المحاضرة السادسة

من الصفحة 67-85

ويمكن أن يلاحظ الالتواء السيلاني في صخور الغطـــاء الصـــفحي shales المتداخل بين الحجر الكلسي في درجات حرارة منخفضة. تتغير سماكات طبقـــات الغضار الصفحي عندما تتشوه إلى تدفق لدن أو شبه لدن، بينما نجـــد أن طبقـــات الحجر الكلسي تتعرض إلى التشوه التكسري وتحافظ على ثبات سماكاتها (الشـــكل 3 ــ 23 ــ a). بالطريقة نفسها يمكن أن تحدث طيات التواء سيلانية في صخور متحولة بدرجات معتدلة إلى عالية في أي طبقة كالكوارتزيت أو الأمفيبوليت مـــع لدونة منخفضة نسبياً ومتداخلة مع مواد ضعيفة كالشيست(الشـــكل3 ــ23ـــ b) الشيست هنا يتشوه بشكل لدن، بينما سوف يتشوه الكوارتزيت بشكل شبه تكســـري أو قد يحتوي على درجة تشوه لدن ضعيفة. وبالنتيجة يمكن للكوارتزيت ألا يغيـــر سماكاته أثناء الطي.

في الطي الالتوائي ــ السيلاني، يمكن للطبقات التي لم تتعرض سماكاتها إلى تغير ملحوظ أن تتحكم في طبيعة الشكل النهائي للطي.

ــ الطي السيلاني المثالي الهادئ Ideal passive – folds:

هو طي متشابه، يتضمن تشوهاً بلاستيكياً لدناً، ويعمل التطبق هنـــا كدلالـــة إزاحة فقط، ليسجل تأثيرات التشوه، تترقق الطبقات أو تتســـمك باتجـــاه التـــدفق وبشكل متساوٍ في جميع أنواع الصخور.

3 ــ 12 ــ تصنيف الطيات حسب عرضها:

تصنف الطيات حسب عرضها أكانت محدبات أم مقعرات اعتماداً على نظام القياس بالمتر، وبالتالي من الأهمية بمكان تحديد نقاط الانعطاف، ويتراوح عرض الطيات من مجال الميليمترات إلى مجال الكيلومترات كما هو مبين فـــي الجـــدول 3ــ 2.

الجدول (3 ــ 2) تصنيف الطيات حسب عرضها

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

كما ويوجد تقسيم آخر يصنف الطيات إلى فئات بحسب عرضها:

ــ طيات الفئة الأولى: تتوضح من خلال الخرائط الجيولوجية الإقليمية ويزيد عرضها على 10 كم.

ــ طيات الفئة الثانية: تتوضح من خلال الخرائط الجيولوجية ويتراوح عرضها من عدة مئات من الأمتار إلى عدة كيلومترات.

ــ طيات الفئة الثالثة: تكون مميزة ضمن التكشفات والمقاطع ويتراوح عرضها بين متر واحد وأكثر من 100 م.

ــ طيات الفئة الرابعة: يمكن تمييزها ضمن أجزاء من التكشفات والعينات الصخرية ويكون عرضها أقل من 1 م.

إضافة إلى ذلك يوجد تصنيف وصفي لا يستخدم نظام القياس المتري، وهو يصنف الطيات إلى الطيات الميكروسكوبية والطيات الميزوسكوبية والطيات الماكروسكوبية حيث تميز الأولى تحت المجهر والثانية على مستوى العينة اليدوية وحتى مقياس التكشف والثالثة على المستوى الإقليمي وتحدد ضمن الخرائط الجيولوجية.

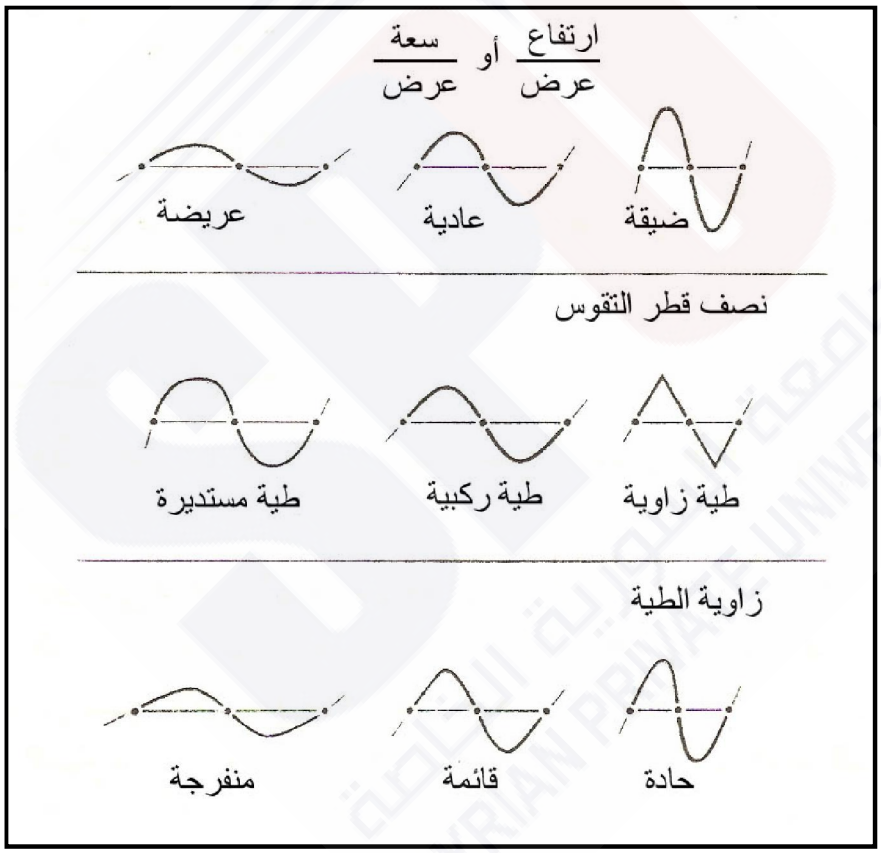
3 ــ 13 ــ تصنيف الطيات حسب نسبة سعة الطية إلى عرضها:

يتطلب هنا تحديد نقاط الانعطاف ومفصلة الطية، ويمكن تصنيف الطيات حسب نسبة سعتها إلى عرضها إلى ثلاثة أنماط وهي (الشكل 3 ــ 24):

ــ طيات عريضة: تكون سعتها أصغر بوضوح من نصف عرضها.

ــ طيات عادية: تكون سعتها مساوية تقريباً نصف عرضها.

ــ طيات ضيقة: تكون سعتها أكبر بوضوح من نصف عرضها.



شكل (3 ــ 24) تصنيف الطيات من خلال القيم المميزة

ويمكن تطبيق هذا التصنيف أيضاً على المحدبات والمقعرات حيث نجد المحدبات أو المقعرات العريضة والعادية والضيقة وذلك حسب نسبة ارتفاعها إلى عرضها كما في الشكل.

3 ــ 14 ــ تصنيف الطيات حسب نصف قطر التقوس:

يتم تناول هذا التصنيف في الطيات التي لا يتكشف منها سوى مجال المفصلة، حيث يصنف الطي إلى ثلاثة أنواع رئيسية كما في (الشكل 3 ــ 24).

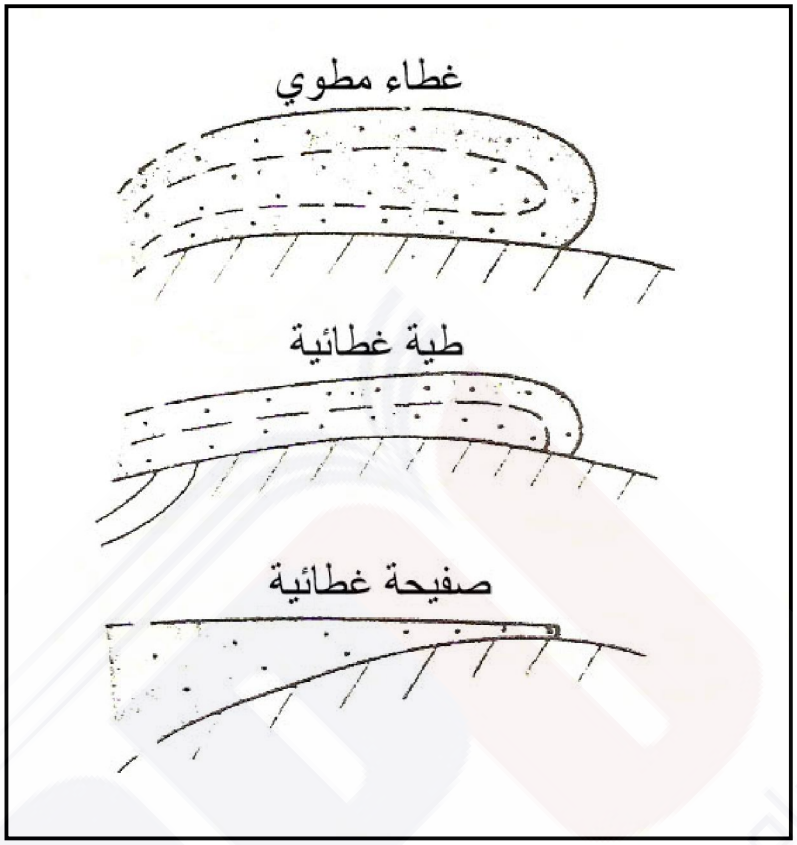
ــ الطية المستديرة Circular fold: تكون ذات نصف تقوس كبير، والأجنحة مقوسة بشكل واضح.

ــ الطية الركبية Knee fold: تشكل مفصلة مستديرة، لكن يكون نصف قطر التقوس صغيراً بالنسبة لارتفاع المحدب أو المقعر، أما أجنحة الطية فمستوية أو مقوسة بشكل خفيف.

ــ الطية الزاوية Zig-zag fold: تلتقي الأجنحة المستوية في هذا النوع من الطيات بشكل زاوي ويكون نصف قطر التقوس صغيراً جداً.

3 ــ 15 ــ الطيات الغطائية Fold nappes:

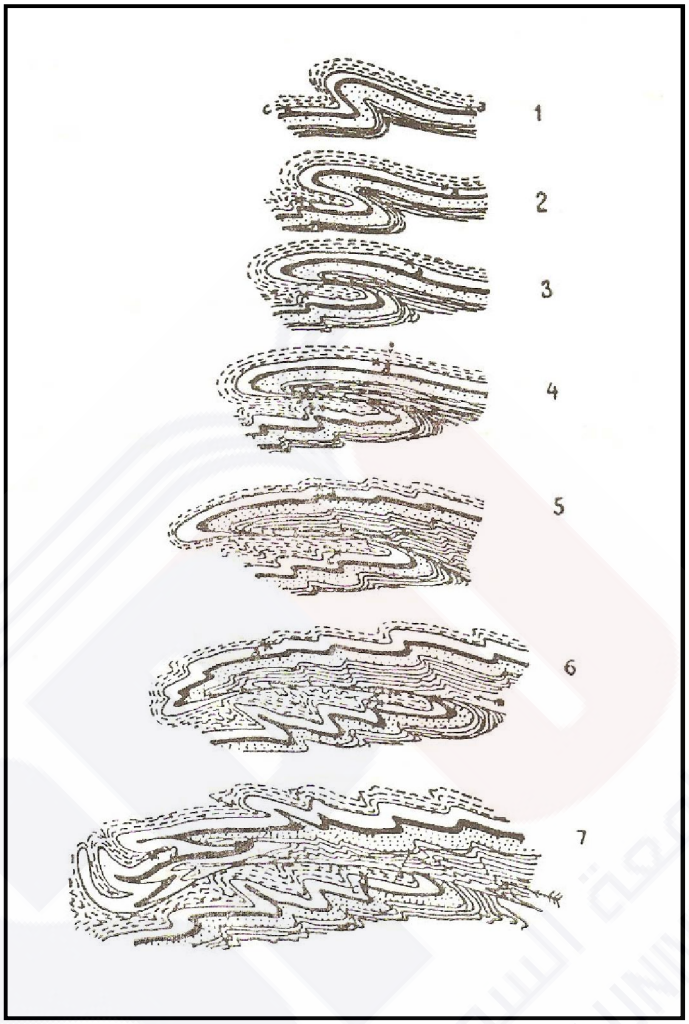
يعبر عن الطيات الغطائية من خلال الجزء المحدب أو المقعر لطية مستلقية، الذي تحرك أثناء عمليات الطي فوق قاعدة ما لمسافات طويلة تقاس بالكيلومترات (الشكل 3 ــ 25). ويميز مصطلح "غطاء" من وجهة النظر التكتونية تراكباً ضخماً لنوعين صخريين مختلفين. ويكون هذا التراكب ناجماً عن الحركات التكتونية.



شكل (3 ــ 25) الغطاءات التكتونية

ينشأ الغطاء المطوي نتيجة ازدياد فعالية الطي التي تؤدي إلـــى أن تكـــون الطيات المستلقية على مساحات واسعة (شكل 3 ــ 26).

كما تنشأ الطيات الغطائية (overthrust fold). بدءاً من الطيات المســـتلقية بحيث أن جزأها العلوي ينزاح على شكل غطاء فوق سطح صدعي تراكبي موازٍ غالباً للسطح المحوري للطية. وهناك نوع آخر للغطاءات وهو الصفيحات الغطائية (thrust sheets) حيث تكون الحركات تكسرية صرفة وتؤدي إلى انزياح كتلـــة صخرية ذات شكل صفائحي فوق قاعدة صخرية أخرى مختلفة على امتداد سطح صدعي تراكبي قليل الميل (الشكل 3 ــ 25).



شكل (3 ــ 26) تطور الغطاءات بدءاً من الطيات المستلقية

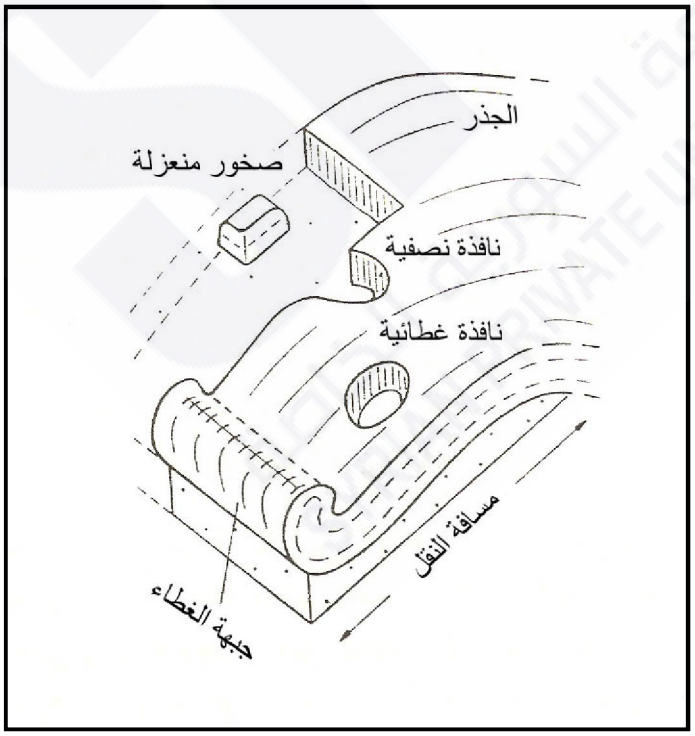
إن تعريف الغطاءات يعني أن الصخور المؤلفة لها، قد انتقلت مــن مكانهــا الأصلي الذي نشأت فيه إلى مسافات بعيدة. ويستخدم هذا التعبير (غطاء) عنــدما تتجاوز مسافة النقل 3 ــ 5 km وبالتالي فمن الصفات الأساســية للغطــاءات أن سحنتها الليتولوجية وعمرها الستراتيغرافي ودرجة تحولها ونمطها التكتوني يختلف عن تلك العائدة للصخور التي تستند إليها هذه الغطــاءات والتــي تجاورهــا. 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 ــ طيات مستلقية ــ وهذه تعد بمثابة مميزات شكلية للغطاءات المطوية أو الطيات الغطائية.

إن مسافة النقل للأغطية هي المسافة بين جذر الغطاء وجبهته (الشكل 3 ــ 27) 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 يتم من خلالها تعرية صخور الغطاء حتى تصل إلى صخور القاعدة التي يستند إليها.



شكل (3 ــ 27) مصطلحات خاصة بالغطاءات التكتونية

فإذا كانت الصخور المحيطة بمنطقة التعرية (أو الفتحات) تعـود للغطـاء، دعيت هذه المنطقة نافذة غطائية. أما عندما تحيط الصخور الغطائية بجهة واحـدة من المنطقة المعراة فتدعى (نافذة غطائية نصفية)، ومن ناحيـة أخـرى تـدعى الأجزاء المتبقية من الغطاء بعد حصول التعرية بالصخور المعزولة، وقد تكـون بقايا للجناح المقلوب للغطاء المطوي، فوق القاعدة التي استند إليها (الشـكل 3 ــ 27).

لعبت نظرية الغطاءات دوراً رئيسياً في تفسير البنيـات التكتونيـة المعقـدة لمعظم الأحزمة الأوروجينية في العالم.

3 ــ 16 ــ آلية الطي *Fold Mechanics:*

تعد الطيات إحدى المظاهر المثيرة للاهتمام في الصخور، وما يزال موضوع تصنيف وتحديد ميكانيكية التشكل مثار جدل في دراسة بنية الصخور.

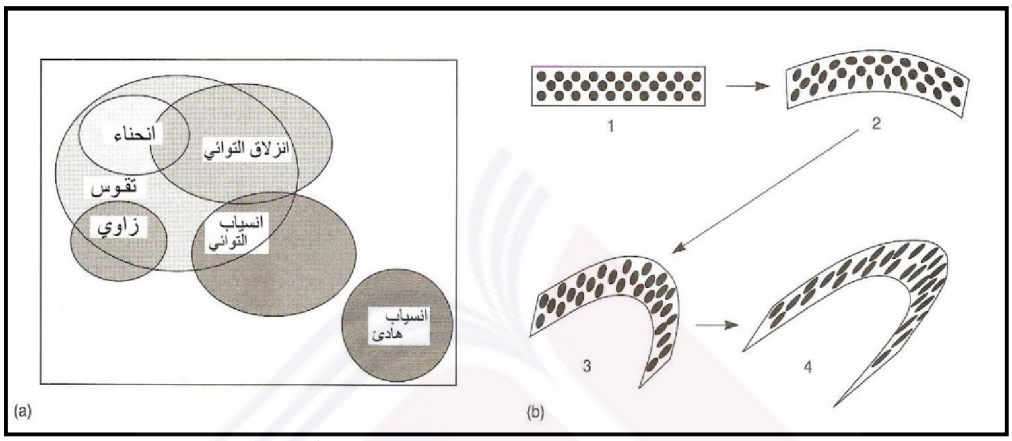
يستكشف موضوع ميكانيك الطي الذي يتأثر كثيراً بعوامل تتحكم في عمليـة التشوه كالحرارة والضغط وتأثير المحاليل والخصائص المميزة للصـخر نفسـه والمتعلقة بالتركيب والنسيج وصفات الطبقات المنفصلة واختلاف سـماكاتها مـع الاتجاه.

3 ــ 16 ــ 1 ــ آلية الطي والظواهر المرافقة:

Fold Mechanics and accompanying phenomena

حددت عدة ميكانيكات (الشكل 3ــ 28)، تتضـمن التقـوس (buckling)، الانحناء (bending)، الانسياب (اللدن) الهادئ (ductile) passive. تترافق هذه الآليات مع الظواهر الكينماتية (الحركية) للانـزلاق الالتـوائي (flexural

flow) والذي يمكن أن يسيطر كطي محكم (tightness) مع تزايد الضغط خلال التشوه المستمر (الشكل 3 ــ 28 ــ b).



a ــ علاقات آليات الطي المحتملة، يرتبط المحور الأفقي بتزايد الحرارة والضغط ويعكس المحور الشاقولي تباين الميكانيكيات تحت الظروف المختلفة.

b ــ مراحل تطور الطبقة المطوية، تظهر عمليات مختلفة في المراحل المبكرة والمتأخرة أثناء التشوه المتعاقب للطبقة بواسطة الطي.

- المرحلة1: حالة غير مشوهة.
- المرحلة2: تتضمن تقوساً خفيفاً للطبقة، مصاحباً بانفعال غير متجانس داخلي، متضمناً تمدداً في القوس الخارجي وتضيقاً في القوس الداخلي.
- المرحلة3: تتضمن تشوهاً متصاعداً للطبقة بواسطة انفعال قص بسيط غير متجانس.
- المرحلة4: وهي الأخيرة المتضمنة انفعال القص التام المتجانس.

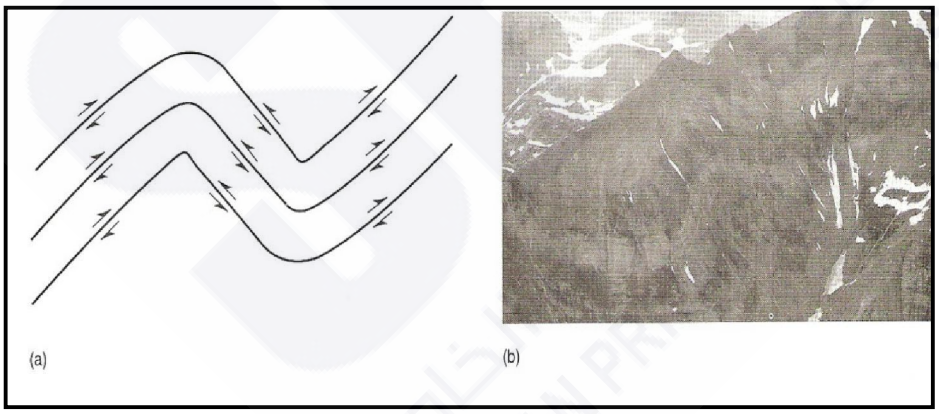
ــ تنتج الطيات المتشكلة بالانسياب اللدن عن جهد القص البسيط، عبر الطبقات وبإزاحة الطبقات أيضاً.

ــ تقدم الطيات المتشكلة بعدة آليات دليلاً على التسلسل المتعاقــب لعمليــات الطي.

3 ــ 16 ــ 2 ــ الانزلاق الالتوائي Flexural slip:

تأخذ الطبقات دوراً مهيمناً في عملية طي الصخور، تحت ظــروف ضــغط وحرارة منخفضين وعلى أعماق قليلة في الأرض.

وبالنسبة للطبقات التي تحافظ على ثبات سماكاتها أثناء الطي، ككتل صخرية متطبقة وقاسية ومتجانسة، كالصخور الكربوناتية أو الصخور الرملية فإنها تنزلق على بعضها كما في (الشكل 3 ــ 29). حيث تظهر الأسهم الحركة النسبية علــى سطح كل طبقة خلال الطي. وكمثال توضيحي على الانزلاق الالتــوائي، يمكــن مراقبة انزلاق صفحات الكتابة عندما يتم ثنيها.



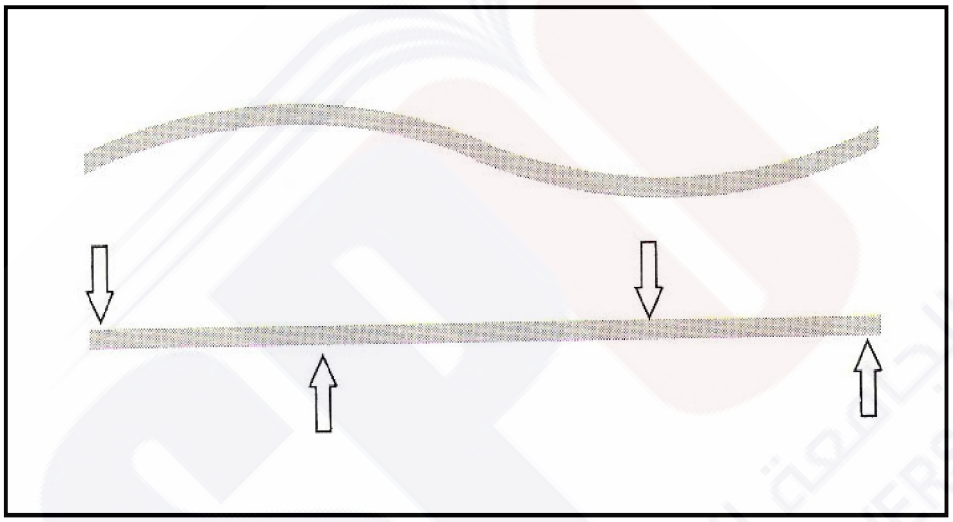
شكل (3 ــ 29)

a ــ طيات انزلاق التوائي، تشير الأسهم إلى الحركة النسبية لسطح الطبقة أثناء الطي.

B . طيات انزلاق التوائي متقوسة في تشكيلة حجر رملي وشيل، كولومبيا البريطانية.

3 ــ 16 ــ 3 ــ الطي بالانحناء Bending:

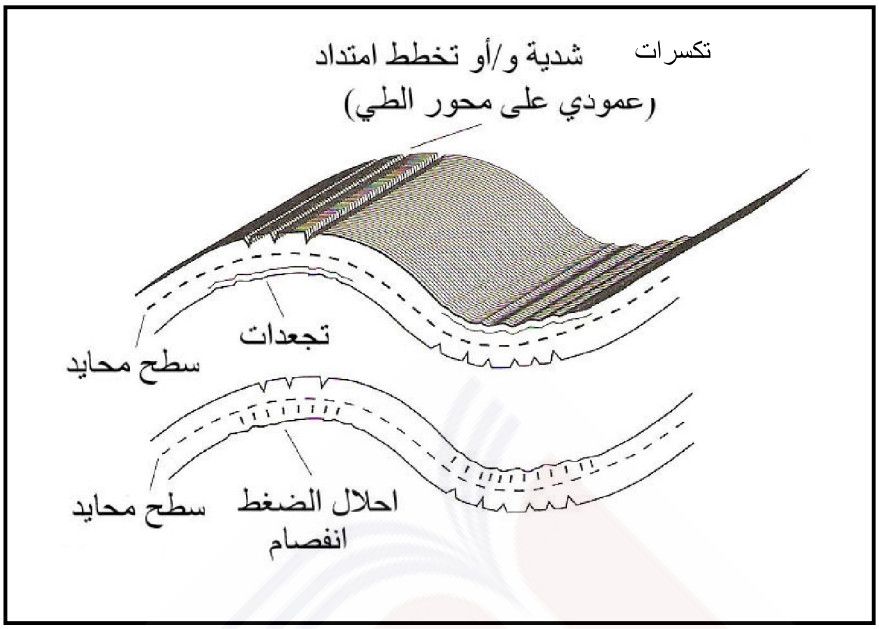
تتضمن آلية الطبقات الصخرية المعرضة للانحناء تطبيقاً للقوة عبر الطبقات (الشكل 3 ــ 30). وينتج عن ذلك عموماً طيات هادئة بزوايا بينية كبيرة، تظهر الطيات الانحنائية في الكراتونات. حيث أن القوى الشاقولية الموجهة وبزاوية كبيرة على التطبق الأفقي الأصلي، هي تلك التي تحدث بالتالي قبباً واسعة ــ أحواضاً ــ انتفاخات. وأقواساً شائعة في الكراتونات.



شكل (3 ــ 30) تشكل الطي بالانحناء

يتمدد القوس الخارجي في ميكانيكية الانحناء، بينما لا يتعرض القوس الداخلي لعملية تقصير، وذلك بسبب أن النهايات تبقى مثبتة. وتبدي الطيات إجهاد تماسي متعادل، يمكن أن يتحدد بالبنيات الصغيرة والتي توضح تقصيراً في الأقواس الداخلية للطية (الشكل 3 ــ 31).

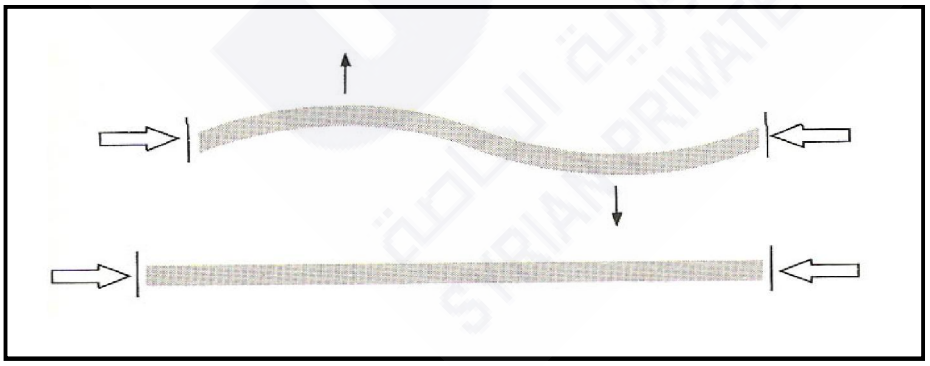
ومثال ذلك التجعد وانفصام طول الضغط المنحل في الأقواس الخارجية، ويمكن أن تتحطم الطبقات بالتكسر التمددي أو قد تحتوي على بنيات مثل البوديناج الذي يعبر عن التمدد.



شكل (3 ــ 31) البنية الناتجة عن انضغاط القوس الداخلي وتمدد القوس الخارجي

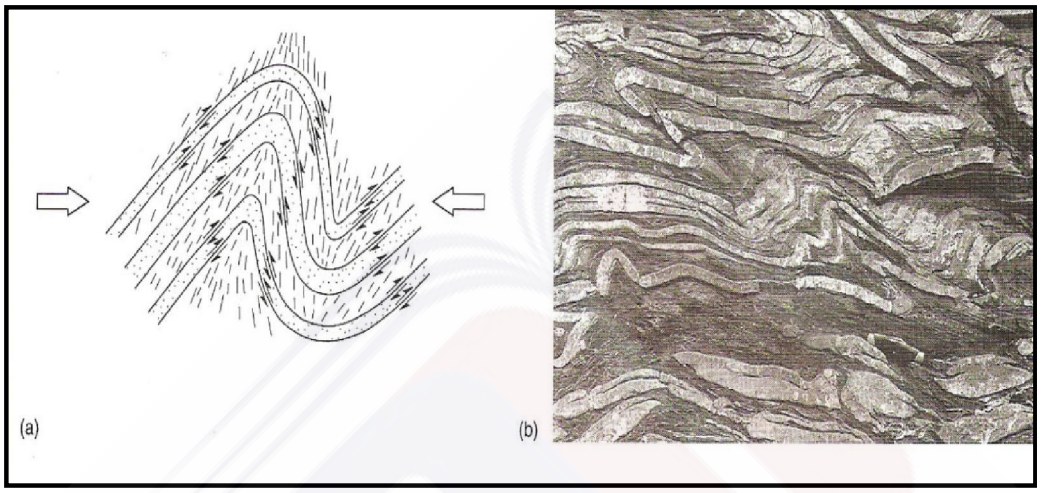
3 ــ 16 ــ 4 ــ الطي بالتجعد Buckling:

تتشكل الطيات في هذه الحالة من خلال قوى موازية للتطبق في الصـــخور (كتلك المطبقة على نهاية عارضة مرنة) (الشكل 3 ــ 32).



شكل (3 ــ 32) تشكل الطيات بالتقوس

وغالباً ما تترافق هذه الآلية مع انزلاق الطبقات بالنسبة لبعضها البعض، وذلك عند درجات حرارة وضغط منخفضين. ويكون الطي الناتج هو طياً ذا منحنٍ جيبياً متوازياً ومتمركزاً (الشكل 3 ــ 33).

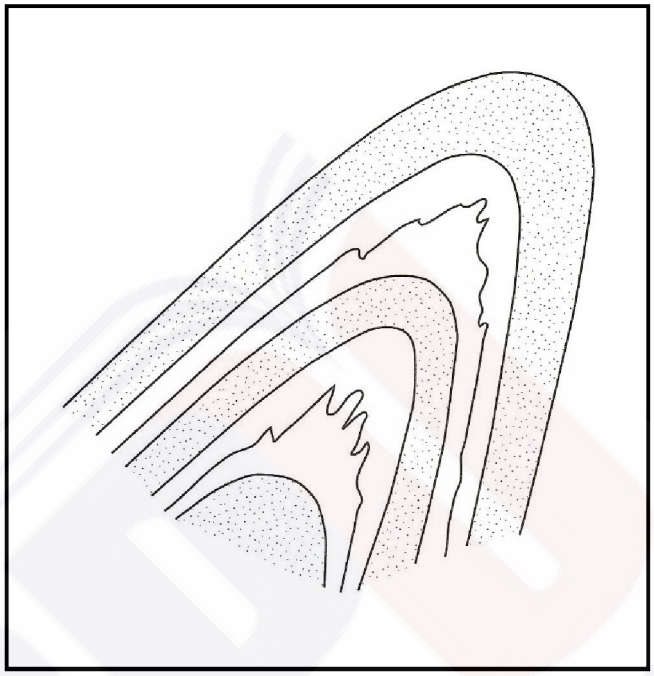


شكل (3 ــ 33)

a ــ التقوس والانزلاق الالتوائي (الأسهم الصغيرة السوداء) في ضغط وحرارة منخفضين. الطبقة القاسية هي المنقطة. تحتوي الطبقة الضعيفة على انفصام تحت موازي للسطوح المحورية.

b ــ طيات تقوس غير متوافقة شديدة في الحجر الكلسي (الفاتح) مع الشيل (الغامق) قرب التلة البيضاء ــ نيويورك. لاحظ أن الاختلافات في السماكات بين الحجر الكلسي القاسي المتداخل مع الشيل الضعيف يمنع الطيات من أن تأخذ الشكل نفسه عبر عملية الطي. (Hatcher)

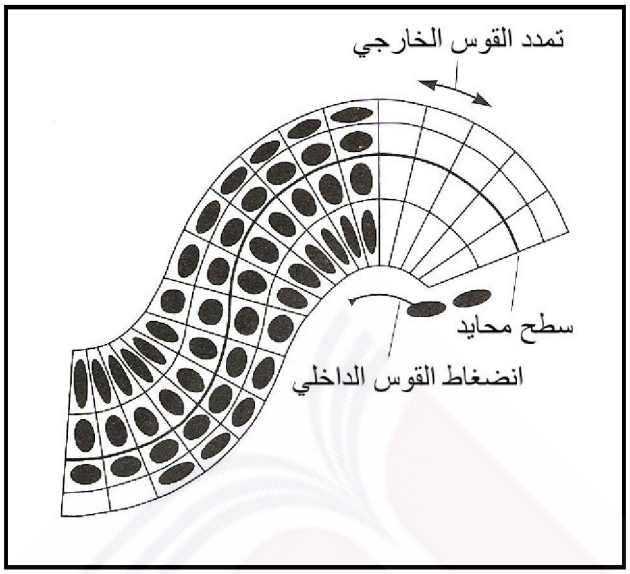
أما عند قيم الضغط والحرارة المرتفعين فإن آلية الانسياب flow سوف تترافق معها وبالتالي ينتج لدينا طي متشابه (الشكل 3 ــ 34).



شكل (3 ــ 34) التقوس والانسياب الالتوائي في حرارة وضغط عاليين، حيث ينتج طيات شبه متشابهة بدون انزلاق التوائي، الطبقات القاسية هي المنقطة.

يتمثل التقوس من خلال التقصير الموازي للطبقة، حيث أن الطبقات تقصر جانبياً وتصبح أكثر ثخانة بشكل عمودي على التطبق وعلى اتجاه الجهد المطبق.

يتضمن هذا النوع من الآلية تشوه الطبقات الداخلية، حيث يتعرض القوس الداخلي للطبقات إلى تقصير موازٍ للطبقات في حين يتعرض القوس الخارجي لكل طبقة إلى تمدد موازٍ للطبقة (الشكل 3 ــ 35).



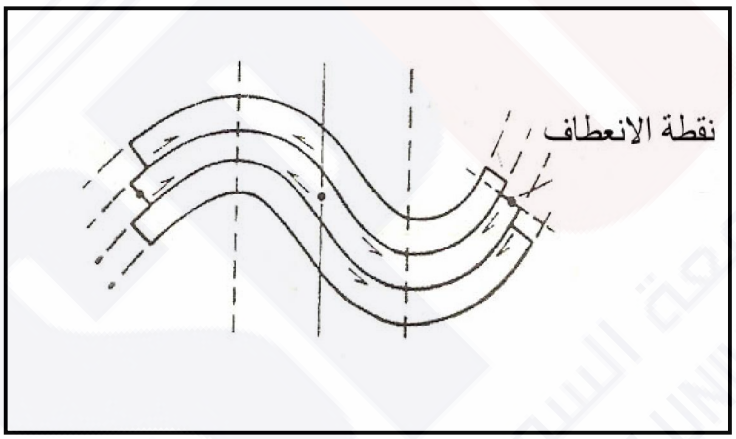
شكل (3 ــ 35) الانفعال عبر طبقة مطوية بالتقوس والانفعال المماسي ــ الطولاني.
لاحظ أن التباعد الموازي للطبقة والتقصير مفصولان بسطح محايد بدون انفعال نهائي.

وبالتالي فسيكون في كل طبقة سطح محايد neutral surface لا يتعــرض لعملية التشوه، يفصل بين نطاقي التمدد والتقصير.

3 ــ 17 ــ الظواهر المرافقة للطي ضمن مقطع ac:

3 ــ 17 ــ 1 ــ انزلاق الطبقات Bedding slip:

يدل هذا المفهوم على انزلاق الطبقات المتعرضة للطي، أي أنها تتحرك بالنسبة لبعضها عبر سطوح التطبق باتجاه مفصلة الطية، ففي أجنحة المحدبات تتحرك كل طبقة بالنسبة للطبقة التي تقع تحتها مباشرة باتجاه مفصلة المحدب، أما في حالة المقعرات فتتحرك كل طبقة بالنسبة للتي تعلوها باتجاه مفصلة المقعر (الشكل 3 ــ 36). ويقود هذا المفهوم إلى مبدأ ثبات مفاصل الطيات، أي عدم تغيير المواقع في المراحل الأولى للطي.



شكل (3 ــ 36) انزلاق الطبقات المطوية

وبالتالي فإن مجال المفصلة لا يعاني من انزلاق الطبقات، بينما يصل هذا الانزلاق في مجال نقاط الانعطاف إلى قيمته الأعظمية.

إن عمليات انزلاق الطبقات تكمل بعضها جانبياً، بحيث أن الطبقات المتراجعة نسبياً في مجال المقعر تنتقل إلى الطبقات المتقدمة نسبياً في مجال المحدب.

3 ــ 17 ــ 2 ــ خدوش الانزلاق الطبقي:

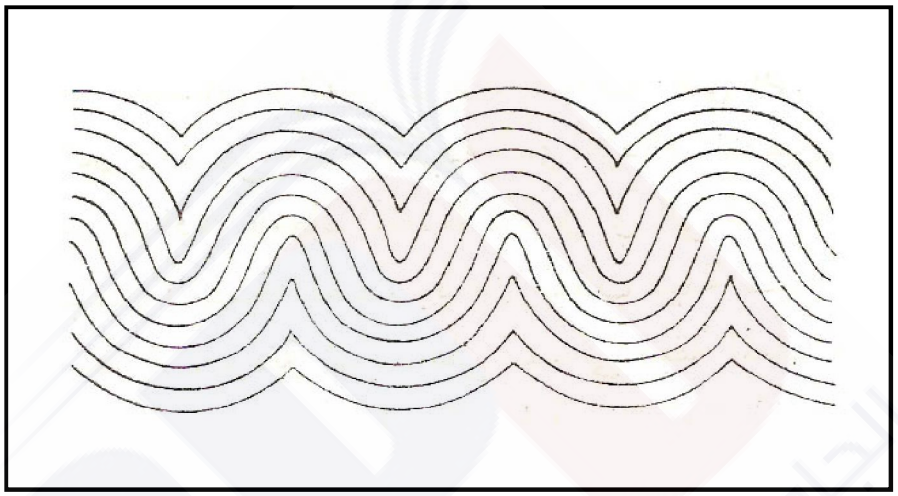
يمكن أن يؤدي انزلاق الطبقات فوق بعضها إلى حدوث خدوش على سطوحها وقد تنشأ في بعض الحالات ظواهر تهشم أو طحن، ويكون اتجاه الخدوش عمودياً على محور الطي، غالباً، إلا أن هذه الخدوش قد تنحرف عن خط ميل سطوح الطبقات المطوية لوجود بعض التعرجات المحلية للطبقات المنزلقة بالنسبة لبعضها. إلا أنه يجب الانتباه إلى أن الخدوش الملاحظة على سطوح الطبقات الموازية 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.

3 ــ 17 ــ 3 ــ 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. إن ظاهرة ترقق المفصلة أقل انتشاراً من ظاهرة ازدياد ثخانة المفصلة وهي تنشأ نتيجة هجرة المواد من مجال المفصلة نحو الأجنحة.

3 ــ 17 ــ 4 ــ سطوح الانفصال:

يتغير شكل طي سطوح الطبقات مع العمق في مقاطع ac وبخاصة في الطبقات التي تكون الثخانة الحقيقية فيها ثابتة كالطياتالمتوازية (الشكل 3ــ 37) وبذلك فإن الطي سينعدمعند عمق معين، حيث تكونالطيات متوضعة فوقوحدات صخرية غيرمشوهة. وهذا يعني أن غطاء سطحياً يمكن أن يتشوه



شكل (3 ــ 37) الطيات المتوازية وتخامدها بالاتجاه الشاقولي (نحو الأعلى ونحو الأسفل).

بسبب أو لآخر بشكل مستقل عن قاعدته. يحصل الطي فوقه وهو ينشأ عادة عبر الصخور مثل الملح والغضار والجص أو عبر الطبقات الأقل تصلباً من التتابع الطبقي.