د. عماد سليمان نوفل

منشورات جامعة البعث
كلية الهندسة الكيميائية والبترولية

هيدروليك الموائع الجوفية

تأليف

الدكتور المهندس
عماد سليمان نوفل

الدكتور المهندس
جورج عبد الله عبد الأحد

مديرية الكتب والمطبوعات الجامعية
١٩٩٤ - ١٩٩٥

مقدمة

يعتبر الميكانيك جزءاً من الفيزياء وأساساً لتقدم الصناعة ، كماهو في صناعة النفط والغاز ، وتعتبر عمليات الصناعة النفطية والغازية ، ابتداء من حفر البئر وانتهاءً بنقل النفط المستخرج بالأنابيب ، عمليات ميكانيكية بطبيعتها ، وتحتل عمليات استثمار المكامن النفطية ، مكاناً أساسياً ضمن هذه العمليات .

يتسع في الوقت الحاضر مجال استخراج النفط والغاز ، حيث تدخل في الاستثمار مكامن ذات ظروف جيولوجية وفيزيائية معقدة ، وتظهر الحاجة إلى حل مسائل هامة متعلقة بزيادة درجة استخراج النفط من الطبقة ، لذلك لابد من فهم كيفية حركة السوائل (النفط والماء) والغازات ضمن الطبقات المشبعة بها .

هيدروليك الموائع الجوفية هو العلم الذي يدرس حركة النفط والماء والغاز ومزيجها في الصخور المسامية والمتشققة والمشكلة للطبقات المنتجة . وبما أن هيدروليك الموائع الجوفية يدرس الحركة الميكانيكية للسوائل والغازات ، لذلك يمكن اعتباره جزءاً من الميكانيك ، حيث يجوز تسميته ميكانيك السوائل والغازات الجوفية.

يترافق إعطاء النفط والغاز من قبل الطبقة مع حدوث ظواهر كيميافيزيائية تظهر ضمن الطبقة نفسها ، حيث تتم حركة السوائل ضمن قنوات مسامية ضيقة (مسامات أو شقوق) ، لذلك تظهر بعض الظواهر السطحية ، ناتجة عن التأثير المتبادل بين جزيئات السائل والجزء الصلب من الصخر الواقع على تماس مع السائل .

لايدخل هيدروليك الموائع الجوفية بدراسة مسائل استثمار المكامن النفطية والغازية فقط ، بل يهتم ببعض المسائل الأخرى .

لايمكن أن يتم التخطيط لاستثمار مكامن نفطية وغازية جديدة في الوقت الحاضر واستغلال الآبار إلا بالاستخدام الواسع لقوانين هيدروليك الموائع الجوفية ، ويشمل

تحديد مايلي :

١) كيفية توزع الآبار على امتداد الطبقة .

٢) عدد الآبار اللازمة وأفضلية إدخالها في الإنتاج .

٣) نظام عمل هذه الآبار .

٤) العامل الواجب حقنه في الطبقة وكميته (ماء أو غاز) ، من أجل الحفاظ على الضغط الطبقي ثابتاً .

٥) كيفية تنظيم وتوجيه السائل والغاز ضمن الطبقة .

تحل هذه المسائل وغيرها من المسائل الأخرى على أساس هيدروليك المواقع الجوفية ، ويتعلق المردود الصناعي والاقتصادي لانتاج النفط والغاز ، بالحلول الصحيحة لهذه المسائل ، لهذا لابد من معرفة قوانين الجريانات الجوفية في الطبقات الحاملة للنفط والغاز .

ومن أجل فهم خصائص استثمار المكامن النفطية والغازية ، لابد من ذكر أنظمة عمل الطبقة التي تحدد بماهية الطاقة الطبقية وبطبيعة ظهورها أثناء عمليات استثمار المكمن ، وهذه الأنظمة هي : نظام الدفع المائي ، النظام المرن ، نظام الغاز المنحل ، نظام الدفع الغازي ، نظام الجاذبية ، النظام المختلط .

قام الباحث الفرنسي دارسي (A . DARSY) في عام ١٨٥٦ م بصياغة القانون التجريبي الذي يبين العلاقة الخطية مابين سرعة الارتشاح وتدرج الضغط ، ثم تلاه عددمن الباحثين الذين قاموا بتطوير هذه النظرية نذكرمنهم سليختر(SLEKHTER) ، جوكوفسكي (N . E . JOKOVSKY) ، بافلوفسكي (N . N. PAVLOVSKY) ليبنزون (L . S . LEBENZON) ، وغيرهم .

هذا الكتاب مخصص للتعرف على عناصر هيدروليك الموائع الجوفية ، من قبل طلاب السنة الثالثة ، قسم الهندسة البترولية في كلية الهندسة الكيميائية والبترولية ،

حيث سنقوم بالدراسة التفصيلية لقوانين جميع أنواع الجريانات الارتشاحية التي تحدث في الطبقات النفطية والغازية المختلفة ، آملين إغناء طلابنا بالمعلومات اللازمة لتمكينهم في المستقبل من المساهمة في وضع الخطط والتصاميم الحقلية لاستثمار المكامن النفطية على نحوٍ أمثل ، والمبنية على الأسس العلمية الصحيحة .

كذلك نأمل أن يكون لهذا الكتاب فائدة للاختصاصيين العاملين في هذا المجال .

الدكتور المهندس
عماد نوفل

الدكتور المهندس
جورج عبد الأحد

لقد كتب الدكتور المهندس جورج عبد الأحد كلاً من الفصول التالية :

الثاني ، الرابع ، السادس ، الثامن .

وكتب الدكتور المهندس عماد نوفل الفصول التالية :

الأول ، الثالث ، الخامس ، السابع ، التاسع .

الفصل الأوّل

المفاهيم الأساسية في هيدروليك الموائع الجوفية

١-١- خصائص حركة السوائل في الطبقات الحقيقية :

يتعلق وجود تراكمات النفط والغاز داخل الأرض ، بوجود صخور قادرة على التخزين وبخصائص بنيوية أخرى للطبقات ، وتسمى الصخور القادرة على تخزين النفط والغاز وإعطائة عند الاستثمار الصخور الخازنة .

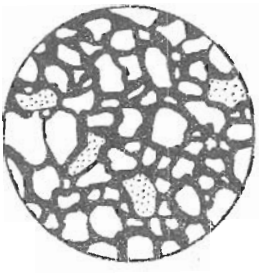
تكون السوائل (النفط ، الغاز ، المياه الجوفية) في فراغات يمكن أن تكون مسامات أو شقوقاً في الصخور الرسوبية ، ويمكن أن تتم حركة هذه السوائل تحت تأثير عمليات طبيعية (هجرة الفحوم الهيدروجينية) ، أو نتيجة نشاط الإنسان لاستخراج الثروات الطبيعية . وتسمى حركة النفط والغاز ومزيجهما عبر الصخور من خلال المسامات أو الشقوق المتصلة بالارتشاح.وكانت قد تطورت نظرية الارتشاح ، التي تعتبرجزءاًمن ميكانيك الأوساط غيرالكتيمة مع متطلبات هيدروليك الموائع الجوفية والهيدروجيولوجيا ودراسة الصخور وإنتاج النفط والغاز والصناعة الكيميائية ... إلخ .

الأساسَ النظري لاستثمار الطبقات الحاوية على النفط والغاز هو علم هيدروليك الموائع الجوفية ، الذي يدرس ارتشاح النفط والماء والغاز في الصخور المسامية أو المسامية المتشققة .

إن لحركة السوائل ضمن الصخور النفوذة خصائص لاتختلف عن طرق دراسة ميكانيك السوائل (حركة السوائل في الأنابيب الأسطوانية) فقط ، بل تختلف عن طرق بحث عمليات أخرى للارتشاح (مثلاً في الصناعة الكيميائية أو الهندسة الهيدروليكية) .

يعتبر الوسط المسامي للصخور الرسوبية نظاماً معقداً من الفراغات المتصلة التي من

الصعب عزل قنوات مسامية محددة فيها (الشكل ١-١) ، وتتراوح مقاييس المسافات في الصخور الرملية غالباً مابين واحد ميكرمتر حتى عدة عشرات منه ، ويصبح الوسط المسامي أكثر تعقيداً في الصخور الكربوناتية (حجر كلسي ، دولوميت) التي تبدي عدم تجانس كبير في توزع المسامات حيث توجد شقوق وقنوات تشكلت بعد تشكل الصخر نفسه ، وهذه الصخور تسمى صخوراً مسامية متشققة بالإضافة إلى وجود مسامات أولية .



شكل (١-١) : مقطع في الحجر الرملي المشبع بالنفط

إن لنظرية ارتشاح النفط والغاز في الطبقات الحقيقية الخصائص التالية :

١) عدم امكانية دراسة حركة السوائل في الطبقات بالطرق الهيدروديناميكية العادية المباشرة ، أي عن طريق حل معادلات الحركة للسائل اللزج مع الأخذ بعين الاعتبار كل المسامات .

٢) الاختلاف الكبير بين المقاييس المستخدمة في الحسابات ، فمقاييس المسامات (من واحد حتى عشرات الميكرومترات) ، وأقطار الآبار (عشرات السنتيمترات) ، المسافة مابين الآبار (مئات الأمتار) وأبعاد المكامن (عشرات الكيلومترات) ، فعدم تجانس الطبقة يمكن أن يختلف ضمن مجال واسع .

٣) محدودية المعلومات حول بناء وخواص الطبقات والسوائل الطبقية التي لاتسمح بوضع نموذج موحد للطبقة .

تقود هذه الخصائص إلى صياغةالتصورات ووضع طرق هيدروليك الموائع الجوفية، الهادفة قبل كل شيء إلى وضع الأسس الرياضية التي تأخذ بعين الاعتبار عدم دقة المعطيات . لهذا فإن دقة النتائج تعتمد على دقة وضع هذه الأسس ودقة تحليل المعطيات .

لقد ذكرنا أنه هناك اختلافات مابين حركة السوائل والغازات في الطبقة عنها في الأنابيب الاسطوانية وتتمثل هذه الاختلافات بما يلي :

١) صغر مقاييس القنوات المسامية ، حيث إن قطر القنوات المسامية صغير جداً ويقاس بأجزاء الميليمترات بالمقارنة مع الأنابيب العادية التي تقاس بالسنتيمترات .

٢) حركة السوائل ضمن هذه القنوات الحسابية صغيرة جداً ، ففي الأنابيب الأسطوانية تصل السرعة من عشرات السنتمترات إلى متر واحد في الثانية ، بينما تكون سرعة ارتشاح السوائل والغازات في القنوات المسامية حتى في المناطق الطبقية القريبة من قاع البئر صغيرة جداً ، فمثلاً عند انتاجية بئر من السائل ١٠٠م٣ / يوم من طبقة ذات سماكة ١٠م ومسامية ٢٠٪ ، فإن سرعة حركة السائل من الطبقة وإلى البئر على مسافة ١٠٠م منه ستكون ١ ميكرون/ثانية .

٣) التأثير الكبير لقوى الاحتكاك نتيجة لكبر لزوجة السوائل الطبقية وكبر مساحة السطح الداخلي لجدران القنوات المسامية وخشونة السطح الداخلي لهذه القنوات ، وهذه القوى ستلعب دوراً كبيراً في إعاقة حركة السائل ضمن هذه القنوات ، ولتبيان تأثير مساحة السطح الداخلي للقنوات المسامية على قوى الاحتكاك ، نعين سطح مجموع الحبيبات الرملية الموجودة في ١م٣ من الطبقة الرملية المسمنتة مع اعتبار كروية الحبيبات الصخرية ذات الأقطار المتساوية :

$$N = \frac{V(1 - m)}{W} = \frac{1(1 - m)}{W} = \frac{3}{4}\,\frac{1 - m}{\pi r^3} \qquad (١-١)$$

حيث إن : N – عدد الحبيبات في ١ م٣ من الطبقة .

V – حجم الصخر (الطبقة) يساوي ١ م٣ .

r – نصف قطر الحبيبة .

m – مسامية الطبقة .

W – حجم الحبيبة .

أما مجموع سطوح الحبيبات S الموجود في ١ م٣ من الطبقة الرملية فتساوي :

$$S = N \cdot f = \frac{3}{4} \frac{(1 - m)}{\pi r^3} \cdot 4 \pi r^2 = \frac{3 (1 - m)}{r} \qquad (٢-١)$$

حيث إن f – سطح الحبيبة .

نلاحظ أنه إذا كانت مسامية الطبقة m = 0,20 ونصف قطر الحبيبة r = 0 , 1 m.m = 10^{-4} m فيكون مجموع سطوح الحبيبات مساوياً :

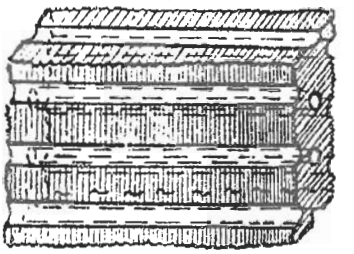
$$S = \frac{3 (1 - 0 , 2)}{10^{-4}} = 2 . 10^{4} \ m^2$$

أي أن مجموع سطوح الحبيبات يساوي ٢٤٠٠٠ م٢ أو أكثر هكتارين ، أما في الطبقات الرملية التي مقاييس حبيباتها صغيرة ، فإن سطح القنوات المسامية في ١ م٣ من هذه الطبقات سيكون أكبر بعدة مرات من السطح السابق . ومن المعروف أن قوى الاحتكاك تتناسب طرداً مع سطح تلامس السوائل الطبقية اللزجة مع الجدران الداخلية للقنوات المسامية وبالتالي فإن قوى الاحتكاك هذه ستكون كبيرة جداً .

١–٢– النماذج المبسطة للوسط المسامي ـ المسامية والمسامية السطحية :

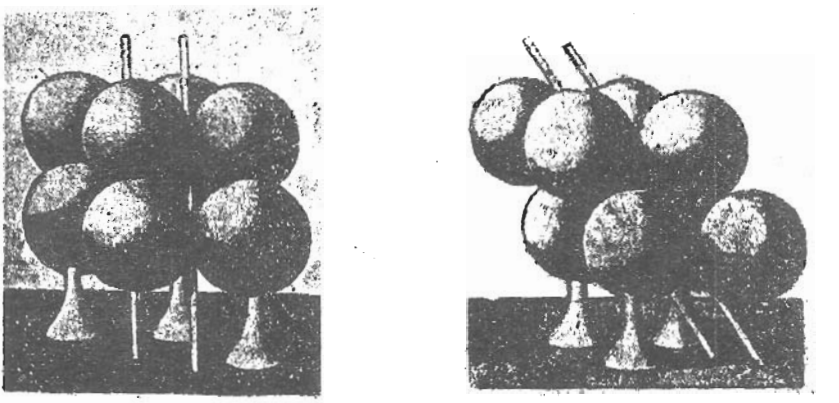
لقد ذكرنا أن للقنوات المسامية شكلاً غير منتظم ومقاييس مختلفة ، لذلك لايمكن دراسة حركة جزيئات السائل أو الغاز في كافة زمر هذه القنوات ، كذلك من غير الممكن معرفة شكل وقياس كل زمرة من هذه القنوات الموزعة في الوسط المسامي . فمنذ بداية تطور نظرية الارتشاح لجأ العلماء إلى وضع نماذج مبسطة للوسط المسامي الحقيقي فقد افترضوا أن الوسط المسامي غير مشوه . ولكون حركة السائل اللزج في الانابيب ذات الشكل الأسطواني كانت قد درست دراسةً جيدةً ، فقد افترض الباحثون أن كل القنوات المسامية لها شكل أسطواني .

يتمثل نموذج الوسط المسامي الموضح بناء على الافتراض السابق ، في افتراض أن المسامات هي عبارة عن اسطوانات ضيقة موضوعة بشكل متوازٍ ، هذا النموذج دعي الصخر المثالي ، انظر الشكل رقم (١-٢) .



شكل (١-٢) : نموذج للصخر المثالي

أما النموذج الآخر للوسط المسامي الذي افترضه سليختر (SLIKHTER) هو ماسمي بالصخر الوهمي ، وهو عبارة عن مجموعة كرات ذات أقطار متساوية ومساوية لأقطار أكبر زمرة من حبيبات الصخر الحقيقي ويتألف من ثماني كرات تتوضع مابين حالتين : الأولى الأكثر تكثفاً ،والثانية الأكثر تحرراً ، الشكل (١-٣) يوضح هاتين الحالتين .

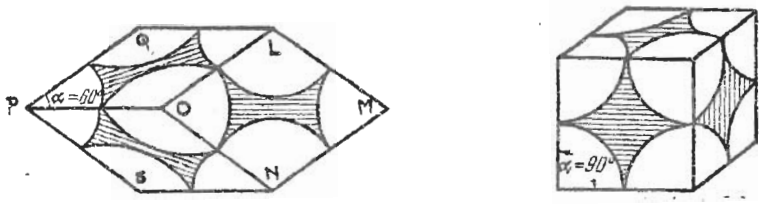


(b) (a)

شكل (١-٣) : نماذج للصخر الوهمي

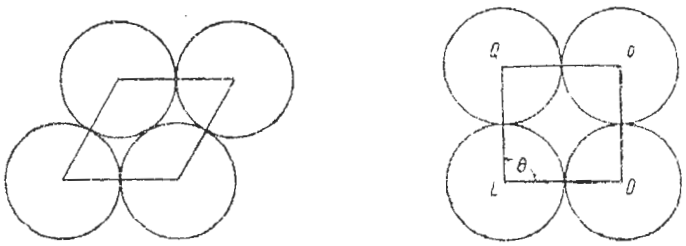
فالتوضع الأكثر تكثفاً (a) يمثل توضع الكرات في رؤوس معيني الأوجه بحيث تكون

الزاوية مابين أضلاع معيني الأوجه مساوية $\theta = 60°$، أما في التوضع الأكثر تحرراً (b) فإن الكرات تتوضع في رؤوس مكعب ، حيث إن الزاوية مابين أضلاع المكعب مساوية $\theta = 90°$. واحتمال توضع هذه الكرات سوف يكون مابين هاتين الزاويتين $60° \leq \theta \leq 90°$. والنموذج الأساسي للصخر الوهمي موضح في الشكل (١-٤)، بينما يوضح الشكل(١-٥) وجه معيني الأوجه عند التوضع الأكثر تحرراً (a) والأكثر تكثفاً (b) .



(b) (a)

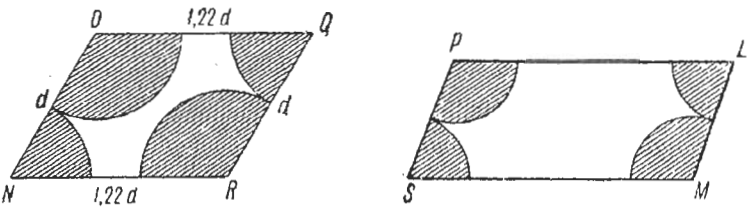
شكل (١-٤) : النماذج الأساسية للصخر الوهمي



(b) (a)

شكل (١-٥) : وجه معيني الأوجه عند التوضع الأكثر تحرراً (a) والأكثر تكثفاً (b)

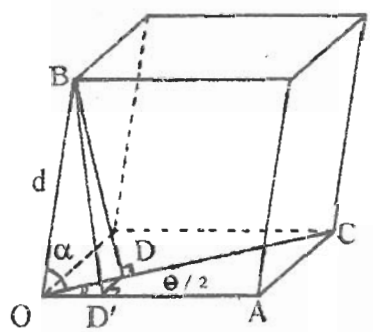
أما في الشكل (١-٦) فيمثل المقطعين القطري S P L M والعمودي NOQR للنموذج الأساسي للصخر الوهمي الموضح بالشكل (١-٤) ، فالأجزاء المهشرة تمثل الحبيبات الصخرية ، أما غير المهشرة فتمثل الفراغات المسامية .



(b) (a)

شكل (١-٦) : المقطعين القطري (a) والعمودي (b) لمعيني الأوجه الأساسي

من أجل دراسة تأثير كيفية توضع الحبيبات الصخرية الممثلة بالزاوية (θ) على المسامية ، ولإثبات عدم تأثير مقاييس الحبيبات (r) على هذه المسامية ، سنقوم بدراسة هندسية كمعيني الأوجه الموضح بالشكل (١-٧) الذي طول ضلعه d ، حيث نرسم من O القطر الكبير لقاعدته OC ، ثم ننزل من B عموداً h عليه فيقطعه في D ، وننزل من D عموداً على الضلع OA فيقطعه في D' .



شكل (١-٧) : الرسم الهندسي لمعيني الأوجه

من المعروف أن المسامية تحسب بالعلاقة

$$m = \frac{V_p}{V} = \frac{V - V_1}{V} = 1 - \frac{V_1}{V} \qquad (١-٣)$$

حيث إن V_1 – حجم مجموع الأجزاء الصلبة والذي يمثل حجم كرة :

$$V_1 = \frac{\pi d^3}{4} \qquad (٤-١)$$

d – قطر الكرة المساوي لطول ضلع معيني الأوجه .

V – حجم معيني الأوجه المساوي لجداء مساحة القاعدة في الارتفاع :

$$V = d^2 \sin\theta \times h \qquad (٥-١)$$

من المثلث OBD نجد أن :

$$h = d \sin\alpha$$

حيث إن :

α – الزاوية المحصورة بين الضلع OB والقطر OC .

نعوض القيم في العلاقة (١-٥) :

$$V = d^3 \sin\theta \sin\alpha \qquad (٦-١)$$

لنحسب قيمة $\sin\alpha$ ، حيث إن :

$$\sin\alpha = \sqrt{1 - \cos^2\alpha} \qquad (٧-١)$$

من المثلث OBD نجد أن :

$$\cos\alpha = \frac{OD}{d}$$

ومن المثلث ODD' نجد أن :

$$OD = \frac{OD'}{\cos\frac{\theta}{2}} = \frac{d\cos\theta}{\cos\frac{\theta}{2}} \Rightarrow$$

$$\cos\alpha = \frac{d\cos\theta}{d\cos\frac{\theta}{2}} = \frac{\cos\theta}{\cos\frac{\theta}{2}}$$

نعوض في (١-٧) فنجد :

$$\sin\alpha = \sqrt{1 - \frac{\cos^2\theta}{\cos^2\frac{\theta}{2}}}$$

نعوض هذه المعادلة في المعادلة (١-٦) :

$$V_1 = \frac{\pi d^3}{4} \qquad (٤-١)$$

d – قطر الكرة المساوي لطول ضلع معيني الأوجه .

V – حجم معيني الأوجه المساوي لجداء مساحة القاعدة في الارتفاع :

$$V = d^2 \sin\theta \times h \qquad (٥-١)$$

من المثلث OBD نجد أن :

$$h = d \sin\alpha$$

حيث إن :

α – الزاوية المحصورة بين الضلع OB والقطر OC .

نعوض القيم في العلاقة (١-٥) :

$$V = d^3 \sin\theta \sin\alpha \qquad (٦-١)$$

لنحسب قيمة $\sin\alpha$ ، حيث إن :

$$\sin\alpha = \sqrt{1 - \cos^2\alpha} \qquad (٧-١)$$

من المثلث OBD نجد أن :

$$\cos\alpha = \frac{OD}{d}$$

ومن المثلث ODD' نجد أن :

$$OD = \frac{OD'}{\cos\frac{\theta}{2}} = \frac{d\cos\theta}{\cos\frac{\theta}{2}} \Rightarrow$$

$$\cos\alpha = \frac{d\cos\theta}{d\cos\frac{\theta}{2}} = \frac{\cos\theta}{\cos\frac{\theta}{2}}$$

نعوض في (١-٧) فنجد :

$$\sin\alpha = \sqrt{1 - \frac{\cos^2\theta}{\cos^2\frac{\theta}{2}}}$$

نعوض هذه المعادلة في المعادلة (١-٦) :

$$V_1 = \frac{\pi d^3}{4} \qquad (٤-١)$$

d – قطر الكرة المساوي لطول ضلع معيني الأوجه .

V – حجم معيني الأوجه المساوي لجداء مساحة القاعدة في الارتفاع :

$$V = d^2 \sin\theta \times h \qquad (٥-١)$$

من المثلث OBD نجد أن :

$$h = d \sin\alpha$$

حيث إن :

α – الزاوية المحصورة بين الضلع OB والقطر OC .

نعوض القيم في العلاقة (١-٥) :

$$V = d^3 \sin\theta \sin\alpha \qquad (٦-١)$$

لنحسب قيمة $\sin\alpha$ ، حيث إن :

$$\sin\alpha = \sqrt{1 - \cos^2\alpha} \qquad (٧-١)$$

من المثلث OBD نجد أن :

$$\cos\alpha = \frac{OD}{d}$$

ومن المثلث ODD′ نجد أن :

$$OD = \frac{OD'}{\cos\frac{\theta}{2}} = \frac{d\cos\theta}{\cos\frac{\theta}{2}} \Rightarrow$$

$$\cos\alpha = \frac{d\cos\theta}{d\cos\frac{\theta}{2}} = \frac{\cos\theta}{\cos\frac{\theta}{2}}$$

نعوض في (١-٧) فنجد :

$$\sin\alpha = \sqrt{1 - \frac{\cos^2\theta}{\cos^2\frac{\theta}{2}}}$$

نعوض هذه المعادلة في المعادلة (١-٦) :

$$V = d^3 \sin\theta \sqrt{1 - \frac{\cos^2\theta}{\cos^2\frac{\theta}{2}}}$$

ومنه :

$$m = 1 - \frac{\frac{\pi d^3}{6}}{d^3 \sin\theta \sqrt{1 - \frac{\cos^2\theta}{\cos^2\frac{\theta}{2}}}}$$

أي أن :

$$m = 1 - \frac{\pi}{6 \sin\theta \sqrt{1 - \frac{\cos^2\theta}{\cos^2\frac{\theta}{2}}}}$$

وباستخدام المعادلات المثلثية نحصل على :

$$m = 1 - \frac{\pi}{6 (1 - \cos\theta) \sqrt{1 + 2\cos\theta}} \qquad (٨-١)$$

من الواضح أن θ تعبر عن كيفية توضع كرات الصخر الوهمي التي تتغير من $\theta = 60°$ وحتى $\theta = 90°$، وبتطبيق العلاقة الأخيرة من أجل هاتين الزاويتين الدحديتين نجد أن:

$\theta = 60°$	عندما	$m = 0,259$
$\theta = 90°$	عندما	$m = 0,476$

وهكذا فإن قيمة المسامية ستتراوح بين القيمتين :

$$0,259 \leq m \leq 0,476$$

أما مسامية الصخور الحقيقية فتتغير ضمن مجال أوسع بكثير مما ذكر أعلاه ، ويعلل هذا بسبب اختلاف مقاييس حبيبات الوسط المسامي ، ووجود مواد اسمنتية مختلفة في القنوات المسامية .

لننتقل الآن إلى دراسة المسامية السطحية ، التي يعبر عنها بنسبة سطح الممر إلى سطح المعين .

$$n = \frac{S}{S_1} = 1 - \frac{S_2}{S_1} \qquad (٩-١)$$

حيث إن S – سطح الممر المتشكل من الفراغات الموجودة بين الحبيبات الكروية

(انظر الشكل ١-٤) .

S_1 - سطح المعين .

S_2 - مجموع سطوح الأجزاء الأربعة من الدوائر الواقعة في المعين :

$$S_1 = d^2 \sin\theta \ , \ S_2 = \frac{\pi d^2}{4}$$

نعوض في المعادلة (١-٩) فنجد :

$$n = 1 - \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{d^2 \sin\theta}$$

ومنه :

$$m = 1 - \frac{\pi}{4 \sin\theta} \qquad (١٠-١)$$

نلاحظ من هذه المعادلة أن المسامية السطحية كذلك لاتتعلق بأقطار الحبيبات الكروية التي تكون الوسط المسامي ، وإنما بكيفية توضعها الممثلة بالزاوية (θ)، فيمكن الحصول على القيم الحدية للمسامية السطحية بتعويض قيم $\theta = 60°$ ، $\theta = 90°$:

$\theta = 60°$ عندما $n = 0 , 0931$

$\theta = 90°$ عندما $n = 0 , 2146$

أي أن :

$$0 , 0931 \leq n \leq 0 , 2146$$

هناك نوعان من المسامية في الطبقات الحقيقية أو النماذج ، الأولى تسمى المسامية بشكل عام أو المسامية المطلقة ، والثانية هي المسامية الفعالة . ففي المعادلة (١-٣) وعندما يعبر V_p عن حجم كل مسامات عينة الوسط المسامي ، فإن المسامية تعبر عن المسامية المطلقة ، أما المسامية الفعالة فستكون عندما يكون V_p في العلاقة (١-٣) معبراً عن حجم المسامات المتصلة الحاوية على نقط .

من أجل إجراء الحسابات العملية يجب معرفة المسامية السطحية الوسطية لحجم من الوسط المسامي . ولهذا الهدف لنفرض أنه لدينا نموذج لوسط مسامي ذو شكل

اسطواني (هذا النموذج كان قد استخرج من بئر - يدعى عينة اسطوانية) .

ستكون مساحة المسامات على طول الأسطوانة ، وعلى بعد Z عن بدايتها ، تابعة لهذه الإحداثيات (Z) إي أن $F_i(Z)$ كما في الشكل (١-٨) ، أما طول العينة فهو (L) ، وبالتالي يمكن حساب المسامية السطحية عند ارتفاع (Z) كما يلي :

$$n(Z) = \frac{F_i(Z)}{F} \Rightarrow F_i(Z) = F \cdot n(Z) \qquad (١١-١)$$

حيث إن : F - مساحة مقطع الأسطوانة .

عندئذ ستحسب القيمة الوسطية للمسامية السطحية $\bar{n}$ بالعلاقة التالية :

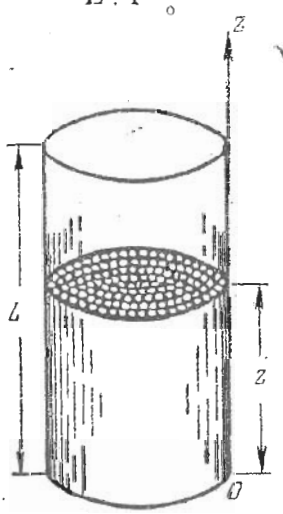
$$\bar{n} = \frac{1}{L}\int_0^L n(Z)\,dZ \qquad (١٢-١)$$

ولكن حجم الأسطوانة المذكورة سيكون مساوياً $V = L \cdot F$ وبالتالي فإن حجم كل المسامات في هذه العينة :

$$V_p = \int_0^L F_i(Z)\,dZ \qquad (١٣-١)$$

وبالتالي سنحصل على المعادلة التالية :

$$\bar{n} = \frac{1}{L \cdot F}\int_0^L n(Z) \cdot F \cdot dZ$$



شكل (١-٨) : عينة للوسط المسامي

$$\bar{n} = \frac{1}{V}\int_0^h F_i(Z)\,dZ = \frac{V_p}{V} = m \qquad (١٤-١)$$

من العلاقة (١-١٤) نجد أن المسامية السطحية الوسطية $\bar{n}$ تساوي المسامية المطلقة m .

أما القيمة الوسطية لسطح الممرات فتحسب من العلاقة التالية :

$$\bar{S} = \bar{n} \cdot F = m \cdot F \qquad (١٥-١)$$

فلدى حل بعض المشاكل العملية المتعلقة بارتشاح السوائل في الطبقة ، يهمنا تعيين القيمة الوسطية لسطح الممرات ، ومن العلاقة (١-١٣) تبين لنا أن هذه القيمة تساوي حاصل ضرب سطح مقطع الطبقة والمسامية m .

١-٣- الإنتقال من الصخر الوهمي إلى الصخر الحقيقي ـ القطر الفعال

يمكن استخدام معادلات الصخر الوهمي من أجل دراسة الحركة الارتشاحية في الصخور الحقيقية شريطة اختيار نفس أقطار الحبيبات الكروية الموجودة في الصخر الوهمي . فأقطار الحبيبات يجب أن تحقق الشرط التالي : تساوي المقاومة الهيدروليكية أثناء ارتشاح السوائل في الصخر الحقيقي والوهمي .

يسمى قطر حبيبات الصخر الوهمي الذي يحقق الشرط السابق بالقطر الفعال ويرمز له بالرمز d_E . فيجب تحديد القطر الفعال هذا من أجل الانتقال من الصخر الوهمي إلى الصخر الحقيقي .

يمكن إيجاد القطر الفعال باستخدام التحليل الميكانيكي للصخر والذي يحدد به التركيب الحبيبي الذي يمثل نسب كل زمرة من أقطار الحبيبات الصخرية ، عن طريق استخدام مناخل ذات فتحات بأقطار مختلفة ، حيث يقوم كل منخل بفصل الحبيبات الصخرية ذات الأقطار الأكبر من قطر فتحاته ، ثم توزن كل زمرة ، وتحسب النسبة المئوية لكل منها . نقوم بعد ذلك برسم منحنٍ ، حيث يوضع على محور العينات النسبة المئوية لأوزان كل الزمر ، والتي تبدأ أقطارها من الصفر وحتى القطر المحدد .