الجيولوجيا الهندسية

الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي
جامعة تشرين
كلية العلوم

الجيولوجيا الهندسية

لطلاب السنة الثالثة – تطبيقية

الدكتور محمد عيسى

أستاذ في قسم الجيولوجيا

قسم الجيولوجيا

1434-1435 هـ

2012-2013 مـ

الفهرس

الفصل الأول: الجيولوجيا الهندسية – الأساسيات والإطار العام	15
1- 1 – الركائز العلمية للجيولوجيا الهندسية	16
1- 2 – الاهتمامات الهندسية	16
1- 3 – الرؤية والتفسير الهندسي للظواهر	17
1- 4 – الطرق التحليلية المستخدمة في الجيولوجيا الهندسية	17
2- المتطلبات الجيوهندسية للمشروعات	18
3- الأهمية الهندسية للمعلومات الجيولوجية	19
3- 1 – مشروعات التخطيط العمراني	19
3- 2 – المشروعات الإنشائية	19
3- 3 – مشروعات نقل المياه	20
3- 4 – مشروعات حماية الشواطئ	20
4- المعلومات الجيولوجية وحدودها	21
4- 1 – معلومات الجيولوجيا السطحية	21
4- 2 – معلومات الجيولوجيا تحت السطحية	21
4- 3 – معلومات هيدروجيولوجية وهيدرولوجية	21
5- منهجية التفسير الهندسي للظواهر الجيولوجية	22
5- 1 – جمع المعلومات	22
5- 2 – المسوح الميدانية لمنطقة المشروع	22
5- 3 – مخرجات التحليل الهندسي للمعلومات الجيولوجية	23
5- 4 – أساليب التحليل	24
الفصل الثاني: المكونات الأساسية للصخور	25
1- المكونات الصلبة	25
1- 1 – التركيب الفلزي	25
1- 2 – مقاس العناصر البنيوية	28

1- 3 - الخصائص المورفولوجية للعناصر البنيوية 31
1- 4 - التركيب الحبي وتركيب المجمعات الدقيقة للصخور المفككة 32
2- المكونات السائلة 35
2- 1 - أشكال تواجد المياه في الصخور 35
2- 1- 1- مياه بشكل بخار 35
2- 1- 2- المياه المرتبطة 36
2- 1- 3- المياه الحرة 39
2- 1- 4- المياه بالحالة الصلبة (المياه المتجمدة) 40
2-1- 5- المياه المتبلورة والمرتبطة كيميائياً 40
2- 2- الرطوبة الطبيعية للصخور 41
3- المكونات الغازية 42
الفصل الثالث: التصنيف الجيوهندسي للصخور 45
1- الروابط البنيوية في الصخور 45
1- 1- طبيعة الروابط البنيوية 45
2- نشوء الروابط البنيوية وتشكل الصخور 51
3- بنية ونسيج الصخور 53
4- تصنيف الصخور 62
4- 1- مفاهيم عامة (أنواع التصانيف) 62
4- 2- مبادئ إقامة التصانيف العامة للصخور 63
4- 3- التصنيف العام للصخور 67
الفصل الرابع: الخواص الفيزيائية للصخور 69
1- خواص الكثافة 69
1- 1- كثافة الحبات الصلبة 69
1- 2- كثافة الصخر أو كثافة الصخر الرطب 70
1- 3- كثافة الهيكل الصخري أو كثافة الصخر الجاف 70

1- 4- تعيين مسامية الصخور باستخدام مفهوم الكثافة 71
2- النفوذية 75
2- 1- مفهوم النفوذية والنفوذية المائية 75
2- 2- العوامل المؤثرة على النفوذية المائية 77
2- 3- مفهوم التدرج الابتدائي للرشح في الصخور الغضارية 80
2- 4- تصنيف الصخور حسب نفوذيتها 81
3- الخواص الحرارية للصخور 82
3- 1- السعة الحرارية للصخور 82
3- 2- الناقلية الحرارية للصخور 84
3- 3- النفوذية الحرارية 85
3- 4- التمدد الحراري 85
3- 5- مقاومة التجلد 86
4- الخواص الكهربائية للصخور 87
4- 1- الناقلية الكهربائية 87
4- 2- ثابت العازلية الكهربائية 90
5- الخواص المغناطيسية 91
5- 1- قابلية التمغنط 91
5- 2- المغناطيسية المتبقية 94
الفصل الخامس: الخواص الفيزيائية – الكيميائية للصخور 95
1- قابلية الانحلال 95
2- الامتصاص 98
2- 1- أنواع الامتصاص 98
2- 1- 1- الامتصاص الميكانيكي 98
2- 1- 2- الامتصاص الفيزيائي 99
2- 1- 3- الامتصاص الفيزيائي – الكيميائي 100

2- 1- 4- الامتصاص الكيميائي 102
2- 1- 5- الامتصاص الحيوي 103
2- 2- أهمية عمليات الامتصاص 103
3- الالتصاق 104
4- اللدونة 108
5- الانتفاخ 111
6- الانكماش 114
7- الخواص الشعرية 118
7- 1- الارتفاع الشعري للمياه في الصخر 118
7- 2- ترابط الصخور بالقوى الشعرية 120
8- المناعة المائية 120
8- 1- التحلل المائي 121
8- 2- قابلية الارتخاء 123
8- 3- الحت المائي 124
الفصل السادس: الخواص الفيزيائية الميكانيكية للصخور 127
1- مفاهيم أساسية 127
2- خواص التشوه 131
2- 1- تشوه الصخور الصلبة 136
2- 2- تشوه الصخور الضعيفة التماسك 138
2- 2- 1- تشوه الصخور المفككة 138
2- 2- 2- تشوه الصخور الغضارية 139
2- 3- عامل بواسون 141
3- خواص المتانة 142
3- 1- مقاومة الصخور للقص 143
3- 1- 1- مقاومة الصخور الصلبة للقص 145

3- 1- 2- مقاومة الصخور المفككة للقص 146
3- 1- 3- مقاومة الصخور الغضارية للقص 147
3- 2- مقاومة الصخور لاجهادات الضغط 148
3- 2- 1- مقاومة الصخور الصلبة للانضغاط أحادي المحور 150
3- 2- 2- مقاومة الصخور الغضارية للانضغاط أحادي المحور 151
3- 3- مقاومة الصخور للتمزق والانقطاع (متانة الشد) 153
4- خواص السيولة 155
4- 1- زحف الصخور 156
4- 1- 1- الزحف الحجمي 157
4- 1- 2- زحف القص 159
4- 2- المتانة الدائمة 161
الفصل السابع: الدراسات الجيوهندسية لمواقع الإنشاء مراحلها وطرائق تنفيذها 163
1- مهام الدراسات الجيوهندسية 163
2- مضمون الدراسات الجيوهندسية 163
3- تنفيذ الدراسات الجيوهندسية 164
3- 1- المسح الجيوهندسي 164
3- 2- الآبار والحفر الاستكشافية 167
3- 3-الدراسات الجيوفيزيائية 170
3- 4- الاختبارات الحقلية للصخور 174
3- 5- الدراسات المخبرية لتركيب الصخور وصفاتها الفيزياميكانيكية 174
الفصل الثامن: الدراسات الجيوهندسية من أجل إقامة المنشآت الهندسية المختلفة 177
1- مراحل التحريات الجيوهندسية 177
1- 1- مرحلة الدراسة الفنية الاقتصادية 177
1- 2- مرحلة تصميم المشروع 178
1- 3- مرحلة المشروع الفني 178

2- الدراسات الجيوهندسية لبناء المنشآت الصناعية 178
2- 1- الدراسات الجيوهندسية التمهيدية 179
2- 1- 1- الدراسات الجيوهندسية لاختيار الموقع 179
2- 1- 2- الدراسات الجيوهندسية على الموقع المختار 179
2- 2- الدراسات الجيوهندسية التفصيلية 181
الفصل التاسع: توازن المنحدرات والحلول الجيوهندسية للحفاظ على استقرارها 185
1- مفاهيم عامة 185
2- حركة الكتل الصخرية على المنحدرات 187
2- 1- المظاهر الأساسية للحركة 187
2- 1- 1- الانهيارات السريعة (الانهيالات) 187
2- 1- 2- الانهيالات 188
2- 1- 3- الانزلاقات 189
2- 2- عناصر الكتل الصخرية المتحركة على المنحدرات 191
2- 3- عناصر حركة الكتل الصخرية المتحركة على المنحدرات 192
3—ثبات وتوازن المنحدرات 193
3- 1- أسباب فقدان توازن المنحدرات 194
3- 1- 1- العمليات التكتونية 194
3- 1- 2- عمليات التجوية 194
3- 1- 3- المياه السطحية 194
3- 1- 4- المياه الجوفية 195
3- 1- 5- النشاط الهندسي للإنسان 195
3- 2- شروط توازن المنحدرات 196
4- الحلول الجيوهندسية للحفاظ على استقرار المنحدرات 198
الفصل العاشر: الدراسات الجيوهندسية لبناء السدود 201
1- المقدمة 201

2- الأنواع الرئيسة للسدود 201
2- 1- السدود الخرسانية 201
2- 1- 1- السدود التثاقلية 202
2- 1- 2- السدود الكتفية 203
2- 1- 3- السدود القوسية 204
2- 2- السدود الركامية 204
2- 2- 1- السدود الركامية ذات التركيب المتجانس 204
2- 2- 2- السدود الركامية ذات التركيب غير المتجانس 205
2- 3- السدود الركامية الخرسانية 206
3- تراكيب السد 206
3- 1- سد التحويل 206
3- 2- ممر الأسماك 206
3- 3- الممرات المائية أو المسيل 207
3- 4- البوابات 207
3- 5- محطة التوليد الكهرومائية 207
3- 6- الأنفاق 207
4- التحريات الجيولوجية 208
4- 1- التحريات الجيولوجية الأولية 208
4- 2- التحريات الجيولوجية الدقيقة 209
5- التحريات الجيوفيزيائية 210
5- 1- التحريات الزلزالية 210
5- 2- التحريات الكهربائية 211
6- آبار الحفر 212
7- التحريات الجيولوجية لحوض الخزن 213
8- الجيولوجي وبناء السد 216

9- مشاكل السدود 218
10- الضغوط في منطقة إنشاء السدود 223
11- استقرارية صخور الأساس 227
12- التحشية (Grouting) 229
12- 1- التحشية ذات مواد صلبة عالقة 229
12- 2- التحشية ذات المواد السمنتية الكيميائية 229
12- 3- التحشية بالمواد السمنتية العضوية 230
13- السدود المطاطية 234
الفصل الحادي عشر: الدراسات الجيوهندسية لبناء الأنفاق 239
1- المقدمة 239
2- التحريات الجيولوجية ومواقع الأنفاق 239
3- الدراسات الهيدرولوجية لمسار النفق 242
4- المسار الدقيق للنفق 244
5- طبيعة القوى المسلطة على جدران النفق 247
6- طرق شق وحفر النفق 252
7- حفر الأنفاق في الأراضي غير صخرية 255
الفصل الثاني عشر: الدراسات الجيوهندسية للطرق والجسور 257
1- المقدمة 257
2- الطرق 257
3- التحريات الجيولوجية في بناء الطرق 258
4- التحريات الجيولوجية الأولية لاختبار المسار المناسب للطريق 259
5- التحريات التفصيلية لمسار الطريق 260
6- مشاكل القطع في بناء الطريق 263
7- مواصفات سطح الأرض المستخدمة كأساس في بناء الطرق 265
8- الجسور 266

الفصل الثالث عشر: شواطئ البحار وطرق حماية الشواطئ 271
1- المقدمة 271
2- شواطئ البحار والمحيطات 271
2- 1- أنواع شواطئ البحار 272
3- حركة الأمواج 273
3- 1- النظرية الموجية 273
3- 2- قاعدة الموجة 275
4- عمل الأمواج 275
5- التيارات المائية 279
6- ظواهر التآكل للشواطئ 281
7- طرق حماية الشواطئ 282
7- 1- الحوائط البحرية 283
7- 2- الرؤوس الحادة 283
7- 3- التكسيات أو محطمة الأمواج 283

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

تعتبر الجيولوجيا الهندسية من أهم العلوم الجيولوجية التطبيقية فهي تعالج مجموعة واسعة من المسائل العلمية الجيولوجية وتقدم الحلول للمسائل التطبيقية التي تنشأ عند تصميم المنشآت الهندسية المختلفة واستثمارها كالسدود والطرق والأنفاق والمنشآت الهيدروتقنية وغيرها.

وفي التطبيقات الهندسية غالباً ما تصادف ظروف جيولوجية غير ملائمة لتنفيذ الأعمال الهندسية كأن تكون صخور ضعيفة المتانة أو صخور عالية الرطوبة مع تطور الظواهر الجيولوجية فيها كالكارست والانزلاقات وغيرها فتهتم الجيولوجيا الهندسية بدراسة هذه الظواهر واختيار أفضل الأماكن لإقامة المنشآت وتعطي حلولاً لتأمين ثباتها والظروف الطبيعية لاستثمارها.

وتؤثر المنشآت الهندسية المختلفة بهذه الدرجة أو تلك على الظروف الجيولوجية الطبيعية وتدرس الجيولوجيا الهندسية الظواهر التي يمكن أن تنشأ تحت تأثير هذه المنشآت مثل الهبوطات والانهيارات كما تحدد قيم المعايير اللازم استخدامها لتأمين ثبات واستمرارية هذه المنشآت لفترة زمنية طويلة. ونظراً لهذا العدد الكبير من المسائل نشأت ضرورة حل مسألة الاستخدام الأمثل للوسط الجيولوجي والحفاظ عليه.

يتناول هذا الكتاب موضوعات تتعلق بالمكونات الأساسية للصخور وأسس تصنيفها الجيوهندسي وكذلك دراسة الخواص الفيزيائية الكيميائية والميكانيكية لهذه الصخور كما يتضمن معالجة موضوع توازن المنحدرات وأسباب عدم استقرارها وتقديم الحلول الجيوهندسية لها. وأخيراً يقدم الكتاب عرضاً لأهم طرائق التحريات الجيوهندسية ومراحل تنفيذ هذه التحريات وإجرائها لبعض أنواع المنشآت الهندسية كالمنشآت الصناعية والسدود والأنفاق والجسور وحماية الشواطىء البحرية.

ولقد تمت الاستعانة في وضع هذا الكتاب بمراجع أجنبية وعربية مختلفة وزود بالكثير من الجداول والأشكال التوضيحية التي تساعد الطالب على استيعاب المعلومات وفهمها. ولقد روعي في تبويبة التسلسل العلمي المنسجم مع متطلبات منهاج مقرر الجيولوجيا الهندسية المعتمد في قسم الجيولوجا بجامعة تشرين.

إن هذا الكتاب هو محاولة علمية متواضعة قد لا تخلو من بعض الثغرات وإني سأكون ممتناً لكل من يتقدم بأية ملاحظة أو تصويب كي يتم تدارك ذلك في المستقبل.

آمل أن يكون هذا الكتاب لبنة متواضعة تساهم في تشييد مكتبتنا الجامعية ويمكن للطالب والباحث من التزود بالعلم والمعرفة لتحقيق أهدافنا في التقدم العلمي والازدهار الحضاري.

والله ولي التوفيق

الجيولوجيا الهندسية ـ الأساسيات والإطار العام

يقصد بالجيولوجيا الهندسية العلم الذي يهتم بتحليل الظواهر والسمات الجيولوجية بصورة تمكن المهندسين من وضع التخطيط والتصميم الآمن للمنشآت التي تدخل المادة الأرضية كعنصر إنشائي فيها.

ونظراً لتنوع المنشآت الهندسية فقد تضمن التعريف للجيولوجيا الهندسية لتشمل ظواهر وسمات الجيولوجيا السطحية ، والتركيبية ، والهيدروجيولوجية ، والجيوفيزيائية وظواهر الانهيارات الأرضية المحدودة وغير المحدودة.

يعتبر ظهور علم الجيولوجيا الهندسية بصورة متكاملة ضرورة أملاها التوسع الإنشائي على سطح الأرض وتحت سطحها مع التنوع الشديد في استخدام هذه المنشآت.

ويمكن إيجاز الإطار الشامل لأهداف علم الجيولوجيا الهندسية كما يلي:

1. إيجاد إطار تحليلي أو رقمي يمكن من خلاله استخدام الخبرات والملاحظات الجيولوجية الحقلية والمخبرية لإنتاج معلومة يمكن استخدامها مباشرةً في أعمال التخطيط والتصميم الهندسي الآمن للمنشآت السطحية والجوفية.
2. تأكيد المتغيرات الجيولوجية والطبيعية الكامنة في المواد الأرضية (المستقرة وغير المستقرة) وتحديد الأسلوب الذي تحيد به سلوكيات هذه المواد عن السلوك المثالي.
3. تقييم أهمية المياه الجوفية كعامل هندسي له انعكاساته على أعمال الإنشاء وكذلك كبعد اقتصادي له أهمية في أعمال التنمية.
4. إيجاد نوع من الوعي الاجتماعي البيئي بالظواهر الجيولوجية والتغيرات الجارية والمحتملة بالقشرة الأرضية.
5. تحديد الأبعاد والانعكاسات الهندسية المصاحبة للظواهر الجيولوجية أو الناتجة عن حدوثها.
6. دراسة وتحليل الآثار الهندسية للحركات التكتونية والزلزالية وتطوير المحاولات الهندسية لمجابهتها.

7. دراسة الأبعاد الهندسية للسمات الجيومورفولوجية للمواقع وجريانات السيول وتحركات الكثبان الرملية وغيرها من الظواهر الجيوبيئية.

1-1- الركائز العلمية للجيولوجيا الهندسية:

من التعريف السابق لعلم الجيولوجيا الهندسية يمكن تحديد أهم ركائز هذا العلم الآتي:
استكشاف وتحديد الظواهر المشكلة للترسيبات والتراكيب الصخرية بمواقع المشروعات الهندسية ويعتمد ذلك على أسس جيولوجية وجيوبيئية بحتة حيث يُنظر إلى هذه الظواهر كناتج للعمليات الجيولوجية بأوجهها المتعددة التي تمت ومازالت تجري على سطح الأرض ، وبلورة نتائج العمليات الجيولوجية بكل موقع وتحديد العوامل ذات المدلول والتأثير الهندسي على أعمال التخطيط والتصميم والإنشاء.

1-2- الاهتمامات الهندسية:

تشكل الاهتمامات الهندسية بمواقع الإنشاء مع اختلاف أنواعها القاعدة الرئيسة للجيولوجيا الهندسية حيث أن هدف الجيولوجيا الهندسية كعلم تطبيقي هو خدمة مشروعات التنمية والتعمير.
وفيما يلي إيجاز لأهم الاهتمامات الرئيسة:
عند إقامة المشروعات الإنشائية تعمل المادة الأرضية كعنصر حامل للمنشأ الهندسي كما هو الحال في المنشآت السطحية أو المنشآت الجوفية كالأنفاق والمناجم وغيرها، وفي كلتا الحالتين يهتم المهندسون بتحقيق حالة الاتزان الستاتيكي بين رد فعل المادة الأرضية والفعل الناجم عن إقامة المنشأ، وان تنوع المشروعات الهندسية المقامة على سطح الأرض وتحت سطح الأرض واختلاف أهدافها والمواد المستخدمة فيها جعل من الضروري عند دراسة مواقع الإنشاء واختبارها أن يتم بلورة ما يعرف (بالفعل) وعناصره الأساسية وميكانيكية تأثره وتأثيره على المواد الأرضية الحاملة للمنشأ حتى يمكن دراسة رد الفعل وتحديد ميكانيكية حدوثه.

1-3- الرؤية والتفسير الهندسي للظواهر:

يعتبر الإلمام بالظواهر الجيولوجية وأبعادها وميكانيكية حدوثها محور الاهتمام في الرؤية الهندسية حيث أن مدلولاتها وانعكاساتها الهندسية على المنشآت لايمكن إخفاءها ويمكن أن تندرج تحت مايلي:

المتغيرات الكامنة الطبيعية والجيولوجية مثل الشكل البنائي للصخر وتدهور الصخور وعمليات الإحلال وعمليات التعرية بميكانيكياتها المختلفة ، التغيرات والتشكيلات الناجمة بالقشرة الأرضية ويقصد بها نتائج تأثير القوى التكتونية عليها مثل الفوالق ـ الطيات ـ الفواصل ـ الشقوق.... الخ.

أما النقاط الرئيسة التي ترتكز عليها الرؤية الهندسية هي كما يلي:

يرتكز التحليل الهندسي للظواهر والسمات الجيولوجية على تحديد وتحليل وتحقيق العوامل التالية:

- سلوك المواد الصخرية تحت مستويات التحميل المتغيرة.
- سلوك الصخور تحت تأثير المتغيرات البيئية.
- ميكانيكية انهيار المواد الصخرية.
- ميكانيكية تشوه المواد الصخرية.
- تأثير عدم استمرارية وتجانس النسيج الصخري (سطوح الانفصال) على الخواص والسلوك الهندسي.

ويرجع عدم التجانس الميكانيكي للمواد الصخرية إلى عدم تجانس المادة الصخرية والى السلوكيات غير المحددة وعدم نمطية الصخور.

1-4- الطرائق التحليلية المستخدمة في الجيولوجيا الهندسية:

يتم استخدام الطرائق والأساليب التالية في تحليل المعطيات والمعلومات الجيولوجية:

- أسلوب التحليل الرقمي ويبنى هذا الأسلوب على أساس ما يلي:
  - ✓ نتائج التجريب المخبري للخواص الهندسية للصخور.
  - ✓ نتائج المسح الحقلي لخواص الترسيبات الصخرية المختلفة.

❖ أسلوب التحليل الرياضي. يكثر استعماله في نطاق المشروعات الهندسية ويبنى هذا الأسلوب على أساسيات علم هندسة وميكانيكية الصخور ، ومن مخرجاته النمذجة الجيوتقنية ، النمذجة الرياضية والرقمية.

2- المتطلبات الجيوهندسية للمشروعات:

يحتاج اختيار واختبار المشروعات الهندسية بصفة عامة إلى:

- دراسة الخواص الطبيعية والسلوكيات الميكانيكية للمواد المكونة للترسيبات الصخرية التي سيتم الإنشاء فوقها أو خلالها ، سواء كانت هذه المكونات تربة أم مواد مفككة أم صخور صلبة.
- يحتاج تصميم أساسات المنشآت الهندسية الكبيرة مثل السدود والخزانات والأنفاق (بجميع أشكالها سواء كانت للمواصلات أو لنقل المياه أو التعدين) والطرق الرئيسة ، وكذلك المنشآت الهندسية الكبيرة ، إلى دراسة جيوهندسية مستفيضة لتحديد أهم الظواهر الجيولوجية والوحدات الصخرية السطحية وتحت السطحية ومدلولاتها وذلك على طول المسار.

تحتاج إقامة هذه المشروعات أيضاً بدرجة كبيرة إلى تحديد السمات التكتونية التي توجد عليها الصخور وأهمها أنواع التراكيب الجيولوجية بهدف انعكاساتها الهندسية ، ومن هنا تأتي أهمية الدراسة الجيوهندسية للتراكيب الجيولوجية كالفوالق والطيات ونظم الفواصل التي قد تتواجد في مناطق تلك المشاريع العملاقة ، وحتمية الاهتمام بها اهتماماً كبيراً ، حيث أن وجودها في المنطقة التي تقام عليها المنشآت أو تنشأ بها الأساسات يوجب اتخاذ عدد من الاحتياطات الهندسية لتأمين سلامة المنشآت ، وأن عدم الاهتمام بدراسة التراكيب الصخرية من الزوايا الهندسية في المناطق التي تقام عليها ، ومن الضروري لتصميم بعض المشروعات الهندسية معرفة طبيعية المياه الجوفية وتحت السطحية ومصدرها وحركتها ، حيث تؤثر المياه الجوفية بصورة مباشرة أو غير مباشرة على أساسات هذه المشروعات وكذلك البنية الأساسية الملحقة بها وخاصةً عناصر الهندسة الصحية وعمليات الري والصرف.

وتحتاج المشاريع العملاقة إلى معرفة الخصائص الهيدروليكية لهذه المياه وتحديد الدور الذي تلعبه كعوامل مساعدة ومسببة للتبخر والنقل والترسيب للمواد والترسيبات الصخرية.

ولاشك أن معرفة ذلك سوف يساعد في إيجاد الحلول الهندسية لمشاكل كثيرة تتعرض لها هذه المشروعات ، وخاصةً تلك التي تتعلق بتهذيب مجاري الترع وتقوية الجسور وتبطينها ومعالجة مشاكل ترسيب الرمال في القنوات الصناعية وفي المحافظة على التربة الزراعية وغيرها.

3- الأهمية الهندسية للمعلومات الجيولوجية:

تكون المعلومات الجيولوجية والجيوتقنية زاوية رئيسة في المشروعات الهندسية عامةً حيث تشكل الأرض المسرح الأساسي الذي يحمل أو يحتوي على مفردات الإنشاء ، وعليه كان لزاما أن يمد المخطط والمصمم بالمقومات الهندسية المطلوبة والتي تتصل بالظواهر الجيولوجية.
ويمكن توضيح أهمية توفير هذه المعلومات للزوايا المختلفة للمشروعات الهندسية كما يلي:

3-1- مشروعات التخطيط العمراني:

تشكل المعلومات الجيوهندسية ركيزة أساسية للأعمال التالية:

- اختيار مواقع التنمية العمرانية والمفاضلة بين البدائل.
- تحديد أفضل اتجاه لامتداد التنمية العمرانية للمواقع القائمة.
- تحديد الأخطار والمشكلات الجيولوجية بالمواقع التخطيطية للمشروع وما قد ينجم عنها من انعكاسات هندسية .
- توفير المعلومات الجيولوجية المؤثرة على اختيار مسارات الطرق والأنفاق في أعمال التنمية العمرانية (اتزان الميول ـ أنواع التربة السطحية ذات المشاكل ...).
- تحديد مصادر مواد البناء المتاحة.
- تحديد حركة الكثبان الرملية وحركة الرمال واتجاهاتها ومدى تأثير البيئة بها.

3- 2- المشروعات الإنشائية:

يشكل اتزان المنشأ السطحي أو المنشأ الجوفي كالأنفاق ومحطات القوى ومنشآت التعدين حجر الأساس أمام التصميم الإنشائي لهذه الأعمال ويقصد باتزان المنشأ قدرته على تحمل ردود الأحمال الناجمة عن:

- الأحمال الميكانيكية والضغوط المؤثرة الناجمة عن النشاط الإنساني.

- التغيرات البيئية.
- سلوكيات المواد أو الترسيبات الصخرية الحاملة للمنشأ أو الحاوية له تحت مستويات التحميل المختلفة.
- الحركات السيزمية.

وانطلاقاً من هذا تبرز أهمية المعلومات الجيوهندسية عند:

- اختيار نوع ومنسوب التأسيس للمنشأ.
- تحديد المشكلات الهندسية التي قد تنشأ عن تواجد ترسيب فلزي أو صخري محدد وأسلوب العلاج المقترح.
- مقدار تأثير الحركات السيزمية على المنشأ وأسلوب تقديرها.
- تحديد مسارات الأنفاق وأعماقها والطرق السريعة والجبلية.
- تقدير ضغط الصخور حول المنشآت الجوفية.
- دراسة اتزان المنحدرات الصخرية في مشروعات التنمية.

3-3- مشروعات نقل المياه:

تسهم المعلومات الجيوهندسية بصورة مباشرة في:

- تخطيط محاور الترع والقنوات الناقلة للمياه عبر المناطق الصحراوية.
- تحديد المظاهر والتغيرات الجيولوجية على طول المسار ومدى تأثيرها على كفاءة أسلوب النقل.
- تحديد العلاقة بين المياه الجوفية ومنسوب المياه السطحية والتداخلات المؤثرة بينها.

3-4- مشروعات حماية الشواطئ:

إن أهم النقاط التي توضحها الدراسات الجيوهندسية مايلي:

- الوضع التركيبي والترسيبي للشواطئ.
- عمليات التغير والتعرية للصخور المكونة للشاطئ.
- ميكانيكية التآكل وعلاقتها بالترسيبات الصخرية للشاطئ والدراسات البحرية.

4- المعلومات الجيولوجية وحدودها:

يتصل مجال المعلومات الجيولوجية بالعديد من مجالات العلم والتطبيق إلا أن المعلومات الجيولوجية التي تدخل بتأثيراتها المجال الهندسي بزواياه المختلفة هي معلومات محددة يتم ترجمتها أو تفسيرها من الوجهة الهندسية ويتحتم على المهندسين إعادة صياغة هذه المعلومات والظواهر بصورة هندسية حتى يمكن أخذها في الاعتبار ويمكن تحديد إطار المعلومات الجيولوجية ذات التأثير الهندسي كما يلي:

4-1- معلومات الجيولوجيا السطحية:

وتشمل أساسا مايلي:

- أنواع الوحدات الصخرية وتوزيعها بمنطقة المشروع.
- أنواع الترسيبات السطحية وتوزيعها بمنطقة المشروع.
- السمات الطبوغرافية والجيومورفولوجية بمنطقة المشروع.
- التراكيب الجيولوجية ومدى تأثر المواقع بها.

4-2- معلومات الجيولوجيا تحت السطحية:

وتغطي هذه المعلومات الزوايا التالية:

- التتابع الليتولوجي للوحدات الصخرية حتى عمق مناسب للعمل الهندسي.
- التراكيب الصخرية ومدى تأثر المنطقة بها.
- سطوح عدم الانفصال للمادة الصخرية وكثافتها.

4-3- معلومات هيدروجيولوجية وهيدرولوجية:

وتهتم بتوفير المعلومات حول:

- التراكيب والطبقات الحاملة للمياه.
- مصادر المياه الجوفية.
- الأحواض الهيدروغرافية والخزانات الجوفية.

5- منهجية التفسير الهندسي للظواهر الجيولوجية:

يحتل توفير المعلومات والمسوحات الأساسية حيزاً رئيساً في إعداد المشروعات الهندسية ومشروعات التنمية العمرانية ويهدف توفير المعلومات والمعطيات الجيولوجية لمنطقة المشروع إلى تحديد المحددات الطبيعية والجيولوجية المؤثرة من الوجهة الهندسية في أعمال التخطيط وأعمال التصميم والإنشاء عامةً ، وما قد تبرزه هذه المحددات من مشكلات أو ميزات هندسية. لذلك كان توفير هذه المعلومات وتحليلها الهندسي حتمياً لمرحلة التخطيط للمشروعات والتصميم للمنشآت المختلفة لما لها من انعكاسات هندسية ، بل واقتصادية على بعض زوايا المشروع.
يعتبر التخطيط والتصميم السليم أفضل وسيلة لتحقيق الأمان للمنشآت هندسياً وبيئياً ومن الممكن توضيح إطار أومنهجية التفسير الهندسي للمعلومات والظواهر الجيولوجية كما يلي:

5-1- جمع المعلومات:

يتم جمع وتصنيف المعلومات الجيولوجية لموقع المشروع الهندسي من خلال الدراسة المتأنية لكلٍ من:

- الخرائط الجيولوجية العامة والتفصيلية السطحية وتحت السطحية المتاحة للموقع والمنطقة التي سيقام بها المشروع.
- تجميع المعلومات المتوفرة من الأقمار الصناعية أو الدراسات الجيوفيزيائية وما تنتجه الدراسات والمسوحات الجيولوجية الميدانية من معلومات تفصيلية عن نوعيات الوحدات الصخرية وتوزيعها والتراكيب الصخرية الظاهرة على سطح الأرض أو تحت السطح.
- نتائج أعمال الحفر التي تمت أو تجري بالموقع والمنطقة المحيطة.
- طبيعة المشروع الهندسي وأهدافه والمساحة المقام عليها ونوعية مواد الإنشاء.

5-2- المسوح الميدانية لمنطقة المشروع:

تهدف هذه المسوح إلى رصد الظواهر الجيولوجية بالموقع والتي يمكن أن يكون لها انعكاس هندسي أو اقتصادي على المفردات الهندسية للمشروع وذلك بصورة شاملة خاصةً في غياب الدراسات التفصيلية لموقع المشروع والتي يمكن بعد إتمامها إبراز المحددات الطبيعية

والجيوهندسية بالصورة الهندسية المطلوبة التي تمكن المهندسين والمخططين من أخذها بعين الاعتبار.

ويمكن استنباط المحددات الجيوهندسية بصورة جيدة لموقع المشروع من خلال:

- تحليل الخرائط الجيولوجية العامة المتاحة للموقع.
- خرائط التربة السطحية وتوزيعها للموقع والمنطقة المحيطة.
- الدراسات التفصيلية والأبحاث المنشورة حول الجيولوجيا السطحية وتحت السطحية للمنطقة والمناطق القريبة.
- الدراسات المناخية والبيئية المتاحة.
- نوعيات الصخور والتراكيب الصخرية بالموقع وتوزيعها من واقع الدراسات والبحوث المنشورة.
- تحليل نتائج القياسات الميكانيكية أو الجيوفيزيائية بالموقع وكذلك نتائج المسوح الميدانية.

5-3- مخرجات التحليل الهندسي للمعلومات الجيولوجية:

يعتبر التحليل الهندسي للظواهر والسمات الجيولوجية بحق همزة الوصل بين علوم الأرض وبين التطبيقات الهندسية بزواياها المختلفة سواء كانت هذه التطبيقات للمنشآت المقامة فوق سطح الأرض أو المحتواة في باطن الأرض. لذلك كان من الضروري وضع المعطيات الجيولوجية في قوالب هندسية تمكن المخطط والإنشائي من استخدامها كمعطيات هندسية.

ولتوضيح ذلك يمكن إيجاز أهداف التحليل الهندسي للمعلومات والظواهر الجيولوجية في ما يلي:

- التقدير الكمي أو استنباط التقنين الرياضي الممثل لتأثير العوامل الجيولوجية المؤثرة كمدخل لتحقيق الاتزان الهندسي للمنشآت السطحية والجوفية.
- استنباط تقنين للعوامل الجيولوجية وسلوكيات المواد الصخرية المؤثرة في تحقيق اتزان المنحدرات والميول الصخرية.
- تحديد المعطيات اللازمة لتحقيق الاتزان للبيئة الطبيعية (الخلل البيئي الناجم عن نشاط الإنسان).

5-4- أساليب التحليل:

يتم تحليل المعلومات الجيولوجية التي يتم الحصول عليها لمنطقة المشروع عن طريق أحد الوسائل التالية:

- تحليل المعطيات الجيولوجية (الوحدات الصخرية ـ التتابع الليتولوجي) إلى العوامل الأساسية وتحديد سمات وسلوك كلٍ منها عن طريق المسوح الحقلية والاختبارات المخبرية.
- إعادة صياغة الظواهر والعوامل الجيولوجية بعد دراستها وتحليلها ووضعها في صيغ هندسية ذات محددات يمكن حسابها أو قياسها ، وتحديد العلاقة المتبادلة بين المعطيات الجيولوجية وعناصر ومراحل المشروع الهندسي (مراحل التخطيط ـ مرحلة التصميم ـ مرحلة التنفيذ) ، واستخدام أحد الوسائل (الرياضيات أو الوسائل الإحصائية) التي يتم استخدامها في التحليل الهندسي للمعلومات الجيولوجية **وأكثر الوسائل المستخدمة ما يلي:**
- استخدام نظريات الرياضيات وميكانيكية المواد والصخور.
- استخدام النمذجة الرياضية والجيوتقنية وذلك من خلال إنتاج عمل النموذج الملائم لعناصر كل موقع.
- التحليل الرياضي أو الإحصائي لنتائج الاختبارات الحقلية والمخبرية واستنباط العلاقات الرياضية أو الإحصائية منها.

****

المكونات الأساسية للصخور

يدخل في تركيب الصخور عناصر متنوعة وهي تجمع في ثلاث مجموعات رئيسة:

1. **المكونات الصلبة:** تتألف من مختلف الفلزات والمواد العضوية والاتحادات الفلزية العضوية والمياه بالحالة الصلبة، وعند الدراسات الجيوهندسية تدرس فقط الفلزات الأساسية المشكلة للصخور والتي تتواجد فيها بكميات لا بأس بها وتظهر تأثير ملحوظاً على خواص هذه الصخور.

1-1- التركيب الفلزي: يبلغ عدد الفلزات التي تشارك في تركيب الصخور حوالي 100 فلز ، يدخل بعضها في تركيب الصخور بشكل رئيس وتسمى بالفلزات الرئيسة ، ويتواجد بعضها الآخر بنسب قليلة (أقل من 5%) وتسمى بالفلزات الثانوية ، وقد يصادف بعضها الآخر بنسب قليلة جداً وتسمى بالفلزات العرضية ، وتعتبر فلزات الصفاح البوتاسي والكوارتز والبيروكسينات والميكا والأوليفين أكثر شيوعاً في الصخور النارية أما بقية الفلزات فتصادف بشكل نادر.

ويتشابه التركيب الفلزي للصخور المتحولة تشابهاً كبيراً مع التركيب الفلزي للصخور النارية ، إلا أنه إضافةً إلى فلزات الصخور النارية تصادف فلزات أخرى تعتبر مميزة للصخور المتحولة كالغارنت والديستين والاندالوزيت والكلوريت والايبدوت وغيرها ، والتي تظهر بدورها تأثيراً كبيراً على خواص هذه الصخور.

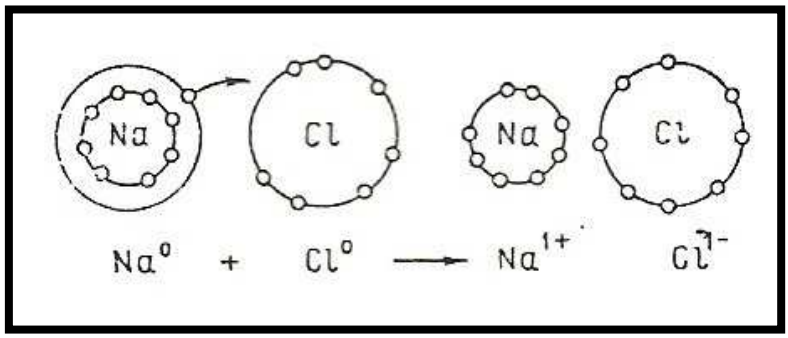
ويسيطر في تركيب الصخور الرسوبية الكوارتز والصفاح البوتاسي والميكا إلى جانب بعض الفلزات الواسعة الانتشار مثل الفلزات الغضارية والكربونات والسولفات والهاليدات وغيرها من الفلزات إلى جانب بعض المواد العضوية والفلزية العضوية.

تتمتع كل فلزات الصخور تقريباً ببنية بلورية تظهر من خلال بنيتها الداخلية وشكلها الخارجي ، كما يصادف عدد قليل من الفلزات بشكل غير مبلور ، وعند دراسة الفلزات في الأغراض الجيوهندسية تعطى أهمية خاصة لخواصها الفيزيائية والفيزيا ـ كيميائية والفيزيا ـ ميكانيكية والتي تتعلق بالبنية البلورية لهذه الفلزات. ويتحدد ثبات البنية البلورية بطاقة واتجاه الرابطة بين الذرات المنفصلة. وانطلاقاً من هذا ينبغي أن يجري تقسيم الفلزات في الأغراض الجيوهندسية بواسطة

النمط المسيطر للرابطة الكيميائية في هذه الفلزات وليس بحسب تركيبها الكيميائي كما هو الحال في علم الفلزات.

إن الروابط بين الذرات في البنيات البلورية للفلزات الأساسية المشكلة للصخور يمكن أن تكون شاردية أو تكافؤية أو هيدروجينية أو جزئية وتعتبر الروابط الشاردية والتكافئية أكثر هذه الروابط ثباتاً.

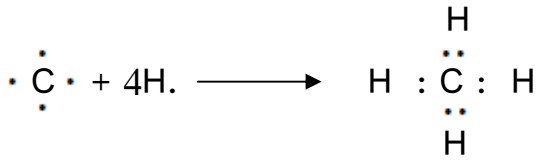
إن كل ذرة تملك مداراً خارجياً يتوضح فيه عدد معين من الالكترونات وعندما ينقص هذا العدد نتيجة لانتقال أحد الالكترونات في هذا المدار إلى المدار الخارجي لذرة أخرى تتحول هذه الذرة إلى شاردة موجبة ، أما الذرة التي تكتسب إلكتروناً جديداً في مدارها الخارجي فإنها تصبح شاردة سالبة. هذا وتتناسب القوة الشاردية للذرة طرداً مع عدد الالكترونات المكتسبة أو المفقودة ، هذا ونتيجةً للاختلاف الذي يحصل في شحنة الشوارد المتشكلة فإن كل شاردة تجذب إليها العدد الضروري من الشوارد المختلفة عنها بالإشارة وتتشكل بين هذه الذرات رابطة تدعى بالرابطة الشاردية. (الشكل رقم 1)

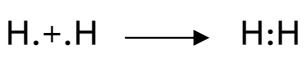


الشكل رقم 1 : مخطط تشكل الرابطة الشاردية عند NaCl

وأكثر الفلزات التي تعتبر نماذج لانتشار هذه الرابطة هي الأملاح البسيطة ، الكربونات ، السولفات، الهاليدات، وتمتاز هذه الأملاح بسهولة انحلالها بالماء. وهذا يفسر بالإضعاف الكبير للروابط الشاردية في الوسط المائي.

وإذا كانت الذرات تفقد أو تأخذ نفس العدد من الالكترونات فإنها لا تستطيع أن تأخذ أو تعطي لبعضها البعض وإنما تشترك بالالكترونات المتواجدة في مدارها الخارجي حيث تتحقق الرابطة الكيميائية على حساب زوج الالكترونات سوية. وهذا يتم بطريقة انتقال الالكترونات المنفصلة من مدار إحدى الذرات إلى المدار المشترك الموحد للذرتين وتشكل رابطة قوية بين الذرات تسمى بالرابطة التكافئية. على سبيل المثال في الهيدروجين والميتان يكون على النحو التالي:





تلعب الرابطة التكافؤية دوراً مهماً في تشكيل السيليكات التي تعتبر الفلزات الأساسية المشكلة للصخور النارية والمتحولة والكثير من الصخور الرسوبية.

وأغلب هذه السيليكات تملك روابط شاردية إضافةً إلى الروابط التكافئية ، إلا أن أهم الصفات المميزة لهذه الفلزات هي المتانة العالية والانحلالية الضعيفة وغيرها من الصفات التي تتحدد بوجود الروابط التكافئية في هذه الفلزات.

وفي الاتحادات الحاوية على الهيدروجين يمكن لذرة الهيدروجين وبسهولة أن تنزلق من ذرة إلى ذرة مجاورة وتشكل ما يسمى بالرابطة الهيدروجينية.
وهذا يحدث لأن ذرة الهيدروجين تتمتع بقطر ذري صغير جداً وكذلك لغياب الطبقات الداخلية للالكترونات.
وتنشأ هذه الرابطة عادة بين الذرات الشديدة الكهرسلبية كالفلور والأوكسجين والآزوت. وهذا النوع من الروابط يلعب دوراً مهماً في تشكيل الفلزات الغضارية والمواد العضوية.

وأخيراً فإن الرابطة الجزيئية تعتبر أضعف الروابط وهي تصادف عملياً عند كل الفلزات إلا أن الدور الملحوظ للرابطة الجزيئية يظهر عند الفلزات الغضارية المفككة بدقة.

وهكذا انطلاقاً من نوع الروابط المسيطرة بين الذرات في الفلزات المشكلة للصخور يمكن تمييز خمس مجموعات للاتحادات المختلفة فيما بينها بخواصها الفيزيائية والفيزياكيميائية والفيزياميكانيكية وهي:

1) فلزات صف السيليكات الأولية.
2) الأملاح البسيطة (الهاليدات ، السولفات ، الكربونات).
3) الفلزات الغضارية.
4) المواد العضوية والمعقدات الفلزية ـ العضوية.
5) الجليد.

وتسيطر عند فلزات صف السيليكات الأولية الروابط من النوع الشاردي التكافئي ، وعند الأملاح البسيطة الروابط الشاردية ، بينما يظهر تأثير الروابط الهيدروجينية إلى جانب الروابط السابقة في المجموعات الثلاثة الأخيرة.

1-2- مقاس العناصر البنيوية:

تسمى المكونات الصلبة لأغلب الصخور والمؤلفة من بلورات منفصلة ومن حطام هذه البلورات والصخور ، بالعناصر البنيوية وتتفاوت العناصر البنيوية في مقاساتها من أجزاء من الميكرون وحتى عشرات السنتيمترات ويقود تغير مقاس هذه العناصر إلى اختلاف كبير بالسطح النوعي للمكونات الصلبة وبالطاقة السطحية له.

وهذا يؤثر بشكل كبير على خواص الصخور ويلاحظ هذا التأثير بشكل خاص عند غياب الروابط البلورية القاسية بين العناصر البنيوية للمكونات الصلبة.

لهذا فان مقاس العناصر البنيوية بالإضافة إلى التركيب الفلزي يعتبر من المؤشرات الهامة للصخور التي تحدد خواصها.

وعند دراسة الصخور النارية والمتحولة يعتبر مقاس البلورات أساساً جيداً لتقسيمها طالما أن هذه الحبات لاتصف فقط هذه الصخور ولكنها تصف ظروف تشكلها ، هذا وتقسم الصخور البلورية وفقاً لمقاس حباتها إلى صخور كبيرة الحبات عندما يكون مقاس البلورات (الحبات) أكبر من 5مم ، متوسطة الحبات (2 – 5 مم) ، صغيرة الحبات (0.2 – 2 مم) ، ناعمة الحبات أقل من 0.2 ، ومجهريه الحبات حيث لا تلاحظ الحبات بالعين المجردة.

وحسب درجة تجانس هذه الحبات وفقاً لمقاييسها تقسم إلى الأنواع التالية:

- ❖ صخور ذات حبات متجانسة المقاييس.
- ❖ صخور غير متجانسة الحبات وصخور بورفيرية.

وعند دراسة الصخور الرسوبية الحطامية فإن مقاس مكونات الصخور الرسوبية الحطامية وعلاقاتها الكمية يعتبر من أهم المؤشرات التصنيفية.

ووفقاً لمكونات الصخور الرسوبية الحطامية الملتحمة بملاط تميز الأنواع التالية من الصخور:

- ❖ صخور ذات تجمعات حطامية كبيرة.
- ❖ صخور ذات مواد حطامية متوسطة.
- ❖ صخور ذات مواد حطامية ناعمة.
- ❖ صخور ذات مواد حطامية مجهرية.

وضمن الصخور الحطامية غير الملتحمة بملاط (الصخور المفككة) تميز الأنواع التالية:

- ❖ مواد حطامية كبيرة (كتل وجلاميد).
- ❖ رمال.
- ❖ رمال غضارية.
- ❖ غضار رملي.
- ❖ مواد غضارية.

هذا وتعطى أهمية كبرى لتصنيف المواد الحطامية للصخور الرسوبية حسب مقاساتها وتقوم التصانيف المستخدمة في الجيولوجيا الهندسية على أساس تغير خواص الحبات (الجزئيات) المفصولة حسب مقاساتها ، وهذا ما يعطي حدود الأجزاء الغضارية الغرينية (الغبارية) والرملية

والحصوية ، إذ أنه يتعلق بها تمييز الأنماط البتروغرافية الأساسية للصخور الرسوبية : الغضار ، اللوس ، الأحجار الرملية والصخور التجميعية.

وقد أظهرت المعطيات التجريبية التي وضحت التغير الحاد للتركيب الفلزي والصفات الفيزيائية والكيميائية للحبات ذات المقاييس الأصغر من (1) ميكرون كأساس لتمييز هذه الحبات في مجموعة منفصلة تسمى بالغضارية باعتبار أن الفلزات الغضارية هي المسيطرة فيها.

وتعتبر العناصر البنيوية ذات القطر الأكبر من 0,05 مم هي الحد الأسفل للحبات الرملية وحبات هذا المقياس تميز بسهولة في الصخور بالعين المجردة ، والمجموعة المؤلفة من مثل هذه الحبات تسلك سلوك المواد السريعة الانهيار.

أما العناصر البنيوية التي مقاساتها أكبر من 2 مم فتنسب إلى المجموعة الحصوية وهي لاتتمتع عملياً بالسعة المائية الجزيئية والارتفاع الشعري للماء كما تتصف بنفوذية مائية عالية وتمثل الحبات ذات المقاييس (40مم) الحد الأعلى للمجموعة الحصوية حسب العالم أخوتين.

وهكذا فإن الحبات الغضارية توجد في المجموعة 0,001 > مم

الغرينية (الترابية) 0,01 – 0,05 مم

الأحجار الرملية 0,05 – 2 مم

الحصوية 2– 4 مم

كما هو في الجدول /1/

الجدول رقم(1): تصنيف العناصر البنيوية للمكونات الصلبة للصخور حسب مقاساتها:

قيمة العناصر المكونة		مقاس العناصر المكونة بالمليمتر	حدود مقاس كل زمرة
الصف	المجموعة		
جلاميد وأحجار	كبيرة	أكبر من 800	أكبر من 200
	متوسطة	800- 400	
	صغيرة	400- 200	
حصى	كبيرة	200- 100	400 - 200
	متوسطة	100- 60	
	صغيرة	60 - 40	
حصباء	كبيرة جداً	40 - 20	40 - 2
	كبيرة	20- 10	
	متوسطة	10- 4	
	صغيرة	4 - 2	
حبات رملية	خشنة	2- 1	2 - 0,05
	كبيرة	1- 0,5	
	متوسطة	0,5 - 0,25	
	صغيرة	0,25- 0,10	
	ناعمة	0,10- 0,05	
حبات غرينية (غبارية)	كبيرة	0,05 - 0,01	0,05 - 0,001
	صغيرة	0,01 - 0,001	
حبات غضارية		أقل من 0,001	أقل من 2 ميكرون

1-3- الخصائص المورفولوجية للعناصر البنيوية:

تتمتع العناصر البنيوية المكونة للصخور بأشكال وسطوح متنوعة لدرجة كبيرة جداً.

وإن درجة تغير شكل العناصر البنيوية تتحدد بشكل كبير بمقاس وصفات الفراغ المسامي وهذا يؤثر أيضاً على النفوذيه المائية والارتفاع الشعري للمياه في الصخور.

ويقصد بشكل الحبات الفلزية والمواد الحطامية مظهرها الخارجي. ففي الصخور النارية تملك الحبات الفلزية التي تتشكل أثناء تبرد الماغما أشكال جيدة الانتظام أو رديئة. أما في الصخور المتحولة فإن نمو وإعادة تبلور الحبات الفلزية يتم في الظروف الحرجة القصوى ، لهذا فإن البلورات في هذه الصخور تتمتع عادةً بأشكال غير منتظمة. وفي الصخور الرسوبية وخاصةً في الصخور الحطامية التجميعية والأحجار الرملية تملك العناصر المكونة لها أشكال متنوعة بدرجة كبيرة.

وتتحدد مورفولوجية الحبات الحطامية بمجموعة من العوامل الأساسية من أهمها:

التركيب الفلزي من خلال المتانة الفيزيائية والثبات للفلزات المشكلة للحبات الحطامية. ومع استمرارية النقل للحبات الفلزية والحطامية فإن أكثر الفلزات التي تحافظ على شكلها هي الفلزات المتينة والثابتة كالكوارتز.

وتتعلق درجة تغير شكل الحبات بمقاسها فالحبات الأولية التي مقاساتها أقل من 0,02 مم وكذلك كل الحبات الغضارية لا تتأثر عملياً أثناء نقلها وإعادة توضعها من جراء وزنها المنخفض ووجود أغشية مائية حافظة على سطوحها. وتزداد درجة تغير شكل الحبات مع زيادة مقاساتها.

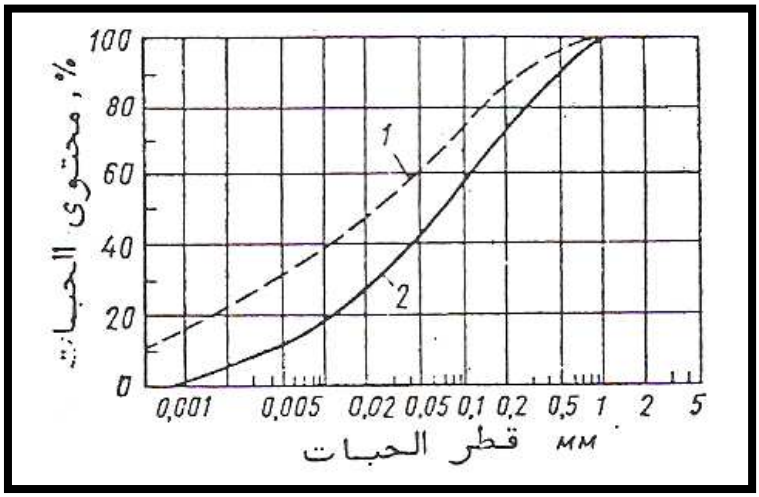
كذلك مورفولوجية الحبات تتعلق بظروف نقلها وتوضعها فالتوضعات الرملية الريحية المنشأ يكون تغير شكل حباتها أكبر ما يمكن ، أما في الصخور الرملية المتشكلة في الوسط المائي فتتعلق درجة تغير شكل حباتها بمسافة النقل.

1-4- التركيب الحبي وتركيب المجمعات الدقيقة للصخور المفككة:

تتألف غالبية الصخور المفككة من حبات إحدى المجموعات التصنيفية ويعبر عن العلاقة الكمية لمختلف المجموعات في الصخور المفككة بالتركيب الحبي. فالتركيب الحبي يظهر مقاس الحبات وكمية تواجدها في هذا الصخر أو ذلك ويتم تعيينه بواسطة عدة طرائق حيث يعبر عن محتوى كل مجموعة بنسبة مئوية وعند إجراء التحليل الحبي للصخور يتحدد محتوى الحبات الأولية فيها ، بمعنى آخر حطام البلورات المنفصلة في الصخور. إلا أنه في صخور كثيرة وخصوصاً في الصخور شديدة التبعثر (الغضارية ، الغرينية) يوجد إضافةً إلى الحبات الأولية

ما يسمى بالحبات الثانوية التي تمثل المجمعات الدقيقة المتشكلة عند اتحاد بعض الحبات الأولية بتأثير قوى الجذب الجزيئي الناشئة عن ازدياد السطح النوعي للحبات مع تقلص أحجامها. لهذا ينبغي عند تعيين التركيب الحبي إجراء معالجة خاصة للعينات الصخرية بهدف تحويل الحبات الثانوية إلى حبات أولية ، وعندما يتم حساب الحبات الثانوية في الصخر إضافةً للحبات الأولية ، أي تتعين طبيعة تبعثرها ، يتم التحدث عن تبعثر ثانوي للصخر الذي يوصف بما يسمى التركيب التجميعي الدقيق (المجمعات الدقيقة). ويجب أيضاً تحديد نسب الحبات الثانوية حسب مقاييسها وهذا ما يعرف بالتحليل التجميعي أو تحليل المجمعات الدقيقة وعند الوصف الجيوهندسي للصخور ينبغي معرفة كلا التركيبين (الحبي والتجميعي) فالتركيب الحبي يظهر التبعثر الأعظمي (الأقصى) للصخور ، بينما يعكس التركيب التجميعي الدقيق درجه تجمع الصخور ويبين درجة ترابط هذه الصخور ويستخدم لتحديد طبيعة الروابط البنيوية فيها.

إن التركيب الحبي وتركيب المجمعات الدقيقة للصخور الرملية متقارب جداً (خصوصاً عند غياب المواد الناعمة فيها) أما في الصخور الغضارية فيختلف الأمر بشكل جوهري (الشكل رقم 2)



الشكل رقم 2 : مخطط يظهر التركيب الحبي (1) وتركيب المجمعات الدقيقة (2) للصخور الغضارية

ولتعيين عدم تجانس الصخور المفككة يستخدم عامل عدم التجانس :

$$U = d60 / d10$$

d60 : قطر الحبات التي يبلغ محتواها في الصخر 60%

d10 : ويسمى القطر الفعال وهو قطر الحبات التي يبلغ محتواها في الصخر 10%

ويتم إيجاد كلا القطرين للحبات بواسطة المنحني التكاملي للتركيب الحبي.

وعند عامل عدم تجانس ، للرمال أكبر من 3 وللغضار أكبر من 5 ، تعتبر هذه الصخور غير متجانسة .

أما بالنسبة لتصنيف الصخور الحطامية المفككة فتوجد تصانيف كثيرة تعتمد على التركيب الحبي ومن أهمها التصنيف المقدم من قبل العالم أخوتين جدول (2) وهو يقسم الصخور الغضارية وبنفس الوقت يعكس هذا التصنيف كل تعدد الأنواع للصخور الرملية.

الجدول رقم (2) التصنيف الحبي للصخور الحطامية المفككة حسب اخوتين

اسم الصخر	محتوى الحبات مم (نسبة الحبات)			
	الغضارية أقل من 0.002	الغرينية 0.5 – 0.002	الرملية 2 – 0.05	الحصوية أكبر من 2
غضار ثقيل	أكبر من 60	غير محدود	غير محدود	أقل من 10
غضار	60 – 30	–	أكبر من الحبات الغبارية	
غضار غريني (غباري)	60 – 30	أكبر من الحبات الرملية	–	
غضار رملي ثقيل	30 – 20	–	أكبر من الحبات الغبارية	
غضار رملي ثقيل غباري	30 – 20	أكبر من الحبات الرملية	–	
غضار رملي متوسط	20 – 15	–	أكبر من الحبات الغبارية	
غضار رملي متوسط غباري	20 – 15	أكبر من الحبات الرملية	–	
غضار رملي خفيف	15 – 10	–	أكبر من الحبات الغبارية	
غضار رملي خفيف غباري	15 – 10	أكبر من الحبات الرملية	–	
رمل غضاري ثقيل	10 – 6	–	أكبر من الحبات الغبارية	
رمل غضاري ثقيل	10 – 6	أكبر من الحبات الرملية	–	
رمل غضاري خفيف	6 – 3	–	أكبر من الحبات الغبارية	
رمل غضاري خفيف	6 – 3	أكبر من الحبات الرملية	–	
رمل	أقل من 3	–	أكبر من الحبات الغبارية	

2. المكونات السائلة:

2-1- أشكال تواجد المياه في الصخور:

تتواجد المياه في الصخور بالأطوار الثلاثة السائل والصلب والغازي وهي تقسم إلى الأنواع التالية:

2-1-1- مياه بشكل بخار:

وتتواجد في فراغات ومسامات الصخور والتربة غير المملوءة بالماء.

إن محتوى بخار الماء في الصخر لا يزيد عن 0.001% من الكتلة الكلية للصخر ومع ذلك تلعب هذه المياه دوراً كبيراً في العمليات التي تجري في الصخور حيث أنها تعتبر أولاً الشكل الوحيد للمياه القادرة على التحرك في الصخور عندما تكون رطوبته قليلة ، وثانياً لأنه عند تكاثف البخار على سطح الحبات الصخرية تتشكل الأشكال الأخرى للمياه وبشكل خاص المياه المرتبطة.

تتم حركة بخار الماء من الطبقة ذات المرونة العالية إلى الطبقة الأقل مرونة وإذا وجد بخار الماء في حالة الإشباع ـ أي عندما يتمتع بمرونة أعظمية عند درجة حرارة معينة ـ فإن حركته تتمدد فقط بقيمة درجة الحرارة ويكون اتجاه هذه الحركة من الطبقة الأعلى درجة إلى الطبقة ذات درجة الحرارة المنخفضة ، ويقع بخار الماء في الصخر في حالة توازن ديناميكي ثابت مع أشكال المياه الأخرى (وخصوصاً مع المياه المرتبطة) ومع بخار الماء في الغلاف الجوي وعند ظروف محددة يبدأ بالتكاثف.

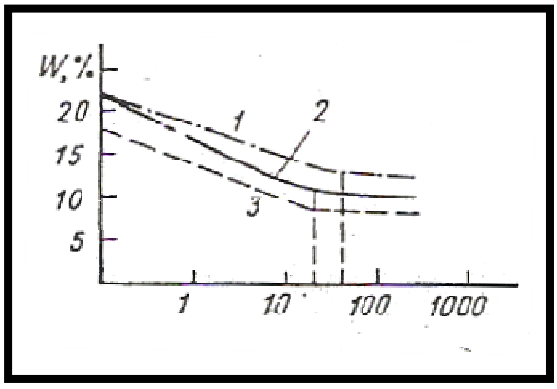
إن تكاثف بخار الماء يمكن أن يتم تحت تأثير انخفاض درجة الحرارة وزيادة تأثير العلاقة التبادلية بينه وبين الحبات الصخرية وفي هذه الحالة عندما تمتز جزيئات بخار الماء بقوة على سطح الحبات الصخرية تتشكل المياه المرتبطة وتتحدد شدة الامتزاز لبخار الماء من قبل الحبات الصخرية بمجموعة من أهمها المرونة النسبية لبخار الماء (فمع زيادة المرونة النسبية تزداد كمية المياه الممتزة) وأكثر ما يلاحظ تكاثف بخار الماء في الرمال وخصوصاً في ظروف المناخ القاري الجاف.

2- 1-2 – المياه المرتبطة:

تتواجد في الصخور الغضارية ، ويؤدي تواجد مختلف أنواع المياه المرتبطة في هذه الصخور وغيرها إلى تغير حالتها وخواصها بشكل حاد ولهذا فإن دراسة هذه المياه تملك أهمية تطبيقية كبيرة. وتختلف المياه المرتبطة بخواصها عن المياه لأخرى فمثلاً حركة جزيئات المياه المرتبطة تكون أقل من حركة جزئيات المياه الحرة ولكنها في الوقت ذاته تكون أكبر من حركة المياه المتجمدة أو المبلورة ومع انخفاض الرطوبة تقل هذه الحركة.

وتقسم المياه المرتبطة وفقاً لطبيعة ارتباطها مع الحبات الصخرية إلى نوعين أساسيين:

مياه وثيقة الارتباط ومياه ضعيفة الارتباط ـ (الشكل 3) يبين هذا الشكل أنه مع زيادة الضغط حتى حد معين (20 – 50 ميغا باسكال) على الصخور المحتوية على مياه مرتبطة ، تنخفض رطوبة هذه الصخور ، إلا أنه مع زيادة الضغط عن هذا الحد ولو لبضعه آلاف ميغا باسكال فإن رطوبة الصخر لا تتأثر تقريباً وهذا يدل على أن هناك ضمن المياه المرتبطة توجد مياه أشد ارتباطاً بالحبات الصخرية وهي ما نسميها بالمياه قوية الارتباط.



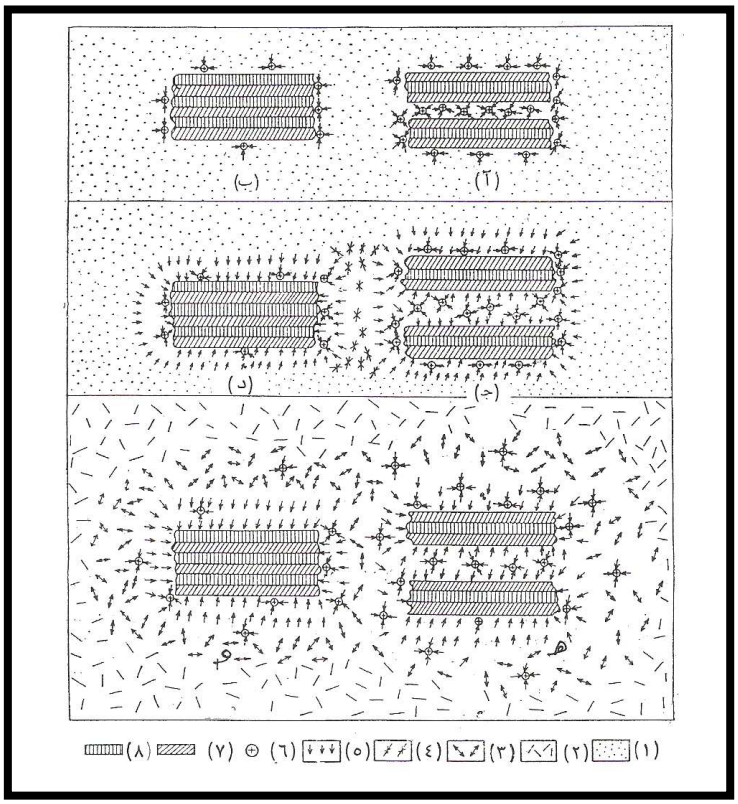
الشكل رقم 3 : مخطط يبين تغير رطوبة الصخور عند زيادة الضغط المؤثر عليها
1. غضار مونتموريلونيتي 2. غضار كاولينيتي 3. غضار رملي

1. **المياه قوية الارتباط :** تسمى طبقة المياه المتشكلة مباشرةً على سطح الحبات الصخرية نتيجة عمليات الامتصاص لجزئيات المياه من الأبخرة بالمياه قوية الارتباط أو المياه الهيغروسكوبية (wg) (الشكل 4) ، وتقسم هذه المياه إلى نوعين أساسين كحد أدنى

مختلفين فيما بينهما بطاقة الارتباط مع سطح الفلزات هما المياه الجزرية والمياه متعددة الطبقات.

تتواجد المياه الجزرية على سطح الحبات الصخرية بشكل بقع صغيرة غير متصلة فيما بينها وتتألف كل واحدة منها من عدة جزيئات من الماء وهي تمتص بفعالية أكبر من قبل مراكز الامتصاص للسطح وتتميز هذه المياه بطاقة ارتباط عالية تبلغ (40 – 130 كيلو جول / جزئي).

ويتشكل هذا النوع من المياه عند رطوبة نسبية للهواء حتى 20 – 30% وتقدر كميتها بنحو 20 – 60% من الرطوبة الهيغروسكوبية العظمى تبعاً لنوع الشوارد التبادلية.



الشكل رقم 4 : الأشكال المختلفة للمياه في الضخور

(أ.جـ.هـ) غضار مونتموريلونيتي ، (ب.د.و) غضار كاولينيتي

1.هواء ، 2. مياه حرة ، 3.مياه اسموزية ، 4.مياه شعرية ، 5.مياه قوية الارتباط ، 6.شوارد ممتزة ، 7.و8.الطبقات البنيوية لبلورات الفلزات الغضارية

إن تشكل غلاف متصل للمياه المرتبطة يبدأ مع ظهور النوع الثاني من المياه قوية الارتباط (المياه متعددة الطبقات) (الشكل 4). ويتم تشكل هذا النوع من المياه عند رطوبة نسبية للهواء في المجال 30 – 90% وترتبط المياه متعددة الطبقات بسطح الحبات الفلزية بواسطة الرابطة الجزيئية ذات الطاقة الضعيفة (0,4 – 40) كيلو جول /جزئي.

إن الكمية العامة للمياه قوية الارتباط المتشكلة في الصخر عند مرونة نسبية للبخار تساوي تقريبا 0,9 تسمى بالرطوبة الهيغروسكبية الأعظمية (W_{mg}) ويتحدد محتوى المياه وثيقة الارتباط في الصخور بواسطة التركيب الفلزي الكيميائي لهذه الصخور ومقدار تبعثرها. ويتأرجح محتوى المياه قوية الارتباط في الصخور الرسوبية المبعثرة في حدود كبيرة بين 0,2 و30% وأكثر.

وتختلف خواص المياه قوية الارتباط عن خواص المياه الحرة بكثافتها فهي تبلغ 1,84 غ/سم^3 وكذلك تتمتع بانخفاض قيمة الثابت الكهربائي ودرجة التجمد.

2. **المياه ضعيفة الارتباط:** وتشمل المياه الشعرية والمياه الاسموزية (الشكل 4).

وتقسم المياه الشعرية إلى ثلاثة أشكال: مياه زوايا المسامات ، المياه المعلقة ، والمياه الشعرية الحقيقية.

تتشكل مياه زوايا المسامات في أماكن تلامس الحبات الصخرية مع بعضها البعض بهيئة قطرات منفصلة تشغل أجزاء تضيق المسامات وتكون هذه الجزيئات في أقسام المسام معزولة عن بعضها البعض وغير متحركة وتشكل فيما بينها فراغات ليست كبيرة إذا ما قيست بحجم المسام الكلي ، أما كمية مياه زويا المسامات فتختلف حسب نوعية الصخور فهي تتراوح في الرمال بين 3 – 5% وفي الرمال الغضارية بين 4 – 7 % وعند زيادة رطوبة الصخور فإن المسامات تمتلئ كليا بالماء وفي هذه الحالة تظهر المياه الشعرية الحقيقية والمياه المعلقة.

تختلف المياه المعلقة عن المياه الشعرية الحقيقية بأنها لا تملك علاقة مباشرة مع مستوي المياه الجوفية ، ومن جراء ذلك لا يمكن أن تتغذى بها عندما تتناقص كميتها وأكثر ما تصادف في الرمال. وهي تنشأ في التشكيلات المتجانسة وغير المتجانسة ففي التشكيلات المتجانسة يتعلق تشكل المياه المعلقة بالتركيب الحبي للرمال وبرطوبتها العالية ، فهي لا

تتشكل في الرمال الكبيرة الحبات ، وفي التشكيلات المتطبقة تتشكل المياه المعلقة على الحدود بين طبقتين مختلفتين بتركيبهما الحبي.

أما المياه الشعرية الحقيقية فتصعد نحو الأعلى اعتباراً من مستوى المياه الجوفية وتتغذى منه عندما تتناقص كميتها بفعل التبخر. هذا وتسمى رطوبة الصخر التي تكون عندها كل المسامات الشعرية ممتلئة بالماء بالسعة المائية الشعرية (WC).

وتشبه المياه الشعرية بشكل عام المياه الثقالية فهي تملك ضغطاً هيدروستاتيكياً ، ولكنها تختلف عنها ببعض الصفات. فالمياه الشعرية تتجمد عند درجة حرارة أقل من الصفر حيث تتعلق درجة تجمدها بقطر المسامات التي تتواجد فيها. وقد لوحظ حسب بعض التجارب أن المياه الشعرية الموجودة في الصخور الغضارية والغضارية الرملية عند درجة حرارة أعلى من (−12 درجة مئوية).

وتتشكل المياه الاسموزية نتيجة الاختلاف في تركيز الشوارد الموجودة في المياه المسامية وبالقرب من سطح الحبات الصخرية حيث تسبب الشوارد الممتزة انتقال جزئيات من المياه المسامية نحو سطح الحبات الصخرية وارتباطها مع الشوارد الممتزة. وهذه المياه ذات طاقة ارتباط ضعيفة لا تزيد عن 0,4 كيلو جول / جزيء ، وكثافتها قريبة من كثافة المياه الحرة ، وتبلغ درجة تجمدها −1,5 درجة مئوية وهي أعلى من درجة تجمد مختلف أشكال المياه الشعرية بكثير.

2−1−3− المياه الحرة:

وتسمى بالمياه الثقالية وهي تكون غير متحركة تحت تأثير قوى الثقالة عندما تملأ المسامات المغلقة في الصخر أو تكون متحركة بفعل قوى الثقالة الأرضية وتكون هذه الحركة عمودية تتجه من الأعلى نحو الأسفل (المياه الراشحة في نطاق التهوية) أو في الاتجاه الأفقي (المياه الجوفية). وتسمى الإمكانية العظمى لاحتواء الصخر على أشكال المياه المرتبطة والمياه الحرة عند امتلاء تام لكل المسامات الصخرية بالسعة المائية التامة للصخر (Wo) . وتقدر كمية المياه الثقالية في الصخر بالفرق بين قيمة السعة المائية العظمى (التامة) والسعة المائية الشعرية. وعند إشباع كامل للصخر بالماء وغياب الغازات فيه يكون حجم المسامات مساوياً لحجم الماء في الصخر. فإذا أخذنا كثافة الماء واحد ، فإن كتلة وجودها عند سعة مائية تامة

للصخر سوف تساوي حسابياً حجم المسامات ، وانطلاقاً من هذا يمكن حساب السعة المائية التامة كنسبة بين كتلة الماء إلى كثافة الهيكل الصخري.

أي:

$$Wo = n \frac{\rho_w}{\rho_d}$$

حيث أن :

Wo السعة المائية التامة ، n المسامية ، ρ_w كثافة الماء ، ρ_d كثافة الهيكل الصخري .

وإن المياه الثقالية تتمتع بكافة خواص المياه العادية.

2-1-4- المياه بالحالة الصلبة (المياه المتجمدة):

عند انخفاض درجة الحرارة تحت الصفر تتجمد الثقالية وتتحول إلى حالة المياه المتجمدة (جليد). ويمكن أن يتواجد الجليد في الصخر على شكل بلورات منفصلة أو طبقات مستمرة تبلغ في بعض المناطق سماكات لا بأس بها. وتلعب بلورات الجليد في أغلب الحالات دور المادة اللاحمة التي تلصق الحبات الفلزية مع بعضها البعض.

لهذا تتغيير خواص الصخور بشكل حاد عند تغير حالة المياه. فوجود المياه المتجمدة في الصخور الغضارية يؤثر على صفاتها الميكانيكية ـ الفيزيائية وخصوصاً عند زوال التجمد ، إذ تزداد عندها كمية المياه الحرة كما تزداد خاصة الرشح وتتغير متانة الصخور وخواصها الكهربائية.

2-1-5- المياه المتبلورة والمرتبطة كيميائيا:

تتواجد هذه المياه في الشبكة البلورية للفلزات حيث تدخل في تكوين الفلز بشكل أيونات أو جزئيات ماء (H_2o, OH^-, H^+) مشاركةً بذلك في تركيبة مثل المسكوفيت $KAL_2ALSi_3O_{10}(OH_2)$ ، الجص $CaSo_4 2H_2o$

وغير ذلك من الفلزات. ويمكن نزع هذا النوع من المياه من الشبكة البلورية للفلزات بتسخينها إلى درجة حرارة 300- 1500 درجة مئوية حيث يؤدي خروجها من الفلزات إلى تفكك هذه الفلزات وتغيير تركيبها الكيميائي.

2-2- الرطوبة الطبيعية للصخور:

وهي كمية المياه الموجودة في الصخر بالحالة الطبيعية. وتتحدد قيمة الرطوبة عن طريق وزن الصخر المطلوب بتعيين رطوبته مرتين الأولى مع رطوبته والثانية بعد طرد المياه منه بالتسخين إلى درجة حرارة تقارب 105 – 107 درجة مئوية مدة من الزمن حتى ثبات وزنه ، وتكون نسبة المياه المزاحة إلى وزن الصخر المطلق الجاف هي الرطوبة التي نسميها الرطوبة الوزنية (المطلقة) وتقدر كجزء من الواحد أو كنسبة مئوية (بضربها بـ 100) ، وعندما يعبر عن هذه الرطوبة بنسبة حجم الماء إلى حجم الصخر المطلق الجاف تسمى بالرطوبة الحجمية ، وتعتبر الرطوبة الطبيعية من أهم الصفات الفيزيائية للصخور فهي تحدد المتانة وغيرها من الخواص عند التطبيقات الجيوهندسية.

ولوصف الحالة الفيزيائية للصخور ينبغي أيضاً تحديد درجة إملاء المسامات بالماء.

لهذا يتم إيجاد ما يسمى بالرطوبة النسبية (عامل الرطوبة) بالعلاقة التالية :

$$G = \frac{Wn}{n} = \frac{W\rho_s}{e}$$

Wn : الرطوبة الحجمية

n : المسامية

W : الرطوبة المطلقة كجزء من الواحد

ρ_s : كثافة الجزء الصلب من الصخر

e : عامل المسامية ويمكن أن تتغير قيمة G من (0) وحتى (1) عندما تكون Wn = n

وعلى أساس قيمة الرطوبة النسبية تنقسم الصخور الرملية إلى الفئات التالية :

قليلة الرطوبة ($0 < G \leq 0.5$)

رطبة جداً ($0.5 < G \leq 0.8$)

مشبعة ($0.8 < G \leq 1$)

هذا وإن وجود الماء في أي صخر يؤثر على خواصه وهذا ما سنراه لاحقاً عند دراسة مختلف خواص الصخور وخاصةً الصخور شديدة التبعثر كالصخور الغضارية.

3. المكونات الغازية:

تحدد المكونات الغازية الموجودة في مسامات وشقوق الصخور خواص هذه الصخور بشكل كبير. وتسمى كمية الغازات الحرة أو الممتزة الموجودة في واحدة الكتلة أو (الحجم) للصخور في الظروف الطبيعية بالسعة الهوائية. تتعلق السعة الهوائية للصخور بدرجة كبيرة بحجم مسامات هذه الصخور وغيرها من الفجوات وبدرجة إملائها بالماء. فكلما كانت المسامات أكثر امتلاءً بالماء كلما كان المحتوى الغازي فيها أقل والعكس صحيح.

إن الاختلاف بين تركيب الهواء الجوي والغازات في الصخور (الهواء المسامي) يتلخص قبل كل شيء بمحتوى (N_2 , CO_2 , O_2) ، فإذا كان غاز الفحم في الهواء الجوي يمثل فقط أجزاء من المئة (تقريباً بحدود 0,03%) فإن محتواه في الصخور يبلغ عشرات وحتى كامل النسبة المئوية. ويتواجد الأوكسجين والآزوت في التشكيلات الصخرية بكميات مختلفة ، وفي ترب هذه التشكيلات الصخرية تكون كمية هذه الغازات أقل منها في الغلاف الجوي وهذا يمكن تفسيره بحدوث عمليات امتصاص الأوكسجين والآزوت وإطلاق ثاني أوكسيد الكربون في هذه الترب.

ويملك وجود غاز الهليوم ضمن المكونات الغازية للصخور أهمية كبيرة فهو يصعد باتجاه الأعلى نحو سطح الأرض من الأعماق الكبيرة ويزداد تركيزه بدرجة كبيرة أثناء وجود الفوالق التكتونية وهذه الخاصية يمكن استخدامها للكشف عن الفوالق غير الظاهرة على سطح الأرض كذلك تحتوي الصخور أيضاً على غاز الميتان (CH_4) وغيره من الفحوم الهيدروجينية التي يمكن أن تكون ذات قيمة اقتصادية في الطبقات العميقة.

وتتواجد الغازات في الفراغات المسامية بالحالة الحرة أو ممتزة أو محصورة أو بشكل فقاقيع صغيرة في المياه المسامية أو منحلة فيها.

ترتبط الغازات الممتزة على سطح الحبات الصخرية بواسطة القوى الجزيئية وتتعلق كمية الغازات الممتزة في الصخور بتركيبها الفلزي وبوجود الدبال وغيره من المواد العضوية وبتبعثر الصخور وقيمة مساميتها. وتتمتع أكاسيد الحديد والمواد العضوية بمقدرة امتزازية كبيرة ومع زيادة تبعثر الصخور تزداد كمية الغازات الممتزة فيه. وتتغير كمية الغازات الممتزة عموماً في الصخور من أقل من 1 سم^3 إلى 15 سم^3 لكل 100 غ من الصخر الجاف.

وتتناقص كمية الغازات الممتزة في الصخور الغضارية مع زيادة الرطوبة وتوجد أكبر كمية من الغازات الممتزة في الصخور المطلقة الجفاف ، إن الغازات الممتزة تغيب في الصخور عند وجود أعظمي للمياه قوية الارتباط فيها.

وعندما يكون الترطيب متعلقاً بالارتفاع الشعري للمياه فإن الغازات المطرودة من المسامات تخرج بحرية إلى الغلاف الجوي. ولكن في بعض الأحيان يترافق صعود المياه الشعرية مع رشح المياه السطحية فينشأ نوع آخر من المكونات الغازية يسمى بالغازات المحصورة. وتختلف هذه الغازات عن الغازات الممتزة بأن قيمتها العظمى تتشكل عند قيمة معينة الرطوبة تسمى (الرطوبة المثالية).

ومع استمرار زيادة الرطوبة تتناقص هذه الغازات وعند إملاء كامل لكل المسامات بالماء وكذلك عند رطوبة تساوي الصفر فإن الصخور لا تحوي على غازات محصورة. ويمكن أن تشغل هذه الغازات في الصخور الغضارية 20 – 25% من حجم المسامات.

هذا ويسبب وجود الغازات الممتزة والمحصورة في الصخور الكثير من الظواهر مثل هبوط الطبقات وتشوهها وانهيارها وإنقاص نفاذيه هذه الصخور.

****

التصنيف الجيوهندسي للصخور

1. الروابط البنيوية في الصخور:

ترتبط العناصر البنيوية المكونة للصخور (الحبات الفلزية، الجزيئات، البلورات) فيما بينها بروابط بنيوية. تحدد طبيعة هذه الروابط بشكل كبير الخصائص الأساسية لهذه الصخور. إن متانة بعض الحبات الفلزية والبلورات تتعلق بالروابط الكيميائية البلورية الداخلية. وبنفس الوقت فإن ثبات الصخور المكونة (المركبة) من هذه العناصر البنيوية هو أقل منها، وعند بعض الصخور المشتتة غير الملتحمة بملاط تكون المتانة قريبة من الصفر، وبالتالي فإن خصائص المتانة أو الخصائص التماسكية لهذه الصخور لا تتحدد فقط بتماسك العناصر البنيوية المكونة لها بقدر ما هي تتحدد بمتانة الروابط بين هذه المكونات أي بمعنى آخر بالروابط البنيوية.

تتشكل الروابط البنيوية نتيجة عمليات فيزيائية ـ كيميائية معقدة. وهي تتشكل تحت تأثير عمليات الارتصاص والانحلال والتجوية والرشح وغيرها. هذا وتعد عملية تشكل الروابط البنيوية عملية تاريخية طويلة تتطور على امتداد (الحياة الجيولوجية) للصخور. لهذا فان دراسة الروابط البنيوية تقوم على أساس دراسة عمليات التشكل الصخري وأيضاً التصورات الحديثة الفيزيائية ـ الكيميائية والميكانيكية للمنظومات الصخرية المبعثرة للتأثيرات الفيزياكيميائية المتبادلة التي تحدث على سطوح التماس بين العناصر البنيوية وبوجود مكونات سائلة وغازية في الصخور.

1.1. طبيعة الروابط البنيوية: بحسب المتانة يمكن أن تكون الروابط البنيوية مختلفة جداً من الضعيفة التي بصعوبة تظهر في الظروف الطبيعية وتبدي تأثيراً ضعيفاً على خواص الصخور وحتى الشديدة المتانة والمتساوية الشدة مع متانة الحبات البلورية نفسها. وبالتالي يفسر هذا التنوع بمتانة الروابط بطبقة التأثيرات المتبادلة الناشئة على تماسات الجزيئات والحبات. وبحسب طبيعة هذه التأثيرات المتبادلة تقسم هذه الروابط إلى عدة أشكال (أنماط):

أ. كيميائية(تكافؤية، شارية).

ب. فيزيائية وفيزيا ـ كيميائية (جزئية، كهربائية، مغناطيسية، شاردية، أيونية، شعرية).

ج. ميكانيكية.

<u>أولاً:</u> الروابط البنيوية ذات الطبيعة الكيميائية: يعد هذا النمط من الروابط قريب بطبيعته من الروابط البلورية الداخلية للفلزات. فهي يمكن أن تنشأ عند التماس المباشر للحبات الفلزية بعضها مع بعض أو عند إملاء الفراغ بين الحبات بمادة لاحمة متينة تؤمن (توثق) على حساب الروابط الكيميائية مع السطوح المستوية الخارجية للشبكات البلورية للحبات الملتحمة.

إن الروابط الكيميائية تعتبر أكثر أشكال الروابط البنيوية ثباتاً وهي تنشأ بطرائق مختلفة ففي الصخور المغماتية تظهر بنفس الوقت مع تشكل الحبات الفلزية نفسها في عمليات التبلور وتصلب المصهور المغماتي. وعند الصخور المتحولة تتشكل أثناء إعادة تبلور الصخور الأم ، أما في الصخور الرسوبية الملتحمة بملاط فتنشأ نتيجة ارتشاح المحاليل وترسب الأملاح وأيضاً نتيجة التوضع في الفراغ المسامي الغرويات السيليسية وهيدروكسيدات الحديد وتبلورها على سطوح التماس بين الحبات. وبطبيعتها تمثل الروابط الكيميائية قوى ذات طبيعة كهربائية ـ مغناطيسية وهي تتحقق على حساب الالكترونات المحيطة بالذرات. وبحسب قيم الكهرسلبية للذرات المتبادلة التأثير فإن توزع الالكترونات التكافئية بينها يمكن أن يكون متبايناً. وعند ذلك في الفلزات الأساسية المشكلة للصخور يحدث تشكل نمطين للروابط الكيميائية هما التكافئية والشاردية.

إن الخصائص الأساسية المميزة للرابطة الكيميائية هي **<u>أولاً</u>** ظهورها عند مسافات ليس كبيرة بين الذرات المتبادلة التأثير (بحدود 0.5 – 3.5 انغستيروم) وعند زيادة المسافة للذرات فإن قيمة هذه الرابطة تتناقص بسرعة **<u>وثانياً</u>** الطاقة العالية التي تبلغ 1200 كيلو جول/مول.

<u>ثانياً:</u> الروابط البنيوية ذات الطبيعة الفيزيائية والفيزيا ــ كيميائية: في الصخور المبعثرة بشدة (الصخور الغضارية وصخور اللوس وبعض أشكال الحوار والمارل والدياتوميت) وأيضاً التشكيلات العضوية والترب فإن الدور الأساسي في تشكيل الروابط البنيوية تلعبه قوى ذات

طبيعة فيزيائية وفيزياكيميائية. تشكلها يرتبط بالسطح النوعي العالي للمكونات الصلبة للصخور الدقيقة التبعثر وبالظواهر الفيزيائية والفيزيا ـ كيميائية المؤثرة على الحد ماء ـ فلز تميز عدة أشكال للقوى ذات الطبيعة الفيزيائية والفيزياكيميائية المؤثرة على تماسات الحبات شديدة التبعثر (جزئية، كهربائية، مغناطيسية، شارية، شعرية) دور كل من هذه القوى المذكورة أعلاه في تشكيل الرابطة البنيوية العامة للصخور يمكن أن يتغير تبعاً لدرجة تصلب هذه الصخور ومائيتها ففي الرسوبات الغضارية والغضاريات ضعيفة التصلب والتورق ستكون التأثيرات المتبادلة المسيطرة هي الجزئية والكهربائية والمغناطيسة ، وفي الصخور الغضارية المتعرضة لتصلب ملحوظ وأيضاً في صخور اللوس والترب فإن التأثير المحدد في الروابط البنيوية تتمتع به القوى الجزئية ـ الكهربائية والشعرية.

أ. **القوى الجزئية** : تنسب القوى الجزيئية حسب طبيعتها إلى قوى ذات طبيعة كهرستاتيكية وكهرمغناطيسية، وهي تنشأ على حساب التأثيرات الثنائية المتبادلة للجزيئات الحيادية المتمتعة بعزم ثنائي القطب أو غير المتمتعة. ففي الحالة الأولى تنشأ بين الجزيئات تأثيرات متبادلة كهرستاتيكية على حساب التأثيرات الموجهة (الجزأين يتمتعان بالقطبية الثنائية) أو التأثيرات المتبادلة كهرمغناطيسية على واحدة من الجزيئتين يتمتع بالقطبية الثنائية ، بينما في الحالة الثانية التأثيرات المتبادلة كهرومغناطيسية على حساب التأثير التبعثري. زوج الجزيئات المتبادلة التأثير يمكن أن يصدر حقل جذب جزئي، التأثير بين أي جسمين صلبين عند اقترابهما على مسافة تقاس بعشرات وحتى مئات النانومتر (1 نانومتر= 10 A°) ومع تناقص حجوم الأجسام المقتربة من بعضها (زيادة السطح النوعي للمنظومة) فإن دور التجاذب الجزيئي بينها يزداد.

ب. **القوى الكهرستاتيكية:** إضافةً أو إلى جانب التجاذب الجزيئي بين الحبات أو الجزيئات المفصولة في الوسط المتبعثر يمكن أن تنشأ تأثيرات متبادلة كهرستاتيكية، فعند تماس مباشر للجزيئات واحدة مع الأخرى فإن سطحها يمكن أن يكتسب بعض الشحنات من جراء الكهربائية التماسية لقد أظهرت الدراسات التي أجريت في هذا الاتجاه بأن كل الجزيئات الفلزية في الحالة

الهوائية الجافة نتيجة الاحتكاك تكتسب شحنة كهربائية تتعلق قيمتها وإشارتها بعدة عوامل: التركيب الفلزي، مقاس الجزيئات (الحبات)، ووجود الأغشية الامتصاصية على سطوحها. فلقد تبين بأنه عند الاحتكاك تشحن بعض الفلزات(بيوتيت، مسكوفيت، جص) بقوة وبعضها (كوارتز، ميكروكلين، هورنبلاند) بضعف وثالثة تشكل وضعاً متوسط الشدة.

كما وتختلف الفلزات بشحنتها أيضاً: فالكوارتز والهورنبلاند والميكا تمتلك شحنة سالبة أما الكالسيت والجص فتملك شحنات موجبة، وفي حالة الميكروكلين تتعلق الشحنة بمقاس الحبات. وتزداد قيمة شحنات الحبات نتيجة الاحتكاك مع زيادة التبعثر وبعد بلوغ القيمة العظمى الموافقة لمجموعة معينة تتناقص بشكل حاد. وتملك الروابط الكهربائية أهمية تطبيقية في الصخور الرملية والغبارية (الغرينية) عند رطوبة طبيعية أقل من السعة المائية الجزيئية العظمى لهذه الصخور.

ج. **القوى المغناطيسية:** إضافةً إلى التأثيرات المتبادلة الجزيئية والثنائية القطب في تشكيل الروابط البنيوية في الصخور المبعثرة فإنه يمكن أن تشارك قوى ذات طبيعة مغناطيسية (أسيبوف 1968). إن تشكل التأثيرات المتبادلة ذات الطبيعة المغناطيسية متعلق بوجود عزم مغناطيس عند الحبات الغضارية وهذا يقود في ظروف الحقل الجيومغناطيسي إلى تأثيرات متبادلة فيما بينها. لقد أظهرت الحسابات بأن قيمة الرابطة المغناطيسية البنيوية على واحدة سطوح التماس لحبتين غضاريتين لا تزيد عن $10^{-9} - 10^{-11}$ نيوتن. وبالتالي فإن دور القوى المغناطيسية في تشكيل الروابط البنيوية للصخور الناعمة التبعثر ليس كبيراً وبالتالي فإن احتمال تأثير هذه ينبغي حسابه فقط في المراحل الأولى لتشكل الرسوبات حيث يمكن لهذه القوى أن تساعد على تكاثف الجزيئات.

إن التأثيرات المتبادلة الجزيئية والكهربائية والمغناطيسية تنسب إلى مجموعة التأثيرات الطويلة، وهي تظهر على مسافة بين الحبات تقاس بعشرات أو مئات النانومتر. وعند تماسك الصخور المبعثرة بشدة خلال عملية التشكل الصخري أو بالتجفيف فإن المسافة بين الحبات تختصر بشكل كبير وهذا يقود إلى إظهار القوى الكهربائية ـ الشاردية على سطوح التماس.

د. الروابط البنيوية الكهرستاتيكية ـ الشاردية: يرتبط نشوء هذه الروابط عند الجزيئات الغروية والغضارية بالتأثيرات المتبادلة بين هذه الجزيئات والمحاليل في الصخور الجافة تعتبر شوارد طبقة الامتصاص حلقات اتصال وعند تجفيف الصخور أو تراصها فإن الكاتيونات التبادلية المتوضعة بين الجزيئات الغضارية المشحونة سلباً تشكل بينها جسوراً كهربائية متينة. إن ميكانيكية تشكل الرابطة البنيوية بين الجزيئات على حساب القوى الشارية الكهربائية مشابهة للعلاقات بين الطبقات داخل بلورات الفلزات الميكاوية فلقد بين الحساب النظري لقوى الجذب الكهربائي ـ الشاردي لجزيئات المونتموريللونيت المشحونة سلباً بأنه يحصل تجاذب بينها وبين الشوارد الموجبة في الوسط المحيط، والأبحاث التجريبية أظهرت كذلك بأن الروابط البنيوية لهذا الشكل تكون كبيرة وبالتالي تكون متانة العينات المحضرة من جزيئات (حبيبات) ذات حجوم 1 – 2 ميكرون على الضغط مرتبطة بالتركيب الفلزي وبكثافة الشوارد التبادلية الموجبة وتركيبها وهي تتغير من 0.1 وحتى 25 ميغا باسكال.

ولقد ثبت في الوقت الحاضر بأن الشحنات السالبة عند الفلزات الغضارية تبقى دائماً على السطوح القاعدية وهذه الشحنات تعد أكثر فعالية، وتتغير إشارة الشحنات تبعاً لتغير حموضة الوسط و تفاعلها مع المحاليل.

فعندما تكون **pH<7** تكون الشحنات موجبة وعندها على الجوانب يجب أن توجد شوارد سالبة، وعندما تكون **pH>7** تمتز حول الفلز الغضاري فقط الشوارد الموجبة إن تأثير القوى الكهربائية الشاردية في الصخور الناعمة التبعثر تصبح ملحوظة خاصةً عند اقتراب الحبات لمسافة حتى(2–3 نانومتر) والتي عندها تبدأ تسيطر على قوى الجذب الجزيئي. ومع نشوء التأثيرات المتبادلة الكهربائية ـ الشاردية فإن متانة المنظومة الصخرية تزداد بشكل واضح وهذا يوضح بشكل خاص بالتمتين (التثبيت) للغضاريات عند جفافها.

هـ. الروابط البنيوية الشعرية: في الصخور المبعثرة التي تمثل منظومة ثلاثية الأطوار والتي رطوبتها ليست أقل من الرطوبة الأعظمية وليست أكبر من الحد السفلي للدونة، توجد رابطة

بنيوية على حساب القوى الشعرية. إن تأثير القوى الشعرية على سطوح التماس بين حبتين كرويتين ذات نصف القطر r يعبر عنها بالعلاقة التالية:(زيموف 1967)

$$F_k = 2\pi \sigma r$$

حيث أن:

σ : التوتر السطحي للسائل.

إذا كان واحد من السطحين المتماسين أو قطر إحدى الحبتين غير متساوٍ بالقياس لدرجة كبيرة بالمقارنة مع السطح أو القطر الآخر فإنه يكون:

$$F_k = 4\pi \sigma r$$

حيث أن:

r : قطر الحبة الأصغر.

انطلاقاً من المعادلتين المذكورتين أعلاه يمكن إعطاء تقييم تقريبي للقوى الشعرية في المنظومة المبعثرة المؤلفة من حبات كروية ذات أقطار 1 ميكرون. وقد أعطت الحسابات قيمة بحدود $4x10^{-7}$ نيوتن على سطح التماس.

<u>ثالثاً:</u> الروابط البنيوية ذات الطبيعة الميكانيكية: إن القوى ذات الطبيعة الفيزيائية والفيزياكيميائية المدروسة أعلاه تؤثر في مسامات المنظومات الدقيقة التبعثر المشبعة كلياً أو جزئياً بالماء. وفي المنظومات الأكثر خشونة على سبيل المثال الأحجار الرملية والصخور ذات الكسارات الكبيرة فان التأثير الإجمالي للرابطة البنيوية على حساب القوى المذكورة أعلاه يضمحل بدرجة كبيرة لهذا فإن مثل هذه الصخور تنسب عادة إلى المنظومات غير المترابطة أو السريعة الانهيار. إن التماسك (التلاصق) البنيوي لهذه الصخور ليس كبيراً ومشروطاً بفعالية ذات طبيعة ميكانيكية بحتة. وإلى هذه القوى تنسب قوى الإمساك المتبادل للحبات من جراء عدم التجانس الدقيق (المجهري) لتضاريس سطحها.

إن قيمة الإمساك المتبادل للحبات والكسارات الفلزية تتعلق بكثافة الصخور وتركيبها الحبي فهي تزداد مع كبر وعدم تجانس التركيب الحبي للصخور.

2. نشوء الروابط البنيوية وتشكل الصخور:

إن تشكل الروابط البنيوية في الصخور هي عملية تاريخية طويلة تتطور على مدى كل فترة تشكل الصخور ووجودها.

ففي لحظة تشكل الصخور (تبرد الماغما، إعادة التبلور عند العمليات التحولية، تراكم الرسوبات ....الخ) تنشأ فيها ما نسميها بالروابط البنيوية الأولية. وفي المراحل اللاحقة من (الحياة الجيولوجية) للصخور وتحت تأثير عمليات الارتصاص والانحلال والتجوية وارتشاح المحاليل وغيرها يمكن أن تنشأ في الصخور روابط بنيوية جديدة (ثانوية). وبنفس الوقت مع هذا يمكن أن تتغير وتتحول بهذه الجهة أو تلك الروابط البنيوية الأولية. وكل هذا يشترط تغيراً ثابتاً للروابط البنيوية خلال الزمن الجيولوجي. وبالتالي مع تغير الروابط البنيوية تتغير الخواص الجيوهندسية للصخور. وبالطبع يجب الأخذ بعين الاعتبار بأن متانة وطبيعة الروابط البنيوية في كل حالة محددة تتعلق بنسب المكونات في الصخور. فكما هو معروف جيداً على سبيل المثال أن متانة الغضار في الحالة الجافة يمكن أن تبلغ 10 ميغا باسكال ، بينما في الحالة الرطبة يكون لدناً أو بمثابة كتلة سيلانية تتشوه بسهولة تحت تأثير وزنها. لهذا عند الدراسات الجيوهندسية للصخور من الضروري أن يؤخذ بالحسبان إلى جانب تركيب وعمر ومنشأ الصخور، حالة هذه الصخور في كل لحظة محددة والتنبؤ بصفاتها مع الأخذ بالحسبان هذه الحالة.

في الصخور المغماتية والمتحولة تنتشر على نطاق واسع الروابط البنيوية البلورية ذات الطبيعة الكيميائية، وهذا يفسر متانتها العالية. وفي منطقة الهيبرجينيز فإن الصخور المغماتية وتحت تأثير عوامل التجوية وتشكل الترب تتعرض إلى التخريب. فإذا كانت التجوية الفيزيائية تسيطر على التجوية الكيميائية فإن تخريب (تحطيم) الصخور البلورية المتينة يتجلى بالأساس بالتحطيم

وعند مشاركة عمليات نقل مواد التجوية تتشكل الصخور الرملية والصخور التجمعية التي توجد فيها الروابط البنيوية الجزئية والكهربائية والشعرية الضعيفة.

إن قيمة الروابط البنيوية الجزئية والكهربائية بمقدار ما هي ضعيفة في تلك الصخور فإن هذه الصخور في الحالة الجافة تمثل أجساماً سريعة الانهيار لهذا اصطلح على تسمية هذه الصخور بالصخور غير المترابطة.

إن ظهور المياه الشعرية في هذه الصخور يعطي (يؤدي إلى نشوء) الرابطة البنيوية وبصورة خاصة للصخور الرملية الناعمة حيث تتفوق فيها المسامات الشعرية على المسامات اللاشعرية.

إن الروابط البنيوية الشعرية في الصخور التجمعية يمكن أن تنشأ في تلك الحالة عندما تتضمن مواد مالئة (رمال، مواد غضارية) بين المواد الحطامية الكبيرة (حصى، حصباء ....) قادرة على التمسك بالمياه الشعرية.

وعند سيطرة التجوية الكيميائية على الفيزيائية تتشكل الصخور الغضارية وصخور اللوس وهذه الصخور تتمتع بروابط بنيوية مختلفة في مختلف مراحل تشكلها.

إن الروابط البنيوية في هذه الصخور تأتي بحسب أهميتها على النحو التالي: الشاردية ـ الكهربائية ـ الشعرية ـ الجزئية ـ المغناطيسية. وفي صخور التورف وصخور المنشأ العضوي فإن النمط الآخر من هذه الروابط يغيب.

في الأحواض المائية تتشكل الصخور الكيميائية (الكربوناتية، السولفاتية، الهالوجينية) المترسبة من المحاليل عند إشباعها وكذلك الصخور العضوية القريبة منها والمتشكلة نتيجة تراكم الرسوبات السيليسية والكربوناتية للمتعضيات الميتة. فعند أغلب هذه الصخور تسيطر الروابط البنيوية البلورية. كذلك يملك هذا النوع من الروابط البنيوية أهمية كبرى في الصخور الرسوبية الملتحمة بملاط مثل الكونغلوميرا والأحجار الرملية والاليفرليت والأرجليت المتشكلة نتيجة عمليات السمنتة في مناطق الكاتاجينيز والهيبرجينيز. أما قيمة الروابط البنيوية البلورية عند الصخور الرسوبية الكيميائية والملتحمة بملاط فتتعلق بدرجة التصلب. فكلما كانت درجة التصلب

أكبر كلما كانت أمتن الروابط البنيوية البلورية وتحت تأثير عمليات التحول فإن الروابط البنيوية البلورية تصبح محددة لكل الصفات الجيوهندسية للصخور المتحولة.

إن الإنسان في عملية نشاطه الإنتاجي يمكن أن يغير تركيب خواص أية صخور ويحولها إلى صخور اصطناعية وبخاصةً يغير وبدرجة كبيرة خواص الصخور المبعثرة. وتبعاً لنمط الصخور، وطرائق وأساليب التأثير عليها فإن الصخور الاصطناعية يمكن أن تتمتع بروابط بنيوية مختلفة ومن ضمنها الروابط البلورية، وفي هذه الحالة فإن هذه الصخور (الاصطناعية) بمتانتها يمكن أن توافق الصخور ذات الروابط البنيوية البلورية.

3. بنية ونسيج الصخور:

إن التركيب الفلزي والمقاس والخصائص المورفولوجية للعناصر المكونة للصخور، وتوزعها الفراغي والتأثيرات المتبادلة فيما بينها تحدد المظهر العام للصخور الذي يعبر عنه بالبنية والنسيج.

فالبنية والنسيج مرتبطان بشكل وثيق بتركيب الصخور وبظروف تشكلها، وبهذا المعنى يعتبران أهم المؤشرات المنشئية. وفي نفس الوقت أيضاً فإن الخصائص البنيوية والنسيجية تعتبر من أهم مؤشرات الصخور النوعية التي تحدد خصائصها الفيزيائية وبصورة خاصة صفاتها الفيزيا ـ ميكانيكية. لهذا عند الدراسة الجيوهندسية للصخور بهدف إقامة مشاريع هندسية. فإن البنية والنسيج يدرسان كأساس لوضع (إيجاد) العلاقات بين الصفات الأساسية للصخور كوسط طبيعي وخواصها.

أ. البنية: مفهوما البنية والنسيج متشابهان جداً بالمعنى فمن اللاتينية البنية هي تركيب، توضع، بناء، تكوين. أما النسيج فهو اتحاد، ارتباط. إن التقارب بالمعنى بين هذين المفهومين أدى إلى تعريفها بالأدبيات العلمية الجيولوجية بمعان مختلفة. وسنعتمد التعريف الذي يستخدم على نطاق واسع في الأدبيات البتروغرافية وهو أن البنية يقصد بها خصائص بنية الصخور التي تتحدد بمقاسات الجزئيات المكونة (للفلزات) وعلاقات الارتباط المتبادلة بين المكونات وفي حقل

الجيولوجيا الهندسية أضيف مؤشر جديد للبنية وهو طبيعة علاقة الارتباط بين مكونات الصخور (الرابطة البنيوية) وبالتالي أصبحت تعرف بنية الصخر في الجيولوجيا الهندسية بأنها مقاس وشكل وطبيعة السطح والعلاقات الكمية لعناصره (الحبات المنفصلة، الجزئيات، الكسارات ....) وطبيعة علاقة الارتباط فيما بينها. هذا وطالما أن التأثيرات المتبادلة للعناصر البنيوية ترتبط بوجود مكونات أخرى في الصخر (سائلة، وفي بعض الحالات غازية) فإنه في مثل هذه النظرة تعتبر البنية مؤشراً للصخر كمنظومة متعددة المكونات.

يبقى الإشارة بأن مقاس العناصر البنيوية التي هي أحد المؤشرات البنيوية الأساسية يتغير ضمن مجالات واسعة ففي الصخور التجمعية الحطامية مقاسات المواد الحطامية يمكن أن تبلغ عدة عشرات السنتيمترات وفي الصخور الرملية والصخور المغماتبة (الاندساسية) والمتحولة تتراوح هذه المقاسات بين أجزاء مئوية من الميليمتر وحتى عدة ميليمترات، وفي الصخور الناعمة التبعثر تبلغ أجزاء من الألف من الميليمتر. وتبعاً لمقاس المؤشرات البنيوية فإن بنية الصخور يمكن أن تدرس بالعين المجردة أو بالمجهر. وفي كلتا الحالتين نستخدم مفهوم البنية ماكرو أو ميكرو (أي البنية الجهرية والبنية المجهرية).

تقسيم البنيات بحسب الخصائص المورفومترية للعناصر البنيوية:

في الجيولوجيا الهندسية كما في البتروغرافيا يستخدم على نطاق واسع تقسيم بنيات الصخور بحسب خصائص العناصر البنيوية أي بحسب مقاسها ودرجة تبلورها وتوجيهها وخصائصها المورفولوجية. وانطلاقاً من هذا المبدأ فإنه ضمن الصخور المغماتية العميقة تميز بنيات مكتملة التبلور متساوية الحبيبات (حبات متوسطة أو كبيرة) أو بنيات بورفيرية غير متساوية الحبات حيث الكتلة الأساسية فيها هي للحبات الناعمة أو المتوسطة. الصخور المتوسطة العمق (نصف عميقة) تتصف عادةً ببنيات ذات تبلور كامل (غالباً حبات صغيرة) أو بورفيرية حيث الكتلة الأساسية من الحبات ذات مقاسات صغيرة. الصخور البركانية تتمتع غالبيتها ببنيات ذات تبلور مجهري (خفي) أو بورفيرية حيث الكتلة الأساسية غير مكتملة التبلور أو زجاجية.

إن الصفة المميزة لكل الصخور المتحولة هي البنيات المكتملة التبلور. الحبات الفلزية المكونة لهذه الصخور تكون عادةً موجهة باتجاه واحد وهذا مرتبط بتشكلها في ظروف الضغط الموجه.

وبحسب العلاقة بين مقاسات العناصر المكونة فإن بنيات الصخور المتحولة تقسم إلى بنيات متجانسة أو غير متجانسة (بورفيرية). وإضافةً لذلك تميز البنيات التالية في الصخور المتحولة، فحسب أشكال فلزاتها تميز البنيات التالية:

- ايديوبلاستيه (Idioblastic) وفيها تكون البلورات ذات شكل تام الأوجه.
- كزينوبلاسيتيه (Xenoblastic) وتكون البلورات ذات شكل غير نظامي.
- غرانوبلاسيتيه (Granoblastic) تكون حبات الفلزات ذات حجوم وأشكال متقاربة.
- بورفيروبلاسيتية (Prophyroblastic) وفيها تكون حبات فلز أو عدة فلزات أكبر من حجوم الفلزات الأخرى في الصخر وتشكل الحبات الصغيرة أرضية الصخر.
- لبيدوبلاسيته (Lepedoblastic) تكون البلورات غير متجانسة القياس (صفائحية، حرشفية).
- نيماتوبلاسيتيه (Nematoblastic) وتتألف من بلورات موشورية منفصلة، عادةً أمفيبول.

أما بنيات الصخور الرسوبية الملتحمة بملاط تتحدد قبل أي شيء بمقاس وشكل المواد الحطامية المكونة لها فكما هو معروف تقسم الصخور الحطامية إلى أربعة أنواع:

صخور حطامية خشنة، صخور رملية، صخور اليريتية، صخور بيليتية.

ولكل نوع من هذه الأنواع بنية مميزة فللصخور الحطامية الخشنة تكون البنية حصبائية خشنة أو حصوية (مدورة) وللصخور الرملية تكون البنية رملية متوسطة أو ناعمة، بينما للصخور البيليتية تكون البنية بيليتية.

إن الأهمية الاستثنائية الكبرى عند وصف بنيات الصخور الحطامية الملتحمة بملاط تعطى لوصف المادة اللاحمة من حيث تركيبها وبنيتها وعلاقتها المتبادلة مع الجزيئات للحطامية. وبحسب هذا المؤشر الأخير يمكن أن تكون الجزيئات الحطامية منغرسة في الملاط وغير

متلاصقة (متماسة) فيما بينها. أو يمكن أن يملأ الملاط الفراغات بين الجزيئات الحطامية المتلاصقة أو يمكن أن يتوضع فقط على سطوح التماس بين الجزيئات والمواد الحطامية.

- بنيات الصخور الرسوبية الكيميائية والعضوية: تقسم وفقا لمقاس البلورات ودرجة التبلور وأيضاً تبعاً لمقاسات وأشكال الرواسب العضوية وتجمعاتها. إن أكثر البنيات انتشاراً هنا هي البنيات الحبيبة المبلورة أو المجهرية التبلور أو الأولّية ...الخ . البنية الأولى تصادف في الصخور الكلسية، الدولوميتية وبعض الصخور السيليسية والأملاح، أما البنيات الأخرى فتصادف عند الصخور الكربونائية والسيليسية.
- أما بنيات الصخور الحطامية الملتحمة بملاط ضعيف (الصخور الحطامية الخشنة) الأحجار الرملية، صخور اللوس، الغضاريات فتتمتع بتنوع كبير وهذا عائد للاختلاف في المقاس والشكل والعلاقة الكمية لعناصرها البنيوية وتستخدم هذه الخصائص المذكورة أعلاه لتقسيم هذه الصخور إلى عدة أنماط بتروغرافية لهذا فإن تسمية بنيات هذه الصخور مرتبط بشكل وثيق بتسمياتها البتروغرافية. وبناء على ذلك ضمن الصخور الحطامية تميز البنيات الحصبائية والحصوية. وعند وصف بنيات هذه الصخور يعتبر مهماً جداً إظهار تركيب وكمية المواد المالئة. فعند محتوى لا بأس به من المواد المالئة (أكثر من 40% للمواد الرملية و 30% للمواد الغضارية فإنه بالتأكيد يذكر في تسمية بنيات الصخور نوع المادة المالئة.
- ضمن الصخور الرملية وحسب درجة فرز الحبات والمواد الحطامية تميز بنيات حصوية رملية أو رملية، وهذه الأخيرة بدورها تقسم حسب مقاس الحبات المسيطرة إلى بنيات ذات حبات خشنة أو متوسطة أو ناعمة.
- أما بنيات الصخور الغضارية وصخور اللوس فتحدد بالعلاقات المتبادلة وبطبيعة علاقة الارتباط للمواد الحطامية (الرملية والغبارية) وللجزيئات الغضارية وبمقدار ما تتواجد هذه الأخيرة (الجزيئات الغضارية) في حالة تجمعية أو بهيئة أغلفة غضارية على سطح الحبات

التجمعية فإن تمييز بنيات الصخور الغضارية وصخور اللوس بحسب تركيبها الحبي (الغرانومتري) (كما هو الحال في حالة الصخور الحطامية والرملية) لا يمكن اعتباره صحيحاً. هذا وباستخدام المجهر الالكتروني في السنوات الأخيرة أصبح بالإمكان دراسة بنيات الصخور الناعمة التبعثر وتمييز عدة أنماط للبنية بحسب خصائصها المورفومترية.

تقسيم البنيات بحسب طبيعة الروابط البنيوية:

المبدأ البتروغرافي لتقسيم البنيات على الرغم من استخدامه الواسع في الجيولوجيا الهندسية إلا أنه لا يعطي تصوراً كاملاً عن بينة الصخور لأنه لا يتضمن صفات الروابط البنيوية التي هي من أهم مؤشرات البنية. لهذا عند الدراسة الجيوهندسية للصخور فانه إضافةً إلى البنيات المميزة بالمؤشرات البتروغرافية يتم تقسيم هذه البنيات بحسب طبيعة الروابط البنيوية. وفي أساس مثل هذا التقسيم يؤخذ نمط التماس المسيطر الذي يحدد بدوره بشكل عام طبيعة الروابط البنيوية في الصخر وبالتالي متانته. وبالتوافق مع ذلك وبحسب طبيعة الروابط البنيوية ضمن الصخور يمكن تمييز أنماط للبنيات : مبلورة، تجمعية، تخثرية، مختلطة، مفككة.

- البنيات البلورية: تميز هذه البنية أغلب الصخور المغماتية والمتحولة والتشكيلات الرسوبية ذات المنشأ الكيميائي (الأملاح، الصخور الكلسية، الدولوميت).
- البنيات التجمعية: وتميز الصخور الرسوبية الملتحمة بملاط مثل الصخور التجمعية، البريشا، الصخور الرملية، الاليفروليت، الكربونات ...الخ .
- البنيات التخثرية: تنتشر في الرسوبات ذات النمط التخثري للارتباط مثل الطمي، الصخور الغضارية ضعيفة التصلب، الترب، التورف.
- البنيات المختلطة: مميزة للصخور التي توجد فيها عدة أنماط من الارتباطات مثل الغضاريات الكثيفة، الحوار، الدياتوميت، الأحجار الرملية ذات الملاط الغضاري ...الخ .
- البنيات المفككة: هذه البنيات تتمتع بارتباط ضعيف مثل الصخور الحطامية الخشنة (بدون مواد مالئة غضارية) أو الصخور الرملية.

كل نمط من أنماط البنيات المذكورة أعلاه يتصف بقيم معينة للمتانة وبسلوكية تشوه مميزة، لهذا عند الدراسة الجيوهندسية للصخور من الضروري إضافةً إلى وصف خصائص بنيتها اعتماداً على المؤشرات البتروغرافية توضيح نمط البنية حسب الروابط البنيوية، وهذا يسمح بالحصول على تصور كامل ليس فقط عن تركيب وبنية الصخور وإنما عن خواصها أيضاً.

ب. النسيج: يقصد بالنسيج الصخري مجموع المؤشرات التي تصف التوضع النسبي وتوزع العناصر البنيوية للصخر في الفراغ.

فالنسيج مشابه للبنية ويتعلق بشكل أساسي بتركيب الصخور وظروف تشكلها فنسيج الصخور المغماتية يتصف بأشكال محددة تشكلت من جراء اختلاف ظروف تبرد المصهور المغماتي، وأكثر انتشاراً هنا النسيج المتجانس (أو الكتلي) النسيج الخطي، النسيج الكروي، النسيج الموجه. أما نسيج الصخور المتحولة فينقسم إلى نسيج كتلي ونسيج متورق وضمن النسيج المتورق تميز عدة أنواع من أهمها: النسيج الصفحي، المتوازي (الاردوازي)، النسيج الغنايسي، النسيج الشيستوي، النسيج الليفي وإضافةً إلى أنواع النسيج المذكورة أعلاه في الصخور المتحولة يصادف ما نسميه بالنسيج المتبقي وهو الذي يحتفظ بالخصائص النسيجية للصخور الأم على سبيل المثال التطبق للصخور الرسوبية.

وضمن الصخور الرسوبية يميز النسيج الكتلي (غير المتطبق) والنسيج المتطبق. فالنسيج المتطبق هو أكثر انتشاراً ضمن الصخور الرسوبية وهو يتميز بوجود طبقات أو طبيقات ضمن الصخور مميزة بتركيبها وببنيتها وبلونها ...الخ . وبحسب طبيعة النسيج المتطبق يقسم إلى نسيج عدسي، متوازي، مائل ...الخ . ويتصف هذا النسيج بتناوب الطبقات المنفصلة والطبيقات وهذا عائد إلى التغيرات الفصلية أو الطويلة الأمد في ظروف الترسيب.

هذا وعند وصف نسيج الصخور فإنه ينبغي وبوضوح التمييز بين الخصائص النسيجية للصخر نفسه (ضمن النمط البتروغرافي الواحد) وخصائص تكوين كل التشكيلة الصخرية (الماسييف) فينبغي تميز تطبق الصخر عن تطبق التشكيلة الصخرية وعن الحدود العليا والسفلى للسماكة

الرسوبية التي تفصلها عن الطبقة المغطية وعن طبقة الأساس وكذلك عن الطبقات الرسوبية المرتبط تشكلها بالحركات التكتونية أي الحركات الاهتزازية للقشرة الأرضية والتي تسبب تغيراً في ظروف تراكم الرسوبات. وإلى مؤشرات النسيج (دلائل، علائم) التي تصف سماكة الصخور بشكل عام يمكن أن ننسب أيضا الاقتطاعات الأولية للصخور المغماتية وتشققاتها.

ج. تأثير البنية والنسيج على خواص الصخور: كما ذكرنا سابقاً تعتبر البنية والنسيج من أهم مؤشرات الصخور التي تحدد خواصها فكما هو معروف جيداً على سبيل المثال ضمن الصخور المغماتية والمتحولة فإن الصخور الأكثر متانة وثبات أمام عمليات التجوية هي الصخور التامة التبلور وذات البنية المتساوية الحبات. وعند ذلك كلما كان مقاس البلورات عند هذه الصخور أصغر كلما كانت متانتها أكبر، وهذا يوضح بشكل أساسي بسببين هما:

أولاً: مع تناقص مقاس البلورات تنخفض شوائب بنيتها وتزداد متانة البلورات نفسها، وثانياً: تزداد كمية سطوح التماس بين العناصر البنيوية ووفقاً لذلك تقل قيمة الجهد (التوتر) المؤثر على واحدة سطوح التماس عند تطبيق حمولة خارجية.

إن الصخور ذات البلورات الكبيرة وبصورة خاصة عند عدم تساوي مقاسات هذه البلورات (بورفيرية) وعند عدم تساوي المسامية فإن بنياتها تتمتع بمتانة أقل، وعند وجود بلورات كبيرة في مثل هذه الصخور (وأيضاً مسامات كبيرة) فإن متانتها تتناقص بشدة بشكل عام عند التأثير عليها بحمولة ميكانيكية أو عند تغيرات حادة لدرجة الحرارة.

التأثير الكبير على خواص الصخور المغماتية والمتحولة يظهره نسيج هذه الصخور فالصخور ذات النسيج الكتلي عادة لا تتمتع بالخواص الأنيزوتروبية وأكثر ثباتاً أمام عمليات التجوبة، أما الصخور ذات النسيج المتورق أو الصفحي أو التدفقي فتتخرب بسهولة عند عمليات التجوبة وتأثير الحمولات الخارجية وتتمتع خواصها الفيزيائية والفيزياميكانيكية بالأنيزوتروبية.

فالصخور الحطامية الملتحمة بملاط تتعلق خواصها بالخواص البنيوية للحبات والكسارات الفلزية وأيضا بتركيب الملاط ونوعه. فالصخور الأكثر متانة وثباتاً هي الصخور التجمعية المؤلفة من

كسارات وحبات فلزية متوسطة وناعمة ومتجانسة المقاييس وذات ملاط كوارتزي، أما الصخور التجمعية المؤلفة من حبات وكسارات فلزية كبيرة وخشنة فتتمتع بمتانة أقل وتتخرب بسهولة وعند وجود ملاط غضاري فإن متانة الصخور الحطامية الملتحمة بملاط تنخفض بشكل ملحوظ.

إن الكثير من خواص الصخور الرسوبية الملتحمة بملاط يرتبط تقريباً بعلاقة خطية مع مساميتها، فمع زيادة المسامية تزداد النفوذية للماء أو الهواء لهذه الصخور وتنخفض المتانة ويزداد التشوه.

كما أنه ضمن الخواص النسيجية لهذه الصخور والتي تؤثر على خواصها الجيوهندسية ينبغي الإشارة إلى التطبق الذي ترتبط معه عادةً التشققية المنشئية وكلا العاملان يقود إلى خاصية الانيزوتروبية التي تظهر بوضوح في خواص هذه الصخور بينما تغيب عند الصخور ذات النسيخ الكتلي أو تظهر بشكل ضعيف جداً.

إن وجود الملاط الغضاري يضعف الروابط البنيوية في هذه الصخور وهذا يتجلى في انخفاض متانتها وظهور تشوهات سيلانية عند الحمولات الكبيرة.

ضمن الصخور الرسوبية الكيميائية والعضوية أكثر الصخور متانةً وثباتاً هي الصخور الكلسية المبلورة والدولوميت ذات البنيات المؤلفة من حبات صغيرة ومتوسطة متساوية المقاييس وأضعف هذه الصخور متانةً وثباتاً هي الصخور الكربوناتية ذات البنيات الأوليتية أو العضوية وكذلك الصخور السيليسية ذات البنية العضوية. التأثير الكبير على خواص الصخور المذكورة أعلاه تظهره مسامية هذه الصخور.

إن المجال الكبير لتغير المتانة والطابع المختلف لتشوه الصخور الكيميائية والعضوية يعود إلى التنوع الكبير في روابطها البنيوية. أما من أهم أسباب المتانة القليلة لمجموعة الصخور الكربوناتية والسيليسية (الحوار، المارل، الحجر الكلسي الأوليتي، الدولوميت) فهو تمتعها بنمط البنيات المختلطة (تجمعية، تخثرية ...الخ) لذلك فإن هذه الصخور تتمتع بخاصية اللدونة عند الرطوبة وتظهر التشوهات السيلانية تحت تأثير الحمولات.

إن تأثير الصفات البنيوية والنسيجية على خواص الصخور تظهر بشكل واضح عند الصخور الحطامية المفككة والصخور الناعمة التبعثر (المرتبطة ملاط ضعيف). فلقد أوضحنا سابقاً بأن وجود اختلاف بين خواص كل من الرمل والغضار عائد إلى تركيب هذه الصخور وتبعثرها. فالرمل ليس لدناً ولا ينتفخ ويرشح الماء منه بشكل جيد وضعيف الانضغاط تحت تأثير الحمولة الستاتيكية ولا يتمتع بأي ارتباط. وبالاختلاف عن الرمل فإن الغضار يتمتع باللدونة وبخاصية الانتفاخ وعملياً لا يرشح منه الماء وينضغط بشدة تحت تأثير الحمولات ويتمتع بعلاقة ارتباط. وضمن الصخور الغضارية الأكثر انضغاطية والأقل متانة هي مجموعة المونتموريلونيت، إنما الأكثر ثباتاً وأقل انضغاطية هي مجموعة الكاولينيت وهذا عائد إلى طريقة اجتماع صفائح الوحدات الأساسية المكونة للصخور الغضارية.

إن خواص الرمال والغضار تتعلق بشكل أساسي بمساميتها، فعند تراص هذه الصخور فإن كمية التماسات أو الالتصاقات بين العناصر البنيوية تزداد ومن ثم تزداد متانة الصخور وعند ذلك تتناقص نفوذيتها المائية.

وليس أقل تأثيراً على خواص الصخور المفككة والصخور الناعمة التبعثر تظهره الخواص النسيجية فوجود تطبق واضح أو مجهري يقود إلى الأنيزوتروبية الحادة لخواص هذه الصخور. وهنا نشير إلى أنه عند الصخور الغضارية الناعمة التبعثر يمكن أن يكون سبب الانيزوتروبية ليس التطبق وإنما وجود بنية مجهرية موجهة (على الأغلب التوجه للعناصر البنيوية في مستو محدد).

كذلك فإن خواص الصخور المفككة والصخور الغضارية لا تتعلق فقط بتبعثرها ولكن بطبيعة الروابط البنيوية. فالمتانة الضعيفة لسطوح التلاصق عند الصخور الحطامية الخشنة (عند غياب المادة المالئة الغضارية) وكذلك عند الصخور الرملية أو حسب سلوكها كمنظومة سريعة الانهيار.

وعند الصخور الغضارية وتبعاً لدرجة تصلبها يمكن أن تكون متطورة مختلف البنيات والروابط وبالتوافق مع ذلك فإن متانتها يمكن أن تتغير من أجزاء مئوية من الواحد وحتى عدة ميغا باسكالات بينما طبيعة التشوه تتغير من اللدونة وحتى الخواص السيلانية.

1. تصنيف الصخور:

1.4. مفاهيم عامة (أنواع التصانيف)

تختلف الصخور كثيراً بمنشئها وتركيبها وبنيتها وخواصها ولا يمكن دراسة خواص هذه الصخور إلا بترتيبها وتنظيمها في نظام معين (أي تصنيفها) فالتصنيف هو القسم الأساسي لأي علم طبيعي والمرحلة الأولى والهامة للاستنتاج العام للمعطيات. ويعتبر تصنيف الصخور في الجيولوجيا الهندسية وسيلة وطريقة لدراستها والتعرف عليها وهو هام وضروري لحل المسائل التالية:

1. تقسيم كل الصخور المتنوعة الموجودة في الطبيعة إلى مجموعات مختلفة بشكل جوهري بالمؤشرات المنشئية والبتروغرافية وبالخواص الإنشائية.
2. إنشاء خرائط ومقاطع ومخططات جيوهندسية.
3. تعيين تركيب وحجم وطريقة واتجاه الدراسة الجيوهندسية للصخور.
4. اختيار طرائق تحسين خواص الصخور.

إن إيجاد تصنيف جيولوجي ــ هندسي وحيد للصخور لم يتم بعد وهذا يعود إلى النقص في دراسة خواص الصخور والصعوبة في إيجاد تصنيف يؤمن مختلف متطلبات التطبيقات الهندسية هذا وتوجد عدة تصانيف هي:

- **التصانيف العامة:** وتشمل كل أنماط الصخور الأكثر انتشاراً في الطبيعة ووصفها من وجهة نظر جيوهندسية. وهي تقوم على أساس منشئي. ونقصد بالأساس المنشئي ليس فقط عملية نشوء الصخور ولكن التغيرات اللاحقة التي تتعرض لها الصخور (خلال حياتها الجيولوجية) وعند مثل هذا الإنشاء فإن التصنيف العام للصخور يظهر الخواص الجيوهندسية لهذه

الصخور مع خواصها المنشئية ويتابع تغيرات هذه الخواص من مجموعة صخرية إلى أخرى كما ويعتبر هذا التصنيف الأساس الذي يجب أن تقام عليه التصانيف الأخرى.

- **التصانيف الخاصة:** تهتم بتقسيم الصخور وفقاً لمتطلبات هذا النوع أو ذاك من الإنشاءات فمثلاً أنماط الصخور الصلبة المميزة يمكن أن تكون مقسومة إلى أنواع: حسب مقاومتها المؤقتة للانضغاط أحادي المحور، وحسب درجة التشقق، وكذلك حسب درجة التجوية ....الخ، وكل نوع من هذه الأنواع يعتبر تصنيفاً خاصاً من الصخور الصلبة. فمثلاً الصخور الرملية يمكن وبحسب تركيبها الغرانومتري وضعها بتفصيل كبير أكثر مما هو منفذ في التصنيف العام وكل تقسيماتها الجديدة تعتبر تصنيفات خاصة للصخور الرملية وكذلك الأمر بالنسبة للصخور الغضارية ولصخور اللوس وأيضاً للترب والتورف.
- **التصانيف الإقليمية:** وفيها تدرس الصخور منسوبة إلى منطقة معينة وعند إقامتها يتم الانطلاق من التصورات عن التشكيلات الجيولوجية والسحنات وفي أساس هذا التصنيف يجب أن تؤخذ (وتتوضع) تقسيمات الصخور الموجودة في المنطقة حسب العمر والمنشأ.
- **التصانيف الفرعية:** وتوضع وفقاً لمتطلبات الإنشاءات الهندسية المحددة كتصنيف الصخور تبعاً للأغراض المنجمة حيث تقسم الصخور وفقاً لحاجتها للتدعيم بعد أعمال الحفر إلى الأنواع التالية: صخور كتلية قوية لا تحتاج إلى تدعيم وصخور ضعيفة تحتاج إلى تدعيم أو التصنيف بغرض إنشاء الأنفاق (صخور متماسكة، صخور متطبقة، صخور مشققة، صخور كتلية، صخور مهشمة، صخور شديدة الانتفاخ، صخور قليلة الانتفاخ) وغير ذلك.

إن التصانيف العامة تعتبر أساساً لكل التصانيف الأخرى لذلك فإن تحديدها بشكل صحيح يتمتع بأهمية كبرى .

2.4. مبادئ إقامة التصانيف العامة للصخور

تصنف كل تنوعات الترب المصادفة في الطبيعة في مجموعات وفق مبادئ ومؤشرات مختلفة. إن أول تصنيف للصخور كما ذكرنا سابقاً قسم الصخور بحسب خاصية واحدة لهذه الصخور

أو اثنين أو ثلاثة، على سبيل المثال بحسب قابليتها للانضغاط وللانحلال. ويبدو هذا للوهلة الأولى جيداً حيث في أساسه تستقر أهم خواص الصخور لكن في الحقيقة هذا المبدأ لا يملك أهمية كبيرة لأنه يوحد الصخور بحسب مؤشر أو عدة مؤشرات هامة دون أن يأخذ بعين الاعتبار منشأها وخصائصها البتروغرافية. هذا حتماً يقود إلى أنه إذا قسمنا الصخور إلى مجموعات بحسب هذا المؤشر فإن دراستها في حقل علمي غالباً ما يظهر بأنها مختلفة جداً بخواصها وسنوضح هذا بمثالين:

المثال الأول:

هو أن الصخور المغماتية والمتحولة والصخور الرسوبية الملتحمة بملاط يمكن تقسيمها بحسب قيمة المقاومة المؤقتة للانضغاط أحادي المحور في حالة الإشباع بالماء (Rc) وعند ذلك تميز عدة مجموعات صخرية بدءاً من الصخور المتينة جداً (Rc=120 ميغا باسكال) وحتى الصخور الضعيفة المتانة جداً (1 – 0.1 =Rc ميغا باسكال) ومثل هذا المجال الكبير لمتانة الصخور المشبعة بالماء يعطي إمكانية ليست فقط لتقسيم الصخور إلى أنواع مختلفة ولكن فصل عدة مجموعات متمايزة ضمن التصنيف العام لهذه الصخور. وبناء على ذلك يمكن تمييز المجموعة الصلبة (القاسية) في مجموعة واحدة اعتماداً على قيمة (Rc) حيث تعتمد قيمة (Rc=5 ميغا باسكال) كحد فاصل بين هذه المجموعة والمجموعة شبه الصلبة. وإذا اعتمدنا هذه الفرضية فإنه ضمن الصخور ذات المتانة العالية يمكن أن نذكر الغرانيت والطين الصفحي المبلور والصخور الكلسية وغيرها وعند نفس المتانة لهذه الصخور فإنها تتباين بشكل كبير. فالطين الصفحي وبالاختلاف عن الغرانيت يتمتع بالانيزوتروبية الميكانيكية، بينما الصخور الكلسية تتمتع بقابلية الانحلال التي لابد من أخذها بالحسبان.

وهكذا أيضاً يمكن القول بالنسبة للصخور التي تتصف بمتانة ضعيفة جداً. فضمنها يمكن تمييز عدة مجموعات صخرية مثل الطين الغضاري، الدياتوميت، المارل، الجص وغيرها. وجميع هذه الصخور عند نفس المتانة المنخفضة تملك خواص مختلفة فالجص يتصف بقابلية انحلال لا

بأس بها والمارل بالقدرة على الانتفاخ، والدياتوميت عند تخريب البنية الطبيعية وعند رطوبة محددة يتمتع بخواص اللدونة، أما الطين الغضاري فيتمتع بشكل واضح بالأنيزوتروبية.

وهكذا يتضح بأنه عند نفس القيمة بـ (Rc) فإن الصخور تختلف عن بعضها البعض بخواص أخرى وبالتالي تقسم الصخور المغماتية والمتحولة والرسوبية الملتحمة بملاط إلى مجموعتين:

حسب قيمة Rc ليس جيداً، إذ أنه ضمن الصخور شبه الصلبة يقع الطين الغضاري والطف، أما بقية الصخور النارية والمتحولة فتنتسب إلى الصخور القاسية. إلا أن الصعوبة الأساسية تنشأ عند تقسيم مجموعة الصخور الرسوبية الملتحمة بملاط. ففي هذه الحالة الصخور ذات المنشأ الواحد والمتشابهة بخواصها البتروغرافية تبدو في مجموعتين مختلفتين. فعلى سبيل المثال ينسب الأنهدريت إلى مجموعة الصخور الصلبة، بينما الجص ينسب إلى الصخور شبه الصلبة وكذلك بالنسبة للكونغلوميرا والأحجار الرملية.

إن كل الصخور السولفاتية والكربوناتية ومن وجهة نظر بعض العلماء (سرغيف ...) توجد تصنيفاً في مجموعة واحدة فهذه الصخور متقاربة بمتانتها، كذلك تتمتع هذه الصخور بخاصية الانحلال وهذا ما يفسر تعرضها لتشكل المظاهر الكارستية وفي هذا تتجلى وحدة صخور هذه المجموعة.

وكذلك يمكن القول عن الصخور الكونغلوميراتية والرملية وغيرها من الصخور الرسوبية الملتحمة بملاط من حيث متانتها معبراً عنها من خلال قيمة Rc إلا أن الأكثر أهمية في هذه الصخور هو أن متانة هذه الصخور تتعلق بالدرجة الأولى بتركيب وبنية ملاطها وفي هذا وحدة صخور هذه المجموعة.

وهكذا يتضح من هذا المثال بأن إنشاء تصنيف عام على أساس تقسيم الصخور الصلبة بحسب مؤشر المتانة يعتبر غير ملائم.

المثال الثاني:

يخص الصخور الناعمة التبعثر، ففي هذا الصف تدخل صخور مختلفة التبعثر. إن أكثر مجموعات هذه الصخور تعقيداً هي الصخور التي تحوي على جزيئات شديدة التبعثر توافق الجزيئات الاليفرليتية والغرينية بالمقاس (الصخور الغضارية وصخور اللوس) وكنماذج لهذه الصخور نذكر الغضار واللوس. فللغضار كما للوس تعتبر اللدونة من أهم المؤشرات ولكنهما يختلفان بعدد اللدونة وبدرجة الكثافة وعند التأثيرات المتبادلة بين الحبات الفلزية والماء عند الغضار تلاحظ زيادة في حجم الصخور (انتفاخ) أما عند اللوس فيلاحظ العكس (انضغاط الحجم) أي انكماش وبالتالي في أساس تقسيم الصخور المبعثرة لا تستخدم صفة واحدة.

إن المثالان السابقان يسمحان بالوصول إلى خلاصة مفادها أنه عند إنشاء (وضع) تصنيف عام للصخور لا يجب الاقتصار (الاعتماد) على صفة وحيدة للصخور. فعند دراسة بعض الصفات المنفصلة يمكن تقسيم الصخور إلى أشكال وتحت أشكال وأنواع. إلا أن التصنيف العام الذي يشكل المدخل الملائم لحل كل المسائل في الجيولوجيا الهندسية هو الذي يعتمد منشأ الصخور كمؤشر أساسي حيث تقسم الصخور وفق هذا المبدأ إلى صفوف، مجموعات، تحت مجموعات، أنماط. فعند المؤشر المنشئي يجب حساب العلاقة المتبادلة بين المجموعات الصخرية المختلفة.

فالصخور المغماتية تعتبر صخوراً أولية فعند تأثير عمليات التجوية تتشكل الصخور الرسوبية. وعند ذلك تتحطم الصخور المغماتية بشكل متباين. ففي بداية مرحلة عملية التجوية وعندما تسيطر التجوية الفيزيائية تتشكل الصخور الرسوبية الحطامية (التجمعية والرملية) وعند التطور الحاد لعمليات التجوية أي عندما تسيطر التجوية الكيميائية يحدث تغير في التركيب الفلزي للصخور وتتشكل الفلزات الغضارية التي وجودها في الصخور يشترط صفات خاصة (اللدونة وغيرها). وعلى الصخور الرسوبية تتشكل الترب ومن الترب والصخور الرسوبية تنقل المياه بعض العناصر وتوضعها في الأحواض والتي يقود تركيزها في هذه الأحواض إلى تشكل رسوبات

كيميائية وبيوكيميائية (صخور عضوية). كما أن الأملاح والأكاسيد يمكن أن تلعب دور الملاط بين كسارات الصخور والحبات الفلزية المنفصلة وتتشكل الصخور الرسوبية الملتحمة بملاط.

إن أية صخور تحت تأثير عمليات التحول تتحول إلى صخور متحولة. وتحت تأثير عمليات التجوية الفيزيائية فإن الصخور المتحولة والترسبات الكيميائية والصخور الرسوبية الملتحمة بملاط تتحول من جديد إلى صخور رسوبية غير ملتحمة بملاط.

هذه الدورة الطبيعية للصخور تتخرب أكثر فأكثر من قبل الإنسان الذي يشكل الصخور الاصطناعية.

3.4. التصنيف العام للصخور

لقد ذكرنا أعلاه بأن المؤشر الجيولوجي الأساسي لتقسيم مختلف الصخور التي تصادف في القشرة الأرضية هو منشأ هذه الصخور. وتبعاً لذلك تميز مجموعات الصخور المغماتية والصخور المتحولة، والصخور الرسوبية وكذلك الصخور الاصطناعية. وكل مجموعة من هذه الصخور تتمتع بعدد من المؤشرات والصفات الخاصة بها ومن أهمها:

التركيب الفلزي، البنية، النسيج، ظروف التوضع، الحالة الفيزيائية والصفات الفيزيائية والميكانيكية. وعلى أساس كل هذه المؤشرات المنشئية الأساسية يمكن تمييز عدد كبير من الأنماط البتروغرافية للصخور.

إن مختلف الأنماط المنشئية والبتروغرافية للصخور يمكن أن توجد في مجموعات محددة بصفاتها الفيزيائية ــ الميكانيكية (المتانة، التشوه، النفوذية المائية ....الخ) وانطلاقاً من هذا تقسم الصخور إلى صفين أساسيين يختلفان بشكل حاد بصفاتهما الجيولوجية ــ الهندسية:

- صخور صلبة تسود فيها الروابط البنيوية البلورية وهي تتمتع بمتانة عالية وتشوه قليل وتكون في أغلب الأحيان مشققة أو مكرستة في حالة الصخور الكربوناتية. وتعتبر أماكن انتشار هذه الصخور في أغلب الأحيان ملائمة لإنشاء مختلف المنشآت الهندسية بدون استخدام

تدابير معقدة لتأمين ثباتها وتشمل هذه الصخور كل من الصخور المغماتية والمتحولة والرسوبية ذات الروابط البنيوية البلورية (الصخور الكيميائية).

- صخور رخوة (مفككة) ويكون فيها دور الروابط البنيوية البلورية ضعيفا، وهذه الصخور تتصف بمتانة أقل بكثير من المجموعة السابقة وتشوه كبير جداً، كما تتصف بعض أنواع هذه الصخور بنفوذية مائية عالية، وهي تشمل مختلف الأنماط المنشئية للصخور الرسوبية وبشكل خاص تلك التي تعود لعمر الرباعي.

إن الاختلاف في الصفات الجيوهندسية لهذين الصنفين من الصخور كبير جداً.

هذا ويضاف عادةً في الدراسات الجيوهندسية إلى الصفين السابقين مجموعة الصخور الاصطناعية الصلبة للصف الأول وتمتاز بأن الروابط البنيوية فيها من صنع الإنسان وهي ذات متانة عالية وقابلية قليلة للانحلال، وأيضاً مجموعة الصخور الاصطناعية الرخوة إلى الصف الثاني وتمتاز بأن الروابط البنيوية فيها مختلفة وذلك تبعا لأسلوب تشكل الصخر الاصطناعي وبشكل عام تكون الروابط البنيوية القاسية فيها ثانوية. وتتعلق خواص هذه الصخور بأسلوب الحصول عليها وصفات الروابط البنيوية فيها.

ويقسم كل صف إلى عدة مجموعات وكل مجموعة تقسم بدورها إلى عدة تحت مجموعات وذلك على أساس المؤشرات المنشئية وفي كل تحت مجموعة يمكن تمييز عدة أنماط حسب الخصائص البتروغرافية، هذا ويعتبر تقسيم الصخور الرخوة أكثر صعوبة حيث تسود فيها الروابط البنيوية ذات الطبيعة الفيزيائية المتنوعة ويميز ضمنها مجموعتين أساسيتين: مجموعة الصخور الحطامية المفككة (غير الملتحمة بملاط) ومجموعة الصخور الرسوبية الغضارية وصخور اللوس.

****

الخواص الفيزيائية للصخور

1. خواص الكثافة:

تعتبر الكثافة من أهم الخصائص الفيزيائية للصخور وهي عبارة عن النسبة بين وزن الصخر (بما في ذلك كل مكوناته) وحجمه.

$$\rho = m / v$$

(**m** وزن الصخر بالغرام ، **v** حجم الصخر بالسم^3) وعليه تقدر الكثافة غ/سم^3 . وبما أن المكونات المائية والغازية في الصخور تتغير تحت تأثير مختلف العوامل الطبيعية والاصطناعية فإن وزن الصخر وكثافته سيتغيران.

تستخدم في الدراسات الجيوهندسية عدة مؤشرات لوصف الكثافة مثل كثافة الأجزاء الصلبة، كثافة الصخر، كثافة الهيكل الصخري، كثافة الصخر المغمور، وكثافة الصخر الجاف.

1.1. كثافة الحبات الصلبة: وتسمى كتلة واحدة الحجم من الصخور الخالية من المسام وهي تعادل نسبة كتلة المكونات الصلبة إلى حجمها. تتعلق كثافة المكونات الصلبة بالتركيب الفلزي وبوجود مواد عضوية وعضوية ـ فلزية وهي تمثل قيمة وسطى لكثافة هذه المكونات. وان كثافة المكونات الصلبة لأغلب الصخور تتغير من 2,5 حتى 2,8 غ/سم^3 وهي تزداد مع زيادة نسبة الفلزات الثقيلة في الصخور. لهذا فإن كثافة الحبات في الصخور الأساسية وفوق الأساسية تبلغ (3 – 3,4 غ/سم^3). وهي أعلى من كثافة الصخور الحامضية فهي عند الغرانيت (2,63 – 2,75 غ/ سم^3) كذلك فإن وجود المواد العضوية يخفض بشكل حاد قيم هذه الكثافة (فكثافة الدبال يبلغ 1,25–1,4 غ/سم^3) لهذا تكون كثافة الصخور الرسوبية السطحية الغنية بالمواد الدبالية أقل من كثافة الأنواع نفسها من الصخور الموجودة على أعماق معينة من سطح الأرض.

تعتبر كثافة المكونات الصلبة لبعض أنواع الصخور المفككة الخالية من المواد العضوية والأملاح الذوابة في الماء ثابتة تقريباً وتبلغ القيم الوسطية التالية لبعض أنواع الصخور مقدرة غ/سم^3 : الرمل 2,66 ، الرمل الغضاري 2,7 ، الغضار الرملي 2,71 ، الغضار 2,74 .

وتستخدم كثافة المكونات الصلبة (كثافة الحبات) لحساب مجموعة من المؤشرات الأساسية للصخور وبصورة خاصة المسامية ومعامل المسامية.

2.1. كثافة الصخر أو كثافة الصخر الرطب: وهي عبارة عن كتلة واحدة الحجم من الصخور في حالتها الطبيعية وتتعلق قيمتها بالتركيب الفلزي والرطوبة والمسامية. فهي تزداد مع زيادة نسب الفلزات الثقيلة والرطوبة في الصخور وتبلغ قيمتها العظمى عندما تكون الصخور مشبعة تماماً بالماء وتتناقص بزيادة نسب المواد العضوية في هذه الصخور كما تتناقض كثافة الصخور مع زيادة المسامية.

تتعلق كثافة الصخور الرسوبية (الأحجار الرملية، الصخور الغضارية الكربوناتية ...) بالدرجة الأولى برطوبتها ومساميتها وبدرجة أقل بتركيبها الفلزي وهذا يعود بالدرجة الأولى إلى الاختلاف الكبير في قيم المسامية لهذه الصخور.

أما كثافة الصخور المغماتية والمتحولة وقسم لا بأس به من الصخور الرسوبية الكيميائية المنشأ فتتحدد بشكل أساسي بتركيبها الفلزي إذ أن مسامية هذه الصخور قليلة نسبياً. تتغير كثافة الصخور المفككة (الغضارية، اللوس، الأحجار الرملية والحطامية ذات الحبات الكبيرة) من 1,3 وحتى 2,20 غ/سم^3.

وتتمتع الصخور التي تتصف بوجود روابط بلورية قاسية بين الحبات بكثافة أكبر وتقترب من كثافة الحبات الصخرية عندما تكون المسامية قليلة. وهكذا فإن كثافة الصخور المغماتية تتغير بحدود 2,5– 4,3 غ /سم^3 وهي تزداد من الصخور الحامضية إلى الأساسية وفوق الأساسية.

3.1. كثافة الهيكل الصخري أو كثافة الصخر الجاف: وهي عبارة عن كتلة واحدة الحجم من الصخور الخالية من الرطوبة وتعادل النسبة بين المكونات الصلبة وحجم الصخر الجاف في

الحالة الطبيعية (حجم المكونات الصلبة بالإضافة إلى حجم المسام). وتتغير قيم هذه الكثافة في حدود ضيقة بالمقارنة مع كثافة الصخر الرطب كونها تتعلق بالتركيب الفلزي وبالمسامية. فكلما كانت المسامية أقل وتواجد الفلزات الثقيلة أكبر كلما كانت كثافة الهيكل أكبر وفي الصخور المفككة الخالية من المواد العضوية تتعلق كثافة الهيكل الصخري فقط بالمسامية ويتم تعيين كثافة الهيكل الصخري (ρ_d) تجريبياً أو تحسب بواسطة كثافة الصخر (ρ) والرطوبة (w) بالعلاقة التالية:

$$\rho_d = \rho / (1 + w)$$

وفي بعض الصخور المفككة (كالأحجار الرملية) لا يمكن تحديد كثافة الهيكل الصخري في الحالة الطبيعية لأنه لا يمكن الحصول على صخور رملية غير مشوهة.

فبنية الصخر ونسيجه الطبيعيين يختلفان عند رفع العينات من الحقل. وإن تجفيف العينات الصخرية للتخلص من الرطوبة يؤدي إلى تغير كبير للمسامية فيها. لذلك أثناء الدراسات الجيوهندسية لمثل هذه الصخور ينبغي تحديد كثافة الهيكل الصخري في حالتي التراص الأعظمي والتفكك الأعظمي.

تستخدم كثافة الهيكل الصخري بشكل واسع لحساب المسامية وعامل المسامية، وأيضاً لوصف درجة تراص الصخور الغضارية المستخدمة في المنشآت الهندسية كالسدود وغيرها. هذا وتصادف مجموعة أخرى من مفاهيم الكثافة أثناء التطبيقات العملية مثل كثافة الصخور المشبعة بالماء وكثافة الصخور المغمورة وغيرها ويستخدم المفهوم الأخير لتحديد استقرار أساس المنشآت والطبقات الصخرية المغمورة بالماء والتي توجد تحت مستوي المياه الجوفية.

4.1. تعيين مسامية الصخور باستخدام مفهوم الكثافة:

المسامية: هي كل الفراغات الموجودة داخل الصخر مهما كان منشؤها وأشكالها وأبعادها وعلاقاتها الداخلية وتقسم المسامات حسب منشئها إلى مسامات أولية وأخرى ثانوية.

تتشكل المسامات الأولية مع تشكل الصخر حيث تتواجد في الصخور الحطامية بين حباتها وفي الصخور الكيميائية بين بلوراتها وحباتها كما تلاحظ بين مستويات تنضد الصخور الرسوبية كذلك تتشكل نتيجة انطلاق الفقاعات الغازية الموجودة داخل الصخور والتي تكون بحاله سائلة (مسامات الصخور النارية).

أما المسامات الثانوية فتنشأ نتيجة لعمليات كثيرة من أهمها الانحلال الجزئي والتبلور وإعادة التبلور والدلمتة والتعرية وغيرها. ويحدد شكل المسامات وأبعادها والعلاقات المتبادلة فيما بينها شكل وبينة الفراغ المسامي في الصخر. وتميز عموماً عدة أنواع من المسامية استناداً إلى طبيعة العلاقات المتبادلة بين المسامات فإذا كانت المسامات الموجودة في الصخر مرتبطة ومتصلة فيما بينها تسمى بالمسامات المفتوحة أما إذا كانت هذه المسامات معزولة عن بعضها البعض وغير متصلة يطلق عليها اسم المسامات المغلقة. ويسمى مجموع المسامات المفتوحة والمغلقة بالمسامية العامة للصخر. كذلك تقسم المسامات من وجهة نظر ديناميكية (حسب حركة الغازات والسوائل فيها) إلى مسامات فعالة تمكن السوائل والغازات من التحرك خلالها تحت تأثير ضغوط مناسبة ومسامات غير فعالة لا تسمح بهذه الحركة بسبب ضيق لأقطار هذه المسامات أو كونها مغلقة أصلا ولتعيين المسامية (n) وعامل المسامية (e) تستخدم عادةً علاقة تربط بين هاتين القيمتين وكثافة الحبات (المكونات) الصلبة (ρ_s) وكثافة الصخر (ρ) أو كثافة الهيكل الصخري (ρ_d) فالمسامية تصف كما ذكرنا أعلاه حجم المسامات في واحدة الحجم وتحسب بالعلاقة التالية:

$$n = 1 - V_s = 1 - (\rho_d / \rho_s) = (\rho_s - \rho_d) / \rho_s$$

V_s : حجم المكونات الصلبة في واحدة الحجم.

وتقدر المسامية كجزء من الواحد أو كنسبة مئوية.

أما معامل المسامية فيساوي نسب حجم الفراغ المسامي إلى حجم المكونات الصلبة للصخر ويقدر كجزء من الواحد ويحسب بالعلاقة التالية:

$$e = n / V_s = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d$$

وترتبط المسامية (n) وعامل المسامية (e) بالعلاقتين التاليتين:

$$e = n / (1 - n)$$

$$n = e / (1 + e)$$

تملك دراسة المسامية أهمية قصوى لأنها تؤثر بشكل واضح على الكثير من الخواص الجيولوجية الهندسية للصخور كالخواص الحرارية والكهربائية والنفوذية، وهي تستخدم كمؤشر أساسي لوصف الصخور وتصنيفها في الجيولوجيا الهندسية وخصوصاً الصخور الحطامية، ونورد فيما يلي تصنيف الصخور الرملية باستخدام عامل المسامية جدول/1/

الجدول (1) تصنيف الصخور الرملية حسب عامل المسامية

نوع الرمال	درجة الارتصاص (التكتل)		
	شديدة التكتل	متوسطة التكتل	ضعيفة التكتل
رمال كبيرة ومتوسطة الحبات	$e < 0.55$	$0.55 \leq e \leq 0.70$	$e > 0.70$
رمال صغيرة و ناعمة الحبات	$e < 0.60$	$0.60 \leq e \leq 0.75$	$e > 0.75$
رمال ناعمة جداً (غبارية)	$e < 0.60$	$0.60 \leq e \leq 0.80$	$e < 0.80$

هذا وعند الدراسات الجيوهندسية ينبغي تعيين عامل الارتصاص (التكتل) للصخور الرملية لذا يتم تعيين عامل المسامية للصخور في الحالة الطبيعية (e) وفي حاله التفكك الأعظمي (e_{max}) والتكتل (الارتصاص) الأعظمي (e_{min}) ويتم إيجاد عامل الصلابة حسابياً بالعلاقة التالية:

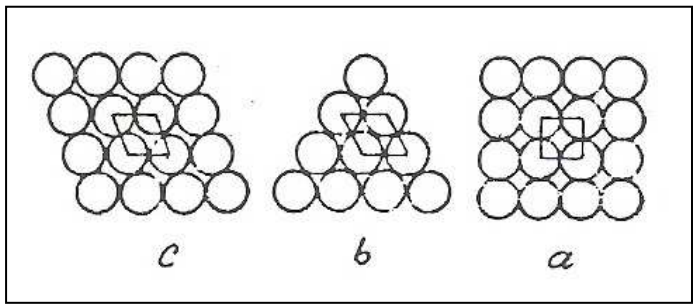
$$Id = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min})$$

استناداً إلى قيم Id تقسم الصخور الرملية إلى ثلاث مجموعات:

1. صخور ضعيفة التكتل : $0 < Id \leq 0.33$
2. صخور متوسطة التكتل : $0.34 \leq Id \leq 0.66$
3. صخور شديدة التكتل : $0.67 \leq Id \leq 1$

وتعتمد قيمة المسامية أيضاً على شكل وترتيب ودرجة تجانس الحبات المكونة للصخر فإذا كان الصخر متجانساً ومؤلفاً من حبيبات كروية الشكل ومرتبة بأوضاع مختلفة تبين الحسابات أن حجم الفراغات بين الكريات الحالة (a) هو 47.64% من الحجم الإجمالي وفي الحالة (b) يبلغ 26.18% ، الشكل /1/ . وتجدر الإشارة إلى أن قيم المسامية تنخفض إذا كانت حبيبات الصخر غير متجانسة المقاييس إذا أن الحبيبات الصغيرة تستقر في الفراغات الكائنة بين الحبيبات الكبيرة.

إن التقييم العام للفراغات الصخرية في كثير من الحالات لا يمكن أن يتم بدون حساب التشققية. فالكثير من الصخور وخاصةً المغماتية والمتحولة عند مسامية 1–5% يمكن أن تمتلك فراغات تشققية تبلغ 10–20% ، وأثناء دراسة الصخور توجد صعوبة في الفصل بين التشققات والفراغات المسامية حيث أن التشققات يمكن أن ينظر إليها كمسامية خطية. لهذا يتم التحدث عن الفراغات العامة في الصخر.



الشكل (1): تأثير ترتيب الحبيبات الكروية على قيمة المسامية

a : الترتيب الأقل كثافة ، b : الترتيب الأكثر كثافة ، c : الترتيب المتوسط الكثافة

وتقسم الشقوق حسب عرضها إلى شقوق دقيقة أصغر من (1مم) ، صغيرة (1–5مم) ، متوسطة (5–20 مم) ، كبيرة (20 –100 مم) وكبيرة جداً أكبر من 100 مم.

أما حسب المنشأ فتقسم إلى الأنواع التالية:

1. شقوق أولية تنشأ مع تشكل الصخر.
2. شقوق تكتونية تتشكل أثناء التشوهات التكتونية (ضغط وشد).

وأكثر ما تلاحظ هذه الشقوق هو عند الصخور ذات الروابط البلورية القاسية وتكون قليلة جداً عند الصخور المفككة وتمتاز هذه الشقوق باستمراريتها ومحافظتها على الاتجاه عند اختراقها لمختلف التشكيلات الجيولوجية الموجودة .

3. شقوق لا تكتونية ويكون تشكلها مرتبطاً بالخواص الداخلية للصخور تحت تأثير القوى التي تظهر بفعل العمليات الجيولوجية الخارجية التي تحدث على سطح القشرة الأرضية أو بالقرب منه كشقوق التجوية و إزالة الثقل.

وعند الدراسة الجيو هندسية بالإضافة إلى نوعية التشققات تعطى أهمية للتقدير الكمي لها ويتم ذلك بإيجاد ما يسمى بعامل التشقق الفراغي (K_T) المقترح من قبل العالم نيشتاديت وهو يعطى بالعلاقة التالية:

$$K_T = (F.100) / S_{\%}$$

F : مجموع مساحة الشقوق في المنطقة المدروسة.

S : مساحة هذه المنطقة و تبعاً لهذه النسبة قسمت إلى الأنواع التالية:

1. صخور ضعيفة التشقق حيث تقل نسبة التشققات فيها عن 2% .
2. صخور متوسطة التشقق وتتراوح نسبة التشققات فيها بين 2- 5% .
3. صخور شديدة التشقق وتبلغ نسبة التشققات فيها 5-10% .
4. صخور شديدة التشقق جداً وتزيد نسبة التشققات فيها عن 10% .

2. النفوذية:

1.2. مفهوم النفوذية والنفوذية المائية:

النفوذية هي خاصة الصخور بالسماح للسوائل والغازات وخليطها بالمرور من خلال فراغاتها تحت تأثير قوى ضغط مطبق على هذه الصخور. وعند الدراسات الجيوهندسية يحدث عادةً دراسة النفوذية المائية للصخور حيث نعني بها قدرة الصخور على إمرار المياه عبر فراغاتها.

ويتم تحديد نفوذية الصخور المائية كمياً بواسطة ما يسمى عامل النفوذية المائية أو عامل الرشح.

إن حركة المياه الجوفية تحت تأثير انخفاض الضغط أو الرشح في الصخور المشبعة تماماً بالمياه تخضع في حالة الحركة الصفائحية للقانون الخطي للرشح (قانون دراسي):

$$V = K\,(\Delta H/L) = KI$$

V : سرعة الرشح ، K : عامل تناسب يسمى بعامل الرشح ، I : تدرج الضغط.

يتضح من المعادلة بأن عامل الرشح يساوي سرعة الرشح عند تدرج هيدروليكي يساوي الواحد. ويقدر عامل الرشح بـ م/ يوم ونادراً بـ سم/ثا ، وتتعلق قيمة عامل الرشح بأبعاد الفراغ المسامي وبالخواص الهيدروديناميكية للسائل الراشح (اللزوجة، الكثافة). هذا ولوصف الخواص الرشحية للصخور المشبعة بالمياه يستخدم عادةً إلى جانب عامل الرشح ما يسمى بعامل الناقلية المائية.

$$T = K\,m$$

K : عامل الرشح ، m : السماكة الوسطى للطبقة الحاملة للمياه.

ويقدر عامل الناقلية المائية بـ م^2/يوم. وهو يعبر عن قدرة الطبقة الحاملة للمياه التي سماكتها (m) وعرضها (1م) السماح للماء بالرشح خلال فراغاتها في واحدة الزمن عند تدرج هيدروليكي يساوي الواحد. وبالتالي فإن عامل الرشح وعامل الناقلية المائية يحددان النفوذية المائية للصخور ويعطيانها تعريفاً كمياً. ولوصف نفوذية الصخور المتعلقة فقط بأبعاد المسامات والشقوق وليس بخواص السائل أو الغاز الراشح يستخدم عادةً عامل النفوذية وإذا أخذت صفات السائل الراشح بعين الاعتبار يأخذ قانون دراسي الشكل التالي:

$$V = Kn\,(\rho g/\mu)\,I = Kn\,(\gamma r/\mu)\,I$$

Kn: عامل النفوذية المائية ، ρ: كثافة السائل ، g: التسارع الحر ، γ : الوزن النوعي للسائل ، μ: اللزوجة الديناميكية للسائل.

تقاس نفوذية الصخور عادةً بوحدة قياس تسمى بالدراسي (1 دارسي = 10^{-8} x 1.02 سم^2) ويعرف بأنه نفوذية عينة من وسط مسامي (صخري) مساحة مقطعها 1 سم^2 وطولها 1 سم تمرر عبرها (1 سم^3/ثا) من سائل لزوجته سانتي بواز واحد عندما يكون فرق الضغط على نهايتها مساوياً 1 كغ/سم^3 . ولدارسي أجزاء هي الميلي دراسي والسانتي دراسي. هذا وتعتبر

الصخور التي يقاس عامل نفوذيتها بواحد دراسي أو بأجزائه العشرية ذات نفوذية جيدة ولقد أثبتت التجارب الكثيرة التي أجريت صحة قانون دراسي لأغلب الصخور ضمن مجال كبير إلى حد ما لتغيير السرعة. ولكن في الصخور المكرستة والمشققة تلاحظ مخالفة التناسب الطردي بين سرعة الرشح وتدرج الضاغط إذ تتحرك المياه الجوفية بسرعات كبيرة ويصبح نظام الحركة (دواماً) أي أن الحركة الدوامية لا تخضع لقانون الرشح الخطي. هذا وتبدأ الانحرافات عن قانون دارسي عندما تبلغ العلاقة بين أبعاد المسامات وصفات السائل من جهة وحركة المياه الجوفية من جهة أخرى ويعبر عن القانون اللاخطي للرشح بعلاقة كراسنيولسكي التالية:

$$V = K_k \sqrt{I}$$

K_k : عامل محدد بطريقة تجريبية.

2.2. العوامل المؤثرة على النفوذية المائية:

تتعلق النفوذية المائية بالتركيب الكيميائي والفلزي للصخور وبالخواص البنائية والنسيجية لهذه الصخور وكذلك بتركيز وصفات السائل الراشح وبالظروف التي تتم عندها عملية الرشح (قيمة التدرج الهيدروليكي، درجة الحرارة وغيرها).

وأهم هذه العوامل:

1. التركيب الحبي: ترتبط نفوذية الصخور الرملية والتجميعية بشكل كبير بدرجة تجانس تركيبها الحبي وبوجود حبيبات غضارية أو عضوية ففي الصخور غير المتجانسة بتركيبها الحبي تكون مقاسات المسامات أقل بكثير منها في الصخور المتجانسة، وبالتالي فإن نفوذيتها المائية تكون أقل. وتعتبر الصخور المؤلفة بالكامل من حصى أو حصباء جيدة النفوذية وإذا شارك في تركيبها مواد إضافية كالرمال الناعمة أو الغضارية الغبارية الناعمة تصبح نفوذيتها أقل.
2. التركيب الفلزي: يحدد التركيب الفلزي مقاس الحبيبات وأيضا شكلها وعلاقتها مع الماء. فتكون نفوذية الحبيبات الورقية (كحبيبات الميكا) أقل من نفوذية حبيبات الصفاح البوتاسي والكوارتز التي لا تملك أشكالاً مختلفة على الرغم من المسامية الكبيرة الأولية، فالنفوذية تتناقص مع تناقص أبعاد الحبات ومن أجل نفس الأبعاد تتغير من الميكا إلى المرو كما أنها تختلف بالنسبة لحبات المرو المستديرة والزاوية كما مبين في الجدول /2/

الجدول (2) : علاقة النفوذية بأبعاد الحبات وأشكالها

أقطار الحبات	عامل الرشح سم/ثا		
	ميكا	مرو زاوي الحبات	مرو مستدير الحبات
0.5 – 1	$^{-2}10 \times 1.5$	$^{-2}10 \times 9$	$^{-1}10 \times 2.4$
0.25 – 0.5	$^{-3}10 \times 7.7$	$^{-2}10 \times 2.6$	$^{-2}10 \times 4.4$
0.1 – 0.25	$^{-3}10 \times 1.2$	$^{-3}10 \times 6.5$	$^{-2}10 \times 7.3$
0.06 – 0.1	$^{-4}10 \times 4.9$	$^{-3}10 \times 1.6$	$^{-3}10 \times 4.8$
0.01 – 0.06	$^{-4}10 \times 2.3$	$^{-4}10 \times 4$	$^{-3}10 \times 2.3$

3. الشوارد التبادلية: تؤثر الشوارد التبادلية بشكل واضح على نفوذية الصخور وخصوصاً الصخور الغضارية. فقد تبين نتيجة الدراسات والأبحاث التي أجريت على صخور الغضار الرملي المشبعة بشوارد (Na^{+1} , Ca^{+2} , Al^{+3} , Fe^{+3}) أن قيم النفوذية المائية هي على التوالي (1 ، 48 ، 280 ، 290). إن الانخفاض الحاد لنفوذية الصخور عند وجود شوارد أحادية التكافؤ يفسر

أولاً: بتأثيرها التبعثري الذي يقود إلى تخريب التجمعات الصغيرة وبالتالي تخفيض أبعاد المسامات.

ثانيا: بزيادة مقدرة الذوبان في المياه للصخور مما يقود إلى زيادة محتوى المياه المرتبطة وتناقص كبير في المسامية الفعالة.

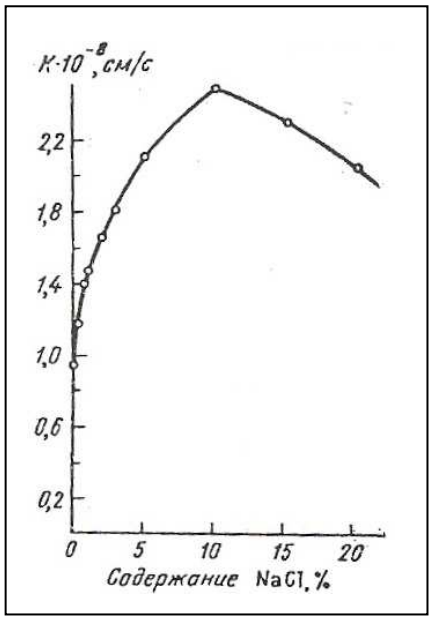
إن قدرة الشوارد التبادلية أحادية التكافؤ وخصوصاً شاردة الصوديوم (Na^{+}) على تقليل النفوذية في الصخور الغضارية وصخور اللوس جعلها تستخدم منذ القديم في التطبيقات العملية وخصوصاً عند بناء منشآت الري لحماية الماء من الرشح خلال القاع وجوانب الأقنية والسدود .

4. الخواص النسيجية والبنيوية: تؤثر الخواص البنيوية والنسيجية كثيراً على النفوذية المائية للصخور. فوجود التطبق يؤدي إلى عدم تجانس نفوذية الصخور في الاتجاهين الأفقي والشاقولي. وأكثر ما يظهر ذلك هو في الصخور الغضارية حيث تكون النفوذية في الاتجاه الأفقي أكبر بكثير منها في بقية الاتجاهات وتؤثر العمليات التي تقود إلى تغيير أبعاد

المسامات وكميتها أيضاً على النفوذية المائية للصخور. فنتيجة تخريب بنية ونسيج الصخور وخصوصاً الصخور الغضارية واللوس ومن ثم إعادة تراصها يحدث إنقاص كبير للنفوذية المائية وأيضاً تساويها في كل الاتجاهات.

5. تركيب وتركيز السائل الراشح: تتعلق النفوذية المائية بدرجة كبيرة بتركيب وتركيز السائل الراشح. فتركيب السائل الراشح يحدد تركيب الشوارد التبادلية في الصخور التي كما أوضحنا أعلاه تحدد بدرجة كبيرة نفوذية هذه الصخور، هذا ولقد أظهرت الدراسات والأبحاث التي أجريت أن نفوذية الغضار عند رشح ماء عذب أقل بكثير من نفوذيته من جراء رشح محاليل الكتروليتية بتركيز أعلى من 0.1–1% ، فمثلاً عند رشح محلول بتركيز حتى 10% عبر غضار المونتموريللونيت يزداد عامل الرشح بمقدار 2.7 مرة بالمقارنة مع رشح المياه النقية. وهذه الزيادة في النفوذية تفسر بضغط الطبقات ذات المياه الضعيفة الارتباط حول الحبيبات الغضارية مما يؤدي في النتيجة إلى زيادة القطر الفعال للمسامات وعند زيادة مستمرة للتركيز يلاحظ انخفاض عامل الرشح إذ أن لزوجة السائل الراشح تزداد بشكل واضح كما في الشكل (2) ، كذلك فإن وجود الغازات في المياه الراشحة يقلل من النفوذية المائية للصخور إذ يحدث عند ذلك انسداد المسامات بفقاقيع الغازات وتزداد لزوجة المياه.

6. تأثير درجة الحرارة: تؤثر تقلبات درجة الحرارة كثيراً على قيم النفوذية المائية وهذا يعود إلى أن لزوجة المياه تتعلق بشكل كبير بدرجة الحرارة فعند انخفاض درجة الحرارة من 20 درجة مئوية إلى درجة واحدة يتناقص عامل الرشح بمقدار مرتين.

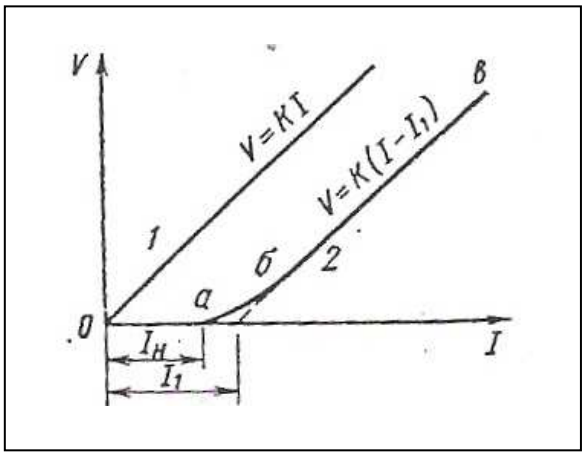


الشكل (2) : العلاقة بين عامل الرشح وتركيز محلول NaCl للغضار المونتموريللونيتي

3.2. مفهوم التدرج الابتدائي للرشح في الصخور الغضارية:

يتأثر رشح المياه في الصخور الغضارية بعوامل كثيرة من أهمها صغر المسامات التي تقاس بالميكرون وبأجزائه وكذلك بمقاومة الأغشية المائية المحيطة بالحبيبات الصخرية التي تزداد كلما نقصت سماكة هذه الأغشية وحدث تقارب بين هذه الحبيبات. وقد بينت التجارب الكثيرة التي أجريت أن حركة رشح الماء في الصخور الغضارية تبدأ فقط بعد أن تصل قيمة تدرج الضاغط فيها إلى مقدار معين(التدرج الابتدائي للراشح I_H) تستطيع بواسطته التغلب على مقاومة الأغشية المائية لحركة الماء وهذا ما يوضحه الشكل /3/ ، حيث تلاحظ العلاقة البيانية بين سرعة الرشح (V) وتدرج الضاغط (I) للصخور الرملية والغضارية . ومن هذا الشكل نجد أنه بالإمكان تمييز ثلاثة أجزاء على المنحني (2) الجزء الأول (Od) تكون خلاله السرعة (V=0) أما الجزء الثاني (Ob) فهو انتقالي ومنحني الشكل وعليه تكون سرعة الرشح قليلة جداً وتخضع للقانون $V = KI_n$ حيث $n = 1.5 - 1.6$ ، بينما الجزء الثالث (bB) مستقيم وهو جزء الرشح الثابت ولهذا الجزء سرعة الرشح تتحدد بالعلاقة التالية:

$$V = K\,(I - I_1) = K\,(I - {}_{4/3}\, I_H)$$



الشكل (3) : يبين سرعة الرشح وتدرج الضاغط (الميل الهيدروليكي)
1. للصخور الرملية ، 2. للصخور الغضارية

إن قيمة التدرج البدائي للغضاريات تتعلق بتركيبها الفلزي – الكيميائي وبكثافة وتركيب وتركيز السائل الراشح ودرجة حرارته. وأكبر قيمة له تبلغ 10–70 للمونتموريللونيت وأقل قيمة حوالي الواحد للكاولينيت. وفي كل الحالات تصادف أعلى القيم عند الصخور الغضارية الكثيفة. هذا ويعتقد معظم العلماء أن أسباب وجود التدرج الابتدائي في الغضاريات يعود إلى تشكل مياه غشائية مرتبطة حول الجزئيات الصخرية.

4.2. تصنيف الصخور حسب نفوذيتها:

تصنف الصخور تبعاً لعامل النفوذية إلى ثلاث مجموعات رئيسة وهي:

1. الصخور النفوذة: وتشمل الصخور الحطامية الخشنة كالحصى ، والحصباء ، والصخور الرملية ـ الغضارية الضعيفة الارتباط بالملاط وذات الترتيب المنتظم والصخور الكاربوناتية المشققة والمكرستة والصخور النارية المشققة ويشغل الفراغ المسامي في هذه الصخور كقاعدة عامة جزءاً كبيراً من حجمها حوالي 20–40 % وأكثر. وهو يتألف من عدد كبير نسبياً من الشقوق فوق الشعرية والشعرية الكبيرة والشعرية التي تنتشر بنظام في الصخر في أغلب الحالات. وتكون المياه المرتبطة فيزيائياً في هذه الصخور قليلة. ويتراوح عامل النفوذية في هذه الصخور بين 10 وعدة آلاف ميلي دراسي.
2. الصخور نصف النفوذة: وتنتسب إليها الرمال الغضارية ضعيفة درجة الانتظام وبعض الصخور الرملية والكربوناتية قليلة التشقق. ويتألف الفراغ المسامي لهذه الصخور من

المسامات تحت الشعرية بكمية لا بأس بها. لهذا نجد في الصخور زيادة في كمية المياه المرتبطة فيزيائياً ويتغير عامل النفوذية لها بين 0.1 و 10 ميلي دراسي.

3. الصخور غير النفوذة: وتشمل صخور الغضار والشيست الغضاري والرمال شديدة الارتباط بملاط الحوار الكثيف وغير المشقق والحجر الكلسي الشبيه بالحوار وغير المشقق وكذلك الصخور النارية والكلسية غير المشققة وكافة الصخور ذات المسامات المغلقة.

يختلف حجم الفراغ المسامي كثيراً في هذه الصخور فهو يبلغ قيماً كبيرة في بعضها كالغضار والحجر الكلسي الشبيه بالحوار حيث يبلغ 50% وتنخفض هذه القيمة إلى 6% وأقل في الصخور النارية المبلورة. وفي هذه الصخور تكون معظم المياه الموجودة فيها مرتبطة فيزيائياً بقوة وغير قادرة على الحركة تحت تأثير حقل الثقالة الأرضية وتأثير تدرجات الضغوط العادية وتكون قيمة عامل النفوذية لهذه الصخور أقل من 0.1 ميلي دراسي.

3. الخواص الحرارية للصخور:

1.3. السعة الحرارية للصخور: وتعتبر من أهم الخواص الحرارية وهي تصف قدرة الصخور على امتصاص الطاقة الحرارية عند التبادل الحراري، وتصرف الحرارة (ΔQ) التي يكتسبها الصخر وفقاً للمبدأ الأول للترموديناميك على تغيير الطاقة الداخلية له (U) وعلى العمل (A) المتعلق بتمدد هذا الصخر. ويؤدي اكتساب الصخر للحرارة (ΔQ) إلى زيادة درجة حرارته بمقدار (Δt) .

$$\Delta Q = Cm\ \Delta t$$

m: كتلة الصخر ، C: عامل تناسب يسمى بالسعة الحرارية ويقدر بكمية الحرارة التي يجب إعطائها للصخر لتسخينه بمقدار درجة سيلسيوس (س°) واحدة، ويميز عادةً بين السعة الحرارية النوعية والسعة الحرارية الحجمية. فالسعة الحرارية النوعية (C) هي كمية الطاقة الحرارية الضرورية لتغيير حرارة كيلو غرام من المادة أو واحدة الكتل درجة سيلسيوس واحد وتقاس بـ الـ جول /كغ س° ، أما السعة الحجمية (Cv) فتساوي حسابياً كمية الحرارة الضرورية لتغيير حرارة واحدة الحجوم من الصخر درجة سيلسيوس واحدة وهي تقدر بـ الـ جول /م^{3}س° ، وترتبط السعة الحرارية النوعية (C) والحجمية (Cv) مع بعضها البعض بالعلاقة التالية:

$$Cv = \rho C$$

ρ: كثافة الصخر.

وتستعمل في الجيولوجيا الهندسية عادةً السعة الحرارية النوعية للصخور كونها أكثر ثباتاً. وتعتبر السعة الحرارية للصخور ثابتة عند درجات حرارة وضغوط منخفضة وهي تتحدد بالسعة الحرارية للمكونات الأساسية لهذه الصخور.

تتعلق السعة الحرارية للمكونات الصلبة للصخور بتركيبها الفلزي وبالمواد العضوية الموجودة، فهي الأكثر أنواع الفلزات انتشارا تتغير من 0.5 وحتى (1) ك جول/ كغ س° ، وتبلغ لأغلب أنواع الفلزات حوالي 0.7 – 0.95 ك جول/س° ، كما أن السعة الحرارية للمواد العضوية أكبر بكثير منها للمواد الفلزية وهي تبلغ للترب والتورف المجفف في الدرجة (100) 0.8 – 2.10 ك جول/كغ س° ، وأكبر القيم تملكها الترب الغنية بالدبال، كذلك تتعلق السعة الحرارية في الصخور بنسب الحبيبات الرملية والغضارية الموجودة فيها. فكلما كان محتوى المواد الغضارية كبيراً كلما كانت السعة الحرارية أكبر كذلك تزداد السعة الحرارية بزيادة رطوبة الصخور فالصخور الرطبة تكون سعتها الحرارية أكبر من الصخور الجافة، فالسعة الحرارية النوعية للمياه في الدرجة 20 هي 4.19 ك جول/كغ س° ، وهي بالنسبة للجليد تعادل 2.10 ك جول/كغ س° ، هذا وتحسب السعة الحرارية النوعية للصخور المسامية الرطبة (Cw) التي لا تزيد رطوبتها الوزنية عن 15–20 % بالعلاقة التالية:

$$Cw = C(1-W) + W$$

وفي حالة الصخور المفككة الرطبة (مع الأخذ بعين الاعتبار وجود مياه مرتبطة فيها) يتم تعيين السعة الحرارية النوعية بالعلاقة التالية:

$$Cw = 0.2x + 0.7y\ (W-Y)$$

X: الكمية الوزنية للمواد المعدنية ، Y: كمية المياه المرتبطة بقوة ، W: الرطوبة الوزنية .

0.2 و 0.7 السعة الحرارية النوعية للمكونات الصلبة والمياه المرتبطة مقدرة بالحريرة/غ س° وتزداد السعة الحرارية الحجمية للصخور بشكل خاص مع زيادة الرطوبة وتهمل السعة الحرارية للهواء عند تعيين السعة الحرارية للصخر المؤلف من مكوناته الثلاثة الصلبة والسائلة والغازية.

2.3. الناقلية الحرارية للصخور:

تصف الناقلية الحرارية للصخور قدرتها على نقل الحرارة وهي تحدد بعامل الناقلية الحرارية (λ) الذي يعادل كمية الحرارة التي تنتقل عبر واحدة المساحة خلال واحدة الزمن عندما يكون التدرج الحراري معادلاً الواحد ويقاس بـ واط/م س° ، وتتعلق الناقلية الحرارية للصخور بمكوناتها وتركيبها الفلزي – الكيميائي وبخواصها البنائية والنسيجية (تبعثرها، مساميتها، تطبقها...) وكذلك بدرجة الحرارة والرطوبة. وتتغير قيم (λ) لأكثر الفلزات بين 0.4 و 7 واط/م س° ، وتبلغ في أغلب الحالات 0.8 – 4 واط/م س° .

وتزداد الناقلية الحرارية للصخور بمقدار زيادة رطوبتها وذلك باعتبار أن ناقلية المياه للحرارة أعلى من الهواء بـ 30 مرة ، كذلك تتعلق الناقلية الحرارية للصخور المفككة بتركيبها الحبي فالصخور التي تحتوي على كميات لا بأس بها من الحبات الكبيرة (الحصى، الحصباء) تتصف بناقلية حرارية كبيرة بالمقارنة مع الصخور ذات الحبات الناعمة (عند تساوي نفس الخواص الأخرى كالرطوبة والوزن الحجمي وغيرها). كما تتعلق الناقلية الحرارية بالوزن الحجمي بشكل كبير وبالتالي بمسامية الوسط فكلما كان الوزن الحجمي منخفضاً كلما كانت الجزيئات أقل التصاقاً بالنسبة لبعضها البعض وبالتالي كانت الناقلية الحرارية أقل. فلقد تبين تجريبياً أن زيادة الوزن الحجمي للهيكل الصلب للصخور الرسوبية بمقدار 15–20% يشترط زيادة في الناقلية الحرارية تقريباً بمقدار الضعف كما يؤدي الرص الاصطناعي إلى زيادة الناقلية الحرارية للصخور لذلك فإن تجلد الصخور وإزالة تجمدها تحت ثقل المنشات يتم بسرعة أكبر من الطبقات المجاورة وهذا يؤدي بدورة إلى الكثير من الظواهر الضارة كتشقق الطرق مثلاً.

وتتصف غالبية الصخور الرسوبية والمتحولة بالخاصة الانيزوتروبية أي تتغير قيم (λ) فيها حسب الاتجاه وتكون قيمة (λ) في الاتجاه الموازي لمستويات التطبق أو التورق أعلى منها في الاتجاهات الأخرى بمقدار 10–30% .

كذلك يتأثر عامل الناقلية الحرارية بالتغيرات الحرارية حسب العلاقة الخطية التالية:

$$\lambda t = \lambda (1+\beta_0 t)$$

λt: عامل الناقلية الحرارية عند درجة الحرارة t .

λ: عامل الناقلية الحرارية عند درجة حرارة معلومة.

β_0: ثابت يعادل تقريباً 3×10^{-3}

t: درجة الحرارة.

3.3. النفوذية الحرارية: وهي سرعة حدوث التغيرات في درجات الحرارة للصخور من جراء امتصاص أو إعطاء الحرارة وهي تحدد بالنسبة بين الناقلية الحرارية والسعة الحرارية الحجمية (Cv) وتقاس بـ م^2/ثا .

$$a = (\lambda/Cv) = \lambda/\rho c$$

a: النفوذية الحرارية ، ρ: الكثافة.

تتغير قيمة النفوذية الحرارية ضمن مجالات ضيقة نسبياً وهي تتراوح بين 0.31×10^{-6} و 40×10^{-6} في حالة الجص وفي حالة الملح الصخري، وتتعلق النفوذية الحرارية بنسب المكونات الصخرية وبالصفات البنيوية والنسيجية وبدرجة الحرارة وحالة الرطوبة.

أظهرت التجارب التي أجريت أن النفوذية الحرارية تزداد بزيادة الرطوبة حتى قيمة معينة ثم تتناقص بعد ذلك بازدياد الرطوبة عن هذه القيمة.

وتعليل هذه الظاهرة هو أنه في الصخر الجاف ذي النسيج المحطم يكون التماس الحراري بين الحبيبات قليلاً وبالتالي يكون الانتقال الحراري بطيئاً ومع زيادة المياه المرتبطة حول الحبيبات تزداد سطوح التماس بين الحبات مما يزيد من سرعة انتقال الحرارة بشكل حاد. ومع استمرار زيادة الرطوبة فإن القسم الأعظم من الحرارة يذهب لتسخين المياه الموجودة في الفراغات المسامية مما يسبب انخفاضاً في النفوذية الحرارية.

وتتعلق قيمة النفوذية الحرارية أيضاً بدرجة الحرارة فانخفاض درجة حرارة الترب يزيد بعض الشيء النفوذية الحرارية ويقدر معدل ازدياد النفوذية الحرارية عند الصخور المتجلدة بـ 1.3 – 1.5 مرة عنها بالنسبة للصخور الأخرى وتكون قيم النفوذية الحرارية عادةً في الاتجاه الموازي لمستويات التطبق أو التورق أعلى من قيمتها في الاتجاه المعامد لهذه المستويات.

4.3. التمدد الحراري: وهي قابلية الصخور لتغيير أبعادها عند تغيرات درجة الحرارة. وتوصف هذه الخاصة للصخور بعاملي التمدد الطولي والحجمي اللذين يستخدمان بشكل واسع في الحسابات المتعلقة بالأعمال المنجمية. ويقاس عامل التمدد الحراري بـ 1/درجة سيلسيوس إذا

زادت درجة الحرارة (t_1) للعينة الصخرية حتى الحرارة (t_2) فإن تغير المقاسات للعينة (ΔL) يتعين بالعلاقة التالية:

$$\Delta L = \beta_L \, L(t_2 - t_1)$$

β_L: عامل التمدد الطولي ، L: المقاسات الطولية الأولية للعينة الصخرية وبالتالي فإن عامل التمدد الطولي يساوي:

$$\beta L = \Delta L \, / \, L(t_2 - t_1)$$

أما قيمة عامل التمدد الحجمي للصخور (βv) فهي أكبر بثلاث مرات من قيمة عامل التمدد الطولي أي : $\beta v = 3\beta L$.

إن التمدد الحراري له قيمة شعاعية تتغير حسب الاتجاه فالكالسيت يتمدد عند تسخينه باتجاه واحد فقط بينما يتقلص في الاتجاهات الأخرى كذلك يتأثر عامل التمدد الحراري بشكل كبير بالضغط فكلما ازداد الضغط انخفضت قيمة عامل التمدد الحراري.

5.3. مقاومة التجلد: ويقصد بها خاصة الصخور على مقاومة تأثير درجات الحرارة المنخفضة (السالبة) وتؤدي درجات الحرارة السالبة إلى انخفاض متانة الصخور وتحطيمها لاحقاً بفعل تأثير عاملين أساسيين:

الأول: يتعلق بقوى الجهد الداخلي التي تنشأ في الصخور من جراء الفرق في عوامل التمدد الحجمي للفلزات المشكلة للصخور من جراء الفرق في عوامل التمدد الحجمي للفلزات المشكلة للصخور وعدم تساوي درجات الحرارة في مختلف الطبقات عند تجمد الصخور.

الثاني: وهو الأساس فيتعلق بتأثير المياه المتجمدة التي تقع في مسامات الصخور.

فالمياه المتحولة إلى جليد يزداد حجمها بمقدار 9% وإذا كان الفراغ المسامي كافياً لاستيعاب الحجم الزائد فإن الضغط الهيدروستاتيكي لا ينشأ. وفي الحالة المعاكسة يتولد في الصخر ضغط هيدروستاتيكي كبير يؤدي في كثير من الأحيان إلى تحطيم الصخر. وقد أثبتت التجارب أن الحد الأدنى للضغط الناتج عن نمو البلورات الجليدية هو بشكل حر 0.05 ميغا باسكال (Mpa) أما الحد الأعلى لهذا الضغط فهو (200 Mpa) عندما يتجمد الماء في جملة مغلقة تماماً.

تتعلق مقاومة الصخور للتجلد بمتانة الفلزات المشكلة لهذه الصخور وبخواصها الحرارية وأيضاً بقوى الترابط بين الحبات المشكلة لهذه الصخور كما تتعلق بالرطوبة وبالخواص البنائية والنسيجية لهذه الصخور.

تتميز الصخور المؤلفة من حبيبات صغيرة من الفلزات المتينة (كالمرو، والصفاح ، والأوليفين) بمقاومة عالية للتجلد بينما الصخور التي تتألف من فلزات ضعيفة الارتباط (الميكا ، الصفاح البوتاسي ، الكلوريت) فتتمتع بمقاومة تجلد منخفضة وتعتبر الرطوبة من أهم العوامل المؤثرة في مقاومة التجلد. فلقد تبين تجريبياً أن الفعل التجريبي للمياه عند التجلد يبدأ بالظهور عند قيمة معينة من الرطوبة تدعى بالرطوبة الحرجة وتعادل 70–80% بالنسبة لمعظم أنواع الصخور.

وهذا يفسر بأنه عند رطوبة منخفضة لا تظهر أية زيادة في الإجهاد الداخلي للصخور وبالتالي فإن تجلد الصخور لا يترافق بتغيير كبير في متانتها، أما في الحالة المعاكسة (عند زيادة الرطوبة عن القيمة الحرجة) فإن التشوه الحجمي نتيجة التجلد يزداد بسرعة مما يؤدي إلى انخفاض حاد في متانة هذه الصخور.

تتصف الصخور المؤلفة من حبيبات كبيرة أو من حبيبات صغيرة غير متجانسة بمقاومة تجلد منخفضة، كذلك تنخفض مقاومة التجلد بزيادة المسامية المفتوحة للصخور وخصوصاً مقاسات هذه المسامات (بما فيها المسامات الصغيرة) وتوزعها في الصخر. وتؤثر على مقاومة التجلد سرعة تغيرات درجة الحرارة. أما إذا كانت عملية التجلد تحدث بسرعة كبيرة ينشأ عند ذلك إجهاد كبير يمكن أن يفوق حد ثبات هذه الصخور ويسبب تحطمها.

ويتم تعيين مقاومة الصخور للتجلد بأخذ عينات مشبعة بالمياه ذات أشكال منتظمة وتعريضها لعدد محدد من دورات التجلد والإذابة حوالي 25 دورة (وعند الدراسات التخصصية يمكن أن يزداد عدد الدورات حتى 50–100 دورة وأحياناً يبلغ 200 دورة). ومن ثم قياس نسبة انخفاض متانة الانضغاط فيها.

4. الخواص الكهربائية للصخور:

1.4. الناقلية الكهربائية: وهي قدرة الصخور على نقل التيار الكهربائي وهذه الخاصة توصف بقيمة الناقلية الكهربائية النوعية (σ) أو المقاومية الكهربائية النوعية (ρ).

$$\rho = 1 / \sigma = Rs / L$$

R: المقاومة الكهربائية الكاملة للعينة الصخرية مقدرة بالأوم.

s: مساحة المقطع العرضي للعينة بـ م^2 . ، **L:** طول المقطع بـ م.

وتقاس المقاومية الكهربائية بواحدة تسمى أوم.متر ، أي أن قيمة المقاومية النوعية تساوي قيمة المقاومية الكلية مقدرة بـ (أوم لمتر مكعب من الصخر مقطعة (1م^2) وطوله (1م) بحيث تقاس هذه المقاومية عمودياً على سطح المكعب. أما الناقلية الكهربائية فتقاس بـ 1/أوم.متر.

تتعلق الناقلية الكهربائية للصخور بمجموعة من العوامل من أهمها: التركيب الفلزي، تفكك الصخور، الصفات البنائية والنسيجية، الرطوبة، التركيب الكيميائي، تركيز السائل المسامي، درجة الحرارة وغيرها. لهذا فإن قيم الناقلية الكهربائية والمقاومية الكهربائية النوعية تغيير ضمن حدود كبيرة حسب حالة الصخور.

تكون الناقلية الكهربائية للفلزات والمواد العضوية المشكلة للصخور متنوعة بطبيعيتها وقيمتها . فالمقاومية الكهربائية لأغلب الفلزات تتغير في مجالات واسعة (10^{-3} – 10^{14}) أوم.م وأكثر وتصنف الفلزات تبعاً لقيم الناقلية الكهربائية إلى نواقل وعوازل.

تعتبر فلزات الذهب والفضة والبلاتين نواقل مثالية (ρ أقل من 10^{-6}) أوم.م وهي تتواجد في الصخور بنسب قلية جداً. أما أنصاف النواقل والعوازل فتسيطر ضمن الفلزات المؤلفة لهيكل الصخور وهي تتمتع بناقلية كهربائية الكترونية وشاردية. وفي الفلزات العوازل فتسيطر ضمن الفلزات المؤلفة لهيكل الصخور وهي تتمتع بناقلية كهربائية الكترونية وشاردية. وفي الفلزات العوازل التي تشكل الكتلة الأساسية للفلزات المشكلة للصخور (مقاوميتها الكهربائية النوعية من 10^2 وحتى (10^{15} – 10^{16}) أوم.م) تسيطر الناقلية الكهربائية الشاردية التي يزداد دورها بزيادة درجة حرارة الوسط وبشكل خاص تزداد الناقلية الكهربائية الشاردية عند الفلزات الغضارية المشبعة بالمياه وعند تساوي الظروف الأخرى تكون الناقلية الكهربائية على علاقة مباشرة مع كمية الفلزات ذات الناقلية الجيدة.

وترتبط الناقلية الكهربائية للصخور بشكل مباشر برطوبة هذه الصخور وبتركيب وتركيز المحلول المسامي، فالناقلية الكهربائية للصخور الجافة أقل بكثير من الناقلية الكهربائية للصخور الرطبة. وهذا يفسر بالفرق الحاد بين قيم المقاومية الكهربائية النوعية للهواء (∞ أوم.م) وللماء. لهذا فإن الصخور المشققة والكهفية القاسية تملك مقاومية كهربائية نوعية كبيرة جداً. وتتصف الصخور

الجافة غير المرتبطة (المفككة) بناقلية كهربائية كبيرة تتحدد بالأساس بالمقاومية لسطوح التماس بين الحبات المنفصلة. ويزيد وجود المياه في الصخور ناقليتها الكهربائية بشكل حاد.

وتلاحظ أكثر التغيرات للناقلية الكهربائية مع زيادة الرطوبة في الصخور الرسوبية المسامية فمثلاً عند زيادة رطوبة الحجر الرملي الجاف حتى 2-3% فإن مقاوميته النوعية تتناقص عدة مرات. أما في الصخور النارية والمتحولة التي تتصف بمسامية منخفضة فتبدو هذه العلاقة بشكل أضعف كذلك تتعلق الناقلية الكهربائية للصخور بخصائصها البنيوية والنسيجية وخصوصاً بمساميتها وتطبقها وبشكل عام ترتبط المقاومية الكهربائية للصخور بالمسامية بالعلاقة التالية:

$$\rho = \rho m\ (2+n/2(1-n))$$

ρm: المقاومية النوعية للطور الصلب للصخر.

n: المسامية كجزء من الواحد.

وتتصف الصخور وخصوصاً الصخور الرسوبية والمتحولة ذات النسيج المتطبق أو المتورق بعدم تساوي قيم الناقلية الكهربائية في مختلف الاتجاهات فتكون قيمة الناقلية الكهربائية في الاتجاه الموازي للتطبق أكبر من قيمتها في الاتجاه العمودي عليه (خاصة انيزوتروبية) وهي تقاس بعامل عدم تجانس الناقلية الكهربائية:

$$\lambda = \sqrt{(\rho_1/\rho_2)}$$

ρ_1 و ρ_2 : قيم المقاومية الكهربائية النوعية للصخور في الاتجاهين العمودي على التطبق والموازي له.

إن قيم λ هي دوماً أكبر من الواحد وتبلغ لبعض أنواع الصخور القيم التالية ، الجدول/3/ وتتعلق الناقلية الحرارية للصخور بدرجة الحرارة بشكل كبير فمع زيادة درجة الحرارة تنخفض قيم المقاومية الكهربائية النوعية وبالتالي تزداد ناقليتها الكهربائية. وتتناقص المقاومية الكهربائية للصخور الرسوبية بمعدل مرتين وأكثر عند زيادة درجة الحرارة إلى 40-50 درجة مئوية مع انخفاض درجة الحرارة للصخور وتشكل الجليد في فراغاتها المسامية تزداد المقاومية الكهربائية بشكل حاد . وأخيراً تزداد الناقلية الكهربائية بازدياد الضغط حتى 30-60 وذلك نتيجة لانغلاق المسامات والشقوق وازدياد نسبة الرطوبة.

الجدول (3) : تغير قيم λ لبعض أنواع الصخور

اسم الصخر	قيم λ
الحجر الكلسي	**1.30 – 1**
الغضار	**1.30 – 1.02**
الحجر الرملي	**1.60 – 1.10**
الشيست	**2.25 – 1.41**

2.4. ثابت العازلية الكهربائية: وهو من أهم الخواص الكهربائية المستخدمة عند إجراء الدراسات الجيوهندسية ويقاس بالنسبة بين شدة الحقل الكهربائي في الفراغ (E_0) وشدته في الوسط المادي المعطي (E) أي : $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$ وهو يمثل قيمة عددية مجردة ليس لها وحدة قياس. يتعلق الثابت الكهربائي للصخور بالتركيب الفلزي والكيميائي لمكوناتها الأساسية وبنسب حجوم هذه المكونات بالنسبة لبعضها البعض وبالخواص البنائية والنسيجية للصخور وكذلك بتردد الحقل المعطي وبدرجة الحرارة والضغط. وتتراوح قيمة الثابت الكهربائي للفلزات الأساسية المشكلة للصخور بين 4.3 – 11.5 كما هو مبين في الجدول /4/ ، ويبلغ هذا الثابت عند بعض الفلزات قيماً مرتفعة كما هو الحال عند فلز الروتيل حيث تبلغ قيمته (86).

الجدول (4) : الثابت الكهربائي لبعض الفلزات

اسم الفلز	الثابت الكهربائي
الكوارتز	**5.6 – 4.3**
الصفاح القلوي	**7.2 – 4.5**
الميكا	**11.5 – 5.4**
الكالسيت	**8.7 – 7.5**
الجص	**4.2**

وتكون قيمة الثابت الكهربائي للهواء النقي قريبة من الواحد وتتصف الصخور المسامية الجافة بقيم منخفضة للثابت الكهربائي وكلما زادت المسامية للصخور كلما تناقصت قيمة الثابت

الكهربائي. وباعتبار أن قيمة الثابت الكهربائي للماء هي دوماً أقل من قيم الثابت لبقية الفلزات والغازات المشكلة للصخور فهذا يعني أنه بزيادة الرطوبة تزداد قيمة الثابت الكهربائي. ويتعلق الثابت الكهربائي بدرجة حرارة الصخور، فمع زيادة درجة الحرارة تتناقص قيمته عند الماء والصخور الرطبة وتزداد عند الصخور الجافة وتبعاً لذلك عند زيادة درجة حرارة الصخور الرطبة تنخفض قيمة الثابت الكهربائي في البداية أو تبقى ثابتة ثم تزداد بعد عزل الماء بشكل حاد.

وأخيراً تتعلق قيمة الثابت الكهربائي للصخور في الحقول المتناوبة بتردد التيار المستقطب. فمع زيادة تردد التيار يتناقص الثابت ويكون هذا التناقص حاداً في الصخور الرطبة. فمثلاً تنخفض قيمة هذا الثابت لعينة الحجر الرملي التي رطوبتها 12% حوالي 100 مرة عند زيادة تردد التيار من 10^2 وحتى 10^7 هرتز.

5. الخواص المغناطيسية:

1.5. قابلية التمغنط: وهي من أهم الخواص المغناطيسية للصخور ويعبر عنها حسابياً بالنسبة بين المغناطيسية المتحرضة في الصخر (I) وشدة هذا الحقل (H) .

$$X = I / H \text{ : أي}$$

ويميز عادةً بين قابلية التمغنط الحجمية وهي قيمة مجردة وقابلية التمغنط النوعية وتملك واحدة قياس معاكسة للكثافة م^3/كغ وهي تساوي حسابياً قابلية التمغنط الحجمية مقسومة على الكثافة.

هذا وتقسم المواد تبعاً لقيم (X) إلى الأنواع التالية:

- المواد الديامغناطيسية $X < 0$ ($X \approx -10^{-7}$)
- المواد البارامغناطيسية $X > 0$ ($X = 10^{-6}$)
- المواد الفيرومغناطيسية $X >> 0$ ($X = 10 - 10^5$)

أ. المواد الديامغناطيسية: وتتميز هذه الأجسام بغياب العزم المغناطيسي الذاتي (يساوي الصفر في الذرات المنفصلة) ولكن إذا وضعت الذرة تحت تأثير حقل مغناطيسي خارجي فإن كل مداراتها الالكترونية تبدأ بتحقيق حركة اهتزازية دورانية حول اتجاه الحقل المغناطيسي وفي النتيجة تكتسب كل ذرة من الذرات عزماً إضافياً يتجه بشكل معاكس لاتجاه الحقل الذي أصدره وهذا ما يحدد الإشارة السالبة لقابلية التمغنط وتنتسب إلى المواد الديامغناطيسية الكثير من العناصر الحرة كالذهب والقصدير والفضة والكبريت والفحم وغيرها. وأيضاً بعض الفلزات

الأساسية المشكلة للصخور مثل الكوارتز والجص والأنهدريت والهاليت ....الخ ومن الصخور ينتسب إلى هذه المواد الملح الصخري والغضار والحجر الكلسي.

ب. المواد البارامغناطيسية: وتختلف عن المواد السابقة بأن ذراتها تتمتع بعزوم مغناطيسية دائمة إلا أنه بشكل عام تبدو عينة المواد البارامغناطيسية غير ممغنطة عند غياب الحقل المغناطيسي الخارجي من جراء التوزع العشوائي فيها للعزوم المغناطيسية لذراتها المنفصلة حيث تعادل قيمة المحصلة النهائية لهذه العزوم الصفر. وتحت تأثير الحقل المغناطيسي الخارجي فقط تكتسب ذرات وجزيئات هذه المواد اتجاهاً محدداً بسبب ظهور تمغنط ذاتي (مغناطيسية محرضة) في المادة البارامغناطيسية تزول هذه المغناطيسية عند رفع الحقل المغناطيسي الخارجي. وتنتسب إلى هذه المواد الكثير من الفلزات والصخور مثل البيريت والروتيل والايبيدوت والسيديريت والدولوميت والبيوتيت وغيرها.

ج. المواد الفيرومغناطيسية: وتتميز هذه المواد بقيمة موجبة وكبيرة لقابلية التمغنط وينتسب إليها الحديد الحر الذي تبلغ قابلية التمغنط عند حوالي الألف وكذلك أكثر الفلزات الحديدية مثل (المغناتيت، التيتانومغناتيت، البروتيت وغيرها) وتبلغ قابلية التمغنط للمغناتيت 20 ولبقية الفلزات أقل من 0,4 هذا وتظهر الخواص الفيرومغناطيسية فقط تحت الدرجة الحرجة التي تدعى بدرجة حرارة كوري وهي تبلغ للحديد 758 درجة وللكوبالت 1075 وللنيكل 360 درجة وعندما ترتفع درجات الحرارة لهذه المواد كثيراً وتتجاوز الدرجة الحرجة فإنها تسلك سلوك المواد البارامغناطيسية.

تتعلق الخواص المغناطيسية للصخور بتركيبها الفلزي – الكيميائي وببنية هذه الصخور أي بنسب المواد الديا والبارا والفيرومغناطيسية وبعلاقة هذه الفلزات مع بعضها البعض. إلا أن الدور الأساسي في توليد الخواص المغناطيسية للصخور يعود إلى المواد الفيرومغناطيسية باعتبار أن قابلية التمغنط لديها عادةً أكبر بكثير من قابلية التمغنط للفلزات الديا والبارامغناطيسية المشكلة للصخور.

كذلك تتعلق الخواص المغناطيسية للصخور بخصائصها البنيوية والنسيجية وخاصةً بحجم وشكل وتوزع المركبات الفيرومغناطيسية فعادةً مع زيادة تبعثر هذه المركبات تتناقص قابليتها للتمغنط.

هذا وتتغير قابلية التمغنط للصخور ضمن مجال واسع جداً وتعتبر الصخور المغماتية أكثر أنواع الصخور القابلة للتمغنط وهي تتناقص من الصخور الفوق أساسية إلى الحامضية الجدول /5/ ، إن قابلية التمغنط الحجمية للصخور المتحولة أقل منها للصخور المغماتية بشكل عام وتتصف صخور الشيست الغضاري والفلليت والكوارتزيت والغنيس والمرمر وغير ذلك من الصخور بقابلية تمغنط قليلة أما السكارن والشيست الحديدي والكوارتزيت الحديدي فتتصف بقيم عالية لقابلية التمغنط حتى $17500 X 10^{-6}$.

الجدول (5) : قابلية التمغنط لبعض أنواع الصخور

اسم الصخر	X
البيرودوتيت	**$10 X 73000^{-6}$**
البيروكسينيت	**$10 X 11000^{-6}$**
الغرانيت	**$10 X 6000^{-6}$**
الكوارتزيت البورفيري	**$10 X 1700^{-6}$**

تتميز الصخور الرسوبية عادةً بمغناطيسية قليلة أو أنها غير مغناطيسية وذلك لاحتوائها على كميات قليلة من المواد الفيرومغناطيسية.

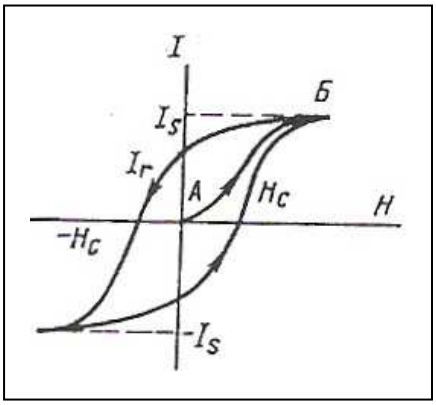
وتتصف صخور الحجر الكلسي والدولوميت والأنهدريت والجص والأملاح وغيرها من الصخور الرسوبية ذات المنشأ الكيميائي والمؤلفة من فلزات ديامغناطيسية بقابلية تمغنط قليلة بينما تتمتع الصخور الغضارية والرملية بأكبر قابلية للتمغنط.

تتمتع الخواص المغناطيسية بأهمية كبرى عند تشكل مختلف أنواع الصخور وبشكل خاص الصخور الغضارية. فلقد أظهرت الدراسات التي أجريت من قبل الباحث اسيبوف (1968) أن الخواص المغناطيسية للفلزات والحقل المغناطيسي يؤثران على عملية ترسب الصخور الغضارية وتشكل خواصها البنيوية والنسيجية وبالتالي على الخواص الفيزيامیكانيكية لهذه المواد المتشكلة. وهذا يرتبط بوجود جزئيات فيرومغناطيسية عالية التبعثر على سطح الفلزات الغضارية ومرتبطة بها بقوة. ولقد تبين أثناء عملية ترسب المواد الغضارية وتجفيفها اللاحق في الحقل المغناطيسي أن صفات الشقوق المتشكلة تتعلق بتوتر الحقل المغناطيسي الخارجي وبمنرالوجية الغضار فيكون

التشقق أكبر شدة في فلزات المونتموريلوينت أما في عينات الغضار الهيدروميكاوي فتنشأ الشقوق فقط عند حقول إجهاد كبيرة.

بينما في عينات الكاولينيت تغيب الشقوق وتبقى هذه العينات كتلية متلاحمة، وعندما يكون الحقل مساوياً للصفر تغيب هذه التشققات، وإذا تشكلت فإنها تملك اتجاهات شعاعية وتفسر زيادة متانة الرسوبات المتشكلة في حقل مغناطيسي يساوي الصفر حسب أي العالم اسيبوف بسببين أساسيين: **أولهما:** هو البنية المتجانسة الخواص للرسوبات **وثانيهما:** وجود تجمعات عالية التبعثر فيها مما يساعد على زيادة الطاقة السطحية وكنتيجة لذلك تزداد المتانة الميكانيكية للصخور. وهكذا فإن دراسة الصفات المغناطيسة يملك أهمية كبيرة نظرية وتطبيقية.

2.5. المغناطيسية المتبقية: تختلف عملية تمغنط المواد الفيرومغناطيسية بشكل جوهري عنها في حاله المواد الديا والبارامغناطيسية بأن زيادة التمغنط مع ازدياد توتر الحقل الخارجي ليست واحدة وبشكل عام ليست خطية. ففي البداية يكون النمو بطيئاً وبشكل خطي تقريباً وبعد ذلك يزداد بشكل حاد ثم يبدأ بالزيادة ببطء مرة أخرى حتى يبلغ حد الإشباع عند قيمة معينة لتوتر الحقل المغناطيسي الخارجي (قيمة Is تنخفض مع زيادة درجة الحرارة وإذا انخفض توتر الحقل بعد الوصول إلى نقطة الإشباع فإنه عند إزالته ينخفض التمغنط إلى قيمة معينة (Ir) تسمى بالمغناطيسية المتبقية شكل /4/ ولإزالة تمغنط الصخر بشكل كامل يجب التأثير عليه بحقل مغناطيسي موجه بشكل معاكس لتوتر يساوي (HC−) ويسمى بقوة الكظم وهي توتر الحقل الذي تحصل من أجله الإزالة الكاملة لتمغنط الصخر وتعتبر من أهم مميزات الصخور.



الشكل (4) : علاقة التمغنط (I) بتوتر الحقل المغناطيسي (H) للصخور الفيرومغناطيسية

****

الخواص الفيزيائية – الكيميائية للصخور

1. قابلية الانحلال:

وهي مقدرة الصخور على الانحلال تحت تأثير المياه الطبيعية أو أية محاليل طبيعية أخرى . وأثناء عملية الانحلال تخرب جزئيات الماء المتمتعة ببنية ثنائية القطب الشبكة البلورية للفلزات . وتنتقل الشوارد من الشبكة إلى المياه وتشكل محاليل مائية . وهكذا يحدث تغير في حالة وخواص الصخر وتتشكل فيه فجوات مختلفة المقاييس نتيجة الانحلال ونزع المواد المشكلة للهيكل الصخري الصلب .

تتم عملية الانحلال بطرق مختلفة ويميز عادةً بين انحلال مباشر وآخر غير مباشر (انتشاري) يحدث الانحلال المباشر عند التماس المباشر للمياه المتحركة أو المحاليل في المسامات والشقوق مع الفلزات المحتواة في الصخر والمنحلة في هذه الظروف وهو يزداد عند زيادة سرعة حركة المياه الجوفية ، أما الانحلال غير المباشر فيختلف عن الانحلال المباشر بأنه لا يتعلق بالتأثير المباشر للمياه الحرة الجارية على الفلزات المنحلة ولكنه يمثل عملية تلقائية لحركة الايونات في المحاليل المسامية تحت تأثير فروق التركيز في مختلف أجزاء التشكيلة الصخرية مما يقود تغير تركيب الجزء الصلب للصخور .

وتلعب عملية الانحلال غير المباشر (الديفوزيا) دوراً مهماً في الصخور الغضارية التي تتصف بنفوذية مائية ضعيفة جداً وبكمية كبيرة من المياه المرتبطة أما في الصخور ذات النفوذية العالية كالصخور الرملية والحطامية والصخور المشققة فتتفوق فيها عمليات الانحلال المباشر وتعتبر عمليات الانحلال غير المباشر بطيئة جداً بالمقارنة مع السرعة التي تتم بها عمليات الانحلال المباشر . تتعلق قابلية الانحلال للصخور بمجموعة من العوامل من أهمها: التركيب الفلزي ، التركيب الكيميائي للصخور ، وخواصها البنيوية والنسيجية والقدرة الانحلالية للمادة الحالة (المياه السطحية أو الجوفية أو المحاليل الأخرى) وكذلك الظروف الترموديناميكية .

إن كل أنواع الصخور مهما كان تركيبها الفلزي – الكيميائي ومهما كانت صفات العلاقة بين العناصر التي تتألف منها هذه الصخور من الوجهة النظرية قابلة للانحلال بالماء ، لكنها تختلف فيما بينها بدرجة انحلالها وبسرعة هذا الانحلال ومن وجهة النظر التطبيقية تتمتع عمليات

انحلال الصخور الكربوناتية (الكالسيت و الدولوميت) والسولفاتية (الجص و الانهدريت) والهاليدات (الهاليت ، السيلفين ، الكارناليت) وبعض نماذج الصخور الأخرى كالمرمر واللوس وغيرها من الصخور التي يدخل في تركيبها الهاليت والكالسيت والفلزات القريبة منها بأهمية كبيرة.

يعد التركيب الفلزي من أهم العوامل المحددة لانحلال الصخور. وتتناقص قابلية الفلزات للانحلال في المياه بازدياد طاقة شبكاتها البلورية وهي الطاقة اللازمة لتخريب علاقات الارتباط في الشبكة وأبعاد الايونات الداخلة في تركيبها إلى مسافات يمكن عندها إهمال التأثير الاليكتروستاتي المتبادل فيما بينها. وتزداد هذه الطاقة وتنخفض قابلية الفلزات للانحلال كلما زادت شحنة الشوارد وصغرت أقطارها الشاردية.

تتعلق قابلية الانحلال بالخصائص الانحلالية للسائل الحال. فقابلية الانحلال على سبيل المثال للهاليدات والسولفات والكربونات في الكيروسين أقل بعشرات وحتى مئات المرات منها في الماء ، ويفسر ذلك بأن جزيئات الماء التي تتمتع بعزم ثنائي القطب تملك طاقة ضم كبيرة .

وتتزايد قابلية الصخور للانحلال مع تناقص مقاسات الفلزات المشكلة لها . لذلك يلاحظ تطور ظاهرة الكارست في الصخور الناعمة الحبات بشكل أسرع منه في الصخور الخشنة الحبات أما إذا كان الصخر غير متجانس الحبات فإن البلورات الصغيرة تنحل وتنمو البلورات الكبيرة على حسابها. وتنتشر نتيجة ذلك المسامات في الصخر بشكل غير منظم مما ينعكس بشكل سلبي على مختلف الخواص الجيولوجية والهندسية له.

وتؤثر على قابلية انحلال الكربونات والسولفات والهاليدات الشوائب الموجودة فيها . فالمواد الصعبة الانحلال بالمقارنة مع الفلز المعطى تسبب إنقاص قابلية الانحلال له وللصخر بشكل عام وتحدث عملية إعاقة الانحلال هذه من جراء تشكل أغشية غروانية تعيق انحلال الفلز على سطح البلورات وهذا ما يفسر التطور البطيء للكارست عند وجود شوائب غضارية في الصخور المعرضة للانحلال.

ومن الشوائب الأخرى الكثيرة الانتشار في الصخور الكربوناتية والتي تعيق عمليات الانحلال بشكل كبير المواد البيتومية المبعثرة . أما الشوائب من المواد الأكثر انحلالاً من الفلزات الرئيسة فتسرع عملية الانحلال وتزيد قابلية الصخور للانحلال .

إن طاقة الشبكة البلورية للشوارد وكذلك الخاصة الانحلالية لأغلب المواد الحالة تتعلق بالظروف الترموديناميكية فمع زيادة درجة الحرارة يحدث تنشيط الحركة الاهتزازية للشوارد في الشبكة البلورية وبالتالي إضعاف قوى الارتباط الشاردية أي بمعنى آخر إضعاف طاقة الشبكة البلورية وهذا ذو أهمية كبيرة . فزيادة درجة الحرارة يجب أن تزيد قابلية الصخور للانحلال غير أن هذه العلاقة تظهر عند مختلف الفلزات بأشكال متباينة . فمثلاً قابلية الانحلال لـ NaCL و $CaCo_3$ في الماء المقطر الخالي من Co_2 كما هو الحال عند غالبية بقية الأملاح (الفلزات) تزداد فعلياً بعض الشيء في كل المجال الحراري من (0) إلى (100) درجة مئوية .

غير أن قابلية الانحلال للانهدريت على العكس تتناقص ، أما الجص فقابليته للانحلال تزداد في البداية حتى الدرجة (40) ثم تنخفض بعد ذلك وعند درجة أقل من (42) تكون قابلية الانحلال للانهدريت أعلى من الجص (وهذا يتوافق وطاقة الشبكات البلورية).

ويؤثر الضغط كثيراً على قابلية الانحلال ، فكما هو معروف إذا كان الهيكل الفلزي يتعرض لضغط كبير تزداد قابليته للانحلال وهذا يتضح بشكل كبير عند توزع غير منتظم للضغط على مختلف أجزاء التشكيلة (من جراء التشوهات التكتونية ، التشققات وغيرها).

إن الغازات والأملاح المنحلة في المياه الطبيعية تزيد من مقدرة هذه المياه على حل الصخور . فوجود غاز Co_2 يؤثر بأشكال مختلفة على قابلية الانحلال للصخور الكربوناتية والسولفاتية والهاليدات . فإذا كانت قابلية الانحلال لكبريتات الكالسيوم والملح الصخري تتغير بشكل قليل بوجود (Co_2) فإنها على العكس بالنسبة للكربونات ، فانحلال $CaCo_3$ في مياه تحتوي على غاز أوكسيد الكربون يتم وفق التفاعل التالي :

$$CaCo_3 + H_2O + Co_2 \rightleftharpoons Ca(Hco_3)_2$$

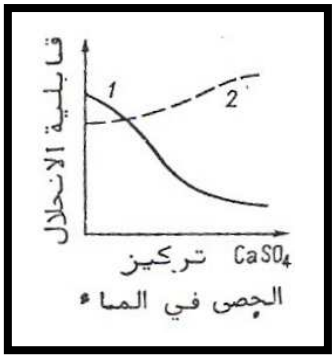
وتشكل في النتيجة بيكربونات الكالسيوم السهلة الانحلال في الماء .

وتتحدد كمية كربونات الكالسيوم المنتقلة إلى المحلول بكمية غاز ثاني أوكسيد الكربون الموجود في المياه والداخلة في التفاعل . وعند شروط عادية من الحرارة والضغط وتركيب الهواء الجوي يكون احتواء Co_2 في الماء كبيراً . ومن جراء هذه الخاصة الانحلالية تكون قابلية انحلال الصخور الكربوناتية في المياه الطبيعية أكبر منها في حالة المياه النقية التي لا تحتوي على Co_2 بحوالي 4–5 مرات.

كذلك تتعلق الخاصة الانحلالية للمياه الطبيعية بتركيب الأملاح المنحلة فمثلاً عند وجود الجص تنخفض قابلية انحلال الكالسيت بشكل واضح وتزداد قابلية انحلال الدولوميت ، الشكل/1/ فعند رشح المياه الغنية بالجص خلال تشكيلة الدولوميت يتم التفاعل التالي :

$$CaCo_3.MgCo_3 + CaSo_4 \rightleftarrows 2CaCo_3 + MgSo_4$$

يتشكل نتيجة لذلك كالسيت ثانوي وفي مرحلة لاحقة تنزع المياه الكالسيت الثانوي من الدولوميت وتصبح الصخور مسامية وكهفية.



الشكل (1): العلاقة بين قابلية الانحلال وتركيز الجص في المياه
1. للكالسيت ، 2. للدولوميت

2. الامتصاص (Absorption):

وهو مقدرة الصخور المسامية على احتجاز وتثبيت بعض المواد التي تحويها المحاليل المتسربة عبرها هذا ويتمتع الامتصاص بطبيعة معقدة وهو يتألف عادةً من بضعة عمليات تجري معاً ويحدث في نتيجتها تغير في تركيب وبنية وصفات الصخور.

2-1- أنواع الامتصاص :

2-1-1- الامتصاص الميكانيكي : ويظهر في مقدرة الصخور المسامية على الاحتفاظ بجزء من الجزئيات المعلقة بالمياه أثناء رشحها عبرها . وتضاف هذه الجزئيات إلى الصخر وتصبح جزءاً منه وتؤدي إلى تغيير خواصه الفيزيائية وتوجد لكل صخر قيمة حدية للجزئيات التي تستطيع أن تتسرب عبر هذا الصخر فالجزئيات التي مقاييسها أكبر من هذه القيمة لا تستطيع أن تتسرب عبر مسامات الصخر ، أما الجزئيات الأقل حجماً فهي تتسرب جزئياً لدرجة ما ثم

يحتفظ بها جزئياً في الصخر وذلك جراء 1. انقطاع المسامات 2. التعرجات في الأقنية المسامية 3. وجود قوى جذب جزيئي عند الجزئيات الصغيرة تتزايد مع تناقص أقطار هذه الجزئيات وتنتشر هذه الظاهرة بشكل واسع في التوضعات النهرية الرملية والحصوية التي تتحول إلى صخور كونغلوميراتية نتيجة احتجازها الحبيبات الغضارية والغروية والرملية الموجودة في المياه .

2-1-2- الامتصاص الفيزيائي : ويمثل هذا النوع من الامتصاص مقدرة الصخور على احتجاز بعض المواد من المحاليل المائية من جراء التأثير المتبادل الجزيئي الناشئ بينها وبين الحبات الصخرية ودون أي تفاعل كيميائي بين المواد المحتجزة والصخر .

يحدث الامتصاص الفيزيائي بفعل الطاقة السطحية الحرة للحبيبات الصخرية ويمثل الصخر الرطب جملة متبعثرة ينظر فيها إلى المياه المحتوية على أملاح منحلة كوسط تبعثر ، أما الحبيبات الصخرية والجزئيات العضوية فينظر إليها كمادة متبعثرة . وتقاس الطاقة السطحية لهذه الجملة بناتج جراء التوتر السطحي الناشئ على حدود التماس بين المادة المتبعثرة ووسط التبعثر وكمية السطح الإجمالي لكل جزئيات المادة المتبعثرة .

تسعى الجملة المتبعثرة إلى إنقاص طاقتها السطحية. وفي جملة (حبيبات صخرية + ماء) يمكن أن يحدث إنقاص هذه الطاقة إما بإنقاص كمية السطح الإجمالي للحبيبات الصخرية أو بإنقاص التوتر السطحي للماء . وهاتان الحالتان تقودان إلى إظهار المقدرة الامتصاصية الفيزيائية للصخور .

يؤدي تشكل طبقات الامتصاص على سطح الجسم الصلب إلى تخفيض توتره السطحي. وبنفس الوقت إنقاص صلابة أو متانة هذا السطح . وهذه الظاهرة مبرهنة تجريبياً وموضحة نظرياً من قبل العالم ريبندير (Rebender) الذي اعتبر أن الجزئيات الممتصة والمرتبطة مع وحدات السطح للشبكة البلورية تضعف قوى التلاصق (التماسك) بينها وتسهل تشكل شقوق جديدة أو توسع الشقوق الدقيقة الموجودة سابقاً في البلورة . وقد استخدمت هذه الظاهرة فيما بعد لإضعاف صلابة الصخور أثناء عملية الحفر وذلك بإدخال محاليل خاصة في الآبار .

كما لاحظنا أعلاه تتعلق قيمة الطاقة السطحية للصخر بالسطح العام لمكوناته الصلبة وأيضاً بالمواد الغروية الموجودة في الصخر. ولقد تبين أنه عند وجود حبيبات مقاييسها أقل من 0,1 ميكرون في الصخر وبحدود 1% فإن سطحها يساوي سطح كل الجزئيات الـ99% الباقية

والمختلفة التركيب الحبي. ويكون تواجد الحبيبات الغروية في الصخور الغضارية عادةً أعلى من 1% وفي بعض الحالات يصل إلى 75% لهذا فإن كمية الطاقة السطحية للصخور تتحدد بدرجة كبيرة باحتوائها على مواد غروية.

وتنخفض الطاقة السطحية للجمل المتبعثرة بتقليص مساحة السطح الخارجي للحبيبات الصخرية (المادة المتبعثرة) وذلك بالتحامها فيما بينها وترسبها وهذا ما يدعى بالتخثر . فكما هو معروف تحمل الجزئيات الصخرية شحنات متماثلة على سطوحها الخارجية لذلك فهي تتنافر وتبقى متبعثرة ولكي يتم التخثر تعدل هذه الشحنات بإضافة المحاليل الكهربائية التي يجب أن يكون تركيزها أعلى من حد معين يسمى الحد الاليكترولتي أو عتبة التخثر. وتتعلق قيمته بطبيعة وتبعثر المادة وكذلك بنوع الاليكتروليت وبتركيب الشوارد التبادلية . فالغرويات اللاعضوية الموجودة في الصخر تملك حد أو عتبة تخثر أقل من عتبة التخثر للغرويات العضوية .

هذا ويتم التخثر في الجمل الغروية بامتصاص الشوارد التي تحمل شحنة معاكسه لشحنتها . وبما أن معظم الحبيبات الغضارية والغروية ذات شحنات سالبة فإن الشوارد الموجبة هي التي تحدث التخثر. وتزداد مقدرة هذه الشوارد على إحداث التخثر بازدياد شحنتها ووزنها الذري .

وتلعب شاردة الكلس الدور الأساسي كمخثر في الصخور غير المالحة فوجودها في المياه الطبيعية يعتبر العامل الأساسي الذي يسبب الامتصاص الفيزيائي للغرويات العضوية والفلزية وذلك بطريقة تخثرها أما وجود H^+ في الصخر وحتى بكميات قليلة سيزيد المقدرة التخثرية للشوارد الأخرى بينما وجود (OH^-) على العكس يساعد على ثبات الغرويات ذات الشوارد السالبة ويضعف بقوة المقدرة التخثرية للاليكتروليتات.

2-1-3- الامتصاص الفيزيائي – الكيميائي (الامتزاز): وهو عبارة عن مقدرة الصخور على حجز كمية من الشوارد الموجودة في المياه الراشحة عبرها ، وتحرير كمية معادلة من الشوارد إلى هذه المياه لهذا غالباً ما يسمى هذا النوع من الامتصاص (بالامتصاص التبادلي) فمثلاً عند التأثير المتبادل للصخور الغضارية مع محلول $CaCL_2$ فإن جزءاً من شوارد الكالسيت يزول من المحلول وعند تحليل هذا المحلول يلاحظ ظهور كاتيونات أخرى مثل K^+ و Na^+ يعادل حجمها كمية شوارد Ca^{+2} المزالة . وتسمى الكمية العامة للشوارد التي تدخل في عملية التبادل في الظروف المعطاة بسعة الامتصاص أو سعة التبادل وتقدر بملغ مكافئ / 100غ من الصخر

الجاف . هذا وتنشط خاصة الامتصاص الفيزيائي– الكيميائي في الصخور الغضارية بشكل خاص .

يتعلق الامتصاص الفيزيائي – الكيميائي للصخور بدرجة تبعثرها فكلما كانت درجة التبعثر للصخر كبيرة كلما كانت قدرته التبادلية أكبر وتظهر زيادة سعة التبادل مع زيادة التبعثر عند بعض الفلزات بشكل حاد وتغيب عند بعضها الآخر. ونجد أن سعه التبادل تزداد بشدة مع زيادة التبعثر عند الفلزات التي تتحدد قيمتها عندها بالسطح الخارجي للبلورات (كالكاولينيت) وتتغير قليلاً عند الفلزات التي يكون عندها التبادل متعلقاً بالإضافة إلى السطح الخارجي للبلورات بالفراغ بين الطبقات كما هو الحال في فلزات المونتموريلونيت ، إن المقدرة التبادلية للفلزات الغضارية المشكلة للصخور يتمتع بها الكاولينيت وهذا يعود إلى أن الكاولينيت يملك شبكة بلورية قاسية لذلك فإن إمكانية دخول الشوارد إلى الفراغ الموجود بين طبقاته غير ممكنة لهذا فإن العمليات التبادلية في حبيبات الكاولينيت تتم بالأساس على السطح الخارجي للبلورات أما الميكا فهي تملك شبكة بلورية مشابهة للكاولينيت إلا أن السطح القاعدي للبلوارات يحمل شحنات سالبة تنشأ بفضل تجمع الشحنات الداخلة المحدودة في الشبكة البلورية عند التبادل بين Si^{+4} ، AL^{+3} مع أقل الشوارد تكافئية ، ونتيجةً لهذا التبادل الشاردي عند الميكا لا يحدث فقط على الجوانب ولكن على كامل السطح القاعدي للشبكة البلورية. وبالتالي فإن سعة الامتصاص للميكا تزيد عنها في الكاولينيت فهي تتراوح بين 10–40 ملغ مكافئ/100غ. إن التبادل في الحالتين السابقتين يحدث على السطح الخارجي للحبيبات الصخرية أما في حالة المونتموريلونيت الذي تتصف شبكته البلورية بقدرة الحركة عند تفاعلات التبادل الكاتيوني فيلاحظ بأن التبادل الشاردي يحدث على السطح الخارجي والداخلي للبلورة وبالتالي فإن سعة التبادل الشاردي في هذه الحالة كبيرة فهي تتراوح بين 80 و150 ملغ مكافئ/100غ من الصخر الجاف .

وأخيراً تتميز المركبات العضوية كالدبال بسعة امتصاص عالية تبلغ وسطياً 200 ملغ مكافئ/100غ وتصل في بعض الأحيان إلى 500 ملغ مكافئ/100غ وتتعلق عملية التبادل الفيزيائي – الكيميائي في الصخور بتركيب الكاتيونات التبادلية فيها وكذلك بالتركيب الكاتيوني للمحلول المتبادل التأثير مع هذه الصخور .

فعندما تتواجد في المحلول المسامي للصخر كاتيونات مختلفة التركيب يلاحظ بأن امتصاصها أثناء التفاعل التبادل يتم بشكل متباين وبشكل عام فإن القانونية العامة لتبادل الكاتيونات في الصخور تعود إلى ما يلي:

1) تزداد قدرة الصخر على امتصاص الكاتيونات مع زيادة تكافؤ هذه الكاتيونات فالشوارد الثلاثية التكافؤ تمتص بشكل أنشط من الثنائية التي بدورها تمتص بشكل أنشط من الشوارد أحادية التكافؤ .
2) تزداد المقدرة الامتصاصية ضمن الكاتيونات أحادية التكافؤ مع زيادة أقطارها ويستثنى من ذلك شاردة الهيدروجين (H^+).

إن أكثر الكاتيونات انتشاراً ترتب حسب نشاطها في التفاعلات التبادلية على النحو التالي :

Fe > AL > H > Ba > Ca > Mg > NH4 > K > Na > Li

كذلك فإن المقدرة التبادلية يمكن أن تتغير عند مختلف التأثيرات على الصخور وبشكل خاص يؤدي تجفيف الصخر إلى إنقاص سعته التبادلية .

هذا ويحدث في الصخور إضافة إلى التبادل الكاتيوني تفاعلات فيزيائية – كيميائية للتبادل الأنيوني ولكن من الضروري ملاحظة إن التبادل الأنيوني للصخور يتم ببطء كبير بالمقارنة مع التبادل الكاتيوني .

2-1-4- الامتصاص الكيميائي : يقوم هذا النوع من الامتصاص على أساس تشكل اتحادات صعبة الانحلال أو غير منحلة نتيجة التأثير المتبادل بين الصخور والسائل الراشح وهذه الاتحادات تتراكم بشكل رسوبات وغالباً ما تمتزج مع المكونات الصلبة للصخر وتلتحم بها بقوة في بعض الحالات الأخرى وتسبب تغيير بتركيبها الفلزي وصفاتها المختلفة ومن أهم الكاتيونات التي تعطي اتحادات غير منحلة كاتيونات Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+3} , Al^{+3} غير أن شاردتي (Ca^{+2} , Mg^{+2}) تلعبان الدور الأساسي. ومن الأنيونات التي تصادف في الصخور وتعطي اتحادات صعبة الانحلال أنيونات Co_3^{-2} , Po_4^{-3} , So_4^{-2} ويحدث تشكل اتحادات صعبة الانحلال في حالتين :

تتلخص الأولى منهما في تحرير بعض الكاتيونات من الصخر بفعل عمليات الامتصاص الفيزيائي – الكيميائي ومن ثم اتحادها مع أنيونات المحلول وتشكل أملاح صعبة الانحلال

ومثال ذلك تأثير محلول Na_2Co_3 على الصخور الكربوناتية . ففي هذه الحالة وبفعل الامتصاص الفيزيائي – الكيميائي يدخل كاتيون Na^+ في الصخر الماص وينزع منه كمية مكافئة من الكالسيت والمنغنيز وهذان الكاتيونان يعطيان مع أنيون Co_3^{-2} كربونات صعبة الانحلال $CaCo_3MgCo_3$ تتحول إلى الحالة الصلبة وتصبح في الصخر بهيئة تشكيلات جديدة .

أما في الحالة الثانية فيتم تشكل الاتحادات الصعبة الانحلال بالتفاعل المباشر بين مكونات الصخر والمواد المنحلة في المياه ومثال ذلك وجود ملح $CaCL_2$ و $CaSo_4$ في الصخر وبإضافة محلول يحوي على نترات الفوسفور تترسب عندها من جراء التفاعل الكيميائي فوسفات الكالسيوم الثلاثية التكافؤ والصعبة الانحلال $Ca_3(Po_4)_2$ هذا وتنتشر عمليات تشكل أملاح فوسفات وفحمات الكالسيوم في الطبيعة بكثرة.

2-1-5- الامتصاص الحيوي : ينتشر هذا النوع من الامتصاص في النطاقات العليا من الغلاف الصخري الغنية بالحياة العضوية ففي هذه النطاقات ونتيجة النشاط الحيوي للمعضيات الكبيرة والمجهرية يحدث تشكل وتراكم مواد جديدة يمكن أن تنضم إلى المكونات الصلبة التي توجد في المحلول المسامي .

هذا وإن انتقائية ونشاط هذا النوع من الامتصاص يسبب تغير الغلاف الخارجي للصخور وحالتها الفيزيائية وخواصها. ويتضح دور الامتصاص الحيوي بشكل أساسي عند تجوية الصخور وأيضاً في المراحل الأولى لتشكل الصخور الرسوبية .

2-2- أهمية عمليات الامتصاص :

تستخدم المقدرة الامتصاصية والتبادل الفيزيائي – الكيميائي في الأعمال التطبيقية الجيولوجية الهندسية. وتعتبر عمليات التبادل الفيزيائي – الكيميائي من أهم أنواع الامتصاص في الصخور وهي تحدث في الطبيعة بشكل واسع . ويمكن اصطناع هذا النوع من الامتصاص لتغيير مواصفات الصخور حسب الطلب . ولقد اقترح العالم الروسي سكالوفسكي أسلوباً لمقاومة الرشح من السدود والقنوات على أساس استبدال شوارد الكالسيوم العالية القيمة الاتحادية (Ca^{+2}) بشوارد الصوديوم (Na^+) وذلك بإضافة محلول (NaCL) مما يؤدي إلى تحرر الحبيبات الغضارية من ترابطها وتصغر بالتالي أقطار المسامات في الصخور وتنخفض نفوذيتها . وهذه الطريقة

تستخدم على نطاق واسع في الصخور الكربوناتية وغير الكربوناتية . فعلى سبيل المثال تنقص المقدرة الرشحية للصخور الكربوناتية بحوالي 15–20 مرة وللتربة السوداء بحوالي 210–285 مرة.

وتستخدم خاصة الامتصاص الفيزيائي والميكانيكي للصخور تخفيض نفوذيتها وخصوصاً في حالة الصخور الحطامية الرملية المكونة لقاع المنشآت المائية كالسدود والخزانات وأقنية الري وذلك بترشيح محاليل غضارية عبر هذه الصخور مما يؤدي في النهاية إلى إضعاف الخواص الرشحية لهذه الصخور.

وعند إنقاص نفوذية الرمال بواسطة الحبيبات الغضارية الناعمة يجب أن نأخذ بعين الاعتبار تركيبها وتركيب المحاليل الغضارية . فالرمال ذات الحبات الكبيرة (الخشنة) يمكن أن تنخفض نفوذيتها بترشيح محاليل غضارية ذات تركيز (1,5–3%) فهذه الرمال لا تحتفظ بالجزئيات الغضارية الناعمة بل لا بد من استخدام جزيئات و أوحال خاصة أكبر مقاساً . وبالتالي فإن تخفيض النفوذية في هذه الصخور يتم على مرحلتين : مرحلة أولى تضاف فيها إلى الصخور الرملية الخشنة الحبات مواد ترابية ورملية ناعمة ومرحلة ثانية (لاحقة) يضاف فيها إلى الصخر المتشكل مواد غضارية أما في حالة الصخور الرملية الناعمة الحبات فيتم تخفيض النفوذية بواسطة جزئيات غضارية مقاساتها أقل من 0,005 ميكرون .

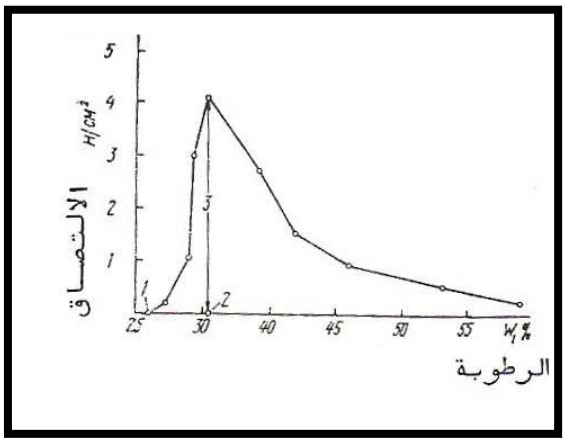
ويجب الأخذ بعين الاعتبار بأن الطريقة الأخيرة التي تعتمد على ترشيح محاليل غضارية عبر الصخور تكون أحياناً غير فعالة.

فالجزئيات الغضارية لا تتسرب مع المياه في الطبقات الرملية ولكنها تتراكم على السطح وتشكل حاجزاً غضارياً خاصاً بسبب إنقاص النفوذية . وعند تخريب هذا الحاجز الغضاري تستأنف عملية رشح المياه بنفس القوة السابقة لهذا تعتبر هذه الطريقة غير مألوفة .

3. الالتصاق :

وهو قابلية الصخور للالتصاق بالسطح الخارجي لمختلف المواد . وتميز هذه الخاصة بشكل أساسي الصخور الغضارية وصخور اللوس وهي تظهر في الصخور عند وجود حمولات خارجية متوسطة بين (0.1 – 0.5 Mpa) ورطوبة أكبر بقليل من رطوبة حد اللدونة . وعند زيادة الحمولة (إلى بضعة عشرات الميغاباسكال) فإن الصخور تبدأ بالالتصاق على سطوح المواد

المجاورة عند رطوبة أقل من الرطوبة الجزيئية الأعظمية . هذا ويكون الالتصاق ضعيفاً في البداية ثم تزداد شدته بسرعة مع زيادة الرطوبة إلى أن تبلغ قيمتها العظمى عندما تبلغ الرطوبة حداً معيناً يسمى (برطوبة الالتصاق الأعظمية) وبعد هذا الحد ومع استمرار زيادة الرطوبة تتناقص شدة الالتصاق بشكل حاد، الشكل/2/ .



الشكل (2): علاقة التصاق الصخور بالرطوبة

1. رطوبة بداية الالتصاق

2. رطوبة الالتصاق العظمى

3. شدة الالتصاق العظمى

يظهر الالتصاق فقط عند الصخور الرطبة وهو يتعلق بقوى الجذب الجزيئي للمياه ضعيفة الارتباط التي تربط بين الحبات الصخرية وسطوح المواد المجاورة لها . ويقاس الالتصاق بشدة الالتصاق وهو القوة اللازمة لفصل الأجسام عن الصخور الملتصقة بها وتقدر بـ غ/سم^2 أما المؤشرات الأساسية التي تحدد الالتصاق فهي : رطوبة بداية الالتصاق ، رطوبة الالتصاق الأعظمية ، شدة الالتصاق .

تتعلق خاصة الالتصاق بعوامل كثيرة نذكر من أهمها التركيب الحبي والفلزي للصخور ، تركيب الشوارد التبادلية ، حالة الصخر (الرطوبة ، الكثافة ، البنية ، النسيج) المواد التي تتألف منها المادة اللاصقة ، قيمة الحمولة التي تضغط على تلك المادة وغير ذلك من العوامل . هذا وإن

الشروط الضرورية لظهور خاصة الالتصاق للصخور هي وجود فلزات غضارية وجزيئات عضوية عالية التبعثر ورطوبة قريبة من الرطوبة الهيغروسكوبية.

تتأثر خاصة الالتصاق للصخور بدرجة كبيرة بالتركيب الحبي لهذه الصخور وقد أثبتت التجارب والأبحاث التي أجراها الباحث (كالتشيف 1975) إن شدة التصاق الجزيئات التي أقطارها أقل من (1) ميكرون والمأخوذة من الكاولينيت تزيد على 10 نيوتن/سم^2 في حين بلغت هذه الشدة للحبات التي أقطارها 1–2 ، 2–5 ، 5–10 ميكرون والمأخوذة من نفس الصخر 7 ، 3 ، 1.2 نيوتن/سم^2 .

أما التصاق الرمال والطين فهو ضئيل بالمقارنة مع التصاق الصخور الغضارية التي يتغير عندها من 0,2 –0,3 وحتى 5–6 نيوتن/سم^2 وفي أغلب الأحيان يتغير ضمن المجال 0,5–2 نيوتن/سم^2 عند حمولة مقدارها 0,8 ميغاباسكال .

وفي حالة الطمي تزداد شدة الالتصاق وكذلك رطوبة بداية الالتصاق ورطوبة الالتصاق العظمى مع زيادة محتوى الحبات الغضارية حتى حد معين هو 50–60 % وبعد ذلك يضعف تأثير التركيب الحبي ويزداد تأثير التركيب الفلزي .

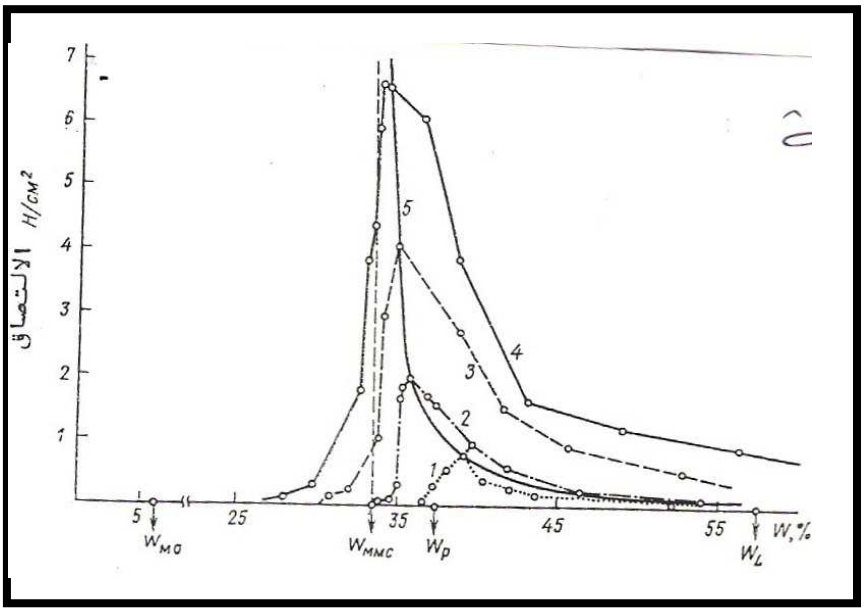
ويؤثر التركيب الفلزي للصخور كثيراً على الالتصاق فهو من جهة يحدد تبعثر الصخور ومن جهة ثانية يؤثر على تشكل مياه مرتبطة في هذه الصخور. وعند نفس الظروف تكون قيمة التصاق الغضار المونتموريلونيتي أعلى من قيمة التصاق الكاولينيت بـ (5 مرات) ومن الميكا بمرتين .

وتتعلق خاصة الالتصاق للصخور الغضارية بتركيب الكاتيونات التبادلية بشكل جوهري . فشاردة الصوديوم (Na^+) خاصة تزيد بشكل كبير شدة الالتصاق للصخور (وبهذا يتعلق الالتصاق الكبير للأملاح) . وبشكل عام تزداد شدة ورطوبة الالتصاق بازدياد نسبة الشوارد التبادلية أحادية التكافؤ ويتناقص بازدياد نسبة الشوارد الثنائية والثلاثية التكافؤ.

كذلك يؤثر الضغط الخارجي كثيراً على شدة الالتصاق . فمع زيادة الحمولة الضاغطة تزداد القيمة المطلقة للالتصاق بشكل كبير ، أما رطوبة بداية الالتصاق ورطوبة الالتصاق الأعظمية فتتحول باتجاه التناقص، الشكل/3/ ويظهر هذا التناقص بشكل واضح حتى عند فروق بسيطة للضغوط الخارجية ويدل على الصفة الديناميكية (الحركية) للبارامترات الأساسية التي تصف

خاصة الالتصاق للصخور. وهنا يجب الإشارة إلى أن زمن تأثير الحمولة يؤثر أيضاً على قيمة الالتصاق للصخور المخلعة والشديدة الرطوبة غير أن هذا التأثير ليس واحداً للصخور مختلفة التركيب الفلزي .

ويأخذ المنحني الموحد للالتصاقات الأعظمية للصخور الغضارية مختلفة التركيب الفلزي عند قيم مختلفة للضغوط الخارجية شكل قطع زائد .



الشكل (3): علاقة التصاق الغضار الكاولينيتي مع الرطوبة وقيمة الحمولة الضاغطة حسب (كالتشيف) عند حمولة مقدارها على التوالي:

1. 0.1 Mpa ، 2. 0.3 Mpa ، 3. 1 Mpa ، 4. 5 Mpa ،

5. المنحني الموحد للالتصاقات الأعظمية للصخور عند مختلف الضغوط

W_{Mg}الهيغروسكوبية الأعظمية ، W_{MMC} السعة الجزئية الأعظمية ، W_P الحد الأسفل للدونة ، W_L الحد الأعلى للدونة

وأخيراً تتعلق شدة الالتصاق بنوعية المادة التي يلتصق عليها الصخر (معدنية ، مطاطية ، جلدية ، خشبية ....الخ) فلقد تبين تجريبياً أن الصخور الغضارية تلتصق على السطوح الخشبية والمطاطية أكثر من السطوح المعدنية ، أما الصخور الرملية فعلى العكس تظهر شدة التصاق كبيرة بالنسبة للمعادن .

وهكذا فإن خاصية الالتصاق للصخور تعتبر أحد العوامل الهامة والمحددة لظروف عمل آلات شق وتعبيد الطرق واستصلاح الأراضي ويسبب التصاق الصخور على سطح الحفارات وآلات النقل تخفيض إنتاجيتها عند تنفيذ أعمال الحفر في المناجم واستخراج الخامات من المقالع وغير ذلك.

4. اللدونة :

وهي قدرة الصخور على تغيير أشكالها تحت تأثير القوى الخارجية والمحافظة على الشكل المكتسب بعد إزالة هذا التأثير دون أن تفقد هذه الصخور تماسكها . وتتمتع الصخور الغضارية وصخور اللوس والمارل والحوار والترب الزراعية وبعض الصخور الاصطناعية بخواص اللدونة عند رطوبة محددة وضغوط غير كبيرة وتغيب هذه الخواص في الظروف العادية في حالة حمولات غير كبيرة عند نماذج الصخور الأخرى.

تتحدد خاصة اللدونة للصخور المترابطة بدليلين هامين هما :

1- الحد الأعلى للدونة أو الحد الأسفل للسيولة (WL) وهو يمثل الرطوبة الحدية التي إذا تجاوزها الصخر انتقل من حالة اللدونة إلى حالة السيولة .

2- الحد الأسفل للدونة (WP) ويمثل الرطوبة الحدية بين الحالة نصف صلبة والحالة اللدنة للصخور وهو يصف الرطوبة الصغرى التي تستطيع عندها الحبيبات الصخرية بالتحرك دون أن تفقد الصخور تماسكها.

ويسمى الفرق في قيمة رطوبة الصخر بين الحدين الأعلى والأسفل للدونة بعدد اللدونة أو دليلها ويرمز له بالرمز (Mp) أو(IP) وهو يظهر المجال الذي تتغير فيه رطوبة الصخر دون أن يفقد لدونته. هذا وكلما كان عدد اللدونة كبيراً كان الصخر أكثر لدونة.

تؤثر على لدونة الصخور مجموعة من العوامل أهمها التركيب الحبي والفلزي ، شكل الحبات ، تركيب الشوارد التبادلية وصفات السائل الراشح.

يعتبر التركيب الحبي من أهم العوامل المؤثرة في لدونة الصخور . فلقد ثبت تجريبياً أن خواص اللدونة تبدأ بالظهور عند الحبات ذات القطر الأقل من (5) ميكرون ، وتكون لدونة الحبات ذات الأقطار 1-2 ميكرون ضعيفة وتبلغ اللدونة قيمتها العظمى عند الحبات التي تقل أقطاره عن (1) ميكرون فاللدونة تتعلق بشكل كبير بتبعثر الحبات الغضارية وتزداد طرداً مع زيادة الغرويات

فيها وخصوصاً المواد الغروية العضوية وذلك لمقدرتها على الاحتفاظ بكمية كبيرة من المياه المرتبطة . ويؤثر التركيب الفلزي للصخور كثيراً على لدونتها ، إذ أن مختلف الفلزات بالماء بصورة متباينة. ويرتبط شكل الحبات الذي بدورة يظهر تأثيراً على قيمة الالتصاق ببنية الشبكات البلورية للفلزات. وتتمتع الفلزات ذات الحبات الصفائحية والحرشفية بأكبر قيم للدونة ، وهذا ما جعل عدد كبير من الباحثين يعتقدون بأن الشكل الصفائحي للحبات هو العامل الأساسي المحدد للدونة الصخور وقد أظهرت الدراسات التي أجريت من قبل العالم الروسي سرغييف على خلائط مختلفة التركيب الفلزي إن قيمة لدونة الصخور تكون كبيرة عندما تتواجد في جزيئاتها الغضارية فلزات مجموعة المونتموريلونيت بينما تكون قليلة في حالة وجود فلزات الكاولينيت . ويعود هذا إلى أن فلزات المونتموريلونيت تتمتع ببنية بلورية غير ثابتة ولها قدرة على الاحتفاظ بكمية كبيرة من المياه ، بينما فلزات الكاولينيت تتصف ببنية بلورية قاسية ولا تستطيع الاحتفاظ إلا بكمية قليلة من المياه .

وتتأثر لدونة الصخور بشكل كبير بنوع الشوارد التبادلية وهي تزداد مع زيادة نسبة الشوارد أحادية التكافؤ وانخفاض نسبة الشوارد الثنائية والثلاثية التكافؤ .

وبشكل عام تزداد اللدونة في الصخور تبعاً لنوع الشوارد وفق التسلسل التالي:

$$Li^{+} > Na^{+} > K^{+} > Mg^{+2} > Ca^{+2} > H^{+} > Fe^{+3} > AL^{+3}$$

ويظهر تركيب وتركيز المحلول المائي الراشح عبر الصخور تأثيراً كبيراً على لدونتها . فتركيب الأملاح المنحلة في المياه يؤثر على تركيب الشوارد التبادلية في الصخور والتي تؤثر بدورها على لدونة هذه الصخور . فالمياه التي تحتوي على شوارد (Na^{+}) تسبب زيادة لدونة الصخور ، أما المياه التي تحتوي على شوارد (Ca^{+2}) فتؤدي إلى انخفاض اللدونة . كذلك فإن ازدياد تركيز الأملاح في المياه الراشحة يؤدي إلى إنقاص لدونة الصخور وهذا يعود إلى عملية نزع الماء وبالتالي تقليل محتوى المياه الضعيفة الارتباط في الصخور.

ويتم تعيين حدود اللدونة باستخدام طرائق متعددة تقسم إلى طرائق مباشرة وأخرى غير مباشرة . تقوم الطرائق المباشرة على القياس لقيم التشوه اللدوني للصخور . أما الطرائق غير المباشرة فتقوم على تعيين مجال الرطوبة الذي تظهر فيه خواص اللدونة وهذه الطرائق هي الأكثر انتشاراً في الوقت الحاضر.

وتستخدم خواص اللدونة لتصنيف الصخور الغضارية فهي تصنف حسب دليل اللدونة (IP) إلى الأنواع التالية حسب الجدول/1/.

الجدول (1): تصنيف الصخور الغضارية حسب IP

اسم الصخر الغضاري	دليل اللدونة
غضار رملي	$1 < IP \leq 7$
رمل غضاري	$7 < IP \leq 17$
غضار	$IP > 17$

وفي التطبيقات الجيوهندسية يستخدم على نطاق واسع دليل قوام الصخور (IL) الذي يتم تعيينه باستخدام دليل اللدونة (IP) بواسطة العلاقة التالية :

$$IL = (W - WP) / IP$$

وتصنف الصخور حسب قيمة هذا العامل (دليل القوام) إلى عدة مجموعات حسب الجدول/2/.

الجدول (2): تصنيف الصخور حسب IL

اسم الصخر	حالة (قوام) الصخر	دليل القوام (IL)
الرمل الغضاري	صلب	$IL < 0$
	لدن	$0 \leq IL \leq 1$
	في حالة سيولة	$IL > 1$
الغضار الرملي والغضار	صلب	$IL < 0$
	نصف صلب	$0 \leq IL \leq 0.25$
	لدن متماسك	$0.25 \leq IL \leq 0.50$
	لدن طري	$0.50 \leq IL \leq 0.75$
	لدن في حالة السيولة	$0.75 < IL \leq 0.1$
	في حالة السيولة	$IL > 1$

ويستخدم دليل اللدونة أيضاً لحساب مؤشر لدونة الحبيبات الغضارية (يريكلونيسكي 1949) أو النشاط الغروي (سيكمبثون 1953).

$$Kp = IP / Mc$$

حيث أن Mc: نسبة وجود الحبيبات الغضارية التي أقطارها (d<0.005 MM) فكلما كانت قيم هذا المؤشر أكبر كلما زادت مقدرة فلزات الحبيبات الغضارية على ضم المياه المرتبطة التي تحدد لدونة الصخور، بمعنى آخر كلما زادت قيم Kp كلما زادت لدونة الصخور والعكس صحيح.

وتقسم الصخور حسب قيم (Kp) إلى ثلاثة أنواع رئيسة:

1) صخور ذات نشاط غروي شديد $Kp \geq 1.25$
2) صخور ذات نشاط غروي متوسط $75 < Kp < 1.25$
3) صخور ذات نشاط غروي ضعيف $Kp \leq 75$

هذا ويغلب على تركيب الصخور الغضارية ذات النشاط الغروي الشديد فلزات المونتمونيت في حين يغلب على تركيب الصخور ذات النشاط الضعيف فلزات الكاولينيت.

5. الانتفاخ :

يعرف الانتفاخ بأنه زيادة حجم الصخر نتيجة تبلله بالماء وهو خاصة تميز الصخور الغضارية والصخور الحطامية الملتحمة بملاط غضاري . تتعلق خاصة الانتفاخ بقدرة الفلزات الغضارية على الذوبان في الماء وبالسطح النوعي الكبير لهذه الفلزات ويتسبب الانتفاخ في إضعاف الروابط البنيوية بين الحبات الغضارية وابتعادها عن بعضها نتيجة تشكل أغلفة رقيقة من جزئيات الماء حول هذه الحبيبات وهذا يؤدي إلى زيادة مسامية الصخر وبالتالي زيادة قابليته لامتصاص كمية أكبر من الماء (زيادة في حجم الصخر). لذا ففي عملية الانتفاخ لا تحدث زيادة في حجم الصخر فقط ولكن يتناقص التحامه (ارتباطه) بسبب الإضعاف الكبير للروابط البنيوية الشاردية – الكهربائية . هذا ولا يحدث الانتفاخ إلا إذا كان تركيز الأملاح في المحلول الخارجي أقل من تركيزها في الماء المسامي ولو كان العكس فإن الصخر سيفقد جزءاً من مياهه ويجف وينكمش لذا فإن خاصة الانتفاخ ترتبط بظاهرة الحلول ويتم تقدير انتفاخ الصخور بالمؤشرات التالية :

1- شدة أو تشوه الانتفاخ (R_H) ويحدد بالتغير النسبي للحجم أو الارتفاع عند عدم إمكانية التوسع (التمدد) الجانبي للعينة الصخرية بعد الانتفاخ ويعبر عنه كنسبة مئوية . وهو يتحدد عند الانتفاخ الحر أو الانتفاخ تحت تأثير حمولة.

2- رطوبة أوحد الانتفاخ (W_H) ويعبر عنها كنسبة مئوية وهي رطوبة العينة الصخرية عند توقفها عن امتصاص الماء .

3- ضغط الانتفاخ (P_H) ويقدر بالميغا باسكال وهو الضغط الذي يتولد في العينة الصخرية أثناء امتصاصها للماء عندما لا تستطيع زيادة حجمها أثناء انتفاخ الصخر.

وتصنف الصخور حسب تشوه الانتفاخ الحر وضغط الانتفاخ في المجموعات التالية الجدول/3/.

الجدول (3): تصنيف الصخور المنتفخة

حالة الصخر	قيمة التشوه الانتفاخ الحر	قيمة ضغط الانتفاخ Mpa
غير منتفخة	**أقل من 4**	**أقل من 0.025**
ضعيفة الانتفاخ	**10 – 4**	**0.1 – 0.025**
متوسطة الانتفاخ	**15 – 10**	**0.25 – 0.1**
شديدة الانتفاخ	**أكثر من 15**	**أكبر من 0.25**

يتأثر انتفاخ الصخور بمجموعة من العوامل أهمها :

1. تركيب وبنية الصخر (التركيب الحبي والفلزي) تركيب الشوارد التبادلية ، الخواص البنيوية والنسيجية ، الرطوبة وغيرها.
2. التركيب الكيميائي والتركيز للمحلول المائي الذي يقع في علاقة تأثير متبادل مع الصخر.
3. قيمة الضغط الخارجي الذي يتعرض له الصخر.

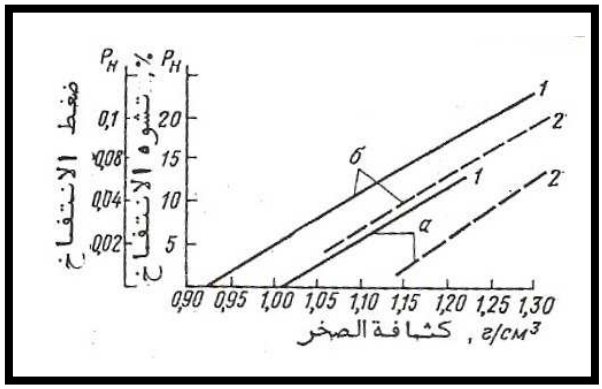
ويميز الانتفاخ بصورة أساسية الصخور المترابطة (الملتحمة بملاط) فالأوحال الرملية لا تتمتع بخاصية الانتفاخ أو أنها تنتفخ بشكل قليل جداً ، أما الأوحال الغضارية والغضار فيزداد الانتفاخ فيها وبما يتناسب ومحتوى الحبات الغضارية والغروية بشكل خاص.

ويؤثر التركيب الفلزي للصخور كثيراً على انتفاخها وبشكل خاص تركيب الفلزات الغضارية. فالفلزات التي تملك شبكة بلورية متحركة (غير ثابتة) كمجموعة المونتموريلونيت تتمتع بقيمة

انتفاخ كبيرة بالمقارنة مع الفلزات ذات الشبكات البلورية القاسية. وتتغير شدة الانتفاخ في الصخور تبعاً لنوع الشوارد التبادلية. كالكاتيونات الثنائية والثلاثية التكافؤ المجمعة للحبيبات الغضارية والغروية تخفض من مقدار الانتفاخ أما الكاتيونات أحادية التكافؤ فتسبب تبعثر الحبيبات الغضارية والغروية في الصخور مما يؤدي إلى زيادة مسامية هذه الصخور وقابليتها لامتصاص الماء وبالتالي زيادة شدة الانتفاخ .

وتزداد قيمة الانتفاخ بشكل وثيق بكمية المياه الممتصة فقيمة الانتفاخ تتناقص مع زيادة قيمة الرطوبة الطبيعية (البدائية) للصخر. لذا بمقدار زيادة قيمة هذا المؤشر فإن الانتفاخ يتناقص.

وتتغير شدة الانتفاخ في الصخور الغضارية تبعا لبنيتها ، فمع زيادة كثافة العينات الصخرية تزداد قيمة تشوه الانتفاخ وكذلك ضغطه وتكون العلاقة غالباً خطية. الشكل/4/.



الشكل (4): العلاقة بين تشوه الانتفاخ (1) وضغط الانتفاخ (2) والكثافة
a: كاولينيت ، b: مونتموريلونيت

ويكون الانتفاخ أكبر ما يمكن بالاتجاه العمودي على التطبق أو على اتجاه التشقق الرئيسي .

ويتعلق انتفاخ الصخور الغضارية بوجود الأملاح في المحاليل الراشحة في الصخور وأيضاً بتركيز وقيمة (pH) للمحاليل. ويحدد التركيب الكيميائي للمياه تركيب الكاتيونات التبادلية بدرجة كبيرة وبالتالي قيمة الانتفاخ . إضافةً لذلك عند وجود نفس الأملاح في المياه الطبيعية فإن قيمة الانتفاخ ستتغير تبعاً لتركيزها. فكلما كان وجود الاليكتروليتات في الماء أكبر كلما كان تشكل المياه المرتبطة في الصخور أقل ، وبالتالي كلما كان الانتفاخ قليلاً.

وأخيراً يتعلق تشوه الانتفاخ للصخور بقيمة الضغط الخارجي المؤثر عليها .

كما أن قيمة ضغط الانتفاخ تنخفض بمقدار زيادة الضغط الخارجي وإذا تساوت قيمة هذا الضغط مع ضغط الانتفاخ أو زادت عنه فإن تشوه الانتفاخ لا يظهر.

تنتشر ظاهرة انتفاخ الصخور في الطبيعة بشكل واسع جداً وهي من أهم الخواص التي من الضروري أخذها بعين الاعتبار عند تنفيذ أعمال البناء واستثمار المنشآت الهندسية . فالمهندس تصادفه قضايا كثيرة مع ظاهرة الانتفاخ وخاصةً عند بناء السدود والخزانات المائية حيث تتغير الظروف الهيدروجيولوجية للمكان وتزداد رطوبة الصخور على حساب ورود كميات جديدة من المياه. فالصخور التي توجد في أسفل وعلى جوانب هذه الخزانات والسدود يمكن أن لا تنتفخ وحسب ولكن تتبلل تحت تأثير المياه (وخاصة مياه الأمطار) وهذا يؤدي في النهاية إلى تخريب كامل لبنية هذه الصخور الطبيعية . كذلك تؤدي هذه الظاهرة إلى تشكل الانزلاقات على السفوح الجبلية المكونة من صخور غضارية . لهذا فإن الدراسة الشاملة لظاهرة الانتفاخ تملك أهمية تطبيقية كبيرة وخصوصاً في حالة وجود صخور غضارية في مناطق المنشآت الهندسية المختلفة.

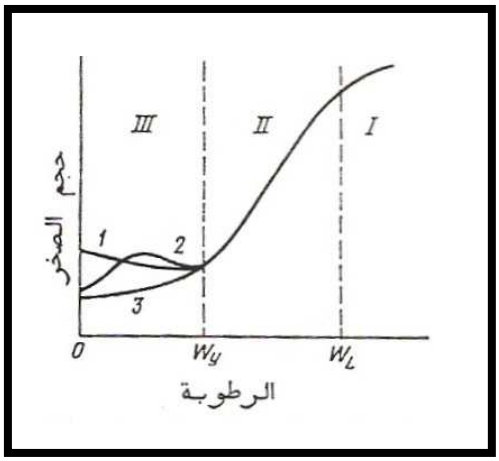
6. الانكماش :

وهو إنقاص حجم الصخور نتيجة فصل المياه عند الجفاف أو عند ظهور عمليات فيزيائية–كيميائية كالحلول مثلاً ، وهذه الخاصة تتمتع بها الصخور الرطوبة فقط. وتصبح الصخور نتيجة عمليات الانكماش كثيفة وحتى صلبة بعد الجفاف . إن تكثف (تصلب) الصخور الغضارية عند الانكماش يزيد من مقاومتها للتشوه إلا أن وجود الشقوق المرافقة عادةً للانكماش يزيد من النفوذية المائية وينقص من ثبات الطبقة السطحية للصخور في المنحدرات.

ويظهر الانكماش في الصخور الغضارية والمارن والحجر الكلسي الغضاري والصخور الحطامية المرتبطة بملاط غضاري.

هذا ويحدث عند الانكماش إضافةً إلى عملية التكثيف (الترصيص) الميكانيكي والتصدع (التشقق) إعادة توزيع للمكونات الكيميائية المنحلة للصخور فتنفى أجزاء الصخور التي تحدث فيها عملية تبخر الماء عند الانكماش بالأملاح ويمكن أن تكتسب في حالات عديدة زيادة في المتانة وانخفاض في تأثير الماء. ولكن في بعض الحالات وخصوصاً عند تبلور مثل هذه الفلزات كالحصى فعلى العكس تزداد عملية تفتت الصخور وتحطمها. وبالتالي فالانكماش هو

عملية فيزيائية – كيميائية معقدة تقود إلى تغير صفات الروابط البنيوية بين الحبات الصخرية ويجري انكماش الصخور الغضارية المشبعة بالماء في ثلاث مراحل بطيئة ، عادية ومتبقية. الشكل/5/.



الشكل (5): تغير حجم الصخر الغضاري المشبع بالماء عند الانكماش

1. مرحلة الانكماش البطيء

2. مرحلة الانكماش العادي

3. مرحلة الانكماش المتبقي

1 ، 2 ، 3 ، نماذج مختلفة للتشوه المتبقي

Wy : رطوبة حد الانكماش ، WL : رطوبة حد السيولة

من المرحلة الأولى تتبخر المياه بالأساس من المسامات الكبيرة وغالباً ما يكون إنقاص الحجم العام للصخر أقل من حجم المياه المتبخرة ، وفي المرحلة الثانية للانكماش يكون إنقاص حجم الصخر الغضاري أعظمياً ويساوي تقريباً حجم المياه المتبخرة . ومع استمرار التجفيف يتأخر تغير الحجم بدرجة لا بأس بها عن تغير حجم المياه المتبخرة ، وتبدأ مرحلة الانكماش المتبقي لا تزيد قيمته عن 2–3 % من الانكماش العام. وتجري هذه المرحلة بشكل متباين جداً عند الصخور الغضارية المختلفة البنية والتركيب الفلزي. فاللغضار الكاولينيتي يلاحظ أكبر زيادة للحجم ، الشكل/5/ ، المنحني (I) وهذا يتعلق بتناقص قيم القوى المؤثرة على العينة الصخرية

بينما للغضار الميكاوي المائي فيلاحظ تناقص قليل للحجم ، الشكل/5/ ، المنحني (III) ويلاحظ في حالة المونتموريلونيت بعد انتهاء المرحلة الوسطى للانكماش بعد الزيادة في الحجم وبعد ذلك يحدث تناقص حتى بلوغ الرطوبة القيمة صفر، الشكل/5/ ، المنحني (II) .

إن هذه الزيادة الملاحظة في الحجم (انتفاخ جاف حسب العالم سرغييف) تحدث عندما يتبقى في الصخر رطوبة هيغروسكوبية تتوزع عل سطح الحبات الصخرية ولا تستطيع أن تؤمن التغطية لسطحها . هذا ويقدر الانكماش كمياً بالمؤشرات التالية:

1- الانكماش النسبي الخطي (bL) والحجمي (bv) وه عبارة عن نسبة تقلص ارتفاع أو حجم العينة الصخرية إلى ارتفاعها أو حجمها الأوليين أي:

$$bL = L1-L2 \,/\, L1 \quad , \quad bv = v1-v2 \,/\, v1$$

L1 ، V1 : الطول والحجم الأوليين للعينة الصخرية.

L2 ، V2 : الطول والحجم لنفس العينة الصخرية بعد الانكماش.

وتقدر قيمة الانكماش النسبي الطولي والحجمي بالنسبة المئوية . يكون الانكماش الحجمي لصخر متجانس أكبر بثلاث مرات تقريباً من الانكماش الطولي.

2- ثابت الانكماش الحجمي ($\beta\upsilon$) ويبين التناقص النسبي لحجم الصخر عند تغير الرطوبة بمقدار 1% ويمكن حسابه من خلال قيمة الانكماش الحجمي والرطوبة الأولية للعينة الصخرية (w1) والرطوبة النهائية (w2) أي :

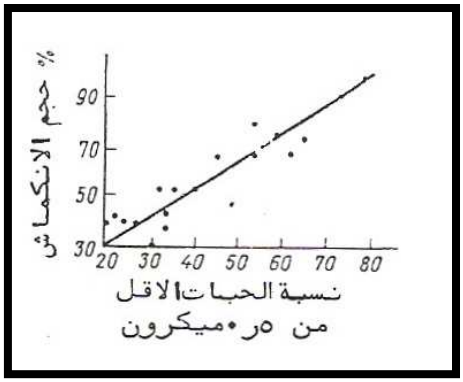
$$\beta\upsilon = b\upsilon \,/\, (w1-w2)-b\upsilon\, w1 = b\upsilon \,/\, \Delta w-b\upsilon\, w1$$

3- رطوبة الانكماش أو حد الانكماش (wy) : وهو عبارة عن مقدار الرطوبة عندما يتوقف الصخر عن الانكماش (التقلص في الحجم) مع الاستمرار في التجفيف.

هذا ويسمى حد السيولة وحد اللدونة وحد الانكماش بحدود قوام التربة أو حدود أتربرغ.

تتعلق قيمة انكماش الصخور بمجموعة من العوامل أهمها التركيب الفلزي ـ الكيميائي للصخور ، الرطوبة والمسامية ، البنية والنسيج ....الخ.

ويؤثر محتوى الحبيبات الغضارية كثيراً على قيمة الانكماش فكلما كان تبعثر الصخور الغضارية كبيراً كلما كان الانكماش أكبر عند تساوي الظروف الأخرى. الشكل/6/



الشكل (6): العلاقة بين حجم الانكماش وتبعثر الصخور

ويظهر تأثير التركيب الفلزي على الانكماش من خلال الخواص الكريستالوكيميائية لسطح الحبات الفلزية وبنيتها البلورية وأيضاً من خلال التبعثر والكثافة الأولية . وتكون قيمة الانكماش الحجمي عند نفس الظروف للغضار المونتموريلونيتي أكبر من قيمة الانكماش الحجمي للكاولينيت . كذلك فإن الفلزات ذات الشكل الابري كالهالوزيت تتميز بقابلية عالية للانكماش ، بينما تتصف الفلزات ذات الشكل الصفائحي كالميكا بانكماش ضعيف .

وتؤثر الشوارد التبادلية وتركيز الأملاح في المحلول المسامي على قيمة الانكماش وذلك من خلال تغير سماكة طبقة المياه المرتبطة والرطوبة الأولية ، وبشكل عام يزداد الانكماش في الصخور عندما تكون الشوارد التبادلية أحادية التكافؤ ويتناقص عند استبدالها بشوارد ثنائية أو ثلاثية التكافؤ.

وتتعلق قيمة انكماش الصخور الغضارية بدرجة كبيرة بالمسامية والرطوبة الأولية فكلما كانت المسامية والرطوبة الأولية كبيرة كلما كان الانكماش كبيراً وتظهر متانة الروابط البنيوية تأثيراً كبيراً على انكماش الصخور .

ويفسر تأثير الروابط البنيوية على خواص للصخور بممانعتها لتراص الصخور عند الانكماش وعندها فإن الحبات الصخرية يمكنها بحرية أن تتداخل مع بعضها البعض وتشكل بنية أكثر تماسكاً وتتعلق قيمة الانكماش أيضاً بدرجة توجه الحبات الغضارية . فالغضار ذو البنية الموجهة يملك قيمة انكماش أكبر بـ 5–10 %من الغضار ذي التوزع العشوائي لحباته.

هذا وقد تتشكل في الصخور الغضارية نتيجة عملية الانكماش الشقوق ويعود سبب تشكل هذه الشقوق إلى تطور قوى جهد تفوق متانة الروابط البنيوية بين الحبات الصخرية من جراء التوزع غير المنتظم للرطوبة والحرارة . ففي مركز الحسم تنشأ قوى ضاغطة بينما تتشكل على السطح قوى تمدد وانبساط. وعند توزع منتظم للحرارة والرطوبة لا يسبب الانكماش أي تحطيم للصخور الغضارية.

7. الخواص الشعرية :

تتجلى الخواص الشعرية للصخور في مقدرتها على نقل الماء في الاتجاهين العمودي والأفقي ضمن مسامات الصخور وفي الروابط الشعرية لهذه الصخور .

7-1- الارتفاع الشعري للمياه في الصخر : يشكل الفراغ المسامي في الصخور جملة معقدة الغاية من القنوات الشبيهة بالأنابيب الشعرية مما يؤدي إلى اكتساب هذه الصخور خواص شعرية وبالتالي ارتفاع السوائل في تلك الصخور عند حدوث التلامس بينهما ويمكن تصور ارتفاع الماء في الأنابيب الشعرية للصخر كنتيجة لتأثير القوى الشعرية الناتجة عن التوتر السطحي للماء عند الحدود الفاصلة للماء والهواء مع الحبات الصخرية والتي تفوق قوى الثقالة الأرضية.

وتوصف الخواص الشعرية في الدراسات الجيوهندسية عادةً بالارتفاع الشعري الأعظمي المقاس بالسنتيمترات أو بالأمتار وكذلك بسرعة الارتفاع الشعري والمقاسة عادةً بالسنتيمترات في الساعة. وتتأثر هاتان القيمتان بمجموعة من العوامل أهمها التركيب الحبي والفلزي – الكيميائي للصخور وخواصها البنيوية والنسيجية وتركيب المحلول المائي.

يتعلق ارتفاع وسرعة النهوض الشعري بدرجة كبيرة للغاية بالتركيب الحبي للصخور باعتباره يحدد مقاس وطبيعة المسامات بالدرجة الأولى.

فمع زيادة تبعثر الصخور يتناقص مقاس المسامات فيها وبالتوافق مع هذا يزداد ارتفاع النهوض الشعري . وكلما كانت السرعة البدائية للحركة الشعرية للمياه كبيرة كلما كان توقف الماء عن الحركة سريعاً وكان مقدار الارتفاع قليلاً والعكس صحيح وفي كل الحالات تكون سرعة الارتفاع الشعري أكبر ما يمكن في اللحظة الأولية للارتفاع. ويبلغ ارتفاع النهوض الشعري في الرمال متوسطة الحبات 0,15-0,35 م وفي الرمال صغيرة الحبات 0,35 -1 متر بينما يبلغ في

الرمل الغضاري 1–1,5 متر وفي الغضار الرملي 3–4 متر. ويمكن أن ترتفع هذه القيمة في الغضاريات إلى 8 متر وفي صخور اللوس حتى 3–4 خلال سنتين حسب معطيات كوسوفيتش.
ويؤثر التركيب الفلزي الذي يحدد حجم الحبات الصخرية وأشكالها وحالة سطوحها على الارتفاع الشعري من خلال تأثيره المباشر على المسامية وزاوية التبلل الجانبي.
ويؤثر على نهوض المياه الشعرية في الصخر الهواء الموجود في هذا الصخر فكلما كانت الكمية كبيرة في الصخر كلما كان ارتفاع النهوض الشعري قليلاً. وعندما تكون كمية الهواء المحصورة في الصخر كبيرة تتوقف المياه الشعرية عن الحركة تماماً.
ويتعلق ارتفاع النهوض الشعري للمياه في الصخور بدرجة كبيرة بتركيب الشوارد التبادلية حيث أن تأثيرها على ارتفاع النهوض الشعري في الصخور مختلفة التركيب الحبي ليس واحداً. ففي حالة الصخور متوسطة الحبات إلى الرمال مثلاً يؤدي وجود الكاتيونات أحادية التكافؤ إلى ازدياد ارتفاع المياه الشعرية أما وجود كاتيونات ثنائية أو ثلاثية التكافؤ فيؤدي إلى خفض مقدار ارتفاع الماء في المسامات الشعرية .
فالشوارد أحادية التكافؤ تؤدي إلى تفكك الحبات الصخرية أما الشوارد الثنائية والثلاثية التكافؤ فتؤدي إلى تجميع الحبيبات أما في حالة الصخور الغضارية فيحدث العكس.
ويفسر ذلك بأنه في الحالة الأولى (الصخور الرملية) توجد نسبة عالية من المسامات الكبيرة غير الشعرية التي لا تسمح بالارتفاع وتزداد نسبة هذه المسامات بازدياد نسبة الشوارد التبادلية الثنائية والثلاثية التكافؤ وعند استبدال هذه الشوارد بشوارد أحادية التكافؤ فإن ذلك يؤدي إلى تبعثر الحبات الصخرية وبالتالي تقليص أقطار المسامات غير الشعرية وتحويلها إلى مسامات شعرية.
أما في الحالة الثانية (حالة الصخور الغضارية التي تحتوي على نسبة عالية من المسامات الشعرية) فيؤدي إبدال الشوارد الثنائية والثلاثية التكافؤ بشوارد أحادية التكافؤ إلى تحويل المسامات الشعرية إلى مسامات فوق شعرية لا تحدث عبرها حركة للمياه الشعرية بسبب امتلائها بالمياه المرتبطة.
ويعتبر التطبق من أهم العوامل المؤثرة على النهوض الشعري للمياه في الصخور ويتناقص هذا النهوض مع زيادة تراص الصخور المرتبطة . فالتكثيف (الترصيص) للصخور الغضارية يمكن

أن يقود إلى منع كامل للنهوض الشعري للماء وذلك لأنه يؤدي إلى تشكيل مسامات فوق شعرية ممتلئة بالكامل بالمياه المرتبطة.

كذلك فإن وجود أملاح مختلفة في الماء يمكن أن يساعد على الزيادة الكبيرة أو الصغيرة للارتفاع الشعري . فالدراسات التي أجريت من قبل الباحث بولينوف أظهرت المياه الكلورية – الآزوتية ترتفع أكثر من المياه السولفاتية – الآزوتية عند نفس الملوحة والشروط الأخرى وأخيراً عندما تزداد درجة حرارة الصخور وبالتالي حرارة المياه الموجودة فيها فإن مقدار الارتفاع الشعري ينخفض بسبب انخفاض قيمة التوتر السطحي من جراء تناقص اللزوجة أما سرعة هذا الارتفاع فتزداد.

إن تحديد قيمة الارتفاع الشعري ذو أهمية كبيرة في الدراسات الجيولوجية الهندسية وهو يستخدم مع غيره من المؤشرات الأخرى عند تخطيط وتصميم الكثير من المنشآت الهندسية كالاوتوسترادات والسكك الحديدية والمطارات وغيرها. وأيضاً لتعيين عمق انخفاض منسوب المياه الجوفية لوقاية المنشآت من التلف وحماية الأراضي الزراعية من التملح .

7-2- ترابط الصخور بالقوى الشعرية :

تملك الصخور المتمتعة ببنية تماسكية متانة كبيرة في الحالة الجافة وتتناقص متانة هذه الصخور عند الرطوبة الشعرية . أما في حالة الصخور التي تغيب فيها البنية التماسكية بين الحبات الصخرية مثل (الرمال والطمي) فيلاحظ على العكس ظهور قوى الترابط وزيادة المتانة عند الرطوبة الشعرية.

8. المناعة المائية :

يقصد بالمناعة المائية للصخور مقدرتها على الاحتفاظ بالمتانة الميكانيكية والثبات عند تعرضها للمياه الساكنة أو الجارية . ففي الحالة الأولى (المياه الساكنة) يتجلى تأثير المياه على الصخور الهشة بالانتفاخ والتحلل وعلى الصخور الصلبة بالارتخاء ، أما في الحالة الثانية (حالة المياه الجارية) فتحدث ظواهر الحت المائي وتبعاً لذلك فإن المناعة المائية للصخور يمكن أن توصف بالتحلل أو الارتخاء أو الحت المائي .

8-1- التحلل المائي :

ويقصد به مقدرة الصخور على فقدان الترابط والتحول إلى كتلة هشة مع فقدان كامل للمتانة وذلك عند تعرضها للمياه الراكدة . وهذه الظاهرة هي نتيجة لإضعاف الروابط البنيوية بين المكونات الصخرية عند اماهتها .

وتتصف الصخور المبعثرة (الغضارية) بقدرة كبيرة على التحلل وكذلك الصخور الرسوبية المرتبطة بملاط غضاري أو بملاط قابل للانحلال بالماء.

ويحدد التحلل المائي بالمؤشرين التاليين :

1) زمن التحلل ويقصد به الزمن الذي تفقد العينة الصخرية خلاله تماسكها وبالتالي تتحلل إلى أجزاء مختلفة المقاييس والأشكال .
2) طبيعة التحلل وهي قرينة وصفية تعكس ظاهرة تحلل الصخر .

ويتعلق التحلل المائي بمجموعة من العوامل من أهمها التركيب الكيميائي – الفلزي للصخور (التركيب الفلزي للحبات الصخرية ، تركيب الشوارد التبادلية ...) الخواص البنيوية (طبيعة الروابط البنيوية ، التبعثر .....) الرطوبة ، تركيب وتركيز المحلول الذي يؤثر على الصخر.

إن القسم الأكبر من الصخور ذات الروابط البنيوية القوية يعتبر عملياً غير متحلل . وتتحلل هذه الصخور عند الإشباع الكامل بالمياه بينما على العكس من هذه الصخور تنتسب الصخور المتبعثرة إلى الصخور القابلة للتحلل ويؤثر التركيب الحبي لهذه الصخور الذي يحدد بدوره نفاذيتها على سرعة وطبيعة التحلل تأثيراً كبيراً . ويتعلق التحلل المائي أيضاً بطبيعة بنية الصخور ، فالمسامات الكبيرة لهذه الصخور ونفوذيتها السهلة يجعلانها تتمتع ببنية هشة غير متماسكة وبالتالي تتمتع بسرعة تحلل كبيرة.

بينما على العكس الصخور ذات المسامات الدقيقة والنفوذية المائية القليلة والتراص الكبير تتمتع بمناعة مائية كبيرة وبالتالي بالتحلل المائي البطيء. لذلك فإن ازدياد نسبة التشققات في الصخور يؤدي إلى سرعة تحللها بالماء أو تؤثر المادة اللاحمة الطبيعية المحتواة في هذه الصخور (كربونات ، حصى ، مواد دبالية) أيضاً على سرعة وطبيعة تحلل هذه الصخور. كذلك فإن وجود شقوق متباينة المقاسات يساعد على التحلل.

إن التأثير الكبير على تحلل الصخور المرتبطة تظهره الرطوبة الأولية التي عندها يبدأ التأثير المتبادل بين الماء والصخر. فالصخور الجافة أو الصخور التي تتمتع برطوبة منخفضة تتحلل بسرعة أكبر من الصخور المرتفعة الرطوبة.

وتتميز الصخور الغضارية بشكل عام برطوبة معينة تسمى بالرطوبة الحرجة والتي بموجبها يمكن أن نحكم على المناعة المائية للصخور فإذا كانت رطوبة الصخور أقل من الرطوبة الحرجة تكون هذه الصخور ضعيفة المناعة المائية أما الصخور التي لها رطوبة أكبر من الرطوبة الحرجة فإنها عملياً لا تتحلل. وتتعلق قيمة الرطوبة الحرجة للصخور بالتركيب الفلزي لهذه الصخور. ففي الغضار المونتموريلونيتي تبلغ قيمتها (50%) أما عند الكاولينيت فتبلغ حوالي (25%) .

كذلك تتعلق سرعة وطبيعة تحلل الصخور المترابطة بشكل جوهري بتركيب الشوارد التبادلية. ووفقاً للدراسات والأبحاث التي أجريت تبين أن عينات الغضار المشبعة بمختلف الشوارد تحللت بشكل متباين وذلك تبعاً للحالة التي تعرضت فيها للماء رطبة أم جافة . فعند إدخال العينات الرطبة في الماء يلاحظ بأن العينات المشبعة بشوارد Li^{+} ، Na^{+} تنتفخ في البداية ثم تتفكك فيما بعد إلى معلق غضاري أما العينات المشبعة بشوارد Ca و Mg فتبدو أكثر ثباتاً وتتحلل الأجزاء السطحية منها فقط.

أما العينات المشبعة بشوارد Fe^{+3} ، AL^{+3} ، Ca^{+2} ، Mg^{+2} فتحلل إلى أجزاء مختلفة المقاييس خلال 2–15 دقيقة وتنتفخ العينات المشبعة بشاردة الصوديوم في البداية ثم تتحول إلى معلق غضاري بينما تتفكك العينات المشبعة بشاردة اليوتاسيوم (K^{+}) إلى أجزاء منفصلة قبل أن تتحول إلى معلق غضاري .

وتنخفض سرعة التحلل المائي بازدياد وتركيز المياه الراشحة عبر هذه الصخور ويزداد تماسك هذه الصخور ومتانتها بسبب انخفاض الرطوبة فيها لأن المياه المسامية ذات التركيز المنخفض للأملاح تنتقل بفعل الحلول من المسامات إلى المياه الراشحة ذات التركيز العالي للأملاح.

ويتناقص تأثير الشوارد التبادلية على تحلل الصخور بوجود مواد نازعة للمياه فبزيادة قساوة المياه تتناقص قابلية الصخور للتحلل دون أي تأثير لتركيب شواردها التبادلية .

وأخيراً فإن عينات الصخور الموجودة في المياه تحت تأثير ضغط خارجي تتحلل بشكل أسرع من العينات التي لا تتعرض للضغط.

8-2- قابلية الارتخاء :

ويقصد بها نقص متانة الصخور الصلبة عند تعرضها للماء . ويتلخص جوهر ظاهرة الارتخاء في إضعاف الترابط بين حبات الصخر من جراء تسرب جزئيات الماء بين فراغاتها. إلا أنه نظراً للمتانة الأولية الكبيرة فإن الصخور لا تفقد كامل خواصها ولا تتحلل ويقدر الارتخاء بعامل الارتخاء (y_s): وهو النسبة بين متانة الانضغاط في الصخور الصلبة عند إشباعها بالماء (σs) ومتانتها في الحالة الجافة ($\sigma 0$).

$$y_s = \sigma s / \sigma 0$$

وكلما كانت قيمة عامل الارتخاء أكبر كلما كان الصخر أقل ارتخاء وبشكل عام تتراوح قيمة (y_s) بين (0) و(1) وتقسم الصخور الصلبة تبعاً لهذا العامل إلى صخور صلبة قابلة للارتخاء ($\mathbf{0.75 > y_s}$) وصخور غير قابلة للارتخاء ($\mathbf{y_s \leq 0.75}$) وتتعلق خاصة ارتخاء الصخور بتركيبها الفلزي وبمتانة الروابط بين حباتها وبالمسامية وغيرها من العوامل.

يتغير عامل الارتخاء للجزء الأكبر من الصخور النارية والمتحولة التي لم تتعرض لعمليات التجوية بين (0,95-1) وعلى العكس فالكثير من الصخور الرسوبية تنقص متانتها بدرجة كبيرة عند تعرضها للماء وبخاصة الصخور التي تحتوي على كمية كبيرة من المواد الغضارية (كالمارل والكلس الغضاري والأحجار الرملية الغضارية وغيرها) والكربوناتية (كالحجر الكلسي والحوار) والصخور السيليسية (الدياتوميت) والصخور ذات الملاط القابل للانحلال بسهولة (الأحجار الرملية ذات الملاط الجصي) فعلى سبيل المثال لا يزيد عامل الارتخاء للأحجار الرملية الغضارية عن 0,45 بينما تتراوح قيمته بالصخور الكلسية بين (0,5-0,15) هذا وتعتبر الصخور التي قيمة عامل الارتخاء لها أقل من 0,75 ضعيفة الثبات عند استخدامها بهيئة مواد طبيعية .

إن خاصة الارتخاء للصخور تعتبر مؤشراً غير مباشر لمقدرتها على مقاومة التجوية وتأثير المياه المتجمدة فكلما انخفضت قيمة عامل الارتخاء كلما ازداد تأثر الصخور بالتجوية .

8-3- الحت المائي :

وهو مقدرة المياه الجارية على انتزاع بعض الأجزاء الصخرية عند تلامسها مع الصخور وجرفها معها . ولتحديد الحت المائي يستخدم مؤشران هما :

1) السرعة الحرجة للتيار المائي وهي تمثل سرعة التيار المائي الوسطية التي يبدأ عندها جرف بعض الأجزاء المنفصلة أو التجمعات مع التيار وتقدر بـ م/ثا.
2) شدة الحت المائي وهي النسبة بين سماكة الطبقة المزالة من الصخر بفعل التيار المائي والزمن اللازم لذلك وتقدر بـ مم/دقيقة .

تصادف ظاهرة الحت المائي كثيراً في الصخور المترابطة . فهو يحدث نتيجة التأثير الديناميكي للتيار المائي على أجزاء منفصلة أو تجمعاتها وهو يسبب تخريب الروابط بين هذه الأجزاء ومن ثم جرفها مع التيار .

ويتعلق الحت المائي بمجموعة من العوامل من أهمها تبعثر الصخور ، التركيب الكيميائي-الفلزي ، المسامية ، اللدونة ، التحلل المائي ، الرطوبة ، القساوة وغيرها من العوامل .

إن ظاهرة الحت المائي هي أكثر وضوحاً في الصخور الغضارية عند إشباعها الكامل بالمياه ونظراً للانتشار الواسع لهذه الصخور في الطبيعة فإن دراسة الحت المائي لها ذات أهمية كبيرة . هذا وتوجد علاقة واضحة جداً بين خاصة الحت المائي للصخور الغضارية وقابليتها للتحلل. وفي أكثر الحالات فإن الصخور القابلة للتحلل بسرعة تتمتع بمقدرة كبيرة على الحت المائي. وتزداد مقاومة هذه الصخور للحت المائي مع زيادة محتوى الحبيبات ذات المقاييس الأقل من 0,05 و 0,001 مم وتتعلق قابلية الحت المائي بدرجة كبيرة بخواص الصخور البنائية والنسيجية وبشكل خاص تزداد مقاومة الصخور الغضارية للحت المائي للحت المائي مع تناقص مساميتها وفي التشكيلات المتطبقة فإن قابلية الحت المائي تكون باتجاه التطبق أقل بـ 1,2 – 1,5 مرة منها في الاتجاه العمودي عليه وتتعلق قابلية الحت المائي للصخور بالرطوبة الطبيعية لهذه الصخور (حتى تأثير التيار المائي عليها) فمع زيادة الرطوبة تزداد مقاومة الصخور للحت المائي. الجدول/4/

الجدول/4/: تغير السرعة الحرجة للحت المائي للغضار الكربوناتي مع تغير الرطوبة

بنية مخلعة (مخربة)		بنية غير مخربة	
الرطوبة %	**السرعة الحرجة للحت المائي م/ثا**	**الرطوبة %**	**السرعة الحرجة للحت المائي م/ثا**
6 – 3	**0.15**	–	–
12 – 11	**0.25**	**10 – 8**	**0.75**
20 – 18	**0.40**	**18 – 16**	**1.35**
25 – 23	**0.50**	**27 – 25**	**2.60**

ولقد دلت التجارب والأبحاث التي أجريت على أن زيادة رطوبة الصخر من (0) إلى (25–27 %) قد أدت إلى ارتفاع قيمة السرعة الحرجة للحت المائي بمعدل 3–3,5 مرة . وهكذا فعندما تؤثر المياه الجارية على الصخر الجاف فإنها بسرعة تتسرب أو تمتص وتسبب إضعاف حاد للروابط بين المكونات المشكلة لهذا الصخر، أما في حالة الصخر الرطب الذي يتمتع برطوبة أعلى من السعة الجزيئية العظمى فإن امتصاص الماء يحدث ببطء شديد ولا يؤدي ذلك إلى تحطيم الصخر.

إن دراسة المناعة المائية للصخور ذات أهمية كبيرة بالنسبة للكثير من الظواهر الطبيعية كتحديد الحت المائي لشواطئ البحيرات الاصطناعية والسدود والخزانات والأقنية المائية وكذلك لحساب استقرار المنحدرات وسفوح المقالع والحفر المختلفة وغيرها من المنشآت الأخرى.

****

الخواص الفيزيائية – الميكانيكية للصخور

1. مفاهيم أساسية:

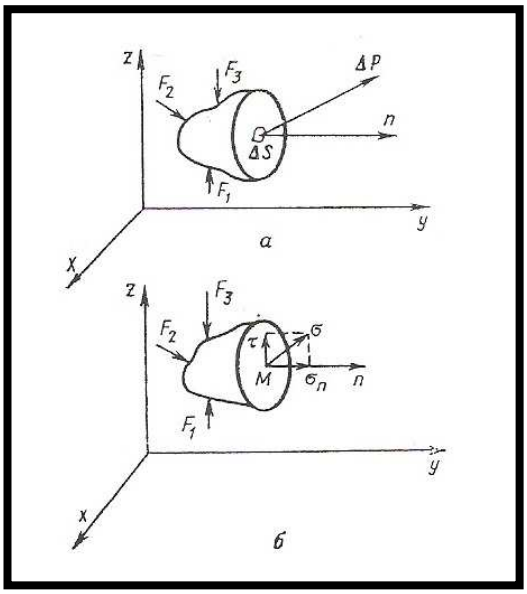
يقصد بالخواص الفيزيائية – الميكانيكية للصخور رد فعلها تجاه تأثيرات الحمولات الخارجية التي يمكن أن تكون ساكنة (لا تتغير مع الزمن أو تتغير ببطء) أو ديناميكية (تزداد وتتناقص مع الزمن بسرعات مختلفة). مثل تقلبات القشرة الأرضية عند الهزات الأرضية والانفجارات وضربات الموجات البحرية واهتزاز الصخور عند حركة المرور وغيرها.

توصف الخواص الفيزيامیكانيكية للصخور بالمؤشرات التي تعتبر ضرورية لحساب ثبات (متانة) وتشوه الصخور التي تؤلف أساس المنشآت الهندسية وتتعلق قيمة هذه المؤشرات بصفات الصخر نفسه (تركيبه، نسيجه، بنيته) من جهة وبطبيعة الحمولة الخارجية المطبقة (قيمتها، سرعة التطبق، استمرار التأثير...) من جهة أخرى.

وبشكل عام يتألف تشوه الصخور تحت تأثير زيادة الحمولة من ثلاث عمليات :

1. تشوه مرن ، 2. تشوه لدن ، 3. تشوه تمزقي.

إن تطبيق حمولة خارجية على الصخر يؤدي إلى تطور عمليات التشوه فيه وذلك من جراء اختلاط عناصره البنائية وتغيير المسافات بين هذه العناصر . وتسمى القوى الداخلية التي تنشأ في العناصر البنائية الداخلية تحت تأثير الحمولة بالاجهادات الميكانيكية. نأخذ داخل الجسم الواقع تحت تأثير مجموعة قوى خارجية (F1, F2, ... Fn) نقطة اختيارية (M)، الشكل /1/ ونأخذ حول النقطة (M) مساحة صغيرة (Δs) وضعها في الفراغ يتحدد بالعمود (n).



الشكل (1) : رسم تخطيطي يوضح الإجهاد ومركباته

إن القوى المتساوية التأثير والمؤثرة على ذلك السطح والمنتشرة فيه بشكل متجانس تساوي (Δp) وعند ذلك سيتولد في الصخر قوة معاكسة لها في الاتجاه ومساوية في الشدة تولد إجهاداً متوسطاً على السطح (Δs) قيمته $\sigma_{cp} = \Delta p / \Delta s$.

وعندما تتناهى مساحة السطح إلى النقطة (0) نحصل على الإجهاد الحقيقي (σ).

$$\sigma = \lim_{\Delta s \to 0} \Delta p / \Delta s$$

ويقدر الإجهاد بالباسكال (باسكال = 1 نيوتن/م^2).

يعتبر الإجهاد (σ) شعاعاً يمكن تحليل إلى مركبتين واحدة عمودية على السطح (σn) والأخرى (τ) تتوضع في مستوي السطح وتسمى هاتان المركبتان إجهاد عمودي وآخر مماسي.

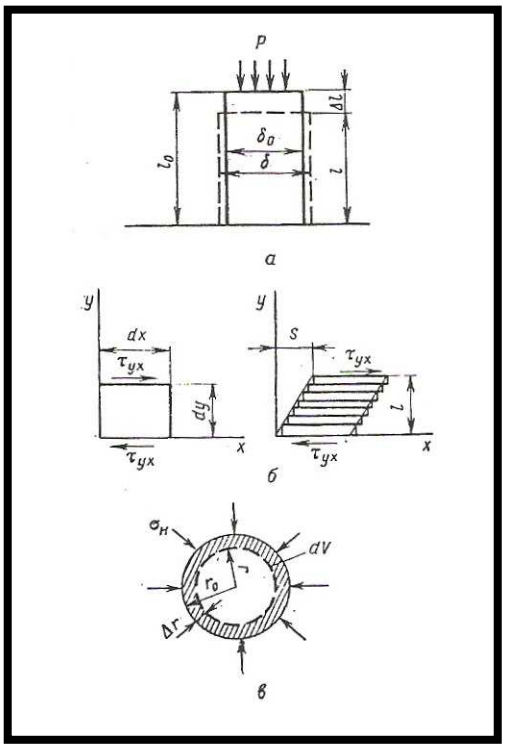
إن الاجهادات العمودية يمكن أن تكون موجبة أو سالبة وهي مسؤولة عن تغيير الحجم أي تشوه الضغط والتمدد (تشوهات خطية) أما الاجهادات المماسية فهي المسؤولة عن تغيير شكل الجسم أي تشوه القص (تشوهات زاوية). ويحدد مقدار التشوهات الخطية بنسبة زيادة الطول (ΔL) إلى الطول الأولي (L) أي : $\varepsilon = \Delta L / L$

وهي تسمى بالتشوه الطولي الخطي ، الشكل /2/ أما مقدار التشوهات الزاوية فيحدد بالتشوه النسبي لقوى المزدوجة وهو يساوي تقريباً ميل زاوية الالتواء ، الشكل /2-b/

$$y = s / L \, tg\alpha$$

وعند ضغط شامل ومتجانس (هيدروستاتيكي) فإن تغيير الحجم يعبر عنه بالتشوه الحجمي :

$$\varepsilon v = \Delta v / v = \varepsilon x + \varepsilon y + \varepsilon z$$

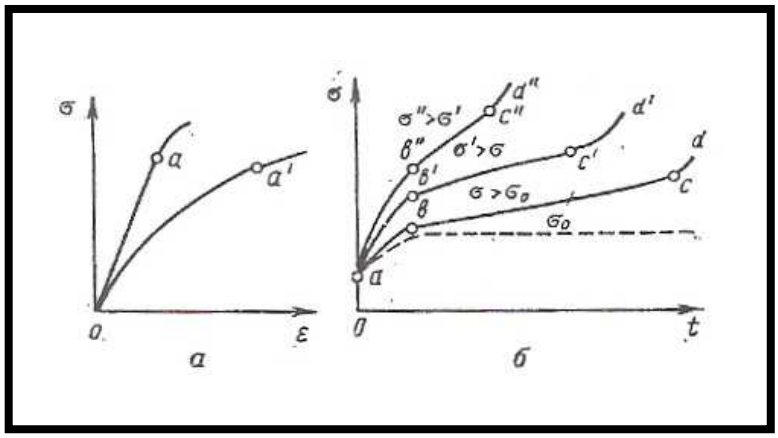


الشكل (2) : رسم تخطيطي يوضح أنواع التشوهات

وهو يساوي مجموع التشوهات الخطية بالمحاور الإحداثية الثلاثة، الشكل /b–2/ حيث أن:

Δv زيادة الحجم ، v الحجم الأولي .

إن تشوه الجسم تحت تأثير الضغط يجري دائماً مع الزمن. لهذا لتعيين الخواص الفيزيائية الميكانيكية للجسم من الضروري إيجاد العلاقة بين الاجهادات والتشوهات والزمن. وتعبر معاملات هذه العلاقة عن الخواص الفيزياميكانيكية للصخور بالمعنى الضيق. هذا ولإيجاد علاقة التشوه مع الإجهاد وزمن تأثيره تختبر العينات الصخرية إما عند إجهاد ثابت مع قياس تغير التشوه مع الزمن أو عند اجهادات مختلفة مع قياس التشوه على وقت محدد . والمنحنيات التي يتم الحصول عليها موضحة على الشكل /3/.



الشكل (3) : العلاقة بين الإجهاد (σ) والتشوه (ε) والزمن (t)

a : في المرحلة المرنة ، b : في مرحلة الزحف

وبعد ذلك يستمر بالزيادة لكن سرعة نموه تتناقص بالتدريج (الجزء aB) على الشكل /3/ ثم يجري التشوه بعد ذلك بسرعة ثابتة الجزء (BC) وفي النهاية تحدث زيادة لسرعة التشوه وتحطيم العينة الصخرية خلال فترة زمنية قصيرة . وبناءً على ذلك يمكن أن نميز على المنحني البياني أربع مراحل أساسية :

- oa تشوه سريع (مرحلة التشوه المرن).
- aB مرحلة الزحف غير المستقر.
- BC مرحلة الزحف المستقر.
- cd سيلان تصاعدي أو مرحلة الزحف الخطر.

نزيل الحمولة عن العينة في المرحلة oa ، فالتشوه بالكامل يزول ويعود حجم العينة إلى وضعه الأولي وهذا التشوه يسمى بالتشوه القابل للانعكاس (εr) أما التشوه عند إزالة الحمولة على بقية الأجزاء (المراحل) الثلاثة فلا يعتبر قابلاً للانعكاس بالكامل وهو يحتوي على جزء غير قابل للانعكاس أو جزء متبقي (تشوه لدن) وبالتالي فإن التشوه العام للعينة (ε0) يتألف من مركبتين:

$$\varepsilon 0 = \varepsilon r + \varepsilon b$$

إن الضغط المطبق على الصخر يهضم من قبل الهيكل الفلزي، الماء المسامي، والهواء الذي يملأ الفراغات والاجهادات الموافقة نرمز لها بالرمز (σ' , u_w , ua). يسمى الإجهاد في الهيكل الصخري (σ') بالإجهاد الفعال وهو دائماً ينتقل من خلال تماس الحبات الفلزية . ويمثل الإجهاد

الفعال ذلك الجزء من الإجهاد الكامل الذي يسبب تغير حجم الصخر ويحدد قيمة المقاومة للقص.

أما الإجهاد في الماء المسامي (u_w) فيسمى بالحيادي أو الضغط المسامي وهو يحدد قيمة امتصاص المياه من قبل الصخر وللصخر المشبع بالكامل تكون قيمة الإجهاد حسب (تيرزاكي 1923) :

$$\sigma = \sigma' + u_w$$

σ : الإجهاد بالكامل.

وعند عدم إشباع كامل للصخور تكون قيمة الإجهاد (بيشوب 1955):

$$\sigma = \sigma' + / u_a - x(u_a - u_w) /$$

حيث x عامل يساوي (1) عند إشباع كامل للصخر بالماء ويساوي (0) عند إشباع الصخر بالكامل بالغاز.

وهكذا فإن الإجهاد الكامل يساوي دائماً مجموع الضغط الفعال والضغط المسامي، إن الإجهاد الفعال في أية نقطة من الصخر المشبع بالماء يساوي الفرق بين الاجهادين الكامل والمسامي (الحيادي) أي : $\sigma' = \sigma - u_w$

هذا ويتحدد تشوه الصخور تحت تأثير الضغوط بتغيير البنية والنسيج لهذه الصخور وبتشوه مكوناتها الأساسية. ويتضمن تغير بنية ونسيج الصخور تحت تأثير الضغوط إنقاص المسامية نتيجة إغلاق المسامات ورص الشقوق وأيضاً تخريب الروابط البنيوية .

وللتنبؤ بمتانة وتشوه الصخور من الضروري معرفة الشروط الفيزيائية المحددة لسلوك هذه الصخور تحت تأثير الضغوط وتقسم الخواص الفيزيائية – الميكانيكية للصخور إلى خواص التشوه وخواص السيولة .

2. خواص التشوه :

تصف خواص التشوه للصخور سلوكها عند تطبيق قوى خارجية لا تؤدي إلى تحطيم هذه الصخور. وتتعين خواص التشوه للصخور غالباً عند تطبيق قوى خارجية ستاتيكية ولكن عند أعمال البناء المضادة للهزات الأرضية من الضروري معرفة سلوك الصخور عند التأثيرات الميكانيكية. إن خواص التشوه للصخور ضرورية للتنبؤ بتغيير حجومها وهي تقاس بعامل

المرونة (التشوه) وعامل بواسون ومعاملي القص والتشوه الحجمي، هذا وتوصف العلاقة بين الإجهاد والتشوه بالقانون الخطي للمرونة (قانون هوك) الذي يعبر عنه بالعلاقة التالية في حالة ضغط أحادي المحور : $\sigma = E\varepsilon$ حيث أن :

σ: الإجهاد بالباسكال.

E: معامل المرونة (معامل هوك) بالباسكال وهو عامل التناسب بين الإجهاد الناظمي المؤثر (ضغط أو شد) وبين التشوه الطولي النسبي المرن (ε) الموافق لهذا الإجهاد .

ε: التشوه الخطي النسبي. ويعبر عن قانون هوك في حالة تأثير الاجهادات المماسية (τ) بالعلاقة التالية :

$$\tau = Gy$$

G: معامل الانزياح (القص) ، y: التشوه الزاوي النسبي.

وعند تأثير ضغط شامل متجانس (p_0) يأخذ قانون هوك الشكل التالي :

$$p_0 = -k\,\varepsilon v$$

أو

$$-\varepsilon v = \beta v\, p_0$$

k: معامل الضغط الحجمي ويقدر بالباسكال ويعبر عن العلاقة التناسبية بين الضغط والتغيير النسبي لحجم الصخر.

βv: عامل الانضغاط الحجمي (يصف قابلية الانضغاط) وهو عبارة عن قيمة عكسية لـ k وبالتالي يقدر بـ 1 / باسكال .

εv: التشوه الحجمي النسبي.

إن إشارة (−) في المعادلة السابقة توضع للدلالة على أنه عند زيادة الضغط فإن حجم الجسم يتناقص ، وعند تعرض العينة الصخرية لضغط أحادي المحور في حدود التشوهات المرنة تحدث تغيرات في المقاسات الطولية والعرضية . وترتبط التشوهات النسبية الطولية (ε_L) والعرضية (εb) فيما بينها بالعلاقة التالية :

$$\varepsilon_b = -\mu\, \varepsilon_L$$

μ: عامل التمدد الجانبي أو عامل بواسون.

وتدل إشارة الناقص في هذه المعادلة على أنه عند تناقص حجم العينة الصخرية في الاتجاه الطولي تحدث زيادة في حجم العينة بالاتجاه العرضي.

وللتنبؤ بتشوه تغير حجم الصخر يجب معرفة معاملين هما معامل التشوه (E) وعامل بواسون (μ) أو معامل الإزاحة (G) ومعامل الضغط الحجمي K .

وترتبط مؤشرات خواص التشوه للأجسام عند صحة قانون هوك فيما بينها بالعلاقات التالية:

$$K = E / 3(1-2\mu) = EG / 3(3G-E)$$

$$G = E / 2(1+\mu) = gK - E / 3KE$$

$$E = gK\ G / 3K + G = 3K(1-2\mu)$$

$$\mu = (E / 2G) - 1 = (3K - E) / 6K$$

وهذه العلاقات تسمح باستخدام أي معاملين لتحديد المعاملات الأخرى .

وتبعاً لاستمرارية تأثير الضغط على الصخر نميز بين معامل المرونة الديناميكي Ed ومعامل المرونة الستاتيكي Ey ومعامل التشوه العام E_0 ومعامل المرونة Ey يساوي نسبة الإجهاد عند ضغط أحادي المحور إلى التشوه العكسي النسبي εr أي :

$$Ey = \sigma / \varepsilon r$$

σ : الاجهاد الذي لا يزيد عن حد المرونة أما معامل التشوه E_0 فيساوي نسبة الاجهاد عند ضغط أحادي المحور الى التشوه العام النسبي $E_0 = \sigma / \varepsilon 0$ ومن الواضح أن $E_0<Ey$ إذ أن $\varepsilon r<\varepsilon 0$ ، وهكذا توجد بين قيم المؤشرات التي تصف خواص التشوه للصخور العلاقة التالية :

$$Ed > Ey > E0$$

ولحساب تشوه الصخر المعرض لتأثير القوى الخارجية تستخدم تلك القيم لمؤشرات خواص التشوه التي تعكس بدرجة كبيرة طبيعة القوى الخارجية المؤثرة فمثلاً لحساب انخفاض المنشأة عند تأثير حمولة ستاتيكية تستخدم قيمة معامل التشوه العام ، بينما لحساب التشوه من التأثير السريع الناشئ عن الحمولة الديناميكية يستخدم معامل المرونة ويتم عادةً تحديد قابلية الانضغاط بطريقة اختبار عينة صخرية في شروط الاجهادات الضاغطة وحيدة المحور دون أن تتمكن الصخور من التمدد الجانبي ففي هذه الحالة التشوه الحجمي يساوي التشوه العمودي النسبي أي أن:

$$\varepsilon v = \varepsilon z$$

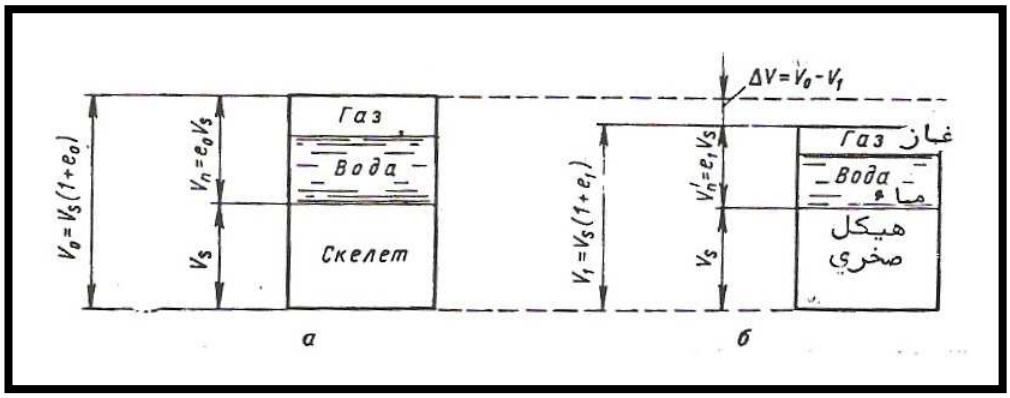
أو

$$\Delta v/v = \Delta h/h$$

v,h: الارتفاع والحجم الأوليين للعينة الصخرية .

Δv,Δh: تغير ارتفاع وحجم العينة الصخرية .

نعتبر بأن انضغاط الصخر يتعين فقط بتغير حجم مساماته بينما حجم الهيكل يبقى ثابتاً ، الشكل/4/ .

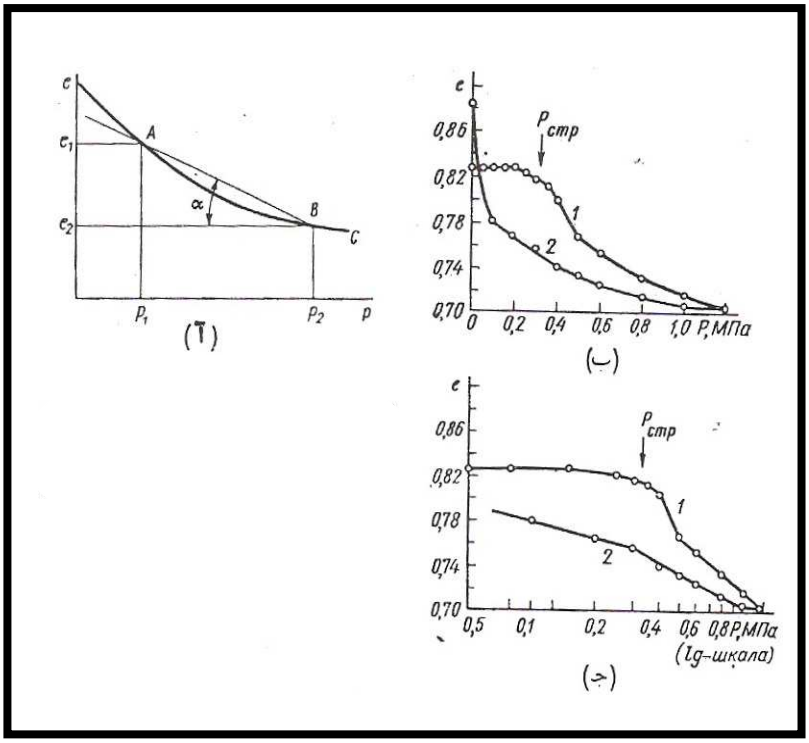


الشكل (4) : تغير حجم الصخر المسامي عند الانضغاط

a : الحالة الابتدائية ، b : بعد الانضغاط

Vn : حجم المسامات ، Vs : حجم الهيكل الصخري ، e : عامل المسامية

وبمعرفة عاملي المسامية للصخر عند الضغوط الموافقة يمكن رسم منحني الانضغاط ، الشكل /5/ ، يوضح العلاقة بين الضغط والمسامية وهو بمثابة وصف عام لقابلية الصخور الغضارية للانضغاط. إذا أزيلت الحمولة فإن العينة الصخرية الغضارية في جهاز الكبس (الضغط) سوف تزداد في الحجم والمنحني الموافق يسمى بمنحني الانتفاخ. وبعد إزالة الحمولة يظهر عامل المسامية للصخر غير متساوٍ مع المنحني الأولي مما يدل على تغيرات غير عكسية لبنية الصخر.



الشكل (5) : منحنيات الانضغاط للصخر الغضاري

إن منحني الانضغاط في الإحداثيات (e – p) عند مجال غير كبير للضغط (Mpa 0.3 – 0.1) يمكن أن يستبدل بالمستقيم AB ، الشكل /5 – آ/ الذي معادلته مع العامل الزاوي (α) ستأخذ الشكل التالي:

$$ei = e0 - \alpha pi$$

حيث (α) عامل الانضغاط وهو يساوي نسبة تغير معامل المسامية (e1–e2) إلى قيمة الضغط الفعال (p=p2–p1)

$$a = tg\alpha = \Delta e/\Delta p$$

وبنفس الطريقة عند إزالة الحمولة أو الضغط نحصل على العلاقة التالية :

$$e'i = e'_0 - \alpha' pi$$

حيث (α′) تمثل معامل الانتفاخ.

يتألف منحني الانضغاط للصخور الغضارية ذات البنية الطبيعية السليمة (غير المضطربة) من جزئين : الأول عندما يكون الضغط المطبق أقل من متانة الروابط البنيوية (P_{CTP}) والثاني عندما تكون قيمة الضغط المطبق تزيد عن(P_{CTP}) ، الشكل /5 – ب ، جـ/ ، على الجزء الأول

منحني الانضغاط يسير عملياً بشكل موازي لمحور الضغط مما يدل على عدم رص كبير للصخر (أي تغيرات صغيرة جداً في معامل المسامية). أما على الجزء الثاني فيسير منحني الانضغاط بشكل منحني مما يدل على تغيرات كبيرة في معامل المسامية ، الأمر الذي يدل على تراص الصخر تحت تأثير الحمولة التي تزيد قيمتها عن قيمة متانة الروابط البنيوية للصخر ، هذا وتتعين قيمة (P_{CTP}) برسم منحني الانضغاط بالإحداثيات (e – Lg p) ، الشكل /5 – جـ/ وعندما تكون $P>P_{CTP}$ تأخذ معادلة منحني الانضغاط الشكل التالي:

$$ei = e0 - ak\ Lg\ (pi/\ P_{CTP})$$

حيث ak هي عامل الانكباس وهو قيمة مجردة بدون وحدة قياس وهكذا فإن قابلية الانضغاط في الصخور الغضارية يمكن أن توصف بمؤشرين : قيمة متانة الروابط البنيوية عند الضغط (P_{CTP}) وعامل الانضغاط (a) أو عامل الانكباس (ak) ويرتبط عامل الانضغاط بمعامل التشوه العام للصخر عند ضغط أحادي المحور بالعلاقة التالية :

$$E0 = (\ (1+e0)/a\ )\ \beta = E_{0K}{}^{\beta}$$

β:عامل متعلق بالتمدد العرضي للصخر وهو يساوي للرمل 0,8 وللرمل الطيني 0,7 وللطين الرملي 0,5 وللغضار 0,4 .

E_{0K} : معامل التشوه الانضغاطي العام .

إن الخواص البنيوية والنسيجية للصخور تحدد خواص التشوه عند الضغوط التي تصادف في الأعمال التطبيقية الإنشائية وتتحدد هذه الخواص بأبعاد العناصر البنيوية (الحبات ، الذرات ، التجمعات ، الكتل الفلزية والصخرية) ، المسامية ، التشقق ، متانة الروابط البنيوية ، التوضع المتبادل للعناصر البنيوية . ويختلف تأثير كل عامل من هذه العوامل حسب طبيعة الصخور الموجودة : صلبة ، ضعيفة التماسك (الغضارية) والصخور المفككة غير المتماسكة.

2-1- تشوه الصخور الصلبة :

يعتبر تشقق الصخور الصلبة العامل الأساسي المحدد لتشوهها ومتانتها . فمع زيادة تشقق الصخور تتناقص مؤشرات التشوه بشكل حاد ، غير أن قيم معامل التشوه تتناقص بسرعة أكبر

من قيم معامل المرونة لأن سطوح التشقق تحوي الكثير من النتوءات التي تتحطم بتأثير الحمولة المطبقة فترتفع قيمة التشوهات اللدنة في الصخر .

ولقد أثبتت التجارب والأبحاث أن تشوه الصخور الصلبة المشققة يتناسب بشكل مباشر مع الحمولة المؤثرة وعرض الشقوق وعكساً مع مساحة سطوح التماس الصلبة ومعامل التشوه لفلزات هذه الصخور. فمع زيادة مساحة سطوح التماس تقترب قابلية التشوه للصخور من قابلية التشوه لمكوناتها الفلزية ، وعند قيمة نسبية لمساحة سطوح التماس أقل من 2% يخفض وجود الشقوق معامل التشوه لكتلة الصخر قليلاً. إن وجود شبكة شقوق محددة يحول الصخر المتساوي الخواص إلى صخر متباين الخواص ، تتعلق خواص التشوه له بالزاوية بين اتجاه تطبيق الضغط واتجاه شبكة الشقوق. ويتناقص معامل التشوه للصخور مع زيادة عدد أنظمة التشقق وبنفس الوقت تتناقص درجة عدم التجانس التي توصف بالقيمة $\sqrt{Emax/Emin}$ ، وعندما يكون عدد شبكات الشقوق كبيراً تتحدد خواص التشوه للصخور ليس بالتشقق وحده ولكن بغيره من البارامترات البنيوية وخصوصاً المسامية. فالمسامية ستؤثر على خواص التشوه والتجانس للعينات الصخرية الصلبة غير المشققة.

إن معامل المرونة للصخور المتقاربة بتركيبها الفلزي يتناقص مع زيادة المسامية التي تصبح العامل الوحيد الذي يحدد مرونة الصخور عندما تزيد قيمتها على 10–12% وتتغير قيم معامل التشوه حسب الاتجاه وبخاصة في الصخور الرسوبية والمتحولة. وتكون قيمته في الاتجاه الموازي للتطبق أكبر دائماً بحوالي 1,2–1,5 مرة منه في حالة الاتجاه العمودي على التطبق ويعلل ذلك بأنه في الحالة الأولى يتحدد تشوه الصخور بالطبقات الأكثر قساوة بينما يتحدد التشوه في حالة الإجهاد العمودي بالطبقات الأكثر هشاشة (الرخوة) وأيضاً برص الشقوق الأولية المنتشرة بشكل موازي للطبقات ونظراً لكون قيمة معامل التشوه للصخور الصلبة تتعلق بشكل أساس برص وإغلاق الشقوق فإننا نلاحظ بشكل واضح علاقة E0 بقيمة الضغط المؤثر: فكلما كانت قيمة الضغط أكبر كلما ازدادت قيمة معامل التشوه . ومع زيادة الضغط تقترب قيمة معامل التشوه للصخور الصلبة المشققة من قيمة معامل التشوه للفلزات المشكلة لهذه الصخور كذلك تتعلق قيمة معامل التشوه بحجم الصخور التي تخضع للاختبار فكلما كان الحجم كبيراً كلما كانت قيمة معامل التشوه أقل.

وأخيراً فإن درجات الحرارة الموجبة يغير خواص التشوه للصخور الصلبة نتيجة تغير الحجم وظهور التشققات. غير أن التشوه الحراري سيكون قليلاً بالمقارنة مع التشوه الناتج عن الضغط.

2-2- تشوه الصخور الضعيفة التماسك (الصخور المفككة والصخور الغضارية) :

تمتاز الصخور الضعيفة التماسك بقابليتها للانضغاط عندما تتعرض لحمولات خارجية. وتعتبر هذه الخاصة من أهم خواص التشوه لهذه الصخور ويحدث الانضغاط نتيجة تقلص حجم المسامات الصخرية وخروج الماء والهواء منها. لذلك فإن الانضغاط يرتبط بشكل مباشر بانخفاض المسامية ويتم عادةً تحديد قابلية الانضغاط كما ذكرنا أعلاه في شروط الاجهادات الضاغطة وحيدة المحور دون أن تتمكن الصخور من التمدد الجانبي.

وتوصف قابلية الانضغاط باستخدام قرائن عديدة من أهمها معامل الانضغاط (a). وتقسم الصخور حسب قيمة (a) ووفقاً لتسيتوفيتش (1973) إلى الأنواع التالية:

1) صخور شديدة الانضغاط : عندما تكون قيمة $a > 0.1$ سم^2/كغ .

2) صخور متوسطة الانضغاط : إذا كانت القيمة تتراوح بين 0,1 و0,005 سم^2/كغ .

3) صخور قليلة الانضغاط : تكون القيمة أصغر من 0,005 سم^2/كغ .

2-2-1- تشوه الصخور المفككة:

تتعلق قابلية الانضغاط للصخور المفككة بحركة الحبات الصخرية وتشوهها وبشكل خاص بتحطيم هذه الحبات وتفتيتها.

ففي الصخور الحطامية تتعلق قابلية الانضغاط بنسبة الحبات الكبيرة والصغيرة وبطبيعة الحبات الناعمة الموجودة بين الحبات الصخرية. فأكثر الصخور قابلية للانضغاط ذات الحبات الغضارية وأقلها الصخور ذات الحبات الرملية. وإذا غابت المادة الناعمة الموجودة بين الحبات الصخرية فإن الصخر ذي الحبات الكبيرة يتشوه بشدة أكثر من الصخر المؤلف من حبات صغيرة وذلك لأن كمية سطوح التماس في الصخر المؤلف من حبات كبيرة في واحدة الحجم أكثر من كميتها في الصخر ذي الحبات الصغيرة.

كذلك فإن قيمة الضغط على سطح التماس في الصخر ذي الحبات الكبيرة يمكن أن يسبب تحطيم الحبات وبالتالي التشوه الكبير بالمقارنة مع الصخر الحطامي ذي الحبات الصغيرة كذلك

يظهر شكل الحبات وطبيعتها سطوحها تأثيراً كبيراً على قابلية الانضغاط للصخور الحطامية والرملية .

فالصخور التي حباتها مدورة أقل تشوهاً من الصخور ذات الحبات الزاوية والحبات ذات السطح الحرشفي.

وتتعلق قابلية الانضغاط أيضاً بالكثافة فكلما كانت الكثافة أكبر كلما كانت قابلية الانضغاط أقل. وأكثر ما يظهر دور الكثافة في قابلية الانضغاط هو في الرمال ذات الحبات الصغيرة . لهذا عند بناء المنشآت الهندسية من الصخور المفككة يجري رصها في جسم المنشآت بكثافة كبيرة مما يؤمن تشوه أقل ومتانة أكبر للمنشأة الهندسية .

ويؤثر التركيب الفلزي للرمال والصخور الحطامية على قابليتها للانضغاط وذلك من خلال شكل الحبات وطبيعة سطحها ومتانتها. إن وجود كمية كبيرة من حبات الميكا في الرمال يزيد من قابليتها للانضغاط ومن مرونتها .

كذلك فإن وجود الفلزات غير الثابتة في الرمال كالغلوكونيت والجص والكالسيت يزيد من قابليتها للانضغاط بسبب تحطيم الحبات تحت تأثير الضغط. أما وجود فلزات غضارية ومواد عضوية في الرمال وكذلك أكاسيد الحديد المائية التي تغطي عادةً سطح الحبات فيزيد ليس فقط قابلية الصخور للانضغاط ولكن استمرارية تشوهها تحت تأثير الحمولة. إن أقل قابلية للانضغاط تتمتع بها الرمال والصخور الحطامية المؤلفة من حبات لفلزات ثابتة مثل الكوارتز.

هذا وتزداد قابلية الانضغاط في الصخور المفككة بازدياد الرطوبة لأن الماء يسهل انزلاق الحبات بالنسبة لبعضها البعض ويظهر ذلك جلياً في الصخور الرملية في المناطق الجافة عندما تتعرض للترطيب.

2-2-2- تشوه الصخور الغضارية :

إن من أهم الخواص الميكانيكية للصخور الغضارية هي قابليتها للانضغاط. ويحصل الانضغاط نتيجة تقلص حجم المسامات وخروج الماء والهواء من المسامات الصخرية وتقود قابلية الانضغاط إلى إنقاص حجم الصخور وهي تعتبر وسيلة لاختصار قيمة المسامية العامة للصخور . هذا وتتمتع الصخور الغضارية بشكل عام بقابلية كبيرة للانضغاط.

إن تغيير الحجم تحت تأثير الحمولة الخارجية يتم ببطء عند الصخور الغضارية فالمسامية والرطوبة لهذه الصخور يمكن أن تتناقص مع الزمن عند هذه الحمولة أو تلك . والمنحني الذي يظهر تغير عامل المسامية للصخر مع الزمن في حالة عدم تغير الحمولة يسمى بمنحني التراص.

وتتأثر قابلية الانضغاط في الصخور الغضارية بمجموعة من العوامل من أهمها التركيب الفلزي والحبي للصخور ، الكثافة ، الشوارد التبادلية ، الضغط الحرارة وغيرها من العوامل. ويظهر تأثير التركيب الفلزي على قابلية الانضغاط للصخور الغضارية من خلال مقاس الحبات وقابليتها للانحلال بالماء والتي تحدد قيمة المسامية والمجال المحتمل لتغيرها تحت الضغط .

فالحبات الأقل حجماً والأكثر انحلالية يتمتع بها المونتموريلونيت والمواد الغروية العضوية . لهذا فإن وجود هذه المواد في الصخر يسبب مسامية كبيرة وإمكانية لا بأس بها للتراص عند تأثير حمولة خارجية .

إن المعيار الكمي لتغير المسامية والانحلالية بالماء للصخور الغضارية تحت تأثير الضغط يوضح بهشاشة بنيتها ووجود طبقات رقيقة مائية ضعيفة الارتباط على سطوح تماس الحبات الصخرية تظهر مقاومة قليلة للضغط أكثر من الصخور الصلبة ذات سطوح التماس القاسية بين الحبات الصخرية في الصخور القليلة الانحلال بالماء . وبمقدار الرص يحدث التصاق العناصر البنيوية وزيادة عدد سطوح التماس بين الحبات في واحدة الحجم وتغير طبيعة الصخور نتيجة عصر المياه المرتبطة مما يؤدي إلى نمو المقاومة للضغط. وتتقارب قابلية الانضغاط للصخور الغضارية مختلفة التركيب الفلزي عند ضغوط كبيرة ولكن لا تتلاشى المتانة حتى عند ضغوط تفوق 100 ميكا باسكال.

ويتحدد تأثير تركيب الشوارد التبادلية وكذلك تركيز وتركيب المحلول المسامي على قابلية الانضغاط للغضار من خلال تأثيرها على قابلية الانحلال والمسامية الأولية. فوجود شوارد الليثيوم أو الصوديوم في الغضاريات يزيد بشكل كبير قابليتها للانحلال ومساميتها ، أما شوارد الكالسيت أو الألمنيوم أو الثوريوم فتخفض قابلية الانحلال بالماء وتساعد على تجميع الحبات الصخرية وبالتالي تنقص المسامية الأولية ، هذا ويظهر تأثير الشوارد التبادلية في الصخور العالية التبعثر وذات القابلية الكبيرة للانحلال بالماء بدرجة عالية كالمونتموريلونيت وفي

الغضاريات ذات المحتوى العضوي الغروي الكبير أما في الصخور الأقل تبعثرا كالكاولينيت فإن تأثيرا الشوارد التبادلية يبدو ضعيفاً ويزداد تراص الصخور الغضارية بزيادة الضغط الخارجي المطبق عليها.

هذا وإن تمدد الصخر الغضاري عند إزالة الحمولة الخارجية عنه يتعلق بالأساس بقوى المرونة للتركيب الفلزي للهيكل الصخري وبالمياه والغاز للصخور غير المشبعة بالكامل. هذا وإن التكرار الكبير لتطبيق الحمولة وإزالتها يساعد بشكل أكثر فعالية على تراص الصخور الغضارية وعند هذا تتناقص التشوهات المتبقية ويمكن أن يكتسب تشوه الصخر صفة المرونة بالكامل. وتلاحظ مثل هذه الظواهر في الصخور المؤلفة للجسور والطرق وأساس الصوامع والمستودعات وغيرها.

كذلك فإن تغير درجة حرارة الصخر يمكن أن يسبب إنقاصاً في الحجم أو زيادة فيه وبالنتيجة النهائية يشابه تأثير الحمولة الإضافية أو نزعها . ويلاحظ التناقص الكبير في حجم الصخور الغضارية عند الانكماش (التقلص) الحراري الذي يلاحظ غالباً في أساس المنشآت التي تعتبر منبعاً دائماً للطاقة (كالأفران والمراجل وغيرها). وعند الانكماش بفعل الحرارة يحدث إنقاص رطوبة ومسامية الصخر الغضاري . وكقاعدة عامة يكون الانكماش الحراري للصخر الغضاري غير متجانس مما يسبب انحناء المنشآت الهندسية.

2-3- عامل بواسون:

يعتبر عامل بواسون مؤشراً لمقدرة الصخور على تغيير مقاييسها عند حدوث التشوهات فيها. فإذا عرضت عينة ذات شكل اسطواني أو موشوري لقوى شد ، أو ضغط فإن الانفعال المحوري (الموازي للإجهاد) سيترافق بانفعال جانبي عمود عليه. فإذا كان الإجهاد المحوري شاداً فإن الانفعال الجانبي سيكون تقلصاً ، أما إذا كان الإجهاد المحوري ضاغطاً فإن الانفعال الجانبي سيكون تمدداً ، هذا ويساوي عامل بواسون :

μ = الانفعال الجانبي / الانفعال المحوري

وينسب عامل بواسون المستخدم في الحسابات إلى التشوه المرن عادةً. يتأثر عامل بواسون بعوامل عديدة من أهمها : التركيب الفلزي والمسامية والتشققات والرطوبة وغيرها.

يتغير عامل بواسون (μ) للفلزات الرئيسة المشكلة للصخور ضمن حدود ليست كبيرة من (0,08 وحتى 0,34) ويمكن تمييز ثلاث مجموعات من الفلزات حسب قيم (μ):

1. مجموعة الفلزات ذات القيم المنخفضة لعامل بواسون (0,08 – 0,16) مثل: الكوارتز، الهيماتيت، البيريت.
2. مجموعة الفلزات التي تتراوح قيمة (μ) فيها بين (0,21 – 0,29) مثل الصفاح البوتاسي، الميكا وغيرها من السيليكات.
3. مجموعة الفلزات ذات القيم المرتفعة (μ) فيها بين (0,33 – 0,34) وهي تضم مجموعة غير كبيرة من الفلزات وأهمها السربنتين ، الجص ، الزركون.

ويتعلق عامل بواسون للبلورات بنمط الشبكة البلورية واتجاه تأثير الإجهاد بالنسبة لمحاور الشبكة البلورية . بينما يتعلق عامل بواسون للصخور بالتركيب الفلزي وبالمسامية والتشقق . ولكنه يجب التأكيد بأن المرو يتميز بأقل قيمة لعامل بواسون (0,08) بالمقارنة مع بقية الفلزات وهذا يعود إلى البنية الهيكلية للشبكة البلورية لذا فإن وجود هذا الفلز في الصخور بنسب مرتفعة يقود إلى إنقاص قيمة (μ) ففي الصخور الكوارتزية (الكوارتزيت ، الأحجار الرملية الكوارتزية) تتغير قيمة (μ) في حدود (0,09 – 0,14) أما في الصخور الحاوية على الكوارتز كالغرانيت فتتغير قيمة (μ) في حدود (0,18–0,24) ويتغير عامل بواسون في الصخور الصلبة ضمن مجال ضيق من 0,1 وحتى 0,3 ويتناقص تبعاً لزيادة المسامية. فمثلاً تتغير قيمة عامل بواسون للحجر الكلسي شبه الرخامي ذي المسامية المنخفضة بحدود (0,30 –0,32) بينما تبلغ قيمته في الحجر الكلسي متوسط المسامية (0,23 –0,27) وفي الحجر الكلسي القوقعي ذي المسامية العالية تبلغ قيمته (0,17 –0,23) وكذلك تتناقص قيمته بازدياد نسبة التشققات في الصخور حيث تعمل الشقوق عمل المسام في خفض قيمة (μ). وتزداد قيمة (μ) بازدياد الرطوبة فللرمل الجاف تبلغ قيمة (μ) (0,17 – 0,25) ، أما الصخور الرملية المشبعة بالماء فتبلغ قيمة (0,44–0,49) وأخيراً تتغير قيمة (μ) للصخور الغضارية من 0,1 وحتى 0,45 وفقاً لدرجة الكثافة (الصلبة).

3. خواص المتانة :

تعرف متانة الصخور بمقدرتها على مقاومة تأثير الاجهادات الخارجية بدون الانهيار الكامل وتظهر خواص المتانة في الصخور بأشكال مختلفة وذلك وفقاً لتطبيق ولتوزيع القوى المؤثرة.

ولكن في جميع الحالات يتم فقدان المتانة بسبب القص أو التمزق. ويحدث القص عند تأثير اجهادات مماسية ذات قيمة محددة وعند القص فإن أحد أجزاء الصخر يتحرك بالنسبة للآخر. أما التمزق فيحصل نتيجة تأثير اجهادات ناظمية ذات قيمة معينة ويتجلى التمزق من خلال ظهور الشقوق وفصل أحد أجزاء الصخر عن الجزء الآخر باتجاه عمودي على محور التشقق.

3-1- مقاومة الصخور للقص :

إن الاجهادات المماسية التي تنشأ في الصخور تحت تأثير الضغط الخارجي تتغلب على الروابط البنيوية بين الحبات الصخرية وتسبب حركتها بالنسبة لبعضها البعض. وهكذا تتشكل منطقة القص ويحدث انهياراً للصخر وتعتبر مؤشرات مقاومة الصخور للقص هي مؤشرات المتانة الأساسية لمقاومة الصخور للقوى الخارجية. ويملك التعيين الصحيح لمؤشرات المقاومة للقص عند الصخور أهمية تطبيقية كبيرة. ففيه تتعلق دقة وأمانة الحسابات الهندسية الخاصة مثل:

1. تقييم وحساب قدرة تحمل الصخور.
2. تقييم توازن واستقرار المنحدرات الطبيعية وحواف الردميات والحفريات.
3. حساب ضغط الصخور على الحواجز.
4. تصميم السدود الترابية وقواعدها وغير ذلك.

فإذا أخذنا M (مساحة متناهية في الصغر) تحت الأساس الذي ينقل إلى الصخر ضغطاً معيناً نجد أنه يؤثر فيها اجهادان مماسي (τ) وناظمي (σn) يحاول الأول زلق الصخور بينما يحاول الثاني رص هذه الصخور وتتوقف المتانة في هذه المساحة الصغيرة على مقاومة الصخور للاجهادات المماسية في هذه المساحة أي بمعنى آخر تحمل القاعدة يتوقف على مقاومتها للقص وهكذا نستطيع أن نستنتج أن مقاومة الصخور للقص هي المحدد الأساسي لمتانتها وقدرة تحملها وتوازنها.

ويتم تعيين بارامترات متانة الصخور بطرائق مختلفة وأكثر هذه الطرائق انتشارا هي :

1. القص المباشر المستوي.
2. الضغط أحادي المحور أو ثلاثي المحاور.

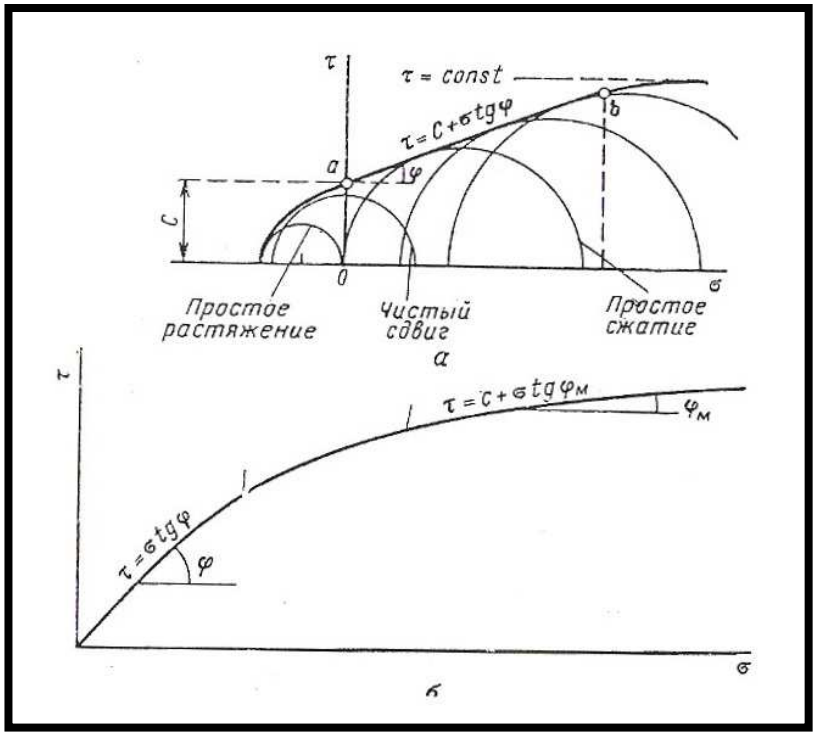
وتستخدم طرائق القص المباشر في أكثر مخابر ميكانيك التربة وذلك لبساطتها وللسرعة في للحصول على النتائج فيها. ويتم اختبار الصخور بالقص المباشر بواسطة علبة القص التي

تتألف من جزئين علوي وسفلي وكل جزء هو عبارة عن حلقة معدنية مربعة أو دائرية الشكل وتختلف مساحة مقطع هذه العلبة (مساحة مقطع العينة) حسب نوعية الصخور.

توضع العينة الصخرية في العلبة وتطبق عليها قوى شاقولية Fn بقيمة ثابتة تحدد الإجهاد الناظمي σn :

$$\sigma n = F_h / A$$

A: مساحة المقطع العرضي للعينة. ثم تطبق قيم الضغط الأفقي F_h على القسم العلوي من العلبة متزايدة بالتدريج من الصفر وحتى يحصل القص على طول السطح الأفقي القاسم للعلبة وتحسب المتانة τ بالعلاقة $\tau = F_h/A$ ، وتكرار التجربة عدة مرات (ثلاث مرات على الأقل) على عينات متماثلة مع تغير قيم الإجهاد الناظمي **σn** كل مرة وتستخدم نتائج التجربة لرسم المنحني البياني للقص الذي يمثل العلاقة بين الاجهادات المماسية والعمودية في لحظة الاقتطاع للصخر. الشكل /6/.



الشكل (6) : علاقة مقاومة القص مع الضغط الشاقولي

a : حالة صخر مترابط ، b : حالة صخر مفكك

ويمثل هذا المنحني في حالة الصخور المفككة مستقيم مائل مار من مبدأ الإحداثيات أما في حالة الصخور المترابطة الغضارية والصلبة فيقطع هذا المنحني محور العينات على مساحة معينة من مبدأ الإحداثيات. وتأخذ معادلة هذا المنحني (معادلة كولومب) الشكل التالي للحالة الأولى: $\tau = \sigma \, tg \, \varnothing$ ، أما في الحالة الثانية فتأخذ المعادلة الشكل التالي : $\tau = \sigma \, tg \, \varnothing + c$

τ: مقاومة الصخر للقص بالميغا باسكال.

σ: الإجهاد العمودي في مستوي الاقتطاع بالميغا باسكال.

$\varnothing$: زاوية الاحتكاك الداخلي.

$Tg \, \varnothing$: عامل الاحتكاك الداخلي.

c: التماسك، ميغاباسكال.

هذا وتعتبر قيم $\varnothing$ و c بارامترات علاقة القص للصخور وتستخدم لحساب متانة وثبات التشكيلة الصخرية . وتتعلق قيمة مقاومة الصخور للقص بعوامل عديدة داخلية (بنية الصخور ونسيجها وتركيبها) وخارجية (قيمة وسرعة تغير الضغط ، ظروف الجفاف) لذلك فإن اختيار الصخور بالمخبر أو في الحقل يجب أن يعكس عمل هذه الصخور في المنشآت ، فإذا أخذنا بعين الاعتبار كل ما ذكر أعلاه نجد أن تعيين متانة الصخور وبارامترات المتانة يتم بصورة تقريبية.

3-1-1- مقاومة الصخور الصلبة للقص:

تتصف مقاومة القص للصخور الصلبة بقيم معينة لبارامترات مقاومة القص $(c,\varnothing)$ التي يمكن أن تختلف بشكل كبير . فمقاومة الصخور الصلبة للقص هي مقاومة تماسك واحتكاك حيث في البدء يقاوم التماسك القص ثم يظهر تأثير الاحتكاك بعد استنفاذ التماسك. ويعتبر عامل الاحتكاك $(tg \, \varnothing)$ أكثر الصفات استقراراً عند القص وهو يتعلق بالتركيب الفلزي والرطوبة وتتراوح بين 0,3 و0,6 هذا ويعبر عن المجموع الزاوي للاحتكاك الداخلي للصخور الصلبة بالعلاقة التالية:

$$\varnothing\varepsilon = \varnothing_3 + \varnothing_T$$

$\varnothing_3$: زاوية الاحتكاك المحددة للالتصاق الميكانيكي للسطوح الخشنة.

$\varnothing_T$: زاوية الاحتكاك للسطوح الناعمة.

وفي الصخور الصلبة كقاعدة عامة تكون $\varnothing_3 > \varnothing_T$.

إن قيمة $ø_3$ متغيرة وتتعلق بدرجة خشونة السطوح المعرضة للقص وقيمة الإجهاد المؤثر أما قيمة $ø_T$ فهي صفة ثابتة وتتعلق فقط بالتركيب الفلزي وبالرطوبة.

وتتعلق مقاومة القص عند الصخور الصلبة بمقاس العينات المعرضة للقص وبوجود التشققات. وقد دلت التجارب على أن متانة القص في العينات الصخرية الخالية من الشقوق تبلغ 90% من متانة الانضغاط كذلك تغير عمليات التجوية ببنية الصخور وتركيبها لذلك فهي تؤثر على متانتها. ومع تزايد التجوية يحدث تغير معامل الالتصاق وزاوية الاحتكاك الداخلي.

3-1-2- مقاومة الصخور المفككة للقص:

يعبر عن علاقة مقاومة القص مع الضغط الناظمي للصخور المفككة (الرمال والحصى) بمنحني يمر من مبدأ الإحداثيات ويتحدب باتجاه الأعلى ، ولكن في الحالات التطبيقية تقرب هذه العلاقة بمنحني منكسر موصوف بمعادلة كولومب مع بارامترات مختلفة . وينص قانون كولومب المقاومة العظمى للقص في الصخور المفككة هي مقاومة احتكاك وتتناسب طرداً مع الضغط العمودي المطبق عليها في مستوي القص وهكذا نجد أن هذه العلاقة للرمال في مجال الضغوط العمودية 0,1 ميغا باسكال تأخذ الشكل : $\tau = \sigma \, tg \, ø$ ، وفي حالة ضغوط أكبر من 0,1 ميغا باسكال تكون : $\tau = \sigma \, tg \, ø + c$.

τ: مقاومة القص الأعظمية ، $ø$ ، c : بارامترات العلاقة.

تعتبر زاوية الاحتكاك الداخلي البارامتر الأساسي الذي يصف خواص المتانة للصخور المفككة وهي تتعلق بـ :

1. مقاومة الالتصاق التي تظهرها الجزئيات عند خروجها من وضع التوازن (مقاومة البنية $ø_3$).
2. احتكاك الجزئيات مع بعضها البعض عند حركتها المتبادلة $ø_T$.
3. المقاومة لاقتطاع الجزئيات وتحطيمها $øc$ أي أن: $ø = ø_3 + ø_T + ø_c$

إن دور كل عنصر من عناصر زاوية الاحتكاك الداخلي $ø$ في مقاومة القص مختلف وهو يتعلق بعوامل كثيرة فترابط الحبات يتعلق بشكل أساسي بمقياس هذه الحبات وبدرجة تراصها فكلما كان مقاس الحبات كبيراً وتراصها أكبر كلما كانت أكثر التصاقاً وتتعلق مقاومة الاحتكاك للحبات بالتركيب الفلزي وبحالة وصفات سطح هذه الحبات فتكون متانة القص في الصخور المؤلفة من حبات زاوية أكبر من قيمتها في الصخور المؤلفة من حبات مدورة. كذلك فإن المقاومة لاقتطاع

الحبات تتعلق بمتانة الشبكة البلورية للفلزات وبالحالة الاجهادية. ويوضح الجدول /1/ تأثير تجانس التركيب الحبي وشكل الحبات على زاوية الاحتكاك للصخور الرملية وتؤثر الرطوبة على مقاومة القص للصخور المفككة ويظهر هذا التأثير من خلال تخفيض قيمة كل من التماسك (c) والاحتكاك (ø) بين الحبات وتبلغ متانة القص قيمتها الدنيا عندما تكون الصخور مشبعة بالماء. هذا ويظهر تأثير الرطوبة بدرجة ملحوظة فقط للرمال الغرينية .

الجدول (1) : تأثير تجانس التركيب الحبي وشكل الحبات على زاوية احتكاك الصخور الرملية

شكل الحبات	تجانس التركيب الحبي	زاوية الاحتكاك بالدرجة	
		رمال رخوة	رمال متراصة
دائري	متجانسة التركيب	30	37
دائري	جيدة التدرج الحبي	34	40
زاوي	متجانسة التركيب	35	43
زاوي	جيدة التدرج	39	45

3-1-3- مقاومة الصخور الغضارية للقص :

تملك مقاومة القص للصخور الغضارية طبيعة معقدة وهي تتحدد بعوامل داخلية وأخرى خارجية. ويظهر تأثير العوامل الداخلية (التركيب ، البنية ،النسيج) من خلال قوى الترابط والاحتكاك بين العناصر البنيوية للصخر. أما العوامل الخارجية فتشمل تأثير طريقة (نظام وظروف تحضير العينة للاختبار) وقيمة الضغط العمودي. وهناك طريقتان لاختبار الصخور الغضارية هما طريقة الاجهادات الشاملة أو الكلية وطريقة الاجهادات الفعالة.

في الحالة الأولى تستعمل معادلة كولومب بالشكل التالي :

$$\tau = \sigma \, tg \, ø + c$$

وفي الحالة الثانية بالشكل :

$$\tau = (\sigma - u_w) \, tg \, ø' + c' = \sigma' \, tg \, ø' + c'$$

تتعلق مقاومة الصخور الغضارية للقص بكثافة الصخور ورطوبتها وبخواصها البنائية والنسيجية.

وتؤدي زيادة الفلزات ذات القابلية العالية لامتصاص الماء في الصخور إلى تناقص متانة القص لهذه الصخور. لهذا يعتبر الغضار المونتموريلونيتي أقل الصخور مقاومة لاجهادات القص بينما يعتبر الغضار الكاولينيتي ذو مقاومة عالية. كذلك تزداد متانة القص في الصخور الغضارية بازدياد الكثافة وانخفاض المسامية. لأن ذلك يترافق باقتراب الحبات الغضارية من بعضها البعض وازدياد قوى الاحتكاك والترابط فيما بينها ، كما تؤدي زيادة نسبة الحبات الغضارية والغروية التي تقل أقطارها عن 0,1 ميكرون إلى انخفاض قيمة معامل الاحتكاك الداخلي لهذه الحبات وبالتالي انخفاض متانة القص.

كذلك تتناقص متانة القص في الصخور الغضارية بازدياد الرطوبة التي تؤدي بدورها إلى انتفاخ الصخور وازدياد حجمها وتباعد الحبات الصخرية وبالتالي انخفاض قوى التجاذب فيما بينها والتي تحدد قوى التماسك (c) كما تشكل المياه حول الحبيبات الصخرية أغشية رقيقة تسهل انزلاقها وتخفض قيمة زاوية الاحتكاك الداخلي .

وتؤثر الشوارد التبادلية كثيراً على مقاومة القص للصخور الغضارية فالشوارد أحادية التكافؤ كالصوديوم تعمل على إضعاف قوى الترابط والاحتكاك بين الحبات من خلال تفريقها وزيادة ثخانة الأغشية المائية وحولها مما يؤدي إلى تناقص مقاومة الصخور الغضارية لاجهادات القص بينما الشوارد الثنائية أو الثلاثية التكافؤ تعمل على تجميع الحبات الغضارية وإنقاص ثخانة الأغشية المائية مما يؤدي إلى زيادة قوى الاحتكاك والترابط بين الحبات وبالتالي زيادة مقاومة الصخور لاجهادات القص .

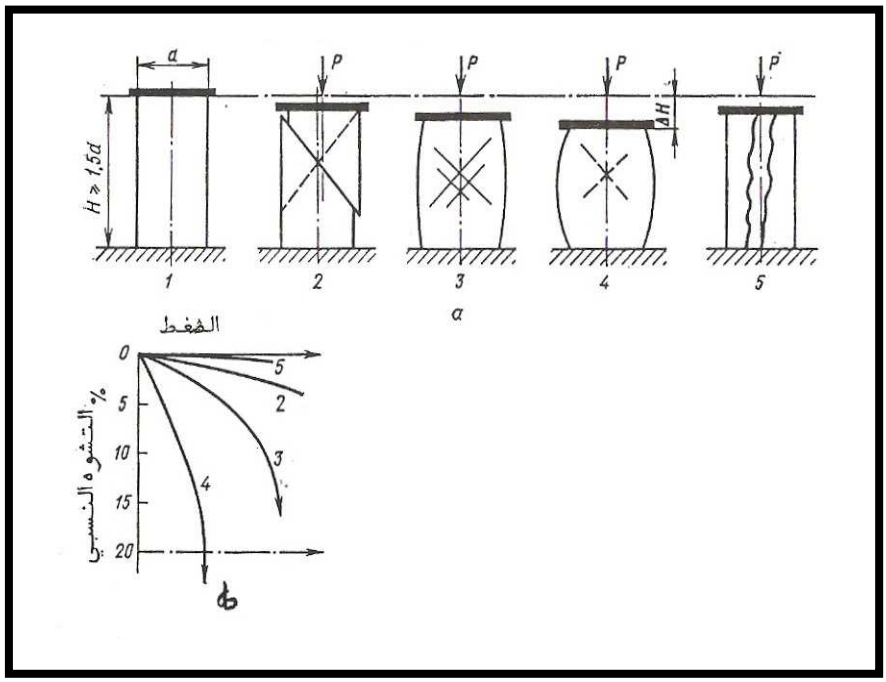
وأخيراً تكون متانة القص في الصخور الغضارية المتطبقة أقل ما يمكن في الاتجاه الموازي لمستويات التطبق وتبلغ أعلى قيمة لها في الاتجاه العمودي على هذه المستويات .

3-2- مقاومة الصخور لاجهادات الضغط (متانة الانضغاط):

تحدد متانة الانضغاط في شروط الإجهاد البسيط (أحادي المحور) أو المركب (ثلاثي المحاور). وتعد متانة الانضغاط أحادي المحور هي الأكثر أهمية حيث تعتبر الصفة الأساسية التي تحدد متانة الصخور ومعرفتها هامة جداً عند تخطيط وتصميم الأعمال الإنشائية وتنفيذها.

وتنفذ هذه الاختبارات بتعريض العينة الصخرية الاسطوانية أو المكعبية إلى تأثير حمولة ضاغطة متزايدة بالتدريج من الصفر وحتى يتم الانهيار. وتوافق المتانة في حالة الانضغاط أحادي

المحور الضغط الذي تتفكك عنده العينة الصخرية إلى قطع صغيرة أو تعاني من تشوه كبير. هذا ويحدد مؤشر المقاومة للانضغاط أحادي المحور بالنسبة بين القوة المحطمة (p) ومساحة المقطع العرضي للعينة والعمودي على اتجاه هذه القوة (s) Rc = p / s إذا قدرت القوة المحطمة بالنيوتن ومساحة المقطع العرضي بـ م^2 فإن المتانة تقدر بالبكاسكال إلا أنه في حالة الاجهادات الحقيقية للعينة الصخرية وعند انضغاط غير متجانس بشكل ملموس تنشأ في هذه العينة اجهادات قص واجهادات شد ، ويتم التحطيم (الانهيار) عند الانضغاط بسبب القص أو بطريقة التمزق والانقطاع ، الشكل /7/.



الشكل (7) : تشوه الصخور عند الانضغاط

a : الشكل الخارجي للعينة الصخرية حتى الاختبار (1) وبعده (2–5)

b : العلاقة بين التشوه والضغط

2 : تحطيم هش بطريقة القص

3 : تحطيم نفس هش

4 : تحطيم لدن

5 : تحطيم هش بطريقة تمزق واقتطاع العينة

وتبعاً لذلك ينظر إلى مؤشر المتانة عند الانضغاط كصفة شرطية للمتانة تربط بين طبيعة الصخر وظروف اختباره ، إن تعيين Rc في التطبيقات الجيولوجية – الهندسية واسع الانتشار يخول مقارنة مختلف الصخور والتقييم التجريبي لقدرة التحمل لصخور الأساس الصلبة وثبات سقوف المناجم.

هذا ويمكن أن يكون انهيار الصخور عند الانضغاط هشاً أو لدناً. ويسمى الانهيار هشاً عندما تحصل تشوهات مرنة قليلة قبل وروده ويعبر عنه بظهور وتطور الشقوق ويعتبر هذا النوع من التحطيم صفة مميزة للصخور ذات الروابط البلورية القوية وخصوصاً عند تطبيق الضغط بسرعة. أما التحطيم اللدن فيظهر بطريقة سيلان الصخر عند تشوهات كبيرة وتأخذ العينة الصخرية شكل(برميل) عند الحفاظ على الاستمرارية وعدم تغير الحجم. هذا وتلاحظ اللدونة غالباً في الصخور الضعيفة الترابط وعند تطبيق الضغط ببطء.

3-2-1- مقاومة الصخور الصلبة للانضغاط أحادي المحور:

يتغير مؤشر متانة الانضغاط للصخور الصلبة في حدود كبيرة. وتلاحظ أعلى القيم للمتانة عند البازلت الكتلي والغرانيت ذي الحبيبات الصغيرة والكوارتز الحديدي وتبلغ حوالي 380-450 ميغاباسكال. وتتمتع الصخور الرسوبية الملتحمة بملاط وصخور الحبات البازلتية بمتانة أقل حوالي 200 ميغاباسكال.

وتؤثر العوامل البنيوية (مقاس وشكل الحبات ، صفات توضعها في الفراغ ، متانة الروابط بين الحبات) بشكل كبير على المتانة. فالصخور ذات الحبات الصغيرة والمتساوية تملك متانة أكبر بكثير من الصخور ذات الحبات الكبيرة والبنية البورفيرية. إن زيادة قليلة للمسامية تنقص مؤشر المتانة (فعند زيادة مسامية الغرانيت الميكروكليني من0,63 وحتى 3,07 % تتناقص متانة الانضغاط من 240 وحتى 113 ميغاباسكال. ويحدث تناقص المتانة أيضاً عند إضعاف الروابط البنيوية وهذا يتم على سبيل المثال عند التبريد والتسخين بشكل متناوب أو عند التأثير الفيزياكيميائي للمياه ولمحاليل الاليكتروليتات وغيرها من المواد ويؤدي إشباع الصخور الصلبة بالماء إلى إضعاف متانتها وهذا ما يلاحظ خصوصاً في صخور المارل والغضار الصفحي

والأحجار الرملية والكونغلوميرا ذات الملاط الغضاري أو الكلسي أو الجصي وتتناقص متانة الصخور الصلبة الكتلية والقليلة المسامية عند إشباعها بالماء بشكل قليل ويكون هذا التناقص مؤقتاً وعكسياً إذ أنه بعد تجفيف الصخر يمكن أن يستعيد متانته الأولية وهذا يتعلق بالظواهر الفيزياكيميائية الجارية في الشقوق المجهرية للصخور الصلبة عند تغلل الماء فيها . ويؤثر تركيب الصخور الصلبة كثيراً على قيمة مؤشر المتانة عند الانضغاط ، فمتانة الملح الصخري أقل من متانة الحجر الكلسي التي بدورها أقل من متانة صخور الكوارتزيت وهذا يتحدد بالفروق الجوهرية في متانة الفلزات المشكلة لهذه الصخور (متانة الهاليت أقل من الكالسيت ومتانة الكالسيت أقل من متانة الكوارتز). كذلك تتأثر متانة الانضغاط بنسيج الصخور وهذا ما يظهر واضحاً في الصخور الرسوبية والمتحولة ، حيث تكون المتانة في الاتجاه الموازي لمستويات التطبق أو التورق (σ_{II}) أقل من المتانة في الاتجاه العمودي على هذه المستويات (σ_I) وتتغير النسبة (σ_I/σ_{II}) بحدود (1– 1,5).

3–2–2 – مقاومة الصخور الغضارية للانضغاط أحادي المحور:

تسمح اختبارات الانضغاط أحادي المحور للصخور الغضارية بتعيين مقاومة هذه الصخور للقص السريع وعندها يمكن اعتبار ø=0 وفي هذه الحالة يتم تعيين تماسك الصخور كنصف الإجهاد الضاغط الأعظمي أي : $\tau = c = \frac{1}{2} Rc$ تتعلق قيمة مؤشر متانة الانضغاط للصخور الغضارية ببنية ونسيج وتركيب هذه الصخور. إن تأثير كل هذه العوامل على مؤشر المتانة يمكن أن يظهر لهذا الصخر الغضاري أو ذاك من خلال مؤشر الصلابة (التراص) حيث يتم تعيين قيم الصلابة بواسطة قيمة (Rc).

إن انهيار العينات الصخرية الغضارية عند الانضغاط يمكن أن يتم عند قيم مختلفة للتشوه حسب صفات الروابط البنيوية والرطوبة المسامية ويكون التشوه هشاً ولدناً فيكون انهيار الصخور الغضارية المتراصة هشاً عند تشوهات قليلة بينما يكون تحطيم الغضاريات الحديثة لدناً.

ويظهر تأثير التركيب الفلزي للغضاريات على (Rc) من خلال متانة الروابط البنيوية بين الحبات والمسامية والتبعثر. فعند نفس القيمة لعامل المسامية يتمتع الغضار المونتموريلونيتي بأكبر متانة انضغاط بينما يتميز الكاولينيت والميكا المائية بمتانة قليلة. هذا وإن وجود روابط بنيوية طبيعية

عند الغضاريات يحدد متانتها العالية أكثر من الغضاريات التي لها نفس التركيب ولكنها مرصوصة اصطناعياً.

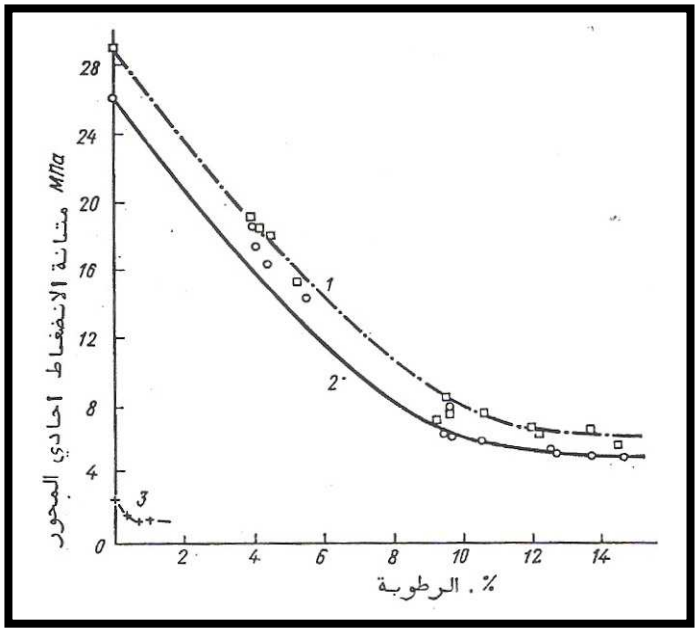
وتسمى نسبة متانة الانضغاط للعينات السليمة (ذات الروابط البنيوية الطبيعية) Rc_1 إلى متانة العينات المضطربة Rc_2 حيث خربت بنيتها الطبيعية وصنعت مخبرياً بإعطاء الوزن الحجمي الطبيعي والرطوبة الطبيعية بحساسية الصخور الغضارية (St) أي:

$$\mathbf{St = Rc_1/Rc_2}$$

ويصنف العالم تيرزاكي الغضار حسب حساسيته إلى ما يلي :

1. غير حساس $1 < St \leq 4$
2. حساس $4 < St \leq 8$
3. عالي الحساسية $St > 8$

وتزداد متانة الصخور الغضارية نتيجة التجفيف وذلك من جراء التراص عند الانكماش وفصل الماء من سطوح التماس بين الحبات. لهذا تزداد شدة التأثير الالكتروستاتيكي والجزئي المتبادل بين الحبات وتسبب متانة أكبر من قيمتها للعينات الرطبة ، الشكل /8/



الشكل (8) : مخطط يوضح العلاقة بين متانة الانضغاط أحادي المحور والرطوبة بعد التجفيف:
1،2– للغضار المونتموريلونيتي عند معامل مسامية على التوالي 0.38 ، 0.45 .. 3 – للكاولينيت

3-3- مقاومة الصخور للتمزق والانقطاع (متانة الشد):

تتحدد متانة الشد بحاصل تقسيم القوى المحورية الشادة (p) التي تحطم الصخر إلى مساحة المقطع العرضي البدائي للعينة الصخرية أي:

$$Rt = p / s$$

وهذه القيمة الوسطى للإجهاد المحطم تسمى أيضاً بمتانة الصخر عند الشد أحادي المحور وهي تقدر بالباسكال. ولتمزيق العينة الصخرية يجب أن تنشأ فيها الشقوق التي تؤدي إلى فصل الصخر إلى أجزاء وهذا يعني أنه يجب أن يتشكل على الأقل سطحان جديدان غير موجودان سابقاً وتنشأ اجهادات الشد في الصخور بتأثير عوامل كثيرة من أهمها الجاذبية الأرضية والتمدد الحراري وهبوط الطبقات الصخرية غير متجانس.

إن تحديد قيمة متانة الشد ذو أهمية كبرى فهي تستخدم في حساب توزع الاجهادات حول الأنفاق وعند فعالية التفجيرات في الصخور وأيضاً عند تقييم تشكل الشقوق في أساسيات المنشآت الهيدروتقنية وغيرها. ويتم تعيين متانة الشد بواسطة تطبيق قوى شد العينة الصخرية وهذا يتحقق عند شد أحادي المحور أو انحناء أو تشقق وأيضاً عند الضغط على عينة مجوفة من الداخل.

وتتصف اختبارات الشد بكونها عملية معقدة جداً فإن دقة المعلومات عن قيمة حد متانة الشد التي يتم الحصول عليها بواسطة اختبارات الشد المباشر قليلة وتبعاً لذلك يتم غالباً تعيين هذا المؤشر بطريقة غير مباشرة (مثلاً عند الثني) تتصف الصخور الصلبة الكتلية والمتجانسة والمختلفة التركيب البتروغرافي بمتانة شد لا تزيد عادةً عن 20-30 ميغا باسكال وهذه المعطيات تنسب فقط إلى العينات الصخرية الخالية من الشقوق والأكثر ثباتاً ويوضح الجدول /2/ نتائج الدراسات التجريبية لمتانة الشد والانضغاط وعامل بواسون لبعض الصخور الصلبة.

يتضح من الجدول /2/ أن أعلى القيم لمتانة الشد تلاحظ في صخور الكوارتزيت والبازلت ومع زيادة المسامية وتغير نمط الروابط البنيوية تنخفض متانة الشد بشكل حاد (الحوار والملح الصخري) وتوضح نتائج القياسات بأن متانة الشد تمثل جزء غير كبير من متانة الانضغاط.

الجدول (2) : يوضح متانة الشد والانضغاط وعامل بواسون (μ) لبعض أنواع الصخور

اسم الصخر	متانة الشد MPa	متانة الانضغاط MPa	عامل بواسون
غرانيت	19	201	0.23
مرمر	13	132	0.30
غابرو	20	169	0.18
لابرادوريت	17	132	0.26
دياباز	31	330	0.14
بازلت	40	390	0.12
كوارتزيت	44	350	0.10
حجر رملي	13	58.5	0.17
حجر كلسي	7	38	0.35
غضار صفحي	13	61	0.08
ملح صخري	5 – 1.5	9	–
حوار	0.6 – 0.2	4 – 3	–

ويفسر الفرق بين متانتي الشد والانضغاط بأنه عند انضغاط الصخور التي تحتوي على فراغات (شقوق ومسامات) تنغلق هذه الفراغات مما يؤدي إلى زيادة قوى المقاومة لاجهادات ذات الانضغاط أما عند الشد فيحدث إضعاف سريع لقوى التأثير المتبادل ، لذلك فإن وجود التشققات في الصخور يؤدي إلى خفض كبير في مقاومتها لاجهادات الشد ولهذا السبب تكون متانة الشد في الصخور المقسمة بشبكة من الشقوق معدومة وتساوي الصفر ، تتصف متانة الشد في الصخور الغضارية بقيم منخفضة ولا تزيد في أكثر الحالات عن 0,01 ميغاباسكال. وتتعلق قيمة المتانة بالمسامية والرطوبة الأوليتين ومع تناقص قيمتها تزداد المتانة. كذلك تتعلق متانة الشد بالتركيب الفلزي وهي تتناقص من المونتموريلونيت إلى الميكا المائية فالكاولينيت .

هذا ويمكن أن تبلغ متانة الشد 0,1 –0,3 ميغا باسكال عند وجود روابط بلورية متينة بين الحبات من جراء وجود أكاسيد لغرويات سيليسية أو كربونات عند الرمال سوف تنخفض إلى أجزاء من الألف من الميغاباسكال.

4. خواص السيولة :

تتعلق طبيعة مقاومة الصخور للقوى الخارجية بقيمة هذه القوى وزمن تأثيرها. فتأثير قيمة الضغط على التشوه والمتانة تم إيضاحها سابقاً.

وهنا سنناقش تشوه الصخور تحت تأثير ضغط ثابت مع الزمن أو عند اختلاف سرعة تطبيق القوى (خواص السيولة) . فعند زيادة سريعة للحمولة على العينة الصخرية ، وليكن انضغاط أحادي المحور ستكون المقاومة أكبر ما يمكن وتسيطر في العينة الصخرية التشوهات المرنة ويلاحظ تحطيم هش بطريقة القص أو الانقطاع والتمزق بينما عند زيادة بطيئة للقوى الخارجية ستكون مقاومة الصخر أقل وستحدث تشوهات زحف يمكن أن تنتهي بالتحطيم بشكل قص هذا وتتعلق درجة ظهور التشوهات المرنة أو الزحف في الصخور بنسبة زمن تأثير القوة الخارجية (T) إلى زمن التراخي (Tr) وتتحدد قيمة زمن التراخي من نسبة اللزوجة (μ) إلى معامل المرونة عند القص (G) أي :

$$Tr = \mu / G$$

وتمثل هذه القيمة الفاصل الزمني الذي خلاله يتناقص الإجهاد في الجسم عند تشوه ثابت إلى قيمة معينة (عادةً حوالي 2,71 مرة) . إن زمن التراخي ليس واحداً عند مختلف الأجسام ، فللصخور الصلبة يقاس زمن التراخي بمئات وآلاف السنين . وإذا كان زمن استمرار تأثير القوى على الصخر أقل من زمن التراخي فسوف تتطور بالأساس التشوهات المرنة أما إذا كان زمن تأثير القوة ذات القيمة المعنية على الصخر يزيد عن زمن التراخي فستنشأ في الصخر تشوهات متبقية، زحف وسيلان . فمثلاً الجليد والزجاج عند تطبيق سريع للحمولة يتشوهان تشوهاً مرناً ويتحطمان تحطيماً هشاً وفي حالة تطبيق الحمولة ببطء تظهر عندها خواص الزحف ويسيلان كالسائل .

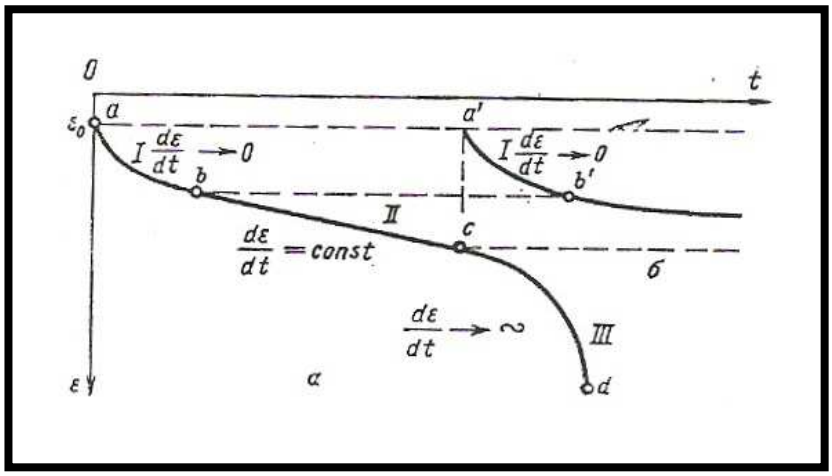
4-1- زحف الصخور :

تحدث ظاهرة زحف الصخور في الطبيعة بشكل واسع وهي تؤدي إلى نشوء الكثير من الظواهر الطبيعية كالطيات والتصدعات والانزلاقات على المنحدرات وانسياب الطبقات الصخرية تحت تأثير ثقل المنشآت الهندسية المختلفة وتضييق آبار الحفر وغير ذلك. وتتم دراسة ظاهرة الزحف في الصخور مخبرياً بتطبيق اجهادات مختلفة على عينات صخرية متماثلة لفترات طويلة وبرسم منحنيات الزحف. وتظهر خواص السيولة للصخور عند الزحف الحجمي وزحف القص يحدث الزحف الحجمي عند ضغط شامل يتضاءل باستمرار نتيجة ارتصاص الصخر أما زحف القص فيظهر عند إجهاد مماسي دائم في أساس المنشآت الهندسية المختلفة كالسدود وفي الطبقات والكتل الصخرية على السفوح والمنحدرات أثناء الأمطار الغزيرة وغيرها ويوضح الشكل /9/ منحنيات الزحف الحجمي وزحف القص وهنا تميز المراحل التالية :

المرحلة I (المتمثلة بالقسم ab) وهي مرحلة الزحف غير المستقر.

المرحلة II (المتمثلة بالقسم bc) وهي مرحلة الزحف المستقر أو التسيل اللدن المصحوب بسرعة تشوهات ثابتة عملياً.

المرحلة III (القسم cd) وهي مرحلة التسيل المتزايد مع سرعة التشوه المستمرة في الزيادة.



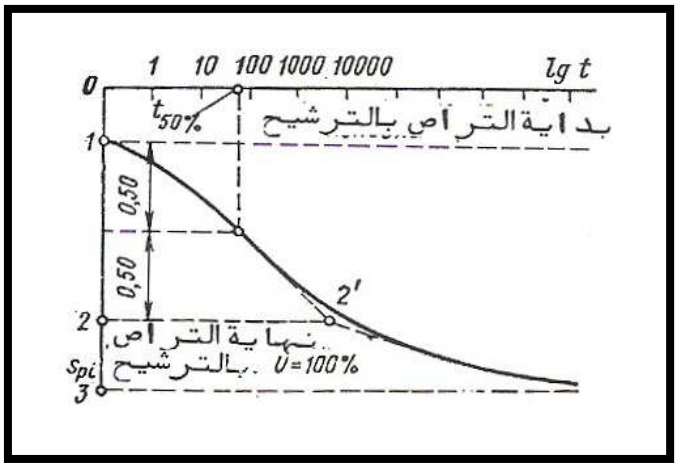
الشكل (9) : منحنيات الزحف : آ : الزحف غير المضمحل ، ب : الزحف المضمحل

وقد بنيت الأبحاث الكثيرة التي أجريت في هذا المجال من قبل عدد كبير من الباحثين بأن العوامل الرئيسة التي تتحكم بمراحل الزحف هي : إعادة تنظيم بنية الصخر (مع انقطاع الروابط البنيوية القديمة وتكوين روابط جديدة ونشوء وتطور الشقوق الدقيقة.

ففي المرحلة الأولى (مرحلة الزحف المضمحل) يحدث انسداد في الشقوق الدقيقة كما يلاحظ أيضا نقصان في حجم الصخور أما في المرحلة الثانية (مرحلة التسيل اللزج اللدن) فيحدث إعادة تنظيم الصخر مع عدم تغير في الحجم عملياً ويعوض عن انهيار الروابط البلورية بنشوء أو تكون روابط جديدة غرواتية مائية وتلامسية جديدة كما تظهر شقوق دقيقة في اتجاه القوى أو الأحمال المؤثرة. وفي المرحلة التالية (مرحلة التسيل المتزايد) يزداد حجم الصخور وتقل مقاومتها العامة نتيجة لظهور شقوق دقيقة جديدة تستمر بالاتساع مع الشقوق الدقيقة الموجودة أصلاً وتؤدي في النهاية إلى التحول إلى حالة التسيل اللزج المصحوب بكبس الصخور وأخيراً يجب الإشارة إلى أن الزحف المستقر لا ينشأ أو يظهر إلا عندما تكون الاجهادات أكبر من حد معين ، أما في حالة القيمة الأقل للاجهادات الفعالة (الحمولة) نجد أن الزحف لا يتحول إلى حالة السيولة (أي حالة الزحف المستقر) أي أن الصخور تتمتع بمقاومة طويلة الأمد وخلال أية مدة زمنية لتأثير الحمولة ستكون تشوهاتها عبارة عن تشوهات متضائلة ، الشكل /9 – ب/.

4-1-1- الزحف الحجمي:

تسمى عملية التطور الزمني للتشوه الحجمي لتصلب (تشديد) الصخور الغضارية المشبعة بالماء تحت تأثير حمولة ثابتة بالتراص. وتعتبر معرفة معاملات التراص للصخور هامة جداً بسرعة انخفاض المنشآت المقامة على صخور غضارية عالية المسامية ومشبعة بالماء. فعند حمولة خارجية على الصخر المشبع بالماء في ظروف الكبس ، الشكل /10/.



الشكل (10) : منحني التراص (التشديد) لصخر غضاري عالي المسامية مشبع بالماء

a–b : التراص الآني

1–2 : التراص الرشحي (الاولي)

2–3 : التراص الثانوي

ينشأ في البداية انضغاط آني متعلق بالتشوهات المرنة للمياه المسامية والفقاعات الغازية والهيكل الصخري ثم يبدأ بعد ذلك تراص الصخر نتيجة اعتصار المياه من فراغاته ومساماته.

وتراقب سرعة التراص في هذه المرحلة بسرعة تسرب (رشح) المياه المسامية وتبعاً لذلك تسمى هذه المرحلة بالتراص الأولي أو (الترشيحي) وفي نهاية هذه المرحلة تكون قيمة الضغط المسامي تساوي الصفر ($u_w=0$) وتنتهي العملية بترصيص الصخر نتيجة الانتقال البطيء للحبات بالنسبة لبعضها البعض. وتسمى مرحلة الترصيص المتعلقة بزحف الهيكل الصخري بالتراص الثانوي (اللاحق) هذا وتختلف قيمة واستمرارية التشوه في مرحلتي التراص الأولي والثانوي وغالباً ما تنشأ هاتان العمليتان بنفس الوقت. كما يمكن أن تغيب مرحلة التراص الأولي في الغضاريات الكثيفة. وأن التمييز الواضح لمرحلتي التراص ليست دائماً ممكناً فالزمن اللازم لبلوغ هذه الدرجة أو تلك من التراص تحت تأثير حمولة ثابتة يتعلق بالنسيج والتركيب لهذه الصخور. يتمتع التراص الأولي بقيمة عظمى للغضاريات ذات المسامية العالية وبمقدار التكاثف يتناقص ، بينما نسبة التراص اللاحقة الموافقة تزداد ويتعلق عامل التراص ببنية وتركيب الصخر وهو يرتبط بعاملي الرشح والانضغاط بالعلاقة التالية :

$$Cv = k_F (1+e) / a\rho$$

k_F: عامل الرشح ، e: عامل المسامية ، a: عامل الانضغاط ، ρ: كثافة للماء .

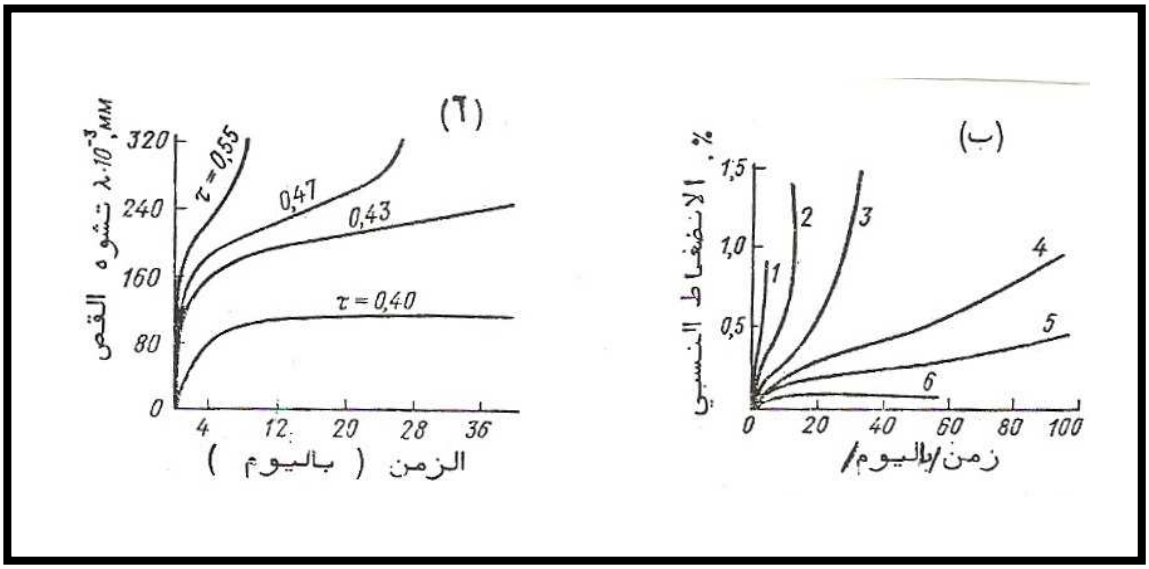
تتغير قيمة عامل التراص للصخور الغضارية ضمن حدود كبيرة (من 2 x 10^{-6} وحتى 8 x 10^{-6} سم^2/ثا) وتزداد قيمة عامل التراص بوجود سائل استقطابي في المسامات الصخرية حتى تصل (2.5 x 10^{-2} ـ 5 x 10^{-2} سم^2/ثا) ودون أية علاقة لذلك بالتركيب الفلزي ، هذا وتفسر قيم (Cv) الكبيرة للغضار ذي السائل الاستقطابي بوجود تأثير لانحلالية الغضار أثناء عملية التشوه تحت تأثير الحمولة.

كذلك يظهر نسيج الصخور تأثيراً ملحوظاً على قيمة عامل التراص فقيمة (Cv) للكاولينيت عند (e=0.85) مع توجه عشوائي للحبات تساوي 2.7 x 10^{-3} سم^2/ثا ، ومع توجه عمودي تساوي 1.2 x 10^{-3} سم^2/ثا ، أما في حالة توجه عمودي – أفقي للحبات فتبلغ (Cv) 0.7 x 10^{-3} سم^2/ثا. ويفسر تأثير توجه الحبات على قيمة (Cv) بأنه في الغضار ذي التوجه العشوائي والعمودي ترتص الحبات بشكل أسرع منه في حالة التوجه الأفقي ، حيث يكون خروج الماء في الحالة الأولى أسهل عند عملية التراص.

4-1-2- زحف القص :

تتصف الأجسام الصلبة بما فيها الصخور الغضارية بوجود الإجهاد الحدي للقص $\tau k1$ والذي يسمى حد السيولة والمتطابق مع حد المرونة فعندما تكون $\tau < \tau k1$ لا تظهر السيولة في مثل هذه الأجسام وهي تتشوه تشوهاً مرناً وعندما تكون $\tau > \tau k1$ يحدث التشوه اللدن حيث تأخذ الأجسام أشكالاً مختلفة وتحافظ عليها بعد إزالة الحمولة.

إن قانونية زحف الصخور تدرس بطريقة التعيين التجريبي لعلاقة تشوه القص عند جهد القص المعطي والزمن أو بسرعة القص r مع الجهد τ ، هذا ويوضح الشكل /11/ منحنيات الزحف للغضار الرملي والجص والتي يظهر منها أن طبيعة منحنيات الزحف واحدة وهذا يدل على وجود قانونية عامة للزحف لمختلف أنواع الصخور المختلفة بتركيبها ونسيجها.



الشكل (11) : منحنيات الزحف

آ : للرمل الغضاري عند اجهادات مماسية مختلفة

ب : للجص عند انضغاط أحادي المحور وفي حالة اجهادات مختلفة : 1 – 30 MPa ، 2 – 25 MPa ، 3 – 20.5 MPa ، 4 – 15 MPa ، 5 – 12.5 MPa ، 6 – 20.5 MPa (الجص جاف)

إلا أن زحف هذه الصخور يظهر عند قيم مختلفة للإجهاد المماسي فمثلاً إذا كانت الصخور الغضارية اللدنة تظهر خواص الزحف عند اجهادات مماسية مقاسة بأجزاء مئوية أو عشرية من الميغا باسكال فإن الصخور الصلبة تتطلب تأثير اجهادات مقاسة بعشرات الميغا باسكال. وللتنبؤ بزحف المنشآت من الضروري معرفة قيمتين هما عتبة حد الزحف وعامل اللزوجة الفعالة للصخور وتغيراته مع الزمن. فعتبة الزحف حسب العالم الروسي ماسلوف تمثل ذلك الإجهاد المماسي الذي اعتباراً منه تشوه الصخور الذي كان مهملاً يبدأ بالزيادة .

تتعلق عتبة حد الزحف ببنية وتركيب الصخور وبدرجة الحرارة وأيضاً بالضغط وسرعة تأثيره فعتبة حد الزحف للصخور المرصوصة جيداً (الكثيفة) أعلى من قيمتها للصخور نصف المرصوصة .

كذلك فإن عتبة حد الزحف للصخور الصلبة أعلى منها للصخور الغضارية فمثلاً تبلغ قيمتها في الصخور الرملية 5–7 ميغاباسكال وفي أملاح البوتاسيوم 0,5–1 ميغاباسكال بينما تبلغ في الغضاريات بأجزاء من العشرة أو المئة من الميغاباسكال.

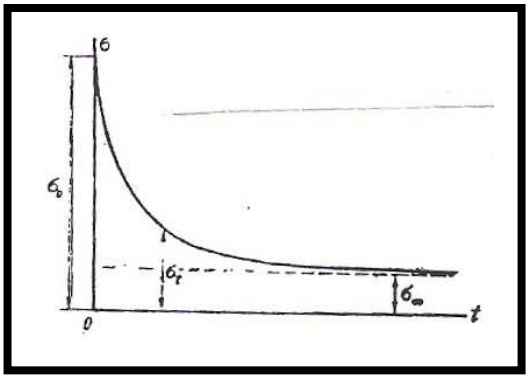
وتتصف اللزوجة الفعالة للصخور مقاومتها للسيلان تحت تأثير القوى الخارجية. ويتم تعيين اللزوجة كمياً بعامل اللزوجة (μ) وهو عبارة عن القوى المماسية التي يجب أن تكون مطبقة إلى واحدة المساحة من الطبقة المعرضة للقص حتى تتم المحافظة على الحركة الصفائحية مع سرعة ثابتة بالنسبة للقص تعادل واحدة السرع وإذا قدر الإجهاد بالباسكال والزمن بالثانية فإن اللزوجة تقدر بـ باسكال x ثانية.

4–2– المتانة الدائمة :

وهي أقل قيمة للإجهاد الذي يؤدي إلى تحطيم الصخور عند تعرضها لتأثير القوى الخارجية لفترة زمنية طويلة. فكما هو معروف تزداد تشوهات الصخور الغضارية بمرور الزمن في مرحلة الزحف ولكي نحافظ على قيمة معينة للتشوهات نحتاج بمرور الزمن إلى قيمة أقل للاجهادات العامة وتسمى عملية تقليل أو خفض الاجهادات العامة بمرور الزمن (إضعاف الاجهادات) في حالة التشوهات غير المتغيرة بارتخاء أو استرخاء الاجهادات. وتحدث عملية الاسترخاء هذه التي تعتمد على انهيار الروابط البنيوية في الصخور دائماً أثناء عملية الزحف غير أن قيم الاجهادات لا تهبط إلى الصفر ولكنها تهبط إلى قيمة معينة فقط تبقى بعدها ثابتة أو مستقرة.

إن قيمة المتانة الدائمة هي دوماً أقل من قيمة المتانة المؤقتة هذا وتحدد المتانة الدائمة للصخور بتعريض عينات متماثلة لاجهادات مختلفة وحساب الزمن اللازم لتحطيم هذه العينات ثم يرسم منحنيات المتانة الدائمة التي توضح علاقة الاجهادات ، الشكل /12/ ويميز على الشكل العوامل الخاصة التالية لمتانة الصخور التي لها خواص الانسياب :

- المقاومة العابرة أو اللحظية (σ_0) وهي مقاومة الصخر في لحظة بدء التحميل .
- المتانة (σ_t) بعد تعريض العينة الصخرية للإجهاد خلال الزمن t .
- المتانة المستمرة (σ_∞) أو الحد الأدنى للمتانة عند ارتخاء الاجهادات حتى لا تنخفض المتانة دون مستواها.



الشكل (12) : مخطط المتانة الدائمة

(σ_0) : المقاومة العابرة أو اللحظية

(σ_t) : المانة بعد تعريض العينة الصخرية للاجهاد خلال الزمن

(σ_∞) : المتانة المستمرة

وتقدر المتانة الدائمة عادةً بأعلى قيمة للإجهاد الذي يؤثر في العينة خلال /1000/ ساعة دون أن يؤدي إلى تحطيمها. وتعد المتانة الدائمة من أهم الخواص الميكانيكية للصخور وتحديدها بدقة ذو أهمية لمختلف الأعمال الإنشائية وخاصة السدود والأنفاق والمناجم.

****

الدراسات الجيوهندسية لمواقع الإنشاء – مراحلها وطرائق تنفيذها

1. مهام الدراسات الجيوهندسية:

تعتبر الدراسات الجيوهندسية الجزء الأساسي من الأعمال الاستكشافية الذي يجري تنفيذه لإيضاح تصاميم مختلف النماذج ومراحل البناء والتنقيب والاستثمار للتوضعات المفيدة وأيضاً لتحقيق الأنواع الأخرى من الحلول الجيوهندسية وتدخل ضمن هذه المسائل دراسة البنية الجيولوجية ، الجيومورفولوجية ، الظروف الهيدروجيولوجية ، العمليات الجيولوجية ، والجيوهندسية ، خواص الصخور والتنبؤ بتغيراتها عند بناء المنشآت واستثمارها وفي كل حالة محددة تتحدد مهام الدراسات الجيوهندسية تبعاً لنوع ومقاس المنشأة.

هذا وعند الدراسات الجيوهندسية تدرس بالأساس خواص الصخور والعمليات الجيوهندسية بعلاقة وثيقة مع الوسط الجيولوجي الطبيعي.

2. مضمون الدراسات الجيوهندسية :

ويتحدد ببرنامج الدراسة ويدخل ضمنه تجميع ودراسة وتحليل المعطيات الجيولوجية الموجودة بمنطقة البناء ، المسح الجيوهندسي والهيدروجيولوجي ، أعمال السبور ، الدراسات الجيوفيزيائية ، التجارب الحقلية ، المراقبة الدائمة ، الدراسات المخبرية للصخور وأخيراً المعالجة المكتبية ووضع التقرير.

وفي كل حالات الدراسة يجب أن نبدأ من تجميع المعطيات الموجودة عن الظروف الطبيعية للمنطقة (البنية الجيولوجية ، الظروف الهيدروجيولوجية ، المناخ ، الهيدروجيولوجيا ، غطاء التربة ، الطبوغرافيا) وهذا العمل يتم في المراحل التحضيرية قبل البدء بالأعمال الحقلية ، وتتم دراسة المعطيات المحفوظة في الأرشيف والمطبوعة عن المنطقة كما يتم تجميع المعطيات حول تجربة بناء واستثمار منشآت مشابهة في مناطق طبيعية مشابهة لهذه المنطقة.

إن التجميع والتحليل المتقنين للمعطيات المتوفرة يضيف في كثير من الحالات استكشافات جديدة عن المنطقة مما يسمح بوضع برنامج هادف للدراسات واختصار حجم هذه الدراسات بدرجة كبيرة. هذا وبعد إجراء بعض التدابير التنظيمية والاقتصادية الضرورية تسافر البعثة التنقيبية إلى المنطقة المقترحة للدراسة والتي ستقام عليها المنشأة وتبدأ بالأعمال الحقلية (المسح الجيوهندسي، أعمال السبور، الدراسات الجيوفيزيائية ....الخ) وأخيراً فإن المعطيات الحقلية ونتائج الدراسات المخبرية تعالج مكتبياً وتنتهي هذه الدراسات بوضع تقرير جيوهندسي.

ويتعلق حجم الدراسات المنفذه بـ :

أ. صعوبة الظروف الجيوهندسية للمنطقة.

ب. درجة دراسة المنطقة.

ج. مرحلة التصميم.

د. نوع المنشأة المصممة.

3. تنفيذ الدراسات الجيوهندسية:

تنفذ الدراسات الجيوهندسية بالمراحل الأساسية التالية :

3-1- المسح الجيوهندسي: وهو يمثل مجموعة متكاملة من الدراسات الحقلية ورسم الخرائط للبنية الجيولوجية وللظروف الهيدروجيولوجية والجيومورفولوجية ، والعمليات الجيولوجية وكذلك تحديد الخواص الفيزيامیكانيكية لصخور المنطقة المقترحة للإنشاء. ويجري تقييم كل مكونات الوضع الجيولوجي الطبيعي من وجهة نظر إنشائية وبهذا يتميز المسح الجيوهندسي عن المسح الجيولوجي.

ويتحدد مقياس المسح الجيوهندسي بدرجة تفصيل الدراسات الجيوهندسية وهو يتراوح بين 1/500 000 وأقل وحتى 1/50 000 وأكبر. هذا ويعتبر الأساس الذي يقوم عليه تنفيذ المسح الجيوهندسي هو الخريطة الجيولوجية للمنطقة المحددة. وتعتبر الجولات الحقلية الطريقة الأساسية للمسح حيث يتم من خلالها تدوين كافة الملاحظات.

والملاحظات الجيومورفولوجية تحاول تدقيق صفات التضاريس (الريليف) عمره ، منشأه ، وضع علاقة الريليف بالمياه الجوفية ، العمليات التكتونية ، والجيولوجية. أما الملاحظات الجيولوجية فتتخلص في تعيين ظروف توضع الصخور سماكتها ، منشأها ، عمرها ، درجة تجويتها...الخ ومن أجل هذا الهدف تدرس التكشفات الطبيعية التي تمثل خروج طبقات الصخور إلى السطح على سفوح المنحدرات وفي الوديان ومجاري الأنهار.

ويتم وصف التكشفات بالعين المجردة من الأسفل نحو الأعلى وتدون لكل طبقة أسماء الصخور، اللون ، التركيب ، الشوائب ، السماكة الظاهرية. وعناصر التوضع ، كما يتم اختيار عينات للدراسة المخبرية. وتوضح على الخريطة أماكن هذه التكشفات الصخرية. كما تصور وترسم التكشفات التي تعتبر نموذجية. وتسمى المناطق التي يلاحظ منها أكبر كمية من التكشفات بالمناطق المفتوحة وفي حالة غياب هذه التكشفات تسمى بالمناطق المغلقة وفي هذه المناطق تدرس البنية الجيولوجية بمساعدة السبور والدراسات الجيوفيزيائية حيث تؤخذ عينات صخرية للدراسة.

كذلك تدرس الظروف الهيدروجيولوجية عند المسح الجيوهندسي لإيضاح مائية الصخور وأعماق توضع المياه الجوفية ونظامها وتركيبها الكيميائي وإظهار العمليات الجيولوجية (الانهيارات ، الانزلاقات ، الكارست). التي يمكن أن تشكل خطراً على ثبات المنشآت الهندسية واستثمارها طبيعياً كما يجري تعيين الخواص الفيزيامیكانيكية للصخور بالطرائق الحقلية وفي مخابر متخصصة.

هذا وتجري أعمال التنقيب والاستكشاف لمكامن مواد البناء أثناء عملية المسح الجيوهندسي. ولتسريع عمليات المسح الجيوهندسي تستخدم الطرائق الجوية التي تعتبر فعالة خاصة في المناطق التي يصعب دراستها حقلياً مثل الصحاري والمستنقعات وغيرها.

وتعتبر عملية اختيار الأجزاء الملائمة للدراسات الحقلية المفصلة من أهم مسائل المسح الجيوهندسي. فعلى أساس المعطيات التي يتم الحصول عليها توضع خريطة جيوهندسية لمنطقة

البناء ، مما يعطي إمكانية إجراء التصنيف الجيوهندسي للمنطقة وتمييز الأجزاء الأكثر ملائمة للبناء.

فالخريطة الجيوهندسية تتضمن معلومات (أو بيانات) عن أهم العوامل الجيوهندسية ضمن حدود المنطقة المدروسة وهي تتألف من الخريطة نفسها ، المصطلحات، المقاطع الجيوهندسية، والمذكرة الإيضاحية. ويمثل على الخرائط الجيوهندسية التركيب الليتولوجي للصخور وخواصها وتوزعها وظروف توضعها وأيضاً عمرها ومنشؤها كما تتضمن معلومات عن المياه الجوفية والعمليات الجيولوجية والجيوهندسية الطبيعية. ويتم إنشاء الخرائط الجيوهندسية بمساعدة مختلف الخرائط الأخرى مثل خريطة المعطيات الأساسية ، الخريطة الطبوغرافية الجيولوجية ، الهيدروجيولوجية ، الجيومورفولوجية وخريطة توزع مواد البناء.

تتكون الخرائط الجيوهندسية من ثلاث أنواع :

1- خريطة الظروف الجيوهندسية.

2- خريطة التصنيف الجيوهندسي.

3- الخرائط الجيوهندسية الخاصة.

تحتوي خريطة الظروف الجيوهندسية على معطيات وحسابات تلبي كل أنواع الإنشاءات وتستخدم عادةً للتقييم العام للظروف الطبيعية للمكان الذي سيتم عليه الإنشاء أما خريطة التصنيف الجيوهندسي فتعكس تقسيم المنطقة إلى أجزاء (أقاليم ، مقاطعات ، مناطق ،....) وفقاً للظروف الجيولوجية العامة وتوضع الخرائط الجيوهندسية الخاصة وفقاً لنوع المنشأة وهي تتضمن تقييم الظروف الجيوهندسية لمنطقة البناء والتنبؤ بالظواهر والعمليات الجيوهندسية. وتتعلق مقاييس الخرائط الجيوهندسية بالهدف منها وبدرجة تفصيل الدراسة وهي:

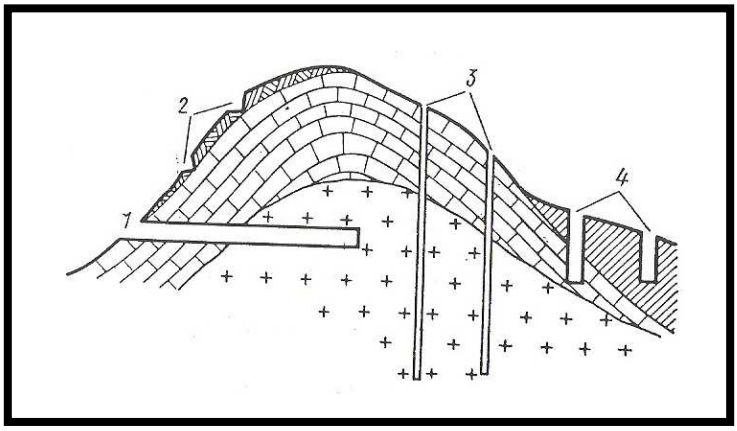
1- خرائط عامة (تخطيطية) ذات مقاييس صغيرة جداً (1/500 000) وأقل وتستخدم لدراسة القوانين العامة لتشكل الظروف الجيوهندسية على مناطق واسعة.

2- خرائط ذات مقاييس صغيرة (من 1/25000 وحتى1/500 000) وتستخدم في المراحل الأولى للتخطيط والتصميم.

3- خرائط ذات مقاييس كبيرة تفصيلية (1/25000 - 1/2000) وتستخدم في مرحلة إنشاء منشآت هندسية منفصلة.

أما المقاطع الجيوهندسية فتعتبر إضافات هامة للخرائط وهي تخول إظهار الظروف الجيوهندسية للمكان مع العمق ويمكن إنشاء هذه المقاطع بواسطة الخرائط أو السبور وتختلف هذه المقاطع عن المقاطع الجيولوجية العادية بأنها لا تظهر التركيب وظروف التوضع وعمر الصخور فقط وإنما أيضاً شدة تطور العمليات الجيوهندسية.

3-2- الآبار والحفر الاستكشافية: وهي الجزء الهام والأساسي للدراسات الجيوهندسية فبمساعدة هذه الآبار والحفر ، الشكل /1/ ، تتضح البنية الجيولوجية والظروف الهيدروجيولوجية لأرض البناء وتؤخذ عينات صخرية وأخرى من المياه الجوفية على العمق الضروري كما تجري أعمال اختبارية ومراقبة ثابتة (مستقرة) هذا ويعتبر حفر الآبار من أهم الأعمال الاستكشافية عند الدراسات الجيوهندسية والهيدروجيولوجية. فالآبار هي حفر شاقولية اسطوانية ذات قطر صغير تنفذ بواسطة آلات حفر خاصة.



الشكل (1) : مخطط يوضح أنماط الحفر الاستكشافية

1. حفر أفقية ، 2. حفر تنظيفية ، 3. آبار ، 4. حفر عمودية

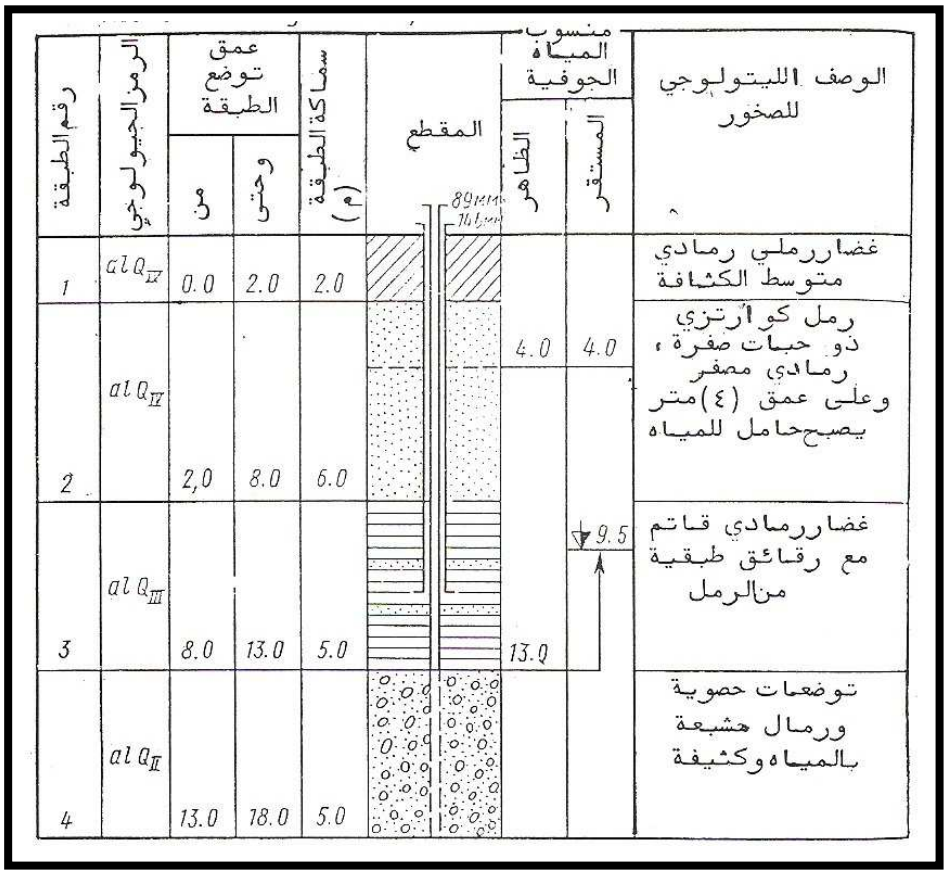
ويتم الحفر بطرق عديدة من أهمها الحفر الدوراني والحفر بالدق ويعتبر الحفر الدوراني الطريقة الأكثر فعالية حيث يتم فيها تحطيم الصخور بواسطة رؤوس حفر خاصة تتحرك حركة دورانية ويمكن بواسطة الحفر الدوراني أخذ عينات صخرية على أعماق مختلفة الأمر الذي يصعب تحقيقه بواسطة الحفر بالدق حيث يتم تحطيم الصخور بواسطة أزميل محمول على قضيب دوراني يتحرك بحركة عمودية ذات تواتر محدد.هذا ويميز عادةً في بئر الحفر الفوهة والحائط والقاع. وتتمتع أعمال الحفر بمزايا عديدة من أهمها السرعة الكبيرة لاختراق الآبار وإمكانية بلوغ أعماق كبيرة أما عيوبها الأساسية فهي عدم إمكانية مشاهدة جدران الآبار من جراء أقطارها الصغيرة وأيضاً المقاسات الصغيرة للعينات وكذلك ضرورة غسل الآبار عند الحفر وغيرها.

ويقع قطر الآبار المستخدمة في الدراسات الجيوهندسية التطبيقية عادةً ضمن المجال (33–219 مم). أما عمق الآبار فيتحدد بمهام الدراسة الجيوهندسية فللمنشآت الهندسية كتمديد المياه والمجارير نادراً ما يزيد عن (30م) بينما عند التنقيب عن المياه الجوفية لأغراض الشرب فيمكن أن يبلغ عمق الآبار /800م/ وأكثر.

وتتضمن الأعمال المنجمية الحفر والأنفاق الاستكشافية. وتنفذ الحفر على شكل متدرج أو على شكل شاقولي في موقع المنشأة المستقبلية ويكون لها مقطع مستطيل أو دائري وتتراوح مساحته فتحتها العلوية من (2) وحتى (3,5 م^2) ويمكن أن يصل عمقها إلى بضعة عشرات من الأمتار وتنفذ يدوياً أو ميكانيكياً وهي توفر أخذ العينات غير المضطربة ، فالحفر العمودية الصغيرة التي لا تزيد أعماقها من 3–4 متر ومقطعها 2.5x1 متر يتم تنفيذها عادةً في الصخور الرملية والغضارية أما الحفر العمودية ذات المقطع الأكبر من (2 م^2) فتنفذ لأعمال اختبار خاصة وعلى أعماق أكبر من السابقة وتملك هذه الحفر أهمية كبيرة عند الدراسات الجيوهندسية وخصوصاً أثناء أعمال البناء فهي تسمح بدراسة المقطع الجيولوجي – الليتولوجي بالتفصيل وكذلك تسمح بأخذ عينات مختلفة المقاسات بإجراء اختبارات على الصخور ولكن السلبية الأساسية لهذه الحفر هو تكلفتها وصعوبة حفرها وخصوصاً في الصخور الصلبة وفي الصخور المشبعة بالماء أما

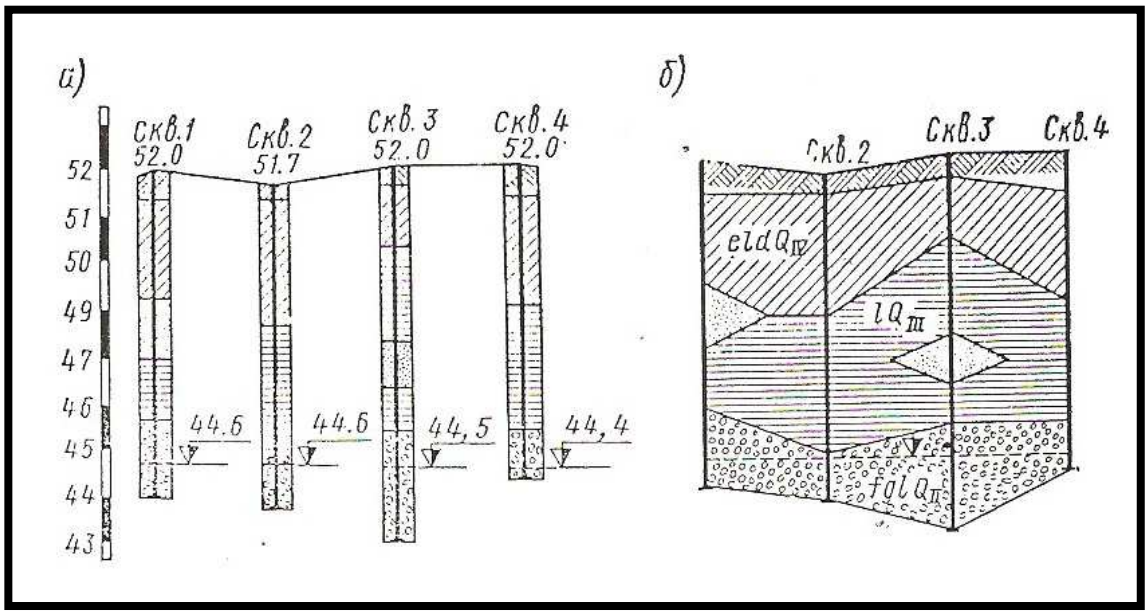
الأنفاق الاستكشافية فتنفذ من أجل التعرف على البنيات الجيولوجية المعقدة في المناطق الجبلية وتكون مقاطعها بشكل شبه منحرف أو دائرية وهي تستخدم لتنفيذ المسح الجيولوجي وأخذ العينات وإجراء الاختبارات الحقلية بالموقع.

إن الوثيقة الجيولوجية الأساسية للأعمال التنقيبية هي سجل أعمال الآبار والحفر الاستكشافية. ففي هذا السجل يتم وصف تركيب وحالة الصخور المستكشفة كما يظهر عمق آخذ العينات الصخرية ، كذلك تغطي نتائج المراقبة على ظهور مستوي المياه الجوفية وغير ذلك وأخيراً يتم إنشاء المقاطع (الأعمدة) الجيولوجية بواسطة معطيات الآبار الاستكشافية ، الشكل /2/ .



الشكل (2) : عمود (مقطع) جيولوجي لأحد الآبار

وتوجد معطيات مجموعة من المقاطع (الأعمدة) في بروفيل جيوهندسي (مقطع جيوهندسي) ويوضح الشكل /3/ مراحل إنشائه.



الشكل (3) : مراحل بناء المقطع الجيولوجي

a : المرحلة البدائية ، b : المرحلة النهائية

وعند إنشاء البروفيل يتم في البداية اختيار خط ويقترح بأن يكون في موقع يؤمن الحصول على تصور كامل عن الظروف الجيوهندسية والهيدروجيولوجية للأرض مع الأخذ بعين الاعتبار توضح المنشآت المستقبلية وبالخط المقترح يتم إنشاء بروفيل طبوغرافي لسطح الأرض وتحمل على البروفيل النقاط التي تعكس مكان توضع الآبار والحفر الاستكشافية وأيضاً كل المعطيات عن تركيب وحالة وخواص الصخور ومنسوب المياه الجوفية وعلى كل مقطع يظهر المقياس والرموز الستراتيغرافية والمصطلحات. هذا وتملك المقاطع أهمية كبيرة عند التقييم الجيوهندسي لمنطقة البناء وأجزائها المنفصلة.

3-3- الدراسات الجيوفيزيائية:

تترافق الطرائق الجيوفيزيائية مع الأعمال الاستكشافية (أعمال السبور) و هي تسمح باختصار حجم وزيادة وفرة ودقة نوعية الدراسات وفي أغلب الحالات تستخدم كطرائق مساعدة. فهي تساعد

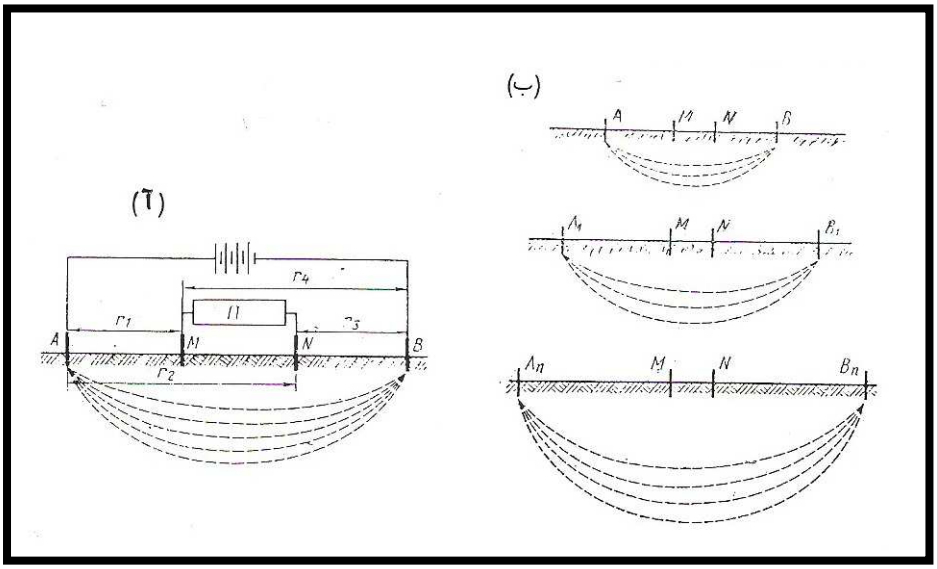
في دراسة المقطع الجيولوجي للصخور والحوامل المائية والعمليات والظواهر الجيولوجية المختلفة كالكارست وغيره.

تقوم الطرائق الجيوفيزيائية على اختلاف الخواص الفيزيائية للصخور (المقاومية الكهربائية النوعية ، سرعة انتشار الأمواج السيسمية المرنة ، الفعالية الإشعاعية ، الحساسية ، المغناطيسية وغيرها) إن تغير قيم البارامترات بالاتجاه العمودي أو الأفقي يدل على تغير موافق في تركيب الصخور وحالتها. وتتعلق فعالية التنقيب الجيوفيزيائي بدرجة اختلاف الصخور بخواصها الفيزيائية وأيضاً بصحة توافقها (اقترانها) مع الدراسات الجيوهندسية والهيدروجيولوجية الأخرى. وتنفذ الدراسات الجيوفيزيائية على سطح الأرض أو في الآبار ، أما الطرائق الجيوفيزيائية الجوية فلم تنتشر حتى الآن بشكل واسع. هذا وتعتبر الطرائق الجيوكهربائية من أكثر الطرائق انتشاراً في التطبيقات العملية وتستخدم بشكل أقل الطرائق السيسمية (الأمواج الانكسارية) الإشعاعية ، المغناطيسية وغيرها. تقوم الطرائق الجيوكهربائية على دراسة الحقل الكهربائي المتولد في التشكيلة الصخرية فكل صخر حسب تركيبة وبنيته ومائيته يتمتع بمقاومية كهربائية نوعية خاصة. وكلما تباينت الفروق بين هذه المقاوميات كلما كانت النتائج أدق. هذا وتحدد مقاومية المقطع الجيوكهربائي (ρ) من مقياس شدة التيار (I) بين الاليكترودين المغذيين A و B ، الشكل (4–أ) ، والفرق بالجهد (ΔV) بين الالكترودين M و N بالعلاقة التالية:

$$\rho = K\,(\Delta V/I)$$

حيث أن : K: ثابت التشكيل وتتحدد قيمته بالعلاقة التالية: شكل (4 – ب) .

$$K = 2R \,/\, (1/r_1 + 1/r_2 + 1/r_3 + 1/r_4)$$



الشكل (4) : مخطط الطريقة الكهربائية

آ- المسافة بين الاليكترودات ، ب- زيادة عمق الدراسة عند تغير المسافة بين الاليكترودات المغذية

إن إدخال هذا العامل عائد إلى أنه عند تغير المسافة بين الالكيترودات تتغير شدة وفرق الجهد. وبما أن المقاطع الجيولوجية تتألف من عدة طبقات صخرية مختلفة بخواصها الجيوكهربائية فإن القيم التي يتم الحصول عليها عند قياس القيم I و ΔV تعكس هذه الاختلافات. ومن جراء هذا فالمقاومية المحسوبة بالعلاقة السابقة سوف تعكس خواص كامل المقطع وهي تسمى بالمقاومية الظاهرية النوعية (ρ_K). ولقياس شدة التيار وفرق الجهد يستخدم مقياس فرق الجهد ويفضل أن تكون اليكترودات فولاذية أو نحاسية بطول (0.5 – 0.6 متر) وتتصل هذه الاليكترودات مع مصدر تغذية بكبلات جيوفيزيائية خاصة.

هذا وتنقسم الطرائق الجيوكهربائية إلى طريقتين: السبر الجيوكهربائي الشاقولي (VES) والبروفيل الجيوكهربائي. تستخدم طريقة السبر الجيوكهربائي لدراسة مقطع الصخور في أية نقطة بواسطة تغير قيم المقاومية النوعية الظاهرية مع العمق. وتقوم هذه الطريقة على أساس أنه مع زيادة المسافة بين الكترودي التغذية بصورة طردية يزداد عمق اختراق التيار بالمقطع الصخري.

لهذا تسلسل زيادة الفروق بين الاليكترودات فإن البارامترات المقاسة (I و ΔV) وبالتالي (ρ_K) تنتسب إلى أعماق أكبر، الشكل /4/ ، هذا ويجري غالباً في النقطة الواحدة تنفيذ 12 – 15 قياس عبر أبعاد مختلفة الاليكترودات ويعتبر عمق الاختراق عادةً هو قيمة المسافة بين الاليكترودات ويتم بواسطة نتائج السبر الجيوكهربائي إنشاء منحني بياني بمقياس لوغاريتمي حيث توضع على محور السينات نصف المسافة بين الاليكترودات المغذية AB/2 وعلى محور العينات القيمة (ρ_K) الموافقة.

وبالاختلاف عن طريقة السبر الجيوكهربائي الشاقولي فإن الطريقة البروفيل الجيوكهربائي تتلخص بأن المحطة (مقياس فرق التوتر ، مصدر التغذية ، الاليكترودات) تتحرك على المنحني وتبقى المسافة بين الاليكترودات وبالتالي عمق الدراسة ثابتاً. ويتم اختيار الفرق AB بحيث يتم توضيح المقطع الجيولوجي على العمق المطلوب وبنفس الوقت الحصول على معلومات صحيحة من القياس. وبنفس الطريقة تعطي إمكانية تحديد الوديان النهرية القديمة وأماكن الفجوات الكارستية العميقة وغير ذلك. وبواسطة قيم (ρ_K) التي يتم الحصول عليها يرسم بروفيل المقاومية أو خريطة تساوي المقاومية التي يمكن على أساسها التوصل إلى نتائج هامة حول البنية الجيولوجية للمنطقة المدروسة.

وبشكل عام فإن الطرائق الجيوكهربائية تسمح بحل مسائل جيوهندسية كثيرة من أهمها :

1. وضع المقطع الجيوهندسي للصخور الرملية الغضارية .
2. إيجاد الطبقة الغطائية للصخور الصلبة المتوضعة تحت التوضعات الرخوة .
3. تحديد موقع الوديان النهرية القديمة .
4. تحديد سماكة الجزء الذي تعرض للتجوية من الصخور الصلبة .
5. تحديد أماكن المناطق المشققة ومناطق الفوالق التكتونية والحوامل المائية في الصخور المشققة .

أما الطرائق السيسمية التي تقوم على أساس الاختلاف في سرعة الأمواج الطولية والعرضية في مختلف الصخور فتستخدم في التطبيقات الجيوهندسية لحل المسائل التالية :

1) تحديد سماكة التوضعات الرخوة المتوضعة على الصخور الصلبة .
2) تحديد عمق توضع منسوب المياه الجوفية .
3) إظهار الفجوات الكارستية الكبيرة ومناطق التشققات والتحطيم التكتوني .
4) تعيين صفات المرونة للصخور وغير ذلك .

3-4- الاختبارات الحقلية للصخور :

حيث تتم دراسة الصخور في الظروف الحقلية وضمن ظروف توضعها المباشر وهذا يقلل كمية أعمال السبور وحجم الأعمال المخبرية وفي الكثير من الحالات تعطي هذه الاختبارات إمكانية تعيين خواص المتانة والتشوه وغيرها من الصفات بدقة أكبر منها في حالة الأعمال المخبرية وبشكل عام تستخدم هذه الاختبارات لدراسة :

1) نفوذية الصخور (اختبارات الضخ).
2) خواص التشوه للصخور الرملية – الغضارية (اختبارات الحمولة).
3) خواص المتانة وتقسيم المقاطع الجيولوجية (اختبارات القص والسبر).

3-5- الدراسات المخبرية لتركيب الصخور وصفاتها الفيزيامیكانيكية :

وتستخدم بشكل واسع في الحسابات الجيوهندسية وهي تعتبر الجزء الأساسي والهام في هذه الدراسات. فيتم في البداية أخذ العينات للدراسة من التكشفات الموجودة والآبار والحفر العمودية وغيرها من الحفر الاستكشافية. وتؤخذ العينات على كل الأعماق وبحوالي كل (0.5 – 1 متر تؤخذ عينة صخرية) وتعالج بالتفصيل الطبقة التي ستكون الأساس الحاصل للمنشأة المستقبلية. هذا وتؤخذ في الدراسات الجيوهندسية العينات الكتلية (أي تلك التي تحافظ على حالتها وبنيتها الطبيعية) ويتم الحصول عليها من جدران الحفر العمودية والتكشفات وهي تملك أشكالاً مكعبية

بأبعاد (10 X 10 X 10) و حتى (30 X 30 X 30) بينما تؤخذ من الآبار عينات كتلية اسطوانية بارتفاع من 20 – 30 سم .

وحسب العالم الروسي كالومينسكي تستخدم الدراسات المخبرية لحل المسائل التالية:

1. الدراسة الجيولوجية للصخور (التركيب الفلزي ، الكيميائي .. الخ) .
2. إيجاد المؤشرات التصنيفية للصفات الفيزيائية – التقنية .
3. تعيين المؤشرات الحسابية للصفات الفيزيائية – التقنية من أجل حساب ثبات ومتانة وطول عمر المنشأة الهندسية .
4. تعيين مؤشرات الصفات الفيزيائية – التقنية للصخور من أجل الاختيار الأمثل من أجل الحلول الجيوهندسية للانزلاقات والكارست وغيرها .

وبشكل عام تمكن الدراسات المخبرية من الحصول على معلومات هامة عن التركيب الحبي والصفات الفيزياميكانيكية تستخدم بشكل واسع في الحسابات الجيوهندسية كمؤشرات حسابية أو تصنيفية ، ومن أهم المؤشرات التصنيفية (التركيب الحبي ، عدد اللدونة ، مؤشر التراص ، مؤشر الانتفاخ ، درجة الإشباع .... إلخ) أما المؤشرات الحسابية فتشمل (الوزن الحجمي ، عامل الانضغاط ، معامل التشوه ، التماسك ، زاوية الاحتكاك الداخلي وغيرها) .

ويتم في المخبر تجريبياً تعيين التركيب الحبي والصفات الفيزيائية (الوزن الحجمي ، الكثافة ، الرطوبة الطبيعية ، الانتفاخ ، الانحلال ، عامل النفوذية) والصفات الميكانيكية (زاوية الاحتكاك الداخلي ، التماسك ، الانضغاط) بينما يتم تعيين بقية الصفات الأخرى بواسطة المعادلات الرياضية .

إن نوع وكمية التحاليل يتعلق بتركيب وخواص الصخور وكذلك بالغاية من الدراسة ودرجة تفصيلها .

وأخيراً فإن المعطيات الحقلية والمخبرية التي تتضمن معلومات عن الظروف الجيوهندسية تجري عليها معالجة مكتبية تتلخص بما يلي : وضع الخرائط والمقاطع الجيوهندسية ، المعالجة

الرياضية بما فيها النمذجة الرياضية على الحاسبات الالكترونية المتطورة للمعطيات مثل (مؤشرات الصفات الفيزياميكانيكية للصخور ، مؤشرات التشقق.... الخ) . النمذجة الرياضية للبارامترات الجيولوجية والعمليات الجيولوجية الخارجية بغية التنبؤ بها ، إجراء الحسابات الضرورية ، ونتيجة المعالجة المكتبية للمعطيات يتم وضع تقرير نهائي عن الدراسات الجيوهندسية يتألف من جزئين عام وخاص. يبدأ الجزء العام بمقدمة يبين فيها الهدف من الدراسة وتركيب وحجم الأعمال المنفذة ، موقع المنطقة ومدة الدراسة ، ثم تبدأ بعد ذلك مناقشة الظروف الفيزيوجغرافية والاقتصادية للمنطقة ، تاريخ الدراسات الجيولوجية لها ، البنية الجيولوجية والتركيب الليتولوجي للصخور ، الظروف التكتونية والجيومورفولوجية ، تاريخ التطور الجيولوجي، الظروف الهيدروجيولوجية ، الصفات الفيزياميكانيكية للصخور ، ظهور العمليات الجيولوجية.

أما الجزء الخاص فيوضح الوصف التفصيلي لمنطقة الإنشاء وتعرض فيه طريقة الدراسة كما توضح الظروف الجيوهندسية لمنطقة الإنشاء والتنبؤ بإمكانية تغيرها وكذلك تعرض الصفات الفيزياتقنية للصخور والحلول الجيوهندسية لزيادة ثبات المنشآت الهندسية المستقبلية. وفي الخاتمة يتم عرض أهم النتائج التي تم التوصل لها.

****

الدراسات الجيوهندسية من أجل إقامة المنشآت الهندسية المختلفة

تؤثر الظروف الطبيعية العادية بشكل متباين على ثبات واستثمار مختلف أنواع المنشآت (هيدروتقنية ، طرقية ، صناعية ، مدنية....الخ). ويتميز كل نوع من المنشآت بنمط معين ومتسلسل من الدراسات وحجم محدد من هذه الدراسات. فمثلاً في حالة المحطات الهيدروتقنية تحفر الآبار التقنية على أعماق تصل إلى بضعة مئات من الأمتار بينما في حالة غالبية المنشآت المدنية الأخرى لا يزيد عمقها من 10–20 متر.

وعند الدراسات الجيوهندسية يجب الحصول على المعلومات الجيولوجية الضرورية لتقدير مساحة البناء واختيار تصاميم المنشآت ونظام استثمارها.

وعند حل هذه المسائل تعتبر مسألة التنبؤ بالتأثيرات المتبادلة بين المنشأة والوسط المحيط من أهم الأشياء التي يجب تحديدها ، هذا ولكل نمط من المنشآت يتم إنشاء إدارة تحدد مهام وحجم وطبيعة ومضمون الدراسات الجيوهندسية.

1. مراحل التحريات الجيوهندسية :

تنجز التحريات التي يتم من خلالها الحصول على معلومات عن الظروف الجيوهندسية للمنشآت وفق عدة مراحل يختلف عددها باختلاف درجة تعقيد الظروف الجيوهندسية للمنطقة وبشكل عام تميز ثلاث مراحل أساسية للتحريات الجيوهندسية وهي :

1–1– المرحلة الأولى: وتسمى مرحلة الدراسة الفنية الاقتصادية وفي هذه المرحلة لا تنفذ الدراسات الجيوهندسية الحقلية إلا في حالات نادرة جداً وعادةً يتم فيها تجميع المعطيات العلمية والأرشيف عن الظروف الجيوهندسية للمنطقة وتجمع هذه المعطيات بهيئة تقرير جيولوجي مختصر يتضمن لمحة قصيرة عن تاريخ الدراسات الجيولوجية في هذه المنطقة ويعطى فيه تصور أولي عن الظروف الجيوهندسية لإقامة المنشأة المستقبلية. وتسمح الدراسات الجيوهندسية

في هذه المرحلة بإعطاء تحليل لظروف المنطقة عن مختلف الخيارات لأرض البناء مع النصح بالخيار الأفضل.

1-2- المرحلة الثانية : وتسمى مرحلة تصميم المشروع وفيها تنفذ تحريات ينبغي من خلاله أن نحصل على معطيات ضرورية لاختيار مكان البناء وتشمل التحريات هنا معظم أجزاء المنطقة أو بضعة أجزاء متنافسة كمواقع للبناء. وضمن طرائق الدراسات يحتل المسح الجيوهندسي والطرائق الجيوفيزيائية الدور الأساسي ، أي مجموعة الطرائق التي تعطي إمكانية التنفيذ السريع للدراسة على أراضي واسعة.

1-3- مرحلة المشروع الفني : وهي المرحلة الثالثة من التحريات وهنا تجري الدراسات على الجزء الذي تم اختياره لإقامة المنشأة وتشمل الأعمال التقنية والدراسات الحقلية للخواص الرشحية الفيزياميكانيكية للصخور (اختبارات الحمولة ، تجارب الضخ) ويجب أن تؤمن الدراسات هنا معطيات ضرورية لحساب الهبوطات وثبات المنشأة والحلول الجيوهندسية للحفاظ عليها.

هذا وتجري بعض الدراسات الجيوهندسية أثناء عملية بناء المنشآت الضخمة للحصول على معلومات تسمح بتدقيق التنبوءات بالظروف الجيوهندسية التي تم الحصول عليها في مرحلة التصميم.

2. الدراسات الجيوهندسية لبناء المنشآت الصناعية :

يتم تصميم المنشآت الصناعية غالباً على مرحلتين : في البداية يتم إعداد مخطط المشروع وعلى أساسة تتم معالجة مرحلة المشروع الفني. هذا وتنفذ تحريات إضافية ضرورية لتدقيق التحريات الأولية ولكن أحياناً في بعض المشاريع المنفصلة غير المعقدة يمكن أن تنجز التحريات بنفس الوقت لكلا المرحلتين معاً.

وتنسيق كل مرحلة من التصميم عادةً بالدراسة الجيوهندسية الخاصة بها فمرحلة تخطيط المشروع تسبق بدراسات تحضيرية ، أما مرحلة المشروع الفني فتسبق بدراسات تفصيلية.

2-1- الدراسات الجيوهندسية التمهيدية :

في الحالات التي تعتبر فيها هذه الدراسات ضرورية يتم في البداية انجاز أعمال جيوهندسية على مستوى الدراسة الفنية – الاقتصادية. ويكون الهدف الأساسي هو اختيار موقع البناء ثم تنفذ بعد ذلك عملية دراسة الموقع المختار. وفي الحالات التي يكون بها الموقع معطى مباشرة تنفذ الدراسات الجيوهندسية مباشرةً على الموقع.

2-1-1- الدراسات الجيوهندسية لاختيار الموقع :

ويدخل ضمن هذه المرحلة تجميع ودراسة وتحليل كل المعطيات المتوفرة (الجيولوجية والهيدروجيولوجية والجيومورفولوجية ....الخ.)عن المنطقة التي يقترح بها اختيار موقع البناء وتنفذ الدراسات الجيوهندسية لأرض الموقع في الظروف الحقلية وبمشاهدة التكشفات. وفي حالة قلة التكشفات الصخرية وأيضاً غياب المعلومات الجيولوجية عن المنطقة يتم حفر بئر أو بئرين في كل جزء متجانس جيومورفولوجياً بحيث لا يزيد عمق البئر عموماً عن 20-30 متر ويعطى انتباهاً كبيراً للمياه الجوفية ، فالأعمال يجب أن توضح الوضع الهيدروجيولوجي العام بما في ذلك نظام المياه الجوفية وظروف الإمداد بالمياه لأغراض الري والشرب وأخيراً يتم صياغة كل المعطيات التي يتم تجميعها عن المنطقة بشكل تقرير مع مقاطع جيولوجية وليتولوجية وأعمدة منفصلة وعلى أساس هذا التقرير يتم الاختيار النهائي لموقع المنشأة ضمن المنطقة المدروسة.

2-1-2- الدراسات الجيوهندسية على الموقع المختار:

وينجز العمل في هذه المرحلة بهدف التقييم العام للظروف الجيوهندسية للموقع المختار. ويدخل ضمن الدراسات المسح الجيوهندسي ، أعمال الحفر التنقيبية ، الدراسات الجيوفيزيائية ، أعمال الاختبارات الحقلية ، الأعمال المخبرية والمكتبية مع وضع التقرير الجيوهندسي وتبعاً لدرجة دراسة وصعوبة الظروف الجيوهندسية للمنطقة ينفذ المسح الجيوهندسي بمقياس 1/5000 وحتى 1/25000 وحسب الظروف الجيوهندسية لمنطقة البناء تقسم إلى ثلاثة أنواع:

1. المناطق ذات الظروف الجيوهندسية البسيطة: وتنسب إليها المناطق المؤلفة من طبقات متوضعة أفقياً وذات سماكة ثابتة ومتجانسة بتركيبها الليتولوجي وصخور الأساس في هذه المناطق جافة كما تغيب فيها الظواهر الفيزياجيولوجية مثل الكارست والانزلاقات وغيرها.
2. المناطق ذات الظروف الجيوهندسية المتوسطة التعقيد وتتوضع الصخور فيها بشكل عدسي وهي غير ثابتة السماكة وتكون رطبة في بعض الأحيان في أماكن توضع الأساس ويلاحظ في بعض أماكن هذه المناطق انتشاراً بعض الظواهر الفيزياجيولوجية .
3. المناطق ذات الظروف الجيوهندسية المعقدة. ويكون مقطعها الجيولوجي متغير جداً ويلاحظ تشوه التوضع كما تظهر في المقطع صخور عدسية وطبقة رقيقة مع قدرة تحمل قليلة وتتصف هذه المناطق أيضاً بظروف هيدروجيولوجية معقدة ، كما تنتشر الظواهر الفيزياجيولوجية بشكل واسع.

إن هذه الأوضاع تحدد بدرجة كبيرة حجم الأعمال المنفذة ، هذا ويترافق المسح الجيوهندسي كما ذكرنا أعلاه بمجموعة من الأعمال الأخرى.

فالأعمال التنقيبية يكون هدفها توضيح تركيب وسماكة الصخور وظروف توضعها ، فبواسطة هذه الأعمال يتم أخذ عينات صخرية ومائية ويحدد عمق توضع المياه الجوفية وكذلك تساعد هذه الحفر التنقيبية على إجراء الأعمال الاختبارية والمراقبة الثابتة أو المستقرة.

تتوزع الحفر التنقيبية على الموقع وفق شبكة أو مقاطع تنقيبية وتحدد المسافة بين حفرتين متجاورتين مع الأخذ بعين الاعتبار الظروف الجيومورفولوجية فإذا كانت المنطقة تمثل جزء من وادي نهري ينبغي تعيين الحفر الاستكشافية بمقاطع تقطع العناصر الجيومورفولوجية الأساسية حيث تقل المسافة بين 100 و300 متر. وفي حالة الظروف الجيوهندسية البسيطة والمنشآت العادية تخترق الحفر سماكة التوضعات السطحية حتى عمق 10 متر وفي بعض الحالات حتى 15- 20 متر ، أما إذا كانت الظروف الجيوهندسية معقدة فإن عدد الحفر التنقيبية العميقة

(حتى 20 – 30 متر) تزداد حتى 20–30 % من عددها العام (كما يتم أخذ عينات مضطربة مخربة البنية) بغية تأمين دراسة كل نماذج الصخور الموجودة في الموقع.

هذا وعندما تكون مقاسات وأحجام المواقع المدروسة كبيرة فإن تقسيم وتمييز مختلف التوضعات الليتولوجية وتعين أعماق توضع المياه الجوفية. يتم بمساعدة الطرائق الجيوفيزيائية (وخصوصاً الجيوكهربائية والسيسمية).

وتستخدم الاختبارات الحقلية بشكل واسع حيث يتم بواسطتها تعيين قابلية الصخور للانضغاط تحت تأثير الحمولة ، كثافة التوضعات الرملية والغضارية ، مقاومه الصخور للقص وغير ذلك كما يتم بواسطة هذه الاختبارات تعيين خواص الصخور الرشحية واتجاه سرعة الجريانات المائية الحدية ومقدار تغير مناسيب المياه.

وأخيراً فإن كل معطيات الدراسة يتم تحليلها وتمثيلها بتقرير جيولوجي هندسي مع خريطة بالمعطيات المتوفرة لمنطقة البناء بمقياس 1/25000 ـ 1/10000 توضح حدود الموقع المدروس عليها وأيضاً خرائط جيوهندسية ومقاطع وأعمدة للحفر التنقيبية وجدول بمؤشرات الصخور والمياه الجوفية ومنحنيات بيانية لنتائج الرصد ومصور الظروف الطبيعية. ويعطي هذا التقرير تقييم كبير للظروف الجيوهندسية للموقع مع الأخذ بعين الاعتبار خصائص الأبنية والمنشآت المستقبيلة. وفي كثير من الحالات تتصف المواقع المقترحة للإنشاء بظروف طبيعية معقدة مما يستوجب إجراء أعمال إضافية يتعلق حجمها ومضمونها بظروف منطقة الإنشاء وتنتسب إلى مثل هذه الظروف مناطق انتشار الزلازل والكارست وانزلاقات وغيرها.

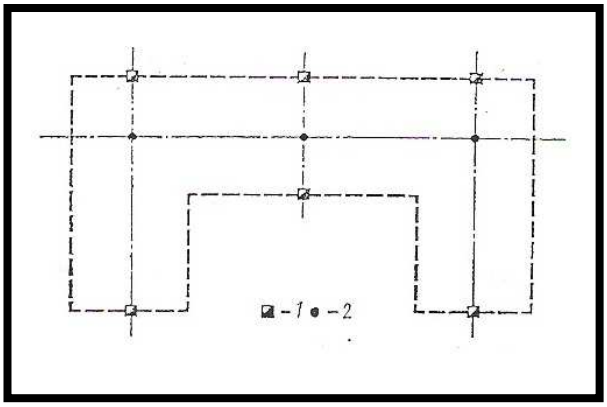
2–2– الدراسات الجيوهندسية التفصيلية:

تنفذ الدراسات الجيوهندسية التفصيلية وفق مرحلة مشتركة من التخطيط :

مرحلة تصميم المشروع ومرحلة المشروع الفني وتهدف هذه الدراسات إلى تدقيق وتحليل المعطيات الجيوهندسية التي تم الحصول عليها في مرحلة الدراسات التمهيدية. إن النوع الأساسي في هذه المرحلة هو الحفر التنقيبية والاختبارات الحقلية.

تتوزع الحفر التنقيبية وفقاً لتوزع الأساسات (بالمحيط أو بمحاور الأبنية) ، الشكل /1/ ويتعلق عدد الحفر التنقيبية والمسافة بينهما بمجموعة من العوامل من ضمنها طابقية المبنى (عدد الطوابق) وتعقيد البنية الجيولوجية لموقع المنشأة المستقبلية وبشكل عام تتراوح المسافة بين الحفر التنقيبية بين 20 و 100 متر ، أما عمق الحفر التنقيبية فيتعلق بخصائص البنية الجيولوجية فعند عمق قليل لتوضع الصخور الصلبة يجب أن تخترق الحفر من (0,5) وحتى (1) متر من هذه الصخور وفي الحالة العامة عندما يكون موقع البناء مؤلف من تشكيلات متجانسة بدرجة كبيرة أو قليلة التجانس ومتماسكة لدرجة ما (صخور غضارية وغضارية رملية) فإن عمق هذه الحفر يؤخذ بشكل يساوي مرة ونصف أو مرتين من عرض الأساس ولكن على العموم ليس بأقل من 6–8 متر وفي حالة ظروف أكثر تعقيداً يؤخذ عمق هذه الحفر حتى 20–25 متر وأكثر.

أما في الأجزاء التي تنتشر فيها صخور رخوة (صخور مشبعة بالماء) رمال ، أوحال .....الخ فالآبار يجب أن تبلغها وتخترق 2–3 متر من الصخور التي يحتمل أن تكون أساساً مأمولاً.



الشكل (1) : توزع الحفر الاستكشافية عند دراسة منطقة بناء مدروسة

1. الحفر العمودية ، 2. الآبار

ويتم بواسطة الحفر التنقيبية وضع مقاطع جيولوجية وأخذ عينات للدراسة المخبرية والحصول على أهم المؤشرات اللازمة للتصميم ، أما الاختبارات الجيوهندسية الحقلية فتتم فقط تحت المنشآت الأكثر أهمية ويعتبر هدفها تدقيق مؤشرات المتانة والتشوه للصخور ضمن مجال البناء.

هذا وتنتهي الدراسات التفصيلية بوضع تقرير يتضمن معلومات وافية عن صخور الأساس لبعض الأبنية والمنشآت وعدوانية المياه وفي هذا التقرير يتم تقديم بعض الحلول الجيوهندسية للحفاظ على صخور الأساس وعلى الأبنية والمنشآت في مرحلتي بنائها واستثمارها.

****

الفصل التاسع

توازن المنحدرات والحلول الجيوهندسية للحفاظ على استقرارها

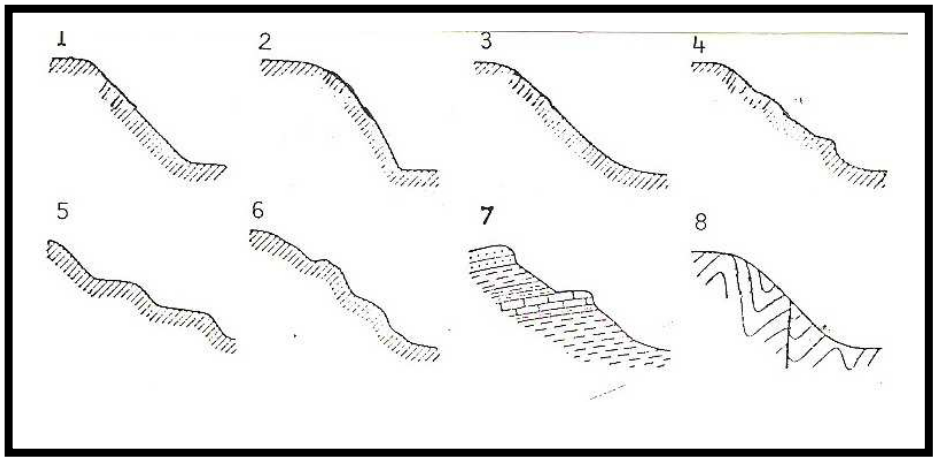
1. مفاهيم عامة:

تدعى بالمنحدرات تلك الأجزاء من القشرة الأرضية التي تمتاز بزوايا انحدار كبيرة نسبياً لا تقل عادةً عن درجتين ويستثنى من ذلك أجزاء القشرة الأرضية التي تكون قاع الأودية والمساحات من الشواطئ البحرية التي تتحرك عليها الأمواج وذلك مهما كانت زوايا انحدارها.

تتحدد المنحدرات في أجزائها العلوية بالخطوط المائية (الفواصل المائية) أو بخطوط حجب الرؤية أو بنقاط قمم الجبال ، أما في أجزائها السفلية فيتم تحديدها بخطوط قاعدة المنحدر حيث تصبح زاوية الانحدار أقل من درجتين.

إن مورفولوجيا المنحدرات متعددة ومتنوعة جداً وهي تتحدد من خلال عدة عوامل أهمها العمليات المشكلة للرليف ، والبنية الجيولوجية والحركات التكتونية وكذلك الظروف الفيزيوجغرافية (نوع الريليف ، المناخ ، الغطاء النباتي) التي تلعب دوراً كبيراً في عملية تطور المنحدرات ، إذ أن هذه الظروف تحدد نوعية التأثير للعمليات الجيولوجية الخارجية على المكونات الصخرية للمنحدرات . هذا ويظهر الشكل/1/ الأنواع المورفولوجية المختلفة لبروفيلات المنحدرات وتعتبر الأشكال الأساسية لبروفيلات المنحدرات هي المستقيمة والقببية والمنحنية (1، 2، 3) من الشكل /1/ ، ويعطي اجتماع الأشكال الأساسية مع بعضها البعض الأنواع المورفولوجية الأخرى للمنحدرات (4، 5، 6، 7، 8) من الشكل /1/.

وتتصف المنحدرات بالإضافة إلى تنوع مورفولوجيتها بمجموعة من المقاسات الهندسية التي تستخدم في وصف المنحدرات وتمييزها عن بعضها البعض ومن أهمها زاوية الانحدار التي تعتبر من أهم العوامل التي تعتمد أثناء وصف المنحدرات ويوجد عدة تصانيف للمنحدرات تعتمد على التمييز بين زوايا انحدارها ، وسنورد هنا تصنيف العالم الروسي نيكولايف بشكله المبسط ، الجدول/1/



الشكل (1) : الأنواع المورفولوجية المختلفة للمنحدرات

1. المستقيمة ، 2. القببية ، 3. المنحنية ، 4. متدرجة ، 5. ريليف شكل شرفات ، 6. ريليف معقد ، 7. بنيوية ، 8. منحدرات بنيوية معاكسة

الجدول (1) : تصنيف المنحدرات حسب زاوية الانحدار

نوع المنحدر	زاوية الانحدار (α°)
معتدل جداً	6 – 2
معتدل	15 – 6
متوسط الانحدار	30 – 25
منحدر	45 – 30
منحدر جداً	60 – 45
جروف	80 – 60
شاقولي (رأسي)	90 – 80
معلق	أكبر من 90

2. حركة الكتل الصخرية على المنحدرات :

2-1- المظاهر الأساسية للحركة : يمكن للمنحدرات أن تكون طبيعية حيث تتشكل بفعل القوى الديناميكية الداخلية أو الخارجية للأرض كما يمكن لها أن تكون اصطناعية عندما يكون تشكلها مرتبطا بالنشاط الهندسي للإنسان وينسب للمنحدرات الاصطناعية سفوح الجسور والسدود والحفر وجوانب المقالع ... ومن أجل شروط محددة فإن الكتل الصخرية المكونة للمنحدرات أو للسفوح تفقد توازنها وتتحرك نحو الأسفل ويميز ثلاثة مظاهر أساسية لحركة الكتل الصخرية هي: الانهيارات السريعة (الانهيالات) والانهيارات البطيئة والانزلاقات.

2-1- 1- الانهيارات السريعة (الانهيالات) :

يقصد بالانهيالات الصخرية تحطم الكتل الصخرية الضخمة وهي تحدث بشكل مفاجئ وتترافق مع تحطم الكتل الصخرية المقتطعة أثناء سقوطها باتجاه أسفل المنحدر.

وأثناء الانهيالات تقطع الكتلة الأساسية للكتل الصخرية المنهالة جزء من الطريق على هيئة سقوط حر وتكتسب الكتل المنهالة حركة انزياحية قد تصل سرعتها إلى 150 م/ثا في الجزء السفلي من المنحدر.

تنشأ الانهيالات الصخرية على المنحدرات التي تزيد زاوية انحدارها عن 25-30 درجة ويلاحظ ذلك عادةً في المناطق الجبلية حيث المستويات الصخرية تجتمع وتتوضع في الطيات بزوايا ميل مختلفة ومن الأسباب الهامة لنشوء الانهيالات الصخرية تشقق الصخور المكونة للمنحدر وحركة الكتل الجليدية والثلجية بالإضافة إلى أسباب أخرى. ومن أجل شروط محددة يميز بالاستناد إلى درجة الانحدار عدة أنواع للمنحدرات هي:

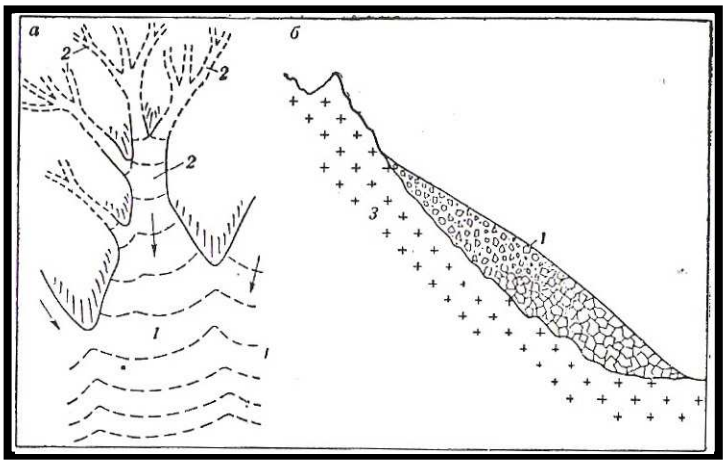
منحدرات خطرة وذلك عندما يمكن للانهيالات الصخرية أن تحدث في صخور جافة ، ومنحدرات عادية حيث تنشأ الانهيالات فقط عند تواجد حوامل مائية بين الطبقات ومنحدرات غير خطرة حيث أن الانهيالات لا تنشأ على هذه المنحدرات حتى في حالة تواجد الحوامل المائية بين الطبقات ، وتحدث الانهيالات الصخرية بفعل الصدمة المتولدة عن الظواهر الجوية (العواصف،

الصواعق، الأمطار الغزيرة) أو الهزات الأرضية. وتعتبر الخاصة المميزة للانهيالات هي دوران وانقلاب الكتل الصخرية المتحركة وتنتهي عمليات الانهيالات الصخرية بحوادث تتضمن خسائر مادية وبشرية.

2-1-2 الانهيارات :

إن تطور عمليات الانهيار أبطأ بكثير من تطور عمليات الانهيال لكنها أكثر انتشاراً ومصادفة من هذه الأخيرة. وتعتبر الانهيارات عنصراً مميزاً للأراضي الجبلية ويقصد بعمليات الانهيارات الصخرية تجمع الكتل الصخرية المتدحرجة وفق سطح المنحدر بفعل عامل الجاذبية الأرضية في أسفل المنحدر.

هذا و إن أهم الظروف لتشكل الانهيارات الصخرية هي الانحدار الشديد لسطح الأرض ووفرة تكشفات الصخور الأم وسيطرة طقس جاف أو جليدي مع وفرة تجمع نواتج التجوية الحصوية والحصبائية. وتعتبر الانهيارات صفة مميزة للنطاقات الجبلية المرتفعة حيث أنه في هذه النطاقات لا تثبت نواتج التجوية من قبل الغطاء النباتي وعندما تتدحرج القطع الصخرية وفق اتجاه الانحدار تتركز وتتجمع بالتدريج في الأودية المعامدة لاتجاه الانحدار وتؤدي بحد ذاتها عملاً تهديمياً يسبب ازدياد عمق الأودية مشكلة ما يشبه المجاري المائية الصغيرة. ومع اجتماع المواد المنهارة مع بعضها تعطي في الجزء السفلي من المنحدر توضعات ذات حجوم أكبر فأكبر ، الشكل /2/ ، والكتل الصخرية التي تصل إلى الأجزاء اللطيفة الانحدار من المنحدر تجتمع مع بعضها مكونة ما يسمى بجسم الانهيار.



الشكل (2) : مخطط يظهر الانهيار .. a : في المستوي ، b : في المقطع

ترتبط حركة الكتل الصخرية نحو الأسفل بالإضافة إلى زاوية انحدار سطح المنحدر بعوامل أخرى منها شكل وحجم الكتل الصخرية فتكون الكتل الصخرية الكروية أو شبه الكروية أكثر وأسهل وأسرع حركة من الكتل المستوية أو شبه المستوية ، أما تأثير حجم الكتل الصخرية فيكون أكثر تعقيداً. فالكتل الكبيرة تبدأ بالحركة فقط في حالة المنحدرات الشديدة الانحدار ولكن بسبب امتلاكها لعطالة كبيرة فهي تتدحرج لمسافة أطول من الكتل الصغيرة الحجم ، وإضافةً لما سبق يؤثر على حركة الكتل درجة رطوبة المواد والبنية وخواص الصخور المكونة للمنحدر.

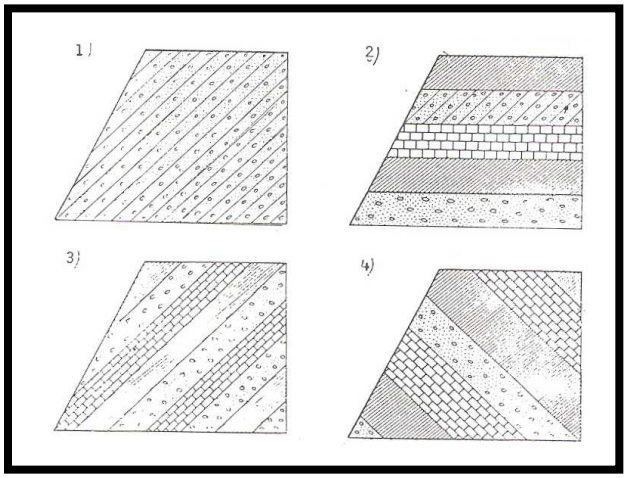
2-1-3- الانزلاقات :

وهي عملية زحف الكتل الصخرية على سطح المنحدر وفق مستوي غضاري عالي الرطوبة وتحت تأثير قوى الثقالة الأرضية. وكقاعدة عامة تتميز عمليات الانزلاق باختفاء عملية دوران وتدحرج الكتل الصخرية المتحركة ، إذ أن معظم نقاط الكتل الصخرية تتحرك ملامسة لسطح الانزلاق إلا أنه يلاحظ أحياناً في سلسلة الانزلاقات تواجد شيء من الدوران الذي يولده ما يسمى بتراجع في مقدمه الانزلاق إلى الوراء.

هذا ويمكن أن تنتقل الكتل المنزلقة من أجل ظروف جيولوجية وهيدروجيولوجية وجيوهندسية محددة بسهولة إلى حالتي الانهيال والانهيار.

إن الأشكال الثلاثة للحركة التي تم استعراضها تمثل الحالات العامة لحركة الكتل الصخرية على المنحدرات. ويتم تحريك الكتل الصخرية على المنحدرات نتيجة لما يسمى بفقدان توازن توضع تلك الكتل الصخرية في أماكنها الطبيعية.

وتعتبر بنية المنحدر من أهم العوامل التي تحدد ثبات وتوازن هذا المنحدر وكذلك طبيعة الحركة الممكنة عليه وشكل هذه الحركة. ويمكن أن تكون المنحدرات بدرجة أو بأخرى مؤلفة من كتلة متجانسة أو من طبقات صخرية مختلفة التركيب والخواص وذات سطوح تطبق (سطوح تماس فيما بينها) واضحة. كذلك يمكن أن تكون الطبقات الصخرية المكونة للمنحدرات أفقية التوضع وذات امتدادات أفقية ومستوية أو يمكن أن تكون متوضعة بزوايا ميل وفي هذه الحالة يتوافق اتجاه ميل الطبقات مع اتجاه ميل المنحدر أو قد يكون معاكساً لاتجاه ميل هذا المنحدر. الشكل /3/ .



الشكل (3) : أشكال المنحدرات حسب الطبقات المكونة لها

1. منحدر يتكون من كتلة صخرية متجانسة ، 2. منحدر يتكون من طبقات أفقية التوضع ، 3. منحدر يتكون من طبقات مائلة اتجاه ميلها يوافق اتجاه ميل المنحدر ، 4. منحدر يتكون من طبقات مائلة اتجاه ميلها غير متوافق مع اتجاه ميل المنحدر

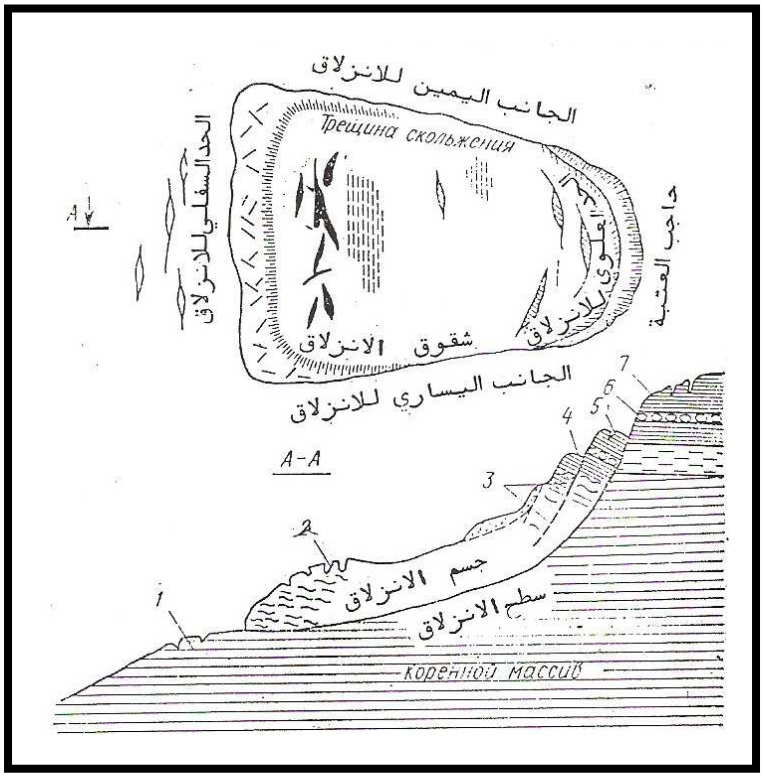
2-2- عناصر الكتل الصخرية المتحركة على المنحدرات:

تسمى الكتل الصخرية التي تتحرك أثناء عملية الانزلاق بجسم الانزلاق ويدعى السطح الذي تحدث وفقه الحركة بسطح الانزلاق. وبالمقارنة مع مفهوم مجرى الجليديات يقترح العالم (KHOPPE) تسمية سطح الانزلاق بمجرى الانزلاق. وعند ذلك وبالنظر إلى توضع الانزلاق بشكل كامل وفق حركته من الأعلى نحو الأسفل وتظهر مفاهيم جوانب الانزلاقات اليمينية واليسارية وكذلك حدوده العلوية والسفلية.

ويسمى الجزء من سطح الانزلاق المتوضع إلى الأعلى من جسم الانزلاق على هيئة عتبة والملاحظ بشكل جيد بعد قطع الصخور المتحركة لمسافة ما بعتبة الانزلاق.

ويسمى الحد العلوي لعتبة الانزلاق بحاجب العتبة ، والمساحة المتشكلة نتيجة حركة وانزياح جزء المنحدر تسمى بدرجة الانزلاق.

وهناك من يسمي هذه المساحة بمصطبة الانزلاق ، إلا أن هذا ليس صحيحاً دائماً وذلك لأنه بمصطبة الانزلاق يجب أن تعين مكان تجمع الكتل المتحركة والتي تتشكل في أسفل المنحدر بنتيجة تجمع نواتج تحطيم مكونات المنحدر وانزلاقها إلى الأسفل. ويشير العالم (M.E. KHOPPE) إلى أنه من الصعب جداً تمييز مصطبة تجمع الانزلاق عند التوضعات النهرية بواسطة المظهر الخارجي ، ويسمى التعمق في سطح المنحدر والمتكون بعد انزياح جسم الانزلاق بأخدود الانزلاق ويظهر الشكل /4/ بنية الانزلاق وعناصره الأساسية.



الشكل (4) : مخطط يظهر بنية الانزلاق وعناصره الأساسية

1. تشوه المنحدر الأساسي ، 2. شقوق الانتفاخ ، 3. مرآة الانزلاق ، 4. مصطبة الانزلاق ، 5. شقوق الانفصال ، 6. حائط العتبة ، 7. حاجب الفلق

2-3- عناصر حركة الكتل الصخرية المتحركة على المنحدرات:

إن حركة وانزياح الكتل الصخرية على شكل انهيارات يتم عادةً بشكل مفاجئ وينتهي الحدث بسرعة كبيرة بينما حركة الكتل الصخرية على شكل انزلاقات تتم بصورة بطيئة. هذا وإن المنحدر الذي تجري عليه عملية الانزلاق يمكن أن يقع بمراحل مختلفة للحركة. ففي البداية يقع المنحدر في مرحلة التحضير للحركة وهذه المرحلة تتمثل بازدياد القوى الكامنة المتولدة عن تأثير القوى الطبيعية أو الاصطناعية على الصخور المكونة للمنحدر والتي تؤدي إلى تحريض أو نشوء حركة هذه الكتل الصخرية ثم تبدأ مرحلة الحركة وزمن الاستقرار وتخامد الحركة. وبعد ذلك

تكتسب الكتل الصخرية وضعية جديدة من التوازن وكذلك فإن سطح الغلق سوف يصبح متوازناً وتنتهي عملية الانزلاق بمرحلة اكتساب وسيطرة التوازن العام للمنحدر والكتل الصخرية المتحركة. وفي حالات منفردة فإن العوامل الطبيعية أو الاصطناعية المولدة لظاهرة الانزلاق يمكن أن تتوقف عن التأثير كأن تتغير ظروف التجوية أو التآكل أو الاحتكاك أو حركة المياه الجوفية أو غير ذلك من العوامل التي تولد حركة الكتل الصخرية على المنحدرات وعندها فإن عملية الانزلاق سوف تتوقف وتنتهي. وعندما يكون الوضع الجيولوجي الجديد لا يسمح لعملية الانزلاق باستعادة نشاطها فإن مثل هذه الانزلاقات تسمى بالانزلاقات القديمة جداً وفي الحالات التي تغطى فيها الكتل الصخرية المنزلقة بتوضعات لاحقة فإن الانزلاقات القديمة تسمى عندها بالانزلاقات المدفونة أما إذا كانت الظروف الجيولوجية على النحو الذي يسمح للعوامل المؤثرة على عملية الانزلاق بالنشاط مرة ثانية ونقل الانزلاق إلى حالة الحركة تسمى عندها الانزلاقات وبالتمييز عن الانزلاقات القديمة.

3. ثبات وتوازن المنحدرات:

تتثبت الأشياء أو تنعدم حركتها نسبياً في الحالة العامة عندما تساوي القوى المؤثرة عليها أي عندما تتساوى القوى المولدة للحركة مع القوى الكابحة لهذه الحركة. والمنحدرات مثلها كمثل مختلف الأشياء تتمتع خلال مراحل تطورها بمراحل من التوازن بين القوى المؤثرة على الصخور المكونة لها ضمن شروط توضعها الجيولوجي ، وفي مثل هذه المراحل فإن الكتل الصخرية المكونة للمنحدرات تتوقف عن الحركة نسبياً في الحالة العامة إلا أن هذا التوازن قد لا يستمر ضمن الشروط الجيولوجية المختلفة وتغيراتها مما يؤدي إلى نشوء الحركة من جديد فما هي الأسباب التي تؤدي إلى عدم استقرار أو فقدان توازن المكونات الصخرية للمنحدرات وما هي شروط توازن هذه المنحدرات.

3-1- أسباب فقدان توازن المنحدرات:

يعود فقدان المنحدرات لتوازنها إلى عدة أسباب مختلفة يحرضها الانحدار الكبير لسطح المنحدر. ومن أهم هذه الأسباب يمكن أن نذكر العمليات التكتونية ، عمليات التجوية ، فعالية المياه السطحية والجوفية والنشاط الهندسي للإنشاءات.

3-1-1- العمليات التكتونية:

تؤدي العمليات التكتونية إلى حدوث تغيرات على درجة من الأهمية في بنية المنحدر ويظهر ذلك جلياً من خلال تشقق الصخور الصلبة المكونة للمنحدر. وتؤدي الانقطاعات وخلخلة الروابط البنيوية بين الصخور المنفردة (المعزولة) إلى نشوء ضرورة توازن كل كتلة صخرية. وفي مثل هذه الظروف وبحالة توفر زاوية انحدار لسطح المنحدر كبيرة نسبياً أو توضع سطوح التطبق بالتوافق مع اتجاه انحدار المنحدر فإن الكتل الصخرية المنفردة يمكن أن تقع في حالة عدم التوازن ومثل هذه الكتل سوف تنزلق وتتحرك نحو الأسفل وفق سطح التطبق مشكلةً ما يسمى بالانزلاق أو يمكن لهذه الكتل أن تتحرك وفق منظومة الشقوق والتشوهات التكتونية مشكلةً ما يسمى بالانهيال.

3-1-2- عمليات التجوية:

تؤدي عمليات التجوية الفيزيائية والكيميائية إلى تحويل الصخور المكونة للمنحدرات من صخور صلبة إلى صخور طرية أو أقل صلابة وينجم عن ذلك اختلال الروابط البنيوية بين نواتج التجوية والصخور الأم ، وفي حالة انحدار سطح المنحدر بزاوية حوالي 10-12 فإن نواتج التجوية تتحرك نحو الأسفل مشكلة ما يسمى بالانهيار.

3-1-3- المياه السطحية:

تقوم مياه البحار والبحيرات والأنهار المتواجدة بتماس مباشر مع أسفل المنحدرات بغسل وحت المنحدرات من أسفلها ونتيجةً لهذا الحت والغسل المتتابع تتشكل في أسفل المنحدرات منخفضات وتصبح الصخور المكونة للمنحدر معلقة فوقها وعندما يصل عمق المقعرات المتشكلة في أسفل

المنحدرات كافياً تأخذ الصخور المكونة للمنحدرات بالتشقق والانقطاع عن بعضها ومن ثم تتحرك الكتل الصخرية المقتلعة نحو الأسفل.

3-1-4- المياه الجوفية:

يكون تأثير المياه الجوفية في حالة فقدان المنحدرات لتوازنها مختلف جداً ففي حالة جريان المياه الجوفية فوق الطبقة السفلية (القاعدية) للمنحدر فإن تيار المياه الجاري يمكن أن يكون سبباً مباشراً لحل ونقل الجزئيات الصخرية لهذه الطبقة القاعدية ونتيجةً ذلك فإن هذه الطبقة تفقد صلابتها وتصبح أكثر طراوة (حيث تكتسب مسامية كبيرة) وتتضغط تحت تأثير وزن الطبقات الصخرية المتوضعة فوقها. ويؤدي هبوط الطبقات الصخرية العليا تحت تأثير نقصان سماكة الطبقة السفلى بفعل الانضغاط إلى ظهور شقوق الغلق والانقطاع ضمن هذه الصخور وهكذا يتشكل انزلاق اعتيادي ذو منشأ انحلالي.

وفي حالة كون الطبقة القاعدية (السفلى) مكونة من صخور غضارية فإن إشباع هذه الصخور بالمياه يؤدي إلى ازدياد لدونتها. هذا وإن تغير درجة صلابة الصخور الغضارية إلى انضغاطها تحت تأثير وزن الطبقات الصخرية المتوضعة فوقها. ويؤدي نقصان حجم الطبقة المنضغطة إلى هبوط الطبقات الصخرية المتوضعة فوقها وتشكل انزلاقات الانضغاط ويؤدي إشباع الصخور الغضارية المكونة للمنحدر بالمياه السطحية أو الجوفية إلى انتقال هذه الصخور من صخور صلبة متماسكة إلى صخور لدنة. وعندما تصبح هذه الأخيرة لدنة لدرجة كافية فإنها سوف تتحرك وفق سطح المنحدر مشكلة ما يعرف بالانزلاقات العائمة أو السابحة.

3-1-5- النشاط الهندسي للإنسان:

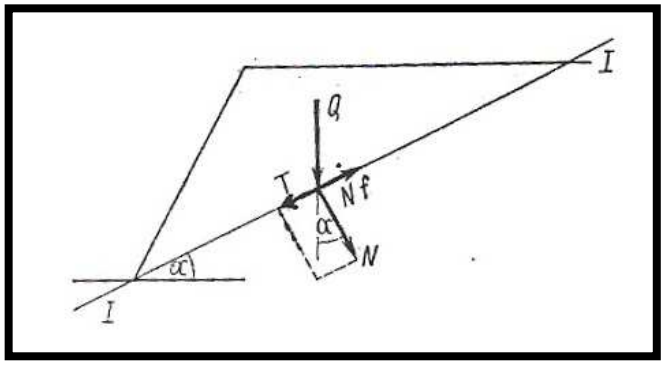
يؤثر النشاط الهندسي للإنسان أيضاً في عمليات تشكل الانزلاقات فإنشاء الحفر والمناجم يؤدي إلى تشكل منحدرات اصطناعية يخضع توازنها لنفس شروط توازن المنحدرات الطبيعية. وفي مثل هذه الحالة فإن الأعمال التي تهدف إلى تغير في الشروط الهيدروجيولوجية الطبيعية (التجفيف على سبيل المثال وغيره) يمكن لها أن تؤدي إلى تغير في شروط توازن المنحدر. كذلك فإن

السفوح الاصطناعية والسدود والجسور يمكن أن تقع في حالة عدم توازن. فعلى سبيل المثال يمكن أن يؤدي اقتطاع السفوح الطبيعية أثناء تنفيذ عمليات شق الطرقات إلى تنشيط الانزقالات المدفونة. وفي جميع الحالات السابقة من النشاط الهندسي للإنسان سوف تظهر عمليات الانزلاق المشابهة لحالات الانزلاق الطبيعية هذا وفي معظم الحالات يشترط في أساس تشكل الانزلاقات مجموعة من العوامل التي تعمل متضافرة مع بعضها البعض.

3-2- شروط توازن المنحدرات:

مهما تكن أسباب فقدان المنحدرات لتوازنها فإن حركة الكتل الصخرية تتم بصورة أساسية بفعل عامل الثقالة الأرضية وبالتالي وفي حالات كثيرة فإن شروط توازن المنحدرات يمكن أن تتحدد من خلال قواعد علم الميكانيك. وتوجد طرائق كثيرة من أجل حساب توازن المنحدرات. إلا أن جميع هذه الطرائق تعتمد في أساسها على شروط التوازن التي يتم تحديدها من مخططات توزع القوى المؤثرة على المنحدر.

وسنعمل على دراسة وتحديد شروط توازن المنحدرات من خلال دراسة وتحديد شروط توازن منحدر ما ، الشكل /5/.



الشكل (5) : مخطط القوى المؤثرة على مستوى الانزلاق

ومن أجل ذلك نرسم مستوي (I-I) ينطبق على سطح الانزلاق حيث أن قوة ثقالة الجزء المقتطع تساوي إلى (Q). إن قوة الثقالة المؤثرة شاقولية وبالنسبة للمستوي (I-I) يجب أن تتوزع إلى قوتين:

قوة مماسية : $T = Q \sin \alpha$ ، وأخرى شاقولية (ناظمة على سطح الانزلاق) $N = Q \cos \alpha$ تؤدي القوة (T) إلى تحريك الكتلة الصخرية وفق المستوي (I–I) ، أما القوة (N) فسوف تولد قوة احتكاك (N_F) تعيق حركة الكتلة الصخرية وبالإضافة لذلك تعاق الحركة أيضاً من قبل قوة التماسك بين الصخور (C) والمؤثرة في المستوي (I–I) على كل مساحته وهذه القوة تساوي (F).

إذا كانت زاوية انحدار سطح الانزلاق (α) تمتلك القيمة (α_{ak}) المكافئة لحالة التوازن الحدية فإنه يمكن كتابة التوازن الحدي:

$$\mathbf{Nf + Cf - T = 0} \qquad \mathbf{(1)}$$

$$\mathbf{T = Nf + Cf} \qquad \text{أو}$$

حيث أن (F) هو عامل الاحتكاك الداخلي الذي يتعلق بنوعية الصخور.

إن المعادلات التي تم الحصول عليها (السابقة) يمكن إعادة تشكيلها أي كتابتها وفق المتحولات الداخلية فيها (**Nf أو Cf**) .

قوة الضغط الشاقولي على واحدة المساحة من الانزلاق (جهد الانضغاط):

$$\mathbf{\sigma = N / F = Q\ COS\ \alpha_{kp} / F} \qquad \mathbf{(2)}$$

جهد النقل على واحدة مساحة الانزياح (جهد الانزياح):

$$\mathbf{\tau = T / F = Q\ SIN\ \alpha_{kp} / F} \qquad \mathbf{(3)}$$

القيمة الحدية للزاوية (α) والتي من أجلها تبدأ حالة التوازن الحديدية تسمى بزاوية الانزياح (Ψ) ومع الأخذ بعين الاعتبار المعادلات السابقة فإن معادلات التوازن الحدي تمتلك الشكل التالي:

$$\mathbf{Tg\ \Psi = tg\ \phi + c/\sigma} \qquad \mathbf{(4)}$$

$$\mathbf{\tau = \sigma\ tg\ \phi + c}$$

حيث (ϕ) هي زاوية الاحتكاك الداخلي.

من المعادلة (4) التي تم الحصول عليها نلاحظ بأن زاوية الانزياح (Ψ) عبارة عن قيمة متحولة تتعلق قيمتها بقيمة الضغط الناظمي (الشاقولي) على سطح الانزياح وبالتالي فإن سطح

الانزياح يكون عبارة عن سطح منحني يتحول إلى سطح مستوي فقط في حالة انعدام قوى التماسك بين الصخور. إذا وضعنا في المعادلة (4) مكان القيمة ($\Psi = \alpha_{kp}$) أي قيمة أخرى للزاوية (α) فإنه يمكن إنشاء سلسلة من السطوح التي تمر عبر قاعدة المنحدر وبذلك فمن الواضح بأن المنحدرات المتشكلة من تلك التي تميل بزاوية $\alpha < \alpha_{kp}$ سوف تكون متوازنة أما المنحدرات المتشكلة من السطوح التي تميل بزاوية ($\alpha > \alpha_{kp}$) فسوف تكون فاقدة التوازن وبالتالي فإن زاوية الانزياح ($\Psi = \alpha_{kp}$) يمكن تسميتها بالزاوية الحدية لتوازن السفوح أو المنحدرات وسطح المنحدر المكافئ لهذه الزاوية يسمى بالسطح الحدي.

4. الحلول الجيوهندسية للحفاظ على استقرار المنحدرات:

تدرج عمليات حركة الكتل الصخرية على المنحدرات ضمن قائمة الأخطار على الأبنية والمنشآت في مرحلة بنائها وكذلك في مرحلة استثمارها.

وكل نوع من أنواع انتقال الكتل الصخرية وضمن شروط جيوهندسية محددة يستدعي ضرورة القيام بمجموعة من الإجراءات التي تكافئ وبدقة شروط الانزلاقات. وكقاعدة عامة فإن جميع الإجراءات التي تتخذ للحماية من الكتل الصخرية المتحركة على المنحدرات يجب أن تتوجه باتجاه إزالة تأثير الأسباب التي تؤدي إلى عملية الحركة. يمكن أن تقسم جميع المنحدرات الانزلاقية إلى ثلاث مجموعات أساسية:

1) سفوح اصطناعية (حفر، مناجم ، مقالع).
2) منحدرات طبيعية تتم الحركة عليها على هيئة زحف حر للبلوكات الصخرية.
3) منحدرات طبيعية ذات انزلاقات تتم بواسطة قوى دفع وهي تنشأ في البداية في الجزء الأعلى من المنحدر. على سبيل المثال من جراء زيادة الضغط أو تشكل شقوق الانقطاع والكتل الصخرية المقتطعة والمتحركة نحو الأسفل تدفع الصخور المتوضعة أسفل منها على المنحدر.

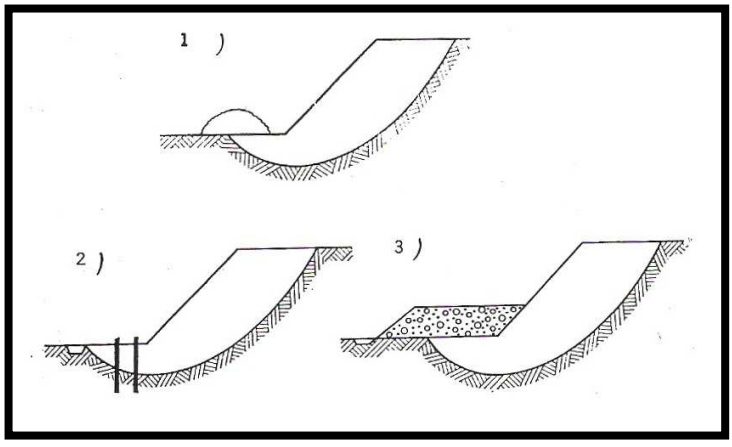
إن كل مجموعة من هذه المجموعات الثلاث الآنفة الذكر تتطلب إجراءات خاصة بها تصلح فقط من أجل المنحدر المعني وبدوره ضمن كل مجموعة من هذه المجموعات يجب الانطلاق من نوع الانزلاق:

أ- هل يتشكل نتيجة عملية غسل الجزئيات الصخرية الرقيقة بفعل المياه الجوفية التي تخرج على المنحدرات بشكل ينابيع مؤدية بذلك إلى إضعاف توازن التوضعات الصخرية فوقها.

ب- أو هل يتم الانزلاق وفق مستوي التطبق المائل أو السطح الفاصل بين الطبقات.

ت- وأخيراً هل سيتشكل الانزلاق نتيجة حركة كتل صخرية منفردة أو مقطوعة من البلوكات الصخرية من المنحدر حيث أنه يتم الحفاظ على التركيب الصخري ضمن حدود كل بلوك صخري.

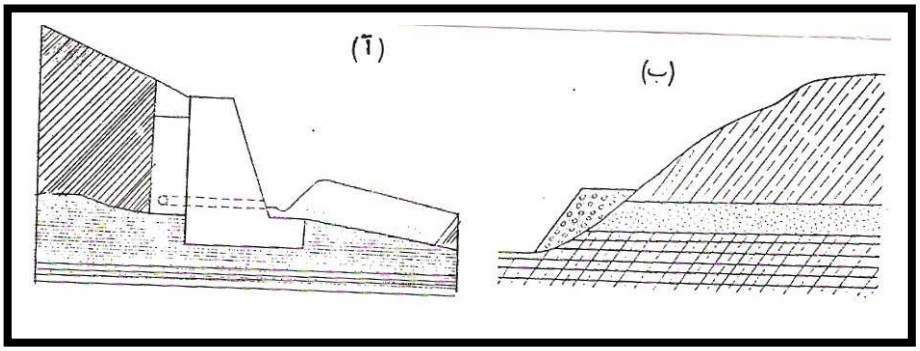
في حالة الانزلاقات التي تتم بواسطة قوى الدفع يتوضع سطح الانزلاق أسفل قاعدة المنحدر وأثناء حركة جسم الانزلاق يتشكل تلة أسفل المنحدر. الشكل /6/ وهذه التلة بحد ذاتها تعمل على إعاقة حركة الانزلاق (تولد ضغط معاكس للانزلاق) وبالتالي فإن الإجراءات التي يجب اتخاذها في هذه الحالة يجب أن تؤدي إلى رفع فعالية التلة ويتم ذلك عن طريق إنشاء رصيف من البيتون المسلح أو زرع أوتاد من البيتون المسلح في جسم الانزلاق أمام المنحدر. الشكل /6/



الشكل (6) : مخطط يوضح تشكل الانزلاقات والتدابير المتخذة للحفاظ على استقرار المنحدرات

1. تشكل التلة، 2. زرع أوتاد من البيتون المسلح على جسم الانزلاق، 3. إنشاء رصيف من البيتون المسلح

وفي حالة الانزلاقات التي تتم على هيئة زحف حر للبلوكات الصخرية حيث لا تتشكل التلة في مقدمة المنحدر فإن الإجراءات المتخذة في هذه الحالة يجب أن تكون مغايرة لما ورد سابقاً. وإحدى هذه الإجراءات المتخذة في مثل هذه الحالات والتي تعتبر واسعة الانتشار هي : إنشاء جدران استنادية وأرصفة بيتونية ، الشكل /7/ .



الشكل (7) : آ. بناء جدران استنادية ، ب . بناء أرصفة بيتونية

وهذان الإجراءان يعطيان نتائج جيدة في حالة الانزلاقات التي تتشكل نتيجة تطور عملية غسل الجزئيات الرقيقة من الصخور بفعل المياه الجوفية أو تلك التي تتم وفق مستوي التطبق المائل. ويجب الإشارة هنا إلى أن هذه المنشآت (الجدران الاستنادية والأرصفة البيتونية) يجب أن تكون مصحوبة بمنظومة تصريف للمياه. وفي حالة عدم وجود منظومة تصريف للمياه فإنه سيتشكل وراء هذه المنشآت تجمع للمياه الجوفية وبسببه يمكن لهذه المنشآت أن تفقد توازنها. هذا وإن تصميم منشآت التدعيم وعمق توضع القواعد يتم تحديدها بحساب قيم الضغط الذي يولده جسم الانزلاق.

وهناك إجراءات عامة عديدة تستخدم أحياناً لتثبيت المنحدرات مثل اختيار زاوية ميل المنحدر الاصطناعي بحيث تجمع بين المتطلبات الاقتصادية والتوازن وكذلك الاستعانة بالتشجير إن أمكن لتثبيت المنحدرات غير المستقرة وغير ذلك من الإجراءات.

****

الفصل العاشر

الدراسات الجيوهندسية لبناء السدود

1. المقدمة:

تقام السدود لتنظيم تصريف النهر أو المجرى المائي والسيطرة على الفيضانات العالية ولتجنب أخطارها حيث تتكون خلف جسم السد بحيرة صناعية يتم خزن المياه فيها للاستفادة منها لأغراض تنظيم الري وإقامة المشاريع السياحية. هذا وغالباً ما يستفاد من طاقة مياه خزانات السد الناتجة من اختلاف في ارتفاع منسوب المياه أمام وخلف السد في توليد الطاقة الكهربائية.

لقد عرفت السدود منذ الزمان فحضارة وادي الرافدين، واليمن وبلاد الشام و وادي النيل تشهد بذلك لكن معظم السدود التي شيدت قبل القرن الماضي امتازت بصغر حجمها وارتفاعها المحدود. ومع التقدم الذي شهدته البشرية وازدياد الحاجة إلى الطاقة الكهربائية ، المياه الصالحة للشرب ، الإرواء الزراعي ، واستخدامات صناعية أخرى للمياه أصبحت السدود أكبر حجماً وأكثر تعقيداً وازداد عددها بشكل كبير جداً نتيجة التغيرات الكبيرة التي حدثت في التكنولوجيا المستخدمة في بنائها، إذ اعتمدت على التقدم العلمي خاصة في العلوم الهندسية والجيولوجية واليوم عندما يقام السد ينظر إلى عامل الأمان واستقرار السد قبل الكلفة الاقتصادية. ويمثل السد تجمع كميات هائلة من المواد الإنشائية على مساحة محدودة جداً نسبياً إضافةً إلى وزن المياه المحصورة خلف جسم السد وهذه كلها تسلط ضغطاً كبيراً على صخور الأساس. وهنا تبرز أهمية الدراسات والاختبارات الجيولوجية في بناء السدود فلقد أصبح من المؤكد لدى المهندس أن للاختبارات والدراسات الجيولوجية قبل بناء السد وللاستشارات الجيولوجية أثناء بنائه أهميتها الخاصة في نجاح وضمان سلامة السد إضافة إلى انسيابية العمل أثناء بنائه.

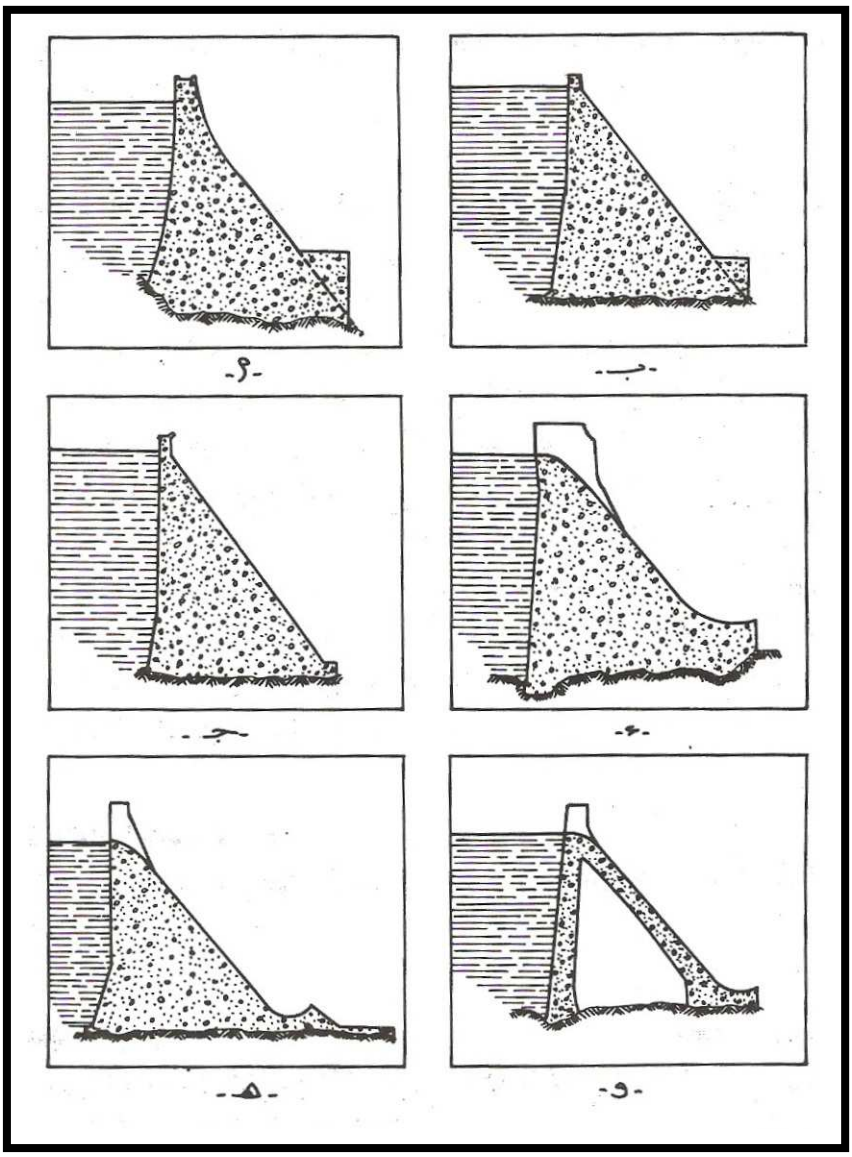
2. الأنواع الرئيسة للسدود:

تقسم السدود بناءً على المواد الإنشائية المستخدمة في بنائها وشكلها العام إلى الأنواع التالية:

2-1- السدود الخرسانية: وهي السدود التي تبنى من البيتون المسلح وغالباً ما تحتاج إلى مكاشف صخرية ذات قابلية تحمل كبيرة وتشمل الأنواع التالية:

2-1-1- السدود التثاقلية:

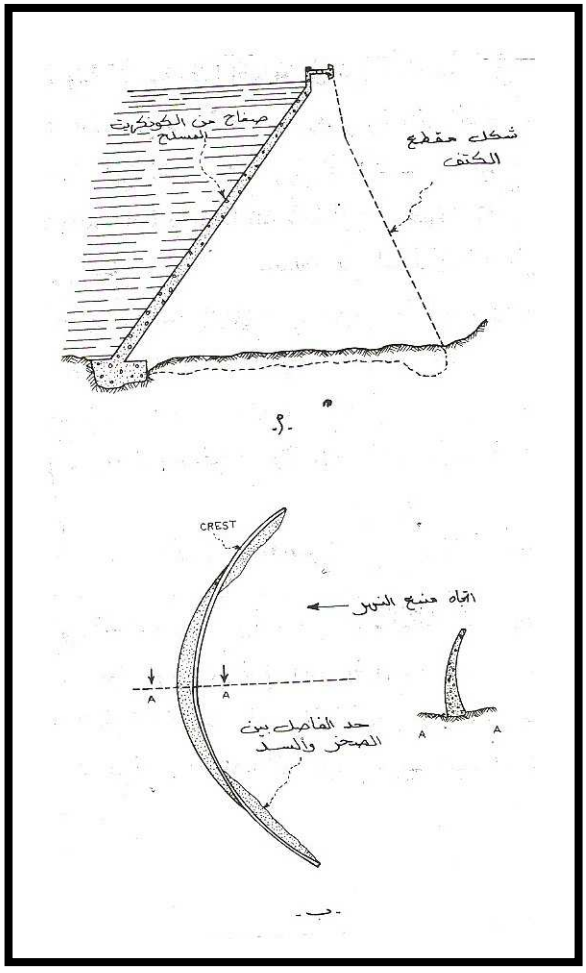
سدود ضخمة تعتمد في استقرارها على وزنها ولها محور مستقيم أو منحني قليلاً باتجاه منبع النهر كما أن المقطع العرضي لها أشبه بالمثلث القائم الزاوية. الشكل/1/



الشكل (1): مقاطع في سدود تثاقلية خرسانية وبأشكال مختلفة

2-1-2- السدود الكتفية:

وتكون أشبه بجدار كونكريتي ففي الجانب المواجه لمنبع النهر يمتاز الجدار بميل عن الشاقول وبذلك يمتص معظم وزن الماء وفي الجانب الآخر من الجدار تستخدم الأكتاف للحفاظ على استقرارية البناء. الشكل/2/.



الشكل (2): أ. مقطع عرضي في سد كتفي
ب. منظر علوي ومقطع عرضي في سد قوسي

وهذه الأكتاف هي عبارة عن ألواح كونكريتية تبنى بصورة عمودية الجدار وتعمل على تثبيته وذلك بنقل قوة ضغط الماء إلى صخور الأساس وتكون الأكتاف على عدة أنواع حيث يؤخذ

بعين الاعتبار المتانة والكلفة الكلية في بنائها. وتستخدم السدود الكتفية عادةً في الأماكن الوعرة التي يكون لتوصيل المواد الإنشائية إليها كلفة عالية. علماً بأن هذه السدود تفضل عادة بدل السدود التثاقلية وذلك لحاجتها الأقل من المواد الإنشائية.

2-1-3- السدود القوسية:

وهي عبارة عن جدار كونكريتي مقوس باتجاه منبع النهر شكل (2- ب) إن هذا التقوس يعمل على نقل جزء كبير من ضغط الماء من جدار السد إلى جدران الوادي التي يستند إليها السد. في حين ينقل الجزء الآخر من ضغط الماء إلى صخور الأساس في القاع لذا يجب أن تكون صخور جدران وقاع الوادي ذات صلابة عالية وقابلية تحمل كبيرة.

2-2- السدود الركامية:

إن هذا النوع من السدود آخذ بالازدياد في السنين الأخيرة وذلك لسهولة بنائه واعتماده على المواد الأولية المتوفرة محلياً إضافةً إلى توفر مجال أوسع في اختيار الموقع المناسب لعدم حاجته إلى الظروف الجيولوجية والجيومورفولوجية التي تحتاج إليها السدود الخرسانية عادةً.

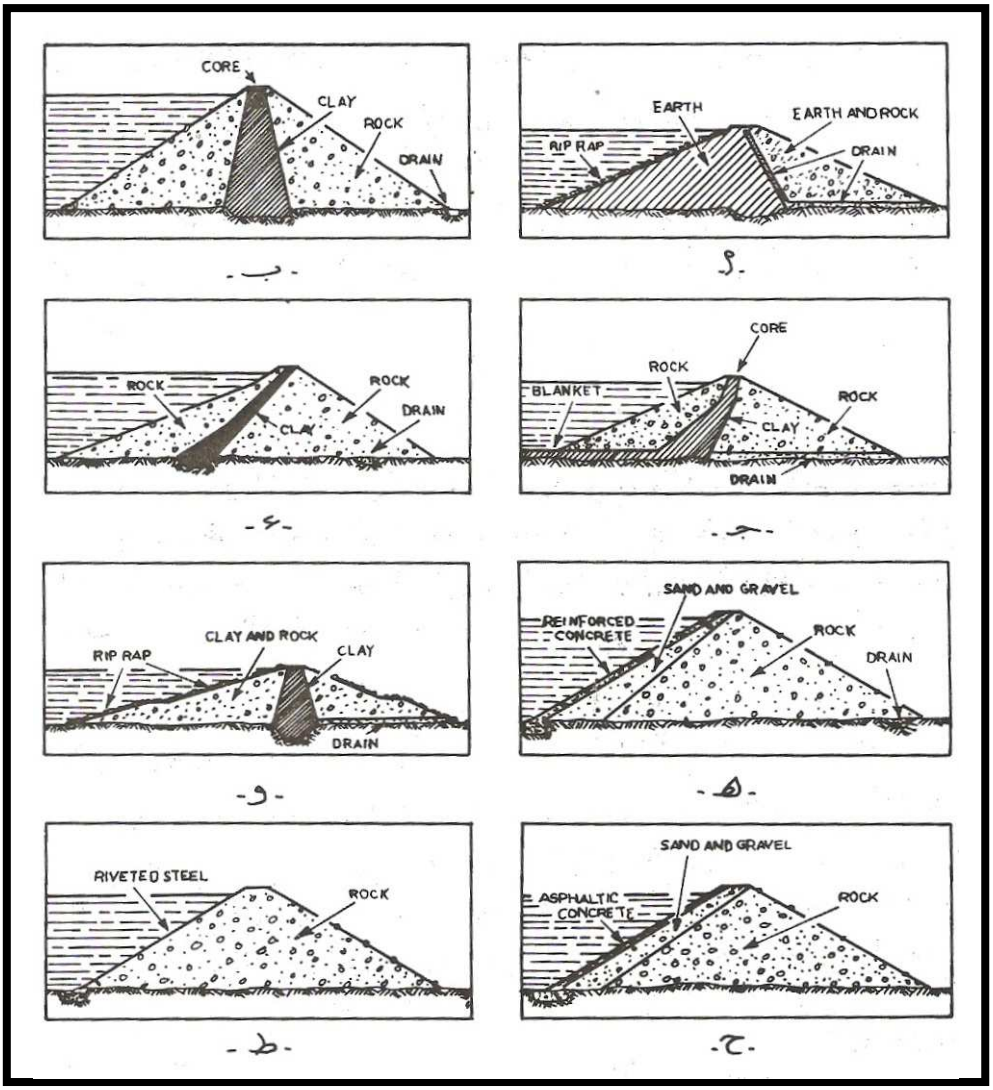
وفي الإحصائية التي نشرت في نهاية الستينات من قبل اللجنة العالمية للسدود الضخمة (International commission for large dams) تبين أن من بين (925) سد من السدود التي شيدت في أنحاء مختلفة في العالم وللفترة من /1965-1968/ هناك سبعمائة منها سدود ركامية والباقي هي سدود خرسانية. والسبب في ذلك يعود إلى التقدم العلمي في فهم العلاجات المقترحة للظواهر ذات العلاقة بميكانيكية التربة بحيث أصبح من الممكن بناء سد ترابي ذي ارتفاع يضاهي ارتفاع السدود الخرسانية وبكلفة اقتصادية أقل وأكثر أماناً واستقراراً. وتقسم السدود الركامية إلى نوعين وهي:

2-2-1- السدود الركامية ذات التركيب المتجانس:

وهي السدود التي تشيد من نوع واحد من المواد الإنشائية وهذا النوع قليل الانتشار نسبياً لأنه نادراً ما تتوفر مواد أولية من نوع واحد وقريب من موقع السد بحيث تكون كافية لبناء سد. وهناك في الأقل نوعان من المواد الإنشائية يدخلان في بناء هذه السدود إضافةً إلى المواد الأخرى المستخدمة في المعالجة الموضعية لتسرب المياه أو لمنع نفاذها خلال جسم السد. الشكل /3/

2-2-2- السدود الركامية ذات التركيب غير المتجانس:

وهي أكثر السدود انتشاراً حيث يتكون السد من أنطقة من المواد الإنشائية المختلفة. يحتل كل نطاق موضعاً معيناً من السد وذلك تبعاً للغاية المتوخاة منه وهذا يعتمد على الخواص الميكانيكية للمواد الإنشائية المستخدمة بحيث يضمن استقرار السد بكلفة أقل حيث يعتمد قدر الإمكان على المواد الإنشائية المتوفرة حول موقع السد أو قريبة منه. الشكل /3/



الشكل (3): مقاطع في أنواع متباينة من سدود ركامية. أ ، ب ، جـ ، د ، هـ ، و ، ح . تمثل النوع غير المتجانس أما ط فيمثل النوع المتجانس

2-3- السدود الركامية الخرسانية:

معظم السدود التي تشيد في الوقت الحاضر يدخل في بنائها النوع الركامي والخرساني سوياً حيث غالباً ما يكون وبصورة أساسية ركامياً، وفي بعض الأجزاء منه تستخدم الجدران الخرسانية أو قد يكون العكس وذلك تبعاً لعوامل الأمان، الظروف الجيولوجية والجيومورفولوجية والكلفة الاقتصادية.

3. تراكيب السد:

إن السد بحد ذاته لا يعني شيئاً بدون التراكيب المكملة له حيث أنها تعمل للسيطرة على مياه الخزانات ونقلها عبر السد وهي عادةً تكون بأشكال مختلفة. إن تصميم هذه التراكيب يحتاج إلى دراسات وتحريات وافية خاصةً بما يتعلق بالمياه الجوفية لمنطقة السد والتضاريس إضافةً إلى جيولوجية الموقع وفيما يلي وصف موجز لبعض أنواع التراكيب:

3-1- سد التحويل:

وهو سد بسيط يوضع في مجرى النهر وفي مكان يسبق الموقع المختار للسد وباتجاه منبع النهر. الغاية منه تحويل النهر عن مجراه الطبيعي ليفسح المجال للعمل وبناء السد. إن الموقع المختار لسد التحويل يعتمد على جيومورفولوجية وجيولوجية المنطقة. أما فيما يتعلق بنقل مياه النهر فهو يعتمد على طبيعة الوادي الذي يجري فيه النهر فعندما يكون مجرى النهر في وادي عميق يتم نقل المياه بواسطة نفق يحفر في صخور جدار الوادي. أما إذا كان مجرى النهر في وادٍ غير عميق عندئذ يتم نقل مياه النهر عن طريق قناة أو أنابيب ذات أقطار كبيرة. في حالة كون السد من نوع السدود الركامية فإنه غالباً ما يختار موقع لسد التحويل بحيث يصبح جزءاً من السد الرئيسي بعد إكمال المشروع.

3-2- ممر الأسماك:

إن بناء السد في مجرى النهر يعني عرقلة الهجرة الطبيعية للأسماك أو إيقافها ومن أجل الحفاظ على الثروة السمكية عادةً يوضع تركيب معين ضمن السد يساعد الأسماك على الانتقال عبر السد وهذا التركيب يدعى ممر الأسماك.

3-3- الممرات المائية أو المسيل:

وهي ممرات تصمم وتبنى من أجل السيطرة والتخلص من الزيادة في مياه خزانات السد خاصةً في موسم الفيضان. إن موقع وشكل وحجم هذه الممرات له علاقة مباشرة بحجم ونوع السد والتضاريس المحلية وجيولوجية المنطقة المحيطة بالسد، فضلاً عن المعرفة المسبقة عن تاريخ النهر وكمية المياه التي تصل إليه أثناء فترة الفيضانات وباختصار إن عدد وحجم هذه الممرات يكون بشكل يستطيع التخلص من المياه المتزايدة في الخزانات وقبل أن يحدث أي ضرر للسد أو تراكيبه الأخرى.

3-4- البوابات:

وهي بوابات توضع في أعلى المسيل والغاية منها هو السيطرة على المياه في تلك الممرات.

3-5- محطة التوليد الكهرومائية:

هناك العديد من السدود التي شيدت من أجل توليد الطاقة الكهربائية فقط. فلقد أصبح من المعروف أن أسهل وسيلة وأقل كلفة وأقل تلوث للبيئة في توليد الطاقة الكهربائية هي الطريقة الكهرومائية وعادةً توضع محطة التوليد الكهرومائي عند أسفل مقدمه السد أو عند مسافة صغيرة منه وذلك تبعاً للتضاريس المحلية. ويتم السيطرة وتوجيه الماء المستخدم في توليد الطاقة بواسطة أنابيب ذات أقطار كبيرة تخترق عادةً جسم السد. وفي أعلى هذه الأنابيب توضع صمامات للسيطرة على المياه المارة فيها. إن موقع هذه الصمامات يكون عادةً ضمن جسم السد بحيث يمكن التحكم فيها.

3-6- الأنفاق:

تشق هذه الأنفاق خارج جسم السد وفي صخور جدران الوادي أو قد تكون في جوانب جسم السد وتوضع في مقدمتها صمامات للسيطرة على كمية المياه المارة فيها. هذا وتستخدم الأنفاق للتحكم في مستوي مياه الخزانات أو للتغذية المبرمجة للنهر أو المشاريع الاروائية المرافقة للسد.

4. التحريات الجيولوجية:

4-1- التحريات الجيولوجية الأولية:

وتشمل الدراسة الأولية لاختيار موقع السد وخزاناته وتراكيبه. ويعتمد ذلك على الخرائط الجيولوجية والدراسات الجيولوجية السابقة المتوفرة في المنطقة. وفي حالة عدم توفر هذه المعلومات يقتضي الأمر إجراء مسوحات جيولوجية أولية.

في التحريات الجيولوجية الأولية يتطلب الأمر تحديد اتجاه وميل الطبقات ونوع صخورها وتحديد طبيعة التشوهات التكتونية وأثرها في صخور المنطقة كنوع الطيات والصدوع، الفواصل واتجاهها والتكسرات. كذلك يجب تحديد سمك الطبقة المتجوية أو السطحية المفككة. وإضافةً إلى ذلك تثبت في هذه الدراسة الأولية طبيعة التضاريس ومدى صلاحيتها للعمل كالخزانات وسعة استيعابها واستقرارية السفوح التي قد تكون جدراناً جانبية لها. كما يجب أن تحدد الأهمية الاقتصادية للموقع المختار للسد وهل توجد فيها مواد إنشائية أولية، أو خامات معدنية أو هل هي منطقة أثرية أو سكنية لأن تغطيتها بالماء يعني هدراً لثروة يمكن استغلالها في المستقبل، بعد الانتهاء من التحريات الجيولوجية الأولية يقوم الجيولوجي بإعداد تقرير كامل يتضمن النقاط التالية:

1- وصف جيولوجي كامل للمنطقة وفيه وصف للطبقات، التراكيب الجيولوجية والصدوع وامتدادها...الخ.
2- مواقع المواد الأولية الإنشائية التي يمكن أن تستخدم في بناء السد.
3- وصف كامل للآبار الاختيارية المحفورة ونتائج قياس الآبار .
4- وصف كامل للاختبارات الهيدرولوجية.
5- وصف كامل للتحريات الجيوفيزيائية.
6- خرائط جيولوجية وجيولوجية هندسية تثبت عليها الخواص الفيزيائية للصخور.
7- مقاطع جيولوجية في اتجاهات مختلفة توضح التراكيب الجيولوجية وأنواعها في المنطقة.
8- قائمة بالمصادر عن الدراسات والتقارير السابقة في المنطقة. أي الدراسات الجيولوجية، الهيدروجيولوجية، الهيدرولوجية، ميكانيكية التربة، ميكانيكية الصخور، التحريات الجيوفيزيائية ...الخ من الدراسات المتوفرة وذات العلاقة.

كل هذه المعلومات توثق في تقرير واحد شامل يتم فيه أيضاً اقتراح موقع مناسب للسد. وهنا تبدأ مرحلة أخرى من التحريات وهي اختبار مدى صلاحية الموقع المختار لجسم السد وتشمل:

1- موقع السد يجب أن يكون في وادي ذي جدران لها انحدار شديد وانحدار مناسب على الأقل وهذا الموقع يحجز خلفه أراضي واسعة يمكن أن تصبح خزانات للسد. يراعى في هذا الموقع أيضاً إمكانية تحويل مجرى النهر عن مساره الطبيعي في نقطة قبل هذا الموقع. بحيث يترك هذا الجزء في الوادي لبناء السد وتراكيبه.

2- الموقع المختار للسد يجب أن يدرس بشكل مفصل ودقيق من الناحية الطبقية والتكتونية وتستخدم لهذه الغاية جميع الوسائل المعروفة في التحري الجيولوجي وبصورة خاصة في حفر الآبار الاختيارية والدراسات الجيوفيزيائية.

3- في الموقع المختار يجب أن يحسب العمق إلى الصخور أو طبقة الأساس التي ستتعرض وبصورة مباشرة لثقل السد والضغوط التي تعمل عليها. كما يجب أن تدرس الخواص الطبيعية والميكانيكية لتلك الصخور وإضافةً إلى ذلك تحدد النفاذية المائية لها وللصخور المجاورة أيضاً.

4- إن استقرارية المنحدر في جانبي الوادي الذي سيشيد عليه السد يجب أن تدرس بشكل دقيق وخاصةً إن هذا المنحدر معرض لفقدان استقراره أثناء الحفر وإزالة جزء من جوانبه السفلى.

5- إذا كان الموقع المختار في منطقة معروفة بنشاطها الزلزالي عندئذٍ تحدد معامل الأمان الزلزالي وذلك لأخذ الاحتياطات الهندسية اللازمة.

6- يفضل عادةً إجراء تحليل كيميائي للمياه السطحية والجوفية لمعرفة مدى تأثيرها في المواد المستخدمة ببناء السد.

7- من الضروري تحديد مواقع المواد الأولية التي تستخدم في بناء السد ويفضل عادةً أن تكون قريبة من الموقع المختار للسد. أما إذا كان موقع السد المختار بعيداً عن مصادر المواد الأولية هذه فعندئذٍ يبين ما هي أفضل السبل وأقلها كلفة في الحصول على هذه المواد.

4-2- التحريات الجيولوجية الدقيقة:

بعدما يتم اختيار المكان المناسب للسد وتراكيبه تبدأ المرحلة الأولى في تنفيذ مشروع بناء السد وهي الدراسات الجيولوجية التفصيلية لموقع السد والخزان المائي التابع له. حيث ترسم خارطة

جيولوجية تفصيلية بمقياس رسم (1/1000) يثبت عليها شكل السد وتراكيبه وخزاناته. وغالباً ما تكون الخرائط الخاصة بالخزان بمقياس رسم (1/5000) أو (1/10000) وبناءً على هذه الخرائط توضع خطة للتحريات تحت السطحية وتشمل:

1. حفر عدد من الآبار الاختيارية علماً بأن عمق ومواقع ونوع هذه الآبار تحدده الحاجة الجيولوجية.
2. تحدد على الخرائط المناطق التي تحتاج إلى مسوحات جيوفيزيائية وذلك لتحديد سمك الغطاء المفكك أو عمق الطبقة الصلبة.
3. تحديد النفاذية المائية لصخور الأساس وجدران الوادي وذلك عن طريق حفر آبار وضخ الماء فيها تحت ضغط عال.
4. يحدد الأسلوب الأفضل لتحويل مجرى النهر عن مساره الطبيعي والى مسار مؤقت بعيد عن موقع السد بحيث يمكن العمل وانجاز البناء وبعد الانتهاء يمكن إرجاع النهر إلى مساره الطبيعي.

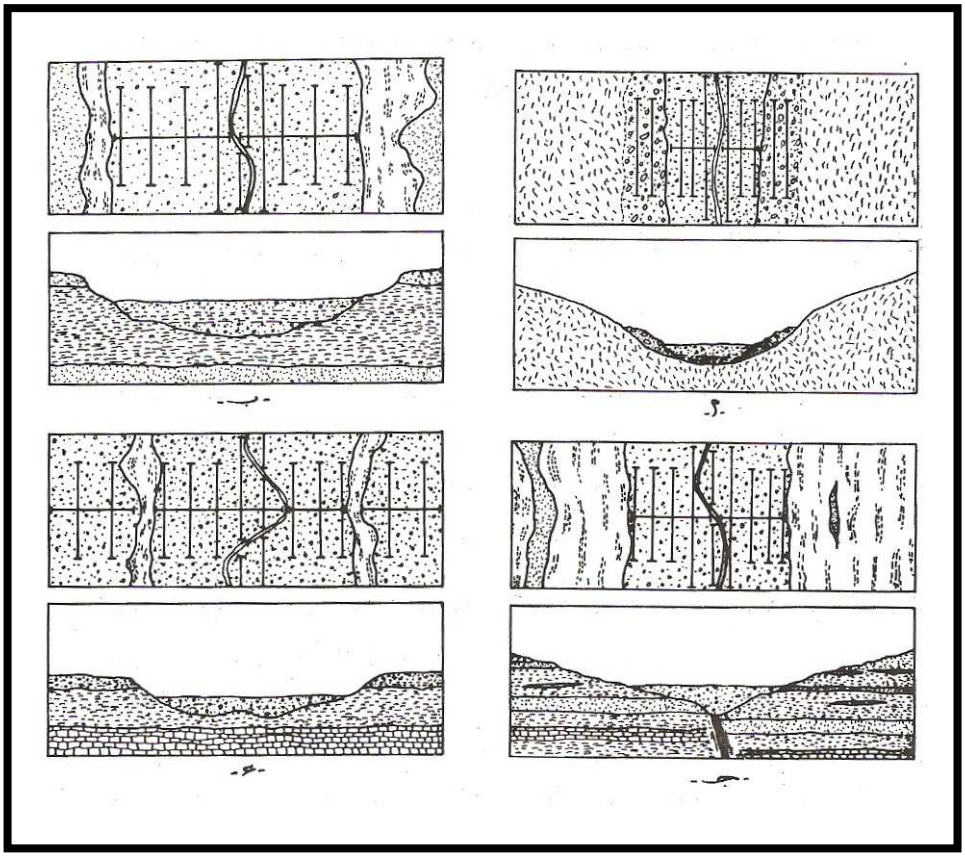
5. التحريات الجيوفيزيائية:

تستخدم الطرائق الجيوفيزيائية لتحديد التغيرات تحت السطحية سواء الشاقولية أو الأفقية. ولكون هذه الطرق تمتاز بالسرعة والكلفة الاقتصادية المناسبة فغالباً ما تستخدم في التحريات الأولية والتحريات التفصيلية الدقيقة في موقع السد وخزانه. هذا وتعتبر الطرائق الزلزالية والكهربائية هي من أكثر الطرق شيوعاً في هذا النوع من التحري.

5-1- التحريات الزالزلية:

تستخدم التحريات الزلزالية بشكل واسع في المناطق السهلة أو غير الوعرة. إن التقدم التكنولوجي في صنع أجهزة قياس الزلزالية جعل من هذه الطريقة دقيقة ومعتمدة في نتائجها. فإضافةً إلى المسح الزلزالي المعروف فإن للدراسات الزلزالية تطبيقاتها في فحص وقياس معامل المرونة لصخور باطن الأرض وتحديد خواصها الفيزيائية الأخرى وذلك عن طريق حفر آبار وقياس السرع الزلزالية عند أعماق مختلفة. وفي المسح الزلزالي الاعتيادي لمنطقة السد يجري المسح في أكثر من خط زلزالي وباتجاهات مختلفة. الشكل /4/، بحيث يمكن أن تستخدم نتائج هذه

المسوحات في إعطاء صورة واضحة ومجسمة لباطن الأرض. هذا وتدقق نتائج المسح بواسطة حفر الآبار في مواقع يتم اختيارها من قبل الجيوفيزيائي.



الشكل (4): أمثلة على أسلوب توزيع خطوط المسح الزلزالي في منطقة الوادي لتحديد سمك الترسبات والتتابع الطبقي

5-2- التحريات الكهربائية:

إن طريقة المقاومة النوعية لها تطبيقاتها العديدة في التحري عن موقع السد وخزانه. إن المعطيات العلمية لهذه الطريقة ومعطيات الطريقة الزلزالية المستقاة من الآبار الاختبارية تشكل الأسلوب الأمثل في إعطاء صورة متكاملة عن الظروف تحت السطحية وبأبعادها الثلاث، حيث أنها تستخدم في تحديد سمك الطبقات المفككة وطبيعة المواد المكونة لها وفي الكشف عن المواد الأولية التي يمكن أن تستخدم في بناء السد وكذلك في تحديد عمق المياه الجوفية.

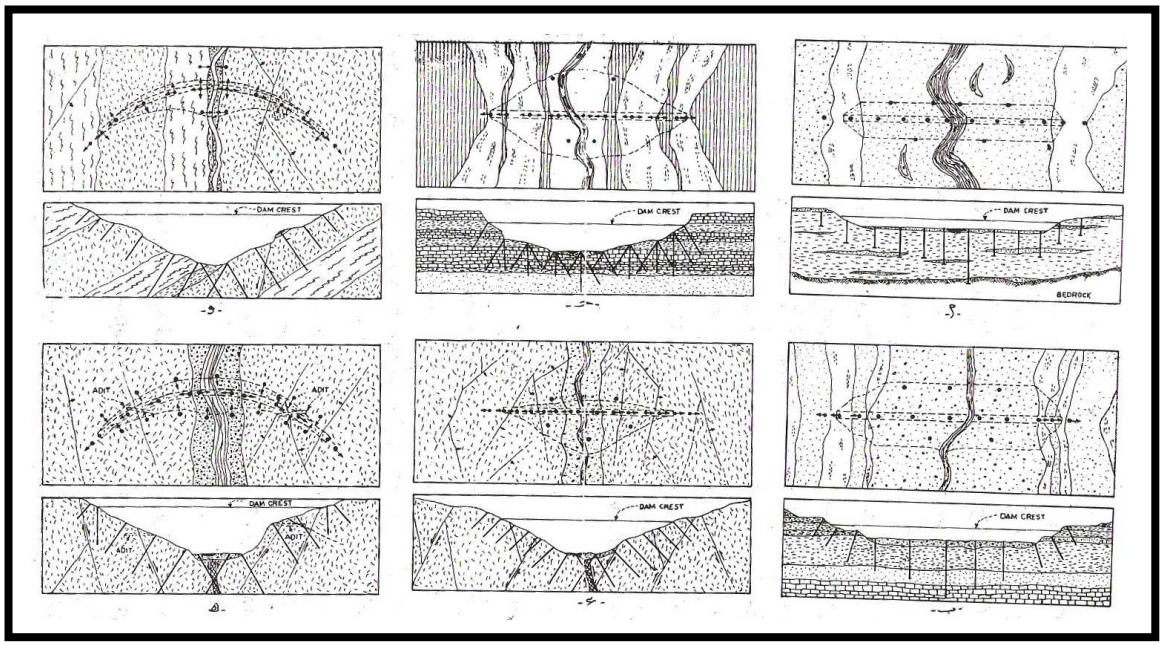
6. آبار الحفر:

أثناء التحريات الجيولوجية الأولية والدقيقة في موقع السد والخزان تحفر الآبار ذات الأعماق والأقطار المختلفة ولغايات عديدة ويمكن أن نوجز أنواع هذه الآبار والغاية من حفرها بالشكل التالي:

1. تحفر الآبار من أجل الحصول على اللباب الصخري (أوقد يكون فتاتياً) من باطن الأرض لفحصها مخبرياً. وذلك لتعريفها وتحديد الصفات الميكانيكية والطبيعية لها.
2. تحفر الآبار لاختبار نفاذية صخور باطن الأرض للمياه وتحديد التغيرات الأفقية والعمودية لتلك النفاذية، حيث من المعروف أن النفاذية المقاسة موقعياً تختلف عن تلك المقاسة مخبرياً لنفس الصخور.
3. قياس صلابة وقابلية تحمل الصخور في الموقع حيث أنه ثبت علمياً أن صلابة الصخور المقاسة في المختبر تختلف كثيراً عما هي عليه في الطبيعة.
4. تحديد عمق الصخور الصلبة وبصورة دقيقة في حالة وجود غطاء من المواد المفككة أو تحديد سمك الطبقة المتجوية.
5. تحفر الآبار لأجل عملية إجراء القياسات فيها بغية تحديد الصفات الفيزيائية للصخور في باطن الأرض ويستفاد من هذه القياسات في الآبار تحديد نوع صخور باطن الأرض، كثافتها، نفاذيتها، مساميتها، المقاومة النوعية، السرع الزلزالية، معامل المرونة والصلابة، الخواص المغناطيسية للصخور ومعدل الانبعاث الحراري.
6. تحفر الآبار من أجل تحديد سمك وحجم المواد الأولية التي يمكن أن تستخدم في بناء السد وتراكيبه.
7. تحفر الآبار أيضاً من أجل عملية التحشية (Grouting) وهي عبارة عن ضخ المواد الأسمنتية في باطن الأرض لزيادة صلابة الصخور وتقليل نفاذيتها للمياه أو القضاء عليها.

إن عدد وكثافة الآبار التي تحفر يعتمد على الغاية من حفرها. ففي التحريات الجيولوجية الأولية للسد والخزان وبعد أن تكتمل الدراسات والخرائط الجيولوجية والمسوحات الجيوفيزيائية تحفر الآبار في مواقع معينة وذلك للتأكد مما هو مقترح حول الطبقية والتراكيب الجيولوجية لباطن الأرض. وفي المناطق المعقدة جيولوجياً وحينما تكون طرق الاستكشاف الجيوفيزيائي غير فعالة يصبح

حفر الآبار هو الوسيلة الوحيدة للكشف عن جيولوجية باطن الأرض. وفي التحريات الجيولوجية الدقيقة لموقع السد يوضع برنامج حفر كامل بحيث تعطى أدق التفاصيل عن صخور باطن الأرض ويمكن بعدها معالجة وتهيئة الصخور لتصبح أساس ملائم لجسم السد. الشكل /5/



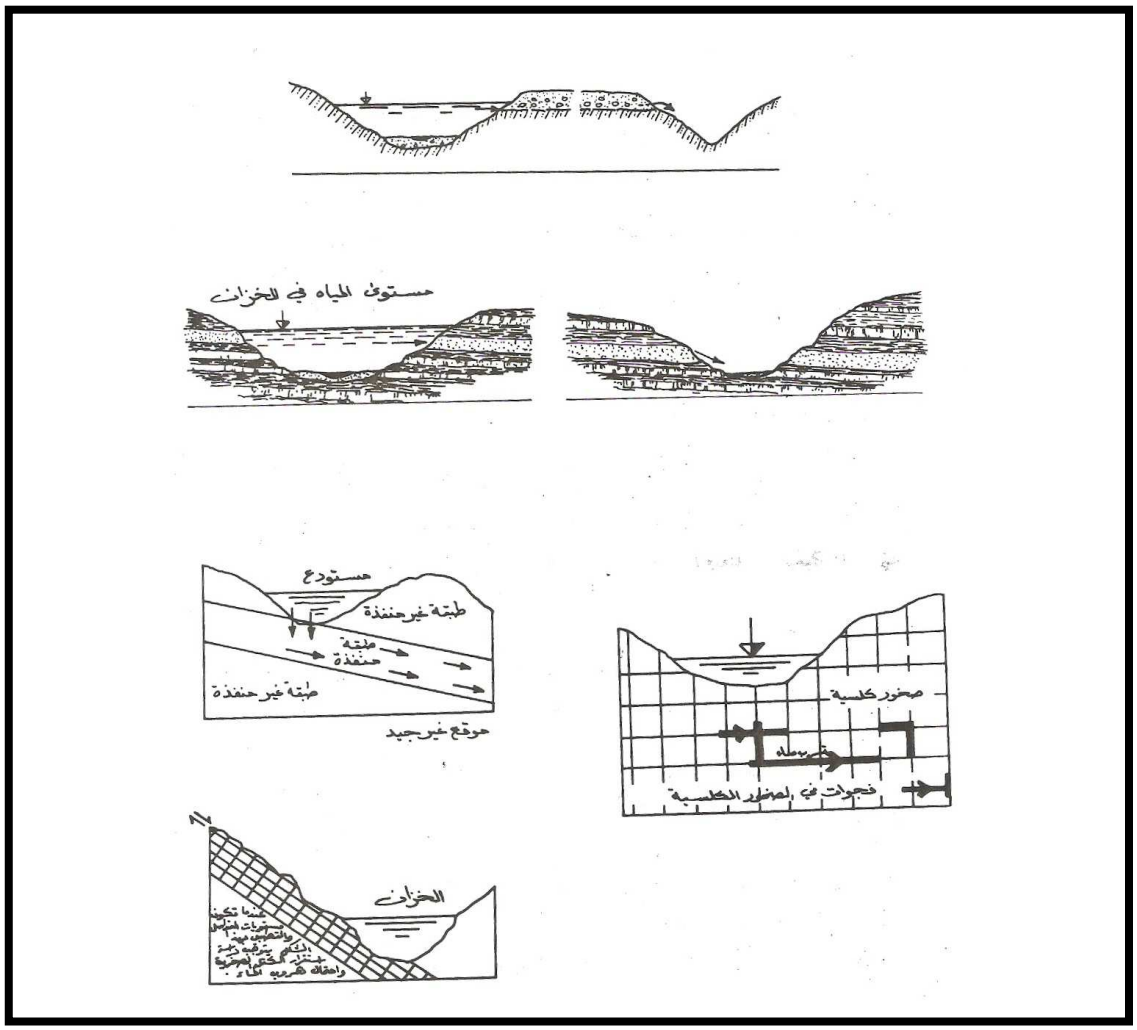
الشكل (5): أمثلة عن طريقة توزيع وأعماق آبار الحفر في التحري عن صخور الأساس لبعض أنواع السدود
أ ، ب ، جـ ، سدود ركامية. د. سد حرساني تثاقلي. و ، هـ ، سدود خرسانية قوسية.

7. التحريات الجيولوجية لحوض الخزن:

إن نجاح السد وبقاءه يعتمد وبصورة مباشرة على خزانه لذا فإن التحري الذي يجري في منطقة الخزان لا يقل أهمية عن ذلك الذي يجري في موقع السد بحد ذاته. إن أهم النقاط التي يجب الانتباه لها في التحريات الجيولوجية عن منطقة الخزان هي:

1. القابلية الاستيعابية للخزان وقابلية احتفاظها بالمياه أو هذا يتمثل بالوضع الجيولوجي لصخور جدران الخزان الطبيعي حيث غالباً ما يحدث تسرب للمياه عبر هذه الجدران وإلى الوديان المجاورة. أو حتى تسرب المياه عبر صخور الأساس ومن تحت السد. إن التسرب الأخير يمكن معالجته بواسطة ستائر التحشية. أما بالنسبة للتسرب وهروب المياه من جدران الخزان فيعتمد على نفاذية الصخور المكونة لجدران الخزان ووضعها

التركيبي والتكتوني. فعلى سبيل المثال إن وجود طبقة ذات نفاذية عالية لها ميل باتجاه بعيد عن الخزان (أو وجود صدع له نفس الاتجاه) ستعمل كنفق في نقل مياه الخزان إلى خارجه، الشكل /6/ ، إن معالجة مثل هذه الحالات قد تكون مكلفة في بعض الأحيان لذا يفضل أن تحدد طبيعة الصخور المكونة لجدران الخزان وتحديد وضعها التركيبي والتكتوني ومدى مساهمتها في تهريب المياه وما هي أفضل السبل في معالجتها وأقلها كلفة.



الشكل (6): بعض الأوضاع الجيولوجية التي يسهل عملية هروب المياه من الخزان إلى المناطق المجاورة

2. استقرارية جدران الخزان: إن صخور جدران الخزان عرضة للانزلاق بسبب عوامل عديدة تقوم المياه بدور رئيسي فيها. إن تكرار غمر الصخور بالمياه يؤدي إلى تقليل صلابة الجزء المغمور منها وذلك بفعل التجوية الكيميائية والفيزيائية إضافةً إلى تعرية مستمرة من قبل تيارات مائية ناتجة من حركة الرياح. إن كل هذه العوامل قد تؤدي إلى انزلاق جدران الخزان خاصةً إذا كانت الصخور هذه تكثر فيها التكسرات أو الفواصل، أو تتكون من طبقات ذات نفاذية متباينة أو ذات صلابة متباينة حيث يعمل أحدها كسطح انزلاق وفضلاً عن الظروف الجيولوجية الطبقية لجدران الخزان فإن الوضعية التركيبية لها دورها المهم أيضاً من حيث وجود الصدوع بأنواعها واتجاهاتها أو ميل الطبقات المكونة لتلك الجدران. توجد العديد من الطرق في معالجة استقرارية الجدران إلا أن ذلك يتطلب تحديد استقرارية الجدران قبل الشروع في بناء السد وهذه هي مهمة التحريات الجيولوجية.
3. الرواسب المتجمعة في الخزانات: عندما تملأ خزانات السد بالمياه تنشأ وضعية جديدة تحتاج إلى دراسة وخاصةً فيما يتعلق بمعدل الترسيب في البحيرات الصناعية المتكونة خلف جسم السد. من الطبيعي جداً لمياه النهر أن تحمل مواد عالقة مختلفة الأحجام وتقوم بنقلها وترسيبها في البحيرات أو خزانات السدود وإن كمية هذه الرواسب تكون أعظم ما يمكن في موسم الفيضانات وهي أيضاً تعتمد على مجرى وحوض النهر حيث إن وجود طبقات ذات صخور فتاتية على مسار النهر تساهم بشكل كبير في زيادة معدل المواد العالقة المحمولة خاصةً في فترة الفيضانات. إن تجمع الرواسب في قعر الخزانات قد تؤدي إلى تقليل السعة الاستيعابية لها بشكل كبير لذا تجري المسوحات السنوية لمعرفة وتقدير كميات الرواسب التي تصل إلى الخزانات. وعلى أساس هذه المسوحات توضع خطة مناسبة لتقليل كمية هذه الرواسب وذلك بتقليل كمية المواد العالقة المحمولة إلى الخزانات. إن هذه العملية قد لا تكون سهلة وفي بعض الأحيان قد تتطلب مبالغ طائلة وظروف عمل وأجهزة خاصة.
4. الجانب الاقتصادي لمنطقة السد والخزان: في التحري عن منطقة الخزان يجب على الجيولوجي أن يدرس الأهمية الاقتصادية للمنطقة التي سوف تغمرها المياه فقد تكون تلك المنطقة غنية بالترسبات المعدنية الثمينة وعند غمرها بالمياه يصبح من الصعب

استخراجها أو قد تؤدي المياه إلى إتلافها أو قد يكون العكس حيث من الممكن لهذه المواد أن تلوث المياه أو تزيد من حامضيتها وبالتالي تؤثر في المواد الأسمنتية المستخدمة ببناء السد.

5. يجب أن يدرس مدى تأثير وجود الخزان مع ارتفاع وانخفاض مياهها في منسوب المياه الجوفية للمنطقة لأنه في بعض الأحيان قد تكون المياه الجوفية هي المصدر الرئيسي للماء في المنطقة المجاورة للسد وفي بعض الأحيان أيضاً قد يؤدي ارتفاع منسوب المياه الجوفية (كنتيجة لوجود السد إلى أضرار مادية لمعالم تلك المنطقة).
6. من الأمور التي يجب ملاحظتها أثناء التحري في منطقة الخزان وجود النباتات والأشجار حيث يجب أن تزال هذه النباتات قبل ملء الخزان بالمياه لأن تفسخها يؤدي إلى زيادة حامضية المياه وهذا بدوره يؤثر في المواد المستخدمة ببناء السد. أما إذا كانت منطقة الخزان مستخدمة من قبل الإنسان في السابق فيفضل أن ترفع مخلفاته قبل غمرها بالمياه لأن تفسخ تلك المواد قد تكون مياه آسنة ومن ناحية أخرى قد يكون لوجود النباتات والمواد الأخرى في مياه الخزان أثرها السيئ في تراكيب السد بحد ذاته كدخولها إلى التوربينات الخاصة بتوليد الطاقة الكهربائية، لذا وجب على المختصين أن يقارنوا وبصورة دقيقة ما بين الفوائد المتوخاة من السد والخسارة الناتجة من غمر منطقة واسعة بالمياه (أي دراسة الجدوى الاقتصادية للمشروع).

8. الجيولوجي وبناء السد:

يقوم الجيولوجي بتنفيذ أول خطوة في مشروع بناء السد ألا وهي مرحلة جمع المعلومات وإجراء التحريات اللازمة التي سبق ذكرها وإضافةً إلى ذلك يتطلب الأمر من الجيولوجي إعطاء رأيه بالمشروع ككل وما هي المشاكل والصعوبات التي سوف يلقاها المهندس المنفذ للمشروع. هذا ويفضل عادةً أن يكون الجيولوجي مرافقاً لعملية حفر وبناء السد. حيث يمكن الاستفادة من نتائج الحفر وإزالة الغطاء السطحي من التحقق من الصورة الجيولوجية التي تم تصورها للمنطقة. وفي حالة ظهور التباين يستطيع الجيولوجي التدخل في الوقت المناسب لتغيير خطة العمل. إن وجود الجيولوجي أثناء تنفيذ المشروع له الفائدة الكبيرة للمهندس حيث يستطيع الجيولوجي إعطاء

المشورة عن كمية المتفجرات اللازمة أو سمك الصخور التي يجب إزالتها وأمور أخرى عديدة تظهر أثناء مراحل البناء والعمل المختلفة.

بعد اكتمال العمل وبناء السد يقوم الجيولوجي بكتابة التقرير النهائي الذي يشمل جميع المعلومات المتعلقة بصخور الأساس وطرق معالجتها والتخلص من النفاذية المائية لها وكذلك مدى صلاحية المواد الأولية التي استخدمت في البناء إضافةً إلى رسم خارطة جيولوجية مفصلة لمنطقة السد وصخور الأساس. هذا التقرير يصبح مرجعاً، يمكن الاستعانة بهذه الدراسات في مشاريع سدود أخرى. هذا من جانب ومن جانب آخر يبقى الجيولوجي ملازماً للسد لمراقبة استقراريته بواسطة أجهزة المراقبة الخاصة فعند إنشاء السدود لا بد من نصب أجهزة للمراقبة في جسم السد نفسه وفي الأسس وفي المنطقة المحيطة بالسد والخزان وإن الغرض من هذه الأجهزة هو مراقبة التغيرات التي يمكن أن تحدث في جسم السد أو في منطقة الأسس وتشمل هذه:

1. البيزومترات:

وهي عبارة عن شبكة من حفر طولية تمتد إلى طبقة جيولوجية معينة حاوية على المياه الجوفية وتحدد مواقعها وأعماقها وفقاً للمقطع الجيولوجي ونوعية الصخور وهيدرولوجية المنطقة، لقياس المياه في هذه الحفر بجهاز يسمى بـ Deep meter حيث يجري القياس يومياً أو أسبوعياً وفقاً لخطة معينة.

2. خلايا الضغط المسامي:

الغرض من هذه الخلايا هو قياس الضغط المسامي أي ضغط الماء في الفراغات الموجودة في مواد جسم السد وبواسطتها يمكن الكشف عن وجود أي تسرب للمياه عبر جسم السد.

3. المحطات الزلزالية:

في أغلب سدود العالم وخاصةً المنشأ منها في المناطق النشطة زلزالياً تحدد مواقع معينة من منطقة السد والخزان لغرض نصب محطات الرصد الزلزالي حيث تقوم هذه الأجهزة بتسجيل كافة الفعاليات الزلزالية وخاصةً الدقيقة والناتجة عن هزات أرضية طبيعية ذات المنشأ التكتوني أو من عملية إملاء الخزان بالمياه التي تؤدي إلى حدوث تغير مفاجئ لاستقرارية حالة صخور القاعدة في منطقة الخزان.

4. البندول:

ويستخدم في مراقبة الحركة الكلية لجسم السد الأفقية والشاقولية.

9. مشاكل السدود:

من المعروف أن معظم الصخور النارية والمتحولة هي صخور صلبة وذو قابلية تحمل جيدة فيما إذا كانت خالية من التجوية والتشوهات.

فعند التعامل مع الصخور النارية يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار أعمار هذه الصخور والتاريخ التكتوني لها وذلك لأن الصخور الأقدم تكون قد تعرضت إلى تشوهات تكتونية أكثر. فعند أنطقة التشويه التكتونية أو عند مستوي التصدع تكثر التكسرات التي تقلل من قابلية تحملها وبشكل كبير فلذا يجب الانتباه إلى موقع أنطقة التشويه هذه وامتدادها وعمقها. كما أن مستويات التطبق والفواصل في الصخور المتحولة تعمل على تقليل قابلية تحمل الصخور.

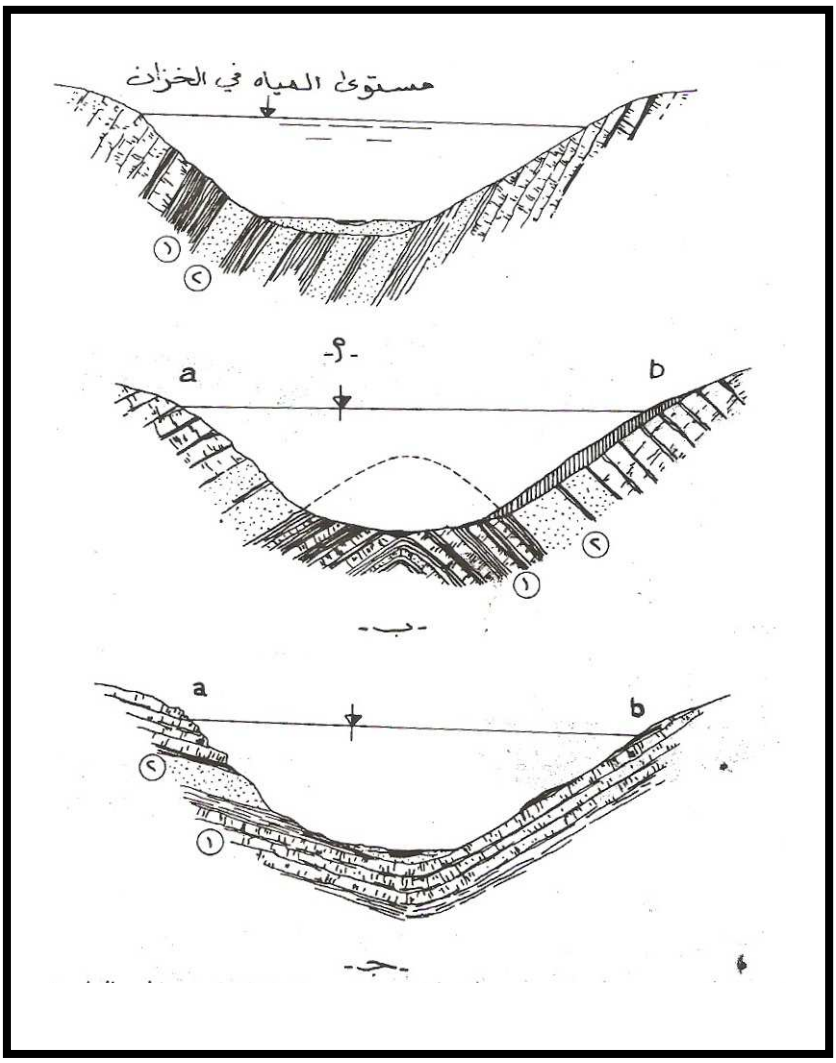
إن معامل التشويه التي تقاس للنماذج المخبرية في هذه الصخور تعطي قيماً أضعاف ما هي عليه في الطبيعية لذا وجب على الجيولوجي أن يأخذ هذه الحقيقة بعين الاعتبار خاصةً عندما يكون السد المزمع بناؤه من نوع التثاقلي أو الكتفي والذي يحتاج إلى صخور أساس صلبة. هذا وإن وجود الصخور المتحولة والنارية سوياً في الأساس يعني وجود صخور ذات قابليات تحمل متباينة ويمكن أن تخلف مشاكل كثيرة تهدد استقرارية السد. عند التعامل مع الصخور النارية والمتحولة يفضل أن يقاس معامل المرونة في الحقل وأفضل طريقة لذلك هي الطريقة الزلزالية. حيث يمكن قياس معامل المرونة على أعماق كبيرة داخل الصخور. ومن المشاكل الأخرى التي تواجه بناء السدود في الصخور النارية مشكلة الحد الفاصل بين جسم السد الأسمنتي وصخور جدران الوادي فإذا كان هذا الحد على شكل مستوي فغالباً ما يحدث انزلاق في السد إلا أن الحفر وإزالة الصخور من جدران الوادي (بواسطة المتفجرات) يترك سطحاً غير مستو تكثر فيه النتوءات والتعرجات التي تعمل على تثبيت الاسمنت (الكونكريت) في صخور الجدران. إن ضغط الماء العالي عند السد يسبب دخول الماء في الفواصل والتكسرات لصخور الأساس أو جدران الوادي وإن هذه المياه تعمل على تجويته وتقلل من قابلية تحمل هذه الصخور. للتقليل من حدة التجوية هذه ينصح عادةً بعدم استخدام كميات كبيرة من المتفجرات عند الحفر وإزالة الصخور حيث يترك متران في الأقل قبل الوصول إلى الحد المفروض عند إزالة الصخور وفي

المتر والنصف الأول منها تستخدم كميات صغيرة من المتفجرات، أما نصف المتر المتبقي فيفضل إزالته بالطرق اليدوية والآلية وبدون استخدام المتفجرات فضلاً عن معالجة التحشية لهذه الصخور التي تزيد من قابلية تحملها وتقلل أو تمنع نفاذية المياه إلى الداخل وذلك عن طريق غلق الفتحات البينية فيها.

إن للصخور الرسوبية صلابة وقابلية تحمل متباينة فالبعض منها يمكن أن يصلح كصخور أساس والبعض الآخر لا يستطيع تحمل ثقل السد أو الضغوط المسلطة عليه ولكون هذه الأنواع من الصخور الرسوبية يمكن أن تتجمع في بضعة أمتار من السمك لذا عند التعامل معها يجب أولاً التأكد من صلاحيتها كصخور أساس وتقسم الصخور الرسوبية إلى ثلاثة مجموعات وهي:

1- مجموعة الصخور الرملية.
2- مجموعة الصخور الكلسية.
3- مجموعة الصخور الطينية.

تعتمد صلابة وقابلية تحمل مجموعة الصخور الرملية على طبيعة المواد السمنتية وبصورة عامة تمتاز هذه الصخور بقابلية تحمل عالية وإن قابلية تحملها تكون أكبر ما يمكن باتجاه عمودي على سطح التطبق وتقل وجود الفواصل والتكسرات. إن أهم المشاكل التي تواجه بناء سد في صخور رملية هي مشكلة النفاذية العالية لها إضافةً إلى النفاذية الناشئة من الصدوع والفواصل والتكسرات، نسبياً فإن للصخور الرملية نفاذية تعتمد على مساميتها والتي بدورها تعتمد على طبيعة المواد السمنتية وحجم الحبيبات التي تتحكم في حجم الفراغات لذا فإن معالجة نفاذية هذه الصخور بالتحشية لا يجدي نفعاً وعوضاً عن ذلك يفضل وضع غطاء من المواد الطينية التي لا تسمح بنفاذ الماء. ومن المشاكل الأخرى التي تظهر في التعامل مع الصخور الرملية هي مشكلة الانزلاق على سطح التطبق خاصةً إذا وجدت طبقة من الطين حيث أنها تساعد على الانزلاق. في الواقع إن ميل الطبقات وخط اتجاهها وعلاقته مع جدران الوادي وقعره وبالتالي مع محور السد له دور أساسي في تحديد استقرارية السد. الشكلين /7 و 8/ . إن قوة تماسك الكونكريت مع الصخور الرملية تكون عادةً جيدة إلا أنه يجب أولاً التخلص من الطبقة المتجوية أو المتكسرة سواء في صخور الأساس أو في صخور الجدران التي يرتكز عليها السد.



الشكل (7): طبيعة بعض المشاكل التي يمكن أن تنتج عن النفاذية العالية لصخور الحجر الرملي عندما يكون جزء منه من صخور أساس السد.

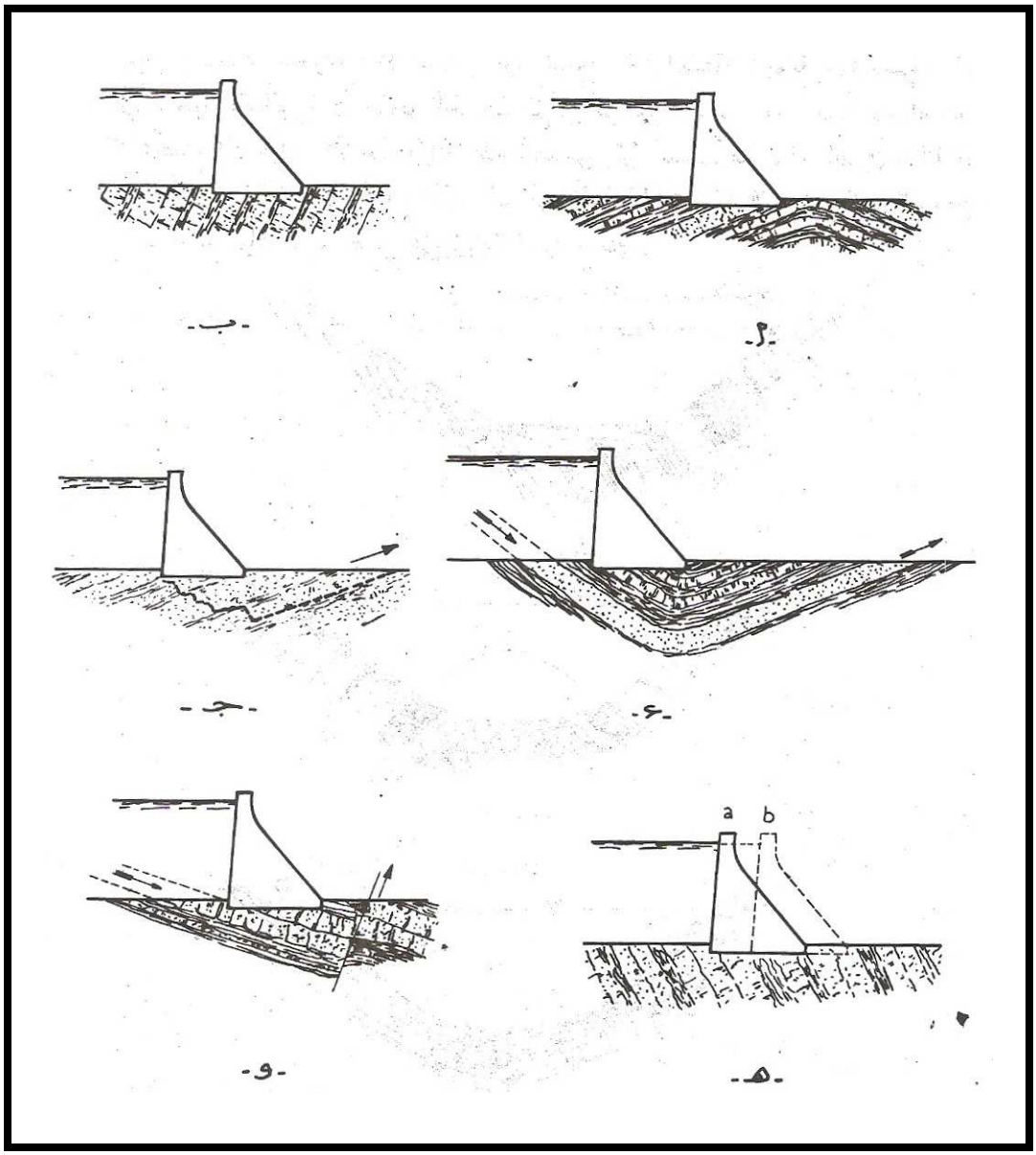
أ. طبقة الحجر الرملي تعمل على المساعدة في هروب المياه إلى أعماق كبيرة تحت السد.

ب. هروب المياه عن طريق جدران الوادي.

جـ. المياه قد تساعد على انزلاق الصخور وتسليط ضغط إضافي على السد.

1. طبقة غير نفاذة للمياه.

2. طبقة الحجر الرملي ذات النفاذية العالية للمياه.



الشكل (8): بعض الأوضاع الجيولوجية الجيدة وغير الجيدة لاعتمادها كصخور أساس.

أ ، ب ، أوضاع جيدة أما في جـ ، د ، و ، فأوضاع غير جيدة وفي هـ الوضع (b) مفضل عن الوضع (a) ذلك لأن مقدمة السد تقع على طبقة غير نفاذة لمياهه.

وهنا يجب الانتباه عند استخدام المتفجرات في حفر وإزالة هذه الصخور، يترك نصف متر يزال بالطرق الآلية أو اليدوية. هذا وغالباً ما تحتاج هذه الصخور إلى عمليات تحشية وذلك لملء الصدوع والفجوات بمواد إسمنتية تعمل على زيادة قابلية تحملها. أما مجموعة الصخور الكلسية (الجيرية) فتتميز بقابلية تحمل كبيرة وهي بذلك تصلح كصخور أساس أو إسناد في جدران الوادي. إن قابلية تحمل هذه الصخور تقل بشكل كبير عند وجود الفواصل والتكسرات التي غالباً ما تتحول إلى قنوات وكهوف وبفعل المياه الجوفية.

إن هذه الظاهرة تشكل مشكلة خطرة حيث تؤدي إلى انخساف في صخور الأساس عند تعرضها إلى ثقل السد أو الضغوط المسلطة عليه. وإضافةً إلى ذلك فإن تكون قنوات تنقل الماء عبر السد في بعض الأحيان قد تكون أنهر جوفية علماً بأن عملية التحشية المتمثلة بملء الفجوات بالاسمنت لا تصلح في حالة القنوات والكهوف هذه لأن المواد السمنتية لا تلبث وأن تغسل بالماء بعد فترة وجيزة وقد تضخ مادة القير السائل بدلاً من الاسمنت للمحافظة على بقاء الاسمنت لفترة أطول، إلا أن هذا أيضاً ليس بالحل المناسب وإنما تعالج هذه المشكلة بفرش غطاء من مواد غير مسامية فوق هذه الصخور أو اللجوء إلى وسيلة ما لقطع المياه عنها ثم تحقن مواد التحشية في داخل الفجوات والقنوات ولأعماق كبيرة بحيث تشكل جداراً في باطن الأرض يحول دون مرور المياه خلاله. هذا ويجب أن يكون هنالك برنامج طويل الأمد في المتابعة والتحشية لضمان ديمومة هذا الجدار. أما في معالجة صخور الأساس لموقع جسم السد فيجب التأكد من إزالة الطبقة المتجوية والأجزاء المتكسرة منها. ولكون الكونكريت يتماسك بصورة جيدة مع الصخور الكلسية (الجيرية) فليس هنالك حاجة إلى معالجة معينة لضمان هذا التماسك وفي حالة وجود شقوق سطحية كبيرة ووجود طبقة رقيقة من المواد الطينية فيجب أن تزال هذه المواد ولعمق كبير، ثم تحقن الشقوق بمواد التحشية وذلك لضمان صلابة وقابلية تحمل هذه الصخور.

وفي بعض الحالات يلجأ المهندس إلى ربط الصخور مع بعضها إلى البعض الآخر بواسطة حفر آبار وملئها بالكونكريت المسلح ويجري هذا عادةً على صخور جدران الوادي لضمان الاستقرار وزيادة قابلية التحمل.

وتمتاز مجموعة الصخور الطينية بالتباين الكبير في قابلية التحمل والصلابة التي تعتمد على مقدار تصلب هذه الصخور والتي تعتمد على عوامل مثل:

- ✓ حجم الحبيبات الطينية.
- ✓ وجود حبيبات الرمل الناعمة التي تساعد على هروب الماء والتصلب.
- ✓ سمك الرواسب التي تعلو الطبقة الطينية، أي مقدار الضغط الشاقولي المسلط عليها والفترة الزمنية لذلك.
- ✓ طبيعة القوى التكتونية المؤثرة عليها.

وتقسم الصخور الطينية بالاعتماد على الصلابة وقابلية التحمل إلى مجموعتين الأولى صخور غير صلبة تتفتت وتتحلل عند غمرها بالماء والثانية صخور صلبة تقاوم التجوية ولا تتأثر بالماء عند غمرها فيه.

إن صخور المجموعة الأولى لا تصلح كأساس أو ركائز جانبية للسدود التثاقلية أو الكتفية لأن قابلية تحملها أقل بكثير من قابلية تحمل الكونكريت هذا إضافةً إلى الخواص البلاستيكية فهي عند تعرضها إلى ثقل معين قد تنضغط وتزحف من تحت السد. أما صخور المجموعة الثانية فلها قابلية تحمل عالية لذا يمكن استخدامها كصخور أساس خاصةً وإن نفاذيتها تكاد تنعدم وقوة تماسكها مع الكونكريت جيدة وفي موقع جسم السد تحتاج صخور المجموعة الثانية إلى معالجة تشبه معالجة الصخور الصلبة التي تم ذكرها سابقاً. حيث تحقن مواد التحشية في الشقوق والصدوع والفواصل لزيادة قابلية التحمل وتزال الطبقة السطحية المتجوية الحاوية على الفواصل والتكسرات. وفي التعامل مع هذه الصخور أيضاً يجب ملاحظة القابلية التضاغطية لها فهي تمتاز بقابلية تضاغطية كبيرة وبالتالي فإن مقدار الاندفاع العلوي عند إزالة الثقل أو الضغط عنها تكون كبيرة أيضاً. لذا عند بناء السدود في مثل هذه المواقع يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار وذلك بجعل ثقل السد تقريباً متساوياً أثناء ملء الخزانات وتفريغها.

10. الضغوط في منطقة إنشاء السد:

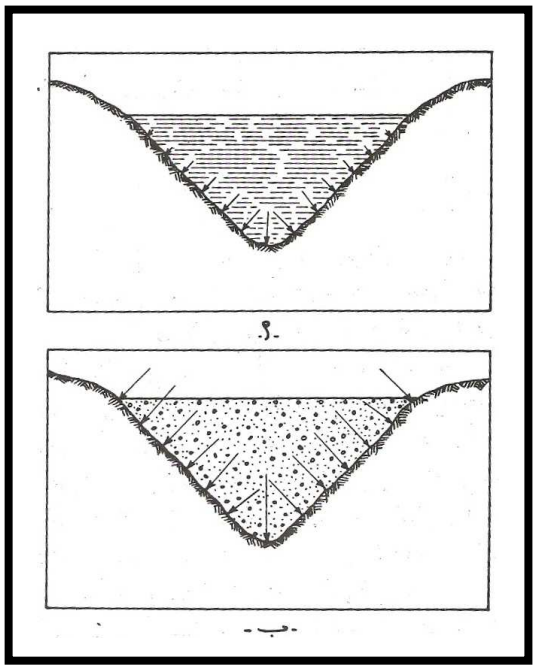
إن بناء السد وملء الخزانات بالمياه يعني خلق قوى ضاغطة كبيرة على صخور جدران وقعر الوادي وهذه الصخور يجب أن تمتلك صلابة وقابلية تحمل كبيرة جداً بحيث يمكن أن تتحمل جميع الضغوط المسلطة عليها دون حدوث أي انكسار الذي قد يؤدي إلى انهيار السد. إن توزيع القوى على صخور الأساس والناتجة من وجود جسم السد تعتمد على شكل السد والمواد المستخدمة في بنائه. ففي السدود الخرسانية يعمل السد كجسم واحد صلب وزنه متساوٍ في جميع

مقاطعه وبالتالي فالضغط المسلط على وحدة المساحة السطحية لصخور الأساس يحسب من وزن جسم السد والمساحة السطحية التي يغطيها. أما في حالة السدود الترابية فالأمر يختلف تماماً. فالضغط المسلط على صخور الأساس يختلف من موقع إلى آخر وذلك بالاعتماد على سمك ونوع المواد المستخدمة في ذلك الموقع. إن المياه المحصورة في الخزانات خلف السد أيضاً تسلط ضغطاً على صخور الأساس ويعتمد هذا الضغط على ارتفاع عمود الماء فهو يزداد كلما ازداد ارتفاع الماء، الشكل /9/. أي على العكس من الضغط الثابت المسلط من جسم السد. إن قوى الضغط الناتجة من المياه المحصورة خلف السد لا تسلط ضغطاً على صخور الأساس فحسب بل تسلط ضغطاً على واجهة السد أيضاً، هذا الضغط يعتمد على ارتفاع عمود الماء في الخزان وكثافة الماء، الشكل /10/. والذي يمكن أن يحسب من المعادلة التالية:

$$dp / dy = \rho g$$

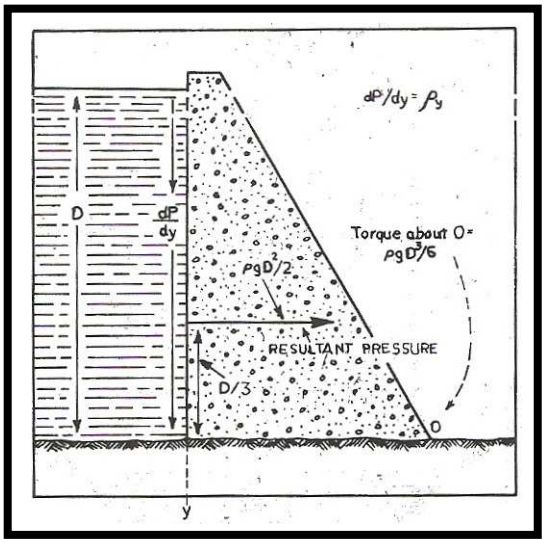
حيث أن:

g: الجاذبية الأرضية ، **ρ:** كثافة الماء ، **p:** ضغط الماء ، **y:** المسافة الشاقولية.



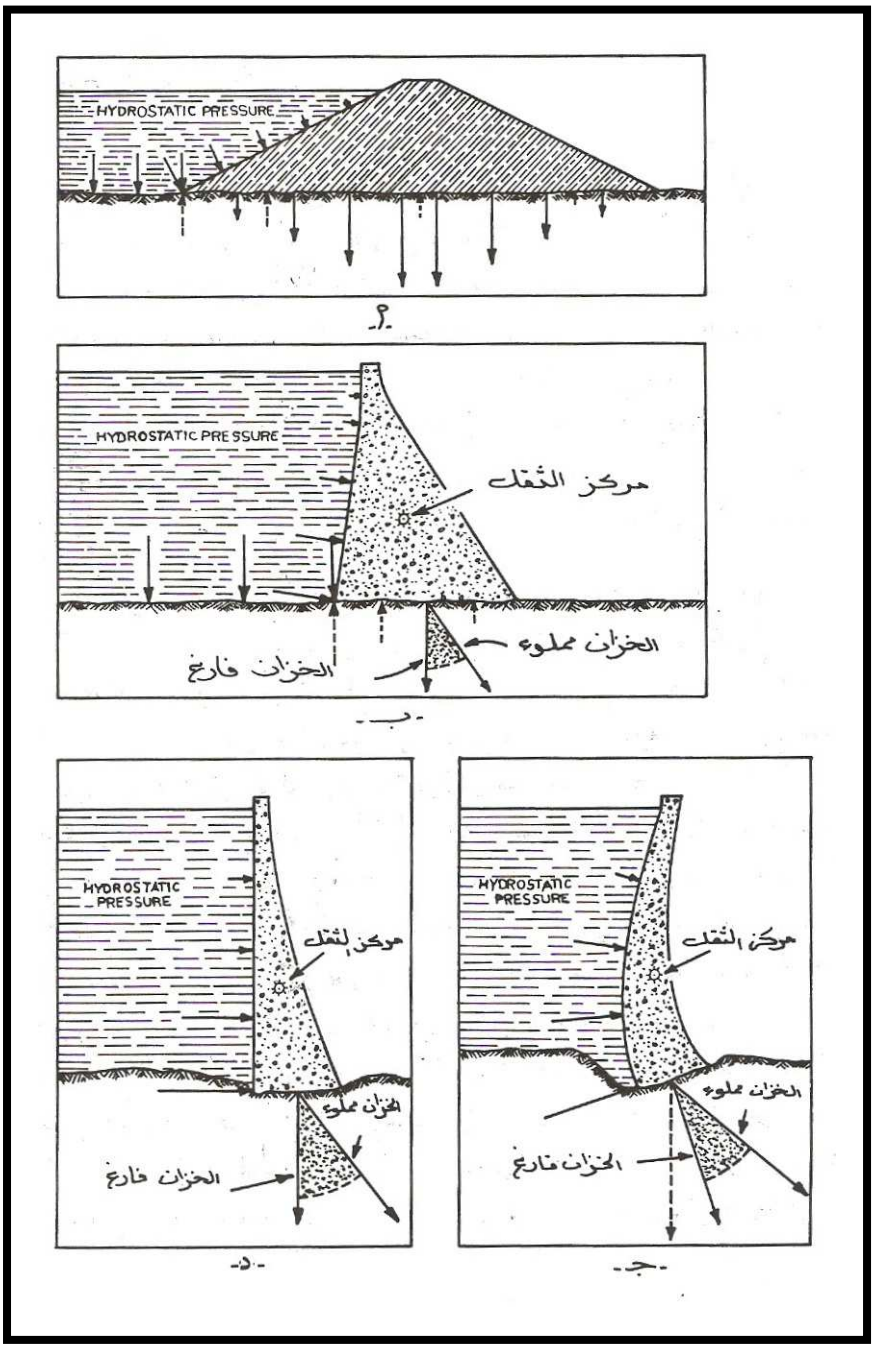
الشكل (9): أ. الفرق بين ضغط الماء المسلط على صخور الأساس
ب. ضغط جسم السد المسلط على صخور الأساس

إن المحصلة الكلية للضغط على وحدة المساحة من واجهة السد تساوي $\rho gD^2/2$ حيث أن (D) تمثل ارتفاع عمود الماء والمحصلة هذه محسوبة عند ارتفاع يساوي ثلث عمود الماء (D/3)، الشكل /10/ وبذلك يمكن حساب ضغط الماء الكلي على جسم السد بعد تحديد عرض واجهة جسم السد.



الشكل (10): توزيع القوى العاملة على واجهة جسم السد الخرساني والناتجة من مياه الخزان المحصورة

إن الضغط المسلط على واجهة السد يعمل أيضاً على إزاحة أو دفع السد حول نقطة ارتكاز (الشكل 10) وهو يساوي $(\rho gD^3/G)$ إن هذه القوى مع قوى الدفع العلوي وهي تعمل على دفع السد إلى الأعلى تتواجد من التصرف المرن لصخور الأساس وذلك عندما يزال عنها الثقل أو تفريغ خزانات السد من المياه تؤدي دوراً في عدم استقرارية السد. وعندما يكون خزان السد فارغاً فإن القوى التي تعمل على صخور الأساس تتمثل بوزن جسم السد وهي قوى رأسية. وعندما يملئ الخزان فإن ضغط المياه على واجهة السد تعمل على تغير اتجاه القوى من وضعها الرأسي إلى وضع مائل باتجاه بعيد عن الخزان. أي أن هذه القوى تحاول أن تزيح السد بدفعه وقلبه حول نقطة الارتكاز. إن قوى ضغط المياه هذه أيضاً لها تأثير ملموس في السدود القوسية. الشكل /11/. أما في حالة السدود الترابية فإن ضغط الماء على واجهة السد يستوعب من قبل المواد المكونة للسد، لأن المواد المفككة تعمل على امتصاص هذا الضغط الزائد بسهولة كما هو في الشكل /11/.

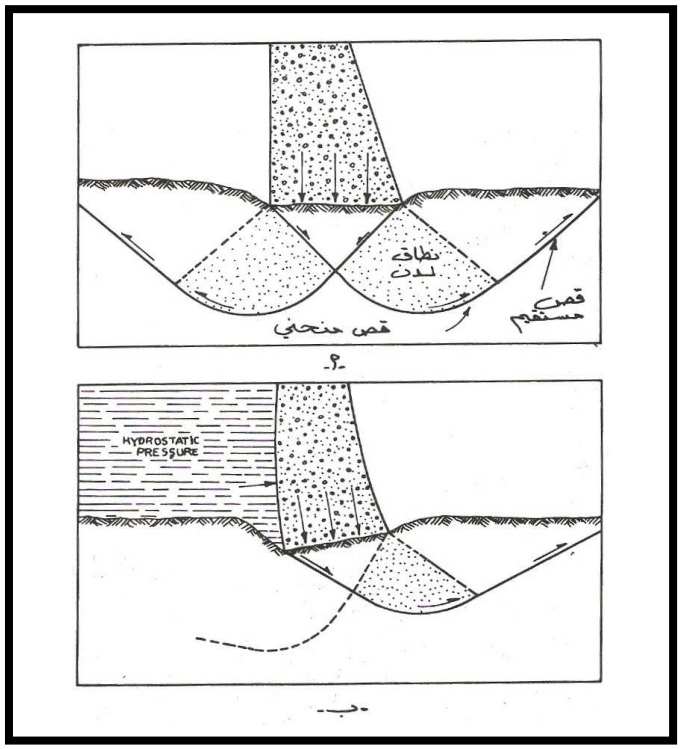


الشكل (11): مقاطع في سدود خرسانية وركامية توضح طبيعة الضغوط التي تعمل على هذه السدود.
أ. سد ركامي ، ب. سد خرساني تثاقلي ، جـ. و د. سدود خرسانية وقوسية

11. استقرارية صخور الأساس:

إن ثقل جسم السدود الخرسانية عادةً ينحصر في مساحة محدودة وهذا يعني أن صخور الأساس سوف تتعرض إلى قوى ضاغطة كبيرة قد تتصدع على أثرها. ومن الطبيعي أن جزءاً من صخور الأساس يتعرض في بداية الأمر إلى تشويه لدن دائم. وأن هذا التشويه اللدن يحدث حتى في أكثر الصخور مرونة. وذلك لاحتوائها على فجوات أو تكسرات دقيقة التي تضغط بواسطة الوزن المسلط عليها. فإذا كانت القوى الضاغطة على صخور الأساس رأسية عندئذٍ تقوم قوى القص الناتجة عنها بخلق نطاقين للضعف متناظرين حول السد. الشكل /12/.

أما إذا كانت القوى الضاغطة مائلة (بفعل ضغط مياه الخزان أو لكون جسم السد واقعاً على سطح مائل) فإن قوى القص المتولدة سوف تكون غير متناظرة وبالتالي سوف تعمل على خلق نطاق واحد للضعف. الشكل /12/.



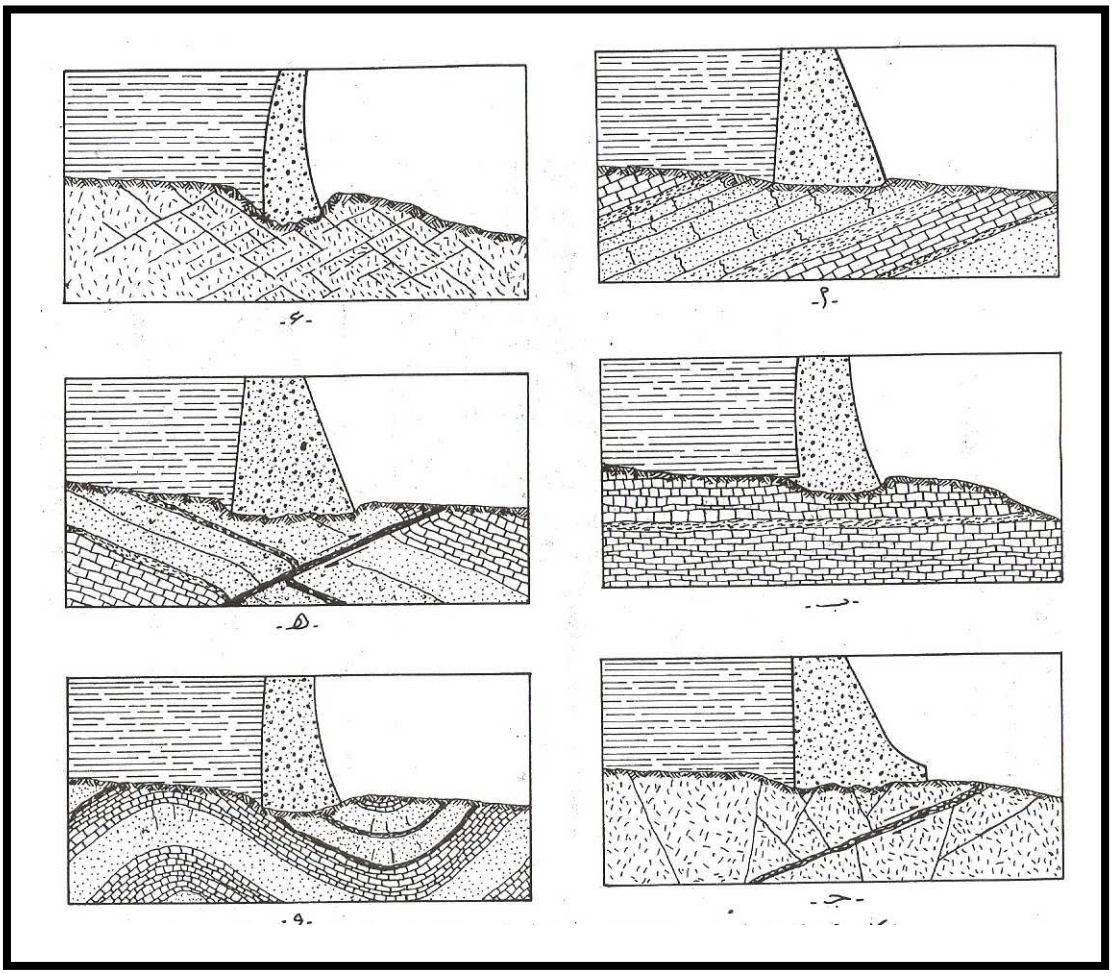
الشكل (12): توزيع قوى القص وأنطقة الصعب الناتجة عنها

أ. القوى الضاغطة عامودية

ب. القوى الضاغطة مائلة عن الشاقول

إن قابلية تحمل صخور الأساس أو بمعنى آخر مقاومتها لقوى القص هي التي تحدد استقرارية السد وعدم انهياره. فلذا يؤكد دائماً على الدراسة الدقيقة لصخور الأساس وذلك لتفادي الوضع الجيولوجي غير المناسب في صخور الأساس. الشكل /13/. في بعض الحالات الجيولوجية غير المحبذة كصخور أساس لسدود خرسانية.

وفي جميع هذه الحالات تكون مقاومة صخور الأساس ضعيفة وبالتالي ينشأ نطاق ضعف يمكن أن تحدث عليه الإزاحة أو الانزلاق لجسم السد.



الشكل (13): مقاطع جيولوجية توضح العوامل التي تساعد على خلق نطاق ضعف في صخور أساس السد

أما في حالة السدود الترابية فنادراً ما تكون قوى القص هي السبب الرئيسي في عدم استقرار السد أو انهياره إنما يكون لتسلل المياه عبر مواد البناء لجسم السد أو في صخور أساسه هو العامل الرئيسي في انهياره وهذا صحيح عندما تقع صخور الأساس ضمن أراضي منبسطة غير مائلة ويجب الانتباه هنا إلى بناء السدود الترابية على أرض قد يؤدي إلى عدم استقرار في صخور الأساس أيضاً. إن عدم استقرار السد الترابي قد يأتي أيضاً من جدران الوادي الذي يقام فيه السد خاصةً إذا كان السد في قعر واد حيث غالباً ما يحدث انزلاق لصخور أعلى المنحدر وفي بعض الأحيان للمنحدر ككل. وتقوم الظروف الجيولوجية وبمساعدة المياه المحصورة في خزان السد بخلق سطح ضعف يساعد على حدوث الانزلاق لصخور المنحدر الذي قد يؤدي إلى انهيار السد.

12. التحشية:

التحشية (Grouting) هي عبارة عن عملية حقن سائل يحتوي على مواد كيميائية أو على مواد عالقة صلبة حيث يحقن هذا السائل في تشققات الصخور أو المواد المفككة عبر آبار تحفر لهذه الغاية حيث تدخل وتستقر المواد المحمولة من قبل السائل في فتحات وفجوات داخل الصخور مما يؤدي إلى التحسن في الخواص الفيزيائية ككل إضافةً إلى أنه يمنع أو يقلل تسرب المياه بتقليله لنفاذية الصخور للمياه الجوفية. والتحشية يمكن أن تكون على ثلاثة أنواع رئيسة تبعاً للمواد التي تحملها.

12-1- التحشية ذات مواد صلبة عالقة:

وهي أكثر الأنواع استخداماً حيث تشمل حقن مواد عالقة صلبة ودقيقة وعند ترسبها تكون مادة متلاصقة غير نفوذة. هذا ويضاف إليها عادةً بعض المواد الطينية أو الرملية أو حتى مواد كيميائية للتعجيل في ترسبها وتصلبها.

12-2- التحشية ذات المواد السمنتية الكيميائية:

ويستخدم هذا النوع عندما تكون الفتحات والفجوات من صخور باطن الأرض دقيقة إلى درجة يصعب فيها دخول المواد العالقة (النوع الأول).

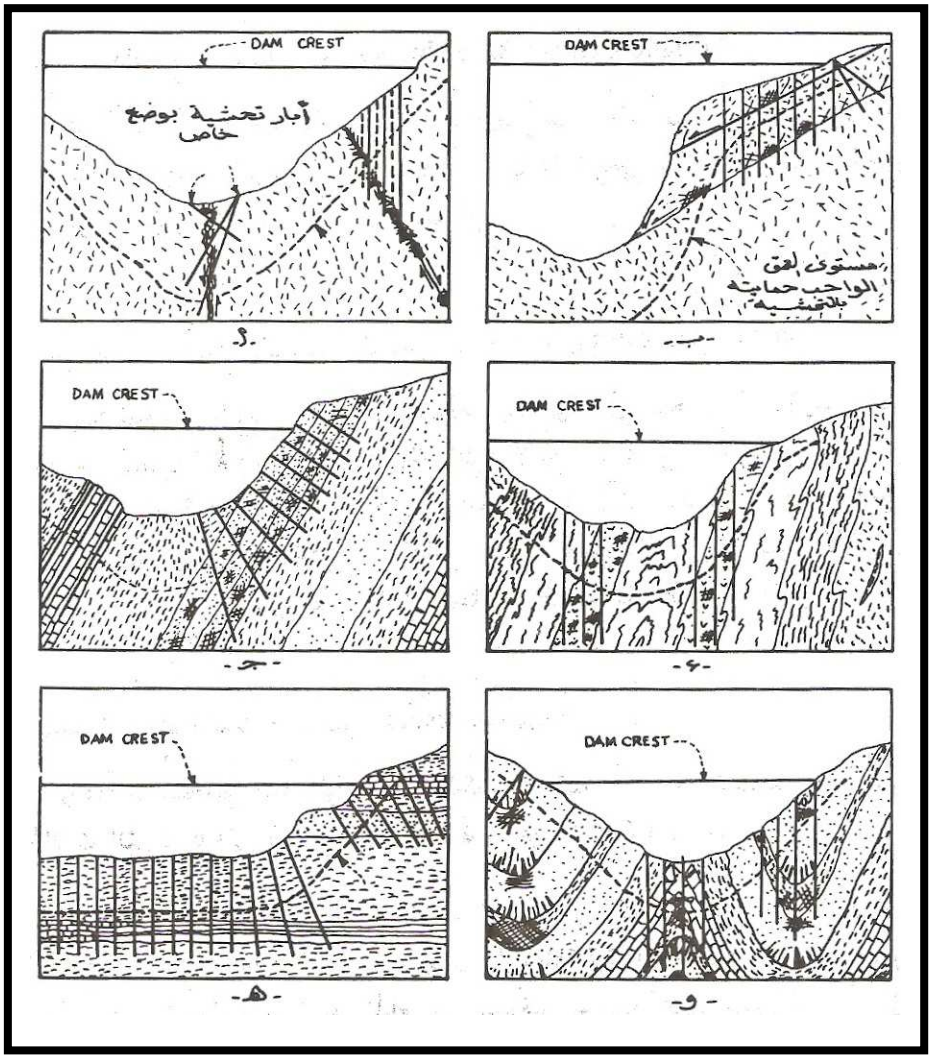
ويشمل هذا السائل نوعين من المحاليل الكيمائية عادةً تمزج سوياً قبل أو أثناء الحقن ، الأول قد يكون محلولاً حاوياً على سيليكات الصويوم والثاني يحتوي على عامل مساعد يعمل على تحويل المحلول الأول إلى مادة أشبه بالجيلاتين الذي يقوم بغلق الفتحات والقضاء على نفاذية الصخور.

12-3- التحشية بالمواد السمنتية العضوية:

ونادراً ما تستخدم هذه المواد وذلك لكونها باهظة الثمن وقد تستخدم في بعض الحالات التي تستدعي الحاجة فيها إلى القضاء على مسامية الصخور. لقد ذكرنا مراراً في السابق أن الفائدة المتوخاة من التحشية هي ملء الفتحات والفجوات داخل صخور الأساس وهذا يؤدي إلى زيادة قوة وقابلية تحمل الصخور بصورة كبيرة وبنفس الوقت يمنع تسلل المياه بين الصخور الموجودة تحت جسم السد أو على جوانبه وفي بعض الحالات الصخرية الرديئة يكون لعملية التحشية مع عملية ربط الصخور بواسطة الكونكريت المسلح (وذلك بحفر آبار وملئها بالكونكريت المسلح) دور رئيسي في زيادة قابلية تحمل الصخور إلى أضعاف مما هي عليه.

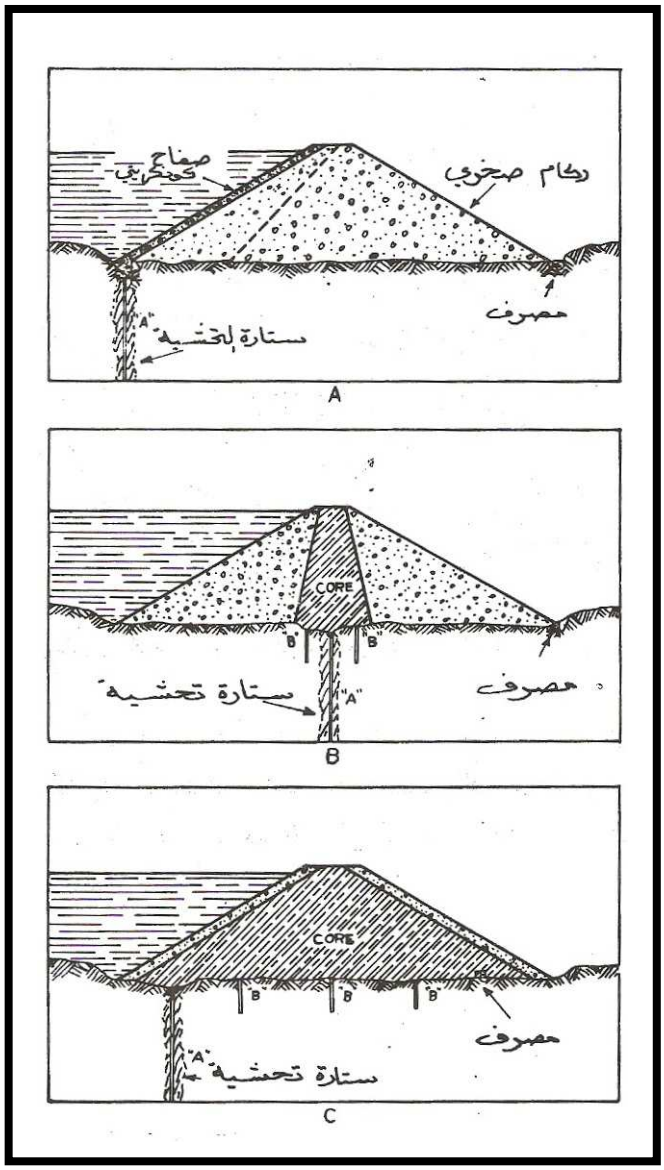
إن عملية معالجة صخور الأساس بواسطة التحشية تكون عادةً على ثلاثة أشكال:

1. المعالجة الموضعية لصخور بعض الطبقات التي تعاني من حالات تكسر أو ضعف في قابلية التحمل وتتم إما عن طريق حقن مواد التحشية أو وضع غطاء فوق الصخور أو كليهما سوياً. الشكل /14/. إن هذا النوع من المعالجة يستخدم مع صخور الأساس وقبل بناء السد ولأعماق لا تتجاوز عدة أمتار.

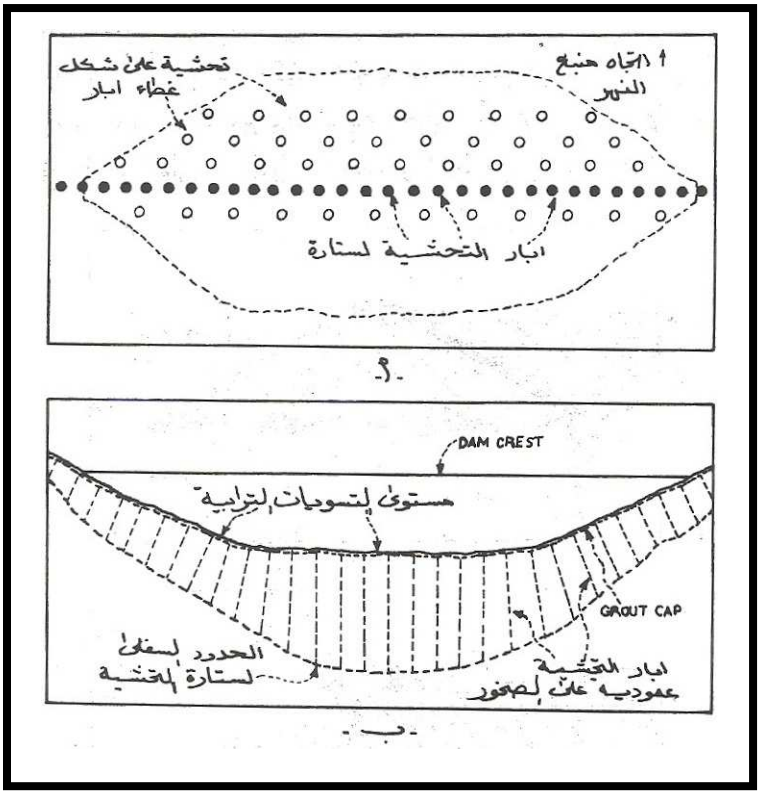


الشكل (14): المعالجة الموضعية بواسطة مواد التحشية لصخور الطبقات التي تعاني من تكسر أو تظهر ضعفاً في قابلية التحمل لثقل جسم السد والضغوط المسلطة عليه

2. المعالجة بشكل ستارة وتشمل حقن مواد التحشية في آبار واقعة على خط واحد ومتقاربة إلى بعضها بحيث تكون أشبه بستارة ضمن صخور الأساس. يعمل هذا الستار على خلق حاجز غير نفوذ للمياه الجوفية. إن عمق وموقع هذا الستار يعتمد على نوع السد والظروف الجيولوجية لصخور الأساس. الشكلين (15 و 16).

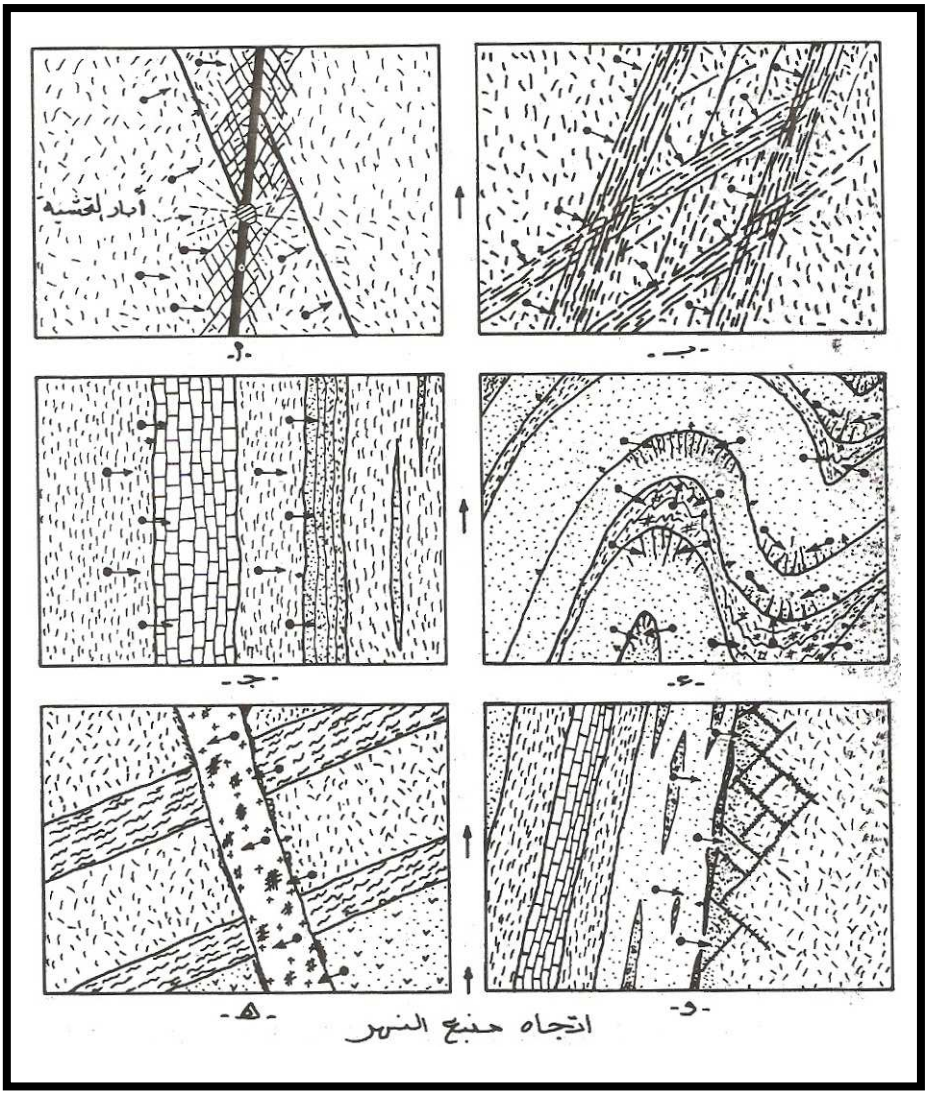


الشكل (15): مقاطع تبين استخدام مواد التحشية كستائر في صخور أساس السد وذلك لمنع تسرب المياه عبر السد



الشكل (16): منظر علوي ومقطع للآبار التي تستخدم لضخ مواد التحشية (المعالجة هنا على شكل غطاء وستارة أيضاً)

3. المعالجة المنتظمة لغايات معينة وتشمل حقن مواد التحشية في آبار موزعة بشكل مدروس وذلك لزيادة صلابة وقابلية تحمل صخور الأساس ككل أو التخلص من حركة المياه الجوفية ضمن صخور الأساس أو جدران الوادي أو جسم السد نفسه. الشكل /17/.



الشكل (17): استخدامات التحشية في المعالجة المنتظمة لغايات معينة

(البقع السوداء تمثل مواقع الآبار والأسهم تشير إلى اتجاه حقن مواد التحشية في تلك الآبار)

13. السدود المطاطية:

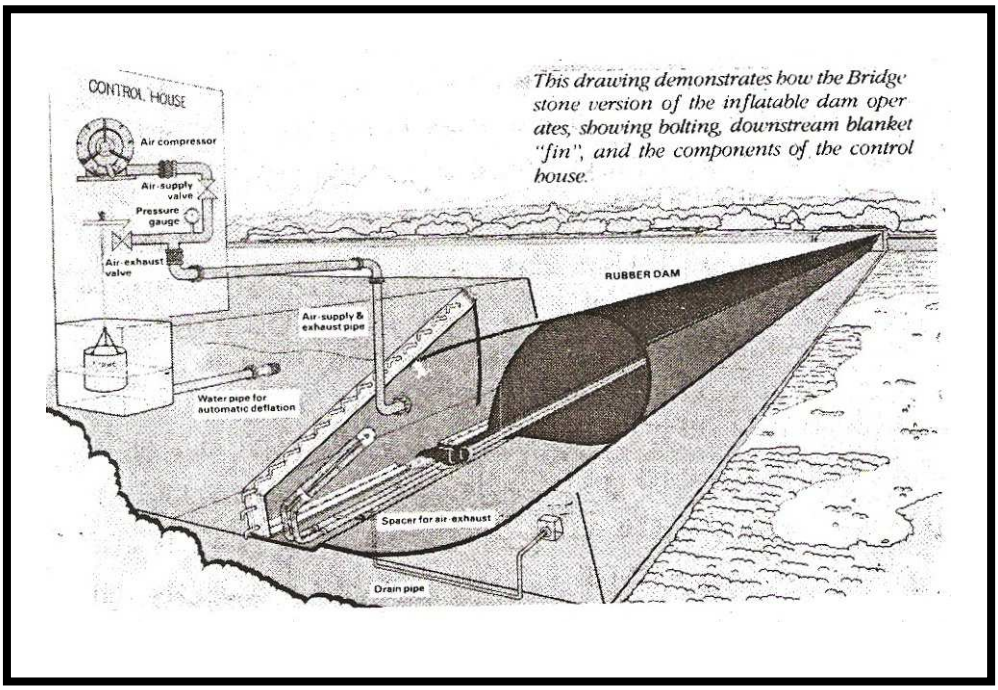
إن السدود المطاطية التي هي قيد الاستعمال الفعلي على نطاق واسع في اليابان، لأن من المؤمل أن تغزو العالم خلال الفترة المقبلة وتوجد الآن أعداد كبيرة من هذه السدود المطاطية

تعمل في اليابان بدأت بالانتشار في بعض الدول الآسيوية و دول أوروبا الغربية خلال العقدين القادمين.

تمتاز هذه السدود بالمرونة العالية ومقاومة الهزات الأرضية إضافةً إلى المقاومة العالية للعوامل الكيميائية المختلفة وعوامل الحت وضمن مختلف الظروف الجوية وتوفر ظروفاً مناسبة للعمل كسدود تثاقلية أو كسدود للتقوية، ويمكن أن تتطور بعض التقنيات ذات العلاقة لتنفيذ هذه السدود مستقبلاً لكي تتضمن السدود ذات البوابات العديدة لأغراض التشغيل وتوليد الطاقة الكهربائية بصورة محدودة. يمكن لهذه الأنواع من السدود أن توفر قابلية تشغيل واسعة للخزانات مثل العمل كحاجز مائي ضمن فترات معينة من السنة واستوائها مع قاع النهر لغرض الخزن وتصريف المياه جزئياً أو كلياً وباتجاهات يمكن التحكم فيها في أوقات أخرى من السنة وحسب متطلبات التشغيل لذا يمكن أن تؤدي هذه السدود خدمات مهمة لمشاريع الري والوقاية من الفيضانات وتنظيم مستويات المياه في القنوات الطبيعية والاصطناعية (جداول الري) استغلال وتصريف المياه الجوفية، السيطرة على مناطق المد والجزر، تكوين تجمعات مائية لأغراض سياحية، العمل كحاجز جيد وفعال لحصر المياه الملوثة والمالحة ومناطق انتشار النفط والعمل على خنق المناطق الحساسة من الوديان ضمن المنخفضات حمايةً للمنشآت المدنية.

إن الفكرة الأساسية خلف هذا المشروع والمتوقع أن يحدث ثورة في مجال تصميم السدود وفي مجالات استثمار الموارد المائية مع بداية القرن الحادي والعشرين مبنية على فكرة أساسها هو أن العالم بصورة عامة ودول العالم الثالث بصورة خاصة يحتاج إلى مشاريع سدود لخزن المياه (صغيرة أو متوسطة) وبأعداد كبيرة حيث يمكن تحت ظروف الفيضان تفريغ هذه السدود بسهولة وبسرعة كبيرة لضمان عدم تحطمها ويمكن أن تصرف أيضاً من خلال عملية التفريغ الكلي أو الجزئي الرسوبيات العالقة والقاعية ذات الأحجام المختلفة. لذا يمكن أن تعتبر هذه السدود إحدى الطرق الفعالة للتخلص من ظاهرة الترسيب في قيعان الأنهر والبحيرات والتي تؤدي إلى تناقص واضح في حجم المياه الجوفية مع الزمن. إن تكاليف إنشاء هذه السدود رخيصة بالمقاييس المادية مقارنةً مع تكاليف السدود الحالية إضافةً إلى التكاليف المعقولة والاعتيادية لتوفير مستلزمات الصيانة كما أنها توفر سهولة ومرونة في نصب وتصاميم السدود وخاصةً في المناطق التي تمتاز بوضع معقد خصوصاً عند مواقع الأسس.

إن هذه السدود، الشكل/18/. يمكن أن تعبأ بالهواء المضغوط أو الماء حيث تتم عملية الإملاء والتفريغ الجزئي أو الكلي من خلال أنظمة تحكم ذات قدرة عالية يمكن برمجتها على الحاسبة الالكترونية أو التعامل معها آنياً بالوسائل الأخرى. إن أجسام هذه السدود تتكون من قطعة واحدة أو قطعتين أو عدة قطع ذات حجرات داخلية يتم اختيار التكوين المناسب منها اعتماداً على ظروف النهر الجيومترية (عرض ، عمق وحجم المياه المصرفية) وكذلك ظروف الطبيعة الجيولوجية لمجرى النهر والمنطقة. لذلك فإن جسم السد بصورة عامة يتكون من أقسام متعددة منفصلة داخلياً إلى حجرات يمكن أن تبقى على انتفاخها كلياً أو جزئياً أو تفرغ من إحدى جوانبها وإلى ارتفاعات محددة أو تفرغ كلياً لتصل إلى قعر النهر.



الشكل (18): نماذج من الهياكل والأجزاء المكونة للسدود المطاطية

إن عملية الإملاء والتفريغ الجزئي أو الكلي بالهواء أو الماء تعتمد على طبيعة تشغيل السد والظروف الهيدروجيولوجية وكمثال على ذلك أنه في فترات معينة من السنة لا تحتاج إلى تجميع

المياه خلف هذه السدود لذا يتم تفريغ السد كلياً أو جزئياً لضمان مستوي متدني من المياه خلف السد كما يمكن العمل بالعكس في فترات أخرى مغايرة .

إن من أهم مشاكل هذه السدود هي إيجاد تقنيات ملائمة لتثبت جسم السد على قاع النهر حيث تمثل هذه المشكلة أدق وأصعب المراحل كما تستغرق معظم الوقت الأساسي لنصب هذه السدود الجاهزة.

لذا يتم اختيار مواقع لحفر الأسس المناسبة ومواقع الصبات الكونكريتية لغرض التثبيت وبأساليب غير اعتيادية إضافةً إلى استخدام مواد مرنة في بناء الأسس لغرض العمل كمواد ماصة للصدمات الناتجة عن تجمع المياه، تفريغ السدود من محتواها المائي أو الهوائي وعند تصريف الرسوبيات الخشنة. وتعتبر حماية المطاط المستعمل لبناء جسم السد من تأثيرات أشعة الشمس مشكلة رئيسة أخرى وفي هذا الصدد تم تطوير تقنيات خاصة لغرض تطوير المواد المطاطية بإضافة بعض أنواع المواد الكيميائية لغرض إعطاء الحماية المقبولة. من المشاكل الثانوية الأخرى هي حماية هذه الأنواع من السدود من عبث المواطنين لذا فإن رفع المستوى الثقافي والإدراك العلمي للتجمعات السكانية المحيطة بمثل هذه الانجازات التكنولوجية تعتبر عملاً ضرورياً وأساسياً.

****

الدراسات الجيوهندسية لبناء الأنفاق

1-المقدمة:

عرف الإنسان الأنفاق منذ قديم الزمان إذ حفرت الأنفاق للمعابد وقصور الملوك والأمراء وحفرت الممرات السرية لغايات عسكرية أو لإخفاء الكنوز والمقابر أو لأسباب أخرى. واليوم بعد عدة آلاف من السنين تشكل الأنفاق ظاهرة حضارية في حياة الإنسان بل إن حركة البناء تحت السطحي أصبحت مألوفة وفي زيادة مستمرة وذلك للأسباب الاقتصادية والعسكرية والسياسية. والآن تبنى الملاجئ ، المخازن الجوفية ، محطات توليد الكهرباء ، المحطات النووية والمعامل والمصانع ذات الأهمية الخاصة تحت سطح الأرض. كما وتشق وتبنى الأنفاق تحت سطح الأرض لحل كثير من اختناقات المرور وتوزيع النقل في المدن الكبيرة وحل مشاكل تخطيط الطرق الجبلية وتقليل التواءات الطرق واختصار المسافات كما أن إنشاء السدود يتطلب عمل أنفاق خاصة سواء لغرض توليد الطاقة الكهربائية أو لتحويل مياه النهر عن مجراه الطبيعي أثناء التنفيذ هذا وتستخدم الأنفاق أيضاً في أغراض المجاري ومد الأسلاك والكابلات وأنابيب الغاز.

2-التحريات الجيولوجية ومواقع الأنفاق:

إن للتحريات الجيولوجية الدور الأساسي في تحديد موقع النفق والمسار العام له وتحديد الأسلوب الأفضل لبنائه. ولكل هذا أثر بالغ في تخفيض الكلفة الكلية وزيادة سلامة النفق وبناءه وأسلوب بنائه. إن ما يقصد بالتحري الجيولوجي لا يقتصر على المسح الجيولوجي للمكاشف الطبيعية السطحية وما تعكسه من تراكيب لباطن الأرض بل يشمل أيضاً المسح الجيوفيزيائي وبإحدى الطرق الجيوفيزيائية المناسبة أو أكثر من ذلك فضلاً عن حفر آبار اختبارية أو في بعض الأحيان إزالة جزء من الغطاء الترابي وذلك للكشف عن طبيعة المواد والصخور التي تغطيها. كل هذا من أجل إعطاء صورة مفصلة ودقيقة عن الوضعية الجيولوجية تحت السطحية لمنطقة مسار النفق وما يجاورها وبالرغم من هذه الدراسات الجيولوجية المستفيضة في كثير من الأحيان تظهر مستجدات جيولوجية عديدة أثناء شق وحفر النفق. غالباً ما تكشف عن أوضاع جيولوجية لم تحدد مسبقاً يستفاد منها في تحسين الصورة.

لذا تهدف التحريات الجيولوجية إلى ما يأتي:

أ- دراسة مفصلة للطبقية والتراكيب الجيولوجية مع إعطاء وصف وافٍ للخواص الطبيعية والميكانيكية للصخور والمواد المكونة لها وبصورة يمكن الاعتماد عليها في تحديد مسار النفق في باطن الأرض.

ب- دراسة مفصلة للظروف الهيدروجيولوجية في منطقة مسار النفق وما يجاورها تتضمن تحديد كمية المياه المتوقع تسربها إلى داخل النفق، الصخور التي تسمح بنفوذية المياه، ملوحة المياه، نوع الأيونات التي تحملها (وذلك لما قد تحدثه من تفاعلات كيميائية مضرة لتبطين النفق الكونكريتي) فضلاً عن دراسة أثر بناء النفق في الظروف الهيدروجيولوجية للمناطق المجاورة كأثره في مستوي منسوب المياه الجوفية أو الأنفاق المجاورة الأخرى.

ت- بعد أن يحدد موقع النفق من التحريات الجيولوجية الأولية يجب على الجيولوجي تحديد وبشكل دقيق الظواهر الجيولوجية التي تتحكم بمسار النفق. فعلى سبيل المثال يجب أن تحدد مواقع الصخور المتعرية والصدوع والصخور التي تكثر فيها الفواصل والتكسرات وذلك للابتعاد عنها بقدر المستطاع. وإذا كان لا بد من أن يكون مسار النفق عبر هذه الصخور فعندئذٍ يفضل أن يكون هذا المسار عمودياً على مستواها بقدر المستطاع أو يتم اقتراح علاجات بعد أن تحدد المواقع بصورة تفصيلية ويتم تقييم دقيق لها.

ث-في تحديد مسار النفق يجب مراعاة مواقع مداخل النفق حيث يجب أن تكون بعيدة عن المنحدرات غير المستقرة أو المنحدرات التي يمكن أن تفقد استقرارها أثناء شق النفق.

ج- إن سمك تبطين النفق وأسلوب بنائه ونوع المواد التي تدخل في تركيبة وتسليحه والضغط المسلط عليه ومقدار وطبيعة هذا الضغط تعود إلى نوع الصخور التي يخترقها النفق وعمقه من سطح الأرض لذا وجب دراسة توزيع الضغط في مختلف مواقع شق النفق وحساب الاجهادات في أعماق مختلفة وتحديد الصفات الميكانيكية والفيزيائية للصخور في النفق.

ح- إن وجود الجيولوجي في موقع العمل وأثناء شق وتشييد النفق له بالغ الأهمية في استمرارية العمل بشكل دقيق وسريع إضافة إلى تقليل احتمالية وقوع الحوادث أو التعرض للمخاطر. حيث يقوم الجيولوجي بإعطاء صورة مسبقة عن الوضعية الجيولوجية والخواص الطبيعية والميكانيكية للصخور قبل الحفر واختراقها وبذلك يستطيع المهندس إجراء الاستعدادات اللازمة للحفر.

خ- إن من القواعد الأخرى للتحريات الجيولوجية هو تقدير كمية المواد الإنشائية التي يحتاج إليها المهندس في بناء وتبطين النفق. إن توفير المواد الإنشائية في موقع العمل يعتبر ضرورياً من أجل ديمومة وانسيابية العمل خاصةً إذا كان موقع النفق بعيداً عن مصادر هذه المواد الإنشائية.

د- تشمل التحريات الجيولوجية أيضاً دراسة تفصيلية لما قد يسببه وجود النفق من أضرار للمناطق السكنية المجاورة وذلك من التغير في منسوب المياه الجوفية أو جفاف لبعض الينابيع التي لها استخداماتها الضرورية أو ما قد يحدث أثناء حفر وشق النفق من اهتزاز وارتجاج أو انخساف للبناء الموجود على سطح الأرض.

مما تقدم تبين أن أول خطوة تنفذ في أي مشروع لمد النفق تأتي من إجراء التحريات الجيولوجية اللازمة لاختبار الموقع لإعداد تقرير مدعم بالخارطة الجيولوجية مع مقاطع في مواقع عديدة لها علاقة بالمسار المقترح للنفق حيث يثبت أفضل المواقع والمسارات للنفق المزمع تشييده على الخارطة.

وبعد أن يتم تحديد مواقع مسار النفق بشكل نهائي يطلب من المختصين إجراء التحريات الجيولوجية المفصلة والدقيقة والتي لها علاقة مباشرة بمسار النفق الدقيق. وتقدم هذه الدراسة ضمن تقرير يشمل جميع الملاحظات التي تم ذكرها سابقاً في أهداف التحريات الجيولوجية وعلى أساس هذا التقرير تبدأ عمليات الحفر وشق النفق، وأثناء عمليات الحفر هذه غالباً ما يحتاج مهندس الحفر إلى مشورة عن وضعية وطبيعة الصخور التي سيتم حفرها. إن هذه المشورة تأتي من الجيولوجي وذلك بالاعتماد على التقرير الجيولوجي المعد سابقاً فضلاً عن حفر الآبار الاختبارية في الموقع. وتحفر هذه الآبار من على سطح الأرض. ويستعان بالحفر الأنبوبي الأفقي عندما يكون النفق تحت سطح الأرض حيث تحفر واجهة النفق ويأخذ اللباب الصخري لفحصه مخبرياً وتحدد الخواص الفيزيائية والميكانيكية للصخور. كما يجب على الجيولوجي أن يكون ذا خبرة عالية فعند حدوث أي إشكال أو ظهور مستجدات أثناء الحفر يجب أن يستطيع معالجة الأمر بصورة لا تؤدي إلى زيادة كلفة المشروع أو تأخير العمل. يعتقد البعض أنه كلما كان النفق قصيراً كانت الكلفة والوقت المستغرق لبنائه أقل وهذا ليس صحيحاً دائماً فعندما يكون مسار النفق في مناطق معقدة جيولوجياً فإنها تحتاج إلى معالجة خاصة. إن هذه المعالجة غالباً

ما تكون على حساب الكلفة الكلية والوقت المستغرق لبناء النفق. لذا فإنه من الممكن تجنب التعقيدات والمشاكل إذا تم اختبار موقع ومسار النفق على أسس صحيحة. إن هذه الأسس توضح من خلال الدراسات والتحريات الجيولوجية التي تشمل دراسة تفصيلية للطبقية والتراكيب الجيولوجية للمنطقة التي يمر فيها النفق وما يجاورها ، حيث يفضل أن تدرس أكبر مساحة ممكنه حول موقع النفق ثم تعد خارطة جيولوجية مفصلة يثبت عليها اتجاه المضرب للطبقات ومقدار ميلها والطيات واتجاه محاورها ، والصدوع وأنواعها وفي الأماكن المغطاة بطبقة غير سمكية من الرواسب يمكن عمل حفر صغيرة لمعرفة طبيعة الصخور التي تحتها.

إن التحري الجيولوجي قد يصبح أكثر تعقيداً إذا كان مسار النفق على عمق كبير تحت الأرض وإذا كانت المنطقة المختارة لموقع النفق في أرض معقدة جيولوجياً وتتكون من تراكيب جيولوجية متداخلة. في هذه الحالة تظهر أهمية التحريات الجيوفيزيائية التي ترافقها عادة حفر الآبار الاختبارية.

3-الدراسات الهيدروجيولوجية لمسار النفق:

إن من إحدى أهم الدراسات الجيولوجية في مشاريع الأنفاق دراسة الظروف الهيدروجيولوجية للمنطقة وللمسار وذلك لما لها من أهمية أثناء حفر وشق النفق وبعد اكتمال بنائه. فإذا كان مسار النفق تحت مستوي منسوب المياه الجوفية أثناء الحفر ستحدث عند ذلك مشاكل عديدة قد تؤدي إلى تعطيل أو إيقاف العمل. وعند تبطين النفق سوف تكون هنالك زيادة في كلفة التبطين لجعل التبطين مقاوماً لضغط الماء المسلط عليه. إن من أهم واجبات الهيدروجيولوجي هو تحديد ارتفاع منسوب المياه الجوفية خلال المواسم الأربعة للسنة، ومن ثم تقدير كمية المياه الداخلة إلى النفق أثناء عملية الحفر والشق وكم يلزم من الآبار لضخ الماء وتخفيض مستوي المياه الجوفية أو اقتراح الأسلوب الأفضل في التخلص من مشاكل المياه الجوفية إضافةً إلى تحديد الخواص الجيوكيميائية للمياه الجوفية وذلك لمعرفة أثرها من المواد الإنشائية المستخدمة في تبطين النفق.

إن من الضروري جداً تحديد كمية المياه التي تدخل إلى النفق وفي أي جزء منه وطرق التخلص منها قبل البدء بحفر النفق. فمن المعروف أن الماء يدخل إلى النفق عند اختراقه لطبقة حاملة للمياه الجوفية. إن معدل سرعة هروب المياه إلى داخل النفق يعتمد على طبقة الصخور الحاملة

له. فالصخور الرملية تتميز بمسامية ونفاذية كبيرة والصخور الكلسية لها نفاذية جيدة أما نفاذية الصخور الطينية فهي ضئيلة علماً بأن نفاذية الصخور بصورة عامة تزداد مع زيادة نسبة الفواصل والتكسرات. وهذا ينطبق على الصخور النارية أيضاً. أثناء حفر النفق يمكن السيطرة على المياه الجوفية والتخلص منها بالطرق المعروفة إذا كانت نفاذية صخور الطبقة الحاملة لها معتدلة. لكن إذا كانت المسامية عالية جداً كما هو الحال في الصخور النارية أو الكلسية ذات النسب العالية من الفواصل والتكسرات أو القنوات أو الكهوف (كما هو الحال في الصخور الكلسية) عندئذٍ يصعب التعامل معها وقد تسبب حوادث غير محبذة إذا لم تجرى الاستعدادات اللازمة للتخلص من المياه قبل وصولها إلى مناطق الحفر. إن عملية حساب كمية المياه التي يمكن أن تدخل في النفق أثناء الحفر ليست سهلة حيث تعتمد على:

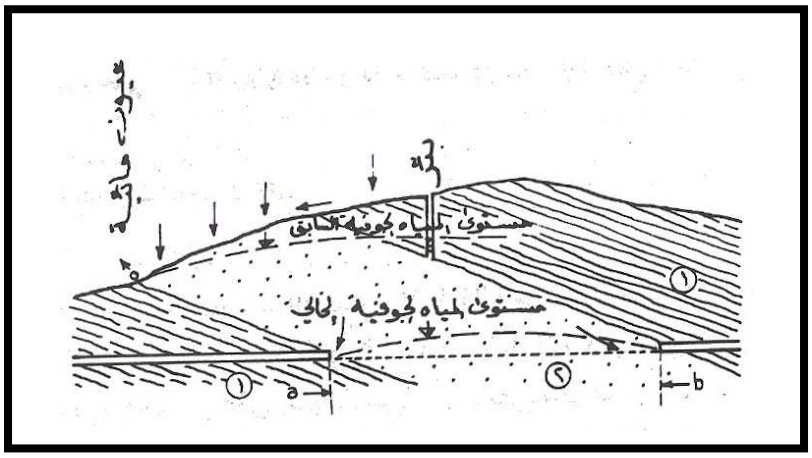
1- مسامية ونفاذية صخور الطبقة الحاملة للمياه. الشكل/1/

2- مساحة المقطع للطبقة الحاملة للمياه.

3- سعة المنطقة المغذية للمياه الجوفية.

4- معدل التغذية.

في حالة (3) و (4) تستدعي الحاجة إلى إجراء دراسة هيدرولوجية مفصلة يحسب فيها معدل الأمطار ، نسبة الرطوبة ، كمية المياه السطحية ، وطبيعة المكاشف الجيولوجية ومساحاتها السطحية وعلاقاتها بمواقع تجمع المياه السطحية.

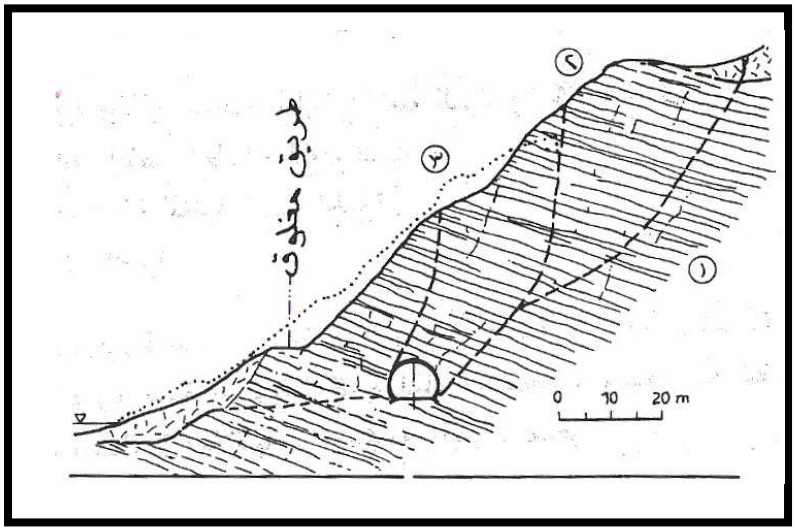


الشكل (1): تأثير النفق على مستوى منسوب المياه الجوفية (المياه تتسرب عبر النفق عندما تشق في طبقة ذات نفاذية عالية "2")

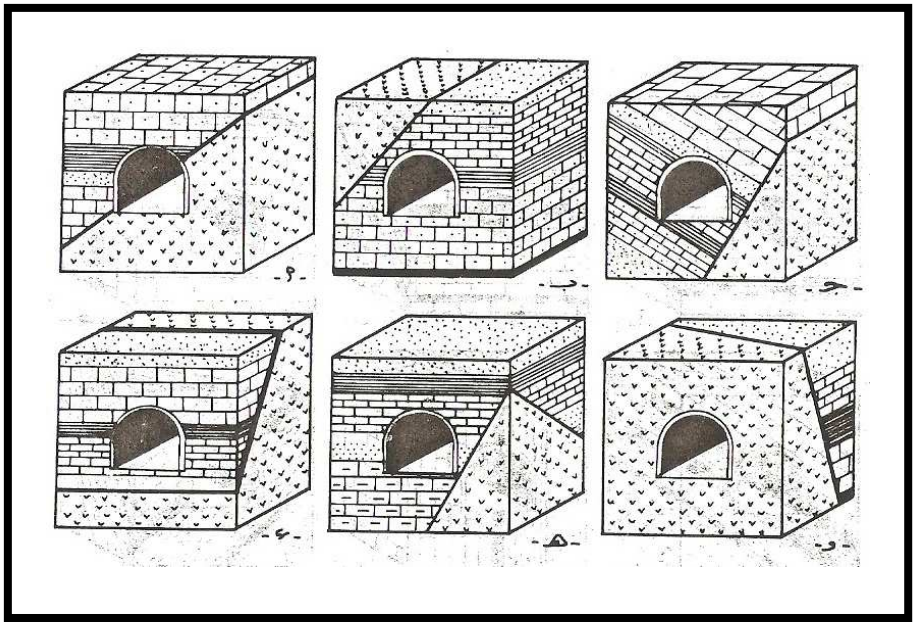
4. المسار الدقيق للنفق:

بعدما يختبر النفق جيولوجياً وتدرس المنطقة هيدروجيولوجياً يحدد المسار الدقيق للنفق. وهنا بعض الأمور التي يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار.

1. الابتعاد وبقدر الإمكان عن المنحدرات أو الوديان لأن النفق بموازاة سطح المنحدر قد يسبب عدم استقرارية المنحدر وبفعل قوة الجذب قد يحدث الانزلاق أو الانخساف والانهيار أثناء حفر وشق النفق أو حتى بعد الانتهاء من البناء. الشكل/2/
2. الابتعاد عن أنطقة الضعف أو التصدع ، لأنها غالباً ما تسبب مشاكل أثناء الحفر حتى بعد اكتمال بناء النفق. الشكل/3/ ، وإذا كان لا بد من المرور عبرها فيفضل أن يكون مسار النفق عمودياً عليها وبذلك يكون مسار النفق قد احتوى على أقصر مسافة ممكنة في ذلك النطاق الضعيف الذي يحتاج إلى معالجة خاصة.

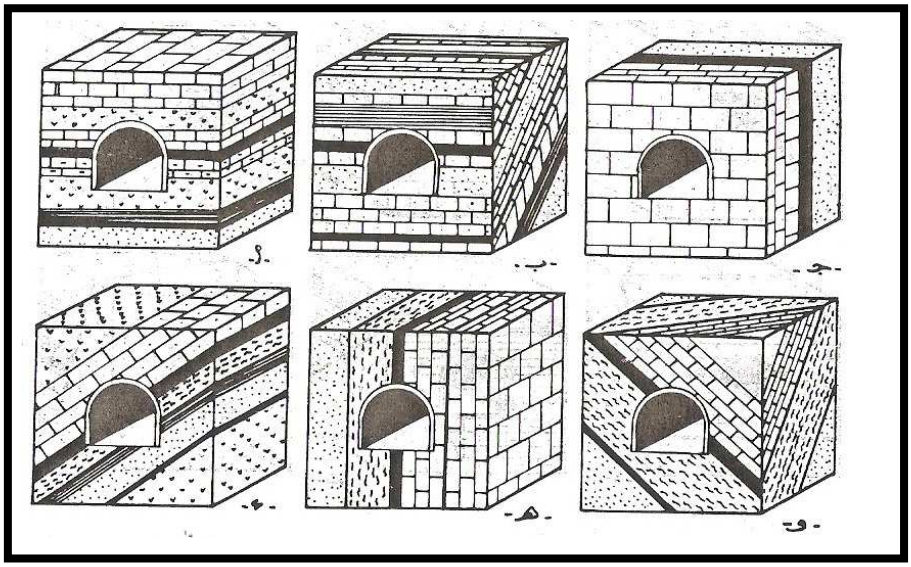


الشكل (2): مقطع جانبي يوضح الانهيار والانزلاق في المنحدر نتيجة شق النفق بموازاة سطح المنحدر.
1. طبقات الأرض ، 2. الشكل السابق للمنحدر قبل شق النفق ، 3. الشكل الحالي للمنحدر بعد حدوث الانزلاق

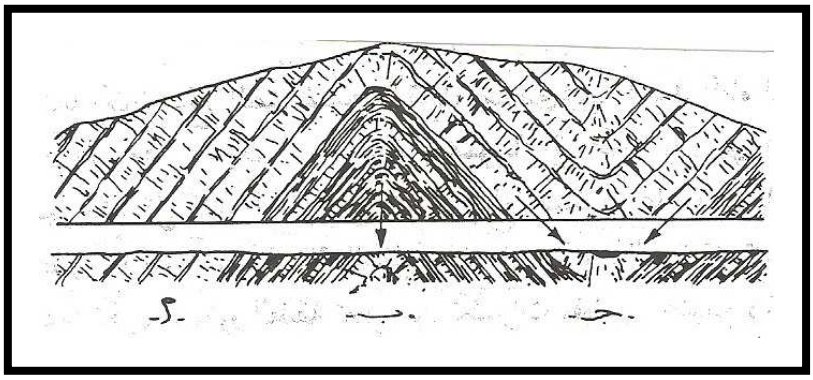


الشكل (3): علاقة النفق مع أنطقة الضعف والتصدع

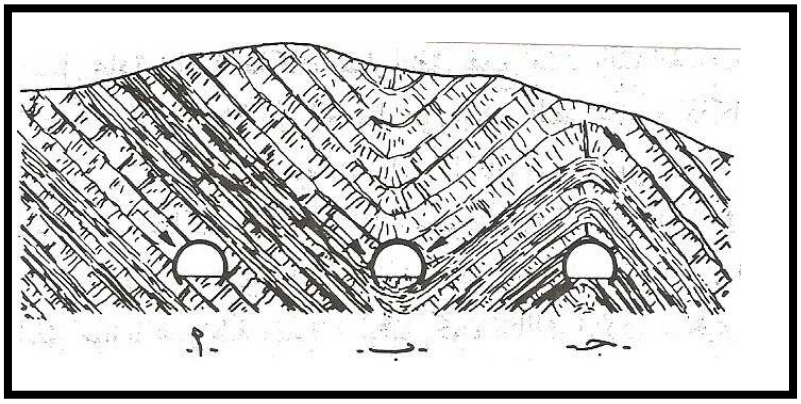
3. عندما يكون موقع النفق ضمن طبقات رسوبية يجب تحديد اتجاه المضرب. الشكل/4/ ، وهنا قد يكون مسار النفق عمودياً على محور طية. وفي الطية المحدبة قد تظهر مشاكل أثناء الحفر مثل انزلاق قطع صخرية على مستويات الضعف أو التطبق مما قد يسبب عرقلة العمل. إن مثل هذه الظاهرة قد تزداد بشكل كبير عندما تكون صخور الطبقة تعاني من تكسرات وفواصل عديدة. الشكل/5/. أما إذا كان مسار النفق في طيه مقعرة عندئذ تظهر مشاكل المياه الجوفية ويمكن لمسار النفق أن يكون موازياً لاتجاه مضرب الطبقات أو محور الطية إلا أن هذا غير مفضل عادةً خاصةً إذا كان مسار النفق يقطع مستويات الضعف (التطبق) حيث يؤدي هذا إلى اختلاف في الضغط على جانبي النفق خاصةً إذا كان هناك اختلاف في التكوين الصخري للطبقات. أما إذا كان مسار النفق بموازاة محور الطية المحدبة فهذا يخلق مشاكل عند الحفر مثل سقوط وانزلاق الصخور وفي حالة كون الميل كبير جداً فسوف يكون هنالك ضغط كبير على جدران النفق موازياً لمحور طية مقعرة فسوف يكون هنالك انزلاق صخري إضافةً إلى تجمع المياه الجوفية وتسربها إلى داخل النفق. الشكل/6/



الشكل (4): علاقة مسار النفق مع اتجاه مضرب وميل الطبقات الرسوبية



الشكل (5): إن أفضل مسار للنفق عندما يكون عمودياً على مضرب الطبقات (المسار يخترق طيات محدبة ومقعرة)



الشكل (6): مسار النفق مواز لمضرب الطبقات

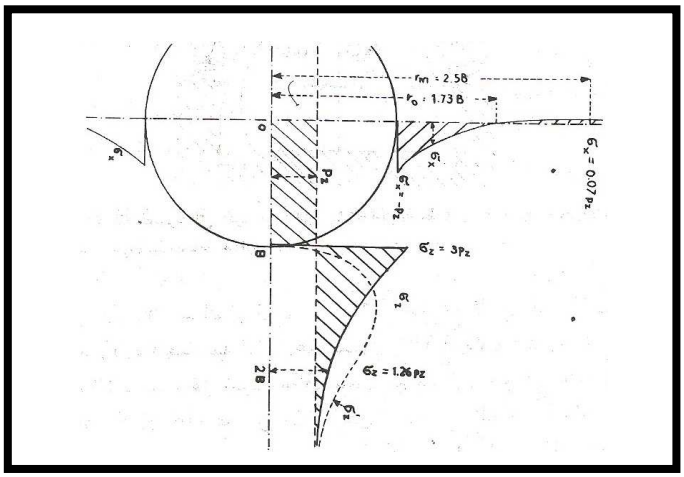
أ. المسار يخترق مستويات التطبق

ب. المسار في لب طية مقعرة

جـ. المسار في لب طية محدبة

5. طبيعة القوى المسلطة على جدران النفق:

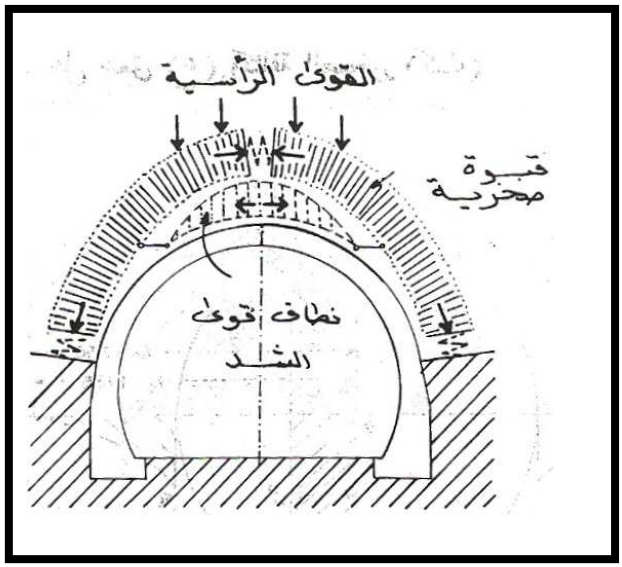
إن أحد واجبات الجيولوجي هو حساب مقدار الضغط المسلط على جدران النفق و الذي على أساسه تحدد طبيعة التبطين والدعائم اللازمة للحفاظ على النفق. إن مقدار الضغط المحسوب ليس بالضرورة يمثل مقدار الضغط الحقيقي المسلط على جدران النفق فهناك عوامل لا يستطيع الجيولوجي التكهن بها مسبقاً لذا تحسب هذه الضغوط نظرياً وذلك بتحليل القوى والإزاحة الناتجة عنها حول فتحة دائرية الشكل في جسم مرن. الشكل/7/



الشكل (7): توزيع القوى حول فتحة دائرية في صخور باطن الأرض

إن القوى الرأسية تمثل وزن الصخور وعند غياب الصخور الساندة تحتها يتكون شكل أشبه بقبوة حول النفق تدعى هذه بالقبوة الصخرية تتوزع فيها القوى. الشكل/8/.

ونتيجةً للقابلية التضاغطية في الصخور تنضغط جدران النفق فتتولد قوة شد فوق سقف النفق نادراً ما تستطيع الصخور مقاومتها، وبذلك يتكون نطاق ضعف موقعي.



الشكل (8): الأنطقة الصخرية التي تتكون حول النفق حيث أن الجزء المخطط يمثل نطاق القبوة الصخرية وأسفله مباشرة يتكون نطاق الشد الذي يسبب تساقط صخور السقف

إن القوى الرأسية تعتمد على عمق (ع) وكثافة الصخور (كث)

ض= ع × كث

وبعد شق النفق فإن معظم هذه القوى تنتقل و تزداد على جدران النفق وفي هذه الحالة فإن قوة تماسك الصخور أو مقدار مقاومتها لقوى القص هي التي تحدد قابلية التحمل و طول فترة التحمل قبل حدوث الانهيار. إن مقدار و طبيعة القوى التي تعمل على صخور جدران النفق تعتمد أيضاً على المسافة من مركز النفق (r) ونصف النفق (B). الشكلين 7 و 8 . وهي كما يأتي:

$$\sigma_z = \rho_z \left(1+B^2/2r^2 + 3B^4/2r^4\right)$$

حيث أن ρ_z يمثل الضغط العمودي (العمق×معدل الكثافة).

إن مقدار القوة التضاغطية عند B = r ، أي عند جدران النفق تساوي $3\rho_z$ ، إن قوة الشد σx تحسب كما يأتي:

$$\sigma_x = \rho_x \, (1-3B^2/r^2) \, B^2/2r^2$$

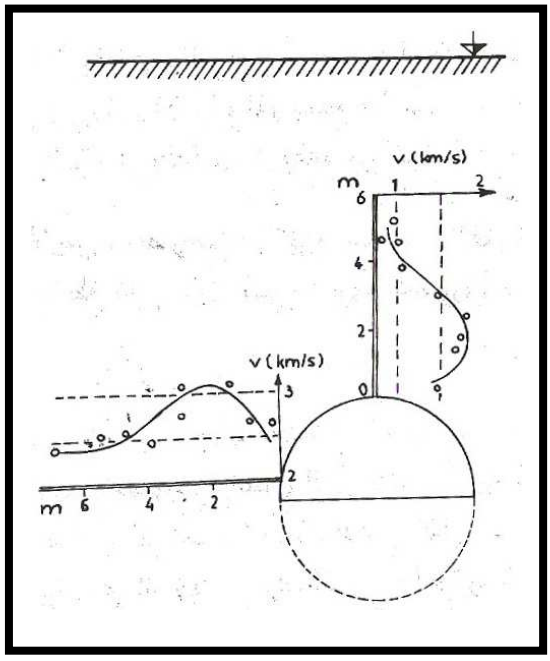
ومن هذه المعادلة نلاحظ أن قيمة الشد σ_x عند B = r ، أي عند سقف النفق تساوي $-\rho_z$ ، والقوة التضاغطية الناتجة عنها تساوي ρ_z 0.07 ، وذلك عند r = 2.5B ، إن قوى الشد عند النفق تسبب نطاق ضعف غير مستقر يحتاج إلى دعامة لمنعه من السقوط، هذا النطاق كلما ارتفع عن سقف النفق كانت كمية الصخور الساقطة أكثر أو بمعنى آخر شمل مساحة أكبر.

إن ارتفاع هذا النطاق يعتمد على الصفات الفيزيائية للصخور. فعلى سبيل المثال إذا كانت فتحة النفق ذو قطر (25 م) كان ارتفاع هذا النطاق (9 أمتار) ووزنه لا يمكن أن تتحمله الدعائم الوقتية التي تستخدم عادةً عند حفر الأنفاق. إن حدة تأثير قوى الشد هذه عادةً تتضاءل بوجود القوى التضاغطية الأفقية في الصخور حول النفق ولو كانت قيمة هذه القوى ثلث قيمة القوى التضاغطية الرأسية لكانت قوى الشد عند سقف النفق تساوي صفراً ولكن هذا لا يعني عدم وجود تساقط لصخور السقف. وعلى أي حال إن القوى التضاغطية الأفقية في الطبيعة عادةً تكون أصغر من مقدار القوى الرأسية. إن تأثير غياب القوى التضاغطية الأفقية قد يصبح واضحاً عند شق النفق بصورة موازية وقريبة من سطح منحدر حيث غالباً ما يحدث انخسافات عديدة لسقف النفق وقد تصل في بعض الأحيان إلى سطح الأرض خاصةً إذا كانت الصخور المحيطة بالنفق تكثر فيها الفواصل والتكسرات وهذه من مميزات صخور المنحدر.

وفي صخور باطن الأرض تنحصر ضغوط كبيرة وعند حفر النفق ضمن تلك الصخور تتأثر المجاورة و المحيطة لها (وذلك بفعل القوى المحصورة) وسرعان ما تتكون فيها أنطقة وهي:

النطاق الأول: ويتمثل بصخور الغلاف الداخلي للنفق وهذه عادةً تكون متكسرة و متفككة نتيجة لتحرر القوى المحصورة. **والنطاق الثاني:** يتمثل بالقبوة الصخرية حول محور النفق. الشكل /8/، حيث يستلم معظم الضغط الرأسي لثقل الصخور التي تعلو النفق وينقله إلى الجدران الجانبية. أي أنه نطاق القوى ككل لذلك يستحسن تبطين النفق بغلاف يستطيع مقاومة هذه القوى و يتحمل وزن وضغط صخور النطاق المفكك. أما **النطاق الثالث:** فيشمل صخور ما بعد النطاق الثاني وهي ثابتة وغير متأثرة بوجود النفق تقريباً.

إن إحدى المهمات الصعبة لدى المختصين هي تحديد سمك النطاقين الأول و الثاني ولقد وضعت العديد من الطرق المباشرة وغير المباشرة لقياس هذا السمك. ففي الطرق المباشرة تحفر جدران النفق بعدد من الآبار الأنبوبية الاختبارية ذات الأقطار الصغيرة ويأخذ اللباب الصخري لفحصه مخبرياً وتحديد طبيعة الإجهاد فيه، أو تقاس الجهود مباشرة في هذه الآبار وبواسطة طرق معينة. أما الطرق غير المباشرة فتشمل القياسات الزلزالية الدقيقة، حيث من المعروف أن زيادة الضغط على الصخور يؤدي إلى زيادة معامل التشويه الذي بدورة يؤدي إلى سرعة الأمواج المرنة وبالتالي إذا قيست هذه السرع لصخور جدران النفق فمن الممكن تحديد نطاق القبوة الصخرية أما كيف تقاس السرع المرنة هذه فيتم عن طريق حفر آبار أنبوبية في جدران النفق. الشكل/9/ ولعمق عدة أمتار ثم يوضع مصدر للموجات المرنة ويتمثل بشحنة صغيرة من المتفجرات حيث تستخدم السماعات الخاصة لالتقاط الموجات المرنة، ومن معاملي المسافة والزمن المقاس يحسب التغير في السرع مع العمق.

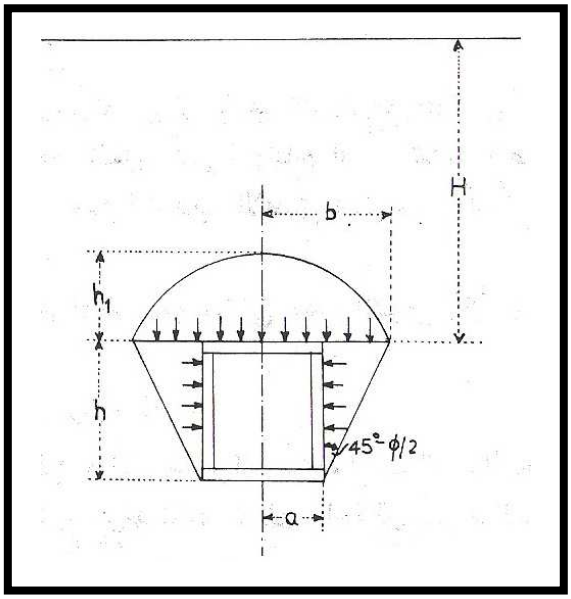


الشكل (9): كيفية استخدام السرع الزلزالية في تحديد سمك نطاق القبوة الصخرية ونطاق الصخور المتكسرة لجدران

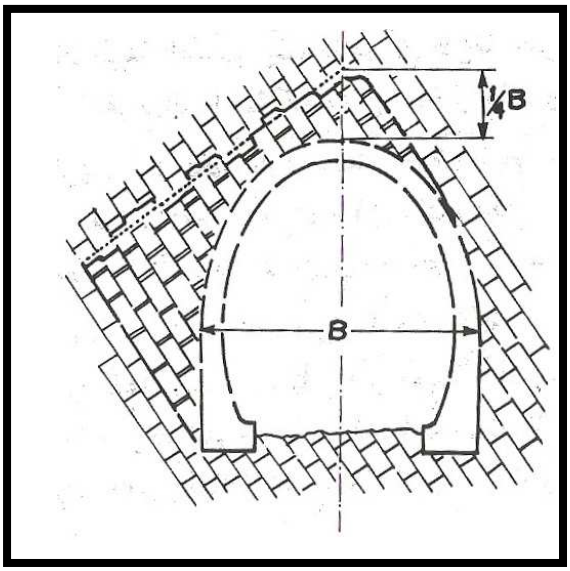
إن طبيعة القوى المحصورة حول النفق قد تكون من التعقيد بحيث قد يحتاج المختصين إلى أكثر من أسلوب في الدراسة للتكهن أو تقدير تصرف الصخور هنالك. لقد استطاع بعض الجيولوجيين ومن الخبرة الطويلة في عمل الأنفاق أن يضعوا صيغاً مبسطة تعتمد على معادلات رياضية يمكن أن تستخدم لتقدير سمك صخور كل نطاق إضافةً إلى حساب مقدار الضغط المسلط على الغلاف المبطن وعلى سبيل المثال تستعمل الصيغة التالية لحساب سمك النطاق الأول المفكك. الشكل/10/

$$h1 = b / F$$

حيث أن قيمة (F) تتراوح من (20) إلى (1) اعتماداً على طبيعة الصخور. فهي تساوي (20) في حالة بازلت و كوارتز ، وتتراوح بين (6) إلى (8) بالنسبة إلى الصخر الرملي الصلب وتصل إلى (1) في حالة الصخور الطينية ويجب أن يفهم هنا أن سمك النطاق المفكك المحسوب في المعادلة المذكورة أنفاً يمثل تقديراً أولياً فقط. فلقد أثبتت الخبرة العملية أن سمك هذا النطاق يعتمد على ظروف أخرى عديدة كعلاقة مسار النفق باتجاه المضرب وميل الطبقات أو طبيعة التطبق والفواصل، التكسرات أو الخواص الفيزيائية العامة للصخور. الشكل/11/



الشكل (10): مقطع عرضي لنفق يوضح فيه سمك الغطاء الصخري والمتكسر والمتفكك والذي يسلط ضغط على دعامات النفق



الشكل (11): تصرف صخور جدران النفق عند شق النفق في طبقات رسوبية مائلة

6. طرق شق وحفر النفق:

أن أحد أهداف الدراسات الجيولوجية هو التعاون مع المهندس المختص في اختيار أفضل السبل في شق وحفر النفق. فسرعة ونجاح العمل تعتمد وبصورة مباشرة على الدراسات المستفيضة التي تحدد الأسلوب الأفضل لشق وحفر النفق ، طبيعة المساند والدعامات ونوع التبطين . إن أفضل أسلوب لحفر الأنفاق يعتمد على طبيعة الصخور وكما يأتي :

1. الحفر في صخور صلبة ومتماسكة:

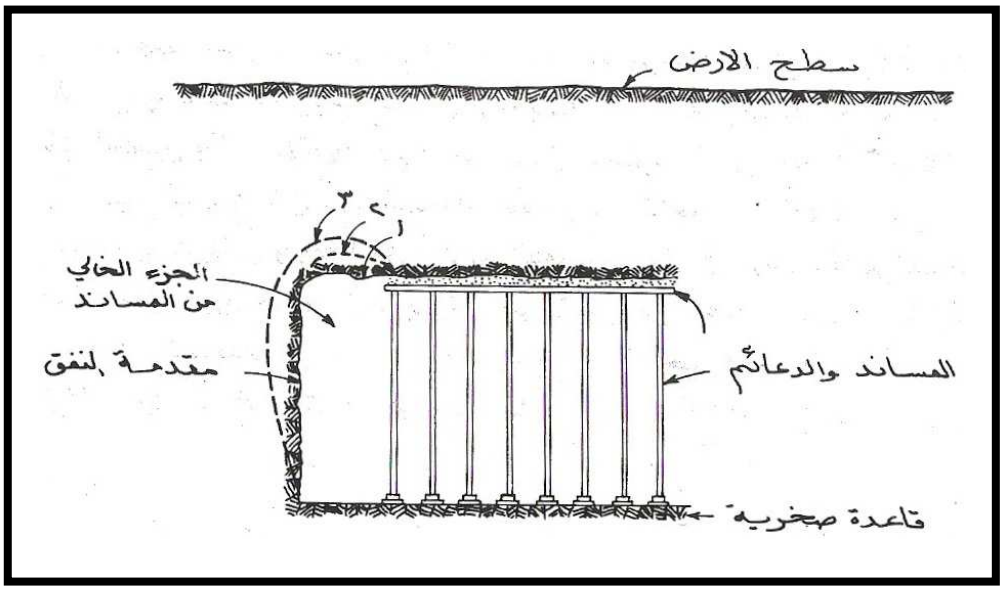
وفي هذا النوع قد لا تكون هنالك حاجة إلى استخدام المساند أو الدعائم الوقتية خاصةً إذا كانت سعة الفتحة صغيرة أو تكون هنالك حاجة إلى المساند الشكلية لمنع تساقط صخور السقف.

2. الحفر في صخور معتدلة الصلابة والتماسك:

وفي هذه الحالة يجب أن تستخدم المساند والدعائم لمنع صخور جدران وسقف النفق من السقوط والانهيار. إن عملية التبطين المؤقت قد يستغرق وقتاً ولكنها ضرورية جداً للحفاظ على سلامة النفق والعاملين فيه.

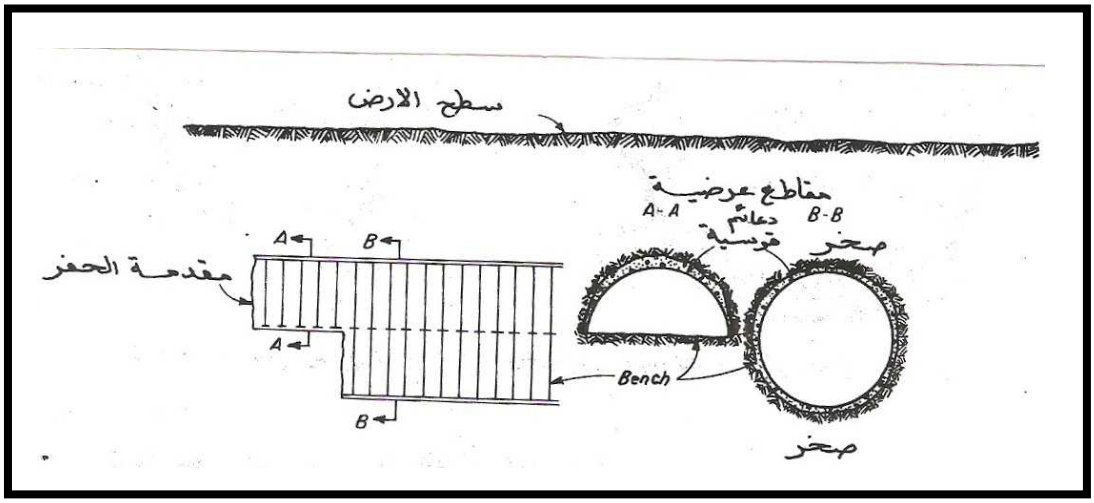
3. الحفر في صخور مفككة أو غير صلبة:

وفي هذا النوع من الحفر تكون هنالك حاجة إلى الدعائم والمساند الوقتية إضافةً إلى التبطين بالكونكريت المسلح للأجزاء المنجزة من النفق قبل البدء بحفر الجزء الآخر. إن طبيعة الصخور أيضاً لها دور في طريقة حفر وإزالة صخور النفق حيث يمكن أن يكون الحفر بإزالة واجهة كاملة من صخور النفق وخطوة بعد خطوة. الشكل/12/ ، أو يمكن أن يكون بإزالة صخور نصف واجهة فقط وتوضع المساند والدعائم ثم يباشر بإزالة النصف الآخر. الشكل/13/ ، كما يمكن أن يشق النفق وذلك بحفر نصفه العلوي أولاً مع إجراء تحوطات الأمان في الدعائم ثم بعد ذلك يباشر بحفر النصف الأسفل منه وفي حالة التعامل مع الصخور أو المواد المفككة تحفر فتحات صغيرة تمثل الحدود أو الجدران الجانبية للنفق وتبطن بشكل دائمي وبعد ذلك يباشر بإزالة الجزء الوسطي. الشكل/14/ ، أو قد يحفر عدد من الفتحات ذات الأقطار الصغيرة وتبطن الأجزاء التي تمثل جدران النفق بالتبطين الدائم ثم تحفر وتزال الأجزاء البينية. إن عملية الحفر بحد ذاتها تتم باستخدام المتفجرات وإن كمية المتفجرات المستخدمة تقدر من قبل المختصين وذلك بالاعتماد على طبيعة الصخور وأسلوب العمل المختار في حفر النفق فعلى سبيل المثال في شق نفق باستخدام أسلوب حفر الواجهة الكاملة في البداية تحفر حفر أنبوبية طويلة في واجهة النفق ثم توضع المتفجرات فيها وفي الوقت الحاضر أصبحت هنالك خبرة كبيرة جداً في كيفية توزيع الحفر الأنبوبية هذه وعمقها والمسافة بينها وكمية المتفجرات المستخدمة بحيث يتمكن الخبير من إزالة الصخور وعمل حفرة بشكل خال من التشويهات أو الفراغات التي قد تسبب مشكلة أثناء عملية التبطين. الشكل/15/

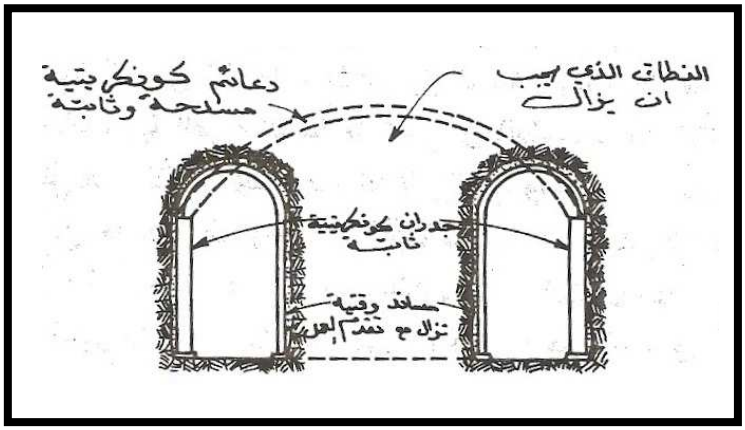


الشكل (12): أحد الأساليب المستخدمة في حفر وإزالة صخور النفق

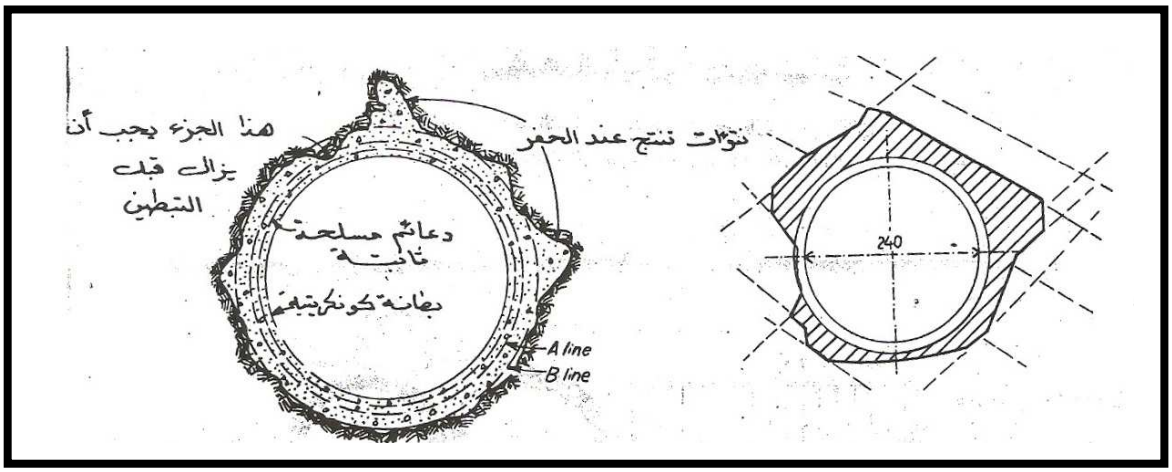
1 ، 2 ، 3 تمثل مراحل انهيار الصخور عند عدم وضع المساند والدعائم



الشكل (13): أحد الأساليب المستخدمة في حفر وإزالة صخور الأنفاق



الشكل (14): الأسلوب المستخدم في حفر وشق النفق في المواد المفككة



الشكل (15): مقطع عرضي في نفق يوضح النتوءات الصخرية في جدران النفق والتي تخلق مشاكل أثناء التبطين

7. حفر الأنفاق في الأراضي غير صخرية:

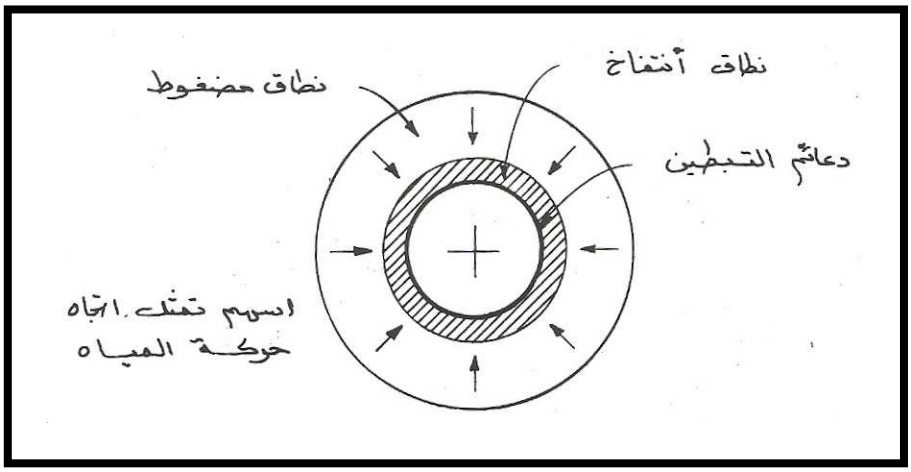
عند حفر وشق النفق في باطن الأرض المتكون من تربة أو مواد مفككة ذات قوة تماسك ضعيفة نسبة للصخور غالباً ما يحدث الانهيار للفتحة الأولية وبعد دقائق أو ساعات من عملها (في حالة التربة الطينية الصلبة قد تصل إلى /24/ ساعة قبل الانهيار) فلذا عند العمل في مثل هذه الظروف يجب وضع الدعائم الوقتية في الحال. كما يجب الانتباه إلى عدم ترك أجزاء من جدران النفق (حتى وإن كانت صغيرة) غير مغطاة بالدعائم لأنها قد تسمح بهروب المواد المفككة إلى داخل النفق وبالتالي تسبب التكهف خلف الدعائم وهذا غالباً ما ينتهي بانهيار كامل ومفاجئ

قد يؤدي إلى دفن ما هو موجود في النفق. ولهذا السبب يفضل تبطين الأجزاء المنجزة من النفق بالتبطين الكونكريتي قبل البدء بالتقدم في الحفر.

إن أهم المشاكل التي تواجه الحفر في المواد المفككة هي المياه الجوفية فهي تشق طريقها إلى النفق للاختلاف في الضغط. ومن الممكن التخلص من المياه الجوفية بخفض منسوبها تحت مستوى مسار النفق أو استخدام طرق أخرى تمنع تقدم الماء إلى النفق مثل معالجتها موقعياً والتخلص منها وسحبها إلى خارج النفق.

وفي بعض الأحيان قد تحتوي المواد المفككة على نسبة عالية من المواد الطينية وهذه المواد قد يكون لها خاصية الانتفاخ عند امتصاصها للماء حيث تمتص الرطوبة في جو النفق أو من المياه الجوفية. إن انتفاخ هذه المواد الطينية يؤدي إلى تسليط ضغط مضاف على هذه الدعائم فإذا كانت قابلية تحمل هذه الدعائم غير كافية فقد يحدث الانهيار.

إن الضغط الناتج في انتفاخ المواد الطينية قد يؤثر على التبطين الدائم للنفق أيضاً لذا يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار قابلية التبطين في مقاومة الضغط المتزايد ولهذا السبب يفضل أن يكون شكل النفق دائرياً لتخفيف هذه الضغط المسلط عليه. الشكل/16/



الشكل (16): طبيعة القوى الناتجة من انتفاخ المواد الطينية المحيطة بالنفق. لذا يفضل أن يكون النفق على شكل دائري لتخفيف حدة تأثير الضغط المسلط في التبطين

****

الفصل الثاني عشر

الدراسات الجيوهندسية للطرق والجسور

1. المقدمة:

عرفت الطرق منذ قديم الزمان وفي الوقت الذي لم يعرف فيه بعد معنى التحريات الجيولوجية . ومع مرور الوقت وحصول التطور في أساليب بناء الطرق والجسور أيقن المهندسون أن للتحريات والدراسات الجيولوجية أهميتها القصوى في تحديد المسار الأفضل للطرق والجسور التي تعكس على الكلفة والجودة ومعامل الأمان.

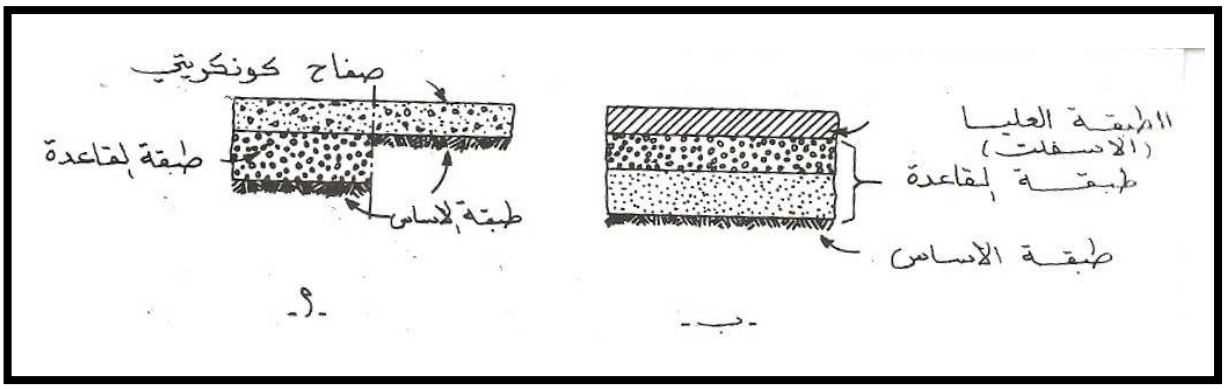
2. الطرق :

إن قابلية تحمل الطريق لضغوط العربات المتباينة واهتزازها يعتمد على المواد المستخدمة في بناء الطريق وعلى الطبيعة الجيولوجية لسطح الأرض . إن الهدف الرئيسي من المواد المستخدمة في بناء الطريق هو تحملها ونقل الضغط إلى منطقة الأساس وفي نفس الوقت منع نفوذ المياه إلى صخور أو طبقة الأساس أو إلى داخل مواد بناء الطريق. إن السمك الكلي لهذه المواد يختلف حسب نوع الطريق وتتكون عادة من ثلاث طبقات /الشكل1/ وهي تشمل من الأعلى إلى الأسفل:

أ. الطبقة العليا.

ب. طبقة القاعدة.

ج. طبقة الأساس.



الشكل (1): طبقات المواد المستخدمة في بناء الطريق

أ. تستخدم في مناطق ذات قابلية تحمل ضعيفة

ب. تستخدم في المناطق ذات قابلية تحمل جيدة

ويقصد بطبقة الأساس سطح الأرض الذي يعالج ليصبح مستوياً وذلك بإزالة التشويهات منه ، أو قد تضاف إليه مواد ترابية أو رملية تعدل بعد ذلك لتصبح سطحاً مستوياً . أما طبقة القاعدة فهي عادةً تتكون من مواد لها نفاذية عالية للمياه وتشمل الحصى أو القطع الصخرية.

تضغط هذه الطبقة وتعدل حتى تصبح ذات سطح مستو . أما الطبقة العليا فيمكن أن تكون على نوعين الأول هو الكونكريت المسلح حيث يصل سمك هذه الطبقة إلى (15 سم) أو أكثر وتعمل هذه الطبقة على تحمل جزء كبير من الضغط المسلط على الطريق وتستخدم في الأراضي أو المناطق التي لها قابلية تحمل قليلة . والنوع الثاني فهو عبارة عن طبقات من الإسفلت الممزوج مع قطع صخرية أو حصى ويتراوح سمكها بين (5 سم) إلى (15 سم) .

3. التحريات الجيولوجية في بناء الطرق :

إن التحريات الجيولوجية الأساسية التي يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند بناء الطرق هي:

1- التحريات الجيولوجية الأولية لاختيار الموقع الأفضل للطريق وهنا يجب أن تترك حرية الاختيار للجيولوجي لبيان أفضل المسارات من الناحية الجيولوجية.

2- التحريات الجيولوجية عن التربة المناسبة أو المواد المفككة التي يمكن أن تستخدم في بناء الطريق ورفعه على مستوي سطح الأرض.

3- إعطاء وصف جيولوجي لمسار الطريق وتحديد قابلية تحمل التربة والطبقات التي سوف يستند عليها الطريق مع تقديم المقترحات حول طبيعة المعالجات التي يمكن أن تزيد من قابلية تحمل الأساس.

4- في حالة بناء الطريق في مناطق وعرة يجب إعطاء دراسة أولية عن طبيعة المنحدرات واستقراريتها وأساليب معالجتها وتكاليفها.

5- عند وجود الحاجة إلى بناء الجسور أو الأنفاق مع بناء الطريق يجب إجراء تحريات جيولوجية خاصة وموقعيه لبناء هذه التراكيب الهندسية.

4. التحريات الجيولوجية الأولية لاختيار المسار المناسب للطريق :

إن اختيار مسار مناسب لطريق قد تتحكم فيه عوامل اجتماعية وعسكرية أو سياسية .إلا أن على المختص تحديد أفضل مسار اعتماداً على الطبيعة الجيولوجية للمنطقة . وعلى سبيل المثال يحاول المختص الابتعاد عن التربة الطينية والبناء على الصخور الصلبة واستعمال التربة الرملية كمواد أساس لتجاوز مشاكل الصخور الطينية أو التربة الطينية التي قد تخلق مشاكل عدة مثل الانتفاخ . كما وتسبب حصر المياه وتجمعها على جانب الطريق مما قد يؤدي إلى حدوث الانزلاقات .

وفي المناطق الجبلية يجب على الجيولوجي الابتعاد عن الصخور المتجوية ذات التشققات الكثيرة وذلك لقابلية تحملها الضعيفة وعدم استقرارها . لذا قد يتطلب الأمر عمل قطع عميق في الأرض من أجل الوصول إلى صخور مناسبة . وقد يقترح المختصون بناء الأنفاق في بعض المواقع لزيادة الأمان والسلامة .

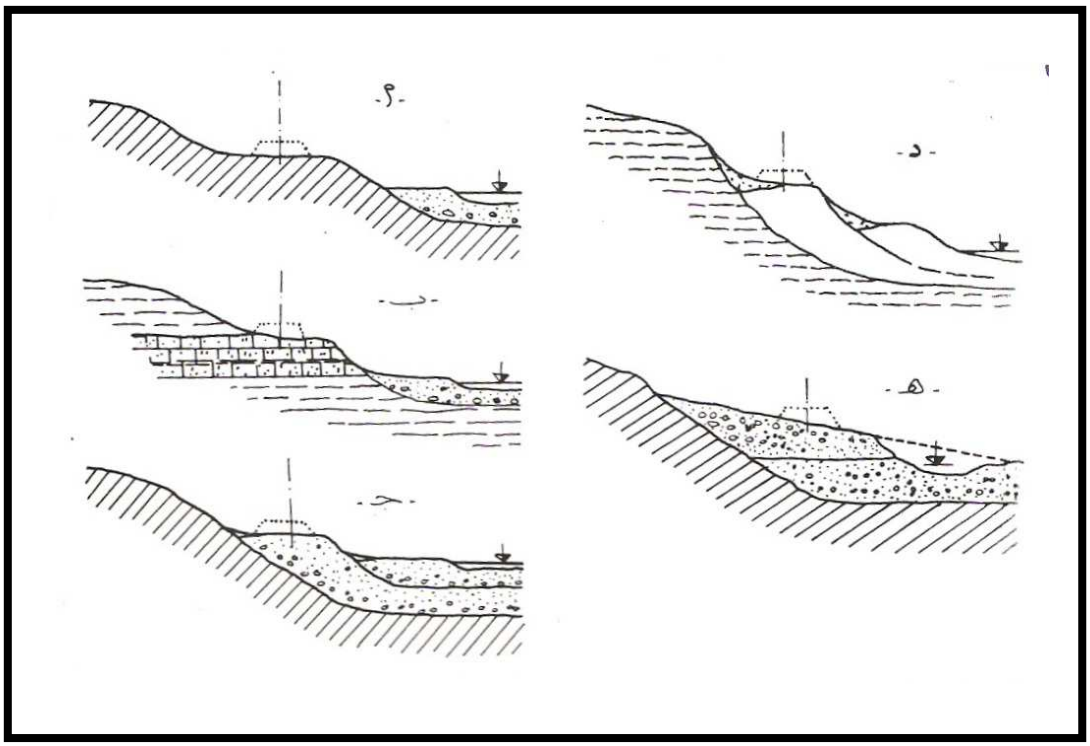
إن التحريات الجيولوجية لا تقتصر فقط على تحديد طبيعة الصخور وقابلية تحملها بل تأخذ بعين الاعتبار المياه وتصريفها عبر الطريق لأن الطرق عادة تشكل حاجزاً تتجمع عنده المياه لذا يجب تحديد أفضل السبل في التخلص من هذه المياه المجتمعة وقبل حدوث أي أضرار حيث تحسب كمية المياه التي يمكن أن تتجمع عند الطريق وعلى هذا الأساس توضع تصاميم التصريف المختلفة بحيث تعطي أنسب معدل للتصريف عبر الطريق.

إن عمليات القطع لسطح الأرض أثناء بناء الطريق يمكن أن تنتج عنها مواد أولية تستخدم في بناء الطريق نفسه لذا يجب تحديد مدى صلاحيته هذه المواد في البناء هذا إضافة إلى تحديد المواقع القريبة المناسبة للحصول على مواد البناء الأولية.

إن جميع المعلومات التي تقدم ذكرها تقدم على شكل تقارير يضاف إليها خرائط عليها المسارات الأفضل للطريق والوضع الجيولوجي لسطح الأرض كما يشمل التقرير التوصيات حول نوع التحريات التفصيلية التي يجب عملها وأفضل أسلوب لشق وبناء الطريق.

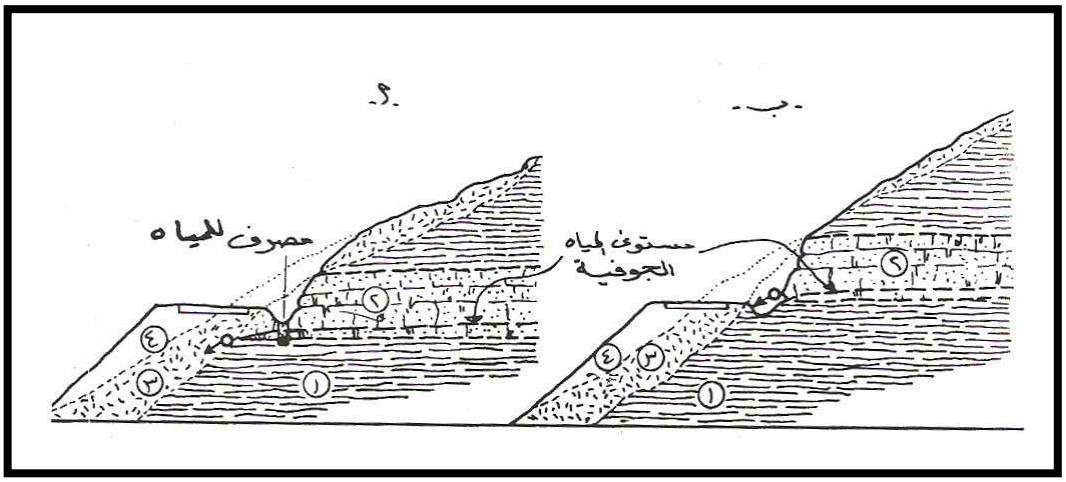
5. التحريات التفصيلية لمسار الطريق:

وهي التحريات الجيولوجية التي على أساسها يتم تحديد المسار الدقيق (النهائي) للطريق أفقياً ورأسياً . حيث توجد عوامل جيولوجية عديدة تؤدي دوراً في تحديد هذا المسار ، كطبيعة صخور مكاشف طبقات الأرض ، طبيعة المنحدرات المجاورة ، الطبيعة التكتونية للمنطقة ، هيدرولوجية وهيدروجيولوجية المنطقة وبذلك فإن التحريات الجيولوجية سوف تكون متعددة ومتشبعة لأنها تخص بناء طريق وتحديد كمية القطع وشق الأنفاق وتشييد الجسور أو بناء جدران أو غير ذلك. لذا فإن طبيعة الدراسات الجيولوجية سوف تكون متباينة بين نقطة وأخرى من الطريق وبمعنى آخر قد يكون لكل جزء من الطريق ظروفه الجيولوجية الخاصة . فعند مرور مسار الطريق في المناطق الوعرة قد تكون هنالك حاجة إلى دراسات جيولوجية وجيوفيزيائية وهيدرولوجية وهيدروجيولوجية تفصيلية إضافة إلى حفر الآبار. أما في المناطق السهلة قد يكتفي الجيولوجي بحفر بضعة آبار اختبارية لمعرفة تراكيب التربة أو الطبقات التحت سطحية . فعلى سبيل المثال يمكن أن يكون مسار الطريق خالياً من المشاكل إذا اختبر في وضع جيولوجي كما هو موضح في (أ) و(ب) في حين يحتاج الوضع (ح) و (د) و (هـ) دراسة جيولوجية تفصيلية لتحديد أنطقة الضعف وعدم الاستقرار في المنحدر. الشكل(2).



الشكل (2): أمثلة عن وضعيات جيولوجية مختلفة
أ ، ب ، تمثل منحدراً مستقراً يمكن أن يستخدم كمسار لطريق
جـ ، د ، هـ ، تمثل وضعيات غير مستقرة للمنحدر ولا يمكن أن تستخدم كمسار لطريق

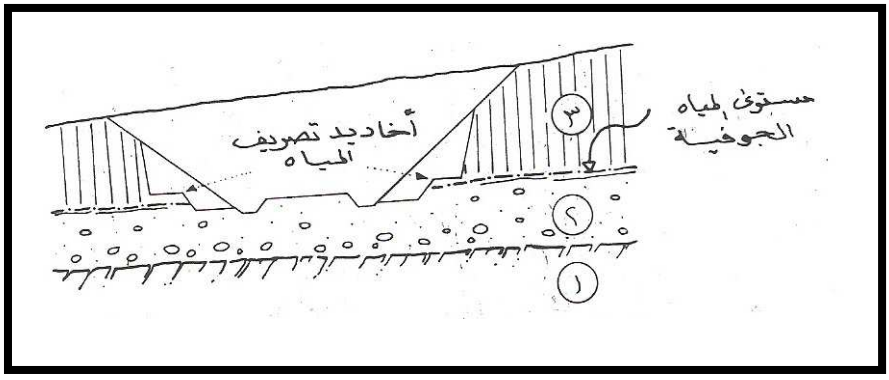
وكذلك في وضع جيولوجي معين يسبب ارتفاع منسوب المياه الجوفية قلة الاحتكاك الداخلي للتجمعات الفتاتية الصخرية على المنحدر وبالتالي قد يكون مصدراً في عدم استقرارية المنحدر أو بقاءه ككل . لذا فإن إحدى وسائل المعالجة هي إزالة جزء من التجمعات الفتاتية لهذا المنحدر ووضع قناة لاستلام المياه المتدفقة من طبقة الحجر الرملي. الشكل(3).



الشكل (3): تأثير المياه الجوفية من مسار طريق في منحدر متكون من مواد ترابية (تعالج هذه بإزالة جزء من المواد الترابية وتصريف المياه الجوفية)

1. مارل ، 2. حجر رملي ، 3. قطع صخرية مع مواد أخرى مفككة ، 4. مواد ترابية

إن بناء الطريق قد يتطلب إزالة الطبقة الترابية العليا ، إذ أن ارتفاع منسوب المياه الجوفية من هذه الطبقة غير مستقرة ويتعرض إلى انخفاضات عديدة وبالتالي لا تصلح كطبقة أساس لذا ينخفض مستوى الطريق ليصبح فوق طبقة أكثر تحملاً ومناسبة كطبقة أساس. الشكل(4) ، ثم تبنى الجدران الكونكريتية المائلة لمنع انزلاق المواد المفككة من المنحدر إلى الطريق .



الشكل (4): قطع في مواد مفككة وذلك لبناء مسار طريق على طبقة الحصى

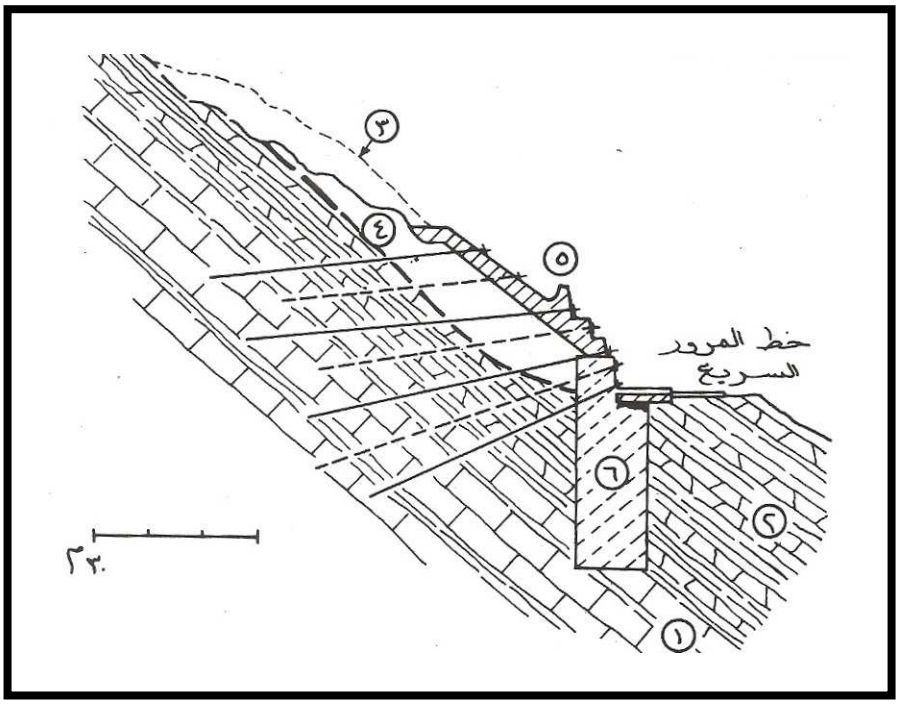
1. طبقة صلبة ، 2. طبقة حصى ، 3. طبقة مواد ترابية مفككة

6. مشاكل القطع في بناء الطريق:

إن التحريات الجيولوجية لا تقتصر على تحديد مسار الطريق فقط بل تستمر أثناء مد الطريق وبنائه. فعند مد الطريق من المحتمل إزالة أو قطع الأجزاء المرتفعة من سطح الأرض أو الإضافة إلى الأجزاء المنخفضة .

إن القطع وإزالة الغطاء السطحي يخلق منحدرات ذات استقرارية تعتمد على نوع صخور الطبقات المنكشفة في هذا المنحدر. إن نقاط الضعف في هذه الصخور واستقرارية المنحدر ككل تحددها التحريات الجيولوجية . هذا إضافة إلى تخمين مقدار التجوية والتعرية التي يمكن أن تصيب هذه الصخور المنكشفة وتحديد مقاومتيها إلى الظروف الجديدة ، إذ بإزالة صخور الغطاء تتعرض الصخور السفلى إلى عوامل التجوية والتعرية بصورة مباشرة مما قد يخلق ظروفاً جديدة تؤدي إلى تقليص فترة استقرارية المنحدر. كما يجب الانتباه لوجود المياه السطحية التي تعمل على تقليل عمر واستقرارية المنحدر. وتوجد العديد من الإجراءات الوقائية للتخلص من مشاكل المياه السطحية هذه إضافةً إلى أساليب هندسية خاصة بزيادة استقرارية المنحدر كبناء الجدران الكونكريتية أو ربط أجزاء المنحدر بواسطة أعمدة كونكريتية أو أجراء عمليات التحشية. الشكلين(5-6) ، ولعل أصعب ما يواجه المختصين في استقرارية المنحدر هو التربة المفككة حيث تؤدي مياه الأمطار والمياه الجوفية وحتى الاختلاف في درجات الحرارة والغطاء النباتي دورها في تحديد استقرارية هذه المنحدرات .

هذا إضافةً إلى نوع المعادن الطينية. إن الخبرة الطويلة لدى المختص تجعله يفضل المنحدرات ذات الميل القليل وهذا ليس متوفراً دائماً فضلاً عن أنه ليس من الضروري أن يكون منحدراً مثالياً خالياً من المشاكل .

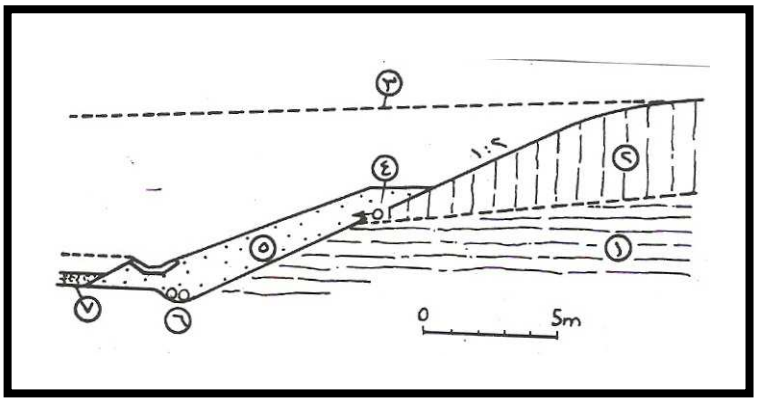


الشكل (5): مثال لإحدى طرق معالجة استقرارية المنحدر. حيث تستخدم الأعمدة الكونكريتية والكونكريت المسلح لربط صخور المنحدر.

1 ، 2 . طبقات صخرية من مارل وحجر جيري

3. شكل المنحدر السابق ، 4. سطح الانزلاق

5. صفائح كونكريتية مسلحة ، 6. عمود كونكريت لتثبيت قدم المنحدر



الشكل (6): مثال لإحدى طرق معالجة استقرارية المنحدر المتكون من مواد مفككة وطينية ، وذلك بإزالة جزء منه وإعادة ترتيبه بالأسلوب المناسب.

1 ، 2 . مواد ترابية وطينية ، 3. شكل المنحدر قبل الحفر

4. اتجاه تسلل المياه الجوفية ، 5. طبقة من الحصى لتثبيت قدم المنحدر

6. قنوات تصريف المياه المتجمعة ، 7. مواد القاعدة المستخدمة في بناء الطريق

7. مواصفات سطح الأرض المستخدم كأساس في بناء الطرق :

إن الوضعية الجيولوجية للتربة المستخدمة كأساس في بناء الطريق لها دورها الفعال في تحديد استقرارية الطريق . وهنالك عدة نقاط يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند التحري عن مثل هذه التربة وهي :

1- التحري عن ضغط الماء في فجوات البنية الدقيقة لهذه المواد والذي له دور كبير في تكوين سطح الانزلاق.

2- عندما يكون الطريق مرتفعاً عن مستوي سطح الأرض فإن المواد التراكمية لها ثقل على الأساس وبالتالي سوف تسبب زيادة في ضغط الماء للفجوات البينية خاصة في المواد ذات النفاذية المنخفضة . إن ضغط الماء الذي يقاس ويحسب مخبرياً يعالج موضعياً إما بزيادة الثقل أو التخلص من الطبقة غير النفوذية. كما يجب الانتباه إلى أن ضغط الماء في الفجوات البينية هذه قد يسبب انبعاجاً في تربة الأساس وعند جانبي الطريق. وتعالج هذه الحالة بوضع مواد تسبب زيادة الثقل على الأساس وبالتالي الموازنة والاستقرار للأرض .

3- إذا كانت مواد الأساس متكونة من الرمل الناعم المشبع بالماء وتعلوها طبقة من المواد غير النفوذة فإن ثقل طبقات الطريق قد تسبب ضغطاً أزموزياً عالياً يتوزع في طبقة الرمل والى

جانبي الطريق مما يسبب التشويه والارتفاع في الأرض التي قد تسبب في ظهور خطر الانزلاق للطريق خاصة إذا كان هنالك انحدار قليل. وتعالج هذه المشكلة بتجفيف الطبقة الحاوية على الماء بطريقة أو بأخرى.

4- إذا كانت مواد الأساس تتألف من مواد مفككة لها مسامية جيدة ومشبعة بالماء فإن ضغط طبقات الطريق يسبب تصلب هذه المواد وهروب الماء منها . ومن أجل التأكد من ذلك يجب أن تكون طبقة القاعدة متكونة من الحصى أو قطع صخرية ذات نفوذية عالية بحيث تسمح بهروب المياه .

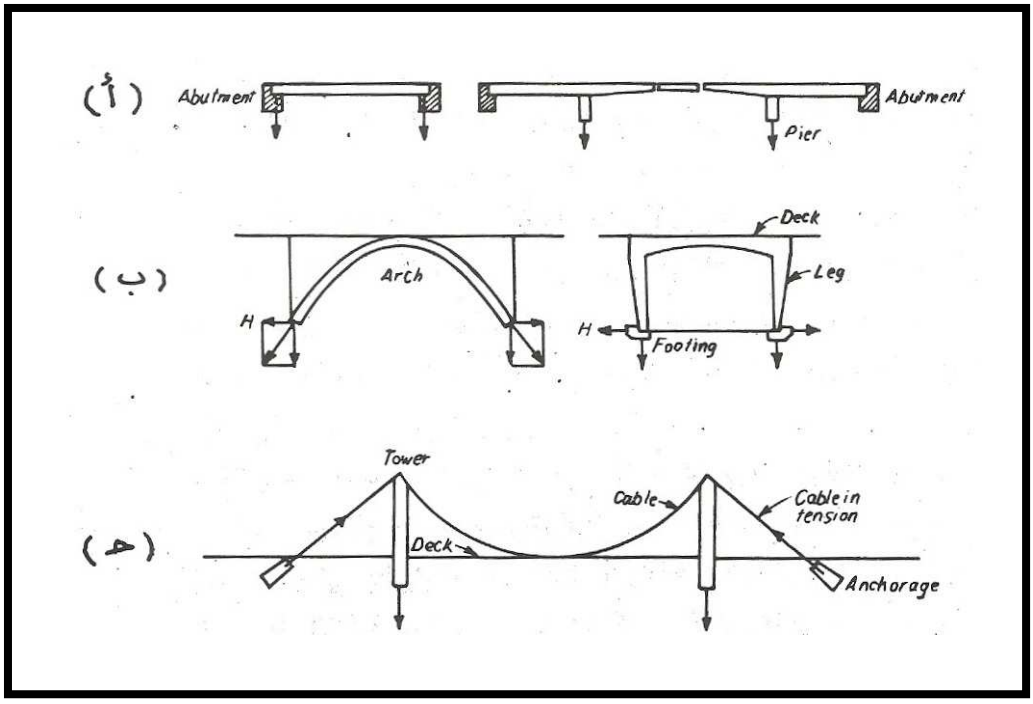
8. الجسور:

يتكون الجسر من جسم الجسر والمساند التي تنقل ثقل الجسم وما عليه إلى صخور الأساس، إن طبيعة القوى التي تنقلها المساند تعتمد على شكل وتصميم الجسر. وعلى هذا الأساس صنفت الجسور إلى ثلاثة أنواع وكما يأتي :

الجسور البسيطة : وتكون شبيهة بالمصطبة التي تستند من طرفيها حيث تنقل المساند وزن الجسم وما عليه بصورة شاقولية إلى صخور الأساس . وتستخدم في بعض الحالات – إضافة إلى المساند الجانبية – مساند سطحية تعمل على حمل معظم ثقل الجسر خاصة إذا كان الجسر يتكون من أكثر من مصطحبة واحدة ، الشكل/7/ ، ويستخدم هذا النوع من الجسور بكثرة في شبكة الخطوط السريعة .

الجسور الهيكلية: ويكون على شكل قوس أو ما شابه ذلك بحيث يتوزع وزن الجسر المنقول إلى المساند الجانبية بصورة شاقولية وأفقية على صخور الأساس ، الشكل(7) ، ويكون هذا النوع من الجسور عادةً معدنياً أو في بعض الأحيان يبنى من الكونكريت المسلح والمواد الأخرى.

الجسور المعلقة : وفيها يوضع جسم الجسر على مساند ترتفع فوق مستوي الجسر وتمرر عليها الأسلاك المعدنية السميكة والقوية التي تربط نهايتها بقطع كونكريتية كبيرة ، الشكل(7) ، حيث تعمل هذه الأسلاك على سحب المساند إلى الخارج وحمل جسم الجسر.



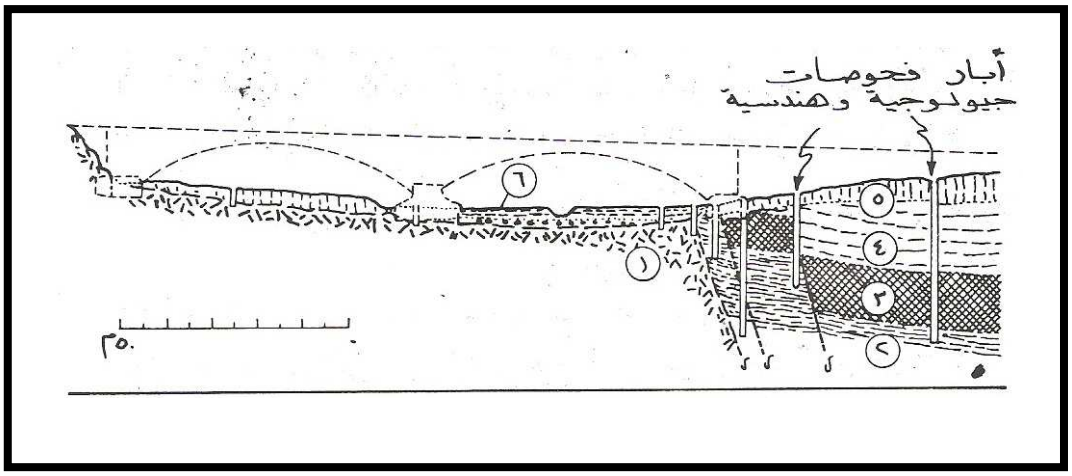
الشكل (7): الأنواع الثلاثة من الجسور

أ. النوع البسيط ، ب. الجسور الهيكلية ، جـ. الجسور المعلقة

تكون القوى التي تعمل على صخور الأساس كبيرة وبأكثر من اتجاه وهي بدورها تعتمد على نوع الجسر المطلوب بناؤه ، فالجسور التي تشيد مع الخطوط السريعة عادةً تكون من النوع البسيط وتستخدم فيها المساند الجانبية التي تكون عبارة عن مرتفعات تراكمية تدعم بالكونكريت أو قد تستخدم المساند الوسطية الكونكريتية أو كلاهما. إن التحريات الجيولوجية الواجب عملها تتضمن إعطاء سمك الغطاء الترابي السطحي وعمق الصخور الصلبة التي يمكن أن تصلح كصخور أساس . أو تحديد أفضل عمق الذي يمكن عنده أن يتحمل وزن الجسر. وهذا يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار عدم السماح بحدوث تشويه تضاغطي لصخور الأساس خاصة إذا كان مقدار التضاغط متفاوتاً بين المساند . حيث يؤدي هذا إلى انكسار الجسر أو لحدوث التصدعات فيه. وهنا يبرز عمل الجيولوجي في معرفة طبيعة الطبقات تحت السطحية ومدى قابلية تحملها وأفضل وسائل المعالجة لها.

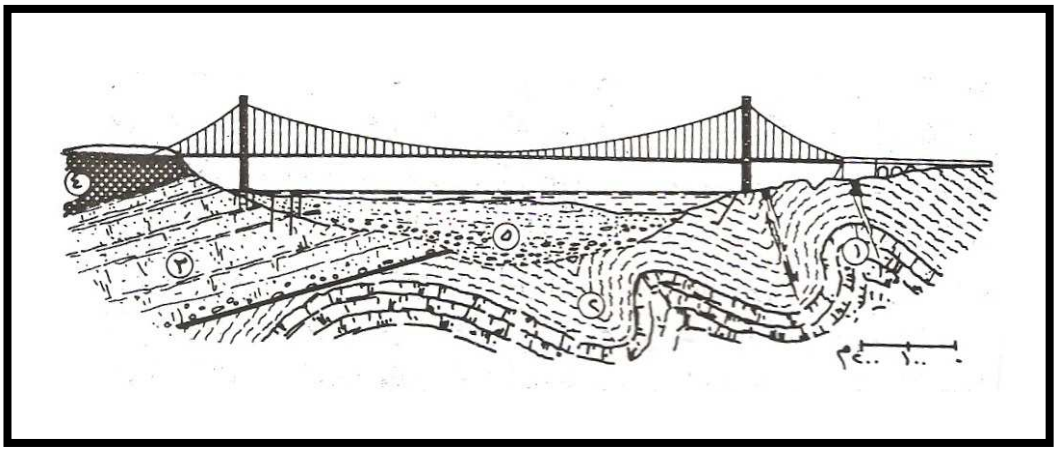
أما في حالة الجسور التي تشيد فوق الوديان العريضة سواء كانت كجزء من خط سريع أو عبر نهر فإن الأمور تتعقد كثيراً لأن غالباً ما تشكل هذه الوديان مواقع ضعف تكتوني ، إضافة إلى كون جدرانها تعاني من التفكك والتعرية ، إن التحريات الجيولوجية والهيدرولوجية في مثل هذه الحالة تستغرق فترة طويلة لاختيار الموقع المناسب الذي يمتاز بالاستقرارية الجيولوجية الأفضل والأقل كلفة. وفي مثل هذه الجسور أيضاً قد توضع المساند الكونكريتية على أعماق كبيرة وعلى صخور لها قابلية تحمل عالية. إن تحديد الصخور تحت هذه المساند وقابلية تحملها وتضاغطها ومقدار الهبوط التي تحدث تعتبر من الأمور الضرورية جداً .

إن التباين في التركيب الفلزي للصخور أو حتى في الصفات الفيزيائية لها قد تسبب اختلافاً في التصرف تحت المساند وبالتالي حدوث التصدعات في جسم الجسر. هذا وفي كثير من الأحيان تفرض الطبيعة الجيولوجية على المختص أن يغير في تصميم الجسر تبعاً للظروف ومتطلبات السلامة ، الشكلين(8-9).



الشكل (8): الطبيعة الجيولوجية جعلت الجسر من نوع هيكلي وعلى شكل قوسين وذلك لجعل المساند في وضع جيولوجي متوازي

1 ، 2 ، 4 .طبقات طينية ، 5. مواد مفككة ، 6. ترسبات نهرية



الشكل (9): جسر من نوع المعلق اعتماداً على الطبيعة الجيولوجية للوادي

1. حجر جيري ، 2. غنايس ، 3. حجر رملي ، 4. صخور نارية ، 5. ترسبات جليدية

****

شواطئ البحار وطرق حماية الشواطئ

1. المقدمة :

تمثل البحار والمحيطات والمسطحات المائية حوالي 71% من مساحه الكره الأرضية أي 351 مليون كيلومتر مربع تقريباً وتمتد شواطئ هذه المحيطات المائية إلى أكثر من عشرات الآلاف من الكيلومترات حيث يظهر الكثير من المشاكل الهندسية لحماية هذه الشواطئ ومنع تآكلها .

ومن ضمن الأمثلة لتغيير شواطئ البحار لدرجة كبيرة تصل إلى معدل يتراوح بين مترين إلى خمسة أمتار في العام تحت تأثير الأمواج والعواصف والتيارات

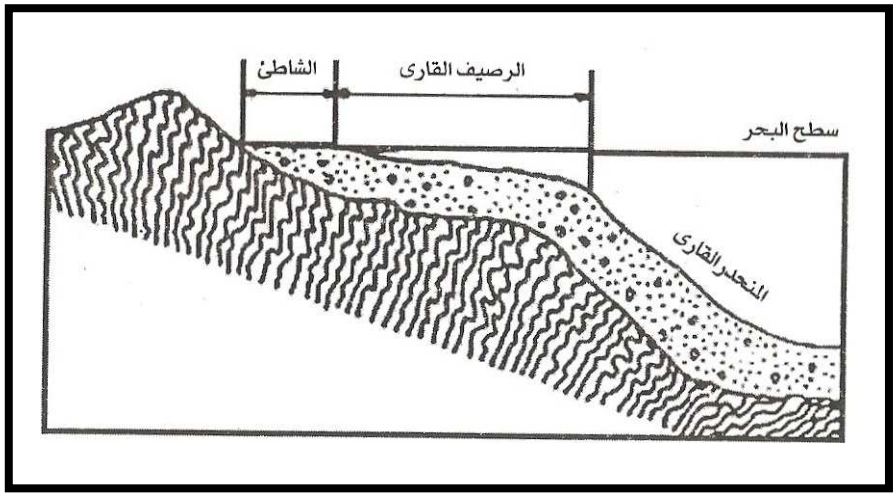
2. شواطئ البحار والمحيطات :

أثبتت الدراسات التفصيلية لقيعان البحار والمحيطات على أنها غير مسطحة ولكنها تحتوي على سهول وجبال وهضاب تشبه إلى حد كبير تلك التضاريس السطحية التي توجد بالقارات ويبلغ عمق البحار أكثر من ثمانية كيلومترات وقد ترتفع بعض سلاسل الجبال فوق قاع البحر مكونة جزراً كبيرة أو صغيرة على شكل أقواس. وقد توجد براكين نشطة تحت سطح البحر وينتج عن تراكم الحمم والطفوح البركانية أن تتكون جبال من صخور بركانية قد تظهر رؤوس بعضها فوق سطح الماء على هيئة جزر بركانية ومن أمثلتها تلك الجزر التي توجد بالمحيط الهادي .

وتحد معظم البحار بمناطق من المياه الضحلة تحيط بالقارات مكونة الأرصفة القارية التي تختلف في اتساعها وعرضها اختلافاً كبيراً. وتتدرج الأرصفة القارية في انحدارها إلى أعماق تصل إلى حوالي 200 متر ثم يزداد عمقها فجأة لدرجة كبيرة مكونة المنحدرات القارية ، الشكل/1/ ، بينما تعرف منطقة المياه الضحلة المغلقة للرصيف القاري والتي تحدها دروع القارات بمنطقة الشاطئ وتدل دراسة هجرة شواطئ البحار بأن المنحدرات القارية هي في الواقع الحدود الحقيقية للقارات .

ويرجع تغير شواطئ البحار إلى حركة المياه المستمرة وكمية الطاقة الهائلة التي تخترقها الأمواج والتيارات البحرية والتي قد تظهر على شكل تحريك كتل هائلة من الصخور أو على

شكل سرعات عالية جداً للتيارات والأمواج ويختلف نوع التيارات وقوة تأثيرها ومجال عملها تبعاً لعمق المياه.



الشكل (1): الرصيف القاري والمنحدر القاري

2-1- أنواع شواطئ البحار:

تصنف شواطئ البحار تبعاً للعلاقة بين اليابسة والماء إلى أربعة أنواع رئيسة هي :

1- الشواطئ الناتجة عن تجاوز البحر.

2- الشواطئ الناتجة عن انسحاب البحر.

3- الشواطئ المركبة.

4- الشواطئ المحايدة.

1- الشواطئ الناتجة عن تجاوز البحر :

في كثير من أنحاء العالم يرتفع مستوى ماء البحر بالنسبة للأرض أو قد تنخفض الأرض بالنسبة لسطح البحر وينتج عن ذلك أن عدة كيلومترات من الأراضي الساحلية تصبح تحت سطح البحر ويتحدد شكل الشاطئ الناتج بتضاريس الأراضي التي تغطيها المياه فإذا كانت المنطقة التي

غطتها مياه البحر مستوية نشأت سواحل خطية مستقيمة ومسطحات عريضة من المياه الضحلة بينما تنتج المناطق ذات المرتفعات شواطئ غير منتظمة تحتوي على جزر.

2- الشواطئ الناتجة عن انسحاب البحر :

وتنشأ نتيجة انحسار ماء البحر أو ارتفاع الأرض بالنسبة لسطح البحر وتنشأ شواطئ مستقيمة مصحوبة بتكوين بعض الجزر والخلجان والموانئ الطبيعية .

3- الشواطئ المركبة :

كثير من شواطئ البحار لها تاريخ معقد من غزو البحر وتقهقره وانخفاض الأرض وارتفاعها وتعرف هذه السواحل بالشواطئ المركبة .

4- الشواطئ المحايدة :

وهي التي لا يعزى وجودها إلى غزو وانحسار البحر ومن أمثلتها شواطئ الدلتا مثل دلتا نهر النيل أو نمو الشعب المرجانية كتلك التي توجد بالقرب من سواحل البحر الأحمر.

3. حركة الأمواج :

تضطرب الأجسام المائية المكشوفة الراكدة بدرجات متفاوتة بفعل الأمواج التي يعتمد حجمها وطاقتها على المساحة الكلية للمسطح المائي ، وعمق المياه وشدة الاضطرابات التي تسبب الأمواج . وقد تتأثر بعض الشواطئ قليلاً بفعل الأمواج حيث تكون المياه ضحلة أو لوجود وسائل حماية طبيعية للشاطئ ضد الأمواج كأن تكون صخور الشاطئ صلبة قوية لا تتآكل بسهولة.

3-1- النظرية الموجية :

توجد الأمواج كأشكال منتظمة مستمرة على صورة ارتفاعات تليها انخفاضات بأبعاد متنوعة ومتغيرة ، وتحدث هذه الأمواج من تداخل الغلاف الجوي مع الغلاف المائي وهي عبارة عن التغيرات السطحية الخارجية التي يعانيها الغلاف المائي بالمقارنة بالأمواج الداخلية التي تحدث أحيانا عند تداخل غلافين مختلفين من الكثافة. ويوجد نوعان من الأمواج التي تؤثر على الشواطئ والسواحل هما :

أ- الأمواج الانتقالية

ب- الأمواج الاهتزازية

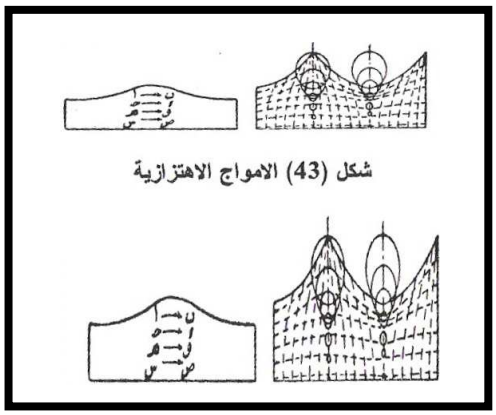
أ- الأمواج الانتقالية :

هي النوع الذي تتحرك فيه الجزيئات إلى الأمام مع الموجة دون الرجوع إلى مكانها الأصلي وتتكون الحركة الأمامية من مجموعة من المسارات التي تشبه إلى حد ما الشكل البيضوي الذي تجتازه الجزيئات ولا تحدد الحركة بالسطح فقط ولكن تأخذ جميع جزيئات الماء في العمق دورها في الحركة وتصبح الأشكال شبه بيضوية مفلطحة في العمق كما تصير في القاع عبارة عن إزاحات متتالية في خط مستقيم. وبالرغم من أن انتقال جزيئات الماء نفسها قد تكون قصيرة إلا أن تأثيرها ينتقل تدريجياً وبذلك تتحرك الموجة لمسافة كبيرة وتتميز المناطق الساحلية بالموجات الانتقالية ويمكن تلخيص التغيرات التي تصاحب هذه الموجات أثناء تقدمها من المياه العميقة إلى المياه الضحلة إلى زيادة في ارتفاع الموجة ونقص في طولها وسرعتها كما يصبح الجانب الأمامي للموجة أكثر انحداراً عن جانبيها الخلفي كذلك تصبح المدارات الدائرية لجزئيات الماء ذات شكل بيضوي ، الشكل/2/ . وعند ترتطم الموجة بالشاطئ فإن ثلثين إلى ثلاثة أرباع ارتفاع الموجة يكون فوق السطح الساكن للماء وأثناء الاصطدام ينهال الجزء العلوي للموجة على الانحدار الأمامي للشاطئ بسرعة أكبر من مسار الموجة وعند الاصطدام وبعده تكتسب الموجة حركة انتقالية.

ويمكن التعبير الرياضي عن الموجات الانتقالية في المياه متناهية العمق بالعلاقات التالية:

$$\text{ل} = (\text{جـ} / 2\text{ط}) \cdot \text{ن}^2 \quad ، \quad \text{س} = \text{ل} / 2\text{ط} = (\text{جـ}/2\text{ط} \cdot \text{ن})$$

حيث أن: ل: طول الموجة ، ن: زمن الموجة ، س: سرعة الموجة ، جـ: الجاذبية الأرضية ، ط: النسبية التقريبية .



الشكل (2): الأمواج الانتقالية

ب- الأمواج الاهتزازية :

وهي التي تتحرك فيها كل جزيئات الماء في مدار مغلق حول مكانها الأصلي وتتقدم الموجة بشكل عام . أما جزيئات الماء فإنها لا تنتقل أو قد تتقدم ببطء في اتجاه الموجة . ويعادل ارتفاع الموجة نصف قطر المدار الذي يتحرك في نطاقه جزيء الماء. وتتقدم الأمواج الاهتزازية لدرجة كبيرة بازدياد العمق وبصفة عامة فإنه عندما يصل العمق ع = 9/1 ل يقل نصف قطر المدار (ارتفاع الموجة) إلى النصف.

3-2- قاعدة الموجة :

يعرف على أنه العمق الذي يقل عنده ارتفاع الموجة الاهتزازية (سعه الموجة) لدرجة بحيث تصبح عاجزة عن تحريك أصغر الحبيبات الصلبة التي توجد على القاع ويتوقف منسوب قاعدة الموجة على ارتفاع وطول أكبر الموجات التي تحرك سطح الماء كذلك حجم أصغر حبيبات الفتات التي توجد بالقاع والأمواج الاهتزازية لها طاقة حركية وطاقة وضع وتعزى طاقة الحركة إلى الحركة المدارية للجزئيات المائية. بينما تعزى طاقة الوضع إلى الاختلاف في ارتفاع قاعدة الموجة ويمكن التعبير عن الطاقة الكلية للموجة بالمعادلة الآتية:

$$ق = 8 \, ل \, هـ^2 \, (1 - 4.935 \, هـ^2/ك^2)$$

حيث أن:

ق: الطاقة الكلية ، ل: طول الموجة بالقدم ، هـ: ارتفاع الموجة بالقدم ، ك: كتلة الماء المتحرك.

4. عمل الأمواج :

عندما تتقابل الأمواج الانتقالية مع عائق رأسي مثل هضبة شديدة الانحدار فإن طاقتها تنطلق على هيئة اصطدام ديناميكي شبيه باصطدام تيار من الماء تحت ضغط كبير يكون له قوة هدم كبيرة أما إذا تقابلت موجة اهتزازية مع عائق رأسي فإن قمتها ترتفع تقريباً إلى ضعف الارتفاع العادي وفي هذه الحالة تنكسر الموجة وينطلق جزء كبير من طاقة الموجة أمام الحاجز على هيئة ضغط هيدروستاتيكي متساو وليس على صورة ضغط ديناميكي كما هو الحال في الموجات الانتقالية ولا يكون لها قوة هدم كبيرة ، وتقاس شدة الأمواج على السواحل الشاطئية بواسطة جهاز يسمى دينامومتر الأمواج وتختلف شدة اصطدام الأمواج بالشواطئ باختلاف الظروف البيئة والجوية.

ويزداد الفتات الصخري الذي تحمله الأمواج من مقدرتها كعامل من عوامل التفتيت والنحر والتعرية. ففي أثناء العواصف تصطدم المواد الصخرية الفتاتية بشدة أمام الحواجز والعوائق الشاطئية ، على أية حال ألا تفترض أن الأمواج المدمرة هي دائماً من نوع الأمواج الانتقالية فعلى الرغم من أن التأثيرات الديناميكية للأمواج الاهتزازية على المنشآت الشاطئية تكاد تكون منعدمة إلا أن تحولها إلى أمواج انتقالية نتيجة احتكاك السطوح وتصادم جزئيات الماء تؤدي إلى نشأة بعض القوى التدميرية كما أن غالباً ما تكون الأمواج الشاطئية في المياه الضحلة ذات طبيعة مركبة من موجات انتقالية واهتزازية .

4-1- تحديد مواضع تأثير الأمواج :

يختلف تأثير الأمواج على الشواطئ من مكان لآخر ومن منطقة لأخرى تبعاً لشكل الشاطئ وطبوغرافية القاع بالقرب من الشاطئ كذلك طبيعة وتركيب صخور الشاطئ وخواصها الطبيعية والميكانيكية ولقد اتضح من ملاحظة الأمواج أنها تتكسر عندما تقترب من منطقة الشاطئ في وضع شبه مواز له حيث تنطلق طاقة الأمواج وتقل سرعتها تدريجياً على امتداد جهة الشاطئ عندما تقترب من منطقة المياه الضحلة وتتأرجح الموجة لتعكس في اتجاه موازي للشاطئ .

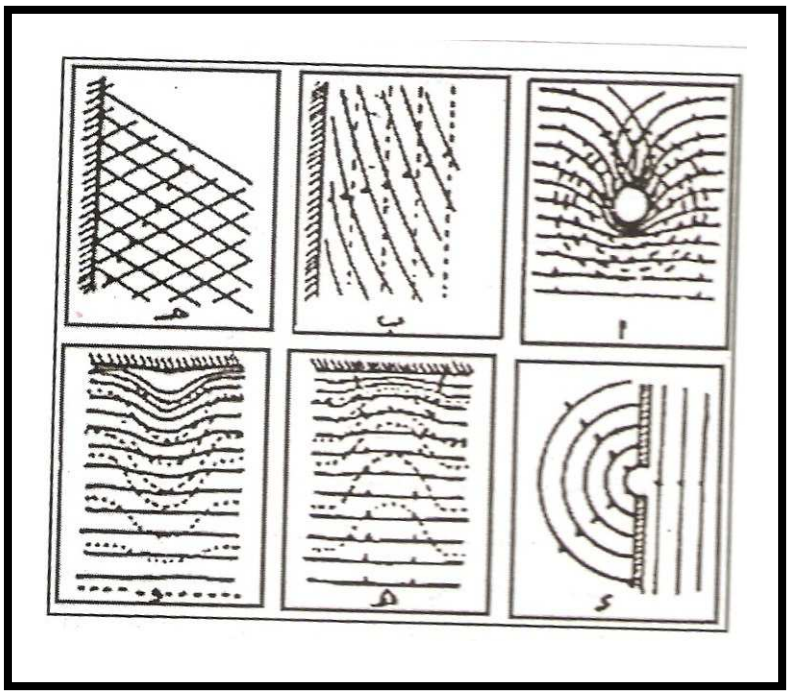
وتؤثر طبوغرافية القطاع بالمنطقة الشاطئية وبمنطقة ما بعد الشاطئ ، الشكل/3/ ، على قدرة الأمواج كعامل من عوامل الحت والتفتيت ، فكلما كانت المنطقة الضحلة أكثر اتساعاً كان تأثير الأمواج ضعيفاً ، كما تؤدي كذلك الكميات الهائلة من الرواسب النهرية التي تكون عند مصباتها إلى إضعاف قدرة الأمواج على الحت والتفتيت ولهذا كان أول عمل لدراسة حماية الشواطئ هو الدراسة التفصيلية لقاع المنطقة الشاطئية ويبين الشكل/4/ تأثير طبوغرافية القاع بالمنطقة الشاطئية على تجميع أو تباعد الأمواج على خط الشاطئ وتصنف أمواج المنطقة الشاطئية تبعاً لشكل مقطع الموجة إلى أربعة أنواع رئيسة :

أ- الأمواج المتدفقة

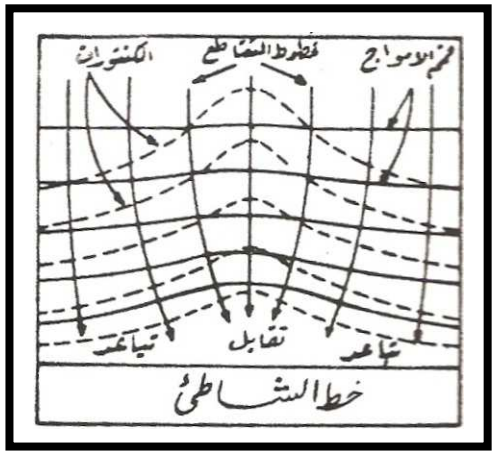
ب-الأمواج الغاطسة

ت-الأمواج المتداعية

ث-الأمواج العملاقة



الشكل (3): تأثير طبوغرافية منطقة الشاطئ على اتجاه الأمواج



الشكل (4): تأثير هضبة تحت سطح الماء على الأمواج

عندما يتعرض الشاطئ لتأثير الأمواج فإن الصخور اللينة تتآكل بسرعة أكبر من الصخور الصلبة وبذلك يصبح الشاطئ متعرجاً ويجب أن يؤخذ في الاعتبار عند تخطيط المنشآت البحرية

مدى تعرض الشاطئ للرياح والأمواج والتيارات المائية السائدة بالمنطقة. وتعتبر المسافة التي تقطعها الرياح بالمناطق المكشوفة من البحر ذات أهمية خاصة لتحديد مدى القوة التدميرية للأمواج الناتجة حيث يتناسب ارتفاع الموجة (هـ) مع الجذر التربيعي للمسافة في اتجاه الريح ناحية الشاطئ (د) حيث هـ = حـ$\sqrt{د}$

هـ: ارتفاع الموجة بالأقدام ، د: المسافة أو عرض المياه المفتوحة بالأميال ، حـ: معامل يتوقف على سرعة الرياح وهو يساوي 1,5 في حالة العواصف الشديدة ، والمسافات أو عرض المياه المتسعة (أكبر من 39 ميلاً) .

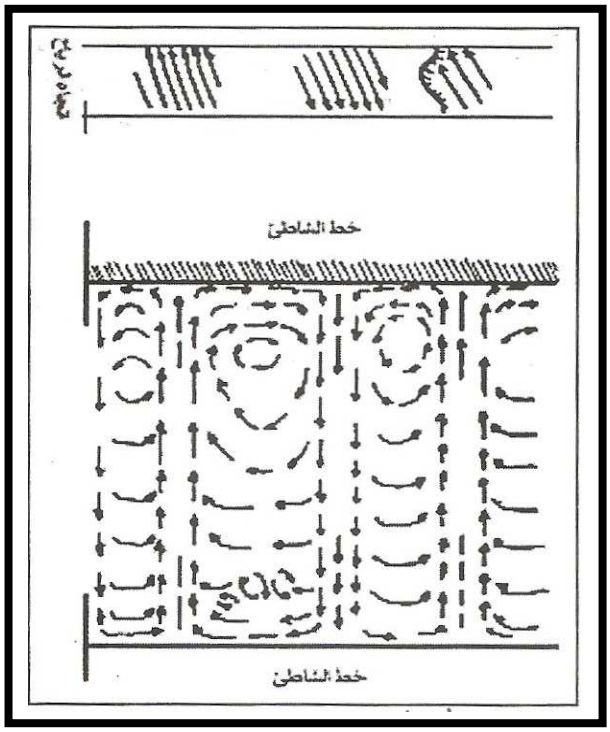
بينما هـ = (1.5 . $\sqrt{د}$) + (2.5 − $\sqrt[4]{د}$) في حالة المسافات القصيرة (أقل من 29 ميلاً) والرياح المفاجئة وطبقاً للمعادلتين السابقتين فإن العلاقة بين ارتفاع الموجة الاهتزازية ومدى اتساع المياه وعرضها يتضح من الجدول/1/.

الجدول (1)

عرض المياه المفتوحة بالأميال	ارتفاع الموجة بالأقدام
1	**3.0**
10	**5.5**
10	**7.1**
20	**8.3**
40	**9.4**
59	**15.5**
100	**15.0**
300	**21.4**
400	**26.0**

5. التيارات المائية :

ليست الأمواج هي العامل الوحيد الذي يدل على حركة المياه بل تؤدي حركة التيارات المختلفة دوراً كبيراً في التأثير على شكل الشواطئ ويتوقف اتجاه هذه التيارات على التغيرات السطحية المصاحبة للرياح التي تؤثر على الطبقة المائية السطحية العليا الساخنة من المحيطات ويبين الشكل/5/ التيارات المائية الدوارة وعلاقتها باتجاه الرياح السائدة .



الشكل (5): العلاقة بين اتجاه الرياح والتيارات

وتؤثر هذه التيارات في اتجاهات متعامدة أو موازية لخطوط الشواطئ وأهم هذه التيارات تأثيراً تلك التي تصطدم بميل مع الشاطئ وكلما كانت زاوية الميل كبيرة زادت شدة وسرعة التيارات الناتجة وبالتالي قدرتها على الحت والتعرية.

وهناك أنواع عديدة من التيارات المائية نذكر منها ما يأتي :

a. التيارات الناتجة عن اختلاف كثافة الماء.
b. التيارات الناتجة عن اختلاف درجة الملوحة.
c. تيارات الأنهار.

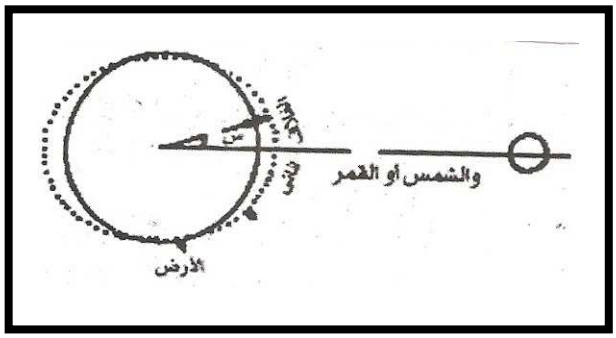
d. تيارات المد والجزر.
e. تيارات الأمواج (التيارات الشاطئية).
f. تيارات الماء تحت السطحية (تيارات السحب).
g. تيارات الحمل.

وتؤثر هذه التيارات بدرجات مختلفة على شكل المنطقة الشاطئية كذلك تتفاوت قدراتها على التفتيت والتعرية وقد وجد بالدراسة أن أهم هذه التيارات المائية من الوجهة الهندسية تيارات المد والجزر وتيارات الأمواج أو الشاطئية وتيارات الماء تحت السطحية.

تيارات المد والجزر:

المد والجزر هو الارتفاع والانخفاض في منسوب سطح البحر وما يصاحبه من تيارات تبدو واضحة وقوية في بعض الأماكن وضعيفة في أماكن أخرى وتنتج حركة المد والجزر نتيجة جذب الشمس والقمر لمياه المحيطات والمسطحات المائية التي تغطي قرابة ثلاثة أرباع سطح الأرض وتنشأ قوى الجذب نتيجة دوران الأرض والشمس حول محورهما وللتغير الزوالي للشمس والقمر خلال مساراتها البيضوية الشكل/6/ .

وقد أمكن حساب القوى المسببة للمد والجزر بفرض أن شكل الأرض كروي منتظم مغطى بغلالة رقيقة من المحيطات واقع تحت قوه جذب الأرض للشمس أو قوة جذب الأرض للقمر. الشكل/6/.



الشكل (6): تيارات المد والجزر

إن ارتفاع المد والجزر المحسوب نظرياً لا يتعدى نصف متر غير أن ارتفاع تيارات المد والجزر قد يصل إلى ارتفاعات غير عادية تتعدى عشرات الأمتار وذلك بسبب انعكاس حركة المياه

الصاعدة والهابطة نتيجة تعاريج الشاطئ ويمتد تأثيره لأعماق قد تصل إلى /300/ متر وقد يتحول المد والجزر في الشواطئ غير المنتظمة إلى تيارات تكتسب على النطاق المحلي سرعات تتفاوت بين (16 إلى 20 كمxساعة) وبذلك تصبح عوامل نشطة للتآكل والترسيب.

تيارات الأمواج أو التيارات الشاطئية:

وهي التيارات التي تكون موازية للشاطئ وهي من العوامل الهامة للنقل والترسيب وتنشأ من اصطدام الأمواج بميل مع الشاطئ فإذا تعدت زاوية ميل الموجة مع خط الشاطئ عشرة درجات فإنه تنشأ تيارات تبلغ سرعتها 10 كيلومتر/ساعة ويساعد انكسار الأمواج على تقليل زاوية ميل الموجة وبذلك تقل سرعتها ويضعف تأثيرها وتوجد التيارات الشاطئية بصفة خاصة بالشواطئ العريضة الضحلة مما يعوق عودة الكتلة الداخلة مع الأمواج إلى البحر حيث يتحرك الماء الزائد بموازاة الشاطئ.

تيارات تحت السطح (تيارات السحب):

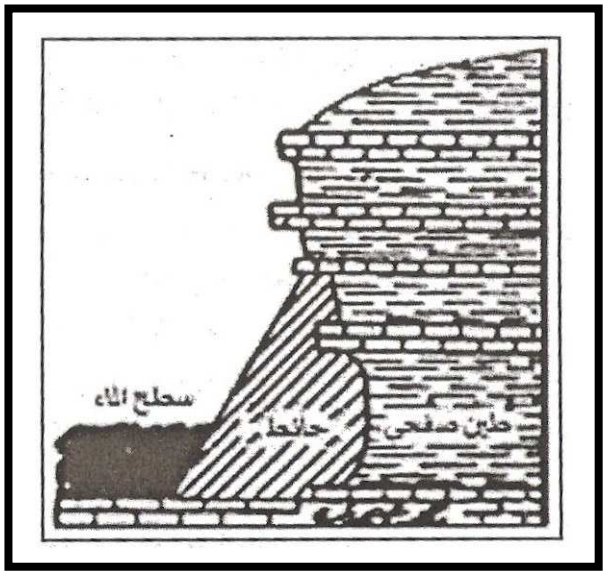
عندما تغزو الأمواج الانتقالية سواحل البحار يندفع الماء الزائد في اتجاه الأرض الذي يبحث عن منفذ له متجهاً إلى القاع فتنشأ تيارات تحت سطح الماء خاصة في الشواطئ المتوسطة الانحدار حيث تكتسب التيارات تحت السطحية سرعات كافية لتحريك الحبيبات الدقيقة من الرواسب الشاطئية.

6. ظواهر التآكل للشواطئ:

تتحدد أشكال تآكل الشواطئ أساساً بفعل الأمواج أما التيارات فإنها تساعد على توزيع نواتج الحت والتعرية بالأمواج وأكثر الأشكال التركيبية شيوعاً بمناطق الشواطئ هي الهضاب شديدة الانحدار والمدرجات البحرية .

حيث تقف الهضاب اللينة المتماسكة والتي يصل ارتفاعها إلى أقل من المتر ارتفاعاً بجانب الهضاب الصلبة التي يصل ارتفاعها لأكثر من90 متراً في مواجهة المياه.

كذلك يعتمد شكل التآكل على التتابع الطبقي لقطاع الصخور بمنطقة الشاطئ ، الشكل/7/ ، حيث يلاحظ سرعة تآكل طبقات الطين الصفحي اللينة بالمقارنة مع طبقات الحجر الكلسي الصلبة.



الشكل (7): حماية الشواطئ من التآكل بإنشاء حائط مائل من الخرسانة المسلحة

ومن ضمن الظواهر الأقل أهمية لتآكل الشواطئ الفجوات والكهوف والأقواس البحرية والجزر الصغيرة وهذه الظواهر لا توجد إلا في الصخور المتماسكة وتنشأ بفعل الأمواج بالمناطق الشاطئية المكونة من صخور ضعيفة وحيث يحدث انكسار للأمواج ويهتم المهندس بصفة خاصة بالمنطقة المحصورة بين مستوي المياه المنخفضة وتلك التي تغطيها المياه العالية وهي تلك المنطقة التي تؤثر عليها الأمواج بتفكيك الصخور وتفتيتها كما أنها المنطقة التي تتميز لدرجة كبيرة بنقل المواد الشاطئية .

7. طرق حماية الشواطئ:

تنقسم الأعمال الهندسية لحماية الشواطئ إلى نوعين رئيسين هما:

- أعمال تهدف إلى خلق وتحسين ووقاية صخور الشاطئ.
- إجراءات تهدف إلى إنشاء الممرات وملحقاتها مع تحسينها والمحافظة عليها.

وسنذكر فيما يلي بعض الأعمال الهندسية المستخدمة لحماية شواطئ البحار والتي تشمل الحوائط البحرية ، والرؤوس الحاجزة والتكسيات أو محطة الأمواج والأرصفة والردم الصناعي.

7-1- الحوائط البحرية :

عبارة عن منشآت كتلية تشبه الحوائط الساندة تهدف لحماية المناطق والكتل الصخرية التي تقع مباشرة خلفها من فعل الأمواج العاتية والتيارات العنيفة وهذا النوع من الحوائط باهظ التكاليف.

كما أن الأجزاء السفلية من الحائط تكون معرضة للتآكل و يجب أن تكون الحوائط البحرية ممتدة إلى الخلف فوق المستوي العلوي للماء للتقليل من التآكل و التقليل من عزم الانقلاب مع مراعاة عدم وجود انحرافات حادة حيث أن الزوايا الحادة و المتداخلة تساعد على تركيز التأثير المدمر للأمواج والتيارات وتكون أوجه الحوائط البحرية رأسية وفي بعض المواقع يفضل استخدام حوائط ذات أوجه مقعرة للإقلال من تأثير الأمواج.

7-2- الرؤوس الحاجزة :

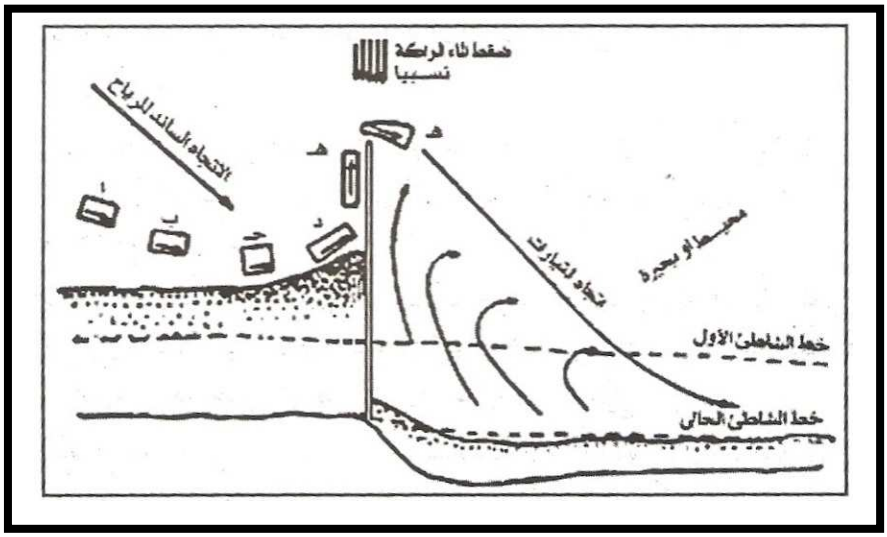
تقوم أيضاً بنفس الأعراض للحوائط البحرية و لكنها تمتاز بأنها منشأة خفيفة نسبياً وتنشأ الرؤوس الحاجزة عادة بعمل تركيبات من ألواح الصلب والخشب الثقيل وتستخدم عندما يكون فعل الأمواج ضعيفاً نسبياً.

7-3- التكسيات أو محطمة الأمواج :

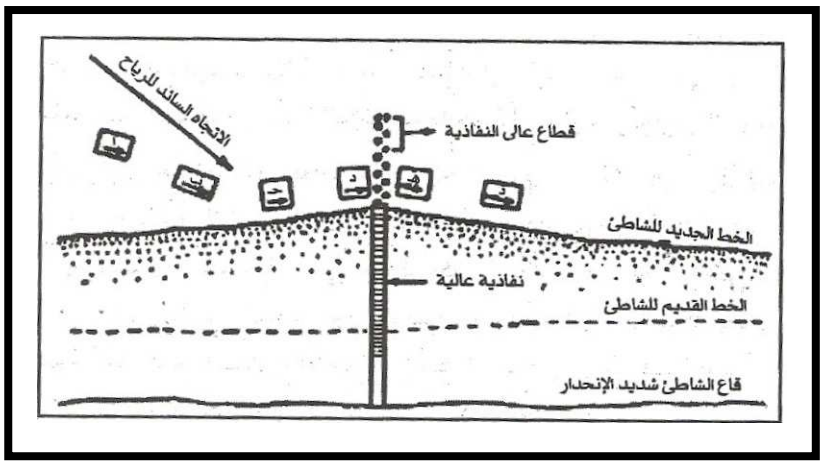
فإن معظمها يتكون من الأحجار عالية المقاومة للحت والتآكل التي توضع بنظام معين أمام التلال المنخفضة عند الشاطئ لوقايته ويجب أن تكون الكتل الصخرية كبيرة الحجم حتى لا يسهل إزاحتها عند تصادم الأمواج بها ولا تحمي الحوائط البحرية والرؤوس والتكسيات الأجزاء الأمامية من الشاطئ كذلك فإنها تتسبب في نحت الشاطئ نتيجة لحصر تقدم الأمواج وزيادة المواد المنقولة من الشاطئ وعند تصميم الحوائط البحرية والرؤوس الحاجزة يجب أن يكون هناك عمق كاف لأساساتها كعامل للأمان ضد عوامل التآكل عند أسفل هذه المنشات. وفي كل عام تتحطم عدة أميال من الرؤوس الحاجزة والتكسيات أمام فعل الأمواج حيث يكلف إعادة بنائها وصيانتها مصاريف باهظة ولكنه قد أمكن التغلب على هذه الصعوبات بإنشاء أرصفة تشبه تلك التي توجد بمداخل الموانئ مما يساعد على الإقلال من تأكل التكسيات والحوائط البحرية والرؤوس الحاجزة.

الأرصفة :

عبارة عن حوائط تقام عمودية على الاتجاه العام لخط الشاطئ ووظيفتها الإقلال من المواد الشاطئية المنقولة وبالتالي تساعد على الترسيب ويستعمل في بناء الأرصفة ألواح من الصلب أو كتل خرسانية أو الحجارة وتبنى بحيث يكون ارتفاعها بين الحد الأعلى للمد والحد الأدنى للجزر وتتوقف المسافات الفاصلة بين الأرصفة على كمية المواد المتحركة بطول الشاطئ و كلما زادت كمية الرواسب الشاطئية المتحركة بطول الشاطئ زادت المسافة بين الأرصفة اتساعاً وتتفاوت النسبة بين طول الرصيف والمسافة بين الأرصفة من 1 :1 إلى 1 : 3 ، ويجب أن تسمح الأرصفة بمرور بعض المواد المنقولة تجاه الشاطئ إذا كانت حركة الراسب الشاطئية في اتجاه واحد وذلك لأنه إذا توقف الترسيب فإنه يحتمل تآكل الشاطئ بعوامل الحت. ولقد اقترحت كثير من التصميمات الهندسية ومن ضمنها الأرصفة ذات النفاذية المتزايدة بالمقارنة بالأرصفة الصماء للإقلال من تآكل وحت صخور الشاطئ . ويبين الشكلين/8 ، 9/ الفرق بين الأرصفة المنفذة والأرصفة الصماء ويعيب طريقة الأرصفة أنها تقيد استخدام الشاطئ للأغراض المختلفة كما أنها قد تكسب الشاطئ منظراً غير مرغوب فيه.



الشكل (8): رسم تخطيطي يوضح تأثير التيارات الشاطئية بجوار رصيف (ميناء) ذات نفاذية متزايدة



الشكل (9): رسم تخطيطي يوضح تأثير التيارات الشاطئية بجوار رصيف (ميناء) غير نفاذ

الردم الصناعي:

تحول بعض السواحل على نطاق ضيق إلى شواطئ صناعية وذلك بتغطيتها بطبقة من الرمال أو الحصى والتي يمكن وقايتها من النقل والحركة بواسطة الأرصفة و إذا كانت عوامل الحت والتآكل بطيئة فإن تجديد طبقة رمال الشاطئ قد يكون أجدى وأقل تكلفة من طرق حماية الشواطئ الأخرى.

كذلك توجد بعض الوسائل الأخرى لحماية القنوات والممرات المائية الصناعية والموانئ وذلك بتطهيرها من الرواسب التي تتراكم في قاعها أو باستخدام وسائل خاصة تعمل على انحراف التيارات المائية التي ترسب المواد الفتاتية بالقاع.

****

المصطلحات العلمية

-A-

Absolute	مطلق
Absolute humidity	الرطوبة المطلقة
Absorption	الامتصاص
Absorptivity	قوة الامتصاص
Activity	النشاط
Adsorption	امتزاز
Adsorbed layer	الطبقة الممتزة
Adsorption complex	وسط الامتزاز
Air content	المحتوى الهوائي
Anisotropy	تباين الصفات
Anion	أنيون
Areal erosion	الحت السطحي
Argillite	أرغيليت
Artesian	ارتوازي
Atmosphere	الغلاف الجوي
Atmospheric icagents	عوامل جوية
= pressure	الضغط الجوي
Atterberg limits	حدود أتربرغ
Authigenous	موضعي
Absorption	امتصاص

-B-

Basalt	بازلت
Bedding planes	سطوح تنضد

Bentonite	بينتونيت
Biosphere	الطبقة العضوية
Biotite	بيوتيت
Boring	السبر
Boulders	الحجارة
Building	البناء
Building stone	حجر البناء

-C-

Capacity	سعة
Capillary	شعري
Capilaary rise	نهوض شعري
= waters	مياه شعرية
Cataclastick rock	صخر مهشم
Cation	كاتيون
Chart	خريطة
Cheek test	اختبار المراقبة
Classification of rocks	تصنيف الصخور
Clay	غضار
=minerals	فلزات غضارية
Cleavage	التشقق
Curtain	ساترة الكثافة
Cohesion	تماسك
Closed porsity	مسامية مغلقة
Coarse grains	حبات خشنة
Coarse sand	رمل خشن

Coefficient of friction	عامل الاحتكاك
=of compressibility	عامل الانضغاط
=of consolidation	عامل التراص
= volume compressibility	عامل الانضغاط الحجمي
Compaction	التماسك
Compression	انضغاط
Compressive strength	متانة الانضغاط
Conductor	ناقلية
Consistency	قوام
Consolidation	ارتصاص (تشديد)
Contact	تماس
Contact pressure	ضغط التماس
creep	زحف

-D-

Deformation	التشوه ، التغير
Degree of saturation	درجة الإشباع
= of stability	درجة الاستقرار
Density	الكثافة
Dense	مرتص
Designing	تصميم
Dispersion	تشتت (تبعثر)
Diamagnetic	ديامغناطيسي
Diffuse layer	طبقة الانتشار
Dielectric	عازل
Dispersed stracture	بنية متبعثرة (مشتتة)

Dispersion	انتشار
Dissolution	انحلال
Disturbed sample	عينة مضطربة
Dry unit weight	الوزن الحجمي الجاف
Dynamic geology	الجيولوجيا الديناميكية

-E-

Effective stress	إجهاد فعال
= diameter	القطر الفعال
Elastic	مرن
Elasticity	المرونة
Electrical properties	الخواص الكهربائية
Engineering geology	الجيولوجيا الهندسية
Exchange	تبادل
= absorpation	امتصاص تبادلي
Expansion	تمدد
Exploring shaft	حفرة استكشافية

-F-

Fault polish	سطح الانزلاق
Filtration	الرشح
Ferromagnetic	فيرومغناطيسي
Fine sand	رمل ناعم
Fissures	شقوق
Foot of slope	قدم المنحدر
Force	قوة
Free water	ماء حر

Friction	احتكاك
Frost resistance	مقاومة التجلد

–G–

Gibbsite	جبسيت
Grained	حبي
Granular	حبيبي
= structure	بنية حبيبية
Gravel	حصى
Gravitational water	ماء ثقالي
Gravity force	قوة الجاذبية الأرضية
Grit	حصب
Ground movement	حركة أرضية
Ground water	مياه أرضية

–H–

Hard	صلب
Hardness	القساوة
Heat capacity	سعة حرارية
Heavy minerals	المنوالات الثقيلة
Hetero geneity	عدم التجانس
Heterogenic	غير متجانس
High compressibility	قابلية انضغاط مرتفعة
Hollows	فجوات
Homogeneity	التجانس
Homogeneous texture	نسيج متجانس
Homogeneous structure	بنية متجانسة

Humidity	الرطوبة
Humas	الدبال
Hydraulic gradient	الميل الهيدروليكي

–I–

Ice	جليد
Illite	ايليت (الميكا المائية)
Imperetable	غير نفوذة
Impermeable layer	طبقة كتيمة
Imporous	غير مسامي
Impounding reservoir	حوض التخزين
Initial compression	الانضغاط البدائي
Insitu test	اختبار حقلي
Inter granular pressure	الضغط بين الحبات
Internal	داخلي
isotropic	متشابه الخواص في كل المناحي

–J–

Joints	فواصل

–K–

Kaolinite	كاولينيت
Karst Karstic	كارستي
Karstic water	مياه كارستية

–L–

Lan surface	سطح الأرض
Land slide	انزلاق أرضي
Layer	طبقة

Lens	عدسات
Liquid limit	حد السيولة
Lood	الحمولة
Lowlders	جلاميد
Low compressibility	قابلية انضغاط منخفضة

–M–

Marco grained	كبير الحبات
= pores	مسامات كبيرة
Magnetic properties	الخواص المغناطيسية
Marl	مارل
Mica	ميكا
Mechanical properties of soil	الخواص الميكانيكية للتربة
Micro granular = pores	حبيبي مجهري
Micro pores	مسام مجهرية
Molecular bond	رابطة جزيئية
Molecular energy	طاقة جزيئية
Montmorillonite	مونتموريللونيت
muscovite	مسكوفيت

–N–

Nappe aquifer	منسوب المياه الجوفية
Natural	طبيعي
Non – crystalline	غير مبلور
Non– plastic	غير لدن
Normally – consolidated	متراص طبيعياً

–O–

Observation wells	آبار المراقبة
Olivine	اوليفيت
Open porosity	مسامية مفتوحة
Organic sediments	رسوبات عضوية
Osmosis	حلول

–P–

Para magnetic	بارامغناطيسي
Permeability	النفوذية
Permeable	نفوذ
Plastic	لدن
= deformation	تشوه لدن
= limit	حد اللدونة
Plasticity index	قرينة اللدونة
Poisson ration	نسبة بواسون
Poor cleavage	ضعيف التشقق
Porosity	المسامية
Porphyritic structure	بنية بورفيرية
Primary consolidation	التراص الرئيسي (الأولي)

–Q–

Quarry stone	حجر البناء
Quartz	مرو (كوارتز)

–R–

Recharge well	بئر تغذية
Recompression	إعادة انضغاط
Reduction of rocks	تفتت الصخور

Relative	نسبي
= density	كثافة نسبية
Relaxation	تراخي
Reological properties	خواص الزحف
Resistance	مقاومية
Rigid layer	الطبقة الصلبة
Riprap	ركامي
Rock composition	تركيب الصخر
= deformation	تشوه الصخر
= constitment	مكونات الصخر

-S-

Sample	عينة
Sand	رمل
Sand rock	صخر رملي
Saturation	إشباع
Secondary	ثانوي
= compression	انضغاط ثانوي
Seepage	تسرب
Sensitivity	حساسية
Serpentine	سربنتين
Shear	قص
Settlement	هبوط
Shear strength	متانة القص
Shrinkage	انكماش
Shrinkage limit	حد الانكماش

Slip	انزلاق
= surfaces	سطوح الانزلاق
Slop	منحدر
Softening	ارتخاء
Solubility	قابلية الانحلال
Specific gravity	الوزن النوعي
Stability of slopes	توازن المنحدرات
Stage	مرحلة
Steep	شديد الانحدار
Storage basin	حوض التخزين
Strength	متانة
Stresses	اجهادات
Structures bonds	الروابط البنيوية
Surface tension	توتر سطحي
Swelling	انتفاخ

–T–

Talus lide	انزلاق المنحدر
Temperature	حرارة
Tensile strength	متانة الشد
Time factor	عامل الزمن
Triaxial compression	الضغط ثلاثي المحاور
Tunnels	أنفاق

–U–

Ultrakaline rock	صخور فوق أساسية
Uniform	منتظم

Unstable	غير مستقر
Unit weight	الوزن النوعي
Uniformity coefficient	عامل اللاتجانس
Unconfined compression	ضغط غير محصور

–V–

Verydense	شديد الارتصاص
Viscosity	لزوجة
Void ration	نسبة الفراغ
Voidration	عامل المسامية
Volume weight	الوزن الحجمي

–W–

Water content	المحتوى المائي (الرطوبة)
Water constructional works	منشآت مائية
= insoluble	غير قابل للانحلال بالماء
= saturation	مشبع بالماء
Well – graded	جيد التدرج
= – pumping test	تجربة ضخ بئر
Wells	آبار

–Y–

yield	خضوع
Young modulus	معامل يونغ

المراجع العلمية References

1. المراجع الانكليزية:

1. Blyth, F.G.H(1971) . A Geology for Engineers, Edward Arnold (Publ.) LTD London, 357 P .
2. Cedergen, H.R. (1977). Seepage, Drainage and Flow Nets, John Wiley and Sons, New York, 534 P.
3. Charch, H.K. (1981). Excavation Hand Book, McGraw- Hill company, New York.
4. Flctcher, G.A. and Smoots, V.A.(1974). Construction Guide for Soil and Foundation, John Wiley and Sons, New York, 420 P.
5. Gaillard, DD., Wave Action : Army Engineer School, Belvoir, (1935).
6. Gailcher, A., Goastal and Submarine Mprphology : Paris (1958).
7. Hobst, L. and Zajic, J. (1971).Anchoring in Rock,Elsevier, Amsterdam, 390 P.
8. Huang,Y.H. (1982).Stability analysis of Earth slopes, Van Nostrand Reinhold company, New York, 305 P .
9. Johnsonm D., Shorelines and Shoreline Process : Wiley, New York, (1919).
10. King, CA, Beaches and Coasts : London, (1959).
11. Krumbein, W.C., Geological Aspects of Beach Engin. Eering : Geological Society of America, Berkley Volume, (1950).
12. Legget, R.F. and Karrow, P.F. (1983). Geology in Civil Engineering, , McGraw- Hill Book Company, New York.
13. Mathewson , C.C . (1981) . Engineering Geology, Charles E. Merrill Publ. Company, Columbus, Ohio.
14. Mathewson , C.C . (1981) . Engineering Geology, Charles E. Merrill Publ. Company, Columbus, Ohio, 450 P.
15. Munson,A.E. and L.A.,P.E. (1974)Construction Design for Landscape Architects, McGraw- Hill company, New York,212 p.
16. Neuman, C., Ocean Currents: Elsevier, Amsterdam, (1968).

17. Scrafim. J.L., Internal Stresses in Gallerie 7 th, International Congress of Large Fams.Rome, (1961).
18. Stiny, J., The Geology of Tunnel Construction : Springer Verlag, Vienna, (1950).
19. Taicker, R.A, Breakers, Waves and Wakes: Elsebior, Amsterdam, (1965).
20. Thomas ,H.H.(1979).The Engineering of Large Dams (Part I and Part II),John Wiley and Sons, New York,376 P.
21. Wahlstrom, E.E. (1974). Dams, Dam Foundation and Reservoir sites, Elsevier, Amsterdam, 278P.
22. Zaruba, Q. and Mencl, V. (1976). Engineering Geology , Elsevier Amsterdam, 504P.

2. المراجع العربية:

1. إبراهيم باشا، علي فؤاد و عبود، محمد، وقدور، طه و محمد، أحمد محمد (1990) – الجيولوجيا الفيزيائية (1). منشورات جامعة حلب – كلية العلوم.

2. إمام، حسن فهمي – (2010) الجيولوجيا الهندسية و أساليب التطبيق في الهندسة المدنية منشورات دار الكتب العلمية للنشر و التوزيع – القاهرة.

3. علي، مقداد حسين – حجاب ، باسم رشدي – الجسار ، سنان هاشم (1991) الجيولوجيا الهندسية منشورات وزارة التعليم العالي و البحث العلمي جامعة بغداد.

4. محفوظ، محمد أنور – بهوي، نهاد (1993): الجيولوجيا الهندسية منشورات جامعة دمشق.

5. محمد، أحمد محمد (2007) : الجيولوجيا الفيزيائية (2). منشورات جامعة تشرين– كلية العلوم.

6. محمد، أحمد محمد (1996) الجيولوجيا الهندسية. منشورات جامعة حلب – كلية العلوم.

7. نخلة، فخري موسى – حسين، محب الدين – فهم، حسن – صالح، سيد علي (1985) – الجيولوجيا الهندسية، دار المعارف – الطبعة التاسعة .

اللجنة العلمية لتقويم أملية الجيولوجيا الهندسية

الدكتور

الدكتور

الدكتور

المدقق اللغوي

الدكتور

قسم اللغة العربية – كلية الآداب والعلوم الإنسانية

حقوق الطبع والترجمة محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات