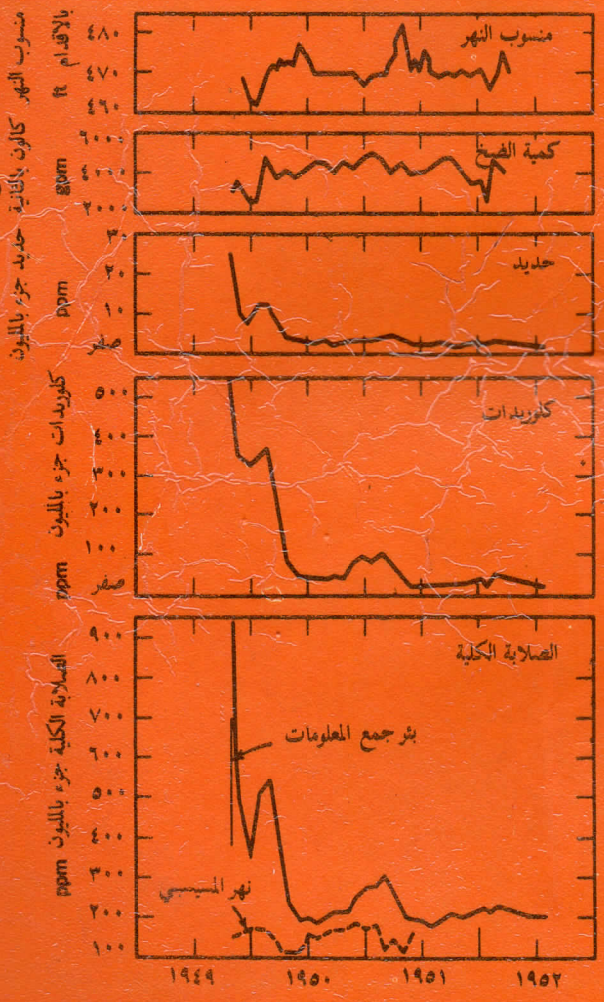
الجمهورية العراقية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الموصل

هيدرولوجية المياه الجوفية

الدكتور ديفيد كيف تودد



ترجمة
الدكتور رياض حامد الدباغ
الدكتور حميد رشيد رفيق

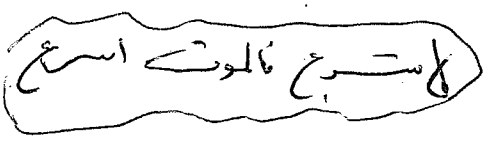
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الموصل

هيدرولوجيّة المياه الجوفية

تأليف
الدكتور ديفيد كيث تووود
استاذ مساعد ـ قسم الهندسة المدنية
جامعة كاليفورينا ـ بيركلي

ترجمة
الدكتور رياض حامد الدباغ
قسم الجيولوجي ـ جامعة الموصل

الدكتور حميد رشيد رفيق
قسم الري والمكائن ـ جامعة الموصل



هيدرولوجية المياه الجوفية

المحتويات

مقدمة المؤلف ٧

الفصل الأول ١٣

المياه الجوفية ودورة المياه في الطبيعة ٢٠

المؤلفات ومصادر المعلومات ٢٢

الفصل الثاني ٢٥

وجود المياه الجوفية ٢٨

التوزيع العمودي للمياه الجوفية ٢٩

منطقة ماء التربة ٣٢

المنطقة الوسطى ٣٣

المنطقة الشعرية ٣٥

المنطقة المشبعة ٣٨

التكوينات الجيولوجية كتكوينات مائية ٤١

أنواع التكوينات المائية ٤٥

أحواض المياه الجوفية ٤٩

المياه الجوفية في مناطق الجمد السرمدي ٥١

المياه الجوفية في الولايات ٦١

الفصل الثالث ٦٤

حركة المياه الجوفية ٦٧

مجال – صحة – أوسريان مفعول قانون دراسي ٧١

معامل النفاذية ٧٣

معدل جريان المياه الجوفية ٧٦

قياس النفاذية في المختبر ٧٨

قياس النفاذية في الحقل ٧٩

العناصر الكاشفة المرشدة ٨٢

الألوان العضوية ٨٣

الجريان غير الثابت ٨٦

التطبيقات على التكوينات المائية ... ...

علاقة الجريان بمنحنيات المياه الجوفية ... ...

الجريان عبر مستوى سطح الطبقة المائية الحرة ٨٨

الجريان عبر حد ذا نفاذية ٩٠

الجريان غير المشبع ٩٢

الفصل الرابع ... ...

الجريان الآحادي لأتجاه الثابت ٩٥

التكوين المائي المحصور ٩٩

البئر في جريان منتظم ١٠٣

التدفق الثابت مع التطعيم المنتظم ١٠٥

الدفق الشعاعي غير الثابت الى البئر ١٠٧

معادلة عدم التوازن للضخ التجريبي ١٠٨

الحل بطريقة ثايس ١٠٩

الحل بطريقة جاكوب ١١٣

تدفق البئر قرب حدود التكوينات المائية ١١٨

أنظمة الآبار المتعددة ١٢٣

خاصية خسائر البئر ١٢٩

الفصل الخامس ... ...

آبار المياه ١٣٣

الآبار المدفوعة أو المدقوقة ١٣٧

الآبار المثقوبة بالحفر (النفاثة) ١٤٠

طرق حفر الآبار العميقة ١٤٢

طريقة الدوار المعكوس ١٥١

تطوير البئر ١٥٤

فحص الآبار للعطاء ١٥٩

الحماية الصحية للآبار ١٦٠

دهاليز الترشيح ١٦٥

الفصل السادس ... ...

مناسيب المياه الجوفية وتذبذباتها ١٦٩

جريان الجداول ومناسيب المياه الجوفية ١٧٢

الضغط الجوي ١٧٩

الريح ١٨٣

هطول الأمطار ١٨٤
مـد وجزر المحيط ١٨٤
الأحمال الخارجية ١٩٠
الهزات الأرضية ١٩٢
الفصل السابع ... ...
نوعية المياه الجوفية ١٩٥
عينات المياه الجوفية ١٩٧
التحلل الكيميائي ١٩٨
المواد الصلبة المذابة بواسطة التوصيـ الكهربائي ٢٠٠
التحليل الفيزيائي ٢٠٢
تدهور نوعية المياه الجوفية ٢١٤
الفصل الثامـن ... ...
الأحواض الواسعة وتطور المياه الجوفية ٢١٧
العوامل المتحكمة في صبيب ٢١٨
الحقوق المائية ٢٢٠
الأستعمال الأستهلاكي ٢٢٢
التدفق الداخلي تحت السطحي والتدفق الخارجي ٢٢٤
الطريقة المبنية على التذبذب الصفري لمستوى المياه الجوفية ٢٢٧
الطريقة المبنية على قانون دراسي ٢٣١
الاستعمال المتحد لمستودعات المياه الجوفية والسطحية ٢٣٤
الفصل التاسع
التحريات السطحية على المياه الجوفية ٢٣٩
طريقة المقاومية كهربائية ٢٤٠
طريقة الانكسار الزلزالي ٢٤٥
الطرق الجذبية والمغناطيسية ٢٤٩
تفسير الصور الجوية ٢٥٠
الفصل العاشر
التحريات السطحية تحت المياه الجوفية ٢٥٣
سجل اداء المقاومية ٢٥٥
سجل اداء الجهد ٢٦٣

سجلات اداء درجات الحرارة ٢٦٤
سجل اداء المسماك ٢٦٦
الفصل الحادي عشر
التطعيم الاصطناعي للمياه الجوفية ٢٦٩
انتشار المياه ٢٧٠
طريقة الندق او الاخدود ٢٧١
طريقة القنوات الطبيعية ٢٧٣
طريقة الري ١٧٤
التطعيم من خلال الحفر والممرات ٢٧٧
مشروع تطعيم ساحل منهاتن ٢٨١
تطبيقات التطعيم في اوربا ٢٨٧
الفصل الثاني عشر
اقتحام مياه البحر في التكوينات المائية الساحلية ٢٩١
شكل الحطح البيني للمياه المالحة العذبة ٢٩٤
تعديلات الضخ ٢٩٧
الحاجز تحت السطح ٣٠١
تشخيص مياه البحر في المياه الجوفية ٣٠٧
الفصل الثالث عشر ... ...
المظاهر الشرعية للمياه الجوفية ٣٠٩
مبدأ ملكية الارض ٣١٠
قانون المياه الجوفية في الولايات المتحدة ٣١٣
التنظيمات الشائعة المطبقة على المياه الجوفية ٣١٧
الفصل الرابع عشر
دراسات النماذج والتحليل العددي للمياه الجوفية ٣١٩
النماذج الكهربائية ٣٢١
الموصلات الاجلاتينية (الهلامية) ٣٢٥
النماذج الغشائية ٣٢٨
طرق التحليل العددي ٣٣٠
العوامل المتحولة والثابتة ٣٣٥
المراجع الاجنبية للكتاب ٣٦١

يعتبر الماء من السلع
جوف الأرض . وإذ
جوفية . وكأمر لابد منه
جهود المتزايدة لحل مث

ان طرق التنقيب ء
طورة ايضا لاستخراج ا
حوث متعددة الانواع
درولوجية المياه الجوف
السنوات الاخيرة نتيج
راض ان مثل هذه المع

لقد كانت غايتي من
ريقة سهلة الفهم لهؤلا
يدرولوجية المياه الجوفية
للبة والرجال المتخصص
ين يشملون المتخصصين
ربة والمصادر المائية والج
هيزات المياه البلدية والص
و المصلحة غير المباشرة ه
غابات والصحة العامة ،
ث يلبي المتطلبات المتباء
ساس والطرق والمشاكل
ولذا فان هذا الكتاب
مل هذا الكتاب فقط ء
يولوجية . وباعتقادي
ع والهايدرولوجي

مقدمة المؤلف

يعتبر الماء من السلع الهامة للجنس البشري، والمصدر الاكبر لتواجد المياه العذبة يقع جوف الأرض . وادت زيادة الطلبات على المياه الى انعاش تطور استخدامات المياه جوفية . وكأمر لابد منه ، فان اي تقدم يعمل على تكبير واضافة مشاكل جديدة،وتبدأ جهود المتزايدة لحل مثل هذه المشاكل . وتعتبر هذه حقيقة خاصة بالنسبة للمياه الجوفية

ان طرق التنقيب عن وجود وحركة المياه الجوفية قد تطورت كثيرا ووضعت طرق طورة ايضا لاستخراج المياه الجوفية . كذلك مبادىء المحافظة على المياه قد ثبتت وانجزت حوث متعددة الانواع ساهمت لتفهم افضل للموضوع . وكنتيجة لذلك فان معرفة درولوجية المياه الجوفية والتي حجبت بنوع من الغموض في الماضي قد توسعت بسرعة السنوات الاخيرة نتيجة للزيادات الكبيرة في استعمالات المياه الجوفية . ومن المعقول راض ان مثل هذه المعرفة ستنمو بمعدلات قدتكون أعلى في المستقبل . .

لقد كانت غايتي من كتابة هذا الكتاب هي وضع الاسس لهيدرولوجية المياه الجوفية ريقة سهلة الفهم لهؤلاء المعنيين بهذه المعرفة . عدد قليل من الرجال متخصصون يدرولوجية المياه الجوفية ، وحيث ان المياه الجوفية مصدر طبيعي رئيس ، فمن المهم للبة والرجال المتخصصين في حقول مختلفة . وعلى رأس هؤلاء المهندسون المدنيون ين يشملون المتخصصين بعلوم الهايدروليك والهايدرولوجي ، والهندسة الصحية وميكانيك ية والمصادر المائية والجيولوجيين ، والزراعيين ومهندسي الري والاشخاص المسؤولين عن هيزات المياه البلدية والصناعية غالبا ما يكون لديهم رغبة حية بالمياه الجوفية . والرجال والمصلحة غير المباشرة هم الموجودون والعاملون في حقول المناجم . وللهندسة الجيولوجية ابات والصحة العامة ، والقانون اضافة الى الاخرين . ومع ان من الصعب وضع موضوع ث يلبي المتطلبات المتباعدة الرغبات ، ولكن الاحتياج الشائع للجميع هو معرفة المبادىء ساس والطرق والمشاكل المواجهة لهذا الموضوع اجمالاً .

ولذا فان هذا الكتاب هو محاولة لعمل نابع وعطاء متحد لهيدرولوجية المياه الجوفية . مل هذا الكتاب فقط على خلفية رياضية من خلال الحسابات وكذلك مبادىء المعرفة يولوجية . وباعتقادي ان تعليمات سابقة في موضوع ميكانيك ع والهايدرولوجي تعتبر مرغوباً فيها ولكنها ليست ضرورية

وبالتشديد فقط على اعتبارات مبادىء المياه الجوفية ، فانني حاولت حصر الكتاب في الحجم العملي وبدون اضعاف مداه . واستخدمت تسميات متناسقة للتدليل بشكل واضح . اضافة الى ذلك فان الاصطلاحات المكافئة الشائعة ذكرت لغرض تجنب الالتباس ، وأمثلة موضحة من المعلومات الحقلية قد تم اختصارها لسبب رئيس هو انها متوفرة بسهولة في مصادر أخرى .

مطبوعات دائرة المسح الجيولوجي الامريكية كثيرة جداً وتحوي ثروة من المواد التي سبق ان تم جمعها من التحريات الحقلية اضافة الى العديد من وكالات المصادر المائية لبعض الولايات التي نشرت تقارير شاملة عن الأوضاع المحلية للمياه الجوفية.وللمدربين اوالمدرسين الذين سيستعملون هذا الكتاب كمقرر اوصي بان المعلومات التي تم جمعها من المصادر السالفة الذكر قد تم عرضها على شكل توضيحات وكمسائل لتقديم مادة الكتاب .

ان محتويات الكتاب قد اعتمدت على الشرح الواسع لهيدروجية المياه الجوفية لكي تشمل كافة عناصر المياه الجوفية كمصدر لتجهيز المياه .

الفصول الستة الاولى غطت كافة النواحي الكمية الأساسية للموضوع ، واحتوت على استخدام ووجود وحركة وهايدروليك وآبار المياه ومستويات المياه الجوفية ، الفصل السابع قدّم نوعية المياه الجوفية التي تعتبر ذات اهمية مساوية لكمية المياه الجوفية مع التراكيز على قياس نوعية المياه وتفسير تحليل المياه .

الفصل الثامن أهتم بمسألة المحافظة على المياه الجوفية الذي تم التعبير عنه بصبيب الضمان والمدى الأقصى لتطوير المياه بواسطة الاستخدام المترابط مع المياه السطحية . الطرق السطحية وتحت السطحية للتحري عن المياه الجوفية قد تم شرحهافي الفصلين التاسع والعاشر ، اثنتان من المشاكل المهمة واللتان تعتبران فريدتين بالنسبة لهيدرولوجية المياه الجوفية وهما التطعيم الصناعي واقتحام مياه البحر قد تمت مناقشتهم في الفصلين 11 و 12 .

الاعتبارات الاقتصادية والقانونية التي تؤثر على تطوير المياه الجوفية والنواحي الاقتصادية قد احتواها الفصل الثامن . على حين اعطى الفصل 13 مقدمة حول الحقرق للمياه الجوفية ، الذي يعتبر موضوعاً ذا أهمية خاصة في العقد الاخير في الولايات المتحدة الامريكية . واحتوى الفصل الاخير على استعراض للأنواع المختلفة من النماذج المختبرية اضافة الى دراسات التحليل العددي الذي أصبح من المواد المهمة في بحوث المياه الجوفية ووضع ملحق في نهاية الكتاب احتوى على قائمة بمعادلات التحويل والثوابت المهمة .

في نهاية كل فصل تظهر قائمة بالمراجع تعود نوعيا للمادة التي تم معالجتهـا .

ان مؤلفات المياه الجوفية ضخمة جداً وببلوغرافيتها الشاملة ليست فقط مشروعاً عظيماً ، بل هي تخدم قضايا عملية قليلة الا مايتعلق بالأشخاص الباحثين ولهذا السبب حاولت اختيار المراجع التي تعتبر ذات عون للقراء الذين يحتاجون الى معلومات أكثر لمادة معينة. وبالنسبة لعديد من القراء تعتبر قائمة المراجع كافية وللآخرين الذين يرغبون بالزيادة ستكون المصادر الموجودة كخطوة اولى لهم . ويحوي الفصل الأول في نهايته مراجع عامة اضافة الى العديد من الكتب الأجنبية .

عدد كبير من الأشخاص ساعدوني بصورة مباشرة وغير مباشرة في تحضير هذا الكتاب ومنهم زملائي في جامعة كاليفورنيا ، اعضاء قسم مصادر المياه في كاليفورنيا ، وأعضاء في دائرة المسح الجيولوجي الامريكية . في اوربا مساعدات لمواضيع خاصة قدمت بسخاء من قبل جيولوجيين ومهندسين .

العديد من أسئلة وردود فعل الطلبة دلّني في تقديم مواضيعي ، فصول معينة تمت مراجعتها من قبل ق . ب . كلندنوس . ت.هاردنك ، وج . ف . بولند ، لكل هؤلاء ولزوجتي أقدم شكري وعرفاني ..

ديفيد كيث توود
بركلي ، كاليفورنيا آذار 1959

مقـــدمة المترجميـــن

يعتبر الماء من العناصر الاساسية لتكوين الـكائنات الحية اضافة الى كونه من العناصر الجوهرية لـكل نشاط اقتصادي فهو يشكل حجر الزاوية لـكل تنمية زراعية واجتماعية واقتصادية في البلاد . وعدد الـكتب العلمية العربية التي تبحث في مواضيع المياه نادرا جدا . ولقد بدأ العرب قديما نهضتهم العلمية بالقراءة والاطلاع وتوّجوها بالبحوث والتأليف والترجمة فكان بيت الحكمة في بغداد يعج بالباحثين والمترجمين لاصناف العلوم والاداب والتي نقلت عن الاغريق والهنود وغيرهم واستمرت تلك الحركة بالنمو والازدهار لفترات طويلة .

وحيث ان قطرنا العراقي الحبيب يمر الآن بمرحلة تحوّل نحو الحياة المتطورة والتغيير الشامل لمرافق الحياة المختلفة . وكمحاولة للمساهمة بتحقيق جزء من الهدف المنشود لتعريب التعليم الجامعي في العراق فقد قمنا وبتكليف من وزارة التعليم العالي والبحث العلمي بترجمة هذا الـكتاب والذي يعتبر من المصادر المهمة والرئيسية في مجال تخصص المياه الجوفية . حيث ان عملية التعرف على ماهو مؤلف في البلدان المتقدمة من العالم بات من الضرورات الحضارية ، وتبذل العديد من دول العالم المتقدم حاليا جهودا استثنائية لقضايا الترجمة ، والتي تعتبر من الركائز الاساسية في دعم النهضة العلمية ومعرفة مايدور من تقدم علمي في بلدان العالم المختلفة .

كلنا امل ان نكون قد اسهمنا وبتواضع في عملية تعريب التعليم الجامعي وان نكون قد وفقنا في نقل هذا العلم الى لغتنا العربية ونكون بذلك قد قمنا بواجبنا العلمي نحو قطرنا ووطننا العربي وقد اضفنا نتاجا جديدا لاغناء مكتبتنا العربية بهذا المرجع والتي تفتقر لمثله وكذلك لـكي يستفيد منه طلبة جامعاتنا وفي اختصاصات عديدة كالجيولوجي والهندسة المدنية وهندسة الري وبعض العلوم الزراعية والجغرافية .

ويسعدنا ان نتقدم بجزيل شكرنا الى كافة الذوات اللذين ساهموا بشكل مباشر او غير مباشر بمساعدتنا لاخراج الـكتاب بشكله الحالي ونخص بالذكر السادة : محمد شامل دحام ؛ وذنون حامد الدباغ والسيدة مها عبدالستار – من قسم الجيولوجي – جامعة الموصل لمساعدتهم في مراجعة بعض الفصول ، وكذلك للآنسة سجى سليمان اللوس لمتابعتها المستمرة للطبع وتصحيحها الاخطاء الصادرة عن طبع النسخة الاولى ، وكذلك للآنستين رند عبدالغني وعفيفة يوسف على الجهد المضني في طبع النسخة الأولية من الكتاب . ويسعدنا ان نشكر السادة الدكتور سمير عبدالوهاب العساف كلية الهندسة – جامعة بغداد لمراجعته الكتاب علمياً والدكتور كاصد ياسر الزيدي لمراجعته الـكتاب لغويا والسيد محمد كامل زيدي محسن على جهده المضني في رسم بعض الصور التوضيحية الخاصة بالكتاب .

ولا يفوتنا مطلقا ان نشكر كافة الاخوة في مؤسسة دار الكتب للطباعة والنشر على متابعتهم وحرصهم على طبع الكتاب واظهاره بشكله الحالي خاصة السيد امجد زكريا مدير المؤسسة ونتمنى للجميع الموفقية والتقدم .

كما ونتوجه بالشكر الى وزارة التعليم العالي والبحث العلمي لتكليفنا بترجمة الكتاب والى رئاسة جامعة الموصل لدعمها المتواصل لحركة الترجمة والنشر .... آملين ان يلقى الكتاب رضى قارئيه وان يغنونا بملاحظاتهم حوله .... والله الموفق .

المترجمـــــون
حزيـران 1979

المقدمة

الفصل الاول

يمكن تعريف هيدرولوجية المياه الجوفية بانها علم تواجد ، وتوزيع .وحركة المياه تحت سطح الارض . ان اصطلاح علم « الجيوهيدرولوجيا » Geohydrology له مضمون مماثل واصطلاح جيولوجيا المياه « Hydrogeology » يختلف عنه فقط بزيادة تأكيده على الجيولوجيا .

مجالاته Scope

عادة يرمز للمياه الجوفية وبدون تخصيص جميع صور المياه التي تشغل الفراغات خلال طبقة جيولوجية هذه المنطقة المشبعةيمكن تمييزها من الاخرى غير المشبعة ، او منطقة التهوية ، حيث تكون فراغاتها مملوءة بالماء والهواء .

ان الماء في المناطق المشبعة تكون له اهمية للاعمال الهندسية والدراسات الجيولوجية وتطوير مصادر المياه وبناءاً عليه فان تواجد المياه في هذه المناطق هوما سنؤكد عليه هنا . توجد المناطق غير المشبَعة عادة فوق المناطق المشبعة ، وتمتد الى الاعلى لتصل الى سطح الارض ، ولأن هذه المياه تشمل رطوبة التربة بمناطق الجذور ، فهي موضوع اختصاص علوم الزراعة والنبات وعلوم التربة.ولا يمكن تمييز حد فاصل للمياه بين المنطقتين لأن لهما حدود امتداخلة وان الماء يمكن ان يتحرك من منطقة الى اخرى في كلا الاتجاهين ان العلاقات بينهما قد وصفت بتفصيل اكثر في الفصل التالي .

ان العديد من علوم الارض التي تشمل الجيولوجيا والهيدرولوجيا ، وعلم الاجواء ، وعلم المحيطات ، ذات علاقة بالمياه الأرضية ، ولكن هيدرولوجيا المياه الارضية يمكن اعتبارها كعلم متخصص بربط عناصر من الجيولوجيا والهيدرولوجيا وميكانيك الموائع .وتعود دراسة وتوزيع المياه الأرضية الى علم الجيولوجيا على حين يهتم علم الهيدرولوجيا بتحديد مصادر المياه للارض ويفسر علم ميكانيكا الموائع حركة هذه المياه .

وتلعب المياه الجوفية دوراً هاماً في مجال هندسة النفط وكثيراً ماتوجد أثناء عمليات استخراج النفط نظماً ثنائية ، تمثل خليطاً بين سائلين هما النفط والماء ، او نظماً ثلاثية كخليط من الماء والنفط والغاز . وعلى الرغم من ان قوانين ميكانيكا الموائع التي تطبق على هذه

النظم والمياه الجوفية واحدة ، فان طبيعة الماء في مجموعة مستودعات النفط تعتبر منفردة عن المياه الجوفية الاخرى ، حيث توجد فروقات جوهرية في نوعية الماء ، وعمق تواجد الماء ، وطرق الاستخراج والاستخدام ، وجميعها تشارك في الفصل بينهما في مجالات الاهتمام والتطبيق . ومع ذلك فإن المياه الجوفية في مستودعات النفط لن يرد ذكرها هنا ، ومما تجب ملاحظته ، على اية حال ، أن هيدرولوجيا المياه الجوفية ، قد استفادت بدرجة غير محدودة من البحوث التي جرت في صناعة النفط .

نبذة تاريخية

Historical Background

ان تطور بحوث المياه الجوفية يؤرخ من ازمنة قديمة وتشمل الوثيقة القديمة على عدة مراجع «مصادر» متنوعة كتبت عن المياه الجوفية ، والينابيع والابار ، وقد وصف تولمان *(36) اكبر الانفاق المائية او (الخنادق) تحت الارض في بلاد الفرس ومصر ، مؤرخة من سنة 800 ق . م .

ان استخدامات المياه الجوفية سبقت معرفة بأصل نشأتها ووجودها ، وكذلك حركتها . ومعظم كتابات الفلاسفة الاغريق والرومان لتفسير اصل الينابيع والمياه الجوفية قد احتوت على الكثير من النظريات تتراوح بين الاوهام الى مايقارب الصحيح من الحقائق(7.24) ولغاية أواخر القرن السابع عشر كان الافتراض العام بأن خروج المياه من الينابيع لايمكن ان يكون منشأة من مياه الامطار ، لان الاعتقاد السائد آنذاك هي ان الكمية غير كافية وان الارض صلدة جدا لاتسمح لنفاذ مياه الامطار بعيدا تحت سطحها وعلى ذلك فان الفلاسفة الاغريق الاوائل مثل هومير (Homer) ثالز (Thales) وبلوتو (Plato) قدموا فرضية تقول ان الينابيع قد تكونت نتيجة او بفعل مياه البحار النشطة التي تمر خلال القنوات التي تحت سطح الارض اسفل الجبال والارتفاعات والتي تنقى بعد ذلك وتصعد الى السطح . وقد افترض ارسطو (Aristotle) بأن الهواء الداخل في الكهوف الباردة المظلمة تحت الجبال حيث يتكاثف الى ماء الينابيع . وقد اتبع الفلاسفة الرومان ، ومنهم سينيكا (Seneca) وبلني (Pliny) ، افكار الاغريق في هذا الموضوع واضافوا اليه قليلا . وعلى أية حال ، فان المهندس المعماري الروماني فيتروفينس قد تقدم بالموضوع خطوة هامة الى الأمام . فقد اوضح ماهو متفق عليه الآن عن النظرية الخاصة بالترشيح او « نظرية الترشيح »

---

* ارقام تشير الى رقم المصدر في نهاية الفصل .

بأن الجبال تستلم كميات كبيرة من مياه الامطار التي تترشح من خلال طبقات الصخور وتظهر عند قواعدها لتكوّن الجداول .

ان نظريات الاغريق قد استمرت على المثابرة خلال العصور الوسطى بدون اي تقدم وحتى نهاية عصر الاصلاح ، او النهضة العلمية « منتصف القرن الرابع عشر » وقد تحرك شعراء وفلاسفة فرنسيون مثل بيرنارد باليسي « سنة 1510 - 1589 ميلادية » واعاد نظرية الرشح في سنة (1580) ولكن دراسته اهملت على العموم .

فالفلكي الالماني جون كيلر « 1571 - 1630 » كان رجلا قوي التخيلات وهو الذي شبه الارض بحيوان ضخم يلتهم مياه المحيط ، حيث يهضمها ويستوعبها . ثم يطرد النواتج النهائية لهذه العمليات الفسيولوجية بشكل المياه الجوفية والينابيع ، ان نظرية مياه البحر الاغريقية الى جانب عمليات التبخر ، والتكثيف داخل الارض ، قد اقرها الفيلسوف الفرنسي ، رنيبا ديكارت (1596 - 1650) .

وقد ادركت بوضوح دورة الماء في الطبيعة عند نهاية القرن السابع عشر ، حيث لاول مرة نشأت النظريات على اساس الملاحظات والمدلولات الكمية وقد شارك ثلاثة من الاوربيين اضافة الى اخرين في هذا التقدم بالتعضيد والمساندة .

فقد قام بيير بارولت *(1608 - 1680) بقياس كمية هطول الامطار خلال ثلاث سنوات واحتسب كمية الماء المنساب السطحي لاعالي حوض تصريف نهر السين وروافده فقد كتب في تقريره سنة 1674 بأن المياه الهاطلة (الترسيب) على الحوض كان حوالي ستة مرات معدل تدفق النهر ، وبذلك دل على خطأ الادعاء السابق بعدم كفاية مياه الامطار .

وقد قام الفيزيائي الفرنسي ادماماروت (1620 - 1684) بعمل قياسات لنهر السين في باريس مؤيدا اعمال بارولت وقد نشرت مؤلفاته في (1686) بعد وفاته متضمنة مدلولات حقيقية عاضدة بشدة نظرية الترشيح وقد ذكر العالم ماينزر[24] (Meinzer) أن ماروت ربما يستحق اكثر من اي شخص اخر امتياز كونه يعتبر مؤسسا لعلم هيدرولوجيا المياه الجوفية وربما استطيع ان اقول علم الهايدرولوجيا بأكمله . والمشاركة الثالثة جاءت من الفلكي

---

* كان بيير بارولت محاميا بالحرفة وقد تقلد مناصب ادارية ومالية في حكومة فرنسا ، ولذلك فهو غير بارز في المحافل العلمية ، ولقد قاده ولعه في المياه الجوفية الى نشر موسوعة « أصل الينابيع » سنة 1674 التي ترجع حوافزها الى عالم الرياضيات والفلك والفيزياء الهولندي كريستان هايجن الذي عاش في باريس واليه اهدى الكتاب . وكذلك فان بيير بارولت غالبا ماحجب عن الانظار لوجود اخوته الثلاثة النوابغ : نيكولاس (1611 - 1661) اللاهوتي الشهير . كلاود (1613 - 1688) الفيزيائي ، والمهندس المعماري . والعالم الذي يعتبر من ابرز العلماء الفرنسيين في عصره وشارلس (1628 - 1733) المؤلف والناقد الذي عرف جيداً برواياته الخيالية عن البجعة الام ..

الانكليزي الموند هالي (1656 – 1742) الذي كتب في تقريره سنة 1693 عن قياساته حول التبخر ، موضحا ان التبخر من البحر كاف كمصدر لمياه كل الينابيع والجداول الجارية .

وخلال القرن الثامن عشر ، وضعت اساسيات علوم الجيولوجيا التي اعطت الاسس لتفهم تواجد وحركة المياه الجوفية ، وخلال النصف الاول من القرن التاسع عشر حفر عدد من الابار الارتوازية في فرنسا مما اعطى الاهتمام بالمياه الجوفية.وقد درس المهندس الفرنسي هنري دارس (H. Darcy) سنة (1856 – 1858) حركة المياه خلال الرمال فان موسوعته لسنة 1856 قد عرّفت العلاقة التي تحكم حركة المياه الجوفية في معظم التكاوين الرسوبية غير المتماسكة والتي عرفت بعد ذلك بقانون دارسي .

وقد اكد المشاركون الاوربيون في القرن التاسع عشر تطور هيدرولوجيا المياه الجوفية كعلم . ومن المقالات الهامة تلك التي عملت من قبل جي باوسينسك وجي . اي دوبري وجي . دوبت ، وبي فورشايمر واي ثيم .

وفي القرن العشرين وجدت نشاطات متزايدة لكل اطوار هيدرولوجيا المياه الجوفية . وكثير من الاوربيين شاركوا بالمطبوعات التي كانت اما تخصصية او موضوعات شاملة ولو لأن اعدادهم كثيرة وعلى سبيل المثال فإن الأسماء مثل آل د اتشلر . وأي امبوكس ، كي كيلهال . واوكوهن ، وجي وكوزين وأي برنز واخيراً جي ذيم . وهو اكثرهم شهرة في الولايات المتحدة .

اما تاريخ مشاركة الامريكان في هيدرولوجيا المياه الجوفية فهي فيما يقرب من نهاية القرن التاسع عشروفي فترة قصيرة من ذلك التاريخ الى وقتنا الحاضر . فإن تطورات عظيمة قد حدثت،فقد حدثت مشاركات نظرية هامة من قبل ، اي . هيزن ، واف . اج . كنك وسي ، اس . سلشتر ، ودراسات حقلية كانت قد بدأت من قبل اشخاص مثل ، تي . سي تشامبرلن ، ان اج . دارتون واوتي لي واوسي مندنهل وكثير من التقدم في هيدرولوجيا المياه الجوفية خلال هذا القرن يمكن ان ينسب الى الدكتور او.اي.ماينزر وهو من خلال اهتماماته المتفانية بالمياه الجوفية وقيادته المحركة لنشاطات المياه الجوفية في المسوحات الجيولوجية الامريكية . قد شجع عدة باحثين طلباً لمعلومات عن المياه الجوفية .

استعمالات المياه الجوفية
Utilization of Ground Water.

ان المياه الجوفية هي مصدر مهم من مصادر الماء في انحاء العالم . واستعمالاتها في الري والصناعات ، والبلديات والارياف مستمرة في الزيادة فالتبريد والتكييف في الماضي قبل عشرين سنة كان قد سبب اقبالا شديداً على المياه الجوفية بسبب صفاته المتجانسة ، في درجات الحرارة .

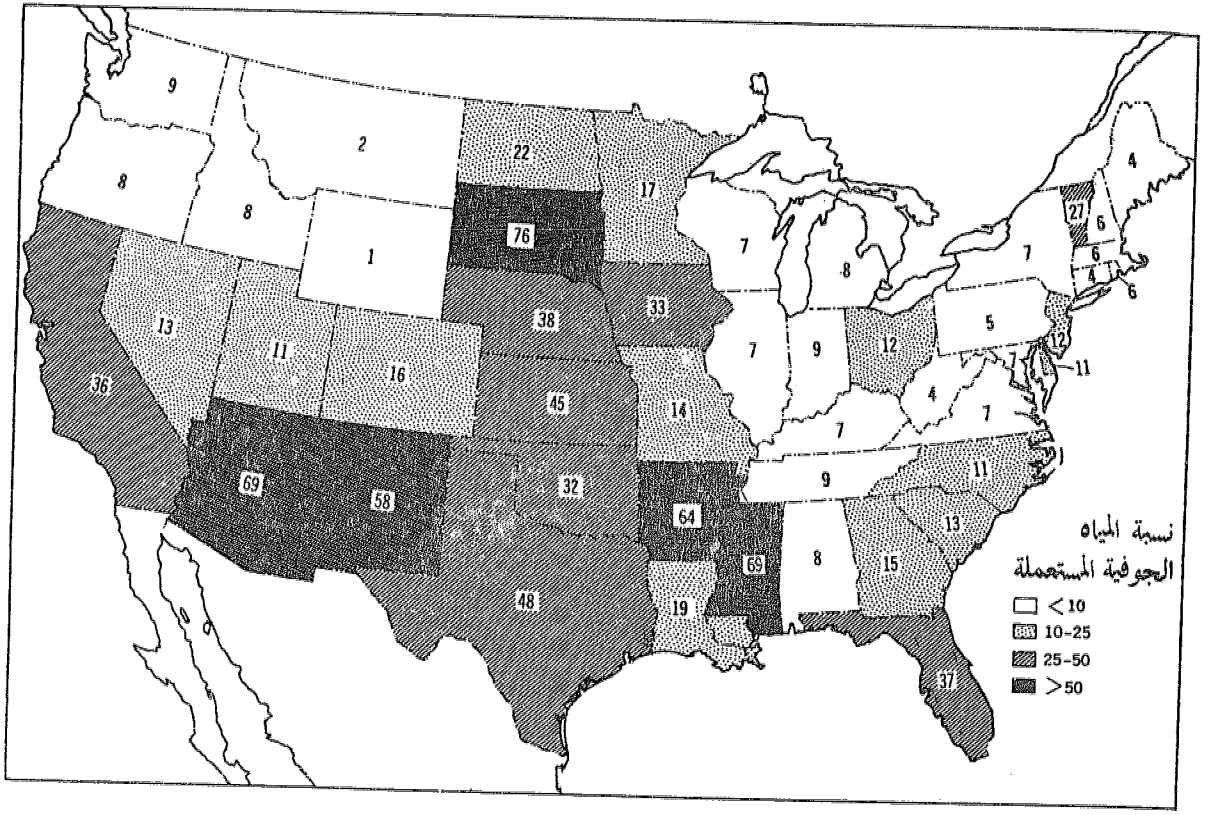
ان النقص في المياه الجوفية في مناطق السحب المتزايد يؤكد اهمية التقديرات الصحيحة والاستخدامات الملائمة . والتنظيم . وحماية التجهيز ، من اجل ضمان استمرار الانتفاع من هذه الثروة الطبيعية . واحصاءات استعمالات المياه الجوفية في الولايات المتحدة كما في سنة 1955 اعدت من قبل ماكجان من المسح الجيولوجي للولايات المتحدة ، فقد كتب في تقريره عن الاستعمال الكلي الذي يقدر بـ 240 بليون غالون في اليوم . منهم 46.3 بليون غالون في اليوم . اوقرابة 19٪ تأتي من المياه الجوفية .

وتطلب مياه الري اكبر قدر من المياه الجوفية . والتي يصل تقديرها الى 30 بليون غالون في اليوم . اوقرابة 65٪ من مجموع المياه الجوفية المستعملة . وطبقاً لما جاء به ماكجان . فان 91٪ من هذه المياه تنضح الى الـ 17 ولاية غربية . حيث الظروف الجافة تتطلب التوسع في متطلبات الري . والاحتياجات الاخرى من المياه الجوفية تتضمن 9.8 بليون غالون في اليوم لمتطلبات الصناعة . 4.7 بليون غالون في اليوم لتجهيزات المياه و 1.8 بليون غالون في اليوم لاحتياجات الارياف من المياه فضلا عن متطلبات الري

ان استعمالات الصناعات الكبيرة من المياه بحسب الترتيب تتطلبها صناعات تكرير النفط ، وصناعات الورق والآت الصناعات الفلزية . والصناعات الكيمياوية والتكييف ووحدات التبريد ؛ وصناعات التقطير .

ان استعمال المياه الجوفية قد ازداد بمعدلات كبيرة في الوقت الحاضر ، والدلائل تشير على ان هذا الاتجاه سوف يستمر .

ويبين جدول رقم 1 – 1 فكرة عن مقدار تزايد استعمال المياه الجوفية من قبل الولايات المتحدة الامريكية ومن قبل انواع المتطلبات في سنة 1955 . وقد نظمت الولايات بحسب ترتيب استعمالها للمياه الجوفية . شكل رقم 1 – 1 يوضح نسبة المياه الجوفية المستعملة بالنسبة لمجموع المياه المستعملة لكل ولاية ..



شكل (1 – 1) المياه الجوفية المستعملة في كل ولاية من الولايات المتحدة بالنسبة لمجموع المياه الموجودة .

جدول رقم 1 – 1 استعمال المياه الجوفية في الولايات المتحدة ، سنة 1955

« بعد ماكجان »[19] .. الكميات مقاسة بوحدات مليون غالون في اليوم

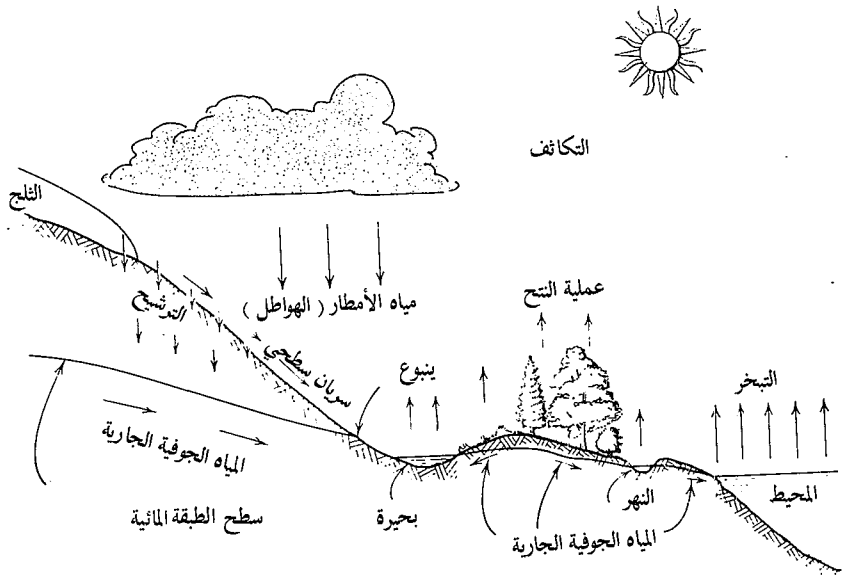
الولايات	التجهيزات العامة	ريفي	السقي	تجهيز الصناعات	المجموع الكلي للمياه الجوفية المستعملة	النسبة المئوية بين المياه الجوفية المستعملة الى مجموع المياه المستعملة .
١ كاليفورنيا	540	89	10.000	460	11.089	36
٢ تكساس	550	140	6.500	1.030	8.220	48
٣ اريزونا	110	10	4.700	140	4.960	69
٤ نيومكسيكو	85	16	1.400	46	1.547	58
٥ ايداهو	56	15	1.100	120	1.291	8
٦ نبراسكا	120	60	850	250	1.280	38
٧ اوهايو	250	77	1.100	940	1.268	12
٨ كلورادو	28	39	1.000	35	1.102	16
٩ فلوريدا	240	27	250	515	1.032	37
١٠ مسيسبي	95	24	460	430	1.009	69
١١ كانساس	130	46	610	220	1.006	45
١٢ لويزيانا	83	22	380	480	965	19
١٣ اركانساس	28	24	790	121	963	64
١٤ الينديز	160	95	3.2	393	651	7
١٥ نيويورك	240	110	22	257	629	7
١٦ الزياتا	140	79	5.1	390	614	9
١٧ اوريكون	36	18	490	65	609	8
١٨ الوا	100	79	3.4	419	601	33
١٩ واشنطن	150	28	230	180	588	9
٢٠ متشجان	180	73	5.3	315	573	8
٢١ بنسلفانيا	120	60	1.6	340	522	5
٢٢ اوتاه	110	8	270	130	518	11
٢٣ نيوجرسي	160	8	22	296	486	12
٢٤ تينتس	100	26	3.6	250	380	9
٢٥ وسكونسن	140	84	2.6	120	347	7
٢٦ جورجيا	85	23	12	210	330	15
٢٧ مينيسوتا	50	72	2.2	190	314	17

الولايات	التجهيزات العامة	ريفي	السقي	تجهيز الصناعات	المجموع الكلي للمياه الجوفية المستعملة	النسبة المئوية بين المياه الجوفية المستعملة الى مجموع المياه المستعملة
٤٠ اوكلاهوما	45	15	150	102	312	32
٤١ ميسوري	41	56	20	190	307	14
٤٢ نيفادا	29	3	210	22	264	13
٤٣ شمال كارولينا	28	52	1.4	170	251	11
٤٤ مونتنا	21	13	150	62	246	2
٤٥ الباما	67	28	2.4	142	239	8
٤٦ كنتوركي	45	29	3.9	160	238	7
٤٧ جنوب داكوتا	46	39	6.8	98	185	76
٤٨ ماساتشوسيتس	82	7	0.2	65	154	6
٤٩ غرب فرجينا	18	17	0	110	145	4
٥٠ فرجينيا	10	33	0.4	100	143	7
٥١ ماريلانسر	17	36	0.7	79	133	7
٥٢ جنوب كارولينا	27	30	12	50	119	13
٥٣ شمال داكوتا	10	14	1.4	66	91	22
٥٤ كونيكتيكوت	10	8	1.3	57	76	4
٥٥ وايونج	25	9	28	5	67	1
٥٦ ديلاوير	11	3	0.4	25	39	11
٥٧ فيرمونت	11	8	0	12	31	27
٥٨ ميان	6	5	0.2	11	22	4
٥٩ هود ازلاند	10	1	0	11	22	6
٦٠ نيوهاميشاير	9	3	0	4	16	6
٦١ منطقة كولومبيا	0	0	0	11	11	3
الولايات المتحدة	4.700	1:800	30.00	9.850	46.35	19

المياه الجوفية ودورة المياه في الطبيعة

Ground Water in the Hydroloyic Cycle

تكوّن المياه الجوفية احد اجزاء نظام دوري يعرف بدورة المياه في الطبيعة . وشكل رقم 1 – 2 يوضح شكلا تخطيطيا لهذه الدورة وتراكيب القشرة الارضية الحاوية للمياه تعمل مثل قنوات لانتقال الماء وكمستودعات لخزنه . والماء الذي يدخل هذه التكاوين من سطح الارض او من اجسام الماء السطحي . بعدها ينتقل ببطء الى مسافات مختلفة ثم



شكل (1 - 2) دورة المياه في الطبيعة

يظهر عند السطح بتأثير السريان الطبيعي ليمتص بواسطة النباتات ، او يستخرج بواسطة الانسان ، ان سعة مستودعات خزن المياه الجوفية بالاضافة الى معدلات الانسياب البطيئة توفر مصادر كبيرة ومتنوعة للماء * .

المياه الجوفية الخارجة ضمن القنوات والجداول السطحية تساعد في تعضيد جريان الجداول عندما يكون ماء السريان السطحي منخفضا او غير موجود . وبالمثل ، المياه التي تنضح من الابار تمثل مصدر المياه الوحيد في عديد من المناطق خلال اغلب اوقات السنة .

---

* ان مستودعات المياه الجوفية للولايات المتحدة تحتوي على كميات من المياه العذبة اكثر بكثير من مجموع كل المستودعات والبحيرات . ومن ضمنها البحيرات الكبيرة . وقد حسبت مجموع المياه الجوفية المخزونة التي يمكن استعمالها وتقدر طاقتها بما يعادل 10 سنوات حولية من مياه الأمطار أو 35 سنة من مياه السريان السطحي .

وعمليا فان جميع المياه الجوفية تنشأ عن المياه السطحية . ان المصادر الرئيسية للمياه في الطبيعة تتضمن مياه الامطار ، وسريان الجداول . والبحيرات ، والخزانات ، ومن المصادر الاخرى ، التي تعد مصادر اصطناعية ، التسرب من فائض الري . والنز من القنوات ، والمياه التي توضع لغرض زيادة تجهيزات المياه الجوفية حتى مياه البحر يمكن ان تدخل تحت الارض على طول الشواطيء حيث الانحدار الهايدروليكي ينحدر الى الاسفل باتجاه اليابسة بعيدا عن البحر تتحرك المياه في الارض متحددة من خلال النطاق غير المشبع الى الاسفل تحت تاثير الجاذبية على حين يتحرك النطاق المشبع في اتجاهات تحددها الحالة الهيدروليكية المحيطة بها .

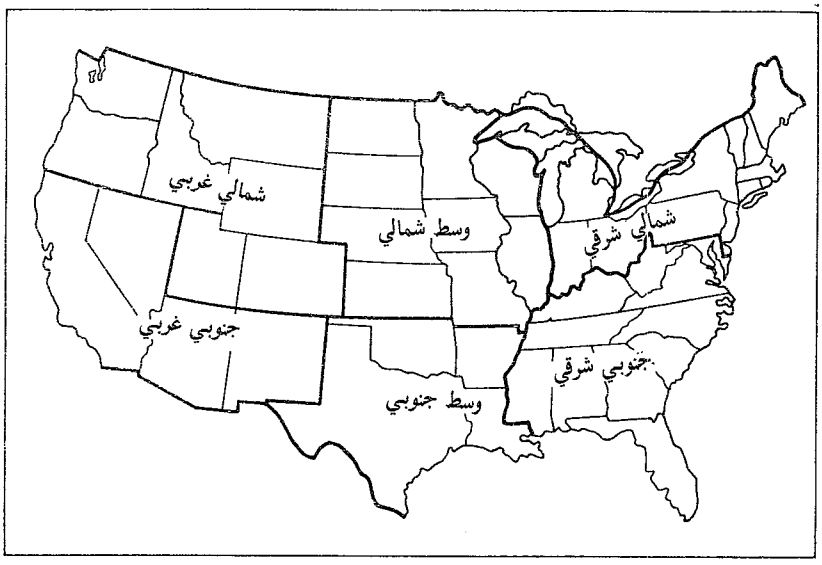
ويحدث تفريغ المياه الجوفية عندما ينبعث الماء من باطن الأرض ، ويحدث معظم التفريغ الطبيعي كسريان من المسطحات المائية ، مثل الجداول . البحيرات ، والمحيطات وتبدو الطفوح السطحية بشكل ينابيع المياه الجوفية القريبة من السطح يمكن ان ترجع مباشرة الى الجو بواسطة التبخر ومن داخل التربة ، وكذلك عملية النتح في النباتات . الضخ من الآبار يكوّن معظم الاستنفاذات الاصطناعية للمياه الجوفية .

– المؤلفات ومصادر المعلومات –

Literature and Data Sources

ان اغلبية القياسات الحقلية والاستقصاءات حول المياه الجوفية في الولايات المتحدة تقوم بها دائرة المسح الجيولوجي ، ومعظم الاعمال كانت بالتعاون اساسا مع الولايات . وقد نشرت النتائج من قبل دائرة المسح الجيولوجي على شكل نشرات عن مصادر المياه او مطبوعات دورية ، ومنذ سنة 1935 ، فان تسجيلات قياسات المياه الجوفية ، في بعض الآبار الممثلة قد نشرت في نشرات تجهيز المياه السنوية ، تحت عنوان مناسب المياه وضغوط الآبار الارتوازية ، في ابار المراقبة في الولايات المتحدة ، وقبل سنة 1940 فان تسجيلات كل سنة قد نشرت في مجلد منفرد ، ومنذ ذلك نشرت التسجيلات في ستة مجلدات سنوية مغطية قطاعات القطر ، المشار اليها في شكل 1 – 3 وطبقا لما جاء به اي . ان . ساير ، رئيس قسم المياه الجوفية بدائرة المسح الجيولوجي ، فان الهدف من برنامج الملاحظة هي :

... لاعداد تقديرات عن احتياطي تجهيزات المياه الجوفية يوما بيوم ، ولتسهيل التنبؤ عن اتجاهات مناسيب المياه الجوفية ، التي سوف تدل على احتمالية الظروف المهمة لتجهيزات المياه في المستقبل ، ولتخطيط الحاجز او المناطق ذات المصادر الحالية او المحتملة بتحديد ارتفاع او انخفاض مناسيب المياه الجوفية فيها ، لتساعد في التنبؤات عن اساس سريان الجداول لتقرر القوى العديدة التي تؤثر على كتلة المياه الجوفية ، ولتبين ما تلعبه هذه القوى بالتاثير في نظام المياه الجوفية ، ولتقديم المعلومات لاستعمالها في البحوث الاساسية ، ولاعداد التسجيلات الطويلة الامد ، والمستمرة لتسجيل التقلبات في مناسيب المياه في الآبار الممثلة ...



شكل رقم (1 – 3) خارطة تخطيطية للولايات المتحدة توضح المناطق التي تضمنتها نشرات دائرة المسح الجيولوجي لتجهيز المياه ومستوى المياه وضغط الآبار الارتوازية ، في آبار المراقبة .

والى جانب هذه النشرات عن تجهيز الماء ، فان دائرة المسح الجيولوجي نشرت في فترات غير منتظمة نشرات اخرى عن الجيولوجيا ومصادر المياه الجوفية ، لبعض المناطق الاخرى وبلا تغيير هذه الفحوصات المفصلة تخص المناطق التي تحوي مشاكل المياه الجوفية المهمة ، والتي نفذت بالتعاون مع وكالات محلية ، والمعلومات المنشورة لمشاكل او مناطق معينة يمكن الحصول عليها من قوائم المصادر عن المياه الجوفية ، لدائرة المسح الجيولوجي او من آخر طبعاتها الصادرة عن هذه الدائرة .

المصدر الثاني للمعلومات الأساسية عن المياه الجوفية من قبل وكالات الجيولوجيا ومصادر المياه الجوفية ، وتختلف الولايات بعضها عن بعض بالاتساع في درجة نشاطاتها ، ولكن ولاية كاليفورنيا والينويز على سبيل المثال ، تحتفظان بوكالات كثيرة لمصادر المياه ، عملت على توسيع دراستها عن المياه الجوفية لما يخص ولاياتهم . وقد صدرت قائمتان بالمصادر شاملة للهيدرولوجيا ، في السنوات الأخيرة تعطي نبذات مختصرة ، عن المؤلفات في الولايات المتحدة ، وكندا ، الأولى تغطي الفترة المحدودة بين سنة 1941 – 1950[3] والثانية ، للفترة من سنة 1951 – 1954[4] ومن المتوقع ان تظهر قوائم اضافية في المستقبل .

وتتضمن المؤلفات المتخصصة في هيدرولوجيا المياه الجوفية ، وحقول ذات اهتمامات عديدة وتوجد اضافات مهمة في مجالات الهندسة المدنية ، ومصادر المياه ، والجيولوجيا والجيوفيزياء ، والزراعة ، وعلم التربة : هناك بحوث عن الانسياب في اوساط مسامية ، تظهر كذلك في مجالات الهندسة الكيميائية ، الميكانيك ، والفيزياء .

والمنظمة الوحيدة في الولايات المتحدة ، التي ميزت الهيدرولوجيا كعلم اصيل : هي الاتحاد الجيوفيزيائي الامريكي ، ومؤلفاتها التي بدأت في عام 1920 ، تحتوي على ثروة من بحوث المياه الجوفية ، وبالمثل فان مطبوعات جمعية الهيدرولوجيا العلمية العالمية وهي منظمة تتبع اتحاد المساحة الجيوديسية والجيوفيزياء العالمية : هي الاخرى تخدم كأوساط اساسية لتبادل المعلومات عن المياه الجوفية ، على اسس عالمية .

وقد ثُبتت المراجع المنتخبة في نهاية كل فصل ، وهذه تعطي مصادر اضافية للمعلومات الخاصة في موضوع البحث في كل فصل ، مصادر عامة عن المياه الجوفية ، ومراجع اجنبية قد ادرجت ضمن مصادر هذا الفصل ايضا .

- الفصل الثاني -

وجـــود الميـــاه الجوفيـــة

(Occurrence of ground water)

لوصف وجود المياه الجوفية فانه يستلزم اعادة النظر في كيفية وجود المياه الجوفية واين توجد ، حيث ان التوزيع تحت السطحي في كلا الامتدادين العمودي والمساحي تحتاج لأن تؤخذ بنظر الاعتبار . ان المناطق الجيولوجية المهمة للمياه الجوفية يجب تشخيصها بالاضافة الى معرفة تراكيبها بتعابير قابلياتها على حمل الماء (water - holding) الماء (water-yielding) على افتراض ان الظروف الهيدرولوجية تعمل على تجهيز الماء المنطقة الجوفية ، حيث ان الطبقات تحت السطحية تتحكم بتوزيعها وحركتها ، لذا فان الدور المهم الجيولوجي في هيدرولوجية المياه الجوفية لايعد تأكيده نوعاً من المغالاة .

العيون والمياه في الاراضي الدائمة الانجماد ، تمثل تواجداً خاصاً للمياه الجوفية .

- اصـــل الميـــاه الجوفيـــة -

(Origin of ground water)

جميع المياه الجوفية تقريباً يمكن اعتبارها كجزء من دورة المياه في الطبيعة المشتملة على المياه السطحية والجوية . وعلى أية حال فان كميات صغيرة من المياه الجوفية نسبياً ، قد تدخل هذه الدورة من مصادر اخرى . المياه الحبيسة (Connate) هي المياه المحتواة في الفراغات البينية للصخور عند زمن ترسيبها التي قد تكون مشتقة من المحيط او مصادر المياه العذبة . ونموذجياً تكون مياه معدنية جداً . مياه جديدة ذات الاصل الصهـــاري (magmatic) . البركاني . او الكوني تضاف الى تجهيز المياه البرية (terrestrial) وهي مياه حداثية (juvenile) . عند الاشارة الى مياه من مصدر مخصوص . فمن المناسب تعيين النوعية مثل المياه الصهارية (magmatic) او المياه البركانية (Volcanic) او المياه الكونية (cosmic) .

خواص الصخور المؤثرة على المياه الجوفية

Rock properties affecting ground water)

المياه الجوفية توجد في التكوينات الجيولوجية النفاذة والتي تعرف بالتكوينات المائية* (الخزان المائي ، المستودع المائي aquifers) والتي هي تكوينات لها تراكيب تسمح لكميات مناسبة من الماء بالتحرك خلالها تحت ظروف حقلية طبيعية او اعتيادية .

ان مستودعات المياه الجوفية اوالتكوينات المائية (كذلك الطبقات. اوالترسبات تعتبر مترادفات مستعملة بصورة شائعة . وبالتغاير (Contradistinction) ، فان ال (اكوكلوود aquiclude) هو تكوين غير نفاذ قد يحوي الماء ولكنه غير قادر على نقل كميات ماء مفيدة ، الطفل هو المثال على ذلك. ويعتبرال (اكويفيوج aquifuge) تكويناً غير نفاذ لا يحتوي ولاينقل الماء ، ويدخل الجرانيت الصلب تحت هذا النوع .

ذلك الجزء من الصخرة او التربة الذي هو غير مشغول بمواد معادن صلبة قد يشغل بمياه جوفية . والفراغات (spaces) الموجودة فيه تعرف بالتجاويف (Voids) ، والفرج (جمع فرجة) (interstices) - والمسامات (pores) ،اوالفراغ المسامي (porespace) لأن الفرج تستطيع ان تعمل كقنوات اوانابيب (conduits) مياه جوفية ، لذلك فانها ذات أهمية أساسية لدراسة المياه الجوفية . على نحو أنموذجي ، فانها تتميز بحجمها وشكلها وعدم انتظامها وتوزيعها .

ان الفرج الاصلية قد خلقت بواسطة العمليات الجيولوجية المتحكمة بأصل التكوين الجيولوجي التي هي موجودة في الصخور الرسوبية والنارية . أما الفرج الثانوية فانها نشأت بعد تكوين الصخرة .

وتشمل الأمثلة المفاصل (Joints) ، والصدوع (factures) وفتحات المحلول ، والفتحات المتكونة بواسطة النباتات والحيوانات . ونسبة الى الحجم ، فان الفرج قد توصف بأنها شعرية (Capillary)أوفوق الشعرية (supercapillary) ، أو تحت الشعرية (subcapillary) . وتكون الفرج الشعرية صغيرة بصورة كافية بحيث أن قوى الشد

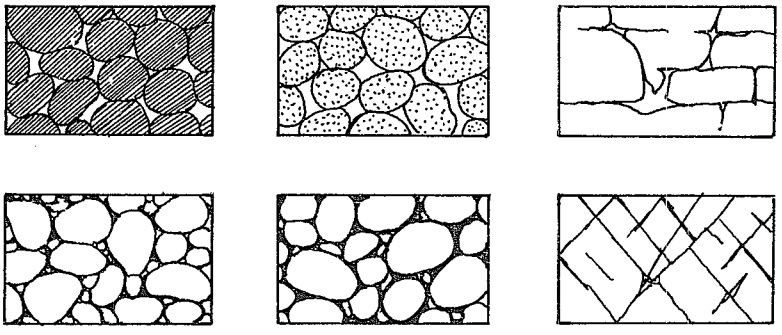
* ان كلمة « التكوين المائي » (*aquifer*) يمكن ارجاعها الى أصلها الاغريقي . والمتكون من مقطعين -*Aqui* والمشتقةمن *aqua*, وتعني الماء . و *fer* والتي مشتقة من *ferre* والتي تعني الحامل ، ولذا تعتبر aquifer. بالحامل للماء ار التكوين الحاوي على الماء او التكوين المائي في حين ان المقطع *clude* من الكلمة aquiclude مشتقاً من الكلمة الاغريقية *claudere* . والتي تعني الانغلاق ، وكذلك بالنسبة للمقطع *fuge* من المصطلح aquifuge يأتي من *fugere* . والتي تعني يدفع بعيدا .

السطحي تستطيع حمل الماء ضمنها ، أما الفرج فوق الشعرية فهي تلك التي تكون أكبر من الفرج الشعرية ، وأما الفرج تحت الشعرية فهي تلك التي تكون صغيرة الى درجة ، بحيث ان الماء يحمل بصورة رئيسية (primarily) بواسطة قوى التلاصق (addesive forces) معتمدة على اتصال الفرج بعضها مع بعض ، ويمكن ان يصنفوا كمتصلين (Communicating) او معزولين (isolated) .

ان مسامية الصخرة او التربة هي قياس للفرج المحتواة . ويمكن التعبير عنها كنسبة فراغ التجويف (void space) الى الحجم الكلي للكتلة ، اذا كانت (α) هي المسامية ، لذا فان :

$$\alpha = \frac{\text{loow}}{V} \qquad \ldots (2.1)$$

حيث (w) هو حجم الماء المطلوب لملء ، او اشباع كل الفراغات المسامية (Porespaces) و (V) هو الحجم الكلي للصخرة او التربة .



شكل (2 – 1) أمثلة على فرج الصخور وعلاقة نسيج الصخرة بالمسامية

الشكل 2 – 1) يوضح عدة اشكال من الفرج وعلاقتها مع المسامية . بمصطلحات من تجهيز المياه الجوفية ، الترسبات الرسوبية الحبيبية (granular) التي تعتبر ذات اهمية كبيرة . المساميات في هذه الترسبات تعتمد على شكل وتنظيم الدقائق (particles) المنفردة كذلك التوزيع الحجمي ودرجة التصلب (Cementation) والتماسك (Compaction) في التكوينات المتصلبة (Consolidated formations) او المتماسكة ، فان ازالة المواد المعدنية بالمحلول ودرجة التصدع (fracture) تعتبر مهمة ايضاً .

ان مدى المساميات من قرب الصفر الى اكثر من 50% ، معتمداً على العوامل المذكورة اعلاه ونوع المواد . الممثلة لمدى المسامية للمواد الرسوبية مسجلة ومدونة في الجدول (2 – 1).

جدول (2 1) مدى المسامية للمواد الرسوبية

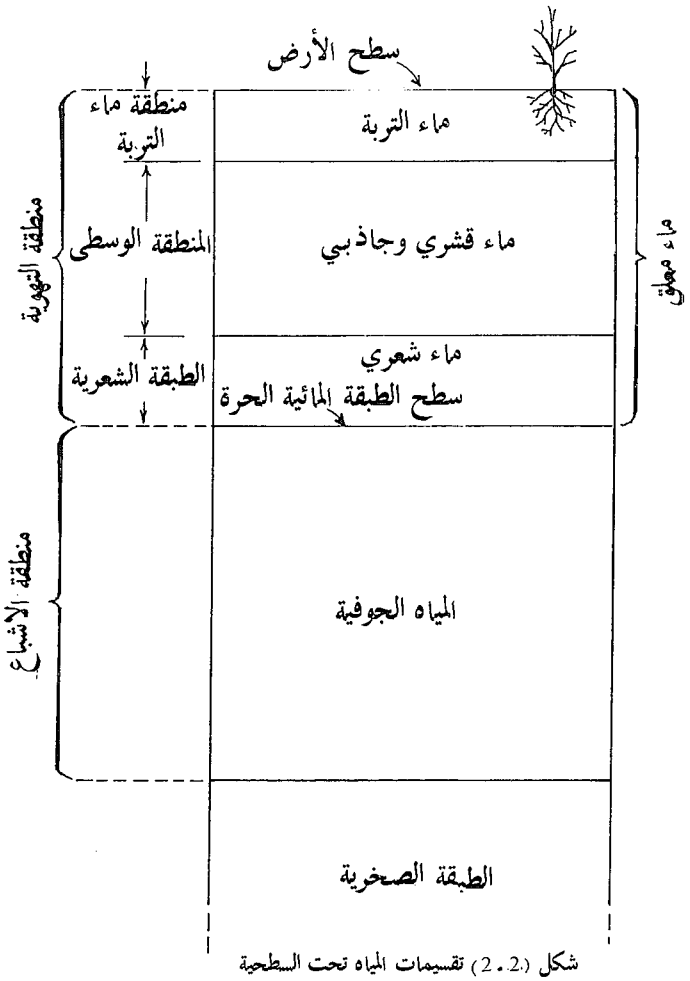
المادة	النسبة المئوية للمسامية
التربة	50 - 60
الطين	45 - 55
الصلصال	40 - 50
رمل متوسط الحجم الى كبير	35 - 40
رمل متجانس	30 - 40
رمل من ناعم الى متوسط الحجم	30 - 35
حصى	30 - 40
حصى ورمل	20 - 35
صخر رملي	10 - 20
الصخر الطيني	1 - 10
الحجر الجيري	1 - 10

التوزيع العمودي للمياه الجوفية (Vertical distribution of ground water)

ان الوجود تحت السطحي للمياه الجوفية يمكن تقسيمه الى مناطق الاشباع (Saturation) ومناطق التهوية (Aeration) . في منطقة الاشباع فان كل الفرج تكون مملوءة بالماء تحت الضغط الهيدروستاتي . اما منطقة التهوية فتتكون من فرج مملوءة جزئيا بالماء وجزئيا بالهواء فوق معظم المساحات اليابسة للارض فان منطقة تهوية مفردة تغطي منطقة اشباع مفردة وتمتد باتجاه الاعلى الى سطح الارض كما هو موضح في الشكل (2 – 2) .

ان المنطقة المشبعة تكون محددة عند القمة اما بواسطة سطح محدود للاشباع او تكون مغطية (overlying) لطبقات غير نفاذة وتمتد الى أسفل مبطنة (underlying) لطبقات غير نفاذة مثل طبقات الطفل او الصخر الصلد (bedrock) . في غياب الطبقات غير النفاذة المغطية . فان السطح الاعلى من منطقة الاشباع هو مستوى الماء او السطح الـ (phreatic) . وهو يعرّف بسطح الضغط الجوي الذي سيظهر بمنسوب . والذي عنده يقف الماء في البئر المخترق للتكوين الصخري الحاوي على الماء والحقيقة هي ان الاشباع يمتد قليلا فوق مستوى معين نسبة الى الجذب الشعري . على اي حال . فالماء يحمل هنا بأقل من الضغط الجوي .

ان الماء الموجود في منطقة الاشباع يعزى ببساطة الى المياه الجوفية في منطقة التهوية لذا فان الماء يوجد بصورة عالقة (suspended) . هذه المنطقة عموما قد تقسم بصورة اضافية الى منطقة ماء التربة (soil water zone) . والمنطقة الوسطى (inter mediate zone) والمنطقة الشعرية (Capillary Zone) (الشكل 2.2) . ان امتداد وتوزيع الماء في كل منطقة موضح في المقاطع او الاجزاء الآتية :



شكل (2.2) تقسيمات المياه تحت السطحية

منطقة ماء التربة (SOIL WATER ZONE)

ان الماء في هذه المنطقة يوجد بأقل من الاشباع عدا ما يصل آنياً من المياه الفائضة على سطح الارض ، مثل سقوط مياه الامطار او الري وهذه المنطقة تمتد من سطح الارض الى أسفل خلال منطقة الجذور الرئيسة ويختلف سمكها باختلاف نوع التربة والنباتات . بسبب الاهمية الزراعية لماء التربة في تجهيز الرطوبة الى الجذور لذا فان المزارعين وعلماء التربة قد درسوا توزيع وحركة رطوبة التربة بصورة واسعة .

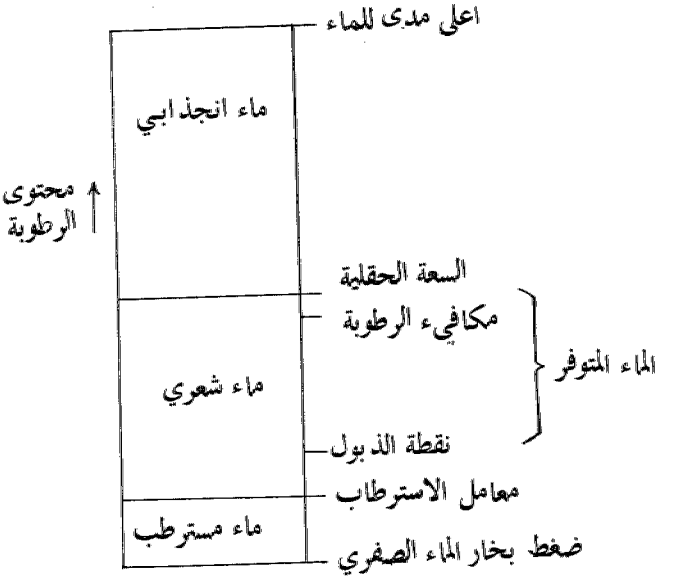
ماء التربة قد صنّف بواسطة (Briggs) الى ثلاثة اجزاء معتمدة على تركيزها في منطقة التربة : الماء الاسترطابي (Hygroscopic water) وهو الماء الممتص adsorbed من

الهواء . الذي يكوّن طبقة رقيقة من الرطوبة على سطوح دقائق التربة . ان قوى التلاصق تكون كبيرة جدا ، لذا فان هذا الماء غير قابل للتوفر للنباتات .

والنوع الثاني هو الماء الشعري موجود كطبقات رقيقة مستمرة حول دقائق التربة . حيث انه يحمل بواسطة الشد السطحي ويتحرك بالخاصية الشعرية . وهو متوفر للنباتات .

والثالث هو الماء الانجذابي (Gravitational) هو ماء التربة الفائض الذي يتصرف خلال التربة تحت تأثير الجاذبية ولعدة درجات . او نقاط التوازن لمحتوى رطوبة التربة نسبة الى الدراسات الزراعية والمختبرية للترب هي معروفة بصورة عامة . وهذه تمثل جهوداً لتعريف الرتب (Classes) اعلاه لماء التربة ، على اي حال كما يمكن ان يلاحظ ، فان التعاريف الاعتباطية لبعض هذه النقاط تمنع التحديدات الفيزياوية النوعية . ان الشكل التوضيحي (Moisture diagram) للرطوبة المبين توضيحيا (Schematically) في الشكل (3.2) يبين المواقع النسبية لرتب ماء التربة ونقاط التوازن . وجميع محتويات الرطوبة التالية يعبر عنها كنسبة الوزن الرطب للتربة الى الوزن الجاف للتربة . التحويل الى نسبة مئوية معينة بالحجم لمقارنتها مع المسامية يمكن عملها وذلك بضربها بواسطة الوزن النوعي للتربة الجافة .

ان المعامل الاسترطابي هو الرطوبة العظمى التي ستمتصها التربة الجافة اوليا بتماس مع الجو ذات رطوبة نسبية قدرها (50%) عند (25C°) .



2 – 3) شكل لماء التربة يبين الرتب ونقاط التوازن

ان نقطة الذبول (Wilting Point) هي تلك الكمية من الرطوبة التي عندها يحصل ذبول دائم للنباتات . وقد اثبتت التجارب ان هذه ليست قيمة فريدة (Unique) . ولكن عوضا عن ذلك تعتمد على النبات ، والمناخ ، ونظام الجذور ، وحجم التربة المفحوصة . وتعرف السعة الحقلية (Field capacity) بكمية الماء التي تحمل في التربة بعد تصريف المياه الانجذابية الفائضة . وبعد ان يقل ماديا معدل حركة الماء باتجاه الاسفل .

مكافيء الرطوبة (Moisture equivalent) هي كمية الماء التي ستحتفظ بها التربة المشبعة بعد ان تطرد مركزيا بالقوة المركزية الطاردة (1000) مرة اكثر من الجاذبية (gravity).

ان السعة الحقلية للرمل اعلى من مكافيء التربة ، ولكنهما مساويان تقريبا للطفل الرملي (Loams)[43] بسبب ان السعة الحقلية ونقطة الذبول تمثلان الحدود العليا والسفلى على التوالي . للرطوبة اللازمة لنمو النباتات . وان الفرق بين هاتين النقطتين هو الماء المتوفر لنمو النباتات . إن الماء المطلوب لاشباع كل فراغات التربة ، هو كمية الماء العظمى المحتملة ، وهذه تعرف بسعة الماء العظمى (maximum water capacity) .

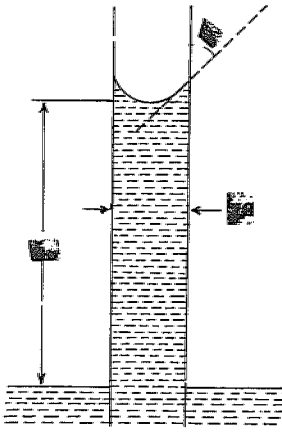
ان الدراسات لرطوبة التربة قد قادت الى تقدم مهم في الطرق لقياس رطوبة التربة في مكانها واختلافاتها مع الزمن[15,19,34] . ان الطريقة الدقيقة تقريباً هي القياس الجذبي (gravmetric) لنماذج التربة ، حيث ان النماذج توزن ، وتجفف ، ويعاد وزنها . وثم تطوير لهذه الطريقة يفيد كتل الامتصاص الجذبية (gravmetric sorption blocks) التي قد تغمر وتزال من التربة .

ومثل هذه الكتل المسامية تعمل بقياسات للرطوبة موازنة لرطوبة التربة لذا فإن وزنها يمكن ان يقارن مع رطوبة التربة . ان ريتشارد (Richards)[30] وآخرين قد طوروا مشداداً (tensiometer) لقياس الشد ، او الجهود الشعرية للتربة (capillary potentials). هذه القياسات يمكن التعبير عنها بمصطلحات من كمية الرطوبة لتربة معطاة وتجهز بتسجيلات مستمرة لاختلافات رطوبة التربة .

ان المشداد يتكون أساساً من قدح مسامي مغمور (مطمور) في التربة ومتصل بأنبوب مملوء بالماء الى مضغاط (manometer) .

ان القياسات المشدادية لرطوبة التربة محدودة لتلك الشدود في مدى يتراوح من صفر (عند الاشباع) الى حوالي (0.85) جو .

وهذا يشمل (encompass) نصف مدى الماء المتوفر أو أكثر ، معتمداً على نسيج (texture) التربة ولقد انشئت مؤخراً اجهزة متنوعة كلها تستخدم مبدأ قياس المقاومة الكهربائية للمادة المطمورة في التربة وربطه بكمية رطوبة التربة .[48,12,11,6,5]



شكل (2.4) ارتفاع الماء في الانبوب الشعري

جص باريس (Plaster of Paris) ، النايلون ، والزجاج الليفي (fiberglass) من خلال اخرين قد استخدمت كمواد لامتصاص الاقطاب المتقاربة . لأن التوصيلية الحرارية للتربة تجهز بقياس لرطوبة التربة ، لأن وحدات متعددة قد تطورت حيث ان العنصر الحراري (heating element) يطمر في التربة [35].

ان طريقة استطارة النيوترون كفيلة بطريقة عمل جديدة تبشر بالنجاح لتحديدات رطوبة التربة [3,4] . حيث من المعلوم ان النيترونات السريعة تتباطأ بالاصطدام مع الهايدروجين بصورة فعالة اكثر من اي عنصر شائع آخر ، وحيث ان الهيدروجين في معظم الترب موجود غالباً بصورة تامة على هيئة ماء . وبتطبيق هذه الحقائق ، فان مصدر للنيوترون السريع متحد مع عداد للنيترون البطيء تنزل في حفرة خاصة مبطنة في التربة . معدل تعداد النيوترونات المبطئة بتأثير هيدروجين التربة هي حساب لكمية رطوبة التربة .
حالما تعاير الحفرة (calibrated) . فان اختلافات العمق والزمن للرطوبة يمكن تحديدها بسهولة .

– المنطقة الوسطى –
INTERMEDIATE ZONE

ان المنطقة الوسطى تمتد من الحافة السفلى لمنطقة ماء التربة الى الحد الأعلى للمنطقة الشعرية الشكل (2.2) . هذه المنطقة تختلف بالسمك من الصفر ، عندما تندمج المناطق المحددة مع مستوى ماء عالي قريباً من سطح الارض ، الى عدة مئات من الاقدام تحت ظروف مستوى الماء العميق .

ان المنطقة تقوم ابتدائياً بدور الموصل بين المنطقة التي قرب سطح الارض بتلك القريبة من مستوى الماء ، التي تكون فيها حركة الماء عمودية باتجاه الأسفل ويجب ان يمر خلالها الماء القشري غير المتحرك* او ال (Pellicular) في المنطقة الوسطى يحمل في مكان بواسطة القوى الشعرية او الاسترطابية (Hygroscopic) . وهو مكافيء الى السعة الحقلية في منطقة ماء التربة .

ان الماء الفائض هو ماء انجذابي ، وهو يتحرك باتجاه الاسفل تحت تأثير الجاذبية .

المنطقة الشعرية CAPILLARY ZONE

ان المنطقة الشعرية تمتد من مستوى الماء الى الاعلى حتى حد الارتفاع الشعري للماء . وقد قام عدد من المتحريين بدراسة ارتفاع وتوزيع الماء في المنطقة الشعرية على اساس خصائص الاوساط المسامية لها . والا امكن للفراغ المسامي (Pore space) ان يكون مثالياً ليمثل انبوباً شعرياً ، فان الارتفاع الشعري h_c (الشكل 4.2) يمكن اشتقاقه من التوازن بين الشد السطحي للماء ووزن الماء المرتفع لهذا فان :

$$h_c = \frac{2T}{r\gamma} \cos \lambda \qquad \ldots (2.2)$$

وحيث T هو الشد السطحي . و (γ) هو الوزن النوعي للماء . و (r) هو نصف قطر الانبوب . و (λ) هي زاوية التماس بين السطح الهلالي وجدار الانبوب بأخذ ($T = 0.074$ غرام / سم عند درجة حرارة مقدارها 50 فهرنهايتية . $\gamma = 1$ غرام / سم^3 . لذا فان الارتفاع الشعري بالسنتيمترات هو تقريباً :-

$$h_c = \frac{0.15}{r} \cos \lambda \qquad \ldots (2.3)$$

ان زاوية التماس تختلف باختلاف التركيب الكيمياوي للسائل والجدار ، وكذلك تختلف باختلاف الشوائب التي على الجدار ولكنها تصل الى الصفر للماء النقي على الزجاج النظيف . وبافتراض هذه القيمة ، فان الارتفاع الشعري قد يتراوح ما بين جزء من الانج من الحصى ، الى قدم من الرمل ، والى عدة اقدام من الطفل . ومن دراسة اربع عينات مختلفة من الرمل تحت اختلاف التراص (Packing) . فان (ماڤيس Mavis) و (تسو Tsui[20]) قد وجدا أن الارتفاع الشعري الأعظم . بالانجات يمكن ان يقرب بواسطة :

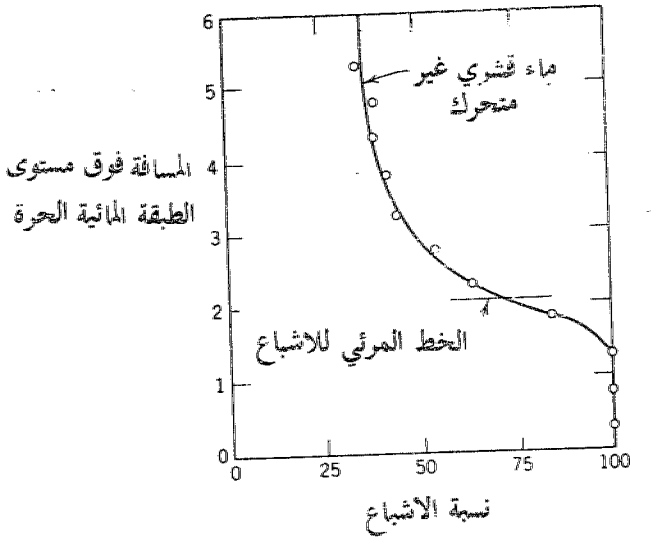
$$h_c = \frac{2.2}{dH} \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right)^{2/3} \qquad \ldots (2.4)$$

* الماء (القشري) غير المتحرك *Pellicular* . جاء من المصطلح اللاتيني *pellicula* . والمشتق من الأصل *pellis* والذي يعني الجلد .

حيث (dH) هو معدل قطر الحبيبة التجانسي harmonic mean graindiameter مقاساً بالملليمتر . و (α) هي المسامية .

وليس فقط سيختلف سمك المنطقة الشعرية مع التربة او نسمج الصخرة ، ولكن مع طبقة معطاة محتوية على مسامات لا تحصى ذات مدى واسع في الحجم ، فان الحد الأعلى سيشكل ايضاً حافة خشنة (Jagged) عند دراستها مجهرياً . على حين لو اخذت عينة تدرك بالعين لنتج نقص تدريجي في كمية الرطوبة مع الارتفاع . كافة المسامات التي تكون فوق مستوى سطح الطبقة المائية الحرة . تحتوي على ماء شعري اعلى ، فقط المسامات الأصغر المتصلة تحتوي على الماء . وتبقى اعلى ، فقط المسامات الأصغر القليلة والمتصلة تحتوي على ماء مرتفع فوق مستوى الماء . هذا التوزيع للرطوبة فوق مستوى الماء الموضح في الشكل (2.5) من معطيات اختبار التصريف على رمل ناعم بواسطة (Lambe)[18]

لاحظ أن الاشباع يوجد فوق مستوى الماء ، ذلك ان الخط المرئي (Visual) للاشباع يختلف عن الخط الحقيقي للاشباع ، ولان الجزء الاعلى للمنحني يصبح محاذياً (asymptotic) الى كمية الماء القشري غير المتحرك لـ (Pellicular) ؟ .



شكل 2 - 5) توزيع الرطوبة في الرمل الناعم فوق مستوى الطبقة المائية الحرة بعد التصريف (لامب [18])

المنطقة المشبعة SATURATED ZONE

المياه الجوفية تملأ كل الفرج في المنطقة المشبعة ، لذا فان المسامية هي القياس المباشر للماء المحتوى لكل وحدة حجم ؛ ليس كل هذا الماء قد يزال من الارض بواسطة التصريف أو الضخ من البئر . على اي حال ، فان القوى الجزيئية وقوى الشد السطحي تتحمل جزء من الماء في مكانه لهذا ، فان الماء المتبقي (retained) هو ذلك الذي يحمل من مكانه ضد الجاذبية . ان الاحتفاظ النوعي للصخرة أو التربة يعبر عنها كنسبة مئوية لحجم الماء الذي سيحتفظ به بعد الاشباع ضد قوة الجاذبية الى حجمه الاصلي .

اذا كان (S_r) هو الاحتفاظ النوعي . لذا : —

$$S_r = \frac{100w_r}{V} \qquad \text{.... (2.5)}$$

حيث w_r هو الحجم المشغول بواسطة الماء المحتفظ و (V) هو الحجم الكلي (gross volume) للصخرة أو التربة ، وعلى الجانب الآخر ، نرى الماء الذي يمكن نزحه او تصريفه يعبر عنه بالعطاء النوعي (S_y) . ان المصطلح ، المسامية الفعالة (effective porosity) له معنى مرادف ويمكن ان يعرف بنسبة ويعبر عنه بنسبة مئوية لحجم الماء الذي — بعد اشباعه — يمكن ان يصرف أو ينزح بالجاذبية الى حجمه الاصلي . لهذا :

$$S_y = \frac{100w_y}{V} \qquad \text{..... (2.6)}$$

حيث (w_y) هو حجم الماء المصرف ، لان ($w_r + w_y = w$) . فمن الواضح ان :

$$\alpha = S_r + S_y \qquad \text{..... (2.7)}$$

لهذا فان العطاء النوعي هو جزء (fraction) من مسامية التكوين الصخري الحاوي على الماء . وتعتمد القيم على حجم الحبيبة ، وشكل وتوزيع المسامات ، وتراص (compaction) الطبقة . قد يصل العطاء النوعي لرمل منتظم الى (30%) ويساويه . ولكن معظم التكوينات المائية الغرينية (alluvial aquifers) تعطي فيما تتراوح مابين (10) الى (20%) .

وقد لخص العالم ماينزر (Meinzer)[24] سبع طرق لتحديد العطاء النوعي هي :

1. اشباع النماذج من المختبر مع السماح لها لان تتصرف (allowing them to drain)
2. اشباع جسم معقول في الحقل لمادة تقع فوق مستوى الماء وفوق المنطقة الشعرية والسماح له بالتصريف باتجاه الاسفل طبيعيا .
3. تجميع النماذج آنيا فوق المنطقة الشعرية مباشرة بعد ان ينخفض مستوى الماء مسافة ممكن تقديرها .

4 . التحقق (ascertaining) من حجم الترسبات المصرفة بضخ كمية معلومة من الماء من البئر .

5 . التحقق من حجم الترسبات المشبعة بكمية النضوح المقاسة من مجرى واحد أو اكثر .

6 . تقدير العطاء النوعي بصورة غير مباشرة بالطرد المركزي لقياس مكافىء الرطوبة .

7 . عمل تحليلات ميكانيكية وحسابات للمسامية وتقدير الاحتفاظ النوعي والعطاء النوعي بناءاً على ذلك .

ان جميع هذه الطرق لها تحديدات ، لهذا ، فان نماذج المختبر قد تكون مضطربة (disturbed) او غير ممثلة ، في الفحوصات الحقلية ، فمن الصعب السيطرة وقياس المتغيرات . والتقديرات غالبا ماتفتقد الدقة .

ان الطريقة الموضحة لفحص ضخ البئر مشروحة في الفصل الرابع ، وهي عموما تعطي افضل نتيجة للقياس الحقلي .

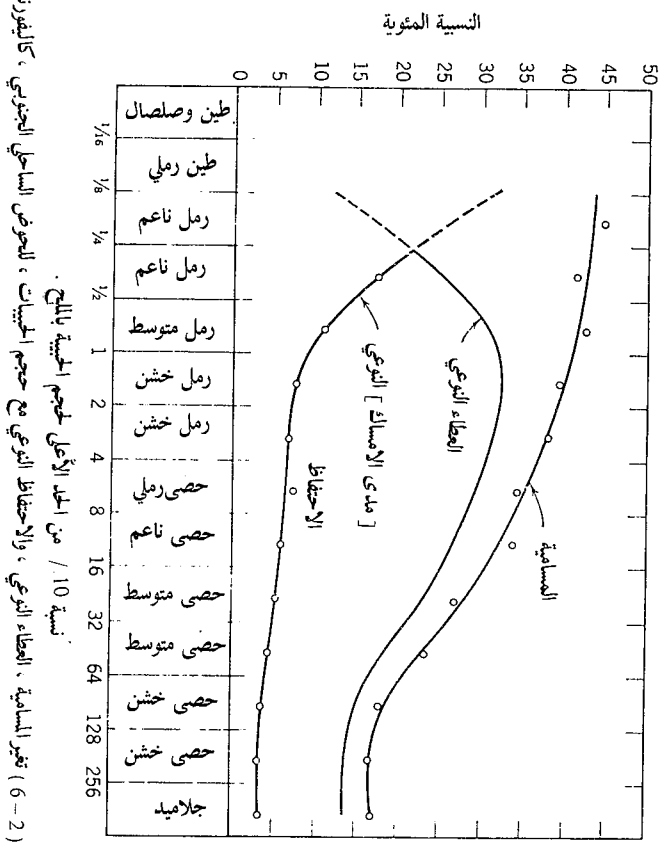
ان المعلومات الكمية عن العطاء النوعي تم الحصول عليها من التحري الحقلي الواسع للحوض الساحلي الجنوبي من لوس انجلوس من منطقة كاليفورنيا[13] حيث ان نماذج متعددة قد أخذت من السطح المكشوف (surface exposure) ، والحفر الاختبارية (Test holes)

جدول رقم (2-2) العطاء النوعي لتكوين مائي رسوبي في وادي ساكرامنيتو في كاليفورنيا (بولند ، وجماعته 28)

المـــواد	النسبة المئوية للعطاء النوعي
الحصى	25
الرمل والذي يحوي رمل مع حصى وحصى مع رمل	
الرمل الناعم . الرمل الصلب . الرمل المتماسك .	20
الصخر الرملي والرسوبيات ذات العلاقة	10
الطين والحصى ، الحصى والطين ، الحصى المتماسك والرسوبيات الأخرى	5
الطين ، الطمى ، الطين الرملي ، الحمم الصخرية والصخور الأخرى الناعمة الحبيبات	3

والآبار . ان المساميات والاحتفاظات النوعية قد حددت في المختبر والعطاءات النوعية قد أمكن الحصول عليها كفرق . والمنحنيات المتوسطة (Mean curves) الموضحة لتغيرات المسامية ، والعطاء النوعي ، والاحتفاظ النوعي مع حجم الحبيبة تظهر في الشكل (2.6) .

بولند (Poland) وغيره ، في تحر آخر قد قدروا سعة خزن المياه الجوفية الكلي (total ground water storage capacity) لوادي (ساكرامينتة في كاليفورنيا بما يقرب من (3000) سجل اداء يومي (well logs) للابار التي اعطت معلومات عن الطبقات تحت السطحية ، حيث تم تعيينها كمادة .



الشكل (2 – 6) تغير المسامية ، العطاء النوعي ، والاحتفاظ النوعي مع حجم الحبيبات ، للحوض الساحلي الجنوبي ، كاليفورنيا
(بعد ايكس [13]Eckis)

نسبة 10 / من الحد الأعلى لحجم الحبيبة بالملم .

جدول (2-3) تخمين للعطاء النوعي لمجموعات خزن في وادي ساكرامنيتو كاليفورنيا
(بولند وجماعته 28)

مجموعة المخزن	النسبة المئوية للعطاء النوعي			
	عمق المنطقة 20-50 قدم	عمق المنطقة 50-100 قدم	عمق المنطقة 100-200قدم	كل المناطق (20-200) قدم
سهول الانهار الفيضية وترسبات القنوات	11.7	10.5	8.0	9.3
السهول الغرينية الواطئة والترسبات الغرينية المروحية	8.0	7.5	6.9	7.3
الترسبات الغرينية المقطوعة	6.2	6.0	6.2	6.2
الترسبات الحوضية	5.0	4.5	6.0	5.4
عموم الوادي	7.9	7.2	6.9	7.1

العطاءات النوعية عينت كما هي مبينة في الجدول (2.2) . والعطاءات النوعية قد حددت لأعماق من (20) الى (200) قدم .. ان النتائج المبينة في جدول (2.3) قد صنفت بواسطة مجموعات الخزن (storage groups)المالكة لبعض صفات طبيعية وجيولوجية مشتركة .

والقيم المتناقصة مع العمق .والمرتبطة بالتماسك (compaction) يمكن ملاحظتها في النهر والترسبات النهرية الغرينية . ان الوادي الذي تزيد مساحته على (2,500,000) فدان قد قدر بان له عطاء نوعياً متوسطاً (7.1%) وسعة خزن المياه الجوفية في منطقة العمق من (20) الى (200) قدم لـ 33,700,000, acre - ft .

التكوينات الجيولوجية كتكوينات مائية
(Geologic Formations as Aquifers)

ان تكوين الصخرة او المادة التي ستعطي كميات مفيدة من الماء قد عرفت كتكوينات مائية . ان التكوينات الجيولوجية المختلفة التي تعمل كتكوينات مائية مشروحة في الفقرات التالية المبنية على عمل توماس (Thomas[41])

والغالب أن (90%) من جميع التكوينات المائية المتطورة تتكون من صخور غير متماسكة ، غالباً ما تكون حصى ورملاً . هذه التكوينات الصخرية الحاوية على الماء قد تقسم على اربعة أجزاء . مبنية على طريقة وجودها (manners of occurrence) وهي مجاري الماء (water courses) . والوديان المطمورة أو المهجورة . والسهول . والوديان التي بين الجبال (inter montene valleys). ان مجاري او مسالك الماء (courses) تتكون من طمى أو غرين (alluvium) يشكل ويطن قنوات المجاري . بالاضافة الى تكوينه للسهول الفيضية المجاورة . والآبار المثبتة في الطبقات العالية النفاذية والمجاورة للجداول تنتج كميات كبيرة من الماء ، مثل الترشيح الذي يحدث من هذه الجداول فانه يزيد من تجهيزات المياه الجوفية . ان الوديان المطمورة أو المهجورة هي الوديان التي لاتشغل آنياً بالجداول التي كونتها . على الرغم من أن وديانا كهذه قد تشابه مجاري الماء في النفاذية وكمية خزن المياه الجوفية ، فان اعادة التغذية والقدرات للعطاء الدائمي هي عادة أقل

ان السهول الواسعة المبطنة بواسطة ترسبات غيرمتماسكة موجودة في الولايات المتحدة. في بعض الأماكن تشكل طبقات الرمل والحصى تكوينات صخرية حاوية على الماء ، وتكون ذات أهمية تحت هذه السهول ، في اماكن اخرى تكون رقيقة نسبيا ولها انتاجية محدودة. وبعض السهول على جوانب الأراضي المرتفعة أو لها مظاهر أخرى تعمل كمصدر للترسبات الرسوبية . ان خزانات المياه الجوفية يعاد تغذيتها رئيسيا من المناطق السهلة لنفوذ الماء الى اسفل الترسيب ومن الجداول الحينية (Occasional) . اما الوديان بين الجبال (intermontane) فانها مبطنة بأحجام هائلة من مواد الصخر غير المتماسكة المشتقة من تعرية الجبال المحيطة . كثير من هذه تقريبا احواض منفردة ، ومفصولة بواسطة سلاسل جبلية . وتوجد في الولايات المتحدة الغربية . ان طبقات الرمل والحصى لهذه التكوينات الصخرية الحاوية على الماء تنتج كميات كبيرة من الماء ، ومعظمها تمتلىء ثانية بواسطة النضوح او التسرب من المجاري في المراوح النهرية عند (allurial fans) مداخل المنحدرات (canyons) او الوديان الضيقة الجبلية . وتختلف احجار الكلس بصورة واسعة من حيث الكثافة ، والمسامية ، والنفاذية . معتمدة على درجة التماسك (consoli) واتساع المناطق النفاذة بعد الترسيب .

وتلك الأكثر أهمية كتكوينات مائية تحتوي على نسب حجمية من الصخرة الاصلية التي ذابت وزالت .

وتتراوح الفتحات من حجر الكلس من مسامات اصلية مجهرية الى فجوات (caverns) ذوبان كبيرة مكونة قنوات تحت سطح الأرض (Subterranean) . وهي كبيرة بصورة كافية لحمل تدفق المجرى بأكمله .

ان المصطلح ، « النهر المفقود » (Lost river) قد أطلق على المجرى الذي يختفي بصورة كاملة تحت الأرض في منطقة كلسية .

والينابيع الكبيرة توجد عادة في المناطق الكلسية . ان ذوبان كاربونات الكالسيوم بالماء يسبب تواجد مياه جوفية عسرة بصورة متغلبة في التكوينات المائية الكلسية كذلك . وباذابة الصخرة ، يحاول الماء أن يزيد الفراغات المسامية والنفاذية مع الزمن . ان التطور النهائي للارض الكلسية هو ان تكون منطقة (Karst) ، حيث ان التصريف تحت السطحي خلال حجر الكلس يخلق خزانات لمياه جوفية كبيرة .

على الرغم من عدم شيوعه فان الجبس (Gypsum) هو الآخر صخر قابل للذوبان . تطور الى امتداد محدود ككوينات صخرية حاوية على الماء .. الصخور البركانية قد تكون تكوينات صخرية نفاذة حاوية على الماء . ان البازلت المتدفق (basalt flow) نفاذ جداً . اذا قورن بحجر الكلس في هذا الاعتبار . والمناطق النفاذة الأخرى في الصخور البركانية تشمل البريشيا المتدفقة (flow breccia) والمسامية التي قد توجد بين طبقات الحمم (Lava) ، وانابيب الحمم ، وشقوق التقلص (Shrinkage cracks) الناتجة عن المفاصل (Joints) . معظم الينابيع الكبرى في الولايات المتحدة مرتبطة مع ترسبات البازلت . ان الشكل (Phyolites) الحممي للجرانيت (الرايولايت) ذو نفاذية اقل من البازلت على حين ان الصخور المقتحمة (intrusive) الضحلة يمكن اعتبارها عمليا غير نفاذة للتدفق .

والحجر الرملي (Sandstone) والجلاميد (conglomerate) انما هي اشكال متماسكة (cemented) للرمل والحصى . لذا . فان مساميتها وعطاءها قد قل بسبب المادة اللاصقة (cement) .

ان أفضل أنواع التكوينات الصخرية الرملية الحاوية على الماء ؛ هي تلك التي تكون متماسكة (cemented) جزئيا ، او تلك التي تعطي الماء خلال مفاصلها . والجلاميد لها توزيع محدود ولذا فإنها غير مهمة ككوين صخري حاوٍ على الماء .

ان الصخور المتبلورة والمتحولة غير نفاذة نسبياً ، وهي تكوينات صخرية فقيرة في احتوائها على الماء ومتى ماوجدت هذه الصخور قرب السطح تحت ظروف متصدعة (fractured) او متكسرة ومتفسخة فانها قد تتطور الى آبار صغيرة للاغراض المنزلية .

الطَفل والمواد الخشنة الممزوجة مع الطَفل هي عموما مسامية ، ولكن مساحاتها من الصغر بحيث يمكن اعتبارها غير نفاذة نسبيا .
والتربة الطينية تؤدي الى تجهيزات مياه منزلية صغيرة من الآبار الضحلة .

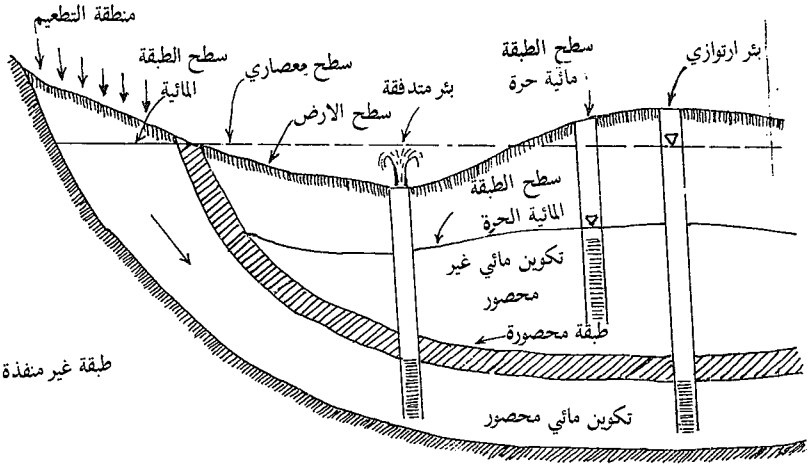
انواع التكوينات المائية

(Types of Aquifers)

معظم التكوينات المائية ذات امتداد مساحي كبير ويمكن تصورها كمستودعات خزن تحت الارض فالمياه تدخل الخزان نتيجة شحنه طبيعيا أو اصطناعيا . وتجري تحت فعل الجاذبية أو تستخلص بواسطة الآبار . اعتياديا ، فان الحجم السنوي للماء المزال أو المحل يمثل جزءاً صغيراً فقط من سعة الخزن الكلية والتكوينات المائية يمكن تصنيفها محصورة وغير محصورة ، معتمدة على وجود او غياب مستوى الماء .

والتكوين المائي غير المحصور هو ذلك الذي يعمل فيه مستوى الماء كسطح أعلى لمنطقة الاشباع . وهو ايضا يعرف بالحر (free) . و (Phreatic) او التكوين المائي غير الارتوازي . ان مستوى الماء يتغير بشكل تعرجات (undulating) وكذلك في الانحدار ، معتمدا على مناطق التغذية (التطعيم) والتصريف ، والضخ من الابار ، والنفاذية .

ان الارتفاعات والانخفاضات في مستوى الماء توافق التغيرات في حجم الماء المخزون ضمن التكوين المائي . والشكل (2.2) هو لمقطع مثالي لتكوين مائي غير محصور ، ان التكوين المائي الاعلى في الشكل (2.2) هو غير محصور ايضا .....



الشكل (2 – 7) تكوينات مائية محصورة وغير محصورة

والخرائط الكونتورية والمظاهر الجانبية (Profiles) لمستوى الماء يمكن تحضيرها من ارتفاعات الماء في الآبار المخترقة للتكوين المائي لغرض تحديد كميات المياه المتوفرة . من حيث توزيعها ، وحركتها .

وتعرف التكوينات المائية المحصورة ايضا بالارتوازية* او التكوينات المائية pressure (aquifers) الضغطية ، وتوجد حيث تكون المياه محصورة تحت ضغط اعظم من الضغط الجوي وذلك بالتغطية (byoverlying) بواسطة طبقات غير نفاذة نسبيا . إن البئر المخترق مثل هذا التكوين المائي يرتفع منسوب الماء فيه فوق قعر الطبقة الحاصرة (confining bed) كما هو مبين في الآبار الارتوازية والمتدفقة للشكل (2.7) .ويدخل الماء التكوين المائي المحصور في المنطقة التي ترتفع فيها الطبقة الحاصرة الى السطح ، أو تنتهي تحت الارض ويصبح التكوين المائي غير محصور .

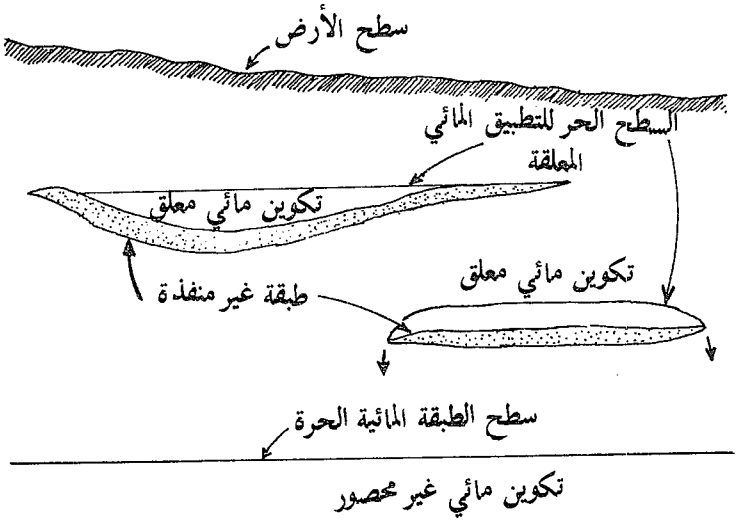
ان المنطقة التي تجهز المياه الى التكوين المائي المحصور تعرف بمنطقة التغذية (او التطعيم) وارتفاعات او انخفاضات الماء في الآبار المخترقة لتكوين مائي محصور ، تنتج بادىء ذي بدء من التغيرات في الضغط عوضا عن التغيرات في حجوم الخزن . وبذلك فان التكوينات المائية المحصورة لها فقط تغيرات صغيرة في الخزن وتعمل بصورة رئيسة كقنوات (condiuts) لنقل الماء من مناطق التغذية الى اماكن التصريف الطبيعي او الاصطناعي .

ان السطح القياسي الانضغاطي (البايزومتري Piezometric) للتكوين المائي المحصور هو سطح خيالي منطبق مع منسوب الضغط الهيدروستاتي للماء في التكوين المائي شكل (7.2) ان منسوب الماء في البئر المخترق لتكوين مائي محصور يحدد ارتفاع السطح القياسي الانضغاطي عند تلك النقطة . واذا وقع السطح القياسي الانضغاطي (البايزومتري) فوق سطح الارض ينتج عنه بئر متدفق .

أنّ الخرائط الكونتورية والمظاهر (profiles) الجانبية للسطح القياسي الانضغاطي يمكن تحضيرها من معطيات البئر المشابهة لتلك التي بمستوى الماء في التكوين المائي غير المحصور .

* ان كلمة ارتوازي (artesien) ذات أصل ممتع . فهي مشتقة من الكلمة الفرنسية (artesien) والتي تعني أو تعود الى أورتويز ضمن مقاطعة في الجزء الشمالي من فرنسا . ولقد تم حفر وفحص أول بئر عميق الى التكوين المائي المحصور في تلك المنطقة وذلك عام 1750 . ويرجع هذا المصطلح أصلاً الى بئر ذو التدفق المائي الحر ، ولكنه في الوقت الحاضر يطبق على كافة الآبار التي تخترق تكوينات مائية محصورة أو بشكل مبسط التكوينات المائية نفسها .

ومن الواجب ملاحظة ان التكوين المائي المحصور يصبح تكويناً مائياً غير محصور متى ما انخفض السطح القياسي الانضغاطي تحت قعر الطبقة الحاصرة العليا .
كذلك وبصورة مشابهة تماماً فان تكويناً مائياً غير محصور يوجد فوق تكوين محصور ، كما هو موضح في الشكل 2 7) وثمة حالة خاصة لتكوين مائي غير محصور هي (التكوينات المائية المعلقة (Perehed aquifer) التي هي موضحة بالشكل (8.2) . وهذا يوجد اينما كان جسم المياه الجوفية مفصولاً عن المياه الجوفية الرئيسة بواسطة طبقة غير نفاذة نسبياً لا امتداد مسامي قليل وبواسطة منطقة التهوية فوق الجسم الرئيس للمياه الجوفية .

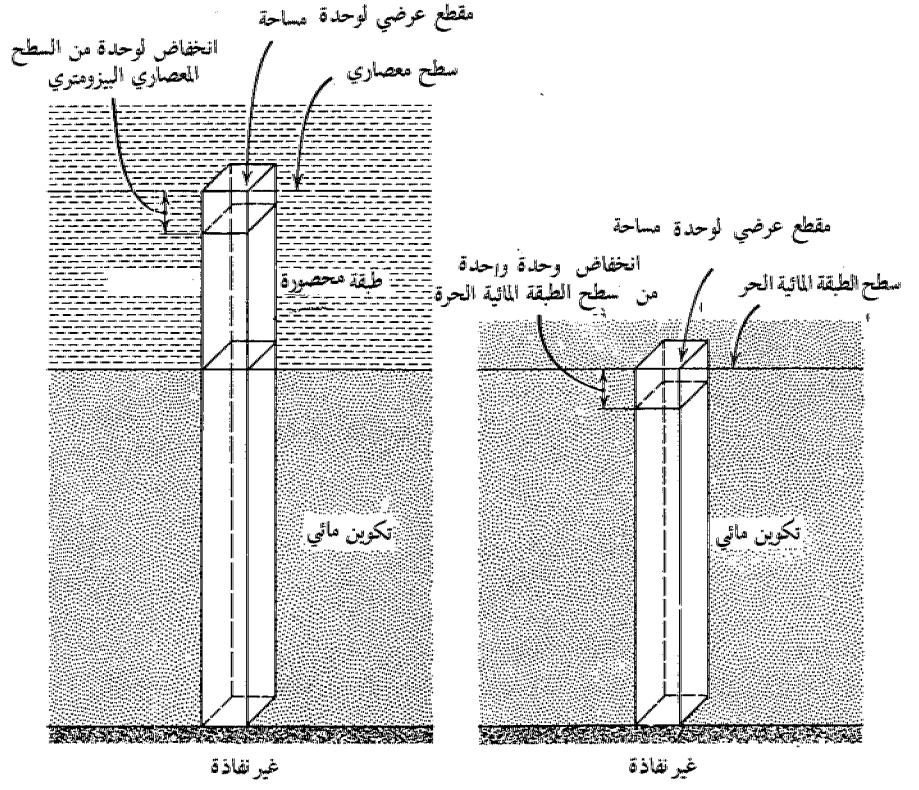


الشكل (2 – 8) تكوينات مائية معلقة

عدسات الطفل (clay lenses) في الترسبات الرسوبية غالباً ما يكون لها اجسام مائية معلقة (perched) ضحلة مغطية لهذه الترسبات . انّ الآبار المخترقة للتكوين المائي المعلق تعطي فقط كميات صغيرة من الماء او مؤقتة والمياه التي تغذي التكوين المائي او تصرف من التكوين المائي الذي يمثل التغيير من حجم المخزون ضمن التكوين المائي للتكوينات المائية غير المحصورة الذي يمكن التعبير عنه ببساطة بواسطة حاصل ضرب حجم التكوين المائي الواقع بين مستوى الماء عند البداية وعند نهاية الفترة الزمنية ومعدل العطاء النوعي للتكوين . في التكوينات المائية المحصورة على اي حال يمكن افتراض التكوين المائي يبقى مشبعاً ، والتغيرات في السطح تنتج بعض التغيرات الصغيرة في حجم المخزون من الماء . لهذا ، فان الضغط الهيدروستاتي ضمن التكوين المائي يساند او يدعم الغطاء ال

(Over burden) على حين ان التركيز الصلب للتكوين المائي يجهز الدعم المتبقي . ومتى ما يختزل الضغط الهيدروستاتي مثلاً بواسطة ضخ الماء من البئر المخترق للتكوين المائي ، فان حمل (Load) التكوين المائي يزداد . ان ضغط (compression) التكوين المائي الناتج الذي ينتزع عنوة بعض الماء يسبب انخفاضاً في الضغط العام وتمدداً قليلاً يعمل على تحرر بعض الماء اللاصق في ذلك التكوين . ان سعة الماء (water yielding capacity) المعطية للتكوين المائي المحصور يمكن التعبير عنها بمصطلحات لمعامل خزنه .

معامل الخزن يعرف بأنه حجم الماء الذي يحرره التكوين المائي منه أو يأخذه الى الخزن لكل وحدة مساحة (surface area) سطحية للتكوين المائي لكل وحدة تغيير في مركبة العمود العمودية على ذلك السطح لعمود رأسي (vertical column) فان قدماً واحداً بقدم واحد ممتداً خلال تكوين مائي محصور ، كما في الشكل (2.9a) فان معامل الخزن (S) يساوي حجم الماء (في القدم المكعب) المتحرر من التكوين المائي عندما ينخفض السطح القياسي الانضغاطي



الشكل (2 – 9) توضيحي لتعريف معامل الاختزان لـ :

أ – تكوين مائي محصور . ب – تكوين مائي غير محصور .

بقدم واحد. في غالبية التكوينات المائية المحصورة. تقع القيم في مدى ($0.00005 \leq S \leq 0.005$) دالة على ان تغيرات ضغطية كبيرة فوق مساحات واسعة تطلب لانتاج عطاءات مائية مهمة

معاملات الخزن يمكن تحديدها من فحوصات الضخ للآبار (الفصل 4) ومن تذبذبات المياه الجوفية نسبة الى الضغط الجوي او تغيرات المد المحيطي (انظر الفصل 6) . معامل الخزن لتكوين مائي غير محصور يقابل عطاءه النوعي ، كما هو مبين في الشكل (2.9b) .

– احواض المياه الجوفية
GROUND WATER BASINS

ان حوض المياه الجوفية يمكن تعريفه بأنه الوحدة الطبيعية (physiography) المحتوية على تكوين مائي كبير أو عدة تكوينات مائية متصلة أو ذات علاقات متبادلة . في الوادي بين سلاسل الجبال يكون حوض التصريف للمجرى السطحي منطبقاً تقريباً مع حوض المياه الجوفية . في مناطق التلال الرملية والكلسية ، حوض التصريف وحوض المياه الجوفية قد يكون لهما أشكال مختلفة تماماً .

ان فكرة حوض المياه الجوفية قد اصبحت مهمة في السنوات الحالية مع الادراك بأن التطور المفرط للمياه الجوفية في جزء واحد من الحوض يؤثر مباشرة على تجهيزات المياه خلال بقية الحوض .

وهذا قد قاد الى تخطيط واسع (basin wide planning) للحوض وتطور المياه الجوفية التي شرحت في الفصل 8 .

– الينابيع –
(SPRINGS)

ان الينبوع عبارة عن تصريف مركز للمياه الجوفية الظاهرة عند سطح الارض كتيار ماء متدفق . ولتمييزه من العيون في مناطق النزيز أو التسرب أو النضوح * التي يستدل عليها بالحركة البطيئة للمياه الجوفية الى سطح الأرض . ان الماء في مناطق التسرب قد يكون بركة ويتبخر أو يجري ، معتمداً على كمية التسرب ، والمناخ ، والطوبوغرافيا (التضاريس) . وتوجد الينابيع في اشكال شتى ، وقد صنفت نسبة لسبب حدوثها أو تركيب صخورها أو درجة

* النزيز أو النضوح يعتبر أحد المصطلحات المستعملة لتعريف حركة المياه خلال الأرض أو خلال وسط تسامي باتجاه سطح الأرض أو سطوح الأجسام المائية . يستعمل هذا المصطلح بكثرة في المصطلحات الهندسية وهو ذو علاقة بحركة المياه الجوفية من والى سطوح الأجسام المائية . خاصة حينما تكون مرتبطة بتراكيب معنة كالسدود والقنوات والمبازل .

الحرارة فيها والمتغيرات فيها . لقد قسم العالم براين (Bryan[8]) جميع الينابيع الى :-

أ – تلك الناتجة من قوى غير انجذابية .

ب – تلك الناتجة من قوى انجذابية .

تحت الجزء الأول الذي يشمل الينابيع البركانية . المتعلقة ، بالصخور البركانية وينابيع الشقوق (fissure) الناتجة من الشقوق (oracks) الممتدة الى أعماق عظيمة من القشرة الأرضية . مثل هذه الينابيع تكون حرارتها عالية بالقياس الى المياه الجوفية الموضعية الاعتيادية . حيث أن المصطلحين النسبيين « الينابيع الدافئة » « والينابيع الحارة » هما الشائعان.

مياه الينابيع الحرارية يكون معدنيا بصورة عالية اعتيادياً . وقد يتكون من الماء الجانح أو الحدث (Juvenile water) أو خليط من المياه الجوفية والماء الجانح . ان الدراسات الواسعة للينابيع الحرارية قد عملت في الولايات المتحدة (47,46,38) حيث سجل اكثر من (1000) من هذه الينابيع .

الشكل (2 10. يوضح توزيعها الاقليمي اوحسب المناطق .

اما الينابيع الجذبية (gravity springs) التي تنتج من تدفق الماء تحت الضغط الهيدروستاتي ، فن الانواع التالية منها تمت معرفته : –

ينابيع الانخفاض (depression springs) – المتكونة عندما يقطع سطح الأرض مستوى الماء الجوفي .

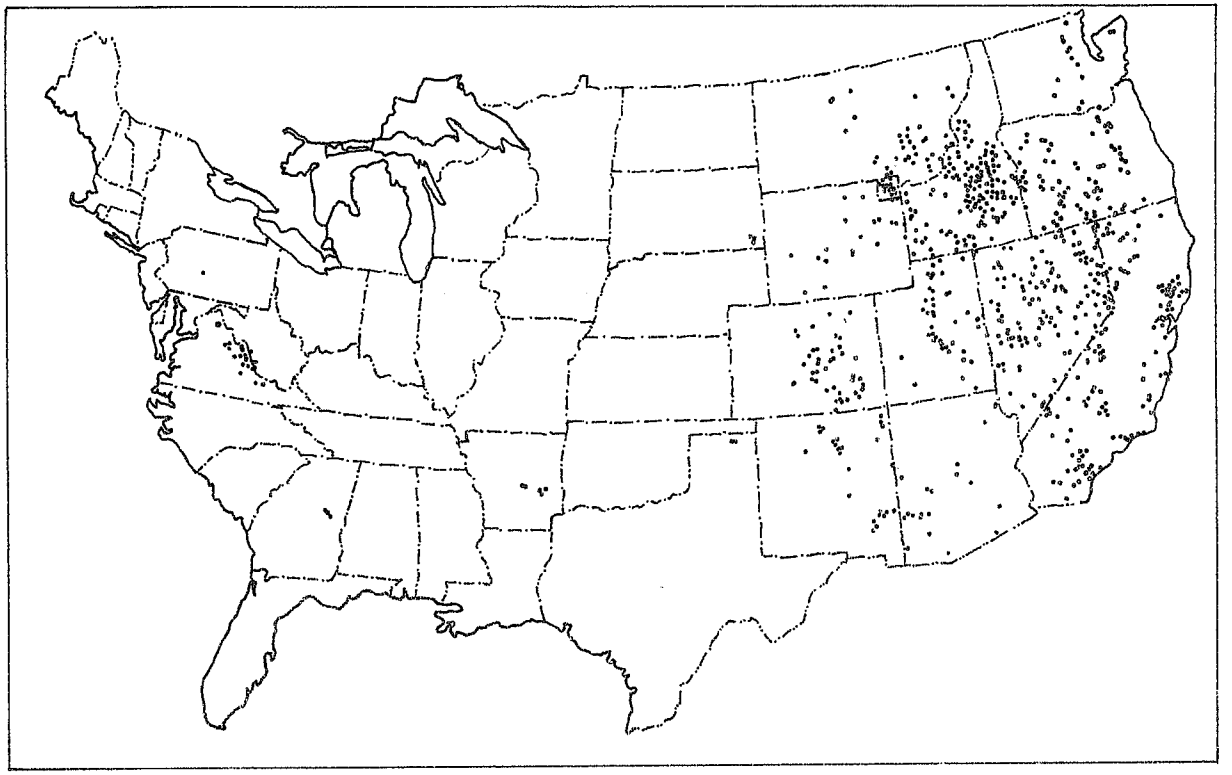
وينابيع التماس (contact springs) – الناتجة بواسطة تكوين مائي نفاذ مغطيا تكويناً مائيا اقل نفاذية يقطع سطح الارض .

والينابيع الارتوازية (Artesian Springs) – الناتجة من تحرر الماء تحت ضغط من التكوينات الصخرية المحصورة الحاوية على الماء . أما عند الجزء المكشوف (outcrop) للتكوين الصخري الحاوي على الماء او خلال الفتحات من الطبقة الحاصرة .

والينابيع الأنبوبية او المتصدعة – (fractere or tubular springs) الناشئة من القنوات المدورة او المستديرة ، مثل انابيب (lava tubes) الحمم او قنوات المحلول ، او الصدوع في الصخور غير النفاذة والمرتبطة بمجهز للمياه الجوفية .

ولدراسة كمية او مقدار الينابيع ، اقترح العالم ماينزر (Meinzer) تصنيفا بواسطة التصريف.

ان النظام الذي جاء في القبول العام موضح في الجدول 2 14 . طبقا للتحريات على العيون و (الينابيع) الكبيرة في الولايات المتحدة . حيث يوجد (65) ذو درجة اولى ، وعدة مئات ذات درجة ثانية . والاف ذات درجة ثالثة .



الشكل (2 – 10) الينابيع الحرارية في الولايات المتحدة (ستيرنز ، وستيرنز وورنك 38).

القيمة	التصريف
الأول	اكبر من 100 قدم^3 / ثانية
الثاني	10 — 100 قدم^3 / ثانية
الثالث	1 — 10 قدم^3 / ثانية
الرابع	100 كالون / دقيقة (0.22 — 1) قدم^3 / دقيقة
الخامس	10 — 100 كالون / دقيقة
السادس	1 — 10 كالون / دقيقة
السابع	1 باينت / دقيقة ـ 1 كالون / دقيقة
الثامن	أقل من 1 باينت / دقيقة (180 كالون / يوم)

من ينابيع الدرجة الاولى ، نجد أن (38) ينبوعاً قد نشأ من الصخور البركانية و (24) ينبوعاً من حجر الكلس و (3) من الحجر الرملي . تلك الينابيع وجدت في الصخور البركانية في كاليفورنيا ، وايداهو . واوريغان . على حين ان الينابيع الموجودة في حجر الكلس تتوفر في منطقة (ميزوري — واركانساس) . وتكساس ، وفلوريدا ، وتلك الينابيع الثلاثة الضخمة من الحجر الرملي قد نشأت خلال الفوالق او فتحات اخرى من مونتانا .

ان معظم الينابيع تتذبذب في معدل تصريفها ، وهذه التذبذبات ترجع الى الاختلافات في معدل الشحن بفترات تتراوح من دقائق الى سنوات ، معتمدة على الظروف الجيولوجية والهيدرولوجية .

والينابيع الدائمية تنزح من (drain) تكوينات مائية نفاذة وواسعة وتتصرف خلال السنة على حين الينابيع الوقتية (inter miffent) تتصرف فقط خلال اجزاء من السنة ، حينما يكون تطعيم المياه الجوفية من الامطار غير كاف ؛ لتحافظ على تدفقها . ولوحظ بأن مناطق الصخور البركانية وتلول الرمل تكون ينابيعها الدائمية ذات تصريف ثابت تقريبا . أما الينابيع التي تبدي تذبذبات تصريف منتظم غير مرتبطة بسقوط الأمطار أو التأثيرات الفصلية في ينابيع (periodic springs) دورية . مثل هذه التذبذبات قد تكون متسببة عن الاختلافات في النتح (Transpiration) . بواسطة تغيرات الضغط الجوي ، وبواسطة الامواج (tides) المؤثرة على التكوينات المائية المحصورة ، وبواسطة السيفونات (Siphons) الطبيعية العاملة في أحواض الخزن الجوفية .

ان الحمّة (نبع حار) (geyser) . وهو ينبوع حراري دوري ناتج من القوة المنتفخة expansive force للبخار فوق المسخن (Super heated) الناتج بواسطة الماء بتماس مع الصخور المسخنة ، على اعماق عظيمة .

– المياه الجوفية في مناطق الجمد السرمدي –

Ground water in the permafrost region

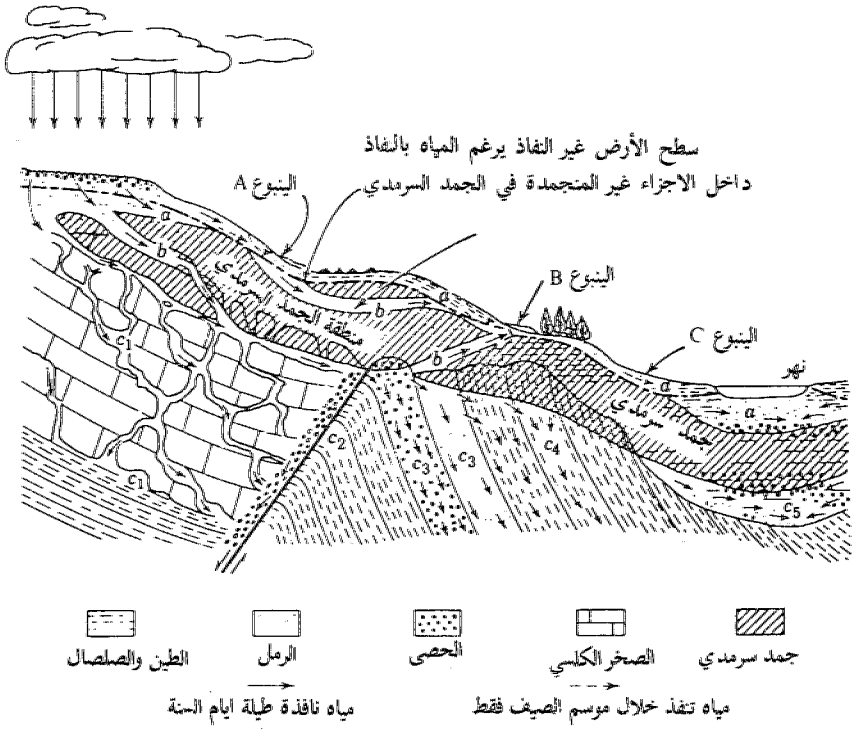
الجمد السرمدي ، او الارض المنجمدة دائماً ، الموجودة فوق مساحات كبيرة في المناطق القطبية من الارض .

ان ستون بالمئة من 60 من الاسكا مشغولة بالجمد السرمدي . وفي هذه المناطق توجد طبقات مختلفة من السمك من عدة اقدام الى عدة مئات من الاقدام تحت سطح الارض وباستمرار فان الانجماد ، باستثناء الطبقة السطحية الضحلة التي هي مذابة فصلياً . فان تجهيز الماء والمشاكل الهندسية المرتبطة بالجمد السرمدي قد تمت دراستها في الاتحاد السوفيتي والاسكا (10,17) .

الماء المحتوي ضمن منطقة الجمد السرمدي غير متوفر بوضوح ، لذا فان المياه الجوفية القابلة للاستعمال توصف بمصطلحات من موقعها نسبة الى الجمد السرمدي .
الماء فوق الجمد السرمدي (Suprapermafrost) . وبين الجمد السرمدي (intraperma frost) وتحت الجمد السرمدي (subpermefrost) يمكن ان يميز . كما هوموضح في الشكل (2 1 1) . والماء فوق الجمد السرمدي تكون مياهه الجوفية فوق طبقة الجمد السرمدي . توفر تجهيزات وقتية من المياه الضحلة . وهي معرضة الى الانجماد الفصلي في الشتاء وقد يمكن تلوثها بسرعة بواسطة النفايات المختلفة المرمية فوق الجمد السرمدي .

الماء الأرتوازي او المحصور (enfrapped) الموجود ضمن الجمد السرمدي يصطلح عليه بالماء ضمن (intropermafrost) الجمد السرمدي .
هذا الماء يوجد في فتحات الجمد السرمدي ، كالتي قرب الانهار ، والفوالق او الكسور في المقاطع الضعيفة او الرقيقة .

ان الماء اعتياديا ليس مصدرا ثابتا في مثل هذه المناطق . وامكانية تطور ملاءمته بواسطة الآبار يجب ان تكون مرتبطة مع الماء فوق الجمد السرمدي او تحت الجمد السرمدي .
ان مياه فوق الجمد السرمدي . المعينة تحت الأرض المنجمدة ، قد تظهر كتجهيزات



a ـ المياه الجوفية فوق الجمد السرمدي .

b ـ المياه الجوفية داخل الجمد السرمدي .

c ـ المياه الجوفية تحت الجمد السرمدي .

c_1 ـ الماء في قنوات الذوبان .

c_2 ـ الماء في الشقوق القديمة .

c_3 ـ الماء في الطبقات المسامية .

c_4 ـ الماء في صخر الأساس .

c_5 ـ الماء في الرسوبيات الغرينية .

ينابيع A و C ستحدث تدفق في الشتاء

الينبوع A و C يتوقف عن الجريان في الشتاء

الينبوع B يحتمل الجريان باستمرار طيلة السنة .

شكل (2 ـ 11) تواجد المياه الجوفية في مناطق الجمد السرمدي لابعد (سيديرستوم ، مونستون ، وسابتيركي)[10]

ثابتة موعودة ، وعلى أي حال ، فان الصعوبات في الموقع ، والتطوير بصورة مكلفة . والتمعدن العالي المحتمل هي من أهم المعوقات الاساس للاستعمالات الواسعة .

وغالبا ما يمتد الجمد السرمدي الى الصخور غير النفاذة ، لذا فان ماء تحت الجمد السرمدي هو غير متوفر . وان افضل مصادر المياه الجوفية في مناطق الجمد السرمدي موجودة في الأرض (thawed ground) المذابة قرب الانهار ، والمجاري ، واجسام المياه الراكدة ، وفي طبقات النهر الجاف والبحيرات وعلى سفوح التلال (South - facing hill sides) الجنوبية المقابلة .

– المياه الجوفية في الولايات المتحدة –

(GROUND WATER IN U.S.A.)

ان مناطق المياه الجوفية في الولايات المتحدة تظهر في الشكل (12.2) ، وقد قام العالم توماس (Thomas)[40] بتهيئة هذه الخريطة ، مبينا مناطق التجهيزات المتوسطة الى الكبيرة للماء القابل للاستعمال ، الذي يمكن الحصول عليه من الآبار . ان المناطق الانتاجية شخصت كمسارات اومسالك المياه ، والوديان المطمورة . التكوينات الصخرية غير المتماسكة والحاوية على الماء ، والتكوينات الصخرية المتماسكة والحاوية على الماء ، والمناطق العقيمة او الخالية تشغل حوالي نصف مساحة البلد ، وهي تحدد عموما تلك المقاطع غير المعلومة ، المنتجة لعطاءات اكثر من (50) غالوناً / دقيقة الى البئر .

ان التوزيع المساحي للمياه الجوفية في الولايات المتحدة ، يمكن وصفه بأفضل صورة بواسطة تقسيم القطر الى مناطق المياه الجوفية ، كما هو مبين في الشكل (2.13) . هذه المناطق تم تطويرها بواسطة دائرة المسح الجيولوجي الامريكية (25,22) ، مبينة على الامتداد المساحي . أما التكوينات الحاملة (Superficial water bearing formations) للمياه السطحية المهمة وتكوينات صخور (bed rock formation) الطبقات . أو النوعين معاً ، اذا حملا تجهيزات المياه المهمة معاً . ويمكن تلخيص المناطق الجيولوجية والمياه الجوفية في هذه المناطق كما يلي : –

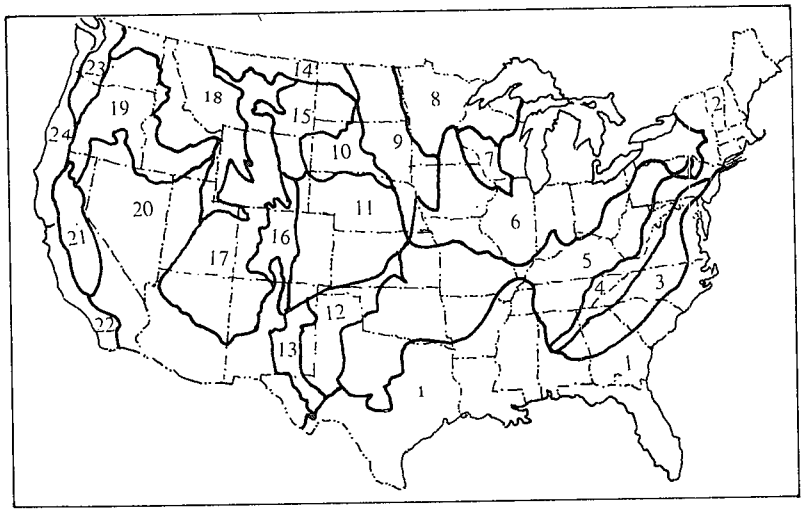
1 . منطقة السهل الساحلي الاطلسي (Atlantic coastal plain province)

الماء مشتق بكميات كبيرة من طبقات العهود الطباشيرية (Cretaceous) . والعهود الثلاثية (Tertiary) ، والعهود الرباعية (Quaternary) . وبصورة رئيسة . فان مكونات هذه الصخور هي الرمل والحصى متداخلين (Interbeded) مع الطفل . ويمكن الحصول على

الشكل (2 – 12) التكوينات المائية الرئيسية للولايات المتحدة الامريكية (تم اعادة طبعها برخص من المحافظين على المياه الجوفية . بواسطة هـ . ي . توماس ١٩٥١ . مؤسسة مكروهل للكتب .

ص ٥١

تجهيزات كبيرة من الحصى النهري في وادي (Mississippi) والمناطق المجاورة . وتشتمل منطقة (Province) على مساحات واسعة من التدفق الارتوازي والمياه الجوفية في هذه المناطق تتراوح ما بين محتويات معادن قليلة الى عالية .



الشكل (2 – 13) مناطق المياه الجوفية في الولايات المتحدة (بعد ماينزر [25]).

2 . منطقة الجرف الشمال الشرقي (Northeastern Drift Province)

تأتي تجهيزات المياه الجوفية الأساس من الجرف الجليدي Glacial drift . ان الطفل الجليد في المنطقة يعطي تجهيزات صغيرة الى عدة ينابيع وبعض الآبار الضحلة . اما الحصى المترسب من الثلاجات فانه يعطي تجهيزات كبيرة وبصورة جديرة بالملاحظة خاصة على الجزيرة الطويلة في نيويورك . وهناك عدة آبار محفورة في الصخور تستلم تجهيزات صغيرة ، وبصورة أساس من مفاصل الصخور المتبلورة أو من الحجر الرملي الثلاثي (Triassic sandstone) . المياه الجوفية عموما ناعمة وبكلمة أخرى تحوي محتويات معدنية قليلة.

3 . منطقة سفوح الجبال (Piedmont Province) : الماء الذي هو عموما قليل المواد المعدنية مجهز بكميات صغيرة بواسطة صخور متبلورة ، وموضعيا بواسطة الحجر الرملي الثلاثي . وهناك عدة آبار محفورة ضحلة مجهزة من الترسبات السطحية او من الجزء المنحل الأعلى من صخر الطبقة .

وهنالك عدد من الآبار محفورة بأعماق متوسطة مجهزة من المفاصل (Joints) من الصخور المتبلورة .

وبعض الآبار من الحجر الرملي الثلاثي تعطي عوضا عن ذلك تجهيزات كبيرة .

4 . منطقة وادي الحاجز الأزرق اللابلاشي (Blue Ridge-Appalachian Valley Province) : هذه المنطقة ذات تضاريس وعرة وتحتوي على ينابيع متعددة تعطي ماء ذا نوعية جيدة من طبقات العصور القديمة او الطبقات المتبلورة لما قبل الكامبريان ، أو صخور مابعد الكامبريان المقتحمة ، حيث إن تجهيزات المياه مشتقة بصورة رئيسة من الينابيع . والجداول المغذاة بالينابيع ، والآبار الضحلة .

5 . منطقة العصر القديم المركزية الجنوبية (South central Paleozoic Province) : ان ظروف المياه الجوفية غالباً ما تكون غير مرضية . ان المصادر الأساس للتجهيز هي حجر الكلس والحجر الرملي العائدة للعصر القديم (Paleozoic) . في خلال الجزء المعتبر للمنطقة فان تجهيزات العصر القديم تكون ضئيلة اوذات نوعية رديئة . مياه العصر القديم العميقة تكون متمعدنة بصورة كبيرة . في عدد من الوديان يمكن الحصول على تجهيزات كبيرة من الرمل والحصى الجليدي المغسول أو الحصى والرمل النهري .

6 منطقة جرف العصر القديم الشمال المركزي (North central Drift - Paleozoic Province) : معظم تجهيزات المياه مشتقة من الجرف (glacial drift) الجليدي . حيث الماء عموماً عسر ولكن من ناحية اخرى جيد . ثمة آبار محفورة متعددة تحصل على تجهيزات ضخمة من المغسول الجليدي او من الحصى المتداخل مع الطفل الجليدي . وهنالك عدة آبار محفورة تمتد نهاياتها الى الحجر الرملي للعصر القديم او حجر الكلس وتستلم تجهيزات وافرة من الماء .

مياه العصر القديم الأعمق هي عموما متمعدنة بصورة عالية وفي عدة مناطق غير ملائمة للاستعمال في حين مياه العصر القديم الأكثر ضحالة هي عموما ذات نوعية مرضية عدا كونها عسرة . في عدة اماكن يمكن الحصول على الآبار المتدفقة من الجرف والتكوينات الصخرية للعصر القديم والحاوية على الماء .

7 . منطقة العصر القديم وسكنس (Paleozoic Province Wisconsin) معظم تجهيزات الماء يمكن الحصول عليها من آبار ذات عمق متوسط محفورة في الحجر الرملي او حجر الكلس الكامبرياني او الاوردوفيسي . هذه الآبار كقاعدة تعطي تجهيزات وافرة من الماء العسر ولكن بطريقة أخرى يمكن اعتبارها مياهاً جيدة . في عدد من الوديان ، يمكن الحصول على مياه التدفقات الارتوازية من التكوينات المائية للعصر القديم . المنطقة

خالية من الجرف الحامل للماء الا في الوديان . حيث يوجد حصى مترسب من الثلاجات حامل للماء .

8- منطقة فوق الجرف المتبلور : Supperior Drift-Crystalline Province

في معظم أجزاء هذه المنطقة يمكن الحصول على تجهيزات المياه المرضية من الجرف الجليدي . حيث يكون الجرف رقيقا ، وتكون تجهيزات المياه على الغالب نادرة وذلك لأن الصخور المتبلورة لما قبل الكامبريان (Precambion) ، في معظم الاماكن تعطي فقط تجهيزات ضئيلة ، وكقاعدة فلا يوجد تكوينات متداخلة للعصر القديم ، والعصر المتوسط ، والعهد الثلاثي تلك التي هي سميكة بكفاية لتعطي مياهاً أكثر ان الجرف ومياه الصخور تتراوح مابين مياه مياه عذبة ذات تمعدن منخفض في ولاية وسكنس (Wisconsain) الى مياه متمعدنة بصورة عالية في الاجزاء الغربية والشمالية .. الغربية للمنطقة .

9- منطقة الجرف الطباشيري لداكوتا (Dakota Drift CretaceousProvince).

ان المصدرين المهمين للمياه الجوفية هما الجرف الجليدي والحجر الرملي لداكوتا . ان الجرف يجهز بآبار متعددة ذات مياه عسرة ولكن من نواحي أخرى يمكن اعتبار هذه المياه جيدة . وهذه الصخور متوفرة لتجهيز المياه في كل أجزاء المنطقة تقريباً . ان حجر رمل داكوتا له مساحات ممتدة للتدفق الارتوازي الذي يجهز عدة آبار متدفقة قوية ، واعداد كبيرة من هذه الآبار يصل عمقها الى اكثر من 1000 قدم .

ان مياه الحجر الرملي لداكوتا متمعدنة بصورة عالية ولكنها مستعملة للتجهيزات المنزلية ، والمياه في معظم اجزاء التكوين عسرة جدا ، ولكن المياه في طبقات قليلة عذبة .

10 . المنطقة الطباشيرية للتلال السود Black Hills Cretaceous Province :

الظروف في هذه المنطقة ، هي على الاطلاق . غير ملائمة نسبة الى تجهيزات المياه الضحلة ؛ وذلك لأن معظم المنطقة مبطنة بطين صفحي يطلق عليه اسم بيير (Pierre shale) او بطين صفحي من مجموعة النهر الابيض (oligocene) . ان التكوين الصخري الاساس الحاوي على الماء هو حجر رمل داكوتا . الذي يبطن المنطقة بأكملها عدا معظم التلال السود .

هذا الحجر الرملي يعطي ماء بصورة ملائمة أينما وجدوفوق الأجزاء المختلفة للمنطقة ؛ اذ يمكن الحصول على آبار تعطي مياهاً متدفقة ، قدتكون في بعض الأحيان بأعماق بعيدة عن السطح . في بعض الأماكن يكون الحجر الرملي مبطناً بطين صفحي ، تجهيزات صغيرة يستحصل عليها من الآبار الضحلة . في التلال السود يمكن الحصول على الماء من مصادر مختلفة . اما من الصخور المتبلورة لما قبل الكامبزياني ، او في الصخور الرسوبية الطباشيرية او العهد الثلاثي .

11- منطقة السهول العظيمة من الطباشيري الى البلايوسين (Great Plains Pliocene - Cretaceous Province) : ان التكوينات الصخرية الأساس الحاوية على الماء لهذه المنطقة هي من حصى ورمل العهد الثلاثي (Late Tertiary) المتأخر (تكوين أوكالالا Ogallalla والترسبات العائدة) وحجر رمل داكوتا . ان ترسبات العهد الثلاثي المبطنة للسهول غير المعراة والناعمة الممتدة ، تجهز كميات كبيرة من الماء الى الآبار الضحلة . ان حجر رمل داكوتا يبطن تقريبا المنطقة بأكملها ويعطي النشأة الى أماكن مختلفة .

ان التدفق الأرتوازي من خلال كثير من المنطقة يقع ايضا على اية حال بعيدا تحت السطح ، لأن يصبح مصدراً عملياً للماء . وحيث تكون طبقات العهد الثلاثي مفقودة او معراة بشكل رديء ويكون حجرورمل داكوتا مطموراً تحت طبقات سميكة من الطين الصفحي كما في أجزاء من شرق كولورادو. فانه قد يكون صعبا حتى كتطوير تجهيزات المياه الصغيرة . ويوجد عدد من الوديان التي تحوي حصى العهد الرباعي (Quaternary) والتي تجهز كميات كبيرة من مياه جيدة اومياه آبار معتبرة للعهد الرباعي والثلاثي مستعملة للارواء .

12 - منطقة السهول العظيمة من العهد القديم الى البلايوسين (Great Plains Pliocene-Paleozoic Province) : ان التكوينات الأساس الحاوية على الماء في هذه المنطقة هي الرمل والحصى للعهد الثلاثي المتأخروالعهد الرباعي ، وهي تعطي نفس الظروف الملائمة كتلك التي في المنطقة السابقة [11] .

ان ترسبات العهد الثلاثي مبطنة خلال المنطقة باكملها عمليا بواسطة طبقات حمر (Red beds) للعصر الثلاثي Triassic او البيرميان (Permian) التي في غالبية الأماكن تعطي مياهاً قليلة أومتمعدنة بصورة عالية فقط . وفي المناطق حيث ترسبات العهد الثلاثي (Tertiary) • هي ضعيفة أومفقودة ، أوالتي تعرت بصورة رديئة فان ظروف المياه الجوفية عموما غير ملائمة .

13. منطقة ترانس – بيكوس العصر القديم .(Trans-Pecos Paleozoic Province) ان صخور الطبقات تتكون من طبقات ثلاثية وكاربونية ، مشتملة على حجر الكلس . الجبس . وطبقات حمرمن الطين الصفحي وحجر الرمل الطيني الصفحي في معظم اجزاء المنطقة . هذه الصخور تعطي فقط تجهيزات ضئيلة لمياه عالية التمعدن الى الآبار العميقة . في وادي بيكوس . على اي حال . يعطي حجر الكلس الكاربوني وحجر الرمل تجهيزات ضخمة الى عدد من الآبار المتدفقة . مياهها عسرة جداً . ولكن تعتبر جيدة بصورة كافية لأغراض الارواء وبعض الأغراض المنزلية . ولاستعمالات بعض الاحياء التي تعيش في المنطقة . وصخور الطبقة مغطاة موضعيا بواسطة الحصى الذي يعود للعهد الرباعي الحامل للماء .

14 . منطقة جرف الشمال الغربي من الأيوسين الى الطباشيري تجهيزات المياه الجوفية (North western Drift-Eocene-Cretaceous Province).

تستحصل من الجرف الجليدي ومن التكوينات الطباشيرية العليا والايوسينية التحتية . حيث الحرف مفقود وغير حامل للماء ، فان الابار تعمق الى التكوينات المبطنة مع بعض النجاح المتغير في وجودها . ان التكوينات الايوسينية والطباشيرية الاخيرة التي تبطن معظم الجزء الشرقي من المنطقة ، هي عموماً تشتمل على طبقات او عدسات من الرمل ، والحصى . أو الفحم التي تعطي الماء . ان التكوينات الطباشيرية التي توجد في الاجزاء الغربية تتكون رئيسيا من طبقات متبادلة من الطين الصفحي والرمل . الحجر الرملي عموماً يعطي الماء ، ولكن الطين الصحفي غير منتج . وحينما يوجد تكوين صفحي سميك تحت الجرف مباشرة أو عند السطح . فانه قد يكون صعباً الحصول على آبار ناجحة . من مناطق معينة ، يعطي حصى الأرض المرتفعة مياهاً الى الآبار الضحلة .

15 . منطقة مونتانا من الطباشيري الى الأيوسين (Montana Eocene-Cretaceous Province) : تكون مياهها عموماً جيدة في الكميات ملائمة للتجهيزات المنزلية والاحياء يحصل عليها من طبقات وعدسات من الرمل . والحصى . والفحم من تكوينات الأيوسين والطباشيري القديم الى الأيوسين التي تبطن معظم المنطقة . هذه التكوينات في هذه المنطقة عادة تستقر على الطين الصفائحي المسمى بيير (pierre shale) الذي هو طين صفحي كثيف وسميك ذي عمر طباشيري . لا يعطي ماء او فقط كميات ضئيلة لمياه ذات نوعية ضعيفة عموماً . لذا فهو يعتمد فقط محلياً ، حيث تزول بعض الطبقات في التكوينات السالفة الذكر . وبذا لا تعطي مياها بصورة ملائمة . فتكون لذلك صعوبة كبيرة في الحصول على تجهيزات مياه مرضية من مثل هذه المناطق في الجزء الشمالي من المنطقة . حيث يوجد جرف جليدي قليل حامل للماء .

16 . منطقة جبال روكي الجنوبية (Southern Rocky mountain Province) : في منطقة الجبال هذه المبطنة لمعظم الاجزاء بواسطة صخور متبلورة ، فان تجهيزات المياه يحصل عليها بصورة رئيسة من الينابيع او من الجداول المغذاة بواسطة الينابيع او الجليد الذائب او من آبار ضحلة جداً قرب المجاري .

17 . منطقة هضبة اريزونا – مونتانا . (Montana - Arizona plateau Province) : تعتبر معظم أجزاء هذه المنطقة الكبيرة قاحلة الى شبه قاحلة مبطنة بواسطة تكوينات رسوبية متراوحة في الاعمار من العصر القديم الى العهد الثلاثي ، غير مشوهة بعنف ولكنها ملتوية ومكسورة بصورة واضحة تعطي علاقة قريبة بين تركيب الصخرة ووجود المياه الجوفية وتسبب

تغييراً سريعاً في ظروف المياه الجوفية من مكان الى مكان . وعلى وجه التحديد فإن تجهيزات المياه ليست كبيرة وليست ذات نوعية مرضية جدا . حيث التكوينات السمكية ذات المواد غير النفاذة تقريباً هي عند السطح . وكذلك فإن الهضبة غير مجزأة بصورة كبيرة . كما في منطقة الخندق(Ground canyon) العظيم. فان تجهيزات المياه ضئيلة محليا . وعلى أي حال فإن تكوينات الحجر الرملي الحاوية على الماء . مثل تلك التي في تكوين كوتيني (Kootenai) او حجر رمل داكوتا ، او تكوين ميسافيرد (Mesaverde) ، يمكن تطويرها . وقد يعطي هذا التكوين تجهيزات لابأس بها من الماء اذ أنه في بعض الاماكن تؤدي لتكوين بعض الآبار المتدفقة . يوجد كذلك ترسبات محلية للحصى الحامل للماء ذي العمر الرباعي

18 . منطقة جبال روكي الشمالية (Northern Rocky mountain Province) :
هذه المنطقة باردة نسبياً ، وجبلية بصورة رئيسة ، ولكن تحتوي على وديان واسعة بين جبلية وسهلية . وهي مبطنة بواسطة صخور مختلفة التراكيب معقدة ومتباعدة . وكما في المناطق الجبلية الاخرى ، فإن تجهيزات المياه يحصل عليها بصورة كبيرة من الينابيع الجبليةوالجداول . وتعتبر المياه متوفرة في اماكن كثيرة خصوصاً حشوة الوادي valley fill المتكونة من حصى ورمل نهري اعتيادي وترسبات الثلاجات الجبال .
وكذلك توجد تجهيزات صغيرة يمكن الحصول عليها من الابار المحفورة في تكوينات الصخور المختلفة ذات اعمار ما قبل الكامبريان والعهد الثلاثي .

19 . منطقة حمم هضبة كولومبيا (Columbia Plateau lava Provine) :—
ان التكوينات الصخرية الأساس الحاوية على الماء لهذه المنطقة ، هي طبقات الحمم المنتشرة بصورة واسعة في تكوينات العهد الثلاثي او الرباعي ومتداخلة او مرتبطة مع حصى ورمل العهد الثلاثي في تكوين ايلنسبرك . وعموماً تعطي الحمم تجهيزات وفيرة لمياه جيدة . وتعطي النشوء الى عدة ينابيع محلية ضخمة ، خصوصاً على امتداد نهر سنيك (Snake) في ولاية ايداهو (Idaho) . وتعتبر الحمم او الحصى والرمل المتداخل هي التي تعطي النشوء الى الآبار المتدفقة . وعلى اي حال . فكثير من هذه الحمم نفاذة بشكل واضح والتضاريس للمنطقة كبيرة جداً بحيث ان مستوى الماء في عدة اماكن بعيد جداً عن السطح ولا يمكن الوصول اليه الا بواسطة الابار العميقة . وفي اجزاء معينة من المنطقة ، يكون المغسول الجليدي وحشوة الوادي الاعتيادية مصادر مهمة ايضاً للماء .

20 . منطقة جنوب غربي بولسون (South western Bolson Province) : ان
المصدر الاساس لتجهيز الماء في هذه المنطقة القاحلة هو الرمل النهري والحصى المكون لحشوة

الوادي ، تليها وديان متعددة متكونة بين الجبال والتي تميز تلك المنطقة عن المناطق الاخرى . في المناطق المرتفعة التي على حافة الوادي يكون مستوى الماء بعيداً عن السطح . أوتكون المياه الجوفية مفقودة في الاجزاء الأقل انخفاضاً المبطنة بواسطة طبقات قاعدية وطفلية calyey . والمياه الجوفية قد تكون ضئيلة في الكمية وفقيرة في النوعية . عند مناسيب متوسطة.

وعلى أي حال ، فان تجهيزات كبيرة من الماء الجيد توجد في عموم المنطقة . ومعظم الماء في وديان هذه المنطقة يسترد بواسطة الابار الضحية ، ولكن توجد عدة ينابيع ومساحات من التدفق الارتوازي . اما في مناطق جبال المنطقة ، فتوجد عدة ينابيع ومجار صغيرة ، وآبار ضحلة ، تمد بتجهيزات ثمينة . وكقاعدة ، فان معظم الاماكن الملائمة في الجبال للينابيع والابار الضحلة هي تلك المبطنة بواسطة الصخور الكرانيتية granitic rocks .

21 . منطقة الوادي المركزي لكاليفورينا (Central Vally of California Province)

مياه جوفية ذات نوعية جيدة موجودة بصورة رئيسة في المخاريط النهرية المتكونة بواسطة المجاري الظاهرة في سيرانيفادا ، وعلى الرغم من ان الماء يمكن الحصول عليه ايضاً من قعر الوادي ، الا أن عطاء المخاريط المحاطة بسلسلة الساحل قليل (coast range) ونوعيته قليلة الجودة والماء عموماً موجود في الاجزاء المركزية والجنوبية ، وافضل في المناطق الشمالية . وتعتبر ترسبات سفوح الجبال المبطنة متكونة من (Pridmont deposits) تكوينات نهرية ، او بحيرات او بحيرة من المياه الحبيبية المتمعدنة بصورة عالية ، وتوجد في الطبقات العميقة من خلال الوادي ، وفي المركز توجد قرب سطح الارض . الري الشديد في الوادي يعتمد على المياه الجوفية التي يتم ضخها من الابار .

22 . منطقة السلاسل الساحلية المركزية والجنوبية لكاليفورينا (Coastal Ranges of Central and southern California Province). : ان اجسام المياه الجوفية الأساس هي في وادي الجبل وسهول سفوح الجبال المتصرفة الى المحيط الهادي . والتكوينات الصخرية الحاوية على الماء تتكون من حشوة الوادي وترسبات حصى ورمل نهري محلياً ، وتجهيزات مياه جيدة متطورة من حجر رمل العهد الثلاثي الأحدث المبطن . ان التطور الثقيل للمياه الجوفية على امتداد الساحل للحاجات المحلية والري ، سببت دخول مياه البحر وتلويثها للتكوينات الصخرية الحاوية على الماء في العديد من الافواه الوديانية للمنطقة .

23 منطقة وديان ويلاميت – بوجيت .(Willamette Valley Puget Sound Province) هنالك جسم ضخم من الطمى يملأ المنخفض أو الغور التركيبي المكون لهذه المنطقة ، وتوجد تجهيزات وفيرة من المياه السطحية التي اعاقت عمليات التحري والاستثمار لموارد المياه الجوفية للمنطقة .

24 . منطقة سلسلة الساحل الشمالية (Northern Coast range province). :

المياه الجوفية موجودة في الحشوة النهرية للوديان المتصرفة الى المحيط الهادي . ثمة منطقة صغيرة في الجزء الجنوبي من المنطقة تحوي مياها جوفية ساخنة اضافة الى بعض الينابيع الحارة ، والمياه شديدة الحرارة . ان وفرة المياه السطحية وطبيعة المنطقة غير المتطورة نسبياً جعلت المعلومات المفصلة عن ظروف المياه الجوفية محدودة .

الفصل الثالث

حركة المياه الجوفية : Ground Water movement

المياه الجوفية في حالتها الطبيعية ذات حركة ثابتة وهذه الحركة يتحكم بها أو تسيطر عليها القواعد الهايدروليكية الثابتة وهي الجريان خلال التكوينات المائية ومعظمها ذات وسط طبيعي مسامي يمكن توضيحه بما يعرف بـ (قانون دارسي) . Darcy-s Law النفاذية التي هي قياس لطبيعة الجريان خلال الوسط هي ثابت مهم في معادلة الجريان . والتعيين المباشر للنفاذية يمكن احتسابها في المختبر أو من القياسات في الحقل .

ان الحقائق أو المعلومات حول حركة المياه الجوفية يمكن معرفتها باضافةمادة الى الماء الجاري ومراقبة آثار الحركة بالنسبة للمسافة والزمن .
من قانون دارسي ومعادلة الاستمرارية يمكن اشتقاق المعادلة الشاملة لجريان المياه الجوفية .

قانون دارسي Darcy's law

اكثر من قرن مضى هنري دارسي* . مهندس هايدرولكي فرنسي قام ببحوث حول جريان المياه وخلال الطبقات الأفقية الرملية المستعملة في ترشيح الماء وقد كتب في عام ١٨٥٦ . مايأتي :-

لقد حاولت بتجارب دقيقة تحديد قانون جريان الماء خلال المرشحات او المصفات وكل التجارب اظهرت بصورة ايجابية ان حجم الماء الذي يمر من خلال طبقة الرمل ذات طبيعة معروفة تتناسب عكسياً مع الضغط وعكسياً تتناسب مع سمك الطبقة الحاجزة لذا باعطاء الرمز S للمساحة السطحية للمرشح أو المصفات .

K = معامل يعتمد على طبيعة الرمل

e = سمك طبقة الرمل .

$P - H_0$ = الضغط تحت الطبقة المرشحة .

$P + H$ = الضغط الجوي مضافا الى عمق الماء فوق المرشح أو المصفات

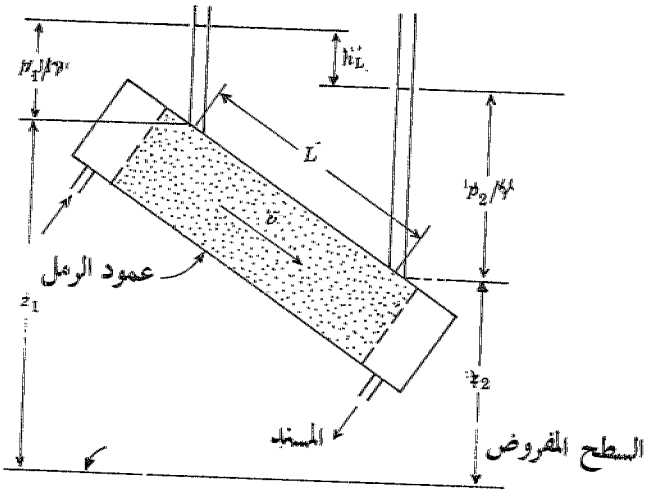
الجريان من هذه الحالة الاخيرة (Q)

$$Q = K_s/e\,(H + e + H_0)$$

وهذه تختصر الى

$$Q = (K_s/e)\,(H + e)$$

* هناك خلاصة ممتعة عن حياة ومسيرة هنري دارسي قام باعدادها فانجر [15] Fancher



شكل (3 – 1) توزيع الضغط والضياع الشحني في الجريان خلال عمود رمل .

عندما يكون H_0 = صفراً . وعندما يكون الضغط تحت المرشح مساويا لوزن الجو هذا التعبير الذي يقول « معدل الجريان خلال وسط مسامي يتناسب مع الضغط المفقود ويتناسب عكسياً مع طول ممرالجريان » يعرف بقانون دارسي .

وقانون دارسي من أهم الايضاحات التي تم تقديمها والتي تعتبر القاعدة الرئيسة هذه الأيام في معرفة جريان المياه الجوفية .

ان التحليلات وكذلك حل المسائل المتعلقة بحركة المياه الجوفية وهايدروليكية الآبار بدأت جميعاً بعد اعمال دارسي .

ان قانون دارسي يمكن تحقيقه بواسطة الماء الجاري بـ المعدل (Q) خلال اسطوانة مساحة مقطعها العرضي – A – وبها مقدار من الرمل وتحوي كذلك على بيزومتروشريطين معصاريين المسافة بينهما - (L) - كما في المخطط (3.1) 36 , 32 , 31 .

الطاقة الكلية للضغوط أو الطاقة الكامنة للسائل فوق السطح المفروض (datam planc)

يمكن توضيحها بمعادلة بيرنولي (Bernoulli equation)

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_L \qquad \ldots (3.1)$$

حيث أن

p = الضغط r = الوزن النوعي للماء V = سرعة الجريان g = التعجيل الارضي

z = الارتفاع h_L = ضياع شحني (Head Loss)

المدون ادناه يعود الى نقاط القياس الموضحة في الشكل 3.1
بما أن السرعة في الوسط المسامي عادة تكون منخفضة . لذا فان الشحنات الهيدروديناميه Velocity heads يمكن اهمالها بدون اي خطأ يذكر وباعادة كتابة القانون يصبح الضياع الشحني .

$$h_L = \left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) \qquad \ldots (3.2)$$

لذا نتيجة لهذا الضياع الشحني (head loss) يمكن تعريفه بـ الجهد المفقود داخل اسطوانة رمل وهذه الطاقة فقدت بسبب مقاومة الاحتكاك . وتحررت كطاقة حرارية ويمكن الاستنتاج بأن الضياع الشحني head loss غير معتمد على ميلان الاسطوانة . والآن قياسات دارسي ترى بأن المتناسبات :-

$$Q \sim h_L \quad , \quad Q \sim \frac{1}{L}$$

بوضع ثابت تناسب (K) العلاقة تكون

$$Q = K A \frac{h_L}{L} \qquad \ldots (3.3)$$

ويمكن التعبير عنها بالشكل التالي

$$Q = KA \frac{\partial h}{dL} \qquad \ldots (3.4)$$

أو بشكل مبسط .

$$v = \frac{Q}{A} = K \frac{\partial h}{dL} * \qquad \ldots (3.5)$$

$\frac{dh}{dL}$ درجة الممال المائي :

---

* في بعض الاحايين يكتب قانون دارسي باشارة سالبة مثلاً ($v = - K (dh / dL)$) التي تعني ان الجريان باتجاه الشحنة المائية الاقل . وهذا التغيير مع ذلك غير ضروري . لأنه غالباً مايضطرب في التطبيقات الجزيئية .
* معامل النفاذية كذلك يرجع اليه كموصل مائي من حيث مشابهته للكهربائية والايصال الحراري .

المعادلة (3.5) هي قانون دارسي في صيغته المبسطة أي أن سرعة الجريان (V) تكون مساوية لناتج الثابت – K – الذي يعرف بـ معامل النفاذية (+) ودرجة الممال المائي . هذه السرعة هي السرعة الظاهرية ، وتعرف بـ خارج قسمة كمية سحب المياه (discharge Q) مقسومة على مساحة المقطع العرضي التابعة للوسط المساحي الذي من خلاله يحدث الجريان السرعة الحقيقية تختلف من نقطة الى نقطة أخرى في كل وسط . ويجب أن يلاحظ بأن المياه الجوفية تجري طبقا لدرجة الممال المائي .

كسوء فهم شائع أوعام لقانون دارسي استخدامه للتعبير حول الجريان من منطقة مرتفعة الى منطقة منخفضة الضغط بالنسبة للجريان الأفقي هذا صحيح – من المعادلة (3.2) عندما تكون $z_2 = z_1$ ولكن بالنسبة للجريان المائل – يجري الماء عادة في اتجاه زيادة الضغط الشكل (3.1) يتضمن الحالة بالنسبة لهذه النقطة .

مجال – صحة – أو سريان مفعول قانون دارسي :

عند تطبيق قانون دارسي من المهم معرفة مجال شرعية القانون في التطبيق لأن السرعة في الجريان الانسيابي – مثل الماء الجاري في الأنابيب الشعرية ، يتناسب مع القوة الأولى للممال المائي (قانون بويسولي Poiseuille's law) ويبدو من المعقول الأعتقاد بان قانون دارسي يستعمل في الجريان الأنسيابي – في الوسط المسامي ..

للجريان في الأنابيب والمقاطع الكبيرة (عدد رينولدز) Reynolds number الذي يعبر عن النسبة اللااتجاهية للقوى الداخلية الى القوى اللزجة (او المقاومة) ويخدم كدليل للتفريق بين الجريان الأنسيابي والجريان المضطرب ، اذن بالتناظر ، عدد رينولدز استعمل ليثبت حدود الجريان الذي يوصف بـ قانون دارسي مطابقا للقيمة حيث تفقد العلاقة الأنسيابية شرعيتها .. عدد رينولدز يعبر عنه بـ : –

$$N_R = \frac{\rho v D}{\mu} \qquad \ldots (3.6)$$

ρ = كثافة السائل v = السرعة

D = قطر الأنبوب μ = اللزوجة

لتبني هذا المعيار للجريان في الوسط المسامي – السرعة الظاهرة تعرف بـ قانون دارسي تستعمل السرعة (v) ومعدل قطر الحبيبات (d) تعوض بدلا من (D) .

ومن المؤكد أن قطر الحبيبات يمثل فقط التقريب لابعاد الجريان الحاسم (اوالحرج) ، أو معدل قطر (الثقب) أو الفجوة التي قصدت ، على أية حال ، قياس فجوة ثقب انموذجي مفصلاً على حبيبة أنموذجية تكون أكثر صعوبة من وجهة النظر العملية .
في السرعة الواطئة جداً يحدث الجريان الأنسيابي ، وهكذا الحال في كل من التجارب العملية والنظرية للجريان ولايعرف بوجود حد أدنى لقانون دارسي ، وعلى النقيض مع ذلك الحد الأعلى ، يعرف التجارب على الرمال والكسرات الصغيرة (4, 5,32, 46, 49, 60 , 61, 62) الحد الممكن ايجاده بواسطة رسم معامل الأحتكاك فاننك (Fanning) عديم الأتجاه (f) ويستعمل في الهايدروليك مقابل N_R ويعرف المعامل (f) بـ

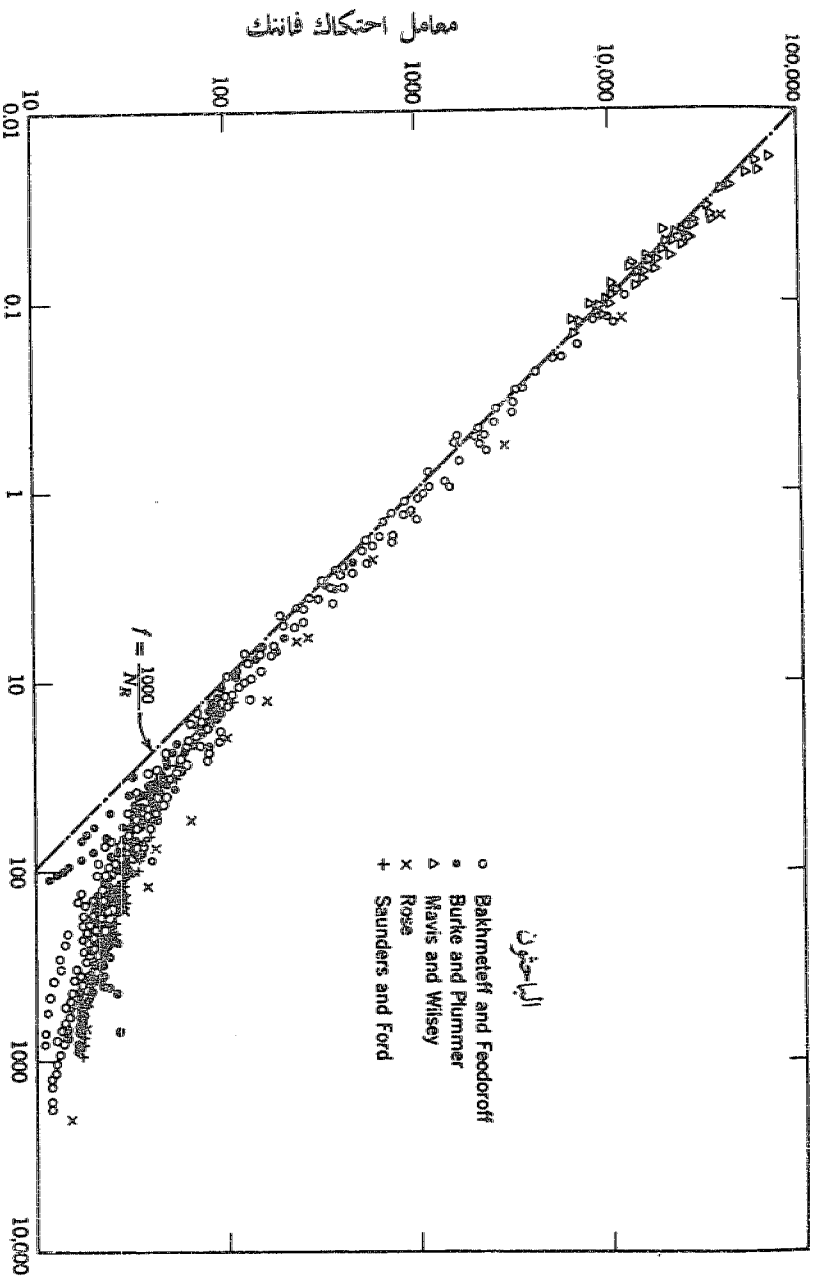
$$f = \frac{d\,\Delta p}{2_{\rho} L v^2} \qquad \ldots (3.7)$$

Δp = الفرق في الضغط فوق طول الوسط المسامي .
L = تقاس على طول خط الجريان – والقيم الأخرى تعرف كما ورد سابقاً .

ان المعلومات من عدة أبحاث قد رسمت في الشكل (3.2) ويظهر بعض لأنحراف عن العلاقة الخطية عندما تمثل N_R مدى يقع تقريباً بين (١ و ١٠) وهذا يدل على الحد الأعلى . لسريان مفعول قانون دارسي . ان عدد من القيم وليس قيمة واحدة يجب أن يحدد أو يعين بسبب توزيع حجوم الحبيبات ذات الوسط الطبيعي لفصل معدل قطر الحبة التي لا حد لها وأيضاً شكل الحبيبات والحشوات ربما تختلف كثيراً ، ولذا فإن الانحرافات يمكن فقط تحديدها مع الخط حيثما يكون هنالك تكرار ملاحظ تقريباً لكل حركة المياه الجوفية $N_R < 1$
لذا فإن قانون دارسي قابل للاستعمال – أو بالأحرى ملائم .

انّ الانحرافات في قانون دارسي يمكن أن نجدها في صخور التكوينات المائية . وفي التكوينات المائية غير المتماسكة – التي لها ممال مائي عال او التي تمتلك فتحات سوائل ذات أقطار كبيرة الجريان مباشرة بالقرب من الأجسام المائية المفتوحة – مثال ذلك – الجداول والآبار أيضا تقترن غالباً بالممال المائي العالي .

من تطبيق التشابه الجزيئي لعدد رينولدز للجريان في وسط مسامي ، في بعض الاحايين يفترض [52] الجريان المضطرب ، وبدأ عند الحد الأعلى لقانون دارسي . ان معظم التجارب الحديثة بحثت من قبل شنيبيل (schneebili) وهبرت ((Hubbert)) – دلت على نواحٍ أخرى .



شكل (3- 2) علاقة معامل احتكاك فاننك اللاتجاهي الى رقم رينولد للسريان خلال الثقوب الحلقية الوسطى Rose [60].

شنيبيل (schneebeili)–وجد من الملاحظات المرئية للجريان في الوسط المسامي أن أول اضطراب يحدث عند وصول رقم رينولدز حوالي 60 ، على حين وجدها هبرت في المجال بين 600 – 700 . وعلى الرغم من التناقض بين هاتين الملاحظتين اقترح كلاهما بأن ابتداء وجود الاضطراب يحدث عند عدد رينولدز أكثر بعدة مرات من الحد الأعلى لقانون دارسي وهذه تدل على أولاً أن عدد رينولدس ليس قياساً جيداً ليحكم بداية الأضطراب للجريان في الوسط المسامي وثانيا هذا الجريان الانسيابي الذي لايتمثل بقانون دراسي موجود في الوسط المسامي .

انّ كل جزء من السائل المتحرك خلال الوسط المسامي يتبع باستمرار مساراً منحنياً في سرع متغيرة باستمرار تقريباً $N_R = 10 - 1$ ، وبذلك يكون بتعجيل متغير باستمرار [32] ويختلف القصور الذاتي للقوى في الجريان ذي السرعة البطيئة نسبيا ، وهذا الاساس غير المنتظم للجريان يصبح ذا أهمية .

قانون دارسي يسيطر على الجريان فقط عندما تسود القوى المقاومة ، لذا فإن القصور الذاتي للقوى تقترب من نفس قيمة درجة القوى المقاومة ، ويتوقف استعمال قانون دراسي عندما يحدث الانتقال اولا ينفصل عن الاضطراب الذي قد حدث .

ان الانتقال من الجريان حيث القوى المقاومة تسيطر الى الجريان الانسيابي ، وحيث قوى القصور الذاتي يسيطر والى الجريان الاضطرابي هي بالتدريج يستدل عليه بواسطة الانحناء غير الحاد في الشكل (2 . 3) بين $N_R = 1$ $N_R = 1000$,

ان توضيح الانتقال التدريجي الى الجريان الاضطرابي يتعلق بالتراكيب الصغيرة لوسط الجريان المسامي في الرمل الطبيعي . والثقوب متغيرة جدا في القيمة ، وفي الشكل ، وفي الاتجاهات كلما زاد الممال المائي ، ذلك ان الجريان الاضطرابي يحدث اولا في الثقوب المعزولة فقط مقترنة بسرع عالية مع زيادة اكثر يحدث الاضطراب وبشكل مناظر في جزء اكبر من الوسط والنتيجة تكون انتقالاً تدريجيا في نوع الجريان.

– معامل النفاذية –

ان حل قانون دارسي يعبر عنه بالمعادلة (3.4) لمعامل النفاذية . الذي يؤدي الى :

$$K = \frac{Q}{A\,(dh/dL)} \qquad \ldots (3.8)$$

الذي يظهر أن K لها ابعاد الـ (L / T) أو السرعة .

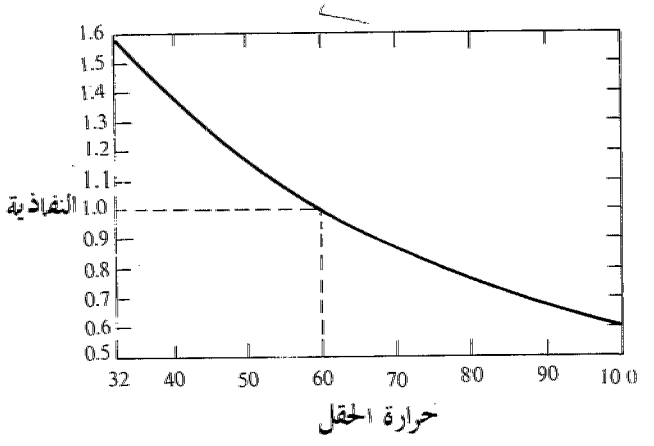
إن اشكالاً متنوعة للتعبير عن معامل النفاذية قد استعملت . وعلى اية حال فان قيادة الولايات المتحدة للمسح الجيولوجي في حقل المياه الجوفية قد عملت الكثير لتوحيد التعاريف .

والمختبر أو « مقياس » معامل النفاذية (K_S) قد عرف على انه جريان الماء في 60° ف بوحدة الغالون لكل يوم خلال وسط مساحة مقطعه العرضي (1 قدم^2) تحت ممال مائي قيمته 1 قدم واحد / قدم . الفحوص المختبرية التي قامت بها دائرة المسح الجيولوجي اعطت نتائج تتغير من 2×10^{-4} الى 9×10^{-4} لمعظم التكوينات المائية الطبيعية ، وقيم كان مداها بين (10 – 5000) في البحوث الحقلية . معامل النفاذية الحقلي (K_f) يعرف بجريان الماء في الغالونات لكل يوم خلال المقطع العرضي للتكوين المائي وبسمك 1 قدم وعرض واحد ميل تحت ممال مائي 1قدم /1 ميل في درجة حرارة الحقل . بأخذ نسبة هذين المعاملين يظهر أن الاختلاف فقط في درجة الحرارة بغض النظر عن تأثير درجة الحرارة على الكثافة . واستمرار تلك اللزوجة يختلف عكسيا مع درجة الحرارة . والعلاقة التي تسمح بالتعبير عن ذلك هي : –

$$\frac{K_s}{K_f} \quad \frac{\mu_f}{\mu_{60}} \qquad \ldots (3.9)$$

حيث ان : –

μ_f هي اللزوجة في درجة حرارة الحقل μ_{60} في درجة حرارة 60 ف . الشكل (3.3) يبسط تحويلات معاملات النفاذية بدون الرجوع الى جدول اللزوجة معامل



شكل (3 – 3) نسبة معامل النفاذية الحقلي كدالة لحرارة الحقل

المنقولية (Transimssibilty " T ") مسار لمعامل النفاذية الحقلي مضروبا بـ سمك التكوين المائي المتقدم.

تعزى النفاذية للوسط المسامي الى السهولة التي يتمكن بها المائع من المرور. ومع ذلك فان التعريف الصحيح للمعامل لايعتمد فقط على الوسط ولكنه يعتمد ايضا على السائل وهي فترة معقولة اكثر للنفاذية ، إذن يمكن التعبير عنها بـ المعامل الذي لايعتمد على صفات السائل الذي يتحكم بالجريان والصفات تتضمن اللزوجة μ تعبر عن مقاومة الحركة ، والوزن النوعي γ يعبر عن القوة المسيره للسائل نسبة الى الوسط الذي يجري فيه .

والجريان يجب ان يرجع الى اقطار الثقوب التي يمكن الزعم بأنهما متناسبة لتمثل قطر الحبيبة d

$$K = f(\mu,\gamma,d) \qquad \ldots (3.10)$$

وبتحليل الابعاد يصبح كما يأتي : —

$$K = \frac{Cd^2\gamma}{\mu} \qquad \ldots (3.11)$$

حيث أن C = هي ثابت بدون وحدات وذلك لأن حاصل — cd^2 — هي خاصية الوسط المسامي فقط .

النفاذية النوعية K 37,52 للوسط يمكن تعريفها بـ

$$K = Cd^2 \qquad \ldots (3.12)$$

التي تعطي عند ابدالها بقانون دارسي :

$$Q = A\,\frac{k\gamma}{\mu}\,\frac{dh}{dL} \qquad \ldots (3.13)$$

ابعاد k هي $[L^2]$

أو المساحة التي يمكن تقريباً تفسيرها كمساحة ثقب واحد يسيطر على الجريان الثابت C يتم السيطرة عليه بواسطة الصفات المختلفة للوسط الذي يؤثر في الجريان على قطر الحبة التي تتضمن مسامية الحشوة وتوزيع وحجم الحبيبات المنتشرة وشكلها .

وقد قادتنا نتائج التجارب الى نفس قيمة K لسوائل مختلفة وغازات تجري خلال وسط معين [52] يظهر أكثر عقلانية طبيعية النفاذية النوعية .

قيمة K عندما تعبر عنها بالأقدام المربعة أو السم^{2} تكون عادة متناهية الصغر . ولذا فان « دارسي » قد تبناها لكونها وحدة أكثر فاعلية وقد ادخلت في صناعة النفط اولاً . ان دارسي في السنوات الأخيرة أعتبر مقبولاً في مفاهيم المياه الجوفية بسبب توضيحاته وتفسيراته المعقولة جداً .

حين حل قيمة K في المعادلة (3.13) ينتج : —

$$k = \frac{\mu Q/A}{\gamma \left(\frac{dh}{dl} \right)} \qquad \ldots (3.14)$$

وكقاعدة لهذا القانون « دارسي » يعرف بـ :

$$1 \text{ دارسي} = \frac{\dfrac{1 \text{ سنتي بوسي} \times 1 \text{ سم}^{3} / \text{ ثانية}}{1 \text{ سم}^{2}}}{\dfrac{1 \text{ ضغط جوي}}{1 \text{ سم}}}$$

النقل الى وحدة المساحة يمكن الحصول عليها بإدخال :

1 سنتي بوسي = 0.01 بوسي = 0.01 داين ثانية / سم^{2}

1 ضغط جوي = $1,.0132 \times 10^{6}$ داين / سم^{2}

هذه التبدلات تؤدي الى عامل التحويل

1 دارسي = 0.987×10^{8} سم^{2}

او تكون مكافئة الى

1 دارسي = $1,062 \times 10^{-11}$ قدم^{2}

لاحظ ان

$$K = \frac{k\gamma}{\mu} \qquad \ldots (3.15)$$

وبادخال قيم مناسبة لـ μ للماء في درجة 60 ف ينتجه عامل التحويل تكون دارسي الى معامل النفاذية في المختبرات بـ

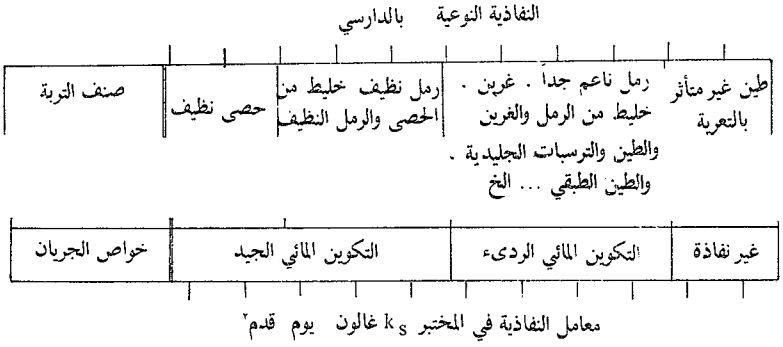
1 داوسي = $18,2K_s$ = darcy

قيم النفاذية النوعية (بالدارسي) ومعامل النفاذية في المختبر لمختلف أصناف الرمال موجودة في الشكل (3.4)

معدل جريان المياه الجوفية

لقد رأينا أن معدل حركة المياه الجوفية يتم السيطرة عليه بواسطة قوة نفاذية التكوينات المائية والممال المائي وللحصول على فكرة منتظمة لقيمة معدل طبيعية الجريان نفترض الانحدار لـ 10 قدم / ميل (0,0019) وأقل نفاذية لـ $K_s = 10$ هذه النتائج في معدل 0,0025 قدم / اليوم على حين أن الانحدار 100 قدم / ميل (0,019) ونفاذية عالية لـ $K_s = 5000$ تنتج سرعة 12,7 قدم / اليوم . وكاقتراح لهذا فان سرع المياه الجوفية متغيرة جداً :

ان بعض الاختبارات الحقلية سجلت سرعاً لاكثر من 100 قدم / اليوم ومهما كان الامر ، فان المعدل الاعتيادي يتراوح ما بين 5 قدم / سنة ، الى 5 قدم / اليوم وبالطبع عندما يكون الجريان الطبيعي قد تحور بواسطة سحب المياه من الآبار ، او بالتصريف فان السطح المائل للطبقة المائية الحرة او الانحدار الانضغاطي للطبقة المحصورة ، ستكون سرعاً عالية .



شكل (3 – 4): قيم النفاذية النوعية ومعامل النفاذية في المختبر لمختلف أصناف الرمل .

معادلات النفاذية

درس كثيرمن الباحثين مشكلة ربط النفاذية بصفات الوسط المسامي . ان نتائج صيغ عديدة اعتمدت على التحليل أو التجارب ، بعضها أعطى نتائج مضبوطة وليس عموما جميعها ، بسبب صعوبة احتواء كل المتغيرات الممكنة للوسط المسامي . ان اساس المشكلة

هو تقليل قوة العامل (C) في المعادلة (3.12) ، الى صفات وسطية بالنسبة لوسط مثالي نموذجي مثل مجموعة من الكرات لها أقطار واحدة للنفاذية يمكن تقديرها بالضبط من معرفة المسامية وحالات الحشوة .

معظم النتائج على أية حال ، عند تطبيقها حتى على أنواع مختارة من الرمل ، تحتاج الى نوع من التعديل .

وتؤدي البحوث الحديثة الى معادلات للنفاذية سبق أن اجريت من قبل هيزن (Hazen[28]) وسلشتر (Slichter[67,68]) وكذلك دراسات حديثة انتجت معادلات كتبها ترزاكي (Terzaghi[72]) ، وسميث (Smith[70]) وفير (Fair[14,27]) وهاتج (Hatch[14,27]) وهلبرت (Hulbert[33]) وفابين (Feben[33]) باجماتيف (Bachameteff) فيودوروف (Feodoroff[4,5]) وروز (Rose[60,62]) وآخرون غيرهم .

معادلات النفاذية لفير (Fair) وهاتج (Hatch) يمكن اعتبارها نموذجية لعدة اسهامات ، ولقد تطورت نتيجة الاعتبارات البعدية وتم تحقيقها بالتجربة . والنفاذية النوعية اعطيت بالمعادلة :

$$k = \frac{1}{m\left[\frac{(1-\alpha)^2}{\alpha^3}\left(\frac{\theta}{100}\sum\frac{P}{d_m}\right)^2\right]} \qquad (3.16)$$

حيث أن :

α = المسامية

m = عامل الحشوة ووجد بالتجربة أنه يساوي تقريبا (5) .

θ = عامل الشكل للرمل يختلف من 6.0 للحبيبة الكروية الى 7.7 للحبيبات ذات الزوايا

P = نسبة الرمل المحمول بين منخلين متجاورين

dm = الوسط الهندسي لمعدل حجوم المناخل المجاورة .

ابعاد القانون تم تصحيحها ، بحيث ان أي نظام متماسك من الوحدات يمكن اشتقاقها كقاعدة . وقد أدت التجارب المتشابهة الى تطوير عدد من الابحاث الاخرى التي احتوت جميعها على تصاميم مختلفة للتعبير عن عوامل هامة للاوساط المسامية التي تسيطر على النفاذية .

قياس النفاذية في المختبر

(Laboratory measurements of Permeability)

ان عدة انواع من اجهزة الانفاذ – قد تطورت لتعيين النفاذية في المختبر لنماذج صغيرة من التكوينات المائية ، وكذلك يمكن ادارتها تحت حالات ، سيطر عليها ، مثل قياسات علاقتها النفاذية قليلة في الحقل في النماذج غير المتصلبة جداً .

تهشم هذه النماذج وتسحق المسامية ، الحشوة واتجاهات الحبيبات وتتغير بوضوح ، وهكذا فان النفاذية تتحول . وايضا واحد او عدة نماذج من الصخور الخازنة للماء ربما لاتمثل كل النفاذية للصخور الخازنة للماء . نماذج من الرمل والحصى مجمعة من أعماق مختلفة لبئر بالقرب من جزيرة كرانر (بتراسكا) التي حلت في المختبر ووجد أن K_s لها قيماً تتراوح بين (150–4350) . هذه النتيجة ربما تعتبر نموذجية لعدة تكوينات مائية وتبين اهمية الطبقة وعدم الانتظام الذي قد يحور أي جسم منتظم مفروض لنموذج الجريان الشكل (3.5a) يوضح جهاز انفاذ ذي مستوى مائي ثابت ويمكن استعماله لقياس النفاذية للتكوينات المتماسكة وغير المتماسكة وتحت ضغوط قليلة .

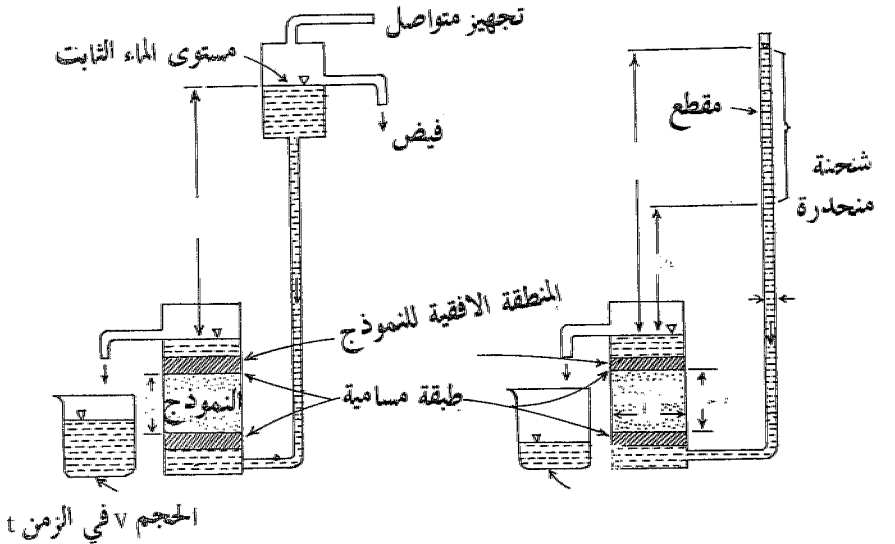
يدخل الماء الى الاسطوانة المتوسطة من الاسفل ويجمع كماء منساب بعد ان يمر الى الأعلى من خلال المادة المراد قياسها من قانون دارسي . النفاذية يمكن الحصول عليها من :

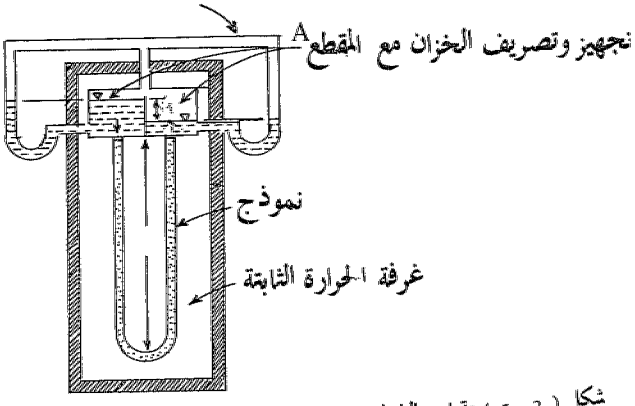
$$K = \frac{VL}{Ath} \qquad \ldots (3.17)$$

حيث ان :

V = حجم الجريان بالنسبة للزمن t والأبعاد الاخرى h, L, A يمكن مشاهدتها في الرسم (3.5a) . ومن المهم ان الوسط يكون مشبعاً تماما ليزيل الهواء المحصور . عدة ضغوط مختلفة في سلسلة من الاختبارات تعطي قياس النفاذية يمكن الاعتماد عليه . الطريقة الثانية لقياس النفاذية هي استخدام المستوى المائي المتحرك في جهاز الانفاذ ذو المستوى الهابط والموضح في الرسم (3.5b) . هنا يضاف الماء الى العمود الطويل الذي يجري الى الاعلى من خلال الاسطوانة الوسطية ويتجمع كماء منساب ويشمل هذا الفحص ملاحظة الأزمنة التي ينخفض فيها مستوى الماء الى تدريجات مختلفة في الانبوب التعبير عن النفاذية بهذا الجهاز يمكن اشتقاقه من قانون دارسي الذي يبدأ من الشكل التفاضلي للمعادلة :

$$dV = \frac{Kh\,A\,dt}{L} \qquad \ldots (3.18)$$





شكل (3 – 5) مقياس النفاذية : (a) مستوى مائي ثابت (b) مستوى مائي متحرك (c) غير حيبسي

اذا كانت a هي مساحة انبوب (شكل 3.5b) اذن الحجم

$$V = a (h_0 - h) \quad \ldots (3.19)$$

h_0 = المستوى المائي الاولي h = المستوى المائي في اي زمن اخر او عموما :

$$dV = - a \, dh \quad \ldots (3.20)$$

بالتعويض في المعادلة 3.18) تحصل على :

$$-a\,dh = \frac{K h A\,dt}{L} \qquad \ldots (3.21)$$

وتصبح المعادلة التي في اعلاه بعد ترتيبها وتبسيطها كالآتي :

$$-\frac{dh}{h} = \frac{K dc^2 dt}{d_t^2 L} \qquad \ldots (3.22)$$

حيث إن dt,dc هي اقطار الاسطوانة والانبوب بالتعاقب من تكامل المعادلة تحصل على :

$$-\ln h = \frac{K d_c^2 t}{d_t^2 L} + C \qquad \ldots (3.23)$$

عندما تكون $t = 0$ و $h_0 = h$ وبذا

$$C = -\ln h_0$$

بادخال ذلك في المعادلة (3.23) واعادة ترتيبها تعطي

$$K = \frac{d_t^2 L}{d_c^2 t} \ln \frac{h_0}{h} \qquad \ldots (3.24)$$

كلا من النماذج الصلدة وغير الصلدة يمكن اختبارها بهذه الطريقة لقياس النفاذية للتكوينات غير الصلدة تحت شحنة واطئة جدا . ومن الممكن استعمال جهاز انفاذ غير تصريفي كما هوموضح في الشكل (3.5c) الذي يحتوي على انبوب طويل بشكل حرف U متصل من الوسط ليجهز ويستلم من الخزان العلوي .

والجهاز مغمور في حجرة ذات درجة حرارة ثابتة . على حين يكون الرأس مغطى ليمنع فقدان التبخر من الخزان . النفاذية تشتق مثلما اشتقت سابقا وتعطي (.

$$K = \frac{AL}{2at} \ln \frac{h_0}{h} \qquad \ldots (3.25)$$

حيث أن

L , A و a قد عرفت في الشكل (3.5c) .

h_0 = مستوى الماء عندما يكون t = صفر .

h = مستوى الماء في أي زمن آخر .

ان البحوث التي اجريت من قبل ماينزر (Meinzer) فايشل ([19.50]Fishel) بهذه الاجهزة تبين قابلية تطبيق قانون دراسي الى درجة مماثل اقل من قدم واحد لكل ميل

قياس النفاذية في الحقل (Field measurement of Permeability)

باستعمال مادة كاشفة أو مرشدة في المياه الجوفية في مواقع مصعّدَية ، وملاحظة الزمن اللازم لهذه المواد للظهور في نقطة المهبط .
من الممكن تخمين سرعة المياه الجوفية وايجادها هذه المعلومات بالاقترانٍ مع الممال المائي الموجود الذي يبرهن قياس النفاذية للصخور الخازنة للماء ؛ لأن الجريان يحدث فقط مع الثقوب للوسط المسامي . ان معدل التدفق :

$$Q = \alpha A v_a \qquad .. (3.26)$$

وكنتيجة لهذا فان α = النفاذية و A =المساحة المقطوعة للتدفق في مقطع عرضي و v_a = معدل سرعة التدفق مقيسةً بواسطة تتبع التدفق . وبتبديل هذه بمعادلة دارسي وحلّها (K) اي بوضع K تصبح

$$K = \frac{\alpha v_a \, dL}{dh} \qquad (3.27)$$

إن القياسات بواسطة المرشد في الحقل عادة تكون محدودة ولمسافات قليلة فقط بضعة اقدام .

والنتيجة الحاصلة لهذا تكون تقريبية . والجزء التالي فقط يوضح شرحا للمرشد بشكل اوسع . إنّ النفاذية الطبيعية على الاعماق الضحله المتقاطعة مع سطح الطبقة المائية الحرة ، يمكن من قياسها مباشرة (بطريقة المعصار – الانبوب ومثقاب الحزم (مثقاب) او قد تطورت بمساعدة ريف (Reeve)وكيرخام (Kirkham) واخرين ان تجويفا اسطوانيٍ تم عمله تحت سطح الطبقة المائية الحرة وسحبت خارجا لفتح كل الطرق لمرورالماء ويتضمن الاختبارسحب الماء لخفض مستواه وبعدها تتم ملاحظة معدل الارتفاع اواضافة الماء وملاحظة معدل الهبوط حيث يمكن حساب معامل النفاذية .من هذه المعلومات وبواسطة معادلات

مناسبة . ولهذه الطرق فوائد .. انها سهلة واقتصادية كذلك ، فيمكن ان تقاس بها النفاذية موضعيا . إن احسن طريقة يعول عليها تقدير نفاذية التكوين المائي ، هي بواسطة الضخ التجريبي للآبار بالاعتماد على ملاحظة تغير مستوى الماء وعلاقته بالضخ .
وقيمة النفاذية الكاملة لمقطع تكوين مائي ذو حجم كبير يمكن الحصول عليها ؛ وذلك لان التكوين المائي لايتأثر . ولذا فالاعتماد على هذه الطريقة افضل بكثير من الطرق المختبرية انّ طرق الضخ التجريبي وحساباته قد تم شرحها في الفصل الرابع .

كشف حركة المياه الجوفية
(Tracing Ground Water movement)

والخلاصة هي ان فكرة كشف حركة جريان المياه الجوفية بسيطة جدا ولتعقيب حركة المياه الجوفية ومن هذه الطرق استعمال الملونات [13] أو الاملاح التي استعملت لعدة سنين.

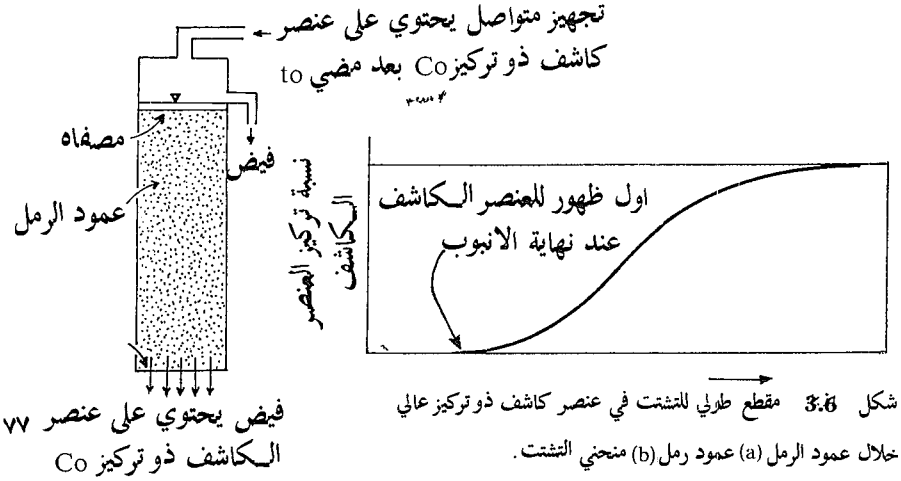
التجارب الاولى لـ سلشتر (Slichter[69]) استعمل فيها العناصر الكاشفة لقياس جريان المياه الجوفية ، وهذه معروفة جدا . وعلى اي حال عندما اختبرت بالتفصيل وجد أن فنون استعمال العناصر الكاشفة اثبتت غالبا ان لها محاذير كثيرة .

التشتت (التبدد ، (الانتشار) Dispersion

تختلف السرع بشكل واسع عبر أي فجوة أو ثقب في الوسط المسامي ، تماماً مثل الأنبوب الشعري عندما تكون سرعة الانتشار للجريان الانسيابي مثلي او تشبيهي) بشكل قطاع مطاطي Paraboli . فالنتيجه تكون ان تركيز العنصر الكاشف يكون مختلفاً . وباتجاهات الجريان ويصبح اكثر انتشاراً كلما طال مسارها [59] بواسطة عمود محشو بالرمل . (أنظر شكل a(6.3) ويجهز باستمرار بعد فترة زمنية (to) بماء يحتوي على عنصر كاشف او تركيز (Co) . فالإنتشار الطولي للعنصر الكاشف يمكن قياسه من خلال أنموذج الماء الذي يخرج من العمود الرملي . وبذا يمكن ايجاد تركيز الكاشف (C) .

الرسم التوضيحي b(6.3) يوضح منحنياً لتفرق أوتشتت نموذجي معتمداً على نسبة تركيز العنصر الكاشف (c/c_0) بالاضافة الى الانتشار الطولي – يحدث ايضاً انتشاراً عرضي ، لتركيز العنصر الكاشف ايضا وهذا يحدث لأن الماء يتوزع باستمرار ويتحد اثناء جريانه حول أوهام حبيبات الوسط كما هو مبين في الشكل (7.3) . التأثير المزدوج لهذين النوعين من الانتشار عندما يرسم بأبعاد ثلاثة يبدأ من منبع نقطة الكاشف ويكون على شكل مخروط مفتوح الى الخارج باتجاه الجريان .

وطبقا لتجارب دانيال (Danel[10]) . فان سطح هذا المخروط يمثل حدود الكاشف الملون . وقد مال بـ 3 درجات الى الاحداثيات .



شكل 3.6 مقطع طولي للتشتت في عنصر كاشف ذو تركيز عالي خلال عمود الرمل (a) عمود رمل (b) منحني التشتت.

ان تفرق العنصر الكاشف (الملون) يتسبب بواسطة التغير في السرع المتناهية الصغر الملاصقة للجريان الصفائحي خلال الوسط المسامي . حيث يكون الانتشار جزئيا ولكن فقط عندما تكون سرعة الجريان صغيرة تماما فالمشكلة يمكن حلها احصائيا على قواعد [38.59.63] لقد اكدت المؤيدة بالتجارب ان العنصر الكاشف الموضوع في نقطة المنبع آنياً ، سوف يعمل على تكوين نوع من التفرق الاعتيادي للتركيز موازٍ ومتعامد على اتجاه التدفق كلما تحرك باتجاه المهبط .

(العناصر الكاشفة المرشدة) :

العناصر الكاشفة المثالية هي التي يجب انتكون سريعة التأثير بالتحديد الكمي وفي تراكيز قليلة جداً . ويجب ان تكون غائبة او بالاحرى قريبة من الماء الطبيعي كذلك يجب ان لا تتفاعل مع الماء الطبيعي لتكون تراسيب ويجب ان لا تمتص بواسطة الوسط المسامي ويجب ان تكون رخيصة وسريعة التوفير [39.40] وحيث لا يوجد كاشف له جميع هذه المميزات ولكن اي كاشف او ملون مقنع ومعتدل يمكن ان يختار ليناسب احتياجات الموقع الخاص .

ان العناصر الكاشفة يمكن تصنيفها بواسطة مقياس الالوان ، والمعامل الكيمياوي ، والموصل الكهربائي الاشعاعات النووية ، ومقدار المطياف الرسام لأفلام المصور الضوئي للطيف . والجدول (1.3) يبين قوائم للمواد التي لها قيمة ككواشف للمياه الجوفية

TABLE 3.1 Classification by Method of Detection of Substances Which May Be Useful as Ground Water Tracers

Colorimetry	Chemical Determination
Organic dyes and stains, water soluble	Soluble chloride salts
Soluble chromate salts	Boron, borax, and boric acid
Amaranth dye	Copper sulfate
Basic fuchsin	Dextrose
Congo red	Ethanethiol
Eosine	Sodium glyceral phosphate
Magenta	Sodium iodide
Methylene blue	
Sodium fluorescein	**Nuclear Radiation**
	Bromine 82
Mass Spectrography	Calcium 45
Helium	Cobalt 60
Hydrogen 2	Hydrogen 3 (Tritium)
Oxygen 18	Iodine 131
	Phosphorus 32
Flame Spectrophotometry	Rubidium 86
Soluble lithium salts	**Electrical Conductivity**
	Any strong electrolyte

الالوان العضوية (Organic dyes)

مثال على ذلك فلورسين الصوديوم الذي يمكن ملاحظته في تركيز قليل . على أية حال يمكن ان يمتص بواسطة التشققات الطينية الموجودة في الوسط الطبيعي .ايون الكلوريد يستعمل بتراكيز قليلة ويعتبر من العناصر الكاشفة المقنعة . التي برهنت على انها اكثر استعمالاً .

وقد برهنت المواد المشعة على أنها اكثر مناسبة ، وذات حساسية عالية للتتبع 20.30.34 لامكانية قياسها بواسطة اشعاعاتها النووية خصوصاً كميات ذات تراكيز من 10^{-16} الى 10^{-18}. ان صفات الجريان لم تتطور بالنسبة للوسط المسامي ولكنها تأثرت بتغير القاعدة وفكرة الامتصاص . وهنالك انواع معينة من النظائر المشعة خاصة التريتيوم الذي يمكن ان يستعمل كاشفاً في الحقل دون اظهار اي خطر للتلوث . ولكن هنالك نظائر مشعة اخرى يجب ان يسيطر عليها باعتناء ويحصر استعمالها في الدراسات المختبرية فقط بسبب خطر مستويات اشعاعها .

كاشف الرابديوم المشع استعمل بواسطة فوكس (Fox) للتأكيد على ان النضوح من ينابيع على مسافة عدة اميال من ساحل البحر تظهر كمجموعة مستقبلة للكاشف بعد الفحص وان نفايات الاشعاعات الناتجة عن الانقسامات النووية تحفز لدراسة امكانية اجراء مخازن تحت الارض . واحتمال تبعية تلوث المياه الأرضية . وهنالك دعوة لمثل هذه الدراسات .

عمـــر الميـــاه الأرضيـــة : -(Dating Grouud Water)

من المحتمل قياس عمر المياه الارضية باستعمال التريتيوم كاشفاً مهماً لهذه العملية والذي اقترح من قبل العالم لبي (^{45}Libby) بمثل هذه البحوث وان عنصر التريتيوم ينتج في الفضاء بواسطة الاشعاع الكوني -والانفجار الترمونووي)- وكثرة عنصر التريتيوم في المطر تختلف اعتباطياً مع مسافة بخار ماء البحار حيث هذه العناصر تنتقل قبل ان تترسب بعد سقوط المطر وترشيحه داخل الأرض وليس هناك زيادة تحدث في التريتيوم . وفضلاً عن ذلك فانه دليل ايضاحي لنقصان حدوث تراكيز للنظائر المشعة لذلك يمكن اختيار نماذج جيدة من المياه الأرضية لتقدير عمرها .

ويمكن الحصول على المياه من التكوينات المائية المحصورة حيث تسحب المياه من عدة آبار مبعثرة في مساحة معينة واحدة للسحب . وبذا يمكن قياس معدل واتجاه حركة الماء

ان اجهزة قياس الاشعاع غالية جداً . وكذلك فإن الزمن اللازم لقياس المستويات الواطئة للتريتيوم المتكون طبيعيا لاتتم بشكل مضبوط . ولهذا فان الطريقة لايمكن ان تكون صالحة لاستكشاف عمـــر الميـــاه .

معادلات الجريـــان العامـــة : — General Flow Equations

عموماً قانون دارسي يمكن كتابته بهذه الصيغة .

$$v = K \frac{\partial h}{\partial s} \qquad \ldots (3\text{-}28)$$

حيث ان :

h. v.k معرفة سابقا .

s = المسافة عبر معدل اتجاه الجريان .

الوسط المسامي ربما يملك نفاذية والتي تتغير باتجاه الجريان .

ان مثل هذه الحالة تسمى النفاذية غير متساوية الخواص — anisotropic —

ومركبات السرعة في نظام ذي زوايا قائمة متساوية من الممكن التعبير عنها كما يلي :

$$v_x = K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_z = K_z \frac{\partial h}{\partial z} \qquad \ldots (3.29)$$

حيث ان K_x, K_y, K_z معامل النفاذية في اتجاهات x, y, z على التوالـــــــي .

السرعة في اي نقطة في التكوين المائي يمكن ان تؤخذ ككمية ذات اتجاه لتسهيل المعادلات الرياضية لمجموع مركبات السرع وبذا فان التكوين المائي يفترض ان يكون متجانساً وذات نفاذية متساوية الخواص . اي انها متساوية في جميع الاتجاهات ومن ذلك يتضح :

$$v_x = K \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = K \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_z = K \frac{\partial h}{\partial z} \qquad \ldots (3.30)$$

في الهايدرودينمك السرعة الكامنة تعرف بسكالر دالة لا اتجاهية Scalar وهي مقدار الشغل المنجز في الفضاء والزمن وهي تمثل عادة بحيث ان المشتقة السالبة مع الأخذ بنظر الاعتبار ان اي اتجاه سائل يمثل سرعة السائل في ذلك الاتجاه . اذاً لهـــذا الهدف :

$$\phi = - Kh,$$

وبعدها تتبع من المعادلة (3.30) .

$$v_x = - \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v_y = - \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad v_z = - \frac{\partial \phi}{\partial z} \qquad \ldots (3.31)$$

ويظهر من التعريف ان السرعة الكامنة موجودة في جريان المياه الجوفية . وجود السرعة الكامنة يتضمن الجريان غير الدوراني Irrotational flow ، لأن المعروف ان المياه الجوفية تجري حول حبيبات مفردة للوسط بالاضافة الى ذلك فان الحبيبات تعتبر أجساماً غاطسة في الموائع ، قد تكون هذه العبارة مضللة . على اساس مجهري والحالات الظاهرة للعيان . على اية حال توضح الدوران في داخل الفجوات يتوازن احصائياً ، بحيث يصبح الجريان الدوراني غير دوراني .

جريان الثابت المنتظم Steady flow

جميع جريان المياه الارضية يجب ان يتبع او يفي بقانون الاستمرارية equation of ceontinuity) الذي يمكن التعبير عنه بشكل عام بالمعادلة بـ

$$\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial \rho}{\partial t} \qquad .....(3.32)$$

ρ =كثافة السائل t = الزمن

للجريان الثابت ليس هناك تغيير في الظروف بالنسبة للزمن وباعتبار الماء مائعاًغير قابـــل للانضغاط يجعل ρ ثابتة لذا فان المعادلة 3.32 تختصر الى :

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \qquad .....(3.33)$$

اما في حالات وجود الجريان غير الدوراني فمن الممكن استعمال المعادلة وطرحها من المعادلة 3.33 لينتج المعادلة .

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \qquad ..... (3.34)$$

وباحلال Kh - محل ϕ ج

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad .....(3.35)$$

وهي معادلة التفاضل الجزئي العامة للجريان الثابت للماء في الوسط المتجانس والمتساوي الخصائص .

الجريان غير الثابـــت : Unsteady flow –

لكي نشتق قانوناً مشابهاً للجريان غير الثابت [36] . سيكون من الضروري الاخذ بنظر الاعتبار معامل الاختزان Storage Coefficient (S) للتكوين المائي غير المحصور الذي عرف في الفصل الثاني كعطاء نوعي (Specific Yield) ولكن بالنسبة للتكوين المائي المحصور فان مقياس الانضغاطية بالنسبة للتكوين المائي يكون β ويمكن تعريفه بواسطة المعادلة :

$$\beta = \frac{-\partial V / V}{\partial p} \qquad \ldots (3.36)$$

حيث ان :

الحجم = V ، الضغط = P

المحصور فان مقياس الانضغاطية بالنسبة للتكوين المائي (aquifer Compressibility) يكون β ويمكن تعريفه بواسطة المعادلة :

$$\beta = \frac{-\partial V/V}{\partial p} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (3.36)$$

حيث ان :

V = الحجم p = الضغط

يمكن تقييمها بتعبيرات للتغييرات ضمن عمود ولمساحة وحدة من مقطعه العرضي ممتدة الى الاعلى خلال التكوين المائي المحصور . انظر الى الشكل (2.9a) . حيث افترض ان القوة الضاغطة تفعل في الاتجاه العمودي – او عموماً بشكل عمودي على مستوى التكوين المائي فوق مساحة كبيرة ممتدة بحيث ان التغييرات في الاتجاه الافقي يكون محذوفاً عندما ينخفض مستوى سطح الماء مسافة وحدة واحدة . ان كمية الماء التي يتم تحريرها من العمود بواسطة تغيير الضغط هو S . وعليه فان $S = \partial V$ حجم عمود التكوين المائي هو $V = 1.b - b$ حيث b سمك التكوين المائي والضغط المتغير

$$\partial p = -\gamma(1) = -\gamma.$$

وبادخال هذه القيم كلها في المعادلة 3.36 المعطاة سابقاً وبالتعويض فيهـــا ينتـــج :

$$\beta = \frac{S}{\gamma b} \qquad \ldots (3.37)$$

بالنسبة للمواد المرنة elastic فان

---

* لغرض اثبات هذه الفرضية . يرجى من القاريء العودة الى احد الكتب الاساسية فـي موضوع الهـايـدرودايـنمـك

$$\frac{\partial V}{V} = -\frac{\partial \rho}{\rho} \qquad \text{.....(3.38)}$$

وعند ربطها بالمعادلة 3.36 ينتج :

$$\partial \rho = \rho \beta \partial \rho \qquad \text{.....(3.39)}$$

وباحلال β مع مكافئة في المعادلة 3.37 ينتج :

$$\partial \rho = \frac{\rho S}{b\gamma} \partial \rho \qquad \text{.....(3.40)}$$

وبادخال هذا الاصطلاح في معادلة الاستمرارية يعطينا :

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \frac{\rho S}{b\gamma} \frac{\partial \rho}{\partial t} \qquad \text{.....(3.41)}$$

وهذه المعادلة ، يمكن توسيعها وادخال قيم مكونات السرعة فيها لتعطي :

$$K\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = \frac{S}{br} \frac{\partial \rho}{\partial t} \qquad \text{.....(3.42)}$$

وحينما تفترض p كثابتاً في المعادلة ، يمكن كتابة المعادلة بعد التعويض عن $p = \gamma h$ كالاتي وتكتب :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{Kb} \frac{\partial h}{dt} \qquad \text{.....(3.43)}$$

وهي معادلة التفاضل الجزئي الذي يتحكم في الجريان غير الثابت للماء في التكوين المائي المحصور المضغوط الذي سمكه النموذجي (b) . وان المعادلة المماثلة للتكوين المائي غير المحصور له شكل غير خطي يجعل الحل المباشر مستحيلا . بالتقريب على اية حال ؛ فإن المعادلة 3.43 يمكن تطبيقها للتكوينات المائية غير المحصورة مهما كانت الاختلافات في سمك الطبقة المشبعة ، قليلة نسبياً .

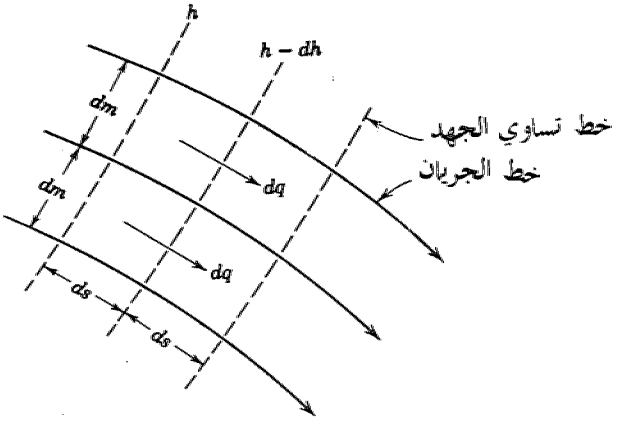
التطبيقات على التكوينات المائية . Application to Aquifers

المعادلات المشتقة في اعلاه سوف تستعمل فيما بعد للحصول على حلول تحليليه لمشاكل معينة في جريان المياه الجوفية . وكحل لأي مشكلة ، فان التكوين المائي يعتبر مثاليا ، والحالات المحيطة لنظام الجريان تكون ضرورية والنتائج لهذه الحالات المثاليه قد تقترب من حالات الحقل . ومع ذلك فان الانحرافات المعروفة نتيجة الافتراضات المتكررة ، تجعل الحلول التحليليه تتطور لتحصل على جواب قد يكون بطريقة ما غير محتمل . والافتراض الاعتيادي فيما يخص التكوين المائي هو أن يكون هذا التكوين متجانسا وان يكون ممتدا

الى مالا نهاية له من المساحة . وفي حالة عدم توفرذلك الشرط يمكن افتراض ان حافات التكوين المائي تكون (أ) غير نفاذة . مثال ذلك وجود صخور الانهايدرايت أو طبقات الطين أو وجود بعض التصدعات (الفوالق) أو جدران الوديان أو ان تكون (ب) نفاذة . ويتضمن ذلك وجود جسم سطح الماء بحالة تلامس مع التكوين المائي او مع السطوح المائية المغمورة تحت السطح او مع الآبار .

خطوط جريان المياه الجوفية Ground Water Flow Lines

شبكات الجريان (Flow nets) :- تحت ظروف حدودية معينة خطوط الجريان* وخطوط تساوي الجهد (equipotential lines) من الممكن رسمها في اتجاهين يشكلان مايسمى بـ شبكة الجريان . الخطوط الثنائية تكون نظاماً متعامداً من المربعات الصغيرة . وهذا يحدث في حالات قليلة وسهله .



شكل (3 – 8) جزء من شبكة الجريان المتعامدة المتكونة من خطوط تساوي الجهد والجريان

* لقد افترض دوماً ان الماء ينضغط في حين ان كافة الحبيبات في الوسط المسامي تكون صلدة ، ومع هذا ، فانهم جميعاً متماسكين معاً بواسطة قوة الضغط (انظر الفصل ٦) .

معادلة التكامل المتحكمة في الجريان يمكن حله للحصول على شبكة الجريان [52] عموما . وعلى أية حال الحلول على الخطوط البيانية يعتمد على التجربة والخطأ التقريبي . أو النماذج المختبرية تكون ضرورية وبعض الاقتراحات حول انشاء الخطوط البيانية لشبكة الجريان قد بحثت من قبل كاساكراند [8] (Casagrande) . وهذا النموذج يدرس ويناقش في الفصل ١٤ .

لاحظ جزء من شبكة الجريان في الشكل (3 . 8) الممال المائي (i) اعطي بموجب العلاقة :

$$i = \frac{dh}{ds} \qquad \ldots (3.44)$$

والجريان الثابت بين خطين متجاورين لخطوط الجريان لسمك واحد .

$$dq = K \frac{dh}{ds} dm \qquad \ldots (3.45)$$

وحيث ان مربعات شبكة الجريان يمكن اعتبارها تقريباً :

$$ds \cong dm \qquad \ldots (3.46)$$

ويمكن اجراءه بحيث ان المعادلة 3.45 تختصر الى

$$dq = K\, dh \qquad \ldots (3.47)$$

ويمكن استعمال هذا كليا لعموم شبكة الجريان حيث ان مقدار الضغط الكليا « h » يكون منقسماً الى n من المربعات بين اي خطين متجاورين من شبكة الجريان لذا

$$dh = \frac{h}{n} \qquad \ldots (3.48)$$

اذا قسم الجريان الى m من القنوات بواسطة خطوط الجريان عندئذ يكون : الجريان الكلي :

$$Q = m\, dq = \frac{Kmh}{n} \qquad \ldots (3.49)$$

لذا فإن التركيب الهندسي لشبكة الجريان سوية مع النفاذية وفقدان الضغط يمكننا من حساب كمية الجريان الكلي في المقطع مباشرة .

علاقة الجريان بمنحنيات المياه الجوفية : —

Flow in Relation to Ground Water Contours.

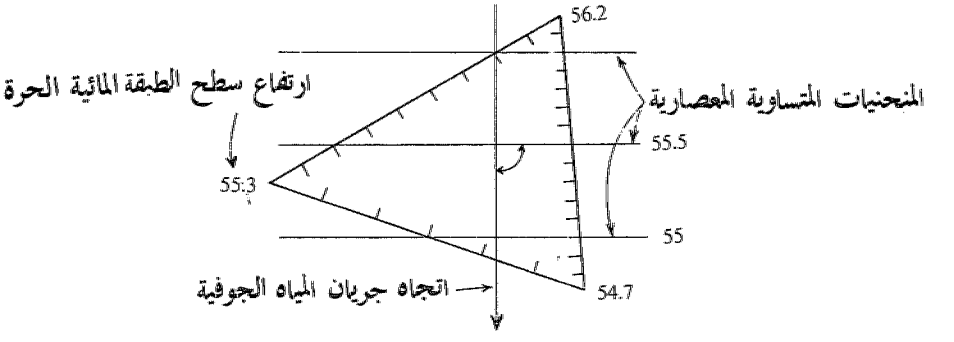
بسبب عدم عبور الجريان لحواجز الحدود غير النفاذه ، فإن خطوط الجريان يجب أن تكون موازية لها ومتشابهة وبالمثل حيث يمكن الجريان عبر سطح الطبقة المائية الحرة للتكوين المائي غير المحصور . لذا فانه يصبح سطحا محددا للجريان . وان الشحنة الضاغطة (Energy head (h_E أو المائع الكامن يمكن تقريب قيمه من المعادلة (3.2) وفي اي نقطة على سطح الطبقة المائية الحرة بواسطة المعادلة (3.50) يمكن تقريبه بـ

$$h_E = \frac{p}{\gamma} + z \qquad \ldots (3.50)$$

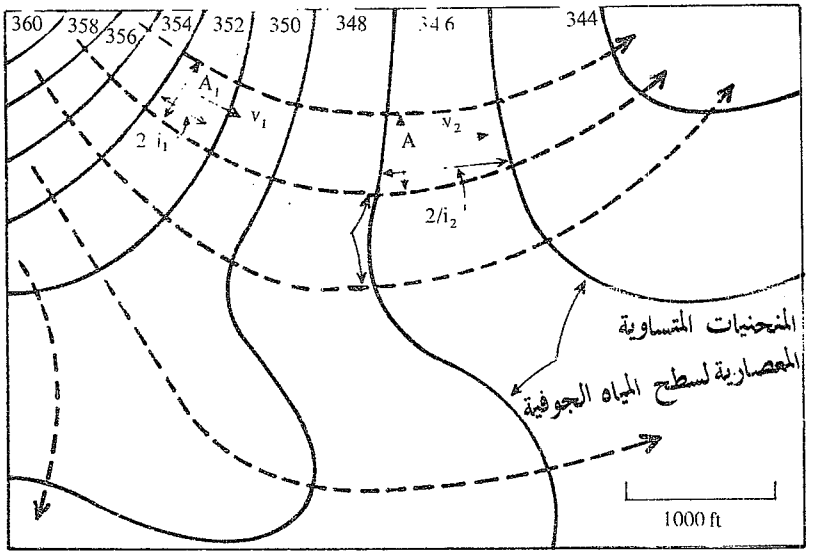
لذا يترك الضغط الجوي يقترب الى الصفر .

$$h_E = z\,,\ \rho = 0$$

وعليه تحت ظروف الجريان الثابت فإن الأرتفاع في أي نقطة على سطح الطبقة المائية الحرة ذات الشحنة الضاغطة يكون متساويا وكذلك فإن تتابع خطوط الجريان تكون عمودية على المنحنيات المتساوية المعصارية وفي حالة معرفة ثلاث ارتفاعات فقط للمياه الأرضية من البئر يمكن تخمين موقع الخطوط الوهمية للمياه الأرضية ومعرفة اتجاه الجريان كما هو موضح في الشكل (3.9) . من خلال القياسات الحقلية لأرتفاعات المياه الثابتة في الآبار ضمن حوض يمكن رسم خريطة المنحنيات المتساوية المعصارية للطبقة المائية الحرة ورسم خطوط الجريان بحيث تكون عمودية على المنحنيات المتساوية المعصارية التي من خلالها تتم معرفة اتجاه الحركة كما هو موضح في الشكل (3 . 10) . ومن الممكن اتباع اجراءات مماثلة بالنسبة للسطح المعصاري للتكوين المائي المحصور .



شكل (3 – 9) تخمين المنحنيات المتساوية المعصارية واتجاه الجريان من ارتفاع سطح الطبقة المائية الحرة في ٣ آبار .



شكل (3 – 10) خريطه المنحنيات المتساوية المعصارية لسطح المياه الجوفية مبينة خطوط الجريان

الخريطة الكنتورية لسطح الطبقة المائية الحره أو سطح الماء المحصور سوية مع خطوط الجريان تعطي معلومات وحقائق جيدة لتعيين مواقع الآبار الجديدة . ليس فقط بإمكاننا اختيار المساحات التي يقترح أنها أحسن مصدر لتجهيز المياه الأرضية ، ولكن بالاضافة الى ذلك يمكن تحديد مناطق النفاذية المناسبة وطريقة العمل يمكن توضيحها بمعامله خطين متجاورين من خطوط الجريان كحواجز غير نفاذة . وبذا تكون السرعة عبر هذه الخطوط غير موجودة ، اذن سيكون الجريان في المقطع (2,1) لذا فليس هناك سرعة عبر هذه الخطوط . الجريان في المقطع أو في الشكل (3.10) من الشكل (3.10) متساوٍ .

$$Q = A_1V_1 = A_2V_2 \quad .....(3.51)$$

V السرعة A = المساحة المشبعة عمودياً على الجريان :

من معادلة دارسي :

$$A_1K_1i_1 = A_2K_2i_2 \quad .....(3.52)$$

التي يمكن اعادة كتابتها بشكل آخر :

حيث أن :

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{A_2\,i_2}{A_1\,i_1} \quad .....(3.53)$$

K = معامل النفاذية ، i = الممال المائي

النسبة A_2/A_1 يمكن ايجادها من المسافات بين خطوط الجريان في المقطعين (أنظر الشكل 3.10) للتكوين المائي المحصور اذا كان الأختلاف في ارتفاع سطح الطبقة المائية الحرة في المقطعين صغيراً مقارنة بالسمك المشبع من التكوين المائي أو للتكوين المائي المحصور ذي السمك المنتظم وبالمثل i_2/i_1 يمكن ايجادها من الفراغات المتتالية للخطوط الكنتورية للحالة الخاصة التي تكون فيها خطوط الجريان تقريباً متوازية كما في المعادلة (3.53) التي يمكن اختصارها الى

$$\frac{K_1}{K_2}\ \frac{i_2}{i_1} \qquad .....(3.54)$$

هذه العلاقة يمكن تفسيرها كدلالة لمساحة ذات جريان ثابت للمياه الأرضية ، ولذلك الجزء الذي يحتوي على مسافات كنتورية واسعة (ممال مستو)نفاذية أعلى من المناطق ذات المسافات الكنتورية الضيقة (الممال شديد الأنحدار) .

والشكل (3.10) يوضح رؤية أحسن انتاج للبئر الذي يكون بالقرب من المقطع (2) اذا نظرنا الى المقطع (1) في جسم سطح الماء يبين أن الشحنة الضاغطة تكون ثابتة في كل مكان مع جسم الماء ومساوية لأرتفاع سطح الماء . ونتيجة لذلك ، فإن خطوط الجريان للتكوين المائي يجب أن تتقاطع عمودياً نحو ذلك السطح . بالنسبة لسطح الأرض فإن ذلك لايمكن حيث إن الضغط الجوي موجود دائماً مع سطح الأرض ومن هنا فإن المعادلة (3.50) توضح أن :

$$hE = Z \quad , \quad P = 0$$

التي تكون مطابقة لحالة حدود سطح الطبقة المائية الحرة .

الجريان عبر مستوى سطح الطبقة المائية الحرة :

Flow Across a Water Table

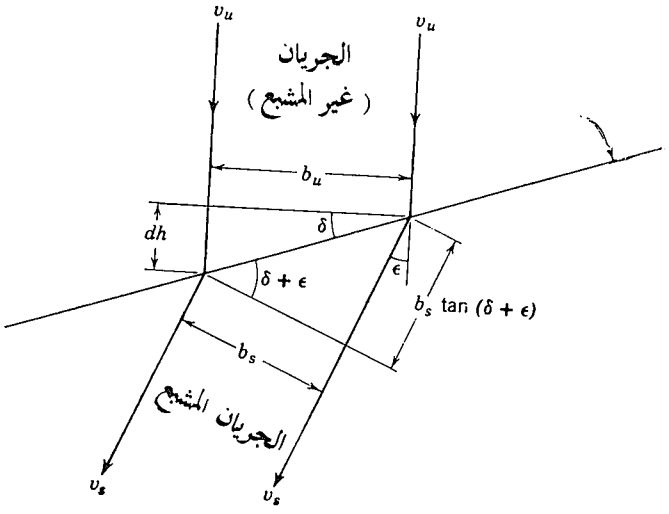
بما انه لايوجد جريان عبر مستوى سطح الطبقة المائية الحرة ، فمن الممكن والحالة هذه استخدام هذا المستوى كحد للمياه الجوفية .

مع ذلك فاذا كان الجريان مشابهاً لجريان الماء النافذ (Per colating water) ، بحيث يصل مستوى سطح الطبقة المائية الحرة ، فان خطوط الجريان لاتصل موازية للسطح ، كحاجز غير نفاذ [31,36] . ولتوضيح هذا الانكسار فان v_n تمثل السرعة العمودية غير

المشبعة المقتربة من مستوى سطح الطبقة المائية الحرة . و v_s تمثل السرعة المشبعة تحت مستوى سطح الطبقة المائية الحرة انظر الشكل (3.11) .

ان الضياع الشحني (dh) للجريان على طول خط الجريان وعلى الجهة اليسرى تحت مستوى سطح الطبقة المائية الحرة يحدث في المسافة لل $b_s \tan(\delta + \epsilon)$ كما هوموضح في الشكل (11.3) لذا فان

$$v_s = Ki = K \frac{dh}{bs \tan(\delta + \epsilon)} \quad .....(3.55)$$



شكل (3 11) الانتشار لخطوط الجريان عبر سطح الطبقة المائية الحرة

ولكن

$$\partial h = b_u \tan \delta \quad .....(3.56)$$

وعليه

$$v_s = K \frac{b_u \tan \delta}{b_s \tan(\delta + \epsilon)} \quad .....(3.57)$$

ومن قانون الاستمرارية

$$\frac{b_u}{b_s} \quad \frac{v_s}{v_u} \quad .....(3.58)$$

bs·bu كما ترى في الشكل (3.11) لذا

$$U = K \frac{v_s \tan\delta}{v_s \tan(\delta + \epsilon)} \qquad .....(3.59)$$

وبعد حلها لـ ϵ تعطي

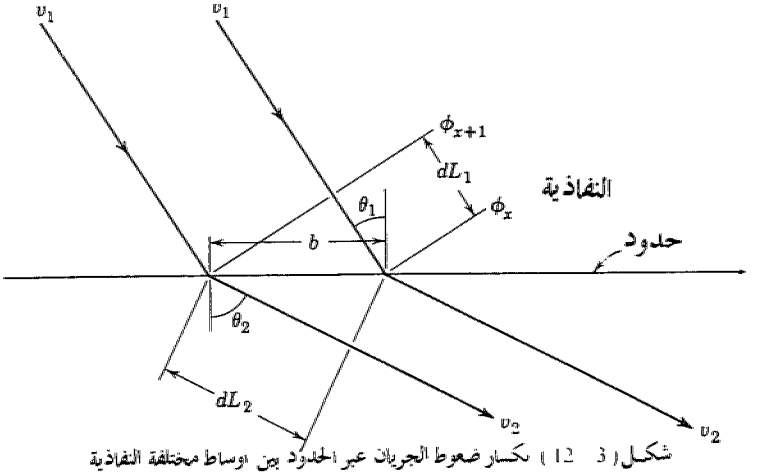
$$\epsilon = \tan^{-1}\left(\frac{K}{v_n} - \tan\delta\right) - \delta \qquad .....(3.60)$$

هذه الحالات التي تكون فيها $v_n > 0$. خطوط الجريان فيها تكون زاوية ($90 - \delta - \epsilon$) ، تحت سطح الطبقة المائية الحرة وتكون هذه الخطوط متوازية مع سطح الطبقة المائية الحرة .

الجريان عبر حد ذا نفاذية Flow Across a Boundary of Permeability

ومشابها للتحليل المذكور في اعلاه حينما يكون الجريان مارا من منطقة ذات نفاذية قيمتها K_1 الى منطقة ذات نفاذية K_2 ، فنتيجة لتغيير النفاذية يتغير اتجاه الجريان وتغير اتجاه الجريان هذا يمكن اشتقاقه بعد الأخذ بنظر الاعتبار قانون الاستمرارية التي يتم التعبير عنها في المنطقتين النفاذيتين .

لنتصور حقل الجريان في الشكل (12.3) . يبدو واضحا ان المكونات العمودية للجريان المقتربة والمغادرة للحد ويجب ان تكون هذه المكونات متساوية . في هذه الحالة يجب أن تكون السرع العمودية v_n بهذه الصيغة :



شكل (3 12) انكسار خطوط الجريان عبر الحدود بين اوساط مختلفة النفاذية

$$vn_1 = vn_2 \qquad \text{.....(3.61)}$$

$$K_1 \frac{dh_1}{dL_1} \cos\theta_1 = K_2 \frac{dh_2}{dL_2} \cos\theta_2 \qquad \text{....(3.62)}$$

θ_1 ، θ_2 هما الزوايا مع العمود كما في الشكل (3.12) كذلك المسافة b على طول الحدود بين خطي جريان متجاورين يجب ان تكون نفسها في كل جهة من الحدود .

من الشكل 3.12 المسافة b يمكن اعطاؤها بـ

$$b = \frac{dL_1}{\sin\theta_1} = \frac{dL_2}{\sin\theta_2} \qquad \text{... (3.63)}$$

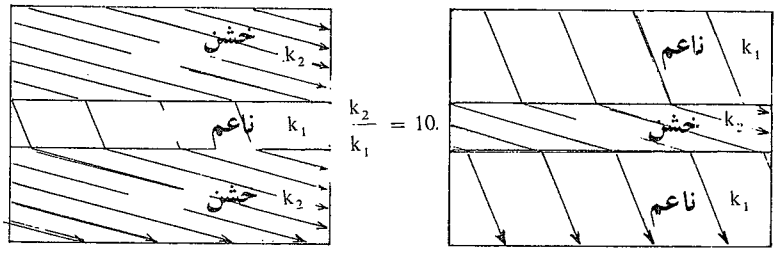
التي يمكـــن اعـــادة ترتيبهـــا :

$$dL_1 \sin\theta_2 = dL_2 \sin\theta_1 \qquad \text{... (3.64)}$$

بقسمة هذه العلاقة بالعلاقة (3.62) ، وملاحظة ان $dh_1 = dh_2$ بين خطين لمنحني تساوي الجهة (equipotential lines)

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} \qquad \text{... (3.65)}$$

لذا فان الجريان المشبع الذي يمر في وسط ذي نفاذية معينة الى آخر له نفاذية مختلفة ، فان انكساراً في خطوط الجريان تحدث بحيث تكون نسبة النفاذية مساوية لنسبة ظل الزوايا . خطوط الجريان ترسم مع العمود والى الحدود المطلوبة نتيجة هذه العلاقة موضحة في الشكل (3.13)



شكـل (3 – 13) الانكسار عبر الطبقات الخشنة والناعمة بنسبة نفاذية 10.

الجريان غيـــر المشبع : Unsaturated Flow

حركة المياه تحت ظروف اقل من التشبع تأخذ مجراها في منطقة التهوية كنتيجة لقوى للخاصية الشعرية الجانبية . نتائج هذه التجارب تدل على ان الجريان غير المشبع يؤكد قانون دارسي ولكن بنفاذية مختلفة من الجريان المشبع . النفاذية النوعية (k) عرفت سابقاً ويمكن تطبيقها فقط في حالة الجريان المشبع على اي حال فان عامل النفاذية غير المشبعة k_u - يمكن تعريفه بالنسبة للجريان غير المشبع* . ان دراسة تجارب جريان مزيج من الغاز والسائل قام بها ويكوف وبوتست (Wyckoff, Botset[76]) دلت على وجود علاقة ثابتة بين درجة التشبع ومعامل النفاذية لرمال ذات نفاذيات واسعة الاختلاف . العالم آرمي (Irmay[34]) يرى ان هذه الحقائق يمكن التعبير عنها

$$k_u = C\,de^2\,(S_s - S_0)^3 \frac{\alpha^3}{(1-\alpha)^2} \qquad \ldots (3.66)$$

C : تكون ثابتة وتساوي تقريبا 0.01 وتعتمد على شكل الحبيبات وتركيب التراب .

d_e = اقطار الحبيبات الفعالة (يكون بحيث نسبة 10 بالمئة من المواد اصغر من هذا الحجم)

S_s = درجة التشبع .

S_0 = التشبع البدائي ، تعني بذلك الجزء من الفراغات المملوءة من الماء غير الجـــاري .

α = المسامية

المنحني للـ k_u/k المرسوم مع S_s كما هوموضح في الشكل (14.3) بالنسبة لـ $S_0 = 0.20$ التي تطابق معلومات العالمان ويكوف / وبوتست بشكل جيد .

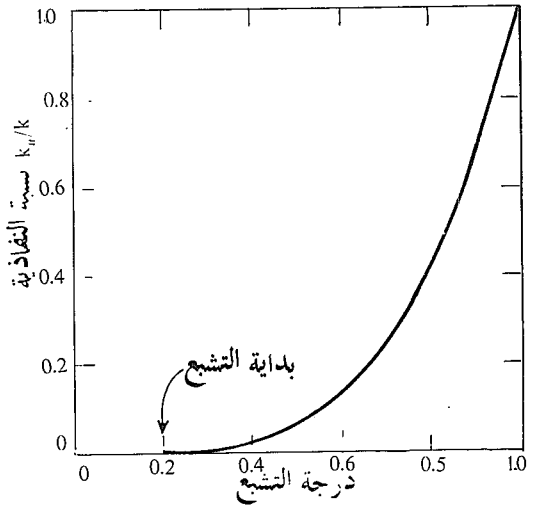
من هنا نلاحظ ان النفاذية المقترنة من الجريان غير المشبع اقل من تلك المقترنة مع الجريان المشبع .

والحقيقة هي انه كلما قلت درجة التشبع تقل النفاذية . وقلة النفاذية في حالة التشبع القليل مثبتة فيزيائياً ايضا ، حيث ان قلتها ومحدوديتها انما هي بسبب ان معظم الفراغات غير المملوءة بالماء . مملوءة بالهواء . وهذا الهواء يعوق حركة ومرور الماء خلال الوسط المسامي .

النفاذية تقترب من الصغر بالقرب من بداية التشبع وهذا يدل على عدم وجود جريان في هذا الحد الادنى . وقطرات الماء تحمل بصورة مبدئية بواسطة قوى الخاصية الشعرية

---

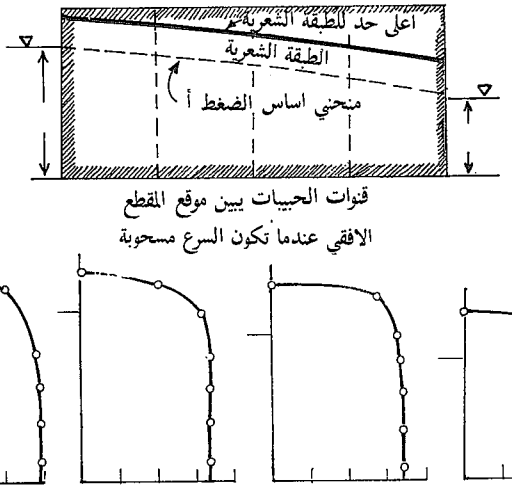
* وان معامل النفاذية غير المشبع Ku من الممكن تعريفه ايضا كالآتي $Ku = \bar{K}u\,\gamma/\mu$ ، وهذا عادة يرجع الى المنقولية الشعرية .



شكل (3 – 14) نسبة النفاذية النوعية غير مشبعة الى النفاذية النوعية المشبعة كدالة للاشباع

التي تنتشر تراكيزها بشكل منفرد في فراغات الفجوات الاصغر حيث يتحجر بواسطة القوى الخارجية .

التجارب المختبرية للقنوات الرملية التي اجراها مافيس وتسيو(Mavis - Tsui) توضح ان الجريان مواز لسطح الطبقة المائية الحرة الذي يحدث في المنطقة الشعرية . ومعظم الحقائق موضحة في الشكل (3 - 15) حيث ان السرعة الافقية في مدخل القناة وفي الربع الأول منها



شكل (3 – 15) السرعة العمودية موضحة خلال قناة تحتوي حبيبات خشنة بنية الجريان في المنطقة الشعرية

المملوء بالرمال الخشنة . والذي يمكن توقعه . السرع في المنطقة غير المشبعة تقل مع المسافة فوق مستوى سطح الماء الحر (منحني الضغط الاسفل) .

لقد اوضح من دلائل التجارب [26] ان الجريان الافقي غير المشبع الى الوسط الجاف المنبعث من مصدر ثابت التشبع يمكن التعبير عنه بـ

$$v = Ct^{-1/2} \qquad \ldots (3.67)$$

v = السرعة C = ثابت t = الزمن

للجريان الى الاعلى والجريان الى الاسفل تعابير اكثر تعقيدا تربط السرعة مع الزمن وقد تم اشتقاقها للجريان الى الاعلى بحيث ان $t \longrightarrow \infty$ $v \longrightarrow 0$ على حين للجريان الى اسفل ثابتة $v \rightarrow$ بينما $t \rightarrow \infty$.

ان الدراسات المختبرية للجريان ذي الاتجاه الواحد من السطح الحر خلال تربة غير مشبعة تدل على ثلاث مناطق رطبة واضحة .

اولاها : مقدمة الرطوبة تدل على وصول حاشية الشعيرات البدائية للمياه المتقدمة . المنطقة الرطبة التالية تبدأ برطوبة الذي يبدأ من الرطوبة الموجودة في الثقوب المتصلة بعضها مع بعض . وتمتد حتى يحصل توازن في الرطوبة . واخيرا تتكون المنطقة التي تسمى منطقة الانتقال ، والتي تحمل بشكل اساسي رطوبة ثابتة كافية وتقترب نسبتها من 80٪ من التشبع .

الفصل الرابع

Ground Water and Well Hydraulics

المياه الجوفية وهيدروليه البئر

لقد تم في الفصل السابق تقديم قانون دراسي والمعادلات الأساس لحركة المياه الجوفية ، وهذه التي يمكن تطبيقها الآن في حالات خصوصية لغرض الحصول على حل المشكلة تتعلق بجريان المياه الجوفية . ومعظم الافتراضات تأخذ بنظر الاعتبار النفاذية ، ونوع الجريان ، والظروف الحدية يجب ان تعمل . على الرغم من ان حلولاً كهذه غالبا مقاربة للظروف الحقلية ومع ذلك فإنها تمتد بتبصر ثمين في تعقيدات تدفق المياه الجوفية . ان التطور الواسع لتجهيزات المياه الجوفية بواسطة ضخ الآبار التي جعلت من المهم الحصول على الحلول العملية لمشاكل تدفق البئر .

ان المعرفة الحاضره لهيدروليه البئر قد ساهم بها سلسلة من المتحرين العاملين على امتداد القرن الماضي .

الجريان الآحادي الاتجاه الثابت (Steady Undirectional flow)

التكوين المائي المحصور (Confined aquifer)

دع تدفق المياه الجوفية بسرعة مقدارها (v) في اتجاه (x) للتكوين المائي المحصور ذي السمك المنتظم . لذا فللتدفق الثابت تختزل المعادلة (3.35) الى : —

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \qquad (4.1)$$

والتي لحلها يؤخذ :

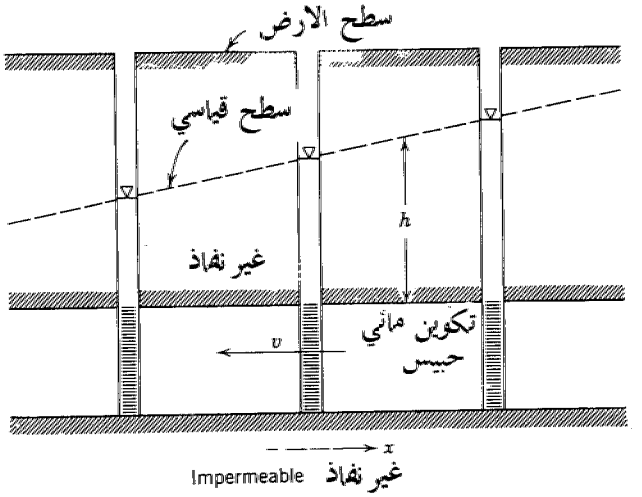
$$h = C_1 x + C_2 \qquad (4.2)$$

حيث (h) هو العمود (Head) فوق مستوى معطى (datum) و (C_2 C_1) هما ثابتا التكامل .

مفترضين ان ($h = 0$) عندما ($x = 0$) و $\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{v}{K}$ من قانون دارسي هذا فإن

$$h = \frac{vx}{K} \qquad \ldots (4.3)$$

وهذا ينص على ان العمود (Head) يقل خطيا ، كما هو موضح في الشكل (1.4) بتدفق في اتجاه (x_1) السالب .



شكل (4 – 1) تدفق الاحادي الاتجاه الثابت للتكوين المائي المحصور ذو السمك المنتظم

التكوين المائي غير المحصور (Unconfined aquifer)

لحالة التدفق المشابهة في التكوين المائي غير المحصور فان حلا تحليليا مباشرا لمعادلة لابلاس (Laplace) غير ممكن حيث ان الصعوبة تنشأ من حقيقة ان مستوى الماء في الحاله ذات الاتجاهين (two dimensional Case) يمثل خط التدفق .

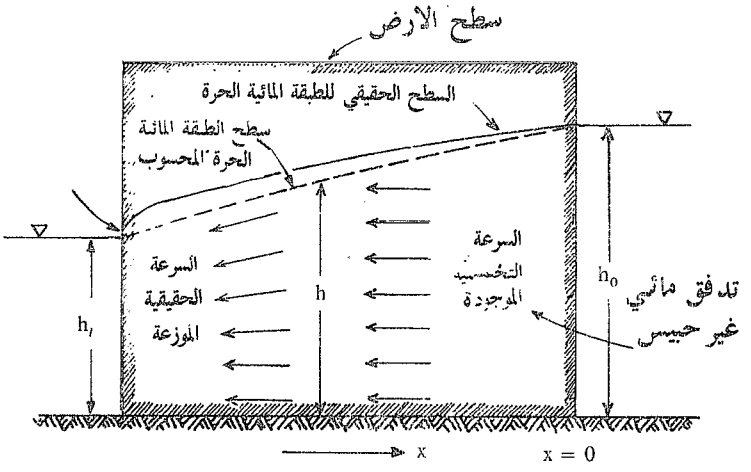
ان شكل مستوى الماء يحدد توزيع التدفق . ولكن في نفس الوقت فان توزيع التدفق يتحكم بشكل مستوى الماء . وللحصول على الحل فان ديوبت [12] (Dupuit) افترض :–

أ – سرعة الجريان متناسبه الى ظل الممال الهيدروليكي بدلا من الجيب (Sine) كما معرف في المعادلة 3.28 .

ب – الجريان يكون أفقياً ومنتظماً في كل مكان في المقطع العمودي .

هذه الافتراضات على الرغم من تمكنها من الحصول على الحل ، فانها تحدد من تطبيق النتائج . للتدفق الاحادي الاتجاه . كما هو موضح في الشكل (4.2) فان التصريف لكل وحده عرض (q) عند اي مقطع عمودي يمكن ان يعطي :

$$q = Kh \frac{dh}{dx} \qquad \ldots (4.4)$$



شكل (4 - 2) التدفق الاحادي في التكوين المائي الغير محبس بين جسمين مائيين مع حدود افقية .

حيث ان (K) هو معامل النفاذية و (h) هو ارتفاع مستوى الماء فوق القاعدة غير النفاذة و (x) هو اتجاه التدفق بالتكامل .

$$qx = \frac{K}{2} h^2 + C \qquad \ldots (4.5)$$

واذا كان ($h = h_0$) حيث ($x = 0$) لذا فان معادلة ديوبت (Dupiut) هي :

$$q = \frac{K}{2x} (h^2 - h_0^2) \qquad \ldots (4.6)$$

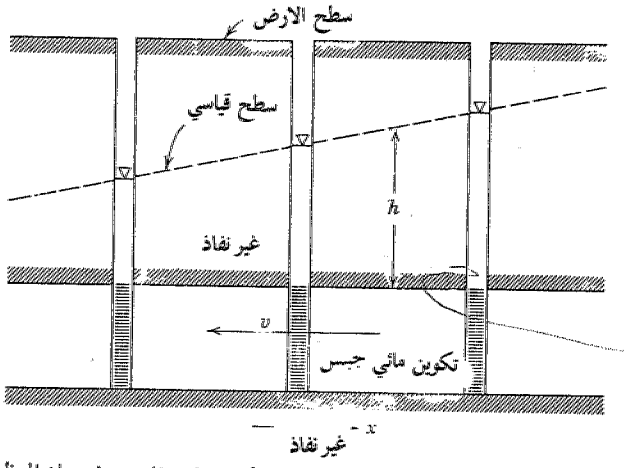
تنتج وتدل على ان مستوى الماء ذو شكل قطعي مكافيء .

للجريان بين جسمين ثابتين لأعمدة الماء الثابتة (h_1, h_0) كما هو في الشكل 4.2 فان انحدار مستوى الماء عند الحد المعاكس للتيار (Up Stream) بالنسبة للتكوين المائي (مع اهمال المنطقة الشعرية) حيث ان

$$\frac{dh}{dx} = \frac{q}{Kh_0} \qquad \ldots (4.7)$$

ولكن الحد ($h = h_0$) هو خط الجهد المتساوي . وذلك لأن جهد السائل في جسم الماء ثابت . وبالتالي فان مستوى الماء يجب أن يكون افقيا عند هذا المقطع الذي هو متناقض (inconsistent) مع المعادلة (4.7) اما في اتجاه الجريان ، فان مستوى الماء ذا المقطع المكافيء والموصوف بالمعادلة (4.6) يزداد في الانحدار حسب افتراضات ديوبت (Dupiut) المنصوص عليها سابقا . حيث ان التقريب يكون ضعيفاً وبعيدا عن الجريان

الحقيقي . لهذا فان مستوى الماء الحقيقي ينحرف اكثر فاكثر من موقعه المحسوب في اتجاه التدفق كما هو مبين في الشكل (4-2) .



شكل (4.1) التدفق الاحادي الاتجاه الثابت للتكوين المائي المحصورذوسمك المنتظم.

والحقيقة هي ان مستوى الماء الحقيقي يقع فوق المستوى المحسوب التي يمكن توضيحها بحقيقة ان تدفقات ديوبت (Dupiut) مفترضة ان كل التدفقات افقية على حين ان السرع الحقيقية لنفس المقدار لها مركبة عمودية باتجاه الأسفل بحيث ان سمك مشبع اكبر المطلوب لنفس التصريف عند حد اسفل الجريان (down stream) وعدم استمراريته في التدفق يتكون وذلك لأنه ليس هناك شكل تدفق ثابت يقدر ان يربط مستوى الماء مباشرة (باتجاه تيار سطح الماء الحر اسفل التيار) . ان مستوى الماء يقترب بالفعل من الحافة بصورة متماسة . خاصة فوق سطح جسم الماء حيث يتكون سطح ناضح (seepage face)

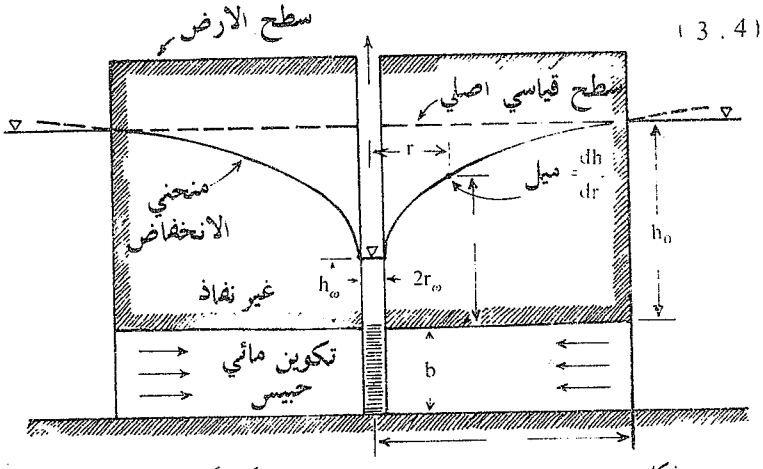
ان التناقضات المذكورة في اعلاه تدل على ان مستوى الماء لايتبع الشكل القطعي لمكافيء المعادلة (4.6) ومع ذلك فالنسبة للمنحدرات المنبسطة ، حيث الجيب والظل متساويان تقريبا . ذلك انها تخمن تقريبا موقع مستوى الماء ماعدا قرب الدفق الخارجي (Out flow) . المعادلة مع ذلك تحدد بدقة (q) و (K) لرؤوس الحافات المعطاة [40]

الجريان الشعاعي الثابت الى البئر (Steady radial flow to awell)

عند الضخ من اي بئر يؤخذ الماء من التكوين المائي المحيط بالبئر ومن الطبقة المائية الحرة وبذلك ينخفض مستوى الماء أو السطح القياسي الانضغاطي ، معتمداً على نوع التكوين المائي ، الانخفاض (drawdown) عند نقطة معطاة هي المسافة التي ينخفض بها مستوى الماء .

ان منحني الانخفاض يبين اختلاف الانخفاض مع المسافة من البئر انظر الشكل .

(3 . 4)



شكل (4 – 3) الجريان الشعاعي الثابت لبئر مخترق تكويناً مائياً محصور في الجزيرة

يتخذ منحني الانخفاض ، وفي ثلاثة اتجاهات شكلاً مخروطياً يعرف بـ (مخروط الانخفاض كذلك فان الحد الخارجي لمخروط الانخفاض يعرف مساحة تأثير البئر .

التكوين المائي المحصور (Confined aquiter)

لاشتقاق معادلة التدفق الشعاعي (التي تربط تصريف البئر الى الانخفاض) لبئر مخترق بصورة كاملة ، تكوينا مائيا محصورا كما في الشكل (4.3) ، فهي تبرهن على فائدتها ان الجريان مفترض بعديز باتجاهين الى البئر متمركز على جزيرة دائريه . ومخترق تكويناً مائيا متساوي الخصائص ومتجانس . وحيث أن التدفق في كل مكان افقي ، فان افتراضات ديوبت (Dupiut) تطبق بدون خطأ . وذلك باستعمال الاحداثيات القطبية المستوية مع البئر اساسا كمركز . فان تصريف البئر (Q) عند أي مسافة (r) تساوي ·—

$$Q = Av = 2\pi rbK \frac{dh}{dr} \qquad \ldots (4.8)$$

في التدفق الشعاعي الثابت الى البئر ، فان اعادة تنظيم وتكامل الظروف الحدية عند البئر ($h = h_w$) و ($r = r_w$) وعند حافة الجزيرة . ($h = h_0$) و ($r = r_0$) تعطى :-

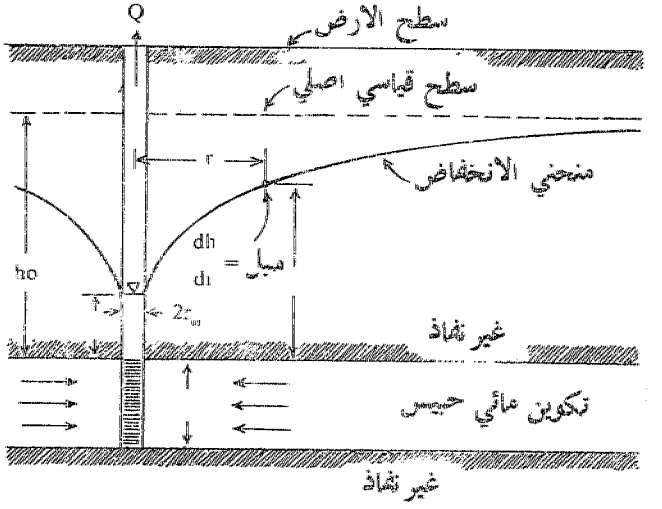
$$h_0 - h_w = \frac{Q}{2\pi Kb} \ln \frac{r_0}{r_w} \qquad \ldots (4.9)$$

او

$$Q = 2\pi Kb \frac{h_0 - h_w}{\ln (r_0 / r_w)} \qquad \ldots (4.10)$$

وفي الحالة الاكثر عموما للبئر المخترق تكوينا مائيا محصوراً واسعاً كما في الشكل (4.4) لايوجد حد خارجي لـ (r)
من الاشتقاق أعلاه عند اي قيمة معطاة لـ (r)

$$Q = 2\pi Kb \frac{h - h_w}{\ln (r / r_w)} \qquad \ldots (4.11)$$



شكل (4 – 4) الجريان الشعاعي الى البئر مخترق تكوين مائي محصور واسع

التي تبين ان (h) تزداد بصورة غير محددة بازدياد (r) ومع ذلك فان (h) العظمى هي العمود المنتظم الابتدائي (h_0) . لذا من الناحية النظرية فان التدفق الشعاعي الثابت في تكوين مائي واسع غير موجود . على اي حال من الوجهة العملية فان (h) تصل (h_0)

مع المسافة من البئر . كتقريب مقارب ، افترض ان نصف قطر التأثير ($r = r_0$) حيث ($h = h_0$) لذا فان (Q) لهذه الحدود معطاة بالمعادلة (4.10) . وبالتخلص من (Q) بين المعادلتين (4.10) و (4.11) ينتج :-

$$h - h_w = (h_0 - h_w) \frac{\ln(r/r_w)}{\ln(r_0/r_w)} \qquad \ldots (4.12)$$

التي تبين أن العمود (head) يختلف خطيا مع لوغاريتم المسافة ، بغض النظر عن معدل التصريف .

ان المعادلة (4.11) تعرف (بالتوازن) او معادلة ثيم[56] (Thiem) وان نفاذية التكوين المائي من الممكن تحديدها من البئر الضخي . وبما ان اي نقطتين ستعرف بالانخفاض اللوغاريتمي فالطريقة تتكون من قياسات الانخفاضات (drawdowrs) في بئرين للملاحظة . على مسافات مختلفة من البئر الضاخ بمعدل ثابت .

ان معامل النفاذية يعطى بواسطة : -

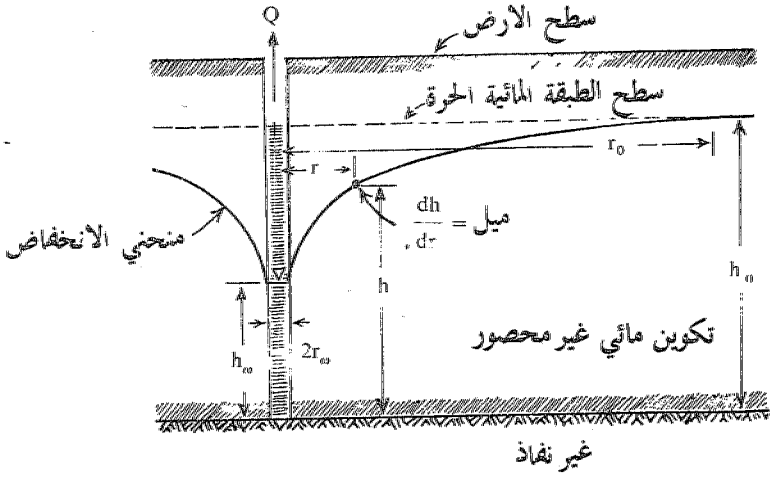
$$K = \frac{Q}{2\pi b(h_2 - h_1)} \ln \frac{r_2}{r_1} \qquad \ldots (4.13)$$

حيث r_1 و r_2 هما المسافتان وh_1 و h_2 هما اعمدة آبار الملاحظة على التوالي لكي تطبق المعادلة فان الضخ يجب ان يستمر بمعدل منتظم ولزمن كاف ليصل الانخفاض الى ظرف – حالة ثابتة وبعبارة اخرى ، تغيرات الانخفاض مع الزمن تكون مهملة . ان آبار الملاحظة يجب ان تكون مثبتة بصورة قريبة الى حد كافٍ نسبة الى بئر الضخ بحيث ان انخفاضاتها قيمة ويمكن قياسها بصورة ثابتة .

ان الاشتقاق يفترض بان التكوين المائي يكون متجانسا ومتساوي الخصائص وهو ذو امتداد غير محدد ، ذلك أن البئر يخترق التكوين المائي بأكمله ؛ بأن الجريان انسيابي (Laminar) . وعلى الرغم من هذه الافتراضات المحددة فان معادلة التوازن قد طبقت بصورة واسعة لتحديدات النفاذية .

التكوين المائي غير المحصور (Unconfined aquifer)

هنالك معادلة للتدفق الشعاعي الثابت الى البئر في التكوين المائي غير المحصور يمكن اشتقاقها ايضا بمساعدة افتراضات (ديوبت Dupiut) . كما هو موضح في الشكل (4.5) فان بئرا مخترقة تكوينا مائيا بصورة كاملة الى القاعدة الافقية وحد متحد المركز يحيط بالبئر ذات العمود الثابت ، وان تصريف البئر هو :



شكل (4 – 5) الجريان الشعاعي الى البئر مخترقاً تكوين مائي غير محصور

$$Q = 2\pi r K h \frac{dh}{dr} \qquad \ldots (4.14)$$

التي متى ما تكاملت بين حدود ($h = h_w$) عندما تكون ($r = r_w$) و($h = h_0$)عندما تكون ($r = r_0$) فانها سوف تعطي : –

$$Q = \pi K \frac{h_0^2 - h_w^2}{\ln (r_0 / r_w)} \qquad \ldots (4.15)$$

وبسبب كبر مركبات التدفق العمودية الكبيرة تفشل هذه المعادلة في وصف منحنى الانخفاض بدقة قرب البئر. على أي حال ان تقدير ال (Q) لاعمدة معطاة هوشيء جيد في التطبيق : وكذلك فان اختيار نصف قطر التأثير (r_0) هوتقريبي واعتباطي . ولكن التغيرفي (Q) قليل المدى واسع لـ (r_0) .

القيم المقترحة لـ (r_0) تقع في مدى من (500 الى 1000 قدم) .

وهذه المسافات لا تدل على حدود مضمونة حيث الانخفاض يمكن ملاحظته ولكن عوضا عن ذلك فانهم يستعملون التقريبات للتطبيق العملي للمعادلة .

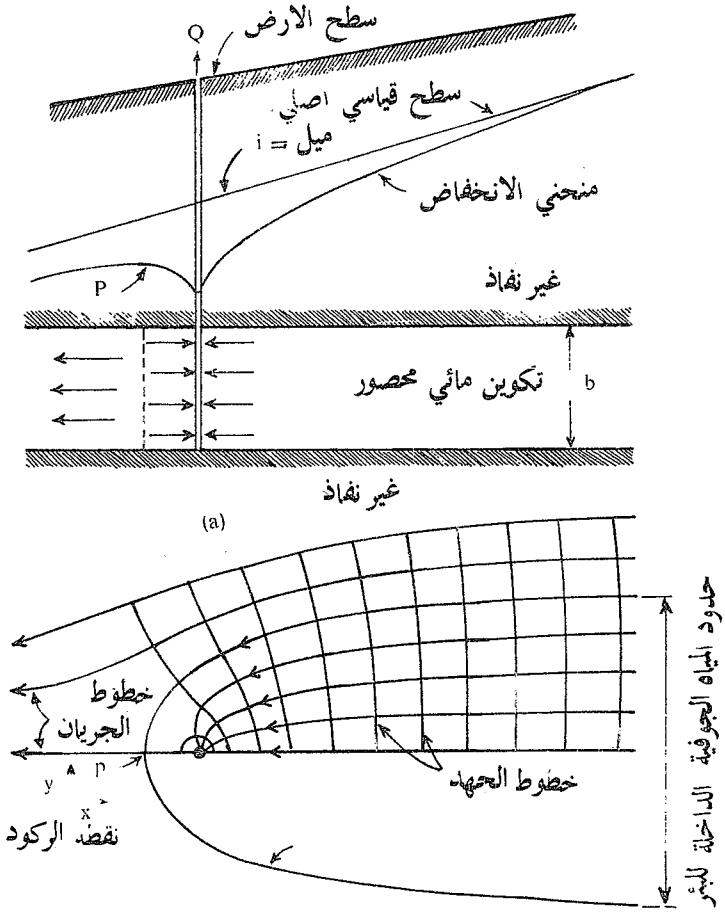
أي زوج من المسافات والاعمدة يمكن ايضا ان يعوض كما عمل من المعادلة (4.13) .

البئر في جريان منتظم

Well in auniform flow

ان منحنيات الانخفاض لجريان البئر المقدمة حتى الآن قد افترضت ان سطح المياه الجوفية الابتدائي افقيا .

الحالة العملية هي ان البئر يضخ من التكوين المائي ، الذي له جريان حقلي منتظم ، كما هو مبين بمستوى مائل للسطح القياس الانضغاطي او مستوى الماء . الشكل 4.6 يبين المنظر مسطحا ومقطعا لبئر مخترقة تكوينا صخريا محصوراً حاوياً على الماء ذا سطح قياس



شكل (4 – 6) الجريان الى البئر مخترق تكوين مائي محصور له سطح منحدر قياسي

(a) مقطع رأسي

(b) منظر مسطح

انضغاطي مائل . من الظاهر بأن المساحة الدائرية للتأثير المرتبطة بشكل الجريان الشعاعي تصبح مشوهة . وعلى أي حال فان لمعظم المنحدرات الطبيعية المنبسطة نسبيا ، تصلح معادلة (ديوبيت Dupiut) للجريان الشعاعي للتطبيق ، من دون خطأ كبير . من التحريات الحقلية للآبار الضاخة من تكوين مائي له ممال هيدروليكي منحدر وجد العالم ونزل (Wenzel) ان النفاذية يمكن تحديدها وذلك بأخذ معدل الممالات الهيدروليكية على كل جانب للبئر الضاخ والواقعة على خط موازٍ لاتجاه التدفق الطبيعي ، ان التعبير الناتج يعرف بمعادلة الممال ذات الشكل الآتي :

$$K = \frac{2Q}{\pi r (h_u + h_d)(i_u + i_d)} \qquad \ldots (4.16)$$

للتكوين المائي غير المحصور . وحيث (Q) هو معدل الضخ (h_d , h_u) هما السمكان المشبعان و (i_d,i_u) هما منحدرا مستوى الماء الحر عند مسافة (r) ضد اتجاه التيار مع اتجاه التيار من البئر على التوالي للتكوين المائي المحصور ، فان المنحدرات القياسية الانضغاطية تحل محل انحدرات مستويات الماء و ($h_u + h_d$) تبدل بـ (2b) حيث (b) هو سمك التكوين المائي .

في الشكل (4.d) تقسم المياه الجوفية علامة الحد للمنطقة التي تنتج جرياناً داخلياً (inflow) الى البئر . موضحة للبئر الضاخ لزمن غير محدود فان الحد سيمتد الى حد التكوين المائي مبنية على افتراضات ديوبت (Dupiut) ذلك أن التعبير للحد للمنطقة المولدة دفقاً داخلياً يمكن اشتقاقه من المعادلة الآتية :-

$$-\frac{y}{x} = \tan\left(\frac{2\pi Kbi}{Q} y\right) \qquad \ldots 4.17$$

حيث ان احداثي المستطيل كما هو مبين في الشكل (4.6) بنقطة الأصل عند البئر (b) هو سمك التكوين المائي (Q) هو معدل التصريف . (i) هو انحدار المستوى القياسي الانضغاطي الطبيعي . و (K) هي النفاذية ويتبع من المعادلة (4.17) بان الحد يقترب محاذياً .

$$y = \pm \frac{Q}{2Kbi} \qquad \ldots (4.18)$$

كلما تقترب (x) من اللانهاية ($x \to \infty$) الحد للمساحة المساهمة أو المساحة المضافة والممتدة أسفل اتجاه الجريان الى نقطة الركود تصبح :

$$x = -\frac{Q}{2\pi Kbi} \qquad \ldots (4.19)$$

المعادلات (4.17) الى (4.19) أيضاً تطبق على التكوينات غير المحصورة بإبدال (b) بالسمك المشبع والمنتظم للتكوين المائي (h_0) . على شرط أن يكون الأنخفاض قليلاً نسبة الى سمك التكوين المائي .

التدفق الثابت مع التطعيم المنتظم

(Steady flow with uniform recharge)

الشكل 4 ـ 7 يوضح بئراً مخترقا لتكوين مائي غير محصور ، يطعم بشكل منتظم بمعدل W من سقوط المطر او مياه الارواء الفائض أو مصادر المياه السطحية الأخرى .

ان الجريان (Q) بإتجاه البئر يزداد كلما اقترب الماء من البئر ويصل النقطة العظمى لـ (Qw) عند البئر .

ان الأزدياد في الجريان (dQ) خلال اسطوانة ذات سمك (dr) ونصف قطر (r) يأتي من المياه المطعمة والداخلة الاسطوانة من الأعلى لذا :

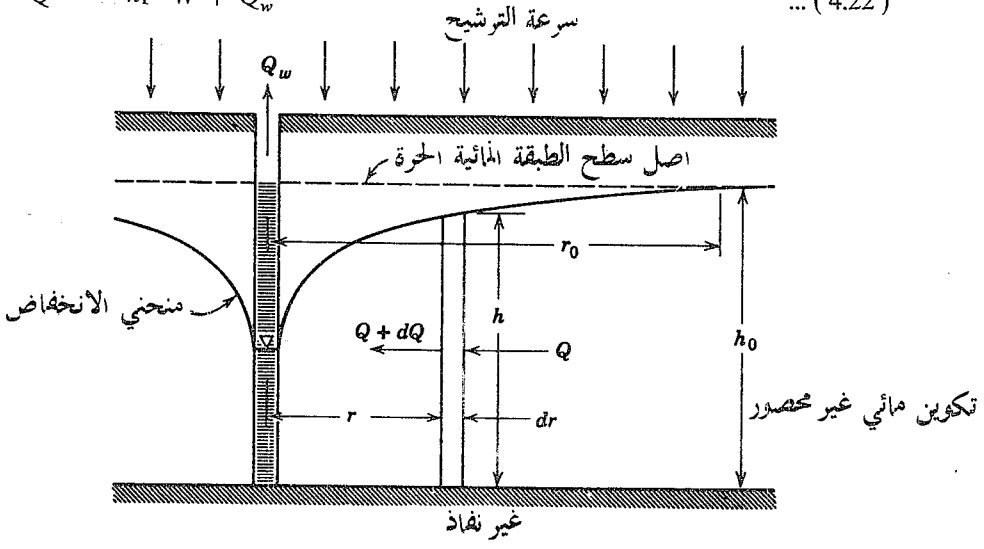
$$dQ = -2\pi r\, dr\, W \qquad \ldots (4.20)$$

بالتكامل ينتج :

$$Q = -\pi r^2 W + C \qquad \ldots (4.21)$$

ولكن عند البئر $(r \to 0)$ بحيث $Q = Q_w$

$$Q = -\pi r^2 W + Q_w \qquad \ldots (4.22)$$



شكل (4 – 7) الجريان الثابت الى البئر مخترق تطعيم منتظم تكوين مائي غير محصور .

وبتعويض هذا التدفق في المعادلة ورد في (معادلة 4.14) يكون التدفق الى البئر كما هو موضح في المعادلة الآتية : —

$$2\pi rKh \frac{dh}{dr} = -\pi r^2 W + Q_w \quad \ldots (4.23)$$

وبالتكامل للمعادلة التي في أعلاه ، وملاحظة أن $(h = h_0)$ عندما $(r = r_0)$ ينتج معادلة لمنحني الأنخفاض : —

$$h_0^2 - h^2 = \frac{W}{2K}(r^2 - r_0^2) + \frac{Q_w}{\pi K} \ln \frac{r_0}{r} \quad \ldots (4.24)$$

وبمقارنة المعادلة (4.24) مع المعادلة (4.15) ، فإن تأثير التطعيم العمودي يصبح ظاهرياً

ان التحليل اعلاه يمكن انجازه بخطوة اخرى لتعطي نصف قطر التأثير (r_0) بدون الاعتماد على النفاذية (K) وبتفاضل المعادلة 4.24 نسبة الى r ينتج :

$$-2h \frac{dh}{dr} = -\frac{rW}{K} - \frac{Q_w}{\pi K} \frac{1}{r} \quad \ldots (4.25)$$

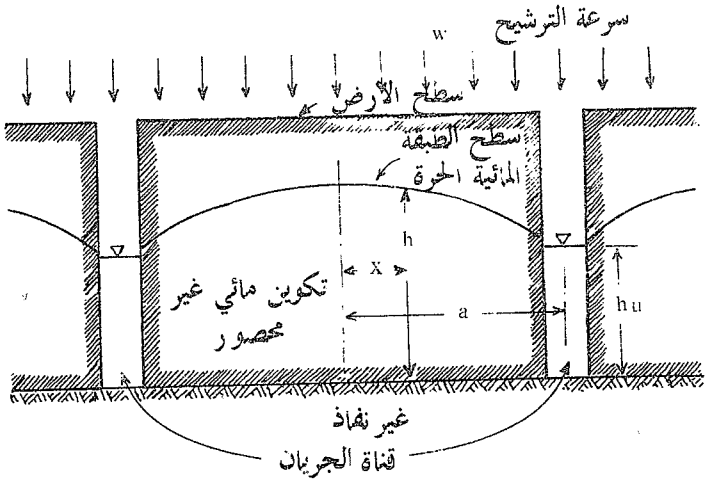
ولكن للتكوين المائي الواسع فان $dh/dr = 0$ حيث $(r = r_0)$ لذا فان المعادلة تختزل الى : —

$$Q_w = \pi r_0^2 W \quad \ldots (4.26)$$

لهذا فان الجريان الكلي للبئر يساوي التطعيم ضمن الدائرة المعرفة بواسطة نصف قطر التأثير وبالعكس فان نصف قطر التأثير هو دالة لضخ البئر ومعدل التطعيم فقط .

ان تقديرات دفق القاعدة (baseflow) للجداول (انظر الفصل 6) او معدل التطعيم للمياه الجوفية يمكن حسابها لحالات خاصة . على سبيل المثال تصور الحدود المثالية الموضحة في الشكل (8.4) لجدولين متوازيين طوليين بصورة غير محددة مخترقين بصورة كاملة لتكوين مائي غير محصور بمعدل التطعيم المستمر (w) الذي يحدث بصورة منتظمة فوق التكوين المائي بالامكان ملاحظة أن المظهر الجانبي للحالة الثابتة لمستوى الماء يعبر بواسطة المعادلة : —

$$h^2 = h_a^2 + \frac{W}{K}(a^2 - x^2) \quad \ldots (4.27)$$



شكل (4 – 8) الجريان الثابت لمجرين متوازيين منتظمين الترشيح في تكوين مائي غير محصور .

حيث h ، ha ، و [ax و] كما هي معرفة في الشكل 4.8 و (K) هي النفاذية من التماثل والاستمرارية :

$$Q_b = 2aW \qquad .....(4.28)$$

حيث (Q_b) هو الجريان القاعدي الداخل للمجرى لكل وحدة طول من قناة المجرى . اذا كانت (h) معروفة عند اي نقطة (Q_b) او (W) يمكن حسابهما على شرط ان (K) معلومة

الدفق الشعاعي غير الثابت الى البئر (Unsteady Radial flow to a well)

متى مااخترق البئر تكوينياً مائياً ممتداً وتم ضخه بمعدل ثابت امتد تأثير التصريف مع الزمن باتجاه الخارج ان معدل النقص في العمود مضروبا بمعامل الخزن المجموع في مساحة التاثير يساوي التصريف . لان الماء يجب ان ياتي من اختزال الخزن ضمن التكوين المائي وان العمود سيستمر في النقصان مادام التكوين المائي غير محدود بصورة تأثيرية لذا فليس هناك تدفق ذو حالة ثابتة يمكن تواجده في ظروف كهذا .

ان معدل الانخفاض على اي حال يقل استمراريا كلما اتسعت مساحة التأثير .
المعادلة التفاضلية التي تطبق على هذه الحالة هي المعادلة 3.43 والتي في الاحداثيات القطبية المستوية تصبح

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T}\frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{.....(4.29)}$$

حيث (T) هو معامل المنقولية (Coefficient of Transmissibility) { T = Kb) و (b) هو سمك التكوين المائي) و (t) هو الزمن منذ ابتداء الضخ .

ثايس [53] Theis امكنه الحصول على حل للمعادلة (4.29) مبني على التشابه بين جريان المياه الجوفية والاتصال الحراري . بافتراض ان البئر يحل محل حوض رياضي ذي قوه ثابتة ذلك بأن (h = ho) ويمثل ابتداء الضخ « انظر الشكلين 4.4 و 4.5) وذلك أن (h→ho) كلما (r → ∞) بعد ابتداء الضخ (t > 0) فتكون حل المعادلة كالآتي .

$$ho - h = \frac{Q}{4\pi T}\int_{r^2 S/4Tt}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u}\,du \quad \text{.....(4.30)}$$

ويمكن الحصول عليه حيث $u = r^2S/4Tt$ و (Q) هو تصريف البئر الثابت .

المعادلة 4.30 تعرف بمعادلة عدم التوازن او معادلة ثايس Theis .

ان التكامل هو دالة للحد الاسفل ويعرف بـ « التكامل الاسي (exponential integral) الذي يمكن ان يمتد كمسلسلات منغلقة لذا فان المعادلة (4.30) تصبح :-

$$ho - h = \frac{Q}{4\pi T}\left[-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \text{.....} \right] \quad (4.31)$$

ان حلولا تقريبية ابسط مذكورة في ادناه قد طورت وهي دقيقة بصورة كافية للاغراض الحقليـــة .

معادلة عدم التوازن للضخ التجريبي

(Non equillbrium equation for pumping tests)

ان معادلة عدم التوازن تسمح بتحديد ثوابت التكوين (T و S) بواسطة مايسمى بالضخ التجريبي للابار واذا كانت الثوابت معلومة ، فان الانخفاض يمكن حسابه لتصريف بئر ما وتتطلب الافتراضات في تطبيق المعادلة (4.30) يجب ملاحظتها : التكوين المائي يكون متجانسا ومتساوي الخصائص * وذا امتداد مساحي غير محدود ، البئر يخترق التكوين المائي بأكمله ، قطر البئر صغير الى ابعد الحدود والماء المزال من الخزين يصـــرف آنيـا

---

* التكوينات المائية المتكونة من الحجر الجيري او الحجر الرملي او أي نوع آخر من الصخور مع وجود ثقوب ثانوية فيها تشكل صفات متجانسة فيما اذا كانت بمساحات كبيرة . على هذا الافتراض ، لقد وجد ان نتائج الضخ التجريبي من هذه الصخور تعطي نتائج جيدة .

مع انخفاض العمود . القيم المتوسطة لـ S و T يمكن الحصول عليها في جوار البئر الضخي بقياس انخفاض عمود الماء في واحد او اكثر من ابار الملاحظة باختلاف الزمن وتحت تأثير معدل الضخ الثابت .

وبسبب الصعوبات الرياضية التي وجهت في تطبيق المعادلة (4.30) او مكافئتها المعادلة (4.31) فان عدداً من الباحثين قد طوروا الحلول التقريبية التي يمكن تطبيقها بصورة جاهزة للحصول على اجوبة مرغوبة ثلاثة طرق بواسطة (ثايس[53,60] Theis جاكوب[10,29] Jacob جاو[9] Chow) مبينة في المقاطع التالية مع الجداول الضرورية او منحنيات بيانه (graphs) . وثم مثال موضح مصاحب لكل طريقة .

الحل بطريقة ثايس Theis (Theis Method of Solution)

باستعمال القيم الحقلية ، يمكن التعبير عن المعادلة (4.30) بما يأتي :

$$h_0 - h = \frac{114.6Q}{T} W(u) \qquad .....(4.32)$$

حيث $(h_0 - h)$ هو الانخفاض بالاقدام (Q) هو تصريف البئر بالغالون/ دقيقة . (T) هو معامل المنقولية بالغالون / يوم / قدم و w(u) هو التكامل الأسي ويصطلح عليه بـ « دالة البئر » .

اما الخلاف او الخلاصة (u) فانها معطاة بـ :

$$u = \frac{1.87r^2S}{Tt} \qquad ..... (4.33)$$

حيث (S) هو معامل الاختزان ويكون عادة بدون وحدات (dimensionless) (r) المسافة بالاقدام من بئر الملاحظة و (t) الزمن بالأيام منذ ابتداء الضخ . للحصول على ثوابت التكوين من معطيات الضخ التجريبي فان Theis اقترح حلاً تقريبياً مبنياً على طريقة بيانية للمطابقة . يحضر رسم على ورقة لوغارتيمية بـ w(u) مقابل (u) . يعرف بـ « منحني النموذج » (Type Curve)

الجدول (4-1) يعطي قيماً الـ w(u) لمدى بعيد وواسع من الـ (u) .

قيم الانخفاض $(h_o - h)$ ترسم مقابل قيم (r^2/t) على ورقة لوغاريتمية لها نفس حجم تلك التي « لمنحني النموذج » .

جدول (ـ ـ ١ قيم u مع قيم **TABLE 4.1 Values of $W(u)$ for Values of**

(After Wenzel [60])

u	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
$\times 1$	0.219	0.049	0.013	0.0038	0.0011	0.00036	0.00012	0.000038	0.000012
$\times 10^{-1}$	1.82	1.22	0.91	0.70	0.56	0.45	0.37	0.31	0.26
$\times 10^{-2}$	4.04	3.35	2.96	2.68	2.47	2.30	2.15	2.03	1.92
$\times 10^{-3}$	6.33	5.64	5.23	4.95	4.73	4.54	4.39	4.26	4.14
$\times 10^{-4}$	8.63	7.94	7.53	7.25	7.02	6.84	6.69	6.55	6.44
$\times 10^{-5}$	10.94	10.24	9.84	9.55	9.33	9.14	8.99	8.86	8.74
$\times 10^{-6}$	13.24	12.55	12.14	11.85	11.63	11.45	11.29	11.16	11.04
$\times 10^{-7}$	15.54	14.85	14.44	14.15	13.93	13.75	13.60	13.46	13.34
$\times 10^{-8}$	17.84	17.15	16.74	16.46	16.23	16.05	15.90	15.76	15.65
$\times 10^{-9}$	20.15	19.45	19.05	18.76	18.54	18.35	18.20	18.07	17.95
$\times 10^{-10}$	22.45	21.76	21.35	21.06	20.84	20.66	20.50	20.37	20.25
$\times 10^{-11}$	24.75	24.06	23.65	23.36	23.14	22.96	22.81	22.67	22.55
$\times 10^{-12}$	27.05	26.36	25.96	25.67	25.44	25.26	25.11	24.97	24.86
$\times 10^{-13}$	29.36	28.66	28.26	27.97	27.75	27.56	27.41	27.28	27.16
$\times 10^{-14}$	31.66	30.97	30.56	30.27	30.05	29.87	29.71	29.58	29.46
$\times 10^{-15}$	33.96	33.27	32.86	32.58	32.35	32.17	32.02	31.88	31.76

ان منحني المعطيات الملاحظ يطبق فوق منحني النموذج ، بابقاء احداثيات المحاور للمنحنيين متوازيين ويضبط حتى يمكن ايجاد الموقع وبالتجربة ، حيث معظم النقاط المثبتة للمعطيات الملاحظة تقع على جزء من منحني النموذج . وثمة نقطة اعتباطية تختار على الجزء او القطعة المنطبقة . وتسجل احداثيات هذه النقطة النظيرة او المثيلة مع القيم المحددة لـ $W(u)$ و u و $(h_o - h)$ و (r^2/t) ويمكن حينئذ الحصول على قيم (T,S) من تطبيق المعادلتين (4.33 , 4.32)

مثال على طريقة ثايس Theis : —

بئر مخترق لتكوين مائي محصور يضخ بمعدل منتظم 500gpm الانخفاضات خلال فترة الضخ قد قيست في بئر ملاحظة يبعد (200 ft) ملاحظات الـ $h_o - h$ و (t) قد سجلت في الجدول (2.4) . قيم (r^2/t) في ft^2/day قد حسبت وتظهر في العمود الأيمن للجدول (2.4) . قيم $(h_o - h)$ و (r^2/t) قد رسمت على ورقة لوغاريتمية . قيم $W(u)$ و u من الجدول (1.4) قد ثبتت على ورقة لوغاريتمية اخرى ، والمنحني قد رسم خلال النقاط

توضع الورقتان احداهما فوق الأخرى وتحرك بمحاور احداثية متوازية حتى تنطبق نقاط الملاحظة على المنحني الموضح في الشكل (4.9) . وثمة نقطة تختار على امتداد الجزء المنطبق تعطي قيما لـ $(h_o - h = 1.2)$ و $(r^2/t = 1.95 \times 10^7)$ و $(W(u) = 2.15)$ و $(u) = 70 \times 10^{-2})$ لهذا فمن المعادلة (4.32)

* هناك طريقتين مفيدتين لغرض تقليل الزمن الحسابي اقترحتا من قبل العالم والتن walton . اولاهما ، لتجنب حساب قيم r^2/t بواسطة رسم $h_o - h$ الزمن ، بدلاً من r^2/t ، وفي هذه الحالة ، يتم وضع المنحنى النموذجي بحيث يتم تطبيق الرسم الخاص بالمعلومات الحقلية عليه وتحديد نقطة اعتباطية matching point ، بحيث تكون النتائج متناظرة . الشيء الثاني هو اختيار النقطة الاعتباطية ليس على المنحني المرسوم ولكن بدلاً من ذلك على نقاط التقاطع للمحاور الاساسية للمنحني النموذجي ، مثال على ذلك : عندما تكون قيمة $W(u) = 1.0$ و $(u) = 0.01$ ، عند حساب قيم T,S يكون بواسطة المسطرة المتحركة ممكنا وتحديداً .

جدول (4 – 2) مجال الضخ التجريبي

مجال الفتح التجريبي (من دائرة المسح الجيولوجي الامريكي)
الاختلاف الزمن عند الفتح قدم^2 / يوم قدم الايام الثواني

TABLE 4.2 Pumping Test Data

(From U. S. Geological Survey)

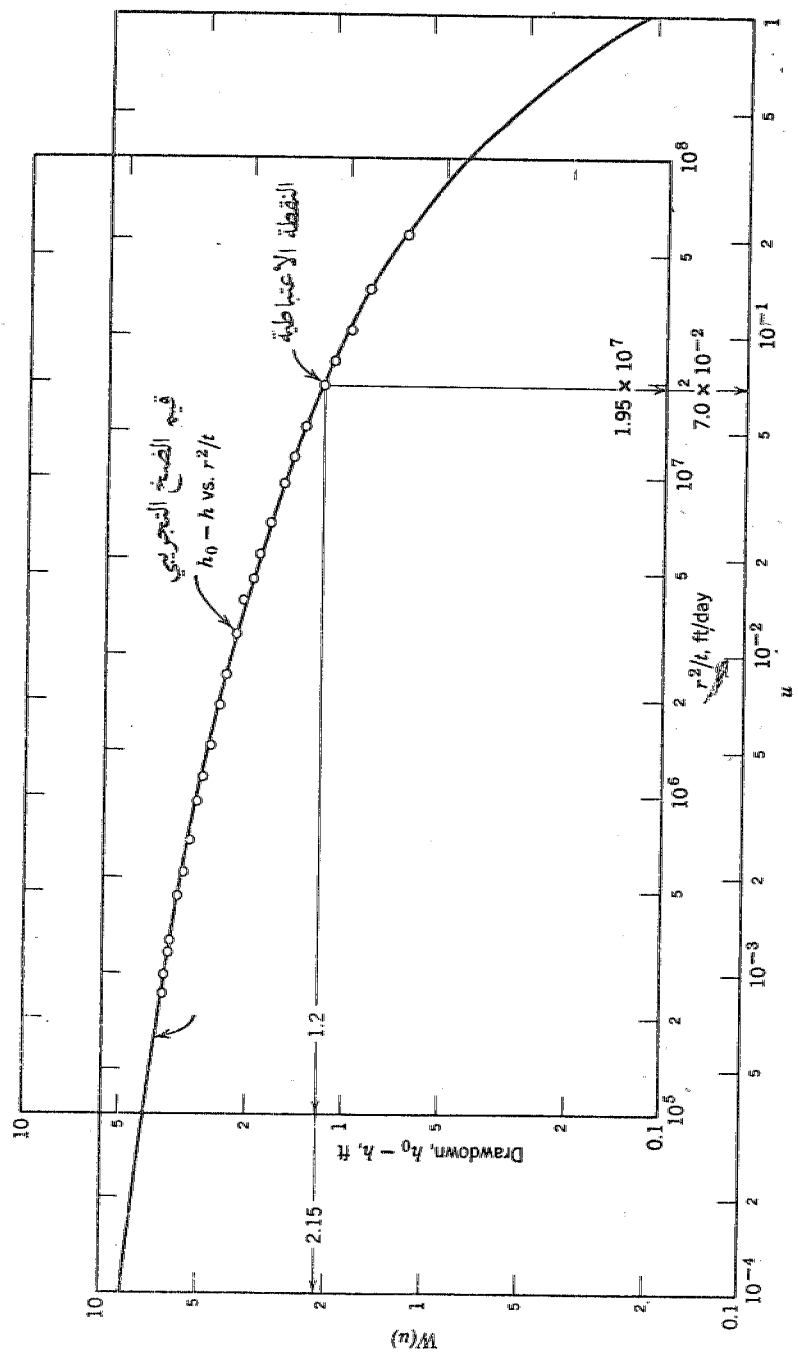
(r = 200 ft)

Time Since Pumping Began, t		Drawdown in Observation Well, $h_0 - h$	r^2/t
Minutes	Days	Feet	Feet^2 Day
0	0	0.00	∞
1.0	6.96×10^{-4}	0.66	5.76×10^7
1.5	1.02×10^{-3}	0.87	3.84×10^7
2.0	1.39×10^{-3}	0.99	2.88×10^7
2.5	1.74×10^{-3}	1.11	2.30×10^7
3.0	2.09×10^{-3}	1.21	1.92×10^7
4	2.78×10^{-3}	1.36	1.44×10^7
5	3.48×10^{-3}	1.49	1.15×10^7
6	4.17×10^{-3}	1.59	9.6×10^6
8	5.57×10^{-3}	1.75	7.2×10^6
10	6.96×10^{-3}	1.86	5.76×10^6
12	8.33×10^{-3}	1.97	4.80×10^6
14	9.72×10^{-3}	2.08	4.1×10^6
18	1.25×10^{-2}	2.20	3.2×10^6
24	1.67×10^{-2}	2.36	2.4×10^6
30	2.09×10^{-2}	2.49	1.92×10^6
40	2.78×10^{-2}	2.65	1.44×10^6
50	3.48×10^{-2}	2.78	1.15×10^6
60	4.17×10^{-2}	2.88	9.6×10^5
80	5.57×10^{-2}	3.04	7.2×10^5
100	6.96×10^{-2}	3.16	5.76×10^5
120	8.33×10^{-2}	3.28	4.8×10^5
150	1.02×10^{-1}	3.42	3.84×10^5
180	1.25×10^{-1}	3.51	3.2×10^5
210	1.46×10^{-1}	3.61	2.74×10^5
240	1.67×10^{-1}	3.67	2.4×10^5

$$T = \frac{114.6Q}{h_o - h} \quad W(u) = \frac{(114.6)(500)(2.15)}{1,2} = 103{,}000 \text{ gal/day/ft}$$

ومن المعادلة (4.33)

$$S = \frac{uT}{1.87r^2/t} = \frac{(7.0 \times 10^{-2})(103{,}000)}{(1.87)(1.95 \times 10^7)} = 0.000198$$



شكل (4 - 9) طريقة ثايس التشبيهية لحل معادلة عدم التوازن .

الحل بطريقة جاكوب (Jacob)

لاحظ جاكوب [10.29] Jacob انه للقيم الصغيرة لـ (r) والقيم الكبيرة لـ (t) تكون (u) صغيرة . لذا فان مصطلحات سلسلة في المعادلة (4.31) تصبح قابلة للاهمال بعد اول مصطلحين وكنتيجة لذلك فان الانخفاض يمكن تعبيره بالمحاذي .

$$h_o - h = \frac{Q}{4\pi T}\left(- 0.5772 - \text{In}\ \frac{r^2 S}{4Tt} \right) \quad .....(4.34)$$

ثم تعاد كتابتها كـ :

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T}\left(\text{In}\ \frac{4Tt}{r^2 S} - 0.5772 \right) \quad .... (4.35)$$

وهذه تختزل الى :

$$h_o - h = \frac{2.30\, Q}{4\pi T} \text{Log}\ \frac{2.25\, T\, t}{r^2 S} \quad .....(4.36)$$

لذا فان رسم الانخفاض $(h_o - h)$ مقابل لوغاريتم (t) يكون خطاً مستقيماً من قياسات الانخفاض في بئر الملاحظة خلال فترة الضخ . $(h_o - h)$ و (t) معلومتان ويمكن تثبيتهما .

ان ميل الخط المنطبق والملائم للمعلومات يمكن حسابه من ثوابت التكوين . حلول سريعة يمكن الحصول عليها من تطبيق المعادلات :

$$T = \frac{264\, Q}{\Delta h} \quad .....(4.37)$$

$$S = \frac{0.3\, T\, t_0}{r^2} \quad .....(4.38)$$

حيث (Δh) هو فرق الانخفاض بالاقدام لكل دورة لوغارتمية من الزمن . (t_0) هو مقطع الزمن على محور الانخفاض الصغرى و (Q) و (T) يعبر عنهما بوحدات الحقل المستعملة .

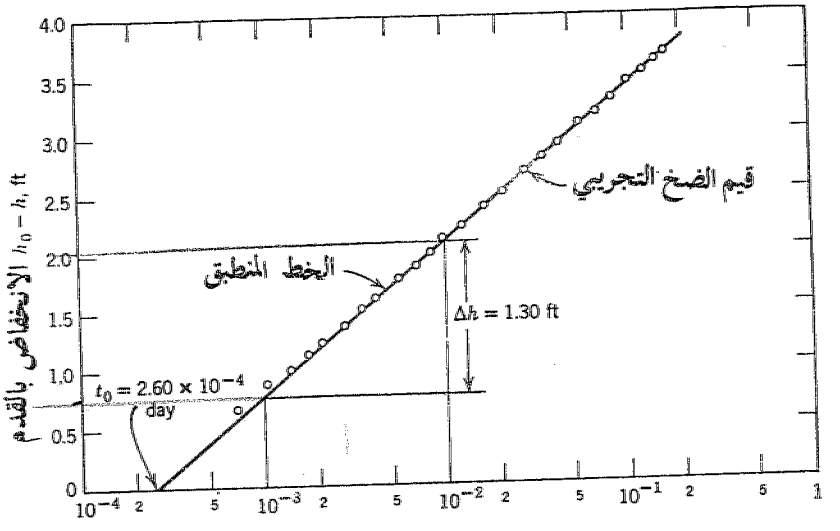
ان تقريب الخط المستقيم لهذه الطريقة يجب اختصاره على قيم من (u) أقل من حوالي (0.01) وذلك لتجنب الأخطاء الكبيرة .

مثال على طريقة جاكوب : Jacob

من معطيات الفحص الضخي للجدول (4-10) أن $(h_0 - h)$ و (t) مثبتتان على ورقة نصف لوغاريتمية كما هي موضحة في الشكل 10-4 . لذا فان خطاً مستقيماً سينطبق خلال تثبيت النقاط و $\Delta h = 1.30 ft$ و $t_0 = 2.60 \times 10^{-4} day$ لهذا فان .

$$T = \frac{264\,Q}{\Delta h} = \frac{(264)(500)}{1.30} = 102{,}000\ gal/day/ft$$

$$S = \frac{0.3\,T t_0}{r^2} = \frac{(0.3)(102{,}000)(2.60 \times 10^{-4})}{(200)^2} = 0.000199.$$



شكل (4 – 10) طريقة جاكوب في حل معادلة عدم التوازن

طريقة جاو Chow للحل :

العالم جاو Chow طور طريقة الحل . وميزة طريقته هي تجنب تطبيق المنحني المنطبق وجعلها غير محدودة التطبيق . مرة ثانية فان قياسات الانخفاض في بئر الملاحظة والقريبة من البئر الضخي تكون معمولة . ان المعلومات الملاحظية ترسم على ورقة نصف نصف لوغاريتمية

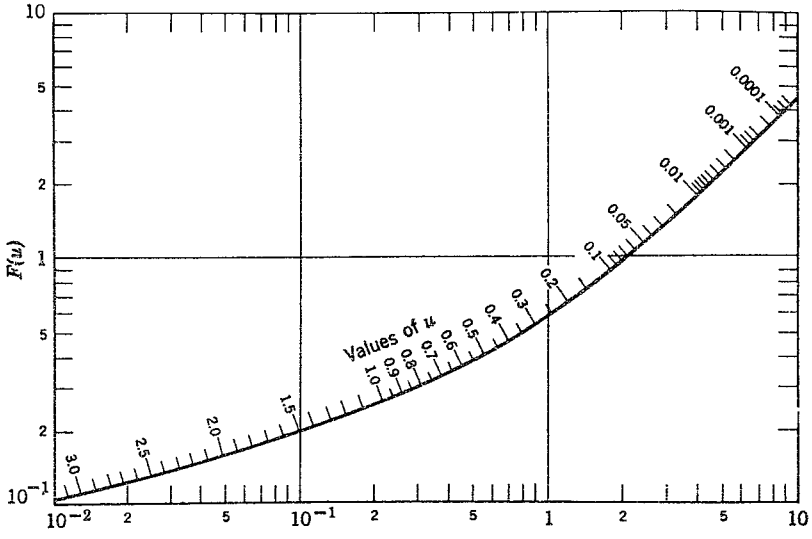
بنفس السلوك . كما في طريقة جاكوب (Jacob) على المنحني المرسوم اختر اي نقطة اعتباطية ولاحظ احداثياتها (t) و ($h_o - h$) وارسم بالتالي مماسا للمنحني عند النقطة المنتخبة وحدد فرق الانخفاض Δh . بالاقدام لكل دورة لوغاريتمية من الزمن . احسب F(u) من : —

$$F(u) = \frac{h_o - h}{\Delta h} \qquad .....(4.39)$$

ثم اوجد القيم المقابلة لـ W (u) و (u) من الشكل 11-4* بالنهاية حسب ثوابت التكوين (T) بواسطة المعادلة (4.32) و (S) بواسطة المعادلة (4.33) .

مثال على طريقة جاو Chow

من الشكل 12.4 يلاحظ ان المعطيات قد رسمت من الجدول (4.2) والنقطة (A) انتخبت على المنحني حيث $t = 4.0 \times 10^{-3}$ day و $h_o - h = 1.55$ft وثم مماس قد انشيء كما هو موضح . وفرق الانخفاض لكل دوره لوغاريتمية من الزمن هو $\Delta h = 1.26$ft ثم ان : $F(u) = 1.55/1.26 = 1.23$ ومن الشكل 11.4 فان .



شكل (4 - 11) علاقة $F(u)$ ، $W(u)$.

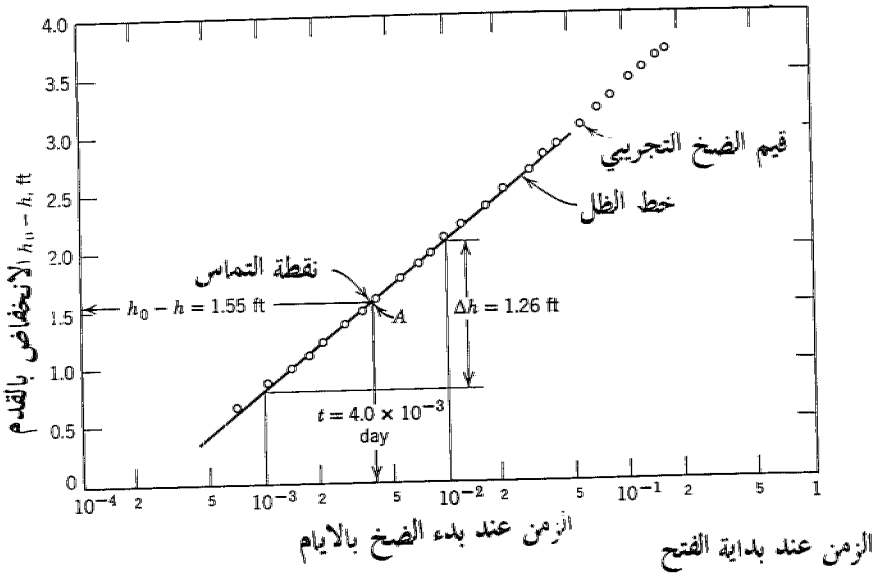
حينما تكون F (u) اكبر من 2.0 c . تكون W (u) مساوية الى 2.30 (u) F (u) . وهكذا يمكن ايجاد قيمة (u) من (4.1) الجدول

$W(u) = 2.72 \qquad 0.03$

لذا فإن :

$$T = \frac{114.6\,Q}{h_o - h} W(u) = \frac{(114.6)(500)(2.72)}{1.55} = 101{,}000 \text{ gal /day/ft}$$

$$S = \frac{u\,Tt}{1.87r^2} = \frac{(0.038)\,(101{,}000)(4.0 \times 10^{-3})}{1.87(200)2} = 0.000205.$$



شكل 4 12 طريقة جاوchow في حل معادلة عدم التوازن

وان الأمثلة المذكورة في اعلاه تعود الى التكوين المائي المحصور . ولكن معادلة عدم التوازن يمكن حسابها ايضا على التكوينات المائية غير المحصورة ، وعندما يكون الانخفاض قليلاً مقارناً بالسمك الكلي المشبع .

في اشتقاق المعادلة ، قد افترض ان يتحرر الماء المتحرر من الخزين بتخفيض العمود head حيث يتحرر آنيا في التكوينات المائية غير المحصورة .

على اي حال فان معامل الخزن مكافىء الى العطاء النوعي والقيمة التي يمكن الحصول عليها فقط بعد انزاف جزء من الماء للتكوين المائي والتي قد صرفت لبعض الوقت لذا فلتطبيق معادلة عدم التوازن في التكوينات المائية غير المحصورة ، فان (T) تحدد اولا و (S) يتم تقريبها برسم القيم المحددة خلال فترة الاختبار مقابل لوغاريتم (t) ومقدرة استقرائيا اتجاه القيمة العظمى او القصوى .

جاكوب Jacob[29] اقترح بأن القيم الأكثر دقة لـ (T) و (S) يمكن الحصول عليها بطرح $(h_o - h)^2 / 2h$ من كل انخفاض .

ان معادلة عدم التوازن قابلة للتطبيق لتحليل بئرسبق ضخه 53 . اذا ضخ البئر لفترة معلومة من الزمن وبعد ذلك اوقف فان الانخفاض بعد ذلك هو نفسه على نحو متطابق كما لوكان التصريف مستمراً وبئر للتطعيم بنفس التصريف طبق على البئر المصرف في لحظة غلق التصريف* ان الانخفاض المتبقي $h_o - h$ حيث (h) هو العمود خلال فترة الاستعادة يمكن اعطاؤه كما يلي : —

$$h_o - h' = \frac{Q}{4\pi T}\left[\int_{r^2 S/4Tt}^{\infty} \frac{e^{-u}\,du}{u} - \int_{r^2 S/4Tt'}^{\infty} \frac{e^{-u}\,du}{u}\right] \quad .....(4.40)$$

حيث (t) هو الزمن منذ ابتداء الضخ و (t') هو الزمن منذ توقف الضخ .
لأجل قيمة صغيرة لـ (r) وقيمة كبيرة لـ (t') فان التكامل الأسي يمكن تقريبه بواسطة اول مصطلحين للمعادلة (4.31) ومعامل المنقولية يعطي بواسطة : —

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi(h_o - h')} \text{Log} \frac{t}{t'} \quad ..... (4.41)$$

بقياس معدل استعادة منسوب الماء في البئر الضخي او تقريب من بئر لملاحظة قريب (T) يمكن تحديدها . للسهولة في الحصول على حل ، فان الانخفاض المتبقي $(h_o - h')$ يجب ان يرسم على مقياس خطي مقابل (t/t') على مقياس لوغاريتمي بعد ذلك فان (T) المشابهة الى طريقة (جاكوب Jacob) والمشروحة سابقا تختزل الى : —

$$T = \frac{264\,Q}{\Delta h'} \quad .....(4.42)$$

حيث (T) هي بالغالون/يوم / قدم و (Q) بالغالون / دقيقة و $(\Delta h')$ هو التغيير في الانخفاض المتبقي بالقدم لكل دورة لوغاريتمية من الزمن قيمة (S) يمكن ايجادها من المعادلة (4.38)

حلول لظروف خاصة : Solutions for Special Conditions

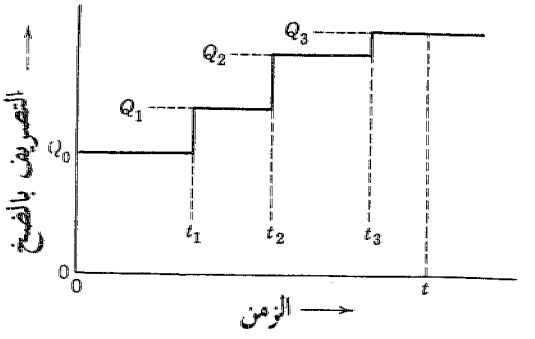
ان حلول متنوعة لمعادلة عدم التوازن قد اشتقت لتكوين مائي خاص وظروف ضخية خاصة به .

---

* ان من محاسن تحليل نتائج بئرسبق ضخه وعاد مستواه الى اصله ، هي لاغراض التأكد من نتائج تحليل الضخ للبئر، كذلك ، فان الطريقة تطبق فقط في حالة ضخ البئر بكمية ثابتة ، والتي غالبا ما يصعب السيطرة عليها في الحقل وبشكل مضبوط

ونظراً لأن هذه الظروف ذات تطبيق عام أقل من تلك الملخصة سابقاً قبل ، ويشمل معالجة رياضية شاملة اكثر .لذا فان الباحثين سيهملون الظروف الضخية الخاصة.وهي جديرة بالملاحظة . وعلى أية حال فان الحلول التي امكن الحصول عليها للاختبارات الضخية كانت بحيث ان الانخفاض يبقى ثابتاً والتصريف يختلف مع الزمن [30] .

ان مشاكل اختلاف التصريف في السلوك الموصوف ايضا قد امكن حلها . وعلى سبيل المثال ، اذا ضخ البئر بنمط تدريجي كما هو مرسوم توضيحيا في الشكل (4.13) فان معادلة عدم التوازن يمكن كتابتها للتعبير عن الانخفاضات عند ايزمن (t') للزيادات الجزئية في (Q) حتى ذلك الزمن وبنفس الشيء العمليات الدورية او المتقطعة للبئر يمكن معالجتها ايضا . المشاكل المتضمنة تكوينات مائية شبه محصورة ، التي قد تكسب او تفقد



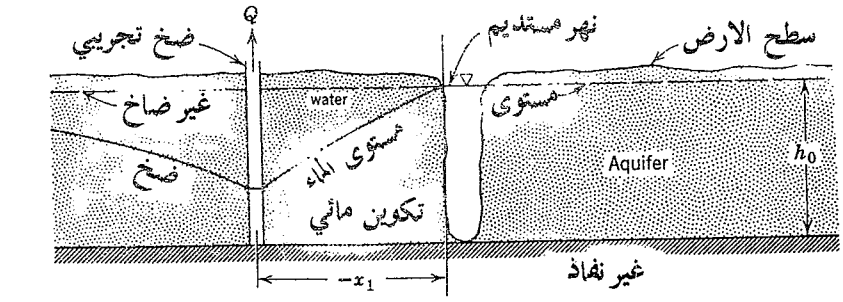
شكل (4 – 13) مثال على نوع المسطحات مع اختبار الضخ

الماء خلال الطبقات شبه النفاذه المجاوره ، قد امكن حلها بواسطة Jacob[24,27] وآخرون . نادرا ماتكون طبقات محصورة غير نفاذة بصورة كاملة . معظم الوقت فانه مفترض ضمنا بأن الجريان هو من البطء بحيث يمكن اهماله في عدة مواقع . على اي حال ، هذه الافتراضات تكون فاشلة . لذا فتحليلات للجريان في التكوين المائي والبئر كما يسمى التكوينات المائية الراشحة ، (Leaky aquifers) تصبح مهمة .

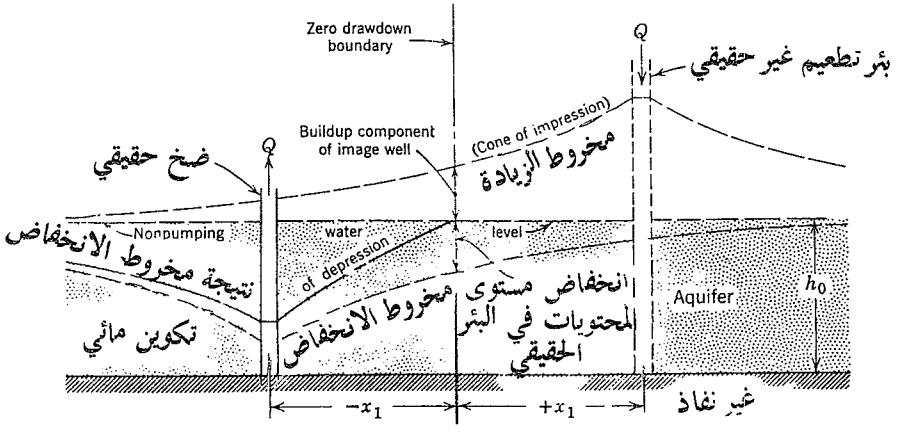
تدفق البئر قرب حدود التكوينات المائية :

Well Flow Near Aquifer Bounderies

في الحقيقة ان حدود التكوينات المائية تكون غير محددة (أي لاتمتد الى مالانهاية) ان الخطا الناشيء في تطبيق معادلات التدفق الشعاعي المذكور اعلاه الى بئر مثبت قرب حد تكوين مائي قد يكون عديم الأهمية .



(a)



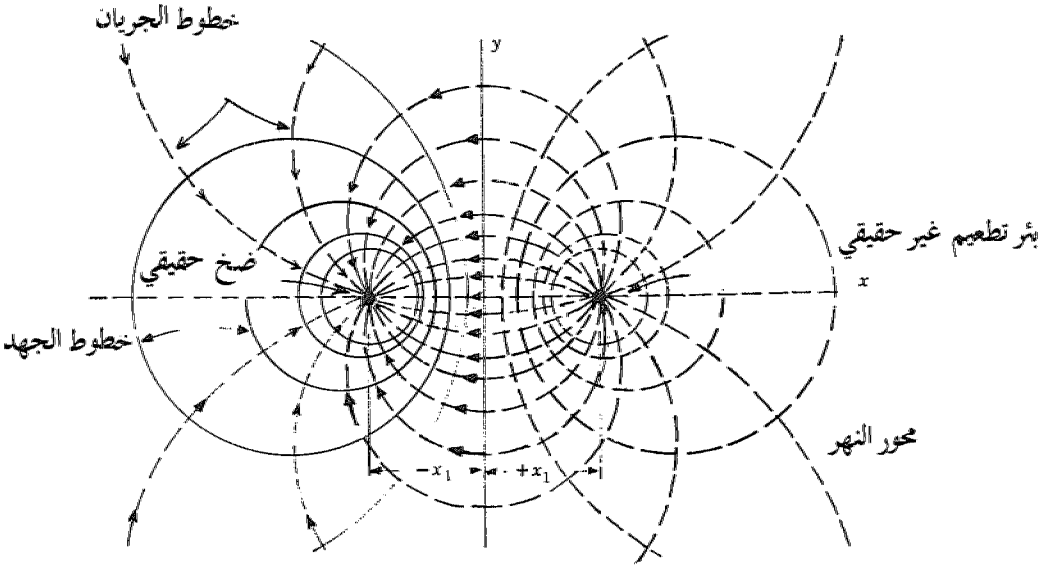
(b)

شكل (4 - 14) الرسوم العرضية لـ
(a) بئر الضخ قرب جدول دائم
(b) النظام الهايدروليكي المكافيء في تكوين مائي غير محدود

على سبيل المثال فان مقارنة قد اجريت[40] بين الجريان الى بئر المثبت في مركز الحد الدائري لنصف قطر (r_0) حالة التدفق الشعاعي وبين الجريان الى بئر مزاح بمسافة (δ) عند المركز . لقد وجد ان التصريفات تختلف بأقل من 5% متى مابلغ الاختلاف المركزي قدر ما $\delta/r_0 = 0.50$ لهذا فما لم يثبت البئر قريبا من الحد معادلات التدفق الشعاعي يمكن تطبيقه بدون خطاء يمكن تقديره . ان حل مسائل الحدود في تدفق البئر غالبا يمكن تبسيطها بتطبيق الطريقة الصورية او التخيل او التشبيه (method of image)

الصورة هي بئر او جدول ادخل ليخلق نظام جريان هيدروليكي ، الذي سيكون مكافئا للتأثيرات ذات الحد الفيزياوي المعروف على نظام الجريان .

بالتشبيه او التخيل فان التكوين المائي ذا الامتداد المحدود او المتناه يمكن ان يحول الى واحد ذي امتداد غير محدود . بحيث ان معادلات الجريان الشعاعي يمكن تطبيقها على هذا النظام المعوّض .



شكل (4 15) شبكة الجريان لبئر الضخ الحقيقي وبئر التطعيم الغير حقيقي (دائرة المسح الجيولوجي الامريكي)

تدفق البئر قرب جدول Well flow Near a stream:

كمثال ممتاز على فائدة طريقة الصورهي حالة البئر القريب من جدول دائم 14.18.29.34.55 حيث انه يرغب الحصول على العمود عند اي نقطة تحت تاثير الضخ بمعدل ثابت Q ولتحديد اي جزء من المضخوخ مشتق من الجدول .

ان الرسوم العرضية موضحة في الشكل (14.4) النظام الحقيقي ونظام خيالي مكافىء . لاحظ في الشكل (14.4) b ان بئراً مطعماً خيالياً قد رسم مباشرة مقابل بئر حقيقي وعلى نفس المسافة من النهر كالبئر الحقيقي . هذا البئر الخيالي يعمل آنيا وبنفس معدل البئر الحقيقي بحيث ان النمو (الازدياد في العمود حول بئر التطعيم) وانخفاض العمود على امتداد خط الجدول بالضبط سيزول . وهذا يمد بعمود ثابت على طول الجدول الذي هو بالضبط مكافىء الى الارتفاع الثابت للجدول المكون لحدود التكوين المائي لهذا ففي المنظر المستوي لشبكة الجريان الناتجة الموضح بالشكل (15.4) يرى خط تساوي جهد مفرد منطبق مع محور الجدول .

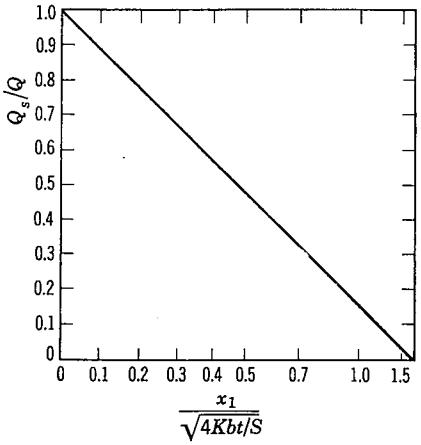
البئر المطعم هو البئر الذي يتم من خلاله اضافة الماء الى التكوين المائي ، ولذا يعتبر مثل هذا البئر عكس بئر الضخ .

ان الانخفاض غير المتناظر الناتج للبئر الحقيقي فهو يعطي عند اي نقطة وذلك بالجمع الجبري لانخفاض البئر الحقيقي والنمو من بئر التطعيم كما لو كانت هذه الآبار مثبتة في تكوين مائي غير محدود ان حل النظام المكافىء هيدزوكيللياً تحت ظروف حالة ثابتة للعمود في اي مكان على جانب البئر الضخي للمجرى بواسطة المعادلة

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{(x - x_1)^2 + y^2}{(x + x_1)^2 + y^2} \quad \text{....(4.43)}$$

حيث $(h_o - h)$ هو الانخفاض عند اي نقطة (x,y) معرفة بالاحداثيات في الشكل (4-15) ثم بئر ضخي مثبت عند $(-x_1, 0)$ وبئر التطعيم عند $(+x_1, 0)$ وكلاهما يعملان بمعدل (Q) تحليل اضافي لتوزيع الجريان يعطي الجزء (Qs/Q) لتصريف البئر الذي يمكن الحصول عليه من النهر اما (Qs) فهي الجريان من الجدول .

ان النتيجة للظروف غير المتوازنة يمكن تعبيرها كمسلسلات منقلبة او بمصطلحات من التكامل الاحتمالي ولكن الحل البياني اللااتجاهي والمقدم في الشكل (4-16) يسهل



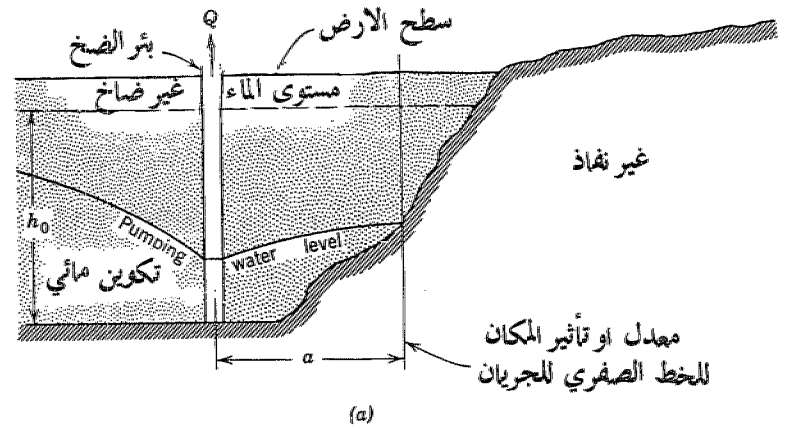
شكل (4 - 16) رسم لتحديد جزء من بئر الضخ المجهز من الجدول المجاور (كلوفر بالمر 8)

الحسابات ، وبذا فان (X_1) هي المسافة من البئر الى الجدول و (K) هي النفاذية . و (b) هو سمك التكوين المائي . و (S) هو معامل الاختزان و (t) هو الزمن منذ ابتداء الضخ نفس النتيجة تطبق على التكوين المائي غير المحصور وذلك بابدال (S) بالعطاء النوعي على شرط ان الانخفاض صغير قياسا على السمك المشبع .

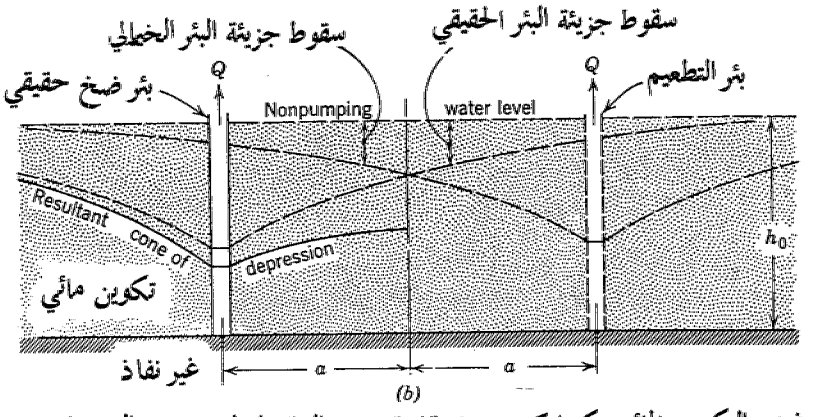
تدفق البئر قرب حدود اخرى (Well Flow Near Other Bounderies)

بالأضافة الى المثال السابق فان طريقة الصور(التشبيه)يمكن تطبيقها على عدد كبير من مسائل حدود المياه الجوفية . وكما ورد سابقا فان الحدود الحقيقية تستبدل بنظام هيدروليكي

مكافيء وتشمل اباراً خيالية تسمح بالحصول على حلول من معادلات قابلة التطبيق فقط لتكوينات مائية واسعه *.



(a)



(b)

ثخن التكوين المائي يكون كبير جدا مقارنة نتيجة السقوط بالقرب من البئر الحقيقي

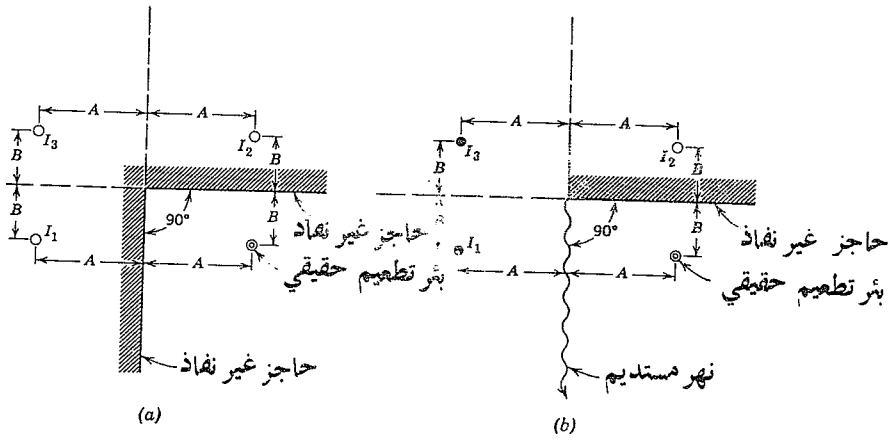
شكل (4 – 17) مقطع عرضي لـ

(a) بئر تطعيم قرب حدود غير نفاذة .

(b) النظام الهايدروليكي المكافيء في تكوين مائي غير نفاذ .

---

* ان الحالات المعاكسة ايضا من الممكن تطبيقها . اذا اجري ضخ تجريبي لمنطقة لاتتوفر فيها المعلومات الجيولوجية الاساسية ، فان طريقة الصور (التشبيه) من الممكن تطبيقها لغرض تثبيت حدود التكوين المائي . ان التغير في ميل منحني الانخفاض (الحبوص) – الزمن يعطي ويوضح وجود الحدّود . ان تحليل مثل هذه التغييرات ومن صنف ابار الملاحظة يمكننا من تحديد موقع الحدود 14 .



شكل (4 – 18) نظام البئر للضخ التجريبي بالقرب من حدود او حواجز التكوين المائي
(a) تكوين مائي محدد بحاجزين غير نفاذين متقاطعين بزوايا قائمة
(b) تكوين مائي محدد بحاجز غير نفاذ متقاطع معه نهر مستديم بزوايا قائمة

الشكلين (17.4) (18.4) يوضحان ثلاثة ظروف حدودية لتبيان تكييف هذه الطريقة حيث ان الشكل (17.4) يوضح بئرا ضاخ قرب حد غير نفاذ .
ثم بئر تصريف تشبيهي موضوع مقابل البئر الضخي ، وبنفس معدل التصريف وعلى مسافة متساوية من الحد لهذا وعلى امتداد الحد فان الآبار تعادل وتكافيء احداها الاخرى مسببة عدم الجريان عبر الحد وهو الشرط المطلوب .
الشكل (18.4)a يوضح بئرا تصريفيا في تكوين مائي محدد من جانبين بحواجز غير نفاذية ان بئرا التصريف الصورية (I_1 and I_2) تقوم بتجهيز الجريان المطلوب ولكن بالاضافة الى ذلك فان بئرا صوريا ثالثا (I_3) صوري لموازنة الانخفاضات على امتداد الحدود.

ان النظام الناتج عن اربعة آبار تصريفية في تكوين مائي (واسع) يمثل هيدروليكيا نظام الجريان لظروف الحد الفيزياوي بالنهاية الشكل b(18.4) يمثل حالة بئر قرب حد غير نفاذ جدول دائمي ان آبار الصور تتطلب اتباع التوضيحات السابقة .

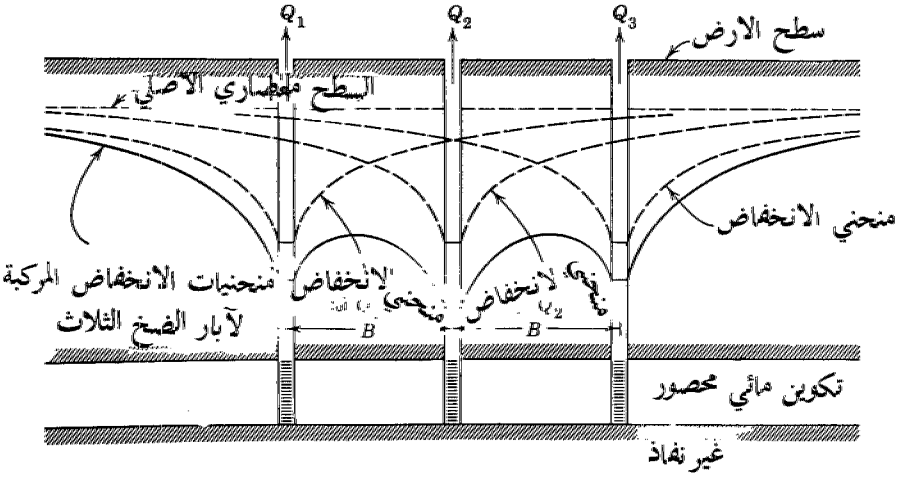
انظمة الآبار المتعددة (Multiple Well Systems)

ان المشكلة الشائعة هي تحديد نوع التداخل والناتج بواسطة مجموعة من الآبار الضخية ان الانخفاض لحقل ابار معين يمكن تحديده عند اي نقطة اذا عرفت تصاريف الآبار او العكس ان الانخفاض عند اي نقطة في منطقة التأثير والمسببة بواسطة تصريف عدة آبار مساو الى مجموع الانخفاضات المثبتة بواسطة كل بئر على حدة لهذا فان : —

$$D_T = D_a + D_b + D_c + \ldots\ldots + D_n \qquad \ldots\ldots (4.44)$$

حيث (D_T) هو الانخفاض الكلي عند نقطة معطاة او D_n .. ... $D_a , D_b , D_c ,$ هي الانخفاضات عند نقطة بسبب تصاريف الآبار a,b,c, ... n على التوالي .

ن مجموع الانخفاضات يمكن توضيحه بطريقة بسيطة وذلك بخط الابار كما هو الشكل (4.19) .



شكل (4 19) منحنيات الانخفاض المفردة والمركبة لثلاث ابار على خط واحد .

ان منحنيات الانخفاض المفردة والمركبة تعطي قيماً واضحة لـ $(Q_1 = Q_2 = Q_3)$ ويكون عدد الابار وأوضاعها الهندسية في الحقل مهماً في تحديد الانخفاضات .

وجميع الحلول قد تكون مبنية على معادلة التوازن أو عدم التوازن .

لبئر يضخ من تكوين مائي محصور في حقل ما . تكون (n) هي عدد الابار الضاخة كما في المعادلة الآتية : —

$$h_0 - h = \sum_{i}^{n} \frac{Q_i}{2\pi Kb} \ln \frac{R_i}{r_i} \qquad \ldots\ldots\ldots (4.45)$$

حيث $(h_0 - h)$ هو الانخفاض عند نقطة معطاة في منطقة التأثير R_i هي المسافة من البئر (i) الى النقطة حيث الانخفاض يصبح قابلاً للاهمال و r_i هي المسافة من البئر (i) الى النقطة المعطاة .

ان المعادلة المقابلة لتكوين مائي غير محصور تصلح فقط لانخفاض صغير نسبيا هي :—

$$h_0^2 - h^2 = \sum_{i}^{n} \frac{Q_i}{\pi K} \ln \frac{R_i}{r_i} \qquad \ldots\ldots\ldots (4.46)$$

اد معادلات تصريف البئر لتوزيعات معينة للابار يمكن ان تعرض من الطريقة المتطورة التي استحدثت بواسطة مسكات (Muskat)[40] .

في المعادلات التالية افترض ان كل الابار تخترق التكوين المائي المحصور وهذه الابار لها نفس القطر والانخفاض، وتصرف في نفس الفترة من الزمن .

بئران يبعد أحدهما عن الاخر بمسافة (B) لاحظ شكل (4.20) ولهما تصريفان (Q_1) و (Q_2) وكما هو معطى في المعادلة : —

$$Q_1 = Q_2 = \frac{2\pi Kb\,(h_0 - h_w)}{Ln(R^2/r_w B)} \qquad .....(4.47)$$

حيث (h_0) هو معدل عمود القياس الانضغاطي عند الحد الخارجي (h_w) هو ذلك عند الابار و (R) هو نصف قطر منطقة التأثير و (R >>B) و (r_w) وهما نصف قطر البئر ونفس الشيء كثلاث آبار مكونة مثلثاً متساوي الاضلاع بمسافة (B) على كل جانب فانه :

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \frac{2\pi Kb\,(h_0 - h_w)}{Ln\,(R^3 / r_w B_2)} \qquad .....(4.48)$$

وبوجود ثلاث آبار على خط واحد وبينها مسافات متساوية بمسافة (B) فان تصريف البئران الخارجيان هو

$$Q_1 = Q_3 = \frac{2\pi Kb(h_0 - h_w)\ln(B/r_w)}{2\ln(R/B)\ln(B/r_w) + \ln(B/2r_w)\ln(R/r_w)} \qquad .....(4.49)$$

على حين البئر المتوسط يصرف في

$$Q_2 = \frac{2\pi Kb\,(h_0 - h_w)\,In\,(B/2r_w)}{2In\,(R/B)\,In\,(B/r_w) + In\,(B/2r_w)\,In\,(R/r_w)} \qquad .... (4.50)$$

ان تصريف كل من الابار الاربع المكونة مربعاً ذا ضلع (B) هو :

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \frac{2\pi\,Kb\,(h_0 - h_w)}{\ln\,(R^4/\sqrt{2}\,r_w B^3)} \qquad ... (4.51)$$

وفي النهاية ، اذا ضخ بئرا خامسا في مركز المربع السابق ، فان ابار الزوايا تعطي : —

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 \frac{2\pi Kb(h_0 - h_w)\ln(B/\sqrt{2}\,r_w)}{4\ln(\sqrt{2}R/B)\ln(B/\sqrt{2}r_w) + \ln(R/r_w)\ln(B/4\sqrt{2}r_w)} \qquad (4.52)$$