوجد علاقة بين توزيع حجم الحبيبات ومسامية الصخر. فقد نوه (Fraser, 1935) وغيره من العلماء أن خلائط متعددة يكون لها نفس المسامية.

وقد أوضح (Selley, 1976) أن مسامية صخر ما تبدو نظريا بأنها مستقلة عن حجم حبيباته ولكن إذا اعتبرنا أن الصخر يتكون من كتلة حبيبات كروية (متكورة) ولها تصنيف وترابط (Packing) متشابه فإن مساميته ستكون متماثلة مع عدم الإشارة إلى حجم الحبيبات. فقد استنتج (Fraser, 1935) أن حجم الفراغ في الصخر يختلف مباشرة باختلاف حجم تكور حبيباته. ومن التجربة التي أجراها كل من (Rogers &

(Head, 1961) فقد تبين أن المسامية مستقلة عن حجم الحبيبات وذلك فقط بالنسبة للرمل جيد التصنيف. كما أظهر (Pryor, 1973) من تحليله لألف عينة رمل حديثة، أن المسامية تتناقص كلما ازداد حجم الحبيبات في صخر ما. ولكن العكس صحيح بالنسبة لرمل النهر وقد يعزى ذلك إلى اختلاف ترابط حبيبات رمل الأنهار عنها وعن ترابط رمل بيئات أخرى. لأن العالم (Lee, 1919) أوضح بأنه بالنسبة لرواسب الصخور القديمة فان الحقيقة هي نفسها بأن المسامية تزداد بتناقص حجم الحبيبات في الصخر. وهذا الاتجاه ربما يعود إلى عدد من العوامل ترتبط بصورة غير مباشرة مع حجم الحبيبة. لذا نجد أن الرمل الناعم تميل حبيباته بأن تكون مزواة بصورة أكبر وفي مقدورها تعضيد طراز صخر ذو ترابط مفكك ومن ثم تكون مسامية الرمل الناعم أعلى من مسامية الرمل الخشن (Selley, 1976) وبما أن المسامية تزداد بتناقص حجم الحبيبات فإن العكس صحيح بالنسبة للنفاذية التي تزداد كلما ازداد حجم الحبيبات (Fraser, 1935; Krumbein and Monk, 1942; Pryor, 1973). فقد يكون السبب في ذلك أن الممرات القنوية بين المسامات في الرواسب الناعمة تكون أصغر ومن ثم ترتفع جاذبية الخاصية الشعرية للحوائط المتاخمة مما يحد أو يخفض من سرعة تدفق السائل.

(جـ) تأثير التصنيف على المسامية

لقد أوضحت دراسات عدة بأن مسامية صخر ما تزداد بازدياد تصنيف الصخر، أي كلما تحسن تصنيف الصخر ارتفعت نسبة مساميته، Pryor, (1973); Beard and Weyl, (1973); Rogers and Head, (1961); and Fraser, 1935. كما تبين من دراسات البحاثة Krumbein and Monk, (1942); Beard and Weyl, (1973) أن تحسن أو ازدياد التصنيف يرافقه ازدياد في النفاذية. ويفسر ذلك بأن رملاً جيد التصنيف يكون فيه نسبة الحبيبات الفتاتية أكبر من المادة الأرضية والعكس صحيح فإن رملاً رديء التصنيف تكون فيه نسبة الحبيبات الفتاتية أقل من المادة الأرضية. لأن الحبيبات الأكثر نعومة والتابعة لأرضية الصخر تسد كلاً من المسامات والممرات القنوية داخل نطاق الصخر ومن ثم تنخفض أو تنعدم المسامية والنفاذية على التوالي.

ومن دراسة (Pryor, 1973) للرمال الحديثة من بيئات مختلفة فقد أكدت هذه العلاقة بالنسبة لرمل الأنهار ولكن أظهرت بأن الوضع يختلف بالنسبة لرمال الشواطيء

والكثبان التي تزداد فيها النفاذية كلما تردى أو انخفض التصنيف (Selley, 1976, 1994).

(د) تأثير شكل الحبيبة (التكور والاستدارة) على المسامية

ترتبط أو تتقارب الحبيبات العالية التكور والمستديرة مع بعضها تاركة أقل المسامات فيما بينها والعكس صحيح بالنسبة للحبيبات المزواة أو المنخفضة التكور. فقد لاحظ (Fraser,1935) أن الرواسب المكونة من حبيبات متكورة تكون مساميتها منخفضة من تلك الرواسب ذات الحبيبات الأقل تكورًا، وذلك بسبب أن النوع الأول من الرواسب تكون حبيباتها أشد ترابطًا وتقاربًا من رمل النوع الثاني ذي التكور المنخفض انظر أيضًا: (Beard and Weyl, 1973) . ومن دراسة (Fraser, 1935) فقد اتضح أن شكل الحبيبة يكون ذا تأثير كبير على المسامية في حالة الحصى المستوى (أو المفلطح). لذا نجد أنه في حالة نوع معين من أحجار الجير مثل الكوكينا تكون نسبة المسامية مرتفعة معطية طراز ترابط «قشور البطاطس» (Pettijohn, 1975) ومثل هذه الرواسب تكون نسبة المسامية فيها حوالى ٨٠٪ (Dunham, 1962). وبالمثل فإن رواسب الطين الطازجة (عند وقت الترسيب) تكون نسبة مساميتها عالية جدًا قد تصل إلى ٨٥٪.

(هـ) العلاقة بين الطراز والمسامية

يعرف طراز الرواسب بالطريقة التي ترتب بها جسيمات الرواسب وهناك عنصران أساسيان يتحكمان في الطراز:

(١) توجيه الحبيبة (Grain orientation).

(٢) تعبئة الحبيبة (Grain packing).

وحيث إن كلا العنصرين يتعلق بالمسامية الأصلية، فسنشرح كلًا منهما بالتفصيل:

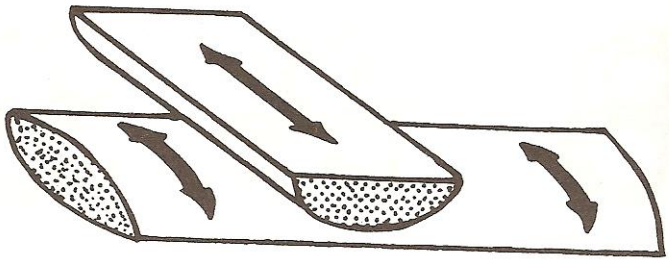
١ - توجيه الحبيبة

يقصد بتوجيه حبيبات الرواسب بالعلاقة الموجودة بين كيفية وضع الحبيبات بالإشارة إلى كلٍ من محور نقل الرواسب (اتجاه التدفق) والمستوى الأفقي. إن توجيه طراز حبَّات الحصى يمكن الحصول عليه لأن أحجامها الكبيرة تيسر عملية قياسها. بينما معرفة حبيبات الرمل كانت إلى وقت قريب صعبة المفهوم لأنها أكثر تعقيدًا ويصعب قياسها.

إن واحدًا من العلامات الشائعة لطراز الزلط هي ارتكاز حبيباته فوق بعضها البعض بحيث ترقد الحصيات ومحورها الطويل موازٍ لاتجاه التدفق ويميل في اتجاه أعلى التيار (شكل ٢٢). وغالبًا ما تكون الحبيبات المنفردة في أرضية أو قاع القناة مرتكزة أيضا. وتستعمل هذه الظاهرة كإشارة مفيدة لمعرفة التيار القديم للرواسب المعنية.

شكل (٢٢). تراكب طراز حَصِيَّات دُمْلوك الطين الصفحي في قاع القناة. تميل الحَصِيَّات في إتجاه أعلى التيار، بشكل معاكس لإتجاه ميل أسفل التيار لمجموعة الواجهة.
(عن: Selley, 1976)

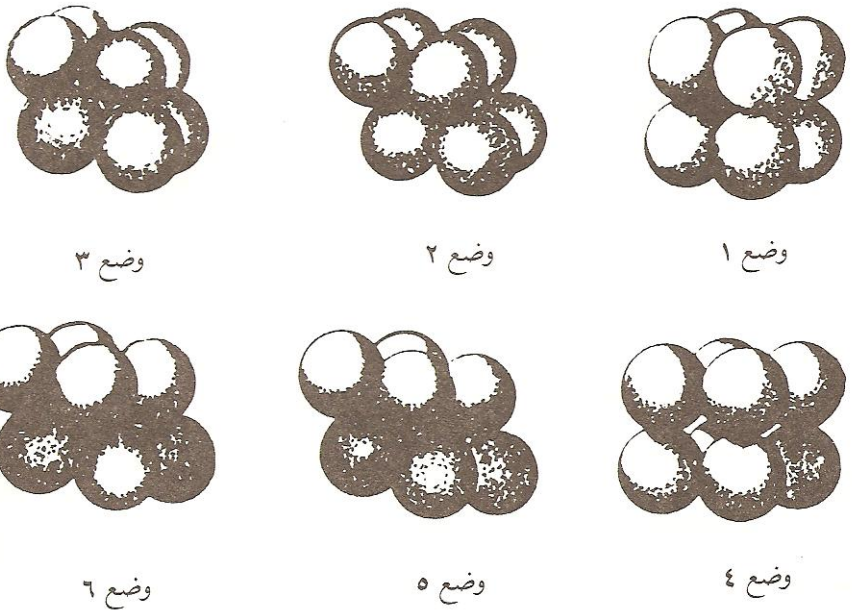
ولقد اتضح من أبحاث: Shelton and Mack, (1970); Martini, (1971); and Von Rad, (1971) أن توجيه حبيبات كل من رمل الطبقات المستوية المنقول في وسط مائي ورواسب تيار العكر ورمل الحواجز البحرية تكون موازية لاتجاه التدفق. كما تكون حبيبات رمل القنوات النهرية موجهة بشكل موازٍ لمحور الجسم الرملي. وهذه تتطابق مع النفاذية المتوافرة أو المفضلة (Buch, 1971). ولكن حبيبات رمل الحواجز الطولية (بالقرب من الشاطيء) تكون حبيباتها مرصوصة بشكل متعامد على محور الحواجز ونشاط الأمواج العائدة وفي هذه الحالة ربما يكون الاتجاه المفضل للنفاذية القصوى متعامدًا مع اتجاه الجسم الرملي (شكل ٢٣). وقد أكدت دراسة الباحث (Pryor, 1973) على اتجاهات النفاذية لرمال الأنهار الحديثة والشواطيء البحرية هذه الخاصية.



شكل (٢٣). توجيه الحبيبة والحد الأقصى لاتجاهات النفاذية (الأسهم) في رواسب القناة (الجسم العلوي) وأجسام رمل الحاجز (الجسم السفلي). يتوازى نطاق النفاذية مع الجسم الرملي في حالة القنوات، بينما تتعامد على محور الجسم الرملي في حالة الحواجز الرملية. (عن: Pryor, 1973, Figs. 3 and 9)

٢ ـ طراز ترابط (أو تعبئة) الحبيبات

بيَّن كلاً من (Graton and Fraser, 1935) أن مسامية الرواسب تختلف طبقًا للطريقة التي تُعبأ أو تترابط فيها المكونات الحبيبية. كان ذلك واضحًا من الأوضاع الستة التي تطرّقوا لها في (شكل ٢٤) والتي توضح نظام الترابط والتعبئة الهندسية للحبيبات المتكورة والتي تتشابه في أحجامها. ولقد أشار الباحثان أن قياس المسامية يتسع بين هذه الأنظمة الستة والتي من خلالها تبين أن نظام الترابط المكعبي (الحالة الأولى) هو الأكثر تفككًا ومن ثم قد تصل فيه نسبة المسامات تقريبا إلى ٤٨٪. وإذا قورن هذا النظام بنظام الترابط المعيني (الحالة السادسة) نجد أن تعبئة الحبيبات في نظام الترابط المعيني أكثر تقاربًا والتحامًا، ومن ثم تنخفض فيه نسبة المسامية إلى حوالي ٢٦٪، وطبعًا مثل هذا الأنموذج لايمكن حدوثه في الطبيعة. ولكن بما أن نظام الترابط المعيني الأكثر ثباتًا، فإن معظم الجسيمات والحبيبات في الرواسب تميل بأن يكون ترابطها فيما بينها أو تعبئتها على نهج هذا النظام (*Pettijohn, 1975*). هذا بالإضافة إلى أن معظم الرواسب تكون مصحوبة بعدم التقيد بنظام معين في تعبئتها إلا أنه في راسب ما ربما توجد بعض المستعمرات أو التجمعات المحلية والتي تكون فيها التعبئة الأكثر ترابطًا هي السائدة فوق الجميع. لإيضاح بعض التفاصيل في هذا المضمار راجع (Pettijohn, 1975). ولقد أوضح (Allen, 1970a) أنموذجًا للتعبئة الحقيقية مبنيًّا ليس على تحليل ترابط الحبيبات



شكل (٢٤). إمكانية تعبئة الحبيبات الكروية في ستة أوضاع. الوضع (١) أكثر الأوضاع تفككًا وثغراته واسعة ويعرف بالتعبئة المكعبية. الوضع (٦) أكثر الأوضاع تزاحمًا وثغراته ضيقة ويعرف بالتعبئة المعينية. (عن: Graton and Fraser, 1935).

المتكورة وإنما على الحبيبات ذات الشكل القضيبي (أو المتطاول) والتي تبيَّن من خلالها الحقيقة التقريبية لترابط حبيبات الرمل.

لاشك أن ترابط أو تعبئة الحبيبات في الرواسب تلعب دوراً مهماً في التحكم في نسبة المسامية الأصلية (الأولية) لهذه الرواسب، وهذا العامل هو أحد العوامل التي يصعب دراسته وتحليله من خلال الصخور المتماسكة. ويرجع السبب في ذلك إلى ثلاث خصائص:

١) صعوبة قياس التعبئة.

٢) افتقار معرفة تحكُّمْ البيئة وطرق الترسيب على التعبئة.

٣) مدى تأثير عملية الدموج والإحكام التي تحدث بعد الترسيب على التعبئة (انظر: Selley, 1976; 1994).

لقد اقترح كثير من الباحثين طرقًا متعددة لقياس التعبئة وتحليلها، ومن بين هؤلاء الدارسين Emery and Griffiths, (1954); Kahn, (1956a,b); Mellon, (1964) . ولقد

أشار (Morrow, 1971) إلى أن طراز تعبئة وترابط الراسب يختلف من نوع إلى نوع داخل وبين الرقائق المتجاورة.

ونتيجة لهذه المشكلات الموجودة بين المسامية والتعبئة فإن المعروف عن العلاقة التي تربط بين التعبئة والمسامية الترسيبية الأولية أو الأصلية قليل. وربما يتوقع المرء ببساطة أن رواسب كل من الطين البحري (متوسط العمق) وتيارات العكر ترسبت بتعبئة مفككة (أو ترابط حبيبي مفكك) أكثر من رواسب الزحف (أو القريبة من القاع). ومن المحتمل أن يكون رمل الطبقات المتقاطعة مفكك الترابط بدرجة أكبر من رمل الطبقات المستوية (أو المسطحة)، وهناك قليل من المعلومات التي تؤيد هذه الاحتمالات، ولكن أظهر الباحث (Pryor, 1973) أن رمل الأنهار الحديثة يكون الترابط أو التعبئة فيه أكثر تفككًا من رمل كل من الشواطيء والكثبان الريحية. وبما أن الحقيقة تقول بأن أهداف عملية الدمج أو الإحكام التي تحدث بعد الترسيب هي إعادة توجيه حبيبات الرمل فإن التعبئة أو طراز الترابط بمقدوره أن يكون له تأثير قليل على مسامية الراسب المتصلب (انظر: Selley, 1976; 1994).

تأثير عملية الدموج (الإحكام) على المسامية الأولية

إن نشاط عملية دموج وإحكام الحبيبات فيما بينها لراسب ما، يتم منذ الترسيب وتزداد بعد الترسيب عن طريق إعادة اتصال توجيه وضع الحبيبات مع بعضها داخل هذا الراسب لكي يعطي طراز ترابط أو تعبئة جديدة مختلفة عما كانت عليه في السابق. لذا فإننا نجد أن نسبة مسامية الطين عند وقت أو أثناء الترسيب تكون مرتفعة جدًا (حوالي ٨٥٪)، وبعد دفن هذا الراسب ومع مرور الزمن تنخفض مساميته الأصلية بشكل كبير وذلك بسبب عملية الدموج أو الإحكام.

يوضح شكل (٢٧) مدى اتساع نسبة المسامية الأولية لرواسب الرمل والطين عند وقت الترسيب وانخفاض هذه النسبة بعد دفن هذه الرواسب وأيضا يشير الشكل إلى مدى التدرج في انخفاض المسامية مع اختلاف مستويات الدفن. فقد شرح (Selley, 1976; 1994). إن المسامية الأولية للرواسب تنخفض مباشرة بعد الدفن وذلك بسبب تصلب الرواسب ودموج وإحكام حبيباتها ومع مرور الزمن وتعمق دفن هذه الرواسب

فإن عملية النشأة المابعدية (Diagenesis) التي تتعرض لها هذه الرواسب تحل محل عملية الدموج والإحكام لتصبح السبب الرئيسي في تدمير المسامية الأولية لهذه الرواسب.

٢ ـ المسامية الثانوية (مسامية بعد الترسيب)

تعرَّف المسامية الثانوية بأنها تنشأ بعد ترسيب الرواسب وانتهاء عملية الترسيب. وينتمي إلى هذا النوع من المسامية خمسة أصناف، وهذه الأصناف أكثر تعقيدًا في تكوينها ونشأتها من المسامية الأولية، (جدول ٧).

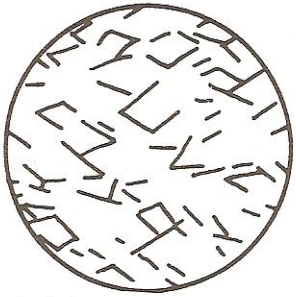
الصنف الأول . مسامية بين البلورات (Intercrystalline porosity) ، حيث تتواجد المسامات بين بلورات الصخر المتبلور (شكل ٢٥أ) مثل الصخور النارية والمتحولة (عالية الحرارة) وفي بعض صخور المتبخرات، وتكون موجودة أيضًا في صخر الجير الذي تعرض لعملية التبلور وتصبح ذات أهمية إذا وجدت في صخر الدلوميت المعاد تبلوره. لأن هذه الصخور تصبح مهمة لاحتمال إحتوائها على مكامن النفط. ويكون وضع المسامات هنا بشكل فراغات مستوية. ويرافق ذلك تقاطع متعارض فيما بينها وتكون عديمة الممرات الثقبية بين مسام ومسام.

الصنف الثاني . مسامية ثغرية (Fenestral porosity) ، وهي تشبه في شكلها بنْية أو تحدب عين العصفور. يوجد هذا الصنف من المسامية في صخر الجير وخاصة في الرمل الجيري الذي يحتوي أيضًا على مسامات أولية ولكنها تكثر في أو تصبح من مميزات الطين الجيري العقدي والطين الجيري المتجانس والذي ينشأ ويتكون في البرك الشاطئية وداخل مناطق المد والجزر المصاحبة. إن مايحدث للرواسب من عمليات اختزال مياه وسمنتة (أو لحام) وتطاير للغاز الموجود داخل الرواسب قد يتسبب في ترسيب طبقات طين صفحي تحتوي على مسامات عدسية فيما بينها وبشكل تحت متوازي (شكل ٢٥ب). ويعتقد أن هذا الصنف من المسامية تكوَّن مع أو أثناء ترسيب بقية رواسب المحتوى (انظر Selley, 1976).

وطبقا لما أشار إليه (Selley, 1994) أن هناك أنواعًا مختلفة من طراز الفتحات الثغرية (Fenestral fabric) والتي عُرِّفَتْ منذ فترة طويلة «بعين العصفور». ويقصد بذلك، تلك الأعين المفردة ذات المقاس الطولي ١ سم والتي تتشكل في بعض أحجار الوحل الجيرية (Illing, 1954). وترتبط هذه الفتحات (Apertures) بكل من المسالك

Intercrystalline Porosity

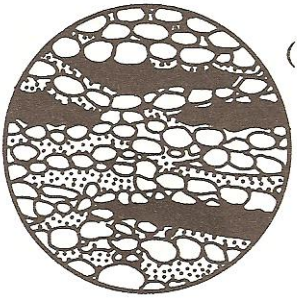
(أ)



فراغات مستوية بين البلورات

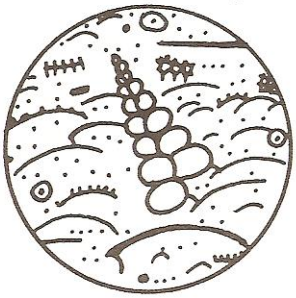
Fenestral Porosity

(ب)



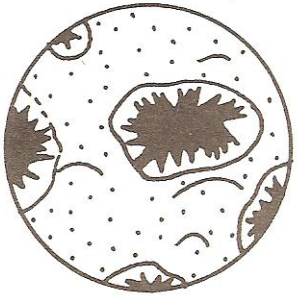
Moldic Porosity

(جـ)



Vuggy Porosity

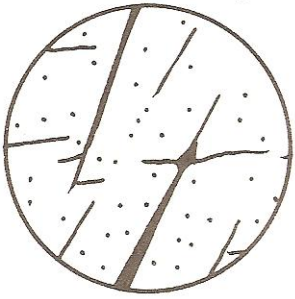
(د)



جير لامع يشكل حافة الثقب

Fracture Porosity

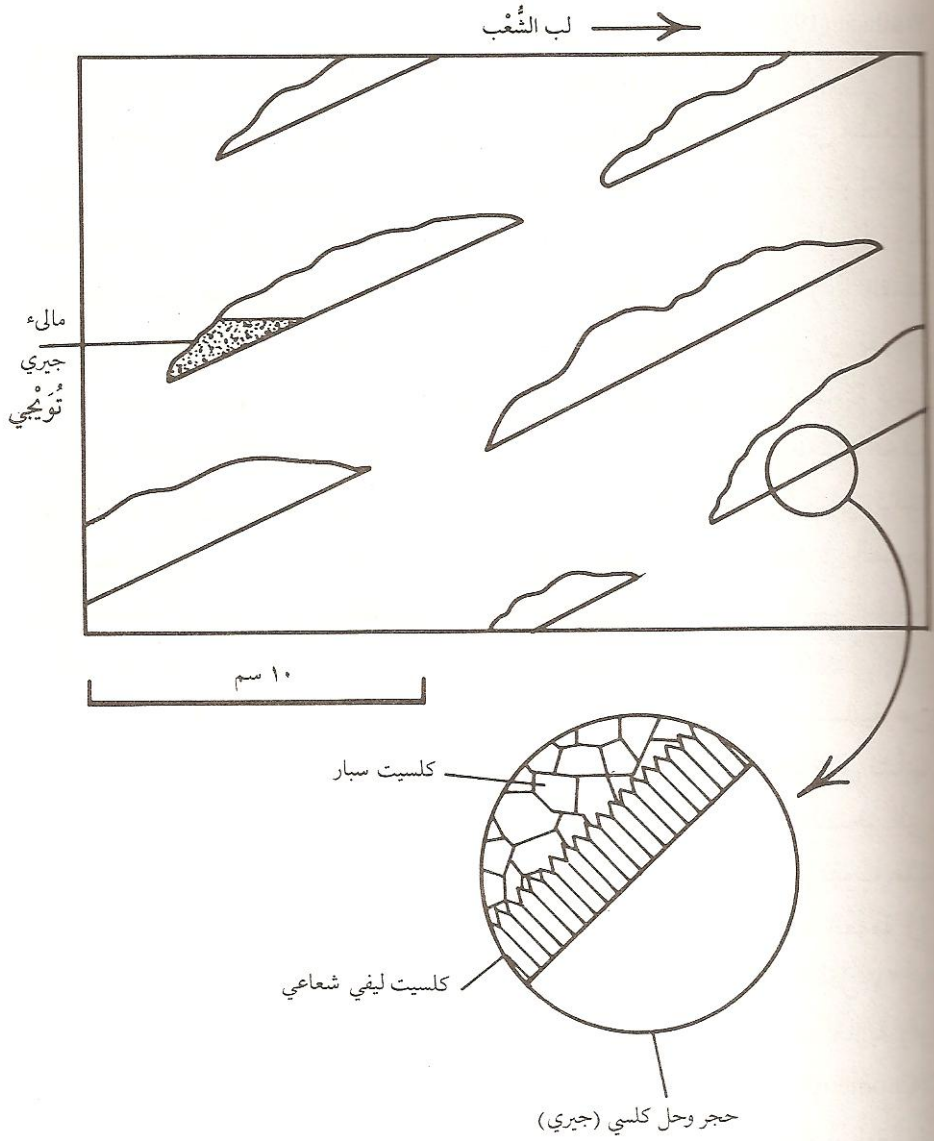
(هـ)



شكل (٢٥). أنواع المسامية الثانوية في الصخور الرسوبية
(أ) مسامات بين البلورات، (ب) مسامات ثغرية، (جـ) مسامات قالبية
(د) مسامات ثقبية، (هـ) مسامات مكسرية.
(عن: Selley, 1976; 1994)

العضوية (Organic burrows) وقنوات هروب الغازات. وفيما بعد تمتلىء هذه الثغرات بمعدن الكلسيت المتبلور. وعامة، ربما يعزى تشكيل فتحات «عين العصفور» المستديرة إلى نشأة الغازات العضوية. بينما الفتحات الثغرية المتطاولة قد تكون مرتبطة في تشكيلها بالمواد العضوية المتعفنة أو الفاسدة من الأستروماتوليت الطحلبي أو أنها تعزى إلى انبعاج أو انثناء الوحل المترقق أثناء الانكشافات بين المدِّية (Intertidal exposure)، (Shinn, 1983).

وأشار (Selley, 1994) إلى أن ظاهرة بنية الأُسْتُرومَاتَاكتَسْ (Stromatactis) ترتبط بأنظمة الفتحات الثغرية. ويشير الاسم إلى أوصال (أو قطع) غير منتظمة من الكلسيت المتبلور والتي يشيع ظهورها على جوانب الروابي الوحلية (Mudmounds) من عصر الحياة القديمة حول العالم. وعادة يبلغ طول بِنْية الأستروماتاكتس عشرة سنتمترات وارتفاعها ما بين ١ ـ ٣ سم. وتكون قاعدتها مستوية (أو مسطحة) ويتقبب السطح العلوي بشكل غير منتظم (شكل ٢٦) وعامة تنحدر هذه البِنْيات بشكل إشعاعي من وسط (أو مركز) هضبة الوحل. ويعزى تشكيل بنيات الأستروماتاكتس إلى عدة أسباب مختلفة منها: الحيوانات ذات الأجسام الطرية غير المعروف أصلها، الاضطراب الحيوي، الطحالب، وأخيراً تعزى إلى إعادة تبلور الطين الجيري (Micrite). وقد أظهرت الدراسة المتأنية أن بعض من بِنْيَات الأستروماتاكتس تكون مليئة جزئيًّا بالطين وسطحها العلوي يكون أفقيا، في حين أن كامل البنية تميل في اتجاه أسفل خاصرة الشُّعْب. وتدعى هذه بالطراز التَّوَيْجي (Geopetal fabric)، وتشير إلى أن الأستروماتاكتس تشكلت كفراغ (أو كفجوة) متزامن مباشرة تحت أرضية البحر. وعلاوة إلى ذلك فإن الكلسيت المالىء لهذه البنيات يكون غالبًا مرئي لأن يتشكل على مرحلتين. فأحيانًا تكون حافة الكلسيت الليفي أو التليف الإشعاعي (Radiaxial fabrous rim) متبوعة بسبار الكلسيت (Calcite spar)، (شكل ٢٦). ومن ثم تبدو أن الأستروماتاكتس قد تشكلت بسبب الهبوط المنحدر إلى أسفل قشرة الوحل الجيري المتصخرة. ولذلك فهي تشكيلة أو نوع من المسامية الثانوية. فأحيانًا تمتلىء الفراغات جزئيًّا بالوحل ثم تحاط بلاحم خلال الدفن الضحل وفي النهاية بلاحم من الاسبار عندما تتعمق في الدفن (Bathurst, 1982).

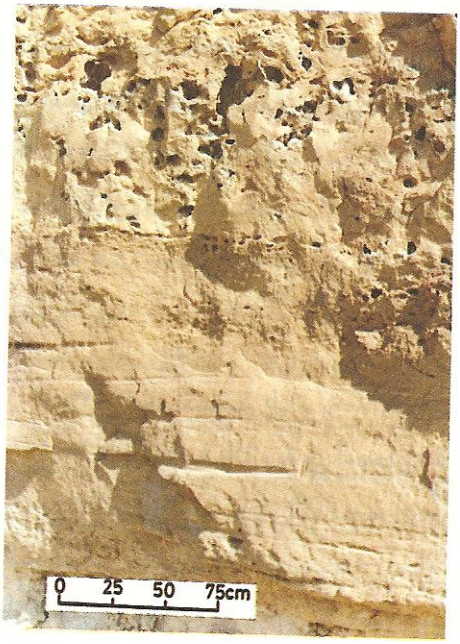


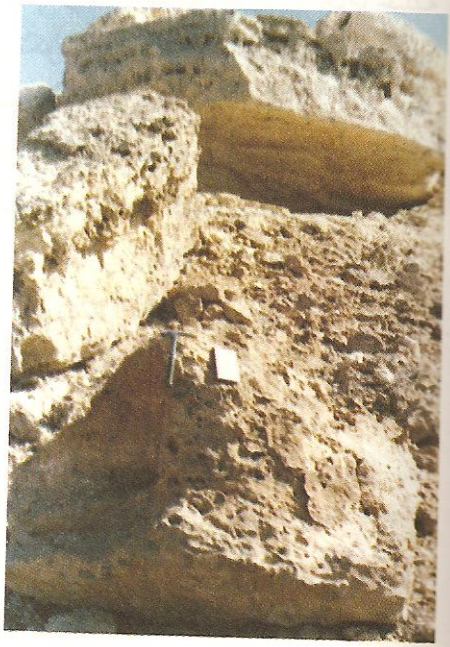
شكل (٢٦). رسمة السّتْرُوماتاكَتَسْ موضحة الخواص المشيرة إلى النشأة (الأصل) كمسام تشكلت بوساطة الهبوط المنحدر والمتزامن مع الوحل الجيري المتصخر. (عن: Selley, 1994).

لمزيد من المعلومات عن بِنْيَة الأستروماتاكتس اقرأ: Wallace (1987); Scoffin (1987); Blatt (1992); Raymond (1995) and Boggs (1995).

الصنف الثالث . مسامية القالب (Moldic porosity) وهي عبارة عن مسامات تكونت نتيجة تحلل أو ذوبان حبيبات ترسيب أولي، وتَعَرُّض هذه الحبيبات لبعض عمليات اللحام (أو السمنتة). إن تحلل بعض الحبيبات (أي القابلة للذوبان) لايمتد تأثير قطعها عبر مكونات الصخر الأخرى والسابقة النشأة مثل الحبيبات (غير القابلة للذوبان) ومادة الأرضية ومادة اللحام. أي أن عملية الذوبان أو التحلل في الصخر نفسه تخص حبيبات معينة من نوع واحد. فمثلاً يمكن الإشارة إلى مسامية قالب سرئيات أو مسامية قالب عقديات أو مسامية قالب بقايا أحافير، بمعنى أنه تمت عملية تحلل اختيارية (مختارة) للسرئيات أو العقد الجيرية أو بقايا الهياكل الحيوانية التي كانت في الصخر (شكل ٢٥جـ). إن هذا الصنف من المسامية الثانوية إذا وجد في الصخر فإنه يختلف من حيث الأبعاد الهندسية أو من حيث المسامية المؤثرة أو من حيث النفاذية وذلك طبقًا لنوعية الحبيبات المتحللة أو الذائبة (انظر Selley, 1976, 1994).

الصنف الرابع . مسامية الثقب (Vuggy porosity) وتنشأ هذه المسامية عن طريق ذوبان أو تحلل أجزاء من مكونات الصخر الجيري وهي تشبه إلى حد ما في نشأتها مسامية القالب، ولكن تختلف عنها في أنها تُقْطَع عبر طراز أو مكونات الصخر التي ترسبت أوليًا (شكل ٢٥د) وتكون دائمًا أكبر حجمًا من مسامية القالب وتمتاز ثقوب هذه المسامية بأنها محاطة بنفس حواف بلورات الحائط ويحتوي أسفل متكون العُرْمَة في المملكة العربية السعودية (Moshrif, 1980) على هذا الصنف من المسامية (شكل ٢٧أ، ب). وبازدياد اتساع حجم مسامية الثقب عندئذ يطلق عليها المسامية المغارية (أو الكهفية) وتكون كذلك إذا بلغ اتساعها ما يسمح بإدخال رَجُلْ بداخلها (Choquette and Pray, 1970) أي ما يعادل أكثر من $\frac{1}{2}$ م^3. مثل هذه المسامية الكهفية أو المغارية موجودة في متكون العرب (الجوراوي العلوي) في حقل زيت أبقيق في المملكة العربية السعودية (McDonnell, 1951) وكثير من هذه المغارات (الكهوف) متوافرة في حقول بترولية أخرى في العالم (انظر Selley, 1976; 1994).





شكل (٢٧). مسامية الثقب في حجر جير متدلت «أسفل متكون العرمة»:
(أ) خشم رِضِيْ جنوب شرق مدينة الرياض. (عن: Moshrif, 1980)
(ب) منطقة خشوم الخناصر شمال غرب مدينة الرياض.
(عن: El-Asa'ad, 1985)

الصنف الخامس. مسامية المكسر (Fracture porosity)، هذا الصنف من المسامية عبارة عن المسامات التي تصاحب مكاسر الصخور بأنواعها وليست تخص الصخور الرسوبية وحدها. وهي تنتج عن كسر الترققات الصخرية المترسبة وقد تحدث مصاحبة أو أثناء عمليات الترسيب. وتأخذ مسامية المكسر صفة الصدوع الدقيقة الناتجة عن حركة الهبوط والانزلاق وقوة الإحكام أو الدموج. وتفقد الرواسب البلاستيكية مكاسرها عند الحدوث وذلك لالتحام المكسر مباشرة في وقتها، بينما الصخور الهشة أو القابلة للكسر، فإن مكاسرها تبقى مفتوحة بعد تكوينها محدثة بذلك مسامية المكسر (شكل ٢٥ هـ). وهذا الصنف من المسامية يخص الصخور الشديدة التصخر، تنشأ في فترة زمنية متأخرة من تلك الأصناف الأخرى من المسامية. وتحدث مسامية المكسر في كل من أحجار الرمل المسمنتة جدًّا وفي صخور الجير وربما تحدث في

الطين الصفحي، وفي الصخور النارية والمتحولة. وتأخذ مسامية المكسر أحجامًا مختلفة مما يجعلها صعبة الملاحظة والتحليل، فقد تكون دقيقة وتحتاج إلى مجهر لملاحظتها ودراستها وقد تصل في مقاسها إلى حجم الكهف أو المغارة.

وتتكون مسامية المكسر بطرق مختلفة فقد تكون نتيجة الحركات التشكيلية أو التكتونية أو تكون مصاحبة لحركة التصدع أو نتيجة عمليات التجوية السطحية، فغالبًا نجدها تحت سطح عدم التوافق أو التطابق مباشرة، وفي هذه الحالة قد تتسع وتكبر بتأثير السوائل أو المحاليل وخاصة في أحجار الجير (Selley, 1976).

٣ ـ نشأة المسامية الثانوية

(أ) المسامية الثانوية في أحجار الجير

تتكون المسامات الثانوية نتيجة التغيرات المتأخرة التي تتعرض لها معظم الرواسب ويتم ذلك بواسطة المحلول، والتفاعلات الكيميائية أو التكسرات الميكانيكية. ويطلق على هذه المسامية «مسامية بعد الترسيب» (Murray, 1960) وأهمية هذه المسامية الثانوية مثل أهمية المسامية الأولية من حيث تراكم الزيت والغاز الطبيعي في هذه المسامات ومن ثم فإن معرفة نشأتها أمر مهم للغاية.

تتكون مسامات المحلول في كثير من برك البترول متصلة أو مصاحبة لسطح عدم التوافق أو التطابق Murray, (1930); Hohlt, (1948); and Levorsen, (1967) . بما أن أسطح التخالف أو عدم التطابق تنهي أو توقف التعرية الحادثة فوق سطح الأرض وفي نفس الوقت تنفذ المياه الجوية المشبعة بغاز ثاني أكسيد الكربون خلال الطبقات النافذة للمنكشفات الطبقية وتذيب هذه المياه الجير، ومن ثم تزداد المسامية إذا كانت الطبقات تنكشف أسفل الميل وتحدث هجرة المياه الجوفية خلال الصخور وتندفع على فترات مع تجمع الزيت والغاز.

إن تفاوت ذوبان مكونات الرواسب المختلفة قد يساعد على تكوين المسامية الثانوية ولكن لايكون ذلك حتميًا. على سبيل المثال ذوبان الجير في الزوائد الصخرية (Stylolites) لاينتج عنه مسامية، بل على العكس فإن الجير المذاب يترسب في مسامات مجاورة محدثًا انخفاضًا في نسبة المسامية السابقة.

هناك حالتان ربما تُميِّزْ بها نشأة المسامية الثانوية :

١ ـ الراسب المتكون بشكل أساسي من معادن ذات إذابات مختلفة، هذا ينطبق على راسب يتكون من معدني الكلسيت والأراجونيت والتي يذاب منها الأراجونيت فقط واستخدم هذا كتفسير لارتفاع نسبة مسامية صخر الطباشير (BØggild 1930). وبطريقة مماثلة تتكون مسامية الثقوب عن طريق إذابة محتويات (مكتنفات) الأنهيدريت أو الجبس في صخور الجير. وبالتالي فإن الجير المذاب من الحبيبات الهيكلية أو غير الهيكلية يستخدم في تكوين لحام الكلسيت مشكِّلا أرضية مقاومة بين الحبيبات ومن ثم تاركًا مسامية القوالب مثل مسامية قوالب السرئيات (Friedman, 1964 and Robinson, 1967) .

٢ ـ يكون الراسب متجانسًا معدنيًّا عند وقت الإذابة وليس نسيجيًّا (أي أن حبيباته غير متجانسة من ناحية الحجم والتصنيف) فينتج عن ذلك إذابة أرضية البلورات الكاذبة (Lucia, 1962; Lucia and Murray, 1967) . فمثلاً دراسة أحجار الجير الزنبقية في غرب ولاية تكساس تُظْهِر لنا أن مناطق الصخر الخالية من الأرضية يكون الالتحام فيه محكمًا بينما المناطق الشاملة على مادة الأرضية الأولية تكون محتوية على مسامية ثقبية ومسامية بين الجسيمات .

تحتوي جسيمات أحجار الجير والدلوميت عامة على توزيع متناسب من ذوائب مختلفة أو أحجام بلورات يفوق ذلك، ولذا تكون فيها نسبة المسامية الثانوية كبيرة (Choquette and Traut, 1963) . وبمجرد تكوين تلك المسامات تتسع وتكبر بسبب نفاذيتهم العالية التي تساعد على هجرة الماء المضغوط (المحكم) فيما بينها .

وينتج عن ذلك أن المسامية الثانوية تكون ذات علاقة ببنيات القمم، مثل الصخور الحيوية (Bioherms) كما شرحها (Hohlt, 1948) من خلال تراكم الشقوق التكتونية في هذه القمم . وربما يكون أهم من ذلك هو أن الماء المضغوط (أو المحكم) يتجه بقوة داخل هذه البنيات (Von Engelhardt, 1967) . ومن المحتمل أن المكاسر تبتلع الماء ومن ثم تمنع الصخر المجاور من التحلل أو الإذابة الثانوية .

تمثل الفوالق المتقاطعة (أو الشقوق) أنواعًا من المسامات الثانوية وهذه مبدئيا لاعلاقة لها بعمليات التحلل أو الاذابة . ويندر أن تنشأ من هذه المكاسر أهميةً كصخور مكمنية ولكن تكون مهمة كأنظمة للصرف . إن برك الزيت الإيرانية الكبيرة الموجودة

في حجر جير الأسمري (ثلاثي) تكون ذات علاقة بمناطق التكسر بسبب الطي خارج أو حول هذه المناطق، وتكون فيها المسامية أقل من ٥, . مِلِّيدَارسي (Millidarcy)، وتكون المسامية بين ٢ ـ ١٥٪ (Levorsen, 1967) . وتلعب المكاسر أيضًا دورًا مهمًا في برك الزيت العراقي، كركوك (ثلاثي) وعين زحلة (طباشيري) (Daniel, 1954) . وربما تتغير الشقوق أو المكاسر المتقاطعة أو حتى مستويات التطبق بواسطة طرق الإذابة (أو التحلل) وتصبح قنوات كبيرة أو حتى كهوف (Levorsen, 1967) . ويتناقص متوسط نسبة المسامية عادة بسبب طرق السمنتة، واتساع نمو البلورة. ويزداد هذا الانخفاض في نسبة المسامية مع زيادة العمر الجيولوجي (Von Engelhardt, et al., 1974).

(ب) المسامية الثانوية في الدلوميت

إن تكوين ونشأة مسامية بين التبلر (بين البلورات) أثناء تغيرات النشأة المابَعْدِيَّة لعملية الدلتة أو التدلمت (Dolomitization) هي واحدة من أهم أمثلة المسامية الثانوية. حيث تزداد المسامية في صخور الجير بشكل لاحق مع زيادة عملية الدلتة. على سبيل المثال، في جنوب غرب إيران وجدت المسامية بنسبة (٠ ـ ٤٪) في صخور جيرية تحتوي على (٠ ـ ٢٠٪) دلـوميت، وبنسبة (٤ ـ ٨٪) مسامية في صخور جيرية تحتوي على (١٠ ـ ٣٥٪) دلـوميت، وبنسبـة (٨ ـ ١٢٪) مسامية في صخور جيرية تحتوي على (٢٠ ـ ٦٠٪) دلوميت، وبنسبة مسامية أكبر من ١٢٪ في صخور جيرية تحتوي على (٣٠ ـ ٧٥٪) دلوميت.

لقد أوضح كل من (Von Engelhardt *et al.*, 1974) تغييرات النشأة المتأخرة التي تحدث في فترة متأخرة جدا وتتم بشكل تدلمت جزيء بجزيء للكلسيت باستطاعتها نظريًا أن تعطي مسامية بنسبة ١٣٪. ولكن في كثير من الحالات تكون مسامية هذا النـوع من الـدلوميت أكبر من ١٣٪ وهي أعلى من مسامية أحجار الجير المجاورة أو أحجار الجير المتدلمتة.

ونذكر هنا بعض الأمثلة كما استنتجها بعض الباحثين:

تكون نسبة المسامية ٣٠٪ في الدلوميت و١٠٪ في أحجار الجير (Murray, 1960)

تكون نسبة المسامية ٢٠٪ في الدلوميت و٥٪ في أحجار الجير (Powers, 1962)

تكون نسبة المسامية ٢٧٪ في الدلوميت و٧٪ في أحجار الجير (Lucia & Murray, 1967)

تكون نسبة المسامية ١٠ ـ ٣٠٪ في الدلوميت وأقل من ١٠٪ في أحجار الجير (Schmidt 1961, 1965)

وقد علل كل من (Von Engelhardt *et al.*, 1974) السبب المحتمل في هذه الاختلافات الكبيرة ذات العلاقة بهذه الحالة كالتالي:

١) نسبة الكلسيت المذاب أكبر من نسبة الدلوميت الناشيء أو المتكون.

٢) اختيار عملية التدلمت للمناطق المنفذة والأكثر مسامية.

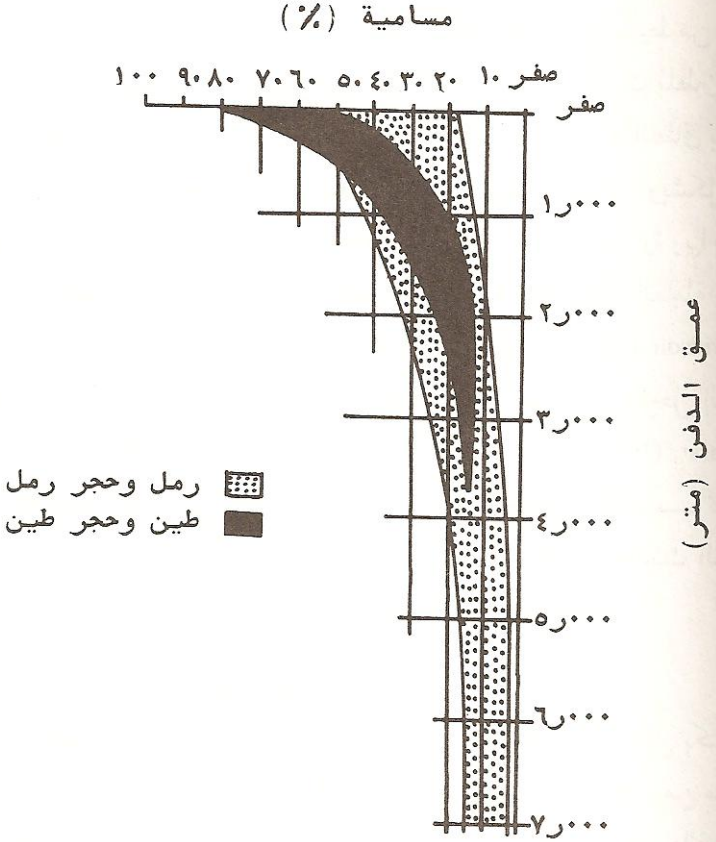
٣) يصبح الدلوميت أقل التحامًا من أحجار الجير المجاورة، وربما يعود ذلك إلى تراكم الهيدروكربونات المبكرة والتي تمنع حدوث عملية نشأة مابَعْدِيَّة جديدة وربما تكون عملية تدلمت جزيء بجزيء مسؤولة عن اختيار الدلوميت ليكون كمادة إحلال بدلاً من أن يكون لاحمًا. ومن ثم ربما يحتفظ الصخر السرئي بمساميته بين الجسيمات أثناء عملية التدلمت (Murray, 1960). وعامة تبدأ عملية الدلمتة في جسم أرضية أحجار الجير. وأحيانًا يحتفظ الدلوميت المتعرض لعملية النشأة المبكرة من التغييرات المابَعْدِيَّة بنسبة عالية من المسامية (Spencer, 1964) بشرط ألا يحدث اتساع في حجم البلورة (أو التبلر) وقد لوحظ مثل هذا الاحتفاظ بحجم البلورة الأصلي في تغيير منتظم التكرار لحجم بلورة في دورات تدلمتية مثل تلك الموجودة في دلوميت الباليوسين في ليبيا والتي تحتفظ بمسامية (١٧ ـ ٣٨٪) (Füchtbauer and Goldschmidt, 1965). وربما يمنع في بعض الأوقات تراكم الزيت المبكر من تضخم البلورة (أو اتساع رقعة التبلر) وعامة يكون دلوميت الطين (Lutite) والذي تعرض إلى عملية مبكرة من التغييرات المَابَعْدِيَّة فقيرًا في المسامية إذا ما قورن بكثير من الدلوميت المتعرض لنشأة مابَعْدِيَّة من التغييرات المابَعْدِيَّة. وربما يعود ذلك إلى تضخم أو اتساع التبلور بالإضافة إلى عملية الدموج والإحكام أو إلى عملية السمنتة على حساب ضغط سائل الزوائد الصخرية (Stylolite) أو الحبيبات غير الثابتة (انظر: Von Engelhardt *et al.*, 1974).

دموج وإحكام الطين Compaction of clays

أشار كثير من الباحثين إلى أن المسامية الأولية للطين الطازج عالية جدًّا وهي أعلى بكثير من مسامية الطين الصفحي (انظر: Trask, 1932; and Hedberg, 1936) وأن هذا الانخفاض في المسامية ومصاحبته تغير الطين إلى طين صفحي هو بمثابة نتائج دمج

وإحكام في جسيمات أو حبيبات الراسب عما كانت عليه في السابق . ويكون ذلك نتيجة الضغط الناتج من ثقل الطبقات العلوية (Pettijohn, 1975) . إن العلاقة الموجودة بين مسامية الرواسب وعمق هذه الرواسب تحت سطح الأرض (بعد الدفن) علاقة معقدة ويرجع تعقيدها إلى عاملين هما حجم الحبيبات وتشوه ترتيبها . ولكن بشكل عام فإن الصخور ذات الحبيبات الناعمة تميل إلى أن تُحْكَم أو تُدْمَج حبيباتها بصورة أفضل من تلك الصخور ذات الحبيبات الخشنة وذلك إذا كان كل شيء آخر من العوامل متساوية، وأن هذه الصخور تظهر انخفاضًا كبيرًا في المسامية مع مقياس التعمق أو الدفن (Pettijohn, 1975) .

من الملاحظ أن شكل (٢٨) يشير إلى أن وحل الطين المترسب عند مستوى صفر من الدفن تتراوح مساميته بين ٥٠ إلى ٨٥٪ ولكن بعد الترسيب مباشرة يبدأ الطين بفقدان المياه عن طريق عملية التصلب أو التماسك ومن خلال هذه العملية يتغير الطين إلى حجر الطين . ويشمل ذلك عملية كل من اختزال الماء والسمنتة (أو الالتحام) وكذلك عملية الدموج أو الإحكام نتيجة الضغط المنبعث من أعلى . ومن المهم جدًّا أن نتذكر أن عملية اختزال الماء من الطين عند العمق السطحي (بالقرب من السطح) لايعود كلية إلى الضغط المبذول من أعلى وإنما يعود أيضًا إلى عملية استخراج الماء من الطين بطريقة مصاحبة نتيجة تواجد جسم مائي تحت راسب الطين، ويطلق على هذه العملية (Syneresis) ، (White, 1961) مسببة في ذلك تكوين تقاطعات شقوق الوحل عند التقاء وجهي الماء والوحل (Selley, 1976; 1990) . إن معرفة الخصائص الطبيعية للطين وكذلك عملية الإحكام والدموج للطين عند مستوى قليل من الدفن (أي بالقرب من سطح القشرة الأرضية) لازالت محور دراسات كبيرة بواسطة المهندسين الجيولوجيين وذلك لأهميتها القصوى بالنسبة إذا كانت القاعدة الأساسية للكثير من المشروعات الهندسية المدنية مثل بناء العمارات العالية وطرق السيارات ومناطق إنشاء السدود وغيرها . وليس المهم فقط معرفة الخصائص الطبيعية للطين عند المرحلة الأولى من دراسة هذه المواقع ولكن المهم أيضًا بأن يكون في مقدور المهندس الجيولوجي التنبؤ بدرجة الدموج والإحكام للطين في المنطقة إذا تعرض الموقع لعملية تشبع مائي (أو تسرب مائي) .



شكل (٢٨). مدى علاقة اتساع المسامية الأولية لرواسب كل من الرمل والطين عند وقت الترسيب وبعد دفن هذه الرواسب. (عن: Selley, 1976)

وكما يظهر من (شكل ٢٨) أن سرعة طرد الماء وفقدان أو تناقص مسامية الطين تنخفض مع زيادة عمق الدفن. لزيادة معرفة تفاصيل أهمية دمج الطين بالنسبة لمكامن البترول، أو تغيير المعادن الطينية المصاحبة (Selley, 1976).

ويتلخص حديثنا عن مدى تأثير عملية الدموج أو الإحكام على المسامية الأصلية للطين بأن نقول إن مسامية الطين الأولية تفقد بسرعة أثناء الدفن المبكر، وبشكل رئيسٍ بسبب العملية الطبيعية للإحكام الناتج عن الجاذبية تحت عمق ٢٠٠٠ متر وتنخفض ببطء شديد نتيجة العمق وتنعدم بشكل كبير بواسطة عمليات الكيمياء المرافقة لاعادة التبلور المعدني.

وكما أن عملية الدموج (أو الإحكام) وتصلب الطين عند عمق بسيط من سطح الأرض مهم بالنسبة للمهندسين الجيولوجيين فإن التغيرات التي تحدث للطين لكي تصبح أحجار وحل في أعماق بعيدة من سطح الأرض تشكل اهتمام واسع النطاق بالنسبة لمهندس البترول لأن في ذلك احتمالاً يتعلق بنظريات هجرة ونشأة البترول. وبشكل مماثل فقد اعتبر علماء جيولوجيا التعدين أن أجسام خامات المعادن منخفضة الحرارة ربما سيقت بواسطة السوائل المتبقية من دمج أو إحكام الطين وبمساعدة مياه البحار العاملة كوسط ناقل، Davidson, (1965); Amstutz and Bubinicek, (1967) and Selley, (1976, 1994).

ويجدر الإشارة هنا إلى أن دمج الوحل الجيري يشبه إلى حد كبير دمج الوحل العادي (غير الجيري) إلا أن كثيراً من الباحثين مثل Bathurst, (1971); Pray, (1960) and Zankle, (1969) يعتقد أن الوحل الجيري قليل الدموج أو الإحكام وذلك بسبب تعرضه لعملية السمنتة (الالتحام) المبكرة. وبالرغم من أن الوحل الجيري حديث الترسب يفقد ماؤه بشكل مبكر إلا أنه يحتفظ بمسامية عالية (Pettijohn, 1975).

دموج وإحكام الرمل Compaction of sands

يتضح أيضًا من (شكل ٢٨) أن الرمل يترسب بمسامية أولية تقل بكثير من مسامية الطين، وكذلك يتبين أن مسامية الرمل تنخفض بنسبة أقل بكثير من مسامية الطين عبر نفس زيادة عمق الدفن المصاحب، والسبب في ذلك أنه في حالة الرمل يصبح فقدان المسامية منخفضًا نتيجة الدموج أو الإحكام الطبيعي بينما في حالة الطين تكون مرتفعة، كما أن معظم فقدان المسامية في الرمل هو بسبب عملية السمنتة (الالتحام) السائدة. وشرح (Selley, 1976) إنه اتضح من دراسة بتروغرافية الرمل أن عملية الدموج والإحكام تحدث في الرمل عبر ثلاث صور:

١ ـ نرى في كثير من القطاعات الصخرية المتعامدة لأحجار الرمل الميكائي أن جسيمات الميكا منطوية ومشوهة بسبب ضغط حبيبات الكوارتز من أعلى ومن أسفل. ومن هذا نستنتج أن عملية الدموج قد حدثت.

٢ ـ تحتوي كثير من أحجار الرمل على حبيبات فتاتية من الطين في حجم حبة الرمل. وهذه الفتاتات الطينية تظهر غالبًا مغلفة ومغموسة بين حبيبات الكوارتز الأكثر مقاومة ويدل هذا على أن عملية الدموج والإحكام قد حدثت.

٣ ـ تظهر كثير من القطاعات الصخرية للرمل حبيبات فتاتية متكسرة، فإذا ظهرت هذه الفتاتات تحت ضوء المجهر العادي غير مشوهة فإنها في الحقيقة تكسرت وأعيدت عملية سمنتتها أو التحامها (Sipple, 1968) ويؤكد هذا أن الدموج الطبيعي قد أخذ مكانه.

وقد تبين من دراسات عديدة أُجْريت على رمال متنوعة أنّ عدد اتصالات الحبيبة لكل حبة يزداد مع زيادة العمق في الدفن. وبشكل مماثل أن طبيعة أو نوعية اتصالات الحبيبة يتغير من نقطة تماس إلى اتصال مقعر ـ محدب وإلى اتصال تشابك (شكل ١٧ أ، ب، جـ) مع ازدياد العمق. تدل هذه الدراسات على أن المسامية تتناقص مع العمق. ولكن تقترح دراسة (Sipple, 1968) أن هذا التناقص في المسامية حدث بسبب عملية السمنتة أو اللحام التي يتعرض لها الرمل في الأعماق وليس بسبب الدموج أو الإحكام. ومن المحتمل أن يفقد الرمل بعض من مساميته الأولية مع ازدياد عمق الدفن وذلك بسبب ضغط السائل الناتج بين حبيبات الكوارتز، إلا أن السبب الرئيس في تناقص مسامية الرمل في الأعماق يرجع إلى اتساع نطاق ونمو سمنتة الكوارتز الثانوي (Sipple, 1968).

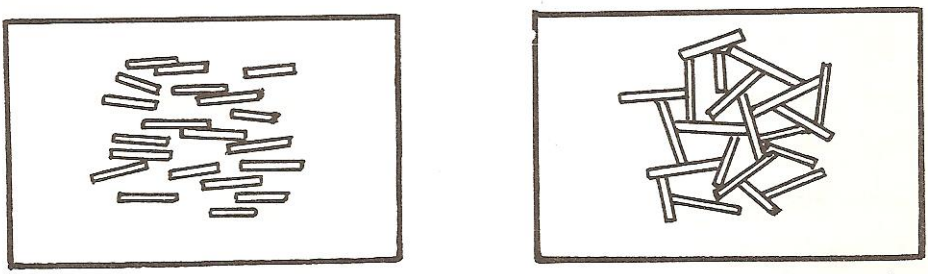
ونختتم حديثنا عن دموج أو إحكام الرمل بالقول إن هناك عملية دمج للرمل وهذه العملية تؤثر بنسبة بسيطة في خفض مسامية الرمل الأولية (أي الموجودة بين الحبيبات). ويوضح لنا (شكل ٢٨) أن أثناء فترة الدفن المبكرة للرمل يكون الانخفاض في المسامية قليلاً جدًّا مع أن عملية دموج الرمل في هذا المستوى تكون عالية وهذا يعاكس بشدة ما يحدث بالنسبة للطين عند نفس المستوى. كما يبين (شكل ٢٨) أن مقدور الرمل الاحتفاظ بمعدل مساميته إلى أعماق كبيرة بينما العكس صحيح بالنسبة للطين.

ويتبين لنا من الشرح السابق أن باستطاعة الرمل، الدموج والإحكام خاصة تحت عمق قليل (أو سطحي) وخاصة إذا كان ترابط الرمل ضعيفًا ويحتوي على نسبة عالية من الجسيمات الناعمة في أرضيته. أخيرًا يتحتم علينا أن نتذكر أن عملية الدموج والإحكام ليست العامل الرئيس في تخريب أو انخفاض مسامية الرمل وإنما التناقص المستمر للمسامية مع ازدياد العمق يحدث بسبب عملية السمنتة المصاحبة.

ملخص عملية الدموج أو الإحكام

تتعرض جميع الرواسب سواء كانت الرواسب مسمنتة أم غير مسمنتة، لعملية الإحكام أو دمج الحبيبات. ويتسبب في عملية الدموج الضغط الصادر من ثقل الرواسب العلوية أو من حدوث تشوه بنائي لهذه الرواسب وينتج عن كلتا الحالتين انخفاض في المسامات الفراغية داخل جسم هذه الرواسب. ويصاحب انخفاض المسامات الفراغية طرد المياه المتخللة لهذه المسامات ومن ثم انخفاض في حجم الرواسب. وتؤثر عملية الدموج في جميع الرواسب ولكن تأثيرها يكون أكثر وضوحًا في الرواسب ذات الحبيبات الناعمة مثل الغرين والطين. وتكون معادن الطين قبل تعرضها لعملية الدموج أو الإحكام مفككة وذات ترابط مفتوح.

ويتحكم في هذا الترابط سرعة الترسيب ودرجة تركيز حجم جسيمات الطين في الماء. وتعتمد عملية دموج الرواسب الناعمة على سرعة طرد الماء من المسامات. وتكون جسيمات الطين قبل الدموج أو الإحكام غير منتظمة التوجيه. وبعد عملية ميكانيكية الدموج يصبح توجيهها على نسق موازٍ بعضها البعض (شكل ٢٩). ولكن يبدو أن نمو هذا الاختيار من التوجيه المتوازي والذي تعكسه جسيمات معادن الطين يبدأ في المرحلة المبكرة جدًّا لعملية الدموج وعند ضغط تقريبي ١ كجم لكل ١ سم^{٢} (Friedman and Sanders, 1978). كما يبدو أن فقدان المسامية مع ازدياد العمق في الدفن يحدث حتى بالنسبة للطين الصفحي، ويكون السبب في ذلك كبيراً نتيجة



(أ) (ب)

شكل (٢٩). صفائح من معدن الطين، (عن: Meade, 1966)
(أ) قبل اتمام عملية الدموج أو الإحكام
(ب) بعد اتمام عملية الدموج أو الإحكام

العملية الكيميائية المشاركة في ترسيب المواد اللاحمة عوضًا عن التضاغط الميكانيكي لهذه الرواسب.

إن رواسب الجير تكون أقل عرضة لعملية الدموج والإحكام من الرواسب الفتاتية (مثل الطين، الغرين، الرمل والطين الصفحي)، ويرجع تجاوب انخفاض مسامية رواسب الجير مع الدفن بشكل كبير إلى ميكانيكية ترسيب السائل وليس إلى إعادة ترتيب طبيعة وضع الجسيمات أو تفتيت هذه الجسيمات. أشارت نتائج كثير من الدراسات التي أجريت على أحجار جير قديمة إلى أن معظم جسيمات هذه الرواسب غير مشوهة. ولأن حجم حبيبات الجير تكون في معظم الأحيان ناعمة، لذلك ربما نتوقع أن يظهر الطين الجيري مقدارًا كبيرًا من التأثر بعملية الدموج والإحكام وتكون مشابهة لما يطرأ في الطين. ولكن الوحل الجيري لا يأخذ المنهاج نفسه الذي أخذته رواسب معادن الطين. ويصبح كثير من الأوحال الجيرية في البيئة الترسيبية عقدية نتيجة نشاط الحيوانات الموجودة. ويندر أن يظهر الوحل الجيري القديم مقومات تثبت تشوه العقد الطينية.

إن العوامل التي تؤثر على عملية الدموج والإحكام (Compaction) في الرمل هي شكل وتصنيف الجسيمات وعمق الدفن. ويكون تجاوب حبيبات الرمل أثناء عملية الدموج والإحكام بأن تتزحزح وتعيد ترتيب ترابطها بشكل أكثر كثافة ومن ثم تنخفض المسامية. ويكون الرمل الرديء التصنيف وذو الحبيبات المزواة أكثر تضاغطًا (متقاربة حبيباته) من الرمل الجيد التصنيف وذو الحبيبات المستديرة.

تدل نتائج كثير من الجيولوجيين على أن الحمل (الثقل) وعملية الدموج المشوهة، وخاصة التي تحدث في الأوحال، تقود إلى انخفاض كبير في حجم المسامات وطرد السوائب بما فيها الهيدروكربون (النفط). وربما تهاجر هذه السوائب المطرودة إلى طبقات رملية عديمة أو قليلة التضاغط. وإذا وجد النفط فمن المحتمل أن يصطاد في مكامن أحجار الرمل أو الجير.

ويمكن حدوث عملية الإحكام أو الدموج في صخر حجر الجير أو صخر ملح الطعام إذا كانت ملتحمة مع أو مجاورة لجسم مائي، فإنها تذاب بسبب ازدياد الإذابة من خلال ازدياد الضغط. وتعرف هذه العملية بضغط السائل ويكون مضمون تأثيرها

مختلفًا عن الإعادة الميكانيكية لترتيب الحبيبات المتجاوبة للضغط الصادر من ثقل الرواسب العلوية.

لمزيد من التفاصيل عن الخصائص الطبيعية للحبيبات راجع: Selley, (1994) and Boggo (1995).