الفصل الرابع

المياه الأرضية في الصخور الرسوبية

4 - 1 تقديم

4 - 2 أنواع الصخور وسمك الطبقة

4 - 3 النفاذية والمسامية

4 - 3 - 1 الصخور التحاتية ذات الحبيبات الناعمة

4 - 3 - 2 الصخور الرملية

4 - 3 - 3 الصخور الكاربوناتية

4 - 4 إنتاجية الآبار

4 - 5 التحري عن المياه الأرضية

4 - 5 - 1 التحري عن المياه الأرضية في الصخور الرملية

4 - 5 - 2 التحري عن المياه الأرضية في الصخور الكربوناتية

4 - 6 كهوف الصخور الجيرية

4 - 7 إدارة المياه الأرضية

4 - 8 نوعية المياه

الفصل الرابع

المياه الأرضية في الصخور الرسوبية

4 - 1 : تقديم :

يتمركز الاهتمام الهيدروچيولوچي العام في الصخور الرسوبية على كهوف الصخور الجيرية . ملايين من الناس تزور سنويًا الكهوف الواسعة في فرجينا ، انديانا ، ميسسوني ، ونيومكسيكو في الولايات المتحدة ، إضافة إلى يوغسلافيا وفرنسا والبلقان ومناطق أخرى كثيرة في العالم .

كما يتمركز الاهتمام العلمي أيضًا على كهوف الصخور الجيرية والآبار الارتوازية العميقة ، ورغم أن الدراسات الخاصة بهذه الكهوف قد بدأت منذ سنوات طويلة إلا أن العديد من الملامح الهيدروجيولوجية لأصل الكهوف لاتزال غير مفهومة .

إضافة إلى أصل الكهوف والضغط الارتوازي هناك عدد من الاهتمامات السائدة الأخرى في هيدروجيولوجية الصخور الرسوبية . التنظيم الطبقي للنفاذية ، وأصل المياه ذات الخصائص الكيميائية غير الاعتيادية ، ومعدل هجرة المياه في الحشارج ذات التكوين الحجري الرملي جميعها ذات اهتمام خاص .

• • •

4 - 2 : أنواع الصخور وسمك الطبقة :

الصخور الصلصالية ، الطينية ، الغرينية والصخور الأخرى ذات الحبيبات الناعمة تشكل حوالي 50% من الصخور الرسوبية . تأتي بعدها بوفرتها

الصخور الرملية ثم الصخور الكربوناتية وأخيراً أنواع أخرى قليلة مختلفة تشمل الكونكلومريت ، الجبس ، الشرت Chert ، التلايت Tillite ، الأملاح ، والدياتومايت diatomite . تشكل الأنواع الصغيرة أقل من 2% من جميع الصخور الرسوبية المعرضة - يتراوح سمك الطبقة عادة من بضعة سنتمترات إلى عدة أمتار . رغم أن الطبقات المتناوبة من الصخور الجيرية الصلصالية والصخور الرملية هي المتميزة في معظم السلاسل الطبقية الرسوبية ، فإن الطبقات الانفرادية يمكن ان تكون سميكة بحيث أن الآبار المائية ضمن مناطق معينة تخترق طبقة واحدة من الصخور رغم إن الآبار ذات عمق أكثر من 100 متر .

• • •

4 - 2 : النفاذية والمسامية :

4 - 3 - 1 : الصخور التحاتية ذات الحبيبات الناعمة :

Fine - graind Detrital Rocks

معظم الصخور التحاتية الناعمة التكوين ذات مساميات عالية نسبيًا إلا أنها ذات نفاذيات واطئة . الجدول (4 - 1) يعطي نفاذية ومسامية عدد من أنواع الصخور الرسوبية - الصخور الصلصالية السيليكونية ، وبعض الصخور الطينية ومعظم صخور الأركليت argillites تظهر مفاصل واسعة متقاربة إذا كانت الصخور قرب السطح ، كذلك إذا كانت هذه الصخور متضمنة بالتصدع فأن الانكسارات التي تبقى مفتوحة لأعماق معتبرة يمكن أن تنمو وتتوسع . يمكن أن تعطي المفاصل والانكسارات عدة غالونات من المياه في الدقيقة للآبار. وتعتبر الصخور ناعمة التكوين حواجز أمام حركة المياه الجوفية . في المناطق ذات التركيب الطبقي الأفقي تعتبر الطبقات ذات التكوين الناعم بمثابة

حشارج صماء الحصر المياه في الأنظمة الارتوازية . ومع ذلك فأن من الخطأ افتراض عدم حدوث حركة محسوسة للمياه خلال الطبقات الصماء التي تحصرها. مثال ذلك ، 100 قدم من الصخور الغربنية ذات نفاذية 0.1 ملي دارسي تمتلك فرق ضغط هايدروليكي مقداره 10 قدم عمودي على السطح سوف تنقل 1.84×10^6 غالون من المياه كل سنة خلال كل ميل مربع من الطبقة.

الفراغ المسامي الكبير في العديد من الصخور الرسوبية ناعمة التكوين يوفر خزن لكميات هائلة من المياه . رغم ذلك لا تستطيع الآبار المنفردة في معظم المناطق استخراج كميات مهمة بصورة مباشرة من هذه المياه، ويمكن حث بزل المياه إلى الحشارج بتخفيض الضغط فيها . لذلك ، لا بد من الأخذ بنظر الاعتبار المياه المخزونة في الصخور الصلصالية والصخور المماثلة عند عمل مسوحات مخزون المياه الجوفية ، خصوصًا عند وجود ضغط هايدروستاتيكي يكفي لحث بزل المياه . وبسبب تأثير الخاصية الشعرية يعتبر البزل بفعل الجاذبية أكثر أهمية في الرسوبيات الخشنة أو في النطاقات المنكسرة . تتناقص مسامية الرسوبيات ذات التكوين الناعم مع العمق ، وإلى حد ما ، مع العمر . طبقات الطين الناعم المترسبة حديثًا ستكون ذات مساميات تتراوح بين 50-90% . سيعمل الانضغاط على دفع المياه الموجودة في المسامات إلى خارج المواد الناعمة إلى الطبقات النفاذة المتاخمة في الرمل لذلك ستكون المسامية عند أعماق عدة مئات من الأقدام أقل من 50% . عند أعماق عدة آلاف من الأقدام ستكون النفاذية أقل من 30% وفي معظم الحالات أقل من 25% . المياه المنبثقة في المسامات عند انضغاط الطبقات سوف لا تساهم بحجم ملحوظ من المياه إلى الحشارج المجاورة تحت الظروف الطبيعية بسبب بطء معدلات الانضغاط التي تتعرض لها الرسوبيات ناعمة التكوين . يمكن أن

يزيد إنتاج البئر من معدل الانضغاط المحلي بحيث يمكن أن تندفع كميات محسوسة من المياه من الرسوبيات ، خصوصًا إذا كانت هذه الرسوبيات ضعيفة الترسيخ . مياه المسامات التي تكون مالحة أصلاً ستكون مصدراً مهمًا للمكونات الذائبة في النطاقات عندما تتحرك هذه المياه إلى الحشارج . إذا انسحبت هذه المياه إلى الحشارج القريبة من السطح بواسطة الصدوع والفواصل الطبقية فإنه ستتكون مناطق محلية من المياه المالحة ، وعندما يدفع الماء إلى السطح فإنه ربما تنتج ينابيع مالحة .

Table 4.1 Porosity and permeability of Sedimentary Rocks

Description and Age	Porosity per cent	Permeability, millidarcys	Reference
Grand Saline Salt (Salt dome)	less than 1.0	4.1	17
Hutchinson Salt, Permain	less than 1.0	7.3×10^{-3}	17
Bradford Sandstone, Devonian	14.8	2.7	51
Berea Sandstone, Mississippian	19	383	51
Oil Creek Sandstone, domlomitic, silica and carbonate cement, Ordovician	6.7	4	50
Woodbine Sandstone, medium granined, moderately cemented with silica, Cretaceous	25.6	4400	50
Repetto Sandstone, coarse grained, poorly indurated, clay cement, pliocene	19.1	36	50

Description and Age	Porosity per cent	Permeability, millidarcys	Reference
Willcox Sandstone, shaley friable, poorly sorted, only partly cemented, Eocene	15.3	0.3	2
Limestone, Wichita Fromation, compact, crystalline, no visible pores, permain	4.1	less than 0.1	3
Limestone, Wichita Formation, compact, crystalline, some visible pores, permain	10.1	7.7	3
Limestone, chalky, Devonain	29.5	37.8	3
Limestone, oolitic	21.6	339	3
Limestone, Charles Formation, fine grained, originated as carbonate mud with enclosed pellets and fossil fragments, mississippain	8.4	0.1	35
Dolomite, Red River Formation, sucrose, intercrystalline porosity, ordovician	11.9	16.5	35
Dolomite, Turner Valley Formation, sucrose with fossil fragment molds, mississippian	27.8	290	35
Dolomite, Red River Formation, interlocking mosaic of subhedral crystals, ordovician	6.3	1.0	35
Shale, pennsylvania, depth 468 feet. (Permeability			

Table 4.1 Continued

Description and Age	Porosity per cent	Permeability, millidarcys	Reference
measured with 0.02 N NaCl)	...	$9\ 10^{-5}$	18
Shale, Cretaceous (Permeability measured with 0.02 N NaCl)	...	$4\ 10^{-3}$	18
Shale, Gros Ventre Formation, Cambrian	11.1	...	31
Graneros Shale, Cretaceous	24.9	...	31
Chanute Shale, pennsylvanian	15.0	...	31
Nonesuch Shale, siliceous precambrian	1.6	...	31

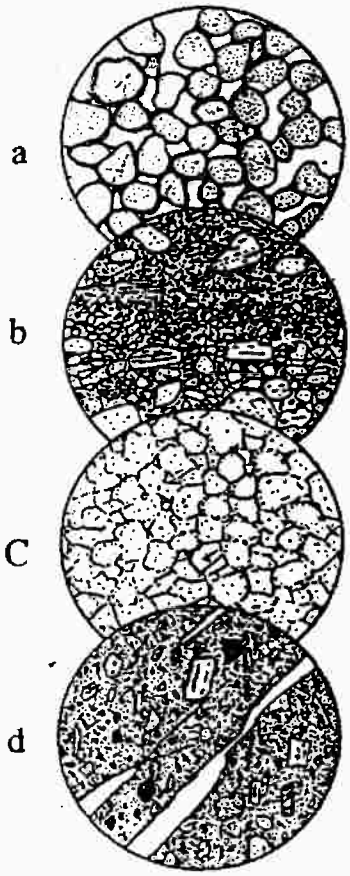
الجدول (4-1) مسامية ونفاذية عدد من الصخور الرسوبية

4 - 3 - 2 : الصخور الرملية Sand stone :

تتراوح مسامية الصخور الرملية من أقل من 5% إلى أقصى قيمة حوالي 30% . يعتمد مقدار فراغ المسامات على درجة انتظام وانسجام الحبيبات ، وشكل الحبيبات ، ودرجة السمنتة Cemention . الشكل (4 - 1) . ومن بين هذه المتغيرات تعتبر درجة السمنتة أكثرها أهمية . وفوائد السمنتة المألوفة هي معادن الطيني ، الكالسايت ، الدولامايت ، والكوارتز . يمكن أن تكون السمنتة الأصلية موضعية بدرجة كبيرة أو أنها قد تعرضت إلى الغسل بدرجات متفاوتة بحيث أن خواص الصخور ككل يمكن أن تكون متغيرة بدرجة كبيرة . الصخور الرملية التي تعرضت للسمنتة بالكالسايت يمكن أن تصبح متصلبة

عند السطح من خلال عودة ترسب الكالسايت حول سطوح حبيباتها . يمكن أن تكون الاستنتاجات المتعلقة بالخصائص الهيدروليكية لهذه الصخور من خلال ملاحظات البروزات الصخرية على السطح ، يمكن أن تكون مضللة . سمنت السليكا في الصخور الرملية سيكوِّن نموات على حبيبات الرمل تميل إلى التعشق مع النموات الموجودة على الحبيبات المجاورة الأخرى . إن المراحل المتقدمة من السمنتة بالسليكا يمكن أن تنتج صخور ذات صلابة عالية جداً ومساميه منخفضة . يمكن أن توجد المعادن الطينية كمكونات أصلية أو كنواتج تحللية . الصخور المسمنتة بالطين غير صلدة عادة كما في الصخور الرملية الأخرى . تميل مسامية الصخور المسمنتة بالطين لتكون عالية بسبب كون الطين ذاته ذو مسامية عالية .

أجريت دراسة على 65 بئر حفرت في منطقة مساحتها 8 أيكر . وأخذت النماذج الصخرية لجميع الآبار حيث تم دراسة 2000 نموذج . رغم أن القياسات المختبرية على النماذج تشير إلى فروقات كبيرة في النفاذية بين آبار تبعد عن بعضها 10 - 35 قدم فقط ، إلا إن النفاذية التي حصل عليها من فحص حشرج تتطابق جيداً مع معدل النفاذية المحسوب من فحوصات المختبر . وقد وجد أن الفروقات الموضعية في النفاذية ضمن الصخور الرملية التي فحصت جاءت بصورة أساسية نتيجة الفروقات في حجم حبيبات الصخور الرملية .



الشكل (4 - 1) مقاطع خفيفة من أنواع مختلفة من الصخور الرملية .

a - الصخور الرملية المسامية ذات السمنتة القليلة بالكالسايت . الانسجام الجيد والاقطار الحبيبية الكبيرة ستجعل من هذه الصخور حشرج جيد .

b - صخور رملية مسامية مع سمنتة قليلة بالطين . الانسجام الردئ يجعل من هذه الصخور حشرج ردئ .

c - أورثوكوارتزايت orthoquartizite ذات مسامية أقل من 1% . هذه الصخور سوف لا تنتج مياه للآبار .

d - مسامية قليلة ناتجة من الانكسارات . هذه الصخور ستعطي كمية معتدلة من المياه خلال الانكسارات .

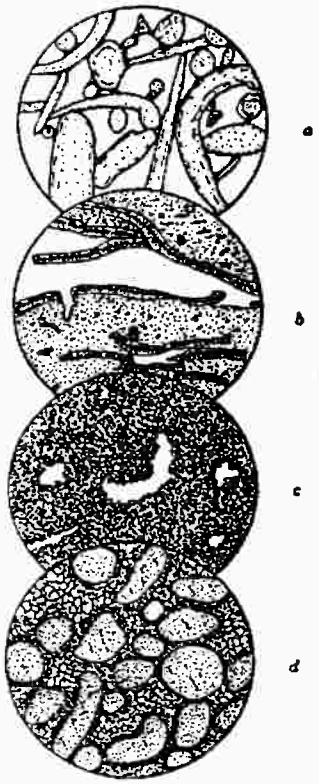
نفاذية الصخور الرملية المتصلبة أقل بكثير من نفاذية الترسبات الرملية غير المتصلبة المماثلة لها في التكوين . مثال ذلك ، الرمل ذو الحبيبات المتوسطة عمومًا ذو نفاذية تتراوح بين 1000 - 30000 ملي دارسي ، لكن نفاذية الصخور الرملية المماثلة ذات الحبيبات المتوسطة تتراوح عمومًا بين 1-500 ملي دارسي ، بعض الانخفاض في نفاذية الصخور الرملية عما هي في الرمل يأتي نتيجة الانتظام المتقارب بين الحبيبات الرملية في حالة الصخور ، إلا أن معظم الانخفاض في النفاذية يعزى إلى انحسار الفراغ المسامي نتيجة السمنت الموجود (الدقائق الناعمة جداً الموجودة بين حبيبات الصخور) . إن العدد الكبير من المتغيرات المؤثرة على النفاذية تجعل من المستحيل التعرف على النفاذية على أساس المسامية وحدها .

• • •

4 - 3 - 3 : الصخور الكاربوناتية Carbonate :

الحجر الجيري والدولومايت هما النوعان الشائعان من الصخور الكاربوناتية، وهما متأصلان من عدد كبير من الترسبات المختلفة ، كأنواع الطين اللاعضوية الجيرية المترسبة ، وشظايا الأصداف ، وترسبات المنحدرات، ورمل الكالسايت ، وتراكمات بقايا الأحياء العضوية المائية وغيرها (الشكل 4-2) . المسامية والنفاذية الأصلية للعديد من هذه الرسوبيات قد تغيرت بسرعة بعد دفنها إلى درجة أن البناءات الرسوبية الأصلية تعرضت هي الأخرى إلى التحول إلى بناءات أخرى غير مماثلة . على العكس من ذلك إذا كانت الصخور صماء نسبيًا ولم تتعرض للتشويه فأن البناءات الرسوبية ربما تقاوم إلى ما لا نهاية . بعض التغيرات المهمة تأتي نتيجة الانضغاط وتحلل الكالسايت والأركونايت ، وعودة ترسب سمنت الكالسايت ، وتكون الدولومايت المعدني .

المسامية الأصلية عالية نسبيًا في معظم صخور الحجر الجيري الحديث . والنفاذية بصورة عامة منخفضة باستثناء الصخور التي لم تمتلئ مساماتها بالسمنت .



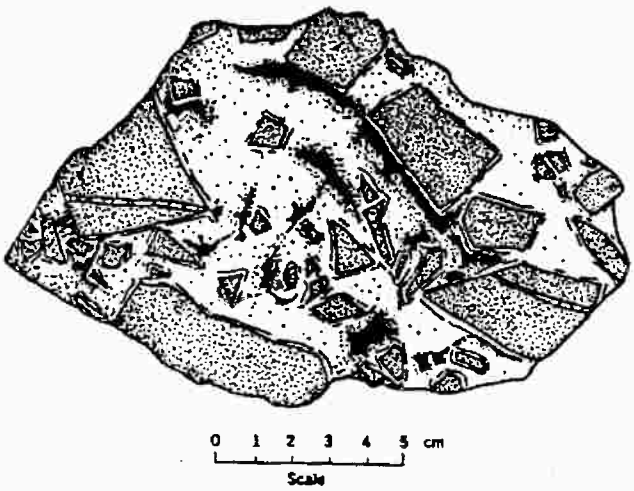
الشكل (4 - 2) مقاطع لأنواع مختلفة من الصخور الكاربوناتية .

a - صخور الكوكوينا coquina مع كميات قليلة من السمنت الكلي . المسامات الكبيرة المتصلة تجعل من هذه الصخور حشرج ممتاز .

b - حجر جيري ذو مسامية عالية تكونت بفعل قشور الاشنات المتراكمة بشكل ورقي إلا أن المسامات غير متصلة بما يكفي لتسمح بهجرة سريعة للمياه .

c - دولومايت ذو مسامية عالية باعتدال تكونت المسامات الكبيرة بفعل تحلل شظايا المتحجرات . نقص المسامات المتصلة جعل من هذه الصخور حشرجًا ضعيف جداً .

d - حجر جيري صلد تكون بفعل سمنتة كاملة تقريبًا والفراغات مملوءة بالكالسايت المتبلور ضمن الرمل الجيري الأصلي هذه الصخور لا تعطي مياهًا للآبار باستثناء مناطق الانكسارات وفتحات التحلل والذوبان .



الشكل (4 - 3) حجر بريشة جيري معرض للسمنتة الجزئية .
الأجزاء السوداء تمثل المسامات الأكبر التي لم تمتلئ كليًا بالسمنت الجيري
« الملون باللون الخفيف »

يمكن أن تتراوح النفاذية من أقل من ملي دارسي واحد للحجر الجيري الصلد الغني بالطين إلى عدة آلاف دارسي لحجر البريشة Breccia الخشن المعرض للسمنتة الجزئية (الشكل 4 - 3) . من المألوف وجود نفاذية بقيم متوسطة تتراوح من 10 - 500 ملي دارسي للحجر الجيري الذي يمتلك بعض المسامية الأصلية . أما الحجر الجيري الصلد المتبلور فإنه ذو نفاذية أقل من ملي دارسي واحد (لاحظ الجدول 4 - 1) .

رغم أن بعض الفراغ المسامي الأصلي يمكن أن يبقى في الحجر الجيري القديم فأن الأشكال الأخرى من المسامية أكثر أهمية بالنسبة لإنتاج المياه . الانكسارات وفتحات الذوبان والتحلل الثانوية على طول الطبقات والنطاقات

ذات المسامية الأولية ربما تنقل معظم المياه . التغير من الكالسايت إلى الدولومايت يولد فراغ مسامي معتبر أيضًا . بلورات الدولومايت صغيرة بحيث أن نفاذيتها أقل من 300 ملي دارسي ما لم تتوسع المسامات بفعل التحلل والذوبان الثانوي . الحجر الجيري ذو المسامات المتولدة من ذوبان الأولايت oolite يمتلك معدل نفاذية مقداره 3.4 ملي دارسي ومسامية 3-11% . الحجر الجيري الذي كان أصلاً كوكوينا Coquina يمتلك معدل نفاذية 5.1 ملي دارسي ومعدل مسامية 6.3% . الدولومايت له معدل نفاذية 3.0 ملي دارسي ومعدل مسامية 13% . أعلى نفاذية سجلت لجميع الصخور كانت 1165 ملي دارسي وأعلى مسامية كانت 32.4% .

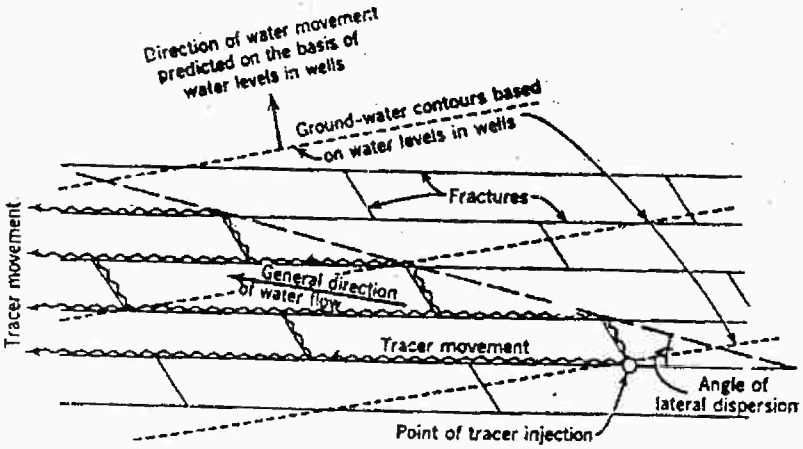
إن النفاذيات المألوفة لمعظم الصخور الكاربوناتية القديمة غير كافية لتسمح حتى بعدة غالونات بالدقيقة من المياه للجريان إلى الآبار الضحلة . ربما يبدو هذا غريبًا للوهلة الأولى نظراً لأن الصخور الكاربوناتية بنفاذية من 20-100 ملي دارسي يمكن أن تنتج كميات كبيرة من النفط إلى الآبار النفطية . يمكن تفسير هذا الاختلاف الواضح عندما نأخذ بنظر الاعتبار فرقين مهمين بين إنتاج النفط والماء . الفرق الأول ، إن آبار النفط أعمق بكثير من آبار المياه وبذلك يمكن الحصول على ضغط هيدروستاتيكي على قرب آبار النفط . الفرق الثاني، تختلف المواد المنتجة في كلتا الحالتين اختلافًا شاسعًا . إذ أن الآبار النفطية التي تنتج من 2-20 غالون / دقيقة من النفط تعتبر آبار منتجة وناجحة جداً في معظم الحقول النفطية . في حين أن الآبار المائية المستخدمة للأغراض الصناعية والبلدية أو للري تصنف على إنها آبار فاشلة ما لم تنتج على الأقل 50 غالون / دقيقة .

الاستنتاج المهم المتعلق بنفاذية الصخور الكاربوناتية القديمة وبعض الصخور

الكاربوناتيـة الحديثـة هو أن البحث يجب أن يتم للنطاقات ذات المسـاميـة الثانوية الناتجة من الانكسارات والذوبان . النطاقات ذات المسامية الأولية رغم كونها نفاذة بما يكفي لتكون مهمة بالنسبة للصناعة النفطية فهي حشارج رديئة بالنسبة للآبار المائية . تعتبر النفاذية الأولية للصخور ككل مهمة بقدر ما توفر من الفراغ المسامي للمياه الأرضية التي تتحرر ببطء نحو النطاقات الأكثر نفاذية . ويجب ملاحظة أن المسامية المقاسة في المختبر ربما لا تمتلك الاتصالات الكافية بين مساحاتها لتجهيز المياه إلى الآبار .

الصخور الكاربوناتية التي تحتوي على قنوات ذوبان واسعة أو انكسارات متكونة أصلاً باتجاه واحد ستكون ذات نفاذيات عشوائية غير متناظرة أو متساوية في كل الاتجاهات . لذلك لا يمكن التنبؤ باتجاه حركة المياه الأرضية ببساطة من خلال رسم الخطوط الكنتورية التي تمثل مناسيب المياه الأرضية في المنطقة . (الشكل 4 - 4) يوضح مثال عن الجريان غير المتناظر (جريان ثنائي الأبعاد) والذي يكون فيه الهبوط في الضغط (head drop) في جميع القنوات (الانكسارات) يتناسب طرديًا مع طول القناة .

جميع الصخور الرسوبية لها كمية معينة من التركيب الطبقي الذي يعطي بعض الجريان غير المتناظر في الاتجاه العمودي بالمقارنة مع ما في الاتجاه الأفقي . ولوحظ من خلال العديد من القياسات المختبرية لنماذج الصخور الرملية بأن متوسط نسبة النفاذية الأفقية إلى النفاذية العمودية كانت 1.5 وحوالي 12% من النماذج أعطى نسبة أكثر من 3.0 . وأقل من 6% أعطى نفاذية عمودية أعلى من النفاذية الأفقية أي أن النسبة أقل من 1 .



الشكل (4 - 4) نموذج لصخور ذات انكسارات بين العلاقة بين الاتجاه الحقيقي لحركة المياه الأرضية والاتجاه المستنتج من رسم الخطوط الكنتورية التي تمثل مناسيب المياه الأرضية .

4 - 4 : إنتاجية الآبار :

معظم الآبار في الصخور الرسوبية المتصلبة باعتدال ذات إنتاجية تتراوح بين 1 - 500 غالون / دقيقة وتنتج الصخور ذات التكوين الناعم عمومًا أقل من 5 غالون / دقيقة ، والصخور الرملية بين 5 - 200 غالون / دقيقة ، والحجر الجيري ذو إنتاجية ربما تتجاوز 200 غالون / دقيقة . لكن الإنتاجيات المألوفة تتراوح بين 5 - 20 غالون / دقيقة .

رغم أن الإنتاجيات المسجلة تعطي بعض التصور عن خصائص الخشارج المتعلقة بحمل المياه الأرضية ، فإن الاختلافات الواسعة في طرق حفر وتنفيذ الآبار وطرق الفحص تجعل من هذه القيم عرضة إلى الاختلافات التي لا يمكن

أن تعزى إلى خصائص الحشارج . السعة النوعية المعبر عنها بالفالون / دقيقة والتي ينتجها البئر لكل قدم من السحب ستعطي معلومات أكثر فائدة . إذا كان سمك الحشرج معلوم ، يمكن تقسيم السعة النوعية على قيمة السمك هذا للحصول على دليل السعة النوعية S.C. index الذي يمكن أن يستعمل للتنبؤ عن إنتاجية البئر في أجزاء من الحشرج لا تملك المعلومات الإنتاجية عنها لكن سمكها يمكن إيجاده .

توزيعات التردد للسعة النوعية للآبار في معظم الصخور الرسوبية المتصلبة باعتدال تشير إلى إنحراف قوي نحو اليمين (أي توزيع موجب) في الشكل 4-5. علاقة الانحراف هذه سائدة أكثر في الحجر الجيري والأورثوكوارتزايت المنكسر.

يمكن زيادة إنتاجية الآبار الأصلية بدفع كميات من الحامض المستعمل لتوسيع الفتحات في الصخور الكاربوناتية أو بتكسير الصخور بواسطة المتفجرات أو بضخ سائل بقوة وضغط عالي إلى البئر أو باستعمال أكثر من طريقة معًا . وقد لوحظ أن نجاح طرق الحث والتحفيز هذه يكون أكثر في الآبار ذات الإنتاجية الابتدائية الواطئة . يمكن تحسين السعة النوعية لهذه الآبار بمقدار 20 - 800 ٪ . ويفشل حوالي 2 - 10٪ من جميع المحاولات بطرق الحث هذه لتحسين إنتاجية الآبار . ومع ذلك وبسبب حقيقة كون كلفة طريقة الحث والتحفيز يمكن تكلف 40% من الكلفة الأصلية للبئر فإن محاولات التحفيز يمكن أن تكون حالات فشل من الناحية الاقتصادية حتى وإن أدت إلى تحسين إنتاجية البئر .

يعزى التحسين الحقيقي لإنتاجية الآبار إلى عدد من التعديلات في الحشرج والبئر . ثم قذف 100 إلى 600 باوند من النايتروكليسرين باتجاه النطاقات الحاملة للمياه في الآبار العميقة المحفورة في الصخور الرملية في ولاية

الينويس الأمريكية . وكانت نسبة التحسن في الإنتاجية يتراوح بين 22 إلى 38 بالمائة . وتعزى الزيادة في إنتاجية هذه الآبار إلى توسيع مقطع البئر وإزاحة المواد الناعمة التكوين التي تغلق السطوح الجانبية للبئر والتي ترسبت أثناء عملية الحفر . كما يمكن أن تكون المتفجرات فعالة في فتح الانكسارات في الصخور المتبلورة والصخور المتصلبة جداً الأخرى . ومن المألوف استعمال المعالجة الحامضية للآبار في الصخور الكاربونانية في ولاية ميسوري وغيرها . ربما يعمل الحامض على تنظيف السطوح الجانبية للبئر . يمكن أيضًا أن يدخل إلى الانكسارات الصغيرة في محيط البئر ويزيد من النفاذية موضعيًا بإذابة بعض المواد . يصل معدل التحسينات بفعل طريقة الحامض في مناطق معينة إلى أكثر من 250 بالمائة .

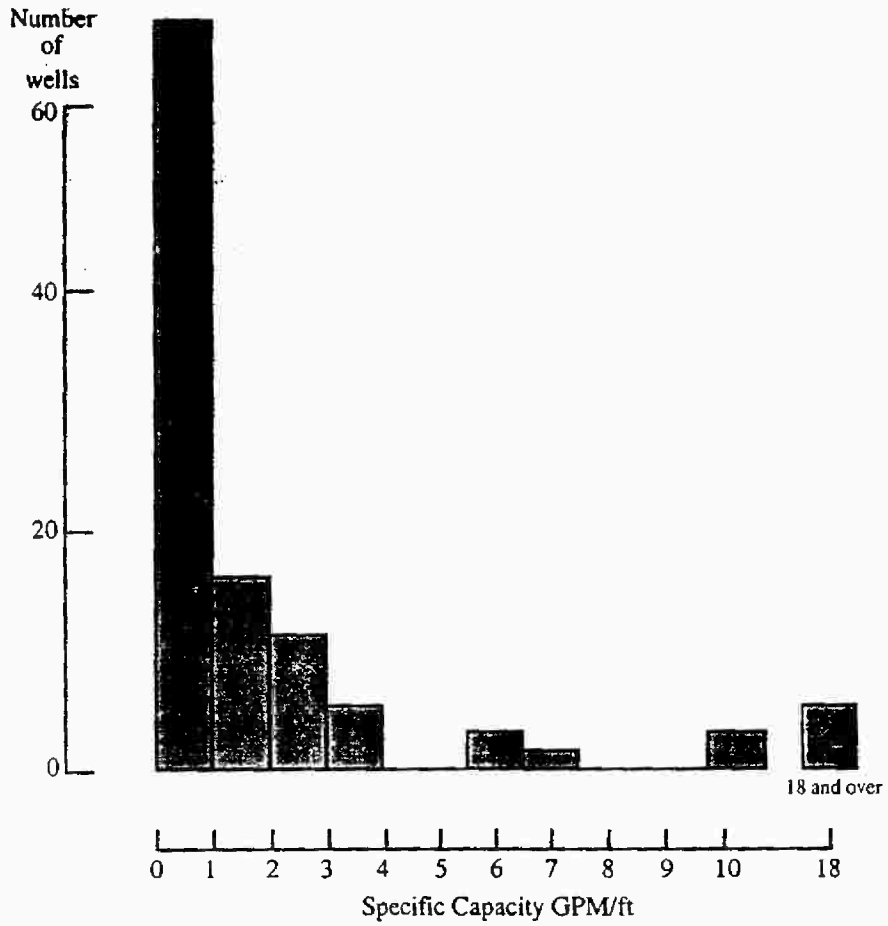
• • •

4 - 5 : التحري عن المياه الأرضيَّة :

تعتبر التحريات ناجحة بصورة خاصة في المناطق ذات الطبقات المنبسطة تقريبًا . من الاعتيادي في مثل هذه الظروف سهولة دراسة البناءات الطبقية المحلية المكشوفة إلى السطح والتنبؤ عن الأعماق إلى الوحدات الطبقية التحتية بدقة تصل إلى أكثر من 10% . وهذه الحقيقة صحيحة خصوصًا في طبقات الحجر الجيري . ترسبات مجاري القنوات السابقة ، الشواطئ ، والحواجز، جميعها يمكن أن تشكل أجسام غير منتظمة من الحجر الرملي يصعب التنبؤ عن مواقعها على أساس التعرض السطحي وحده (لاحظ الشكل 3-6) .

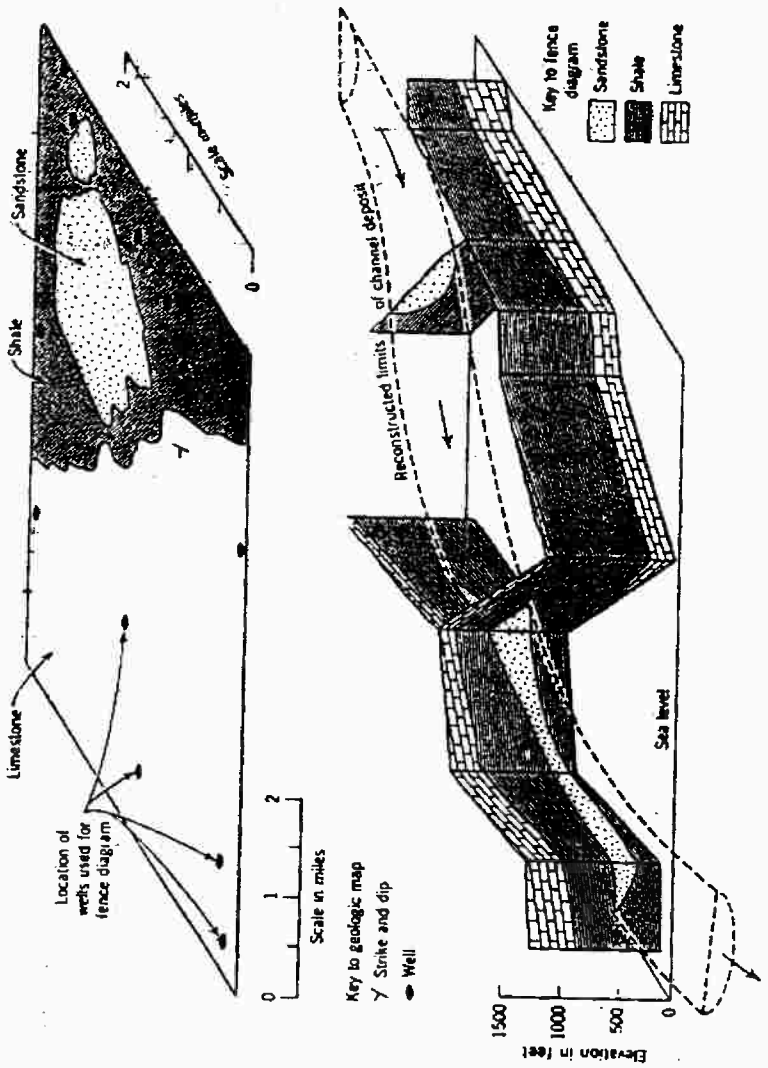
طبقت طرق جيوفيزيائية عديدة خصوصًا الزلزالية منها بشكل واسع في التحري عن النفط . يمكن تقصي أثر الصخور الرسوبية المتصلبة عادة ولمسافات طويلة بواسطة تقنيات الانكسار . ويمكن الحصول على معلومات مفصلة عن

الأعماق إلى مختلف الطبقات . إضافة لذلك ، من الممكن رسم الصدوع والطيات والثنيات ضمن الطبقات الرسوبية . إضافة إلى المجسات الجيوفيزيائية .



الشكل (4 - 5) توزيع التردد للسعة النوعية لـ 105 بئر في صخور ميسوري . معظم الحشارج تتكون من الحجر الجيري .

يتم إجراء بعض الأعمال الجيوفيزيائية الأخرى للمساعدة في تحديد مواقع الآبار في الصخور الرسوبية . ويؤخذ الجانب الاقتصادي بنظر الاعتبار عند إجراء هذه الأعمال عادة . إذا كانت الآبار المراد حفرها عميقة جداً فإن كلفة المسح الجيوفيزيائي الفعال ربما تكون أكبر من كلفة حفر بئر مائي منفرد . أما إذا كان البئر ضحلاً (قليل العمق) فإنه يمكن الاستفادة من المعلومات المأخوذة عن البروزات السطحية للصخور للتحري عن الظروف الجيولوجية . مع ذلك تستعمل في مسوحات المياه الأرضية وبصورة واسعة المعلومات الجيوفيزيائية والمعلومات الطبقية التي جمعت من الصناعة النفطية . حيث يمكن الحصول على نوعية المياه الكيميائية . العمق إلى الحشارج والنفاذيات النسبية لمختلف الوحدات الجيولوجية ولمناطق واسعة شريطة أن تكون الأعمال الجيولوجية والجيوفيزيائية السطحية وتحت السطحية التي تمت في الصناعة النفطية كامنة لهذا الغرض .



الشكل (4 - 6) رسم سياجي مستنتج من خارطة جيولوجية سطحية وسجلات آبار . من المتعذر تحديد الموقع تحت السطحي لمجرى قناة مدفون بالحجر الرملي على أسس الاستكشاف السطحي وحده .

4 - 5 - 2 : التحري عن المياه الأرضية في الصخور الرملية :

الصخور الرملية المسمنتة بأحكام ذات المسامية والنفاذية المنخفضة تعطي المياه إلى الآبار عن طريق الانكسارات . نفس الأسس العامة الدالة عن المياه في الصخور المتبلورة في المناطق البلوتونية تنطبق على هذه الصخور الرملية . معظم المناطق الجيدة لتواجد المياه الأرضية تمتد على طول نطاقات الصدوع وضمن النطاقات المرتبطة كليًا . توجد أفضل الآبار في الوديان الواسعة ومناطق الأراضي العالية المنبسطة على عكس قمم التلال والجبال أو منحدرات الوديان وتتناقص نفاذية الصخور بصورة عامة مع العمق .

يجب توخي الحذر بعدم الخلط بين الصخور الرملية المتصلبة سطحيًا - Case hardened مع الصخور الرملية المسمنتة خلال شملها الكلي . عادة ما تفضي الصخور المتصلبة سطحيًا إلى رمال غير متصلبة أو صخور رملية ضعيفة القوة عند أعماق أقل من 20 قدم . لذلك ، فالصخور الرملية التي تبدو صلبة وغير نفاذة عند السطح يمكن أن تكون حشارج جيدة مع العمق .

• • •

4 - 5 - 2 : التحري عن المياه الأرضية في الصخور الكاربوناتية :

رغم أن مواقع الطبقات الجيرية الانفرادية يمكن تحديدها بالدراسات البنائية والطبقية ، فإن إنتاجية الطبقات يصعب التنبؤ عنها بصورة خاصة . المفاصل الصغيرة ، الاختلافات في التركيب ، الصدوع ، الطبقات الصغيرة من الصلصال أو الشرت ، والنفاذية الابتدائية ، جميعها يمكن أن تتحكم في مواضع فتحات الذوبان والتحلل في صخور الحجر الجيري الكثيفة والدولومايت. في بعض الأماكن يتم العلم بتكوينات معينة على أنها حشارج جيدة من خلال أدلة بسيطة . فقط في أماكن قليلة يمكن للتحري السطحي العرضي (غير المركز) أن يبين صلاحية أو عدم صلاحية طبقة جيرية لتكون

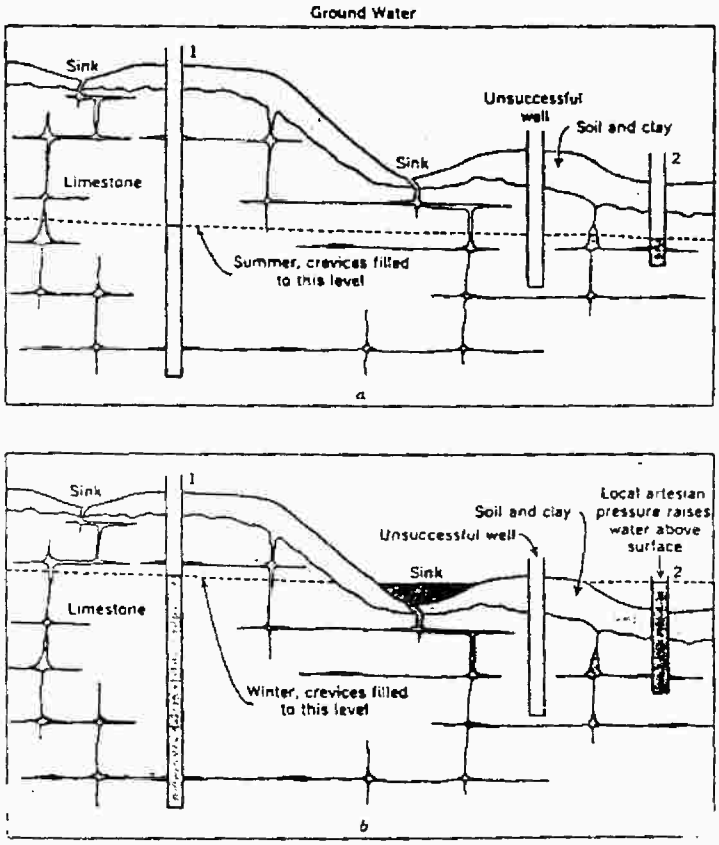
حشرجًا حاملاً للمياه . العلامة أو الدليل الذي يؤخذ من البروزات الصخرية الظاهرة هو وجود فتحات ذوبان ، أو مفاصل متقاربة ، أو وجود صدع في النطاق موضوع البحث . الدليل الذي يبين إن وحدة الحجر الجيري أو الدولومايت قد لا تكون حشرجًا جيداً عند العمق هو وجود عدد كبير من أجزاء صلصالية إضافة إلى عدم وجود فتحات الذوبان .

الملاحظات في مقالع الحجر والحفريات الأخرى قرب الصخور الكاربوناتية الأفقية تبين بأن فتحات الذوبان على امتداد المفاصل العمودية متباعدة فيما بينها وأن الفتحات على امتداد سطوح الطبقات هي أكثر أهمية بالنسبة لإنتاج المياه . إضافة لذلك المفاصل العمودية التي توسعت بفعل الذوبان قرب السطح غالبًا ما تمتلئ بالطين القادم من التربة الواقعة فوقها . من ناحية أخرى ، غالبًا ما تبقى الفتحات الأفقية مفتوحة . نظراً للفرصة الضئيلة جداً في تقاطع البئر مع الشقوق العمودية فإن معظم الآبار تحصل على مياهها من فتحات الذوبان الأفقية على امتداد سطوح الطبقات . (الشكل 4 - 7 والشكل 4 - 8) . مع ذلك ، تميل الفتحات الأفقية لتكون أفضل نمواً قرب الصدوع لذلك يجب أن تستعمل تحريات الصدوع العمودية عند السطح لتحديد المواقع الأكثر ملائمة لآبار المياه .

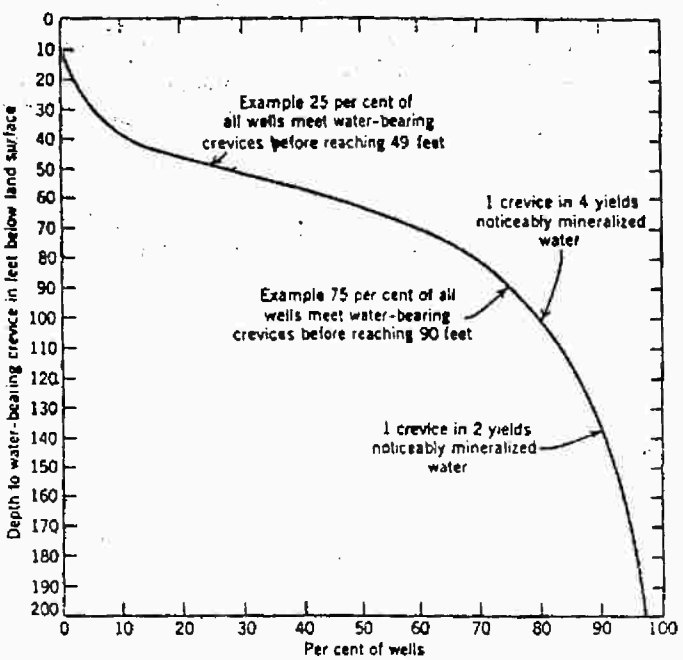
في المناطق ذات الحجر الجيري السميك أو الدولومايت ، تعتبر الآبار الواقعة في بطن الوادي أفضل نوعًا ما من تلك التي تقع في جوانب الوادي . مخزون المياه في الرسوبيات المتاخمة مع منسوب المياه القريب من السطح تعتبر جزء من الميزة المفضلة لآبار بطن الوادي . الآبار المحفورة في الأراضي المرتفعة الواسعة هي الأخرى أفضل وأكثر نجاحًا من تلك التي تحفر في منحدرات الوديان . الشقوق وفتحات الذوبان توجد بكثرة على امتداد قمم الثنيات المحدبة للصخور وضمن الأغوار أكثر من تواجدها على جوانب الثنيات . (الشكل 4 - 9) .

تعيين موقع الآبار في المناطق ذات الطبقات الطباشيرية السميكة أصعب كثيراً مما في الحجر الجيري الصلد أو الدولومايت . يمكن أن تظهر الوديان تعرية وتآكل على طول المناطق المتكسرة كثيراً. لذلك فأن قابليات النقل العالية يمكن أن تعزى إلى الانكسارات وليس إلى الموقع الطوبوغرافي .

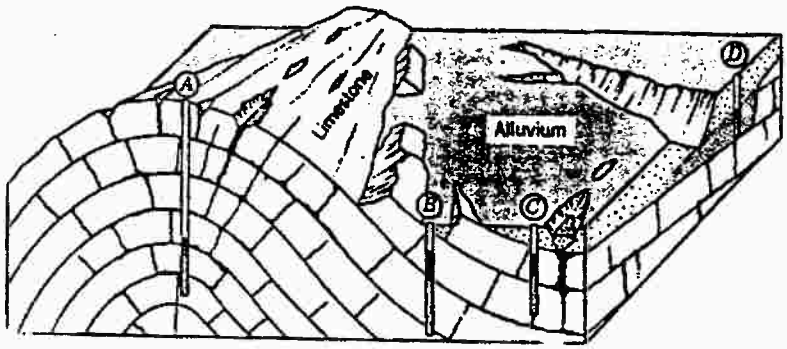
يحتفظ الحجر الجيري الحديث عمومًا ببعض المسامية الأصلية ، وإذا كان الحجر الجيري مكون من مواد حتاتية خشنة فإنه لا يصعب تحديد النطاقات النفاذة.



الشكل 4 - 7) المرتسمات تبين كيفية وجود المياه في الشقوق تحت مستوى الماء الأرضي والظروف الارتوازية .



الشكل (4 - 7) العلاقة بين العمق والنسبة المئوية للآبار التي تقطع الصدوع أو الشقوق الحاملة للمياه .



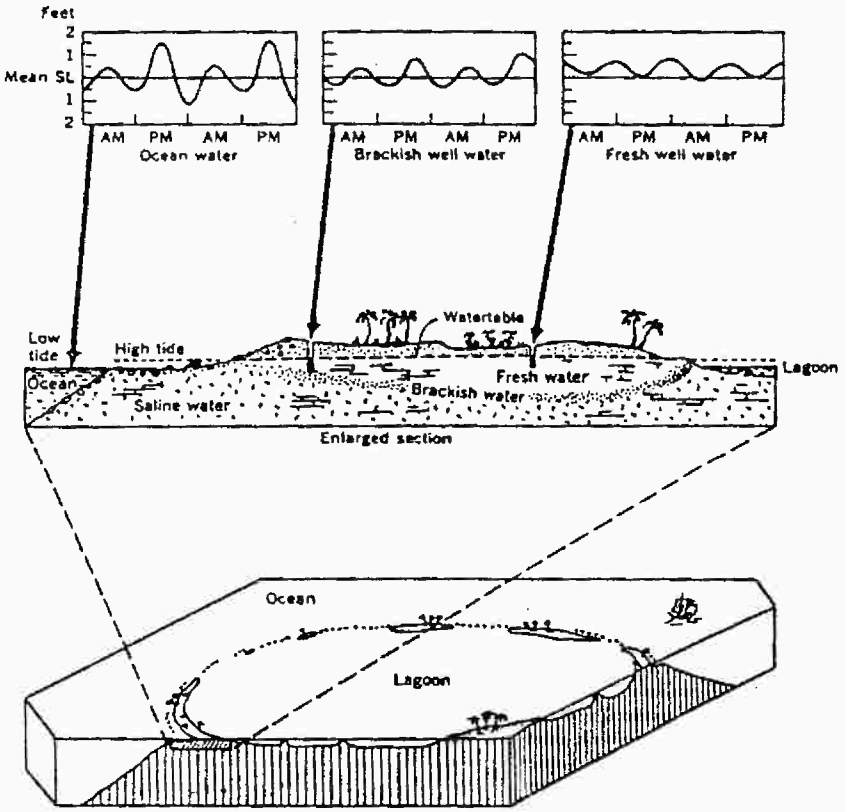
الشكل (4 - 9) آبار مائية في منطقة صخور كاربوناتية منثنية نحو الأعلى (محدبة) . الأجزاء السوداء تبين النطاقات ذات فتحات ذوبان . البئر A ناجح إلا أن عمق رفع المياه بالضخ كبير . البئر B ذو إنتاج منخفض ، البئر C ناجح ذو رفع ضخ قليل . البئر D محفور في المنطقة الرسوبية Alluvium .

معظم الجزر المرجانية التي فوق مستوى سطح البحر تتركب من مواد متشظية منتصبة على قمة رصيف صخري بحري متصلب وصلد ، المادة المتشظية تتغير من شظايا (كسارة حجر) خشنة جداً على الجانب البحري من الجزر إلى رمل كلسي ناعم في الجوانب الأخرى (الشكل 4 - 10) الكسارة الخشنة مسمنتة عادة إلا أنها تحتفظ بنفاذية عالية .

المياه الأرضية في الجزر متأصلة من مياه البحر التي تتحرك من وإلى داخل الصخور في الجزيرة تبعًا لتغيرات منسوب مياه البحر بسبب المد والجزر وكذلك من مياه الأمطار المتسربة إلى الأسفل مباشرة . المياه الصالحة للشرب غير موجودة في الجزر الصغيرة خصوصًا في المناطق ذات الأمطار القليلة . أما في الجزر الكبيرة فإن مياه الأمطار تسرب إلى الأسفل وتطفو على مياه البحر التي تشبع الصخور التحتية . بسبب التغير في النفاذية عبر الجزر فأن عدسة المياه العذبة (تتجمع المياه العذبة فوق المياه المالحة على شكل عدسة كبيرة) ستكون

غير متماثلة الجوانب ، حيث ستكون أكثر سمكًا قرب جوانب الجزيرة غير المواجهة للبحر حيث النفاذية أقل ولا تجري المياه نحو الخارج بالسرعة التي تجري بها من جانب البحر ذو الكسارة الخشنة (الشكل 4 - 10) .

تجمع مياه الشرب في معظم الجزر من الجريان السطحي للسقوف وتخزن في خزانات خاصة لهذا الغرض . في الجزر الكبيرة تستعمل المياه الأرضية للغسل وللشرب بكمية محدودة . السمك القليل لعدسة المياه العذبة يحول دون ضخ واسع النطاق دون صعود المياه المالحة وامتزاجها كليًا مع المياه العذبة .



الشكل (4 - 10) عدسة مياه عذبة أرضية وتذبذبات منسوب ماء البحر في جزيرة مرجانية .

4 - 6 : كهوف الصخور الجيرية Lime stone caverns :

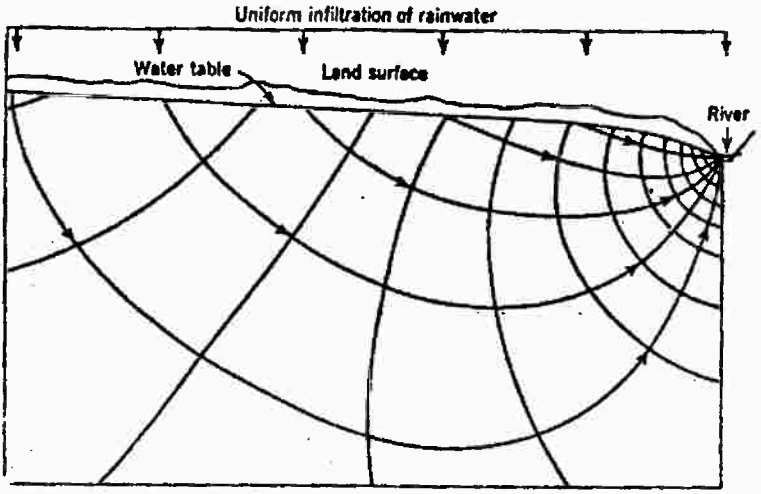
الناحية الممتعة في الهيدرولوچي ذات العلاقة الوثيقة بوجود المياه في الطبقات الجيرية هي دراسة كهوف الصخور الجيرية . قبل عام 1930 يفترض معظم الجيولوچيين بأن هذه الكهوف متأصلة فوق منسوب المياه نتيجة تأثيرات مشتركة لمحلول المياه والتعرية التي تسببها مياه الكهوف الجارية . الباحث (W.M. Davis) أعلن أن هذه المعالم الجيولوجية كالكهوف الأنبوبية الشكل ، والفروع العمياء (المنقطعة) المتصلة بالكهوف ، وغيرها يمكن تفسيرها جيداً وذلك بافتراض أن الكهوف قد حفرت تدريجيًا تحت منسوب المياه الأرضية وليس فوقه كما كان يعتقد . أما أجزاء الكهوف فوق أو عند منسوب المياه الأرضية فقد ظهرت من قبل المجاري السطحية المتصلة بالمجاري الكهفية من خلال أنظمة جريان مستمرة ، ومن قبل اضطراب وإثارة مجاري الكهوف، ومن قبل التواءات وتعرجات المجرى المنخندقة فوق أسطح بعض الكهوف . معظم الكهوف فوق مستوى المياه الأرضية تظهر بعض الدلائل عن الامتلاء الجزئي بتراكمات أجزاء الصخور المتساقطة ، والشظايا المتساقطة من تهدم السقف تملأ أجزاء من الكهوف ، وكذلك الطين الساقط على امتداد السقوف .

وأصبحت الآن حقيقة معروفة من أن تكوين الكهوف يحدث تحت منسوب المياه الأرضية وعند منسوب المياه الأرضية وفوق منسوب المياه الأرضية .

الباحث (Davis) ناقش مسألة تكون الكهوف الجيرية عند عمق تحت منسوب المياه الأرضية ، على أساس حقيقة أن السطوح المتساوية الجهد (equal potential sarface) في الوسط المتجانس المتناظر قرب بالوعة خطية (مجرى) تولد جريان عميق لبعض المياه كما مبين في الشكل (4-11) . أن إمكانية الذوبان العميق للحجر الجيري تتعزز بدراسات جيوكيميائية حديثة أكدت وجود الماء تحت المشبع بالنسبة إلى $caco_3$ عند أعماق 800 قدم أو أكثر تحت

السطح. إن معاينة خطوط الجريان Flow net في الشكل (4-11) تبين الازدحام الملحوظ لخطوط الجريان قرب مجرى النهر وبعض الازدحام (تقارب خطوط الجريان) تحت منسوب المياه ، وهذا يؤكد بدوره وجود نطاقات ذات سرعة جريان أكثر من غيرها . ونظراً لأن معدل الذوبان يتناسب طرديًا مع كمية المياه التي تلامس الصخور في وحدة الزمن ، فإن المناطق ذات السرعة العالية لجريان المياه ستكون النطاقات ذات الذوبان الأعلى . وبذلك سيتغير التجانس وتتحول كمية أكبر من المياه قرب المجرى وسطح المياه . إذا كان النظام الطبقي للصخور الجيرية أفقيًا تقريبًا . فإنه سيضيف عدم تناظر آخر مما يعزز آثار الذوبان قرب منسوب المياه . وبناء على ما تقدم ، في الصخور المتجانسة تقريبًا سيكون العدد الأكبر من الكهوف المتكونة حديثًا قرب منسوب المياه وقرب نقاط التصريف الطبيعي للمياه الأرضية .

تبين سجلات حفر الآبار عمومًا بأن فرص ملاقات كهوف كبيرة مملوءة بالمياه قليلة حتى في المناطق التي لوحظت كهوفها . حتى لو تم تعيين الاتجاه العام للكهوف فإن خرائط الكهوف الموجودة فوق منسوب المياه تشير بأن عدد قليل من الآبار فقط يمكن أن تلاقي الكهوف بسبب الاتجاد العام غير المنتظم للكهوف. مع ذلك من المؤكد وجود الكهوف الكبيرة تحت منسوب المياه كما برهنت على ذلك آبار الفحص ، ودراسات أسس السدود الإنشائية ، وملاحظات الينابيع الكبيرة . بعض الينابيع ذات تصريف أكثر من متر مكعب واحد / ثانية . مثل هذه التصاريف لا يمكن أن تجري تحت الأرض إلا من خلال فتحات كبيرة جداً . ويلاحظ أكبر ينبوع يتدفق من الصخور الجيرية قرب مدينة رأس العين في سوريا والتي تقع على أحد روافد نهر الفرات قرب الحدود التركية . يتراوح تصريف هذا الينبوع بين 35 - 40 متر مكعب في الثانية وبمعدل 38.7 متر مكعب في الثانية ، وينابيع أخرى في نفس المنطقة الجيولوجية ذات تصاريف أكثر من متر مكعب واحد في الثانية .



الشكل (4 - 11) خطوط جريان المياه الأرضية في وسط متجانس متناظر ذو تغذية سطحية .

4 - 7 : إدارة المياه الأرضية Ground water maua jemont :

الإنتاجيات المائية النوعية للصخور الجيرية المنخفضة تأتي في معظمها نتيجة الاستهلاك المفرط لهذه المياه في الأوقات التي تكون فيها التغذية الخارجية لهذه المياه قليلة نسبيًا . وإذا كانت الكهوف متصلة مع بعضها على امتداد المناطق المجاورة فأن تأثير الإنتاج المفرط للمياه سيعم بسرعة ليشمل تلك المناطق المجاورة . إن الاستهلاك المفرط للمياه الأرضية في المناطق الجيرية لا يعمل على حفظ مستويات تلك المياه . فحسب بل يعمل على الحد من تكون ونمو كهوف جديدة .

إضافة إلى ذلك تتسبب الفعاليات المختلفة للإنسان في عمليات تلوث واسعة مختلفة الأنواع للمياه الأرضية هذه تسهل فتحات الذوبان الكبيرة عملية دخول الملوثات العضوية واللاعضوية . في كثير من الأحيان تستعمل

الحفر ومقالع الحجر المتروكة ، والآبار الضحلة للتخلص من النفايات ومياه الأمطار والمواد الأخرى غير المرغوبة ، ومن الاعتيادي أن تتقاطع الآبار أو الشقوق والفتحات مع الطبقات الصخرية الحاملة للمياه مما يوفر فرصًا كافية لتغذية المياه الأرضية بالملوثات بصورة مباشرة . كما أن السحب المفرط للمياه من الطبقات الحاملة لها القريبة من شواطئ البحار سيحفز مياه البحار المالحة على التوغل في هذه الطبقات وتلويث المياه العذبة بالأملاح .

• • •

4 - 8 : نوعية المياه :

يمكن أن تختلف النوعية الكيميائية للمياه الأرضية المستخرجة من الصخور الرسوبية من مياه مشبعة بالأملاح في الصخور البحرية المدفونة إلى مياه جاوية على أقل من 100 جزء بالمليون من المواد الصلبة الذائبة في الصخور الرملية قرب السطح . عند الأخذ بنظر الاعتبار المياه الأرضية في كل الصخور الرسوبية فإن المياه المالحة تعتبر أكثر وزن من المياه العذبة في هذه الصخور . ولحسن الحظ تجثم المياه العذبة دائمًا فوق المياه المالحة وقرب سطح الأرض في حين تتمركز المياه الغير صالحة للشرب في الأعماق البعيدة .

إن مشكلة أصل الأملاح في العديد من الصخور الرسوبية القديمة تبقى واحدة من المشاكل الملحة والمحيرة في جيوكيميائية المياه الأرضية . من الاعتيادي في رسوبيات العصر الحجري الثالث لا تتعدى ملوحة المياه الطبيعية الأصلية ملوحة مياه البحر ما لم يوجد اتصال مع ترسبات ملحية حديثة أو ناتجة من التراكمات الملحية نتيجة عملية التبخر المستمرة . من ناحية أخرى، المياه الطبيعية الأصلية في الصخور الرسوبية في العصر القديم تحتوي عادة كمية كلية من المواد الصلبة الذائبة تتراوح من 100000 - 350000 جزء

بالمليون . معظم هذه المواد الذائبة الموجودة في الطبقات الرسوبية لا تظهر أي دليل حول اتصالها بترسبات تبخرية .

إن الترحيل المميز للأيونات الضعيفة الارتباط خلال المراحل المتقدمة من انضغاط الصلصال هو أحد المصادر الممكنة للملوحة العالية في المياه الأرضية . تفسير آخر مماثل أكثر شيوعًا يتمثل في المرور التفضيلي للمياه الأرضية في طبقات الصلصال الذي يسمح للمواد الصلبة الذائبة بالتراكم والنمو في الطبقات الدنيا كلما ملأت المياه النطاقات المدفونة عميقًا من خلال تسرب المياه في البروزات الصخرية الظاهرة على السطح أو من خلال تدفق المياه الأصلية من طبقات الصلصال الواقعة تحتها .

بغض النظر عن الميكانيكية الحقيقية المسؤولة عن التركيز الأصلي للمواد الذائبة ، فإن الهجرة المتتابعة للمياه المالحة خلال تعرض الطبقات الحاملة لها للتعرية تعتبر ذات اهتمام خاص من قبل الهيدروجيولوجيين . ينابيع المياه المالحة المتدفقة في مناطق الصخور الرسوبية البحرية الأصل تشهد على صحة التدفق البطيء للمياه الأصلية الطبيعية .

ربما تحدث إزالة المياه المالحة في مراحل في العديد من الحشارج التي تتقاطع جانبيًا مع التكسرات والمفاصل . كما يزاح بعض المياه المالحة في كل مرحلة تعرية .

عادة تكون الفروقات في نوعية المياه الكيميائية واضحة بين المجاميع الثلاث الشائعة من الصخور الرسوبية ، الرملية ، والصلصالية والكاربوناتية . يحتوي الصلصال عادة على أعلى كميات من الحديد ، الفلور ، وقيمة منخفضة لـ PH ، عادة بين 5.5 إلى 7.0 ، الحجر الجيري يحتوي نسبة أقل من Sio_2 ، ونسبة أكبر من الكالسيوم والمغنيسيوم ، وقيم PH عمومًا فوق 7.0 .

نوعية مياه الصخور الرملية متغيرة بعض الشيء معتمدة على نوع الصخور المتاخمة لها ، والتركيب المعدني للرمال ، وعمق الطبقات . العديد من الآبار التي تستخرج المياه الصالحة للشرب من حشارج الصخور الرملية العميقة على امتداد السهل الساحلي للمحيط الأطلسي في الولايات المتحدة وخليج المكسيك تعتبر ذات مياه عذبة ذات محتويات من الكالسيوم والمغنيسيوم أقل من 20 جزء بالمليون . إلا أن محتويات هذه المياه عن الصوديوم والبايكربونات هي عالية نسبيًا .