الفصل الرابع

السلوك الميكانيكى للصخور

١ – التصنيف الميكانيكى للصخور :

تنقسم الصخور من ناحية سلوكها الميكانيكى إلى نوعين رئيسيين هما :

(ا) الصخور القوية (Competent rocks)

وتطلق على الصخور التى يمكن إنشاء فتحات بها دون حاجة إلى إقامة دعائم صناعية لحمايتها . وتنقسم هذه الصخور بدورها إلى : كتلية وطبقية وقد تحتوى على فواصل .

(ب) الصخور الضعيفة (Incompetent rocks)

وتطلق على الصخور التى لا يمكن إنشاء فتحات بها دون إقامة دعائم قوية تحميها .

ويلاحظ أن تقسيم الصخور إلى قوية وضعيفة له مفهوم نسبى بمعنى أن بعض الصخور تكون تحت ظروف معينة قوية ، بينما تكون تحت ظروف أخرى ضعيفة . ومثال ذلك إذا حفرنا نفق مساحة مقطعة صغيرة فى طبقة من الطفلة على عمق قليل (حوالى ثلاثين متراً) من سطح الأرض فإن مثل هذا النفق لا يحتاج غالباً إلى دعائم صناعية لحمايته ولذلك يطلق على صخر الطفلة فى هذه الحالة « صخراً قوياً » أما إذا أقيم هذا النفق بنفس الأبعاد فى طبقة من الطفلة على عمق كبير (حوالى ١٠٠٠ متر) من سطح الأرض فإن النفق لا يمكن إقامته فى هذه الحالة بدون دعائم قوية تحمى صخور الطفلة من الانهيار ، لذلك يطلق على الطفلة عندئذ « صخور ضعيفة » .

وهناك عدة تقسيمات أخرى للصخور تهدف جميعاً إلى تفسير سلوك الصخور ميكانيكياً فى مرحلة المرونة وعندما تحيد فى سلوكها عن حدود المرونة .

٢ ــ حدود تطبيق معادلات المرونة على الصخور :

تعتبر نظرية المرونة من أهم الأسس التى توضح السلوك الميكانيكى للصخور . ولكن ينبغى ملاحظة الشروط التالية اللازم توافرها فى الصخور حتى يمكن تطبيق معادلات المرونة عليها :

١ ــ عدم وجود تشققات أو شروخ أو فوالق فى الصخور تمنع اتصالها اتصالاً مستمراً سواء كانت معرضة للاجهادات أو غير معرضة لها .

٢ ــ أن تكون الصخور متجانسة ومتشابهة فى خواصها فى اتجاهاتها المختلفة أى « أيزوتروبية » .

٣ ــ عدم زيادة قيمة الاجهادات المؤثرة على الصخر عن حدود ثوابت المرونة الخاصة به .

ويبدو لأول وهلة أن هذه الشروط تجعل تطبيق معادلات المرونة على الصخور أمراً يكاد يكون مستحيلا ، غير أن كثيراً من التجارب المعملية التى أجريت على الأنواع المختلفة من الصخور القوية مثل الجرانيت أثبتت أنها تخضع لقوانين المرونة وهى واقعة تحت تأثير إجهادات كبيرة نسبياً تصل فى بعض الأحيان إلى نقطة الانهيار .

نستنتج من ذلك أن تطبيق معادلات المرونة على مثل هذه الصخور يعتبر أمراً مقبولا من الناحية العملية . أما عندما تحيد الصخور عن سلوكها المرن فينبغى تطبيق المعادلات الرياضية التى يراعى فيها طبيعة سلوك الصخور بعد مرحلة المرونة .

ويلاحظ أن غالبية الصخور غير متجانسة وليست متشابهة الخواص فى اتجاهاتها المختلفة عند دراستها من الناحية الميكروسكوبية ولكن نظراً لضخامة الكتل الصخرية فإن تأثير عدم التجانس وعدم التشابه الميكروسكوبى يعتبر ضئيلاً جداً لدرجة يمكن معها إهماله دون خطأ كبير من الناحية العملية .

٣ ــ حدود السلوك المرن فى الصخور :

تسلك أغلب أنواع الصخور سلوكًا مرنًا عندما تتعرض لقدر محدود من الاجهادات ولكن كثيراً منها يتعرض فى بعض المناطق لاجهادات تزيد عن حدود المرونة بالنسبة لها ، ولذلك فإنها قد تسلك فى هذه المرحلة سلوكًا لدنا قبل أن تنهار ويمثل شكل (٧٤) منحنى تقريبى يوضح سلوك الصخور عندما تتعرض لإجهادات تزداد تدريجيًا من الصفر حتى تصل إلى نقطة الإنهيار ويلاحظ أن الجزء الذى يبدأ من نقطة الأصل (O) وينتهى عند النقطة (X) يسلك فيه الصخر سلوكًا مرنًا حيث يتناسب الإنفعال تناسبًا طرديًا مع الاجهادات التى تؤثر على الصخر . وتسمى العلاقة بين الاجهادات والإنفعالات فى هذه الحالة « علاقة خطية » ويعبر عنها بالمعادلة .

$$\sigma_X = E\ \epsilon_X$$

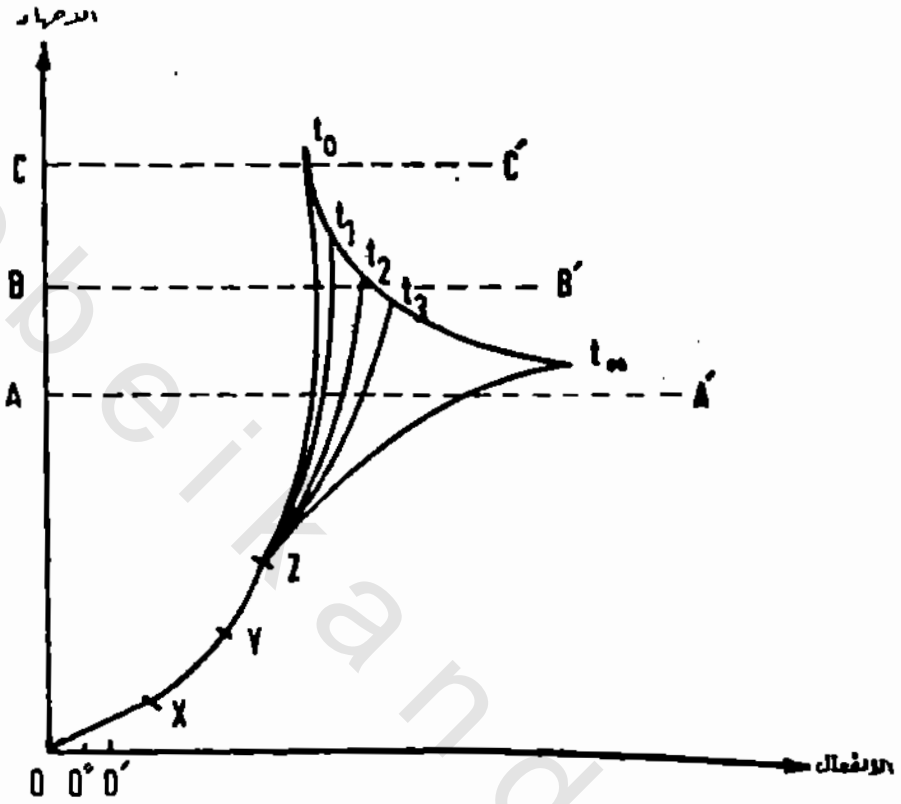
حيث تمثل (σ_X) الاجهاد العمودى فى اتجاه المحور (X)

« « E معامل ينج أو معامل المرونة

« « ϵ_X مقدار التشوه فى اتجاه المحور (X)

فإذا زادت الاجهادات عن حد التناسب الخطى نلاحظ أن المنحنى يزداد ميله ولذلك نحتاج إلى اجهادات أكبر لنحصل على زيادة فى الانفعال ويستمر هذا السلوك فى المنطقة (XY) ويلاحظ أن سلوك الصخور فى هذه المرحلة سلوكاً مرناً بمعنى أنه إذا زال الاجهاد المؤثر يزول الانفعال تماماً دون أن يترك أى أثر لتغيير يكون قد حدث فى الشكل الأصلى للصخر ، ويطلق على نقطة (Y) حد المرونه .

فإذا عرفنا معامل ينج بأنه معدل التغير فى الاجهادات مقسومًا على معدل التغير فى الإنفعالات فإن (E) « معامل ينج » يساوى ظل الزاوية التى يصنعها المنحنى مع محور الانفعالات عند النقطة التى يراد تعيين هذا المعامل عندها .



جدول الاجهادات والتشوهات في الصخور		
سلوك الصخور		
السلوك المرن الخطي	OX	الزمن الأول
السلوك المرن اللدن	XY	
السلوك اللدن	YZ	الزمن الثاني
السلوك الانسيابي	Zt_∞	الزمن الثالث

(شكل ٧٤)

حدود الاجهادات في الصخور

obeikandl.com

ويلاحظ من الشكل (٧٤) أن مقدار معامل ينج يتغير بتغير الاجهادات عندما يحيد سلوك الصخر عن العلاقة الخطية (OX) ويتبع المنحنى (XY)، كما نلاحظ أيضاً أنه كلما زادت الاجهادات يزداد مقدار معامل ينج . وعلى ذلك فإنه كلما زاد العمق الذى توجد عليه الصخور أى كلما زاد عمق الغطاء الصخرى زادت الاجهادات المؤثرة على الكتل الصخرية وبالتالى يزداد مقدار معامل ينج .

٤ – السلوك اللدن وخاصية الانسياب فى الصخور :

إذا استمرت الزيادة فى الاجهادات عن حد المرونة عند النقطة (O) قد تسلك الصخور سلوكاً جديداً بين النقطتين (Y , Z) ويتميز هذا السلوك بزيادة فى زاوية ميل المنحنى زيادة سريعة أى يزداد مقدار التشوه ، وإذا زالت الاجهادات المؤثرة على الصخر فإنه لا يعود إلى شكله الأصلى مرة أخرى . أى أنه بعد زوال الاجهادات المؤثرة على الصخو لا يعود المنحنى إلى النقطة (Y) ولكنه ينتقل إلى نقطة أخرى (O′) تبعد قليلا عن النقطة (O) على محور الانفعالات .

وإذا ترك الصخر فترة زمنية قد يزول عنه جزء من التغير الذى طرأ عليه ويبقى جزء آخر به وتوضح النقطة (O″) على المنحنى مقدار التشوه الدائم أو المتبقى (Residual strain) الذى يبقى فى الصخو بعد زوال الاجهادات المؤثرة عليه . ويطلق على سلوك الصخو فى هذه المرحلة السلوك اللدن .

فإذا فرضنا أن الصخر قد تعرض لاجهادات أكبر من النقطة (Z) فإنه يمكن ملاحظة أن التشوهات التى تحدث بالصخر ليست دالة الاجهادات فقط ولكنها دالة للزمن الذى تؤثر فيه هذه الاجهادات . وعلى سبيل المثال إذا أخذنا فى الاعتبار نقطة مثل (A) على محور الاجهادات فإن التشوهات فى أول الأمر تنتج من تقاطع الخط الأفقى (AA′) مع المنحنى الذى يمثله

الخط (to) . ، أما مقدار التشوهات التى تحدث بعد ذلك فيمكن الحصول عليها من تقاطع نفس الخط (AA') مع الخطوط (t_1, t_2, t_3) حيث تمثل المقادير (١ ، ٢ ، ٣ . . .) الوحدات الزمنية المتتابعة . وأخيراً يمكن معرفة الحالة التى لا تحدث بعدها للصخر أى تشوهات مهما كانت الفترة الزمنية التى يتعرض فيها الصخر للاجهادات والتى تعرف « بحالة الاتزان » فيمكن الحصول عليها من تقاطع الخط (AA') مع الخط ($t \propto$) .

ويقال للصخور التى يزداد فيها مقدار التشوهات بزيادة زمن تأثير الاجهادات بأنها تسلك سلوكاً انسيابياً . وينبغى أن نميز بين السلوك الانسيابى الذى يحتاج لمقدار معين من الاجهادات لكى تبدأ التشوهات الانسيابية فى الازدياد بزيادة زمن تأثير هذه الاجهادات ، وبين السلوك المائع والذى يتميز بأنه يحدث نتيجة تأثير أى مقدار من الاجهادات مهما كان صغيراً واستمراره ولو مدة صغيرة من الزمن .

وأخيراً نفرض ازدياد مقدار الاجهادات المؤثرة على الصخر حتى النقطة (B) على محور الاجهادات فإنه يلاحظ أن مقدار التشوهات يمكن الحصول عليها من تقاطع الخط الأفقى (BB') مع الخط (to) فى أول الأمر ثم مع الخطين (t_1 , t_2) بعد الفترتين الزمنيتين ١ ، ٢ ولكن قبل الوصول إلى النقطة الزمنية الثالثة ينهار الصخر . كذلك لو فرضنا أن الاجهادات وصلت إلى النقطة (C) أو زادت عنها فإن الصخر ينهار فوراً لأن الخط (to) ينطبق على منحنى الانهيار عند النقطة (to) .

ويمكن شرح الشكل (٧٤) باختصار فى النقطة الرئيسية الآتية :

(ا) **السلوك المرن الخطى** : وتتناسب فيه الاجهادات تناسباً طردياً مع الانفعالات « التشوهات المرنة » (OX) .

(ب) **السلوك المرن المنحنى** : ويحيد فيه الصخر عن التناسب الخطى بين الاجهادات والانفعالات ولكنه يتميز بأن الانفعالات تزول تماماً عن الصخر

بزوال الاجهادات التى تؤثر عليها (XY) ومن أمثلته الزحف الأولى فى الصخور .

(جـ) **السلوك اللدن:** ويتميز هذا السلوك بعدم زوال التشوه بزوال الاجهاد المؤثر (YZ) ومن أمثلته الزحف الثانوى فى الصخور .

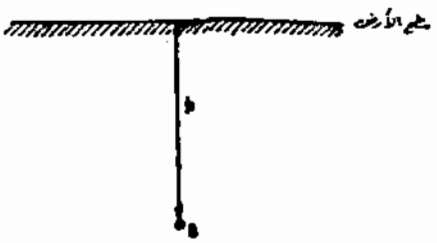
(د) السلوك الانسيابى : وفيه يكون التشوه الناتج عن مجال الاجهادات الثابت والمؤثر على الصخور دالة متزايدة للزمن الذى يؤثر فيه الاجهاد (Zt∝) ومن أمثلته الزحف الثلاثى فى الصخور .

(هـ) مرحلة الانهيار : وهى ممثلة بمنحنى الانهيار الموضح بالشكل (٧٤) .

٥ ــ الاجهادات الأولية فى الصخور :

إذا فرضنا وجود قطعة من الصخر على شكل مكعب على عمق « h » من سطح الأرض شكل (٧٥) ، ثم اتخذنا المحاور (OX , OY , OZ) بحيث تكون نقطة (O) هى أحد أركان المكعب وبحيث تمثل كل من (OX , OY) المحورين الأفقيين ويمثل (OZ) المحور الرأسى . فإذا فرضنا أن كثافة الصخر (γ) وفرضنا أن عجلة الجاذبية الأرضية منتظمة خلال العمق (h) فإن مقدار الاجهادات التى تؤثر على هذا المكعب فى الاتجاه الرأسى تساوى $\sigma z = -\gamma h$

وتدل الإشارة (ــ) على أن القوة الناتجة من هذا الاجهادات تؤثر من



(شكل ٧٥)
الاجهادات الأولية فى الصخور

أعلى إلى أسفل . وإذا عوضنا عن المقدار (h —) بالمقدار (Z) نحصل على ما يأتى $\sigma z = Z\gamma$

ونظراً لأن هذه القطعة من الصخر محاطة بقطع مثلها وتقع تحت تأثير اجهاد رأسى مماثل فإن محاولة تشوه هذا المكعب فى الاتجاه الأفقى لا يحدث نتيجة لوجود المكعبات الصخرية المحيطة به . وبذلك يكون مقدار الانفعال « التشوه المرن » فى الاتجاه الأفقى مساوياً للصفر أى أن :

$$\epsilon\chi = \epsilon\gamma = O$$

وحيث إنه سبق أثبات أن :

$$\epsilon\chi = \frac{1}{E}[\sigma\chi - \mu\,(\sigma\gamma + \sigma z)]$$

ومنها نستنتج أن $\sigma\chi = \sigma\gamma$ نتيجة لأيزوتروبية الصخر فى الاتجاه الأفقى وعلى ذلك يكون $O = \frac{1}{E}\,[\,\sigma\chi - \mu\,(\sigma\chi + \sigma z)\,]$

ولكن المقدار $\left(\frac{1}{E}\right)$ لا يساوى صفراً

$$\therefore \quad \sigma\chi = \sigma\gamma = \frac{\mu}{1-\mu}\,\sigma z = \frac{\mu}{1-\mu}\,Z\gamma$$

حيث تمثل (μ) نسبة بواسون .

وبذلك يمكن إيجاد مقدار الاجهادات الأفقية منسوبة إلى الاجهاد العمودى طبقاً للفروض السابقة .

٦ — الأنواع المختلفة لمجال الاجهادات التى تتعرض لها الصخور :

يوجد أربعة أنواع مختلفة للاجهادات تؤثر على الصخور وهى موضحة بالشكل (٧٦) .

النوع الأول : إذا كانت $\mu = 0$ فينتج عن ذلك أن :

$$\sigma_x = \sigma_y = 0 \quad ، \quad \sigma_z = Z\gamma$$

ويطلق على هذا المجال « مجال الاجهادات وحيدة الاتجاه أو الاجهاد محدود الجوانب » كما هو موضح بالشكل (٧٦ — ا) .

النوع الثانى : إذا كانت $\mu = 1/4$ فينتج عن ذلك

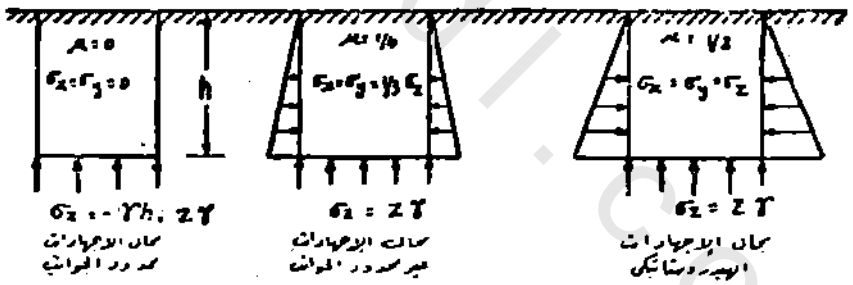
$$\sigma_x = \sigma_y = 1/3\,\sigma_z \quad ، \quad \sigma_z = Z\gamma$$

ويطلق على هذا المجال « مجال الاجهادات غير محدود الجوانب » وهو موضح بالشكل (٧٦ — ب) .

النوع الثالث : إذا كانت $\mu = 1/2$ فينتج عن ذلك

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z \quad ، \quad \sigma_z = Z\gamma$$

ويطلق على هذا المجال « مجال الاجهادات الهيدروستاتيكى » وهو موضح بالشكل (٧٦ — حـ) .



(شكل ٧٦)
أنواع الاجهادات فى الصخور

النوع الرابع : استنتجنا فى الأنواع الثلاثة السابقة قيمة الاجهادات الأفقية الناشئة عن الاجهادات الرأسية فقط أى الناتجة من ثقل الغطاء الصخرى الذى يعلو النقطة الموجودة على عمق (h) تحت سطح الأرض .

ولكن يحدث فى كثير من الأحيان أن تنشأ اجهادات أفقية فى الصخور

نتيجة تأثير الحركات التكونية أو نتيجة عمليات التحول إلى جانب الاجهادات المتولدة عن ثقل الغطاء الصخرى وفى مثل هذه الحالة تزداد قيمة الاجهادات الأفقية على الاجهادات الرأسية وهذه هى الحالة الأكثر شيوعاً فى صخور القشرة الأرضية .

٧ – تقسيم صخور القشرة الأرضية وعلاقته بالتراكيب الثانوية :

يمكن تقسيم صخور القشرة الأرضية بالنسبة لما ينشأ فيها من تراكيب ثانوية إلى :

(ا) **منطقة الكسر :** وهى قريبة من سطح الأرض وتظهر بها الفوالق بشكل واضح ويمكن تمثيلها بالاجهاد غير محدود الجوانب .

(ب) **منطقة الطى :** وتوجد فيها الصخور على أعماق متوسطة من سطح الأرض وتوجدبهاالطيات بأنواعها المختلفة ويمكن تمثيلها بالاجهاد محدود الجوانب.

(ح) **منطقة الانسياب :** وتوجد على أعماق كبيرة من سطح الأرض وتكون فيها الصخور لدنة وتسلك كما لو كانت سوائل غليظة القوام . ويمكن تمثيلها بالاجهاد الهيدروستاتيكى .

٨ – ميكانيكية الطيات :

هناك أربعة أنواع رئيسية من ميكانيكية الطيات هى كالآتى :

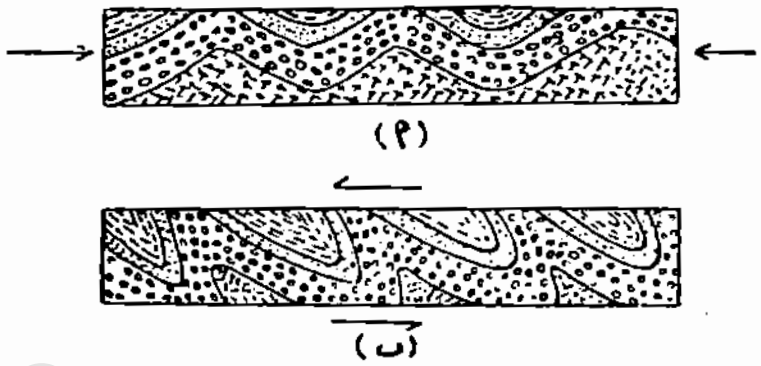
١ – الطى بالثنى .

٢ – الطى الانسيابى .

٣ – الطى بالقص .

٤ – الطى الناشىء عن الحركات الرأسية .

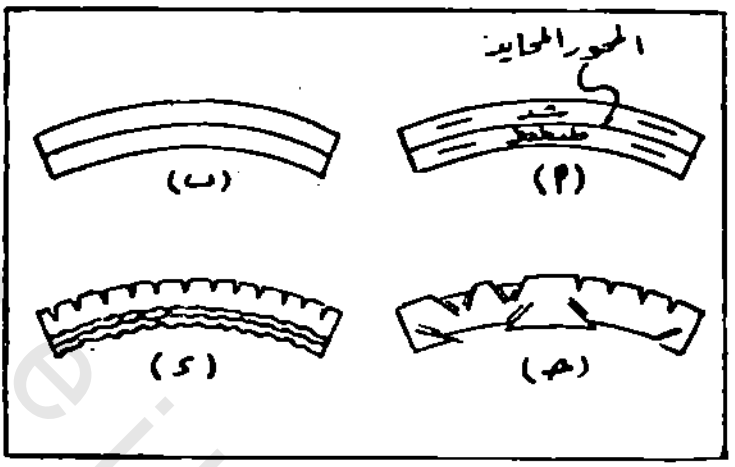
١ – الطى بالثنى : ويسمى أيضاً بالطى الحقيقى وينشأ من الضغوط الأفقية



(شكل ٧٧)
الطى بانثنى
(ا) طيات ناتجة عن ضغوط أفقية بسيطة
(ب) طيات ناتجة عن ضغوط القص

أو إجهادات القص . ويوضح شكل (٧٧) سلوك طبقات أفقية عند تعرضها لقوى من الضغوط الأفقية الموازية للمستويات الأفقية . وعند إنثناء طبقات من صخور متجانسة كما فى شكل (٧٨ — ا) فإن الجزء العلوى المحدب من الطبقة يتعرض لقوى الشد ، بينما يتعرض الجزء السفلى لقوى الضغط بينما يوجد جزء فى المنطقة المتوسطة لا يتأثر ويسمى بالمحور المحايد . وإذا كانت الصخور تسلك سلوكاً لدنا كما فى شكل (٧٨) فإن الجزء العلوى يصبح أكثر استطالة وأصغر سمكاً ، بينما يصير الجزء السفلى أقل استطالة وأكثر سمكاً ، أما إذا كانت الصخور هشة فإنها تتصدع كما فى شكل (٧٨ — حـ) ، وعلى السطح العلوى المحدب تتكون كسور ناشئة عن عوامل الشد أو فوالق عادية صغيرة ، بينما تتكون على السطح السفلى المقعر فوالق معكوسة صغيرة ، وتحت ظروف معينة فإن الصخور على السطح السفلى قد تتجعد كما فى شكل (٧٨ — د) .

وتتميز الصخور الرسوبية بوجود مستويات للتطابق ، ويمكن تشبيه عملية طى الطبقات بانثناء رزمة سميكة من الورق ، إذ أن من أهم عوامل الطى هو إنزلاق الطبقات الواحدة وراء الأخرى كما فى شكل (٧٩) وهذه الظاهرة ذات



(شكل ٧٨)

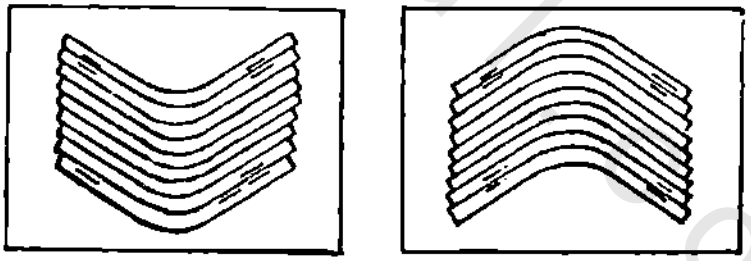
الطى بالثنى

(أ) الضغوط فى حالة انثناء قضيب .

(ب) التشوه الدن .

(جـ) التشوه بالتصدع .

(د) التشوه بالتصدع والطى .



(شكل ٧٩)

قطاع رأسى يوضح الطى بالثنى

(أ) طية محدبة (انتيكلين)

(ب) طية مقعرة (سينكلين)

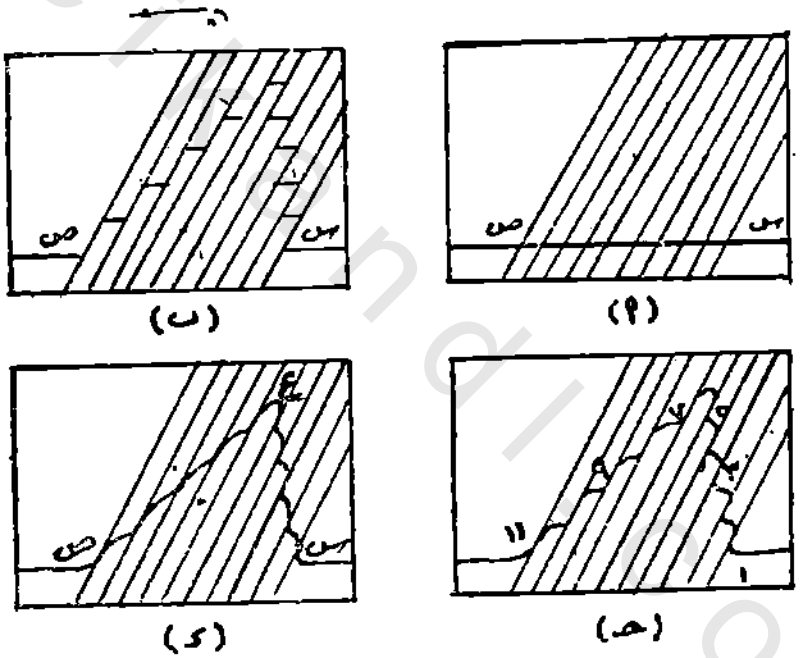
أهمية كبيرة لتفسير بعض أنواع الطيات الإنزلاقية وبعض أنواع التشققات .

وأثناء طى الصخور الرسوبية ، فإن بعض الصخور تكون قوية ، بينما تكون الأخرى ضعيفة . ويؤدى الطى بالثنى إلى تقوس الطبقات القوية تحت تأثير القوى الضغطية ، وإلى انسياب الصخور الضعيفة وكذلك إلى انزلاق الطبقات الواحدة وراء الأخرى .

٢ – **الطى الانسيابى** : توجد جميع المراحل الانتقالية بين الطى بالثنى والطى الإنسيابى ، وينشأ الطى الإنسيابى الذى يسمى أحيانًا بالطى فى الطبقات الضعيفة فى حالة عدم وجود طبقات سميكة من صخور قوية ، وحيث تكون جميع الصخور لدنة نظراً لتركيبها الأصلى أو لارتفاع درجة الحرارة ووجود ضغوط عالية جدًّا محيطة بالصخور ، وتحت هذه الظروف تتحرك الكتلة الصخرية كلها تحت تأثير الضغوط التى تؤثر عليها ، وتشبه فى سلوكها بوجه عام السوائل غليظة القوام . ويحدث الطى الانسيابى عادة بالمناطق التى توجد بها الحركات البنائية للجبال حيث إن المناطق المتوسطة من الأحواض الترسيبية العظيمة التى تسمى جيوسنكلين (Geosyncline) تتجمع فيها طبقات رقيقة من صخور ضعيفة كالطين الصفحى والصلصال والمارل ، وهذه التكاوين الضعيفة تسلك سلوكاً لدنًا وتنساب بسهولة نظراً للضغوط الشديدة والحرارة المرتفعة والمحاليل النشيطة . وجدير بالذكر أن الطى الانسيابى يشبه فى مظهره الطى بالثنى ، ولكنه يتميز بوجود طيات منزلقة صغيرة الحجم على نطاق كبير .

٣ – **الطى بالقص** : ويسمى أحياناً بالطى الانفصامى ، ويرتبط ارتباطًا وثيقاً بالطى الانسيابى وينشأ نتيجة إزاحات تفاضلية دقيقة جدًّا على طوال شقوق أو فواصل متقاربة بعضها من بعض . ويتضح من شكل (٨٠ – ب) أن كتلتى الصخو رقم (١ ، ١١) تبقيان فى مكانهما ، بينما تزاح الكتلة رقم (٦) إلى أعلى لأكبر مسافة بين الكتل الواقعة على الجانبين التى تتحرك تدريجيًّا لمسافات أقل . وإذا كانت الكسور قريبة جدًّا من بعضها البعض والمسافات بينها أقل من سنتيمتر فإننا نجد أن الطبقات نتيجة للاحتكاك الشديد تصبح

موازية للكسور كما فى شكل (٨٠ — حـ) . ويكون التركيب الناتج عبارة عن طية كبيرة مصحوبة بطيات صغيرة كما فى شكل (٨٠ — د) . وفى الحالات البسيطة يكون للطى الانفصامى مصحوباً دائمًا بالكسور والفواصل والتشققات غير أن هذه الكسور قد تختفى أو تتلاشى نتيجة ادماجها وتلاحمها بفضل إعادة تبلور الصخر . ومن الواضح أن الطى الانفصامى يقلل كثيراً من سمك الطبقات ولا يزداد سمكها على الإطلاق ، ويتضح من شكل (٨٠) أن الطبقة التى كان طولها الأصلى (س ص) أصبح طولها بعد الطى الانفصامى (س ع ص)



(شكل ٨٠)

قطاع رأسى يوضح الطى بالقص

(ا) الطبقة قبل إزاحتها على مستويات الفواصل

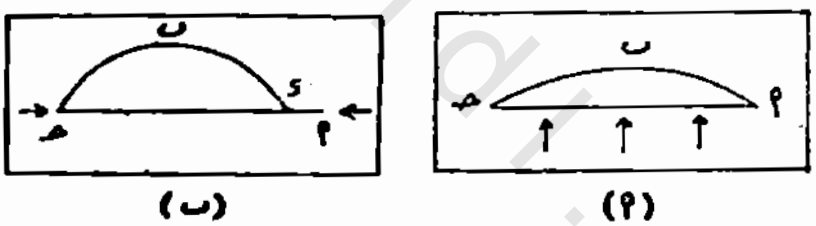
(ب) الطبقة بعد إزاحتها على مستويات الفواصل

(حـ) تصبح الطبقة موازية تقريباً للفواصل نتيجة الاحتكاك

(د) نشأة الطية نتيجة استمرار الطبقة

وتحت ظروف التشوه الشديد للصخور فإن المرحلة الأولى قد تؤدى إلى الطى بالثنى أو الطى الانسيابى ، ويعقب ذلك نشأة كسور متقاربة من بعضها البعض وهذه تؤدى بالتالى إلى الطى بالقص (الانفصامى) . وهناك اعتقاد بأن الطيات الانفصامية قد نشأت بهذه الطريقة .

٤ ـ **الطيات الناشئة عن الحركات الرأسية** : إن الحركات الرأسية التفاضلية التى لا يصحبها تشققات أو كسور ، مثل تداخل كتلة نارية على شكل لاكوليث أو ارتفاع أنبوبة ملحية إلى أعلى ، قد ينشأ عنها طيات بالقشرة الأرضية فى شكل (٨١ ـ ا) إذا كانت طبقة طولها الأصلى (ا حـ) ثم تقوست على شكل قبة نتيجة تعرضها لضغوط رأسية ، فإن النقطتين ا ، حـ تحتفظان بمكانهما ونتيجة لذلك تتقوس الطبقات مكونة القبة (ا ، ب ، حـ) أى أن الطبقات تتعرض للشد من سطحها العلوى مكونة قبواً أو طية محدبة دون أن تتحرك نهايتا الطبقة من مكانهما الأصلى .



(شكل ٨١)
طية ناتجة بالحركات الرأسية
(ا) رفع الغطاء نتيجة تداخل كتلة على شكل قبة
(ب) طية ناتجة بالثنى

الظروف الملائمة لنشأة الطيات

تتكون الطيات بالمناطق التى تتأثر فيها الصخور بالضغط والإجهادات الناشئة عن الحركات الأفقية وحيث توجد طبقات أفقية رفيعة وبها عدسات أو مكتنفات من صخور لدنة بكميات كبيرة . وهذه الظروف المناسبة توجد فى الأحواض الترسيبية العظيمة والتى تسمى جيوسنكلين وتنشأ بها طيات متعددة الأنواع على نطاق إقليمى شاسع . والجيوسنكلين عبارة عن حوض ترسيبى عظيم يمتد على نطاق إقليمى ويصل طوله لآلاف الكيلومترات أما عرضه فيبلغ مئات الكيلومترات ، ويتراوح سمك الرواسب به من ٣ إلى ١٥ كيلومتراً . والرسوبيات التى تتجمع فى الجيوسنكلين تكون ذات ميل بسيط ، وإذ تعرضت هذه الرواسب السميكة لضغوط أفقية موازية تقريباً لسطح الأرض فإنها تؤثر على الطبقات المائلة وتعمل المركبة الرأسية لهذه الضغوط والإجهادات على طى الطبقات فى مساحات شاسعة . وفى بعض الأحوال قد تنشأ الطيات على جانبى الجيوسنكلين نتيجة انزلاق الرواسب على القاع الذى يتكون من صخور أكثر صلابة من الصخور الرسوبية ويصاحب عملية الطى ظواهر جيولوجية أخرى مثل عملية تحول الصخور الرسوبية إلى صخور متحولة ، وكذلك تداخل الصهارة فى الصخور الرسوبية مكونة متداخلات كبيرة من صخور جرانيتية قد تكون فيما بعد سلاسل للجبال .

وقد تتكون الطيات على نطاق محلى صغير تحت ظروف معينة نذكر منها على سبيل المثال :

(ا) تتكون الطيات فى مواضع الضعف بالصخور حيث يكون سمك بعض الطبقات صغيراً .

(ب) تتكون الطيات فى حالة وجود عدسات من صخور لدنة مثل الصلصال والطين الصفحى بداخل صخور قوية .

(حـ) قد تتكون طيات ثانوية إذا وجدت طية كبيرة فى الصخور لدرجة أنه من الأيسر نشأة طية أخرى بدلا من زيادة حجم الطية الأصلية بالصخور.

٩ – ميكانيكية القباب الملحية :

أهم العوامل التى يجب توفرها لنشأة القباب الملحية هو وجود طبقة من الرواسب الملحية ذات سمك كبير ضمن مجموعة من الصخور الرسوبية مغطاة برواسب سميكة . وبما أن سمك الرواسب التى فوق طبقة الملح غير منتظم فإنه تنشأ على طبقة الملح ضغوط تفاضلية ويؤدى الاختلاف فى الكثافة بين الملح والصخور المحيطة إلى صعود الملح إلى أعلى أو هبوط الطبقات المحيطة إلى أسفل وكلما زاد ارتفاع الملح زادت الضغوط الواقعة على الجانبين مما يساعد على ارتفاع الملح لمسافات أكبر مكوناً أنبوبة ملحية . وتتقوس صخور الغطاء التى قد تتعرض لقوى الشد مما يؤدى إلى نشأة فوالق بها . وإذا وصلت أنبوبة الملح إلى مستوى الماء الأرضى فإنها تتوقف عن الإرتفاع وقد تذيب المياه الملح ثم تترسب المواد غير المذابة مع الصخور المكونة لغطاء القبة الملحية والتى يكون تتابعها من أعلى إلى أسفل ، كالسيت ثم جبس ثم أنهيدريت .

١٠ – ميكانيكية الفوالق :

تختلف الشقوق أو الفواصل التى تنشأ بالصخور نتيجة تعرضها للإجهادات من مجموعة واحدة تكاد لا ترى إلا بالمجهر إلى مجموعات لا نهائية تتكون منها الفوالق التى قد تمتد مئات الكيلومترات وتصل إزاحتها الرأسية مئات الأمتار .

وتنقسم الشقوق الهامة فى الصخور تبعاً لنوع الإجهادات المسببة لها إلى نوعين هما :

١ – شقوق تنشأ عن إجهادات الشد أو الضغط .

٢ – شقوق تنشأ عن إجهادات القص .

ويتميز النوع الأول من الشقوق بحركة الحوائط على جانبي الشق بعيداً عن بعضها البعض ولا يطلق على مثل هذه الشقوق عادة فى المرحلة الأولى لتكوينها الفوالق ولكنها تعرف عادة بالفواصل ، وهذا لا يمنع امتداد هذه الشقوق واتساعها بعد ذلك وازدياد حركة الكتل الصخرية فى اتجاه عمودى على اتجاه الشقوق مما يؤدى فى نهاية الأمر إلى تكوين الفوالق .

أما النوع الثانى من الشقوق فإن حركة الحوائط على جانبى الشق تكاد تكون موازية لنفس اتجاه الشق ، كما أنه لا يحدث فى مثل هذا النوع من الشقوق حركة عمودية للحوائط على اتجاه الشق . ويزداد احتمال تشوه الصخور نتيجة لسلوكها اللدن عند تعرضها لإجهادات القص مما يؤدى إلى انتشار هذا النوع من الشقوق دون زيادة فى شدة الاجهادات المؤثرة على الصخور .

ونظراً للصعوبات التى تصادف كل المحاولات التى تعترض التفسير الميكانيكى لأسباب نشأة الفوالق فى الصخور فقد افترضت بعض الصفات المثالية للصخور وسلوكها تحت تأثير الإجهادات ، وأهم هذه الفروض ما يأتى :

(ا) أن تكون الصخور متماسكة :

يمكن اعتبار معظم أنواع الصخور دقيقة الحبيبات متماسكة وبالرغم من عدم صحة هذا الافتراض إلا أنه يمكن من الوجهة العملية إهمال الخطأ الناتج من ذلك وخاصة فى حالة الكتل الصخرية الضخمة كبيرة الحجم والتى تؤثر عليها الإجهادات التى تؤدى إلى نشأة الفوالق .

(ب) أن تكون مادة الصخر متجانسة ومتشابهة الخواص :

وهذا يعنى أن خواص وسلوك الصخر يكون واحداً فى جميع أجزائه وفى جميع الاتجاهات . وبرغم أن هذا الافتراض لا ينطبق على كثير من أنواع الصخور إلا أن التجارب العملية أثبتت أنه يمكن إهمال الخطأ الناتج من هذا الإفتراض بالنسبة لمعظم أنواع الصخور .

(ح) مبدأ التكافؤ :

طبقاً لهذا الافتراض فإنه إذا أثرت مجموعة من القوى على كتلة من الصخور المرنة فإن التشوه الذى يحدث فيها يكافئ مجموع التشوهات التى تسببها كل قوة من هذه المجموعة على حدة على نفس الكتلة وبأى ترتيب . ويمكن دراسة الخواص الميكانيكية للصخور وتحديد مقدار الاجهادات المؤثرة ، بإجراء اختبارات على عينات من هذه الصخور حتى تتصدع أو تنهار . وتجرى التجارب عادة تحت ظروف قياسية معينة ، وذلك لأن نتائج الاختبارات تعتمد على شكل العينة ، ونوع وزمن تأثير الإجهادات عليها أى معدل الإجهاد ، ودرجة الحرارة وغير ذلك من العوامل التى ينبغى تسجيلها عند إجراء هذه الاختبارات المعملية .

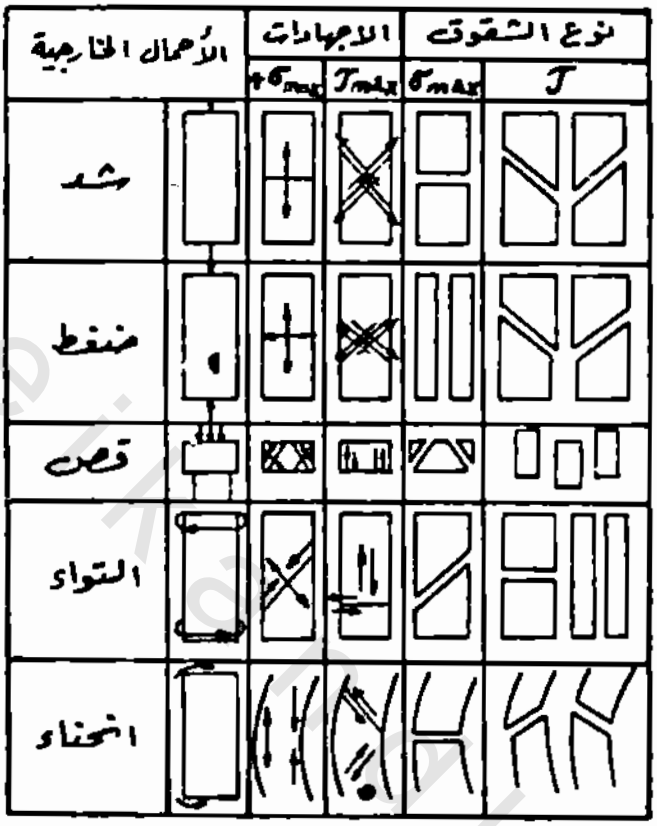
١١ – العلاقة بين الإجهادات المؤثرة على الصخور وأنواع الفرالق :

تختلف طبيعة التشوه الذى يحدث للصخور قبل تصدعها أو انهيارها ويوضح الشكل (٨٢) العلاقة بين اتجاه الشقوق التى قد تحدث فى الصخور قبل انهيارها ومقدار واتجاه الإجهادات المسببة لها . وفيما يلى وصف مختصر لبعض الحالات الشائعة للإجهادات التى قد تتعرض لها الصخور وتنشأ عنها الفوالق مع افتراض أن خواص الصخور وسلوكها فى جميع هذه الحالات يكون مثاليًا .

أولاً – الإجهادات العمودية المسببة للفرالق :

الحالة الأولى :

نفرض أن كتلة صخرية على عمق معين من سطح الأرض تعرضت للإجهادات العمودية (σx , σy , σz) فى اتجاه المحاور الكارتيزية . فإذا كانت مركبة الإجهادات العمودية فى الاتجاه الرأسى (σz) أقل مركبات الإجهادات

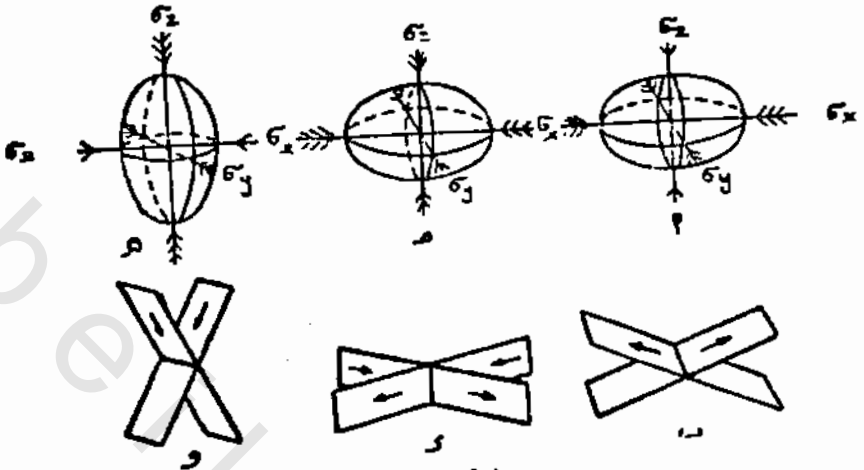


(شكل ٨٢)

العلاقة بين اتجاه الشقوق ومقدار الاجهاد

مقداراً وتليها المركبة الأفقية (σ_y) المؤثرة فى الاتجاه شمالاً جنوباً وأكبرها مقداراً المركبة الأفقية (σ_x) المؤثرة فى الاتجاه شرقاً — غرباً . ويوضح الشكل (٨٣ — ا) بيضاوى الإجهادات ممثلا فيه هذه المركبات .

وعندما يزداد مقدار مركبة الإجهاد الأفقى (σ_x) بحيث يكون الفرق بينه وبين أقل مركبات الإجهاد مقداراً (σ_z) أى ($\sigma_x - \sigma_z$) يزيد عن قوة تحمل الصخور تنشأ عند ذلك مجموعتان من الشقوق فى الصخر ويلاحظ أن اتجاه مستويات هذه الشقوق توازى المحور ($y - y$) وتصنع زاوية مقدارها حوالى ٣٠° مع المحور ($x - x$) كما هو موضح بالشكل (٨٣ — ب) .



(شكل ٨٣)
الإجهادات العمودية المسببة للفوالق

ويمكن التعبير عن ذلك باستخدام المصطلحات الجيولوجية كما يلى :
توجد بالصخور مجموعتان من الشقوق تتجه خطوط مضارب مستوياتها فى الاتجاه شمال ــ جنوب بينما تكون زاوية ميل المجموعة الأولى ٣٠° شرقاً والثانية ٣٠° غرباً . ويتضح ذلك من الشكل (٨٣ ــ ب) كما يتضح أيضاً أنه يوجد فى المجموعتين من الشقوق قوى تحاول إزاحة الحائط العلوى بحركة نسبية فوق الحائط السفلى مما يؤدى إلى نشأة الفوالق فإذا تحرك الحائط العلوى إلى أعلى أطلق على الفالق الناتج فالق معكوس ، أما إذا تحرك الحائط العلوى إلى أسفل نتج عن ذلك فالق عادى .

الحالة الثانية :

إذا تصورنا نفس كتلة الصخر تقع تحت تأثير الإجهادات العمودية (σz , σy , σx) وكانت أكبر هذه الإجهادات مقداراً (σx) فى اتجاه المحور الأفقى ($x - x$) الذى يتجه شرق ــ غرب وتليها فى المقدار المركبة

(σz) فى اتجاه المحور الرأسى ($z-z$) وأقلها مقداراً (σy) . فى اتجاه المحور الأفقى ($y-y$) الذى يتجه شمال – جنوب كما هو موضح بالشكل (٨٢ – حـ) . فإذا زاد الفرق بين أكبر مركبة للإجهادات وأصغرها أى ($\sigma_z - \sigma_y$) عن قوة تحمل الصخور يلاحظ تكون شقوق فى الصخر فى الاتجاه الرأسى أى فى اتجاه المحور ($z-z$) وتتكون كذلك فى هذه الحالة مجموعتان رأسيتان من الشقوق تتجه إحداهما شرق شمال شرق – والأخرى فى الاتجاه غرب – شمال غرب كما هو موضح بالشكل (٨٣ – و) . فإذا تكون الفالق فى اتجاه المجموعة الأولى يطلق عليه فالق إنزلاقى مضربى متجه لليمين أما إذا تكون فى اتجاه المجموعة الثانية يطلق عليه فالق إنزلاقى مضربى متجه لليسار .

الحالة الثالثة :

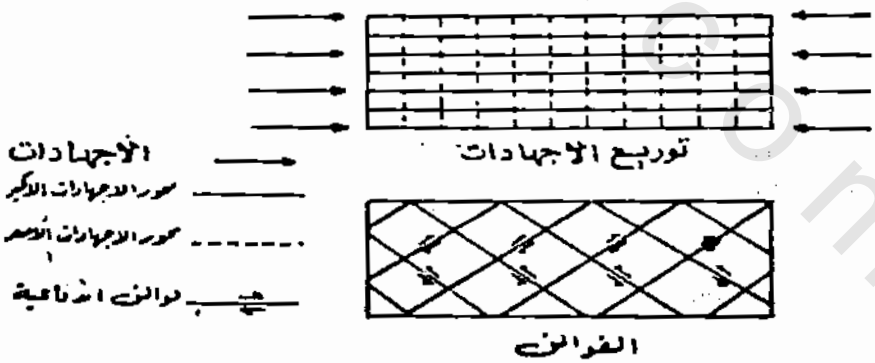
إذا تصورنا نفس كتلة الصخر تقع تحت تأثير الإجهادات العمودية ($\sigma x, \sigma y, \sigma z$) بحيث تكون أكبر هذه الإجهادات (σz) فى الاتجاه الرأسى وتليها فى المقدار المركبة (σy) فى اتجاه المحور ($y-y$) الذى يتجه شمالا – جنوبا وأقلها مقداراً المركبة (σx) فى اتجاه المحور ($x-x$) الذى يتجه شرق – غرب وذلك كما هو موضح بالشكل (٨٣ – هـ) . عندما يزداد الفرق بين أكبر إجهادات وأصغرها أى ($\sigma x - \sigma z$) عن قوة تحمل الصخور تظهر بها مجموعتان من الشقوق التى تتجه مضارب مستوياتها فى الاتجاه شمال – جنوب وتميل إحداهما بزاوية ٦٠° على الاتجاه الشرقى والأخرى بزاوية حوالى ٦٠° على الاتجاه الغربى كما هو موضح بالشكل (٨٣ – و) فإذا حدثت الفوالق بالصخور نتيجة مثل هذه التشققات أطلق عليها فوالق عادية ويتحرك الحائط العلوى فى مثل هذه الفوالق إلى أسفل بالنسبة للحائط السفلى .

وجدير بالذكر أن اختيار اتجاه المحاور الأفقية فى الحالات السابق شرحها بحيث يتجه المحور ($x-x$) فى اتجاه الشرق والغرب والمحور ($y-y$) فى اتجاه الشمال والجنوب لم يكن إلا افتراضاً يسهل تصور العلاقة بين الإجهادات المؤثرة

على الصخور واتجاه الشقوق الناتجة عنها . وبالطبع يمكن أن تتخذ الإجهادات الرئيسية فى الاتجاه الأفقى أى اتجاهات أخرى ما دامت متعامدة مع بعضها البعض ، وعلى ذلك فإن خطوط مضرب الفوالق يمكن أن يكون فى أى اتجاه ويعتمد هذا الاتجاه على اتجاهات محاور الإجهادات الرئيسية المؤثرة على الصخر وكذلك قد تختلف مقادير مركبات الإجهادات الرئيسية بالنسبة لبعضها البعض وينتج عن ذلك حالات أخرى كثيرة تتفق مع الحالات التى سبق شرحها فى اختلاف مقدار مركبات الإجهادات الرئيسية تبعاً لاتجاه المحاور الرئيسية الثلاثة .

ثانياً — إجهادات القص المسببة للفوالق :

الحالة الأولى : إذا افترضنا أن كتلة صخرية تعرضت لتأثير الإجهادات الأفقية فقط وأن مركبة الاجهاد الكبرى (σx) فى الاتجاه ($x - x$) الذى يتجه شرق — غرب ، والصغرى (σy) فى الاتجاه ($y - y$) الذى يتجه شمال جنوب وذلك كما هو موضح بالشكل (٨٤) . وإذا فرضنا أن قيمة هذه الإجهادات لاتتغير بتغير العمق الذى توجد عليه بالنسبة لسطح الأرض .



(شكل ٨٤)

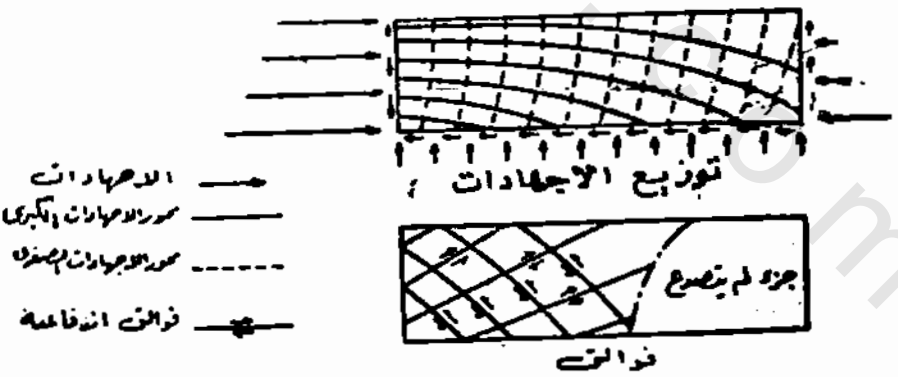
الحالة الأولى لإجهادات القص المسببة للفوالق

عندما يزداد مقدار الفرق بين مركبتى الإجهاد الكبرى والصغرى ($\sigma_x - \sigma_y$) عن تحمل الصخور تحدث بها تشققات كالموضحة بالشكل (٨٤) ويلاحظ أن هذه التشققات رأسية وتميل حوالى ٣٠° مع اتجاه المحور ($x-x$) .

فى المستوى الأفقى . وفى هذه الفوالق يتحرك الحائط العلوى إلى أعلى بالنسبة للحائط السفلى ويعرف هذا النوع بالفوالق المعكوسة أو بالفوالق الاندفاعية .

الحالة الثانية : إذا افترضنا أن كتلة الصخر الموضحة بالحالة الأولى قد ازداد عليها تأثير مركبة الإجهاد (σ_x) وأن هذه الزيادة تقل من الجانب الأيسر إلى الأيمن تدريجياً وتؤثر أسفل كتلة الصخر كما هو موضح بالشكل (٨٥) . وعندما تزداد قيمة الإجهادات عن تحمل الصخور تظهر بها الشقوق .

ولما كان مقدار الإجهادات يختلف من مكان إلى آخر فإن اتجاه الشقوق التى تظهر فى الصخور يختلف كذلك من مكان لآخر وذلك كما هو موضح بالشكل (٨٥) ، حيث يوجد بالجانب الأيسر من الشكل مجموعتان من الشقوق ويلاحظ أن المجموعة الأولى تميل على محور الإجهادات الرئيسية بزاوية مقدارها حوالى ٣٠° إلى الغرب أما المجموعة الأخرى فتميل بزاوية حوالى ٣٠° إلى الشرق .



(شكل ٨٥)

الحالة الثانية لإجهادات القص المسببة للفوالق

ويختلف ميل هاتين المجموعتين من الشقوق فى الجانب الأيمن، فيلاحظ أن المجموعة الأولى تميل بزاوية أقل حوالى ٢٠° ، بينما يزداد ميل المجموعة الأخرى فيصل حوالى ٤٠ درجة إلى الشرق . ويطلق على الفوالق التى تتكون فى مثل هذه الظروف فوالق اندفاعية . ويتضح أيضاً من الشكل(٨٥) أن كتلة الصخور لم تتأثر جميعها بدرجة واحدة فتظهر الشقوق فى جزء منها ، بينما لا يتصدع الجزء المجاور كما يوجد بين الجزءين حدود فاصلة يتوقف شكلها على عدة عوامل أهمها الخواص الطبيعية والميكانيكية للصخر ، ومقدار واتجاه الإجهادات المؤثرة وزمن تعرض الصخور للإجهادات وغير ذلك من العوامل .

الحالة الثالثة : لا تختلف هذه الحالة عن سابقتها من ناحية تعرض كتلة الصخر للإجهادات التى تقل من الجانب الأيسر إلى الجانب الأيمن ولكن فى هذه الحالة يتبع التغير دالة أسية كما هو مبين بالخط البيانى أسفل الشكل (٨٦) . ويتضح أنه فى هذه الحالة أيضاً تتكون مجموعتان من الشقوق تتجه إحداهما حوالى ٣٠° مع محور الإجهادات الرئيسية إلى الشرق والأخرى تتجه حوالى ٣٠° مع نفس المحور إلى الغرب . ويلاحظ فى هذه الحالة أن الجزء الأيمن من كتلة الصخور لم يتصدع تحت تأثير الإجهادات على عكس الجزء الأيسر الذى تنشأ به المجموعتان من الشقوق التى سبق ذكرها وكذلك ظهر بالشكل الحدود الفاصلة بين الجزء الذى لم تظهر به الشقوق والجزء الذى لم يتأثر من كتلة الصخور .

الحالة الرابعة : إذا فرضنا أن كتلة الصخر تعرضت لمجال إجهاد كالموضح بالشكل (٨٧) الذى يتميز بتغير قيمة مركبات الإجهاد من مكان لآخر . ويوضح الشكل (٨٧) التوزيع البيانى للإجهادات باستخدام الاختلاف فى أطوال الأسهم . ويظهر من الشكل (٨٧) الأجزاء التى تصدعت تحت تأثير الإجهادات وظهرت بها مجموعتا الشقوق مختلفة الميل والأجزاء التى لم تتصدع ،

كما يظهر فى الشكل الحدود التى تفصل بين هذه الأجزاء بعضها عن بعض ويطلق على الفوالق التى تتكون فى مثل هذه الظروف من الإجهادات فوالق عادية كبيرة الميل . وهكذا يتضح من الحالات السابقة أنه يمكن الاعتماد على الدراسات الحقلية للفوالق والتى تبين أنواعها المختلفة والتفسير الميكانيكى لأسباب نشأة هذه الفوالق .

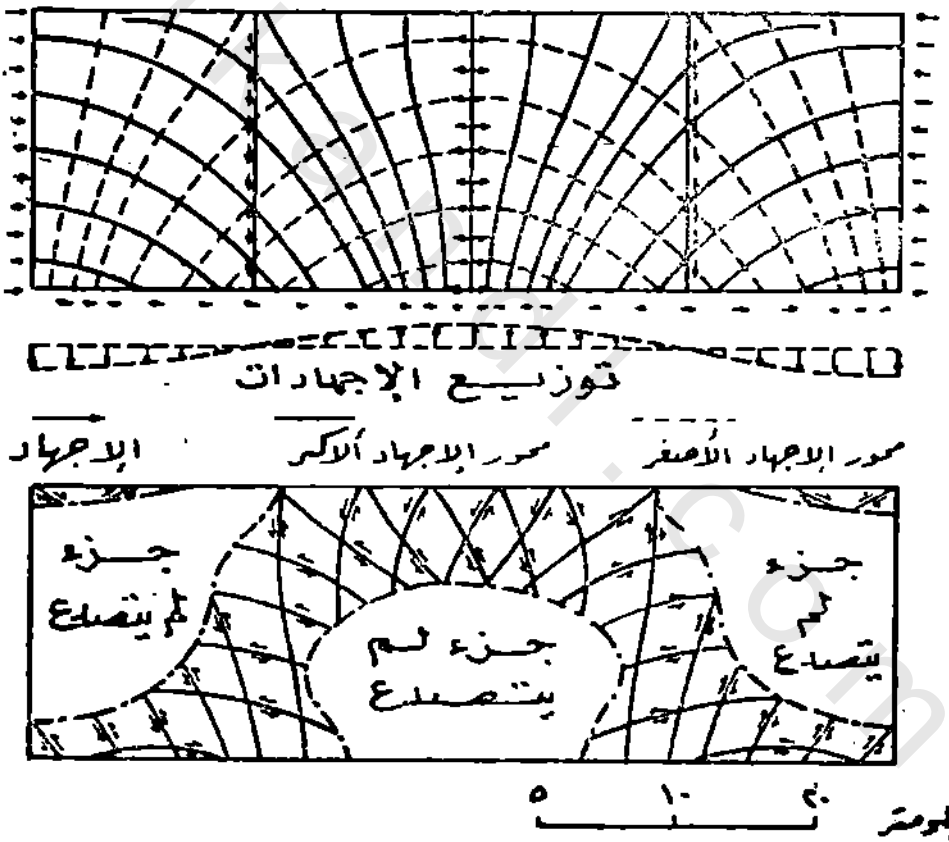
١٢ – الأخطاء الناشئة عن الافتراضات المثالية لسلوك الصخور ومجال الإجهادات :

سبق أن افترضنا توفر بعض الظروف المثالية لكى يسهل تمثيل مجالات :

(شكل ٨٦)

الحالة الثالثة لإجهادات القص المسببة الفوالق

الإجهادات من ناحية توزيعها المنتظم ، كما افترضنا أن سلوك الصخور تحت تأثير هذه الإجهادات يكون مثاليًّا من حيث تشوهها ثم تصدعها وذلك لكى نتبين العلاقة بين الإجهادات المؤثرة على الصخور وطريقة سلوكها حتى تتكون بها الشقوق أو الفواصل التى تؤدى فى النهاية إلى نشأة الفوالق . ولكن هذه الحالات المثالية نادراً ما توجد فى الطبيعة لأن مجال الإجهادات فى صخور القشرة الأرضية يتغير باستمرار كما أن السلوك الميكانيكى للصخور غالباً ما يكون غير منتظم ، ولذلك ينبغى أن يؤخذ فى الاعتبار الأخطاء التى يمكن أن تحدث أثناء التفسير الميكانيكى لأسباب نشأة الفوالق ، كما أنه من المعلوم أن صخور



(شكل ٨٧)

الحالة الرابعة لاجهادات القص المسببة للفوالق

القشرة الأرضية غير متجانسة وليست متشابهة الخواص فى الاتجاهات المختلفة مما يؤثر على عدم انتظام اتجاه الشقوق التى تنشأ بالصخور وبالتالى يؤثر ذلك على أنواع الفوالق . فإذا ثبت نظريًا على سبيل المثال أن اتجاه الشقوق فى كتلة صخرية تتكون تحت تأثير إجهاد معين تكون فى الاتجاه الأفقى فإن عدم تجانس الصخر واختلاف زاوية الميل من مكان لآخر يؤثر على الاتجاه الحقيقى الذى تكون عليه هذه الشقوق فى الطبيعة .

ويختلف أيضاً توزيع الإجهادات فى الصخور باختلاف عدد الشقوق أو الفواصل التى توجد بها ، فبينما قد لا تؤثر الشقوق صغيرة الحجم وقليلة العدد على الصفات الميكانيكية للصخور إلا أن زيادة عدد هذه الشقوق قد يؤدى إلى تغير صفاتها وبالتالى تغير سلوكها تحت تأثير الإجهادات . .
ولقد افترضنا كذلك ، عند مناقشة الحالات المثالية السابقة ، أن الصخور لينة إلى حد ما فهى تتشوه أولا ثم تتصدع وفى هذه الحالة لم نأخذ فى الاعتبار أن الصخور قد تسلك سلوكًا لدنا قبل انهيارها . كذلك افترضنا فى الحالات السابقة أن الشقوق أو الفواصل تتكون فى الصخور تحت تأثير إجهادات القص فقط ، بينما لم نأخذ فى الاعتبار احتمال أن تتكون شقوق بالصخور ناتجة من إجهادات الشد وقد يعزى إليها السبب فى نشأة الفوالق .

مما تقدم يتضح أنه لاتوجد للآن قاعدة بسيطة يمكن تطبيقها مباشرة لتحديد طبيعة مجال الإجهادات التى تؤدى إلى نشأة الفوالق فى الصخر . ولكن يمكن الحصول على معلومات كثيرة عن هذه الإجهادات بمراجعة التاريخ الجيولوجى لمنطقة الفالق ودراسة العلاقات المتبادلة بين الفوالق وما يجاوره من تراكيب جيولوجية على امتداد مساحة كبيرة ، وإلى جانب ذلك اتخاذ بعض الافتراضات المثالية التى تساعد كثيراً فى تفسير السلوك الميكانيكى للصخور تحت تأثير الإجهادات والتى تؤدى إلى نشأة الفوالق .