الفصل الرابع

ميكانيكا الصخور

يساعد علم ميكانيكا الصخور الذى يختص بدراسة سلوك الصخور تحت تأثير الإجهادات المختلفة فى حل كثير من المشكلات الهندسية التى تصادف المهندسين عند إقامة المنشآت الهندسية فى الصخور مثل الأنفاق والسدود والخزانات والمخابئ والقواعد العسكرية والممرات المنجمية اللازمة لاستخراج الخامات المعدنية وغير ذلك.

تقسيم الصخور

لقد قسمت الصخور من الناحية الجيولوجية تبعًا لنشأتها إلى نارية، ورسوبية ومتحولة. وأحيانًا تصنف الصخور على أساس العصور التى تكونت فيها، أو طبقًا لصفاتها وتراكيبها الجيولوجية ولكن هذه الطرق المختلفة لتصنيف الصخور لا تأخذ فى الاعتبار خواصها الطبيعية والميكانيكية، ولذلك لجأ المهندسون إلى تقسيم الصخور تبعًا لاختلاف سلوكها تحت تأثير الإجهادات وكذلك تبعًا لطبيعة المنشآت المقامة فى الصخور.

(جدول ١٨) التصنيف الهندسى للصخور

الصخور

(أ) التقسيم للأغراض التعدينية

صخور قوية — صخور ضعيفة

١ – صخور نارية مرنة مثل الطين

٢ – صخور نارية لدنة مثل الطين الصفحى

٣ – صخور طبقية

(ب) التقسيم لإنشاء الأنفاق

١ صخور متماسكة

٢ – صخور طبقية

٣ – صخور بها فواصل

٤– صخور كتلية

٥ – صخور مهشمة

٦ – صخور لينة

١/٦ – صخور انسيابية

٢/٦ – صخور انتفاخية

٣/٦ – صخور قشرية

٤/٦ – صخور انضغاطية

٥/٦ – صخور زاحفة

(جـ) التقسيم تبعًا لميكانيكية التشوه

١ صخور شبه مرنة التشوه

٢ – صخور لزجة مرنة

٣ – صخور لزجة لدنة

٤ – صخور لدنة

وأهم هذه الطرق الموضحة فى جدول (١٨) هى:

(أ) التقسيم التعدينى للصخور:

تصنف الصخور تبعًا لهذا التقسيم إلى نوعين رئيسيين:

أولاً - الصخور القوية Competent Rocks

وتطلق على الصخور التى يمكن إنشاء فتحات بها دون حاجة إلى دعائم صناعية لحمايتها وتنقسم بدورها إلى:

١ - صخور نارية مرنة:

وتشمل الصخور النارية الكتلية المتجانسة ذات الخواص المتشابهة.

٢ - صخور نارية لدنة:

وهى الصخور النارية التى تعانى من خاصية الزحف عند مستويات الإجهاد المنخفضة.

٣ - الصخور الطبقية:

وهى الصخور الرسوبية المتجانسة ذات الخواص المتشابهة والتى يكون سمكها أقل من عرض الفتحة المنشأة بها.

ثانيًا - الصخور الضعيفة Incompetent Rocks

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

ويلاحظ أن التقسيم التعدينى للصخور لم يتعرض لخواص الصخور من حيث ميكانيكية الانهيار.

(ب) تقسيم الصخور بغرض إنشاء الأنفاق:

يتم تصنيف الصخور بالنسبة لهذا التقسيم إلى الأقسام الآتية:

١ - المتماسكة:

وهى الصخور التى لا تحتوى على أية فواصل ولم تتأثر بالحركات الأرضية.

٢ - الصخور الطبقية:

وهى الصخور التى تقل قوة تحملها للإجهادات المختلفة عند مستويات التطابق وتتميز بالخواص الاتجاهية..

obeikandi.com

٣ - الصخور ذات الفواصل:

وهى الصخور التى تحتوى على فواصل التحمت مع بعضها بفعل المواد اللاحمة.

٤ - الصخور الكتلية:

وهى الصخور التى تعرضت للحركات الأرضية وحدث بها بعض الفواصل ولكنها لم تلتحم مرة أخرى وظلت فى حالة انفصال.

٥ - الصخور المهشمة:

وهى الصخور التى تهشمت تحت تأثير الإجهادات المختلفة إلى قطع صغيرة وبدون حدوث تغيرات كيميائية لها.

٦ - الصخور الانسيابية:

وهى الصخور التى تحتوى على معادن لها خاصية الانسياب مثل بعض المعادن الصلصالية.

٧ - الصخور الانتفاخية:

وهى الصخور التى تحتوى على معادن لها خاصية الانتفاخ مثل بعض أنواع الصلصال.

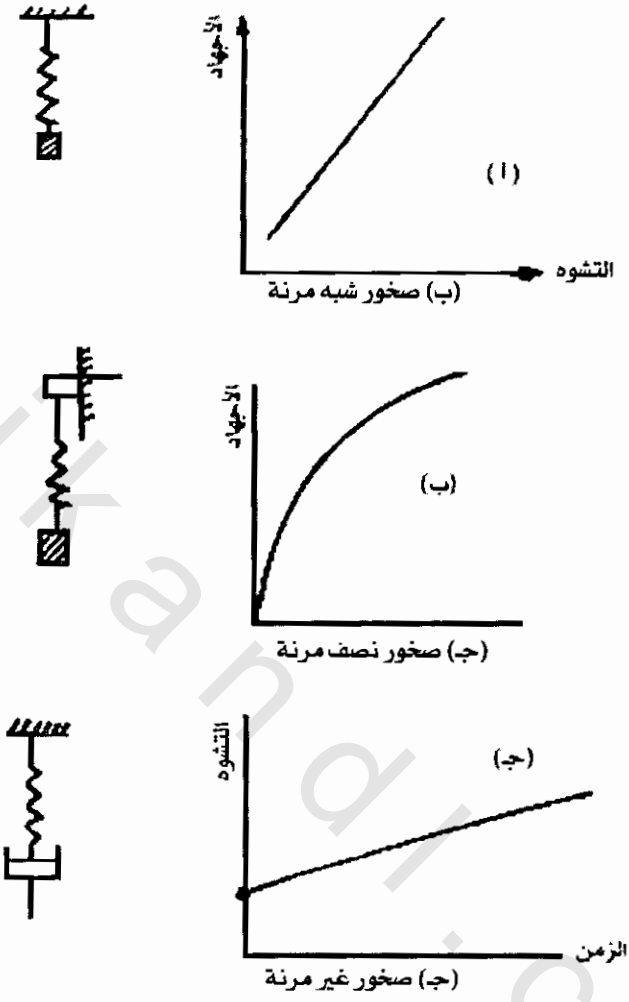
ويلاحظ أن هذا التقسيم لم يتعرض كذلك لخواص الصخور من حيث ميكانيكية الانهيار.

(جـ) تقسيم الصخور طبقًا لميكانيكية التشوه:

تنقسم الصخور تبعًا لهذا التقسيم إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

١ - الصخور شبه المرنة Quasi – Elastic Rocke

وتضم جميع أنواع الصخور القوية «الكتلية والطبقية» التى تتميز بمعاملات مرونة عالية تتراوح بين ٦ - ١١ × ١٠^٥ كجم/سم^٢ وتتراوح قوة تحملها لإجهادات الضغط المحورية بين ١٠٠٠ - ٢٠٠٠ كجم / سم^٢. وغالبًا ما تكون العلاقة بين الإجهاد والانفعال فى هذا النوع من الصخور خطا مستقيمًا كما هو موضح بالشكل (٢٧ - أ).



(شكل ٢٧) التصنيف الميكانيكى للصخور.

٢ – الصخور نصف المرنة Semi-elasticx Rocks

وتضم جميع أنـواع الصخـور القويـة التى تتمـيز بمعامـلات مرونة متوسطة تتراوح بـين ٤ – ٧ × ١٠^{٥} كجم / سم^{٢}. وتتراوح قـوة تحمل هذه الصخور لإجهادات الضغط المحورية بـين ٥٠٠ –١٠٠٠ كجم / سم^{٢}. وغالبًا ما تكون العلاقة بين الإجـهاد والانفعـال فـى هـذا النـوع مـن الصخور منحنيًا كما هو موضح بالشكل (٢٧ – ب).

٣ - الصخور غير المرنة Non-elastic Rocke

وتضم جميع أنواع الصخور الضعيفة التى لا يزيد معامل مرونتها عن ٤ × ١٠^٥ كجم / سم^٢ وتقل قوة تحمل هذه الصخور لإجهادات الضغط المحورية عن ٥٠٠ كجم / سم^٢. وغالبًا ما يزداد مقدار تشوه هذا النوع من الصخور كلما زاد زمن تعرضها للإجهادات وذلك كما هو موضح بالشكل (٢٧ - جـ).

ويلاحظ أن هذا التقسيم يعتمد على نتائج التجارب المعملية للأنواع المختلفة من الصخور من حيث قوة تحملها لإجهادات الضغط المحورية ومعامل المرونة.

أنواع الإجهادات التى تتعرض لها صخور القشرة الأرضية:

تتعرض صخور القشرة الأرضية لإجهادات رأسية وأفقية وقاصة. ويرجع السبب فى نشأة هذه الإجهادات إلى العوامل الرئيسية الآتية:

١ - تأثير الحركات الأرضية العنيفة.

٢ - القوة الطاردة المركزية لدوران الأرض.

٣ - عوامل المد والجزر.

٤ - تأثير قوى الجاذبية الأرضية.

٥ - تأثير عوامل التآكل والتعرية.

٦ - التغيرات الطبيعية والكيمائية.

٧ - الضغط الناتج عن وزن طبقات الغطاء الصخرى.

تأثير الإجهادات على الصخور

عندما تتعرض الصخور لتأثير الأحمال الخارجية المتزنة والتى لا ينتج عنها حركة انتقالية أو دورانية، فإنها تعانى تغيرًا فى شكلها الأصلى أو فى حجمها أو فى الاثنين معًا ويطلق على هذا التغيير «التشوه».

وتعرف الإجهادات بأنها القوة الداخلية المؤثرة على وحدة المساحة فى نقطة معلومة من مقطع الصخر.

وتسلك أغلب أنواع الصخور سلوكًا مرنًا عندما تتعرض لقدر محدود من الإجهادات ولكن كثيرًا منها يتعرض فى بعض المناطق لإجهادات تزيد عن حدود المرونة بالنسبة لها ولذلك فإنها قد تسلك سلوكًا لدنًا قبل أن تنهار ويمثل (الشكل ٢٨) منحنى تقريبيا يوضح سلوك الصخور عندما تتعرض لإجهادات تزداد تدريجيًا من الصفر حتى تصل إلى نقطة الانهيار (التصدع) ويلاحظ أن الجزء الذى يبدأ من نقطة الأصل « o » وينتهى عند نقطة « x » يسلك فيه الصخر سلوكًا مرنًا حيث يتناسب التشوه المرن «الانفعال» تناسبًا طرديًا مع الإجهادات التى تؤثر على الصخر.

وتسمى العلاقة بين الإجهادات والانفعالات فى هذه الحالة علاقة خطية ويعبر عنها بالمعادلة.

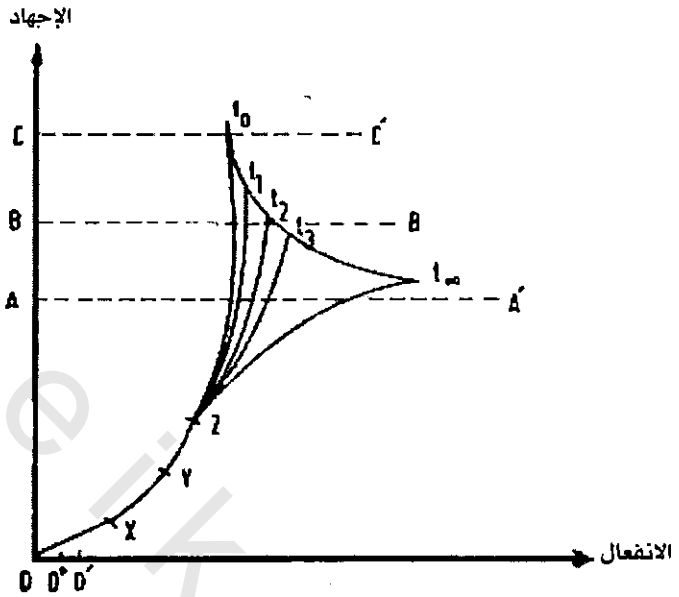
$$\sigma_x = E\,(\epsilon_x)$$

حيث (σ_x) الإجهاد العمودى فى اتجاه المحور (x)

(E) معامل ينج أو معامل المرونة (x)

(ϵ_x) مقدار التشوه فى اتجاه المحور

وبالرغم من أن نظرية المرونة تعتبر من أهم الأسس النظرية التى تستخدم لتوضيح السلوك الميكانيكى للصخور فإنه ينبغى ملاحظة الشروط التالية اللازم توافرها فى الصخور حتى يمكن تطبيق معادلات المرونة عليها.



جدول الإجهادات والتشوهات فى الصخور		
سلوك الصخور		
السلوك المرن الخطى	OX	الأولى
السلوك المرن المنحنى	XY	
السلوك اللدن	YZ	الزحف الثانوى
السلوك الانسيابى	ZI ∝	الزحف الثلاثى

شكل رقم (٢٨): حدود الإجهادات فى الصخور.

١ – استمرار المادة الصخرية أى عدم وجود تشققات أو فوالق فى الصخور تمنع اتصالها اتصالا مستمرا سواء كانت معرضة للإجهادات أم غير معرضة.

٢ – أن تكون الصخور أيزوتروبية أى متجانسة ومتماثلة فى خواصها فى الاتجاهات المختلفة.

٣ – عدم زيادة قيمة الإجهادات المؤثرة على الصخور عن حدود ثوابت المرونة الخاصة بها.

ويبدو لأول وهلة أن هذه الشروط تجعل من تطبيق معادلات المرونة على الصخور غير ممكن، إلا أن كثيرًا من التجارب المعملية التى أجريت على بعض أنواع الصخور القوية مثل الجرانيت أثبتت أنها تخضع لقوانين المرونة وهى واقعة تحت تأثير إجهادات كبيرة نسبيًا تصل فى بعض الأحيان إلى نقطة الانهيار، كما أنه يمكن عمليا إهمال الخطأ الناتج من عدم تجانس الصخور وتشابهها، فإذا ازدادت الإجهادات عن حد التناسب الخطى نلاحظ أن المنحنى يزداد ميله ولذلك نحتاج إلى إجهادات أكبر لنحصل على زيادة فى الانفعال ويستمر هذا السلوك فى المنحنى (YX) ويلاحظ أن سلوك الصخور فى هذه المرحلة سلوك مرن بمعنى أنه إذا زال الإجهاد يزول الانفعال تمامًا دون أن يترك أى أثر لتغيير يكون قد حدث فى الشكل الأصلى للصخور ويطلق على النقطة (Y) حد المرونة. ويحدث التشوه المرن بصخور القشرة الأرضية نتيجة سريان الموجات الزلزالية ومن البديهى أن مثل هذه الإجهادات اللحظية عالية القيمة لا تسبب نشأة تغييرات أو تراكيب دائمة بالصخور.

فإذا استمرت الزيادة فى الإجهادات عن حد المرونة (Y) فقد تسلك الصخور سلوكًا جديدًا بين النقطتين (Y, Z) ويتميز هذا السلوك بزيادة التشوه كلما زاد مقدار الإجهادات، وإذا زالت الإجهادات المؤثرة على الصخر فإنه لا يعود إلى شكله الأصلى مرة أخرى. أى إنه بعد زوال الإجهادات المؤثرة على الصخر لا يعود المنحنى إلى نقطة (O) ولكنه ينتقل إلى نقطة أخرى ($\bar{O}$) تبعد قليلا عن النقطة (O) على محور التشوهات.

وإذا ترك الصخر فترة زمنية قد يزول عنه جزء من التغيير الذى طرأ عليه ويبقى جزء آخر به وتوضح النقطة ($\bar{O}$) على المنحنى مقدار التشوه الدائم أن المتبقى (Residual Strain) الذى يبقى فى الصخر بعد زوال الإجهادات المؤثرة عليه. ويطلق على سلوك الصخر فى هذه المرحلة السلوك اللدن. وتنشأ عن هذا السلوك تراكيب دائمة فى صخور القشرة الأرضية مثل الطيات وتتعرض الطبقات الرسوبية بصفة تكاد تكون دائمة لعمليات الطى بالإضافة إلى انزلاق بعض الطبقات الواحدة تلو الأخرى فى بعض الأحيان وخاصة فى حالة الصخور التى تسلك سلوكًا انسيابيا قبل أن تنهار.

فإذا فرضنا أن الصخر قد تعرض لإجهادات أكبر من النقطة (Z) فإنه يمكن ملاحظة أن التشوهات التى تحدث بالصخر ليست دالة للإجهادات فقط ولكنها دالة للزمن الذى تؤثر فيه هذه الإجهادات.

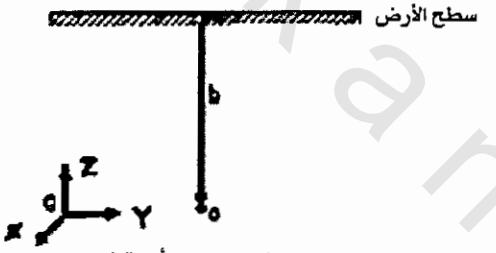
ويقال للصخور التى يزداد فيها مقدار التشوهات بزيادة زمن تأثير الإجهادات بأنها تسلك سلوكًا انسابيًا وتسمى أحيانًا هذه الظاهرة «زحف الصخور» وأخيرًا إذا زاد مقدار تشوه الصخر

عن قوة مقاومته الداخلية يؤدى إلى انهياره (تصدعه) على مستويات يختلف اتجاهها باختلاف مجال الإجهاد المؤثر. ويطلق على هذه المستويات مستويات الانهيار (التصدع) وينشأ عن مثل هذا السلوك الفوالق والفواصل والتشققات بالصخور.

أنواع الإجهادات الأولية فى صخور القشرة الأرضية

إذا فرضنا وجود قطعة من صخر مرن على شكل مكعب متناهى الصغر على عمق (h) من سطح الأرض (شكل ٢٩) ثم اتخذنا المحاور (OX,OY,OZ) بحيث تكون نقطة (O) هى أحد أركان المكعب وبحيث يمثل كل من (OX,OY) المحورين الأفقيين ويمثل (OZ) المحور الرأسى. فإذا فرضنا أن كثافة الصخر (Y) وفرضنا أن مقدار الجاذبية الأرضية منتظم خلال العمق (h) فإن مقدار الإجهادات فى الاتجاه الرأسى تساوى (σ_2).

حيث: $yh = \sigma_2$ وتدل الإشارة (−) على أن القوة الناتجة من هذا الإجهاد تؤثر من أعلى إلى أسفل. وإذا عوضنا عن المقدار (h -) بالمقدار (Z) يمكن إعادة كتابة المعادلة كما يلى:



شكل رقم (٢٩): الإجهادات الأولية فى الصخور.

$$\sigma_2 = Zy$$

ويحدث نتيجة هذا الإجهاد العمودى تشوهٌ (ε_2) فى الاتجاه الرأسى أى فى اتجاه المحور (Z)، كما يحدث أيضًا فى الاتجاه الأفقى (ε_x. ε_y) أى فى اتجاه كل من المحورين (X)، (Y). وبالمثل يؤدى تأثير كل من الإجهادات (σ_x) ، (σ_y) إلى حدوث تشوهات فى اتجاهات المحاور الثلاثة وباتباع طريقة جمع التشوهات فى اتجاهات كل محور على حدة كما هو موضح بالجدول (١٩) نحصل على المعادلات (١، ٢، ٣):

وتمثل μ نسبة بواسان.

و (E) معامل المرونة

وبمعرفة مقدار (E_x , E_x , E_y) يمكن حساب تغير حجم المكعب بعد التشوه. فإذا فرضنا أن أبعاد المكعب ١ × ١ × ١ سم فإن مقدار حجم المكعب قبل التشوه × ١ سم^3 أى أن:

$$V_o = 1\ Cm^3$$

أما أبعاد المكعب بعد التشوه فتصير:

$$(1 + \varepsilon_x)_2 (1 + \varepsilon_y)_2 (1 + \varepsilon_z)$$

$$V = (1 + \varepsilon_x)(1 + \varepsilon_y)(1 + \varepsilon_z)$$

$$= 1 + \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_x$$

مقدار الإجهاد العمودى	مقدار التشوه فى اتجاه المحور Z (ε_x)	مقدار التشوه فى اتجاه المحور X (ε_v)	مقدار التشوه فى اتجاه المحور Y (ε_v)
(σ_x)	$\mu = \frac{\sigma_x}{E}$	$-\mu = \frac{\sigma_x}{E}$	$\mu = \frac{\sigma_y}{E}$
(σ_y)	$-\mu = \frac{\sigma_x}{E}$	$-\mu = \frac{\sigma_x}{E}$	$\mu = \frac{\sigma_x}{E}$
(σ_y)	$-\mu = \frac{\sigma_y}{E}$	$\mu = \frac{\sigma_y}{E}$	$\mu = \frac{\sigma_y}{E}$
	$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\{\sigma_x - \mu(\sigma_x + \sigma_x)\}$ (1)	$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\{\sigma v - \mu(\sigma_x + \sigma_x)\}$ (2)	$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\{\sigma_x - \mu(\sigma_x + \sigma_x)\}$ (3)

(لو حذفت حواصل ضرب التشوهات فى بعضها أو المرفوعة إلى الدرجة الثانية نظرًا لأنها متناهية فى الصغر):

أى إن التغير النسبى فى الحجم = $\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$

$$\varepsilon_x = \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_x + \sigma_x + \sigma_x) \qquad (4)$$

حيث (ε_v) = التشوه الحجمى

فإذا فرض أن المكعب الصخرى تعرض لإجهادات شد فإن قيمة (ε_y) التشوه الحجمى لابد وأن يكون موجبًا أى إنه:

$$1 - 2u \geq 0$$

ومن ذلك يمكن أن نستنتج حدود نسبة بواسان فى الصخور.

$$0 \geq \mu < 0.5$$

ولكن نظرًا لأن الكعب الصخرى المفروض يقع فى كتلة من الصخور ومحاط من جميع الاتجاهات بصخور تقع تحت تأثير إجهاد رأسى مماثل، لذلك فإنه يمكن اعتبار أن مقدار التشوه الأفقى مساو للصفر وبذلك بمكان إعادة كتابة المعادلة (٢) كما يلى:

$$0 = \frac{1}{E}\{\sigma_x - \mu\ (\sigma_y + \sigma_x)\} \qquad (5)$$

فإذا فرضنا أن الصخور متماثلة فى الاتجاه الأفقى فإن:

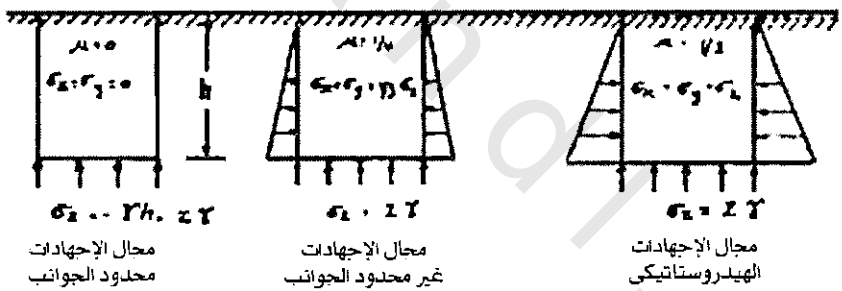
$$\sigma_y = \sigma_x$$

$$\therefore 0 = \frac{1}{E}\{\sigma_x - \mu\ (\sigma_x + \sigma_z)\} \qquad (6)$$

ولكن مقدار $\frac{1}{E}$ لا يساوى صفرًا.

$$\therefore \sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu}\ \sigma_x \qquad (7)$$

ومن المعادلة رقم (٧) يمكن الحصول على مقدار الإجهادات الأفقية منسوبة إلى الإجهاد الرأسى ويمكن تمثيل الإجهادات المختلفة التى تتعرض لها صخور القشرة الأرضية كما هو موضح الشكل (٣٠).



(شكل رقم (٣٠): أنواع الإجهادات فى الصخور

ويمكن تلخيص أنواع الإجهادات التى تتعرض لها صخور القشرة الأرضية بأحد حالات أربع وهى:

الحالة الأولى:

إذا كانت نسبة بواسان تساوى صفرًا $\mu = 0$ فينتج عن ذلك:

$$\sigma_x = \sigma_y = 0 \qquad \sigma_x = \sigma_z$$

ويطلق على هذا النوع مجال الإجهادات أحادى المحور محدود الجوانب.

الحالة الثانية:

إذا كانت نسبة بواسان $\mu = \frac{1}{4}$

فينتج عن ذلك:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{1}{3}\ \sigma_x \qquad \sigma_z = Z_y$$

ويطلق على هذا النوع مجال الإجهادات غير محدودة الجوانب.

الحالة الثالثة:

إذا كانت $\mu = \frac{1}{2}$

فينتج عن ذلك:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z \qquad \sigma_x = Z_y$$

ويطلق على هذا النوع مجال الإجهادات الهيدروستاتيكية.

الحالة الرابعة:

استنتجنا فى الأنواع السابقة قيمة الإجهادات الأفقية الناتجة عن الإجهاد الرأسى فقط أى الناتجة عن ثقل الغطاء الصخرى الذى يعلو النقطة الموجودة على عمق (h) تحت سطح الأرض.

وفى كثير من الأحيان تنشأ بصخور القشرة الأرضية إجهادات أفقية نتيجة تأثير الحركات التكتونية أو نتيجة عمليات التحول إلى جانب الإجهادات المتولدة عن ثقل الغطاء الصخرى. وفى هذه الحالة تزداد قيمة الإجهادات الأفقية على الإجهادات الرأسية، وهذه الحالة هى الأكثر وجودًا فى صخور القشرة الأرضية.

الخواص الطبيعية للصخور

الثقل النوعى الظاهرى Apparent Specific Gravity

يمكن تعيين مقدار الثقل النوعى الظاهرى لعينة من الصخر بالطريقة الآتية:

١ - تجفيف عينة الصخر لمدة ٢٤ ساعة فى فرن تبلغ درجة حرارته ١٠٥°م، ثم يعين وزن العينة وليكن و١.

٢ - تغمر العينة فى الماء لمدة ٤٨ ساعة حتى تشبع تمامًا بالماء. ثم يعين وزن العينة المشبعة وليكن و٢.

obeikandl.com

٣ – توزن العينة المشبعة بالماء وهى معلقة فيه وليكن فى هذه الحالة و٣ ويمكن إيجاد الثقل النوعى الظاهرى بواسطة المعادلة الآتية:

$$\text{الثقل النوعى الظاهرى} = \frac{\text{و}_1}{\text{و}_2 - \text{و}_3} \qquad (٩)$$

أما إذا كانت عينة الصخر ذات شكل هندسى منتظم فإنه يمكن حساب حجم العينة بعد قياس أبعادها ويمكن إيجاد الثقل النوعى من العلاقة الآتية:

$$\text{الثقل النوعى} = \frac{\text{وزن العينة بعد تجفيفها}}{\text{وزن حجم مماثل لجسم العينة من الماء}}$$

ولقد أثبتت التجارب التى أجريت على عينات كثيرة من الصخور أنه كلما زادت نسبة المعادن الثقيلة فى الصخر زاد ثقله النوعى. كما اتضح أن الثقل النوعى للصخور النارية أكبر عادة من الثقل النوعى للصخور الرسوبية.

المسامية الظاهرية Apparent porosity

تمثل المسامية الظاهرية النسبة بين حجم الفراغات البينية فى الصخور إلى الحجم الكلى للعينة. ويمكن حساب المسامية الظاهرية لعينة من الصخر من المعادلة الآتية:

$$\text{المسامية الظاهرية} = \frac{\text{و}_2 - \text{و}_1}{\text{ح} \times \text{ث}} \times ١٠٠ \qquad (٩)$$

و٢ = وزن العينة وهى مشبعة بالماء.

و١ = وزن العينة وهى جافة.

ح = الحجم الكلى للعينة.

ث = كثافة الماء.

ويوضح جدول (٢٠) الثقل النوعى ومسامية بعض الصخور.

الامتصاص Absorption

عندما تغمر عينة من الصخر فى الماء فإنها لا تمتص منه القدر الذى يملأ جميع ما يوجد بها من فجوات، ويرجع ذلك إلى أن بعض الفجوات التى تحتوى عليها العينة يظل محبوسًا بها جزء من الهواء، كما أن بعض مكونات الصخر مثل المعادن الصلصالية يزداد حجمها بامتصاص الماء فتشغل نتيجة لذلك حيزًا أكبر مما كانت تشغله وهى جافة وبذلك قد تمنع دخول الماء إلى

بعض الفجوات وتعرف النسبة المئوية بين حجم عينة الصخر وبين حجم الماء المتص بالنسبة المئوية للامتصاص، ويجب ذكر درجة الحرارة ومدة بقاء عينة الصخر مغمورة فى الماء عند ذكر نسبة الامتصاص ويمكن التعبير عن نسبة الامتصاص بالمعادلة الآتية:

$$\text{نسبة الامتصاص} = \frac{و_2 - و_1}{و_1} \times ١٠٠ \qquad (١٠)$$

وتعرف درجة تشبع الماء بأنها النسبة بين حجم الفراغات البينية المملوءة بالماء فى عينة الصخر وبين الحجم الكلى لهذه الفراغات.

جدول رقم (٢٠): الثقل النوعى ومسامية بعض الصخور

الصخر	الثقل النوعى جم / سم^3	المسامية ٪
جرانيت	٢,٦ – ٢,٨	٠,٥ – ١,٥
دوليريت	٣,٠٠ – ٣,٠٥	٠,١ – ٩,٥
ريوليت	٢,٤ – ٢,٦	٤ – ٦
اندسيت	٢,٢ – ٢,٣	١٠ – ١٥
جابرو	٣,٠٠ – ٣,١	٠,١ – ٠,٢
بازلت	٢,٨ – ٢,٩	٠,١ – ١
حجر رملى	٢,٠٠ – ٢,٦	٥ – ٢٥
حجر طينى	٢,٠٠ – ٢,٤	١٠ – ٣٠
حجر جيرى	٢,٢ – ٢,٦	٥ – ٢٠
دولوميت	٢,٥ – ٢,٦	١ – ٥
نيس	٢,٩ – ٣,٠	٠,٥ – ١,٥
رخام	٢,٦ – ٢,٧	٠,٥ – ٢
كوارتزيت	٢,٦٥	٠,١ – ٠,٥
اردواز	٢,٦ – ٢,٧	٠,١ – ٠,٥

وزن وحدة الحجوم للصخور : (كثافة الصخور)

إذا كانت مسامية الصخور قليلة جدًّا فإن الفرق بين وزن وحدة الحجوم للصخر وهو جاف ووزنه وهو مشبع كليًا يكون ضئيلا جدًّا لدرجة يمكن معها إهماله.

أما إذا كان الصخر مغمورًا فى الماء فإن وزنه يقل ظاهريا عن وزنه الجاف نتيجة لقوة دفع الماء له.

وتقدر قوة دفع الماء بمقدار طن مترى للمتر المكعب من الصخر.

وقد لوحظ من التجارب العديدة التى أجريت على الصخور المختلفة لتحديد كثافتها أنه كلما زادت كثافة الصخور قلت مساميتها، وانخفضت نسبة امتصاصها للماء.

الخواص الميكانيكية للصخور

خواص القوة:

تتعرض الصخور عادة لثلاثة أنواع من الإجهادات وهى:

١ – الإجهادات الناتجة عن الضغط وتؤدى إلى انكماش حجم الصخور التى تتعرض لها.

٢ – الإجهادات الناتجة عن الشد وتؤدى إلى حدوث تشقق وتصدع فى الصخور التى تتعرض لها.

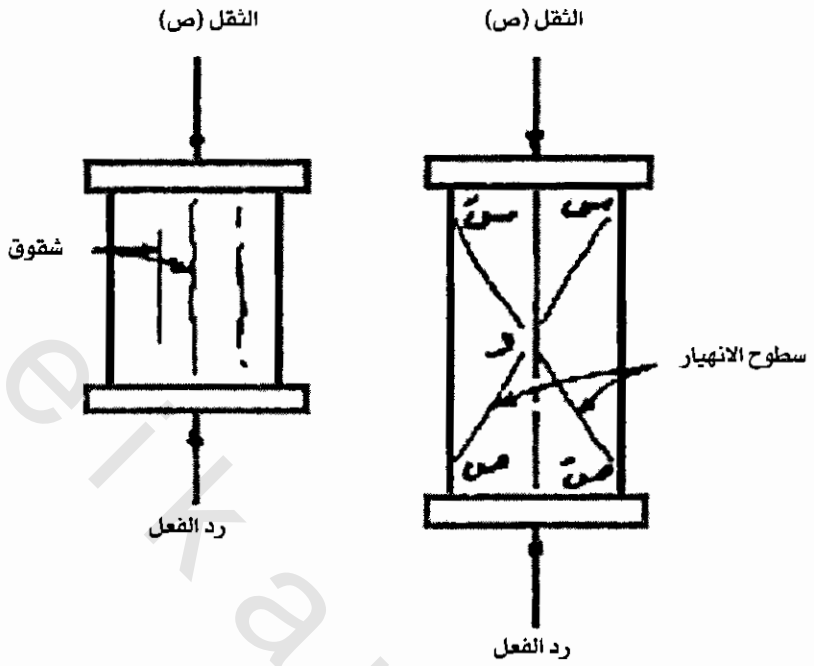
٣ – إجهادات القص وهى التى ينتج عنها حركة الصخور حركة نسبية فى اتجاه تأثير الإجهادات تؤدى إلى انهيار هذه الصخور. إذا كانت زوايا احتكاكها الداخلى ، بيرة أو تشوهها تشوهًا لدنًا، إذا كانت زوايا احتكاكها الداخلى صغيرًا.

وتختلف قدرة الصخور على تحمل الإجهادات التى تتعرض لها قبل أن تتصدع فلكل نوع منها قوة تحمل للأنواع المختلفة من الإجهادات ويوضح الجدول (٢١) قوة تحمل بعض الأنواع السائدة من الصخور النارية والرسوبية والمتحولة لإجهادات الضغط والشد.

ويتضح من هذا الجدول أن الصخور تمتاز بوجه عام بقلة تحملها نسبياً للإجهادات الناتجة عن الشد والقص. ولذلك فإنه غالباً ما يلجأ المهندسون إلى تدعيم الأجزاء التى تتعرض لإجهادات الشد أو القص من المنشآت الصخرية مثل الأنفاق بمواد مناسبة كالخرسانة المسلحة أو الصلب.

(أ) قوة تحمل الصخور لإجهادات الضغط:

تعرف قوة تحمل الصخور لإجهادات الضغط، بمقدار الإجهاد اللازم لتكسير عينة من الصخر تحت ضغط حمل معين وليست محددة من جوانبها كما هو موضح بالشكل (٣١).



شكل رقم (٣١) : تحمل عينات الصخور لإجهادات الضغط
(إجهاد غير محدود الجوانب)

فإذا فرضنا أن مساحة مقطع العينة = ١٠ سم^{٢}، وكان الحمل الذى ينتج عنه تكسيرها = ٤٠٠كجم فإن قوة تحمل الصخر لإجهاد الضغط = $\frac{٤٠٠}{١٠}$ = ٤٠٠ كجم/سم^{٢} وتتوقف قدرة الأنواع المختلفة من الصخور على تحمل إجهادات الضغط على عدة عوامل، أهمها التركيب المعدنى للصخر وخاصة حجم الحبيبات المعدنية المكونة للصخر فتزداد قدرة الصخر على تحمل إجهادات الضغط إذا كانت حبيباتها المعدنية دقيقة الحجم. فالأحجار الرملية ذات الحبيبات الدقيقة أكثر قدرة على تحمل إجهادات الضغط من الأحجار الرملية ذات الحبيبات الخشنة..

ولقد تبين من الدراسات الميكروسكوبية لبعض الصخور النارية والمتحولة من الأنواع التى يظهر فيها ترابط قوى بين بلوراتها المعدنية تكون أكثر تحملا لإجهادات الضغط من تلك التى لا يظهر فيها هذا الترابط.

وبالنسبة للصخور الرسوبية يظهر بوضوح تأثير المادة اللاحمة بين أجزائها، فتزداد قدرتها على تحمل إجهادات الضغط عندما تكون المادة اللاحمة من الكوارتز وتقل عندما تكون المادة اللاحمة من الطمى.

جدول (٢١)

نوع الصخر	الصخر	قوة تحمل إجهاد الضغط كجم/ سم٢	قوة تحمل إجهاد الشد كجم/سم٢	قوة تحمل إجهاد القص كجم/ سم٢	زاوية القص	معامل الاحتكاك الداخلى	نسبة بواسان	معامل المرونة كجم/سم٢
	الجرانيت	٢,٥٠٠–١,٠٠٠	٢٥٠–٧٠	٥٠٠–١٤٠	٦٠–٤٥	١,٨–١	٠,٢٥	١٠–٦–٢°
	ديوريت	٣,٠٠٠–١,٨٠٠	٣٠٠–١٥٠	–	–	–	٠,٢٥	١٠X ١٠–٧°
ناري	دوليريت	٢,٦٠٠–٢,٠٠٠	٣٥٠–١٥٠	٦٠٠–٢٥٠	٦٠–٥٥	١,٨–١,٤	٠,٢٥	١٠ X١١–٨°
	جابرو	٣,٠٠٠–١,٨٠٠	٣٠٠–١٥٠	–	–	–	٠,٢٥	١٠ X١١–٧°
	بازلت	٣,٠٠٠–١,٥٠٠	٣٠٠–١٠٠	٦٠٠–٢٠٠	٥٥–٥٠	١,٠٤–١,٠	٠,٢٥	١٠X١١–٦°
	حجر رملى	١,٧٠٠–٢٠٠	٢٥٠–٤٠	٤٠٠–٧٠	٥٠–٣٥	١,٢–٠,٧		١٠X ٨–٢/٣°
	طين صحفى	١,٠٠٠–١٠٠	١٠٠–٢٠	٣٠٠–٣٠	٥٠–١٥	٠,٦–٠,٢٥		١٠ X ٣,٥–١°
رسوبى	حجر جيرى	٢,٥٠٠–٣٠٠	٢٥٠–٣٠	٥٠٠–١٠٠	٥٠–٣٥	١,٢–٠,٠٧		١٠X ٨–١°
	دولوميت	٢,٥٠٠–٨٠٠	٢٥٠–٥٠	–	–	–		١٠ X ٨,٤–٤°
	فحم	٥٠٠–٥٠	٥٠–٢٠	–	–	–		١٠X ٢–١°
	كوارتزيت	٣,٠٠٠–٥٠٠	٣٠٠–١٠٠	٦٠٠–٢٠٠	٦٠–٥٠	١,٨–١,٢		
متحول	نيس	٢,٠٠٠–٥٠٠	٢٠٠–٥٠	–	–	–		
	رخام	٢,٥٠٠–١,٠٠٠	٢٠٠–٧٠	٣٠٠–١٥٠	٥٠–٣٥	١,٢–٠,٧		
	أردواز	٢,٠٠٠–١,٠٠٠	٢٠٠–٧٠	–	–	–		

obeikandl.com

كما يؤثر اتجاه إجهادات الضغط بالنسبة لمستويات التطابق فى الصخور الرسوبية، فتزداد شدة تحمل الصخر إذا كان اتجاه إجهاد الضغط عموديا على مستويات التطابق، وتقل فى الاتجاهات الأخرى.

كذلك تؤثر درجة تشبع الصخور على شدة تحملها لإجهادات الضغط، حيث تقل قوة تحمل الصخور بزيادة درجة التشبع.

(ب) قوة تحمل الصخور لإجهادات الشد:

تعتبر قوة تحمل الصخور لإجهادات الشد ضعيفة جدا إذا ما قورنت بقوة تحملها لإجهادات الضغط فبينما تستطيع بعض أنواع صخور الجرانيت أن تتحمل إجهادات ضغط تزيد عن ٢٠٠ كجم/ سم^{٢}– فإنها تنهار إذا تعرضت لإجهادات شد تقل عن ٧٠كجم/سم^{٢}– وتقل مقاومة كثير من الصخور الرسوبية لإجهادات الشد فالأحجار الجيرية تبلغ قوة تحملها لإجهادات الشد ٣٥ كجم/ سم^{٢} وتتراوح قوة تحمل الأحجار الرملية لإجهادات الشد بين ٧٠–١٤٠ كجم/سم^{٢}.

لذلك يراعى عدم استخدام الصخور فى المنشآت التى تتعرض لإجهادات شد كبيرة. وينبغى تدعيم المنشآت التى تقام فى الصخور وتتعرض لإجهادات شد كبيرة بدعائم مناسبة لتفادى انهيارها تحت تأثير مثل هذه الإجهادات.

ويمكن الربط بين قوة تحمل الصخور لإجهادات الضغط والشد بالعلاقة الآتية:

$ج_{ض} = ك \times ج_{ش}$

$ج_{ض}$ = قدرة تحمل الصخر لإجهادات الضغط

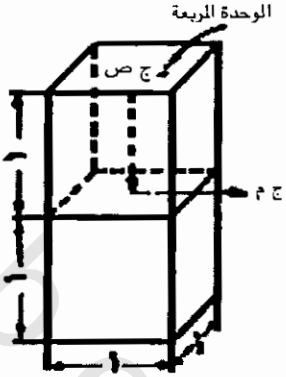
$ج_{ش}$ = قدرة تحمل الصخر لإجهادات الشد

ك = مقدار ثابت تتوقف قيمته على أصل ونوع الصخر وتتراوح بين ٤ إلى ١٠ .

(جـ) قوة تحمل الصخور لإجهادات القص:

إذا تصورنا مكعبين من الصخر أحدهما موضوع فوق الآخر كما هو موضح بالشكل (٣٢) فإذا تأثر المكعب العلوى بإجهادين أحدهما عمودى ($ج_{ش}$)، والثانى مماسى أى قاص ($ج_{م}$) فإن المكعب العلوى يصبح على وشك الانزلاق إذا تساوى الإجهاد القاص مع الإجهاد العمودى مضروبًا فى معامل الاحتكاك (ر) أى عندما تكون :

$ج_{م} = ج_{ض} \times ر$ (١١)



شكل رقم (٣٢)
الإجهادات العمومية والمماسة

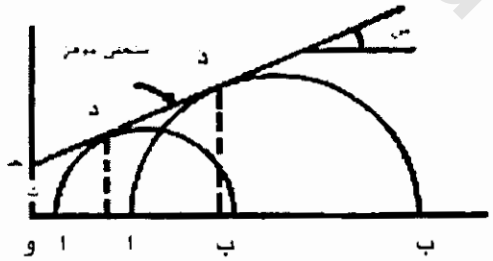
ومما لا شك فيه أن تأثير الإجهادات القاصة فى الصخور لا يكون بمثل هذه السهولة التى تصورنا بها حركة المكعبين السابقين، إذ إن معامل الاحتكاك فى هذا المثال يرمز إلى مقدار الاحتكاك بين سطحين متلاصقين، أما بالنسبة لما يحدث فى الصخور فإنه يجب أن نأخذ فى الاعتبار كذلك القوة التى تربط بين حبيبات المادة الصخرية، ولذلك فإن الاحتكاك يطلق عليه فى حالة الصخور معامل الاحتكاك الداخلى أو معامل المقاومة للقص ويساوى هذا المعامل ظا س. حيث س = زاوية المقاومة للقص. ولقد أمكن نتيجة التجارب التى أجريت على عدد كبير من الصخور إعادة كتابة المعادلة (١١) بعد الأخذ فى الاعتبار شدة التماسك بين الحبيبات الصخرية (ك).

$$ج_م = ج_س \text{ ظا س} + ك \qquad (١٢)$$

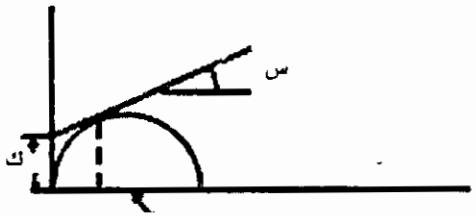
دوائر موهز:

عند تطبيق المعادلة (١٢) يجب ألا يغيب عن الأذهان أن مقدار زاوية المقاومة للقص (س) ومقداره شدة التماسك (ك) ليست ثابتة، بل تتغير تبعًا لتغير إجهاد القص.

ولقد استطاع موهز إيجاد العلاقة بين الإجهادات العمودية والقاصة وزاوية المقاومة للقص وشدة التماسك بواسطة دوائر عرفت باسمه وطريقة رسم هذه الدوائر موضحة بالشكل (٣٣).



(أ) بالنسبة لاختبارين من اختبارات المحاور الثلاثة.



(ب) بالنسبة لاختبار الضغط غير محدود الجوانب.

شكل رقم (٣٣) : دوائر موهز.

١- ارسم و أ ، و أ على محور الإجهادات العمودية يمثلان وحدات الضغط الجانبى (كجم/سم٢) لاختبارين متتالين على العينة.

٢- ارسم و ب ، ب على محور الإجهادات يمثلان الأحمال المحورية الحرجة الواقعة على العينة (كجم/ سم٢) وهذه الأحمال هى اللازمة لتكسير العينة.

٣- ارسم الماس للدائرتين التى تساوى أقطارهما المسافتين أ ب، أ ب على التوالى ليقطع محور الإجهادات القاصة فى نقطة (جـ) ويعرف هذا الماس بمنحنى موهز وذلك لأنه غالبًا ما يكون منحنيًا. ويكون مقدار ميل هذا الماس ممثلا لزاوية المقاومة للقص (س).

والطور (و حـ) ممثلا لشدة التماسك (ك) ويمكن تعيين قيم الإجهادات القاصة بإسقاط أعمدة من نقط تماس منحنى موهز مع الدائراتين المعروفتين باسم دوائر موهز ونقط التماس فى الشكل (٣٣) هى د، د ويمثل طول الأعمدة قيم الإجهادات القاصة.

معامل الأمان:

لكى نضمن سلامة المنشآت الهندسية، يجب ألا تتعرض الصخور التى تقام فيها هذه المنشآت لإجهادات تزيد على قوة مقاومتها للأنواع المختلفة للإجهادات كذلك يجب ألا نتعرض الصخور أو الأحجار المستخدمة فى البناء أو تدعيم المبانى لإجهادات تزيد على قوة تحملها بعد ضرب مقدار قوة تحمل الصخور المختلفة فى معامل الأمان.

ويتراوح معامل الأمان بين ١ : ٦ : أو ١ : ١٠ من قوة تحمل الصخور للإجهادات فى حالة استخدام الصخور فى البناء ، أما فى حالة استخدامها فى الأساسات فإن هذا المعامل يزداد حتى يصل إلى ١: ٢٠ أو ١ :٣٠ ويطلق على قوة تحمل الصخور بعد ضربها فى معامل الأمان سعة الصخور وهى تمثل مقدار الإجهادات المسموح بتعرض الصخور لها دون أن تتشقق أو تنهار.

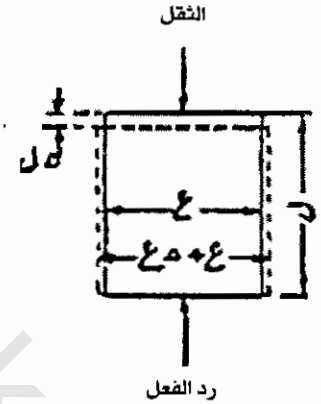
خواص المرونة:

معامل المرونة:

إذا وقع ضغط (ض) على عينة من الصخر، يقل عن الضغط اللازم لتكسر العينة، فإنه يقلل من طولها بمقدار (Δ ل). (نفرض أن العينة على شكل أسطوانة طولها (ل) وقطرها (ع).

وفى نفس الوقت يزيد من قطرها بمقدار Δ ع كما هو موضح بالشكل (٣٤) فإذا زال تأثير الضغط الواقع على العينة وعادت إلى حالتها وشكلها الأصلى تمامًا قبل تأثير هذا الضغط فإنه

يقال إنها تخضع لقانون هوك الذى يقرر أن مقدار التغير النسبى فى طول العينة «الانفعال» يتناسب تناسبًا طرديًا مع الضغط المسبب له ويسمى ثابت التناسب بمعامل المرونة:



شكل رقم (٣٤): التشوه فى الصخور.

$$\text{معامل المرونة (E)} = \frac{\text{الاجهاد العمومى } (\sigma_\chi) \quad \text{ض كم / سم}^2}{\text{الانفعال العمودى } (\varepsilon_\chi)} = \frac{}{\frac{\Delta \text{ ل}}{\text{ل}}} \qquad (١٣)$$

كذلك أمكن تطبيق قانون هوك على العلاقة بين الإجهاد القاص (ν) والانفعال القاص (γ).

$$\text{معامل الجمود (G)} = \frac{\text{الإجهاد القاص } (\tau)}{\text{الانفعال القاص } (\gamma)} = \frac{\tau}{\gamma} \qquad (١٤)$$

وكذلك أمكن تطبيق قانون هوك على العلاقة بين معدل التغير فى الإجهادات الهيدروستاتكية ومعدل التغير فى الحجم:

$$\text{معامل بلك (K)} = \frac{\text{معدل التغير فى الاجهادات الهيدروستاتيكية } (\delta P)}{\text{معدل التغير الحجمى (E)}} = \qquad (١٥)$$

ومن ذلك يمكن استنتاج أن معامل المرونة ومعامل الجمودة ومعامل بلك يعبر عنها بوحدات إجهاد كجم/ سم ^{2} ولقد أمكن إيجاد العلاقة بين معامل المرونة (E) ومعامل الجمود (G) بالعلاقة :

$$E = 2.5\,G \qquad (١٦)$$

كما أمكن إيجاد العلاقة بين معامل المرونة والثقل النوعى للصخر:

$$E = 0.9 \quad (P - 2.1) \times 10^6 \qquad (١٧)$$

حيث (p) الثقلى النوعى للصخر .

وبالطبع فإن الصخور المرنة غالبًا ما تشابه خواصها فى جميع الاتجاهات «أى إنها تكون أيزوتروبية، ولكن معظم الصخور فى الطبيعة تتغير خواصها المرنة فى الاتجاهات المختلفة، ولذلك يتغير معامل المرونة بالنسبة لها من اتجاه لآخر، وعلى سبيل المثال يكون مقدار هذا المعامل أصغر ما يمكن فى الاتجاه العمودى على مستوى التطابق. ومعنى ذلك أن الصخور يزداد تشوهها إذا تعرضت لإجهادات عمودية على مستويات التطابق.

وبصفة عامة يمكن القول: إن قيمة معامل المرونة تزداد بازدياد قوة مقاومة الصخور لإجهادات الضغط.

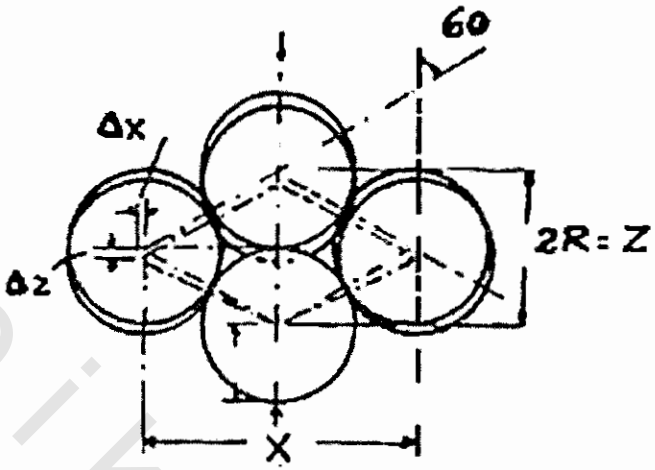
نسبة بواسان:

تعرف نسبة بواسان بأنها النسبة بين مقدار الانفعال الجانبى ومقدار الانفعال الطولى. فإذا فرضنا أن عينة صخرية أسطوانية الشكل طولها (ل) وقطرها (ع) كالموضحة بالشكل (٣٤) تعرضت لإجهادات لا تزيد عن حد المرونة بالنسبة للصخرة وأحدثت تشوهًا (انفعالا) مقداره (Δ ل) فى الاتجاه الطولى، (Δ ع) فى الاتجاه العرضى فإن نسبة بواسان:

$$\text{نسبة بواسان} = \frac{\frac{\Delta ع}{ع}}{\frac{\Delta ل}{ل}}$$ أى النسبة بين التشوه والمستعرض والتشوه الطولى.

ولقد أمكن إيجاد مقدار نسبة بواسان لحالة افتراضية لشكل الحبيبات المعدنية المكونة للصخر كما يلى:

نفرض أن الحبيبات المعدنية على شكل كرات ومرتبة على شكل معين تمس كل حبيبة مجاوراتها فى اثنى عشر نقطة كما هو موضح بالشكل (٣٥) .



شكل رقم (٣٥): نسبة بواسون.

$$\mu = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_z} = \frac{\frac{\Delta \chi}{\chi}}{\frac{\Delta z}{z}} \quad \frac{Z \Delta \chi}{x \Delta z}$$

$$= \frac{\Delta x}{x} \quad \frac{2R}{2\sqrt{3}R}$$

$$\text{but} \quad \frac{\Delta \chi}{\chi} = \cot 60 = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\therefore \mu = \frac{E_Z}{E_X} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{1}{3}$$

وسبق استنتاج الحدود التى تتغير فيها قيمة نسبة بواسون فى صخور القشرة الأرضية من المعادلة (٤) وهى كما يأتى:

$$0 > \mu \leqslant 0.5$$

وبالرغم من أن نسبة بواسون ومعامل المرونة يطلق عليهما ثوابت المرونة إلا أن قيمهم فى الحقيقة ليست ثابتة إذ إنها تعتمد على طبيعة المنحنى الذى يمثل العلاقة بين الإجهاد والانفعال وعلى الظروف التى أجريت فيها التجارب اللازمة لتعيين قيمة هذين المعاملين.

وترتبط ثوابت المرونة وهى:

(E) معامل المرونة

(G) معامل الجمودة

(μ) نسبة بواسان

(K) معامل بلك

(λ) ثابت لاميه

بعلاقات رياضية بحيث يمكن التعبير عن أى واحد منها بدلالة اثنين من الثوابت الأخرى كما يتضح ذلك من المعادلات الآتية:

$$\mu = \frac{\lambda}{2(\lambda+G)} = \frac{3K-2G}{6K+2G} \quad \ldots\ldots\ldots (18)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad \ldots\ldots\ldots (19)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (20)$$

ولذلك يكفى بالنسبة للصخور المرنة تعيين معامل المرونة ونسبة بواسون.

خواص اللدونة:

يمكن تقسيم خواص اللدونة بالنسبة للصخور بملاحظة مقدار تشوهها بالنسبة لزيادة زمن تعرضها للاجهادات الثابتة.

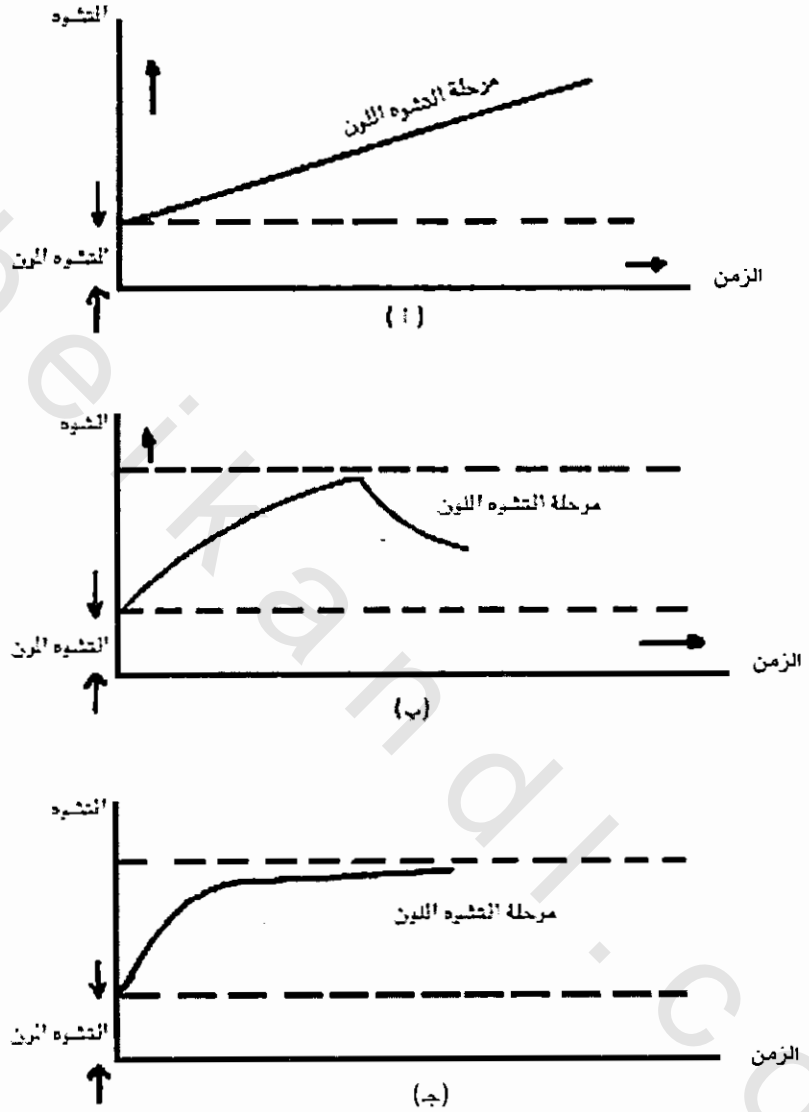
ولقد أمكن تمثيل هذه العلاقة بواسطة منحنيات موضحة بالشكل (٣٦) يطلق عليها منحنيات الزحف فى الصخور.

التراكيب الثانوية فى الصخور

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

١- منطقة الكسر:

وهى قريبة من سطح الأرض ويمكن تمثيلها بالإجهادات أحادية المحور «الإجهاد غير محدد الجوانب».



شكل رقم (٣٦): منحنيات الزحف فى الصخور.

(أ) الزحف الثانوى (ماكسيول).

(ب) الزحف الثلاثى (كلفن).

(جـ) الزحف الأولى (بنجهام).

obeikandl.com

٢- منطقة الطى:

وتوجد على أعماق متوسطة من سطح الأرض ويمكن تمثيلها بالإجهادات ثنائية المحور «الإجهاد محدود الجوانب».

٣- منطقة الانسياب:

وتوجد على أعماق كبيرة من سطح الأرض ويمكن تمثيلها بالاجهادات ثلاثية المحور، وعند تساوى قيمة هذه الاجهادات فى اتجاه المحاور الثلاثة تعرف بحالة الإجهاد الهيدروستاتيكى.

التشقق فى الصخور:

يمكن تعريف الشقوق فى الصخور بأنها أى كسر فى كتلة الصخور. وتنشأ الشقوق أو الكسور عادة بالصخور نتيجة تعرضها لإجهادات تزيد على قوة تحملها.

وعندما تتكون بالصخور سلسلة من الشقوق المتصلة ذات أشكال محددة لها علاقة ببعضها فإنها تسمى بالفواصل (Joints).

أما إذا تحركت كتلتا الصخور على جانبى الكسر حركة نسبية فى الاتجاه الرأسى أو الأفقى أو الاثنين معًا فإن الكسر يعرف بالفالق أو الصدع (Fault) وقد تكون هذه الحركة النسبية صغيرة جدًا، بحيث لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة، وقد تكون كبيرة جدًا تبلغ عدة كيلومترات.

وعندما توجد مجموعة من الفوالق فى منطقة معينة فإنها تعرف باسم منطقة الفالق أو القص (Shear Fault Zone).

وتعتبر إجهادات الشد من أهم العوامل المسببة للفوالق والفواصل فى الصخر، وتنشأ هذه الإجهادات غالبًا فى الصخور نتيجة الانخفاض فى درجة الحرارة، أو تبخر جزء من المياه التى تحتوى عليها الصخور أو بسبب تأثير هذين العاملين معًا. وقد يحدث الانكماش فى الصخور الذى يسبب تولد الإجهادات نتيجة إعادة تبلور بعض المواد الغروية التى تحتوى عليها بعض الصخور اللينة أو التربة.

ومن أمثلة هذه الأنواع من الشقوق تلك التى توجد فى صخور البازلت، فنلاحظ أن هذه الشقوق تأخذ أشكالا سداسية منتظمة، أما فى حالة الطين فإن الانكماش يحدث نتيجة جفاف الطين ولذلك فإن الشقوق فى هذه الحالة تكون غير منتظمة وذلك لعدم انتظام مقدار التبخر فى جميع الأجزاء وذلك كما هو موضح بالشكل (٣٧).

الفواصل (Joints)

يبدو لأول وهلة أن الفواصل فى الصخور تأخذ أشكالا عشوائية، ولكن الفحص الدقيق للفواصل أثبتت أن اتجاهات الفواصل لها علاقة محدودة مع مستويات التطابق أو خطوط انسياب الصخر أثناء تكوينه.

وتحدد خطوط الانسياب فى الصخور باتجاه البلورات، حيث نجد أن المحاور الطويلة لمعظم هذه البلورات متوازية وتشير إلى اتجاه خطوط الانسياب.

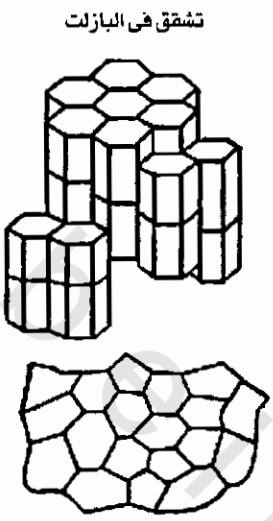
ويوجد بالصخور الرسوبية عادة نوعان من الفواصل متعامدة على مستوى التطابق ويطلق عليها فواصل مضربية أو فواصل ميلية تبعاً لاتجاهها بالنسبة لاتجاه مستوى التطابق.

أما فى الصخور النارية فتوجد ثلاثة أنواع من الفواصل كما هو موضح بالشكل (٣٨).

الأول وتكون موازية تقريباً لخطوط انسياب الصخر (Flat lying Joints)

والثانية وتكون متعامدة تقريباً على خطوط الانسياب وتسمى فواصل قاطعة (cross Joints)

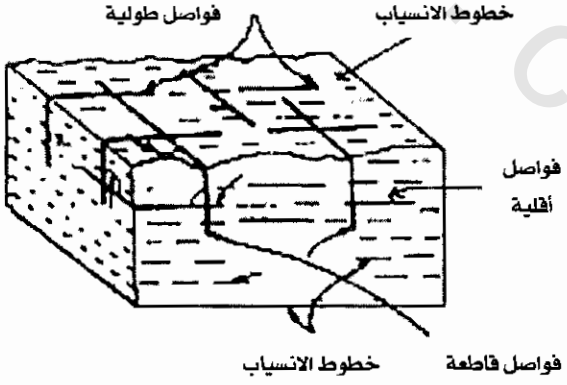
والثالثة وتسمى الفواصل الطولية (longitudinal Joints)



شكل رقم (٣٧)
التشققات فى الصخور.

أنواع الفواصل:

تنشأ الفواصل بالصخور نتيجة تعرضها للإجهادات. وتنقسم الفواصل تبعًا لنوع الإجهادات المسببة لها إلى قسمين:



شكل رقم (٣٨) أنواع الفواصل.

١ – فواصل ناتجة عن إجهادات الشد أو الضغط .

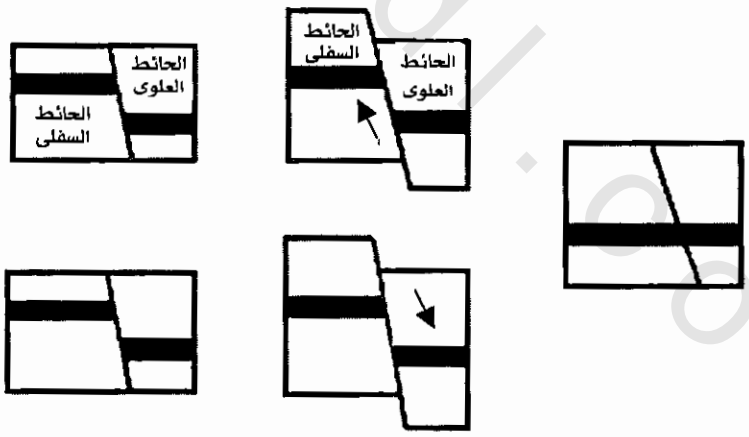
٢ – فواصل ناتجة عن إجهادات القص .

ويتميز النوع الأول من الفواصل بحركة الحوائط على جانبى الشقوق بعيداً عن بعضها. وقد تمتد هذه الفواصل وتتسع وتزداد حركة الكتل الصخرية مما يؤدى فى نهاية الأمر إلى تكوين الفوالق. أما فى النوع الثانى من الفواصل فإن حركة الحوائط على جانبى الشق تكاد تكون موازية لنفس اتجاه الشق، كما أنه لا ينتج عن هذا النوع من الفواصل حركات للكتل الصخرية المتعامدة على اتجاه الشقوق.

الفوالق (faults)

تختلف طبيعة الشقوق التى تنشأ بالصخور قبل تصدعها أو انهيارها باختلاف نوع هذه الصخور ومقدار واتجاه الإجهادات التى تتعرض لها. وقد يحدث التشقق فى الصخور على طول مستوى يعرف بمستوى الفالق، وتسمى كتل الصخور المجاورة لهذا المستوى بحوائط الفالق. أما كتلة الصخور التى تقع أعلى هذا المستوى فتسمى بالحائط العلوى وتسمى الكتلة الصخرية التى تقع أسفل مستوى الفالق بالحائط السفلى.

توجد أنواع مختلفة من الفوالق منها الفالق العادى وفيه يتحرك الحائط العلوى إلى أسفل كما هو موضح بالشكل (٣٩) ومنها الفالق المعكوس وفيه يتحرك الحائط العلوى إلى أعلى.



شكل رقم (٣٩): حركة الحائط على جانبى الفوالق.

وفى الحالتين يحدث التشقق على طول سطح الفوالق نتيجة للإجهادات القاصة وقد يحدث أن تبتعد حوائط الفوالق بعضها عن بعض فينتج عن ذلك وجود منطقة تصدع (fault zone) يختلف عرضها من ٣-١٠ أمتار أو أكثر، وحدوث إزاحة الكتل الصخرية.

طرق التعرف على الفوالق:

من أهم الظواهر التى تساعد فى التعرف على الفوالق ما يأتى:

١- عدم استمرار التراكيب الجيولوجية ويمكن التعرف عليه إما بفحص سطح الأرض إذا كانت مكاشف الطبقات واضحة على سطح الأرض، وإما بحفر آبار اختبارية لكشف الطبقات السفلية.

٢- تكرار ظهور أو اختفاء بعض الطبقات.

٣- وجود العلامات المميزة الآتية بمستويات الفالق وهى.

(أ) تفتت أو استدارة الصخور أو طحنها

(ب) وجود حزوز بسطح الصخور مصحوبة بخدوش نتيجة للاحتكاك

(حـ) سحق الصخور بالمنطقة ليصبح على شكل عجينة فى مظهره.

(د) امتلاء شقوق الفالق بالسيليكا أو بالمعادن.

وفى حالة وجود الفوالق بالصخور النارية أو المتحولة التى توجد على شكل كتل فإنه يصعب تحديد أماكنهم فى الطبيعة. أما إذا وجدت بمثل هذا النوع من الصخور عروق معدنية كالكلسيت والبجماتيت فإنها تساعد على توضيح مكان وجود الفالق نتيجة لإمكان دراسة الاضطرابات التى تحدث فى هذه العروق المعدنية نتيجة لتأثرها بالفوالق.

تعيين اتجاه حركة الفالق:

بالرغم من أنه يمكن تمييز مقدار الإزاحة التى حدثت فى الطبقات على جانبى الفالق، إلا أنه يصعب عادة تحديد الاتجاه الذى تحركت فيه الطبقات.

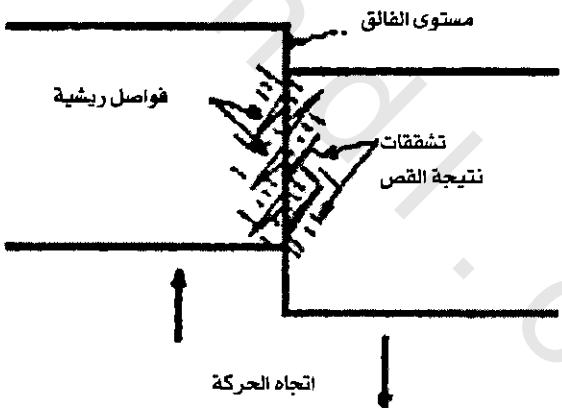
ولتحديد هذا الاتجاه أهمية كبيرة من الوجهة الهندسية يوضحها المثال التالى: قد تحتوى بعض الصخور الرسوبية على طبقة من الرمال المسامية التى تظهر فى موقع يراد بناء أحد السدود فوقه.

ففى مثل هذه الحالة ينبغى - فى حالة وجود فالق يقطع هذه الطبقة - معرفة ما إذا كان قد تسبب فى خفض بقية هذه الطبقة المسامية، وبالتالى فإنه من المتوقع وجودها على عمق ما، أم أن الفالق قد تسبب فى رفع بقية الطبقة، ثم تآكلت ونقلت بعد ذلك بفعل عوامل التجربة والتعرية.

كذلك قد تتسبب الفوالق فى إدخال بعض الصخور اللينة تحت المواقع المراد إقامة المنشآت الهندسية عليها، على حين لا يظهر فحص الصخور على سطح الأرض. أى أثر للفوالق .

ومن أبسط الطرق المتبعة لمعرفة اتجاه حركة الفالق هو تحريك اليد برفق فوق سطح الفالق، فإذا كان ملمس الصخر خشنًا دل ذلك على أن الصخر الذى يقع تحت اليد قد تحرك فى نفس اتجاه حركة اليد، أما إذا كان الملمس ناعمًا فإن ذلك يدل على أن كتلة الصخور قد تحركت فى عكس اتجاه حركة اليد. ومن الطبيعى أنه لا يمكن الاعتماد على هذه الطريقة اعتماداً كبيراً إذ إن عوامل التجوية قد تكون هى التى أثرت على سطح الصخور فجعلتها ملساء أو خشنة فى جميع الاتجاهات.

وهناك طريقة أخرى يمكن بواسطتها الاستدلال على اتجاه حركة الفوالق وهى فحص الفواصل التى تتكون نتيجة الشد فى السطح الذى تحركت فيه إحدى كتل الصخور بالنسبة للكتلة الأخرى. ويؤكد وجوده الزوايا الحادة بين تلك الفواصل وبين سطح الفالق أن كتلة الصخر التى توجد بها هذه الفواصل قد تحركت فى اتجاه رأسى على الزاوية الحادة ويتضح ذلك من الشكل (٤٠) .



شكل رقم (٤٠) : الفواصل الريشية.

الطيات (folds)

تنشأ الطيات فى الصخور نتيجة تأثير الإجهادات العمودية والقاصة.

ويمكن تقسيم الطيات تبعاً للأسباب الميكانيكية المكونة لها إلى أربعة أقسام وهى:

١ – طيات تنشأ بالثنى.

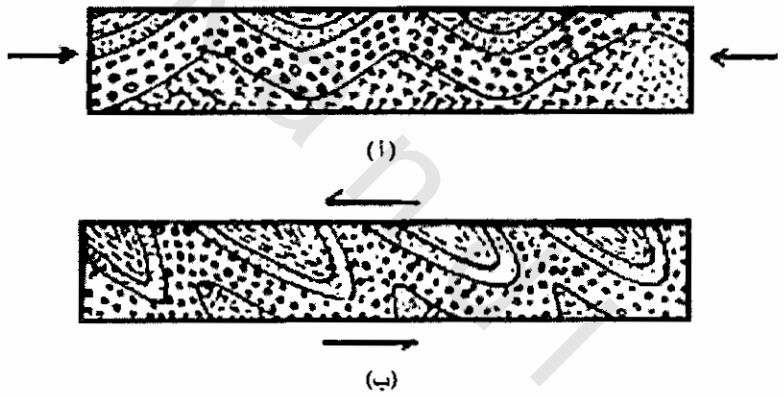
٢ – طيات تنشأ بالانسباب.

٣ – طيات تنشأ بالقص.

٤ – طيات تنشأ نتيجة للإجهادات الرأسية.

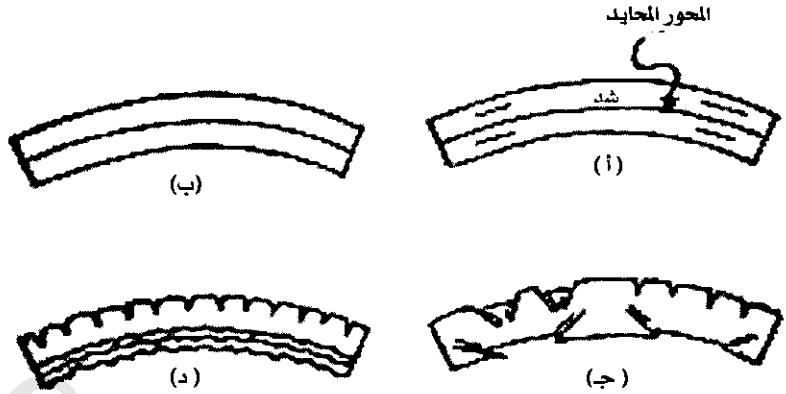
١ – الطى بالثنى:

وينشأ هذا النوع من الطيات نتيجة تأثير الضغوط الأفقية أو الإجهادات ويوضح شكل (٤١) سلوك طبقات أفقية تعرضت لضغوط أفقية وعند انثناء طبقات من صخور متجانسة كما فى شكل (٤٢ أ) فإن الجزء العلوى المحدب من الطبقة يتعرض لقوى الشد، بينما يتعرض الجزء السفلى لقوى الضغط، أما الجزء الذى يقع فى المنطقة المتوسطة فإنه لا يتأثر بأى نوع من القوى ويسمى بالمحور المحايد.



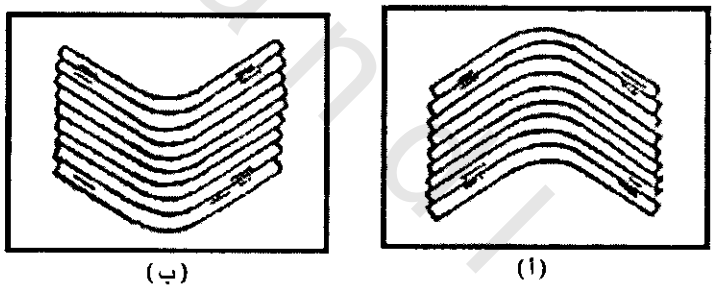
شكل رقم (٤١)
(أ) طيات ناتجة عن ضغوط أفقية.
(ب) طيات ناتجة عن ضغوط القص.

وإذا كانت الصخور تسلك سلوكًا لدنًا فإن الجزء العلوى يصبح أكثر استطالة، وأصغر سمكًا، بينما يصير الجزء السفلى أقل استطالة وأكثر سمكًا، كما هو موضح بالشكل (٤٢ – ب) أما إذا كانت الصخور هشة فإنها تتصدع كما هو موضح بالشكل (٤٢ – جـ). وعلى السطح العلوى المحدب تتكون كسور تنشأ من إجهادات الشد أو فوالق عادية صغيرة. بينما تتكون على السطح السفلى المقعر فوالق معكوسة صغيرة، وقد تتجعد الصخور على السطح السفلى كما هو موضح بالشكل (٤٢ – د).



شكل رقم (٤٢): الطى بالثنى.

وتتميز الصخور الرسوبية بوجود مستويات للتطابق، ويمكن تشبيه عملية طى الطبقات بانثناء مجموعة سميكة من الورق، إذ إن أهم عوامل الطى هو انزلاق الطبقات الواحدة وراء الأخرى، كما هو موضح بالشكل (٤٣) وهذه الظاهرة ذات أهمية كبيرة لتفسير بعض أنواع الطيات الانزلاقية وبعض أنواع التشققات فى الصخور.



شكل رقم (٤٣): قطاع رأسى يوضح الطى بالثنى.

ويؤدى الطى بالثنى فى الصخور الرسوبية إلى تقوس الطبقات القوية تحت تأثير القوة الضغطية، بينما تنساب الطبقات الضعيفة لتنزلق الواحدة وراء الأخرى.

٢ - الطيات الانسيابية:

ينشأ الطى الانسيابى فى حالة وجود صخور لدنة تعرضت لإجهادات كبيرة. وقد يؤدى الارتفاع الكبير فى درجة حرارة الصخور، أو وجودها محاطة بضغوط كبيرة إلى سلوكها سلوكاً لدنًا يشبه بوجه عام سلوك السوائل غليظة القوام.

ويحدث الطى الانسيابى عادة بالمناطق التى توجد بها الحركات البنائية للجبال حيث إن المناطق المتوسطة من الأحواض الترسيبية العظيمة التى تسمى جيوسينكلين (Geosynclines)

تتجمع بها طبقات رقيقة من صخور ضعيفة كالطين الصفحى والصلصال والمارل. وهذه التكاوين الضعيفة تسلك سلوكًا لدنًا وتنساب بسهولة نظرًا لتأثير الضغوط الشديدة والحرارة المرتفعة والمحاليل النشطة.

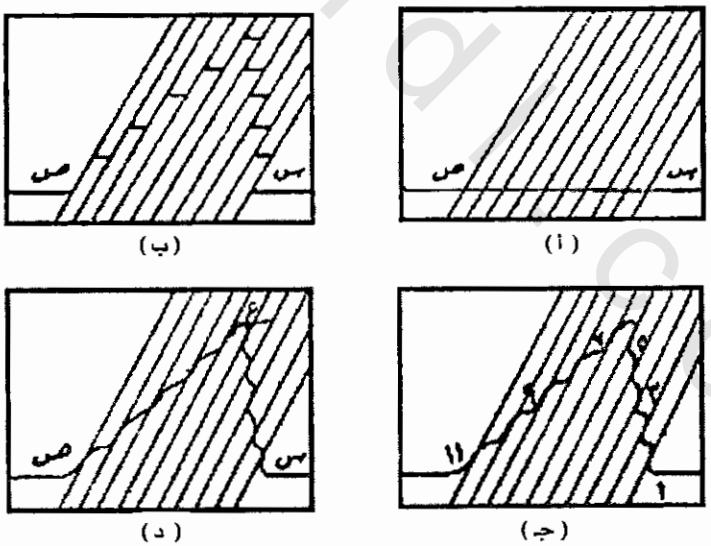
وجدير بالذكر أن الطى الانسيابى يشبه فى مظهره الطى بالثنى، ولكنه يتميز بوجود طيات منزلقة صغيرة الحجم على نطاق كبير.

الطى بالقص:

ويسمى أحيانا بالطى الانفصامى. ويرتبط ارتباطًا وثيقًا بالطى الانسيابى، وينشأ نتيجة إزاحات تفاضلية دقيقة جدًا على طول شقوق أو فواصل يتقارب بعضها من بعض.

ويتضح من الشكل (٤٤ – ب) أن كتلتى الصخر رقم (١، ١١) تبقيان فى مكانهما، وتزاح الكتلة رقم (٦) إلى أعلى لأكبر مسافة بين الكتل الواقعة على الجانبين والتى تتحرك تدريجيا لمسافات أقل.

وإذا كانت الكسور قريبة جدًا من بعضها، والمسافات بينها أقل من سنتيمتر، فإننا نجد أن الطبقات، نتيجة للاحتكاك الشديد، تصبح موازية الكسور. كما هو موضح بالشكل (٤٤- جـ) ويكون التركيب الناتج عبارة عن طية كبيرة مصحوبة بطيات صغيرة كما هو موضح بالشكل (٤٤ – د).



شكل رقم (٤٤): قطاع رأسى يوضح الطى بالقص.

وفى الحالات البسيطة يكون الطى الانفصامى مصحوبًا دائمًا بالكسور والفواصل والتشققات غير أن هذه الكسور قد تختفى أو تتلاشى نتيجة إدماجها وتلاحمها بفضل إعادة تبلور الصخر.

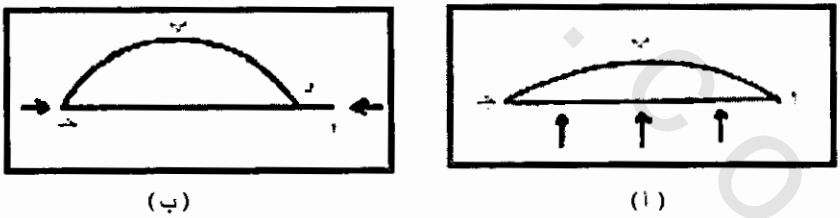
ومن الواضح أن الطى الانفصامى قد يقلل كثيرًا من سمك الطبقات ولا يزيد سمكها على الإطلاق، ويتضح ذلك من شكل (٣٣ - أ) حيث يظهر أن طول الطبقة الأصلى (س ص) قد أصبح بعد عملية الطى الانفصامى (س ع ص) وتحت ظروف التشوه الشديد للصخور فإن المرحلة الأولى قد تؤدى إلى الطى بالثنى أو الطى الانسيابى، ويعقب ذلك نشأة كسور يتقارب من بعضها البعض وهذه تؤدى بالتالى إلى الطى بالقص.

٤ - الطى نتيجة الإجهادات الرأسية:

تؤدى أحيانًا الإجهادات التى تؤثر على الصخور، دون أن يصحبها تشققات أو كسور، إلى نشأة الطيات بها.

وقد يرجع السبب فى نشأة هذه الإجهادات الرأسية بالصخور إلى تداخل كتلة نارية على شكل لاكوليث أو ارتفاع أنبوبة ملحية إلى أعلى.

ففى شكل (٤٥ - أ) يظهر الطول الأصلى للطبقة (أجـ)، ثم تقوس على شكل قبة نتيجة تعرض الطبقة لإجهادات رأسية، فاحتفظت النقطتان (أ، جـ) بمكانهما، ثم أخذت الطبقة شكل قبة (أ ب جـ) أى أن الطبقات تتعرض فى هذه الحالة سطحها العلوى مكونة قبة أو طية محدبة دون أن تتحرك نهايتا الطبقة من مكانهما الأصلى.



شكل رقم (٤٥): طية ناتجة بالحركات الرأسية.

(أ) رفع الغطاء نتيجة تداخل كتلة على شكل قبة.

(ب) طية ناتجة بالثنى.

الأهمية الهندسية للفوالق والطيات

يهتم المهندسون بالفوالق اهتمامًا كبيرًا، لأن وجودها فى منطقة تقام عليها المبانى أو تنشأ بها الأساسات يؤدى إلى اتخاذ احتياطات كبيرة وبالتالى نفقات باهظة فى تكاليف الحفر والأساسات وأعمال الخرسانة وغير ذلك من أعمال الإنشاء.

ومن أهم آثار الفوالق وأكثرها خطرًا على المبانى هى المواد الناعمة التى تخلفها فى منطقة الفالق، فوجود هذه المواد يقلل من مقاومة الصخور للإجهادات مما يعرض المنشآت المقامة عليها للانهيار.

أما من ناحية الطيات، فإن الطيات المقعرة تعتبر من أكثر أنواع التراكيب قدرة على تجميع المياه الأرضية بها مما يسبب بالتالى مشكلات مائية خطيرة عند إنشاء المبانى أو الأنفاق فى المناطق التى توجد بها مثل هذه الطيات.

ومن ذلك يتضح أن اختيار مواقع المنشآت الهندسية المختلفة يؤثر فيه إلى حد كبير وجود الفوالق والطيات بالمنطقة، لذلك ينبغى قبل اختيار موقع أى منشأة هندسية الاهتمام بدراسة التراكيب الجيولوجية بالصخور الموجودة فى الموقع المزمع إقامة هذه المنشآت عليها وتحديد ما قد يوجد به من فوالق أو فواصل أو طيات.

1. Esacson, E.Q., Rock Pressures in Mines; Publication Ltd., Mining Magazine, London, (1961).

2. Farmer, I.W., Engineering Properties of Rocks; Spon, London, (1968).

3. Leonard, O., and W. Duvall, Rock Mechanics and the Design of Structures in Rocks: Willey, New York, (1967).

4. Woodruff, S.W., Methods of Working Coal and Metal Mines; Pergamon press, New York, (1966).

التراكيب والخرائط الجيولوجية (الطبعة الثانية): الناشر دار المعارف (١٩٧٧). تأليف: د. فخرى موسى، د. محب الدين حسين، د. سيد صالح.

obeikandl.com