**جامعة البعث**

**كلية العلوم**

**قسم الجيولوجيا**

# الجيولوجيا البنيوية-2

## القسم النظري

## لطلاب السنة الثالثة-جيولوجيا

**الأستاذ الدكتور علي شحود**

**1441-1440**

**2020-2019**

## فهرس محتويات الكتاب


| |
|---|
| مقدمة.....4 |
| مدخل لعلم الجيولوجيا البنيوية-2.....6 |
| الفصل الأول: مبادئ ميكانيك الصخور.....10 |
| 1-1- الأجسام والقوى والحركات.....10 |
| 1-2- الأشكال الأساسية للسلوك الميكانيكي.....10 |
| 1-3- العوامل المؤثّرة على السلوك الميكانيكي.....13 |
| الفصل الثاني: الطيات Folds .....15 |
| 2-1- تعريف.....15 |
| 2-2- التناظر في الطيات.....15 |
| 2-3- وصف الطيات وتصنيفها ضمن مقطع ac.....15 |
| 2-4- وصف الطيات وتصنيفها حسب محور B.....37 |
| 2-5- الطيات المطوية.....42 |
| 2-6- آليات الطي.....42 |
| 2-7- أسباب نشوء الطيات.....45 |
| الفصل الثالث: الشقوق.....47 |
| 3-1- مفهوم الشقوق.....47 |
| 3-2- تصنيف الشقوق حسب منشئها.....47 |
| 3-3- الشق.....52 |
| 3-4- مجموعة الشقوق Joint Set .....55 |
| 3-5- جملة الشقوق Joint system.....55 |
| 3-6- تحديد الوضعية الفراغية للشقوق.....57 |
| 3-7- الليتولوجيا والتشق.....59 |
| 3-8- وضعيات الشقوق في البنيات الجيولوجية.....60 |
| 3-9- الأهمية الاقتصادية لدراسات الشقوق.....65 |
| الفصل الرابع: الصدوع Faults .....66 |
| 4-1- مقدمة.....66 |

4-2- المصطلحات المميزة للصدع (عناصر الصدع) .....66
4-3- جملة الاحداثيات التكتونية والعامة.....67
4-4- طبيعة الحركات عبر الصدوع.....68
4-5- الصدوع العاديةnormal faults .....69
4-6- الصدوع المقلوبة reverse faults.....71
4-7- الصدوع التراكبية thrust faults أو التراكبات thrusts.....72
4-8- صدوع الانزلاق الاتجاهي.....75
4-9- صدوع الانزلاق المنحرف.....79
4-10- مقدار الانزلاق-الرمية Slip.....79
4-11- الانزياح الظاهري apparent displacement.....82
4-12-انقلاب الصدوع.....82
4-13-السطوح الصدعية غير المستوية.....83
4-14-المجموعة الصدعية.....83
4-15- الجمل الصدعية :Fault system .....84
4-16- الغور الانهدامي Graben والنشز Horst.....85
4-17- آلية التصدع: لدينا نمطين عامين من الكسور.....86
4-18- التصدع واهليلج الانفعال.....86
4-19- تمييز الصدوع.....87
4-20- الظواهر المرافقة لسطوح الصدوع.....88

## مقدمة

يبحث هذا الكتاب في موضوعات مقرر الجيولوجيا البنيوية–2 لطلاب السنة الثالثة–الجيولوجيا التطبيقية في قسم الجيولوجيا بجامعة البعث. ويدرس حسب المنهاج المقرر بمعدل ثلاث ساعات نظرية أسبوعياً. وهو يتضمن ثمانية فصول تعالج موضوعات أساسية في علم الجيولوجيا البنيوية. حيث تطرق إلى المواضيع التالية:

– دراسة المفاهيم الأساسية لميكانيك الصخور.

– دراسة الطيات والشقوق والصدوع ببعضٍ من التفصيل وهي تمثل الجزء الأكبر من هذا الكتاب نظراً لأهمية دراسة هذه البنيات في البيئات الجيولوجية المختلفة.

– دراسة القباب الملحية.

– دراسة حالات اللاتوافق وتشوّه الأجسام الصغيرة الموجودة ضمن الصخور التي تعرضت للإجهادات.

– دراسة التورق والبنيات الخطوطية.

وتتضمن أبحاث **الجيولوجيا البنيوية** على نحو أساسي دراسة الأشكال البنيوية للقارات والبحار والمحيطات، والمعطيات الستراتيغرافية ضرورية جداً لإعداد الخرائط الجيولوجية والمقاطع، ولتوضيح أحجام الأشكال البنيوية. ومن الأمثلة الواضحة عن دور الملاحظة في دراسة الجيولوجيا البنيوية: الصخور الرسوبية، مورفولوجيا الأرض والبنيات الداخلية للصخور. إن الصخور الرسوبية تتميز بتطبقها الأفقي ومن ملاحظة عمليات التشوّه التي تصيب هذه الصخور يمكن لنا أن نحدّد نوعية التشوّهات التي حدثت أو لحقت بها، ويكون ذلك ممكناً وسهلاً كلما كان التطبق واضحاً وكانت الصخور جرداء ومعرضة لعمليات التعرية، وهنا يمكن أن نصادف الحالات التالية:

– يمكن للصخور أن تحتفظ بتطبقها المتوازي وهنا يمكن لنا أن نبين أنه منذ حصول الترسب في قاع المحيطات حتى زمن قيامنا بالملاحظة لم تحصل في المنطقة أي تشوّهات سوى ارتفاع هذه الطبقات العمودي التي تكوّن سلاسل الجبال.

– وفي مناطق أخرى نجد التطبق نفسه ولكن نتحقّق من أن الطبقات قد أصابها تكسرات أو فوالق مؤدية إلى حصول انقطاع في هذا التطبق، بحيث أنه على جانبي الانقطاع يوجد الطبقات المتجانسة على ارتفاعات مختلفة (رمية) متباينة من سنتيمترات عديدة إلى 1000م وهذه الفوالق قد تؤدي إذا لم تكن عمودية إما إلى حصول انخفاض أو ارتفاع للطبقات المتأثرة. ففي **الحالة الأولى** نقول إن الفالق عادي، وفي **الثانية** عكسي ونستنتج من ذلك أن فالقاً عادياً يؤدي إلى حصول تمدّد، أما الفالق العكسي فإنه يؤدي إلى حصول قصر في الطبقات، وهكذا فإن مجرد امتحان بسيط لرمية الفالق نستطيع أن نقرر به ماإذا كانت التشوهات التي أصابت المنطقة قد أدت إلى تمدّد أو إلى تقصير أو انضغاط.

– كما نلاحظ في مناطق أخرى عدم احتفاظ الطبقات بتطبقها الأفقي بل إنها انحنت بزوايا مختلفة (من 0–90°). وهكذا نقول إن الطبقات التوت وتشكلت طيات وهذه الطيات قد تتشكل على مقاييس متباينة من (1م إلى عشرات الكيلومترات) وبأشكال مختلفة. فهذه الطيات إما أن تكون **محدبة** أو **مقعرة** وأدى تشكلها إلى إظهار طبقات أقدم أو أحدث زمنياً، وبالطبع فإن هذه الطيات تؤدي إلى حصول انضغاط (تقصير) يمكن حسابه غالباً. وكلما كان هذا الانضغاط كبيراً كان الالتواء حاداً وشديداً. وهكذا بمجرد الملاحظة البسيطة لصخور سطح القشرة الأرضية يمكن تحديد المناطق المستقرة، والمناطق التي تعرضت لانكسارات والمناطق التي أصابها الطي. وهكذا فإن ملاحظة الأشكال المكونة لسطح الأرض ممكنة إذا كانت هناك تشوّهات حالية أو حديثة، لأن المناطق التي يصيبها مثل هذه التشوّهات تشكل نطاقات ذات تضاريس هامة. هذه التشوهات الملحوظة في الحقل قد لا تصاحب بتشوهات البنية الداخلية للصخر أو بالعكس قد تلحق بها تشوّهات داخلية. ففي **الحالة الأولى** فإن البنيات الرسوبية الأولى

والمستحاثات تبقى كما هي دون أن يمسها أي تغير وهذا يعني أنه لايمكن التمييز بين هذه الصخور والصخور التي لم تتعرض لأية تشوهات سواء أكان ذلك التواءات أم انكسارات. وفي **الحالة الثانية** فإن البنيات الأصلية تتغير والمستحاثات تفقد شكلها الأصلي حيث تتسطح أو تتطاول. وهكذا فإن التشوهات هامة نطلق عليها اسم تشوهات بلاستية. وفي حالة ثالثة قد تتعرض البنيات الداخلية إلى تشوّهات شديدة بحيث تختفي معالمها تماماً، أو تختفي مرفقة بارتفاع في درجة الحرارة مؤدية إلى إعادة تبلور الصخر وتشكل فلزات جديدة. وبالتالي تشكل صخر جديد وفي هذه الحالة نقول أن الصخر قد تحول واكتسب صفات جديدة. وهكذا فإن طبيعة التشوهات الداخلية للصخور تحدّد لنا شدة التشوّهات التي تعرضت لها فهي بسيطة في حالة غياب التشوّهات الداخلية، وفوية في حالة تشوّه البنيات الأصلية وشديد جداً في حالة إعادة التبلور.

تعتبر المهمة الأساسية لهذا الكتاب تزويد الطلاب بالمعلومات الأساسية في مجال الجيولوجيا البنيوية، التي تساعدهم على متابعة الدراسة العالية في هذا المجال أو على أعمالهم العلمية والحقلية التي يمكن أن يقوموا بها مستقبلاً. كما يفيد الجيولوجيين المهتمين بموضوعاته في أعمالهم المختلفة.

## مدخل إلى علم البنيوية-2

**1-1- تعريف بعلم الجيولوجيا البنيوية Structural geology** هي علم يهتم بتمييز البنيات الصخرية ووصفها وإيضاحها من خلال الخرائط والمقاطع والأشكال الفراغية ومخططات الأعماق والمخططات البيانية الإحصائية، كما يهتم أيضاً بدراسة تاريخ تطورها وتحديد شروط تشكلها. ويعد بعض الباحثين أن مصطلح التكتونيك Tectonkcs هو مصطلح مرادف لمصطلح الجيولوجيا البنيوية، بينما يعد آخرون أن علم التكتونيك هو الذي يدرس البنيات الرئيسة على المستوى الإقليمي وأن علم الجيوتكتونيك Geotectonic أو التكتونيك الإجمالي Global Tectonics هو الذي يدرس البنيات على مستوى الكرة الأرضية.

**فالتكتونيك** هو علم دراسة القوى والحركات والتشوهات التي تصيب القشرة الأرضية والصخور، وتؤدي إلى تشكل البنيات والتراكيب الجيولوجية، وميكانيكية هذه التشوهات، والميكروتكتونيك هو دراسة التشوّهات التي تصيب المادة بمقياس صغير مجهري عادي أو الكتروني. أما دراسة هذه التشوهات بمقياس أكبر يرى بالعين المجردة فيحدد اختصاص الماكروتكتونيك والجيوتكتونيك الذي يهتم بدراسة تشوهات القشرة الأرضية والأرض على نطاق كبير، يشمل الوحدات الجيولوجية أو الكتل

**1-2- أهمية الجيولوجيا البنيوية:** تحتل الجيولوجيا البنيوية أهمية كبيرة بين علوم الأرض، وذلك لارتباطها الوثيق بالحياة الاقتصادية وتحكمها بشروط التوضعات المكمنية المفيدة لأن التوضعات الفلزية لها ارتباط وثيق بنوعية البنيات، ولا سيما المحدبات والمقعرات والتشققات. وتلعب الجيولوجيا البنيوية دوراً هاماً في مجال جيولوجيا النفط والتنقيب عنه.

حيث تمثل دراسة الجيولوجيا البنيوية أهمية كبرى لأنها تساعد على معرفة البنيات الأرضية وأشكالها من محدبات ومقعرات وكيفية تشوهها مع الزمن، وذلك لارتباط البنيات المذكورة ارتباطاً وثيقاً بالحياة الاقتصادية ومساهمتها بشروط توضعات الخامات المفيدة ولا سيما في مجال التنقيب عن النفط، وكذلك في دراسة جيولوجية المناجم والدراسات الهيدرولوجية والهيدروجيولوجية. فالعديد من المصائد النفطية تمثل مظاهر بنيوية (مصائد صدعية، محدبات) وكذلك دراسة البنية الجيولوجية، التي ستشهد عليها المنشآت الهندسية كالجسور والسدود والأنفاق وغيرها بهدف تفادي الكوارث الناتجة عن الانهيارات في الطبقات الصخرية والانزلاقات في التربة، التي تكثر في المناطق الكارستية، والتي تحوي صخورها على فجوات وكهوف كارستية

تقسم مظاهر الجيولوجيا البنيوية بشكل عام إلى:

**المظاهر البنيوية الأولية:** هي تلك المظاهر، التي ترافق عملية تشكل الصخر نفسه، مثل سطوح التطبق والتطبق المتقاطع.

**المظاهر البنيوية الثانوية:** فهي تلك المظاهر، التي تحدث نتيجة للتطورات الجيولوجية اللاحقة تحت تأثير عوامل ميكانيكية مختلفة، مثل الحركات التكتونية الحاصلة في القشرة الأرضية، وتدعى بالتشوهات التكتونية اللاحقة، بالإضافة إلى التشوهات الناتجة عن دوران الأرض وعن تأثير الجاذبية الأرضية، كالإنهيارات، والانزلاقات الصخرية.

ويمكن حصر اهتمام الجيولوجيا البنيوية وأهدافها في ثلاثة محاور أساسية:

**المحور الأول:** دراسة بنية الأرض بالمقاييس كافة، وهذا يتطلب مسحاً بنيوياً مما يؤدي إلى كشف الارتباطات وتحديد مناطق احتمال تواجد مكامن مفيدة، وتتضافر في هذا المجال فروع الجيولوجيا البنيوية كافة بدءاً من المقياس الالكتروني، وحتى المسح الجوي والبحري واعتماداً على أعمال السبر ومعطيات الجيوفيزياء.

**المحور الثاني:** دراسة تطوّر هذه البنية عبر الأزمان الجيولوجية، وهذا يتطلب إعادة بناء التاريخ الذي مرت به كل وحدة جيولوجية.

**المحور الثالث:** دراسة الشروط الحرارية والضغوط التي سادت أثناء تشكل هذه البنيات، لأن هذه الشروط تعد من العوامل الرئيسة التي تسيطر على التحكم في تشكل البنيات، وكذلك تشكل المكامن المفيدة وتوليد الحركات الأوروجينية المولّدة للبنيات الكبيرة.
ولكي تحقق الجيولوجيا البنيوية أهدافها السابقة فعلى العديد من علوم الأرض أن تقدّم لها دوراً مساعداً **ومن هذه العلوم نذكر:**
**علم الستراتيغرافيا:** يهتم بدراسة توضع الطبقات الرسوبية ويعتم على قانوني التعاقب والاستمرار في المكان والزمان ويشاطره **علم الترسيب** في توضيح العمليات التي سيطرت خلال ترسب الطبقات وميكانيكيتها.
**علم المستحاثات:** ويهتم بدراسة الأحياء الدقيقة وأهميته تكمن في إمكانية تحديد أعمار الطبقات وبناء التاريخ القديم
**علم البترولوجيا:** يهتم بدراسة منشأ الصخور وهو ذو اتصال وثيق مع **البتروغرافيا** التي تدرس تركيب الصخور، **والمنرالوجيا** الذي يهتم بدراسة خصائص الفلزات.
**الجيوفيزياء:** وهو أحدث العلوم التي طبقت في مجال علوم الأرض ويعتمد على قوانين الفيزياء في دراسة خصائص الطبقات العميقة والصخور، وتتوجه اهتمامات هذا الفرع نحو مجال استثمار المواد المفيدة ولا سيما البترول.
**الجيوكيمياء:** وهي تكمل اهتمام الجيوفيزياء عن طريق استخدام الكيمياء التي تساعد في دراسة خواص الصخور وكذلك تطور تاريخها والتفاعلات الكيميائية التي تتم حسب الشروط الترموديناميكية المطبقة.

**1-3- الطرائق المستخدمة في الجيولوجية البنيوية-2**

**1-3-1- المسح الجيولوجي: Geological survey** جميع الأعمال والدراسات التطبيقية التي تقوم بها الجيولوجيا الحقلية تدعى بالمسح الجيولوجي الذي يهدف إلى وضع الخرائط الجيولوجية على اختلاف أنواعها، في نهاية المطاف. وتبرز عند القيام بأعمال المسح الجيولوجي ثلاث مهمات أساسية أمام الجيولوجي:
1- دراسة الأجسام الجيولوجية وتحديدها، فضلا عن دراسة بنيتها وأشكالها، وإقامة الخرائط الجيولوجية المطلوبة.
2- البحث عن الخامات المفيدة المرتبطة بالأجسام الجيولوجية المختلفة، والتعرف على نظام توزعها، وتحديد المناطق المأمولة استنادا لذلك.
3- التعرف على الظروف الهيدروجيولوجية، والظروف الجيولوجية الهندسية التي تخدم في النهاية إقامة المنشآت والمباني الهندسية المخطط إقامتها، أو الموجودة في الواقع العملي.
ولإنجاز هذه المهام تستخدم منظومة كاملة من طرق البحث يأتي في مقدمتها وضع الخرائط الجيولوجية للمنطقة وضع خرائط توزع الخامات المفيدة فضلا عن الخرائط االتكتونية ولجيوكيميائية، والجيوفيزيائية، والجيومورفولوجية. كما وتوضع المقاطع اللازمة على أساس الخرائط الجيولوجية المتوفرة، والأعمدة الطبقية، وغيرها التي تسمح بقراءة البنية العميقة للقشرة الأرضية استنادا إلى دراسة الخريطة الجيولوجية للمنطقة.

**1-3-2-الطرائق الجيوفيزيائية:Geophisical methods** تسمح الجيوفيزياء بربط الظواهر المتطورة من قبل الجيولوجيين بقوانين الفيزياء الأساسية لذلك فهي ضرورية للجيولوجيا البنيوية-2، وتعتمد على استعمال الطرق والقوانين الفيزيائية من على سطح الأرض لمعرفة بنية وتركيب الطبقات تحت السطحية، وتحديد مكامن الخامات المعدنية وكذلك معرفة الخواص الفيزيائية للصخور (كثافه، مقاومة كهربائية، مسامية وغيرها). وهذه الطرائق المتعددة لها صفات مختلفة فبعضها كالطريقة الثقلية، أو المغناطيسية تعطي نتائج غير محددة تحتاج إلى بعض التكهنات، وعمليات التقريب، وبعضها كالطريقة الاهتزازية تعطي نتائج مباشرة، ودقيقة لاعتمادها على مخططات واضحة. والدراسات الجيوفيزيائية: Geophysics study تطبق على نطاق واسع طرائق البحث السايزمية (الطريقة الانعكاسية) والتي تمكّن من اكتشاف ودراسة المرتفعات المحلية وتحديد أشكالها وطبيعة الصدوع

فيها بالإضافة لتحديد سطوح الانقطاعات الترسيبية التي تتضمنها التشكيلات الرسوبية التي تملأ الحوض الرسوبي. كما يمكن اتباع طرائق البحث الكهربية للبحث عن التراكيب في المناطق البحرية. لقد تم في السنوات الأخيرة التأكد من إمكانية إجراء المسح الإشعاعي البحري بالتكامل مع البحوث الجيولوجية فحص قاع البحر، أخذ عينات التربة، الحفر الخرائطي من فوق ظهر الزوارق). وللمسح بالطريقة الإشعاعية البحرية أهمية كبرى عند وضع خرائط لقاع البحر، بما في ذلك عند تمييز الأقسام الجيولوجية المختلفة من حيث الطبيعة الليتو–سحنية.

**1–3–3–التصوير الجوي:Aeroplane photography** يستخدم للحصول على صور للسطح الخارجي المتكشف من الأرض وهو يمثل صفات البنية الجيولوجية، والتعاقب الطبقي للصخور، وكذلك يظهر سطوح التماس والصدوع والطيات وغيرها من الحادثات التكتونية؛ وهو يمكّن من مسح مناطق صعبة المنال، وخاصة المناطق الصحراوية الواسعة والثلجية والغابات، ويفيد تفسير الصور الجوية والفضائية في متابعة بعض الصدوع والشقوق لعشرات ومئات الكيلومترات.

**1–3–4– حفر آبار الاعتماد (الآبار الاستكشافية):** وتخطط آبار الاعتماد في المناطق السطيحية لتصل إلى الأساس الصخري وتتعمق فيه إلى مسافة تتضمن الخروج من المنطقة التي تعرضت فيها الصخور البلورية لعوامل الحت والتعرية. وفي الأحواض الرسوبية التي يقع فيها الأساس الصخري على أعماق كبيرة (المنخفضات الطرفية والأمامية الجبلية وبين الجبلية) يتم حفر آبار الاعتماد إلى أقصى عمق يمكن لآلات الحفر الحديثة الوصول إليه وفي السنوات الأخيرة. بدأ تصميم آبار الاعتماد لتصل حتى عمق (7–10كم) **يتم** الحفر العميق في المناطق ذات الأهمية النفطية وتصل آبار الحفر أحيانا أعماقاً كبيرة تتجاوز (8 كم) كما هو الحال في المناطق الشمالية الشرقية للقطر، ولم تصل الآبار المحفورة إلى الركيزة في أراضي القطر كافة. وعند القيام بحفر الآبار الاستكشافية (آبار الاعتماد) تجري دراسة نطاقات التي تكشف عنها الآبار من جميع النواحي. ولهذا الغرض تجري في الآبار دراسات وأبحاث جيولوجية بما فيه الكفاية وعادةً ما تكمن في الحصول على أقصى ما يمكن من اللبابات الصخرية التي تخرج عند الحفر drill cutting لجميع أجزاء نطاقات البئر كما تكمن أيضاً في إجراء مجموعة كاملة من الأبحاث الجيوفيزيائية الحقلية والجيوكيميائية. ونتيجة حفر الآبار الاستكشافية تتم دراسة تركيب تضاريس الأساس الصخري، وعمره ومكوناته، ويتم تعيين طبقات مختلفة الثخانة كما يتم تدقيق ستراتيغرافية الرواسب الباليوزوية الميزوزوية العائدة لهذه الأحواض الرسوبية.

**1–3–5– الخرائط الجيولوجية والتكتونية: Geological maps** هي تمثيل على أساس طبوغرافي بمساعدة رموز، وإشارات وألوان متفق عليها للتشكيلات الصخرية المختلفة التركيب والعمر، والمنتشرة على سطح الأرض، أو أن معرفة المناطق المجاورة تسمح بافتراض وجودها تحت الغطاء السطحي. وتعكس هذه الخرائط البنية الجيولوجية لسطح الأرض، والجزء الملتصق به من السطح العلوي للقشرة الأرضية، ووضع تصور عن بنية القشرة الأرضية على هذا العمق، وذلك لفهم نظام توزع المكامن المفيدة وتخدم بوصفها أساسا هاماً لتصميم أعمال التنقيب والاستكشاف، وإجراء التحريات الجيوهندسية المختلفة. وترتبط نوعية الخرائط الجيولوجية، ودقتها بالدراسة التفصيلية للبنية الجيولوجية، فضلاً عن ارتباطها بالأساس الطبوغرافي، ويتم وضع خرائط خاصة إلى جانب الخريطة الجيولوجية.

**1–3–6–العمود الستراتغرافي:Stratigraphic column** هو عمود يتراوح ارتفاعه بين(40–50سم)، وعرضه بين (3–4سم)، ويمكن من التعبير بخطوط ورسوم خاصة عن وضع الصخور المنتشرة في منطقة الخريطة وتركيبها، في تتابعها الزمني من الأسفل إلى الأعلى ومن التوضعات القديمة وحتى التوضعات الحديثة. وتصنف الصخور في العمود الستراتغرافي تبعا للوحدات الستراتغرافية التي يتم تحديدها وتصنيفها على الخريطة الجيولوجية. ويستخدم لرسم الأعمدة الستراتغرافية مقاييس مختلفة تختار بحسب سماكة الصخور في المقطع وتكون عادة أكبر من مقاييس الخرائط. ويشار إلى الحدود بين الوحدات الستراتغرافية

من نمط التوضع المتوافق في العمود بخطوط مستقيمة أما في حالات عدم التوافق الستراتغرافي فتستخدم خطوط متموجة، بينما تشير الخطوط الزاوية إلى حالات عدم التوافق التكتوني.

**1-3-7- 1- وضع البروفيلات الجيولوجية والجيوفيزيائية** التي توضح تكوين المساحات الضخمة قيد الدرس وهي تمثل رسم المقطع العمودي وتوضح التكوين الجيولوجي، ونتائج المسح الجيولوجي والبحوث الجيوفيزيائية تعتبر أساساً لرسم هذه البروفيلات والتحديد الصحيح لاتجاه البروفيلات واختيار العلاقة بين المقاييس العمودية والأفقية، لها أهمية كبرى. ويستحسن أن يكون المقياس العمودي مساوياً للمقياس الأفقي، ومثل هذه البروفيلات تعطي الصورة الحقيقية عن التكوين الجيولوجي للمساحة قيد الدرس. وأكثر البروفيلات وضوحاً هي البروفيلات الجيولوجية-الجيوفيزيائية والمرسومة اعتماداً على مجموعة تفسيرات نتائج حفر الآبار والبحوث الجيوفيزيائية.

**والبروفيلات الجيوفيزيائية:** هي عبارة عن مقطع عمودي للحوض الترسيبي الواقع في المنطقة قيد الدرس، مرسوم اعتماداً على نتائج البحوث الجيوفيزيائية (السايزمية، الجاذبية، المغناطيسية، الكهربائية وغيرها).

**1-4- أهمية الدراسات البنيوية وأهدافها:**

1- دراسة البنية الجيولوجية لأجزاء متفرقة من القشرة الأرضية (مناطق- دول-قارات).

2- تحديد مناطق احتمال وجود مكامن مفيدة، للخامات والثروات المعدنية.

2- دراسة تطور هذه البنية عبر الأزمنة الجيولوجية، وهذا يتطلب إعادة بناء التاريخ الباليوجغرافي الذي مرت به كل وحدة جيولوجية.

3- دراسة الحركات التكتونية التي تعرضت لها هذه الوحدات والتشوهات التي حصلت ومعرفة أسبابها ومدى انتشارها.

ولتنفيذ هذه الأهداف لابد من تضافر الجيولوجيا الإقليمية، والعلوم الجيولوجية الأخرى بدءاً من أعمال المسح الجوي والبحري وحتى أعمال السبر ومعطيات الجيوفيزياء.

# الفصل الأول

## مبادئ ميكانيك الصخور

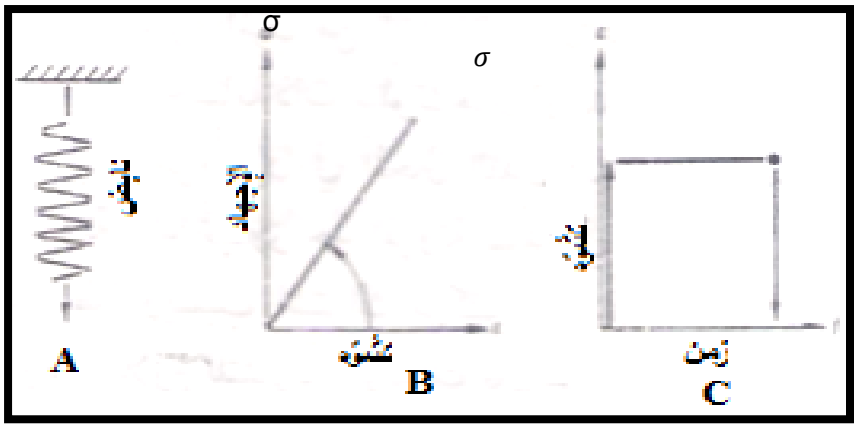
**1-1- الأجسام والقوى والحركات:** يدرس علم الميكانيك حركة الأجسام والقوى المسببة لها والعلاقة بينهما، والمقصود بالأجسام في الجيولوجيا هي الصخور. تسبب القوى التي تؤثّر في الصخور حركات تظهر على شكل تشوّهات للأشكال الأصلية لهذه الصخور. إلا أنه من غير الممكن عادةً مشاهدة القوى المؤثرة في مجال التكشّفات الجيولوجية. بل مايشاهد هي التشوّهات الموجودة والتي تعبّر عن تأثيرات قديمة للقوى على الصخور. وتعزى القوى التي تسبب التشوّهات حسب مفاهيم علم الميكانيك إلى قوى سطحية وقوى جسمية. تنشأ البنيات التكتونية (طيات وشقوق بشكل أساسي) بتأثير القوى السطحية بالدرجة الأولى، وهي قوى خارجية تؤثّر عبر سطوح حقيقية أو مفترضة قي الصخور وتولّد فيها قوى داخلية حسب قانون نيوتن الثالث تساوي القوّة الخارجية وتعاكسها في الاتجاه. وبتأثير هذه القوى فإن الجسم الصخري يخضع لحالة من التوتر توصف في علم التكتونيك **بالإجهاد Stress**. ومن ناحية أخرى فإن الجسم الصخري يتجاوب مع الإجهادات من خلال تشوّهات مرئية يستخدم لأجلها مصطلح **الانفعال Strain** ويدعى العلم الذي يدرس القوى علم التحريك (الديناميك Dynamics) أما العلم الذي يدرس الحركات التي تؤدي إلى تشوّه الأجسام فهو علم الحركة (الكينماتيك Kinematics). إن كل جسم صخري في مجال العمليات الجيولوجية يقع تحت تأثير قوة لجاذبية الأرضية. وهي من القوى الجسمية التي تؤثر بشكل قوى داخلية غير مرتبطة بالقوى الخارجية. وتدعى القوى الجسمية أيضاً القوى الكتلية، أو القوى الحجمية لأنها تؤثر على كل عنصر حجمي للجسم بالطريقة نفسها. وهي تتناسب مع حجم الجسم وكتلته. ومن خلال النسبة العددية للكتلة على الحجم التي تعبّر عن الكثافة فإن قوة الجاذبية الأرضية تؤثّر في حركات التوازن الكثافي التي تظهر على شكل تشوّهات. ينتج تشوّه الأجسام الجيولوجية بصورةٍ عامة من الحركات الأفقية المتولّدة عن القوى التكتونية (قوى خارجية)، كما ينتج من الحركات الشاقولية الناجمة عن قوة الجاذبية الأرضية (قوة داخلية). ويعود للقوى الداخلية أيضاً تلك القوى الناشئة عن حدوث التغيرات الطورية الفلزية المرتبطة بتغيرات الحرارة والضغط في الأجسام الصخرية. يجب عند دراسة السلوك الميكانيكي للصخور وضع تاريخها الجيولوجي الكامل الذي أدى إلى وضعها الحالي في الحسبان، أي دراسة تأثيرات كل القوى التي تعرّض لها الصخر منذ نشاته، والتي حفظت عللا شكل تشوّهات مستديمة.

**1-2- الأشكال الأساسية للسلوك الميكانيكي:** لابد عند تحليل التشوّه من الرجوع إلى الأشكال الأساسية لسلوك تشوّه الأجسام. وتعد السلوكيات المرنة واللدنة واللزجة الأشكال الأساسية للتشوّه المتصل (التشوّه الانحنائي) بينما يميز السلوك القصيف التشوّه اللامتصل.

**1-2-1- السلوك المرن:** يتصف السلوك المرن بأن التشوّهات تظهر مباشرةَ عند تطبيق الإجهادات. وتزول بعد رفعها، حيث يعود الجسم إلى حالته الأصلية (تشوّهاً عكوساً). ولا يتأثّر ذلك بالزمن، أي أنّ شدة التشوّه المرن لاتزداد مع استمرار تأثير القوى. ويمثل النابض الذي يتعرّض لقوة أحادية المحور نموذج التشوّه المرن. وهو يدعى في علم الميكانيك جسم هوك. ويتمثّل سلوك جسم مرن في المخطط البياني المتعامد لعلاقة الإجهاد بالشوّه بمستقيم ينطلق من مركز الاحداثيات، وتتعلق زاوية ميله بقيمة معامل مرونة هذا الجسم. أما المخطّط البياني لعلاقة التشوّه بالزمن بالنسبة لجسم هك فيبين أنه لا توجد علاقة بين التشوّه واستمرار تأثير القوى وأنه عند إزالة التحميل (إزالة القوّة المؤثّرة) فإنّ التشوّه يعود فوراً إلى قيمة الصفر الشكل (1-1).

**1-2-2- السلوك اللدن:** يتطابق حد المرونة مع قيمة الإجهاد التي يتجاوزها لايعود الجسم إلى وضعه الأصلي بعد إزالة التحميل. ويبدي الجسم بعد تجاوز هذا الحد سوكاً لدناً، وهو تشوّه غير عكوس ويتعلق بشدة القوَة المؤثّرة وباستمرار تأثيرها. وبذلك فإن استمرار تطبيق إجهاد ثابت القيمة على جسم لدن مثالي يؤدي إلى مزيد من تشوّه هذا الجسم. يتمثل نموذج السلوك اللدن

في علم الميكانيك بجسم سان فينان، الذي يمثله مكبس يتحرك ضمن اسطوانة، أو ثقل يسند إلى قاعدة مستوية ومربوط بنابض. وعند تطبيق قوّة أحادية فإن النابض يتشوّه في بادئ الأمر بشكل مرن وعندما تتجاوز قوّة الشّد مقاومة الاحتكاك الكائنة بين الثقل والقاعدة، يبدأ الثقل بالانزياح، وهذا ما يتطابق مع التشوّه اللدن المستديم.




**الشكل (1–1): التشوّه المرن.**

**A: نابض جسم هوك.**

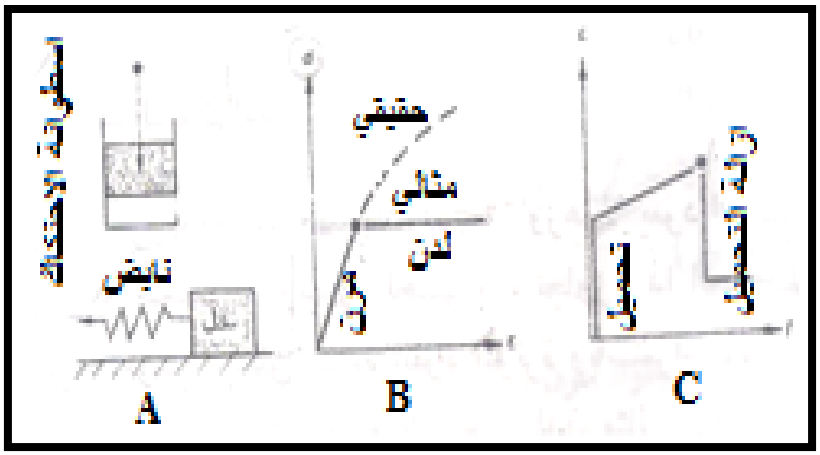
**B: المخطط البياني لعلاقة الإجهاد (σ) بالتشوّه (τ).**

**C: المخطط البياني لعلاقة التشوّه (ε) بالزمن (t).**

وفي المخطط البياني لعلاقة الإجهاد بالشوّه فإن الجزء المرن يتمثّل بمستقيم صاعد يتحوّل عند حد المرونة إلى مستقيم يوازي المحور الأفقي (محور التشوّه). وتتطابق المسافة بين هذا المستقيم والمحور الأفقي مع قيمة الإجهاد اللازمة لتجاوز مقدار الاحتكاك بين الثقل والقاعدة (أو بين المكبس وجدران الاسطوانة) في جسم سان فينان. وعن إزالة التحميل فإن الجزء المرن من التشوّه يزول دون الجزء اللدن غير العكوس الشكل (1–2). إنّ أجساماً ذات سلوك مرن أو لدن مطلق غير موجودة في الطبيعة، بل الأرجح أن يبقى جزء مرن في المجال اللدن بعد تجاوز حد المرونة. وبشكل عام تتناقص المرونة بعد تجاوز حد المرونة بشدة في أول الأمر، ليصبح تناقصها بعد ذلك أكثر بطئاً وبسبب اشتراك مركّبة مرة في المجال اللدن زيادةً أكبر في الإجهاد (القوّة) اللازم للتشوّه. وبذلك فإن المنحني في مخطّط الإجهاد–تشوّه يبدي فوق حد المرونة مساراً مقوّساً يتوسّط بين امتداد مستقيم المرونة الصاعد بشكل خطي وبين المستقيم الموازي للمحور الأفقي العائد لجسم لدن مثالي الشكل (1–2).

**1–2–3– السلوك اللزج:** يتميز الجسم ذو السلوك اللزج بالصفات الميكانيكية نفسها لسائل لزج، حيث يتحدّد سلوكه من خلال الاحتكاك الداخلي لجزيئاته بعضها مع بعض. وتكون وضعية الجزيئات بالنسبة لبعضها في سائل لزج كيفية، على عكس الأجسام المرنة واللدنة التي تكون وضعية الجزيئات فيها ثابتة. يوصف الإجهاد الذي يزداد التشوّه عنده دون زيادة في التحميل بأنه الحد الفيزيائي بين الحالة اللدنة واللزجة.

وهذا يعني أن قوة ثابتة تسبب سرعة تشوّه ثابتة في المجال اللزج، ويتميز هذا المجال بعدم وجود مساهمة للتشوّه المرن. يتمثل نموذج السلوك اللزج بجسم نيوتن. وهو اسطوانة توهين، حيث ينزلق مكبس مثقب ضمن سائل لزج عندما يتأثّر هذا المكبس بقوّة خارجية. وكلما كان السائل أكثر لزوجةً، قلّ انزياح المكبس عند تساوي القوّة المؤثّرة. إن الانسياب الذي يمثله جسم نيوتن هو تشوّه مستديم لاعكوس. ويمكن تمثيل الإجهاد الذي يزداد التشوّه عنده دون زيادة في التحميل بمستقيم موازٍ للمحور الأفقي في محطّط الإجهاد–تشوّه. أما مخطّط التشوّه–زمن فيبدي مستقيماً صاعداً تتعلق زاوية ميله بمعامل لزوجة المادة. وعند إزالة التحميل لايحدث تشوّه عكوس (مرن) الشكل (1–3).

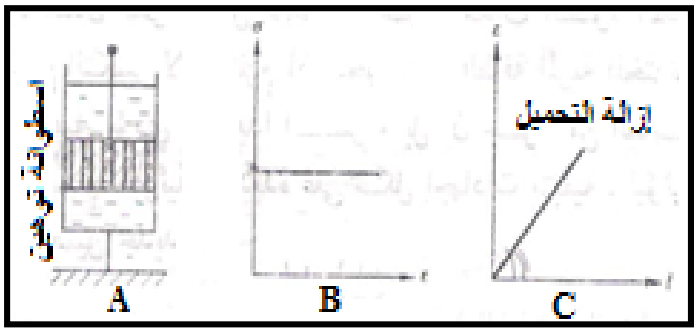



**الشكل (1–2): التشوّه اللدن.**

**A: جسم سان فينان.**

**B: المخطط البياني لعلاقة الإجهاد (σ) بالتشوّه (ε).**

**C: المخطط البياني لعلاقة التشوّه (ε) بالزمن (t).**




**الشكل (1–3): التشوّه اللزج.**

**A: جسم نيوتن.**

**B: مخطط الإجهاد–تشوّه.**

**C: مخطّط التشوّه–زمن.**

**1–2–4– السلوك القصيف:** يتصف السلوك القصيف لجسم ما بظهور سطوح كسرية في هذا الجسم الذي كان خالياً قبل ذلك من مثل هذه السطوح. ولدى زيادة التحميل في تجربة الميكانيك الصخري فإن قيمة الإجهاد التي يتكوّن عندها أول كسر تتطابق مع متانة الصخر. وفي مخطّط الإجهاد–تشوّه فإن منحني التشوّه ينقطع عند وصوله إلى قيمة المتانة، حيث يتمثّل الجزء المرن بالبداية المستقيمة لهذا المنحني قبل حدوث التشوّه اللدن الشكل (1–4).

إن الشيء المهم من وجهة النظر التكتونية هو أن الجزء المرن من طاقة التشوّه هو الذي يستخدم فقط لتكوين سطوح التكسّر بعد تجاوز حد متانة الصخر لأن طاقة التشوّه اللدن تحولت قبل ذلك إل عمل لإحداث التشوّه اللدن. إلا أن تكوّن سطوح التكسّر لايستلزم أن تتحول كل الطاقة المرنة المختزنة في الجسم الصخري إلى عمل يؤدي إلى هذا التكسّر.

**نستنتج مما سبق:** أن التشوّهات الانحنائية (الطيات الانحنائية) تمثل تشوهات لدنة. أما سطوح التكسّر المتمثّلة بالشقوق فهي تعبير عن إجهادات مرنة كانت موجودة في الصخر وتحرّرت عند تجاوز حد متانة الصخر. ونظراً لوجود جزء من تشوّه مرن عند حدوث التشوّه اللدن في الأجسام الصخرية الحقيقية فلا يستبعد تكوّن طيات إنحنائية وتشوّهات تكسرية (شقوق على الأخص)

خلال عملية واحدة. أما التشوّهات الانسيابية فتتميز ميكانيكياً بعدم تكوّن كسور معاصرة بسبب عدم وجود مساهمة للتشوّه المرن فيها.

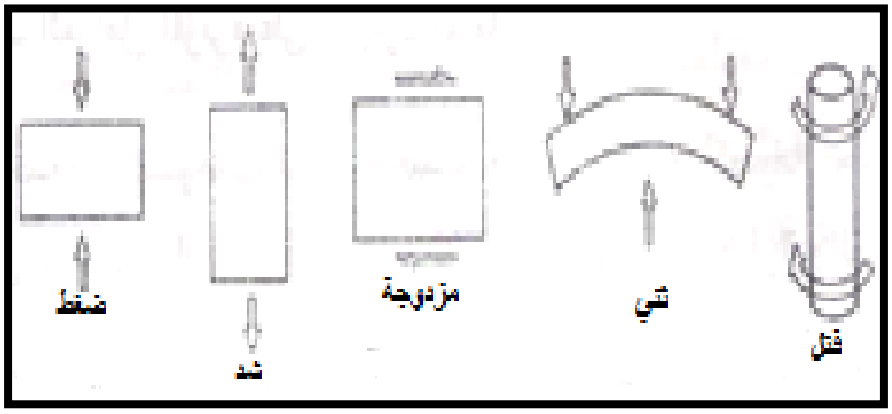
**الشكل (1–4): مخطّط الإجهاد–تشوّه للسلوك القصيف.**

**1–3– العوامل المؤثّرة على السلوك الميكانيكي:** تتعلق حدود التشوّهات المرنة، اللدنة، الانسيابية، والقصيفة لجسم صخري بشكل أساسي بالصفات الصخرية وبنوع الإجهاد وبشروط الحرارة والضغط وبزمن تزايد التحميل وبمساحة سطح التحميل.

**1–3–1– الصفات الصخرية:** تتحدّد صفات الصخر المورفولوجية من خلال البنية والنسيج ويشكلان مجموعة خصائص العناصر المكوّنة للصخر (الفلزات، البقايا العضوية، والملاط) والتي تعطي بتجمعها وترابطها المظهر العام للصخر. كما وتؤثر المواد المالئة للمسامات (غازات وسوائل) أيضاً على السلوك الميكانيكي للصخر.

يصف النسيج العناصر المكونة للصخر من حيث تركيبها وطبيعتها البلورية وأشكالها وقياساتها ونسبه المئوية والعلاقة المتبادلة فيما بينها وهي تدرس بالمجهر الاتقطابي. أما البنية فتصف توضع العناصر المكوّنة للصخر وطريقة ملئها للحجم الذي يشغله هذا الصخر وارتصافها وتوجهها وهي تدرس غالباً بالعين المجردة.

**1–3–2– نوع الإجهاد:** يحدث الإجهاد من خلال الضغط أو الشد أو المزدوجة أو الثني أو الفتل الشكل (1–5). وعندما تؤثّر عدة قوى بتفس الوقت، تستخدم القوة ذات التأثير الأكبر لوصف نوع الإجهاد.



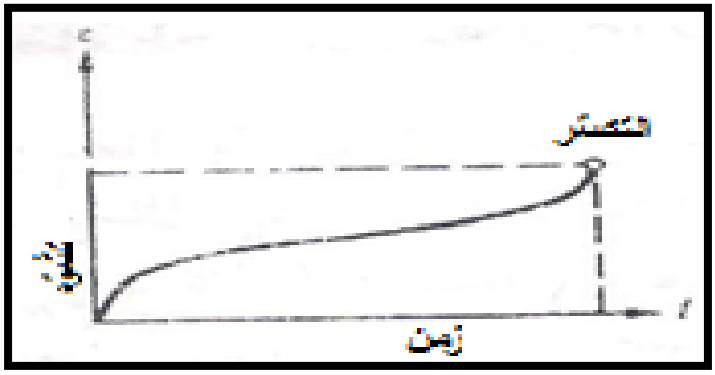

**الشكل (1–5): أنواع القوى المؤدية للإجهادات.**

وإن جسماً صخرياً معيناً يبدي تجاه كل من أنواع الإجهادات المذكورة، وعند تساوي الشروط الأخرى، طرقاً مختلفة للسلوكيات الميكانيكية (بشكل مفضل مرن أو لدن أو لزج أو قصيف). وهذا مايتوضّح في تباين سلوك المتانة مثلاً، أي مقدار القوة (الإجهاد) التي يجب تطبيقها للوصول بالصخر إلى التكسر، حيث نجد في تجارب تأثير القوة أحادية المحور وضمن إطار الإجهادات

المهمة في العمليات الجيولوجية أن الإجهاد اللازم لكسر الصخر يزداد بالترتيب من الشد إلى الثني فالقص فالضغط. وبشكل عام فإن متانة الشد لصخر معين تساوي 1/3 إلى 1/5 من متانة ضغطه.

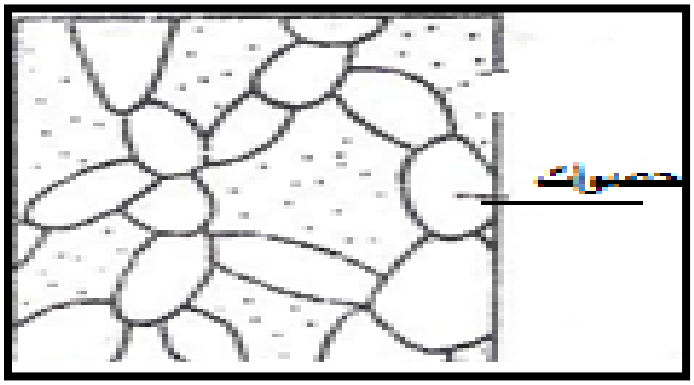
**1-3-3- الشروط الحرارية:** يؤدي ازدياد الحرارة لأن يكتسب الصخر المجهد صفات اللدونة واللزوجة بدرجات متزايدة. أما قابلية الصخ للسلوك القصيف فتكون أكبر مايمكن في درجات الحرارة المنخفضة.

**1-3-4- زمن تزايد التحميل (الإجهاد):** يستمر تزايد الحميل في العمليات الجيولوجية عبر أزمنة جيولوجية، إلا أن تزايداً نسبياً سريعاً للتحميل يمكن أن يحدث أيضاً. ويكون تجاوب صخر معين مع هذه التغيرات في سرعة التزايد متبايناً. فعند كون سرعة الإجهاد عالية يتم بشكل عام تجاوز حد التكسّر للمواد بسرعة نسبياً. أما عند سرعة الإجهاد المنخفضة فإن الجزء اللدن أو اللزج من التشوّه يكون كبيراً على الأغلب. يتجاوب الصخر في التجارب مع قوّة مؤثّرة ثابتة أي مع إجهاد متساوٍ استمر لفترة طويلة من خلال الزحف. وبذلك فإن الإجهادات المستديمة لفترات زمنية طويلة تؤدي لأن يصغر الجزء المرن من التشوّهات باستمرار، بحيث يكاد لايتوقع حدوث تشوّهات كسرية بعد ذلك. ويبين مخطّط التشوّه–زمن أن منحني الزحق يكون في أغلب مساره ذا صعود خفيف جداً. وتكون سرعة التشوّه خلال هذا الزحف المستقر ثابتةً تقريباً. وقبل قليل من التكسّر فإن منحني التشوّه يبدي تزايداً واضحاً للتشوّه مع الزمن الشكل (1-6).




**الشكل (1-6): مخطّط التشوّه–زمن.**

**1-3-5- مساحة سطح التحميل:** تلعب مساحة سطح التحميل (سطح التخميل) دوراً مهماً في سلوك الجسم الصخري. وفي العمليات الجيولوجية تؤثّر القوى السطحية (القوى الخارجية) عادةً عبر سطوح كبيرة. أما إذا كان تأثير القوى الخارجية نقطياً فإن الصخر سيتعرّض محلياً من خلال (التأثير الإبري) إلى إجهادات عالية جداً. وهذا مايؤدي مثلاً إلى الفجوات التي تحدثها الحصوات المتجاورة في بعضها عندما تكون مستندة إلى بعض الشكل (1-7).




**الشكل (1-7): التأثير الإبري.**

# الفصل الثاني

# الطيات FOLDS

**2-1- تعريف:** يستخدم مصطلح الطية لوصف تقوس أو انحناء حدث لسطوح موجودة مسبقاً (سطوح التطبق على الغالب). ورغم ذلك فإن بعض الطيات تتشكل بشكل متزامن مع تكون السطوح المطوية (التشوه المتزامن مع التوضع). وتختلف أبعاد الطيات اختلافاً كبيراً يتراوح بين عدة ميليمترات حتى عدة أو مئات من كيلومترات.

**2-2- التناظر في الطيات:** يدرس التناظر في الطيات بالاعتماد على جملة إحداثيات ثلاثية المحاور تدعى (جملة الاحداثيات التكتونية). يمثل المحور (a) في هذه الجملة اتجاه الحركة التي أدت للتشوّه (اتجاه النقل التكتوني the direction of tectonic transport)، أما المحور (b) فيوازي محور الطية (محور التشوّه)، بينما المحور (c) معامداً لمستوي ab.

هذا ونميز ثلاث أنماط أساسية لتناظر الطيات هي الشكل (2-1).

**أ- التناظر المعيني: rhombic symmetry**

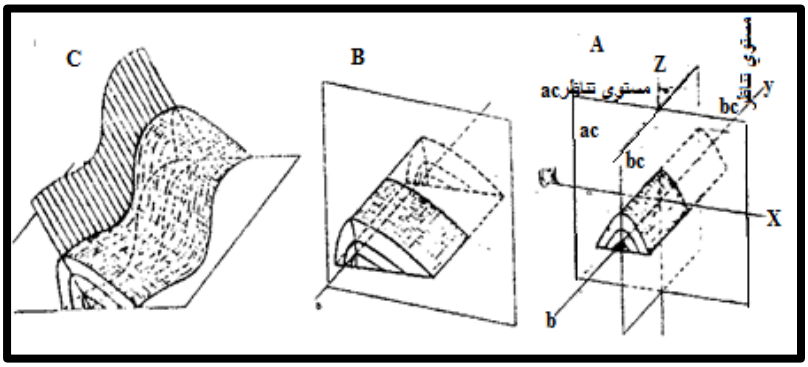
تتميز الطيات ذات التناظر المعيني بمستويي تناظر متعامدين هما مستوي (ac) ومستوي (bc).

**ب- التناظر أحادي الميل: monoclinic symmetry**

تتميز الطيات ذات التناظر أحادي الميل بمستوي تناظر وحيد هو المستوي المعامد لمحور الطي مستوي (ac).

**ج- التناظر ثلاثي الميل:triclinic symmetry**

لاتحوي هذه الطيات أي مستوي تناظر، ويسود هذا التناظر في الطيات التي يكون السطح المحوري فيها مقوّساً إلى حد كبير وهذا ماينشأ على الأغلب عندما تتعرض الطيات لمراحل متعددة من الاجهادات التكتونية.




**A: طية ذات تناظر معيني. B: طبقة ذات تناظر أحادي الميل. C: طية ذات تناظر ثلاثي الميل.**

**2-3- وصف الطيات وتصنيفها ضمن مقطع ac**

**2-3-1- أهمية مقطع ac:**

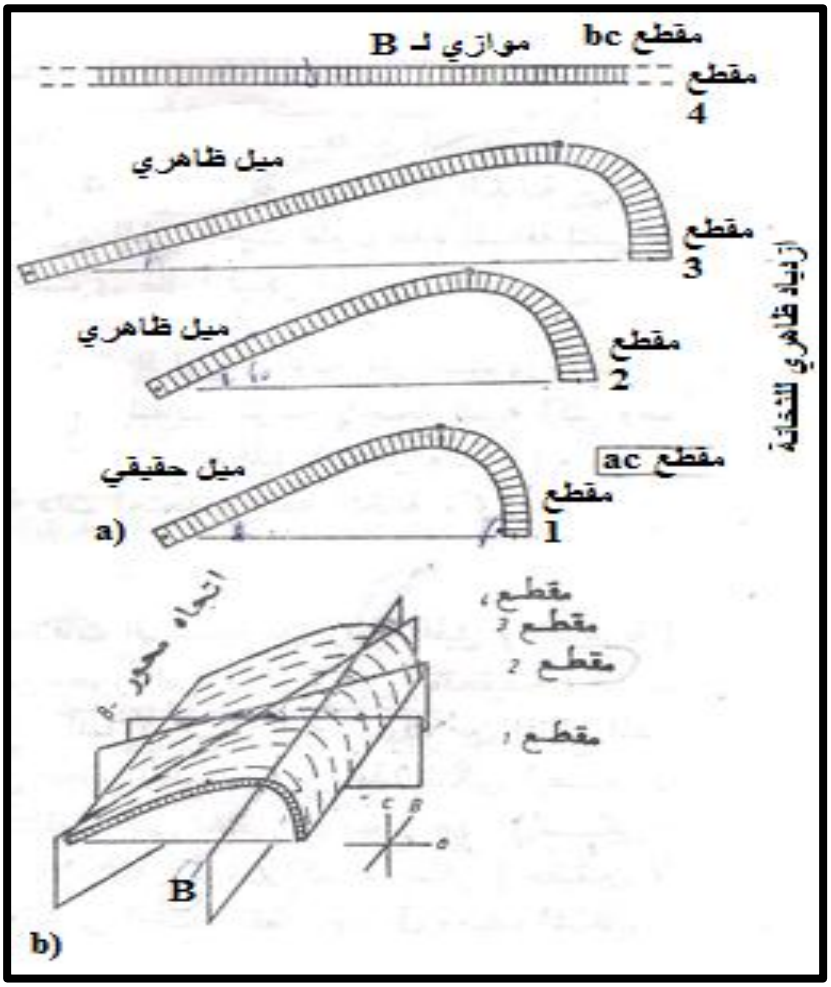
يعد مقطع **ac** المقطع النموذجي لوصف الطيات لأنه يظهر أشكال التشوّهات التي تعرضت لها الطبقات بشكل واضح. وبذلك تكون المقاطع المتكشفة في الحقل والعمودية على محور الطي أفضل تمثيلاً للطيات من المقاطع التي تكون منحرفة عنه أو موازية له الشكل (2-2). يتميز مقطع **ac** بما يلي:

أ- يظهر مستوي مقطع **ac** تشوّهات الطي بشكل أفضل من أي مقطع آخر، ولذلك يدعى "مستوي التشوّهط. وهو يَستخدم بهدف التمثيل التخطيطي لأشكال الطيات.

ب– يتميز المقطع **ac** بأقصر مسافة بين نقطتين مختارتين واقعتين على جانبي المفصلة (لمحدب أو مقعر) بالمقارنة مع المسافة الكائنة بين النقاط المعادلة لها في مقاطع منحرفة عن محور الطي، حيث تطول هذه المسافة لتقترب من اللانهاية مع اقتراب المقطع من مستوي **bc** الشكل (2–2).

ت– كلما صغرت الزاوية الكائنة بين مستوي المقطع ومحور الطي كان ازدياد الثخانة الظاهرية للطبقات المؤلفة لأجنحة الطية أكثر وضوحاً، وبخاصة عندما تكون هذه الأجنحة شديدة الميل الشكل (2–2). وقد يؤدي ذلك للإعتقاد بأن الطية المدروسة ذات أجنحة مختلفة الثخانة. ومن هنا تأتي أهمية التحديد الدقيق لمقطع **ac**.

ث– تبين العلاقات الهندسية بين زاوية الميل (الظاهرية) المقيسة للطبقات في مقطع منحرف عن محور الطية وزاوية الميل (الحقيقية) المقيسة في مقطع **ac** أي زاوية الميل تصغر كلما كبرت الزاوية الكائنة بين المقطع المدروس ومقطع **ac** أي كلما اقتربنا من اتجاه المقطع **bc**. وهذا يقتضي أيضاً أن شدة التقوّس الظاهري للطية ستتناقص حتى تختفي في مقطع **bc** الشكل (2–2)، أي أن شدة التقوّس وميل الأجنحة يكونان أكبر مايمكن (حقيقيين في مقطع **ac** وهذا مايؤكّد مرة أخرى أفضلية مقطع **ac** في وصف أشكال الطيات.




**الشكل (2–2): أهمية مقطع ac.**

**a: الأشكال التي تعطيها مقاطع مختلفة لطية واحدة (بين مقطع ac ومقطع bc).**

**b: وضعيات المقاطع السابقة ضمن الطية.**

### 2-3-1-1- تحديد الوضعية الفراغية لمقطع ac

لابد (بعد أن عرفنا أهمية مقطع **ac**) قبل دراسة الطيات من التأكد من أن المقطع المدروس للطية هو مقطع **ac** أم لا. ويتم ذلك بتحديد الوضعية الفراغية لمحور الطية (محور B) الذي يعامد مقطع **ac**. هذا وتحدّد وضعية محور B بشكل مباشر أو غير مباشر. ويكون التحديد المباشر ممكناً عندما يكون مجال التقوّس الأعظمي (المفصلة) للمحدّب أو للمقعّر المدروس متكشّفاً، حيث يتم قياس اتجاه وتغريق خط المفصلة (الذي يعبّر عن محور الطية) بوساطة البوصلة الجيولوجية بطريقة قياس العناصر الخطية بدقة قدر الإمكان. أن أي خطأ يرتكب في تحديد خط المفصلة سيؤدي إلى أخطاء واضحة في الدراسة (كأن يقاس خط القمة بدلاً من خط المفصلة في حالة عدم تطابقهما أنظر الفقرة 2-3-2). يمكن تحديد قيم الوضعية الفراغية (الاتجاه والميل) لمقطع **ac** حسابياً من خلال علاقة التعامد الكائنة بينه وبين محور B من خلال الجدول التالي:

| القيم المقيسة في الحقل محور B | اتجاه التغريق 200° مثلاً | زاوية التغريق 20° | رمز اتجاه التغريق SW |
|---|---|---|---|
| اجراء الحساب | اتجاه التغريق مضافاً إليه 90° | 90° مطروحاً منها قيمة زاوية التغريق | |
| النتيجة مقطع ac | الاتجاه: 290° | زاوية الميل: 70° | رمز اتجاه الميل NE |

**الجدول (2-1): تحديد الوضعية الفراغية لمقطع ac من خلال معرفة الوضعية الفراغية لمحور B (بالطريقة الحسابية).**

يمكن تحديد مقطع **ac** أيضاً من معرفة محور B من خلال شبكة سميث.

### 2-3-1-2- توجيه محور a ومحور c ضمن مقطع ac

يجب قبل القيام بالوصف الشكلي للطية المدروسة تحديد الوضعية المستخدمة للمحاور التكتونية a , c ضمن المقطع **ac**، حيث أن هناك ثلاث حالات أساسية لتوجيه هذه المحاور ترتبط كل منها بوجهة النظر أو الاعتبار الذي تدرس الطية من خلاله الشكل (2-3):

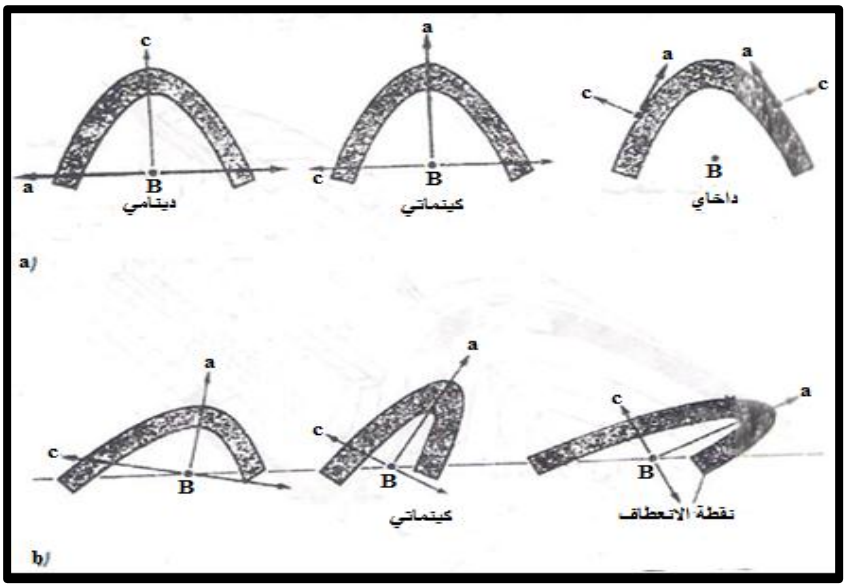
أ- **من وجهة نظر علم التحريك (الديناميك):** يأخذ المحور الإحداثي a منحى القوى التماسية التي قادت إلى نشوء الطية، أما محور c فيكون عمودياً على a ضمن مستوي التشوّه **ac** الشكل (2-3-a) إن هذه الوضعية هي المستخدمة غالباً في الدراسات التكتونية الإقليمية.

**ب- من وجهة نظر علم الحركة (الكينماتيك):** تلعب هنا حركة المفصلة المتجهة (في حالة محدّب) نحو الأعلى الدور الرئيس في وصف العملية، حيث يأخذ محور a منحى هذه الحركة، أما محور c فيوازي اتجاه قوى الضغط التي أدت لتشوّه الطية الشكل (2-3). تناسب هذه الوضعية للمحاور دراسة نشوء الطيات المنفردة بشكل أساسي.

**ت- من وجهة النظر الداخلية:** يكون محور a موازياً لخط ميل سطح الطبقة المطوية، أما محور c فيعامد هذا السطح الشكل (2-3-a) يفيد هذا التوجيه للمحاور في دراسة تشوّهات الأجسام الصغيرة كالمستحاثات مثلاً الموجودة على السطح الطبقي.

إن مايلاحظ هو أن مركز الاحداثيات المرسوم حسب وجهة نظر علمي التحريك والحركة يوجد خارج الشكل المعبّر عن الطية من خلال خط أو طبقة المعلم. أما حسب وجهة النظر الداخلية فهو يوجد على هذا الشكل نفسه الشكل (2-3). هذا وتطبق التوجيهات المحورية آنفة الذكر في حالة الطيات ذات التناظر المعيني، أي تلك التي يشكّل فيها مستوي **ac** (المقطع العرضي) ومستوي **bc** (المقطع الطولي) مستويات تناظر. أما في الطيات ذات التناظر أحادي الميل التي يكون مستوي **ac** فيها هو مستوي التناظر الوحيد فإن محور a يتوضع حسب وجهة نظر علم الحركة ماراً من مفصلة الطية. وبتعبير آخر يرتبط تحوّل الطية من التناظر المعيني إلى التناظر أحادي الميل بدوران محور a ومحور c التكتونيين حول محور b الشكل (2-3-b). إن

الهدف الأساسي من اختيار الوضعيات الفراغية المختلفة للمحاور الاحداثية التكتونية c , a هو الوصول إلى وصف صحيح للطيات المدروسة.

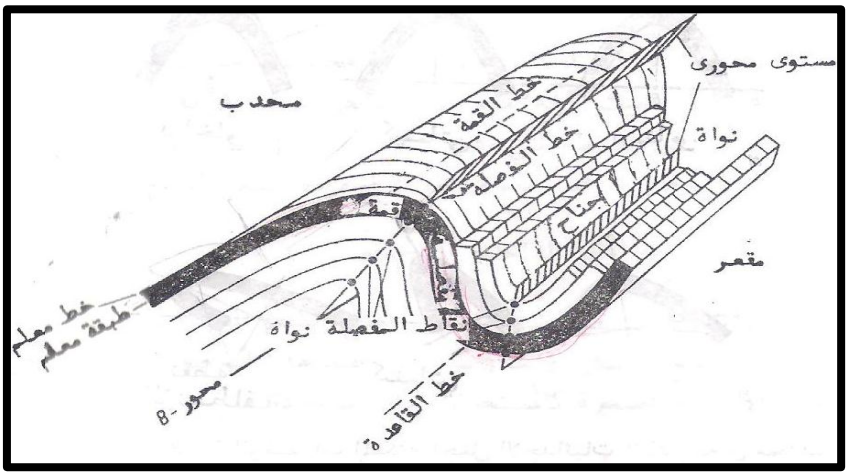



**الشكل (2-3): الوضعيات الممكنة لجمل الاحداثيات التكتونية في محدّب.**

**a- في محدّب ذي تناظر معيني. b- في محدّب ذي تناظر أحادي الميل.**

### 2-2-2 العناصر الأساسية للطيات:

يبدي شكل الطيات ضمن مقطع **ac** انحناءات موجبة، ويكون في حالته المثالية مشابهاً للمنحني الجيبي الرياضي. وتتألف الطية، التي هي وحدة تكتونية أساسية، من جزء محدّب يليه جزء مقعّر. ورغم ذلك فإننا نجد كلمة "طية" تطلق أحياناً ضمن الاصطلاحات المتداولة على أحد جزئيها (المحدّب أو المقعر) عندما يكون متكشّفاً وحده. وفي هذه الحالة يجب دائماً تحديد ماهو المقصود بكلمة "طية" هل هو المحدّب أم المقعر أم التعريف المعطى أعلاه؟.




**الشكل (2-4): العناصر الأساسية للطيات.**

تتميز الطيات ضمن مقطع ac بالعناصر التالية الشكل (2-4):

- **المحدّب anticline:** هو الجزء من الطية التي تكون الطبقات فيه مقوّسة نحو الأعلى (محدّبة) حيث تكون الصخور الأقدم في نواة المحدّب.

– **المقعّرcyncline** : هو الجزء من الطية التي تكون الطبقات فيه مقوّسة نحو الأسفل (مقعرة) حيث تكون الصخور الأحدث في نواة المقعّر.

– **نقطة المفصلة hinge**: هي الموقع الذي يكون سطح الطبقة المطوية (محدّبة أو مقعّرة) عنه ذا تقوّس أعظمي.

– **خط المفصلة hinge line أو محور الطية fold axis** : هو الخط الواصل بين نقاط المفصلة للسطح المطوي النحدَب أو المقعر. وقد يكون أفقياً، أو مائلاً فنقول عنه متغرقاً، ونقول عن الطية أنها في هذه الحالة متغرقة باتجاه تغريق محورها.

– **المستوي المحوري axial plane**: هو مستوٍ وهمي يتضمن محاور الطبقات المطوية المؤلفة للطية الكلية. وعندما يكون مقوّساً أو متعرّجاً يسمى "السطح المحوري axil surface.

– **الجناح Limb** : هو الجزء من الطية الواصل بين مفصلتي المحدب والمقعر المتجاورين.

– **نواة الطية core of fold:** هي الجزء الداخلي من المحدّب أو المقعر، أي أنها تمثل أقدم طبقات المحدّب وأحدث طبقات المقعّر.

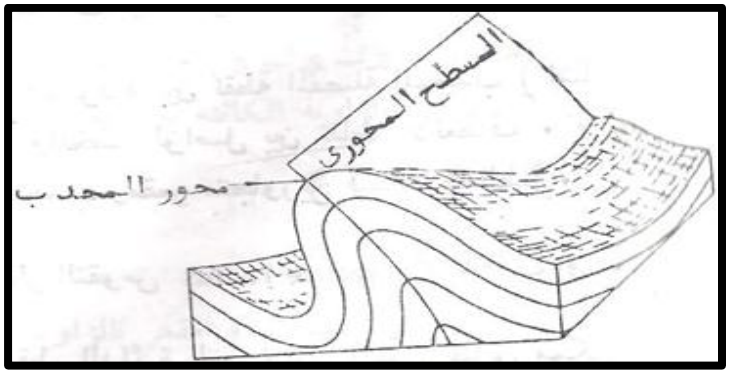
– **نقاط الانعطاف apsis**: هي النقاط التي يحدث عندها التحوّل من المجال الموجب إلى المجال السالب للطية. وشكلياً هي مكان تغير تقوس جناح الطية من الجزء المحدب إلى الجزء المقعر. ويكون تحديد هذه النقاط تقريبياً في حال تكشف أحد جزأي الطية (المحدب أو المقعر) فقط. إن تحديد نقاط الانعطاف لطية ما يلعب دوراً مهماً في تحديد أبعاد هذه الطية. ولذلك فإذا كان تحديدها تقريبياً يجب إيضاح نسبة الدقة في ذلك.

– **خط القمة Crestal Line**: هو الخط الواصل بين نقاط القمة، أي بين أعلى النقاط الواقعة على سطح طبقة محدّبة.

– **خط القاعدة أو خط المنخفض trough line:** هو الخط الواصل بين نقاط القاعدة، أي بين أخفض النقاط الواقعة على سطح طبقة مقعّرة.

– **ذروة المحور axis culmination**: هي أعلى موقع على امتداد محور مقوّس، حيث ينحدر خط المحور من هذه الذروة نحو الجانبين.

– **منخفض المحورaxis depression** : هي أخفض موقع على امتداد محور مقوّس، حيث ينحدر خط المحور من الجانبين نحو هذا المنخفض الشكل (2–5).




**الشكل (2–5): منخفض المحور.**

**2–2–3– القيم المميزة للطيات:** يمكن ضمن مقطع ac تحديد القيم المميزة التالية للطيات الشكل (2–6):

**عرض الطية:Width of fold** هو المسافة بين نقطتي انعطاف متكافئتين متتاليتين.

**سعة الطية:amplitude** هي المسافة بين مفصلة المحدّب ومفصلة المقعر لطية ما مقيسة بشكل عمودي على الخط الواصل بين نقاط الانعطاف.

– **عرض المحدّب أو المقعّر:** تستخدم هذه القيمة بخاصةً عندما لاتتكشّف الطية بكاملها، أي في حالة تكشف جزئها المحدّب أو المقعّر فقط. وهي المسافة بين نقطتي انعطاف متجاورتين. وتعطي هذه القيمة إشارة موجبة (+) عندما تعبّر عن محدّب وإشارة سالبة (–) عندما تعود لمقعر. ويعطي مجموعهما في حالة تجاور المقعر والمحدّب قيمة عرض الطية.

**ارتفاع المحدّب أو المقعر:** هي المسافة العمودية بين نقطة المفصلة للمحدب (إشارة موجبة) أو المقعر (إشارة سالبة) والخط الواصل بين نقاط الانعطاف. ويعطي مجموع هاتين القيمتين بالنسبة لمحدّب ومقعّر متجاورين قيمة سعة الطية.

**نصف قطر التقوّس لمحدّب أو مقعر:** هو نصف قطر الدائرة التي تبدي أفضل تطابق ممكن مع انحناء مجال المفصلة. حيث يتم على الشكل المرسوم حسب المقياس لمقطع ac مطابقة دوائر مختلفة الأقطار حتى نصل إلى أقرب دائرة تطابق انحناء المفصلة. ثم يعاد طول نصف القطر بوساطة المقياس إلى طوله الحقيقي. وتعطى القيمة إشارة موجبة (+) في حالة المحدب وإشارة سالبة (–) في حالة المقعر.

**زاوية الطية لمحدّب أو مقعّر:**هي الزاوية الكائنة بين مماسي جناحي الطية المنطلقين من نقطتي الانعطاف. تعطى القيمة إشارة موجبة (+) في حالة المحدب وإشارة سالبة (–) في حالة المقعر.

موجبة في حالة

**زاوية انتصاب الجناح:** هي الزاوية الكائنة بين مماسي الجناح عند نقطة الانعطاف والخط الواصل بين نقاط الانعطاف. ويعود للطية الواحدة أربع زوايا انتصاب يمكن تمييزها عن بعضها بإضافة كلمة "يمنى أو يسرى" حسب موقعها بالنسبة لمفصلة المحدّب أو المقعّر.

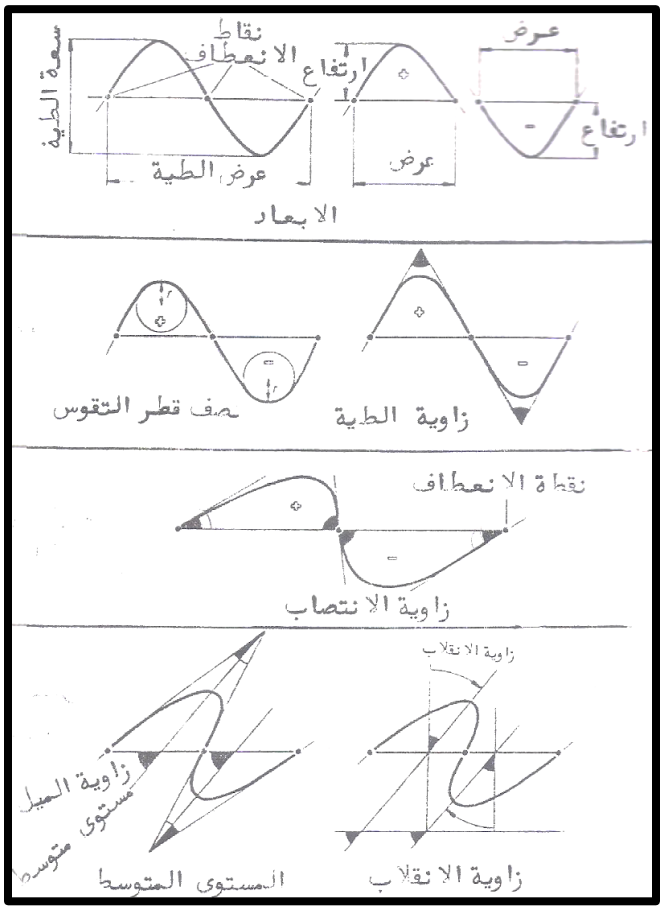
**المستوي المتوسط:** هو المستوي المنصّف للزاوية الكائنة بين جناحي المحدّب أو المقعّر (زاوية الطية). إن الوضعية الفراغية للمستوي المتوسط تطابق الطيات المتناظرة واللامتناظرة السائدة الوضعية الفراغية للمستوي المحوري. أما في الطيات التي تختلف فيها ثخانات الأجنحة فإن وضعية المستوي المتوسط تختلف عن وضعية المستوي المحوري (أنظر الفقرة 2–3–5–3). وتحدّد زاوية ميل المستوي المتوسط ضمن مقطع ac الشاقولي بالزاوية الكائنة بين هذا المستوي والمستوي الأفقي الشكل (2–6).

**زاوية الانقلاب:** تتمثل زاوية الانقلاب ضمن مقطع **ac** الشاقولي لمحدّب أو مقعّر بالزاوية الكائنة بين أثر المستوي المتوسط والشاقول. وحسب هذا التعريف فهي الزاوية المتممة (حتى $90^{\circ}$) زاوية ميل المستوي المتوسط الشكل (2–6). وكذلك فهي تعد أحياناً إنها الزاوية الكائنة بين المستوي الشاقولي والمستوي المحوري. وبالتالي فعندما يتطابق المستوي المتوسط والمستوي المحوري يكون لهذه الزاوية نفس القيمة. أما عند تطابقهما (حالة الطيات ذات الأجنحة مختلفة الثخانة) فيجب ذكر نوع المستوي الذي نسبت إليه هذه الزاوية (المتوسط أم المحوري). يضاف إلى ذلك ذكر جهة الانقلاب وهي الجهة المعاكسة لاتجاه ميل المستوي المتوسط أو المستوي المحوري. وقد يستغنى في بعض الحالات عن ذكر قيمة زاوية الانقلاب، حيث تذكر جهة الانقلاب فقط، كأن يقال: "طيات منقلبة نحو الجنوب الشرقي" كما في السلسلة التدمرية الجنوبية. ولكن يجب الانتباه هنا إلى أن المحدّبات تكون دائماً منغلقة باتجاه انقلابها، بينما تنفتح المقعرات باتجاه انقلابها الشكل (2–6).

**2–3–4– دراسة الطيات من خلال خط المعلم:**

تختلف الطيات في الطبيعة اختلافاً واسعاً. وبهدف تصنيف الأشكال الرئيسية منها يمكن استخدام المصطلحات الخاصة بعناصر الطيات وقيمها المميزة ضمن المقطع ac ولتمييز أشكال الطيات ضمن هذا المقطع يؤخذ "خط معلم" هو عادةً أثر تقاطع السطح

الطبقي مع مقطع ac ويتم رسم مساره بحسب مقياس مناسب وغير مبالغ فيه. فإذا تطابقت مسارات خطوط المعالم كافة لكل سطوح الطبقات المؤلفة للطية فيمكن تمثيلها كلها من خلال خط معلم واحد. أما إذا كانت خطوط المعالم لسطوح الطبقات المختلفة غير متطابقة أي تختلف في مسارها فيجب تمثيل الطية حينئذٍ من خلال خطوط معالم متعددة. ويمكن بالنتيجة وضع سائر معطيات الدراسة الوصفية الخاصة بالطية على شكل بطاقة توثيقية الجدول (2-2).




**الشكل (2-6): القيم المميزة للطيات.**

### 2-3-4-1- تصنيف الطيات حسب وضعية المستوي المتوسط:

تستخدم وضعية المستوي المتوسط كثيراً في تصنيف الطيات، حيث يفضل استخدامه عن استخدام المستوي المحوري لأن تحديده الهندسي أكثر سهولة، كما يمكن تحديده من خلال شبكة سميث. ويكفي لإنشاء المستوي المتوسط لطية ما رسم خط المعلم الممثّل لهذه الطية. أما إنشاء المستوي المحوري فيتطلب رسم كل الوحدة الطبقية أي كل خطوط المعالم العائدة لطبقات الطية.

يمكن تمييز الأشكال التالية ضمن مقطع ac الشكل (2-7):

- **الطية القائمة (محدّب أو مقعّر)**: ينتصب أثر المستوي المتوسط بشكل شاقولي تقريباً (زاوية الانقلاب تقارب الصفر)، ويكون لأجنحة الطية زوايا ميل متساوية، إنما متعاكسة في اتجاه ميلها.
- **الطية المائلة (محدّب أو مقعّر)**: ينحرف المستوي المتوسط بزاوية انقلاب صغيرة عن المستوي الشاقولي. وتختلف أجنحة الطية من حيث زوايا ميلها، إلا أن اتجاهات ميلها تكون متعاكسة.

– **الطية التي يكون أحد جناحيها شديد الميل:** يعد بعض الباحثين أن هذه الطية لاتشكل نمطاً مستقلاً بل مرحلة انتقالية بين الطية المائلة والمقلوبة. ينحرف المستوي المتوسط بزاوية انقلاب متوسطة عن المستوي الشاقولي.ويميل أحد الجناحين بزاوية تقارب الـ $90^{\circ}$ بينما يكون للآخر زاوية ميل أصغر.

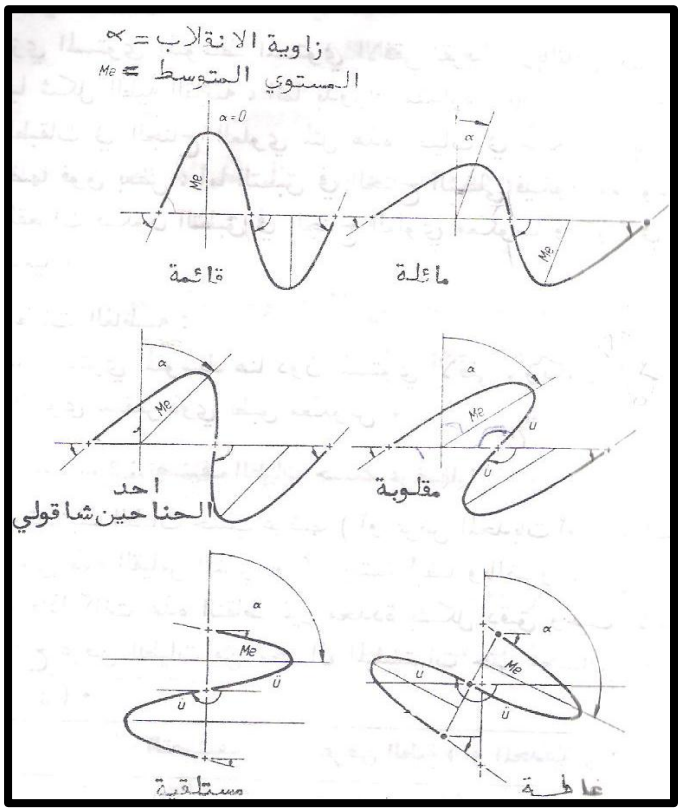
| المميزات | محور B | محدب | مقعر |
|---|---|---|---|
| معطيات مرتبطة باتجاه الشمال (معطيات موجهة) | مقطع ac | | |
| | المستوي المتوسط | | |
| | المستوي المحوري | | |
| | زاوية الانقلاب | | |
| | واتجاهه | | |
| معطيات غير مرتبطة بالشمال (معطيات غير موجهة) | عرض | | |
| | ارتفاع | | |
| | ارتفاع | | |
| | عرض | | |
| | نصف قطر التقوس | | |
| | نصف قطر التقوس | | |
| | عرض | | |
| | زاوية الطي | | |
| | زاوية الانتصاب | يمنى يسرى | يمنى يسرى |
| | الطية الكلية | | |
| | عرض الطية | | |
| | سعة الطية | | |
| | سعة الطية | | |
| | عرض الطية | | |

**الجدول (2–2): بطاقة توثيقية للطية.**

– **الطية المقلوبة (محدّب أو مقعّر):** ينحرف المستوي المتوسط بزاوية انقلاب متوسطة حتى الكبيرة (قد تزيد عن $40^{\circ}$) عن المستوي الشاقولي. ويكون لكلا الجناحين اتجاه الميل نفسه، أي أن أحدهما يكون مقلوباً. وبالتالي فإن قيمة زاوية ميل هذا الجناح تزيد عن $90^{\circ}$ حيث تكتب في هذه الحالة الزاوية المكملة (إلى $180^{\circ}$) مع إضافة حرف "م" مثلاً (م $60^{\circ}$=$120^{\circ}$).

– **الطية المستلقية (محدّب أو مقعّر):** يوازي المستوي المتوسط المستوس الفقي تقريباً، وبالتالي فإن شكل الطية يشابه غالباً شكل الطية القائنة، إنما بدوران مقداره $90^{\circ}$ حول محور B. تتوضع الطبقات في الجناح العلوي لمثل هذه الطيات في خالة المحدبات بشكل طبيعي بعضها فوق بعض، أما التطبق في الجناح السفلي فيكونمعكوساً. أما في حالة المقعرات فيكون التطبق في الجناح العلوي معكوساً ويكون في الجناح السفلي طبيعياً.

– **الطيات الغاطسة:** ينحدر المستوي المتويط هنا دون المستوي الأفقي، ويكون الجناح السفلي للمحدّب والعلوي للمقعر ذوي تطبق معكوس.




**الشكل (2–7): تصنيف الطيات حسب وضعية المستوي المتوسط.**

**2–3–4–2– تصنيف الطيات حسب عرضها:** يعتمد تصنيف الطيات حسب عرضها (أو عرض المحدبات أو المقعرات) ضمن مقطع ac على نظام القياس المتري. كما تعتمد أيضاً وبالضرورة على تحديد نقاط الانعطاف. فإذا كانت هذه النقاط غير محددة بشكل دقيق وجبت الإشارة إلى ذلك. يتراوح عرض الطيات من مجال الميليمترات حتى مجال الكيلومترات الجدول (2–3).

| التصنيف | عرض الطية (أو المحدب أو المقعر) بالمتر |
|---|---|
| مجال الميليمتر | دون 0.01 |
| مجال السنتيمتر | 0.1–0.01 |
| مجال الديسيمتر | 1.00–0.1 |
| مجال المتر | 10–1.00 |
| مجال الديكامتر | 100–10 |
| مجال الهيكتومتر | 1000–100 |
| مجال الكيلومتر | فوق 1000 |

**جدول (2–3): تصنيف الطيات حسب عرضها.**

يوجد تصنيف آخر للطيات يقسّمها إلى فئات حسب عرضها الذي يتناقص مع ازدياد رقم الفئة (حسب Schwad,1956):

– **طيات الفئة الأولى:** يزيد عرضها على 10كم وتتوضّح من خلال الخرائط الجيولوجية الإقليمية.

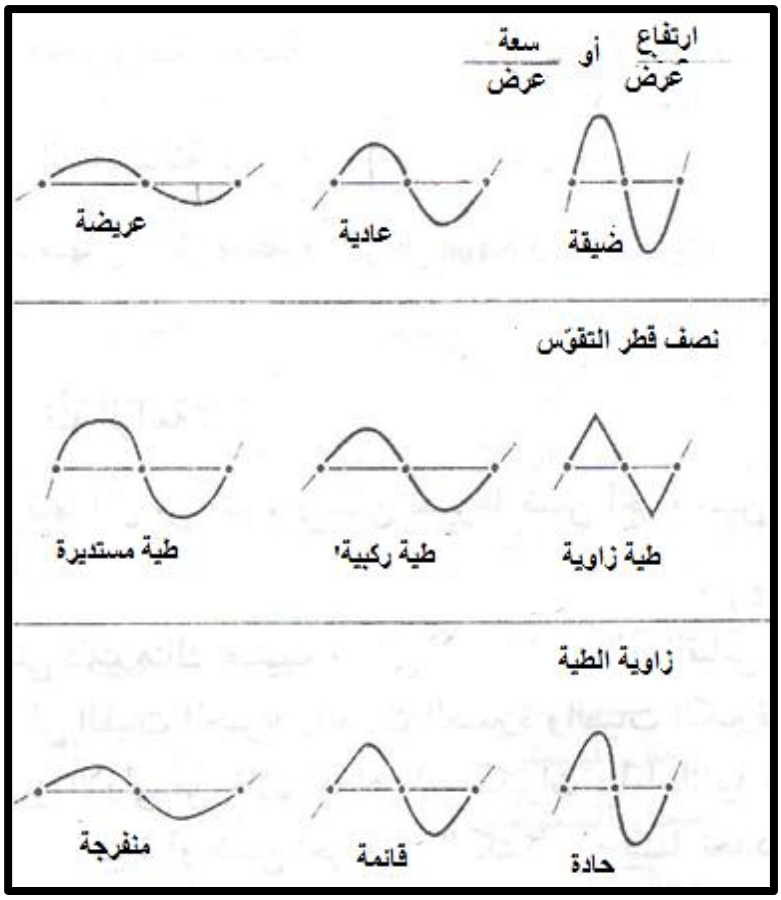
– **طيات الفئة الثانية:** يتراوح عرضها بين عدة مئات من الأمتار وعدة من كيلومترات وتتوضح من خلال الخرائط الجيولوجية الخاصة.

– **طيات الفئة الثالثة:** يتراوح عرضها بين متر واحد وأكثر من 100م وتكونمميزة ضمن التكشفات والمقاطع.

– **طيات الفئة الرابعة:** يكون عرضها أقل من متر، ويمكن تمييزها ضمن أجزاء من التكشفات والعينات الصخرية.

وعلاوة على ذلك هناك تصنيف وصفي لايستخدم نظام القياس المتري، وهو يصنف الطيات إلى الطيات المجهرية والطيات الصغيرة والطيات الكبيرة أو العملاقة، حيث يمكن تمييز الأولى من خلال المجاهر أو المكبرات، أما الثانية فتميز ضمن العينات الصخرية الكبيرة أو ضمن أجزاء من التكشفات، بينما تحدد الثالثة ضمن الخرائط الجيولوجية.

**2-3-4-3- تصنيف الطيات حسب نسبة سعة الطية إلى عرضها:** يلزم هنا تحديد نقاط الانعطاف ومفصلة الطية. ويمكن تصنيف الطيات حسب نسبة سعتها إلى عرضها إلى ثلاثة أنماط هي الشكل (2-8):




**الشكل (2-8): تصنيف الطيات من خلال القيم المميزة.**

– **طيات عريضة:** تكون سعتها أصغر بوضوح من نصف عرضها.

– **طيات عادية:** تكون سعتها مساوية تقريباً نصف عرضها.

– **طيات ضيقة:** تكون سعتها أكبر بوضوح من نصف عرضها.

ويمكن تطبيق هذا التصنيف أيضاً على المحدبات (أو المقعرات) العريضة والعادية والضيقة الشكل (2-8) حسب نسبة ارتفاعها إلى عرضها.

**2-3-4-4- تصنيف الطيات حسب نصف قطر التقوس:**

يستخدم هذا التصنيف بخاصة في الطيات التي لايتكشف منها سوى مجال المفصلة. حيث يمكن تصنيف الطيات حسبه إلى ثلاثة أنواع رئيسة هي الشكل (2-8):

- **الطية المستديرة:** وهي ذات نصف قطر تقوس كبير، والأجنحة مقوسة بشكل واضح.
- **الطية الركبية:** وهي ذات مفصلة مستديرة، لكن نصف قطر التقوّس صغير بالنسبة لارتفاع المحدّب أو المقعر المدروس، أما أجنحة الطية فمستوية أو مقوسة بشكل خفيف.
- **الطية الزاوية:** تلتقي الأجنحة المستوية في هذا النوع من الطيات بشكل زاوي ويكون نصف قطر التقوس صغيراً جداً.

إن أكثر أنواع الطيات شيوعاً في الطبيعة هي الطيات الركبية. وتجب الإشارة على أنه لايمكن استنتاج الشكل الكلي لمحدّب أو مقعر من خلال معرفتنا لمجال التقوّس فقط. إذ يمكن مثلاً لمفصلة طية زاوية كبيرة مدرروسة في مقطع صغير أن تشابه مفصلة طية مستديرة صغيرة. ورغم ذلك يمكن اعتبار نصف قطر التقوّس كأساس في التصنيف خاصة عندما يتعذر تحديد عرض الطية. أما في حال كون عرض المحدّب أو المقعر معروفاً فإنه يمكن حساب معامل التقوّس الذي يعطي فكرة عن الشكل العام للطية بالعلاقة التالية:

$$\text{معامل التقوّس} = \frac{\text{نصف قطر التقوس}}{\text{عرض الطية (محدباً أو مقعراً}}$$

تبين هذه العلاقة أنه كلما تناقصت قيمة معامل التقوس اقترب شكل المحدب أو المقعر المدروس من الطية الزاوية، بينما تدل معاملات التقوس الكبيرة على الطيات المستديرة.

**2-3-4-5- التصنيف حسب زاوية الطية:**

تصنف المحدبات أو المقعرات حسب زاويتها كما يلي الشكل (2-8):

- **المحدّب أو المقعر منفرج الزاوية:** زاوية الطية أكبر من $90^{\circ}$ بشكل واضح.
- **المحدّب أو المقعر قائم الزاوية:** زاوية الطية قريبة من $90^{\circ}$.
- **المحدّب أو المقعر حاد الزاوية:** زاوية الطية أصغر من $90^{\circ}$ بشكل واضح.

| تصنيف الطية | زاوية الطية (درجة) |
|---|---|
| واسعة | $180^{\circ}$-$120^{\circ}$ |
| مفتوحة | $120^{\circ}$-$70^{\circ}$ |
| مغلقة | $70^{\circ}$-$30^{\circ}$ |
| ضيقة | $30^{\circ}$-$10^{\circ}$ |
| متساوية الميل | $10^{\circ}$-$0^{\circ}$ |

**جدول (2-4): تصنيف (Fleuty, 1964) للطيات حسب زواياها.**

**2-3-4-6- تصنيف الطيات حسب موقعها ضمن مثلث الوضعيات:**

تصنف الطيات ضمن مخطط بياني مثلثي بالاعتماد على زاوية تغريق محور الطي وزاوية ميل المستوي المتوسط، حيث تمثّل كل طبقة بنقطة (Rickard,1971) مما يساعد على مقارنة الوضعيات الفراغية لعدد كبير من الطيات ضمن مخطط بياني واحد. إلا أن هذا النوع من التصنيف لايتضمن تحديد علاقة عناصر الطيات مع الشمال الجغرافي. يمثّل الراس الأيسر للمثلث

الشكل (2–9) طيات قائمة ذات محور أفقي (0°) ومستوي متوسط شاقولي 90°)، بينما يمثل الرأس الأيمن للمثلث طيات مستلقية ذات محور أفقي (0°) ومستوي متوسط أفقي (0°) أما الرأس العلوي للمثلث فيمثل الطيات ذات المحور الشاقولي (90°) والمستوي المتوسط الشاقولي (90°) (طيات شاقولية). تمثل النقاط الواقعة على أضلاع المثلث تغيرات لتغريق المحور (0–90°) عندما يكون المستوي المتوسط شاقولياً (الضلع الأيسر) أو تغيرات للإثنين معاً (الضلع الأيمن). أما النقاط الواقعة ضمن المثلث فتمثّل طيات تنحرف فيها زوايا ميل كل من المحور والمستوي المتوسط عن قيمة (90°). يتم تحديد موقع النقطة الممثلة لمحدب أو مقعر عرف منه زاوية تغريق محوره وزاوية ميل مستويه المتوسط ضمن مثلث الوضعيات على النحو التالي الشكل (2–9):

– تحدّد النقطة الموافقة لزاوية تغريق المحور على الضلع الأيسر للمثلث.

– تحدد النقطة الموافقة لزاوية ميل المستوي المتوسط على الضلع الأسفل.

– تتم بدءاً من النقطة الأخيرة متابعة المستقيم الموازي للضلع الأيسر للمثلث حتى يتقاطع مع الخط المنحني الآتي من موقع النقطة الأولى.

تمثل نقطة التقاطع الناتجة موقع المحدب أو المقعر المدروس ضمن مثلث الوضعيات. ويفضل استخدام المستوي المتوسط (بالطريقة الموصوفة) على استخدام المستوي المحوري لأن الأول كمنصف لزاوية الطية ضمن مقطع ac يمثل مستوياً هندسياً، بينما يجب عند استخدام السطح المحوري إعادته إلى مستوي محوري أولاً.

مثال: تمثل النقطة المستقلة في الشكل (2–9) طية ذات محور خفيف التغريق ومستوي متوسط شديد الميل.

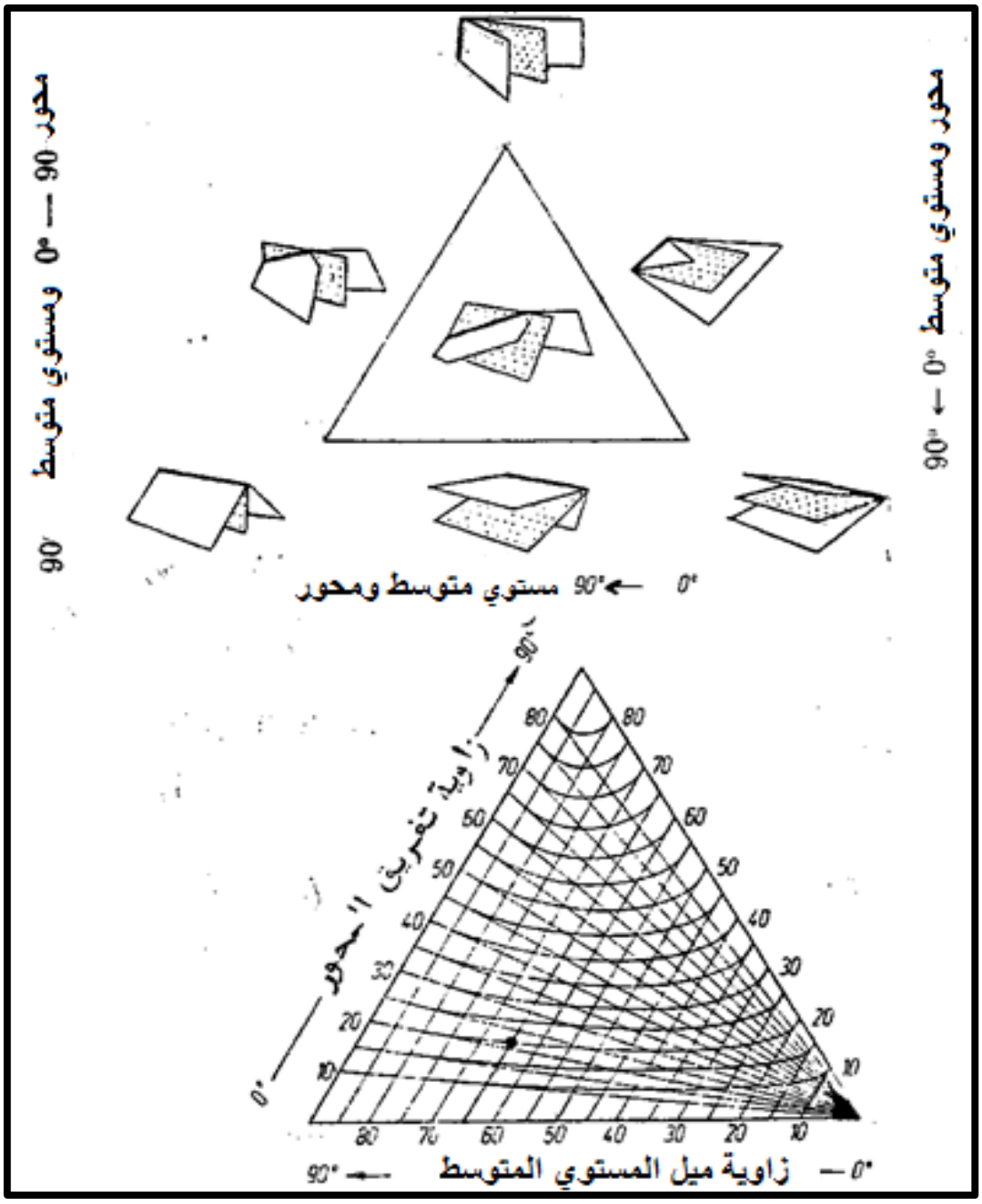
**2–3–4–7– أشكال خاصة للطيات:**

**أ– الطيات اللامتناظرة:**

يعني عدم التناظر في الطيات أن هناك اختلافاً في طول جناحي المحدّب أو المقعر المدروس، فبينما يكون جناحا المحدب أو المقعر المتناظر متساويي الطول، يكون أحد الجناحين المحصور بين نقطة المفصلة ونقطة الانعطاف في المحدّب أو المقعر اللامتناظر أقصر من الجناح الآخر. يرتبط هذا التعريف بالخط الواصل بين نقاط الانعطاف الشكل (2–10–a) هذا ويجب الانتباه إلى أن اصطلاح "طية مائلة" الشكل (2–7) المعتمد على تعريف زاوية الانقلاب لا يعني بالضرورة طية لامتناظرة لأن تعريف الطيات اللامتناظرة وتعريف الطيات المائلة هما تعريفان مستقلان عن بعضهما لدى وصف المحدبات والمقعرات. فإذا كان المستوي المتوسط لطية متناظرة (متساوية في طول أجنحتها) مائلاً على الأفق فإن الطية بالتالي مائلة (ذات انقلاب، الشكل 2–10–b). وتبدو هذه الطية في مقطعها فوق خط الأفق وكأنها طية لامتناظرة (الشكل 2–10–c). يمكن أيضاً لطية لامتناظرة أن تكون ذات زاوية انقلاب تساوي الصفر (الشكل 2–10–d). وهي تبدو في مقطعها فوق خط الأفق كأنها طية متناظرة (الشكل 2–10–e).

إن للطيات اللامتناظرة تناظراً أحادي الميل يكون فيه مستوي ac مستوي التناظر الوحيد (أنظر الفقرة 2–2).

ينطبق المستوي المحوري في حالة الطيات اللامتناظرة ذات الأجنحة متساوية الثخانة على المستوي المتوسط، أي أن أثر المستوي المستوي المتوسط في مقطع ac يمر في هذه الحالة من نقاط المفصلة لكل خطوط المعلم العائدة لمحدّب أو مقعّر. ومن ناحية أخرى فإن أثر المستوي المتوسط في الطيات المتناظرة يصنع زاوية قائمة مع الخط الواصل بين نقاط الانعطاف، بينما تنحرف هذه الزاوية في الطيات اللامتناظرة قليلاً أو كثيراً عن القيمة 90°.

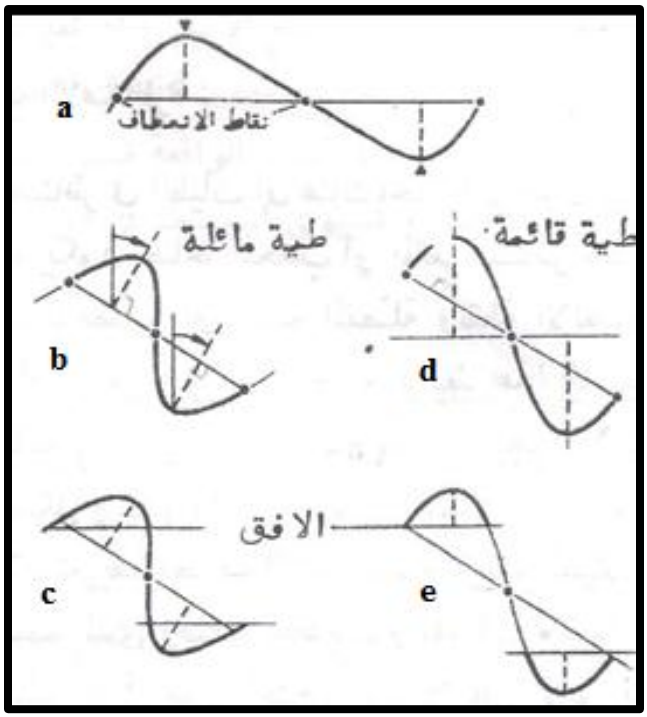



**الشكل (2-9): تصنيف الطيات حسب موقعها في مثلث الوضعيات.**

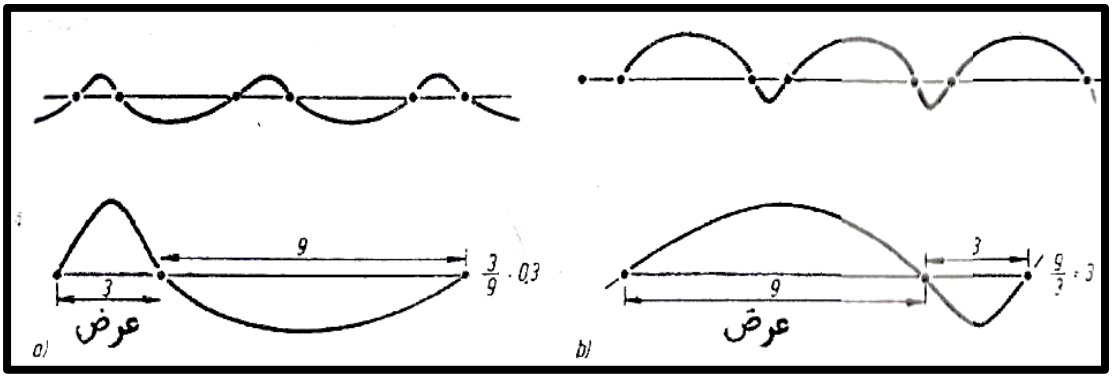
**ب- الطيات الفسطونية festoon folds والطيات القنطرية areade folds**

يميز اصطلاح الطية الفسطونية والطية القنطرية النسبة بين المحدّب والمقعر المؤلفين لطية كاملة. ففي **الطية الفسطونية** يكون عرض المقعر كبيراً (مقعراً عريضاً) بينما يكون نصف قطر التقوّس للمحدّب صغيراً وبالتالي فهو محدّب ضيّق، وعلى العكس يكون **للطية القنطرية** محدّب عريض ومقعّر ضيّق الشكل (2-11).

تكون نسبة عرض المحدّب إلى عرض المقعّر في الطية الفسطونية أصغر من الواحد، أما في الطيات القنطرية فتكون هذه النسبة أكبر من الواحد. ينشأ هذان النوعان من الطيات عن الانفعال المختلف بين الطبقات الصخرية العلوية والسفلية عندما تتعرض لتشوّه انضغاطي مشترك.




**الشكل (2–10): الطيات اللامتناظرة. a– طية لامتناظرة غير منقلبة. b– طية متناظرة منقلبة. c– طية متناظرة منقلبة في مقطع فوق أو تحت خط الأفق. d– طية لامتناظرة غير منقلبة. e– طية لامتناظرة غير منقلبة**



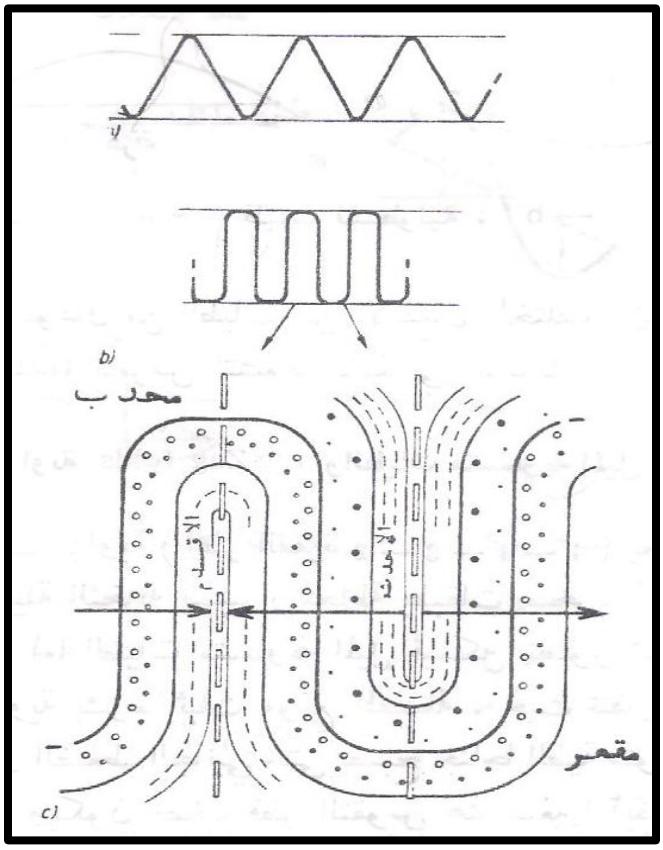

**الشكل (2–11): a– طيات فسطونية. b– طيات قنطرية.**

**جـ– الطيات الزاوية Zig-Zag folds والطيات متساوية الميل Isoclinal folds:**

تتشكل **الطيات الزاوية** (أنظر الفقرة 2–3–4–4) بخاصة في الطبقات الصخرية الصلبة قليلة الثخانة نسبياً والمحاطة بطبقات صخرية أضعف منها (الشكل (2–12–a).

أما **الطيات متساوية الميل** فيمكن تصوّر نشوئها بأنه استمرار لتطور الطيات الزاوية بشرط ثبات موقع المفصلة، حيث تتقارب نقاط الانعطاف نتيجة التضييق بتأثير الضغط الجانبي حتى يصبح جناحا الطية متوازيين تقريباً الشكل (2–12–b). ويكون نصف قطر التقوس هنا صغيراً أيضاً. ولكن يصعب من وجهة النظر الحركية شرح نشوء هذه الطيات بدءاً من الطيات الزاوية،

بخاصةً إذا وضعنا سلوك المواد الصخرية الموجودة في نوى الطيات في الحسبان. وما يجدر ذكره أنه يمكن للطبقات العصية Competent أن تطوى بشكل متساوي الميل، بينما تتشوّه الطبقات الطيّعة Incompetent التي تقع فوقها وتحتها من خلال تشوهات داخلية دون أن يكون لها مظهر واضح. تتطابق الوضعية الفراغية (الاتجاه والميل) لكلا الجناحين في الطيات متسوية الميل النموذجية، حيث أن تمييز المحدبات عن المقعرات متساوية الميل في حال عدم تكشف مفاصلها يتم من خلال تحديد نواة البنية، فإذا كانت مؤلفة من الطبقات الأقدم فإن البنية تمثّل محدّباً، أما إذا كانت أحدث فالبنية تمثل مقعراً الشكل (2-12-c).




**الشكل (2-12): a- الطيات الزاوية. b- الطيات متساوية الميل. c- تمييز المحدبات والمقعرات في الطيات متساوية الميل.**

**د- الطيات القلنسوية والطيات الصندوقية والطيات المروحية والطيات القطرية:**

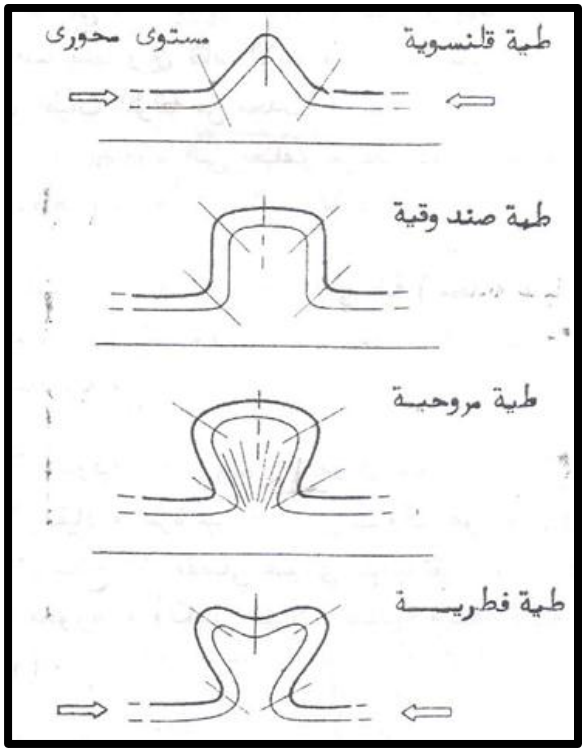
الصفة الأساسية المشتركة لهذه الطيات هي عدد المستويات المحورية (المستويات المتوسطة) في الطية الكاملة الذي يزيد على اثنين (ثلاثة أو أربعة أو أكثر)، وتسود في هذا النوع من الطيات الأشكال المحدبة، وتكون الأجزاء الفاصلة بين هذه المحدبات مطوية بشكل ضعيف أو مستوية وقد تتشكل أحياناً أشكال مقعرة منفردة. تدعى النقاط التي تحدّد بداية أجنحة المحدب (أو المقعر) "النقاط الحدودية" وذلك للتفريق فيما بينها وبين نقاط الانعطاف العائدة للطيات العادية. وتجدر الإشارة إلى أن الطيات المؤلفة من محدب أو مقعر منفرد تدعى "الطيات أحادية الجانب monolateral folds" التي يختلف تعريفها طبعاً عن تعريف الطيات أحادية الميل.

**الطية القلنسوية mitre fold:** هي طية (محدّبة غالباً) قائمة ذات أجنحة شبه مستوية تشابه القلنسوة في شكلها العام الشكل (2-13) وتتميز بوجود ثلاثة مستويات محورية.

**الطية الصندوقية box fold:** تبدو في مقطع ac على شكل جناحين شبه مستويين لايلتقيان مباشرةً عبر مفصلة بل وكما هو الحال في الصندوق ينفصلان من خلال سطح آخر مفصلي عمودي عليهما تقريباً. وتبدي هذه الطية أربعة مستويات محورية. وتكون الطيات الصندوقية عادة قائمة دون انقلاب الشكل (2-13).

**الطية المروحية fan fold:** تتميز بجناحين مقلوبين يميلان باتجاه بعضهما ويتعلق عدد السطوح المحورية بالتقوسات الحاصلة لخطوط المعلم التي تدرس الطية من خلالها، حيث توجد أربعة سطوح محورية على الأقل.

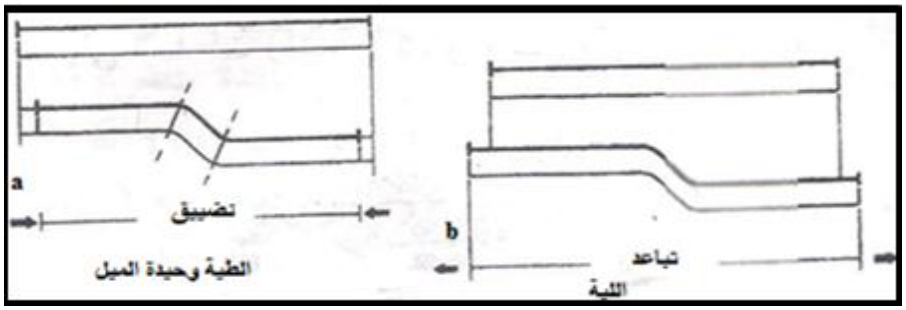
**الطية الفطرية mushroom fold:** هي طية من النموذج المروحي، إلا أن جزئها العلوي يبدي تقعراً، ويشبه شكلها العام في مقطع ac شكل الفطر ذي الحواف المرتفعة والوسط المنخفض. يزيد عدد المستويات المحورية (المستويات المتوسطة) هنا على أربعة، ويعزى ذلك إلى تقوّس الجزء العلوي. ويعبر المستوي المحوري للمقعر العلوي عن انقلاب هذه الطية الشكل (2-13).




**الشكل (2-13): الطيات أحادية الجانب.**

**هـ- الطية أحادية الميل monoclonal fold:**

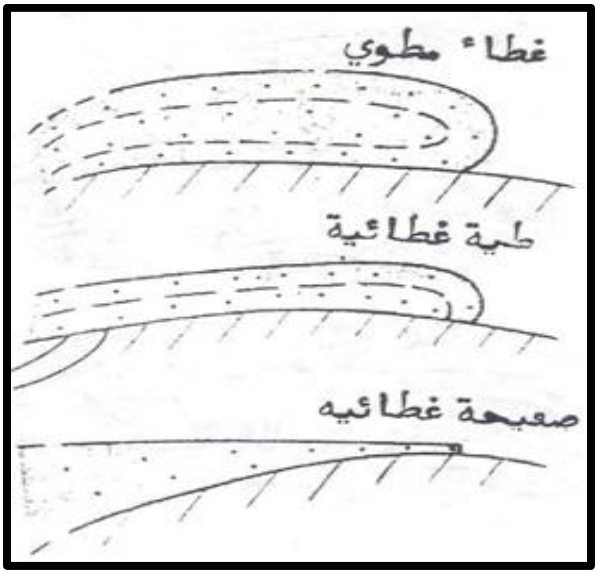
الطية أحادية الميل هي طية لامتناظرة أحد ناحيها طويل (يمثّل التطبق نفسه) وينتقل عبر جناح قصير مرةً أخرى إلى الوضعية الأصلية للتطبق. أي أن هذه الطية تتألف من نصف محدّب ونصف مقعر ذات تقوسين ومستويين متوسطين يحيطان بجناح الطية القصير الشكل (2-14-a). يجب التفريق من ناحية أخرى بين الطية أحادية الميل التي يعود نشوؤها إلى قوى الضغط وبين اللية flexure التي يعود نشوؤها إلى قوى الشد، حيث تتشابه هاتان البنيتان في المظهر العام، إلا أن الجناح القصير في الأولى يحافظ على الثخانة الأصلية للطبقات إن لم تكن قد ازدادت نتيجة الطي. بينما يكون هذا الجناح في اللية مترققاً الشكل (2-14-b).




**الشكل (2–14): a– الطية وحيدة الميل، b– الثنية.**

**و– الغطاءات المطوية fold nappes (الغطاءات nappes):**

**الغطاءات المطوية:** عبارة عن الجزء المحدّب أو المقعّر لطية مستلقية الذي تحرّك أثناء عملية الطي فوق قاعدة ما لمسافات طويلة تقاس بالكيلومترات الشكل (2–15).

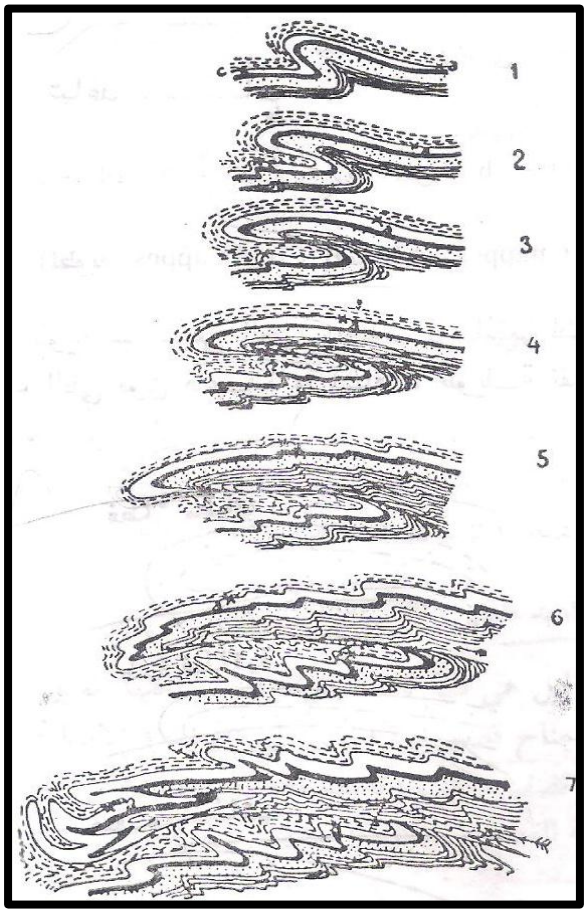



**الشكل (2–15): الغطاءات التكتونية.**

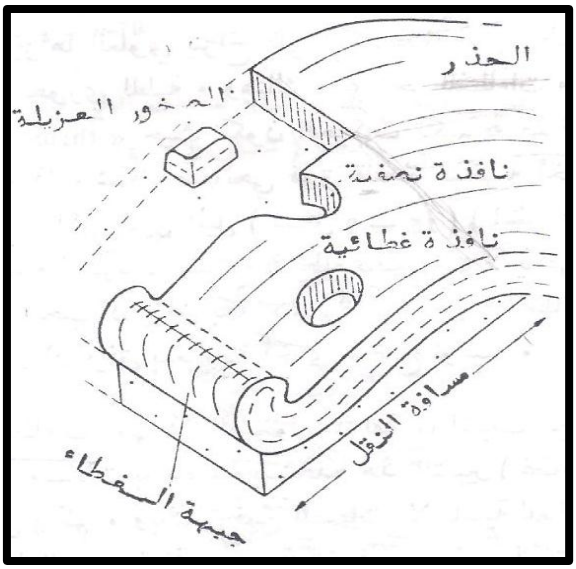
إن إصطلاح "غطاء" يميز من وجهة النظر التكتونية: يمثّل تراكباً ضخماً لنوعين صخريين مختلفين، وهذا التركيب ليس ترسيبياً بل ناتجاً عن الأفعال التكتونية. ينشأ الغطاء المطوي نتيجة ازدياد شدة عمليات الطي التي تؤدي إلى تكون الطيات المستلقية على مساحات واسعة الشكل (2–15 و2–16). أما "الطيات الغطائية" فهي تنشأ بدءاً من الطيات المستلقية بحيث أن جزأها العلوي ينزاح على شكل غطاء فوق سطح صدعي تراكبي موازٍ غالباً للسطح المحوري للطية.وهناك نوع آخر للغطاءات وهو "الصفائح الغطائية" حيث تكون الحركات تكسرية صرفة وتؤدي إلى امتداد سطح صدعي تراكبي قليل الميل الشكل (2–15) (أنظر الفقرة 4–7–3). وهكذا فإن الاستخدام المنفرد لاصطلاح "غطاء تكتوني" لايكفي لوصف البنيات آنفة الذكر، ولذلك يجب أن يرفق بكلمات موضّحة مثل "الغطاء المطوي" أو "الطية الغطائية" أو أن يرفق بمعطيات أخرى توضّح نوعيته.

إن **تعريف الغطاءات** يعني أن الصخور المؤلفة لها انتقلت من مكانها الأصلي الذي نشأت فيه إلى مسافات بعيدة. ويستخدم هذا التعبير (غطاء) عندما تتجاوز مسافة النقل (3–5كم). وبالتالي فمن الصفات الأساسية للغطاءات أن سحنتها الليتولوجية وعمرها الستراتيغرافي ودرجة تحولها ونمطها التكتوني يختلف عن تلك العائدة للصخور التي تستند إليها هذه الغطاءات والتي تجاورها. إن الإحاطة بالامتدادات الكلية للغطاءات تتم من خلال الخرائط الجيولوجية حيث يندر أن يكون ذلك ممكناً من خلال التكشفات

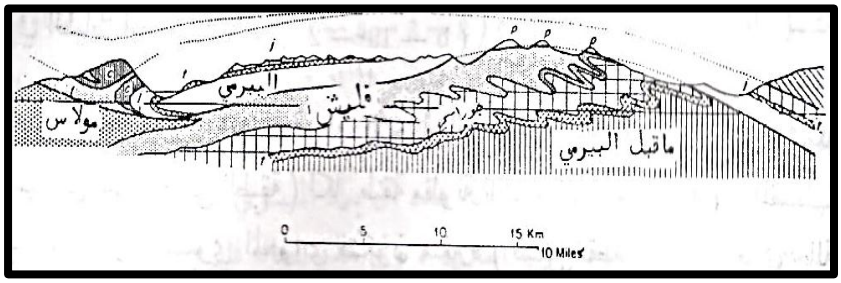
الجيولوجية المنفردة بسبب الأبعاد الكبيرة لهذه الغطاءات. يمكن للغطاءات أن تضم بنيات تكتونية صغيرة تشاهد على مستوى الحقل (طيات مستلقية مثلاً) وهذه تعد بمثابة مميزات شكلية للغطاءات المطوية أو الطيات الغطائية. إن مسافة النقل للأغطية هي المسافة بين جذر الغطاء وجبهته الشكل (2–17). إلا أنه يصعب أحياناً تحديد مسافة النقل عندما يكون جذر الغطاء غير متكشف أو تعرض لتغيير موقعه بتأثير عمليات تكتونية لاحقة. يؤدي تعرض الغطاءات إلى عمليات التجوية إلى إحداث "فتحات" تحدث من خلالها تعرية صخور الغطاء حتى تصل إلى صخور القاعدة التي يستند إليها. فإذا كانت الصخور المحيطة بمنطقة التعرية (أو الفتحات) تعود للغطاء، دعيت هذه المنطقة "نافذة غطائية nappe inlier". أما عندما تحيط الصخور الغطائية بجهة واحدة من المنطقة المعراة فتدعى "نافذة غطائية نصفية". ومن ناحية أخرى تدعى الأجزاء المتبقية من الغطاء بعد حصول التعرية "الصخور العزيلة outlier" وهذه قد تكون بقايا للجناح المقلوب للغطاء المطوي مثلاً فوق القاعدة التي أسند إليها الشكل (2–17). لقد لعبت نظرية الغطاءات دوراً رئيساً في تفسير البنيات التكتونية المعقدة لجبال الألب الشكل (2–18). وفي الواقع فقد وصفت الغطاءات في معظم الأحزمة الأوروجينية في العالم.




**الشكل (2–16): تطور الغطاءات بدءاً من الطيات المستلقية.**




**الشكل (2-17): المصطلحات الخاصة بالغطاءات التكتونية.**



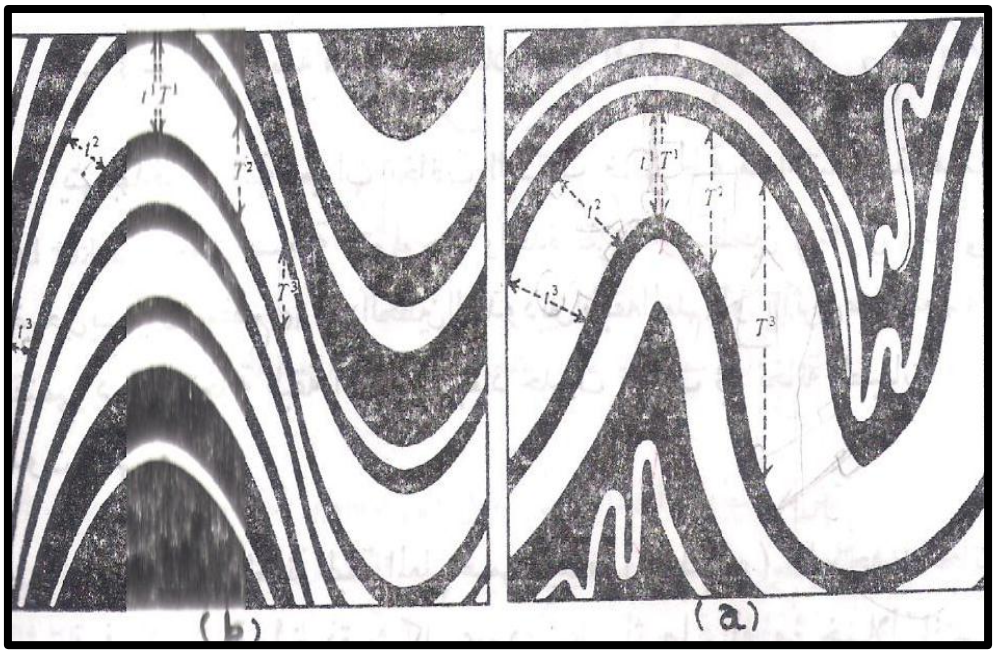

**الشكل (2-18): مقطع عرضي لغطاء Glarus في جبال الألب.**

### 2-3-5- دراسة الطيات من خلال طبقة المعلم:

يتم بهدف دراسة تغيرات ثخانات الطبقات ضمن طية ما اختيار طبقة معلم marker bed تتميز بسحنة ليتولوجية واحدة تقريباً وبسطحين (علوي وسفلي) واضحين يسميان في مقطع ac " أثري طبقة المعلم". وتقتضي دراسة ثخانة طبقة المعلم استبعاد حدوث تغيرات في ثخانة الطبقات قبل حدوث الطي. ندرس تغيرات ثخانة طبقة المعلم ضمن طية ما (مقطع ac) أما بتحديد ثخانتها الحقيقية في كل نقطة مأخوذة بشكل عمودي على أثريها، أو من خلال انشاء مستقيمات ضمن طبقة المعلم بشكل موازٍ للمستوي المتوسط (المستوي المحوري)، أو من خلال إنشاء ما يدعى خطوط تساوي الميل.

### 2-3-5-1- تصنيف الطيات حسب تغيرات ثخانة طبقاتها:

تصنف الطيات حسب تغيرات ثخانة طبقاتها إلى "الطية المتوازية parallel fold" و "الطية المتشابهة similar fold". ويعود هذا التصنيف إلى Van Hise,1896) الذي عدّ الطيات المتوازية هي التي تبقى آثار الطبقات فيها متوازية الشكل (2-19-a) تتميز الطيات المتوازية بأن الثخانة الحقيقية (t): الثخانة المقيسة بشكل عمودي على سطحي الطبقة لكل طبقة مطوية ثابتة. أما الثخانة (T) المقيسة بشكل موازٍ للمستوي المحوري فتكون متغيرة (ضمن مقطع ac). أما في حالة الطيات المتشابهة فإن (T) تبقى ثابتة في الحالة المثالية بينما تكون (t) متغيرة الشكل (2-19).

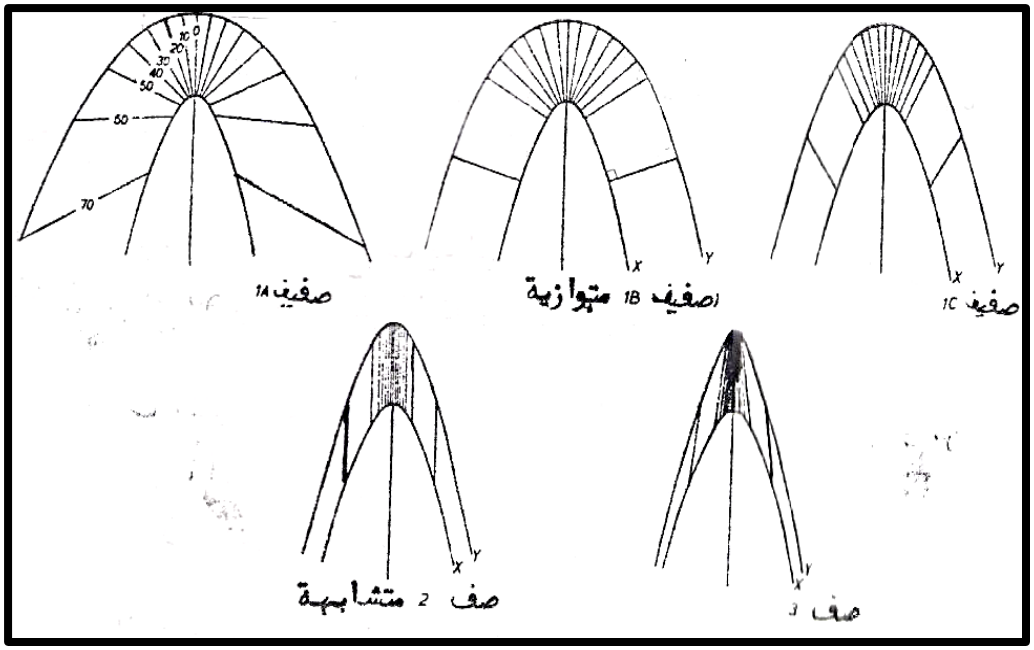



**الشكل (2–19): النمطان الأساسيان للطيات في الصخور المتطبقة.**

**a– الطيات المتوازية. b–الطيات المتشابهة. t: الثخانة الحقيقية. T: الثخانة المقيسة بشكل موازٍ للمستوي المحوري.**

### 2–3–5–2– تصنيف الطيات حسب ترتيب خطوط تساوي الميل:

تمثل الطيات المتوازية والطيات المتشابهة حالات خاصة ضمن إطار تصنيف أكثر عمومية وضع من قبل (Ramsay,1967 واعتمد فيه على ترتيب خطوط تساوي الميل، وهي مستقيمات تصل بين النقاط التي تتساوى عندها زاوايا ميل أثري طبقة المعلم. وتعطى طريقة خطوط تساوي الميل الأفضلية في دراسة طبقات المعلم لأنها تشمل الطريقة الموصوفة في الفقرة (2–3–5–1). الشكل (2–20).



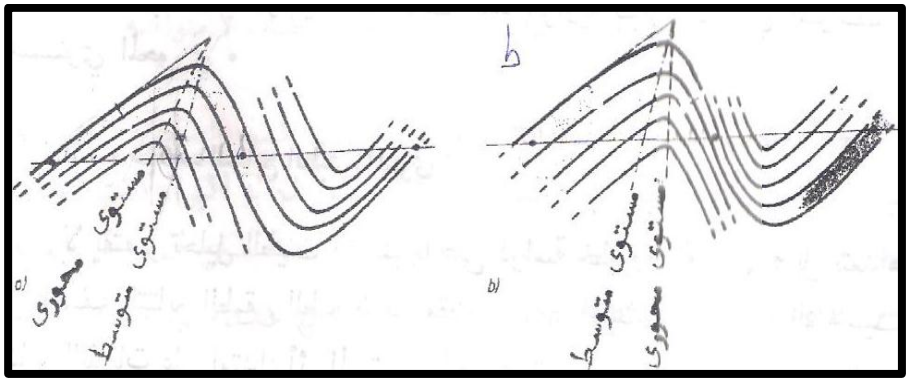

**الشكل (2–20): تصنيف الطيات حسب ترتيب خطوط تساوي الميل المرسومة هنا بفواصل $10^{\circ}$.**

### 2-3-5-3- الطيات ذات الأجنحة مختلفة الثخانة:

تدعى المحدبات أو المقعرات التي تتساوى فيها الثخانة الحقيقية للأجنحة "الطيات ذات الأجنحة متساوية الثخانة". أما إذا اختلفت ثخانة الأجنحة العائدة لطية واحدة فتدعى عندئذٍ "الطيات ذات الأجنحة مختلفة الثخانة"، وتكون عادةً لامتناظرة، أي أن أطوال أجنحتها مختلفة الشكل (2-20). يعود نشوء الطيات ذات الأجنحة مختلفة الثخانة إلى الاختلاف في شدة التشوّه (التشوّه الداخلي) لأجنحة المحدب أو المقعر المدروس، أو إلى عمليات التصدّع التي تكون أشد على أحد الجناحين من الجناح الآخر. إلا أنه يجب التحقق مما إذا كان اختلاف الثخانة باتجاه معامد لمحور B يعود لأسباب ترسيبية أولية. يوجد نمطان ممكنان لهذا النوع من الطيات الشكل (2-21) هما:

- طيات مائلة أو مقلوبة يكون فيها الجناح شديد الميل قصيراً تثخيناً أما الجناح الأقل ميلاً فأقل ثخانةً وأكثر طولاً (طيات تورينغن حسب Schwan ,1958).
- طيات يكون الجناح فيها شديد الميل (أو المقلوب) قصيراً ومترققاً، بينما يكون الجناح الأقل ميلاص أكثر ثخانةً وطولاً (طيات الراين).

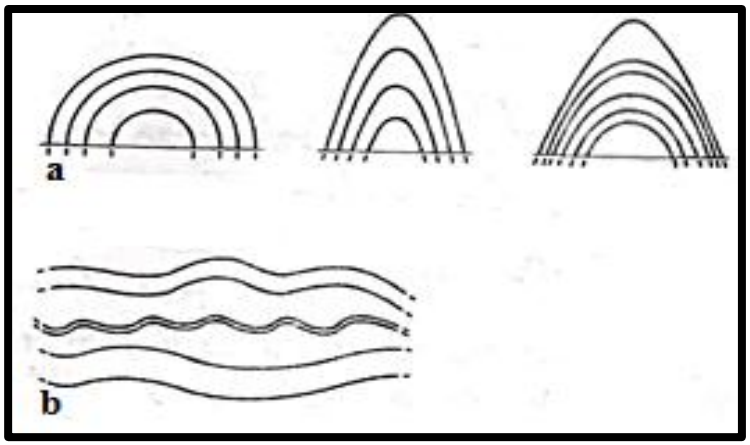
يجب التنويه هنا إلى أن القيام بقياس الثخانة سواء في الحقل أو من خلال المخططات يجب أن يتم حسب مقطع ac لأن المقاطع الأخرى المنحرفة عن محور B يمكن أن تؤدي إلى قياسات خاطئة للثخانة الشكل (2-21). إن المستوي المتوسط والمستوي المحوري للمحدبات أو المقعرات ذات الأجنحة مختلفة الثخانة يكونان غير منطبقين الشكل (2-21). ولذلك يجب عند تحديد زاوية الانقلاب أن يشار فيما إذا كانت هذه الزاوية تتبع للمستوي المتوسط أم للمستوي المحوري.




**الشكل (2-21): الطيات ذات الأجنحة مختلفة الثخانة. a- طيات تورينغن. b- طيات الراين.**

### 2-3-6- التتابع الطبقي المطوي:

تبدي الطبقات المعرضة للطي تتابعاً طبقياً متوافقاً harmonic أو لامتوافق disharmonic (طيات متوافقة وطيات لامتوافقة). ففي الطيات المتوافقة تتوالى مفاصل الطبقات المحدبة (أو المقعرة) العائدة للطية الكلية على امتداد مستوياتها المحورية فوق بعضها. أما في الطيات اللامتوافقة فتتغير مواقع المحدبات (أو المقعرات) لكل طبقة مطوية حسب سلوكها الميكانيكي، وبالتالي فإن مفاصل الطبقات المطوية لاتشترك بمستوٍ محوري واحد الشكل (2-22). لأن كل طبقة تبدي شكلاً طبياً حاصاً بها، ولهذا السبب وفي مجال معين لايمكن إيجاد مستوٍ محوري مشترك. ويجب وصف كل طبقة معلم وحدها. يختلف عرض الطيات ضمن التتابع المطوي حسب طبيعة الصخور المكونة للطبقات، فهو يكون كبيراً في الطبقة كلما كانت ذات ثخانة أكبر وكانت أعصى في مواجهة الضغط، أي أن الطبقات الرقيقة نسبياً والطيعة يمكن أن تبدي قيماً أصغر لعرضها.



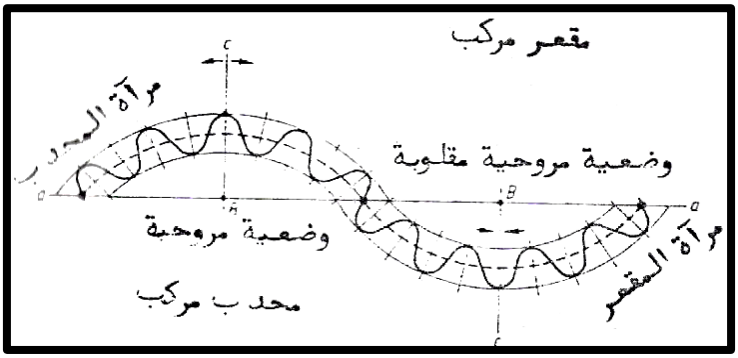

**الشكل (2–22): a– طيات متوافقة. b– طيات لامتوافقة.**

### 2–3–7– جمل الطيات fold system ضمن مقطع ac:

تعرف جملة الطيات بأنها تتالي عدد من الطيات في الاتجاه المعامد لمحاورها أي باتجاه الخط الواصل بين نقاط الانعطاف. يمكن من خلال تحديد جملة الطيات انشاء "السطح المغلف" الذي ندعوه "مرآة الطيات" ويمس أثر مرآة الطيات (وهو الخط الناتج عن تقاطع مرآة الطيات مع مستوي مقطع ac) مفاصل الطيات المفردة العائدة لجملة الطيات الشكل (2–23). وتعطى دراسة شكل مرآة الطيات وترتيب المستويات التوسطة وانقلاباتها للطيات المفردة معلومات عن الوحدة التكتونية الرئيسة (جملة الطيات). التي تشكل فيها الطيات المفردة وحدات ثانوية.

### 2–3–7–1– المحدّب المركب anticlinorium والمقعّر المركب synclinorium:

المحدب المركب هو جملة طيات ذات مرآة يأخذ أثرها شكلاً محدّباً، أما المقعر المركب فهو جملة طيات أثر مرآتها ذو شكل مقعر الشكل (2–23). ويؤدي تتابع عدة محدبات أو مقعرات مركبة ضمن مقطع ac إلى تشكيل ماندعوه ؟المحدب المركب الضخم" أو "المقعر المركب الضخم".




**الشكل (2–23): المحدب المركب والمقعر المركب. يمثل الجزء الأيسر من الشكل محدباً مركباً ذا توضع مروحي للمستويات المتوسطة بينما يمثل الجزء الأيمن مقعراً مركباً ذا توضع مروحي مقلوب للمستويات المتوسطة.**

### 2–3–8– حساب قيمة التضييق (التقصير shortening):

يتم الاعتماد في حساب قيمة التضييق على نقطتي الانعطاف. فكلما اقتربت هاتان النقطتان من بعضهما على امتداد الخط الواصل بينهما ازداد التضييق. نحسب قيمة التضييق الهطي من خلال خط المعلم وذلك باستخدام مقياس المنحنيات. أما في حالة وجود ازدياد في ثخانة طبقة المعلم عند مفصلة الطية وترقق للثخانة الأولية المفترضة عند نقاط الانعطاف فتطبق طريقة مقياس السطوح (المساح). تعطى قيمة التضييق على شكل نسبة مئوية، حيث يعد الطول المقيس بين نقطتي الانعطاف على

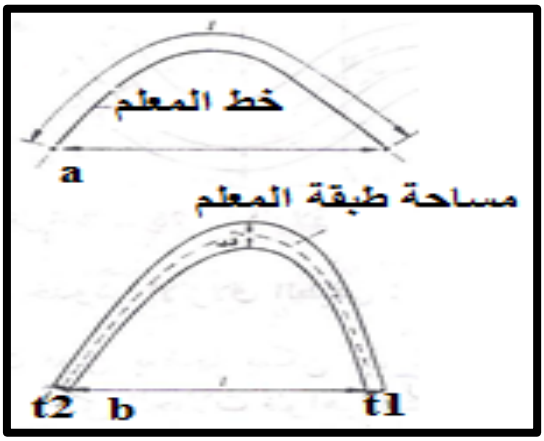
امتداد خط المعلم مساوياً 100% وأن هذا الطول هو نفسه طول المسافة الأفقية الأولية التي كانت تفصل بين هذه النقاط قبل حدوث الطي. تبيّن قيمة التضييق النسبة المئوية للطول الذي تناقص إليه الطول الأصلي (المساوي 100%) ويطرح هذه القيمة من 100 يتم الحصول على النسبة التي حصل بها التضييق. يرمز لقيمة التضييق بـ E ويضاف إليها رمز الطريقة المستخدمة في حسابها، حيث أن ($E_k$) تعبّر عن قيمة التضييق المحسوبة من خلال خط المعلم (بطريقة مقياس المنحنيات) و ($E_p$) هي قيمة التضييق المحسوبة من خلال طبقة المعلم (بطريقة مقياس السطوح). عندما يتعذر تحديد نقاط الانعطاف وبالتالي تكون المسافة بينهما غير ممكنة التحديد، فإنه يجب تحديد مسافة قاعدية بدلاً منها. ويفضل أن تكون هذه المسافة عمودية على أثر المستوي المتوسط.

**2-3-8-1- حساب قيمة التضييق من خلال خط المعلم:**

تحدد القيمة المئوية للتطبيق الخطي ($E_k$) بطريقة مقياس المنحنيات، حيث يحدد طول خط المعلم المختار (L) للمحدّب أو للمقعر المدروس والمحصور بين نقطتي الانعطاف بمساعدة مقياس المنحنيات، وذلك على مخطط ذي مقياس كبير لمقطع ac. وهذا الطول يحدد طول خط المعلم قبل حدوث الطي. ثم تقاس المسافة المستقيمة الواصلة بين نقاط الانعطاف (l) الشكل (2-24-a) فنجد بالتالي أن:

$$E_k = \frac{l.100}{L} [\%]$$

فمثلاً إذا كانت l = 90 ملم و L = 140 ملم فإن $E_k$ = 64.3% أي أن الطبقات ضاقت نتيجة الطي إلى 64,3% من عرضها الأصلي وأن نسبة التضييق هي 35.7%.




**الشكل (2-24): تحديد التضييق في الطبقات. a- من خلال خط المعلم. b- من خلال طبقة المعلم.**

**2-3-8-2- حساب قيمة التضييق من خلال طبقة المعلم:**

عندما يكون لطبقة معلم مطوية مفصلة ثخينة وجناحان مترققان يمكن حساب قيمة التضييق بطريقة مقياس السطوح. ويستخدم لهذا الهدف مخطط بمقياس مناسب، حيث تحسب مساحة طبقة المعلم المحصورة بين أثريها (من جهة وبين مستقيمي الثخانة الحقيقية المارين من نقطتي الانعطاف من جهة أخرى. كذلك تحدّد قيمة الثخانة المتوسطة من خلال تحديد الثخانة على امتداد أثر المستوي المتوسط والثخانة الحقيقية عند نقطتي الانعطاف (ثخانة متوسطة). وعلى افتراض أن طبقة المعلم كانت قبل حدوث الطي على شكل مستطيل ذي مساحة نعادل المساحة التيقيست بمقياس السطوح وذي عرض يعادل الثخانة المتوسطة لطبقة المعلم. فإنه يمكن حساب طوله (L1) الذي يعد في الوقت نفسه طول خط المعلم الشكل (2-24-b) أي:

$$L1 = \frac{F}{L1+L2/2}$$

حيث: L1: طول خط المعلم.

F: مساحة طبقة المعلم.

$t_1$: الثخانة الحقيقية لطبقة المعلم في مجال نقطتي الانعطاف (قيمة متوسطة).

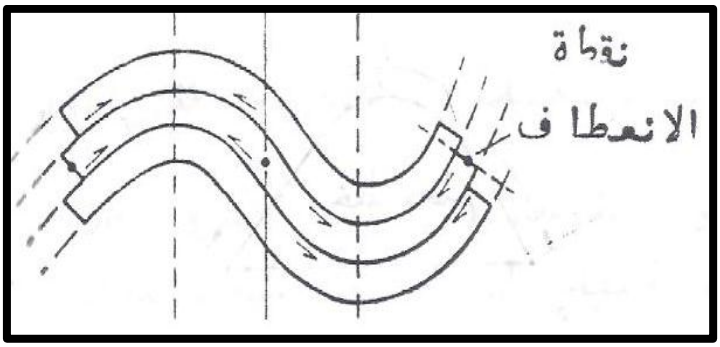
$t_2$: الثخانة الحقيقية لطبقة المعلم على امتداد أثر المستوي المتوسط.

ثم نحسب قيمة التضييق $E_P$ كما يلي:

$$E_P = \frac{L2.100}{L1} \%$$

**2-3-9- الظواهر المرافقة للطي ضمن مقطع ac:**

**2-3-9-1- انزلاق الطبقات bedding slip:** تعني ظاهرة انزلاق الطبقات المتعرضة للطي أنها تتحرك بالنسبة لبعضها عبر سطوح التطبق باتجاه مفصلة الطية، ففي أجنحة المحدبات تتحرك كل طبقة بالنسبة للطبقة التي تقع تحتها مباشرة باتجاه مفصلة المقعر الشكل (2-25). وانطلاقاً من مبدأ "ثبات مفاصل الطيات"، أي عدم تغيير الواقع التي أخذتها هذه المفاصل في المراحل الأولى للطي بقدر يذكر، فإن ذلك يعني نظرياً أن مجال المفصلة لايعاني من انزلاق الطبقات، بينما يصل هذا الانزلاق في مجال نقاط الانعطاف إلى قيمته الأعظمية. كما أن عمليات انزلاق الطبقات تكمل بعضها جانبياً، بحيث أن الطبقات المتراجعة نسبياً في مجال المقعر تنتقل إلى الطبقات المتقدمة نسبياً في مجال المحدّب الشكل (2-25).



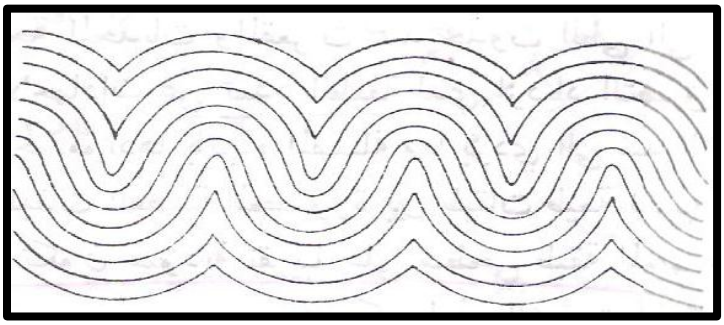

**الشكل (2-25): انزلاق الطبقات المطوية.**

**2-3-9-2- خدوش الانزلاق الطبقي:** إن انزلاق الطبقات فوق بعضها يمكن أن يؤدي إلى حدوث خدوش على سطوحها. وقد تنشأ في بعض الحالات ظواهر تهشم أو طحن. ويكون اتجاه الخدوش عمودياً على محور الطي على الأغلب (موازية لخط ميل الطبقات)، إلا أن هذه الخدوش قد تنحرف عن خط ميل السطوح المطوية لوجود بعض المتعرجات المحلية للطبقات المنزلقة بالنسبة لبعضها. إلا أنه يجب الانتباه إلى أن الخدوش الملاحظة على سطوح الطبقات والموازية تقريباً لخط ميل سطح الطبقة ليست خدوش انزلاق طبقي دائماً، وبخاصة عندما تلاحظ على أحد جناحي الطي دون الآخر. فقد تكون خدوشاً لصدوع موازية للتطبق تكونت زمنياً بعد حدوث الانزلاق الطبقي.

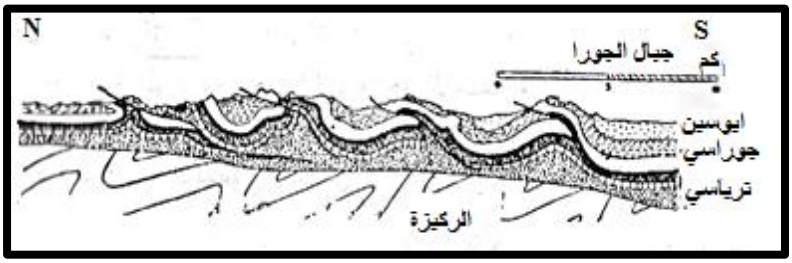
**2-3-9-3- تغير الثخانة:** تبقى الثخانة المقيسة بشكل عمودي على سطوح الطبقات (الثخانة الحقيقية) ثابتة في بعض الطيات، أما في بعضها الآخر فإنها تزداد في المجالات المفصلية وتترقق في الأجنحة. ويحدث ذلك بطريقتين. تتضمن الطريقة الأولى إعادة تنظيم المواد ضمن الطبقة المطوية نفسها من خلال حركة جانبية أو هجرة المواد من مجالات الأجنحة إلى مجالات المفاصل. أما الطريقة الثانية فتتضمن حركات عبر سلسلة من السطوح المتوازية والموازية عموماً للسطح المحوري للطية (أنظر الفقرة 2-6-3). إن ظاهرة ترقق المفصلة أقل انتشاراً من ظاهرة ازدياد ثخانة المفصلة وهي تنشأ نتيجة هجرة المواد من مجال المفصلة نحو الأجنحة.

### 2-3-9-4- سطوح الانفصال: decollement

يتغير شكل طي سطوح الطبقات مع العمق في مقاطع ac وبخاصة في الطبقات التي تكون الثخانة الحقيقية فيها ثابتة (الطيات المتوازية) الشكل (2-26). ويعني ذلك أن الطي سوف ينعدم عند عمق معين، حيث تكون الطيات متوضعة فوق وحدات صخرية غير مشوّهة. وهذا يعني أن غطاءً سطحياً يمكن أن يتشوّه لسبب أو لآخر بشكل مستقل عن قاعدته. يشكل السطح العلوي للجزء غير المشوّه في هذه الحالة سطح انفصال يحصل الطي فوقه. وهو ينشأ عادةً عبر الصخور الطيّعة مثل الملح والغضار والجص، أو عبر الطبقات الأقل تصلباً من التتابع الطبقي. يلعب مفهوم سطح الانفصال (مستوي القص القاعدي) دوراً مهماً في التكتونيك. فقد وصف الباحثون أن طيات الصخور الميزوزوية في جبال الجورا تكونت بشكل مستقل عن قاعدتها البلورية، حيث حصل انزلاقها وانفصالها عنها عبر طبقات الانهيدريت الترياسية الطيعة جداً الشكل (2-27).



**الشكل (2-26): الطيات المتوازية وتخامدها بالاتجاه الشاقولي نحو الأعلى ونحو الأسفل.**



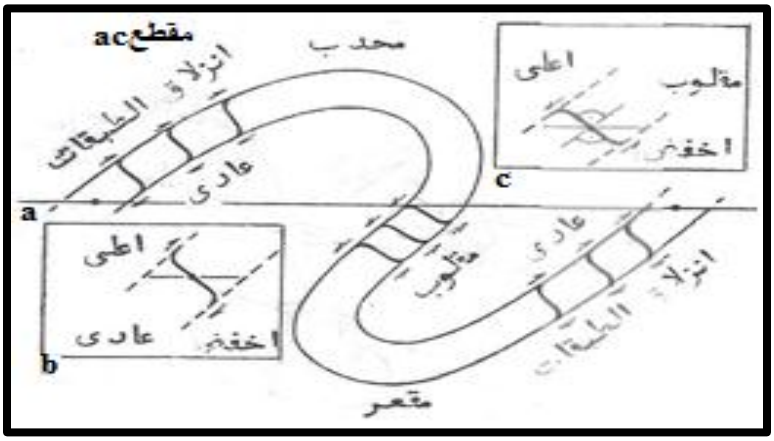

**الشكل (2-27): سطح الانفصال في قاعدة طيات الصخور الميزوزوية في جبال الجورا. لاحظ تكوّن الطي في صخور الميزوزوي.**

### 2-3-9-5- الظواهر التي تتشكل في الأجنحة:

#### أ- شقوق الشد المتعلقة بالطبقة:

تتعرض أجنحة المحدبات والمقعرات عند حدوث الطي إلى إجهادات شد، حيث تنشأ هذه الاجهادات عن تمدد الطبقة لدى ازدياد التضييق وتناقص حجم نواة الطية التي تهاجر موادها باتجاه المفصلة مما يؤدي إلى شد الأجنحة. ويحدث ذلك بخاصةً في الطبقات العصية المحصورة بين طبقات طيّعة نسبياً مما يؤدي إلى نشوء شقوق شد تكون عمودية تقريباً على سطحي طبقة المعلم. وهي شقوق bc (أنظر الفقرة 3-2-7-1) يمكن لهذه الشقوق أن تتحول إلى شقوق مفتوحة نتيجة استمرار اجهادات الشد، وهي تملأ عادةً بفلزات مختلفة (كوارتز أو كالسيت). إن عبارة "متعلقة بالطبقة تعني أن هذه الشقوق لا تستمر ضمن كامل الطية، بل تقتصر على الطبقات المناسبة ميكانيكياً لنشوئها. وهي تغيب عادةً في مجال المفصلة. وإذا نشأت هذه الشقوق في مراحل مبكرة من عمليات الطي فإن شقوق كل طبقة ستنزاح بالنسبة لشقةق الطبقات الأخرى بشكل سلمي باتجاه مفصلة الطية نتيجة استمرار عملية الطي. وهذا مايقود إلى حدوث سحب عند أطراف هذه الشقوق القريبة من سطح الانزلاق الطبقي فتأخذ شكل حرف "S" الشكل (2-28-a). ويمكن من خلال معرفة اتجاه انحراف سطح الشق استنتاج موقع مفصلة المحدب أو

المقعر. وهذا يفيد خاصة في التكشفات التي تظهر فيها أجنحة الطيات دون المفاصل. تبدي النهاية العلوية للشق في حالة الطبقات ذات التطبق العادي (غير المقلوب) انحرافاً نحو الأعلى، وهو الاتجاه الذي توجد عنده مفصلة المحدب، أي أن النهاية السفلية للشق تنحرف نحو مفصلة المقعر. ولا يتعلق هذا بموقع نقطة الانعطاف، حيث تسري هذه القاعدة على امتداد الجناح الواصل بين المحدب والمقعر المجاور الشكل (2–28–b). أما فيالطبقات المقلوبة فإن النهاية العلوية للشق تبدي انحرافاً نحو السفل، أما نهايته السفلية فتنحرف نحو الأعلى الشكل (2–28–c). تشكل هذه الشقوق في جزئها الأوسط رغم انحراف نهايتها زاوية قائمة تقريباً مع سطح التطبق. وهذا يختلف عما هو عليه الحال في الشقوق الريشية.




**الشكل (2–28): شقوق الشد المتعلقة بالطي. a–شقوق الشد في الطية الكلية. b–شكل شقوق الشد في الجناح ذي التطبق العادي. c–شكل شقوق الشد في الجناح ذي التطبق المقلوب.**

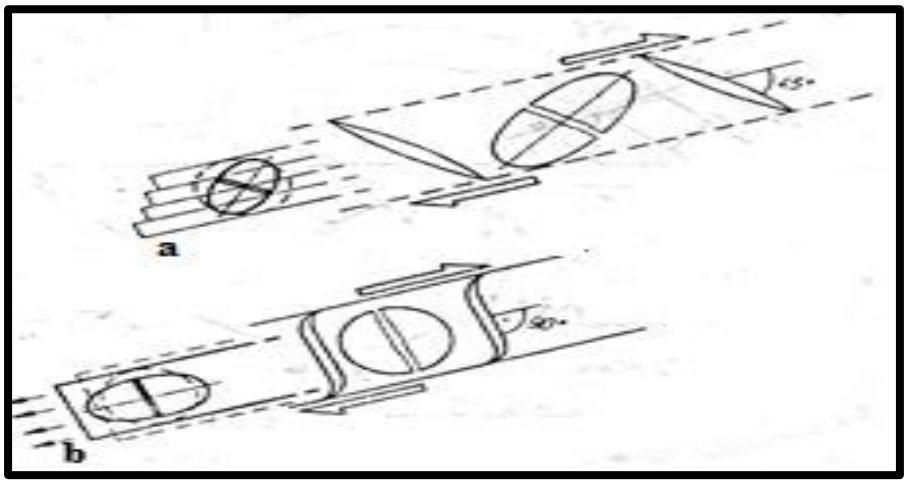
**ب– الشقوق الريشية المتعلقة بالطبقة:**

يعود نشوء هذه الشقوق إلى الدوران الداخلي ضمن الطبقة والناتج عن انزلاق الطبقات الشكل (2–29–a). وبذلك فإن دائرة انفعال مفترضة سوف تتشوه إلى اهليلج انفعال يتطاول قطره الكبير باتجاه انزلاق الطبقات، مما يؤدي إلى نشوء إجهاد شد عمودي على القطر الصغير، وتشكل شقوق ريشية تصنع زاوية $45^{\circ}$ تقريباً مع مستوي جناح الطية، بحيث يتجه رأس الزاوية الحادة الكائنة بين خط المعلم والشق الريشي بعكس انزلاق الطبقات وهذا يعاكس ماهو عليه الحال في شقوق الشد الشكل (2–20–b). تتابع الشقوق الريشية بشكل سلمي عادة، وإذا كانت سطوح التطبق غير واضحة فإن الخط الواصل بين النقاط المتوسطة لهذه الشقوق يعطي فكرة تقريبية عن وضعية هذه السطوح ضمن جناح الطية الشكل (2–30–a). يشير رأس الزاوية الحادة المتجه نحو الأسفل إلى موقع المقعر بينما يشير رأس الزاوية الحادة المتجه نحو الأعلى إلى موقع مفصلة المحدب المجاور. وتطبق هذه القاعدة سواء في الأجنحة ذات التطبق العادي أو في الأجنحة المقلوبة الشكل (2–30–b,c).

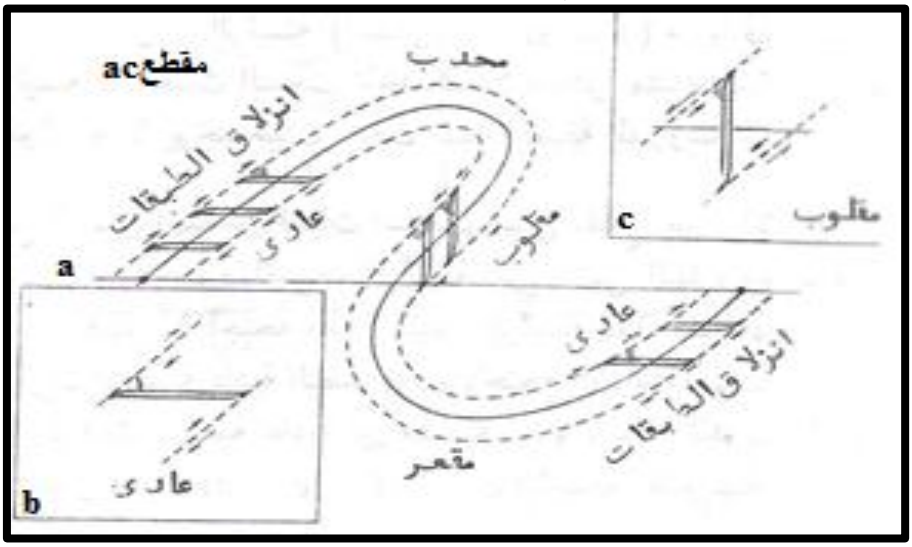
**جـ– طيات السحب:**

تدعى هذه الطيات أيضاً "الطيات الطفيلية" أو "الطيات الثانوية" وهي على الأغلب طيات لامتناظرة، وتنشأ ضمن الطبقات الطيعة المحاطة بالطبقات العصية المكونة لأجنحة الطيات الرئيسة، وعادةً ماتوازي محاور B العائدة إليها محاور B العائدة للطيات الرئيسة. يتميز الشكل الهندسي لمحدب أو مقعر السحب ضمن مقطع ac بجناح طويل وآخر قصير، وعند تتالي المحدبات والمقعرات يتصل الجناح الطويل للمحدب بالجناح الطويل للمقعر المجاور والجناح القصير للمحدب بالجناح القصير للمقعر الشكل (2–31–a). يأخذ ترتيب المستويات المتوسطة (المحورية) لطيات السحب الموجودة على أجنحة الطيات الرئيسة ترتيباً مروحياً ضمن المحدبات الرئيسة أو ترتيباً مروحياً مقلوباً ضمن المقعرات الرئيسة الشكل (2–31–b). أما في مجال مفصلة

الطية الرئيسة فإن طيات السحب تأخذ شكلاً متناظراً مشابهاً للطية الرئيسة، حيث يمك القول أنه لايوجد طيات سحب ضمن الطبقة المدروسة في هذا المجال.




**الشكل (2–29): التفسير المنشئي للشقوق الريشية (a) وشقوق الشد المتعلقة بالطبقة (b).**




**الشكل (2–30): الشقوق الريشية المتعلقة بالطبقة.**

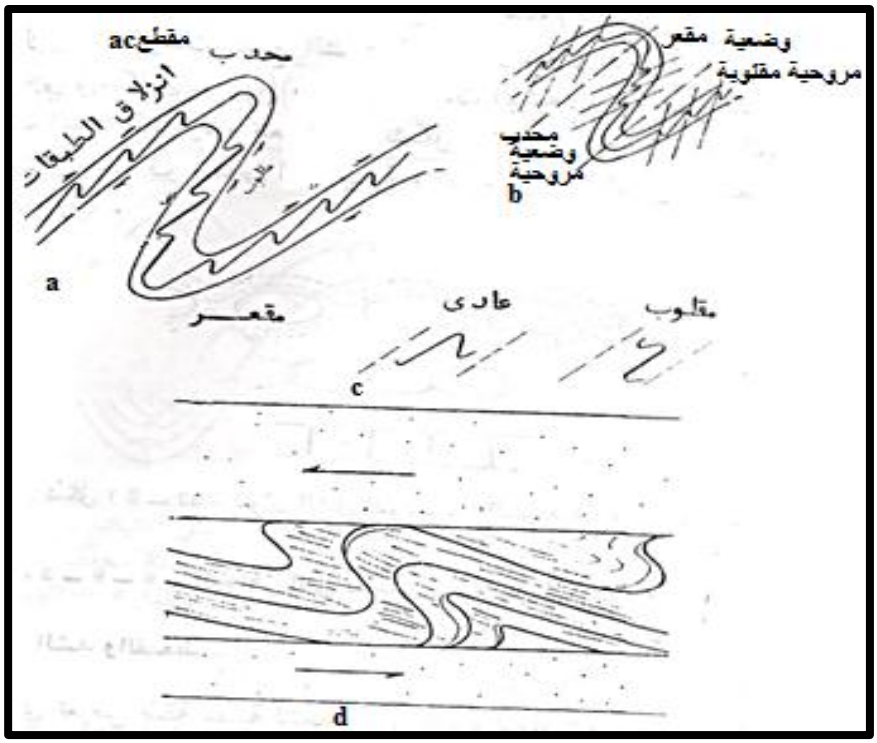
**a–شكل الشقوق في الطية الكلية.**

**b–شكل شقوق في الجناح ذي التطبق العادي.**

**c–شكل الشقوق ا في الجناح ذي التطبق المقلوب.**

يتيح الشكل الهندسي لطيات السحب ضمن مقطع ac الإمكانات لتحديد موقع مفاصل المحدبات والمقعرات الرئيسة التي تنتمي إليها، وذلك في التكشفات التي لاتظهر فيها إلا أجنحة هذه الطيات الرئيسة دون مفاصلها. فعندما تكون أجنحة الطيات الرئيسة عادية اتطبق فإن الأجنحة الطويلة لطيات السحب الموجودة ضمنها تكون ذات وضعية عادية غير مقلوبة أيضاً. بينما تكون الأجنحة القصيرة مقلوبة الشكل (2–31–c). أما في الأجنحة المقلوبة للطيات الرئيسة فيحدث العكس.

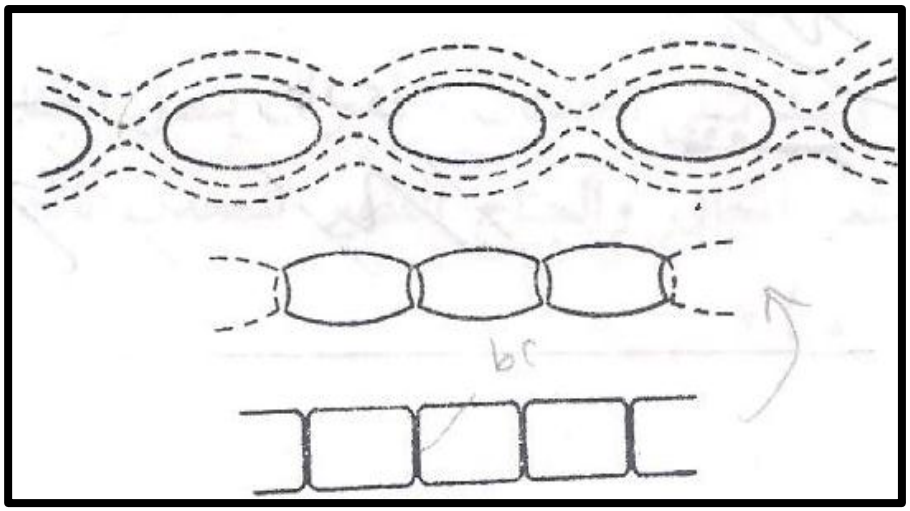
تنشأ طيات السحب نتيجة عمليات السحب التي تتعرض لها المواد الطيعة بسبب انزلاق الطبقات المجاورة ذات المواد العصية أثناء نشوء الطية الرئيسة الشكل (2–31–d).




**الشكل (2–31): طيات السحب. a–ضمن الطية الكلية. b–ترتيب المستويات المتوسطة (المحورية). C–تحديد التطبق العادي والمقلوب. d–نشوء طيات السحب بتأثير قوة المزدوجة الناتجة عن انزلاق الطبقات.**

**د– الكتل البودينية (السجقية):**

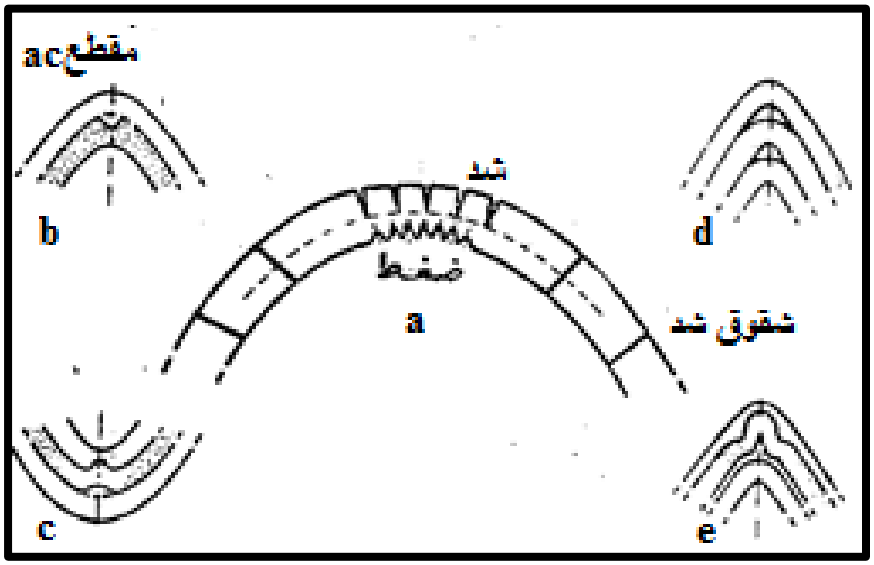
تتكون هذه البنيات في أجنحة الطيات عند تعرض الطبقات الهصية المحصورة بين الطبقات الطيعة لعمليات الشد التي تحدث في الأجنحة، بحيث تتمدد بشكل كبير وتتقطع إلى أجزاء تتباعد عن بعضها ويتغير شكلها. ويكون للأجزاء في البداية محيط مضلع قائم الزاوية، وتفصل بينها شقوق الشد (شقوق bc)، إلا أنه ومع ازدياد التشوهات يضيع الشكل الزاوي وتتحول الأجزاء إلى الشكل الاهليلجي الشكل (2–32). وتملأ الفراغات البينية الناتجة عن ذلك بمواد الطبقات الطيعة المجاورة. تتعلق شدة تشكل الكتل البودينية بالصفات الليتولوجية للطبقات، واختلاف صفاتها الميكانيكية. أما حجم هذه الكتل فيرتبط بثخانة الطبقة الأولية.



**الشكل (2–32): تكوّن الكتل البودينية (السجقية) في مقطع ac.**

**2-3-9-6- الظواهر التي تتشكل في مفاصل الطيات:**

أ- **الشد والضغط:** يؤدي تعرض طبقة عصية للمحدب إلى نشوء إجهاد شد في المنطقة القريبة من سطحها العلوي وإجهاد ضغط في المنطقة القريبة من سطحها السفلي. ويفصل بين هاتين المنطقتين منطقة محايدة لاتتعرض للشد أو الضغط الشكل (2-33-a). ويمكن مناقشة حالة الطبقات المعرضى للتقعر بنفس الأسلوب مع الوضع بالحسبات أن تقوسها نحو الأسفل. تنتشر ظواهر الضغط على طبقات المعلم المطوية، وهذا يعود إلى أن متانة الشد أقل بكثير من متانة الضغط عادةً. يؤدي الشد إلى نشوء شقوق شد موازية تقريباً لمحور B، وتكون ذات شكل افيني يتضيق باتجاه المنطقة المحايدة للطبقة المطوية الشكل (2-33-a) ويبين الشكل (2-34) تكوّن شقوق الشد في المجال العلوي للطبقة المحدّبة، بينما ظواهر الضغط (صدوعاً تراكبية هنا) في المجال السفلي.




**الشكل (2-33): الظواهر المتشكلة في مفاصل الطيات.**

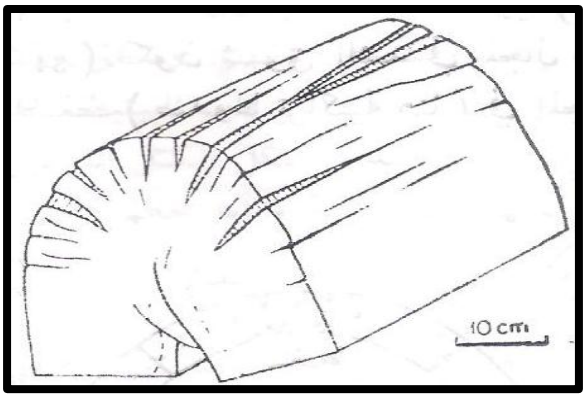
**a- الشد والضغط. b-مقعر ثانوي في مفصلة محدب. c- محدب ثانوي في مفصلة مقعر. d-التجاويف المفصلية. e- الهبوط المفصلي.**

**ب- الطيات الثانوية في مجال المفصلة:**

تنشأ أحياناً مقعرات ثانوية في الأجزاء الداخلية للمحدبات الشكل (2-33-b)، كما قد تنشأ محدبات ثانوية في الأجزاء الداخلية للمقعرات الشكل (2-33-c). وذلك بسبب التضييق الشديد الذي يحصل في نوى الطيات. وتقتصر هذه الطيات الثانوية على واحدة أو بعض من الطبقات المشمولة بالطي. وقد يملأ الفراغ الناجم عن تكوّن الطيات الثانوية هذه بمواد الطبقات الضعيفة المجاورة.

**جـ- التجاويف المفصلية:**

تنشا التجاويف المفصلية في الطيات التي تتألف من طبقات عصية بشكل أساسي، فعند تعرضها للطي تنفصل الطبقات عن بعضها في مجال المفصلة، مما يؤدي إلى تشكّل تجاويف تبقى فارغة بسبب عدم وجود طبقات طيّعة تتحرك موادها لتملأ هذه التجاويف الشكل (2-33-d). يفترض أن هذه التجاويف تشأ عن عدم حدوث انزلاق طبقي أثناء عملية الطي. وتصادف التجاويف المفصلية في المحدبات أكثر منها في المقعرات، وتملأ عادةً بفلزات لاحقة تترسب من السوائل التي تمر عبر هذه التجاويف لتشكل البنيات السرجية المعروفة، والتي تتبع في استطالتها اتجاه محور B للطية.




**الشكل (2-34): تكون شقوق الشد (المجال العلوي) وصدوع الضغط (المجال السفلي) لدى تحدب طبقة عصية.**

**د- الهبوط المفصلي:**

يتميز هذا الهبوط الذي يحصل لبعض الطبقات في مجال مفصلة الطية بأنه يأخذ شكل "الخوذة"، الشكل (2-33-e) وهو يعزى غالباً للهبوط اللاتكسري لطبقة عليا عصية فوق مجال مفصلي لطبقة ضعيفة تقع تحتها. وتنتشر هذه البنيات على الأغلب في مفاصل المحدبات وبخاصة في الطيات الزاوية.

**2-4- وصف الطيات وتصنيفها حسب محور B:**

يحدّد محور B حقلياً من خلال تحديد خط المفصلة لطبقة معلم مطوية. حيث يمكن تحديد وضعيته الفراغية بواسطة البوصلة الجيولوجية حسب طريقة اتجاه الميل. ويجب الانتباه أثناء إجراء القياس إلى التمييز بين خط المفصلة وخط القمة الشكل (2-4). إلا أن الطريقة السائدة في تحديد الوضعية الفراغية لمحور الطية هي الطريقة غير المباشرة المستندة على القاعدة الإحصائية باستخدام شبكة شميت، وذلك من خلال قياس الوضعية الفراغية لسطح طبقة معلم في موقعين أو أكثر على كل جناح للطية المدروسة.

**2-4-1- تصنيف الطيات حسب زوايا تغريق محاورها:**

تحدّد زاوية تغريق محور الطية بالطريقة المذكورة آنفاً (أنظر الفقرة 2-4) من خلال دراسة التكشفات الصخرية. ويمكن استخدام الجدول (2-5) لوصف الطيات حسب هذه الزاوية ومن الملاحظ في التكشفات الصخرية أن المحاور تكون على الأغلب أفقية أو ذات تغريق خفيف حتى المتوسط. ويلاحظ في بعض المناطق وبخاصة في المجالات العميقة للركيزة ازدياد مستمر في قيم زوايا التغريق حتى تأخذ الوضعية الشاقولية أحياناً. وبذلك تتطابق مستويات الخرائط الجيولجية مع مقاطع ac لهذه الطيات.

| التصنيف | زاوية التغريق (درجة) |
|---|---|
| **طيات ذات محور أفقي** | **0°** |
| **أو شبه أفقي** | **0°-10°** |
| **طيات بمحور ذي تغريق خفيف** | **10°-30°** |
| **طيات بمحور ذي تغريق متوسط** | **30°-60°** |
| **طيات بمحور ذي تغريق شديد** | **60°-80°** |
| **طيات ذات محور شبه شاقولي** | **80°-90°** |
| **أو شاقولي** | **90°** |

**2-4-2- تصنيف الطيات حسب شكلها:**

**2-4-2-1- الطية الاسطوانية Cylindrical fold:**

تتميز الطية الاسطوانية بأن خطوط المعطف العائدة لسطح طبقة المعلم (سطح المعطف) وهي الخطوط التي تصل بين النقاط متساوية الاتجاه والميل على سطح طبقة المعلم تتوازى مع محور الطية الشكل (2-35-a) . ويشكل مقطع ac العمودي على محور B مستوياً تناظرياً على الأغلب، كما أن أعلى تناظر ممكن في الطية الاسطوانية هو التناظر المعيني. ويمكن لمقطع ac أن يعطي شكلاً لطيات زاوية أو ركبية أو مستديرة، قائمة أو مقلوبة، متناظرة أو لامتناظرة، إلا أن الشيء المهم في تعريف الطية الاسطوانية هو أن شكل الطية الملاحظ ضمن مقطع ac أن يبدي تغيراً على امتداد محور B.

يعد نموذج الطيات الاسطوانية النموذج السائد، وهي طيات تمتد نظرياً على امتداد محور B إلى اللاتهاية. ولكن بما أن فكرة الامتداد اللانهائي غير محققة في الطبيعة فإنه يعد أن الطيات الاسطوانية هي طيات ذات شكل اسطوني بجزئها الأكبر، ولكن نهاياتها تأخذ شكل طيات مخروطية.

**2-4-2-2- الطية المخروطية Conical fold:**

تتميز الطية المخروطية بأن خط المفصلة وخطوط المعطف والمحور الرئيس للمخروط (محور K) تلتقي في نقطة هي ذروة المخروط الشكل (2-35-b.c) وهذا يعني أن الطية ستنتهي بعد مسافة ما. وتعطي الصورة النموذجية لمحدب مخروطي أو مقعر مخروطي من خلال نصف مخروط يتكشف عادةً جزء منها. يبدي أثر طبقات المعلم في المقاطع العمودية على محور المخروط (المقاطع الرئيسة) مساراً دائرياً أو اهليلجياً، وكذلك فهو يمكن أن يطابق طيات لامتناظرة أو قائمة أو مقلوبة، ركبية أو زاوية. وأن شكل خطوط المعلم لايتغير تعريفاً في المقاطع الرئيسة، إنما يتناقص السطح المحصور بينها وبين الخط الواصل بين نقاط الانعطاف، أو يتزايد بالاتجاه المعاكس الشكل (2-35-b,c) ويتمثل بأعلى تناظر ممكن في الطيات المخروطية بالتناظر أحادي الميل.

**2-4-2-3- الطية اللولبية:**

تتميز الطية اللولبية بالمسار المقوّس لمحورها وانحناء مستويها المحوري، حيث يشكل محور الطية في هذه الحالة خطاً لولبياً الشكل (2-35-d). يبين اسقاط الخط اللولبي على المستوي الأفقي درجة تغير اتجاه تغريقه، بينما يعطي اسقاطه على المستوي الشاقولي التغير في زاوية تغريقه. ويتم بهدف المعالجة التكتونية لهذه الطيات تقسيم الطية الكلية إلى أقسام منفردة تعالج كل منها كمعالجة الطية الاسطوانية (من حيث وصف شكل الطية وتحديد زاوية تغريق المحور مثلاً) ومن ثم يتم توحيد النتائج لتدرس التغيرات بين الأقسام المختلفة.

**2-4-3- تصنيف الطيات من خلال الخرائط:**

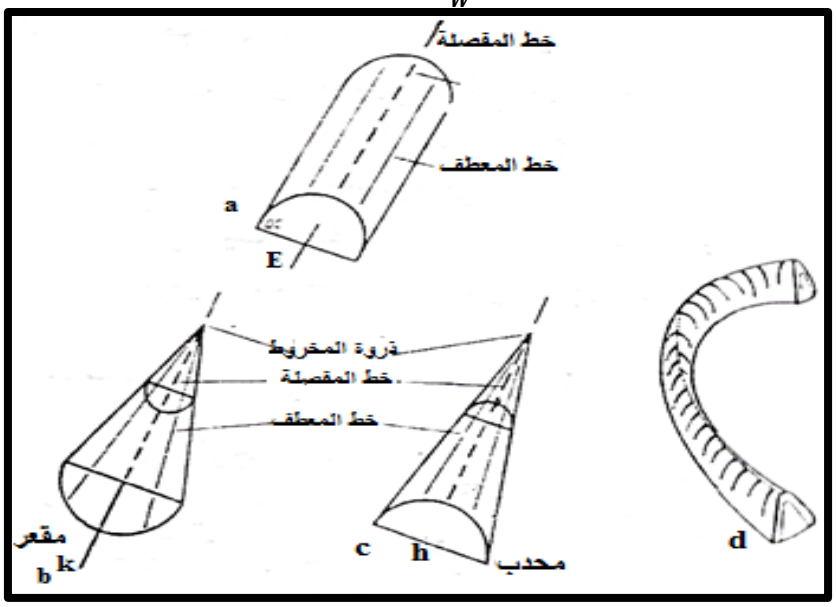
تبين الخارطة الجيولوجية الشكل الذي تأخذه الطية على سطح الأرض، أي مسقط الطية على المستوي الأفقي بمقياس مصغر. ويتم توضيح البنية على الخرائط دون الارتباط بوضعية محاور الطيات، ورغم ذلك فإنه يمكن الحصول على مسار المحاور بالاستفادة من أشكال التكشفات التي تبديها طبقات المعلم التي يكون عمرها النسبي معروفاً. ويرتبط مظهر الطية على الخارطة بالوضع الطبوغرافي وبشكلها ووضعية محورها. إلا أننا سنفترض يطح الأرض فيما يلي أفقياً ومستوياً.

**2-4-3-1- الطية الخطية Lnear fold:**

تتميز الطية الخطية بأن محورها يأخذ مساراً مستقيماً ويتوضع بشكل أفقي تقريباً، أو يميل عن الأفق بسبب وجود بعض الانكسارات على امتداده. وتتميز الطيات ذات المحور الأفقي على الخرائط من خلال التكشفات الطبقية التي تظهر بشكل متوازٍ الشكل (2-

a–36) وتظهر الطبقات الأقدم عمراً في الأجزاء الداخلية في حالة المقعرات. يمكن استنتاج شكل الطية الخطية الكائن ضمن مقطع ac (قائمة، مقلوبة، متساوية الميل) من خلال معرفة قيم زوايا الميول، ومعرفة وضعية التطبق (مقلوب، عادي) للتتابع الطبقي. هذا ويتطابق اتجاه أجنحة الطية مع اتجاه محور B في الطيات الخطية ذات المحور الأفقي. وتتميز الطيات الخطية في الخرائط الجيولوجية من خلال نسبة محاور اهليلج التكشف، حيث أن نسبة المحور الطويل "L" إلى المحور القصير "W" تزيد على 5 أي:

$$5 < \frac{L}{W}$$




**الشكل (2–35): امتداد الطبقات. a–طية اسطوانية. b–مقعر مخروطي ذو مقطع دائري. c–محدب مخروطي ذو مقطع اهليلجي. d–طية لولبية.**

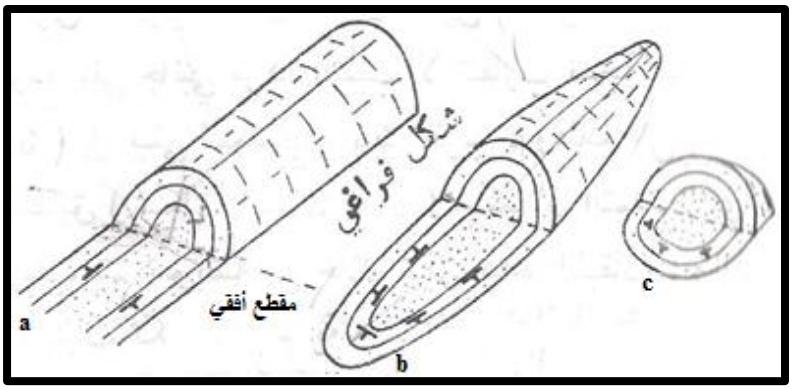
### 2–4–3–2– الطية القصيرة Brachy fold:

يتميز المحدب القصير brachy anticline بأن محوره يتغرق نحو الجانبين اعتباراً من نقطة مرتفعة على امتداده. أما المقعر القصير فإن زاوية التغريق لمحوره تزداد بدءاً من أعمق نقطة باتجاه المستوي الحاوي على نقاط الانعطاف.

تبدي الطبقات في مجال تغريق الطيات القصيرة في الخرائط التفافاً في خطوط اتجاهها، حيث يدعى هذا الالتفاف "أنف الطية nose of the fold" وتكون اتجاهات ميول الطبقات مبتعدة عن نواة المحدّب الشكل (2–36–b) أو باتجاه نواة المقعر. تتميز الطيات القصيرة في الخرائط الجيولوجية بأن نسبة المحور الطويل لإهليلج التكشف إلى المحور القصير تقع بين 2 و 5 أي:

$$5 > \frac{L}{W} > 2$$

ويجب عند حساب هذه النسبة تحديد طبقة المعلم وعلى أي سطح من سطحيها (العلوي أم السفلي) تم ذلك. كما يمكن حساب هذه النسبة من خلال خطوط معلم مختلفة. ثم مقارنة القيم الناتجة مع بعضها، ويلاحظ أن القيم الأعظمية لمحوري الاهليلج تقع في المستوي الحاوي على نقاط الانعطاف.




**الشكل (2-36): شكل تخطيطي للطيات ضمن المقطع الأفقي وفي الشكل الفراغي.**
**a-طية خطية. b-طية قصيرة. c-طية قبابية الشكل.**

**2-4-3-3- الطيات قبابية الشكل doms-shaped folds والقباب doms:**

تنشأ الطيات قبابية الشكل بتأثير ضغط جانبي آتٍ من كل الاتجاهات (متحلق)، مما يؤدي إلى تقوّس سطوح الطبقات، بحيث يكون عرض الطية مساوياً تقريباً امتدادها حسب محور B. يصعب تمييز الطيات قبابية الشكل عن القباب من الناحية العملية، ويتعذر أحياناً. فالقباب لاتنشأ من خلال قوى جانبية بل من خلال قوى شاقولية ودون حدوث تضييق، أي أن النقاط الموجودة على جانبي مركز التقبب لاتتقارب نتيجة نشوء القبة الشكل (2-37-b) بل يبقى البعد بينها ثابتاً تقريباً، وذلك على عكس الطيات التي يحدث فيها التضييق الشكل (2-37-a). كما أن التمدد الذي تعانيه الطبقات عند نشوء القباب يتم تعويضه من خلال ترقق هذه الطبقات، والذي يترافق على الأغلب بنشوء بنيات تكسرية تباعدية.

إن الاختلاف الممكن بين الطيات قبابية الشكل والقباب هو أن أجنحة القبة التي تميل في الاتجاهات كافةً يكون لها على الأغلب زوايا ميل أقل من ميل أجنحة الطيات قبابية الشكل. هذا وتخلو المناطق المجاورة للطيات قبابية الشكل والقباب على الأغلب من أشكا مقعرة مرافقة لنشوئها. تتميز الطيات قبابية الشكل بأن نسبة محاور إهليلج التكشف فيها تقل عن 2 الشكل (2-36-c) أي:

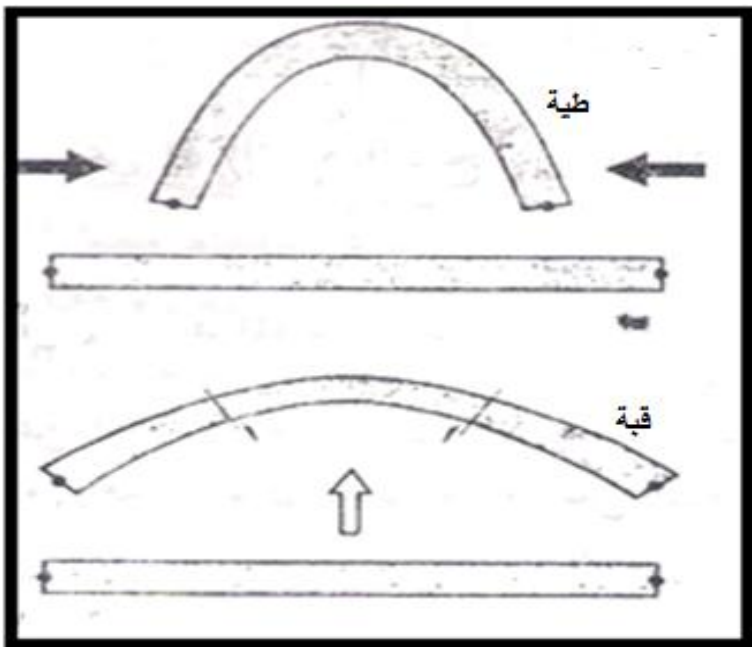
$$\frac{L}{W} < 2$$

**2-4-4- الظواهر المرافقة للطي حسب محور B:**

**2-4-4-1- الاستطالة حسب محور B:**

تنتج الظواهر المرافقة للطي حسب محور B عن التشوه (التحرك) اللدن والتكسري للمواد تحت تأثير الضغط الجانبي، وتظهر الاستطالة حسب محور B (التمدد العرضي) بشكل واضح عندما تزيد زاوية انتصاب أجنحة الطية على $45^{\circ}$. إن تناقص الحجم الفراغي في النواة الناتج عن ازدياد التضييق يؤدي إلى الاستطالة باتجاه محور B.

**2-4-4-2- شقوق الشد المعامدة لمحور B:** تنشأ هذه الشقوق عن الاستطالة حسب محور B نتيجة للقيمة المنخفضة لمتانة الشد عند الصخور. وقد تكون منفردة أو على شكل مجموعات بشكل معامد للسطح المحوري.

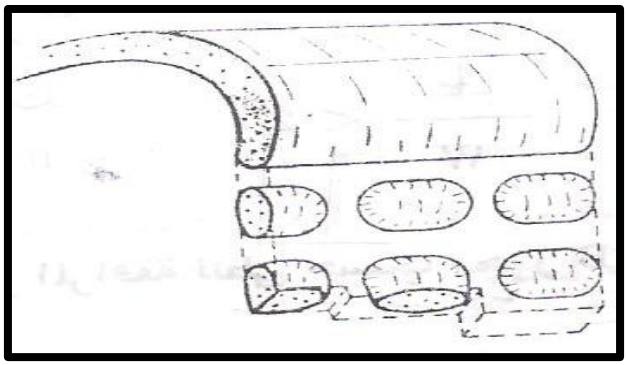



**الشكل (2-37): الاختلاف المنشئي بين الطيات والقبب.**

**a-طية (ذات تضييق جانبي). b-قبة (دون تضييق جانبي).**

### 2-4-4-3- الكتل البودينية حسب محور B:

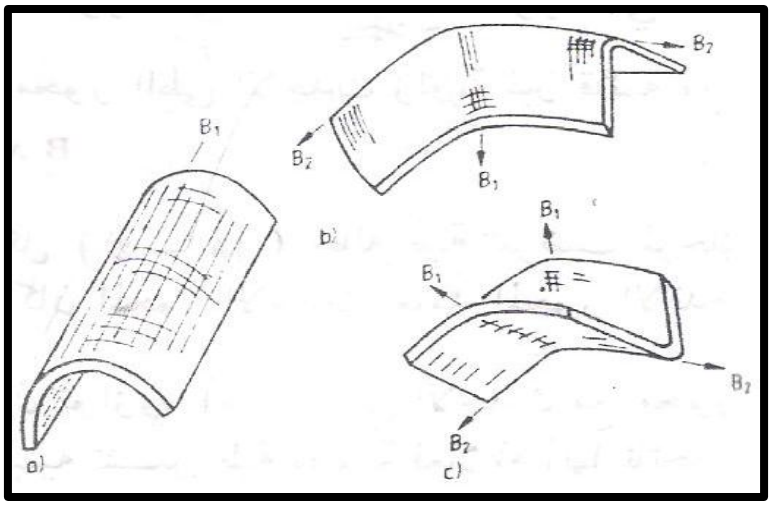
يمكن لتمدد الطبقات حسب محور B أن يؤدي إلى تكوّن كتل بودينية (سجقية) تشابه تلك الناتجة عن شد الأجنحة (أنظر الفقرة 2-3-9-5). حيث تنشا بالنتيجة أجسام قريبة من المجسّم الإهليلجي الشكل (2-38) مؤلفة من المواد الصخرية العصية. وتملأ الفراغات المتكوّنة بينها بالمواد الصخرية العائدة للطبقات الطيّعة المجاورة.



**الشكل (2-38): تكون الكتل البودينية في الفراغ ثلاثي الأبعاد مع مقاطع حسب ac,bc.**

### 2-4-4-4- التموج العرضي:

عندما يكون التمدد العرضي (الاستطالة حسب محور B) غير ممكن لسبب ما قد يكون مثلاً بسبب وجود وحدات صخرية صلبة وثابتة على امتداد محور الطية فقد يؤدي ذلك إل تضييق باتجاه محور الطية، وبالتالي إلى نشوء متزامن لطي ذي محور معامد لمحور الطية الأولية، وهذا مايدعى "التموج العرضي" الشكل (2-39). يصعب غالباً تمييز هذا النوع من البنيات عن الطيات العرضية التي تنشأ تعريفاً من خلال تشوهات أحدث عمودية على محور الطي السايق، إلا أنه يفترض أن التموج العرضي يحث بعد ابتداء عملية الطي الرئيس. ولهذه التموجات عادةً عرض أقل من عرض الطية الرئيسة التي تنتمي إليها، ولها تكرار مختلف على امتداد محور الطية الرئيسة.




**الشكل (2–39): التموج العرضي. a–محدب ذو محور $B_1$. b–محدب ذو تموج عرضي $B_2$ I $B_1$.**
**C–مقعر ذو تموج عرضي $B_2$ I $B_1$.**

**2–5– الطيات المطوية:**

الطيات المطوية هي بنيات طيية نشأت خلال أكثر من مرحلة تفصل بينها أزمنة تطول أو تقصر. وتعطي الخارطة الجيولوجية معلومات أولية عن أمثال هذه البنيات التي تتحدّد بشكل أساسي من خلال ثلاثة عوامل هي:

– الزوايا التي تصنعها محاور الطيات مع بعضها.

– الزوايا التي تصنعها المستويات المتوسطة (المحورية) مع بعضها.

– اختلاف عرض المحدبات والمقعرات.

ويوجد بشكل عام ثلاثة أوضاع يمكن أن تأخذها محاور الطيات المطوية لدى إجراء التحليل الزوجي للطيات هي:

– تعامد محور الطي الأحدث مع محور الطي الأقدم:

– توازي محور الطي الأحدث مع محور الطي الأقدم:

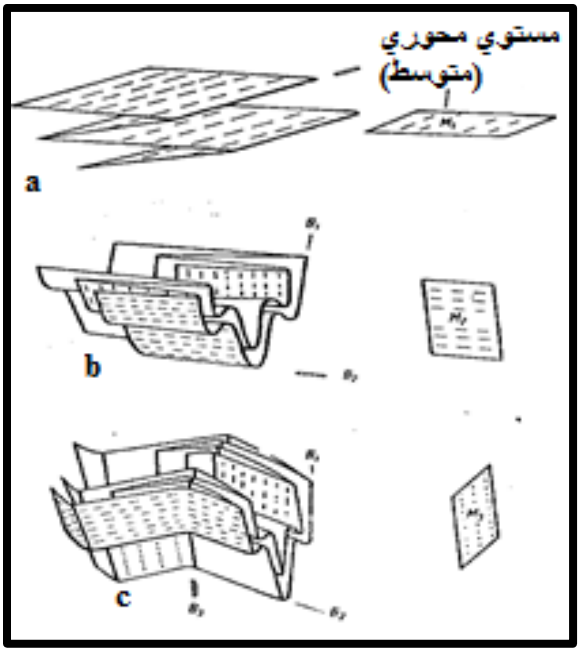
– يصنع محور الطي الأحدث زاوية غير قائمة مع محور الطي الأقدم:

يبين الشكل (2–40) حالة طية تعرضت لمرحلتي طي لاحقتين للمرحلة الأولى، بحيث كان المحور الأحدث يعامد المحور الأقدم دائماً. يجب في حال توازي محور الطي الأحدث مع محور الطي الأقدم التمييز فيما إذا كانت هذه البنية تشكل طية مطوية فعلاً أم أنها ناتجة عن عملية تكتونية واحدة، كما هو الحال عند طيات السحب أو الطيات الثانوية.

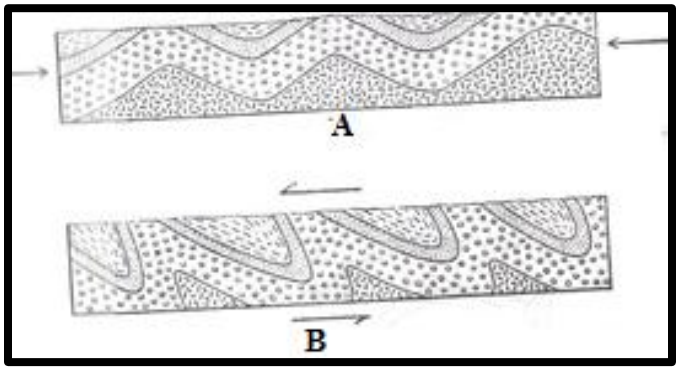
**2–6– آليات الطي:** إن دراسة وتحليل عمليات الطي تتضمن مشكلتين أساسيتين، تتجلى أولاهما في تحديد آلية الطي، أي دراسة التغيرات الداخلية التي حدثت ضمن الطبقات الصخرية المتعرضة للطي، بينما تتجلى الثانية في دراسة سبب حدوث الطي. سنحاول في هذه الفقرة إعطاء لمحة موجزة عن الآليات المقترحة لحدوث الطي بينما ستعالج الفقرة (2–7) أسباب الطي. يوجد بشكل عام ثلاثة أنماط أساسية للطي، تتوسط فيما بينها حالات انتقالية وهذه الأنماط هي:

– **الطي الانحنائي flexure folding**: يعرف هذا الطي بالطي الحقيقي أيضاً، ويمكن أن ينتج إما عن الضغط أو عن المزدوجة الشكل (2–41). يمكن دراسة هذا النموذج من الطي إما على طبقة منفردة أو على وحدة طبقية مؤلفة من عدة طبقات. ففي حالة طبقة منفردة يؤدي هذا النوع من الطي (حالة التحدّب) إلى نشوء اجهادات شد في أجزائها العلوية واجهادات ضغط في أجزائها السفلية، ويفصل بينهما منطقة خالية من الانفعالات. أما في حالة وحدة طبقية تتألف من عدة طبقات فإن هذا النوع من

الطي يتجلى بحدوث انزلاق للطبقات بالنسبة لبعضها عبر سطوحها ولذلك يدعى الطي في هذه الحالة "الطي الانحنائي الانزلاقي flexural-slip folding".




**الشكل (2−40): مخطط فراغي لطي حدث على ثلاث مراحل: $B_1$ I $B_2$ I $B_3$.**



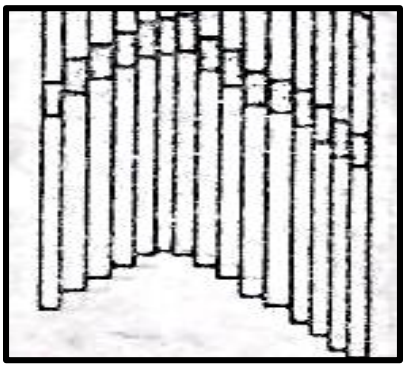

**الشكل (2−41): طبقات مشبوهة من حلال الطي الانحنائي.**

**A− طيات ناتجة عن الضغط البسيط. B− طيات ناتجة عن المزدوجة أو عن المزدوجة والضغط معاً.**

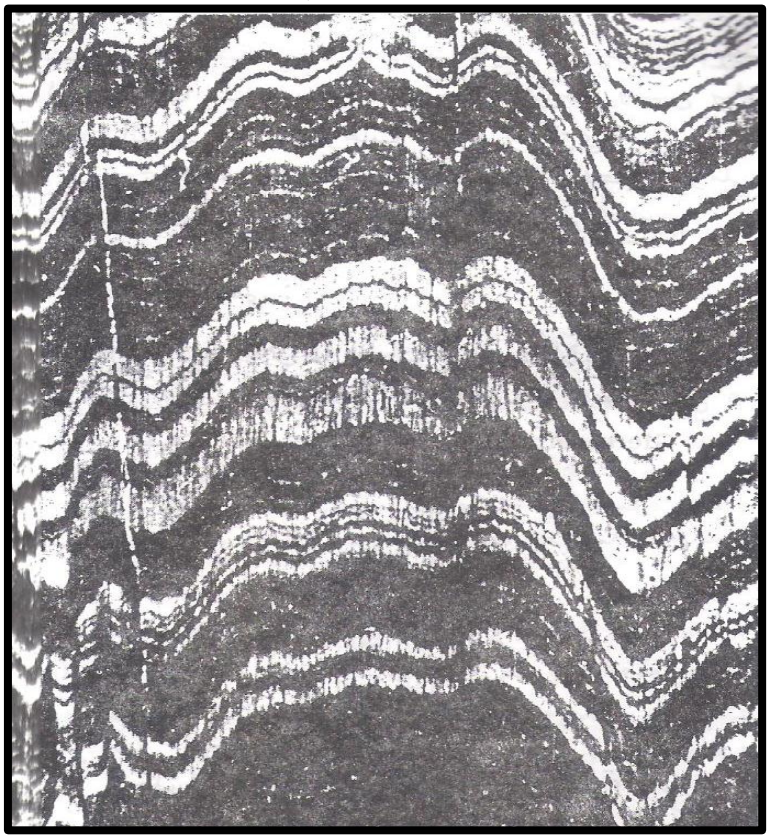
− **الطي الانسيابي flow folding:** يدعى بالطي الطيّع أيضاً، وهو يحدث في الأقاليم التي تتميز صخورها بغياب الطبقات الثخينة العصية وبكونها لدنة، إما نتيجة مميزاتها الذاتية، أو بسبب ارتفاع الحرارة، أو ارتفاع الضغط الحابس. وضمن هذه الشروط فإن طبقة منفردة لاتستطيع نقل قوّة الضغط إلى مسافة بعيدة، حيث أن سلوكها يشابه سلوك السوائل اللزجة وليس سلوك الأجسام الصلبة. يميز هذا النمط من التشوّهات الجزء المركزي من بعض الأحزمة الأوروجينية، حيث تزداد صفات الطواعية للغضار والحجر الرملي رقيق التطبق ضمن شروط عالية من الحرارة وبوجود السوائل المتحرّكة.

− **الطي القصي shear folding:** يحدث هذا الطي من خلال انزياحات صغيرة للطبقات عبر كسور متقاربة (سطوح قص) الشكل (2−42) مما يؤدي إلى تكوّن مايدعى "طيات القص "**shear folds**" أو (طيات الألواح المنزلقة). إن أمثلة جيدة عن طيات القص الصغيرة يمكن أن ترى بوضوح من خلال الطبيقات الرملية الرقيقة ضمن صخور الأوردواز الشكل (2−43) وكذلك

ضمن الطبقات ذات الألوان المختلفة في بعض صخور الشيست. تعتمد هندسية الطيات الصغيرة الناتجة عن الطي القصي على الزاوية بين التطبق وسطوح القص وعلى طبيعة الانزلاق وعلاقته بالتطبق وعلى صفات الطبقات.



**الشكل (2-42): شكل تخطيطي لطية قص.**



**الشكل (2-43): طية قص ضمن صخر الأوردواز (المقياس حقيقي).**

### 2-7- أسباب نشوء الطيات:

يعد الضغط واحداً من أهم وأوضح الأسباب الكامنة وراء حدوث الطي. وهو من أقدم التفسيرات التي وضعت لمنشأ الطيات، حيث تم اختبار هذه افكرة من خلال النماذج التجريبية والنظرية الشكل (2-44). إلا أنه يجب التعامل مع هذه الفكرة بشيءٍ من الحذر، حيث يجب تحديد المعنى الدقيق لمصطلح "الضغط". تبين النماذج التجريبية التي تم فيها وضع مادة متطبقة ضمن صندوق ذي جوانب وقعر صلب أن هذه الطبقة سوف تعتصر بين فكي كماشة الشكل (2-44). لقد كان يعتقد أن هذا النموذج هو النموذج السائد في القشرة الأرضية. حيث يحصل تضييق فيها مما يؤدي إلى نشوء أحزمة الطي الشكل (2-45-a).

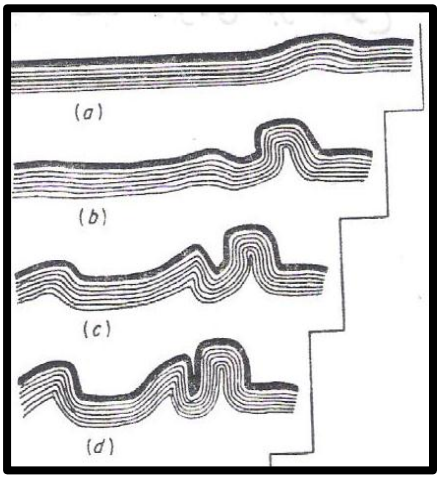
ترغم أن الضغط يبقى التفسير الأساسي لنشوء الطيات، فإن الباحثين يعدون أن الضغط لاينشأ دائماً وبالضرورة عن تضييق القشرة. فالضغط يمكن أن ينشأ بالطرائق التالية:

– من خلال الانزلاق الجاذبي للمواد فوق المنحدرات، حيث أن الجاذبية تؤثر بشكل "قوى جسمية" ضمن طبقة مائلة، مما يؤدي إلى حدوث حركات تؤدي إلى الطي، أو أن الطي يمكن أن يحدث أمام كتلة منزلقة الشكل (2–45–b).

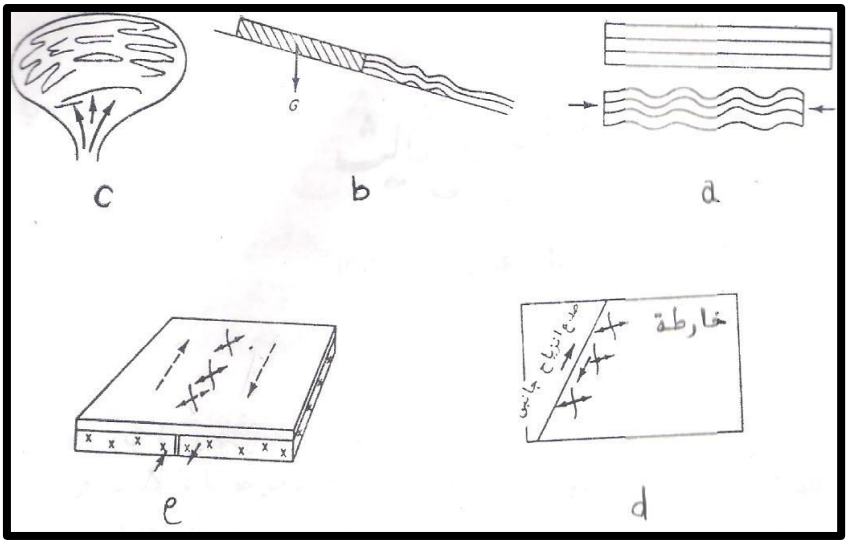
– يمكن للطيات أن تنشأ في مناطق حركات الجليديات الشكل (2–45–c).

– تنشأ الطيات من خلال المزدوجة الناتجة عن انزلاق الطبقات العصية المجاورة للطبقات الطيعة أثناء تكون الطي الرئيس الشكل (2–31–d) أو من خلال المزدوجة الحاصلة في مناطق صدوع الانزلاق الاتجاهي الشكل (2–45–d,c).

– تنشأ الطيات أحياناً نتيجة الانزلاق عبر سطوح قص متوازية متقاربة الشكل (2–42).




**الشكل (2–44): تكون الطيات المتوازية ضمن صندوق الضغط. لاحظ ازدياد شدة الطي من المرحلة a إلى المرحلة d مع استمرار الضغط.**



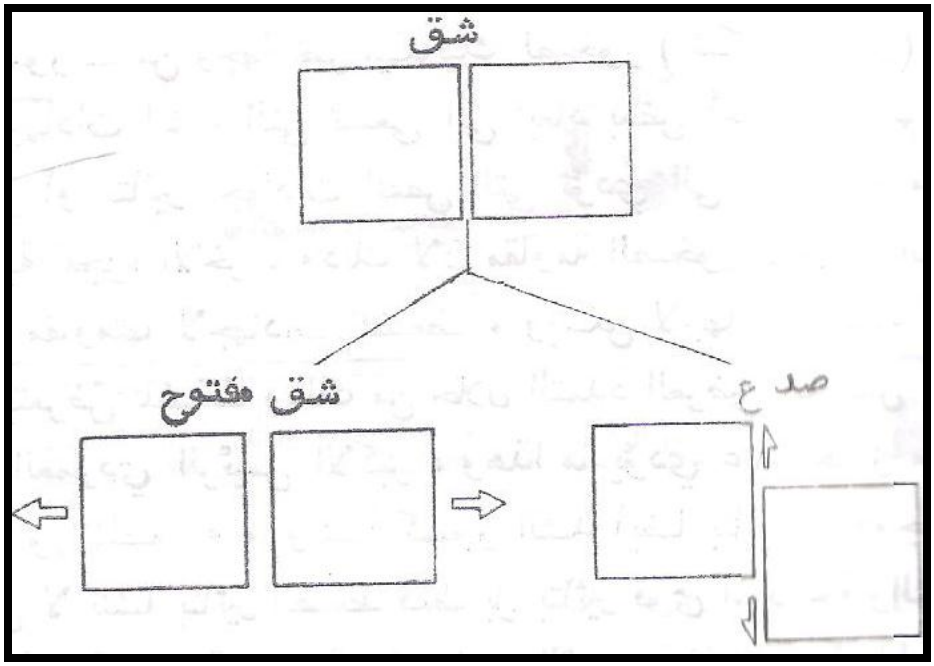

**الشكل (2–45): الظروف الجيولوجية المختلفة لنشوء الطيات.**

**a–طيات ناتجة عن تضييق جانبي. b–طيات ناتجة عن الحركة على منحدر. b–طيات ناتجة عن الحركة على منحدر. c– طيات ناتجة عن حركة الجليديات. d– طيات متشكلة قرب السطح نتيجة الحركة بجوار صدع انزلاق اتجاهي. e– طيات متشكلة في الصخور الغطائية فوق صدع انزلاق اتجاهي.**

## الفصل الثالث

## الشقوق

**3-1- مفهوم الشقوق:** هي كسور (تمزقات) في الجسم الصخري تتميز بعدم حدوث جركة موازية لسطوحها، إلا أن حركة معامدة لسطوحها يمكن أن تحدث مؤدية إلى تكوّن الشقوق المفتوحة، أما إذا حدث حركة انزلاقية للكتل الصخرية على سطح الشق فإن الشق سيتحوّل إلى صدع الشكل (3-1). وتعد الشقوق أكثر البنيات انتشاراً من بين التشوّهات التكسرية.




**الشكل (3-1): الشق، الشق المفتوح، الصدع.**

**3-2- تصنيف الشقوق حسب منشئها:** تصنف الشقوق إلى نوعين أساسيين هما:

**3-2-1- الشقوق خارجية المنشأ:** وهي شقوق ناشئة عن قوى خارجية تؤثّر في جسم الصخر عبر سطح تماس حقيقي أو مفترض.

**3-2-2- الشقوق داخلية المنشأ:** وهي شقوق تنشأ بتأثير إجهادات داخلية ضمن الصخر، كالإجهادات الناتجة عن التقلص بالتبرّد.

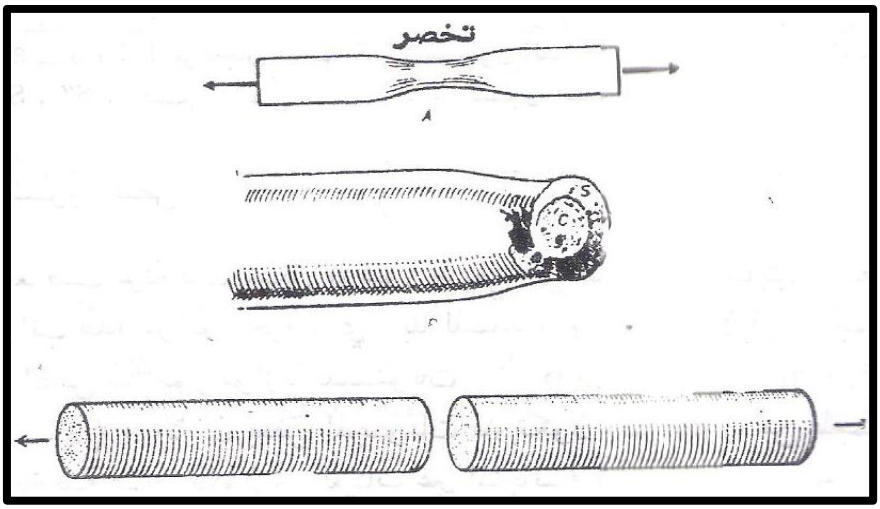
**3-2- الشقوق خارجية المنشأ:**

**3-2-1- تمزق الصخر:** تخضع الصخور عندما تتعرض لتأثير القوى المختلفة للتشوّه المرن أولاً ثم للتشوّه اللدن. وإذا استمر التشوّه إلى حد كافٍ فسينشأ في الصخر انقطاع بحدوث التكسرات فيه (الشقوق والصدوع). لقد تم استنتاج المعلومات المحدّدة للعلاقة بين القوى الخارجية والكسور من خلال التطبيقات الهندسية والتجارب المخبرية والدراسات الحقلية. تنشأ الكسور من وجهة نظر ميكانيك الصخور الشكل (1-5)، بشكل أساسي بتأثير إجهادات الشد التي تسعى إلى إبعاد بعض أجزاء الجسم الصخري عن بعضه الآخر أو بتأثير إجهادات القص التي تؤدي إلى زلق جزء من الجسم الصخري بالنسبة للجزء الآخر، وذلك لأن مقاومة الصخور لإجهادات الشد والقص أقل من مقاومتها لإجهادات الضغط. ويمكن لإجهادات الشد أن تنشأ أيضاً في جسم يتعرض للضغط وذلك من خلال التمدد العرضي الحاصل باتجاه معامد للإجهاد العمودي الرئيس الأكبر، وهذا ما يؤدي عند تجاوز متانة

الشد إلى نشوء الكسور المفتوحة. وتنشأ كسور الشد أيضاً بتأثير المزدوجة. كما أن كسور القص لا تنشأ بتأثير الضغط فقط بل بتأثير قوى المزدوجة والشد أيضاً. ومن هنا تتضح أهمية دراسة العلاقة بين صفات القوى الخارجية وأنماط الشقوق.

**3-2-1-1- المعطيات التجريبية:**

أ- **الشد:** إذا تعرضت نهايتا قضيب للتباعد عن بعضهما، فإن هذا القضيب سينقطع بعد المرور بمرحلتي التشوّه المرن واللدن، وتعتمد طبيعة الانقطاع على تقصّف (قصم) المادة. تبين اختبارات الشد للمعادن الطروقة أنه عندما تقترب العينة من نقطة التمزق فإنها تشكل جزءاً منها تخصّراً (أو رقبة) الشكل (3-2-A) ثم تنقطع من خلال كسور قص وكسور شد (كسور ليفية). وتكون الأخيرة معامدة لمحور الشد الشكل (3-2-B). أي أن الانقطاع يحدث في بعض المواد بشكل مشترك بين كسور القص وكسور الشد. أما في حالة المواد القصيمة فيتشكل كسر شد منفرد يتوضع في الحالة المثالية بشكل عمودي على محور الشد الشكل (3-2-C). إن الصخور المتصلبة الموجودة في الأجزاء العلوية من القشرة الأرضية هي مواد قصيمة بشكل أساسي، وإذا تعرضت لقوى شد فإن ذلك يؤدي إلى كسور شد معامدة لاتجاه هذه القوى.

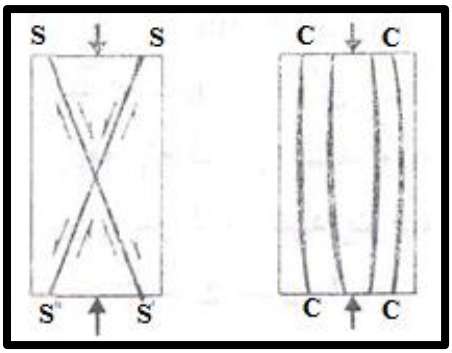



**الشكل (3-2): A-تكون التخصر عند شد قضيب مؤلف من مادة لدنة.**

**B-كسور القص (S) وكسور الشد (e).**

**C-انقطاع قضيب مؤلف من مادة قصيمة.**

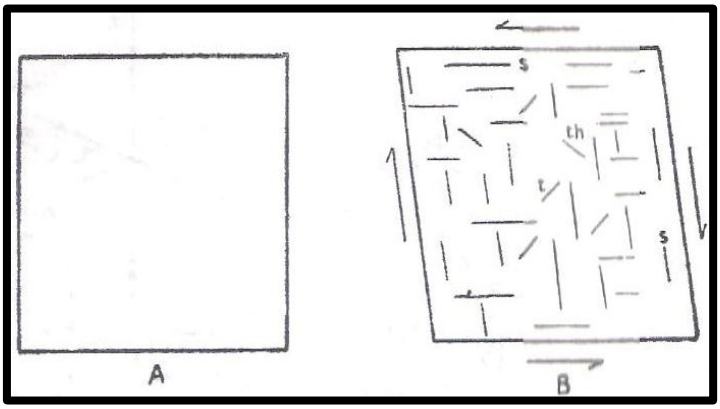
**ب- الضغط:** إن الكسور الناتجة عن اختبارات الضغط تكون على نمطين أساسيين: أولهما والأكثر انتشاراً هي كسور القص، وثانيهما كسور الشد الشكل (3-3).




**الشكل (3-3): النموذجان الأساسيان للكسور الناتجة عن ضغط المواد القصيمة.**

**S, S: كسور قص. C: كسور شد.**

**ت- المزدوجة:** تبين التجربة الموضحة في الشكل (3-2) العلاقة بين الكسور والمزدوجة. وضعت قطعة مطاط ضمن إطار حديدي مربع ذي مفاصل موجودة عند زواياه الأربع. ثم طليت قطعة المطاط بطبقة من البارافين. وهكذا فإذا تشوّه الإطار بتأثير المزدوجة إلى حد كافٍ تنشأ في البارافين كسور متعددة، تكون أولها كسور الشد ذات الاتجاه الموازي للقطر الصغير لمتوازي الأضلاع (t في الشكل 3-4-B). ويعزى نشوء هذه الكسور إلى تمدّد طبقة البارافين باتجاه موازٍ للقطر الكبير لمتوازي الأضلاع. وباستمرار التشوّه تنشأ كسور قص (S في الشكل 3-4-B) موازية لجوانب الإطار. وهذا طبيعي لأن مثل هذه الكسور تنشأ في حالة تطبيق الضغط، إلا أن اتجاهاتها ترتبط هنا بحواف الإطار. وتنشأ في المرحلة الأخيرة من التشوّه صدوع تراكبية صغيرة (th في الشكل 3-4-B) تكون موازية للقطر الطويل لمتوازي الأضلاع.




**الشكل (3-4): الكسور الناشئة عن المزدوجة. A – هيكل مربع يحيط بطبقة مطاط مكسوة بطبقة من البارافين. B- الكسور الناتجة عن المزدوجة: t- كسور الشد. S- كسور قص. th- صدوع تراكبية.**

### 3-2-1-2- علاقة الكسور بالإجهاد:

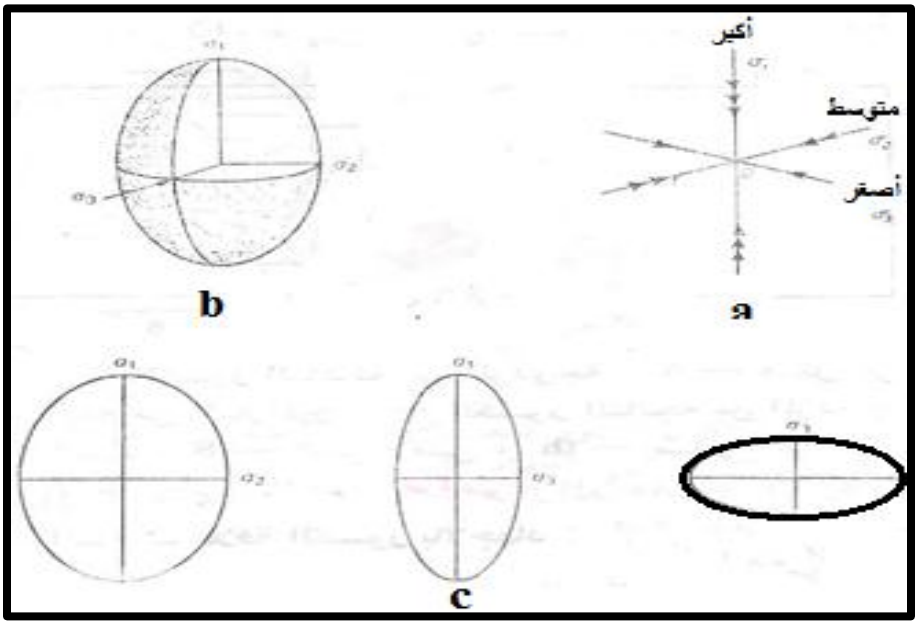
أ- **إهليلج الإجهاد:** تمثّل الاجهادات المؤثّرة في نقطة ما بثلاثة محاور متعامدة تعرف باسم محاور الإجهادات الرئيسة الشكل (3-5-a). يمثّل محور σ1 محور الاجهاد الرئس الأكبر أما σ2 فيمثّل محور الاجهاد الرئيس المتوسط، بينما يمثّل σ3 محور الاجهاد الرئيس الأصغر. وهي تمثّل محاور لما يدعى الاهليلج المجسم للإجهاد الشكل (3-5-b). ويمكن لهذه الاجهادات الرئيسة الثلاثة أن تكون ضغطية أو شدية، كما يمكن أن يكون اثنان منها ضغطيين وواحد شدّياً أو أن يكون أحدها ضغطياً والآخران شديين.

يمكن تعريف **فرق الاجهاد** بأنه الفرق الجبري بين الاجهاد الرئيس الأكبر والاجهاد الرئيس الأصغر.

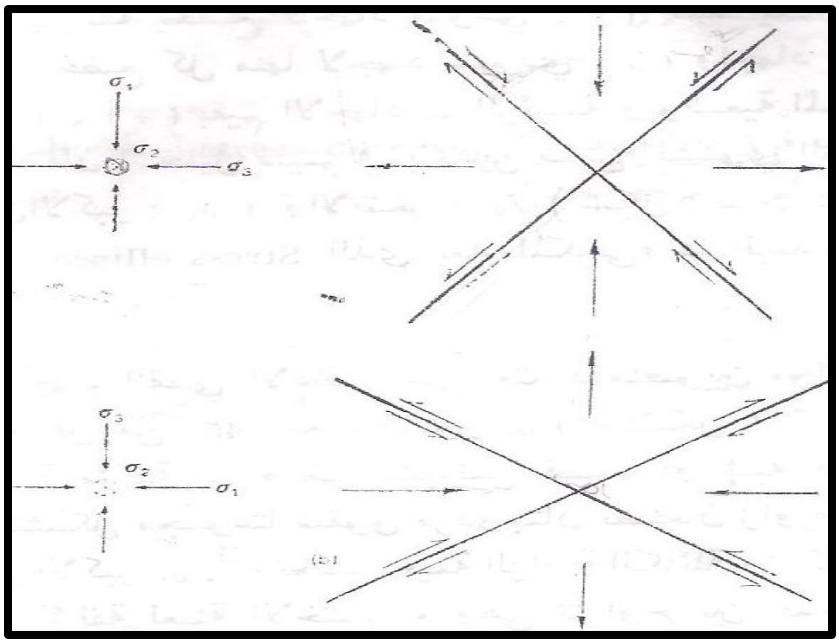
**ب- الكسور والاهليلج المجسّم للإجهاد:** سيتم تحليل علاقة الكسور بالإجهاد، حيث سيفترض أن كل الاجهادات الرئيسة هي إجهادات ضغط. وبالتالي فإن أي مستوي يحوي إثنين من محاور الاجهاد الرئيسة يخضع لإجهاد عمودي (σ) فقط يساوي ثالثهما. أما بقية المستويات فيخضع كل منها لإجهاد عمودي (σ) وإجهاد قصي (τ) فتتعلق شدة كل من (σ) و (τ) بقيم الاجهادات الرئيسة وبوضعية المستوي بالنسبة لها. وبهدف التبسيط فإن التحليل سيتم في بعدين ضمن المستوي الحاوي على محوري الاجهاد الرئيسيين الأكبر (σ1) والأصغر (σ3) الشكل (3-6-c)، وهو ما يعطي إهليلج الاجهاد الذي يعد المكافئ ذا البعدين للإهليلج المجسم للإجهاد.

يحدث الإجهاد القصي الأعظمي على امتداد مستويين موازيين لـ σ2 ويصنع كل منهما زاوية أقل من $45^{\circ}$ مع محور σ1 الشكل (3-6). وهكذا إذا تعرضت أسطوانة مؤلفة من صخر متجانس قصيم أو شبه قصيم للضغط من نهايتيها فإنه ستتشكل مجموعتا شقوق مزدوجتان تصنعان زاوية حادة ينصفها محور الاجهاد الرئيس الأكبر σ1. وتختلف قيمة الزاوية الكائنة بين كلتا المجموعتين

و σ1 باختلاف المادة المؤلفة لعينة الاختبار. وهي تتراوح بين عدة درجات و ْ45 تقريباً، إلا أن أكثر القيم شيوعاً هي القيم القريبة من ْ30. أما كسور الشد فإنها لا تتشكل بوضعية معامدة لـ σ2 أثناء تطبيق الضغط على الأقل لأن الاجهاد العمودي يكون في ذروته عبر هذا المستوي. وعلى العكس فإن الاجهاد العمودي يكون في ذروته عبر هذا المستوي. وعلى العكس فإن الاجهاد العمودي يكون في أقل قيمة له في المستوي المعامد لمحور σ3 مما يؤدي على الأغلب لنشوء كسور شد موازية لهذا المستوي عند تطبيق الضغط. يمكن لإهليلج الإجهاد أن يأخذ أي توجه في القشرة الأرضية. وبالتالي فإن كسور الشد وكسور القص يمكن أن يكون لها أية وضعية فراغية.



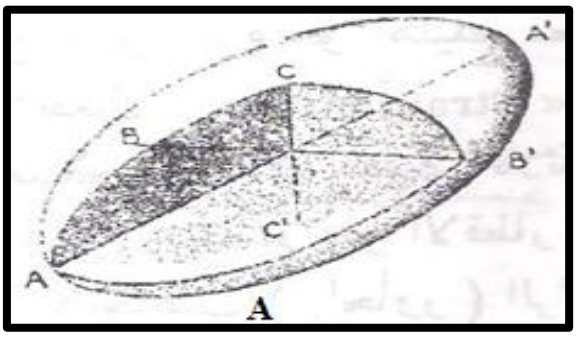

**الشكل (3-5): a- محاور الاجهاد الرئيسة المؤثرة في نقطة (0). B- الاهليلج المجسم للإجهاد. C- مقاطع عمودية على كل من محاور الاجهاد الرئيسة.**



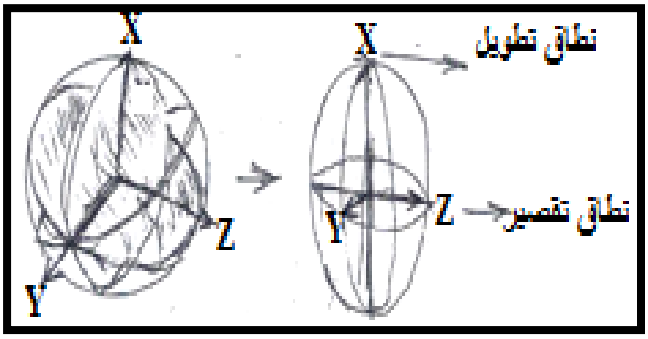
**الشكل (3-6): تصنيع مستويات القص الأعظمي زوايا أقل من ْ45 مع σ1 وتتقاطع عبر σ2.**

### 3-2-1-3-علاقة الكسور بالانفعال:

أ- **إهليلج التشوّه أو إهليلج الانفعال:** ويتضمن إيجاد علاقة الكسور بالانفعال. واستخدمت هذه الطريقة بشكل واسع في الجيولوجيا. يمكن تصوّر التشوّه من خلال التغير الشكلي لكرة وهمية موجودة ضمن الصخر، كأن نتصور كرة موجودة ضمن مكعب من الغرانيت. فإذا تعرض الغرانيت للضغط من الأعلى والأسفل فإن الكرة الوهمية تتشوه إلى كرة مفلطحة يكون محورها القصير شاقولياً. وبشكل عام فإن المجسم الناتج عن تشوّه كرة هو اهليلج مجسّم. ويدعى هذا الشكل الوهمي (الاهليلج المجسّم للانفعال). وكما هو الحال بالنسبة لأي إهليلج مجسم فإن إهليلج الانفعال يحوي ثلاثة مستويات تناظر تتوضع بزوايا قائمة بعضها بالنسبة لبعض وتتقاطع عبر الأقطار الثلاثة للإهليلج، حيث تدعى هذه الأقطار "الاتجاهات (المحاور) الرئيسة للإنفعال". يدعى المحور الأطول للإهليلج المجسم "محور الانفعال الأكبر" (محور AA في الشكل (3-7-A) أما المحور المتوسط فيدعى "محور الانفعال المتوسط" (محور bb في الشكل 3-7-A) بينما يدعى المحور القصير "محور الانفعال الأصغر" (محور cc في الشكل 3-7-A). يعد اهليلج التشوه (الانفعال) أداة تصويرية تقدّم مرجعاً لتقدير تغير الشكل أو البنية الأولية (الحالة الكروية)، إلى البنية الثانوية بعد تطبيق الإجهاد (البنية المنفعلة أو المشوهة) وهنا يتم الانتقال من الحالة الكروية إلى الشكل الإهليلجي.




**الشكل (3-7): الاهليلج المجسم للانفعال.**




**الشكل (3-8): إهليلج الانفعال.**

وفي النتيجة يمكننا القول إن إهليلج الانفعال نشأ بالانفعال من أساس كرة بأقطار موحدة. إذاً يعزى الإهليلج إلى ثلاثة أقطار متعامدة Z، Y،X كانت متعامدة أصلاً في الكرة قبل التشوّه Z، Y،X وتبقى كذلك بعده. وفي الحالة العامة لإهليلج الانفعال، يعرض بعضها للتمدّد أو التطويل (المحورX) أو للتقصير (المحور Z) حتى وصلنا إلى الحالة العامة للانفعال وبالتالي يكون $X > Y > Z$ وتسمى هذه المحاور بمحاور الانفعال الرئيسية. لاحظنا في الشكل (3 -8) أن المحاور المتساوية Y،X فإن **إهليلج الانفعال يصف مقدار التشوّه الذي تعرّض له الجسم الصخري. ويحسب الانفعال بطريقتين:**

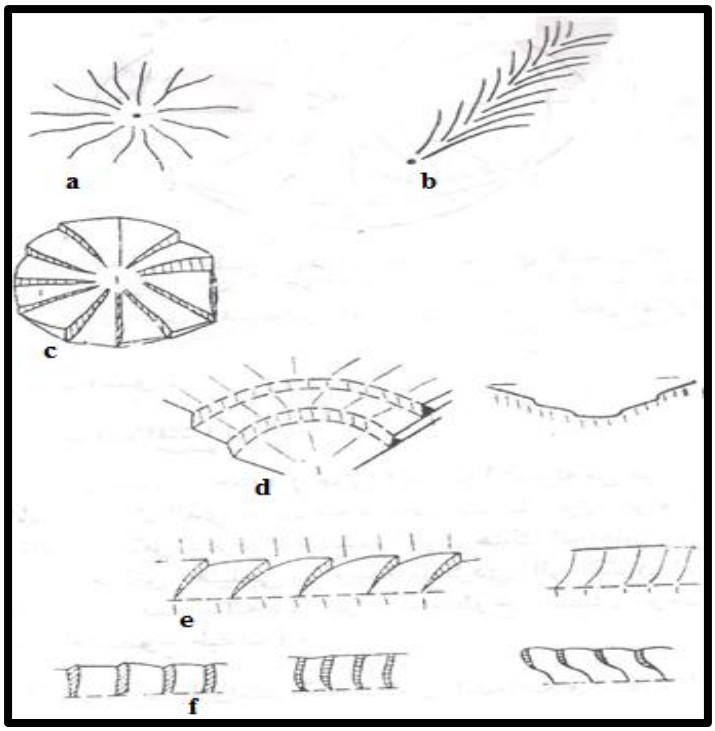
- **تغير طول الخط.**
- **التغير في الزاوية، وهذا يعرف بالقص الزاوي.**

**3-3- الشق:**

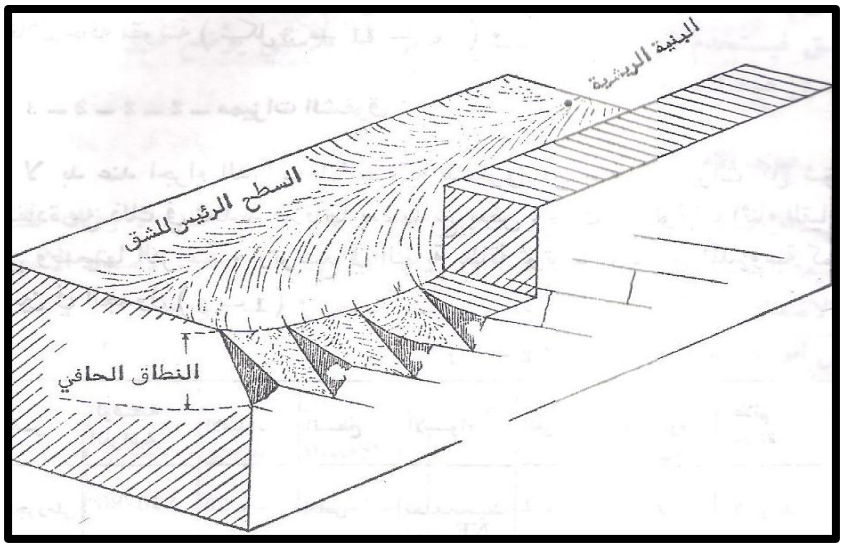
**1- المنشأ:** يتميز كل شق بامتداد محدود (نهائي)، ويبدأ تكونه من مركز نقطي (مركز الشق) هو الموقع الأول الذي حدث فيه فقدان التماسك بين أجزاء الصخر. وتتم عملية توسع الشق يشكل دائري، وعندما تكون هناك اتجاهات محدّدة مفضلة، فإن الانتشار يتم بشكل اهليلجي. وهذا ما يؤدي إلى تكوّن السطح الرئيس للشق. وغالباً ما تتوقف عملية التكسر عند سطوح انفصال موجودة مسبقاً (شقوق أقدم، أو سطوح طبقات). تعطي البنيات الريشية والمتفرعة والشقوق الشعاعية والبنيات الحلقية (بنيات الشق الأولي) معلومات حول موقع مركز الشق (الحقل الأولي) وجود اتجاه الانتشار المفضل. إن البنيات الريشية والمتفرعة هي تحززات أو بروزات ناعمة تتجه شعاعياً من مركز الشق أو تتفرع نحو الجانبين بدءاً من محور مركزي. وتكون البنيات المتميزة بمحور طولي (3-9-b) أكثر انتشاراً من البنيات الشعاعية الشكل (3-9-a) وهي تدعى (البنيات الريشية). تنشأ البنيات المتفرعة من تقاطع السطح الرئيس للشق مع شقوق معترضة. ويفترض أن مركز الشق يوجد باتجاه تجمع والتقاء التحززات أو البروزات. وهذا يفيد في تحديد مركز الشق، بخاصةً عند عدم اكتمال تكشف البنيات الريشية.

تتطور الشقوق الشعاعية بازدياد ارتفاع البروزات أو تعميق التحززات العائدة للبنيات الشعاعية لتؤلف وردة منبسطة (3-9-c). أما البنيات الحلقية فهي ثنيات ذات مسار دائري أو اهليلجي لسطح الشق تحيط بمركزه. وبداً من هذا المركز فإن مظهر البنيات الحلقية يتميز بارتفاعات أو انخفاضات سلمية الشكل (3-9-d). ويشابه منشأ هذه الشقوق نشوء المكسر الصدفي للزجاج.

تتناقص شدة بنيات الشق الأولي كلما ابتعدنا عن مركز الشق، حيث يتحدّد مظهر الشق خارج إطار وجودها من خلال السطح الرئيس للشق. وهو الذي يشاهد غالباً ضمن التكشفات وتكون له الأهمية الأولى ضمن إطار الدراسات الاحصائية. أما النهاية الطبيعية للسطح الرئيس للشق فتتمثل بحدوث انثناء للسطح الرئيس للشق الشكل (3-9-e،f ) وشكل (3-10). ويمكن للنهاية الطبيعية للسطح الرئيس للشق أن تتمثل أيضاً من خلال حافة مقوسة الشكل (3-9-e).




**الشكل (3-9): بنيات الشق الأولي. a- بنية شعاعية. b- بنية ريشية. c- شقوق شعاعية، d- بنية حلقية (مع مقطع عرضي) ، e- النطاق الحافي للشق والحافة المقوسة، f- أشكال حواف الشقوق.**




**الشكل (3-10): شكل تخطيطي لبنية السطح الرئيس للشق (البنية الريشية).**

**2- مميزات الشقوق:** الفائدة منها تحديد علاقاتها بعضها مع بعض، حيث يتم توثيقها أثناء القيام بقياس وضعيتها الفراغية. وتوضع في النهاية بطاقة توثيقية للشقوق المدروسة الجدول (3-1).

| الصخر | الوضعية الفراغية | الامتداد | السطح | الاستواء | العرض | الحشوة | علائم الحركة |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| حجر رملي متوسط الحبيبة ملاط كلسي | 310/80° | 20م | أملس | تحدب بسيط نحو NE | 1 مم | كوارتز | لايوجد |

**الجدول (3-1).**

أ- **الوضعية الفراغية: إن** تحديد الوضعية الفراغية لسطوح الشقوق هو الأساس لوضع المخططات البيانية الإحصائية للشقوق، ويتم ذلك في الحقل بوساطة البوصلة الجيولوجية، حيث يتم تحديد سطح الشق من خلال قياس اتجاهه واتجاه ميله وزاوية ميله. ويشترط أن يكون موقع القياس (المكان الذي توضع عليه البوصلة من سطح الشق) ممثلاً للوضعية الفراغية للشق، أما في حال وجود تعرجات بسيطة لسطح الشق فيستخدم لوح صغير مستوٍ خشبي أو بلاستي يوضع فوق سطح الشق لتعديل هذه التعرجات.

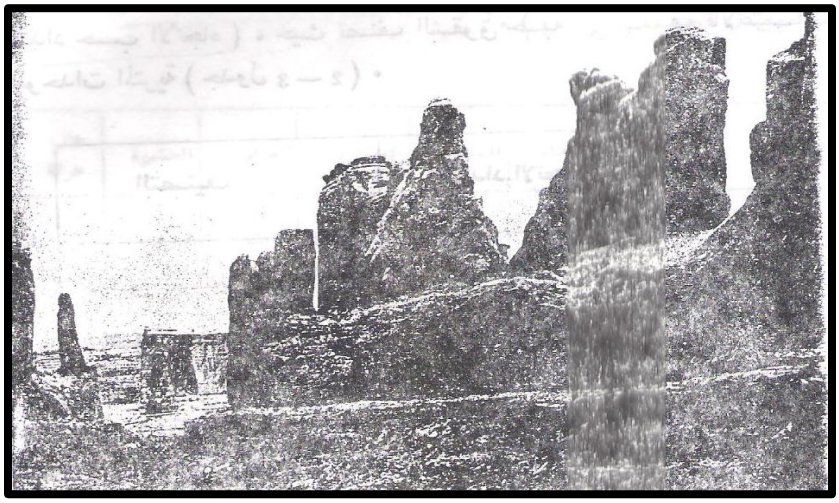
**ب- الامتداد:** إن تحديد الأبعاد الكلية للشقوق غير ممكن على الأغلب، وذلك نظراً لطبيعة التكشفات، ويتم الاقتصار في معظم الحالات على تحديد الامتداد الاتجاهي (الامتداد حسب الاتجاه). حيث تصنف الشقوق حسبه إلى صفوف بالاعتماد على الوحدات المترية الجدول (3-2).

| التصنيف | الامتداد الاتجاهي (بالمتر) |
|---|---|
| شق سنتيمتري | 0.1-0.01 |
| شق ديسيمتري | 1-0.1 |
| شق متري | 10-1 |
| شق ديكامتري | 100-10 |
| شق من فئة المائة متر | 100 فما فوق |

**الجدول (3-2): تصنيف الشقوق حسب امتدادها الاتجاهي إلى صفوف مترية.**

وتصنف الشقوق التي تقل في امتدادها الاتجاهي عن 100م إلى صفوف عامة ثلاثة هي:
صغير (0.1–1 م)، متوسط (1–10 م)، كبير (10–100 م). وتصنف الشقوق أيضاً إلى شقوق مرتبطة بالصخر وشقوق محلية وشقوق إقليمية.

وتصنف الشقوق أيضاً إلى شقوق مرتبطة بالصخر وشقوق إقليمية ولا يعتمد ذلك على المقياس المتري. فالشقوق المرتبطة بالصخر تتعلق بمدى انتشار الصخر نفسه (ثخانة الطبقة مثلاً) وبشكل وجوده (طبقة أو جدار ناري مثلاً) وبصفاته الميكانيكية. أما الشقوق المحلية فتتلق بالبنيات التكتونية المحلية، حيث يمكن أن ترتبط بطية أو بصدع مثلاً، بينما تخترق الشقوق الإقليمية العديد من الوحدات الصخرية والبنيات الجيولوجية الشكل (3–11).



**الشكل (3–11): سطوح الشقوق في حجر رمل Entrada في مقاطعة Utah الأمريكية.**

**ت– بنية السطح:** تصنف بنية سطح الشق إلى ملساء أو خشنة أو متموجة، وهناك على الأغلب علاقة بين الطبيعة البتروغرافية والليتولوجية للصخر وبنية سطح الشق.

**ث– استواء السطح:** يمكن لسطح الشق أن يكون مستوياً، أو أن يكون مقوساً (كأن نقول مثلاً أنه قليل التحدب نحو NW) وهذا مايجب ذكره في الملاحظات. أو يتم قياس هذه التغيرات بوساطة البوصلة الجيولوجية.

**ج– عرض الشق (عرض الفرجة):** يمكن وصف شق بأنه مغلق عندما يتعذر تحديد عرضه بالعين المجردة. وعند اجراء الدراسة الإحصائية للشقوق فإنه من المناسب التمييز بين الشقوق المغلقة والمفتوحة والمفتوحة بشكل كبير (فواصل).

| التصنيف | عرض الشق ملم |
|---|---|
| شق مغلق | أقل من 0.2 |
| شق مفتوح | 10–0.2 |
| شق مفتوح بشكل كبير (فاصل) | 10 فما فوق |

**الجدول (3–2): تصنيف الشقوق حسي عرضها.**

**ح– الحشوة (المالئة للشق):** تتوضع الحشوات ضمن الشقوق على الأغلب بالترسيب الكيميائي من المياه والسوائل الراشحة أو المياه العذرية التي تتخلل الشقوق. ومن أهم الفلزات التيتملأ الشقوق: الانهيدريت–الباريت–الكلوريت–والايبيدوت–الفلوريت–الهاليت–الكربونات–البيريت وفلزات الغضار والمرو. كما يمكن أن يوجد البيتومين، وفي حال وجود عدد من الفلزات ضمن الشق يجب تحديد تعاقبها الزمني النسبي ونسبها المئوية.

**3-4- مجموعة الشقوق Joint Set :**

تتألف مجموعة الشقوق من عدد من شقوق متوازية أو شبه متوازية. ويعرف معدل الشقوق (K) لمجموعة ما بأنه عدد الشقوق (n) الموجودة في مسافة معينة (l) مقيسة بشكل عمودي على سطوح هذه الشقوق، أي:

$$\mathbf{K} = \frac{n}{l}$$

وكلما ازدادت قيمة (K) يعني ذلك ازدياد تشقق الصخر، بينما نعبر القيم المنخفضة لـ (K) عن انخفاض عدد الشقوق على امتداد المسافة المقيسة. أما قيمة مقلوب (K) فتعطي ما ندعوه "درجة التباعد" **(d)** وهي تبين المسافة المتوسطة الكائنة بين الشقوق المتتالية العائدة لمجموعة الشقوق أي:

$$\mathbf{d} = \frac{l}{n}$$

وكلما انخفضت درجة التباعد ازداد معدل الشقوق أي ازداد التشقق.

**3-5- جملة الشقوق Joint system:**

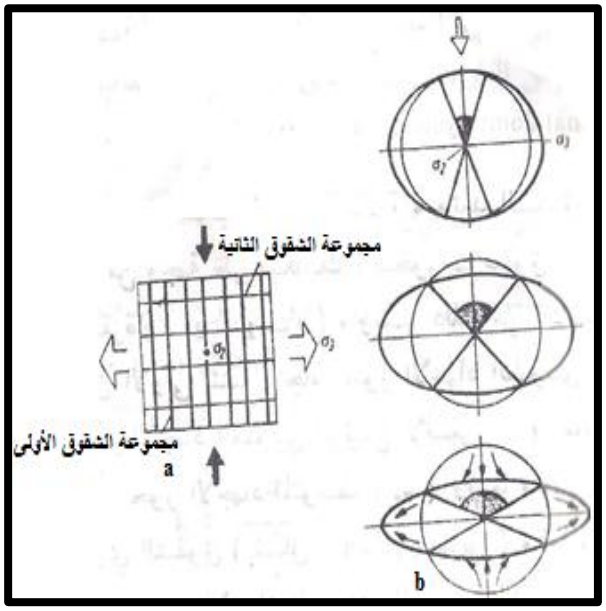
**3-5-1- تعريف:** تتألف جملة الشقوق من مجموعتين شقوقيتين مرتبطتين من الناحية المنشئية وتتقاطعان بزاوية مميزة ويوجد نوعان أساسيان من جمل الشقوق هما جملة الشقوق المتعامدة وجملة الشقوق القطرية.

**3-5-2- جملة الشقوق المتعامدة Orthogonal Joint system:** تتقاطع المجموعتان الشقوقيتان بزاوية قائمة. وتعد الشقوق المنتمية لهذا النوع من الجمل من وجهة نظر ميكانيك الصخور شقوق شد. ويفسّر ذلك من الناحية الجيولوجية بأن مجموعة الشقوق الأولى تنشأ باتجاه محور الاجهاد العمودي الرئيس الأكبر ($\sigma 1$) ويعد محور الاجهاد العمودي الرئيس الأصغر ($\sigma 3$) يعامد سطوح هذه الشقوق، بينما يأخذ محور الاجهاد المتوسط ($\sigma 2$) وضعاً معامداً للمحورين السابقين ضمن مستوي الشقوق الشكل (3-12-a). أما مجموعة الشقوق الثانية التي تتعامد مع محور الاجهاد العمودي الرئيس الأكبر فلا يمكن أن تنشأ من خلال تجربة الضغط أحادي المحور. إلا أن هذه المجموعات موجودة في الطبيعة، وهناك آراء مختلفة لتفسير نشوئها. ويعتمد معظم هذه الآراء على أن هناك عملية تبادل لمحاور الإجهاد الرئيسة أثناء التشوّه، كأن يتم التبادل بين محوري σ1،σ3 أو يحدث تبادل بين σ2،σ3 في حال كون σ1 شاقولياً.

تختلف مجموعتا الشقوق المؤلفتان لجملة الشقوق المتعامدة من حيث الكثافة ومن حيث بنية سطوح الشقوق وعرضها، وتكون المجموعة الأولى أكثر وضوحاً من المجموعة الثانية. ويعود لجملة الشقوق المتعامدة مجموعة ثالثة تتعامد مع كلتا المجموعتين الأولى والثانية. وهي تتمثل على الأغلب بسطوح التطبق نفسها. وبالتالي فإن المجموعات المتعامدة الثلاث المؤلفة لهذا النوع من الجمل تحدد جسماً صخرياً ذا شكل مكعب أو رباعي الوجوه.

**3-5-3- جملة الشقوق القطرية:** تتألف جملة الشقوق القطرية من مجموعتي شقوق مزدوجتين. ويعزى نشوؤها إلى عملية القص. تنشأ كسور القص من خلال تجربة الضغط أحادي المحور عندما يكون التماس بين العينة الصخرية وآلة الضغط مباشراً. أي دون وجود مادة لزجة بينهما، حيث ينشأ مستويا قص متقاطعان نتيجة تقصير العينة باتجاه الضغط وتمددها بالاتجاه المعامد له. يبين النموذج النظري لهذه العملية أن محور الاجهاد العمودي الرئيس الأكبر ($\sigma 1$) ينصف الزاوية الصغيرة بين مستويي القص وذلك عند بداية تطبيق الاجهاد، ومع تقدم العملية وبعد تجاوز زاوية القص النظرية (45°) فإن ($\sigma 1$) يصبح منصفاً للزاوية الكبيرة بينهما الشكل (3-12-b). تدعى هذه العملية التفلطح حيث يتناقص ارتفاع الجسم ويأخذ تفلطحاً متزايداً باتجاه معامد لـ ($\sigma 1$). إن الزاوية الصغيرة بين مستويي القص (زاوية الشقوق القطرية) تأخذ اتجاه الاجهاد العمودي الرئيس الأكبر وذلك في الصخور القصيمة الصلبة الموجودة في الأجزاء العلوية من القشرة الأرضية الشكل (3-12-b الشكل العلوي). أما في الأجزاء

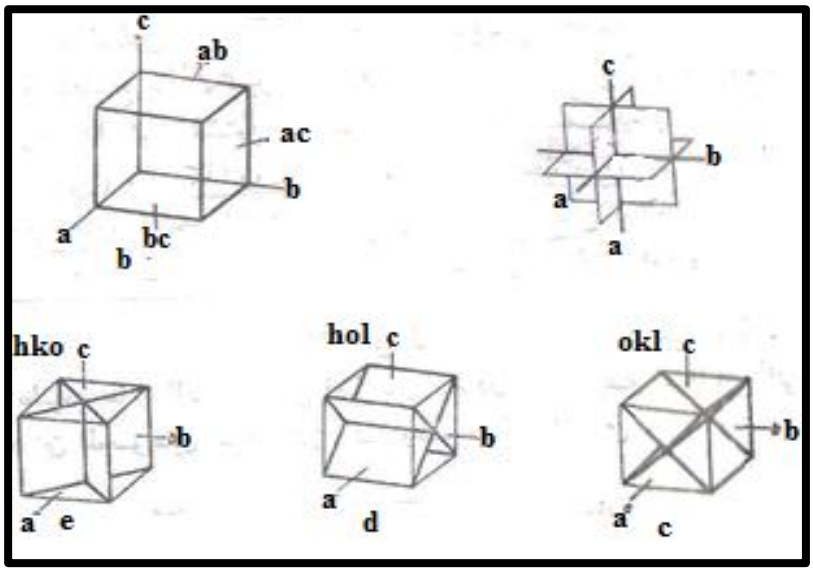
العميقة من القشرة الأرضية فيزداد تأثير عملية التفلطح بسبب شروط الحرارة السائدة هناك، بحيث أن محور ($\sigma 1$) ينصف الزاوية الكبيرة لمستويي القص على الأغلب (3–12–b الشكل السفلي).. وهكذا وانطلاقاً من مبدأ أن منصفات زوايا سطوح القص تتطابق مع محاور الاجهادات العمودية الرئيسة فإنه يمكن استخدام مجموعات الشقوق المزدوجة القطرية لاستنتاج الوضعيات الفراغية لهذه المحاور. يؤدي الاختلاف في قابلية الانزلاق لسطحي القص المزدوجين والمرتبط على الأغلب بطبيعة المادة الصخرية إلى قص غير متعادل للمجموعتين وبالتالي إلى كون إحدى هاتين المجموعتين المزدوجتين أكثر وضوحاً من الأخرى.




**الشكل (3–12): علاقة الوضعية الفراغية لمحاور الاجهادات العمودية الرئيسة مع جمل الشقوق.**
**a– ترتيب المحاور $\sigma 1$، $\sigma 2$، $\sigma 3$ بالعلاقة مع جملة الشقوق المتعامدة.**

**3–5–4– الشقوق في جملة الاحداثيات التكتونية:** تستند جملة محاور الاحداثيات **c، b،a** المستخدمة لوصف البنيات إلى جمل الشقوق المتعامدة. أما جملة الشقوق القطرية فتتحدد علاقتها مع هذه المحاور من خلال "قرائن ميلر" المستخدمة في علم البلورات. يتم في حالة نشوء جملة الشقوق المتعامدة الشكل (3–13–a) وضع محور a موازياً لاتجاه القوة المؤدية للتشوّه (اتجاه محور $\sigma 1$). أما محور c فيتطابق مع محور الاجهاد العمودي الرئيس المتوسط ($\sigma 2$)، بينما يتوضع محور b معامداً لمستوي ac التكتوني وهو يتطابق مع محور الاجهاد العمودي الرئيس الأصغر ($\sigma 3$). وهكذا فإن المجموعتين الأولى والثانية العائدتين لجملة الشقوق المتعامدة والتي تتممها مجموعة شقوق متعامدة ثالثة يمكن تمييزها وتحديدها من خلال المحاور التكتونية الشكل (3–13–a). ويمكن التعبير عن السطوح الثلاثة العائدة لهذه الجملة من خلال سطوح مكعب، حيث يكون المحور الذي لايتضمنه اسم السطح هو المحور العمودي على هذا السطح (3–13–b). يرتبط تسلسل قرائن ميلر l,k,h مباشرةً بتسميات المحاور التكتونية c,b,a على الترتيب. وهذا يعطي التعبير عن جمل الشقوق المتعامدة من خلال قرائن ميلر أيضاً، حيث يتم تمييز قرائن ميلر المتطابقة مع المحاور الاحداثية التي يقع ضمنها مستوي معين من خلال رمز الصفر (0). ويعبر مثلاً عن شقوق ac من خلال قرائن ميلر بشقوق oko، أما السطحان الآخران العائدان للجملة المتعامدة فيعبر عنهما برموز مناسبة الجدول (3–3). إن الأهم من ذلك هو تمييز جمل الشقوق القطرية من خلال قرائن ميلر، حيث يتم إعطاء المحور التكتوني الذي يتقاطع عبره سطحا الشقوق القطريان رمز الصفر (0). وهكذا فإن جملة الشقوق القطرية التي يتطابق خط تقاطعها مع محور b مثلاً تعطى اسم

"جملة شقوق hol القطرية" أو "شقوق hol" اختصاراً. ويتم ترتيب خطوط تقاطع جمل الشقوق القطرية الثلاثة حسب المحاور الاحداثية التكتونية الثلاثة c,b,a الشكل (3–13–e,d,c) والجدول (3–4).




**الشكل (3–13): جمل الشقوق ضمن الاحداثيات التكتونية.**

**a– محاور جملة الشقوق المتعامدة. b–التوضع حسب السطوح.**

**C,d,e–جمل الشقوق القطرية hko,hol,okl.**

| جملة الشقوق المتعامدة | الرمز | | | |
|---|---|---|---|---|
| | حسب المحاور التكتونية | | حسب قرائن ميلر | |
| مجموعة الشقوق الأولى | شقوق | ac | شقوق | oko |
| مجموعة الشقوق الثانية | شقوق | bc | شقوق | hoo |
| مجموعة الشقوق الثالثة | شقوق | ab | شقوق | ool |

**الجول (3–3): جملة الشقوق المتعامدة حسب المعطيات الاحداثية.**

| خط التقاطع=محور احداثي | | رمز جملة الشقوق القطرية | |
|---|---|---|---|
| محور | a | شقوق | okl |
| محور | b | شقوق | hol |
| محور | c | شقوق | hko |

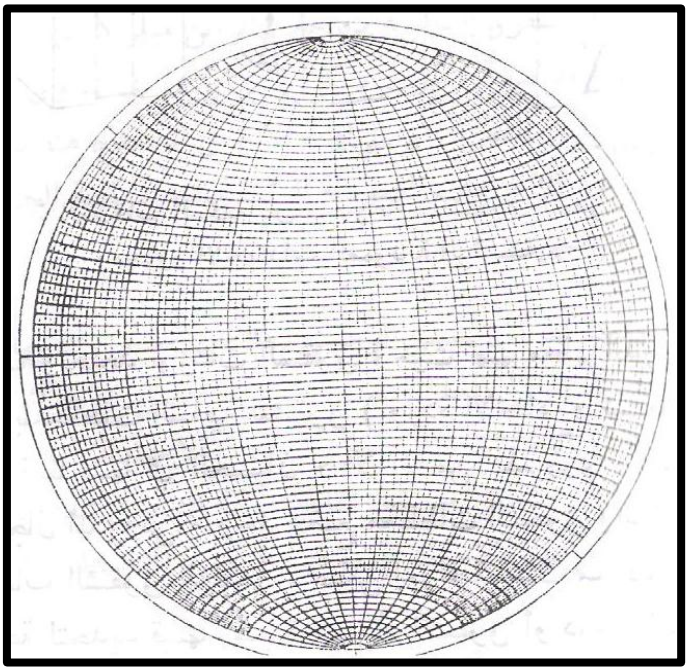
**الجدول (3–4): ترميز الشقوق القطرية حسب قرائن ميلر.**

أما في حال عدم تطابق خط تقاطع مجموعتين شقوقيتين مع أي من المحاور الاحداثية فيرمز للشقوق بـ hkl.

**3–6– تحديد الوضعية الفراغية للشقوق:** يعتمد وصف الشقوق وتحديد وضعيتها الفراغية ضمن مجال التكشفات على البطاقة التوثيقية للشقوق الجدول (3–1) وذلك إضافة إلى تحديد الوضع البنيوي العام في المجال المدروس (طية، قبة...). ويتم قياس الوضعية الفراغية لكل شق دون وضع موقع وجوده ضمن التكشفات في الحسبان. وتعد هذه المعايير أساساً في وصف وتحديد توزعات الشقوق، حيث تهتم معظم الدراسات المتعلقة بهذا الموضوع بالمخططات البيانية للشقوق (وردة الاتجاه أو شبكة سميث) دون وضع المسافات فيما بينها بالحسبان. إلا أنه من الضروري قياس كل الشقوق الموجودة في المجال المدروس. وبعد وضع

مخططات الشقوق واستنتاج الوضعيات الفراغية لمجموعات الشقوق الرئيسة، يمكن اجراء قياسات مساقة بشكل عمودي على كل مجموعة لتحديد قيمها المميزة كمعدّل الشقوق أو درجة التباعد.

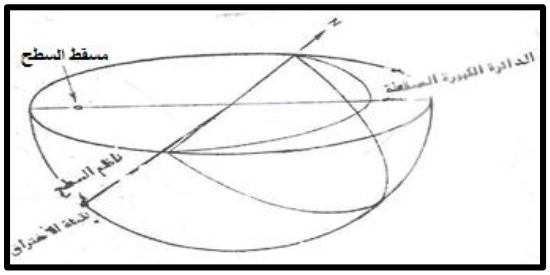
**3-6-1- المخططات البيانية للشقوق:** إن المخططات البيانية diagrams التي يتم انشاؤها من خلال إحصاء الشقوق تمثل اسقاطاً لكل العمليات التي أدت إلى تكون الشقوق منذ نشأة الصخر. وتعطي هذه المخططات الإحصائية معلومات مهمة عن الوضعية الفراغية للشقوق المختلفة في منطقة معينة، حيث أن ذلك "الخليط" من الشقوف ذات الوضعيات الفراغية المختلفة الذي يشاهد في الحقل يتحلل ضمن المخطط البياني الاحصائي إلى مجموعات تأخذ اتجاهات محددة على الأغلب. وهكذا فإن الدور الأساسي لمثل هذه المخططات هو إيضاح هذه المجموعات ومقارنتها.توجد بشكل عام عدة أنواع لهذه المخططات البيانية (هيستوغرامات، وردات اتجاه، شبكات سميث) غير أن شبكة سميث (الاسقاط المحافظ على المساحة eqal area projection الشكل (3-14) هي الأفضل لتمثيل الوضعيات الفراغية للشقوق وتحديد مجموعاتها المختلفة بصفة إحصائية.



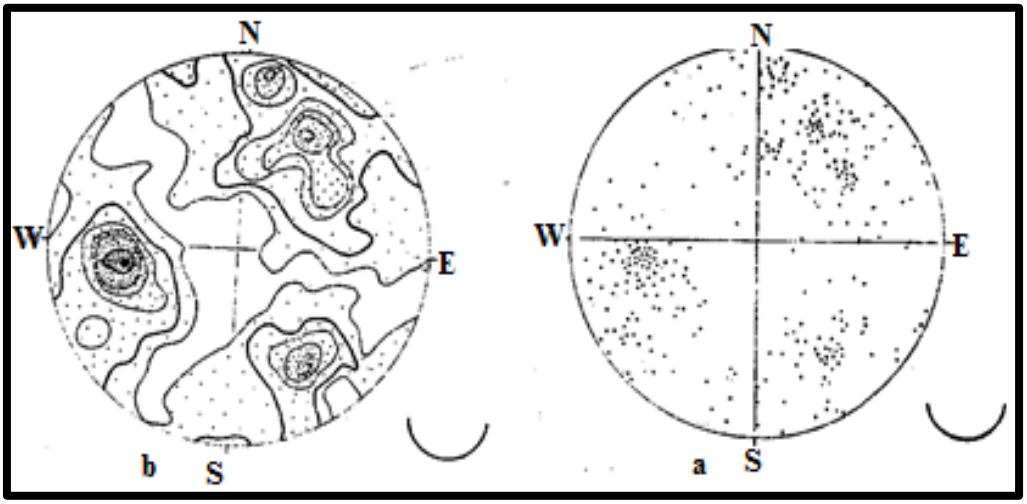
**الشكل (3-14): شبكة سميث Schmidt net أو المسقط المحافظ على المساحة.**

يتمثل كل شق تم قياسه في الحقل بنقطة على هذه الشبكة ويوضّح الشكل (3-15) مبدأ إسقاط المستويات على شبكة شميت (نصف الكرة السفلي). وهكذا فإن وضعية أي مستوً (سطح شق في هذه الحالة) تتمثل في شبكة شميت من خلال نقطة. وبالتالي تشكل الوضعيات الفراغية المقيسة بشكل احصائي الشقوق في شبكة شميت ماندعوه "المخطط البياني النقطي"الشكل (3-16-a). فإذا كان تبعثر النقاط ضمن هذا المخطط صغيراً أي أن النقاط متجمعة في منطقة محدودة ضمنه فإنه يمكن بالنظر تحديد الوضعية الفراغية للاتجاه السائد للشقوق، أما إذا كان التبعثر كبيراً، وبخاصة إذا لم تكن هناك وضعية فراغية سائدة محدّدة فإنه يصعب التعامل مع المخطط البياني النقطي.ولهذا السبب وبهدف الايضاح الأفضل لتوزع الوضعيات الفراغية للشقوق وإبراز الوضعية السائدة منها، يتم تحويل المخطط البياني النقطي إلى مخطط كثافي هلى شكل "مخطط منحنيات تسوية contoral diagram" الشكل (3-16-b). يمكن مقارنة هذه المخططات من حيث الشكل بمنحنيات التسوية الطبوغرافية، حيث أن القمم في الأهية تطابق مناطق التركيز الأعظمي للقياسات الأولى.إن تحويل المخطط النقطي إلى مخطط كثافي يتم من خلال استخدام مسطرة إحصائية ذات دائرة يبلغ نصف قطرها 1 سم، أي أن مساحتها تعادل 1% من مساحة شبكة شميت (يبلغ نصف قطر

شبكة شميت المستخدمة 10 سم)، حيث يتم تحريك هذه المسطرة بخطوات منتظمة فوق المخطط النقطي المثبت بدوره فوق شبكة خطوط متعامدة سنتيمترية بحيث أن مركز دائرة المسطرة الإحصائية يتوضع دائماً فوق نقطة تقاطع خطوط الشبكة المتعامدة. وإذا افترضنا أن عدد النقاط الكلي في المخطط النقطي يساوي 200 نقطة وأن عشراً منها ظهرت ضمن مساحة زائرة المسطرة الإحصائية في منطقة ما من المخطط، فإن ذلك يعني أن 5% من النقاط محصورة في هذه المنطقة. وبالنسبة للنقاط الموجودة بالقرب من محيط المخطط النقطي فإن دائرتي مسطرة الإحصاء تستخدمان بالوقت نفسه ويجمع عدد النقاط الموجودة في كلتا الدائرتين ويكتب في مركزيهما. يتم بعد ذلك رسم رسم منحنيات تساوي الكثافة النقطية بعد اختيار هذه المنحنيات بما يتناسب مع المخطط البياني الشكل (3–16–b)، إلا أن عدد المنحنيات يجب ألا يتجاوز العشرة ولا يقل عن الأربعة بشكل عام. ويحدّد رقم كل منحني من خلال النقاط متساوية القيمة التي يمر بها.




**الشكل (3–15): مبدأ الاسقاط في شبكة شميت. يمكن تمثيل أي سطح مائل من خلال نقطة (مسقط السطح) أو من خلال دائرة كبيرة.**




**الشكل (3–16): شبكة شميت، نصف الكرة السفلي.**

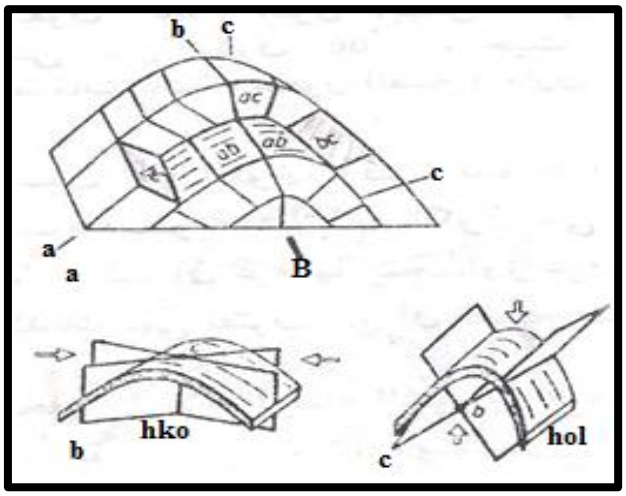
**a–المخطط البياني النقطي. b–مخطط منحنيات التسوية.**

**3–7– الليتولوجيا والتشقق:** إن شدة التشقق ومميزات الشقوق وزاوية الجملة القطرية تبدي ارتباطاً بالتكوين الليتولوجي والبتروغرافي للصخور. فلو افترضنا أن اجهاداً متساوياً أثر في صخور رسوبية مختلفة، لوجدنا أن شدة التشقق في هذه الصخور تزداد بالترتيب التالي: كونغلوميرا (تشقق منخفض) –انهيدريت–حجر رملي–حجر سيلتي–حجر كلسي–دولوميت–حجر مارلي–حجر غضاري (تشقق شديد). كما تلعب المواد اللاحمة في الصخر دوراً مكملاً ضمن إطار علاقة التشقق بالليتولوجيا. إن ازدياد كمية الغضار في الحجر الكلسي مثلاً يزيد من تشققه بينما تؤدي المواد اللاحمة الكربوناتية والسيليسية على الأخص في الحجر الرملي إلى خفض ميله لتكوين الشقوق. كما أن الصخور الرسوبية ذات البنيات والنسج المتبدلة تبدي تشققاً أشد من الصخور الكتلية. وكذلك فإن التناوب بين الطبقات ذات المواد العصية والطيّعة (تناوب حجر كلسي مع حجر غضاري مثلاً) يؤدي إلى

زيادة التشقق على مستوي التعاقب الواحد. إن مقدار الزاوية الكائنة بين مجموعتي الشقوق العائدتين لجملة قطرية (الزاوية التي ينصفها محور $\sigma 1$ في المواد العصية) يزداد (مع ثبات قيمة الاجهاد) كلما ازداد السلوك الطيّع للصخور الرسوبية.

**3-8- وضعيات الشقوق في البنيات الجيولوجية:** يمكن ارجاع الشقوق إلى الاتجاه البنيوي السائد في منطقة أو إقليم الدراسة، حيث يعبّر عن الاتجاه السائد من خلال محاور الطيات أو الصدوع أو البنيات القبابية أو غير ذلك.

**3-8-1- جمل الشقوق في الطيات:** يتم تحديد الوضعية الفراغية للشقوق في الطيات اعتماداً على معرفة الوضعية الفراغية لمحاور هذه الطيات ومقاطع ac لها، وكذلك المميزات الأخرى للطية. ويمكن مقارنة المخطط البياني الاحصائي للشقوق مع النموذج الموصوف فيما يلي والذي يعبر عن وضعيات جمل الشقوق المتعامدة والقطرية في الطيات. يعبر التشقق التكتوني عن وجود جزء من التوترات المرنة أثناء حدوث التشوهات الانحنائية اللدنة. وهذه التوترات المرنة أدت عند تجاوز حد متانة الصخر أثناء حدوث الطي إلى تكوّن الشقوق. يتم وصف جملة الشقوق المتعامدة ثلاثية المجموعة الموجودة ضمن إطار الطية باستخدام جملة الاحداثيات التكتونية الداخلية المتعلقة بسطح الطبقة. وهكذا فإن شقوق ab الشكل (3-17-a) توازي سطح التطبق، حيث تنسب سطوح التطبق إلى الشقوق. وأحياناً يتم تصنيف شقوق ab بأنها شقوق تطبق تأسست أثناء الترسيب وتتبع سطوحاً حدية ليتولوجية أو بأنها شقوق تطبق تشكلت موازية لسطوح الطبقات الثخينة. تتوضع شقوق bc عمودية على الشقوق ab. وهذه يمكن أن تنزاح باتجاه محور الطية نتيجة انزلاق الطبقات أثناء حدوث الطي، وهي تعد شقوق شد متعلقة بالطبقة الموجودة في أجنحة الطية، كظاهرة مرافقة للطي. إن شقوق ac المعامدة لمحور الطية أكثر وضوحاً من المجموعتين الأخريين العائدتين لنفس جملة الشقوق المتعامدة. وذلك بسبب التمدد العرضي المرافق للطي والمؤدي إلى حدوث تكسر حسب هذه الشقوق. وإضافة لذلك فإن هذه الشقوق لا تتعرض إلى تغير في وضعيتها خلال تقدم عملية الطي. وهذا سبب آخر لكونها أكثر وضوحاً. تتميز هذه الشقوق عادةً بأنها سطوح ملساء مستوية، وبأنها تكون على شكل مجموعة واحدة تخترق الطية لمسافات بعيدة. كما أن عرضها يتجاوز عرض الشقوق العائدة للمجموعات الأخرى. وكذلك فهي تقترب من أن تصبح صدوعاً عادية.



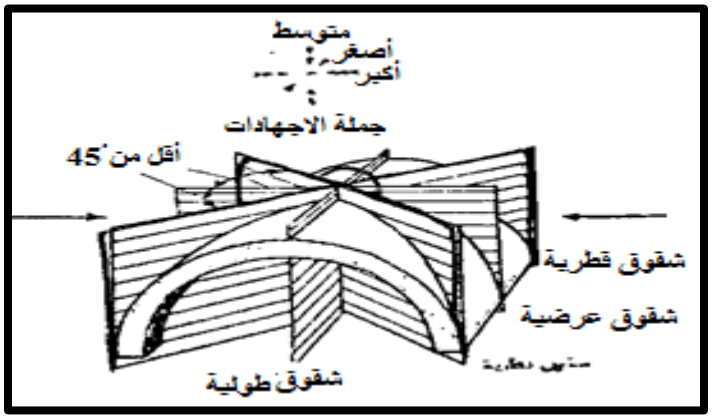

**الشكل (3-17): جمل الشقوق في طية. a-وضعية سطوح جملة الشقوق المتعامدة. b-جملة شقوق قطرية hko مشكلة في مرحلة الطي. C- جملة شقوق قطرية hol متشكلة في مرحلة متقدمة من الطي.**

إن كل محور من المحاور الثلاثة لجملة الشقوق التكتونية المتعامدة يمكن أن يشكل خط تقاطع لجملة شقوق قطرية مرتبطة منشئياً مع الطي. وتكون جمل الشقوق القطرية أكثر ملاءمةً من جمل الشقوق المتعامدة لوصف عمليات الطي، بخاصةً بداية هذه العمليات ونهايتها، حيث يقود التضييق الحاصل عند بداية عملية الطي في الحالة النموذجية إلى نشوء جملة شقوق hko

تكون زاويتها الصغيرة باتجاه المحور a العائد لجملة الاحداثيات الديناميكية والذي يأخذ الاتجاه نفسه للقوة المؤدية للتشوّه الشكل (2-17-c). هذا ويمكن لشفوف hol أن تشكل سطوحاً أولية لصدوع مقلوبة أحادية أو ثنائية المجموعة تتراكب عبرها نواة الطية فوق أجزاء من الأجنحة.

يوجد تصنيف أكثر بساطةً للشقوق بالعلاقة مع محاور الطيات يجمل الشقوق في ثلاثة أنماط هي الشكل (3-18):

آ- **الشقوق الطولية:** وهي توازي محاور الطيات تقريباً وتكون ذات ميول شديدة، وتدعى شقوق الافراج أيضاً لأنها تنشأ عن تحرر الاجهاد الرئيس المعامد لمحور الطية. إن شقوقاً أخرى تأخذ هذه الوضعية تقريباً يمكن أن تعزى إلى الشد على الجانب المحدّب لطبقة مطوية.




**الشكل (3-18): التوجه الهندسي للشقوق الطولية والعرضية والقطرية بالنسبة لمحور الطية وبالنسبة لمحاور الاجهادات الرئيسة.**

**ب- الشقوق العرضية:** وهي تعامد محاور الطيات تقريباً وتكون ذات ميول شديدة أيضاً وتدعى شقوق الشد، حيث تنشأ نتيجة التمدد الموازي لمحور الطي. وتشابه هذه الشقوق من حيث المنشأ تلك الشقوق المتشكلة بوضعية موازية لجوانب عينة مخبرية خاضعة للضغط.

**ت- الشقوق القطرية:** وهي توجد على شكل مجموعتين مزدوجتين paired sets متناظرتين تقريباً بالنسبة للشقوق الطولية والعرضية في منطقة ما. وتكون زاوية تقاطعها المنفرجة باتجاه الشقوق الطولية بينما تكون زاوية تقاطعها الحادة باتجاه الشقوق العرضية وتكون غالباً ذات ميول شديدة.

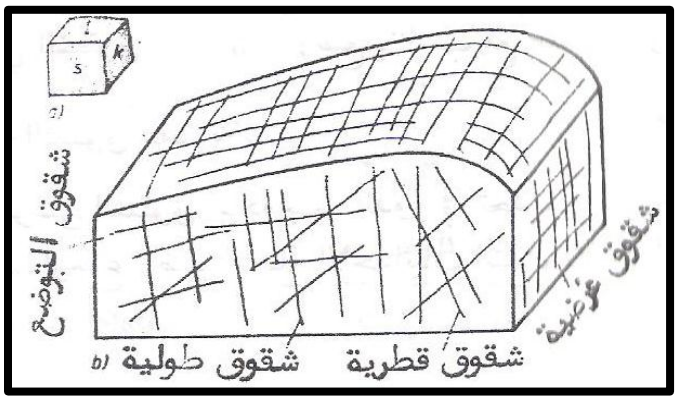
**3-8-2- جمل الشقوق في القباب:** تصعب دراسة الشقوق في المقاطع الشاقولية للقباب، ويسهل ذلك في المساقط الأفقية حيث يبدو توزع الشقوق أكثر وضوحاً. وفي الحالة النموذجية لقبة ذات شكل اهليلجي توجد مجموعتان من الشقوق، الأولى توازي محورها الطويل والثانية توازي محورها القصير أي أن هاتين المجموعتين تؤلفان جملة شقوق متعامدة. وتتميز الحالة النموذجية بأن شقوقاً شعاعية تعبر من محرقي الاهليلج إلى الجزء الأكثر توّساً من محيط الاهليلج. وكلما كان الشكل العام للإهليلج أكثر تفلطحاً، كانت مجموعات الشقوق المتعامدة أكثر شدةً، وكلما اقترب الاهليلج من الشكل الدائري كانت الشقوق الشعاعية أكثر وضوحاً.

إن أهم مايميز شقوق القباب في جميع اتجاهاتها والتي تكون شاقولية على الأغلب هو أنها شقوق مفتوحة. وهي تقترب من أن تكون سطوحاً أولية لصدوع عادية. وهكذا نجد أن التشوّهات التكسرية المميزة للقباب هي الشقوق المفتوحة والصدوع العادية.

**3-8-3- جمل الشقوق في الصخور الرسوبية غير المطوية:** إن وصف التشقق في الصخور الرسوبية غير المطوية يسري في المجالات التي لاترتبط صورة التشقق فيها بصدوع، حيث يمكن للطبقات أن تكون أفقية أو مزاحة عن وضعها الأصلي

لوجودها بين صدوع بعيدة عن بعضها. ومن المهم عند وصف توزع الشقوق تحديد علاقتها مع الوضعية الفراغية للطبقات. يمكن لمجموعات الشقوق بشكل عام أن تؤلف جملاً متعامدة ومعامدة للتطبق، حيث تكون إحدى المجموعتين أكثر شدةً من الأخرى، كما يمكن أن تختلفا في مميزاتهما (امتداد، عرضاً، سطحاً). ويمكن للشقوق أن تؤلف جملاً قطرية تكون قيم زوايا تقاطع مجموعاتها مختلفة باختلاف الصفات الصخرية للطبقات.

**3-8-4- جمل الشقوق في كتل الغرانيت:** يرى الباحثون أن تشقق اندساسات الغرانيت ليس عشوائياً بل يشتمل جمل شقوق متعامدة وقطرية. ويمكن في جملة الشقوق المتعامدة تمييز شقوق طولية (S في الشكل 3-19-a) موازية لاستطالة الجسم المهلي الغرانيتي وشقوق عرضية (k في الشكل 3-19-a) عمودية على S وشقوق توضع L (شقوق أفقية) تمثل المجموعة الثالثة لجملة الشقوق المتعامدة، وهي تنشأ بشكل لاحق نتيجة التعرية وإزالة الحمولات. وتتصف كل مجموعة من هذه المجموعات بمميزات حقلية خاصة. وعلاوة على ذلك يمكن أن توجد جمل شقوق قطرية (شكل 3-19-b). وهي تستخدم في تحديد محور الاجهاد العمودي الرئيس الأكبر ($\sigma 1$) الذي يكون منصفاً للزاوية الصغيرة المتشكلة من تقاطع مجموعتي الشقوق القطريتين المزدوجتين. وبشكل عام فإن دراسة المخططات البيانية للشقوق العائدة للكتل الغرانيتية أصعب من دراسة المخططات المعتمدة على وجوه سطح رسوبي مرجعي.




**الشكل (3-19): جمل الشقوق في كتلة غرانيتية.**

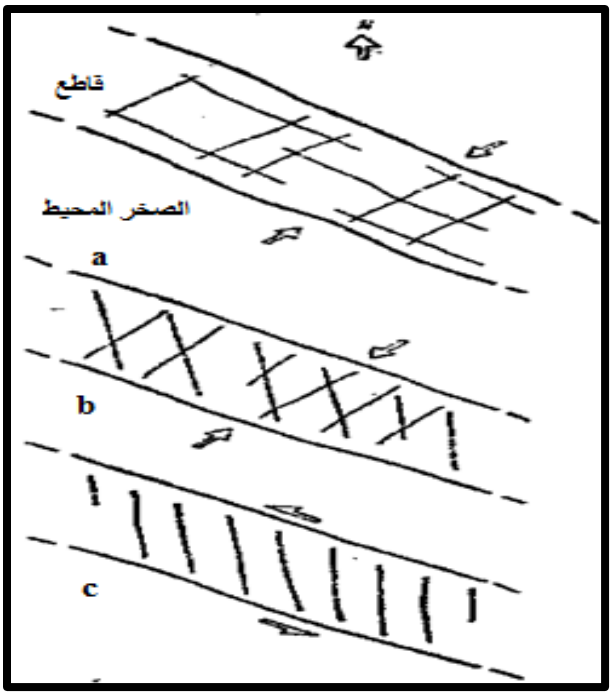
**a-سطوح تقسيم الغرانيت، b-جمل شقوق متعامدة وأخرى قطرية.**

**3-8-5- جمل الشقوق في صخور القواطع: يميز بشكل عام ثلاث حالات أساسية للشقوق هي الشكل (3-20):**

- **جملة الشقوق المتعامدة:** تتوضع المجموعات الثلاث المؤلفة لهذه الجملة بشكل موازٍ أو معامد لسطوح تماس القاطع. وبهدف الوصف يمكن عد الشقوق الموازية لسطح التماس أنها شقوق bc، حيث يتوضع محور b حسب الامتداد الاتجاهي للقاطع، أما محور c فيتوضع موافقاً لميله، بينما يوافق محور a اتجاه قياس ثخانة القاطع. وهذا الاتجاه الأخير هو الاتجاه الذي تعبره الاجهادات من الصخور المجاورة إلى القاطع أو أنه الاتجاه الذي يمكن أن يكون مؤثراً بشكل عمودي بالنسبة لسطحي التماس عند حدوث تقلص حجم القاطع. ويكون لمجموعتي الشقوق ac,ab وضع يتناسب مع هذه المحاور.

- **جملة الشقوق القطرية:** يكون لمجموعتي الشقوق المزدوجتين الدور في تحديد صورة الانتظام الفراغي للبنية، حيث يتم ارجاع وضعية جملة الاحداثيات التكتونية إلى خط التقاطع بين هاتين المجموعتين.

- **مجموعة شقوق:** تتميز بوجود مجموعة شقوق منفردة تصنع زاوية غير قائمة مع سطحي التماس. وتكون زاوية ميلها كبيرة ضمن القواطع ذات الميل الشديد. يعزى نشوء هذه الشقوق إلى حركة جداري القاطع باتجاهين متعاكسين.




**الشكل (3–20): جمل الشقوق في القواطع الصخرية. a–جملة شقوق متعامدة. b–جملة شقوق قطرية. c–مجموعة شقوق منحرفة عن اتجاه القاطع.**

### 3–2–2– الشقوق داخلية المنشأ:

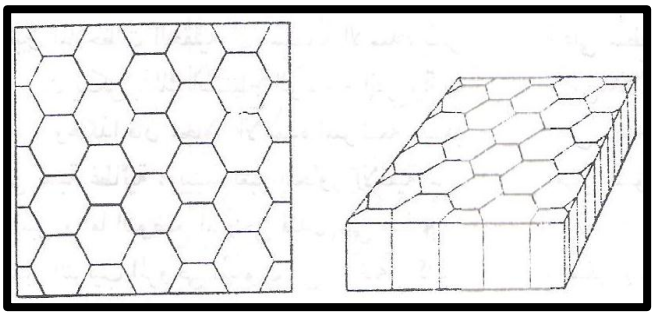
### 3–2–2–1– شقوق الانكماش:

**تعريف:** يشمل تعريف هذه الشقوق بأنها تلك التمزقات التي يعزى منشؤها إلى تقلص حجم الجسم الصخري الناجم عن انخفاض الحرارة الذي يحصل في الصبات والمداخن البركانية (شقوق التبرد) وإطلاق المواد الطيارة وخاصةً الماء، كالذي يحصل في الرواسب المتجففة (كسور الجفاف). ويعزى كلا هذين النوعين من الشقوق إلى المنشأ الشدي. وبشكل عام فإن نشوء شقوق الانكماش يعزى إلى تأثيرات حركية داخلية وليس إلى تأثيرات حركية خارجية.

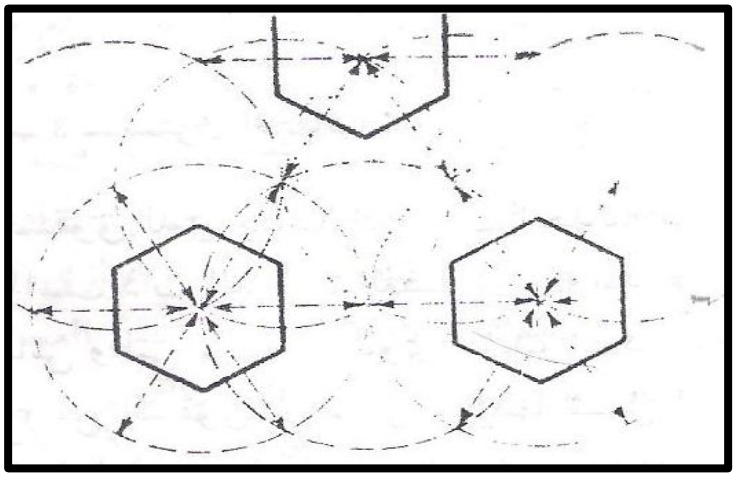
### 3–2–2–2– التشقق العمداني:

**1– تكوّن الأعمدة:** تتمثل الصورة النموذجية للتشقق العمداني في الصخور الاندفاعية البازلتية. وفي صخور الفونوليت والإنديزيت وصخور نارية أخرى، إنما بشكل غير واضح على الأغلب. ومن الممكن للصخور الرسوبية (حجر رملي مثلاً) الموجودة عند التماس مع الصخور النارية والتي تعرضت لارتفاع حرارة ثم التبرد أن تبدي أشكالاً عمدانية أيضاً. يأخذ المقع العرضي للأعمدة من الناحية الإحصائية محيطاً سداسياً منتظماً على الأغلب الشكل (3–21). أما الأشكال ذات خمسة الأضلاع أو الأربعة أو الثلاثة فهي أكثر وجوداً من الأشكال ذات سبعة الأضلاع أو التسعة. ويقع قطر الأعمدة عادة في مجال الديسيمترات (بين عدة من سنتيمترات حتى أكثر من متر) أما أطوال الأعمدة فتتجاوز أقطارها بعدة أضعاف وقد يصل لعدة من عشرات من الأمتار. يعزى تكوّن التشقق العمداني إلى الشد الذي يحدث نتيجة الانكماش حول مراكز تدعى مراكز التبريد. فإذا كان الصخر متجانساً وإذا كان التبرد موحداً فإن مراكز التبريد تتوزع بشكل منتظم عبر الصخر، وتكون المسافة بين المراكز متساوية، وبالتالي فإن إجهادات الشد تكون متساوية أيضاً في الحالة المثالية، مما يؤدي إلى نشوء مضلعات سداسية كاملة الشكل (3–22) تشكل

أعمدة محاطة بالشقوق. ورغم ذلك فإن الحالة المثالية نادراً ماتوجد حيث أن مايمكن مشاهدته في الحقل هو مضلعات غير نظامية على الأغلب.

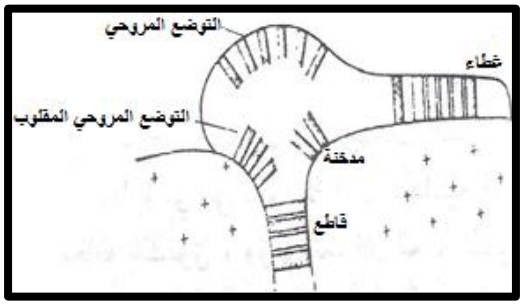


**الشكل (3-21): التشقق العمداني ذو المقطع العرضي السداسي.**



**الشكل (3-22): تتوزع مراكز التبريد بشكل منتظم عند حدوث التبريد في الصخر المتجانس حيث تنشأ الكسور بشكل معامد لاتجاه الشد بين المراكز، وتتقاطع هذه الكسور لتشكل مضلعات سداسية حول كل مركز.**

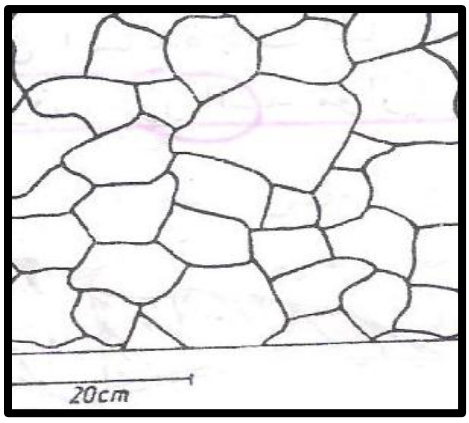
**2- الوضعية الفراغية لمحاور الأعمدة:** تبين الملاحظات الحقلية أن استطالة الأعمدة تكون عمودية على سطح تبرد المهل، حيث يمكن بذلك استنتاج الوضعية الفراغية لسطح التبرد من خلال وضعية الأعمدة. وهكذا فإن محاور الأعمدة المتوضعة بشكل عمودي على سطح الأرض تعبر عن صبة غطائية، بينما تعبرّر المحاور الأفقية عن اندساس مهلي لشق مفتوح شديد الميل. أما التوضع المروحي فيدل على منطقة مرتفعة من الجسم الاندفاعي. بينما يشير الترتيب المروحي المقلوب إلى مدخنة بركانية مقطوعة الشكل (3-23).




**الشكل (3-23): شكل تخطيطي لوضعية محاور الأعمدة بالنسبة لسطوح التبريد.**

**3-2-2-3-شقوق الجفاف:** تنشأ هذه الشقوق لدى جفاف الرواسب الحديثة من خلال تناقص حجمها. وبخاصة منها الرواسب ذات التركيب الغضاري. وتعد هذه الشقوق من الظواهر الناتجة عن الانكماش والتي لا تلعب القوى التكتونية دوراً فيها. وتشابه

السطوح المحاطة بهذا النوع من الشقوق في شكل محيطها شكل المقطع العرضي للأعمدة المتشكلة في الصخور النارية الشكل (3-24)، كما أن هناك علاقة بين أقطار السطوح المحاطة بشقوق الجفاف وثخانة الطبقة المتجففة، فكما تناقصت ثخانة الطبقة المتجففة تناقص قطر السطح المضلع. وتملأ شقوق الجفاف القديمة (المستحاثة) بمواد من التوضعات التي تعلوها.




**الشكل (3-24): شقوق الجفاف.**

**3-9- الأهمية الاقتصادية لدراسات الشقوق:** إن لدراسة الشقوق نتائج قيّمة في الأبحاث النفطية والفلزية والمنجمية. ومن العوامل المهمة في هذا الموضوع هو تحديد كثافة الشقوق واستمراريتها. وهي عامل مهم في التنقيب عن النفط في المكامن المشققة وفي التنقيب عن الفلزات. كما تلعب دراسات الشقوق دوراً مهماً في المشاريع العمرانية (سدود، أنفاق..) حيث أن الاعتبارات الأساسية التي يؤخذ بها في تحديد معظم مواقع السدود هي الموقع الطبوغرافي المناسب وكون المنطقة ملائمة لحجز المياه. إلا أن بنية الصخر (التطبق، التشقق..) تأخذ أهمية كبيرة أيضاً. وكما يبين الشكل (3-25) فإن وضعية السد غير مناسبة وذلك بالنسبة للتشقق والتطبق السائد في صخر الأساس، حيث يلاحظ أن مجموعة الشقوق الرئيسة توازي اتجاه جريان المياه، كما أن اتجاه ميل الطبقات باتجاه الجريان أيضاً. وهذان العاملان يمثلان مجالات تسرب للمياه المخزونة خلف السد. وعلاوة على ذلك فإن اتجاهات سطوح الضعف هذه تسمح بحدوث كسور نتيجة الاجهادات المتجهة نحو مصب النهر والناتجة عن المياه المخزونة خلف السد. إن تدعيم صخر الأساس مكلف في هذه الحالة، مما يدعو لاختيار مناطق أفضل لإنشاء السد. وذلك بالعلاقة مع اتجاهات الشقوق والتطبق، وحيث التدعيم أقل كلفةً. يمكن للشقوق والصدوع أن تسبب مشكلات عند إنشاء الأنفاق أيضاً. ولذلك تنشأ الأنفاق عادةً بشكل معامد قدر الإمكان لمجموعات الشقوق السائدة ذات الميل الشديد. وذلك على عكس حالة السدود حيث يجب أن يكون محور السد موازياً للإتجاه العام للشقوق السائدة.

# الفصل الرابع

# الصدوع Faults

**4-1- مقدمة:** الصدع هو كسر في الجسم الصخري يؤدي إلى انزياح الكتلتين الصخريتين المتقابلتين عبره بشكل موازٍ لسطحه. وتعبّر كلمة صدع عن شيئين بآنٍ واحد، فهي تعبّر أولاً عن مستوي (أو سطح الصدع) وثانياً عن الانزياح الذي حدث عليه. تمثل الصدوع مظهراً بنيوياً شائعاً في التكوينات الصخرية المشوّهة.

توجد الصدوع في كل أنواع الصخور وفي مجالات مختلفة تتراوح بين الصدوع الثانوية المرافقة للطيات وبين الصدوع الرئيسة (النطاقات الصدعية الرئيسة Major fault zones) التي تشكل حدود السلاسل الجبلية الضخمة أو تلك التي تشكّل نطاقات الضعف الرئيسة في القشرة الأرضية. يرتبط الانزياح أحياناً بصدع منفرد ذي سطح خشن أو مصقول، إلا أنه يرتبط على الأغلب بنطاقات صدعية fault zones يتراوح عرضها بين عدة ديسيمترات وعدة عشرات من الأمتار، أو أكثر من ذلك أو أقل، حيث تكون الصخور مهشمة (بريش صدعي) أو مطحونة (ميلونيت)، كما يمكن للنطاق الصدعي أن يتألف من عدة من الصدوع المتوازية تقريباً.

تختلف الصدوع اختلافاً كبيراً من حيث وضعياتها الفراغية ووضعيات الطبقات أو الأجسام الصخرية المتصدعة، وكذلك من حيث طبيعة الحركة ومقدارها، ويتم وصفها من خلال مقاطع شاقولية معامدة لاتجاهها أو من خلال مقاطع أفقية موازية لمستوي الخرائط، كما يمكن أن توصف من خلال أشكال فراغية موجهة. يمكن للصدوع أن تنشط وتتحرك في أزمنة جيولوجية مختلفة بشكل متماثل أو مختلف كل مرة، غير أن تأثيرات الحركة الأخيرة تكون الأكثر وضوحاً بشكل عام.

**4-2- المصطلحات المميزة للصدع (عناصر الصدع):**

عناصر الصدع الأساسية: يتحدد الصدع فراغياً بمجموعة من العناصر هي التالية: (شكل:4-1).

**أ- سطح الصدع ويدعى مستوى الصدع** أو بشكل أبسط الصدع. وهو المستوي الذي حدث عليه انزياح الكتل الصخرية، وقد يكون هذا المستوي عمودياً او مائلاً او ملتوياً ويسمى أحياناً بالمرآة الصدعية. ويتم تحديد وضعيته الفراغية بالطريقة ذاتها التي تحدّد بها بقية أنواع السطوح الجيولوجية (سطوح طبقات أو شقوق أوغيرها) بوساطة البوصلة الجيولوجية. وإذا لم يكن سطح الصدع شاقولياً فإن ذلك يقتضي استخدام مصطلحي الكتلة العلوية والكتلة السفلية.

**ب- زاوية ميل الصدع:** هي عبارة عن الزاوية المقاسة بين المستوي الأفقي والمستوي الصدعي ضمن مقطع شاقولي معامد لاتجاه الصدع، وتتراوح بين $(0^{\circ}-90^{\circ})$. ويعتبر الصدع شديد الميل عندما تكون زاوية ميله أكثر من $45^{\circ}$.

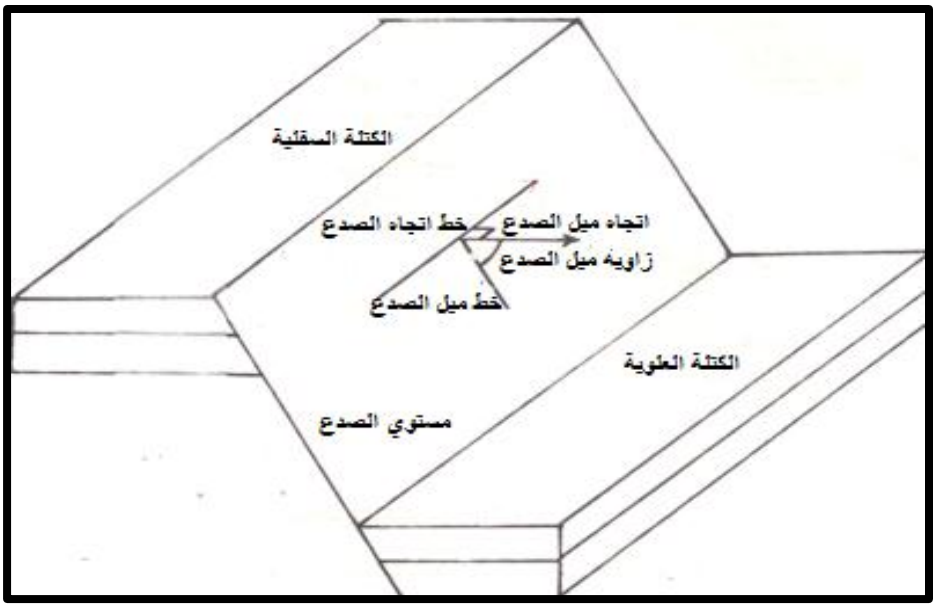
**جـ- خط الصدع أو أثر الصدع:** ويدعى تكشف الصدع وهو الخط الناتج عن تقاطع سطح الصدع مع سطح الأرض. وهو يظهر على الخرائط مستقيماً أو منحنياً إلى حد ما.

**د- خط اتجاه الصدع:** وهو الخط الناتج عن تقاطع مستوي الصدع مع المستوي الأفقي.

**هـ- الكتلة العلوية وتدعى الجدار المعلق:** وهو الكتلة الصخرية التي تستند على مستوي الصدع أو هي الكتلة الصخرية الموجودة فوق الصدع ويسمى أحياناً بالجدار الصاعد.

**و- الكتلة السفلية وتدعى جدار القدم:** وهي الكتلة الصخرية التي تستند على مستوى الصدع أو هي الكتلة الصخرية الموجودة تحت مستوي الصدع، ويسمى أحياناً بالجدار الهابط.

**ز- زاوية الميل الرأسية:** وهي الزاوية المتممة لزاوية ميل الصدع.




**الشكل (4-1): عناصر الصدع الأساسية.**

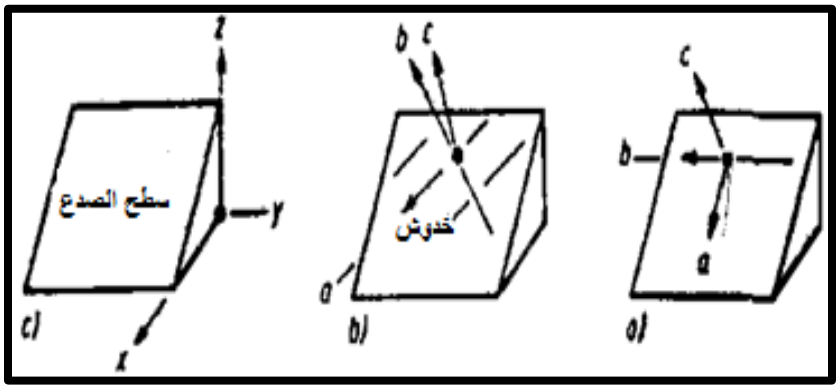
**4-3- جملة الاحداثيات التكتونية والعامة:**

يمكن دراسة الصدوع ضمن الاحداثيات التكتونية أو جملة الاحداثيات العامة:

**4-3-1-جملة الاحداثيات التكتونية:** تتعلق المحاور التكتونية **a,b,c** في هذه الجملة بسطح الصدع، وهناك نوعان لهذه الجملة:

**1- جملة الاحداثيات التكتونية المرتبطة بالسطح:** ينطبق اتجاه سطح الصدع على محور **b**، أما محور **a** فيوازي خط ميل الصدع، **بينما** ينتصب محور **c** عمودياً على سطح الصدع الشكل (4-2-a).

**2- جملة الاحداثيات التكتونية المرتبطة بالخطوط:** يتطلب استخدام هذه الجملة معرفة اتجاه الحركة على سطح الصدع، وذلك من خلال خطوط الخدوش، حيث ينطبق محور **a** على خط الخدش ويعد محور الحركة التكتوني، أما محور **c** فينتصب عمودياً على سطح الصدع. ويتوجه محور **b** بالتالي عمودياً على محوري **a,c** الشكل (4-2-b).




**الشكل (4-2): الصدوع ضمن الجمل الاحداثية. a- جملة الاحداثيات التكتونية المرتبطة بالسطح، b- جملة الاحداثيات التكتونية المرتبطة بالخطوط. c- جملة الاحداثيات العامة.**

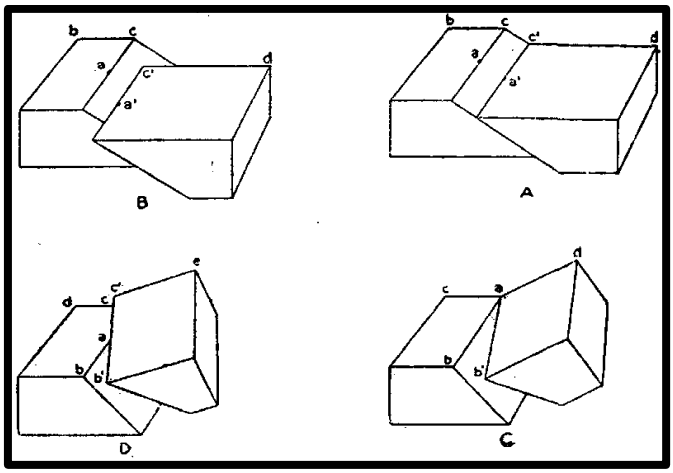
**4-3-2- جملة الاحداثيات العامة:** ينسب سطح الصدع في هذه الجملة إلى الشاقول والأفق، ففي المستوي الأفقي يتوضع محور **X** موازياً لاتجاه ميل الصدع، بينما يتوضع محور **Y** بشكل موازٍ لخط اتجاه الصدع، ويكون محور **Z** بالتالي معامداً لمستوي **XY** الشكل (4-2-**c**).

**4-4- طبيعة الحركات عبر الصدوع:**

**4-4-1- الحركات الانتقالية والحركة الدورانية:**

**1- الحركة الانتقالية:** تتميز الحركة الانتقالية بعدم حدوث دوران للكتل الصخرية بالنسبة لبعضها أثناء انزياحها، وبالتالي فإن الوضعية الفراغية لطبقة المعلم متساوية في كلتا الكتلتين العلوية والسفلية للصدع. وبذلك فإن الخطوط المستقيمة على جانبي الصدع والتي كانت متوازية قبل التصدع تبقى كذلك بعده. وكما نلاحظ في الشكل (4-3-A) فإن النقطتين **a,a** اللتين كانتا متجاورتين قبل التصدع انفصلتا نتيجة الحركة عبر الصدع وأن المستقيمين bc,cd اللذين كانا متوازيين قبل التصدع بقيا متوازيين بعده، ويبدي الشكل (4-3-B) الشيء نفسه رغم اختلاف اتجاه الحركة.

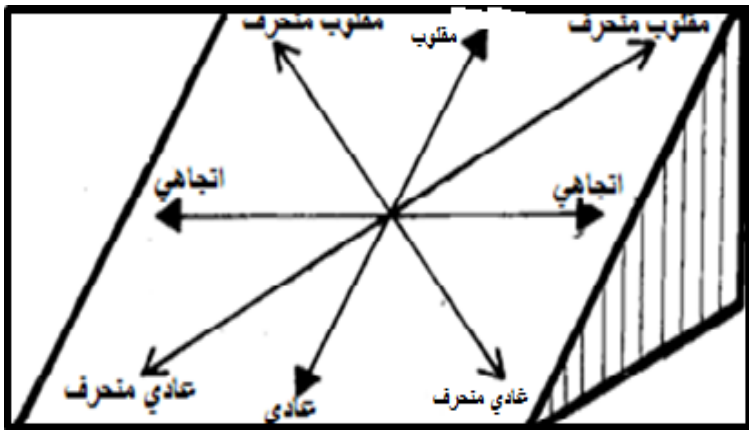
**2- الحركة الدورانية:** تعاني طبقة المعلم (الكتلة الصخرية) من اختلاف في وضعيتها الفراغية على جانبي الصدع نتيجة الحركة الدورانية، ويمكن أن يكون الدوران حول محور يصنع زاوية ما مع سطح الصدع الشكل (4-3-**D,C**) أو حول محور يوازي اتجاه الصدع. وكما يلاحظ في الشكل (4-3-**C**) فإن مقدار الانزياح يزداد نحو مقدمة الشكل وهو معدوم عند النقطة **a**، وكذلك فإن المستقيمين ca,ad اللذين كانا متوازيين قبل التصدع لم يعودا كذلك بعده. ويبين الشكل (4-3-**D**) نوعاً آخر من الحركة الدورانية. تتميز أغلب الصدوع بمقدار معين من الحركة الدورانية، حيث أن مقدار الانزياح ينقص أو يزداد على امتداد كل الصدوع. وإذا كان الدوران بسيطاً يمكن اهماله، وتعد الحركة عندئذٍ حركة انتقالية.



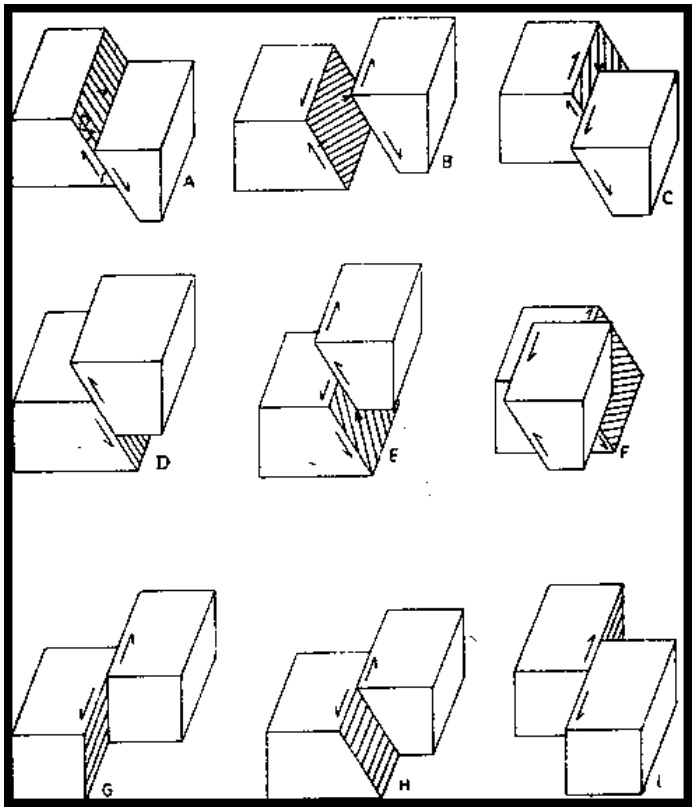

**الشكل (4-3): الحركات الانتقالية والدورانية عبر الصدوع.A, B – حركات انتقالية.C, D – حركة دورانية.**

**4-4-2- الحركة النسبية:** إن مصطلح (الحركة النسبية) أساسي لوصف الحركة عبر الصدوع وتأثيرها على الطبقات المتصدعة. وذلك لأن الصدوع نفسها لاتعطي أي دليل مباشر على (الحركة المطلقة). ففي الشكل (4-3-A) مثلاً يمكن أن تكون الكتلة اليمينية (العلوية) تحركت نحو الأسفل بينما الكتلة اليسارية (السفلية) ثابتة، أو أن الكتلة اليسارية تحركت نحو الأعلى بينما تحركت الكتلة اليمينية نحو الأسفل. وقد يحصل أن تكون حركة الكتلتين نحو الأسفل، إلا أن الكتلة اليمينية تحركت لمسافة أكبر من حركة الكتلة اليسارية، أو قد يحصل العكس أي أن كلتا الكتلتين تحركت نحو الأعلى مع كون اليسارية منها تحركت لمسافة أكبر. إن مفهوم الحركة النسبية (الانزياح النسبي)، أي حركة الكتلة العلوية بالنسبة للكتلة السفلية، يشكل الأساس في تصنيف الصدوع إلى عادية ومقلوبة واتجاهية أو منحرفة. يبين الشكل (4-4) الاتجاهات الممكنة المختلفة لحركة الكتلة العلوية بالنسبة للكتلة السفلية. فإذا كانت حركة الكتلة العلوية نحو الأسفل بالنسبة للكتلة السفلية دعي الصدع **عادياً**، أما إذا كانت حركة الكتلة العلوية نحو الأعلى بالنسبة للكتلة السفلية دعي الصدع **مقلوباً**. وكما نلاحظ فإن الحركة في كلتا هاتين الحالتين توازي خط ميل

الصدع، لذلك يدعى مثل هذا الصدع (صدع الانزلاق الميلي). أما إذا كانت الحركة موازية لخط اتجاه الصدع فإن الصدع يدعى "صدع الانزلاق الاتجاهي". وفي الحقيقة فإن حركة الصدوع تكون على الأغلب منحرفة عن اتجاهات وميول سطوحها، وتدعى هذه الحالة "صدوع الانزلاق المنحرف" التي قد تكون عادية أو مقلوبة الشكلين (4-5، 4-4).




**الشكل (4-4): اتجاهات الانزياحات الممكنة على سطح الصدع. الكتلة الظاهرة في الشكل هي الكتلة السفلية، وتشير الأسهم إلى انجاه حركة الكتلة العلوية.**




**الشكل (4-5): الأنواع الرئيسية للصدوع حسب حركاتها النسبية. A- صدع عادي. B, C – صدع عادي منحرف. D- صدع مقلوب. E, F- صدع مقلوب منحرف، G, H, I- صدوع انزلاق اتجاهي.**

### 4-5- الصدوع العادية:

**4-5-1- المميزات العامة:** تدعى هذه الصدوع أيضاً "صدوع الجاذبية" لأن الحركة الظاهرية للكتلة العلوية تتوافق مع الهبوط بتأثير الجاذبية الأرضية. تتراوح زوايا ميل الصدوع العادية عادةً بين (50،75°)، إلا أنها تميل على الأغلب بزوايا تتراوح بين

(60 حتى 70°)، وتدعى عندئذً الصدوع العادية شديدة الميل. أما إذا قلت هذه الزاوية عن 45° فتدعى الصدوع العادية ضعيفة الميل. يعبر الصدع العادي عن حدوث شد (تباعد)، لأن المسافة الأفقية بين نقطتين من طبقة معلم كانتا متجاورتين قبل التصدّع تزداد (تتباعد) نتيجة التصدع الشكل (4-6-a). وما يميز هذه الصدوع بشكل عام هو أن التباعد يؤدي إلى غياب طبقة المعلم من المجال المحلّل للصدع وهو الجزء من الصدع المحصور بين جزأي طبقة المعلم المتصدعة، الشكل (4-6-a). إن حدوث انزياح لطبقة المعلم عبر صدع يميل بزاوية (90°) يؤدي إلى عدم وجود قيمة للتباعد الأفقي أو أنها مهملة، إذا ما قورنت بالانزياح الشاقولي. ويدعى الصدع في هذه الحالة "صدعاً شاقولياً" الشكل (4-6-b). ويتعذر عندئذٍ تحديد كتلة علوية وأخرى سفلية. تتراوح أبعاد الصدوع العادية من القياسات المجهرية إلى الصدوع التي تصل أطوالها إلى عشرات من الكيلومترات ورمياتها إلى آلاف من الأمتار. يمكن للصدع العادي أن يتخامد عبر امتداده (اتجاهه) من خلال تناقص مقدار رميته باتجاه إحدى نهايتيه أو كلتيهما، وهذا ما يؤدي إلى نشوء ما يدعى الصدع المفصلي، وقد يأخذ سطح الصدع شكلاً منحنياً الشكل (4-7). إن تجزئة صخور القشرة الأرضية إلى كتل من خلال الصدوع العادية المتقاطعة يؤدي إلى "التصدع الكتلي Bluck faulting"، حيث تشكل كتل صخرية موزائيكية ذات أشكال معينية أو مستطيلة. وقد تنشأ الصدوع العادية أحياناً بشكل معاصر للترسيب "الصدوع المعاصرة للترسيب أو الصدوع النامية Growth fault" وهي تتميز بازدياد الثخانات الستراتيغرافية في جانب الكتل العلوية.

**4-5-2- أسباب التصدع العادي:** يحدث التصدع العادي في مناطق تمدد القشرة الأرضية الخاضعة لاجهادات الشد، وعلى الأخص بالقرب من الهوامش القارية وبالقرب من أطراف الأغوار الانهدامية الهابطة، وفي بيئات شدية أخرى كتلك المناطق التي تعلو القباب الملحية أو الاندساسان المهلية. وهكذا يمكن للشد أن يطبق على جزء من القشرة الأرضية بطرق مختلفة. حيث يصنف التصدع العادي بناء على ذلك إلى ثلاثة صفوف الشكل (4-8):

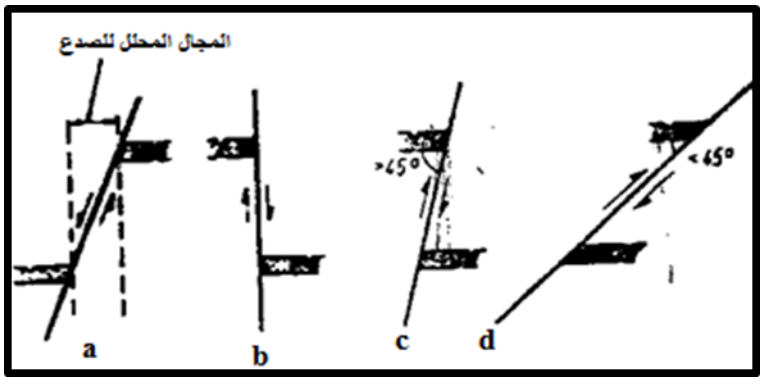
**1- الصف الأول:** يقتصر الشد هنا على الطبقات العلوية من الصخور، ويتم ذلك بطريقتين:

تتضمن الطريقة الأولى وجود سطح انفصال يسمح لكتل الصخور الصلبة أو الرواسب الدلتاوية الرخوة بالانزلاق باتجاه أسفل المنحدر بتأثير الثقالة الأرضية. أما الطريقة الثانية فتتم من خلال انحناء طبقة ثخينة نتيجة الضغط الجانبي. وينحصر التصدع ضمن الجزء العلوي من الطبقة ويكون أشد مايمكن في مجال التقوّس الأعظمي.

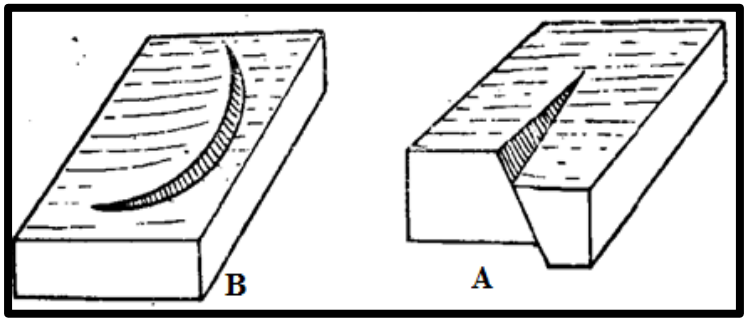
**2- الصف الثاني:** يطبق الشد على الطبقات القصيمة نتيجة انسياب الطبقات اللينة التي تقع تحتها. ويختلف التصدع العادي الناتج بهذه الطريقة عن تصدع الصف السابق تبعاً لتفاصيل عملية الانسياب في صخور القاعدة. وكما نرى في الشكل (4-8-C، D، E، F، G) فإن التصدع العادي حصل نتيجة الانسياب العميق على منحدر الدلتا (C) أو من خلال توسع الحوض الرسوبي نتيجة حركة الملح أو الغضار إلى الحواف الناهضة (D)، أو نتيجة تكون الأغوار الانهدامية القممية Crestal graben فوق القباب الناهضة (E) أو دوران الكتل المتصدعة (F)، أو تكون الأغوار والنشوز (G) نتيجة التمدد الجانبي للقاعدة اللينة.

3- الصف الثالث: يطبق الشد هنا على الغطاء الصخري overburden من خلال تباعد يحدث في الركيزة Basement الأكثر صلابة. ولا يقتصر مصطلح "ركيزة" هنا على تلك الركيزة البلورية القصيمة التي تقع تحت الصخور الرسوبية ضمن العمود الستراتيغرافي بل يمكن أن يتعداها إلى أية طبقات قوية ميكانيكياً تتحكم بتشوه الصخور الأضعف التي تعلوها، حيث تنشأ البنيات الشدية في الغطاء الصخري في كثير من الحالات بشكل مباشر عن تصدع الركيزة القاسية التي تقع تحتها، فقد تتعرض الركيزة للتباعد وهبوط كتل منها عبر صدوع عادية كما هو موضّح في الشكل (4-8-H) كما يمكن للشد الأفقي أن يطبق على الصخور المغطية نتيجة انحراف صدع انزلاق اتجاهي في الركيزة الشكل (4-8-I) مما يؤدي إل تكون أغوار انهدامية من نوع Pull-apart. وبشكل عام يمكن لعدد من العمليات الشدية آنفة الذكر أن تتضافر سوية في منطقة ما.

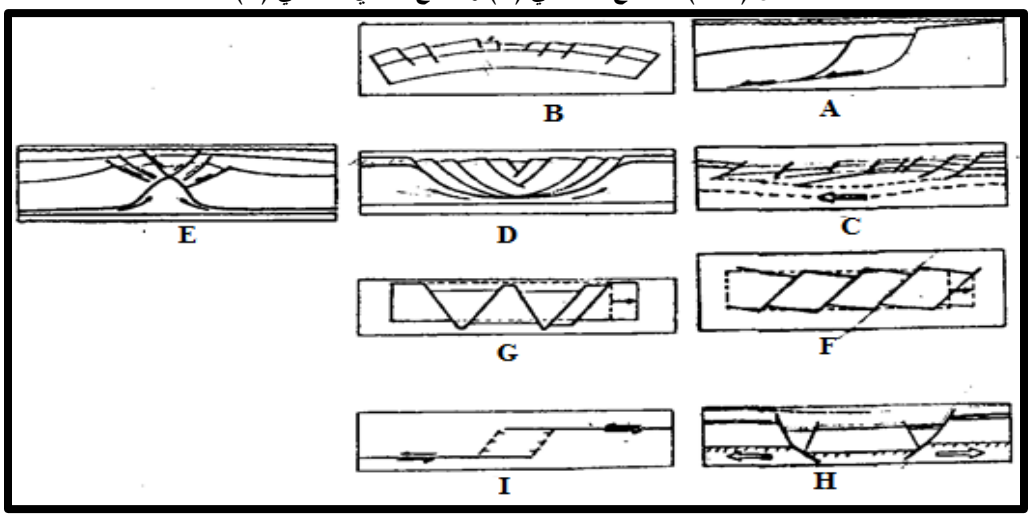
**4-6- الصدوع المقلوبة reverse faults** وهي صدوع انزلاق ميلي تتحرك الكتلة العلوية فيما نحو الأعلى بالنسبة للكتلة السفلية الشكل (4-6-c). ويتراوح ميل هذه الصدوع بين (45°-85°)، وعلى الأغلب بين (55°-75°) وما يميز هذه الصدوع على الأغلب هو التكرار الشاقولي للطبقات، بحيث أن خطاً شاقولياً ماراً من المجال المحلّل للصدع يتقاطع مرتين مع طبقة المعلم نتيجة حدوث التضييق.




**الشكل (4-6): تصنيف الصدوع ضمن المقطع الشاقولي. a- صدع عادي. b- صدع شاقولي. c- صدع مقلوب. d- صدع تراكبي.**




**الشكل (4-7): الصدع المفصلي (A) والصدع العادي المنحني (B).**

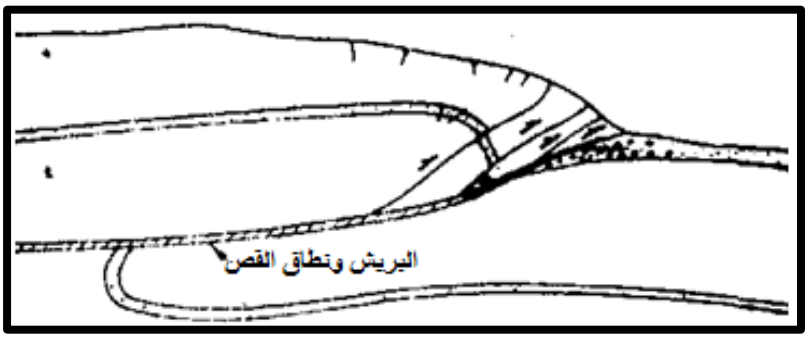



**الشكل (4-8): أسباب التصدع العادي.**

**A-انزلاق جانبي فوق سطح الانفصال، B-تصدع في الجزء العلوي المشدود من طبقة منحنية، C-تصدع عادي في الغطاء الصخري القصيم ناتج عن الانسياب العميق، D-توسع الحوض الرسوبي من خلال حركة الطبقات التحتية اللدنة (ملح غضار), E-تكون الأغوار القممية فوق القباب الناهضة، F-دوران الكتل المتصدعة، G-تمدد القاعدة اللدنة، H-هبوط كتل من الركيزة يؤدي إلى تكون الأغوار الانهدامية فوقها، I-انحراف صدع انزلاق اتجاهي (مقطع أفقي).**

### 4-7- الصدوع التراكبية thrust faults أو التراكبات thrusts

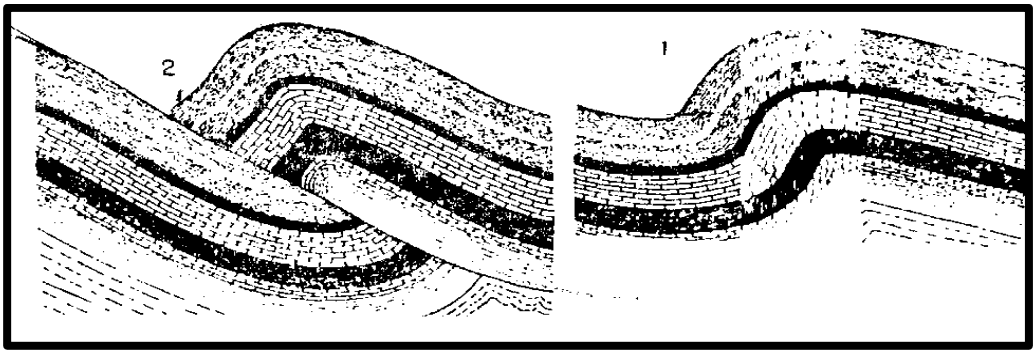
**4-7-1- المميزات العامة:** تشابه الحركة النسبية لهذه الصدوع حركة الصدوع المقلوبة وتختلف عنها بأن سطوحها تميل بزوايا تقل عن $45^{\circ}$ الشكل (4-6-d). وهذا يعني أنها تترافق بتضييق أيضاً. وتكون ميول الصدوع التراكبية ضعيفة على الأغلب ولا تزيد على $10^{\circ}$ إلى $20^{\circ}$، غير أن الميل يزداد باتجاه سطح الأرض في أكثر الحالات الشكل (4-9). تترافق الصدوع التراكبية ببعض الظواهر العامة، كتشكل البريش التكتوني نتيجة تحطم الصخور عند سطح الحركة (الصدع) أو نشوء ظواهر السحب فوق الصدع وتحته وتطور صدوع ثانوية موازية تقريباً للصدع التراكبي الرئيس. وقد لايتشكل البريش إذا كانت الصخور على جانبي الصدع لينة جداً (في الأعماق مثلاً) أو إذا كان الاحتكاك عبر الصدع ضعيفاً جداً بسبب وجود نطاق ذي ضغط مسامي (ماء) عالٍ مثلاً. يصعب عادةً تحديد فيما إذا كانت الكتلة الصخرية العلوية أم السفلية كانت العنصر الفعال أثناء التصدع. ولكن في حال تحديد ذلك وفي حال أن إحداها فعالة خلال عملية التصدع، فإننا ندعو هذا الصدع "صدع تراكب علوي overthrust" إذا كانت الكتلة العلوية هي المتحركة فوق الكتلة السفلية، أو "صدع تراكب سفلي underthrust " إذا كانت الكتلة السفلية هي المتحركة تحت الكتلة العلوية.




**الشكل (4-9): الظواهر المرافقة للصدوع التراكبية.**

**4-7=2- أنواع الصدوع التركيبية:**

**1- الصدوع التراكبية الكسرية Break thrusts** تتطور هذه الصدوع لدى تكوّن كسر في أحد جناحي طية بزاوية كبيرة مع سطوح التطبق، أي أن تكوّن هذه الصدوع يرتبط بوجود الطيات. حيث يؤدي الانحناء المرافق لتطوّر الطية اللامتناظرة الشكل (4-10-1) إلى إضعاف الجناح شديد الميل وتمزقه من خلال تكون كسور شد، ومع استمرار الاجهاد الأفقي يتطور صدع تراكبي على هذا الجناح الضعيف الشكل (4-10-2). يعزى تكون هذا النوع من الصدوع التراكبية إلى كون الطبقات عصية مما يعوق تحول الطية إلى طية مقلوبة أو مستلقية.

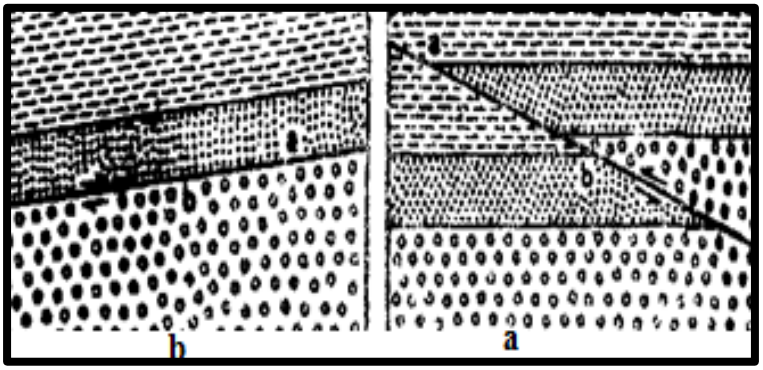



**الشكل (4-9): تطور الصدع التراكبي الكسري، حيث تكون الطبقات عصية على الانقلاب والمط، وبالتالي فإن الطي (1) سيؤدي إلى اضعاف الجناح شديد الميل للمحدب من خلال التصدع التراكبي (2).**

**2- الصدوع التراكبية المطية Stretch thrusts** تتطور هذه الصدوع عندما يتعرض الجناح المقلوب للطية المستلقية أو المقلوبة لزيادة الامتطاط ومن ثم الانقطاع.

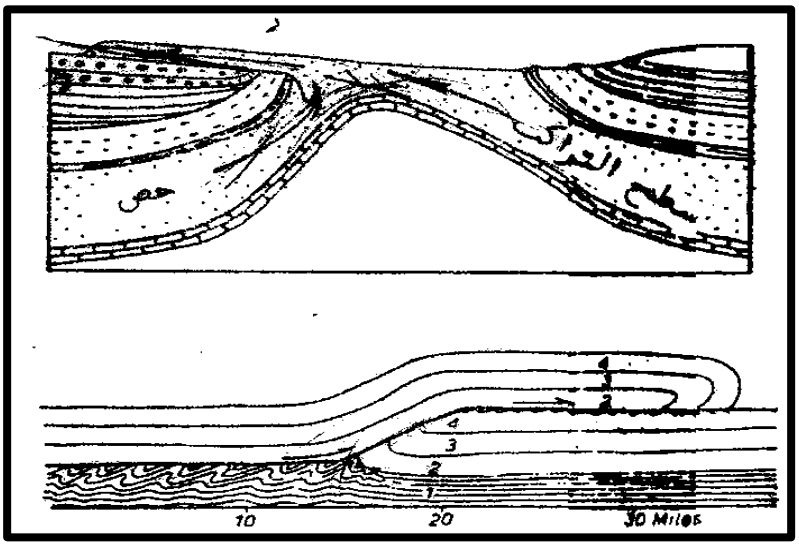
**3- الصدوع التراكبية غير المرتبطة بطي:** لا ترتبط هذه الصدوع بالطي، بل نجدها قاطعة للطبقات الأفقية الشكل (4-11-a).

**4- صدوع التطبق التراكبية Bedding thrusts** وهي صدوع تتبع سطوح التطبق الشكل (4-11-b).



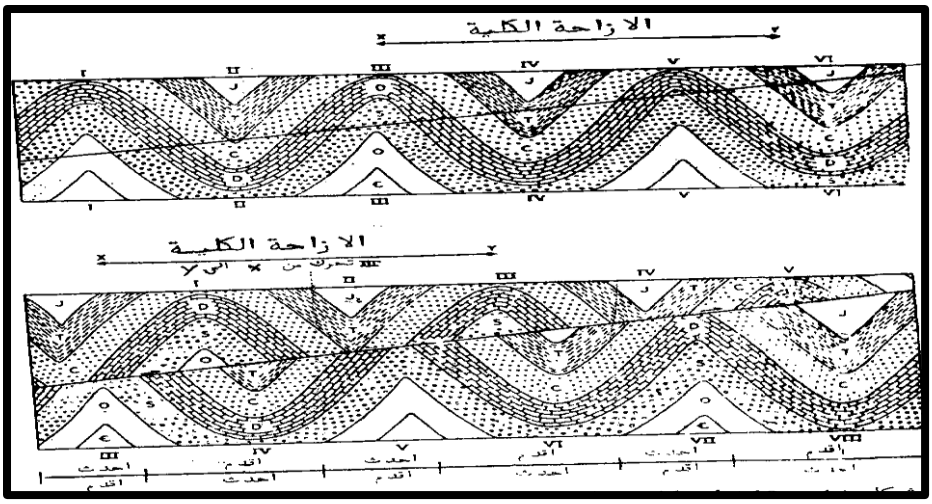

**الشكل (4-11): a- صدع تراكبي غير مرتبط بطي. b- صدع تطبق تراكبي.**

**5- صدوع التجوية التراكبية Erosion thrusts** تتكون هذه الصدوع عندما يتلاقى الصدع التراكبي ضعيف الميل مع سطح الأرض، وبالتالي يمكن للكتلة العلوية أن تتحرك لمسافة معتبرة فوق سطح التجوية الشكل (4-12).



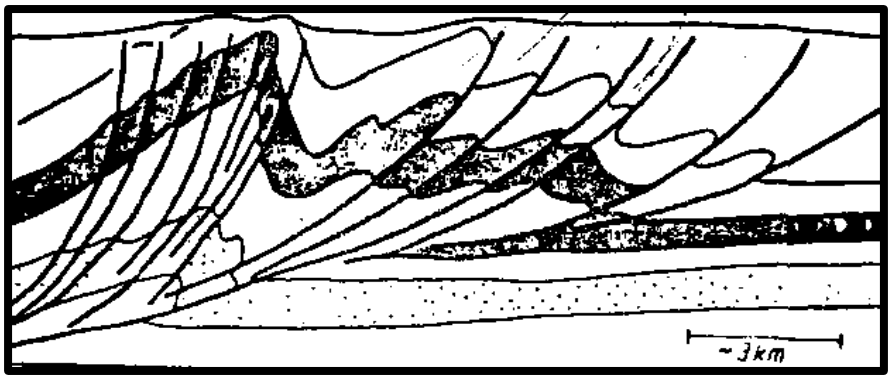

**الشكل (4-12): a-صدع تجوية تراكبي في إيران حيث أن الكتلة المتحركة تتألف من صخور ملحية مخترجة من قمة محدب، b-صدع تجوية تراكبي في نيفادا وكاليفورنيا.**

**6- الصدوع التراكبية القاطعة للطبقات المطوية:** تتميز الصدوع التراكبية عادةً بأن صخور أقدم تتراكب فوق صخور أحدث الأشكل (4-9 وحتى 4-12)، أي أن صخور الكتلة العلوية تكون على الأغلب أقدم من صخور الكتلة السفلية. إلا أنه وضمن شروط معينة (كون الصدوع تقطع طبقات مطوية مثلاً) تتراكب صخور أحدث فوق صخور أقدم الشكل (4-13). ويصعب أحياناً تمييز مثل هذه الصدوع. وقد يخلط بينها وبين اللاتوافقات.




**الشكل (4-13): شكل تخطيطي يبين تكوّن صدع تراكبي لاحق للطي مما يؤدي إلى تراكب صخور أحدث فوق صخور أقدم في بعض الأجزاء.**

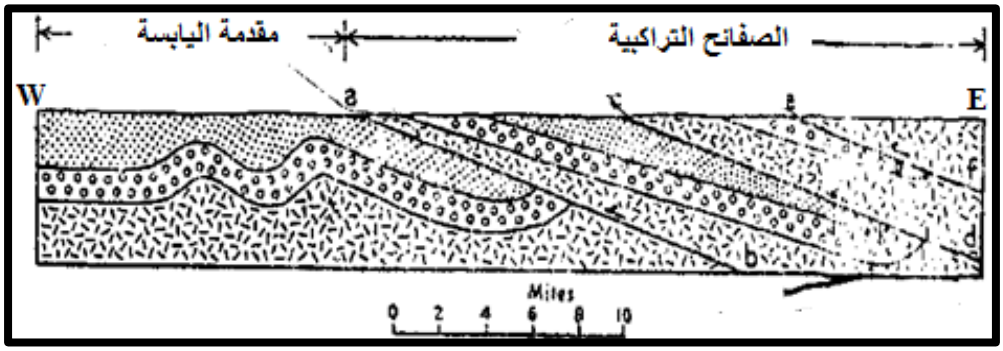
**4-7-3- النماذج البنيوية على امتداد الصدوع التراكبية:** تتميز الصدوع التراكبية في العديد من الحالات بوجود صدوع متعددة تميل بالاتجاه نفسه، حيث أن صدعاً منفرداً يمكن أن يتفرع إلى عدد من الصدوع التي يمكن أن تتحدد مرة أخرى مع الصدع الرئيس بينما يمكن لبعض هذه الفروع أن يخمد ضمن طيات أو عبر التطبق. تدعى هذه البنية "البنية الحرشفية imbricate structure"، حيث تتراكب الكتل الصخرية المؤلفة لهذه البنية فوق بعضها كما تتراكب حراشف السمك الشكل (4-14). وتتراوح أبعاد "الحراشف" المنفردة سواء حسب اتجاه الصدع أو ضمن المقطع الشاقولي من عدة من ديسيمترات إلى عدة أمتار وحتى عدة من كيلومترات، وتختلف رميات الصدوع المؤلفة لهذه البنيات اختلافاً واسعاً. هذا وتوجد البنية الحرشفية في بيئات جيولوجية مختلفة، فهي توجد في صخور الركائز المطوية، وفي الوحدات الصخرية المتأثرة بحركة الجليديات وفي مناطق الحركات الانزلاقية الثقالية كما توجد في مقدمة الصفائح الغطائية. يمكن لصدوع انزلاق اتجاهي ثانوية أن تظهر معترضة على الصدع التراكبي الرئيس. يترافق تكون الصدوع التراكبية مع الطي إلا أن بعض الأشكال المطوية يمكن أن يعزى بشكل مؤكد إلى عملية السحب الناتجة عن الحركة عبر الصدع.




**الشكل (4-14): البنية الحرشفية.**

**4-7-4- التراكبات العلوية:** التراكبات العلوية هي مظاهر جيولوجية مميزة يحدث عبرها انتقال لكتل صخرية ضخمة لمسافات كبيرة تقاس بالكيلومترات. وذلك عبر صدوع ذات ميل أولي ضعيف لا يزيد عن $10^{\circ}$. تدعى الكتلة الصخرية التي تعلو سطح الصدع "الصفيحة الغطائية" أو "صفيحة التراكب". قد يحدث التراكب أحياناً عبر عدد من الصدوع، فكما هو واضح من الشكل

(4–15) فإن هناك حزاماً تراكبياً مؤلفاً من ثلاثة تراكبات هي: ab,cd,ef تميل نحو الشرق. كما أن مسافة النقل كبيرة وتقدر بالكيلومترات. إن كل كتلة محصورة بين صدعين تراكبيين هي صفيحة تراكب، أي أن هذا الشكل يعبّر عن وجود ثلاث صفائح تراكب. تدعى المنطقة الموجودة أمام حزام التراكب "مقدمة اليابسة" الشكل (4–6). وتتميز بأن صخورها مازالت في المكان ولم تتعرض للنقل وهي تدعى لذلك "الصخور الأصيلة" أو Autochthon. أما الصخور العائدة لصفائح التراكب فقد انتقلت لمسافة كبيرة من الأماكن الأصلية لتوضعها، وهي تدعى لذلك "الصخور النقيلة" أو Alluchthonous .




**الشكل (4–15): حزام التراكبات ومقدة اليابسة.**

**4–7–5– الصدوع التراكبية المطوية: Folded thrusts** هي صدوع تنشأ خلال عملية الطي، وبشكل أكثر ندرة قبل عملية الطي. وتكون مستوية في بداية تطوّرها، إلا أنها تتعرض مع استمرار تشوّهات الطي للإنحناء والتعرج الشكل (4–16). تتبع هذه الصدوع ضمن مقطع ac للطيات مسار المحدبات والمقعرات تقريباً. ويبين الشكل (4–17) مثالاً عن هذه الصدوع في جبال الجورا.

**4–8– صدوع الانزلاق الاتجاهي:**

**4–8–1– المميزات العامة:** تتميز صدوع الانزلاق الاتجاهي (تسمى أيضاً صدوع الانزلاق الجانبي) بأن الكتل الصخرية تنزاح بحركات أفقية بالنسبة لبعضها، بشكل موازٍ لاتجاه الصدع الشكل (4–4)، (4–5). ويعتمد الوصف الموحد لصدوع الانزلاق الاتجاهي على طبيعة الحركة النسبية للكتل المزاحة لأنه يصعب عادةً تحديد الحركة الحقيقية، إلا أنه يعتقد بأن كلتا الكتلتين تشاررك في الحركة على الأرجح. وتكون معظم هذه الصدوع مستقيمة وشديدة الميل أو شاقولية: وتتمثل الصدوع الكبيرة منها بنطاق صدعي على الأغلب وليس بصدع منفرد.

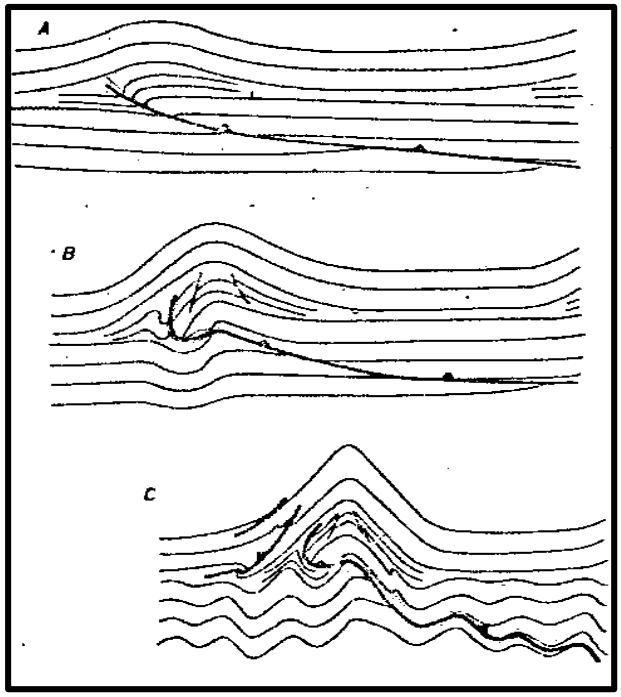
**4–8–2– تصنيف صدوع الانزلاق الاتجاهي حسب الحركة النسبية:** تقسم صدوع الانزلاق الاتجاهي تبعاً لطبيعة الحركة النسبية للكتل على جانبيها إلى نوعين رئيسيين هما:

**– صدع الانزلاق الاتجاهي اليمينية**

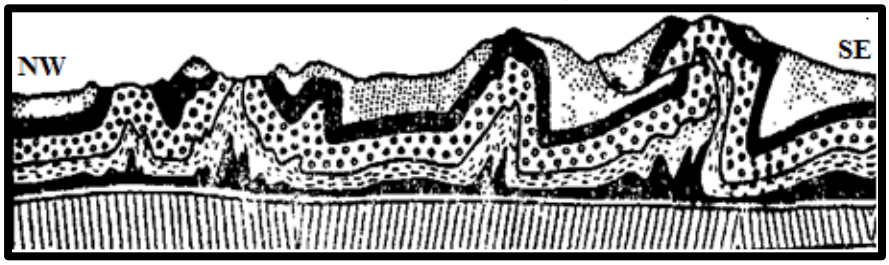
**– صدع الانزلاق الاتجاهي اليسارية.**

يتم التمييز بين هذين النوعين بالطريقة التالية:

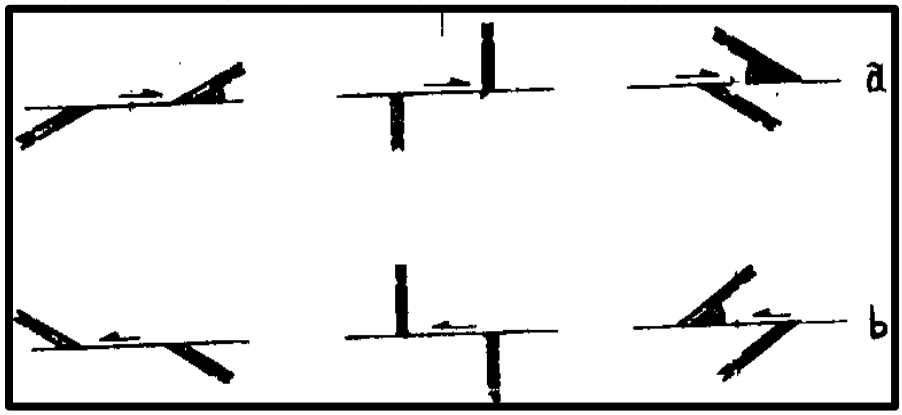
يدوّر الشكل المعبر عن المقطع الأفقي للصدع حتى يأخذ اتجاه هذا الصدع اتجاه اليمين–اليساربالنسبة للناظر الشكل (4–18). يكون لدينا صدع انزلاق اتجاهي يميني إذا ظهرت الكتلة الصخرية التي توجد فوق أثر الصدع مزاحة نحو اليمين بالنسبة للكتلة الموجودة تحته الشكل (4–18–a).




**الشكل (4–16): مقطع تخطيطي يوضّح تطور الصدوع التراكبية المطوية (مرحلة A حتى C)**




**الشكل (4–17): مقطع عرضي في جبال الجورا يتوضح في جزئه الجنوبي الشرقي وجود صدع تراكبي مطوي.**




**الشكل (4–18): تصنيف صدوق الاتجاهي. a–صدوع انزلاق اتجاهي يمينية. b–صدوع ازلاق اتجاهي يسارية.**

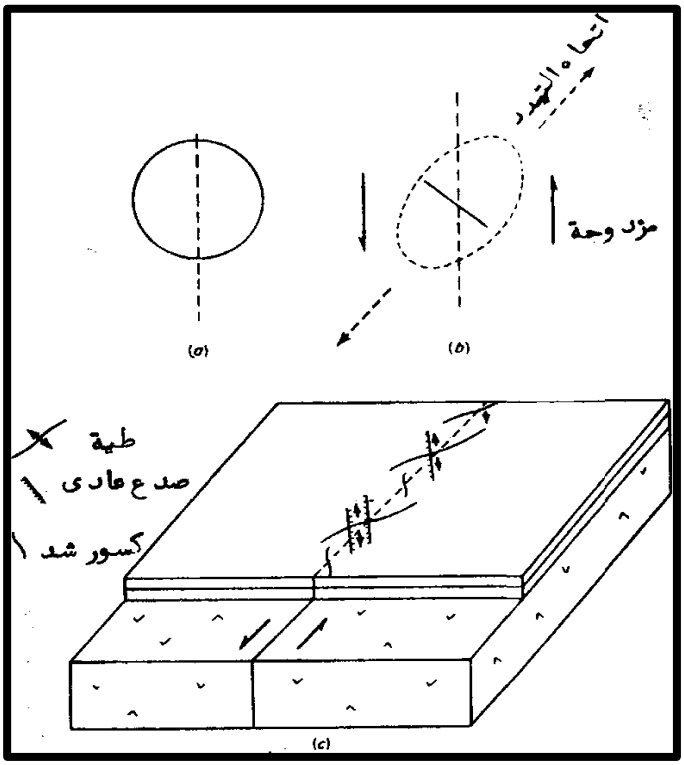
يكون لدينا صدع انزلاق اتجاهي يساري إذا ظهرت الكتلة الصخرية التي توجد فوق أثر الصدع مزاحة نحو اليسار بالنسبة للكتلة الموجودة تحته الشكل (4–18–b). يعادل مقدار الانزياح الجانبي الممكن قياسه مباشرةً المسافة بين نقطتين متعادلتين (كانتا متجاورتين قبل التصدع) من جزأي طبقة المعلم المتقاطعة مع الصدع، مقيسة ضمن المقطع الأفقي بشكل موازٍ لأثر الصدع.

**4-8-3- امتداد صدوع الانزلاق الاتجاهي:** يتراوح امتداد (الطول الاتجاهي) صدوع الانزلاق الاتجاهي من مجال السنتيمترات إلى مجال الكيلومترات أو مئات الكيلومترات، حيث تدعى الأخيرة من قبل الباحثين "صدوع القص الضخمة Mega shear".

**4-8-4- البنيات المتكونة في مجال صدوع الانزلاق الاتجاهي الضخمة:**

**4-8-4-1- البنيات المتكونة فوق صدوع الانزلاق الاتجاهي العميقة:** تم تفسير العديد من جمل الطيات والصدوع ذات الترتيب السلمي الموجودة في الصخور الرسوبية من خلال حركات جانبية لصدوع عميقة في القشرة الأرضية. هذا ويمكن شرح آلية تكوّن هذه البنيات كما يلي:

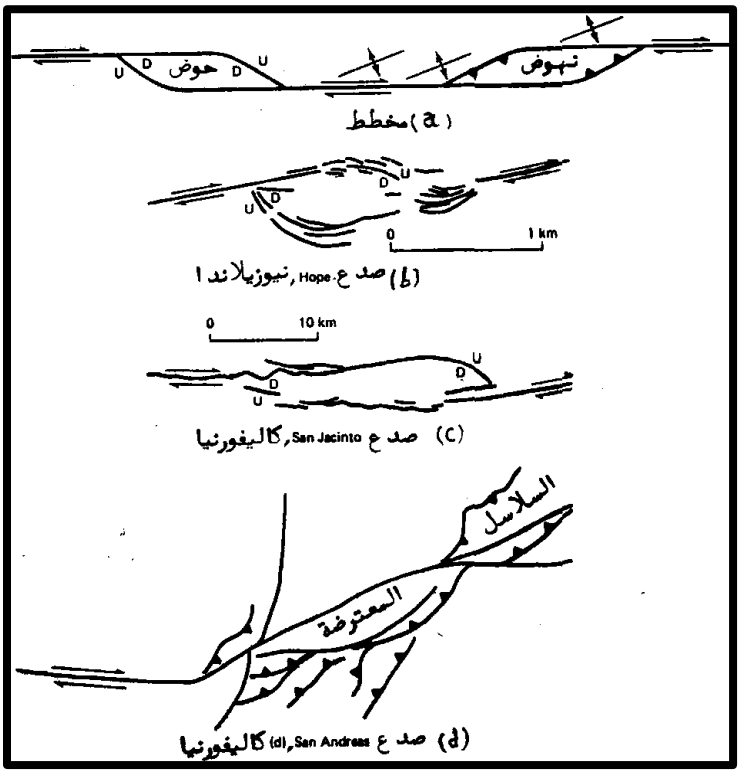
لنفترض أن حركة جانبية حدثت عبر صدع في الركيزة الشكل (4-19) فإن أجزاء الغطاء الرسوبي الواقعة فوق الصدع مباشرةً ستتعرض إلى قوة مزدوجة مما يؤدي إلى نشوء شد باتجاه يقود إلى تكون صدوع عادية وشقوق شد، وتضيق بالاتجاه المعامد له يقود لتكوّن الطيات. وهكذا فإن أشكالاً دائرية في الغطاء الرسوبي فوق الصدع ستتشوّه إلى أشكال إهليلجية بتأثير المزدوجة.




**الشكل (4-19): مخطط يوضّح البنيات الناتجة في الغطاء الرسوبي بسبب الحركة على امتداد صدع انزلاق اتجاهي عميق. a-دائرة مفترضة في الصخور الرسوبية قبل التشوّه، b-تشوّه الدائرة نتيجة الحركة على امتداد الصدوع، c-البنيات المرافقة لحركة الصدع في الغطاء الرسوبي.**

**4-8-4-2- البنيات الناتجة عن انحراف المسار العام للصدع:** تتميز نطاقات الانزلاق الاتجاهي الضخمة سواء في القشرة القارية أو قشرة المحيطات بعدم تكونها عبر سطح مستوٍ مستمر. وبدلاً من ذلك فهي تتألف من أجزاء صدعية ذات تركيب سلمي ترتبط حركياً مع بعضها من خلال نطاقات ذات تشوّهات شدية أو انضغاطية. كما هو موضّح في الشكل (4-20-a) فإذا انحرف صدع الانزلاق الاتجاهي اليميني في مساره نحو اليمين فإن ذلك سيؤدي إلى حدوث شد في منطقة الانحراف وذلك من خلال تصدع عادي يقود إلى تكوّن غور انهدامي في هذه المنطقة. وهذا مايمكن ملاحظته في عدة مناطق من العالم. كما هو الحال في صدع San jacinto(كاليفورنيا) الشكل (4-20-c,b) وعلى العكس فإذا كان انحراف صدع الانزلاق الاتجاهي

اليميني نحو اليسار فإن منطقة الانحراف ستتعرض للضغط مما يؤدي إلى حدوث طي وتراكب في هذه المنطقة. كما هو الحال غي السلاسل المعترضة في جنوب كاليفورنيا المرافقة لانحراف صدع سان اندرياس الشكل (4-20-d).




**الشكل (4-20): تكوّن أحواض الشد ونهوضات الانضغاط نتيجة انحراف مسار صدوع الانزلاق الاتجاهي.**

**4-8-5- تصنيف صدوع الانزلاق الاتجاهي حسب علاقتها مع البنية الإقليمية:**

**4-8-5-1- صدوع الانزلاق الاتجاهي القطرية على محاور الطيات:** توجد صدوع الانزلاق الاتجاهي في العديد من الحالات ضمن نطاق الطي، ويمكن لها أن تأخذ اتجاهاً قطرياً بالنسبة لمحاور الطي. وهي صدوع شاقولية بشكل عام وتحوي بعض سطوحها خدوشاً أفقية. ويصل طول بعضها إلى عشرات من الكيلومترات برمية متوسطة تقارب الكيلومتر. وقد تصل رميات بعضها إلى عدة من كيلومترات.

**4-8-5-2- صدوع الانزلاق الاتجاهي المعامدة لمحاور الطيات:** تعامد صدوع الانزلاق الاتجاهي محاور الطيات أحياناً. ويحتمل نشوءها يعود إلى شقوق عرضية تنشأ في الطيات. حيث يؤدي استمرار الاجهاد الأفقي وتطور الطيات إلى حدوث حركات قص عبر هذه الشقوق لتتحول إلى صدوع انزلاق اتجاهي.

**4-8-5-3- صدوع الانزلاق الاتجاهي المعامدة للصدوع التراكبية:** يمكن لصدوع الانزلاق الاتجاهي أن توجد معامدة للصدوع التراكبية الرئيسة. وهذا ما يؤدي إلى تحرك جزء من الصفيحة المتراكبة لمسافة أبعد من الجزء المجاور، أو أن تتحرك كتلة صخرية محدّدة بصدعي انزلاق اتجاهيين نحو الأمام بين الكتل الصخرية الثابتة نسبياً على جانبيها، حيث تكون هذه الكتلة المتحركة مفصولة عن الكتلة التي تقع تحتها بصدع تراكبي. وتمثل كتلة Cumberland التراكبية الواقعة جنوب غرب فرجينيا هذه البنية الأخيرة بشكل جيد.

**4-9- صدوع الانزلاق المنحرف:** تتميز صدوع الانزلاق المنحرف بأن انزياح الكتل الصخرية عبرها لا يتم بشكل موازٍ لخط ميل الصدع (كصدوع الانزلاق الميلي) أو لاتجاهه (كصدوع الانزلاق الاتجاهي) بل بشكل منحرف عنهما الشكلين (4-4)، (4-5).

ويكون لهذا الانزياح بالتالي مركبة اتجاهية وأخرى ميلية. هذا وتوصف صدوع الانزلاق المنحرف بأنها يمينية أو يسارية كما هو الحال في صدوع الانزلاق الاتجاهي وذلك حسبما تكون الكتلة العلوية مزاحة بالنسبة للكتلة السفلية نحو اليمين الشكل (4-5-F,C) أو نحو اليسار الشكل (4-5-B,E,). وتجدر الإشارة إلى أن معظم الصدوع التي تتشكل بالقرب من سطح الأرض هي صدوع انزلاق منحرف بشكل عام.

**4-10- مقدار الانزلاق-الرمية Slip:**

إن معرفة جهة الانزياح، من خلال الخدوش أو الظواهر الأخرى المرافقة للصدع تشكل شرطاً أساسياً لتحديد مقدار الرمية الحقيقية. وتتمثل "الرمية الحقيقية net slip (n) بالمسافة المقيسة على سطح الصدع بين نقطتين كانتا متجاورتين قبل تكون الصدع وموجودتين ضمن الكتلتين الصخريتين المجاورتين للصدع. وتشكل الرمية الحقيقية (في صدع الانزلاق المنحرف) وتر مثلث قائم الشكل (4-21)، حيث يمثل الضلع القائم لهذا المثلث والموازي لخط ميل الصدع مركبة الرمية الحقيقية ضمن المقطع الشاقولي، وهي تدعى "رمية الميل dip slip (d) أما الضلع الآخر للمثلث والموازي لاتجاه الصدع فيمثل مركبة الرمية الحقيقية ضمن المقطع الأفقي وهي تدعى رمية الاتجاه strike slip" (S).

يمكن من ناحية أخرى تحليل رمية الميل ضمن المقطع الشاقولي إلى مركبتين، توازي إحداهما خط الشاقول وتدعى "الرمية الشاقولية Vertical slip أو throw" (V)، بينما تكون الثانية موازية لخط الأفق وتدعى "الرمية الأفقية horizontal slio أو heave (h) هذا وتحسب الرمية الحقيقية (n) بمعرفة رمية الاتجاه (S) ورمية الميل (d) من العلاقة:

$$n= \sqrt{d^2 + S^2}$$

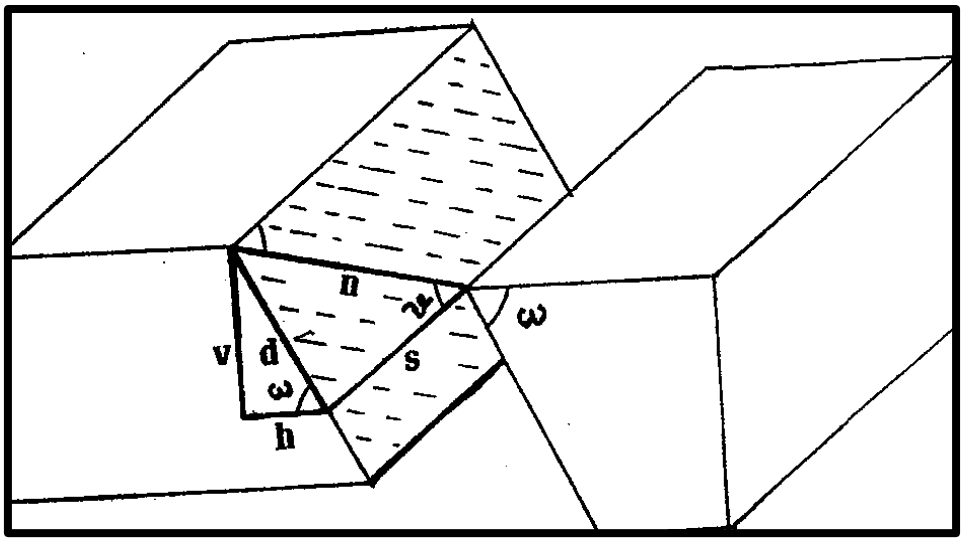
وكذلك فإن (d) ترتبط مع مركبتيها (V)، (h) بالعلاقة:

$$d = \sqrt{V^2 + h^2}$$

تحدد (n) أيضاً من خلال معرفة قيمة الزاوية (ϑ) الكائنة بين خط اتجاه الصدع وبين الخدوش (مقيسة على سطح الصدع) ومعرفة قيمة زاوية ميل الصدع (ω) كما يلي الشكل (4-21):

$$V= d.\sin\omega$$
$$h = d.\cos\omega$$
$$d = n.\sin\vartheta$$
$$S = n.\cos\vartheta$$

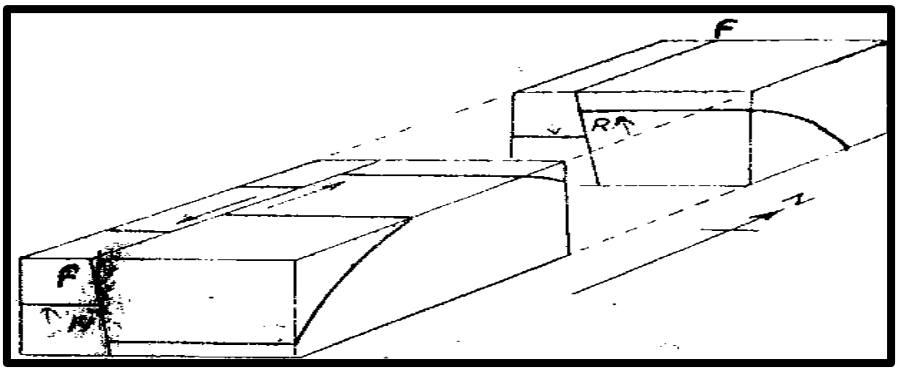
يأخذ تحديد مقدار الرمية الأفقية (h) وتحديد مقدار رمية الاتجاه (s) أهمية خاصة عند دراسة الصدوع، وذلك لتحديد مقدار التباعد (أو التقارب) ومقدار الانزلاق الاتجاهي ضمن المقاطع الأفقية (الخرائط الجيولوجية). ولا يتم الحصول على معطيات دالة على مقدار الرمية الحقيقية إلا في حالات مناسبة يمكن فيها ربط مجالات صغيرة من التتابع الطبقي مع بعضها والتي يفترض أنها كانت متجاورة قبل تكوّن الصدع. ومن ذلك مثلاً مستحاثات أو حصوات أو تخثرات أو مواقع مميزة من مفاصل الطيات أو مميزات بنيوية محلية ضمن الصخر انشطرت نتيجة الصدع. ولذلك يجب أثناء القيام بالعمل الحقلي البحث في الجوار المباشر للصدع عن مثل هذه المميزات بهدف القيام بالقياس المباشر للرمية.



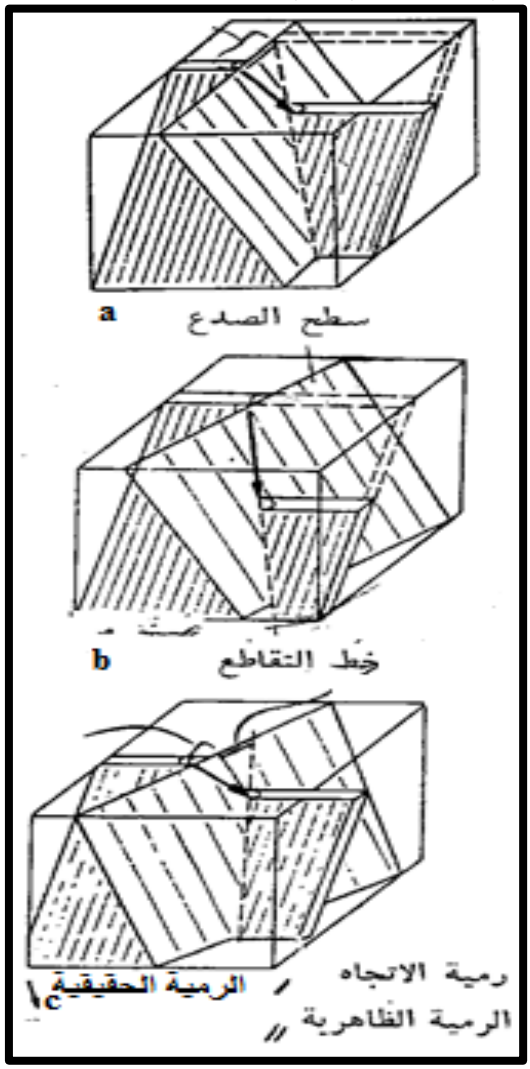

**الشكل (4–21): الرميات في صدوع الانزلاق المنحرف. n–الرمية الحقيقية، d–رمية الميل، S–رمية الاتجاه، V–الرمية الشاقولية، h–الرمية الأفقية، ω–زاوية ميل الصدع، ϑ–الزاوية بين الخدوش وخط اتجاه الصدع.**

**4–11– الانزياح الظاهري apparent displacement:** إن معرفة الرمية الحقيقية تمكّن من تحديد ما إذا كانت الرمية المقيسة في المقطع الأفقي وفي المقطع الشاقولي تمثل حركات تأخذ الاتجاه نفسه أو تمثل انزياحات (رميات) ظاهرية فقط أو أن جزءاً منها ظاهري على الأقل. يمكن فهم هذه الفكرة من خلال المثال التالي: يلاحظ في الشكل (4–22) أن صدعاً انزلاقياً اتجاهياً أدى إلى انزياح ظاهري متغير في المقاطع الشاقولية، حيث نجد في مقدمة الشكل (منطقة N) إن الكتلة الشرقية مزاحة ظاهرياً نحو الأسفل، بينما يلاحظ الجزء الخلفي (منطقة R) من الشكل أن الكتلة الغربية هي المزاحة نحو الأسفل. إلا أنه من الواضح أن الحركة النسبية الحقيقية هي حركة انزلاق اتجاهي وليست حركة انزلاق ميلي كما يبدو ظاهرياً في المنطقتين (R)، (N). وكذلك فإن رمية اتجاهية واضحة في المقطع الأفقي يمكن أن تكون في الواقع رمية ظاهرية مرافقة لصدع عادي صرف، وكما نلاحظ في الشكل (4–23–a) فإن طبقة معامدة في اتجاهها لاتجاه صدع عادي صرف ظهرت في المقطع الأفقي وكأنها مزاحة جانبياً. أماالشكل (4–23–b) فيمثل عدم وجود انزياح جانبي عندما كان اتجاه انزياح (خط انزياح) الطبقة منطبقاً على الخط الناتج عن تقاطعها مع سطح الصدع. وفي بعض الحالات الأخرى فإن الرمية الواضحة في المقطع الأفقي تتألف من جزئين أحدهما يمثل المركبة الاتجاهية (رمية الاتجاه) للرمية الحقيقية والآخر يمثل الرمية الظاهرية الناتجة عن عدم انطباق اتجاه الانزياح على خط تقاطع طبقة المعلم مع سطح الصدع الشكل (4–23–c).

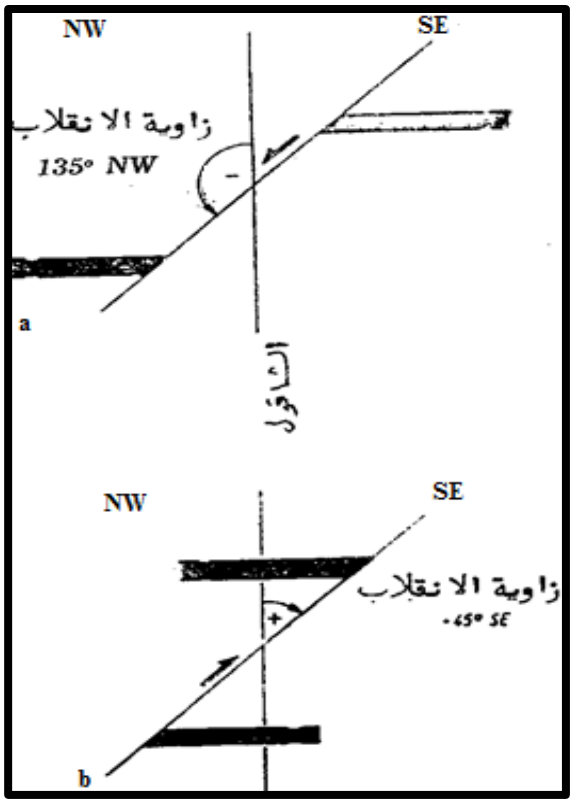
**4–12– انقلاب الصدوع:** يستخدم مصطلح "الانقلاب" للتعبير عن الزاوية الكائنة بين المستوي المتوسط (أو المحوري) للطية وبين المستوي الشاقولي. إلا أن هذا المصطلح يستخدم لوصف الصدوع. وبالتالي زاوية انقلاب الصدع هي الزاوية الكائنة بين الشاقول وبين أثر الصدع ضمن المقطع الشاقولي، وتحدّد هذه الزاوية بالعلاقة مع الحركة النسبية للكتلة العلوية الشكل (4–24). وبناء على ذلك تكون قيم زوايا الانقلاب في الصدوع العادية أكبر من (90°) وهي تعطى إشارة (–) سالبة أما في الصدوع المقلوبة والتراكبية فإن زاوية الانقلاب هي الزاوية الصغيرة الكائنة بين سطح الصدع والشاقول وهي تعطى إشارة موجبة (+) الشكل (4–24–b). يكون اتجاه الانقلاب في حالة الصدوع العادية موافقاً لاتجاه ميل الصدع أما في الصدوع المقلوبة والتراكبية فيعاكس اتجاه ميل الصدع.




**الشكل (4–22): مخطط فراغي يوضّح صدع انزلاق اتجاهي صرف (f) أصاب محدباً، ورغم ذلك فإنه يظهر في المقطع العرضي الأول (منطقة (N) وكأنه صدع عادي. أما في المقطع العرضي الثاني (منطقة R) فيظهر الصدع نفسه، وكأنه صدع مقلوب.**




**الشكل (4–23): الرميات الحقيقية والرميات الظاهرية. a–صدع عادي ذو رمية اتجاهي ظاهرية. b–صدع انزلاق منحرف عادي دون رمية اتجاهية في المقطع الأفقي. C–صدع انزلاق منحرف عادي ذو رمية اتجاهية مؤلفة من جزء حقيقي وآخر ظاهري.**




**الشكل (4–24): انقلاب الصدوع. a– صدع عادي. b– صدع مقلوب أو تراكبي.**

**4–13– السطوح الصدعية غير المستوية:**

**4–13–1– الصدوع الملتوية:** تبدو الصدوع عند دراستها في مجال التكشفات ذات شكل مستوٍ، إلا أنها تبدي الصدوع على الأغلب تغيرات ضمن مقاطعها الشاقولية المأخوذة في مواقع مختلفة على طولها. فقد يحدث أن تتغير زاوية ميل سطح الصدع من مكان لآخر، وقد يحدث أن يتحول صدع تراكبي ظاهر في أحد المقاطع إلى صدع مقلوب في مقطع آخر ثم إلى صدع عادي شديد الميل ثم إلى صدع عادي ضعيف الميل، منتهياً على الأغلب بلية. فإذا تم التأكد من عدم وجود صدوع عرضية مسببة لمثل هذه التغيرات المفاجئة، فإنه يمكن استنتاج أن هذا الصدع هو من الصدوع الملتوية الشكل (4–25–a).

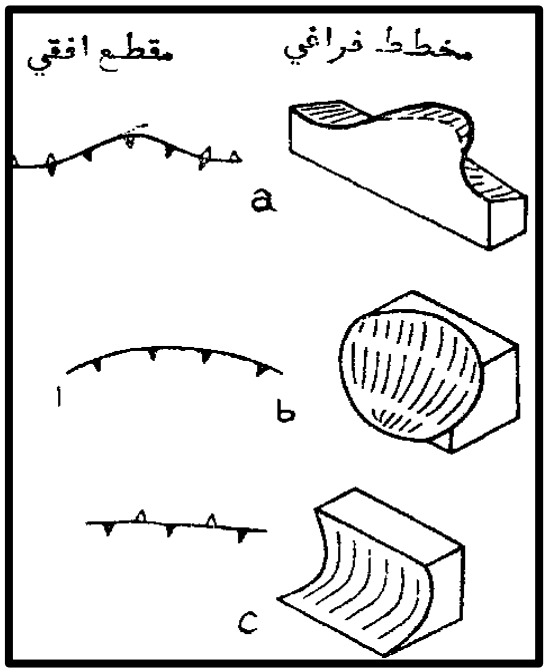
**4–13–2– الصدوع المجرفية:** تتميز هذه الصدوع بتغير في قيم زواياها حسب الاتجاه والميل معاً، حيث تزداد زاوية ميل الصدع من الأسفل نحو الأعلى مما يعطيه شكلاً مقعراً باتجاه سطح الأرض الشكل (4–25–b)، بينما تكون الأشكال المحدبة أكثر ندرةً. وتتراوح مساحة مثل هذه الصدوع بين عدة سنتيمترات مربعة حتى عدة من كيلومترات مربعة.

**4–13–3– الصدوع الاسطوانية:** هي سطوح صدعية مقوسة لاتبدي تغيراً في اتجاهها بشكل عام، ولكن اتجاه ميلها يتغير ضمن المقطع الشاقولي الشكل (4–25–c).

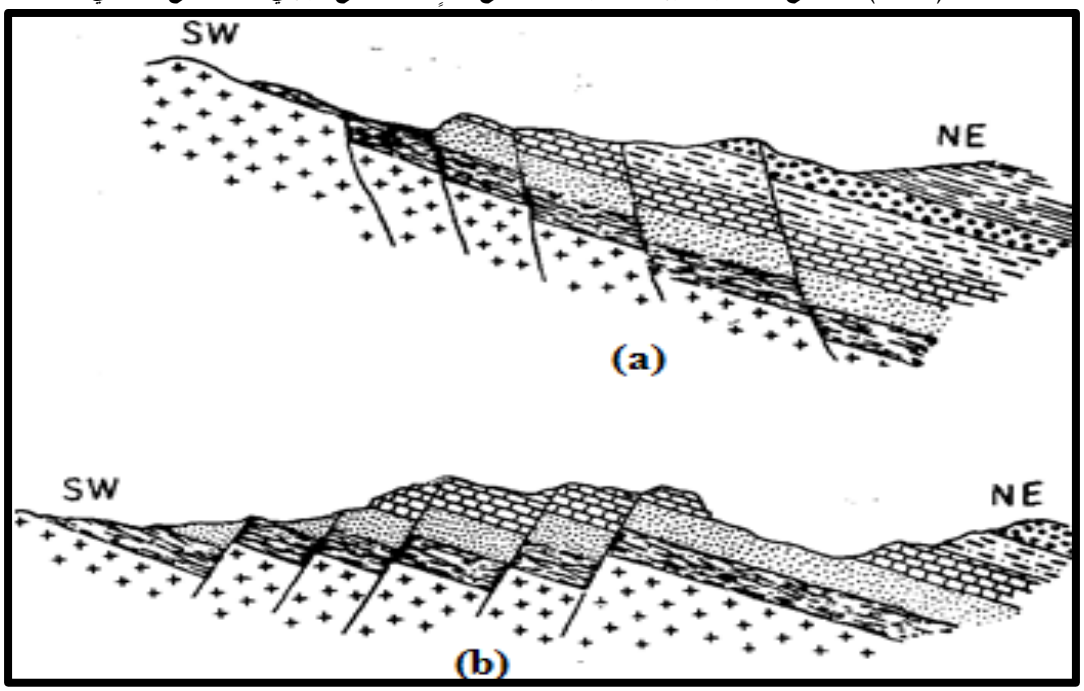
**4–14– المجموعة الصدعية:** تتألف المجموعة الصدعية من عدة صدوع منفردة ذات وضعيات فراغية متساوية تقريباً وتتعاقب بمسافات قصيرة نسبياً حسب ترتيب معامد لاتجاهها. وبالتالي فإن طبقة المعلم تظهر في المقطع الشاقولي مزاحة على الأغلب بشكل سلمي الشكل (4–26). وتكون المجموعات الصدعية ذات صفة تباعدية (شدية) أو تقاربية (ضغطية) وذلك حسب طبيعة الصدوع المؤلفة لها (عادية أو مقلوبة). وهي تصنف بالاعتماد على العلاقة بين اتجاه ميول الصدوع واتجاه ميول الطبقات إلى نوعين:

**1- المجموعة الصدعية المتوافقة:** يتوافق اتجاه ميل الصدوع المؤلفة لهذه المجموعة مع اتجاه ميل أجزاء طبقة المعلم المصابة بها الشكل (4-26-a).

**2- المجموعة الصدعية اللامتوافقة:** يكون اتجاه ميل الصدوع المؤلفة لهذه المجموعة معاكساً لاتجاه ميل أجزاء طبقة المعلم المصابة بها الشكل (4-26-b).




**الشكل (4-25): السطوح الصدعية غير المستوية. a- صدع ملتوٍ. b- صدع مجرفي. C- صدع اسطوني.**



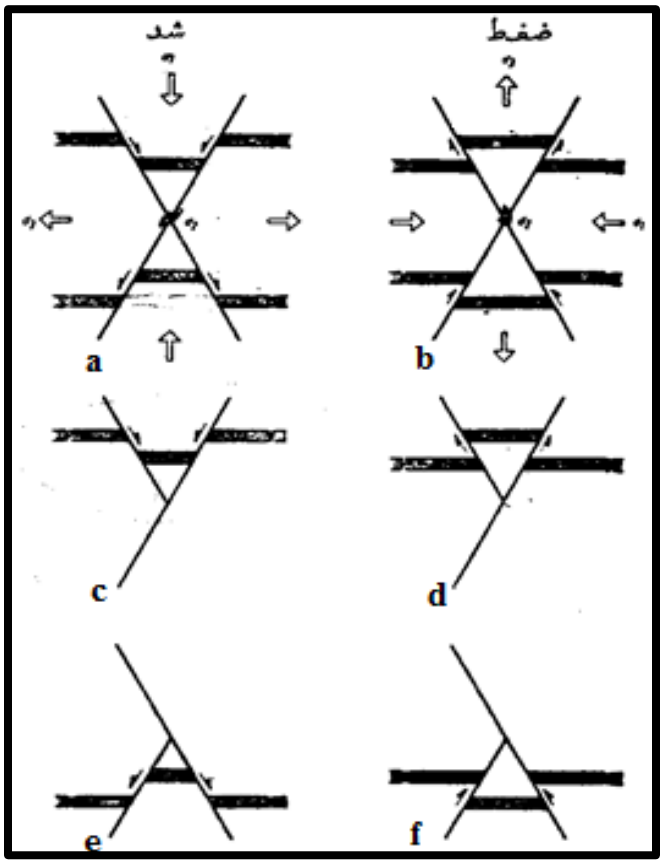

**الشكل (4-26): المجموعة الصدعية. a- مجموعة صدعية متوافقة، لاحظ أن الطبقات والصدوع تميل نحوNE، b-مجموعة صدعية لا متوافقة لاحظ أن الطبقات تميل نحو NE بينما تميل الصدوع نحو SW.**

### 4-15- الجمل الصدعية :Fault system

#### 4-15-1- الجملة الصدعية من نوع "X" (جملة "X" الصدعية):

تتألف جملة "**X**" الصدعية من سطحين صدعيين لهما الاتجاه نفسه تقريباً، إلا أنهما يميلان باتجاهين متعاكسين. ويظهر أثرا الصدعين المتقاطعين ضمن المقطع الشاقولي على شكل حرف "X" ومن هنا أتت تسمية هذا النوع من الجمل الصدعية. يعزى تكوّن هذا الشكل الأساسي من الجمل الصدعية إلى عمليات الشد، إلا أنه يمكن أن ينشأ أيضاً من عمليات الضغط، حيث يتكون في الحالة الأولى ماندعوه جملة "**X**" الصدعية العادية وفي الحالة الثانية جملة "X" الصدعية المقلوبة.

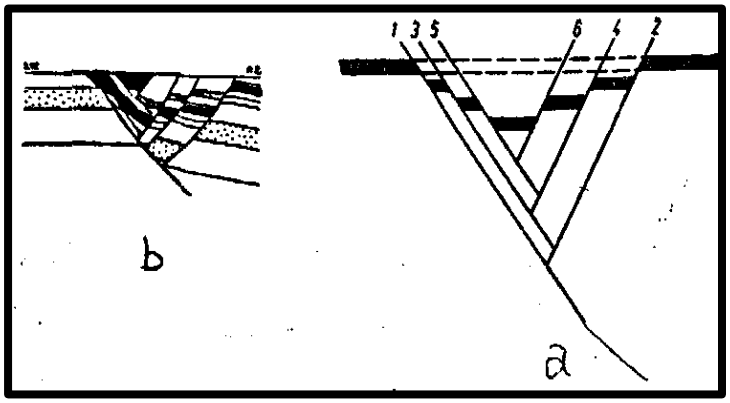
**1- جملة "X" الصدعية العادية:** تتكون هذه الجملة نتيجة العمليات التكتونية الشدية (التباعدية)، حيث يظهر ضمن المقطع الشاقولي أن الجزء الموجود فوق نقطة تقاطع الصدعين يأخذ شكل "غور انهدامي" (غور شدي)، بينما يبدي الجزء الموجود تحت نقطة التقاطع بنية ندعوها "نشزاً" (نشزاً شدياً). إن الغور الانهدامي والنشز الناشئين بهذه الطريقة هما بنيتان شديتان متزامنتان تعودان لجملة صدعية مشتركة الشكل (4-27-a).




**الشكل (4-27): جمل "X" و "Y" الصدعية. a- جملة X" الصدعية العادية. b-جملة X" الصدعية المقلوبةن c,e- جملة "Y" الصدعية العادية، f,d- جملة "Y" الصدعية المقلوبة.**

**2- جملة "X" الصدعية المقلوبة:** تتكون هذه الجملة نتيجة العمليات التكتونية الضغطية (تضيقاً أفقياً)، حيث يظهر الجزء الموجودفوق نقطة تقاطع الصدعين على شكل "نشز" (نشزاً ضغطياً)، بينما يظهر الجزء الموجود تحت نقطة التقاطع على شكل غور انهدامي ذي جانبين متراكبين فوق كتلة الغور (غوراً ضغطياً الشكل (4-27-b).

**4-15-2- الجملة الصدعية من نوع "Y" (جملة "Y" الصدعية):** يظهر أثرا الصدعين المؤلفين لهذه الجملة في المقطع الشاقولي على شكل حرف **"Y"** وذلك بالوضع المقروء (Y) أو المعكوس. وهذا يعني أن أحد الصدعين (الصدع الثانوي) غير مستمر فوق أو تحت نقطة التقاطع، بينما يكون الآخر (الصدع الرئيس) مستمراً الشكل (4-27-C,D,E,F)، حيث أن شكل انزياح طبقة المعلم ضمن هذه الجملة مشتق من شكل الانزياح الحاصل ضمن جملة **"X"** الصدعية. تؤدي العمليات الشدية بصفة خاصة إلى نشوء جمل "**Y**" الصدعية العادية التي يكون فيها حرف **"Y"** بوضعيته المقروءة شكل (4-27-c) بينما تكون الوضعية المعكوسة أكثر ندرة الشكل (4-27-e) أما العمليات الضغطية فتؤدي إلى نشوء جملة **"Y"** الصدعية المقلوبة (4-27-f,d). إلا أن نشوء هذه الجمل يعزى على الأغلب إلى جمل **"Y"** الصدعية العادية (الأشكال الشدية) في الأصل والتي تعرضت لاحقاً لعمليات الضغط. تتعقد بنية جمل "**Y**" الصدعية من خلال تكون مجموعة صدعية توازي الصدع الثانوي الشكل (4-28-b)، كما يمكن للكتلة الغائرة المحصورة بين الصدعين الرئيسي والثانوي أن تتعقد بظهو صدوع رئيسية وثانوية من درجات أدنى، مما يؤدي إلى تجزئة الكتلة الغورية الرئيسة إلى كتل غورية أصغر الشكل (4-28-a).




**الشكل (4-28): جملة "Y" صدعية معقدة بصدوع رئيسة (أرقام مفردة) وثانوية (أرقام مزدوجة) من درجات أدنى.**
**b-جملة "Y" صدعية معقدة بصدوع موازية للصدع الثانوي.**

**4-16- الغور الانهدامي Graben والنشز Horst:**

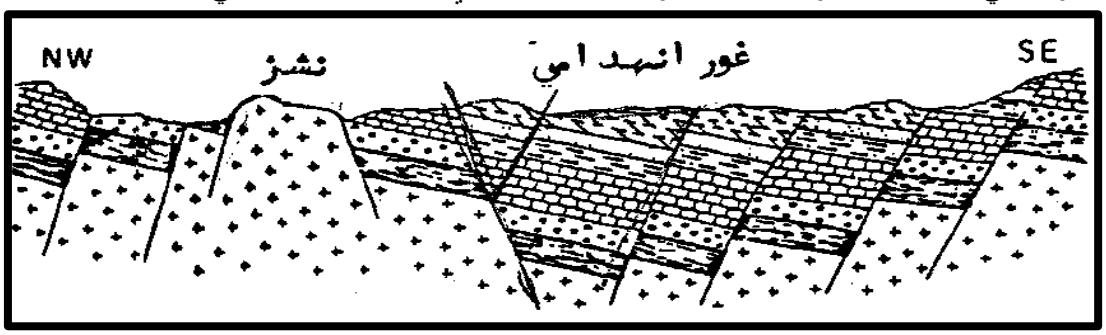
**الغور الانهدامي:** هو كتلة صخرية صدعية متطاولة بشكل عام وهابطة بالنسبة للكتل الصخرية الموجودة على جانبيها.

**أما النشز:** فهو كتلة صخرية صدعية متطاولة بشكل عام ومرتفعة بالنسبة للكتل الصخرية الموجودة على جانبيها. وتكون الصدوع الجانبية المحدّدة لهذه الكتل على الأغلب صدوعاً عادية شديدة الميل أو شاقولية الشكل (4-29). تختلف أبعاد الأغوار الانهدامية والنشوز اختلافاً كبيراً فقد تكون صغيرة أو قد تصل أطوالها إلى عدة من الكيلومترات أو عدة عشرات من الكيلومترات أو حتى عدة مئات من الكيلومترات. لاتنعكس الصورة التكتونية للأغوار الانهدامية دائماً على الشكل التضاريسي، أي أن كتلة الغور الهابطة لاتؤدي إلى سطح تضاريسي منخفض دائماً. فقد يحدث في بعض الحالات أن تكون الصخور المؤلفة للكتلة الغائرة مقاومة للتعرية مقارنة مع صخور الكتل المجاورة، وهذا مايؤدي إلى الانعكاس التضاريسي. أي أن كتلة الغور ستشكل تلالاً مرتفعة، بينما تبدو المناطق المحيطة (العائدة تكتونياً للكتل الناهضة) منخفضة تضاريسياً. تسري هذه القاعدة على الكتل النشزية أيضاً التي قد تشكّل في بعض الأحيان منخفضات تضاريسية.

**4-17- آلية التصدع:** لدينا نمطين عامين من الكسور:

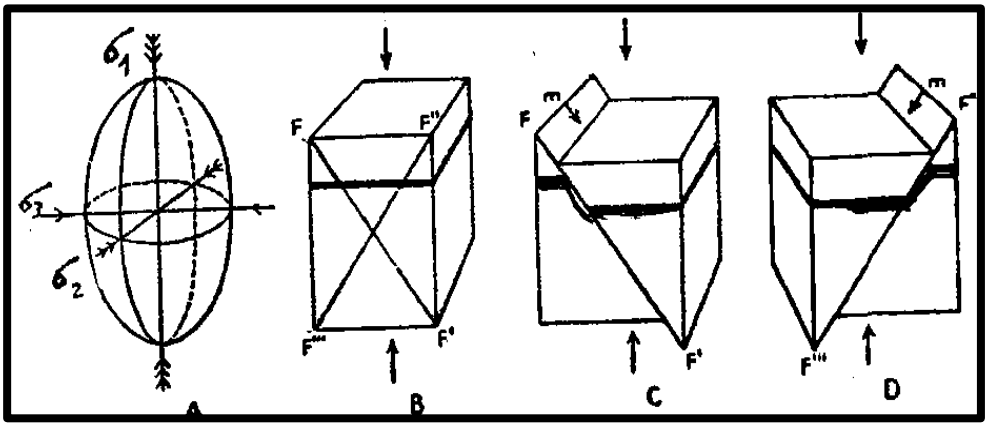
- **كسور الشد.**
- **كسور القص.**

تتميز الأولى بحركة تباعد للكتل الصخرية، بينما تتميز الثانية بأن حركة الكتل الصخرية توازي سطح الكسر. وبالتالي لاتعد كسور الشد صدوعاً عند بداية تكونها على الأقل، حيث يمكن لحركة لاحقة أن تكون موازية لسطح الكسر مما يؤدي إلى تحول كسور الشد إلى صدوع. سنناقش الصدوع التي نشأت أصلاً على شكل كسور قص. وعلاوة على ذلك نفترض أن الانزياحات نتجت عن الاجهادات نفسها التي سببت الكسر الأولي، حيث أن بعض الانزياحات تنتج أحياناً عن اجهادات غير تلك التي سببت الكسر الأولي. وللتبسيط سنفترض أن الصخور متماثلة الخواص أي أن صفاتها متساوية في كل الاتجاهات.




**الشكل (4–29): غور انهدامي ونشز. لاحظ جملة "Y" الصدعية في الوسط.**

**4–17–1– اتجاه الانزياح:** لقد تركز الاهتمام في الفصل الثالث على تكوّن كسور القص وتوجهها دون الاهتمام بطبيعة الحركة التي يمكن أن تلي تكون الكسر. وكما لاحظنا في الشكل (3–8) فإن كسور القص تصنع زاوية أقل من $45^{\circ}$ (بحدود $30^{\circ}$) مع محور الاجهاد الرئيس الأكبر وتكون موازية لمحور الاجهاد الرئيس المتوسط. يبين الشكل (4–29) الانزياح الذي يلي تكوّن الكسر على اعتبار أن قوى الضغط تؤثّر بشكل شاقولي، وأن الكتلة مقيدة من الأمام والخلف وحرة من اليمين واليسار. نلاحظ الوضعية الفراغية للمجسم الاهليلجي للاجهاد في الشكل (4–30–A)، حيث أن $\sigma 1$ شاقولي و $\sigma 2$ معامد للشكل أما $\sigma 3$ فهو أفقي وواقع في مستوي الشكل. وكما يتضح من الشكل (4–30–B) فإن مجموعتين من كسور القص (FF,FF) تتكونان بزاوية تقارب $30^{\circ}$ مع $\sigma 1$. ومع استمرار القوة المؤثرة يحدث التصدع كما هو موضّح في الشكلين (4–30–C)، (4–30–D)، حيث يمكن القول إن اتجاه الانزياح يقع في مستوي الكسر وعمودياً على $\sigma 2$.




**الشكل (4–30): علاقة الصدوع بالإهليلج المجسم للإجهاد. A– الاهليلج المجسم للإجهاد. $\sigma 1$ محور الاجهاد الرئيس الأكبر، $\sigma 2$ محور الاجهاد الرئيس المتوسط، $\sigma 3$ محور الاجهاد الرئيس الأصغر. B– توجه كسور القص. C– حركة الكتلة اليمينية نحو الأسفل عبر الصدعَ FF. D- حركة الكتلة اليسارية نحو الأسفل عبر الصدعَ FF.**

**4–17–2– الاجهاد والتصدع:** تهدف هذه الدراسة إلى تحديد الوضعية الفراغية للصدوع واتجاه الانزياح على امتدادها عند تعرضها للإجهاد الذي يأخذ أية وضعية يمكن تصورها في القشرة الأرضية. سندرس فيما يلي أبسط الحالات وهي التي يكون

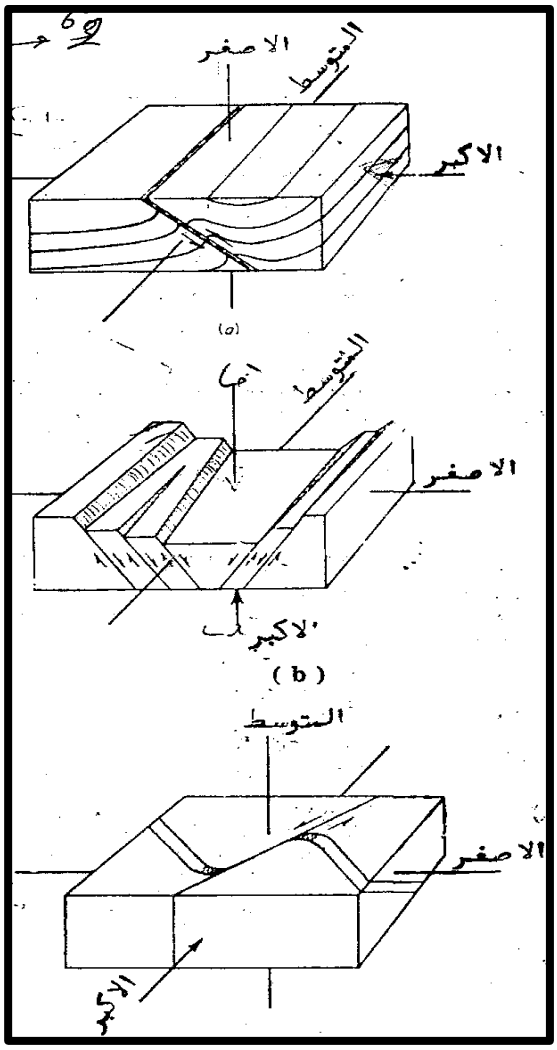
فيها أحد محاور الاجهاد الرئيسة شاقولياً بينما يأخذ الآخران الوضعية الأفقية، حيث يوجد ثلاث حالات أساسية لتوزع الاجهادات اتي تؤدي إلى نشوء الصدوع الشكل (4-31):

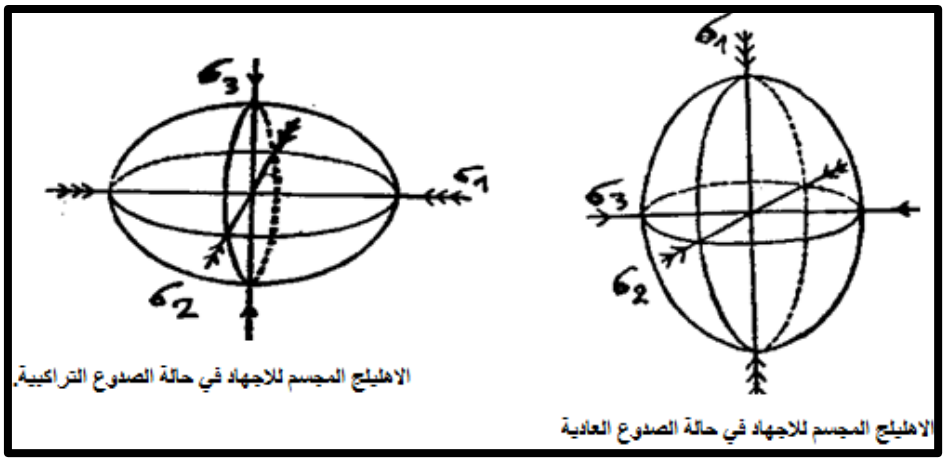
**الحالة الأولى:** يأخذ كل من الاجهاد الرئيس الأكبر والمتوسط الوضعية الأفقية مما يؤدي إلى تكوّن **الصدوع التراكبية** الشكل (4-31-a).

**الحالة الثانية:** يأخذ الاجهاد الرئيس الأكبر الوضعية الشاقولية وهذا مايقود لتكوّن **الصدوع العادية** الشكل (4-31-b).

**الحالة الثالثة:** يأخذ كل من الاجهاد الرئيس الأكبر والأصغر الوضعية الأفقية مما يؤدي إلى تكوّن **صدوع الانزلاق الاتجاهي** الشكل (4-31-C). وهكذا فإذا توافرت معطيات كافية فإنه يمكن تحديد الوضعية الفراغية للإهليلج المجسم للإجهاد في منطقة ما. وطبعاً فإن الوضعية الفراغية يمكن أن تتغير خلال الزمن الجيولوجي.

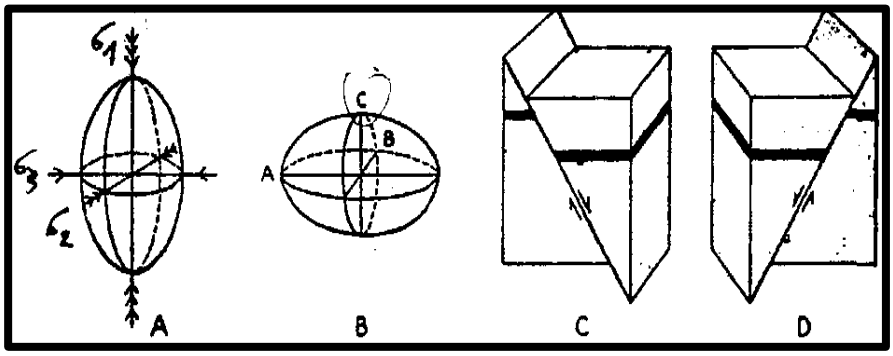
إلا أننا ندرس هنا توجه الاهليلج في الفترة التي كان الصدع فيها نشيطاً. ورغم أنه يمكن تحديد الوضعية الفراغية للإهليلج المجسم بدقة، إلا أنه من غير الممكن دائماً الوصول إلى استنتاجات دقيقة حول القوى التي أدت إلى الاجهاد.






**الشكل (4–32): الاهليلج المجسم للاجهاد في حالة الصدوع العادية، والصدوع التراكبية.**

**4–18– التصدع واهليلج الانفعال:** يبين الشكل (4–33–A) الاهليلج المجسّم للاجهاد، حيث أن كرة وهمية ستتحول ضمن هذه الشروط إلى اهليلج مجسّم للانفعال، كما هو واضح في الشكل (4–33–B). يمثّل محور (A) محور الانفعال الأكبر، أما (B) فيمثّل محور الانفعال المتوسط، بينما يمثّل (C) محور الانفعال الأصغر. ويلاحظ أن (B) يتطابق مع (σ2) وأن (C) يتطابق مع (σ1) وأن (A) يتطابق مع σ3. ويبين الشكلان (4–33–C، 4–33–D) طبيعة الانزياحات الناتجة عن هذه الحالة.




**الشكل (4–33): العلاقة بين اهليلج الاجهاد (A) واهليلج الانفعال (B) والصدوع (D,C).**

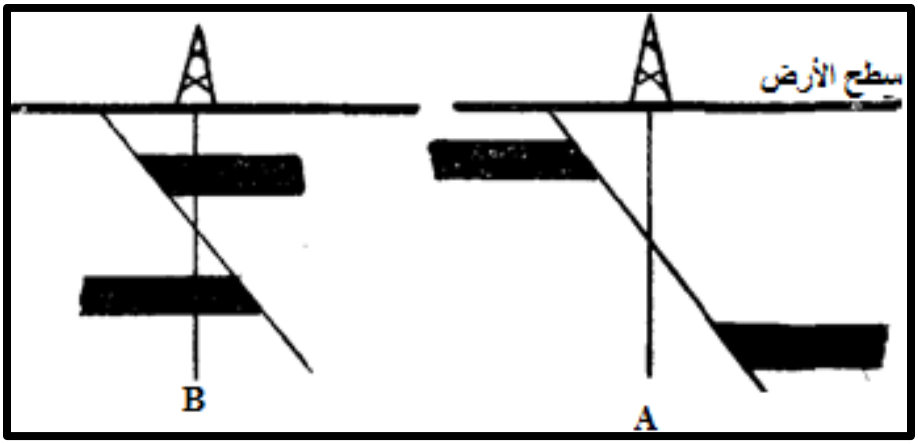
**4–19– تمييز الصدوع:** يمكن تمييز الصدوع بطرائق مختلفة، وتتفاوت إمكانات هذا التمييز من مكان لآخر. فإذا كان الصدع متكشّفاً عبر جرف صخري أو تكشف صنعي (طرقاً، منجماً...) أو غير ذلك فيسهل الحصول على معلومات جيدة عن هذا الصدع. إلا أن ملاحظة الصدوع تكون في حالات أخرى غير مباشرة، حيث أن الأعمال الحقلية الدقيقة يمكن أن تعطي معلومات تسمح بإجراء دراسة كاملة عن الصدوع. وفي حالات أخرى يمكن تحديد وجود الصدوع، إلا أن إجراء تحليل كامل لها يكون غير ممكن. وقد تكون المعطيات قليلة جداً أحياناً، بحيث يكون من غير الممكن الجزم بوجود صدع أو عدمه. وتميز الصدوع بشكل عام من خلال المعايير التالية:

**1– تكرار طبقات أو وحدات طبقية أو غيابها:** إن تكرار بعض الطبقات أو الوحدات الطبقية أو فقدانها هي من المؤشرات المهمة على التصدع، حيث أن الدلائل على وجود الصدوع تأتي من خلال التكرار الستراتيغرافي الملاحظ بالدراسات الجيولوجية تحت السطحية أو فقدانها، بخاصة أن الصدوع لاتكون متكشفة في معظم الحالات.

**2- عدم استمرارية البنيات (محاور طيات، صدوع أقدم...):** يحدث أحياناً أن تنتهي طبقات عند طبقات مختلفة عنها أو أن عروقاً أو جدراً اندساسية أو حتى صدوعاً تقطع بصدوع لاحقة لتشكلها. بشكل عام فإن انقطاع البنيات يشير إلى وجود الصدوع، إلا أن ذلك غير كافٍ للدلالة المباشرة على التصدع مالم يرفق بالدلائل الكافية. فقد تكون هذه الانقطاعات ناتجة عن عوامل أخرى كاللاتوافقات الزاوية أو التماسات الاندساسية أو أحياناً نتيجة التطبق المتقاطع.

**3- المظاهر التضاريسية:** تبين لنا آنفاً أن المعالم الستراتيغرافية والبنيوية تساعد على تحديد وجود الصدوع، إلا أن مثل هذه المعالم لاتوجد دائماً لتساعد على تحديد الصدوع. ولذلك يتم اللجوء في مثل هذه الحالات إلى الدلائل التضاريسية. وتشكل المظاهر الخطية، والانحدارات الطبوغرافية الشديدة المفاجئة والمستقيمة دلائل محتملة على وجود التصدعات الحديثة. وبخاصة إذا ترافقت مع صدوع تجوية شاقولية ونطاقات حطامية ومسيلات مائية خطية. ويمكن للصور الفضائية والجوية أن تشكّل عاملاً مساعداً على اكتشاف مثل هذه المظاهر.

**4- الدراسات تحت السطحية:** تميز الصدوع في الدراسات الجيولوجية تحت السطحية من خلال تكرار أو غياب الطبقات الشكل (4-34) أو الثخانات الشاذة أو من خلال التغيرات المفاجئة في الاتجاه والميل الملاحظة في الآبار. وتكون الصدوع نفسها غير قابلة للملاحظة المباشرة بشكل عام من خلال المعطيات تحت السطحية، ولذلك فإن وجودها وموقعها ووضعيتها الفراغية قابلة لأخطاء في التفسير.




**الشكل (4-34): تختفي طبقة المعلم عندما يخترق البئر مقطعاً ذو تصدّع عادي (A) بينما تتكرر طبقة المعلم في منطقة التصدع المقلوب (B).**

## 4-20- الظواهر المرافقة لسطوح الصدوع:

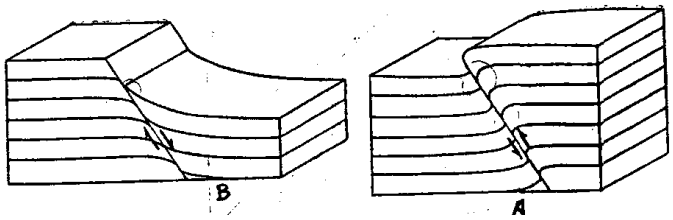
أ- **السطوح المصقولة:** هي سطوح مصقولة polished ومخدوشة striated ناتجة عن الاحتكاك بين كتلتي الصدع أثناء الحركة. حيث ينتج الصقل عن إعادة تنظيم سطحي للفلزات بالمقياس المجهري. وعندما تسود الفلزات الغضارية فإن ذلك سيؤدي إلى ماندعوه مرآة الصدع المشابهة من حيث صقلها لسطح المرآة. أما الخدوش فتنتج عن انزلاق الحبات الفلزية القاسية أو الأجزاء الحطامية الصخرية القليلة أثناء حركة الكتلتين الصخريتين عبر سطح الصدع مما يخلف آثار انزلاق على هذا السطح. وقد تلاحظ هذه الحبة الصخرية أو الفلزية موجودة أحياناً في نهاية الخدش وذلك بالعين المجردة، أو من خلال المكبرة. وهذه تفيد في حالة ايجادها في تحديد اتجاه الحركة التي تكون موازية للخدش وباتجاه الحبة الفلزية أو الصخرية المتبقية. يلاحظ في بغض الأحيان وجود درجات دقيقة ذات امتداد معامد للخدوش. وقد تكون واضحة أو قد تكون صغيرة جداً أحياناً، بحيث يصعب أو يستحيل تمييزها. تفيد هذه الدرجات في تحديد اتجاه الحركة، حيث أن الحركة تحدث عبر الجهة المنبسطة باتجاه الانحدار الشديد

للدرجة. وبشكل عام فعند ملامسة السطح المصقول بأصابع اليد وتحريكها باتجاه الحركة فإن السطح يبدو أكثر نعومةً من الاتجاه المعاكس، مفترضين أن الكتلة التي نلمسها هي الكتلة الثابتة وأن الكتلة الأخرى (غير الموجودة) هي المتحركة.

**ب- البريش الصدعي والميلونيت:** يؤدي انزلاق الكتل الصخرية عبر الصدوع إلى تحطم ميكانيكي للصخر في مجال الصدع. وذلك بشدات متفاوتة وانتشار فراغي مختلف، حيث يتراوح عرض النطاق الصدعي بين الميليمترات وعدة مئات نت الأمتار. يتألف البريش الصدعي Faults breccia من شظايا أو حبات زاوية أو شبه زاوية ذات حجوم مختلفة غارقة في أرضية matrix أكثر نعومة، وهو يوجد على امتداد بعض النطاقات الصدعية. أما الميلونيت mylonite (الطحين) فهو صخر ناعم الحبيبات يتشكل من خلال التحطم والطحن الناتج عن الحركة عبر سطح الصدع.

**ت- السيلسة والتمعدن:** تمثّل الصدوع معابر للسوائل المتحركة، حيث يمكن أن تحدث تبادلات بين هذه السوائل والصخور المحيطة مما يؤدي إلى توضع حبات فلزية كالكوارتز أو تمعدنات مختلفة في مجال السطوح الصدعية، كما هو الحال في بعض المناجم.

**ث- السحب:** "**السحب drag**" هو نشوء انحنائي يرافق الانزياحات الصدعية زمنياً ومكانياً كظاهرة ثانوية. وتساعد هذه الظاهرة في بعض الحالات على تحديد الحركة النسبية للصدوع.

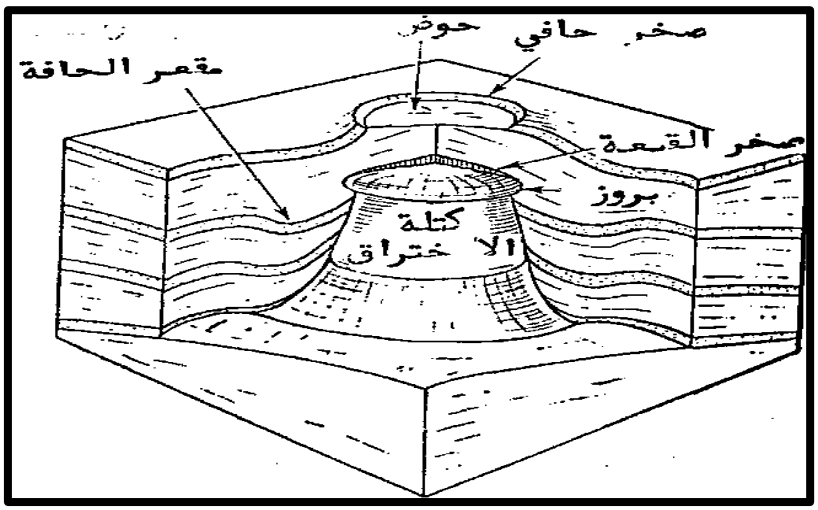


# الفصل الخامس

# القباب الملحية

**مقدمة:** تتصف القباب الملحية بأهمية خاصة في الجيولوجيا البنيوية لأنها تعطي مثالاً جيداً عن حركة الأجسام الصخرية الضخمة اللدنة. وهي تدعى بهذا الاسم بسبب تقبب الطبقات الصخرية الموجودة فوق كتلة الاختراق الملحية التي يغلب على مسقطها الأفقي الشكل الدائري حتى اهليلجي.

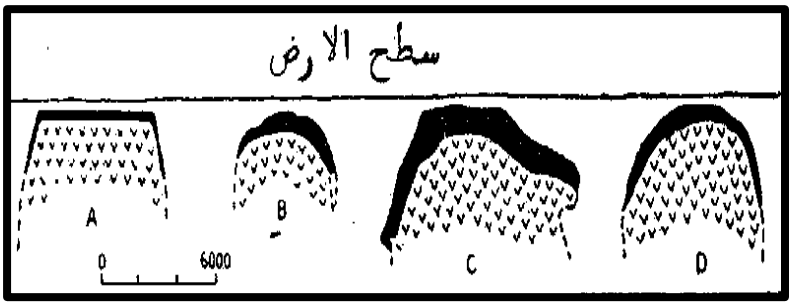
**5-1- شكل وحجم وتركيب القباب الملحية:** لابد عند دراسة شكل القباب الملحية وحجمها وتركيبها من التمييز بين القبة المونة من الصخور الرسوبية وبين كتلة الاختراق المؤلفة من الصخور الملحية. وكتلة الاختراق diaper هي جسم صخري تحرك نحو الأعلى مخترقاً الطبقات الصخرية التي تعلوه. تحدث بنيات الاختراق بتأثير قوى الطفو buoyant forces الناتجة عن تباين الكثافة بين الصخور الخفيفة المكونة لكتلة الاختراق والطبقات الأكثر كثافةً المكونة للصخور المغطية. ويعتقد بأن كتلة الاختراق هي عمود ضخم امتداده الشاقولي أكبر من امتداده الأفقي. ويغطي كتلة الاختراق في العديد من الحالات ما يدعى "صخر القبعة" قليل الثخانة نسبياً والذي يتألف من الحجر الكلسي والانهيدريت والكبريت. تؤدي عملية الاختراق إلى سحب الطبقات الرسوبية المجاورة لكتلة الاختراق نحو الأعلى. وقد ينتشر السطح العلوي لكتلة الاختراق جانبياً ليشكل بروزاً ذا شكل فطري. ويترافق اختراق الملح لطبقات مسطحة في الحالة النموذجية مع تكوّن "مقعر الحافة rim syncline"، وذلك لأن الطبقات التي تميل بلطف نحو الأسفل تنسحب بجوار القبة نحو الأعلى (الشكل 5-1). ومن ناحية أخرى تؤدي التعرية المتباينة بين الصخور مختلفة القساوة في القبة إلى تكوّن حوض في أعلى القبة يكون محاطاً بإحدى الطبقات المقاومة للتعرية التي تكوّن مايدعى "صخر الحافة rim rock".



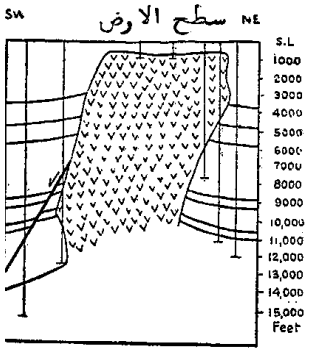

**الشكل (5-1): مخطط فراغي يوضّح المظاهر الأساسية للقبة الملحية.**

تنعكس بعض القباب بشكل جلي على الشكل التضاريسي، بينما يكون بعضها الآخر فير واضح تضاريسياً. ترتفع بعض التلال الناتجة عن القباب الملحية لنحو المتر أو لعدة من عشرات من الأمتار، ويبلغ قطرها نحو (1.5كم). تميل السطوح الجانبية لكتلة الاختراق في بعض الحالات بشدة نحو الخارج، وقد يكون سطحها العلوي أفقياً الشكل (5-2-A) أو بشكل مقبب الشكل (5-2-B,D) كما قد تكون هذه الكتل متناظرة أي أن سطوحها تميل عموماً بزوايا متساوية في كل الاتجاهات، أو غير متناظرة، حيث يميل سطحها بشدة في أحد الاتجاهات أكثر من الاتجاهات الأخرى، كما وقد يميل جدارها في أحد الاتجاهات نحو الكتلة

نفسها الشكل (5–3). وتأخذ كتلة الاختراق أحياناً شكلاً فطرياً الشكل (5–2–C). تتألف كتلة الاختراق بشكل أساسي من الملح الصخري (الهاليت) الذي قد يكون صرفاً لاأثر قيه للغضار أو الصخور الرسوبية الأخرى. وقد يكون حاوياً على طبقات غضارية أو طبقات غنية بالبوتاس. تتألف صحور القبعة بشكل أساسي من الحجر الكلسي والجص والانهيدريت حيث يوجد الحجر الكلسي في الأعلى والانهيدريت في الأسفل، كما يمكن لتوضعات كبريتية ذات أهمية اقتصادية أن توجد في صخر القبعة.




**الشكل (5–2): الأشكال الممكنة لكتلة الاختراق في القباب الملحية (يشير اللون الأسود إلى صخر القبة ويشير الرمز "V" إلى كتلة الاختراق.**




تتمثل القباب الملحية في بداية تطورها في شكل تموجات للسطح العلوي للطبقات الملحية أي في شكل مرتفعات ومنخفضات خطية أو أحواض وقباب لطيفة (وسائد ملحية). ويؤدي نمو هذه البنيات إلى تقبب الطبقات التي تعلوها تتمددها من خلال الانزلاق عبر مجموعات من الصدوع العادية، مما يدل على أن الصخور الرسوبية التي تعلو القبة قد تعرضت لعمليات الشد. تشمل البنية الداخلية للملح في كتل الاختراق المتطورة بشكل جيد طيات متساوية الميل وطيات ذات محاور شاقولية وطيات مطوية وطيات متصدعة. يختلف عمق كتلة الاختراق عن سطح الأرض اختلافاً كبيراً، حيث تصنف القباب الملحية حسب هذا المعيار إلى ثلاثة أنواع هي:

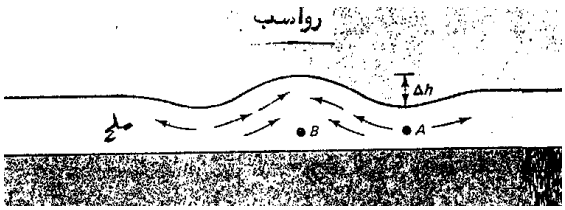
– **القباب الملحية العميقة:** وهي القباب التي يكون السطح العلوي لكتلة الاختراق فيها أعمق من 2000م عن سطح الأرض.

– **القباب الملحية متوسطة العمق:** وهي القباب التي يكون عمق السطح العلوي لكتلة الاختراق فيها بحدود (1000–2000 م) عن سطح الأرض.

– **القباب الملحية الضحلة:** وهي القباب التي يكون عمق كتلة الاختراق فيها أقل من 1000م عن سطح الأرض، بحيث أن الملح الصخري العائد للقبة قد يتكشف مباشرةً على سطح الأرض.

**5–2– منشأ القباب الملحية:** تنشأ القباب الملحية نتيجة اندساس الملح الصخري (الهاليت) اللدن في الصخور الرسوبية التي تعلوه حيث تدعى العملية بالاختراق diapirism. ويحدث ذلك بسبب اختلاف الخصائص الفزيائية بين الملح الصخري والصخور الرسوبية المحيطة. فالرواسب التبخرية ذات مسامية منخفضة بعد ترسيبها، فهي ذات كثافة قريبة جداً من كثافة الفلزات المؤلفة لها أما المكونات الفلزية للرواسب الأخرى فهي ذات ككثافة أكبر. عندما يخترق الملح الصخور المغطية التي تتناقص كثافتها

كلما اتجهنا نحو سطح الأرض، فستعمل كتلة الاختراق إلى مستوى تكون كثافة الملح مساوية كثافة الصخور المحيط، وعندئذٍ يميل الملح لأن ينتشر جانبياً مما يؤدي إلى الشكل الشبيه بالفطر لكتلة الاختراق، أما إذا كان الانتشار الجانبي معاقاً إلى حد كافٍ بسبب صلابة الصخور المحيطة أو كثافتها المرتفعة نسبياً فقد يصل الملح إلى سطح الأرض. يمكن تدعيم فرضية تكون القباب الملحية نتيجة تباين الكثافة بالتجارب المخبرية التي تبين أن الملح يتحرك مخترقاً الطبقات التي تعلوه بالطريقة نفسها التي يتحرك بها سائل عبر سائل آخر أثقل منه وموجود فوقه. نستنتج مما سبق أن تكوّن القباب الملحية يتم بشكل مستقل عن القوى التكتونية، ورغم ذلك يرجح أن يكون هناك دوراً للضغط الأفقي الناتج عن العمليات الأوروجينية، حيث توجد الاندساسات الملحية في مناطق طي شديدة، وهذا ما أدى إلى أن يندس الملح في الطبقات الرسوبية العائدة لقمم المحدبات.



## الفصل السادس

# اللاتوافقات Unconformities

**تعريف:** سطوح اللاتوافق هي سطوح تفصل بين أنماط صخرية مختلفة من حيث الخصائص البتروغرافية (التركيب الفلزي والبنية والنسيج)، أو غير مستمرة في ترتيبها الزمني. ويمكن أن تعزى إلى عمليات رسوبية ومهلية وتحولية وتكتونية، وهي تميز انقطاعاً في استمرارية السجل الجيولوجي أي الانقطاع في عملية البناء الصخري المتواصلة.

**6-1- السبب في أهمية دراسة اللاتوافقات من الناحية البنيوية (التكتونية) يكمن بما يلي:**

1- تشكل مفاتيح لتمييز النشاط التكتوني.

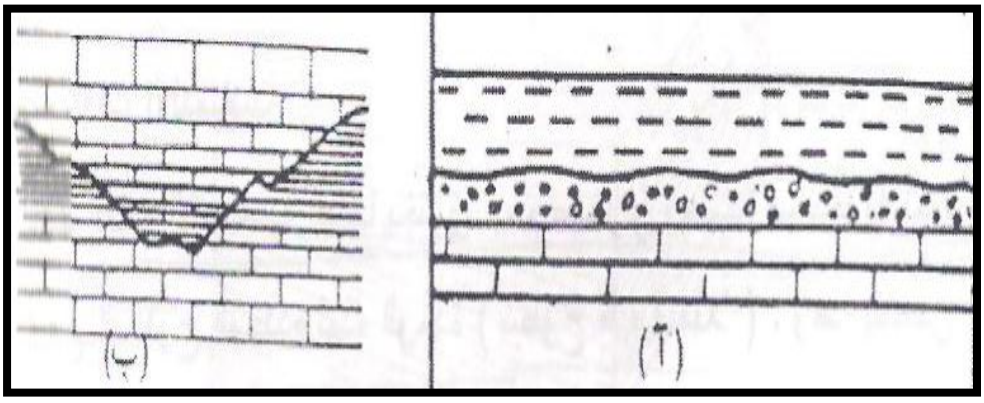
2- تستخدم في تأريخ الحركات الأوروجينية والإيبرجينية، لذلك دراستها مهمة لدارسي علم الطبقية والترسيب والجيولوجيا التاريخية.

3- تترافق مع بعض اللاتوافقات توضعات نفطية وفلزية مهمة.

**6-2- اللاتوافقات الرسوبية:**

تنشأ سطوح اللاتوافقات الرسوبية عن توقف عمليات الترسيب لفترة زمنية، وهي تشكل سطحاً علوياً لطبقة أو لوحدة صخرية، وهذا ما يؤدي إلى أن الرسوبات الأحدث ستتوضّع فوق قاعدة غير أفقية على الأغلب. وكثيراً ما توجد في قاعدة الرسوبات الأحدث التي تعلو هذا السطح طبقات مؤلفة من مواد معاد ترسيبها تعود إلى الصخور الأقدم أو إلى مناطق تعرية مجاورة (كالكونغلوميرا القاعدية Basal conglomerates)، ويميز بين نوعين أساسيين من هذه السطوح:

- **اللاتوافق المتوازي Parallel unconformity أو Disconformity:** وهو اللاتوافق الذي يتشكل إذا كان تطبق الرسوبات الأحدث يوازي سطحها السفلي ويوازي تطبق الصخور الأقدم، فإن ذلك يمثّل لاتوافقاً متوازياً الشكل (6-1). ويعتبر أن أهم سطوح اللاتوافق المتوازية هي سطوح التطبق التي تكون متوازية أو شبه متوازية، وتحد الطبقات الصخرية من الأسفل والأعلى، حيث أن الثغرة المحدِّدة بسطحين طبقيين متجاورين تفصل بين طبقات متماثلة أو متخالفة في التركيب واللون والنسيج، وتميز دائماً انقطاعاً زمنياً في الترسيب، من غير أن يكون هذا الانقطاع قابلاً في كل مرة للإثبات الستراتيغرافي أما إذا كان هناك فرق ستراتيغرافي مثبت بين الطبقة الأقدم والطبقة الأحدث وذلك متوضّح من خلال التباين المستحاثي مثلاً فإن ذلك يعبّر عن وجود ثغرة ستراتيغرافية، أي غياب طبقات معينة أو وحدات طبقية كاملة. وهكذا فإن الثغرات الستراتيغرافية تنشأ عندما تعقب فترة من عدم الترسيب فترة ترسيبية بحيث تحدث تعرية جزئية أو تجوية للطبقات الرسوبية المتوضة سابقاً.



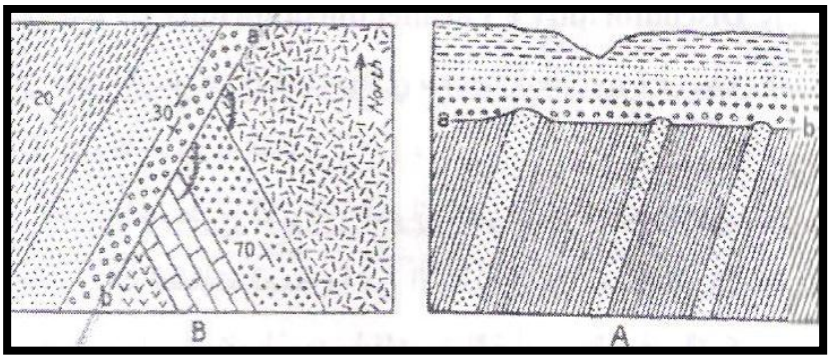

**الشكل (6-1): عدم التوافق المتوازي الحالتين:**

**آ- سطح اللاتوافق سطح ممهد أو منبسط.**

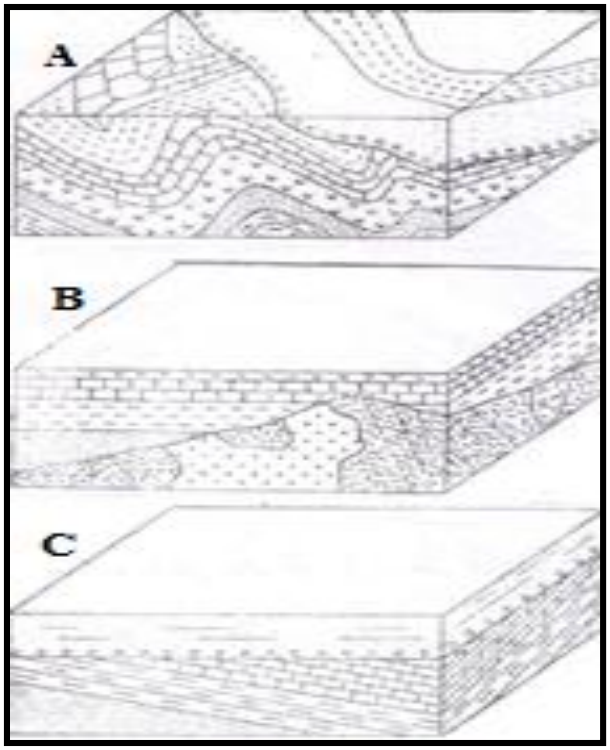
**ب- سطح اللاتوافق تخددي أو تضاريسي.**

– **اللاتوافق الزاوي Angular unconformity:** إذا كان تطبق الرسوبات الأحدث يصنع زاوية مع تطبق الرسوبات الأقدم (يكون سطح اللاتوافق نفسه موازياً لتطبق الرسوبات الأحدث) ، أو أن الرسوبات الأحدث توضعت على قاعدة غير أفقية (سطح اللاتوافق لايوازي تطبق الرسوبات الأحدث) ، فإن ذلك يمثل لاتوافقاً زاوياً. وتكون الطبقات اللامتوافقة في هذه الحالة غير متوازية أو أن تطبق وحدة رسوبية لايوازي سطح قاعدتها. ويظهر ذلك سواء في المقاطع العرضية الشكل (6–2). وفي الشكل (6–3) حيث يبين الشكل (6–3–A) لاتوافقاً زاوياً لصخور متوضعة فوق وحدة صخرية رسوبية مطوية، أما الشكل (6–3–B) فيمثل لاتوافقاً حصل فوق صخور متحولة مطوية (ركيزة Basement) مؤلفة من معقد من الغنايس واندساس غرانيتي وصخور شيست مطوية، وعادةً مايطلق مصطلح اللاتوافق nonconformity على هذا النوع من اللاتوافق الذي تكون قاعدته ذات منشأ بلوتوني. ويبين الشكل (6–3–C) لاتوافقاً حصل فوق كتلة صخرية مائلة. **وتتشكل اللاتوافقات الزاوية بشكل عام نتيجة للعمليات التالية:**

1– عندما يكون السطح العلوي العائد للوحدة الرسوبية الأقدم ليس أفقياً أصلاً. وهذا مايحدث فوق ظهور وسط المحيطات أو فوق الأجسام الرسوبية المتوضعة بشكل مائل (رسوبات تيارات العكر).



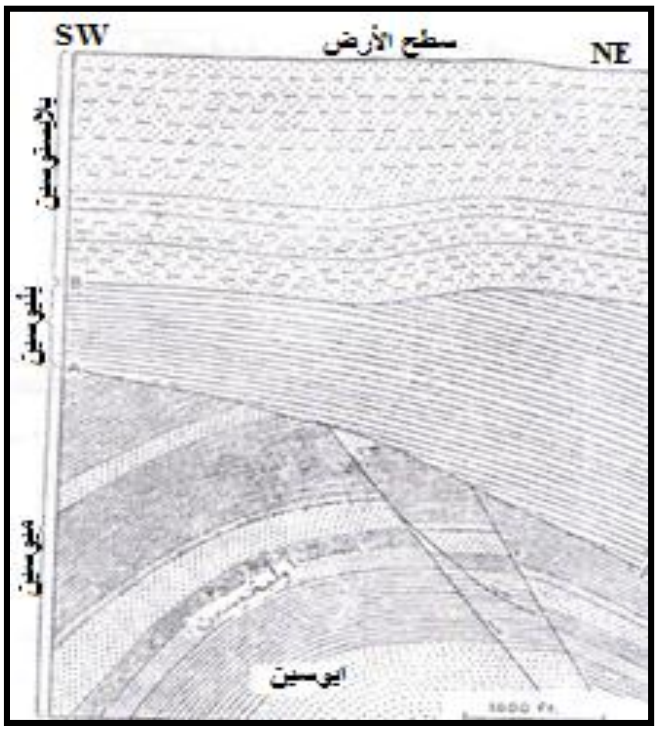

**الشكل (6–2): لاتوافق زاوي. A– مقطع عرضي. B– خارطة (لاتعود لنفس منطقة المقطع المبينة في A.**




**الشكل (6–3): لاتوافقات زاوية.A –فوق وحدة رسوبية مطوية.B –فوق صخور الركيزة المتحولة. C–فوق كتلة رسوبية مائلة.**

2- عندما يتعرض المعقد الصخري الأقدم لعمليات تكتونية شديدة تؤدي إلى طيّه أو إمالته، وبعد النهوض والتعرية يعاود الترسيب مرة أخرى مؤدياً إلى توضع وحدات رسوبية ذات تطبق أفقي أو شبه أفقي. إن هذا النوع من سطوح اللاتوافق الملاحظة بين وحدات رسوبية أقدم ووحدات أحدث يمثل نمطاً واسع الانتشار، ويميز على الأغلب ثغرة زمنية كبيرة حدث خلالها نغير الوضعية الفراغية للطبقات والنهوض والتعرية. وتفيد أمثال هذه اللاتوافقات في تحديد أعمار التشوّهات التكتونية (مرحلة الطي مثلاً) التي حصلت للوحدات الطبقية الأقم. وإن دقة تحديد فترة التشوّهات تعتمد على عمر الصخور الموجودة على طرفي اللاتوافق. فلو أن عمر الصخور الموجودة تحت سطح اللاتوافق يعود للبرمي الأعلى وعمر الصخور الموجودة فوقه يعود للترياسي الأسفل فإن التشوّه يعود إلى نهاية البرمي وبداية الترياسي.

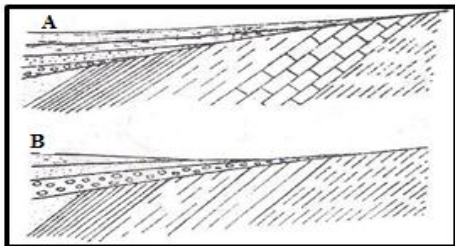
ويبين الشكل (6-4) مثالاً عن لاتوافقين زاويين في حقل سيمرك النفطي (Symric)، ويلاحظ أن سطح اللاتوافق A-A يفصل بين الميوسين والبليوسين، وأن الميوسين تعرض للطي والتصدّع قبل حدوث التعرية التي أدت إلى تكوّن السطح A-A، ثم ترسبت صخور البليوسين فوقه. أما سطح اللاتوافق الثاني B-B فيفصل بين البليوسين والبليستوسين حيث تعرضت صخور البليوسين لطي خفيف قبل حدوث التعرية التي أدت إلى تكوّن السطح B-B والذي ترسبت صخور البليستوسين فوقه ثم تعرضت بدورها لطي خفيف. ويمكن أن تعزى إلى عمليات رسوبية ومهلية وتحولية وتكتونية، وهي تميز انقطاعاً في استمرارية السجل الجيولوجيي أي الانقطاع في علية البناء الصخري المتواصلة.




**الشكل (6-5): يمثل سطح لاتوافق في حقل Cymric النفطي في كاليفورنيا.**

3- عندما يحصل اختلاف في الانتشار المساحي للطبقات المنفردة حلال توضع متتالية رسوبية نتيجة للتحركات الإيبرجينية (النهوض والهبوط)، حيث أن التذبذبات قصيرة الأمد لانتشار البحر والناتجة عن النهوض والهبوط أو إمالة القاع تؤدي إلى حدوث ترقق للطبقات الرسوبية المنفردة، وهذا ما يعبر عنه بالتجاوزات والانسحابات البحرية الشكل (6-6). فإذا امتدت طبقات

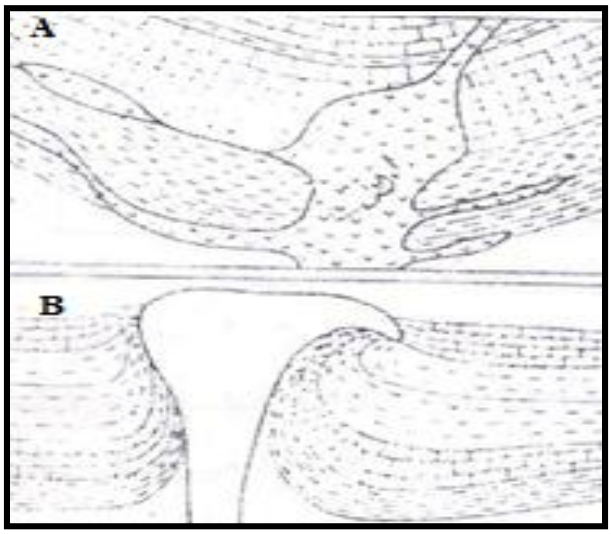
أحدث فوق سطح اللاتوافق بشكل مستمر فإن ذلك يعبر عن حصول تجاوز بحري الشكل (6–6–A)، أما إذا حدث تناقص في انتشار الطبقات الأحدث فوق الطبقات الأقدم فإن ذلك يعني تراجعاً بحرياً الشكل (6–6–B).




**الشكل (6–6): لاتوافق ناتج عن تجاوز البحر (A) وانسحابه (B).**

**ومن اللاتوافقات أيضاً:**

**C– اللاتوافقات الاندساسية Untrussive unconformity:** والتي تحدث عندما يخترق جسم صخري وحدة صخرية أخرى بشكل لايتوافق مع السطوح المحدّدة لهذه الوحدة (سطوح الطبقة مثلاً) ، وهذا يقتضي أن الجسم المندس كان لايزال بحالة لدنة أو سائلة عند حدوث الاندساس، وقد يحدث الاندساس عبر سطوح تكتونية (سطوح صدوع أو شقوق مثلاً). حيث يظهر الشكل (6–7–A) وحدة رسوبية مشوّهة ذات بنية مقعرة اندس فيها صخر مهلي، ويلاحظ أيضاً أن أجزاء من هذا الجسم المندس كونت فروعاً مندسة بين الطبقات. وفي هذه الحالة فإن الجسم المندس أحدث عمراً من الصخر المحيط أما الشكل (6–7–B) فيمثل مقطعاً لاندساس ملحي. وهذا يعود إلى أن الصخور الملجية الموجودة تحت غطاء صخري تصل ثخانته على عدة مئات من الأمتار تتحرّك نحو الأعلى، وغالباً ماتكون الحركة عبر نطاقات صدعية، وتكون الصخور الملحية العائدة للجسم المندس أقدم في هذه الحالة من الصخر المحيط. يعد بعض الباحثين أن الصدوع تمثّل لاتوافقات تضاف إلى النوعين سابقي الذكر (اللاتوافقات الرسوبية الاندساسية) أي أن سطوح الصدوع في اللاتوافقات التكتونية، ويقصد بها السطوح التي تتحرك الكتل الصخرية على جانبيها، مما يؤدي إلى تشويش الترابط الطبقي الأصلي.




**الشكل (6–7): لاتوافقات اندساسية. .A –اندساس مهلي.B– اندساس ملحي.**

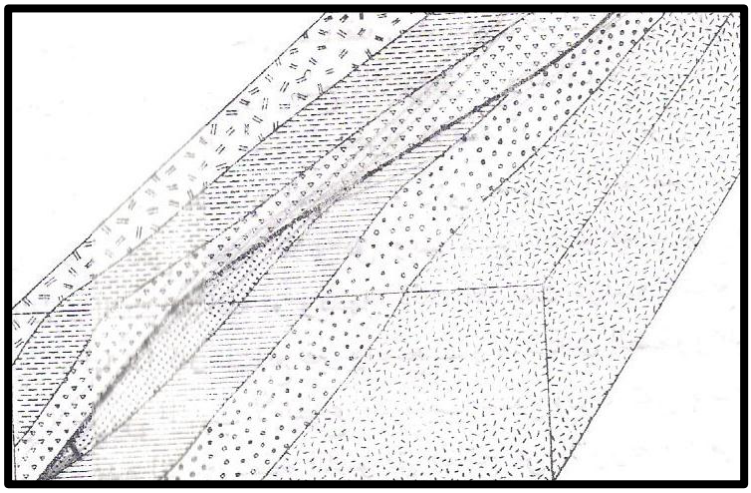
**5–2– تمييز اللاتوافقات:**

تمكن ملاحظة التوافقات ضمن التكشفات المنفردة. فإذا كان اللاتوافق زاوياً فإنه يلاحظ وجود عدم توازي للطبقات على جانبي سطح اللاتوافق، وهذا مايمكن ملاحظته سواء في المقاطع الشاقولية أو الأفقية.

أما إذا كان اللاتوافق متوازياً فيمكن تمييزه في الشروط الجيدة ضمن التكشفات. وفي كلتا الحالتين قد يكون هناك تباين لوني واضح بين الصخور الموجودة على جانبي سطح اللاتوافق. وكذلك فإنه يمكن لكونغلوميرا حاوية على حصى تعود للوحدة الصخرية الأقدم أن توجد فوق سطح اللاتوافق أي في قاعدة الوحدة الصخرية الأحدث، وهي تدعى "الكونغلوميرا القاعدية" وتعد دليلاً جيداً على وجود اللاتوافق. ويتم تمييز اللاتوافقات في بعض الحالات **بتحديد الثغرة الستراتيغرافية،** ويسهل ذلك إذا تمت دراسة التتابع الستراتيغرافي بشكل جيد. أما إذا كان التتابع غير واضح وبخاصة في الصخور البريكمبرية فإن دلائل النهوض المسبب لإنقطاع الترسيب يمكن أن تستقى بشكل أساسي من خلال **تموج وعدم انتظام سطح اللاتوافق الناتج عن التجوية والتعرية.** كما يمكن تمييز اللاتوافقات من خلال **التباين الحاد في درجة التصلب أو التحوّل أو من خلال الاختلاف في شدة الطي على طرفي سطح اللاتوافق.**

### 6-3- التمييز بين اللاتوافقات والصدوع:

يمكن في بعض الحالات الخلط بين اللاتوافقات والصدوع. وكما لاحظنا آنفاً فإن اللاتوافقات الزاوية تتميز بأن الطبقات الأقدم تكون مقطوعة باللاتوافق الشكل (6-8). وهذا مايمكن ملاحظته مباشرةً، أو يستنتج من خلال المسح الجيولوجي. إلا أن هذه الظاهرة يمكن أن تحدث أيضاً من خلال الصدوع.

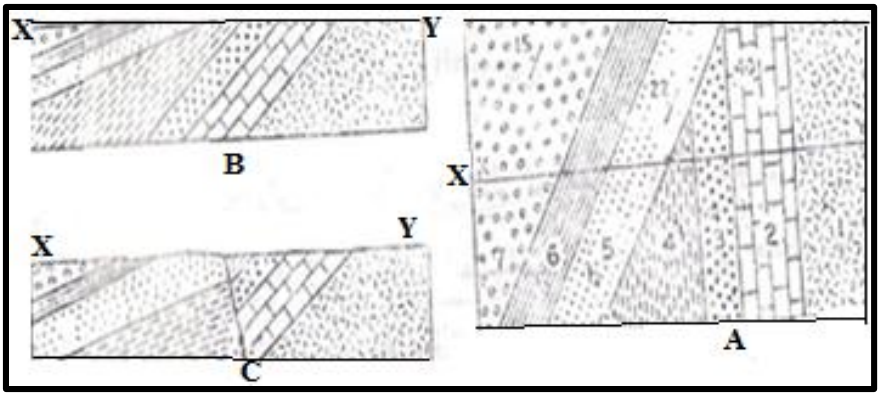


**الشكل (6-8): مخطط فراغي للاتوافـق.**

وبشكل عام تكون الصدوع الموازية لميل الطبقات أو تلك المنحرفة عن اتجاه الطبقات أسهل تمييزاً. أما إذا كان التطبق على أحد جانبي سطح التماس أو كليهما موازياً في اتجاهه لاتجاه سطح التماس كما هو واضح في الشكل (6-9-A) فإنه يمكن لهذا السطح أن يكون صدعاً أو لاتوافقاً. وكما يلاحظ فإن التشكيلة (5) يمكن أن تكون متوضعة بلا توافق فوق التشكيلات (1، 2، 3، 4) أو أن هذا التماس يمثّل صدعاً. ويمثل الشكل (6-9-B) مقطعاً عرضياً عبر XY من الشكل (6-9-A) حيث تم تفسير سطح التماس بأنه لاتوافق، أما الشكل (6-9-C) فيعطي تفسيراً آخراً معتبراً أن سطح التماس ماهو إلا صدع.

إن هناك معايير يمكن من خلالها تحديد ماإذا كان سطح التماس صدعاً أو لاتوافقاً فهو يكون صدعاً إذا كانت التشكيلات (5، 6، 7) أقدم من التشكيلات (1، 2، 3، 4) أما وجود حصى تعود للتشكيلات (1، 2، 3، 4) في قاعدة التشكيلة (5) فيشير إلى أن سطح التماس هو لاتوافق على الأغلب (ولكن حصى حتى ضمن هذه الشروط فقد يكون التماس صدعاً).

إذا كانت الطبقات الأحدث تتجه أو تميل نحو سطح التماس فإن ذلك يمثل صدعاً وذلك مايوضحه الشكل (6-9-A) حيث أن التشكيلات (5،6) تتقاطع في اتجاهها مع التشكيلة الأقدم (التشكيلة 3).



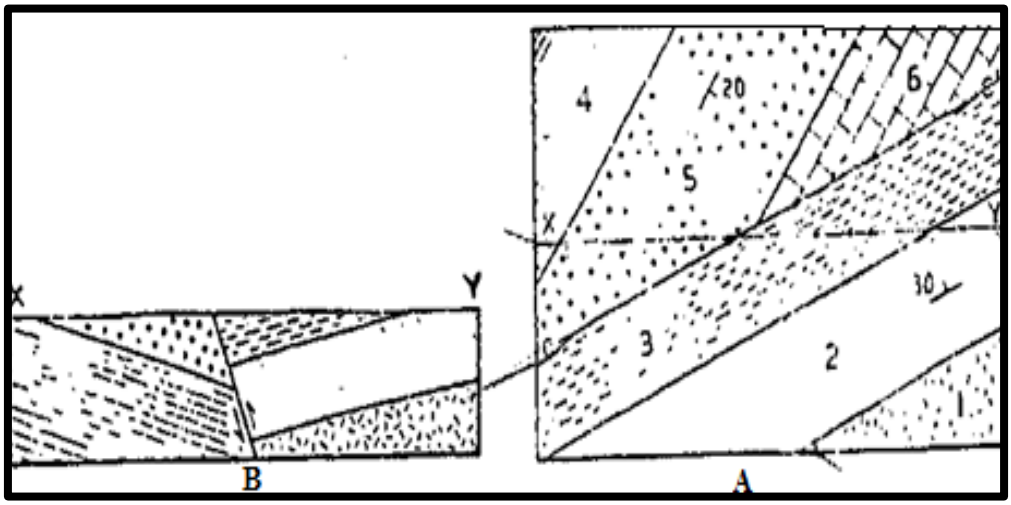

**الشكل (6-9): اللاتوافقات والصدوع. تزداد التشكيلات 1، 2، 3ن 4، 5ن 6ن 7 حداثة مع ازدياد الرقم.**

**A- خارطة تبين أن احتمال أن التماس CC يمثل صدعاً أو لاتوافقاً.**

**B- مقطع عرضي (XY) يفسر CC بأنه لاتوافق.**

**C- مقطع عرضي (XY) يفسر CC بأنه لاتوافق.**

ومن ناحية أخرى فإن الملاحظات الحقلية تشكل دعماً كبيراً لتمييز الصدوع عن اللاتوافقات. فإذا كان سطح التماس يمثل لاتوافقاً فإننا سنلاحظ وجود تعرجات في مسار هذا السطح، أي أن نتوءات صغيرة من الصخر الأقدم تكون بارزة باتجاه الصخر الأحدث. كما يمكن ملاحظة وجود كونغلوميرا أو حجر رملي ذي شظايا تعود للصخر الأقدم فوق سطح التماس. أما وجود سطوح مصقولة وبريش فيشير على أن سطح التماس ماهو إلا صدعز ورغم ذلك فقد تخلو بعض الصدوع من هذه المظاهر. وما يزيد صعوبة التمييز هو أن بعض الصدوع يمك أن تتبع سطوح اللاتوافق وبخاصة الزاوية منها.



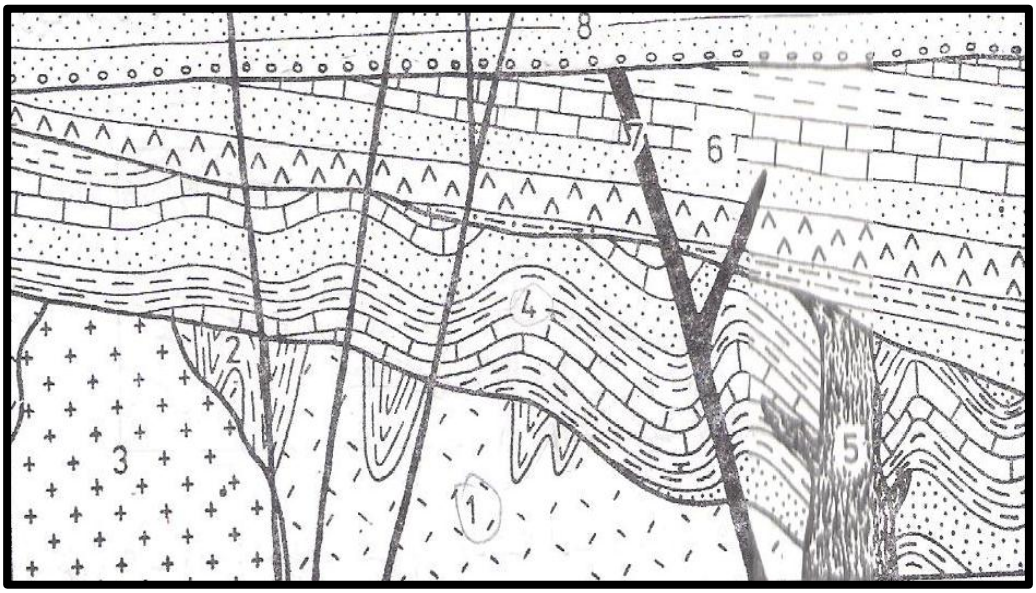

**الشكل (6-9): حالة تماس بين التشكيلات 1، 2، 3، والتشكيلات 4، 5، 6 (ازدياد الرقم يعني الأحدث)، حيث أن هذا التماس يشكل صدعاً على الأغلب. A- خارطة جيولوجية. B- مقطع عرضي XY.**

### 6-4- تحليل التعاقب الزمني النسبي من خلال اللاتوافقات:

تأخذ سطوح اللاتوافق أهمية خاصة لدى تحديد التأريخ الجيولوجي لتطور السلاسل الجبلية. وكما تبين من خلال الشرح السابق فإن اللاتوافقات تمثل انقطاعاً في استمرارية التكون الصخري، حيث يمكن تحديد هذا الانقطاع زمنياً بالنسبة للمعقدات الصخرية المقطوعة به. وهكذا فإن زمن بداية تجاوز بحري يحدد من خلال الموقع الستراتيغرافي لأقدم طبقة تجاوزية.، أما أقل عمر ممكن لعملية تكتونية فيحدّد من خلال الموقع الستراتيغرافي لأحدث طبقة تناولها التشوّه.

يمثل الشكل (6–10) مقطعاً نظرياً لمعقد صخري تأثر بعمليات تكتونية وبتجاوزات بحرية واندساسات مهلية، حيث تعطي دراسة هذا المقطع الترتيب الزمني النسبي للعمليات الجيولوجية على النحو التالي:

1) يلاحظ ضمن الركيزة الغرانيتية (1) أن الرسوبات (2) تعرضت للطي، ثم حدث اندساس غرانيتي (3) قطع هاتين التشكيلتين الصخريتين.
2) توضعت وحدة صخرية رسوبية (4) فوق لاتوافق تجاوزي (اللاتوافق الأول) حيث تعرضت هذه الوحدة في النهاية إلى عملية طي، ويلاحظ أن شدة الطي تتناقص باتجاه التجاوز السابق (نحو اليسار).
3) حدث اندساس لصخر الدياباز (5) مخترقاً الركيزة والوحدة الرسوبية الأحدث، إلا أن هذا الاندساس قطع بسطح اللاتوافق الثاني.
4) تم فوق سطح اللاتوافق الثاني توضع وحدة رسوبية جديدة (6) تعرضت لاحقاً للإمالة نتيجة الحركات الايبرجينية.
5) حدث اندساس لجدار بازلتي (7) اخترق كل الوحدات الصخرية المذكورة أعلاه، إلا أن هذا الجدار قطع بدوره بسطح اللاتوافق الثالث.
6) توضعت وحدة طبقية رسوبية أفقية (8) بادئة بترسيب الكونغلوميرا القاعدية. وقد اخترقت هذه الوحدة (إضافة لكل ماسبقها) من خلال البازلت الذي كوّن على سطحها صبات بازلتية (9)، أن البازلت هو أحدث تكوّن صخري في هذا المعقد.




**الشكل (6–10): مثال نظري لتحديد التعاقب الزمني النسبي من خلال اللاتوافقات.**

# الفصل السابع

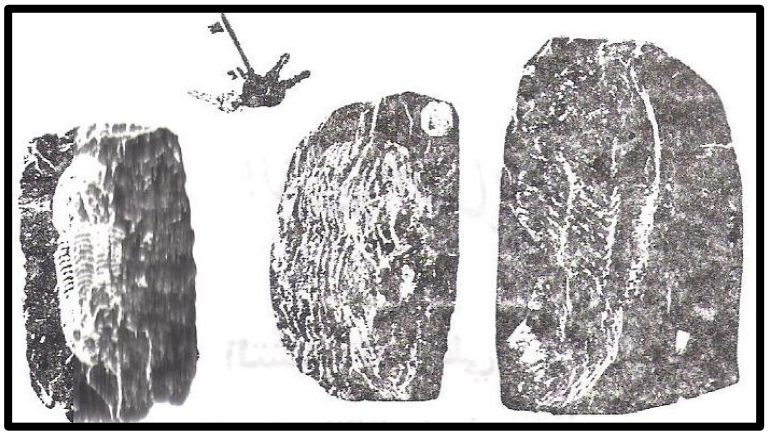
# التشوّه الداخلي Internal deformation

## 7-1- الانفعال Strain

**7-1-1- مقدمة وتعريف:** ماذا نعني بكلمة تشوّه وكيف يمكن معرفة صخر ما هو صخر مشوّه؟ وكيف يمكن وصف التشوّه؟ تتم دراسة شدة التشوّه الداخلي من خلال مظاهر التشوّه التي تبديها أجسام جيولوجية صغيرة (مستحاثات، أوليتات وغيرها) والتي تكون أشكالها الأولية معروفة. لنأخذ مستحاثة ثلاثية الفصوص كمثال لدراسة التشوه الشكل (7-1). تبدو هذه المستحاثة مشوّهة مع الصخر الذي يضمها. كما أن الشكل الأصلي غير المشوّه لهذه المستحاثة معروف لأنه وجد أيضاً في صخور غير مشوّهة. فلو أننا رمزنا للشكل الأصلي اختصاراً بـ H وللشكل النهائي (المشوّه) بـ H فإنه يمكن أن نكتب أن:

$$H = E.H$$

تصف E التغير في الحجم والشكل وبالتالي فإن حاصل جداء الشكل الأصلي H، E يعطي الشكل النهائي في النتيجة. إن مستحاثة ثلاثيات الفصوص لها شكل معقد، إلا أن الصخر نفسه يمكن أن يكون قد تعرض لتشوّه بسيط ومنتظم. ونلاحظ في الشكل (7-1) إن الشكل النهائي للتشوّه مختلف بحسب وضعية محور تناظر المستحاثة بالنسبة لاتجاه الضغط. إن العلاقة E بين الشكل والحجم الأصليين والشكل والحجم النهائيين لجسم صلب هي مايعنيه الانفعال وهي ماسندرسه في هذا الفصل. حيث يلعب الانفعال دوراً مهماً في تحديد ماهية التشوّه وكيفية قياسه. وبناء على ماتقدم يمكن تعريف الانفعال بأنه التعبير الهندسي عن مقدار التشوّه أو هو التغير الحجمي والشكلي لجسم ما والناتج عن تأثير حقل اجهادي مطبق في هذا الجسم.



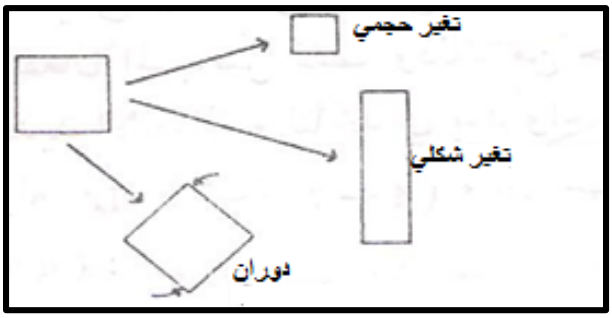
**الشكل (7-1): أمثلة من تشوّه مستحاثات ثلاثيات الفصوص ضمن صخر الأوردواز، حيث يتبين اختلاف تشوّه كل منها وذلك حسب العلاقة بين اتجاهها (اتجاه محور تناظرها) واتجاه الضغط.**

**7-1-2- طبيعة الانفعال:**

يقاس التشوّه **بالانفعال Strain** وهو عبارة عن قيمة مجردة ليس لها وحدة قياس وهو التعبير الهندسي عن قيمة التشوّه الناتج عن تطبيق الإجهاد على جسم صخري ويعبر عن ذلك الانفعال **(طبيعة الانفعال)** بما يلي:

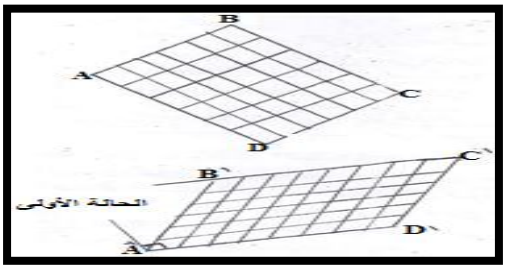
- **تغير في الحجم.**
- **تغير في الشكل.**
- **تغير في الحجم والشكل معاً.**
- **دوران الأجسام بعد تطبيق الإجهاد.**

إذ أن تطبيق الإجهاد على الأجسام الصخرية المتطبقة ذات الوضعية الأفقية يؤدي إلى دورانها إلى الوضعية الشاقولية حول محور أفقي. ويمكننا وفق هذا النوع من الانفعال (الدوراني) تفسير دوران الصفائح كدوران إفريقيا منذ البنسلفانيان حول محور بعكس دوران عقارب الساعة وكذلك دوران الصفيحة العربية في جزئها الشمالي بشكل خاص (الجزء المتحرك من سورية) حول محور أفقي.



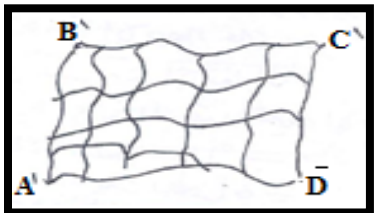

**أنواع الانفعال:**

- **الانفعال المتجانس: Homogenous strain إذا كان** مقدار الانفعال متساوياً في كل الأجزاء من الجسم الصخري.
  - الخطوط المستقيمة تبقى مستقيمة.
  - الخطوط المتوازية تبقى متوازية.

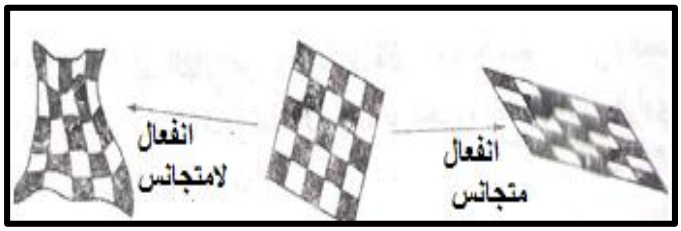



**الشكل (7-2): الانفعال المتجانس.**

- **الانفعال اللامتجانس: InHomogenous strain** تكون هنا قيم الانفعال في أجزاء الصخر غير متساوية.
  - تصبح الخطوط المستقيمة منحنية.
  - تصبح الخطوط المتوازية غير متوازية.




**الشكل (7-3): الانفعال اللامتجانس.**




**الشكل (7-4): الانفعال المتجانس واللامتجانس.**

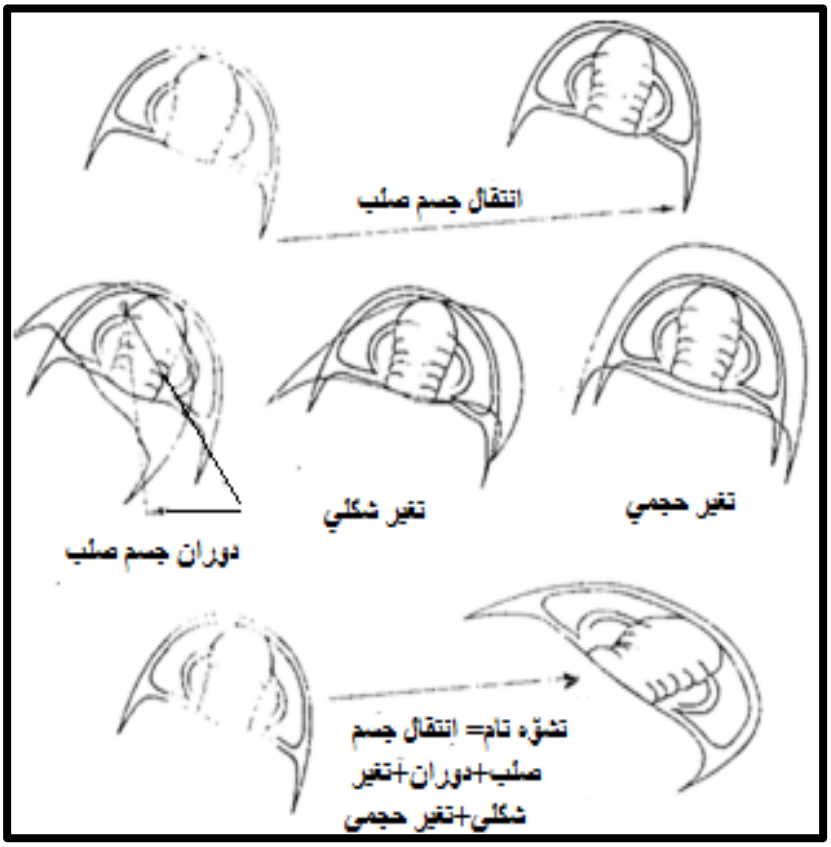
### 7-1-3- العلاقة بين الإجهاد والتشوّه حسب الاختبارات ثلاثية المحاور: Traxial tests

- **معدّل سرعة الانفعال: Overage velocity emotion** إن سرعة الانفعال تحدّد بقيمة الانفعال مقسومة على الزمن. ترتبط متانة الصخر جزئياً بسرعة تطبيق الإجهاد. كما يمكن لصخر أن يتشوّه بشكل لدن إذا تم تطبيق إجهاد ضعيف بسرعة تحميل بطيئة.

- **تغير الوسط: Change of environment** يكون الصخر في حالة توازن في بيئته الأصلية، التي تكون فيها، فإذا تغيرت هذه البيئة فقد الصخر كثيراً من خواصه الفيزيائية وتوازنه.

### 7-1-4- الانفعال Strain والحركة الصلبةRigid

يجب التمييز بين أربع عمليات هندسية مستقلة تساهم في الانزياح الكلي لأي جزء من المادة أثناء التشوّه وهي: انتقال الجسم الصلب، دوران الجسم الصلب، والتغير الشكلي والتغير الحجمي. الشكل (7-5). إن العمليتين الأخيرتين اللتين تؤلفان الانفعال تتضمنان حركات نسبية للذرات المتجاورة. وعلى العكس فإن العمليتين الأوليتين تتضمنان حركة جسم صلب فقط بالعلاقة مع مرجع خارجي. إن كلاً من هذه العمليات الهندسية قابل للفصل. فمثلاً إن التغير الشكلي المتجانس الحاصل للمستحاثة المبينة في الشكل (7-1) لايعطي معلومات حول الانتقال أو الدوران الصلب سواء أثناء التشوّه أو منذ إزالة العينة من التكشف. سيتم فيما يلي فصل الانزياح إلى أجزائه الهندسية، لنحصل بالتالي على علاقة بين الانزياح والانفعال. وهذه العلاقة مهمة لأنها تسمح لنا بحساب التغير في شكل الجسم الناشئ عن أي انفعال، أو أنه يسمح بقياس الانفعال الملاحظ على المستحاثات المشوّهة أو على أجسام أخرى ذات أشكا أولية معروفة.

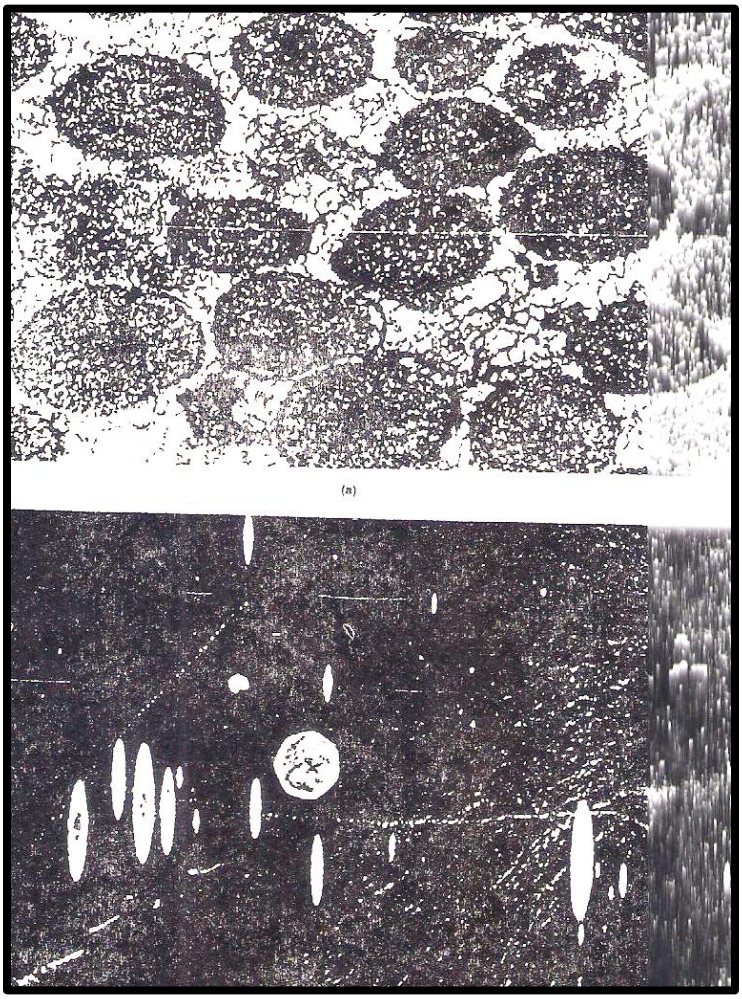



**الشكل (7-5): توضيح حقيقة أن الانزياح في تشوّه عام هو مجموع أربع عمليات هندسية هي الانتقال الصلب والدوران الصلب والتغير الشكلي والتغير الحجمي.**

**7-1-5- قياس الانفعال في الصخور المشوّهة:** ويتم في أنواع معينة من الأجسام مثل:

- الأجسام ذات الشكل الأولي الكروي أو الدائري.
- الأجسام ذات الشكل الأولي الاهليلجي المجسّم أو الاهليلجي.
- العلائم الخطية.
- العلائم الزاوية.

إن أبسط طرائق تحديد الانفعال هي تلك التي يستخدم فيها قياس الأجسام ذات الشكل الكروي التي اتخذت شكل مجسّم اهليلجي بعد التشوّه، حيث يمكن قياس الاهليلج المجسّم للانفعال مباشرةً إذا كان من الممكن رؤيته في الأبعاد الثلاثة. ومثال ذلك الحبات الكروية االكربوناتية وغيرها من الأجسام ذات الشكل الأولي الكروي الشكل (7-6).



**الشكل (7-6): أجسام مشوهة ذات شكل أولي قريب من الكروي.**

**a-صورة مجهرية**

**b-بقع فلزية ذات أشكال**

يتم التحديد المباشر لمحاور الانفعال من خلال ثلاثة مقاطع غير متوازية عبر الصخر، إلا أن الحسابات تكون أسهل إذا كانت هذه المقاطع متعامدة وبخاصةً إذا كانت موازية لمستويات الانفعال الرئيسة. وللحصول على نتيجة دقيقة يجب اجراء عدد من القياسات، حيث يمكن توقيع هذه القياسات على مخطط بياني يوضّح العلاقة بين طول المحور الطويل وطول المحور القصير

وبالتالي فإن ميل المستقيم الأكثر تطابقاً مع توزع النقاط والذي يمر عبر مركز الاحداثيات يعطي القيمة المتوسطة لنسبة الانفعال (نسبة محاور الانفعال الصغرى إلى محاور الانفعال الكبرى) في المستوي المدروس الشكل (7–7). إن دراسة التشوّه المتجانس للعلائم الهندسية تبين مايلي الشكل (7–6):

– تبقى الخطوط المستقيمة مستقيمة والسطوح المستوية مستوية.

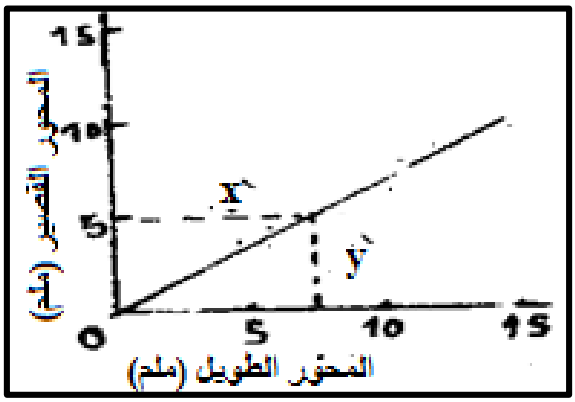
– تبقى المستقيمات المتوازية متوازية وهي تتمدد أو تتقلص بالنسبة نفسها.

– تبقى المستقيمات المتعامدة التي توازي محاور الانفعال الرئيسة متعامدة. أما المستيقمات المتعامدة التي لاتوازي هذه المحاور فلا تبقى متعامدة.

– تتحول الاسطوانات الدائرية أو الاهليلجية (ذات المقطع الدائري أو الاهليلجي) بعيد التشوّه إلى أسطوانات اهليلجية.

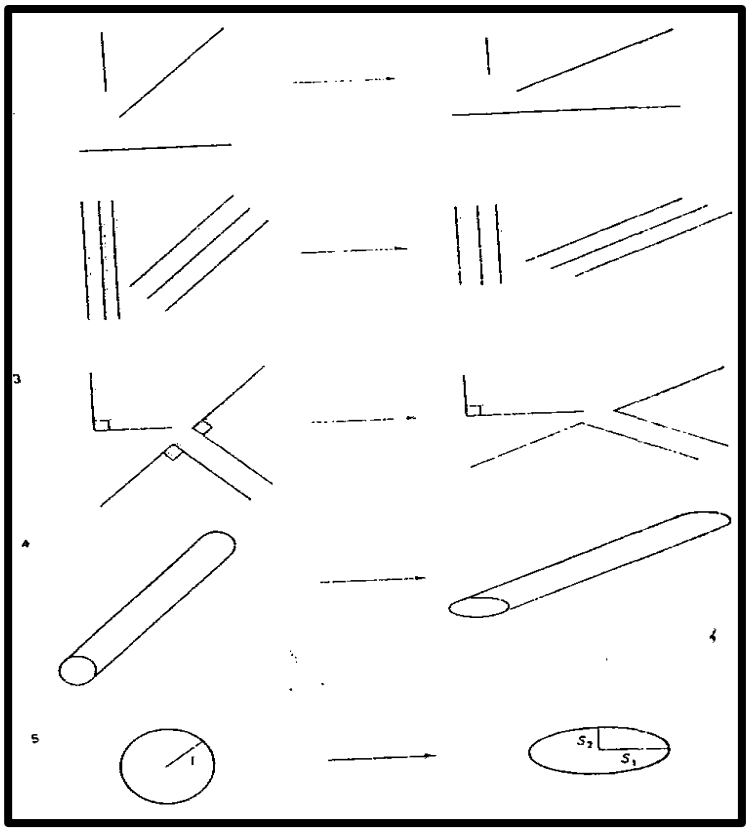
– يتحول الاهليلج المجسّم إلى اهليلج مجسّم آخر مختلف، وبخاصةً فإن الكرة تتحول إلى إهليلج مجسّم. وهناك اهليلج مجسّم واحد يتحول ضمن إطار أي انفعال معين إلى كرة.

تشير الصفات المذكورة في الفقرتين 1 و2 إلى أن الطبقات المتوازية تبقى متوازية بعد التشوّه المتجانس. وهكذا فإن معظم الطبقات الرسوبية المسطحة تشوهت بشكل متجانس، حيث تعرضت للتراص بدءاً من مسامية أولية تقترب من 80% إلى مسامية حالية مساوية 30% أو أقل.




**الشكل (7–6): تحديد نسبة الانفعال في بعدين من خلال الأجسام الدائرية المشوّهة.**

تشير الصفة المذكورة في الفقرة 3 إلى أن النقاط التي تصل بينها خطوط توازي محاور الانفعال الرئيسة تتحرك إما متقاربة أو متباعدة بعضها عن بعض. أما النقاط الأخرى فتتزلق بالنسبة لبعضها وبالتالي فإن خطأ يصل بين نقطتين من مثل هذه الأخيرة سيتعرض للدوران. إن الصفة المذكورة في الفقرة 4 تبين أن جحراً دودياً مستحاثاً ذا مقطع إهليلجي يعد شكلاً مشوهاً، لأن الدودة كانت على شكل أسطوانة دائرية. ورغم ذلك فإنه لايمكن تحديد الانفعال من خلال هذه المستحاثات المشوهة بشكل غام لأننا لانعرف أي مقطع من الأنبوب كان دائرياً في الأصل، حيث أن أي مقطع للأسطوانة الدائرية هو مقطع اهليلجي عدا المقطع المعامد لها.




**الشكل (7–7): أمثلة عن تأثيرات الانفعال المتجانس (نسبة المحور الطويل إلى المحور القصير: $S1/S2$ = 3/2.**

**1- تبقى الخطوط المستقيمة مستقيمة.**

**2- تبقى المستقيمات المتوازية متوازية وهي تتمدد أو تتقلص بالنسبة نفسها.**

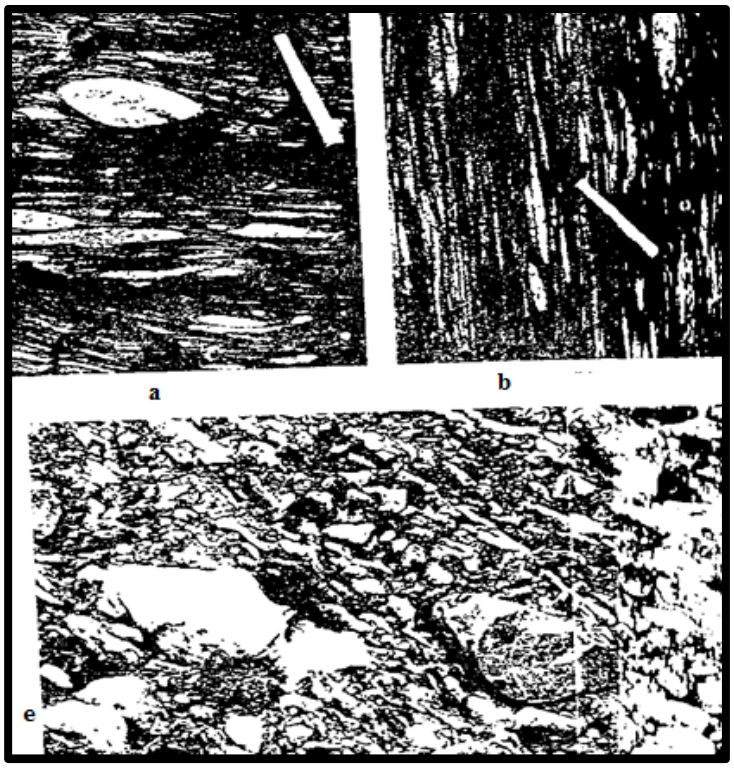
**3- تبقى المستقيمات المتعامدة التي توازي محاور الانفعال الرئيسة متعامدة. أما المستيقمات المتعامدة التي لاتوازي هذه المحاور فلا تبقى متعامدة.**

**4- تتحول الاسطوانات الدائرية أو الاهليلجية (ذات المقطع الدائري أو الاهليلجي) بعيد التشوّه إلى أسطوانات اهليلجية.**

**5- الدوائر والكرات تتحول إلى أشكال اهليلجية ومجسمات اهليلجية.**

تطرح الصفة المذكورة في الفقرة 5، صعوبات في تحديد الانفعال بدءاً من دراسة الحصى المشوهة الشكل (7–8) فالحصى بشكل عام ليست كروية في البداية، بل هي محتبسات اهليلجية تقريباً. وهكذا فإن أي حصاة ستتحول إلى مجسم اهليلجي آخر مختلف من حيث الشكل والتوجّه، وهذا يعتمد على الشكل والتوجّه الأولي للحصاة بالعلاقة مع الانفعال وهذا مايكون غير معروف بشكل عام. وهذه الصعوبات لم تذلل بشكل كامل، بخاصة أن محاور الحصوات الاهليلجية تصبح قريبة من التوازي مع محاور الانفعال في المراحل المتقدمة من الانفعال، إلا أن النسب المحورية تكون مختلفة إلى حد ما الشكل (7–9).

أفضل دلائل الانفعال للصخر الكلي هي الأجسام التي تكون صفاتها الميكانيكية مشابهة لبقية أجزاء الصخر كما هو حال قوالب المستحاثات التي أزيلت منها مواد القوقعة بالانحلال. تستخدم دلائل الانفعال بشكل أساسي للمساعدة على فهم منشأ بنيات معينة. إلا أن الدراسات الإقليمية للانفعال في الصخور أقل شيوعاً وذلك بسبب الحجم الكبير للأعمال التي يتطلبها ذلك وبسبب ندرة دلائل الانفعال الجيدة في بعض أنماط الصخور.

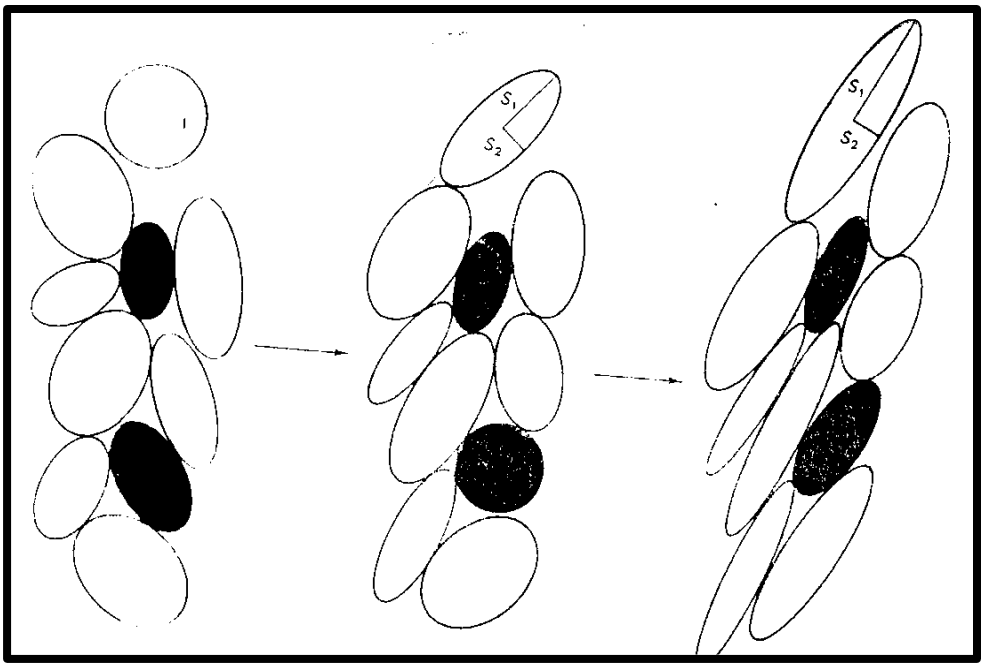



**الشكل (7-8): صخور كونغلوميراتية مشوّهة.**

**a,b-يمثلان مقطعين للتكشف نفسه، حيث يبدو عليهما الاختلاف في الاطالة (حزام Grenville الأوروجيني في أونتاريو).**

**e-صخر كونغلوميراتي من جبال الأبالاش الكندية يبدي تشوهاً عديم التجانس،حيث أن الحصى الكوارتزية تكون غير مشوهة أما الحصى الكربوناتية فهي مفلطحة بشكل شديد وغير متجانس.**

**7-12- مسارات التشوّه:** الانفعال هو وصف التغير الصرف في الشكل والحجم بين الحالة الأولية والنهائية. ومن حيث المبدأ يوجد عدد غير محدود من مسارات التشوّه الممكنة هندسياً والتي تؤدي إلى الشكل النهائي نفسه للجسم المشوّه، وبالتالي فإن الشكل النهائي لا يعطي معلومات تساعد على معرفة ما الذي حصل قبل ذلك. إن الانفعال الصرف هو المجموع المتتالي لكل الانفعالات اللحظية. بوجد بين كل مسارات التشوّه الممكنة نمطان هندسيان بسيطان تكون مناقشتهما أكثر شيوعاً ولهما أسماء خاصة، وهما مفيدان في التعبير عن تأثيرات الانفعال متحد المحور واللامتحد أولهما هو "القص الصرف" وهو يستخدم للتعبير عن الانفعال متحد المحور وهو يقتضي عدم وجود تغير في الحجم، وثانيهما هو "القص البسيط" وهو انفصال دوراني لامتحد المحور وتكون قيمة الانفعال قيه مرتبطة مباشرةً بقيمة الدوران. وهكذا فإن القص البسيط هو تشوه ثنائي البعد وثابت الحجم دون انزياح في الاتجاه الثالث ودون تفلطح معامد لمستوي الانزلاق.




**الشكل (7−9): اقتراب اتجاهات المحاور الرئيسة للحصوات المشوّهة (ذات الأشكال الاهليلجية) من اتجاهات محاور الانفعال الرئيسة في المراحل المتقدمة من الانفعال. وعلى العكس فإن النسب المحورية للحصوات لاتقارب النسب العائدة لمحاور الانفعال الرئيسة $S1/S2$.**

# الفصل الثامن

# التورق والبنية الخطوطية

**8-1- مقدمة:** تختلف البنيات التي وجدت في صخور تعود إلى المستويات العميقة من الأحزمة الأوروجينية على نحو مميز عن تلك البنيات التي وجدت في مستويات أعلى من القشرة الأرضية. ويعود سبب هذا الاختلاف بشكل أساسي إلى تأثير الحرارة المتزايدة والضغط الحابس في تلك المناطق، مما يزيد في ليونة الصخر وكذلك إلى الضغط الموجه الكبير الذي يؤدي إلى ازدياد شدة الطي وتكراره. تتميز البنيات في المستويات العميقة من القشرة الأرضية بالأمور الثلاثة التالية:

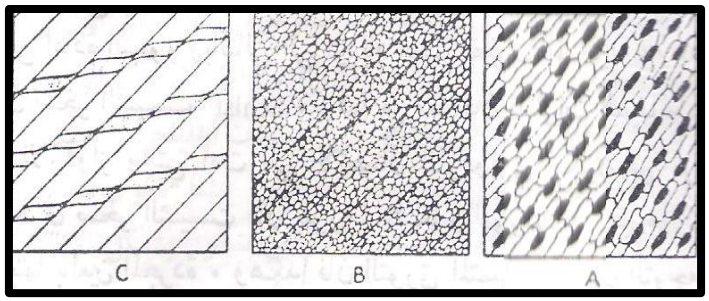
- **الطي:** وهو الشكل النموذجي للتشوّه ويشيع هناك أكثر من التصدع.
- **الانفصال والتشوست** وهي مجموعات من السطوح المستوية التي تتطور بشكل شائع هناك.
- **إعادة التبلور** الحاصل بتأثير الضغط.

**8-2- التورق:** هو مجموعة سطوح مستوية ومتوازية تتكون في الصخر نتيجة للتشوّه، وتكسبه صفة التجزؤ عبر هذه السطوح.وهو مصطلح عام يعبر عن أنواع مختلفة من بنيات بطرائق متباينة كالانفصال الأردوازي والتشوست والبنية الغنيسية . ويكون التورق الأقدم مشوّهاً ومقطوعاً بالتورق الأحدث مما يتيح المجال لتحديد تاريخ التطور البنيوي للصخر.

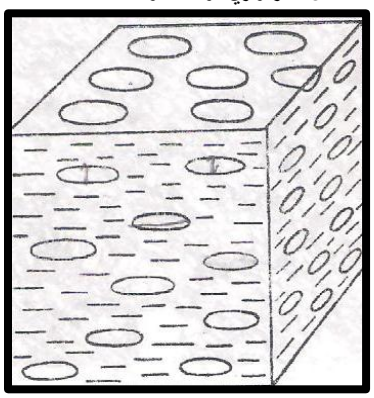
**8-2-1- أنماط التورق ومناشئه:**

**1- الانفصال الأردوازي والتشوست:** يعزى الانفصال الأوردوازي والتشوست إلى الترتيب المتوازي للفلزات الصفائحية كالميكا والكلوريت أو إلى الترتيب المتوازي للحبات الفلزية اهليلجية الشكل كالمرو والصفاح الشكل (8-1). ينشأ الانفصال الأوردوازي بشكل مفضل في الصخور ناعمة الحبات التي خضعت لدرجات منخفضة من التحوّل. أما مصطلح التشوست فيستخدم لدى ازدياد درجة التحول حيث يتعرض الصخر إلى إعادة التبلور وبالتالي إلى ازدياد حجم الفلزات المتحولة، وهذا مايؤدي إلى تكوّن صخر الشيست. إن معظم الانفصال الأردوازي والتشوست الحاصل في الصخور هو من الناحية المنشئية انفصال انسيابي وهو مصطلح منشئي ويعني أن الانفصال ناشئ عن انسياب الصخر (تشوّه لدن)، حيث يحصل تقصير للصخر باتجاه معامد لسطوح الانفصال وتطاول موازٍ لها. ومن الأدلة الواضحة على ذلك حقيقة أن كتلاً ذات شكل أصلي كروي تحولت ضمن الصخر إلى مجسمات اهليلجية بحيث أن محاورها القصيرة تعامد سطوح الانفصال الشكل (8-2). ويمكن لهذه الكتل ذات الشكل الأصلي الكروي أن تكون حصوات في صخر كونغلوميراتي أو حبات كوارتز في حجر رملي أو بيوض في الأحجار الكلسية، والتي تتحول إلى مجسمات شبه كروية مفلطحة أو بشكل أكثر شيوعاً إلى مجسمات اهليلجية، بحيث تتجه محاورها الطويلة والمتوسطة موازية لسطوح الانفصال، بينما تكون محاورها القصيرة معامدة له. وهكذا نجد أن الانفصال الانسيابي يتكون بشكل معامد لمحور الانفعال الأصغر أي معامد لمحور الاجهاد الرئيس الأكبر.

**2- الانفصال التكسري:** يتكون الانفصال التكسري كما يشير اسمه من كسور متقاربة ومتوازية أي أنه تشقق متقارب. ولاتكون الفلزات في الصخر موازية لسطوح الانفصال. وتتراوح المسافة بين هذه السطوح من عدة من ملمترات إلى عدة سنتيمترات، أم إذا تجاوزت المسافة بين السطوح قليلاً من السنتيمترات فيتم استخدام مصطلح "تشقق". يتكون هذا النمط من الانفصالات في شروط الصخور القصيمة عند درجات منخفضة من الحرارة وهو بالتالي حالة نموذجية تميز الصخور الصلبة نسبياً كالأحجار الرملية والكلسية. يعود منشأ هذا الانفصال إلى اجهادات الضغط (كسور قص) أو الشد حيث تملأ الكسور في هذه الحالة الأخيرة بالمرو أو الكالسيت.




**الشكل (8-1): أنماط التورق. A- الانفصال الأردوازي أو التشوست. B- الانفصال التكسري. C- الانفصال الانزلاقي.**



**الشكل (8-2): توجه الحبات اهليلجية الشكل بالعلاقة مع الانفصال الأردوازي. وتعبر الخطوط القصيرة عن الفلزات الصفائحية.**

**3- الانفصال الانزلاقي:** يدعى الانفصال الذي حدث انزياح عبر سطوحه "الانفصال الانزلاقي". ويؤدي ذلك إلى انزياح سطوح التطبق أو سطوح الانفصال أو التشوست الأقدم لمسافة تتراوح بين الميليمتر الواحد وعدة ميليمترات. ويمكن بالتالي للفلزات الصفائحية كالميكا أو الكلوريت أن تتعرض للسحب وأن تأخذ وضعية موازية تقريباً لسطوح الانفصال الأردوازي. ويتألف هذا النمط من الانفصال بأنه يتألف من صدوع متقاربة. يعزى الانفصال الانزلاقي إلى المنشأ القصي، حيث يتميز بوجود انزياح مرئي موازٍ لسطوح الانفصال.

**4- انفصال التطبق:** يدعى الانفصال أو التشوست الموازي لسطوح التطبق "انفصال التطبق" وهو يعزى أيضاً إلى الترتيب المتوازي للفلزات الصفائحية.

**8-3- العلاقة بين التورق والطيات:** إن التشوّه الذي يؤدي إلى التورق يؤدي عادةً إلى نشوء الطيات. وبما أن كلتا البنيتين تنشأ من خلال الضغط نفسه، فإنهما يرتبطان بعلاقة هندسية بسيطة، فقد يكون التورق موازياً للمستوي المحوري للطية أو بشكل مروحي متناظر حول هذا المستوي.

**8-4- المميزات العامة للتورق:** سنلخص فيما يلي أهم مميزات التورق وهي:

**أ- التباعد:** يتراوح التباعد بين مستويات التشوست بين قليل من الميلمترات والسنتيمتر تقريباً.

**ب- نمط الصخر:** تكون الانفصالات أكثر شيوعاً في الصخور ناعمة الحبيبات. وهي أقل تطوراً في الصخور الرملية منها في السيلت والغضار الصفحي أو الأحجار الكلسية.

**ت- علاقة الانفصال بالطيات:** يمكن لسطوح الانفصال أن تكون موازية للسطح المحوري للطية أو تتوضع على جانبيه بترتيب مروحي.

**ث- علاقة التورق بالليتولوجيا:** تختلف الانفصالات في درجة تطورها وتباعدها ووضعيتها تبعاً للطبيعة الليتولوجية للصخور. وتبدو الانفصالات "منكسرة" عند المرور من طبقة إلى طبقة أخرى مختلفة ليتولوجياً وهذا يعود في كثير من الأحيان إلى تطور الانفصال الانسيابي في صخور ذات ليتولوجية معينة والانفصال التكسري في صخور ذات ليتولوجية أخرى.

**ج- الحركات عبر سطوح الانفصال وفيما بينها:** يعزى الطي في بعض صخور الأردواز إلى حركات موازية للانفصال الانسيابي. كما يمكن أن تتم أيضاً بشكل موازٍ للانفصالات التكسرية مما يؤدي إلى طيات ذات شكل زاوي أو أنماط بنيوية أخرى كالطيات الصغيرة والالتواءات أو الانزياحات القصية.

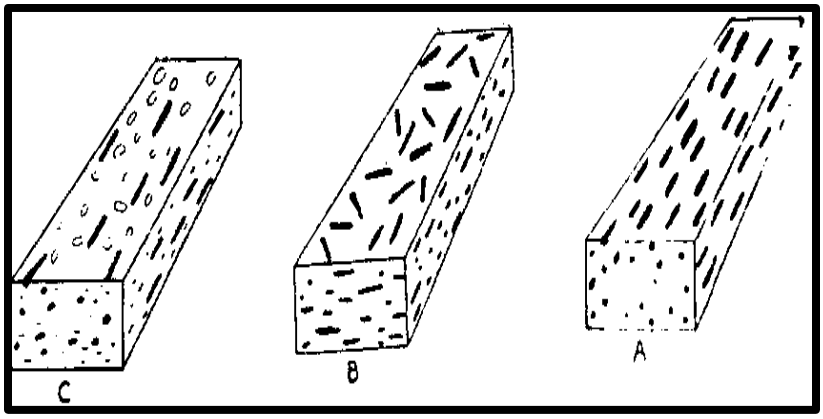
**ح- إعادة التبلور:** تحدث عملية إعادة التبلور بشكل شائع أثناء تطور الانفصال الانسيابي وبخاصة في صخور الشيست. وهذا مايؤدي إلى ازدياد حجم الفلزات المكونة لهذه الصخور. ومن الواضح أن إعادة التبلور في بعض صخور الشيست والفيلليت كانت متزامنة مع حركات موازية للانفصال الانسيابي حيث يشير إلى ذلك وجود بلورات الغارنت الملفوفة التي تدل على حدوث دوران أثناء النمو.

**خ- التقصير بشكل معامد للانفصالات:** يشير وجود البيوض الكلسية والمستحاثات والحصى المشوّهة الموجودة في الصخور ذات الانفصال الانسيابي إلى حدوث تقصير معام لمستوي الانفصال الرئيس ومرافق لتطور الانفصال وإلى حدوث تطاول موازٍ لمستوي الانفصال.

### 8-5- البنية الخطوطية:

### 8-5-1- تعريف:

تنتج هذه البنية عن توازي خاصة موجهة ما ضمن الصخر الشكل (8-3-A). فمثلاً عندما تكون المحاور الطويلة لبلورات الهورنبلاند متوازية فإن الصخر الحاوي عليها يكون ذا بنية خطوطية. يمكن للصخور الاندفاعية أن تكون ذات خطوطية أولية ناتجة عن تدفق المهل الشكل (8-4). أما في الصخور المتحولة فإن الخطوطية تكون ثانوية على الأغلب وناشئة أثناء التشوّه، رغم أنها قد تكون موروثة عن الصخر الأصلي في بعض الحالات.



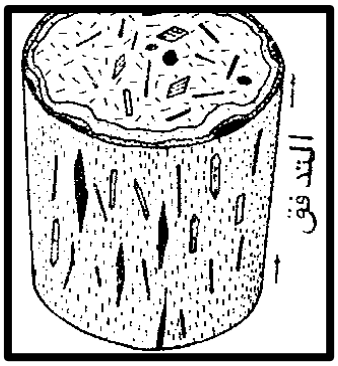

**الشكل (8-3): العلاقة بين التورق والخطوطية. تعبر الخطوط السوداء الثخينة عن فلزات موشورية مثل الهورنبلامد، أما الدوائر المفتوحة والخطوط المتقطعة فتعبر عن فلزات صفائحية مثل الميكا.**

**A- خطوط ناتجة عن توازي بلورات الفلزات الموشورية ولا يوجد بنية انسيابية صفائحية.**

**B- توجه ناتج عن توجه بلورات الفلزات الموشورية بشكل موازٍ للسطح العلوي للكتلة المرسومة ولا يوجد خطوطية.**

**C- خطوطية ناتجة عن تآزي بلورات الفلزات الموشورية مترافقة مع تورق ناتج عن توازي الفلزات الصفائحية.**

قد تترافق الخطوطية مع التورق أو قد لاتترافق الشكل (8–3)، وبالتالي فإن صخراً لايتميز بالانفصال أو التشوست يمكن أن يتميز بالبنية الخطوطية، إلا أن الحالة الأكثر شيوعاً هي أن الخطوط تترافق مع التورق، وتكون المظاهر الخطوطية موازية لمستوي الانقصال أو التشوست الشكل (8–3–C).




**الشكل (8–4): خطوط أولية ناتجة عن تدفق المهل.**

### 8–5–2– أنماط البنيات الخطوطية:

توجد عدة أنماط للبنيات الخطوطية نوجزها بما يلي:

1– الخطوطية الناتجة عن الحصى أو الجلاميد المتطاولة: تكون الحصى ذات أشكال اهليلجية مجسمة وتكون محاورها الطويلة متوازية، وكذلك تتوازى محاورها المتوسطة والقصيرة.

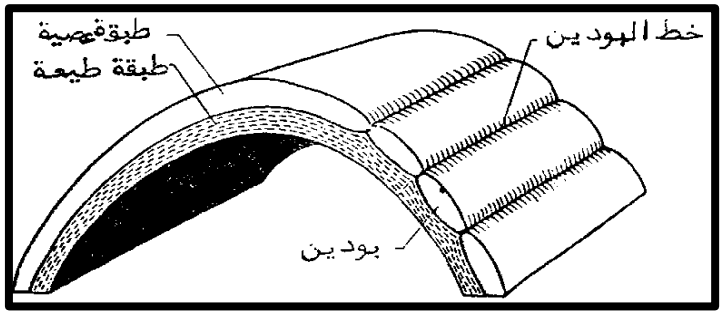
2– الخطوطية الناتجة عن البلورات المتطاولة: يعطي توازي البلورات المتطاولة ذات الشكل الابري (الهورنبلاند مثلاً) بنية خطوطية واضحة.

3– الخطوطية الناتجة عن تموج سطوح التشوست أو الانفصال: تنتج هذه الخطوطية عن توازي خطوط مفاصل طيات السحب الصغيرة المتكونة نتيجة انزلاق الطبقات المختلفة فوق بعضها البعض.

4– الخطوطية الناتجة عن تقاطع سطوح التطبق مع سطوح الانفصال: إن تقاطع مستويين يعطي خطاً، وبذلك إذا تكسر الصخر بشكل موازٍ لسطوح الانفصال فإن أثر التطبق على سطوح الانفصال يبدو على شكل خطوط متوازية.

5– الخدوش: تنتج عن حركة الكتلتين الصخريتين عبر مستوي الصدع.

6– البنية البودينية (السجقية): تتكون هذه البنية في الطبقات العصية التي تبدو في مقطعها العرضي مترققة في مواضع وثخينة في مواضع أخرى لتعطي شكلاً شبيهاً بالسبحة. وهي تبدو على سطوح التطبق يشكل وحدات بودينية مرصوفة بجانب بعضها الشكل (8–5) بحيث تمثل الخطوط الفاصلة بين هذه الوحدات (خطوط البودين) بنية خطوطية. ويعد بعض الباحثين أن محاور الطيات تمثل بنية خطوطية.




**الشكل (8–5): البنية البودينية.إن خط البودين يوازي محور الطية في هذه الحالة.**