كلية العلوم

القسم : **علم الحياة**

السنة : **الاولى**

المادة : جيولوجيا عامة

المحاضرة : الرابعة /نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية ، تكنلوجيا المعلومات والاتصالات

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر (What's app-Telegram) على الرقم 0931497960

الصخور

أولا– الصخور النارية (المغماتية) Igneous Rocks

تُعدّ الصخور المغماتية – كما يظهر من التسمية – نتاجاً للنشاط المغماتي (Magmatism)، ومن ثم فهي صخور ذات منشأ داخلي تشكلت من تبرد وتصلب مادة منصهرة تُعرف بالماغما (Magma). والماغما هي عبارة عن صهارة سيليكاتية مشبعة بالماء والمركبات الطيارة كالفلور، والكلور، وغاز ثاني أكسيد الكربون، وغيرها. ويؤدي انخفاض درجة الحرارة وتغير الضغط إلى تبلور هذا الصهارة. وهذا يمكن أن يتم في أعماق القشرة الأرضية أو على السطح (أو بالقرب من هذا السطح).

في الحالة الأولى (التبلور في الأعماق) تجري عملية التبرد ببطء، وتتشكل صخور ذات حبات بلورية كاملة، أما في الحالة الثانية، وعند الاندفاع السريع للماغما إلى سطح الأرض، فإن حرارتها تنخفض بسرعة والضغط يقترب من الضغط العادي، كما تنفصل هنا المركبات الطيارة عن الماغما. وفي هذه الحالة تمتلك الصخور عادة بنية زجاجية، أي بمعنى آخر لا تحدث عملية تبلور كاملة. تسمى الصخور المغماتية المتشكلة بالأعماق **الصخور المندسة أو العميقة** (Intrusive Rocks)، بينما تسمى الصخور المتشكلة على السطح **الصخور النارية المخترجة أو المتدفقة** (Extrusive Rocks)، وتدعى أحياناً **الصخور البركانية** (Volcanic Rocks).

أ –تبلور الماغما Crystallization of Magma:

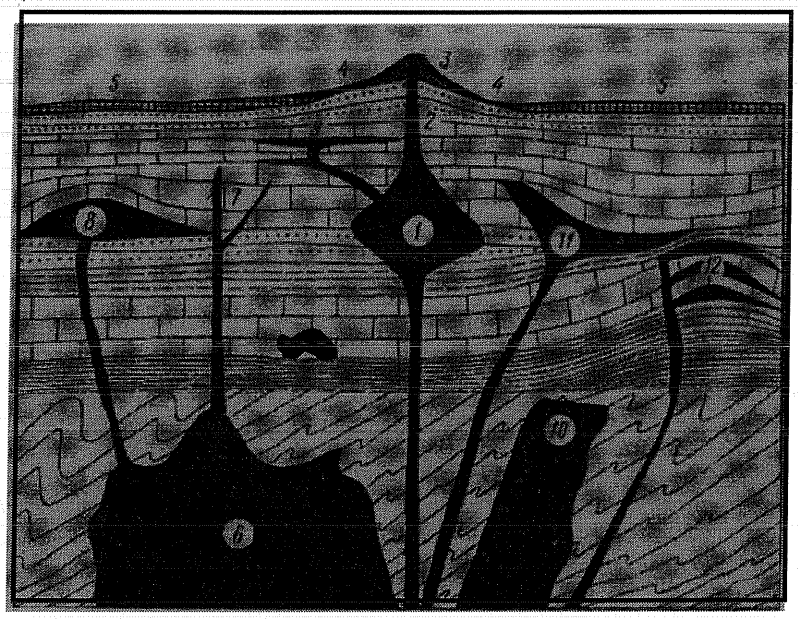
عند التبرد البطيء للماغما في الأعماق تبدأ الفلزات بالتبلور فيها. ففي البداية تتبلور الفلزات التي تكون درجة حرارة تشكلها عالية، وبلورات هذه الفلزات تنمو بحرية في الماغما السائلة؛ ولهذا تتمتع بأشكال بلورية واضحة (بلورات مثالية)، ثم تبدأ بعد ذلك الماغما المتبقية بالتبلور، وهذه تشكل المراحل الأساسية للتبلور، وتنشأ منها مباشرةً (تتشكل) مجموعة من مراكز التبلور التي تنمو حولها البلورات، مالئة الفراغ الحر، ومشكلة الصخور الحبيبية، وهنا تتمتع الفلزات بملامح بلورية واضحة.

وعند تدفق اللابا على سطح الأرض، ومن جرّاء الانخفاض السريع لدرجة حرارتها وضغطها، لا تتمكن من التبلور، وغالباً ما تشكل كتلاً خفية التبلور، أو كتلاً زجاجية. وعموماً توجد أنواع كثيرة للصخور الماغماتية تفسر بعمليات **تفاضل الماغما** وهضم الصخور المحيطة، كما تتعلق بالظروف الجيولوجية التي حدث عندها تشكل الصخور المغماتية.

فتفاضل الماغما يقصد به مجموع العمليات الفيزيا–كيميائية المختلفة التي تؤدي إلى نشوء الماغما الثانوية من المادة المغماتية الأم، والتي تعطي صخوراً مغماتية مختلفة بتركيبها الكيميائي والفلزي.

ب – أشكال توضع الصخور المغماتية:

❖ **الصخور المندسة (Instructive Rocks)**: تكوّن الصخور المغماتية الجزء الأعظم من حجم القشرة الأرضية، فهي التي شكلت أول قشرة للأرض، ومنها نتجت الصخور الرسوبية والمتحولة. ويتعلق شكل توضع هذه الصخور بكمية المادة المندسة وبالخصائص الجيولوجية للمنطقة.



شكل (2): أشكال توضع الأجسام المغماتية

1- البؤرة المغماتية، 2- قناة البركان، 3- مخروط البركان، 4- الدفقة (السيل) البازلتية، 5- الصبة البازلتية، 6- باتوليت، 7- الجدر القاطعة، 8- اللاكوليت، 9- الدسيسات البينية، 10- الستوكات، 11- لوبوليت، 12- فاكوليت.

وتُميز عدة أنواع من الأجسام المغماتية المندسة حسب أشكالها، ومكان تصلبها، وتوافقها مع الصخور المحيطة، أو تقاطعها معها، شكل (2). وهي تُصنف في مجموعتين رئيسيتين:

المجموعة الأولى – الأجسام المندسة المتوضعة بعدم توافق (Discordant) مع الصخور المحيطة، وأهمها:

1- الباتوليتات Batholiths: وهي أكثر الأجسام المندسة ضخامة، وتحتل مساحة تبلغ عشرات الكيلومترات المربعة وحتى المئات ، ولها أشكال غير منتظمة. تتوضع هذه الأجسام في أعماق القشرة الأرضية، وهي تتألف من صخور غرانيتية التركيب. إن الأجزاء السفلى لهذه الأجسام لا تملك حدوداً واضحةً، وغالباً ما تكون متصلة بالبؤر المغماتية، وتبلغ أطوالها 500 كم، شكل (2).

وقد أظهرت الدراسات الجيوفيزيائية في السنوات الأخيرة، أن سماكة الكثير من الباتوليتات لا تزيد عن 3-4 كم، وهي تصادف في مناطق السلاسل الجبلية العظمى ، ونظراً للتوضع العميق للباتوليتات، فإنها تتبرد ببطء شديد، مما يساعد على تشكل بلورات خشنة مميزة لصخور الأعماق. وتُعدّ أجسام الباتوليت المندسة بمنزلة الأساس الصخري للكتل القارية.

2- الستوكات (أو الخزانات المهلية) Stocks: وهي أجسام مندسة غير منتظمة تكون أشكالها – في الغالب – أسطوانية، مساحة مقطعها لا تزيد عن 100 كم^2. فإذا زادت عن ذلك عُدّت أجساماً باتوليتية. تتوضع الستوكات في

مناطق تقاطع مختلف التشوهات التكتونية، وهي تتألف من صخور مختلفة التركيب من الحامضية حتى فوق الأساسية. وتُعدّ الستوكات في أغلب الحالات فروعاً للباتوليتات الضخمة، وتسمى ستوكات باتوليتية، شكل (2)، وهي تتبرد ببطء، وتنشأ عنها فلزات خشنة، ولكنها أقل جودة من بلورات الباتوليت.

3- القواطع النارية أو الدايكات Dikes: وهي عروق مندسة تقطع الطبقات بشكل شاقولي أو مائل، شكل (2). والعرق يتشكل نتيجة توغل الماغما في الشقوق، وهو يتألف – عادة – من نوع واحد من الفلزات (كالكوارتز). وكقاعدة عامة، يمكن أن تكون ممتدة طولياً بشكل كبير (على مسافات عدة كيلومترات). تبقى الإشارة إلى أن حركة توغل الماغما ضمن الشقوق تؤدي إلى مباعدة الشق الصخري، وبعد أن تتبرد فيه يتشكل القاطع الصخري.

المجموعة الثانية – الدسيسات: الأجسام المندسة المتوضعة بتوافق (Concordant) مع الصخور المحيطة: ضمن هذه المجموعة تميز اللاكوليتات، واللوبوليتات، والفاكوليتات، والدسيسات البينية.

– **اللاكوليتات Laccoliths**: وهي أجسام مندسة تتصف بسطح علوي محدب وسفلي مستوٍ تتصل به قنوات تغذية. يكون شكل اللاكوليتات بالمستوي دائرياً، وأقطارها تتأرجح بين عدة مئات الأمتار، وبضعة كيلومترات. وتتشكل اللاكوليتات نتيجة توغل الماغما الحامضية اللزجة ضمن طبقات القشرة الأرضية، وبسبب لزوجتها العالية لا تستطيع أن تنتقل إلى مسافات بعيدة، وتتجمع في مكان واحد. وتدفع اللاكوليتات الطبقات الرسوبية التي تعلوها نحو الأعلى، وتجبرها على التحدب، شكل (2).

– **اللوبوليتات Lopoliths**: وهي أجسام مندسة تتوضع في الطبقات الصخرية في الطيات المقعرة متخذةً شكل الصحن. تتألف اللوبوليتات – في الغالب – من صخور أساسية، وهي تتمتع أحياناً بحجوم ضخمة مثل لوبوليت بوش فيلد في جنوب أفريقيا الذي يزيد طوله عن 300 كم.

– **الفاكوليتات Phacoliths**: تتميز هذه الأجسام المندسة بأنها ذات مقاييس صغيرة نسبياً، ولها أشكال عدسية، وهي تتوضع في مفاصل الطيات المحدبة أو المقعرة.

– **الدسيسات البينية (أو السدود الأفقية) Sills**: تتشكل هذه الدسيسات نتيجة توضع المهل على شكل أشرطة بين الطبقات الرسوبية، أو بشكل موازٍ لها، وتضغط هذه الأجسام على الطبقات من فوقها، فترفعها إلى الأعلى بمقدار يماثل سمكها، وكمثال على هذه السدود نذكر سد هوين (Whin) في وسط إنكلترا، وتبلغ مساحته حوالي 4800 كم^2.

❖ **الصخور المخترقة (Extrusive Rocks)**: يتعلق شكل توضع الصخور الاندفاعية (المخترقة) بنمط سيلان الماغما ولزوجتها. فاللافا السائلة التي تخرج من فوهة البركان تسيل على جوانب المخروط البركاني، وتنحدر نحو الأسفل لتملأ الأجزاء المنخفضة من السطح مشكلةً أغطية.

ج – بنية الصخور النارية Structure of Igneous Rocks:

تتحدد بنية الصخور النارية بدرجة التبلور والمقاييس النسبية للحبات الفلزية وأشكالها. فبحسب درجة التبلور تُصنف بنيات الصخور النارية وفقاً لما يلي،شكل (3) :

1- بنية ظاهرة التبلور (تامة التبلور): وهي التي تُرى بالعين المجردة. وتسمى الصخور التي تتمتع بهذه البنيات الصخور الواضحة التبلور، وعموماً توجد هذه البنية في الأعماق عندما يتبرد المهل ببطء.

2- بنية غير تامة التبلور: وهي تُميز الصخور التي تبلورت في ظروف تحت سطحية أو قريبة من السطح.

3- بنية خفيفة التبلور: وهي التي لا تُرى بلوراتها إلاّ بالمجهر، وتُميز الصخور التي تبردت (تبلورت) على السطح.

4- بنية زجاجية / غير متبلورة، وتتألف الصخور ذات البنية تامة التبلور، الحبيبية بكاملها، من الحبات الفلزية، وهي تقسم تبعاً للمقاييس النسبية لحباتها إلى:

– **صخور ذات بنية حبيبية تامة متجانسة**: (تملك جميع الحبات الفلزية حجوماً متساويةً)، شكل (3).

– **صخور ذات بنية حبيبية تامة غير متجانسة**: (الحبات تملك مقاييس مختلفة)، **كالبنية البورفيرية** التي تتميز بوجود بلورات كبيرة محددة المعالم، بشكل واضح، ضمن الكتلة الأساسية للبلورات الدقيقة. ويُفسر تشكل مثل هذه البنية بتبرد المهل على مرحلتين: مرحلة أولى تم التبرد فيها ببطء، وتشكلت بلورات كبيرة (في الأعماق)، ومرحلة ثانية تحت ظروف سطحية (تبرد سريع)، تشكلت فيها البلورات الصغيرة.

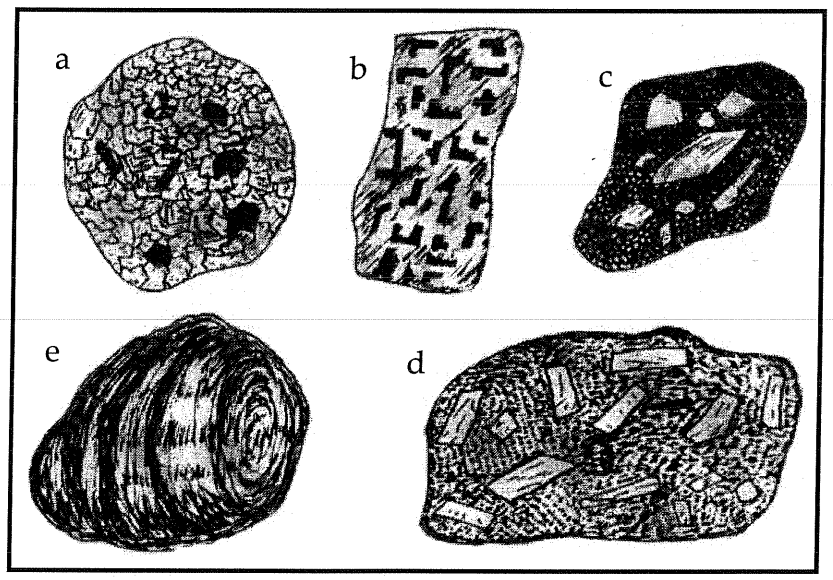
وهناك نوع خاص من البنيات يسمى **البنية البغماتية** نسبة إلى صخر البغماتيت الذي هو عبارة عن صخر سيليكاتي يحتوي على بلورات كاملة الوجوه، وبحجم كبير يتأرجح طولها بين بضعة سنتيمترات حتى ديسمترات، وأحياناً أكثر من متر واحد. وهي تُميز صخور العروق.

كما تُصنف البنيات وفقاً للمقاييس المطلقة للحبات في الأنواع التالية:

1- صخور خشنة الحبات: مقياس الحبات أكبر من 5 مم.

2– صخور متوسطة الحبات: مقياس الحبات أكبر من 5 - 1 مم.

3 صخور ناعمة الحبات: مقياس الحبات ~~أكبر~~ من 1 - 0.5 مم.



شكل (3): بعض أنماط البنيات في الصخور المغماتية

a- بنية حبيبية متجانسة، b- بنية بغماتية،

c, d- بنية بورفيرية، e- بنية زجاجية.

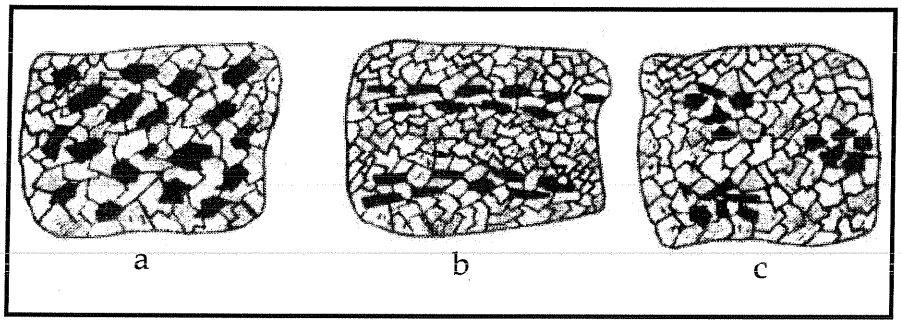
4- صخور ذات حبات ناعمة جداً: لا ترى إلاّ تحت المجهر (بنية مجهرية).

تملك دراسة بنيات الصخور أهمية كبيرة في معرفة منشأ الصخور وهي تقدم معلومات هامة في دراسة هذه الصخور وتصنيفها.

د – نسيج الصخور النارية Texture of Igneous Rocks:

ويُقصد به توزع المكونات الفلزية (الحبات أو البلورات) في الفراغ وطريقة تجميعها لتشكل الصخر، وهذا يعتمد على ظروف التبلور وعلى تأثير العوامل الخارجية، كدرجة الحرارة والضغط. تشمل بنية الصخر، كما ذكرنا أعلاه، بناء الصخر، فهي تعتمد على درجة التبلور، وعلى مقياس البلورات وأشكالها، كما أنها تُشير إلى خواص الصخر الفيزيائية والميكانيكية، ومن ثم يصعب كثيراً التمييز بين خواص البنية وخواص النسيج، وبشكل عام يمكن تمييز الأنواع التالية من النسيج، شكل (4) ..

1- النسيج الكتلي: وهو يُميز الصخور العميقة والمندسة، حيث تتوزع الحبات بشكل متساوٍ وكيفي في كتلة الصخر، التي تبردت في الأعماق بشكل بطيء في شروط ترموديناميةٍ ثابتة، شكل (4).

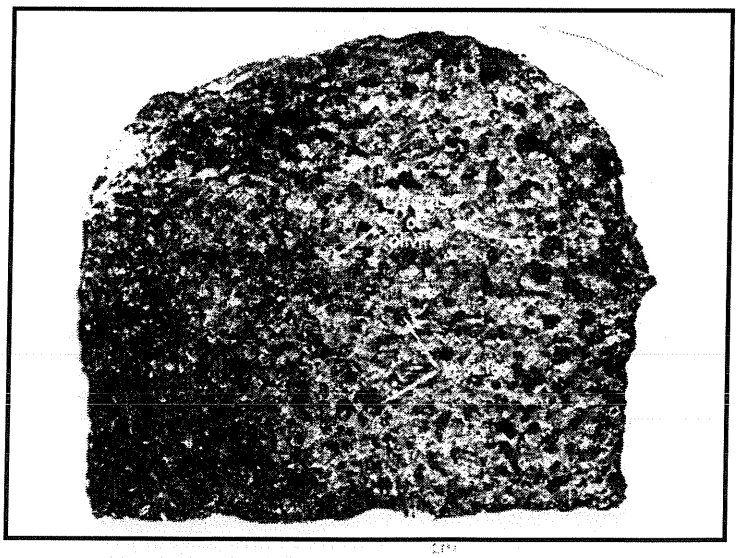


شكل (10-11): بعض أنماط النسيج في الصخور النارية

a- كتلي، b- شريطي، c- نسيج غير منتظم.

2- النسيج التدفقي (السيلاني): تظهر هذه الصخور التي تتمتع بهذا النسيج ملامح تدفق الصهارة المغماتية وحركتها قبل أن تتصلب، وذلك من خلال وجود بلورات فلزية إبرية، تكون متجهة بانتظام حسب اتجاه حركة المهل، شكل (4-b). وهذا النسيج يُميز عادة الصخور النارية المخترجة.

3- النسيج المسامي (الفراغي): وهو يُميز بعض أنواع الصخور النارية البركانية، شكل (5). ويعود تشكل هذه الفراغات إلى خروج الغازات من الصهارة في أثناء تبردها السريع وانخفاض الضغط المفاجئ، ولهذه الفراغات أشكال مختلفة،



شكل (5): النسيج الفراغي في البازلت

فقد تكون عديمة الشكل، أو كروية، أو مسطحة. وإذا احتلت هذه الفراغات نسبة كبيرة من الحجم الكلي للصخر اصطلح على تسمية النسيج **النسيج الرغوي**، ويسمى الصخر عندها الخفّان.

4- النسيج اللوزي: وهو نوع خاص من النسيج الفراغي (الفقاعي) امتلأت فيه الفراغات الناتجة من انطلاق الغازات بالمحاليل المائية السطحية، التي ترسبت فيها بعض الفلزات الثانوية التشكل، كالكالسيت والزيوليت (سيليكات الصوديوم والبوتاسيوم أو الكالسيوم المائية).

وهناك أنواع أخرى من النسيج كالنسيج الملطخ، وغير المنتظم، وغير ذلك.

كما تكتسب الصخور النارية نسيجاً خاصاً عند اقتطاعها وفق تشققات محددة تتشكل عند تبرد الصخور المغماتية. ففي الصخور المندسة تأخذ الاقتطاعات أشكالاً كتلية، أو طبقية، أو غيرها. ومن ثم يجري التقلص وفق اتجاهات أفقية، ولهذا تتطور في الصخور التشققات الأفقية عادة. بينما تأخذ الاقتطاعات في الصخور المخترجة الأشكال الكروية، أو القشرية، أو العمدانية. ولهذه الأخيرة صفة هامة، وهي أنها تميز الصخور البازلتية.

هـ – التركيب الكيميائي للصخور المغماتية: Chemical Composition of Magmatic Rocks

إن التركيب الكيميائي للصخور المغماتية متنوع بدرجة كبيرة؛ فهذه الصخور تتضمن كل العناصر الكيميائية تقريباً، إلاّ أن العناصر الكيميائية الأساسية التالية هي التي تتألف منها الصخور المغماتية:

O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Ti, H

ويُعبر عن التركيب الكيميائي للصخور النارية بالنسبة المئوية لمحتوى أكاسيد العناصر الكيميائية الداخلة في تركيب هذه الصخور،

. إلاّ أن التركيب الكيميائي الوسطي للصخور المغماتية لا يتوافق مع تركيب الماغما، التي نشأت عنها هذه الصخور، وهذا يُفسر بأن الكثير من مكونات الماغما مثل CO_2, H_2O, HF, HCl، وغيرها تخرج من الماغما عند تدفقها إلى السطح ولا تدخل في فلزات الصخور. وتبين هذه التحاليل وجود ثلاثة أنواع من الماغما، هي:

أولاً– الماغما الريوليتية Rhyolitic Magma: وتحتوي على 70% من السيليكا، وتشكل مجموعة الغرانيت – الريوليت (الغرلنيت كصخر مندس والريوليت كصخر مخترج).

ثانياً– الماغما الأنديزية Andesitic Magma: وتحتوي على 60% من السيليكا، وتشكل مجموعة الديوريت كصخر أعماق، والأنديزيت كصخر مخترج).

ثالثاً– الماغما البازلتية Basaltic Magma: وتحتوي على 50% من السيليكا، وتشكل مجموعة غابرو – بازلت.

و – التركيب الفلزي للصخور المغماتية:ineral Coposition of Magmatic Rocks

يتعلق التركيب الفلزي للصخور المغماتية بالشروط الفيزيا–كيميائية التي تبلورت عندها هذه الصخور، وكذلك بالتركيب الكيميائي للمهل، الذي تبلور منه الصخر المدروس. إن أكثر الفلزات انتشاراً هي التالية:

الصفاح البوتاسي، والبلاجيوكلاز، والكوارتز، والأمفيبول، والبيروكسين، والميكا، والأوليفين، وبدرجة أقل تأتي فلزات النيفلين، والمغناتيت، والأباتيت، وغيرها.

يُميز ضمن الفلزات المكونة للصخور النارية: فلزات رئيسة تشكل الكتلة الرئيسة لهذه الصخور، وفلزات ثانوية، توجد بنسب أقل.

ويُنسب إلى الفلزات الرئيسة الكوارتز، والصفاح البوتاسي، والبلاجيوكلاز، والبيروكسين، والأمفيبول، والميكا، والأوليفين، وغيرها. أما الفلزات الثانوية التي تشارك في تركيب الصخور النارية فيُنسب إليها الأباتيت، والمغناتيت، والإيلمنيت، الكلوريت، والكاولينيت، والسربنتين، والأيبدوت، وغيرها.

كما تقسم الفلزات الرئيسة المكونة للصخور إلى مجموعتين أساسيتين:

1- مجموعة السيّال Sial Minerals:

وتحتوي على نسبة كبيرة من SiO_2 و Al_2O_3، وهي تتميز بألوانها الفاتحة مثل فلزات الصفاح والكوارتز.

2- مجموعة الفلزات القاتمة Femic Minerals:

التي تحتوي على Fe و Mg، وتضم فلزات الأوليفين، والبيروكسين، والأمفيبول، والبيوتيت. ويتحدد لون الصخر الناري، وكثافته بالعلاقة بين مجموعة فلزات السيال، ومجموعة الفلزات القاتمة التي يحتويها. وعموماً، تتميز الصخور النارية الحامضية والمعتدلة بألوانها الفاتحة بعكس الصخور الأساسية وفوق الأساسية، التي تتميز بألوانها الغامقة. وكذلك تزداد الكثافة من الصخور الحامضية (2.7-2.5) غ/سم^3 إلى الصخور فوق الأساسية (3.2 - 3.3) غ/سم^3.

تجدر الإشارة إلى أن لون الصخور النارية يمكن أن يتغير بعد تشكلها تحت تأثير عمليات التجوية، وغيرها.

ز – تصنيف الصخور النارية Classification of Igneous Rocks:

تُصنَّف الصخور النارية وفق عدة قرائن يمكن اعتمادها لتحديد مجموعات صخرية تشترك بعضها مع بعض بالخواص أو التركيب، ومن أهم هذه القرائن:

1- موقع تصلب الصهارة المغماتية (من الناحية المنشئية)، وهنا نميز ثلاث مجموعات رئيسة هي:

- ❖ صخور مندسة عميقة.
- ❖ صخور مخترجة (سطحية).
- ❖ صخور العروق في الشقوق.

2- حسب نسبة السيليكا (SiO_2)، وتميز المجموعات التالية، جدول (3-10):

الجدول (1): تصنيف الصخور حسب نسبة السيليكا SiO_2

اسم المجموعة	نسبة الـ SiO_2
صخور فوق أساسية	أقل من 45 %
صخور أساسية	% (52 – 45)
صخور معتدلة	% (65 – 52)
صخور حامضية	% 65 <

كما نميز هنا مجموعة مستقلة من الصخور، هي الصخور القلوية التي تتصف بمحتوى ملحوظ من القلوية حتى 20%، وبكمية قليلة من SiO_2 مقارنة بالصخور الحامضية (40-55%)؛ أي تتصف بزيادة محتوى المركبين K_2O و Na_2O بالنسبة للمركب Al_2O_3، كذلك توصف الصخور النارية حسب الخواص البنيوية والنسيجية، وحسب الزمن والعمر الجيولوجي، ونقدم لمحة موجزة عن أهم مجموعات الصخور النارية مصنفة حسب نسبة

أولاً– الصخور النارية فوق الأساسية: يشتمل تركيب صخور هذه المجموعة على نسبة أقل من 45% من (SiO_2)، وهي تتألف بشكل رئيس من فلزات الأوليفين والبروكسين إضافة إلى سيليكات أخرى غنية بالحديد والمغنيزيوم. ولا نجد فيها المرو أو الصفاح أو الميكا البيضاء. صخور هذه المجموعة ثقيلة وكثافتها 3-3.5، وهي صخور أعماق على الأغلب، أما الصخور السطحية وصخور العروق منها فهي نادرة، ومن أهم صخور هذه المجموعة البيروكسينيت، والبريدوتيت، والدونيت، والكمبرليت.

ثانياً– الصخور الأساسية: وتتأرجح نسبة الـ (SiO_2) فيها من 45% و 52%، وأهم الفلزات المميزة (الرئيسة) لهذه المجموعة البلاجيوكلاز الأساسي (من اللابرادور حتى الأنورتيت بنسبة تتأرجح بين 50% و 70%، وكذلك البيروكسين (الأوجيت وغيره بين 25% و 52%)، وأيضاً الأوليفين بنسبة من 10)% (0 -، وكذلك الهورنبلاند والبيوتيت. إن هذا التركيب الفلزي يحدد لون صخور هذه المجموعة الذي يكون أخضر غامقاً أو أسود. تتأرجح كثافة صخور هذه المجموعة بين 25 و 3.27. كما تتضمن هذه المجموعة بعض الفلزات الثانوية، وأهمها الكوارتز، والأورتوكلاز، والكروميت، والأباتيت، والمغناتيت، والايلمنيت، والبنتلانديت، وغيرها. ومن أهم الصخور التي تنتسب إلى مجموعة الصخور الأساسية نذكر الغابرو، والبازلت، والدياباز، والسبيليت، والأنورتوزيت.

ثالثاً– الصخور النارية المتوسطة (المعتدلة): تحتوي هذه المجموعة على نسبة (52-65)% من السيليس، ونسبة قليلة من الفلزات الملونة (حوالي 25%)، كثافتها حوالي 2.7-2.8، وهي تقسم إلى مجموعتين:

المجموعة الأولى: صخور معتدلة مع بلاجيوكلاز (ديوريت – أنديزيت). الفلزات الرئيسة المشكلة لصخور هذه المجموعة هي البلاجيوكلاز المتوسط والهورنبلاند، ونادراً البيوتيت، والبيروكسين، والكوراتز.

المجموعة الثانية: صخور معتدلة مع صفاح قلوي (سيانيت – تراخيت). تتمتع بعض أنواع صخور هذه المجموعة بوجود الأورتوكلاز والميكروكلين في الصخور المندسة، والسيانيدين والأورتوكلاز في الصخور المخترجة.

ومن أهم الصخور التي تنتسب الى مجموعة الصخور المعتدلة نذكر :الديوريت ، الأنديزيت ، السيانيت ، التراخيت .

رابعاً– الصخور الحامضية:

تتصف هذه الصخور باحتوائها على نسبة عالية من أكسيد السيليسيوم (أكثر من 65%)، وبكمية قليلة من الفلزات الملونة (3-15)%، كما تتميز هذه الصخور بألوانها الكاشفة وكثافتها القليلة نسبياً 2.7. ومن أهم الفلزات المشكلة لهذه المجموعة: الكوارتز بنسبة (25-35)%، والصفاح البوتاسي (35-40)%، والبلاجيوكلاز الحامضي (15-25)%، والبيوتيت (5-15)%، وبسبة أقل المسكوفيت 3%، ونادراً الهورنبلاند. ومن الفلزات الثانوية التي تدخل في تركيب صخور هذه المجموعة نذكر الأباتيت، والزيركون، والكلوريت، والكاولينيت، والتورمالين، وغيرها. وأهم صخور هذه المجموعة :الغرانيت، والبغماتيت، والريوليت، والأوبسيديان.

أخيراً، تجدر الإشارة إلى أن الصخور المتشكلة – رغم وجود ثلاثة أنواع للماغما – ليست متعادلة الانتشار في القشرة الأرضية. فالريوليت (المخترج) نادر الوجود نسبياً، بينما يكون معادله العميق (الغرانيت) واسع الانتشار. كذلك البازلت الذي يُعدّ الصخر الأساسي المكون لقشرة المحيطات واسع الانتشار، لكن مقابله العميق (الغابرو) محدود الوجود.

ثانيا – الصخور الرسوبيةSedimentary Rocks

أ – مقدمة Introduction:

تغطي الصخور الرسوبية أكثر من 75% من مساحة اليابسة، إلاّ أنها لا تؤلف – حجمياً – أكثر من 5% من حجم صخور القشرة الأرضية. وتختلف الصخور الرسوبية عن الصخور الاندفاعية، بأنها صخور تشكلت على سطح القشرة الأرضية، سواء في القارة، أو في أحواض الترسيب، نتيجة لعمليات تخريب الصخور الموجودة سابقاً وتحطيمها (المغماتية، والمتحولة، والرسوبية)، ومن ثم نقل نواتج هذا التحطيم وترسيبه. ومن ثم فإن منشأ الصخور الرسوبية يتعلق بالعمليات الخارجية، التي تحدث على سطح الأرض، وفي الهيدروسفير .

تتمتع دراسة الصخور الرسوبية بأهمية استثنائية، كونها تشكل مجالاً واسعاً لكثير من العلوم الجيولوجية الأخرى، مثل (علم الترسيب والبيئات الترسبية، وعلم الطبقية، وعلم المستحاثات)، وكذلك لاحتوائها على الكثير من الخامات والثروات الاقتصادية الهامة، كالبترول، والغاز، والفوسفات، والحديد، عدا عن أن بعضها يشكل في حد ذاته خامات هامة، كالرمال، والغضاريات، والأملاح، وغيرها.

ب – منشأ الصخور الرسوبية Origin of Sedimentary Rocks:

مما ذكرنا أعلاه، يتضح أن الصخور الرسوبية ليست أولية المنشأ، ومن ثم فإن القشرة الأرضية في أثناء تشكلها لم تكن تحتوي على صخور رسوبية، وإنما نشأت هذه الصخور من الصخور المغماتية والمتحولة التي شكلت القشرة الأرضية الأولية.

تتعرض صخور المنطقة السطحية للقشرة الأرضية لعوامل مختلفة، مثل تقلبات درجة الحرارة، وتأثير المياه والرياح والغازات، ونشاط المتعضيات وغيرها من العوامل التي تؤدي إلى تخريب هذه الصخور وتحطيمها. وتشمل هذه

العملية مجمل عمليات التحطيم الميكانيكي والفساد الكيميائي للصخور، والتي اصطلح على تسميتها التجوية. تؤثر عمليات التجوية في الصخور بدرجات مختلفة تبعاً لطبقة هذه الصخور. وتتجلى عمليات التجوية بمظهرين أساسيين: تجوية فيزيائية، وتجوية كيميائية.

تتمثل التجوية الفيزيائية في عمليات التحطيم الميكانيكي للصخور، وهي تتم تحت تأثير عوامل فيزيائية مختلفة، كتعاقب الجفاف والرطوبة، وتحولات الحرارة المفاجئة، وفعل المياه والرياح والجليد، وتبلور الأملاح، والتي تؤدي جميعها إلى تحطيم الصخور، وتشكيل نواتج حطامية مفتتة.

أما التجوية الكيميائية فتتمثل بفساد الصخور، وتغيير تركيبها الكيميائي، تحت تأثير المياه والغازات الجوية والحموض العضوية، بفعل عمليات كيميائية تسمى عمليات التجوية الكيميائية؛ مثل: الأكسدة، والإماهة، والحلمهة، والتي تؤدي إلى تشكيل محاليل ونواتج جديدة ثابتة في منطقة التجوية.

ترتبط عمليات التجوية الفيزيائية والكيميائية فيما بينها، وغالباً ما تنشأ في الوقت نفسه، ولكن حسب الظروف الفيزيو-جغرافية، غالباً ما تسود التجوية الفيزيائية أو الكيميائية. تحدث التجوية على اليابسة وفي الهيدروسفير (في قيعان البحار والمحيطات)، وهنا، ومن جرّاء تأثير كل من ملوحة المياه البحرية، ودرجة الحرارة، والضغط، والنظام الغازي يحدث فساد للفلزات والصخور، وتسمى عمليات الفساد المعقدة هذه التجوية التحت مائية.

إن نواتج التجوية يمكن أن تبقى في مكانها (مكان التحطيم والفساد)، حيث تشكل نواتج التجوية الفيزيائية توضعات لحقبة ايلوفية، بينما تشكل نواتج التجوية الكيميائية توضعات متبقية. إلاّ أنه في الواقع، يبقى الجزء القليل من نواتج التجوية في مكان التحطم، إذ إن الكتلة الأساسية من هذه النواتج تنقل بالتيارات المائية، والرياح، والجليديات، والمتعضيات إلى أحواض الترسيب. وتؤدي التيارات المائية الدور الحاسم في هذا المجال، فهي تنقل بالتيارات المائية كميات ضخمة من المواد على شكل جزيئات صلبة أو بحالة منحلة. وتبعاً لذلك، فإن توضعات هذه المواد يمكن أن تكون مجتمعة على شكل جزيئات صلبة (رسوبات ميكانيكية)، أو على شكل ترسبات من المحاليل (رسوبات كيميائية وبيو-كيميائية). إن كلا النوعين السابقين للرسوبات (الميكانيكية والكيميائية والبيو-كيميائية) يترسب بترتيب معين، أي بمعنى آخر يُحدث تمايزاً رسوبياً لنواتج التجوية، حيث يميز بين تمايز ميكانيكي وتمايز كيميائي.

يتمثل التمايز الميكانيكي في فصل ترسيب جزيئات الصخور المحطمة وتتاليها، تبعاً لحجم هذه الجزيئات (الحبات)، ولشكلها، ولكثافتها. أما التمايز الكيميائي فهو تتالي ترسيب المواد الموجودة بالحالة المنحلة، وهذا يتعلق بدرجة قابلية المادة للانحلال، وبالظروف الفيزيا-كيميائية للمحاليل (كالتركيز، ودرجة الحرارة، وحموضة الوسط أو قلويته، وغير ذلك).

إن التمايز الميكانيكي والكيميائي مقترنان مع بعضهما بعضاً بشكل وثيق، غير أنه يبدأ التمايز الميكانيكي قبل الكيميائي ببعض الوقت، ثم يتواقتان معاً بعد ذلك.

إن تشكل التوضعات الرسوبية يمكن أن يكون ميكانيكياً، أو كيميائياً، أو بيو-كيميائياً، أو عضوياً، وبعد ذلك تخضع هذه التوضعات إلى جملة من التحولات الفيزيائية والكيميائية (نزع ماء، تراص، سمنتة أو لحام، تبلور متجدد، ... إلخ). تبدأ منذ اللحظة الأولى لتوضعها، وتطول البنية والنسيج والتركيب الفلزي، وتعطي هذه التوضعات صفة التصخر محولةً إياها إلى صخور رسوبية (دياجينيز)، ومن ثم يمكن أن نستنتج مما تقدم أن تشكل الصخور الرسوبية يمر بثلاث مراحل متعاقبة:

1- مرحلة تشكل المادة الأولية المفتتة، وهذه المرحلة تتحقق بفعل عمليات التجوية المختلفة.

2- مرحلة النقل والتوضع (بفعل التيارات المائية، والرياح، والجليديات، والمتعضيات، ... إلخ).

3- مرحلة اكتساب الصفة الصخرية، أو ما يسمى الدياجينيز، وتتحقق بفعل الرص، واللصاق، والتبلور المتجدد، وغيره).

جـ – تصنيف الصخور الرسوبية Classification of Sedimentary Rocks:

تقسم الصخور الرسوبية، حسب التصنيفات الحديثة، إلى أربع مجموعات منشئية، هي: **صخور حطامية، وصخور غضارية، وصخور كيميائية–عضوية، وصخور بيروكلاسيتية**. وضمن كل مجموعة يمكن – حسب التركيب الفلزي وخصائص الترسيب – تمييز عدة مجموعات صخرية:

1- الصخور الحطامية:

وهي تُمثّل نواتج التجوية الميكانيكية للصخور الأولية، وبحسب مقياس وشكل المواد الحطامية، يمكن أن نميز ضمن هذه المجموعة الأنواع التالية:

- ❖ الكتل والجلاميد: وتشمل المواد الحطامية التي تزيد مقاييسها عن 100 مم.
- ❖ المواد الحصوية والحصيائية: وهي المواد الحطامية التي تتأرجح مقاييسها بين 2 مم و 100 مم، وتشكل صخوراً حطامية خشنة (الكونفلوميرا والبريشا).
- ❖ الرمال: وتتأرجح أقطارها بين 0.1 مم و 2 مم، وتشكل صخور متماسكة تسمى الأحجار الرملية (صخور رملية).
- ❖ المواد الغرينية والرملية الناعمة جداً: تتراوح أقطارها بين 0.1 مم و 0.01 مم، وتشكل الصخور الغرينية (الأليريتية).
- ❖ المواد الغضارية الخشنة والمجهرية، وتقل أقطارها عن 0.01 مم، وتعطي الصخور البيليتية.

2- الصخور الغضارية:

تتألف الأجزاء المكونة لهذه الصخور من حبيبات غضارية ناعمة (أقطارها أقل من 0.01 مم) تترافق مع نسبة من الجزيئات الرملية والغرينية، وهي تتباين بصفات الروابط بين جزيئاتها، وبخواص اللدونة، وبالتركيب الفلزي والمنشأ. وتصنف الصخور الغضارية تبعاً للمحتوى النسبي للحبات الغضارية في الأنواع التالية:

- ❖ الغضار: نسبة الحبات الغضارية أكثر من 30%.
- ❖ الغضار الرملي: نسبة الحبات الغضارية بين 10 و 30%.
- ❖ الرمل الغضاري: نسبة الحبات الغضارية بين 2 و 10%.

3- الصخور الكيميائية – العضوية:

وتتشكل بطريقة ترسيب الأملاح المعدنية من المحاليل نتيجة نشاط المتعضيات وموتها وتراكمها. وترتبط الصخور الكيميائية والعضوية فيما بينها بتحولات متبادلة، لهذا جُمعت في مجموعة واحدة، وبحسب التركيب يميز ضمن هذه المجموعة:

- ❖ الصخور الكربوناتية (الكلسية، والدولوميتية، والمارل، والحوار).
- ❖ الصخور السيليسية (الدياتوميت والشيرت).
- ❖ الصخور الملحية والسولفاتية، والملح الصخري، والجص، والأنهيدريت).

- ❖ الصخور الحديدية (المغناتيت، والهيماتيت، والسيديريت).
- ❖ الصخور الألومينية (البوكسيت).
- ❖ الصخور الفوسفاتية (الفوسفوريت).
- ❖ صخور مواد الطاقة (الفحم الحجري، والبترول، والسجل الزيتي).

4- الصخور البيروكلاسيتية (الرسوبية البركانية):

تتألف من مواد حطامية رسوبية، ومن نواتج النشاط البركاني، وبحسب نسبة محتوى المواد الرسوبية، تنقسم هذه الصخور إلى ثلاثة أنواع؛ هي:

صخور الطف، وتكون فيها نسبة محتوى المادة الرسوبية أقل من 10%، والطفيت وتتأرجح فيها نسبة المادة الرسوبية فيها بين (10-50)%، وصخور ذات منشأ طفي تزيد فيها نسبة المادة الرسوبية عن 50%.

كذلك تقسم الصخور الرسوبية حسب مكان تشكلها (البيئات الترسبية التي تشكلت فيها) إلى ثلاث مجموعات؛ هي:

1- صخور بحرية تتشكل في بيئات (شاطئية، وقليلة العمق، وعميقة).

2- صخور لاغونية.

3- صخور قارية تتشكل في البيئات الترسبية للأحواض القارية والأحواض المائية القارية (كالبيئة النهرية، وبيئة البحيرات، والمستنقعات وغيرها).

د – التركيب الكيميائي والفلزي للصخور الرسوبية:

Chemical and Mineral Composition of Sedimentary Rocks

إن التركيب الكيميائي للصخور الرسوبية أكثر تنوعاً منه في الصخور المغماتية والمتحولة، ويمكن تفسير ذلك بتنوع نواتج التجوية والتحولات التي تطرأ على هذه النواتج في المحاليل.

ويتصف التركيب الفلزي للصخور الرسوبية بوجود الفلزات التي تُعدّ ثابتة في منطقة تراكم الرسوبات، أو تتشكل عند العمليات الجيولوجية الخارجية، وضمنها يمكن أن نلاحظ – بالدرجة الأولى – فلزات رئيسية؛ وهي:

– مجموعة الكربونات (كالسيت، ودولوميت، وسيدريت، وملاخيت، وأزوريت).

– الاتحادات الهالوجينية (سيلفين، وكارناليت، وهاليت).

– السولفات (جص، وأنهيدريت، وباريت).

– السيليكات (الكوارتز، والأوبال، والكالسيدوان، والهيدروميكا، وغيرها).

كما تشارك في تركيب الصخور الرسوبية فلزات أخرى ثانوية تتوافر بنسب أقل، أهمها: مجموعة أكاسيد وهيدرو-أكاسيد الحديد، والألمينيوم والمنغنيز (الليمونيت، والهيماتيت، والغوتيت، والمغناتيت، والبيرولوزيت، وغيرها)، ومجموعة الفوسفات (أباتيت وفوسفات الكالسيوم)، والسولفيدات (بيريت، وكالوبيريت، وغيرها)، وكذلك بعض العناصر الحرة، مثل الكبريت.

وإضافةً إلى المادة الفلزية، فإن الصخور الرسوبية غالباً ما تحتوي على هياكل المتعضيات وبقاياها بهيئة متحجرات (أو مستحثات) تؤدي دوراً هاماً في تحديد السحنة الحيوية لهذه الصخور، وتحديد وسط تشكلها وزمنه.

هـ – بنية الصخور الرسوبية Structure of Sedimentary Rocks:

تتحدد خصائص البنية في الصخور الرسوبية بظروف تشكلها، لهذا نجد أنه لكل نمط منشئي خصائصه البنيوية المميزة:

1- بنية الصخور الحطامية المنشأ:

وهي تختلف تبعاً لمقياس المواد الحطامية (الحطاميات) أو الحبات المكونة لهذه الصخور، وضمنها نميز عدة أنماط للبنيات:

بنية حطامية خشنة، وبنية رملية، وبنية غرينية (طمية)، وبنية غضارية، وبنية مختلطة، جدول (2).

الجدول (2): تصنيف الصخور الحطامية حسب أبعاد الحبات، وأنواع البنيات في هذه الصخور.

مقاييس الكسارات الحطامية* (مم)	تسمية الكسارات الحطامية	المجموعات الصخرية	البنية
1000 <	كتل صخرية Blocks	الصخور التجميعية الكونغلوميرا أو البريش	حطامية خشنة
100-1000	جلاميد Boulders		
10-100	حصى Cobbles		
2.0 – 10	حصباء Graveles		
0.1-2.0	رمال Sandes	أحجار رملية	رملية
0.01-0.1	غرين Silts	صخور غرينية (Aleurites)	بنية غرينية
0.01 >	غضار Clay	صخور غضارية (Pelites)	بنية غضارية

*- الحبات

2- بنية الصخور الكيميائية:

تتميز الصخور الكيميائية ببنية بلورية حبيبية، تُقسم حسب مقياس الحبات إلى الأنواع التالية (وذلك حسب أكثر التصانيف شيوعاً):

1- بنية متبلورة بشكل واضح (خشنة التبلور): يكون مقياس الحبات أكبر من 1 مم.

2- بنية متوسطة التبلور: يكون مقياس الحبات واقعاً ضمن المجال 1 - 0.1 مم.

3- بنية خفية التبلور: يكون مقياس الحبات واقعاً ضمن المجال 0.1 – 0.01 مم.

4- بنية بيلتية: يكون مقياس الحبات أصغر من 0.01 مم.

3- بنية الصخور العضوية:

ترتبط هذه البنية بحجم، وشكل، ودرجة حفظ الأشكال العضوية، وبالنسبة بين البقايا العضوية والمادة اللاعضوية، وبنوع هذه البقايا. وهي تقسم تبعاً لمنشأ البقايا العضوية إلى بنية عضوية حيوانية وبنية عضوية نباتية، كما أنها تقسم حسب درجة حفظ البقايا العضوية (القوقعية) إلى:

بنية قوقعية (تحتوي الصخور على قواقع عضوية غير مشوهة)، وبنية محطمة (تحتوي الصخور على قواقع مشوهة).

وإلى جانب مقياس الحبات، فإن نوعية الملاط، وآلية تشكله، والتأثير المتبادل بينه وبين الحبات الصخرية، وكذلك التأثير المتبادل لتوضع الحبيبات في بنية الصخور الرسوبية، تؤدي دوراً أساسياً في تحديد بنيات الصخور الرسوبية. فالملاط يمكن أن يكون تشكله متواقتاً مع تشكل الصخر، أو يمكن أن يتشكل في مرحلة لاحقة لتشكل الصخر. وكمثال على الحالة الأولى نذكر تركيز المواد الغضارية في الصخور الرملية، إذ تشكل المواد الغضارية، عند تراص رسوباتها، رباطاً بين الحبات الرملية. وكمثال على الحالة الثانية نذكر توضع المواد من المحاليل المتغلغلة في الفجوات والفراغات الصخرية. يصنف الملاط أيضاً بحسب تركيبه الكيميائي: سليسي، وحديدي، وكربوناتي، كما يكون أحياناً من طبيعة فوسفاتية.

كذلك فإن المسامية تتمتع بأهمية خاصة عند دراسة الصخور الرسوبية، وهي من أهم الصفات البنائية والنسيجية في الصخور التجميعية. والمسامية هي الحجم الإجمالي لكل الفراغات والشقوق الموجودة في الصخر، ويعبر عنها بعامل المسامية (K_n)، والذي يُمثّل بنسبة مئوية $(\%)$، وهو النسبة بين حجم كل المسامات الموجودة في الصخر $(\sum K_n)$ والحجم الإجمالي لهذا الصخر (V)، أي:

$$K_n = \frac{\sum V_n}{V} \times 100\% \ .$$

إن الفراغات الصخرية يمكن أن تكون قد تشكلت في نفس فترة تشكل الصخر ذاته (مسامية أولية)، أو أنها تشكلت في مراحل لاحقة لتشكل الصخر (مسامية ثانوية). وإذا كانت هذه المسامات والفراغات تسمح للسوائل والغازات بالحركة عبرها، فإنها تسمى مسامية دينامية (أو مفتوحة)، وهي دائماً أقل من المسامية العامة. ومن المهم دائماً عند دراسة الصخور الرسوبية معرفة كمية المسامات وشكلها، بوصفها تؤثر في حركة السوائل والغازات في هذه الصخور، وهذه مسألة هامة جداً في الدراسات التطبيقية.

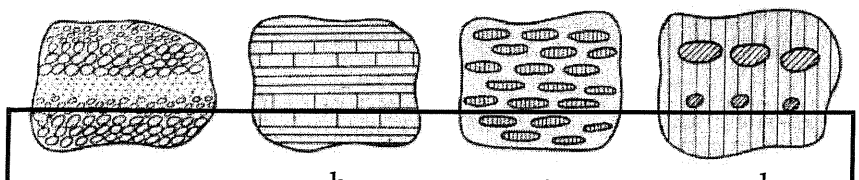
و – نسيج الصخور الرسوبية Texture of Sedimentary Rocks:

وهو من أهم الخصائص والمؤشرات المميزة للصخور الرسوبية، إذ يصف ظروف تراكم (توضع) الرسوبات وتغيرات هذه الظروف مع الزمن.

1- نسيج التطبق الداخلي:

إن أكثر أشكال النسيج انتشاراً في الصخور الرسوبية؛ هي:

أولاً– النسيج المتطبق: تكون الرسوبات – عادةً – متوضعة بشكل طبقات متتالية تختلف فيما بينها بتركيبها الحبيبي، وكذلك بتوزع الفلزات المشكلة لها، وباللون، وبمؤشرات أخرى، شكل (6)، إلاّ أنه وتبعاً لظروف حركة وسط الترسيب، يتم التمييز بين نمطين أساسيين للتطبق:



شكل (6): التطبق المتوازي (الأفقي) في الصخور الرسوبية الناجم عن:

a- تغير أحجام الحبات،

b- تناوب الطبقات مختلفة التركيب،

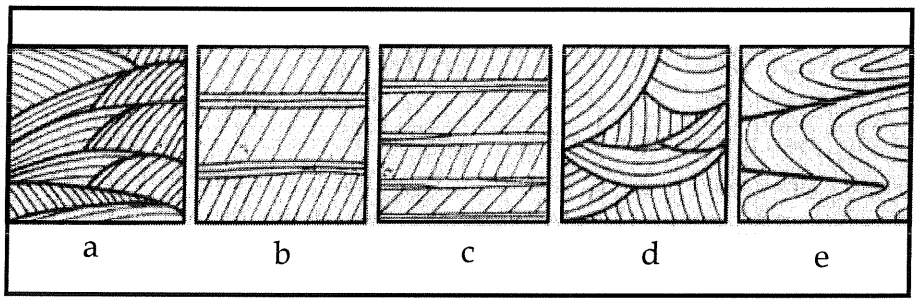
c - التوجيه الأفقي للجزيئات،

d- التوزع في مستو واحد لمادة ما

النمط الأول: يسمى التطبق المتوازي، وهو يميز الرسوبات التي تتشكل في وسط هادئ، وأتت تسميته من توازي سطوح التطبق التي تفصل

بين الطبقات المختلفة في حجم حباتها، أو تركيبها، أو لونها، أو سماكتها، وهذا يعكس تغيرات طفيفة في شروط الترسيب (وهو أكثر أنواع التطبق انتشاراً)، ومثال ذلك: تناوب توضعات رملية خشنة وغضارية ناعمة، حيث يعكس الأول ترسيباً نهرياً في الحالة العادية، بينما تُمثّل الثانية ترسب النهر في أيام الفيضانات، حيث تتوضع المواد الخشنة فوق المواد الناعمة المتوضعة سابقاً.

النمط الثاني: ويسمى التطبق المائل، وهو يميز الرسوبات التي تنشأ في وسط متحرك، حيث يعكس تتابع طبقات تميل بزاوية معينة عن سطح التطبق لمجموعة رسوبية معينة، وهو أكثر ما يظهر في الرسوبات الرملية نتيجة الترسب من التيارات المائية والريحية الناقلة لهذه الرمال. ويقسم هذا التطبق وفقاً لزاوية ميل الطبقات وانحنائها، وحجم الطبقات المؤلفة له، وشكلها، وبنية الطبقات ذاتها، وكذلك سماكة الرسوبات ومساحة انتشارها، إلى عدة أنماط تميز ظروف توضع مختلفة، شكل (7):



شكل (7): أنماط التطبق المائل

a- تطبق ريحي،

b- تطبق التيارات الموسمية،

c - تطبق المجاري النهرية،

d- تطبق الدلتات (التطبق المتقاطع)،

e - تطبق بحري.

1- التطبق الريحي.

2- تطبق الأنهار الموسمية: يتجلى هذا التطبق في تعاقب طبقات أفقية رقيقة مع طبقات مائلة أكثر سماكة.

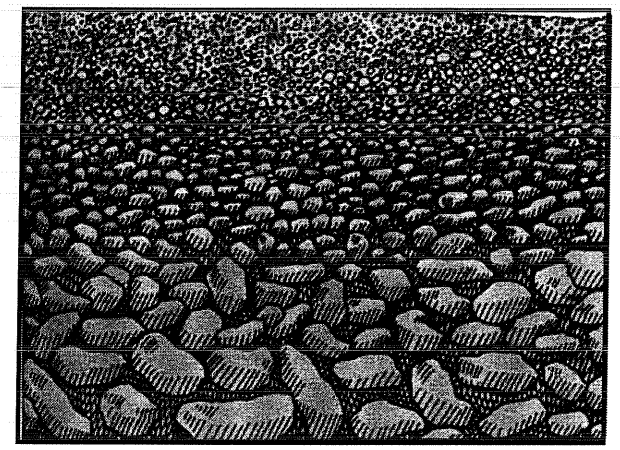
3- تطبق الأنهار الدائمة: يتشابه مع التطبق السابق، غير أنه يتميز بوجود عدسات أو جيوب طبقية.

4- تطبق الدلتات: يتميز بارتفاع نسبة التشكيلات السمكية المائلة بالنسبة للطبقات الرقيقة المتوازية.

5- التطبق البحيري: وله عدة أشكال تعكس وجود، أو غياب التيارات البحرية الدائمة، أو حركة الأمواج البحرية، أو غير ذلك من العوامل.

يوجد – إضافةً إلى النمطين السابقين الأساسيين للتطبق – نمط ثالث يسمى التطبق المتدرج، ويظهر فيه فرز للحبات ضمن الطبقة، حسب مقياس هذه الحبات من الأسفل إلى الأعلى، وهو يعكس الترسيب في وسط هادئ، تترسب فيه المواد حسب تأثير الثقالة، شكل (8).

إن أشـــكال التطبـــق المـذكورة أعـلاه يمكـن أن تتخـرب بفعـــل العمليـــات الجيولوجيـــة اللاحقة، وخاصةً التكتونية منها، ونتيجة لـذلك تكتسـب الصـخور خصائص نسيجية جديدة.



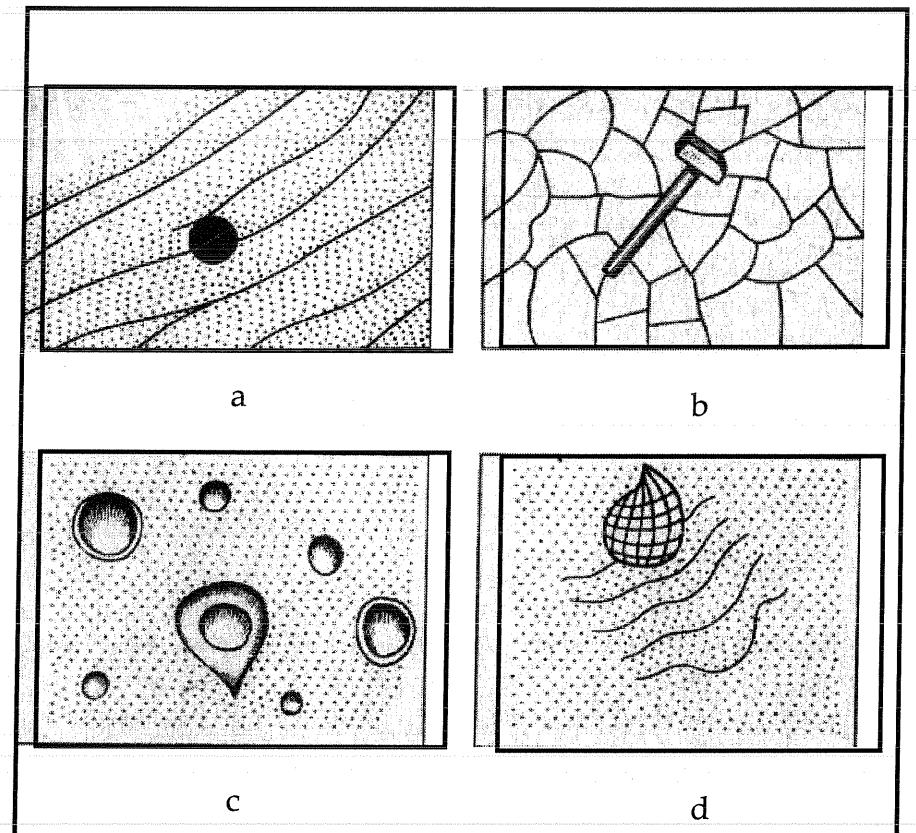
شكل (8): التطبق المتدرج

ثانياً– النسيج الكتلي: يميز هذا النســـيج الصـــخور الرســـوبية الكيميائيـة المنشـأ بالدرجـة الأولى، حيـــث تتميـــز مكونـــات هـــذه الصـــخور (حباتهـــا) بانتشـــار عشوائي، كما أن الدورية المتعاقبة في العمود الطبقي غائبة في تشكيلات هذه الصخور، ومن ثم فإن الخواص الفيزيائية لهذه الصخور تكون متساوية في الاتجاهات كافة.

ثالثاً– النسيج العشوائي: يميز هذا النوع من النسيج صخور الركام الثلجي والصخور التجميعية ذات البنيات الخشنة، وكذلك الصخور الناتجة من الانهيارات الأرضية.

وفي الصخور الرسوبية المتطبقة، غالباً ما تلاحظ اقتطاعات طبقية تتجلى في فصل الصخور إلى قطع أو ألواح منفصلة. وفي الصخور غير المتطبقة (كالأحجار الرملية على سبيل المثال) يكون شكل الاقتطاعات مشابهاً للاقتطاعات في الصخور المغماتية المندسة، إذ تكون موشورية، ومتعددة السطوح أو الوجوه، وكروية،

2- نسيج :لطبقة:عند دراسة الصخور الرسوبية تحتل دراسة خصائص نسيج سطح الطبقة أهمية كبيرة في تميز هذه الصخور وتحديدها. فهذه الخصائص تنشأ عند دراسة التأثيرات المتبادلة بين الرسوبات المتشكلة والوسط الخارجي، وتُنسب إليها ظواهر عدة، شكل (9)



شكل (9): بعض أشكال نسيج سطح الطبقة:

a – علامات التموج

b الشقوق الطينية (شقوق الجفاف)،

c - آثار حبات المطر،

d- آثار انتقال الكائنات الحية

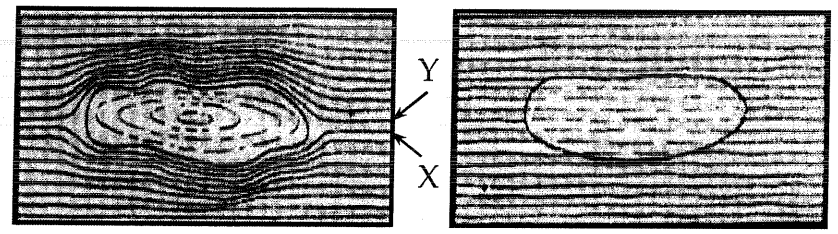
1- علامات التموج Ripple Marks:

تموجات ضعيفة تظهر بشكل شائع على سطح الرمال الشاطئية، أو الكثبان الرملية، أو قيعان المجاري المائية، وهذه العلامات تقدم معلومات عن ظروف الترسيب عند تكون الرسوبات. وهي يمكن أن تكون متناظرة كالتموجات الناتجة من حركة الأمواج، أو لامتناظرة كالتموجات الناتجة من التيارات، وهي تدل على اتجاه حركة هذه التيارات.

2التشققات Muderacks:تبدو بشكل تشققات تشبه خلايا النحل، وتظهر على سطح الصخور الغضارية نتيجة تعرضها لتناوب فترات من الرطوبة والجفاف، وإن وجود مثل هذه الشقوق محفوظة في الصخور الرسوبية لهو دليل على أن هذه الصخور تعرضت لفترات متبادلة من الرطوبة والجفاف عند تشكلها.

3- التخثرات الصخرية Concretion:

وهي أجسام صخرية كروية الشكل عادةً، وتوجد ضمن الصخور الغضارية والكلسية، بشكل أساسي، وهي تتميز بصفات خاصة تميزها عن الصخور المحيطة بها (عادة تكون أقسى من الصخور المحيطة بها)، وبنياتها متماسكة ضمن حدود كبيرة من 2 سم حتى عدة أمتار. وهي تتكون بالأساس حول نواة مركزية، تكون مستحاثة على الأغلب، أو أية نواة أخرى، ونظراً لقساوتها العالية مقارنة بالوسط المحيط بها، تبقى وحدها عندما يتآكل الصخر من حولها ويزول بعوامل التجوية. إن تشكل هذه التخثرات قد يكون متواقتاً مع الترسب، أو لاحقاً لتوضع الطبقات الصخرية، (10).



شكل (10): مقطع شاقولي يمر من جسمين تخثريين يظهر علاقتهما مع تطبق الصخور الرسوبية

a- يوضح أن الجسم التخثري تشكل بعد توضع الطبقة X، وقبل توضع الطبقة Y، b- يوضح بأن الجسم التخثري يتقاطع مع الطبقات مما يدل على أن تشكله تم بعد توضع الرسوبات المحيطة به

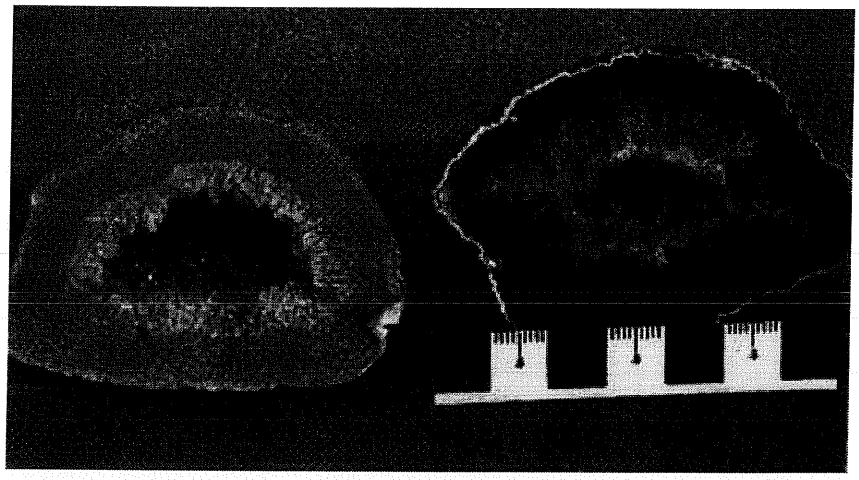
4- الجيودات Geodes:

وتسمى التخثرات المجوفة، وهي شائعة الانتشار في الصخور الرسوبية بشكل أساسي، وبدرجة أقل في الصخور الغضارية، فهي تبدو بشكل كروي مجوف من الداخل تتأرجح أبعادها بين عدة سنتيمترات وعشرات السنتمترات. وهي تتشكل نتيجة إملاء المحاليل المائية للجيوب الناتجة من انحلال البقايا العضوية المدفونة في الصخور، وهي مؤلفة – على الأغلب – من الكالسيدوان، حيث تتجه بلوراته نحو المركز المجوف، شكل (11).

5- انطباعات حبات المطر والبرد: وتتمثل بقجوات كروية صغيرة لا تتعدى أبعادها 15مم.

6- آثار انتقال الكائنات الحية:

تظهر على الصخور الغضارية المشبعة بالماء آثار زحف الكائنات الحية أو انطباعات أقدامها.



شكل (11): الجيودات

ز- لون الصخور الرسوبية Color of Sedimentary Rocks:

عند دراسة التركيب الفلزي للصخور الرسوبية رأينا أن الفلزات الأساسية المشكلة لهذه الصخور؛ هي: الكوارتز، والكربونات، والفلزات الغضارية، جدول (11-2)، وهذه الفلزات جميعها غير ملونة، أو تأخذ الألوان البيضاء، لكن في الواقع يلاحظ أن الكثير من الصخور الرسوبية تبدو بألوان مختلفة، مما يدل على وجود ملونات أو أسباب أضفت على هذه الصخور ألوانها المختلفة:

- ❖ فاللون الأسود والفضي المترافق مع ظلال خضراء يرجع إلى وجود الكربون العضوي غير المتأكسد، وهذا يدل على أن هذه الصخور تشكلت في أوساط مائية هادئة وقليلة الحركة (أوساط مرجعة)، وكأمثلة على هذه الصخور نذكر الصخور الكلسية القاتمة، والغضار، والشيست، والفحم. كما أن اللون الأسود يمكن أن يأتي في بعض الأحيان من بعض الأكاسيد المعدنية؛ مثل: أكسيد المنغنيز (المعروف باسم بالدندريت على الصخور الكلسية والمارلية)، أو من كبريت الحديد (البيريت).
- ❖ الألوان البنية والصفراء والحمراء و البرتقالية، ومشتقاتها: تعود بشكل أساسي إلى الأكاسيد الحديدية، وذلك حسب درجة إماهتها، وهي دليل على أن التشكل تم في أوساط مؤكسدة. فالهيماتيت Fe_2O_3 يعطي اللون الأحمر، والفوتيت $Fe_2O_3H_2O$ يعطي اللون البرتقالي، والليمونيت $Fe_2O_3nH_2O$ يحدث خليطاً من الألوان بين الأصفر والبرتقالي.
- ❖ اللون الأخضر: يعود إلى وجود المركبات الحديدية (كلوريت، وغلوكونيت، وشاموزيت).

وهناك بعض الصخور الرسوبية، وخصوصاً الحطامية، تكتسب ألوانها على حساب لون الأجزاء الحطامية التي تدخل في تركيبها. إن دراسة اللون إلى جانب التركيب الفلزي يساعد في تحديد منشأ الصخور الرسوبية.

ح - السحنة في الصخور الرسوبية The outcrop in Sedimentary Rocks:

لكل صخر مظهر خاص به يعطي تصوراً عن الوسط والشروط التي حصل فيها تشكل هذا الصخر، أي يتمتع بسحنة خاصة مميزة. وتعرف السحنة بأنها مجموع الصفات أو الخصائص الليتولوجية والباليونتولوجية، التي تسمح بتحديد وحدة صخرية معينة وشروط توضعها. أي بمعنى آخر، هي مجموع الخصائص الفلزية والصخرية والمستحاثية، التي تعكس البيئات التي تشكلت بها الصخور.

تتغير السحنات الصخرية وفقاً لبيئات التشكل أفقياً ورأسياً، ففي البيئات البحرية - مثلاً - تلاحظ تغيرات جانبية من الشاطئ باتجاه الأعماق، من سحنة حصوية رملية إلى سحنة رملية بيليتية، فسحنة عميقة كلسية، بشكل يعكس التدرج نحو البيئات العميقة،(.

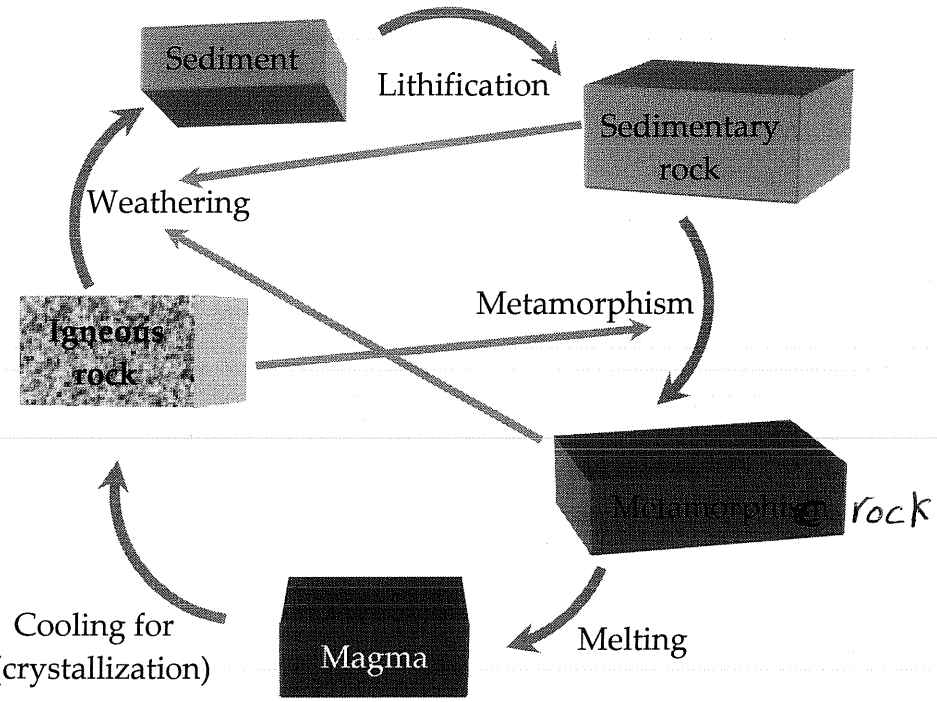
كذلك يدل وجود مستحاثات (Cerithes) من معديات الأرجل البحرية، والتي تعيش قرب الشاطئ في الصخور، على أن هذه الصخور التي توجد فيها هذه المستحاثات قد تشكلت في وسط بحري غير بعيد عن الشاطئ (وهذه تعرف بسحنة المياه الضحلة)، ومن ثم فإن دراسة السحنات تسمح بتحديد البيئات التي توضعت وتشكلت فيها الصخور الرسوبية.

5 –الصخور المتحولة Metamorphic Rocks

أ – مفهوم التحول، عوامله وأنواعه:

تنشأ الصخور المتحولة نتيجة إعادة تشكل الصخور الموجودة سابقاً (الرسوبية، والنارية، وحتى المتحولة) تحت تأثير العمليات الجيولوجية الداخلية. وتجري عملية إعادة التشكل – عادة – في الحالة الصلبة. وهي تتجلى في تغيير التركيب الفلزي، وأحياناً الكيميائي، وكذلك في تغيير بنية الصخور الأولية ونسيجها.

ويحدث التحول تحت تأثير الحرارة المرتفعة والضغوط العالية، وأيضاً بفعل الغازات والمحاليل المائية ذات الحرارة



الشكل (12): مخطط دورة الصخور في الطبيعة

المرتفعة. ويؤدي تركيب الصخور الأولية – أيضاً – دوراً كبيراً في التحول. ويوضح الشكل (12) مخطط دورة الصخور في الطبيعة، وفيه تظهر علاقة الترابط بين المجموعات الصخرية الثلاث، وإمكانية أن يتحول الصخر من نوع إلى آخر مع الزمن، كما يوضح هذا المخطط، أن الصخور النارية هي الصخور الأولى التي شكلت قشرة الأرض، ومنها تشكلت الصخور الرسوبية والمتحولة. وحسب سيطرة هذا العامل أو ذاك – في أثناء إعادة تشكل الصخور – تُميز الأنماط التالية للتحول:

1- التحول الإقليمي Regional Metamorphism:

ويحدث من جرّاء الضغوط العالية غير المتجانسة، ودرجات الحرارة المرتفعة، ويشمل مساحات شاسعة، وهذه العملية تترافق بإعادة تبلور وتشكل فلزات جديدة في ظروف السيلان اللدن للصخور. وهذا يقود إلى ظهور أكثر

الصفات تمييزاً للتشكيلات المتحولة، وهو التوجيه (التوازي بالتوضع) للحبات الفلزية، وتتشكل أكثر أنواع الصخور المتحولة بهذه الطريقة.

2- التحول الديناميكي Dynamic Metamorphism:

وينشأ تحت تأثير الضغوط في ظروف درجات الحرارة غير المرتفعة، ويتلخص في التحطم الشديد للحبات الفلزية بدون إعادة تبلورها بشكل واضح.

3- التحول التماسي Contact Metamorphism:

ويحدث تحت تأثير درجات الحرارة العالية، والأبخرة المائية المتعلقة باندساس المصهور المغماتي. ويلاحظ على طول الأجسام المغماتية إعادة تشكل للصخور وتغير في بنيتها، وتركيبها، ونسيجها. وتحدث تغيرات في التركيب الكيميائي للصخور عندما تدخل فيها، وبشكل حاد، مواد حديثة (محاليل مائية ذات درجات حرارة مرتفعة، وانبثاقات غازية تصعد من البؤر المغماتية الخامدة)، إضافةً إلى التغيرات الفلزية. ويسمى عندها هذا التحول التحول البنيوماتوليتي، والهيدروترمالي.

وعند الإدخال الشديد للمواد الجديدة، وتطور عمليات إبدال الفلزات كيميائياً بمواد فعّالة، ينشأ نوع خاص من التحول يسمى التحول الاستعاضي Metasomatic Metamorphism. فقد تتغير طبقات كلسية بكاملها إلى صخور سيليكاتية معقدة يُطلق عليها اسم تاكتيت Tactite. وحين يكون الإبدال بفلزات الحديد تسمى السكارن Skarn.

ب – التركيب الكيميائي والفلزي للصخور المتحولة:

Chemical and Mineral Composition of Metamorphic Rocks

التركيب الكيميائي في الصخور المتحولة كثير التعقيد والتنوع، وهو يتعلق بالدرجة الأولى بتركيب الصخور الأولية، التي نتجت منها هذه الصخور. فالصخور المتحولة تتألف – عادةً – من العناصر الكيميائية نفسها التي تتألف منها الصخور الرسوبية والنارية، وتدل نسبة وجود الفلزات في الصخور المتحولة على أصل هذه الصخور. فإذا كانت نسبة السيليكات فيها مرتفعة، فهذا يدل على أصلها الناري، وبالمقابل إذا كانت نسبة الكربونات هي المرتفعة، فهذا دليل على الأصل الرسوبي لهذه الصخور؛ إلاّ أن تركيب الصخور المتحولة يمكن أن يتغير بشكل كبير مقارنة بتركيب الصخور الأولية، وذلك تحت تأثير المواد التي تحملها المحاليل المائية الحارة، وعمليات الاستعاضة التي تتم في الصخور.

إن التركيب الفلزي للصخور المتحولة متنوع بشكل كبير، وهذه الصخور يمكن أن تكون مؤلفة من فلز واحد، كالكوارتزيت والرخام (المؤلفين من فلزي الكوارتز والكالسيت على التوالي)، أو من عدة فلزات سيليكاتية معقدة، كالغنايس، والايكلوجيت. وبشكل عام، فإن التركيب الفلزي للصخور المتحولة يتصف بما يلي:

1- تدخل في تركيب الصخور المتحولة الفلزات الأساسية المشكلة للصخور النارية، مثل الكوارتز، والصفاح البوتاسي (الميكروكلين)، والبلاجيوكلاز، والبيروكسين (الأوجيت)، والمسكوفيت، وغيرها. وهذا يدل على أن عمليات التحول تجري في أعماق الأرض، وتحت تأثير درجات حرارة عالية وضغوط كبيرة، بشكل مماثل – تقريباً – لعمليات تبلور الماغما، وتشكيل مجموعات الصخور النارية.

2- تشتمل الصخور المتحولة بصورة خاصة على فلز واحد من فلزات الصخور الرسوبية المميزة، وهو الكالسيت، أما فلزات الصخور الرسوبية الأخرى (باستثناء الكوارتز والصفاح)، فهي غير ثابتة، ومن ثم لا يتم الاختفاظ بها عند تعرض هذه الصخور للتحول

.3- إضافةً إلى الفلزات السابقة، يشارك في تركيب الصخور المتحولة فلزات أخرى، تُعد مميزة لهذه الصخور، مثل الغرينا، والأندالوزيت، والديستين، والسيليمانيت، والكورديريت، والسكابوليت، وبعض الفلزات التي تُعد مميزة لدرجات التحول المنخفضة، مثل الكلوريت، والطلق، والأكتينوليت، والأيبدوت.

ويشكل تجمع الفلزات التي تنشأ في ظروف ترموديناميكية محددة ما تسمى **السحنة الفلزية للصخور المتحولة (سحنة التحول)**. ويُميز عادةً بين ثلاثة أنواع رئيسة من السحنات الفلزية توافق درجات تحول منخفضة، ومتوسطة، وعليا، وهي:

1- سحنة الشيست الأخضر:

تميز الصخور ذات درجة التحول المنخفضة مثل (الفلليت، والشيست السيليسي، والكلوريت الأخضر). وهي تتصف بأنماط الفلزات التالية: الكلوريت، والأكتينوليت، والأيبدوت، والألبيت، والسيريتسيت، والكالسيت، والفلز النموذجي لهذه السحنه هو الأكتينوليت.

2- السحنة الأمفيبوليتية:

تصف هذه السحنة درجة التحول الوسطى، وإليها تُنسب صخور الأمفيبوليت، والغنايس، والشيست الغضاري الميكاوي، والرخام. وأهم فلزاتها المميزة: الغرانات، والغولاستوتيت، والديستين، والبلاجيوكلاز الحامضي، والبيوتيت، والمسكوفيت، والفلز النموذجي لها هو الهورنبلاند.

3- سحنة الغرانوليت – الأيكلوجيت:

تميز هذه السحنة الصخور ذات درجة التحول العليا، وأهم فلزاتها: الأوليفين، والبينل، والبيروكسين، والبيروب، والأماندين (من الغرانات)، والكورديريت، وغيرها.

ج – بنية الصخور المتحولة Structure of Metamorphic Rocks:

تتصف الصخور المتحولة قبل أي شيء ببنية بلورية، إلاّ أن عملية التبلور، بمنشئها، تختلف عن عملية تبلور الصخور المغماتية. فإذا كانت بلورات الفلزات تنفصل عن المصهور المغماتي بالتتالي عند تشكل الصخور النارية (وفق مراحل متتالية)، فإن نمو البلورات وتشكلها في حالة التحول يتم دفعة واحدة، أي في الوقت نفسه، ومع المحافظة على الحالة الصلبة للصخور. وللدلالة على أن عملية تبلور الفلزات تمت في الوسط الصلب اتُفق على استخدام مصطلح خاص، وهو (بلاستو) ، وتبعاً لذلك فإن أكثر البنيات المميزة للصخور المتحولة هي البنية البلاستوبلورية، كما أنها تتصف ببنية محطمة وأخرى متبقية:

❖ **البنية البلاستو بلورية:**

حسب أشكال الحبات الفلزية المسيطرة ضمن هذه البنيات تم تمييز أنواع البنيات التالية، شكل (13):

1- بنية غرانوبلاستية: حيث تكون حبات الفلزات ذات حجوم وأشكال متقاربة.

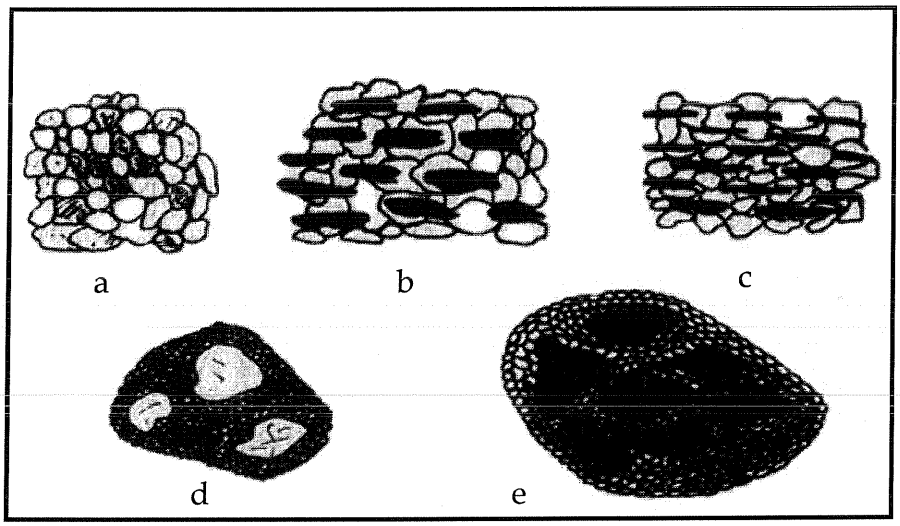
2- بنية ليبدوبلاستية: تتمتع الحبات الفلزية – هنا – بأشكال ورقية، وحرشفية، وصفائحية.

3- بنية نيماتوبلاستية: تملك الحبات الفلزية في هذه البنية أشكالاً إبرية أو موشورية.

4- بنية بورفيروبلاستية: تنشأ هذه البنية في الظروف التي تشكل فيها الفلزات – بفعل قوة تبلورها الكبيرة – أشكالاً بلورية كبيرة ضمن كتلة البلورات الصغيرة الأخرى.

❖ **البنية المتبقية:**

تتصف هذه البنية بالحفاظ على عناصر صخور المنشأ الأولية (النارية والرسوبية). ففي بنيات صخور الغنايس، على سبيل المثال، غالباً ما يُحافظ على بنية الغرانيت، وفي صخور الأحجار الرملية، والغضار الشيستي المتحولة يُحافظ على الخصائص البنائية للصخور الرسوبية. وتدل مثل هذه البنيات على أن عملية التحول كانت غير كاملة، وغالباً ما تتم تسمية هذه البنيات بإضافة مصطلح "بلاستو" إلى الاسم الأول للصخر الأولي، فنقول بنية بلاستوغرانيتية في حالة صخر الغنايس.



شكل (13): بعض أنماط البنيات الأساسية في الصخور المتحولة

a- غرانوبلاستية، b- لبيدوغرانوبلاستية، c- نيمتوغرانوبلاستية، d- بورفيروبلاستية

e- كتاكلاستية (محطمة)

❖ **البنية المحطمة:**

وهي بنية بلورية غير متجانسة تشكلت عند عمليات التحطيم التكتوني للصخور، وضمنها نميز الأنماط التالية:

1- بنية غرانوكلاستية: وتتميز بحبات متجانسة الأبعاد.

2- بنية بورفيروكلاستية: وتتميز بحبات مختلفة المقاييس والحجوم.

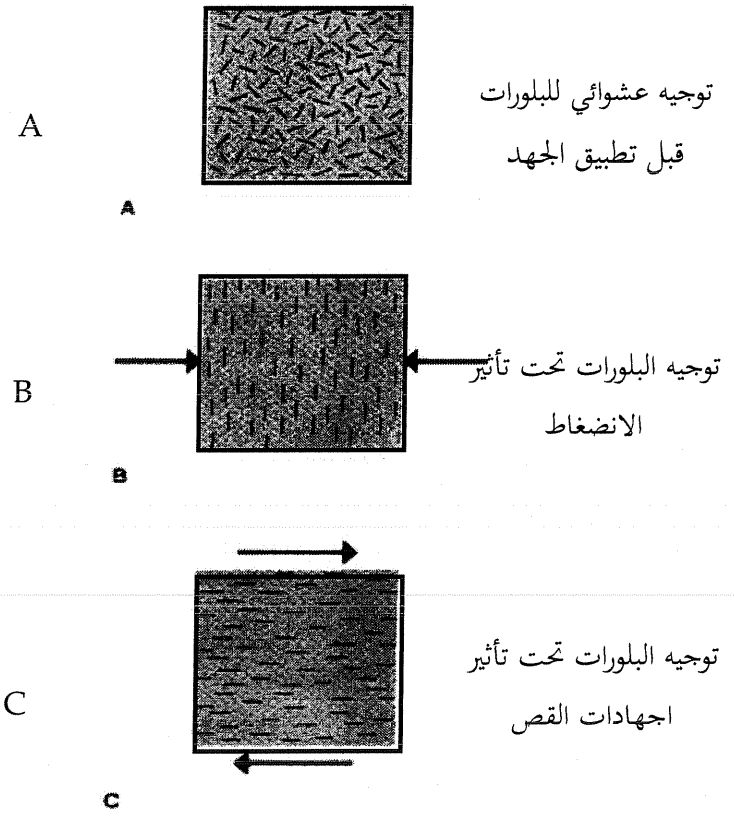
3- بنية أسمنتية: وتتشكل عندما يُحافظ في الصخر على الفلزات الأولية الكبيرة المتبقية ضمن الكتلة الناعمة التحطيم.

د – نسيج الصخور المتحولة Texture of Metamorphic Rocks:

تُقسم أنسجة الصخور المتحولة إلى أنسجة متبقية وأخرى متحولة. ويتم التحدث عن أنسجة متبقية، عندما يُحافظ في الصخور، على أنسجة الصخور الأمات، التي نشأت منها الصخور المتحولة. فالصخور الرسوبية المتحولة –

غالباً – ما تحتفظ بالتطبق، وفي الصخور النارية المتحولة – في الغالب – يُحافظ على النسيج الكتلي أو الصفائحي. أما الأنسجة المتحولة فتتصف بخاصية الأنيزتروبية التي تظهر في التوجيه شبه المتوازي للحبات الفلزية، والتي تتعلق بتأثير الضغط الموجه على الصخور، وبالسيلان، وبأنيزتروبية قوى نمو البلورات.

ففي ظروف الضغط الموجه تنشأ أوضاع ملائمة لكي تأخذ الفلزات أشكالاً ممتدةً في اتجاه واحد أو اتجاهين (موشورية، وإبرية، وصفائحية، وورقية، وحرشفية)، كما تتم إعادة توجيه هذه الفلزات في الصخور، (14). وبشكل



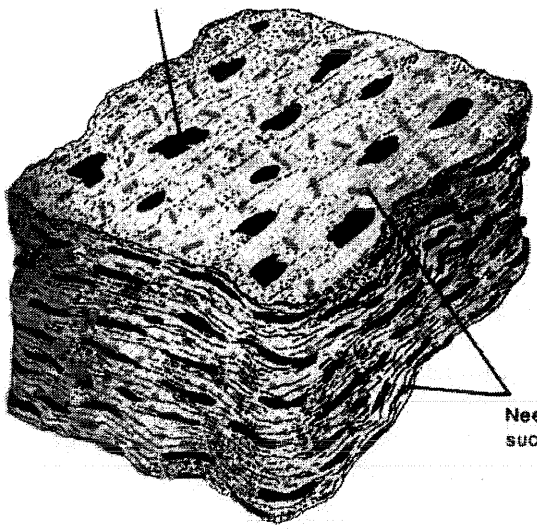
شكل 14((: توجيه الفلزات الورقية في الصخور المتحولة

Platy minerals such as mica

عام يمكن تمييز الأنماط التالية من النسج في الصخور المتحولة.

1- النسيج الشيستوي: ويتشكل عند توجيه مرتب (منتظم) للحبات الصفائحية أو الطولية، شكل (12-4).

2- النسيج الشريطي: ويتشكل عند عزل (فصل) تجمعات مؤلفة



شكل (12-4): النسيج الشيستوي

من فلز وحيد بهيئة أشرطة، شكل (15).

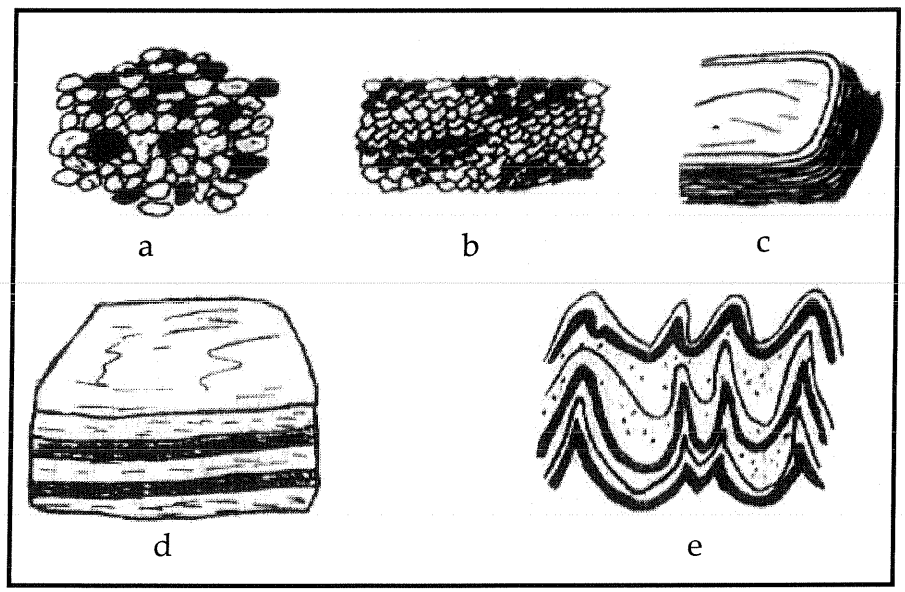
3- النسيج الخطي: ينشأ عند عزل بعض الفلزات أو تجمعاتها.

4- النسيج الغنايسي: يميز الصخور المؤلفة من حبات خشنة ومنضدة باتجاه محدد، وسبب التنضيد – هنا – هو التورق الخشن.

5- النسيج المتموج: ويُميز بوجه خاص في حالة وجود تجعدات صغيرة في الصخور.

6- النسيج الكتلي: يميز الصخور التي تتصف ببنية حبيبية متجانسة، وفي هذا النسيج تفقد الفلزات توجيهها (كما في الكوارتز والمرمر)، وتكون الروابط بين البلورات متينة. ينشأ هذا النسيج – غالباً – عن عملية إعادة تبلور متجانسة تشمل الصخر بكامله.

7- النسيج الليفي: يميز الصخور المؤلفة من فلزات إبرية، أو ليفية، مستطيلة الشكل تقريباً في اتجاه واحد، كما هو الحال في الأسبستوس والأكتينوليت.



شكل(15) : بعض أشكال النسيج في الصخور المتحولة

a- كتلي، b- غنايسي، c- شيستوي، d- خطي شريطي، e- متموج

هـ – تصنيف الصخور المتحولة Classification of Metamorphic Rocks:

تُصنف الصخور المتحولة تبعاً لعدة مؤشرات، فهي تُصنف حسب **نوع التحول** في أربع مجموعات: هيدروترمالية، وتماسية، وديناميكية، وإقليمية. وحتى فترة ليست ببعيدة كان التصنيف الأوسع انتشاراً هو التصنيف القائم على أساس تقسيم القشرة الأرضية، بحسب **شدة التحول**، إلى ثلاث مناطق:

المنطقة العليا Epi Zone:

تتصف بدرجات حرارة منخفضة نسبياً، وضغط جانبي موجه ومنخفض نسبياً، يؤدي – في أغلب الأحيان – إلى تشكيل البريشا التكتونية. وتمثل هذه المنطقة بداية التحول، إذ تحصل في الصخور الواقعة فيها إعادة تبلور وتغير في تركيبها الفلزي، ولكنها – في أغلب الأحيان – تحتفظ بشكلها الأولي؛ كتحول الرمال إلى أحجار رملية كوراتزية. وهنا يكون التحول ناتجاً من إعادة تبلور الأسمنت السيليسي، ولم يصل إلى الحبات المكونة للحجر الرملي. وأكثر الصخور تمثيلاً لهذه المنطقة صخور الشيست الكلوريتي السيليسي الأخضر.

المنطقة الثانية–المنطقة الوسطى Mese Zone:

يكون التحول فيها قريباً من التام، والحرارة في هذه المنطقة مرتفعة، والضغط جانبي مرتفع وهيدروستاتيكي. وتحدث في هذه المنطقة إعادة تبلور بالكامل، وتتخذ الصخور نسيجاً شيستوياً، كما تتشكل فلزات جديدة، فمثلاً الكالسيت يتحد بالكوارتز، ويعطي فلز الغولاستويت $(CaSiO_3)$:

$$CaCO_3 + SiO_2 \rightarrow CaSiO_3 + CO_2 .$$

وأهم الصخور المميزة لهذه المنطقة: الكوارتزيت، والغنايس، والشيست المتبلور.

المنطقة الداخلية Kata Zone:

تمتاز هذه المنطقة بالحرارة المرتفعة جداً، وكذلك بالضغط العام المرتفع، حيث ينعدم هنا الضغط الجانبي تقريباً. ويكون التحول في هذه المنطقة تاماً وشديداً، إذ يصعب معه التعرف على التركيب الأصلي للصخور الأمات التي خضعت للتحول، وأكثر الصخور تمثيلاً لهذه المنطقة الأيكلوجيت الذي يتألف من فلزات الأوليفين، والبروكسين، والغارنت.

تجدر الإشارة إلى أن هذا التقسيم المذكور أعلاه (تقسيم المناطق تبعاً للعمق)، لا يمكن عدّه دقيقاً، فهو لا يأخذ بالحسبان تأثير الكثير من العوامل الأخرى، كتركيب الصخور، وتأثير الجسم المندس، والعمليات التكتونية، ومن ثم فهو لا يدل على درجة تحول الصخور بقدر ما يدل على عمق تشكلها.

مكتبة A to Z