

فالغضار عبارة عن صخور ترابية مستقرة التبلور وتتميز بشرافتها للماء وتصبح عند تشريبها بالمياه لذمة، وقد عرف الغضار بألوان مختلفة منها البنى والرمادي والأخضر. والغضار عبارة عن سيلكات الألمنيوم المائية والتي لا تزيد

الجروپة Gruppe	الصيغة Mineral	التركيب الكيميائى Chemical composition	مترافق معه	
			g in 10^-3	r
Elemente	Graphit	C	10^-6...10^-3	> 81
Sulfide	Sphalerit	ZnS	10^3...10^4	0,0...12,1
مركبات الكربونات	Pyrilit	FeS <sub>2</sub>	10^-4...10^-4	33,7...81,0
	Galenit	PbS	10^-4...10^-4	> 81
الكلorيدات الكلوريتات	Pyrrhotin	Fe <sub>1-x</sub> Fe <sub>x</sub> S <sub>2</sub>	10^-4...10^-3	> 81
	Chalkopyrit	CuFeS <sub>2</sub>	10^-3...10^-1	> 81
Oxide	Hämestik	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10^-3...10^2	25...170
الكلاسيديات الكلاسيديات	Hematit	Fe <sub>2</sub> TO <sub>3</sub>	10^0	35...80
	Magnetit	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10^-3...10^5	31...81
	Rutil	TiO <sub>2</sub>	10^2...10^3	80...173
Karbonatate	Kalzit	CaCO <sub>3</sub>	10^2...10^11	7,6...8,7
الكلربوناتات الكلربوناتات	Dolomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	10^6	0,8
	Stilbit	Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	10^-3...10^3	6,2...7,4
Sulfatate	Anhydrit	CaSO <sub>4</sub>	10^2...10^10	0,5
الكلربناتات الكلربناتات	Gips	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	10^10	7,0
Halogenite	Baft	NaCl	10^9...10^18	6,7...6,2
الكلورجينات الكلورجينات	Sylvit	KCl	10^9...10^18	4,3...6,2
	Fluorit	CaF <sub>2</sub>	10^3	0,1...0,8
Stiklate	Quarz	SiO <sub>2</sub>	10^19...10^21	4,2...6,0
الكلسيديات الكلسيديات	Olivin	(Mg, Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	10^2	0,8
	Labrador	Na <sub>2</sub> [Al <sub>2</sub> (AlO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] <sub>n</sub>	10^11	0,3...6,8
الكلسيديات الكلسيديات	Biotit	K(Mg, Fe) <sub>3</sub> ·(OH) <sub>2</sub> ·[Al, Fe(II)Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ]	10^15...10^18	10,3
	Muskovit	KAl <sub>3</sub> (OH, F, <sub>2</sub> [AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ]) <sub>2</sub>	10^19...10 <sup>18</sup>	4,6...6,2
الكلسيديات الكلسيديات	Orthoklas	K[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	10^11...10^12	4,6...6,2
	Albit	Na[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	10^11...10^12	5,4...6,0
الكلسيديات الكلسيديات	Anorthit	Ca[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	10^11...10^12	6,0...7,2
	Hornblenden		10^11	4,0...5,8

جدول 1 - متوسط قيم المقاومة الكهربائية لأكم الفلزات الطبيعية المشكلة للصخر.

أبعاد حبيباتها عن 2 ميكرون. وبعد الصخر غضاريًا إذا احتوى على أكثر من 50 % من تركيبه على فلزات غضارية. وتصنف الغضاريات وفق مجموعات عديدة أهمها:

١ - مجموعة الكاولينيت.

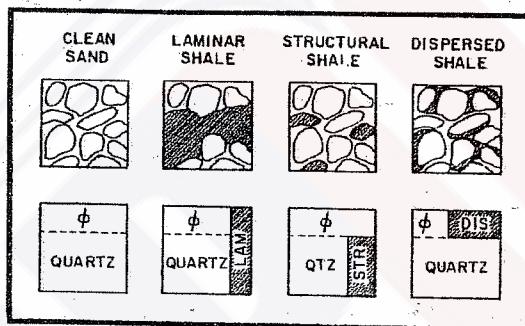
٢ - مجموعة المونتموريلونيت.

٣ - مجموعة الأيليت.

ويعود الغضار من أكثر الفلزات انتشارا في الطبيعة ويمكن لهذه الفلزات أن توجد بنسوب متنوعة في الصخور الرسوبيّة وتكون مترافقه مع الصخور الحطمية حيث تتراوح مع الرمال بشكل عدسات أو طبقات رقيقة.

إن الغضاريات الموجودة ضمن الصخر الخازن والتي تؤثر في القياسات الجيوفيزياطية البرية يمكن أن تصانف على ثلات حالات:

- أ - على شكل طباقى صفائحي (Laminar Clay)
- ب - على شكل غضار بنوى (Structural Clay) أي أن حبات الغضار موزعة ضمن التشكيلة.
- ج - على شكل ملاط بين المواد الصلبة المؤلفة للصخر (Dispersed Clay) إن البنية البلورية للفلزات الغضاروية هي بنية صفائحة وهذه البنية تضفي على الفلزات الغضاروية خصائص عديدة أهمها:



شكل 1 - 10 رسم تخطيطي لأشكال تواجد الغضار في الطبيعة.

- أ - ادمصاص الإيونات وتبادلها مع المحاليل التي تكون بتماس معها، مما يؤدي إلى تغير في الخواص الفيزيائية والكيميائية كازدياد الناقلية الكهربائية مثلاً.
- ب - ادمصاص جزيئات الماء بين مستوياتها الصفائحة مما يؤدي إلى انتفاخها وزيادة حجمها.
- ج - ادمصاص الجزيئات العضوية والاحتفاظ بها.
- وتؤثر هذه الخصائص في الخواص الخازنة على الشكل التالي:
- إن القياسات الصغيرة للجزيئات الغضاروية تسبب زيادة في السطوح النوعية للفراغات هذا يعني زيادة مساحة السطوح التي تكون بتماس مع السوائل وهذا يؤثر في الخواص الشعرية للصخور الخازنة وفي درجة الاحتفاظ بالسوائل

ضمنها أي بازدياد نسبة وجود الغضار في الصخر تزداد إمكانيتها للاحتفاظ بالسوائل.

- إن تفاعلات التبادل بين الفلزات الخضارية والسوائل الداخلة إلى الصخور الخازنة خلال عملية الحفر تؤدي إلى انفاس الجزيئات الخضارية وإغلاق المسامات وتخفيف النفوذية بشكل قد يصعب معه استخراج النفط من الصخر الحارن.

- إن الخواص الفيزيائية للفلزات الخضارية (المقاومة الكهربائية النوعية القليلة  $R_{sh}$  والسرعة المنخفضة لانتشار الأمواج المرنة  $V_{sh}$ ) وقدرة الجزيئات الخضارية على تثبيت جزء من المياه المالحة يؤثر تأثيراً واضحاً في قيم المقاومة الكهربائية للصخور. وفي هذه الحالة يسلك الغضار سلوك وسط ناقل منفصل يضاف إلى الوسط المكون من محلول الملحي المتحرك بصورة حرة ضمن المسامات الصخرية ولهذا فإن ناقليه الصخر الحاوي على الغضار تتالف من مركتين هما:

\* ناقليه السائل الموجود في الفراغات المسامية.

\* ناقليه الجزيئات الخضارية التي امتصت المياه المالحة.

#### ٦ - ٣ - ٢ - الخصائص الكهربائية لمحتوى المسامات أو الشقوق

إن المسامات أو الشقوق يمكن أن تحوي:

أ - غازات (هواء، فحوم هيدروجينية غازية  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ...).

ب - أو سوائل ١ - فحوم هيدروجينية سائلة، ٢ - مياه طبقية).

وتعود انغازات والفحوم الهيدروجينية السائلة مواداً عازلة ذات مقاومة كهربائية عالية مثل المواد الصلبة المؤلفة للصخر. وهكذا نرى أن ناقليه الصخر تعتمد على ناقليه السوائل الموجودة في المسامات أو الشقوق بمعنى آخر على مقاومة المياه الطبقية التي تحتويها الصخور.

#### ٦ - ٣ - ٣ - العوامل المؤثرة في المقاومة الكهربائية النوعية للمياه الطبقية $R_w$ .

تعتمد المقاومة الكهربائية النوعية للمياه الطبقية  $R_w$  على الماء للمسامات والشقوق على (Resistivity of Formation Water)  $R_w$ .

التركيب الكيميائي لها وعلى تركيز نوعية الأملاح المنحلة (NaCl, KCl, MgSO<sub>4</sub>)، وبقدر ما يكون تركيز الأملاح المنحلة كبيراً بقدر ماتكون المقاومة الكهربائية للمياه صغيرة والعكس صحيح. والمقاومة الكهربائية للمياه الطبيعية تتاسب عكساً مع درجة الحرارة T وذلك لتأثير درجة الحرارة على الخواص الفيزيائية للمياه.

ويمكن أن تتساوى تراكيز الأملاح المنحلة في تجمعات المياه الطبيعية الموجودة في موقع مختلفة من التشكيلات الخازنة وتختلف مع ذلك مقاومياتها الكهربائية تبعاً للزوجتها، فالمياه ذات اللزوجة العالية تملك مقاومة كهربائية أكبر من المياه ذات اللزوجة المنخفضة. وذلك بسبب تناقص حركة الشوارد مع ارتفاع لزوجة المياه، وهذا يعود إلى تأثير درجة حرارة الطبقة.

ويمكن أن تتساوى التراكيز واللزوجة للمياه الطبيعية في موقع متعدد ويكون لها مقاوميات كهربائية متباعدة تبعاً لاختلاف درجة تفكك الأملاح بفعل درجة الحرارة.

إن المقاومة الكهربائية للمياه الطبيعية لاتعلق بنوع الملح المنحل بل بقدره على التفكك وبعد الشوارد الناتجة عن هذا التفكك.

وبما أن درجة تفكك معظم الأملاح المنحلة في المياه الطبيعية مساوية لدرجة تفكك ملح كلور الصوديوم (NaCl) ذي التركيز الأكبر عادة في المياه الطبيعية فيمكننا تمثيل الكمية الكلية للأملاح الموجدة في المياه بما يسمى التركيز الكلي المكافئ (Ce<sub>q</sub>) من كلور الصوديوم.

وهكذا فإن المقاومة الكهربائية النوعية للمياه الطبيعية R<sub>w</sub> تعد تابعاً للتركيز الكلي المكافئ من (NaCl) ولدرجة حرارة الطبقة (T<sub>F</sub>) ويمكن أن نكتب.

$$R_w = f(Ce_{q_{NaCl}}, T_F) \quad (6 - 1)$$

ويمكن تحديد المقاومة الكهربائية للمياه الطبيعية R<sub>w</sub> بطرق عديدة:

أ - طريقة بيانات المياه الطبيعية "Water Catalogs"

ب - من القياسات المخبرية.

\* القياس المباشر لمقاومة المياه الطبيعية.

\* التحليل الكيميائي للمياه الطبيعية.

ـ من تفسير بعض القياسات الجيوفيزياتية البئرية.

١ - ٦ - ٣ - ٤ - تأثير التركيب البنوي للصخر على المقاومة الكهربائية للصخر بناء على البنية الهيكلية والنسيجية للصخور وتوزع الفلزات الفراغي فإننا يمكننا أن نميز بين الصخور فنقول صخر متجانس Homogen أو غير متجانس inhomogen وذلك حسب توزع الفلزات المكونة للصخر، وكما نميز بين الصخور المتاظرة Isotrop وغير المتاظرة Anisotrop نسبة لتغير الخواص وفق الاتجاه (انظر الشكل ١ - ١) فإذا كان لدينا صخور غضارية شيسية، هي تعاقب من الطبقات الغضارية الدقيقة والطبقات الرملية الرقيقة، فإن قياس المقاومة الكهربائية  $R$  في مستوى التطبيق يعطى قيمًا أقل من قياسها بشكل عمودي على مستوى التطبيق، وهذا الاختلاف يعطينا فكرة عن عدم تجانس الصخر المقلس.

١ - ٣ - ٥ - تأثير المسامية  $\phi$  على المقاومة الكهربائية للصخر.

المسامية الكلية  $\phi$  هي نسبة جميع الفراغات الموجودة في الصخر  $V_p$  على

كامل حجم الصخر  $V_t$  كما في المعادلة التالية:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (7-1)$$

حيث :  $V_p$  حجم الفراغات القليلة

$V_t$  حجم الصخر.

وتعطى المسامية على شكل نسبة مئوية مثل 30%， 40% أو قيمة تتراوح من

١  $\leftrightarrow$  ٠ منسوبة إلى واحدة الحجوم.

أما المسامية الفعالة  $\phi_{eff}$  فهي نسبة المسامات أو الفراغات المتصلة بعضها

وبعض ويمكن للسوائل أو الغازات أن تتحرك ضمنها.

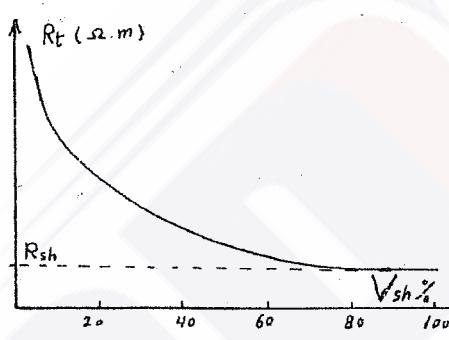
المسامية الفعالة هي التي تؤثر بشكل مباشر في المقاومة الكهربائية للصخر.

لأنه كما درسنا يمكن عد المواد المؤلفة للصخر مواداً غير ناقلة للتيار الكهربائي

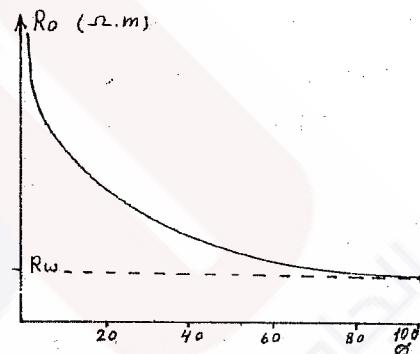
وتصبح المقاومة الكهربائية للصخر تابعاً للمسامية  $\phi$  ولنقاية الماء الموجودة في هذه المسامات ونسبة التشبع بالماء.

$$R_t = f(\phi, R_p, S_w) \quad (8-1)$$

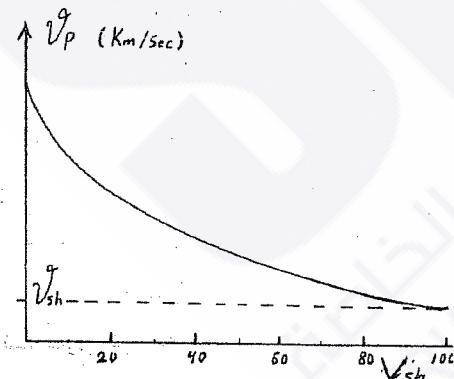
فإذا افترضنا أن الصخر مشبعاً بالماء فإن مقاومية الصخر  $R_0$  تتاسب عكساً ومسامية  $\phi$  وطرداً مع مقاومية السوائل الموجودة في المسامات  $R_p$ . والشكلان (11 - 1) و (12) يوضحان هذه العلاقة.



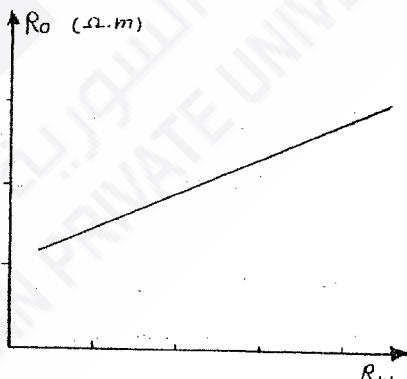
شكل 1 - 13 علاقة المقاومة الكهربائية للصخور  $R_t$  مع المحتوى الغباري  $V_{sh}$ .



شكل 1 - 11 العلاقة بين المسامية  $\phi$  ومقاومة الصخر المشبوع  $R_0$ .



شكل 1 - 14 علاقة بين مقاومية الماء الطبقية  $R_W$  ومقاومة الصخر المشبوع بالماء  $R_0$  مع محتوى الغبار  $V_{sh}$ .



شكل 1 - 12 العلاقة بين مقاومية الماء الطبقية  $R_W$  ومقاومة الصخر المشبوع بالماء  $R_0$ .

#### ١ - ٤ - ٤ - حساب المقاومية الكهربائية (النوعية) للصخور المسامية.

تعتمد المقاومية الكهربائية للصخور المسامية والنفودة بشكل أساسى كما ذكرنا على تركيبها المترالوجى، وعلى بنيتها التركيبية، وعلى نوعية المواقع الموجودة في المسامات (ماء، نفط، غاز) ومقاومة هذه المواقع وكذلك على نسبة تشبعها بهذه السوائل. وسندرس أولاً حالة الصخور المشبعة % 100 بالماء.

#### ١ - ٤ - ٤ - ١ - المقاومية الكهربائية للصخور المسامية المشبعة بالماء $R_o$ .

نتيجة للأبحاث التي أبداها ARCHIE عام ١٩٤٢ على الصخور الرملية النظيفة والخلالية من الغضار، مع الأخذ بالحسبان بأن المقاومية الكهربائية النوعية للمادة الصخرية الكلية تسعى إلى اللانهاية  $\rightarrow R_{ma}$  وجد أرشي بأن المقاومية الكهربائية للصخر المشبوع تماماً بالماء  $R_o$  تتناسب طرداً مع المقاومة الكهربائية النوعية للمياه الطبقية التي تحويها مسامات الصخر.

$$R_o \sim R_w \quad (9-1)$$

وقد توصل أرشي إلى أن عامل التنساب بين مقاومية الصخر المشبوع بالماء  $R_o$  وبين المقاومية الكهربائية للمياه الطبقية  $R_w$  يتعلق بنوع الصخر وبمساماته وبنكبيه الهيكلي والنسيجي. وسمى عامل التنساب هذا بعامل المقاومية الكهربائية للطبقة (التشكيلية) Resistivity Formation Factor واختصاراً عامل التشكيلة F وبذلك تصبح المعادلة (٩ - ١) على الشكل التالي:

$$R_o = F \cdot R_w \quad (10-1)$$

وبما أن عامل التشكيلة F يتعلق بالتركيب الداخلى للصخر أي بالفراغات وطريقة ترتيبها الفراغي وكيفية ارتباطها يعني هذا أن F يتعلق بشكل أساسى بالمسامية  $\phi$  ودرجة تماسك الصخر.

ومن خلال التجارب المخبرية التي أجرتها أرشي على عدة أنواع من الصخور الرملية الخلالية من الغضار، وجد أن عامل التشكيلة F يمكن أن يعطى بالعلاقة التالية:

$$F = \frac{1}{\phi^m} \quad (11-1)$$

إن قيمة الأس  $m$  والذي يسمى أُس المسامية Exponent Porosity السمننة Cementation Factor يتعلق بالمسامية  $\phi$  وبدرجة الترابط أو السمننة، وكذلك تتعلق قيمة عامل السمننة بشكل الحبيبات المولفة للصخر وتتحفظ قيمة هذا العامل مع ارتفاع نظامية كروية هذه الحبيبات أو الجزيئات.

وعلم الباحث الروسي "DACHNOV" العلاقة (1 - 11) عام ١٩٥٩ لتناسب كافة أنواع الصخور ولتصبح:

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (12 - 1)$$

حيث  $a$  عامل تجاري ينبع نوع الصخر.

وتأخذ  $a$  و  $m$  قيمًا مختلفة تبعًا لنوع الصخر والجدول (1 - 2) يبين قيم هذه العوامل لعدة بحاثين (LEHNERT, ROTHE, 1962, DACHNOV 1975, 1962, 1963) ويعود بعض العلاقة (1 - 12) في العلاقة (1 - 10) نجد أن المقاومة الكهربائية للصخر المشبع بالماء تصبح:

$$R_t = \frac{a \cdot R_w}{\phi^m} \quad (13 - 1)$$

4-4-2 - المقاومة الكهربائية للصخور المسامية المشبعة جزئياً بالماء  $R_t$   
بفرض أن الفراغات مشبعة جزئياً بالماء وجزئياً بالهواء أو الغاز أو النفط فإن المقاومة الكهربائية الحقيقة للصخر  $R_t$ . سترداد مقابل المقاومة الكهربائية للصخر المشبع تماماً بالماء  $R_0$  ووجد نتيجة التجارب المخبرية بأن نسبة المقاومة  $R_t / R_0$  هي تابع لنسبة التشبع بالماء  $S_w$  ويمكن أن نكتب

$$R_t / R_0 = f(S_w) \quad (14 - 1)$$

وتعرف النسبة  $R_t / R_0$  بأنها دليل أو مؤشر المقاومة ويرمز لها بـ  $I$  .(Resistivity Index)

$$I = R_t / R_0 \quad (15 - 1)$$

ومن التجارب المخبرية وجد أن دليل المقاومة  $I$  يعطى بالعلاقة التالية :

$$I = S_w^{-n} \quad (16 - 1)$$

DACHNOV (1962) LEHNERT, ROTHE		PIRSON (1963)		DACHNOV (1975)		ليثولوجية الصخور
a	m	a	m	a	m	
1	1.3	1	1.3			رمال غير متغيرة
		1	1.4 - 1.5			صخور غير متراوطة (رمال ورخوة، صخور كلاسية أو قليلة)
				0.9 - 0.75	1.2 - 1.7	صخور متراوطة ضعيفة جداً (رمال الخليج العربي)
		1	1.6 - 1.7			رمال وصخور رملية مدعومة الترابط
						صخور مدعومة الترابط جداً (صخور رملية > 20 % φ )
0.7	1.9					صخور رملية ضعيفة الترابط
0.5	2.2			0.9 - 0.5	1.5 - 2.1	صخور متوسطة الترابط
		1	1.8 - 1.9			صخور متوسطة الترابط (صخور رملية < 15 % φ )
				0.7 - 0.4	2	صخور رملية جيدة الترابط
		1	2 - 2.2			صخور جيدة الترابط (صخور رملية للقلعة المسامية، كوارتزيت دولوميت، صخور كلاسية ذات مسامية أولية)
0.55	1.85					صخور كلاسية بيريبية
0.6	2.15			0.75 - 0.4	1.7 - 2.4	صخور كلاسية تقنية للتلوكور ودولوميت
0.8	2.3			0.6 - 0.35	2.2	صخور كلاسية تقنية ودولوميت ذو مسامية تكميلية

جدول 1 - 2 قيم تجريبية متوسطة لكل من a وعامل السمنة m

حيث n هي أسس التشبع Exponent Saturation وترتبط قيمته ضمن المجال من 1.3 إلى 2 حسب تجارب الفرنسي Desbrandes 1968 وغالباً تستعمل 2 وبتعويض العلاقة (1 - 16) في العلاقة (1 - 15) ينتج

$$R_0 = R_t \cdot S_w^{-n} \quad (17-1)$$

وبإدخال قيمة R0 في العلاقة 1 - 13 نحصل على

$$R_t = \frac{a \cdot R_w}{\phi^m} \quad (18-1)$$

وهي العلاقة العامة التي أوجدها أرشي لحساب المقاومية الكهربائية الحقيقة للصخور وترتيب العلاقة السابقة وفق S\_w ينتج

$$S_w = \left( \frac{a \cdot R_w}{\phi^m \cdot R_t} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (19-1)$$

وينتضح من هذه العلاقة بأن نسبة التشبع بالماء تتعلق بالخصائص البتروفيزيائية للصخور ولخصائص المياه الطبقية.

وبحسابنا لنسبة التشبع بالماء  $S_w$  نستطيع تحديد نسبة التشبع بالمواد الهيدروكربونية وفقاً للعلاقة التالية:

$$S_{\text{hc}} = (1 - S_w) \cdot 100 \quad (20 - 1)$$

ويمعرفة جزء المسامية المتشبع بالمواد الهيدروكربونية وأبعاد المكمن يمكننا حساب الاحتياطي النفطي للمكمن.

#### 4 - 6 - 3 - حساب عامل مقاومية التشكيلة F

إن طرق حساب عامل مقاومية التشكيلة F للصخور المؤلفة من مواد صلبة ذات مقاومية عالية جداً والتي يمكن إهمال نقليتها الكهربائية يمكن أن تصنف إلى مجموعات مختلفة حسب النماذج гидрофизическая الصخرية المعتمدة في الحساب انظر الشكل (1 - 2):

\* نموذج الصخور التي ترتب المواد أو الفلزات المؤلفة له على شكل صفائح

محدودة متوازية مثل النموذج الصفائحي المقدم من Wyllie 1956

\* نموذج الصخور المؤلفة من مواد ذات أشكال معينة ومرتبة وفق نظام محدد

مثل النموذج المقدم من Gassmann 1951 و Schopper 1966.

\* نموذج الصخور التي تتجمع بتركيب بنائي متغير، مثل النموذج المقدم من Schön 1974

إن عامل التشكيلة F في النموذج الصفائحي يحسب على النحو التالي :

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_F} \quad (21 - 1)$$

حيث  $R_p$  المقاومية الناتجة عن السوائل الموجودة في المسامات  $\phi$ .

$R_F$  المقاومية الناتجة عن المواد المؤلفة للصخر Matrix.

تعطى المقاومية  $R_p$ ,  $R_F$  بالعلاقات التالية:

$$R_p = R_w \frac{L}{\phi \cdot L} = \frac{R_w}{\phi} \quad (22 - 1)$$

$$R_F = R_{\text{ma}} \cdot \frac{L}{(1 - \phi)L} = \frac{R_{\text{ma}}}{1 - \phi} \quad (23 - 1)$$

لأن مقاومية أي ناقل يعطى بالقانون التالي

$$R = R_s \cdot \frac{L}{A} \quad (24 - 1)$$

حيث A سطح الناقل

L طول الناقل

$R_s$  المقاومة الكهربائية النوعية للناقل.

$R_{ma}$  المقاومة الكهربائية النوعية للمادة الصلبة أو الفلزات.

ويعتبر قيم  $R_p = R_F$  في العلاقة (1 - 21) والإصلاح نجد

$$\frac{1}{R_t} = \frac{\phi}{R_w} + \frac{1-\phi}{R_{ma}} \quad (25 - 1)$$

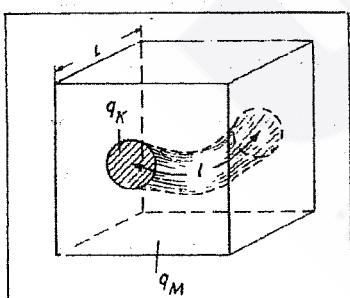
وإذا أن  $R_{ma} \leftarrow$  فالعلاقة تصبح

$$\frac{R_t}{R_w} = \frac{1}{\phi} \quad (26 - 1)$$

وبالمقارنة مع العلاقة  $R_w = F / R_t$  نجد أن عامل التشكيلة في النموذج الصفائي يعطى بالعلاقة

$$F = \frac{1}{\phi} \quad (27 - 1)$$

أما عامل التشكيلة  $F$  للنموذج الذي تكون فيه المسامية موجودة على شكل أقنية والفلزات مرتبة بشكل منظم (نموذج Gassmann و Schopper) فيحسب انتلاقا وفي نموذج الأقنية تنطلق من الفرضيات السابقة أيضا أي أن  $R_{ma} \rightarrow \infty$  وإن نقلية الصخر تعتمد على نقلية السوائل الموجودة ضمن الأقنية أو الأنابيب.



إذا كان لدينا كما في الشكل السابق قناة طولها  $y$  ومساحة مقطعيها  $a_{q_k}$  ومساحة مقطعيها  $a_{q_M}$  ومساحةقطع النموذج  $a_{q_M}$  الذي هو عبارة عن مكعب طول ضلعه  $L$ . فإن نقلية هذا الأنابيب حسب قانون أوم.

شكل ( 1 - 15 ) نموذج الأقنية او الأنابيب

$$R_k = R_w \frac{1}{q_k} \quad (28 - 1)$$

أما المقاومية الكهربائية للنموذج  $R_M$  هي:

$$R_M = R_t \frac{L}{q_M} \quad (29 - 1)$$

والنسبة بين طول الشق أو الأنابيب أو طول العينة أو النموذج  $L$  تعرف نظامية أو تعدد الأنابيب "Tortusity" ويرمز لها بـ  $T^*$

$$T^* = \frac{1}{L} \quad (30 - 1)$$

والمسامية  $\phi$  في هذا النموذج حسب التعريف هي:

$$\phi = \frac{\text{الفراغات}}{\text{حجم الصخر}} = \frac{q_k \cdot 1}{q_M \cdot L} = \frac{q_k \cdot T^*}{q_M} \quad (31 - 1)$$

وقلنا سابقاً إن ناقلية أو مقاومية الصخر أو النموذج الجيوفيزائي يعتمد على ناقلية أو مقاومية السوائل الموجودة في الأنابيب ويمكن القول بأنهما متساوين.

$$R_M = R_K$$

$$R_t = R_M \frac{1}{q_M} = R_w \frac{1}{q_K} \quad (32 - 1)$$

$$\frac{R_t}{R_w} = \frac{1}{L} \cdot \frac{q_M}{q_K} \quad (33 - 1)$$

وبإدخال المعادلين (1 - 30) و (1 - 31) في المعادلة (1 - 33) وبالإصلاح

والمقارنة مع  $R_t/R_w = F$  ينتج:

$$F = \frac{R_t}{R_w} = \frac{(T^*)^2}{\phi} \quad (34 - 1)$$

ان عامل التجعد  $T^*$  يتعلق بالمسامية  $\phi$  وبالبناء البيئي للصخر وبعامل السننة  $m$ .

$$F = \frac{1}{\phi^m} = \frac{(T^*)^2}{\phi} \quad (35 - 1)$$

$$T^* = \phi^{\frac{(1-m)}{2}} \quad (36 - 1)$$