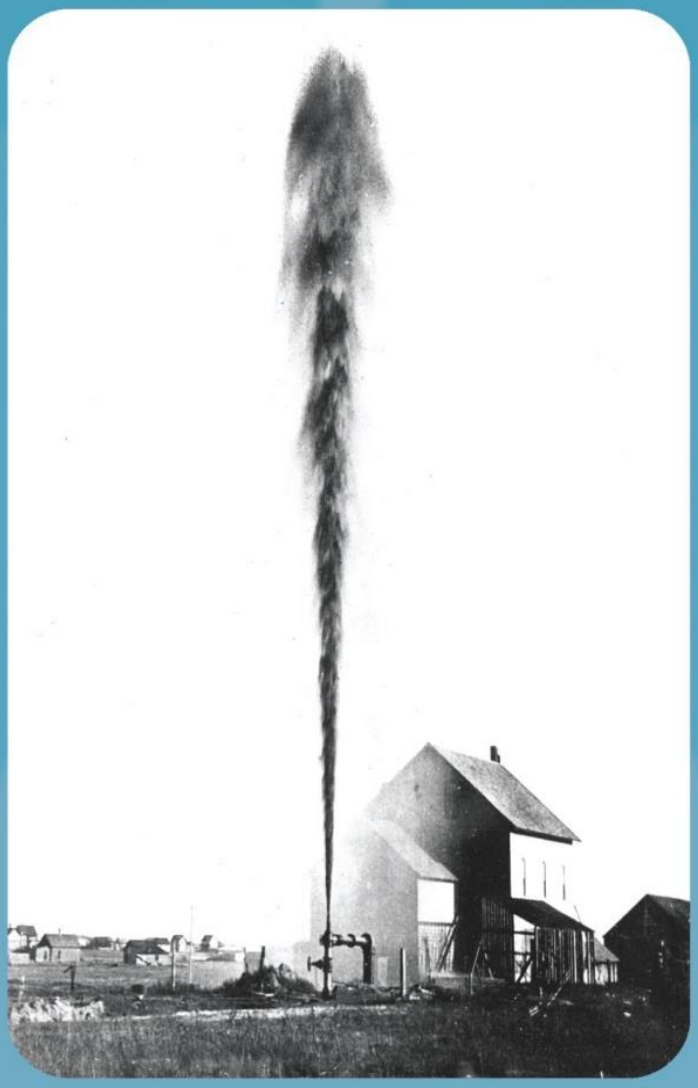


خزن المياه الجوفية
في
مكامن المياه المحصورة

هيربرت وانك

ترجمة

قصي ياسين سلمان الكبيسي

محمود حافظ ذياب الكبيسي

THE GROUNDWATER PROJECT

خزن المياه الجوفية في مكامن المياه المحصورة

مشروع المياه الجوفية
The Groundwater Project

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

Herbert F. Wang
Professor Emeritus of Geoscience,
University of Wisconsin-Madison,
Madison, Wisconsin, USA

ترجمة: قصي ياسين سلمان الكبيسي – قسم الجيولوجي، جامعة بغداد

و محمود حافظ ذياب الكبيسي – قسم الجيولوجيا التطبيقية، جامعة الأنبار
ترجمة الأشكال وتنظيمها: شهد مسعود – مدرسة حبيبة الأساسية، عمان، الأردن
المراجعة اللغوية والعلمية: د. خليل إبراهيم السامرائي – أستاذ في الموارد المائية

خزن المياه الجوفية في مكامن المياه المحصورة

مشروع المياه الجوفية *(GW-Project)*
كويلف، أونتاريو، كندا

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

كل الحقوق محفوظة. هذا المنشور محمي بحقوق النشر. لا يجوز إعادة إنتاج أي جزء من هذا الكتاب بأي شكل من الأشكال أو بأي وسيلة دون إذن كتابي من المؤلفين. (لطلب الإذن يرجى الاتصال بالبريد الالكتروني الآتي:permissions@gw-project.org↗. يحظر بشكل صارم توزيع أو إعادة إصدار الكتاب لأغراض تجارية.

يمكن تحميل أعمال مشروع المياه الجوفية مجانا من الموقع الالكتروني:gw-project.org↗. يمكن لأي شخص استخدام روابط gw-project.org↗ لتحميل أي عمل من أعمال مشروع المياه الجوفية. لا يجوز رفع أعمال مشروع GW على مواقع الويب الأخرى كما لا يجوز إرسال نسخ من هذه المستندات بشكل مباشر إلى الآخرين.

حقوق الطبع والنشر © Herbert F. Wang 2020 (المؤلف)

تم النشر بواسطة مشروع المياه الجوفية (GW-Project)، كويلف، أونتاريو، كندا، 2020.

Herbert F. Wang

خزن المياه الجوفية في مكامن المياه المحصورة \ Herbert F. Wang

كويلف، أونتاريو، كندا، 2020.

29 pages

ترجمة: قصي ياسين سلمان الكبيسي و محمود حافظ ذياب الكبيسي، 2022، (29 صفحة)

ISBN: 978-1-77470-087-7

يرجى الاشتراك في القائمة البريدية لمشروع المياه الجوفية والبقاء على إطلاع حول إصدارات الكتب الجديدة، الفعاليات وطرائق المشاركة في مشروع المياه الجوفية. إن الاشتراك بقائمة البريد الإلكتروني الخاصة بنا يساعدنا في بناء مجتمع عالمي للمياه الجوفية. الاشتراك↗.

محرري المجال: John Cherry and Eileen Poeter

اللجنة: John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira and Eileen Poeter

اللجنة التوجيهية: John Cherry, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Ying Fan, Warren Wood, and Yan Zheng.

صورة الغلاف: Darton (1900)

مشروع المياه الجوفية © المؤلف ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

الوفاء الى

الى إيفان وميا ونوح؛ ميليا وكلوي. لجدنا الأكبر "ملحمة داكوتا الرملية" التي بدأت في الوقت الذي عاشت فيه لورا اينغلس وايلدر في ساوث داكوتا.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

جدول المحتويات

كلمة مشروع المياه الجوفية v
الكلمة الأولى vi
التمهيد vii
التمهيد للنسخة العربية viii
الشكر والتقدير ix
1 **المدخل** 1
2 **ملحمة المكمن المائي في داكوتا** 3
3 **حل ثايس** 10
4 **صيغة جاكوب للانضغاط لخزن المياه الجوفية** 14
5 **معادلة الانتشار** 20
6 **الملخص** 22
7 **التمارين** 23
تمرين 1 23
تمرين 2 23
8 **المراجع** 24
لمحة عن الكاتب 27
لمحة عن المترجمين 28

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

كلمة مشروع المياه الجوفية

عادة ما يقرر أعضاء الأمم المتحدة للمياه وشركائهم موضوعهم السنوي مقدما قبل بسنوات. إن موضوع يوم المياه العالمي في 22 آذار، 2022، هو "المياه الجوفية: جعل غير المرئي مرئي". هذه هي الفكرة الأنسب كشعار لظهور أوائل كتب مشروع المياه الجوفية (GW-Project) في عام 2020، والتي هدفها جعل المياه الجوفية شيء مرئي.

إن مشروع المياه الجوفية (GW-Project)، وهي منظمة غير ربحية مسجلة في كندا في عام 2019، ملتزم بالمساهمة في تقدم التعليم ويقدم نهجاً جديداً لإنشاء ونشر المعرفة لفهم وحل المشكلات. يدير مشروع المياه الجوفية موقع https://gw-project.org↗ كمنصة عالمية لتحقيق سواسية المعرفة في مجال المياه الجوفية وقد تم تأسيسها على المبدأ الآتي:

"**بشكل عام يجب أن تكون المعرفة مجانية والمعرفة ذات القيمة العالية يجب أن تكون مجانية أيضاً**". مجهول

تتمثل مهمة مشروع المياه الجوفية (GW-Project) في توفير مواد تعليمية عالية الجودة ومضطلعة يسهل الوصول إليها مجانا عبر الإنترنت في العديد من اللغات، لجميع الذين يرغبون في معرفة المياه الجوفية وفهم كيفية ارتباط المياه الجوفية بالأنظمة الإيكولوجية والإنسانية. يعد مشروع المياه الجوفية (GW-Project) نوع جديد من الاجتهاد التربوي العالمي بحيث أنه يعتمد على العمل التطوعي للمهنيين من مختلف التخصصات ويشمل الأكاديميين والاستشاريين والمتقاعدين. يضم مشروع المياه الجوفية (GW-Project) عدة مئات من المتطوعين مرتبطين بأكثر من 200 منظمة من أكثر من 14 دولة وست قارات، مع تزايد المشاركة.

إن مشروع المياه الجوفية (GW-Project) هو اجتهاد مستمر وسيستمر بمئات الكتب التي سيتم نشرها عبر الإنترنت خلال السنوات القادمة، أولا باللغة الإنجليزية، ثم بلغات أخرى، لتحميلها أينما يتوفر الإنترنت. تشمل منشورات مشروع المياه الجوفية أيضا مواد داعمة مثل مقاطع الفيديو والمحاضرات و شروح المختبرات وأدوات التعلم بالإضافة إلى توفير أو ربط برامج المجال العام لمختلف تطبيقات المياه الجوفية التي تدعم العملية التعليمية.

إن مشروع المياه الجوفية (GW-Project) هو كيان حي، لذا سيتم نشر إصدارات لاحقة من الكتب من وقت لآخر. والمستخدمون مدعوون لاقتراح التنقيح.

نشكركم على كونكم جزءاً من مجتمع مشروع المياه الجوفية (GW-Project). ونأمل أن نسمع رأيكم عن تجربتكم باستخدام الكتب والمواد ذات الصلة. نرحب بالأفكار والمتطوعين!

لجنة توجيه مشروع المياه الجوفية (GW-Project)

20 تشرين الثاني 2020

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

الكلمة الأولى

بدأ علم المياه الجوفية كعلم منفصل حديث عام 1856 عندما نشر هنري دارسي "قانونه" للعلاقة البسيطة بين معدل التدفق الحجمي وانحدار السمت الهيدروليكي. بعد ذلك بوقت قصير، أدت هذه الخطوة الى وضع وصف رياضي لحالة التدفق المستقر الى الآبار في مكامن المياه الجوفية المتجانسة والافقية. لكن مرت عقود قبل اول ظهور ونشر الشروح الرياضية للتدفق غير المستقر الى الآبار المحفورة في طبقات المياه الجوفية المحصورة بواسطة ثايس (C. V. Theis, 1935) من هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية. ولكي يطور ثايس هذه الشروح، تعين عليه فهم مصدر المياه التي يتم ضخها من مكامن المياه الجوفية المحصورة. كان التعرف على مصدر المياه محير لأنه كان لابد من الاستدلال عليه من معرفة الحدود المشتركة بين المكونات الهيدروليكية للمكمن المائي الجوفي وميكانيكا التربة، ولتحقيق ذلك، يجب ان يتطور الحدس العلمي الى التفكير الكمي من خلال ريادة المياه الجوفي لفكرة الارتباط بالزمن. هذا الكتاب الذي يتطرق الى خزن المياه الجوفية في المكامن المحصورة بقلم هربرت ف. وانغ، يوضح ان المياه المستخرجة من الخزين في طبقات المياه الجوفية المحصورة والحبيبية، تأتي من ضغط هيكل المكمن الجوفي وتمدد الماء مع انخفاض ضغط الماء أثناء عملية الضخ. لا يشرح هذا الكتاب فقط المبادئ والعمليات المتضمنة، بل انه يقدم أيضا التاريخ المثير للاهتمام لهذا الاكتشاف باعتباره قصة ملحمة من الغرب المتوحش تبين كيف تم استخدام الطريقة العلمية لحل لغز مصدر المياه الجوفية المحصورة.

لعقود من الزمان، أجرى مؤلف هذا الكتاب بحوثا دولية متميزة. وركز في تعليمه على ميكانيكا الصخور وجيولوجيا المياه وسجله التاريخي للفهم المتطور لمخزون المكمن الجوفي، هو أفضل محاضراته.

جون جيري؛ مدير مشروع المياه الجوفية (GW-Project)

كويلف، أونتاريو، كندا، تشرين الثاني 2020

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

التمهيد

تشكل مكامن المياه الجوفية مصدرا للمياه لـ 70% من استخدامات الري في العالم. والعديد من هذه المكامن الجوفية تعرضت لانخفاض حاد في ضغط المياه و هي مهددة بالانقراض من الأفراط في الاستهلاك. فتصدير الطماطم أو اللوز هو انتقاله من مناطق ضفاف المياه. إن عدم رؤية المياه الجوفية يجعل ادارتها تعتمد على فهم البيئة الجيولوجية وفيزياء الاستخراج. عندما بدأت اعداد كبيرة من المستوطنين غير الأصليين في إقليم داكوتا في الولايات المتحدة في الجزء الأخير من القرن التاسع عشر، قامت هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية بدراسات للمياه الجوفية والتي استمرت لما يقرب من قرن. يقدم هذا الكتاب مقدمة تاريخية لاكتشاف دور التشوه الذي يحدث للمكمن الجوفي أثناء استجابته لضخ الآبار.

شارك مؤلف هذا الكتاب في عدة عقود من التدريس والبحث في تخصصات ميكانيكا الصخور وجيولوجيا المياه. وضع هذا الكتاب بناء على محاضرات المؤلف في الهيدروجيولوجيا التي تناولت "ملحمة الحجر الرملي في داكوتا" التي ركزت على المعنى المعنوي في دراسة نزح المياه الجوفية من المكامن الجوفية المحصورة حيث يلتقي التخصصين (ميكانيكا الصخور وجيولوجيا المياه).

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

التمهيد للنسخة العربية

لأهمية المياه والحفاظ عليها وعلى اعتبار ان الماء حجر الزاوية لكل تنمية زراعية واجتماعية لتكوين الكائنات الحية، وكمحاولة للمساهمة بتحقيق جزء من الهدف المنشود لتعريب وترجمة بعض المفاهيم العلمية لعلم المياه فلقد قمنا بترجمة هذا المؤلف (خزن المياه الجوفية في مكامن المياه المحصورة) (Groundwater storage in confined aquifer) والذي يعتبر مؤلف أساسي ومهم في مجال حركة وخزن المياه الجوفية والذي سوف يكون جزء من الركائز الأساسية لقوانين المياه الرياضية ومبادئها.

نأمل ان نكون قد اسهمنا وبتواضع في عملية ترجمة المؤلف، وان نكون قد وفقنا في نقل هذا العلم الى اللغة العربية، ونكون قد قمنا بواجبنا العلمي والإنساني واضفنا نتاجًا جديدًا لإغناء المكتبة بهذا المرجع.

نتوجه بالشكر والتقدير الى الدكتور خليل إبراهيم السامرائي الذي اقترح وكلفنا بترجمة هذا الكتاب من اجل حركة الترجمة والنشر... آملين ان يلقى الكتاب رضا القارئ وان يغنونا بملاحظاتهم حوله ... والله الموفق.

المترجمون

ديسمبر 2022

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

الشكر والتقدير

أشكر الأفراد في القائمة الآتية لمراجعاتهم الشاملة والمفيدة ولمساهماتهم في هذا الكتاب:

- John G. Solum: شركة Shell International Exploration and Production.
- Steve Naruk: أستاذ مساعد, قسم علوم الأرض والغلاف الجوي، جامعة هيوستن.
- Murray Einarson: خبيرة فنية, شركة Haley & Aldrich, Inc.

كل التقدير لاقتراحات ومساهمات Eileen Poeter. كما أنني ممتن للرقابة التي أجرتها Amanda Sills وللتدقيق اللغوي باللغة الأنكليزية من قبل Elhana Dyck، كلاهما من مشروع المياه الجوفية، كويلف، أونتاريو، كندا.

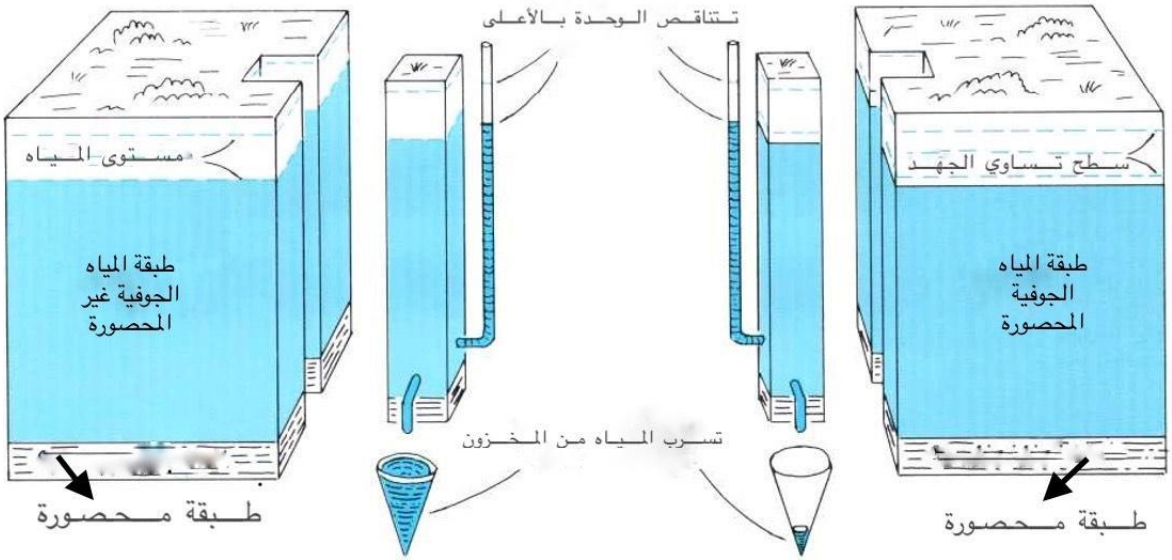
أشكر Eileen Poeter (جامعة Colorado School of Mines، جولدن، كولورادو، الولايات المتحدة الأمريكية) على كتابة تخطيط نموذج وإنتاج هذا الكتاب. تم إنشاء صورة الغلاف باستخدام برنامج Visual Modflow Flex من شركة Waterloo Hydrogeologic.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

1 المدخل

موضوع هذا الكتاب هو اكتشاف وتقدير مفهوم خزن المياه الجوفية في مكامن المياه المحصورة. جميع المكامن حاملة للمياه ولها نفاذية، لكن طبيعة الخزن تختلف اختلافًا واضحًا بين مكامن المياه المحصورة وغير المحصورة كما نوقش في كتب مشروع المياه الجوفية (GW-Project) حول المياه الجوفية في دورة المياه لدينا بقلم بوتر Poeter et al. (2020). والخصائص الهيدرولوجية لمواد الأرض ومبادئ تدفق المياه الجوفية بواسطة وسنير وبوتر (Woessner and Poeter, 2020). السطح العلوي لمكامن المياه غير المحصورة هو منسوب المياه الجوفية، كما تمت مناقشته في كلا كتابي مشروع المياه الجوفية. ويؤدي الضخ من مكامن المياه غير المحصورة إلى تصريف المياه من الفراغ المشبع ويقلل من منسوب المياه الجوفية. مع التحفظات الخاصة بأغشية الماء الملتصقة بحبيبات الصخور الناتجة من التوتر السطحي، تكون معلمة الخزن لمكمن المياه غير المحصور بمقياس الحجم الأولي الممثل (REV) (أصغر حجم تكون فيه الخصائص مماثلة لخصائص الكل) هي نسبة حجم الفراغ إلى حجم REV، أي المسامية. تمت مناقشة REV والمسامية في كتاب GW-Project بواسطة Woessner and Poeter (2020). يُطلق على معلمة الخزن لمكمن المياه غير المحصور اسم الناتج المحدد (Specific Yield). وطبيعة آلية الخزن واضحة نسبيًا.

المكمن المائي المحصور، كما يدل اسمه، عبارة عن وحدة صخرية نفيذه محصورة بين طبقات غير نفيذه. يتم إعادة شحنها حيث تتكشف الطبقة ويتقيد التدفق للبقاء داخلها. ويؤدي الضخ من المكمن المائي المحصور إلى إزالة الماء من موقع الفراغ، لكنه يظل مشبعًا. في هذه الحالة لا يوجد منسوب مائي لخفضه. القاسم المشترك بين المكمن المائي المحصور مع المكمن المائي غير المحصور هو أن الضخ يخفض سمت عمود الماء الجوفي للمياه (الشكل 1). يكمن الخزن في المكمن المائي المحصور نتيجة لانضغاط الصخور والمياه التي تملأ مساحة المسام استجابةً لتغيرات المنسوب الجوفي للمياه أو الضغط. تحدث نقطة تحول مثيرة للاهتمام إذا حصل انخفاض في المنسوب الجوفي للمياه تحت أسفل الجزء العلوي من المكمن المائي المحصور حينئذ يتحول المكمن المائي المحصور إلى مكمن مائي غير محصور وتتغير مقدار معلمة الخزن من قيمتها المحصورة إلى قيمتها غير المحصورة.



الشكل 1 - الخزن غير المحصور مقابل الخزن المحصور. يوضح ان كمية المياه المسحوبة من الخزن لكل وحدة انخفاض في سمت عمود الماء الجوفي للمياه في المكمن المائي غير المحصور هي أكبر عدة مرات من حيث الحجم من الكمية المسحوبة من المكمن المائي المحصور (Heath, 1983).

عندما يضيف أو يطلق الحجم الأولي الممثل (REV) الماء إلى أو من المكمن المائي المحصور استجابة لتغير سمت عمود الماء الجوفي الهيدروليكي[1]، يجب تضمين هذا التغيير في الخزن في معادلة توازن الكتلة لحركة المياه

مشروع المياه الجوفية © المؤلف ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

الجوفية. نتيجة لذلك، فإن استجابة الخزان الجوفي المحصور للضخ أو الاضطرابات الأخرى تكون عابرة وتؤدي إلى معادلة تدفق المياه الجوفية المعتمدة على الوقت. ويوفر كتاب مشروع المياه الجوفية من تأليف وسنر وبوتر (Woessner and Poeter, 2020) مناقشة أكثر تفصيلا لسمت عمود الماء الهيدروليكي ومعادلة تدفق المياه الجوفية المعتمدة على الوقت. وبالتالي، فإن خاصية الخزن أساسية لفهم توافر المياه الجوفية وحركتها. ويمكن القول إن خزن المياه الجوفية يحتل المرتبة الثانية من حيث الأهمية بعد قانون دارسي في مركزيته لجيولوجيا الماء.

يأخذ هذا الكتاب المنظور التاريخي للخزن في المكمن المائي المحصور، والمقالات المعيارية، التي تمتد لنحو نصف قرن، لتنسج معًا خيوطًا من جيولوجيا الماء، وميكانيكا الأرض، وهندسة البترول مع غرز ربط من الرياضيات والفيزياء. والهدف هو رفع قيمة مفهوم الخزن بمعنى أعمق مما يتم الحصول عليه من مجرد تعريفه. تبدأ القصة بفحص التناقض فيما يتعلق بأصل مياه الري الجوفية في إقليم داكوتا في الجزء الشمالي الأوسط من قارة الولايات المتحدة. كانت المعالم المهمة هي التحري الميداني للنظام الهيدروجيولوجي (Darton, 1896, 1901,1909)، وإقامة صلة بين تشوه الخزان الجوفي وسحب سائل المسام (Meinzer,1928)، والحل الرياضي لاستجابة سمت عمود الماء لعمليات ضخ البئر بالقياس على النقل الحراري (Theis, 1935)، وأخيرًا اشتقاق المعادلة الحاكمة المعتمدة على الوقت لحركة المياه الجوفية من حيث الخزان الجوفي وانضغاط الماء "من الصفر" (Jacob, 1940).

[1]In this book, “head” means “hydraulic head.”

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

2 ملحمة المكمن المائي في داكوتا

مهد قانون المنازل لعام 1862 لصفقة شراء في لويزيانا الجزء الشمالي من الولايات المتحدة عام 1803 للتسوية. إذ مكن أصحاب المنازل شراء 160 فدانًا (0.65 كيلومتر مربع) من الأرض مقابل 18 دولارًا مع الالتزام بزراعتها لمدة خمس سنوات. نما الجزء الجنوبي من إقليم داكوتا من حوالي 10000 شخص في عام 1870 إلى ما يقرب من 100000 في عام 1880 (Fabry, 2016). أدى هطول الأمطار الغزيرة في سبعينيات القرن التاسع عشر إلى الاعتقاد العام بأن "المطر يتبع المحراث". إلا أن جفاف 1886-1889 أدى إلى حفر العديد من الآبار للري. تم حفر البئر الارتوازي الشهير في وونسوكيت في داكوتا الجنوبية، الولايات المتحدة الأمريكية (صورة غلاف الكتاب) في عام 1888 وكان ضغط رأس البئر الأولي 250 رطل / بوصة مربعة (1.7 ميجا باسكال) وتدفق 8000 جالون / دقيقة (30 م3 / دقيقة). لفت انتباه كونغرس الولايات المتحدة جفاف 1886-1889 بسبب تداعياته على مستقبل الزراعة في الولايات الجديدة التي هي داكوتا الشمالية والجنوبية. تم استدعاء جون ويسلي باول، المدير الثاني لهيئة المسح الجيولوجي الأمريكية بعد عامين من تأسيسها، للإدلاء بشهادته[2].

> "بينما يعتبر الحجر الرملي في داكوتا هو أحد أهم الخزانات الارتوازية المعروفة، فإن مساحة الأرض التي يمكن استبدالها للزراعة من خلال دفع الأتاوات إلى مالكيها لا تزال صغيرة جدًا بحيث قد تحدث نتائج كارثية إذا ظهرت توقعات كبيرة بشأنها." (تمت مناقشة المكامن المياه الارتوازية في كتاب مشروع المياه الجوفية من تأليف (Woessner and Poeter, 2020).

> "مثل هذه الحالة تمثل تعقيد الظروف، وخطورة الكارثة كبيرة جدًا من خلال الاستغلال الباهظ في جهل الظروف الحقيقية التي تتطلب التحري الأكثر مهارة الذي يمكن منحه."
> - شهادة بوويل Powell (1890)

في الواقع، تم إجراء تحريات ماهرة بواسطة دارتون (N. H. Darton[3], 1896, 1901, 1909) واستمرت طوال القرن العشرين من قبل علماء الجيولوجيا المائية البارزين في هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS). ومن بين هؤلاء، بريدهوفت وآخرون (Bredehoeft et al.) اللذين أثنوا على دارتون كثيرًا في الفقرة الافتتاحية من ورقتهم التي صدرت عام 1983.

> "يعد المكمن داكوتا المائي في ولاية جنوب داكوتا واحد ة من مكامن المياه الارتوازية التقليدية. وتنجم العديد من الأفكار الحديثة المتعلقة بمكامن المياه الارتوازية نتيجة تحريات دارتون في المكمن داكوتا المائي في تسعينيات القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين. تستند هذه الورقة إلى حد كبير على بيانات دارتون وهي تكريم لقدرة دارتون كعالم هيدرولوجيا."

أدرج بريدهوفت وفريقه (Bredehoeft, et al., 1983) عدة اقتباسات أخرى من دارتون (1909، الصفحة 60). من بين اثنين تم تضمينهما أدناه، الأول جزء مباشر من قصة هذا الكتاب والثاني خاص. فالأول هو تصور دارتون لكيفية توفير التكشفات الصخرية في بلاك هيلز في الجزء الغربي من ولاية ساوث داكوتا، للدفع الكامن (كما تمت مناقشته في كتاب مشروع المياه الجوفية من تأليف ووسنر وبوتر (Woessner and Poeter,2020)) للتدفق إلى الشرق حيث تم الانتهاء من حفر آلاف آبار الري.

---

[2]Powell led the famed 1869 expedition of the Colorado River and Grand Canyon. Wallace Stegner's (1954) Beyond the 100th Meridian and John F. Ross' (2018) The Promise of the Grand Canyon provide full accounts.

[3]"Upon meeting another geologist at an outcrop, the other man said 'I have made my guess as to what this formation is. What is your guess?' Darton replied, 'I never guess, I find the facts and I know.'"

مشروع المياه الجوفية © المؤلف ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

"الدليل على هذا الضغط، كما هو موجود في العديد من الآبار في شرق ولاية داكوتا الجنوبية، يثبت بشكل قاطع أن المياه تتدفق تحت الأرض لعدة مئات من الأميال. ويمكن تفسير هذه الضغوط فقط من خلال التأثير الهيدروستاتيكي لعمود الماء الذي يمتد إلى ارتفاع شاهق في غرب الولاية. إذا لم يكن لتدفق المياه إلى الشرق والجنوب، فإن سمت عمود الماء الأولي الذي تستمده المياه من الأراضي المرتفعة في منطقة التغذية سيستمر تحت المنطقة بأكملها، ولكن بسبب هذا التسرب، فإن المنسوب الجوفي للمياه لن ليس يتم الحفاظ عليه ا، وهناك تناقص تدريجي باتجاه الشرق يُعرف باسم " التدرج الهيدروليكي"، وهو منحدر يطيل بقائه احتكاك الماء عند مروره عبر الطبقات ".

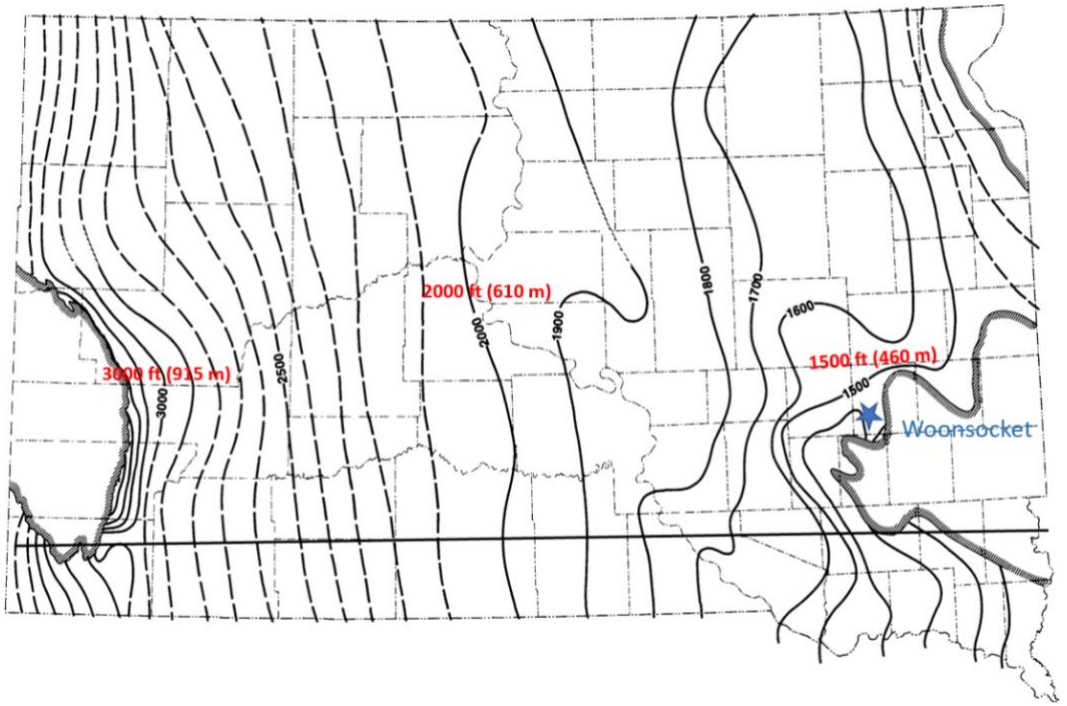
تم احتواء "دليل" دارتون في خريطة لسطح فرق الجهد لنظام المكمن المائي في داكوتا (الشكل 2). من هذه الخريطة وشرح (T. C. Chamberlin, 1885) للمبادئ الجيولوجية والفيزيائية التي توضح الظروف الارتوازية، رسم دارتون نماذج لمقاطع عرضية لنظام المكمن المائي في داكوتا (الشكل 3)، والتي غالبا ما تستخدم في كتب الهيدروجيولوجي المنهجية. الاقتباس الثاني بقلم بريدهوفت (Bredehoeft et al., 1983) أعرب عن أسفه.

"هناك عامل آخر يؤثر بلا شك إلى حد ما على التدرج الهيدروليكي في منطقة السهول الكبيرة (Great Plains) وهو عامل مؤكد ولكن ما هو غير معروف هو كمية التسرب العام من خلال ما يسمى بالطبقات غير المنفذة، خاصة عندما تكون تحت ضغط كبير."

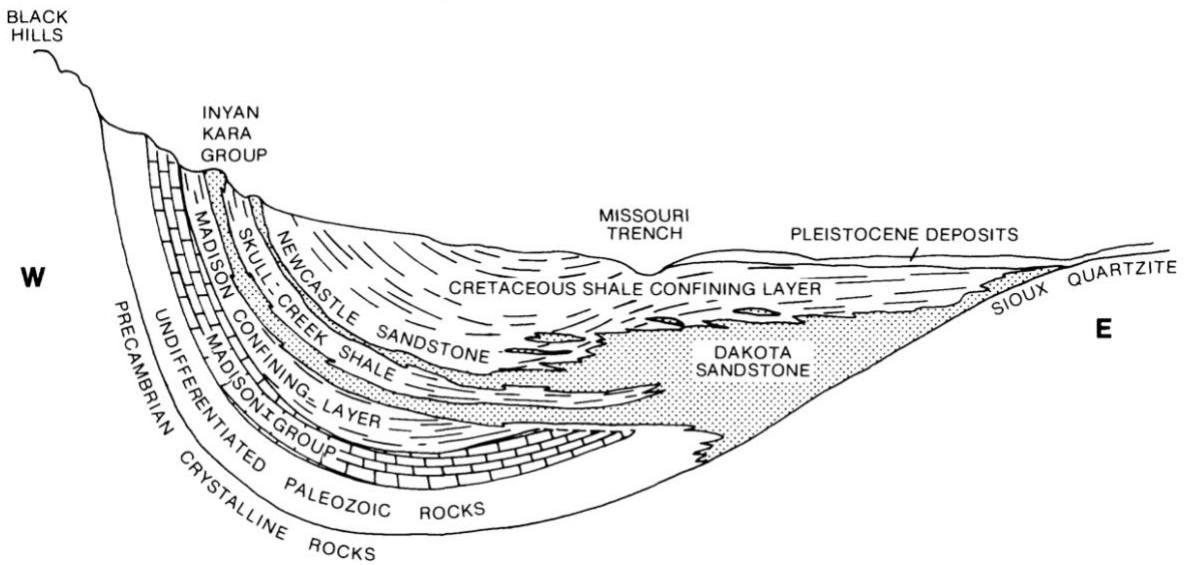
بحلول عام 1923 تم حفر حوالي 10000 بئر في داكوتا الجنوبية وفي النهاية 15000 بحلول عام 1958 (Davis et al.، 1961). انخفض الضغط الأصلي في بئر وونسوكيت (Woonsocket) إلى 130 رطل لكل بوصة مربعة (0.9 ميجا باسكال) وبحلول عام 1892 انخفض تدفقه إلى 1150 جالون \ دقيقة (4.3 متر مكعب \ دقيقة). وفي عام 1915، انخفض الضغط أكثر إلى 45 رطل \ بوصة مربعة (0.3 ميجا باسكال) وبحلول عام 1923 إلى 35 رطل \ بوصة مربعة (0.24 ميجا باسكال) (Meinzer and Hard, 1925). بعد مرور 35 عامًا، فكرا ماليا كل من مينزر وهارد بالمعرفة المسبقة التي وردت في شهادة باول عام 1890.

"إنه لأمر ممتع وممتع للغاية أن نلاحظ أنه في مارس 1890، عندما كانت الإثارة حول الآبار الارتوازية في ذروتها، أدلى الرائد جي دبليو باول، مدير هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية ببيان حول هذا الموضوع قبل لجنة الري التابعة لمجلس النواب والتي بدت متحفظة بشكل غير ملائم في ذلك الوقت، لكنها أشارت بوضوح إلى الطابع المؤقت للضغوط العالية والتصريفات وقدمت تقديرًا للإنتاج الدائم الذي يبدو دقيقًا بشكل ملحوظ بعد 34 عامًا من الى تطور وانحدار الضغط الارتوازي. "

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم



الشكل 2 - سطح فرق الجهد الأولي للمكمن المائي في داكوتا (قدم). تظهر مدينة وونسوكيت (*Woonsocket*) بارتفاع = 1307 قدمًا (400 م) كنجمة. الخطوط الكنتورية المظللة تمثل إعادة التغذية في مرتفعات بلاك في جنوب غرب داكوتا الجنوبية والتصريف إلى الآبار في جنوب شرق داكوتا الجنوبية، على التوالي. الخط الأفقي هو مسار تعريف للمقطع العرضي في الشكل 2 أدناه (مستنسخ من *Bredehoeft et al., 1983*، ومن النسخة الأصل من *Darton, 1909*).



الشكل 3 - المقطع العرضي بين الغرب والشرق الذي يُظهر نظام مكمن الماء الجوفي في داكوتا (من*Bredehoeft et al., 1983*).

على الرغم من أن تقرير مينزر وهارد Meinzer and Hard قد لخص بشكل أساسي العديد من المسوحات والقياسات للضغوط والتدفقات في آبار الري بمرور الوقت، إلا أن صفحات أربع بعنوان "سحب المياه المخزنة وضغط حجر داكوتا الرملي" قد زرعت بذرة حجر الزاوية في ورقة مينزر لعام 1928 بعنوان "قابلية الانضغاط ومرونة طبقات المياه الجوفية الارتوازية ". كانت الصعوبة التي تناولها مينزر Meinzer في تلك الورقة هي مشكلة توازن الكتلة.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

1. بين عامي 1886 و1923، كان متوسط سحب المياه الجوفية 3000 جالون \ دقيقة [4] أو جالونًا في الدقيقة) (11.4 م^3\ دقيقة) من صف مكون من 18 بلدة (R48W – R65)، حيث تبلغ مساحة البلدة 6 أميال × 6 أميال.

2. لكن التدفق الجانبي المستقر عبر مقطع عرضي يمثل طبقة المياه الجوفية استنادًا إلى قانون دارسي، Q = KiA ، يجلب إلى البلدات 500 جالون \ دقيقة فقط (1.9 متر مكعب \ دقيقة). تمت مناقشة قانون دارسي في كتاب مشروع المياه الجوفية (GW-Project) من تاليف (Woessner and Poeter, 2020).

K = 6.25 x 10^{-4} ft/s (1.9 x 10^{-4} m/s) (التوصيل الهيدروليكي)

i = 5 ft/mile (~1m/km) (التدرج الهيدروليكي من الشكل 1) بناءً على خارطة فرق الجهد

A = 6 miles (~10,000 m) x 60 ft (~20 m)

(مساحة المقطع العرضي الممثلة لمكمن مائي لبلدة واحدة مضروب في عرض سمك المكمن المائي)

Q = KiA = (6.25 x 10^{-4} ft/s) (5 ft/ mi) (6 mi * 60 ft) (60 s/min) (7.5 gal/ft^3) = 500 gallons/minute (~2000 liters/minute)

تركت الحسابات في (1) و (2) أعلاه مشكلة إيجاد ما يقرب من 2500 جالون \ دقيقة (9.5 م ^{3} \ دقيقة)، وهو الفرق بين معدل الاستخراج البالغ 3000 جالون \ دقيقة (11.4 م ^{3} \ دقيقة) ومعدل التدفق المار عير المقطع العرضي 500 جالون \ دقيقة (1.9 م ^{3} \ دقيقة). استنتج ماينزر أنه يجب سحب الإنتاج الزائد من المياه الأحفورية الموجودة مسبقًا والمخزنة في مسام المكمن المائي. استمد ماينزر أدلته الظرفية على هذا السلوك من مجموعة متنوعة من الملاحظات الهيدروميكانيكية:

1. كتب كنك (F. H. King, 1982) في الصفحات (67-69) أن "إحدى الملاحظات المدهشة التي تمت ملاحظتها خلال هذه الدراسة هي أن القطار المتحرك ذو الحمولة الثقيلة لديه القدرة على إحداث اضطراب في مستوى الماء في نطاق التربة غير الشعرية، ولكن ليس من السهل رؤية الطريقة التي يتم بها هذا الأمر ". (تظهر استجابة مستوى المياه في الشكل 4 من هذا الكتاب بعد مناقشة الأدلة هذه.) ... "تنتج أقوى الارتفاعات في مستوى المياه عن طريق القطارات المحملة بشكل كبير والتي تتحرك ببطء نسبيًا. ولم يلاحظ قط أن محركًا واحدًا يترك رقماً لحركة منسوب الماء، ولا تنتج قطارات الركاب سريعة الحركة سوى حركة طفيفة، أو لا تنتج أي حركة على الإطلاق ".

2. أجرى تيرزاهي (Terzaghi, 1925) تجارب معملية تم فيها قياس المسامية (حجم الفراغ مقسومًا على الحجم الكلي) لرمل مضغوط مسبقًا استجابة لتغيرات الإجهاد المحوري (القوة لكل وحدة مساحة) (تظهر استجابة الضغط في الشكل 5 من هذا الكتاب بعد مناقشة الأدلة هذه). مرت العينة بعدة دورات تحميل وتفريغ.
على الرغم من أن التفريغ أنتج ضغطًا دائمًا، إلا أن إعادة التحميل اتبع ت الاتجاه الأولي بعد الوصول إلى الضغط المحوري للدورة السابقة. بالعودة الى ماينزر (Meinzer) تبين أن تقليل المسامية بين النقطتين أ وب في الشكل 5 كان مشابهًا لذلك المطلوب لحساب الحجم المفقود من الماء في حسابه.

[4]In actuality, the extraction rate declined from 10,000 gpm in 1910 to 5,000 in 1915 to 2,000 in 1920 to 1000 in 1923.

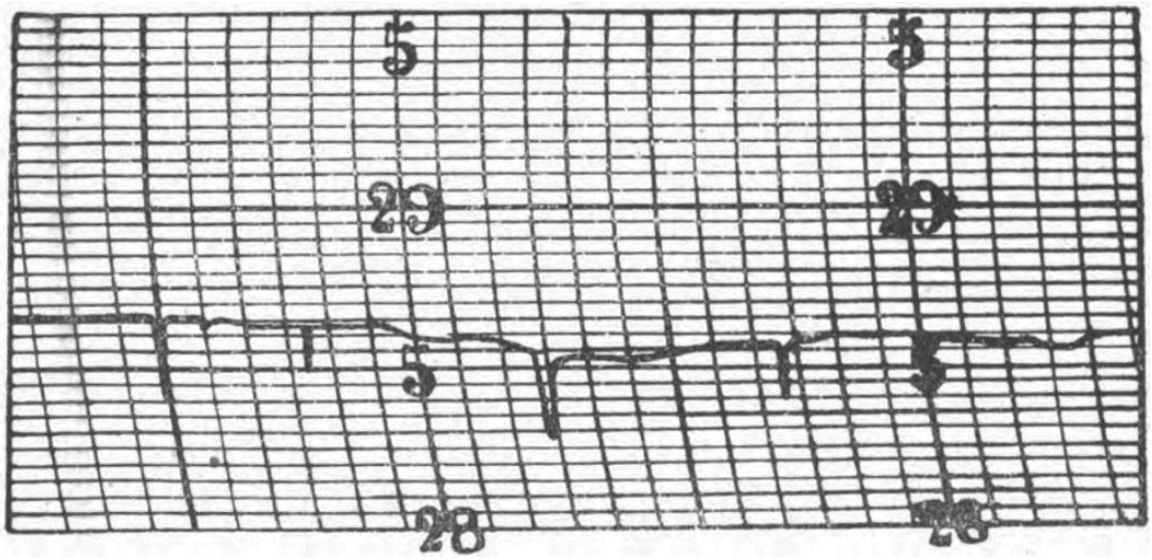
مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

3. قدم شورمان (Schureman, 1926) البيانات التي أظهرت أن مستويات المياه في بئر بعمق 800 قدم في لونجبورت بولاية نيوجيرسي كانت في طور مع المد والجزر المحيطية المسجلة في أتلانتيك سيتي على بعد سبعة أميال إلى الشمال الشرقي. يقع الموقعان على تخوم جزيرة يبلغ عرضها حوالي 1000 قدم (~ 305 م) في المحيط الأطلسي قبالة الساحل الشرقي للولايات المتحدة (تظهر ردود المد والجزر ومستوى مياه الآبار في الشكل 6 من هذا الكتاب بعد تتبع مناقشة الأدلة). يجب أن يكون الارتباط ناتجًا عن تأثير التحميل الميكانيكي لأن 300 قدم (90 مترًا) من الطين المتداخل يعني أن الماء لا يمكن أن يتصل مباشرة بالرمل العميق (Thompson، 1926).

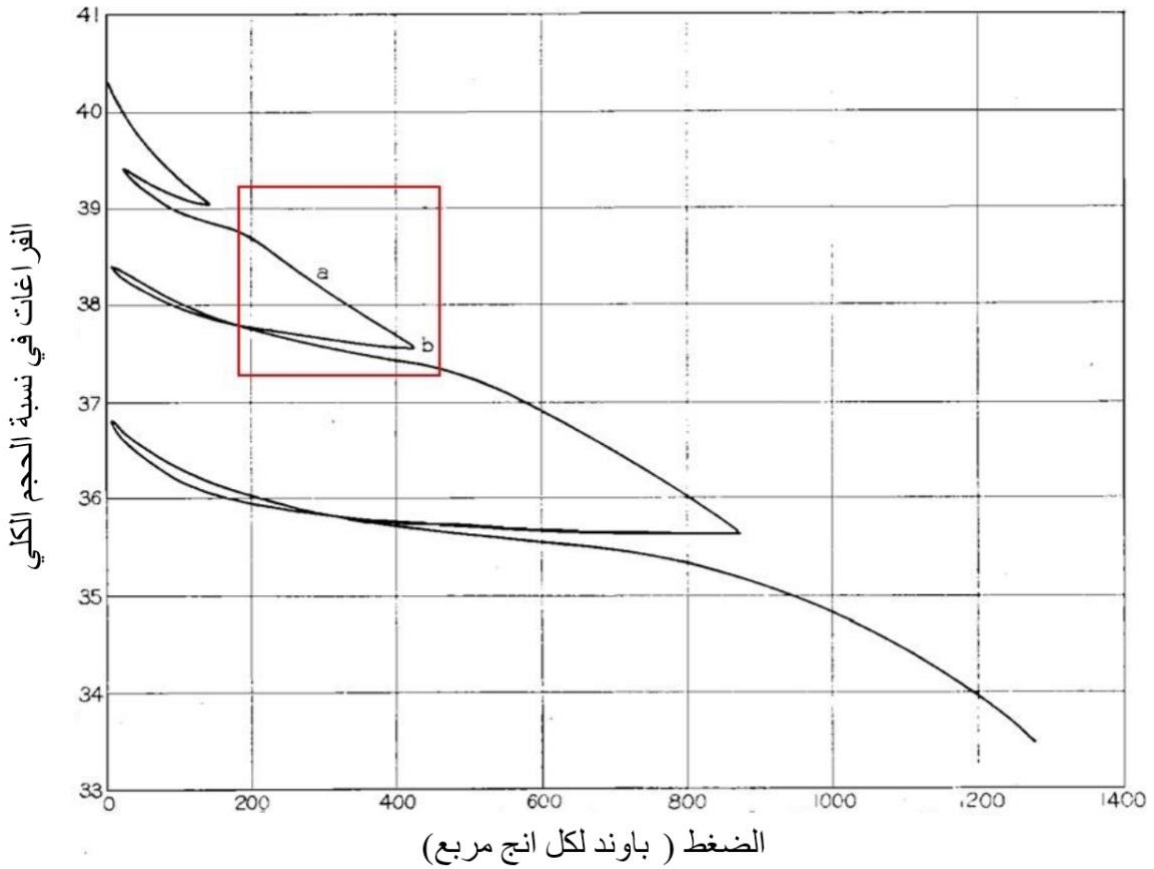
4. عزا برات وجونسون (Pratt and Johnson, 1926) هبوط الأرض في Goose Creek في خليج Galveston إلى استخراج النفط والغاز والمياه من المسام الصخرية في التكوينات تحت سطح الأرض (يظهر الهبوط في الشكل 7 من هذا الكتاب بعد مناقشة الأدلة). أول ثلاث حالات أعلاه، أنتج الحمل الميكانيكي المطبق استجابة لضغط السائل مرتبط ة بتقليل حجم المسام. أظهر الهبوط في Goose Creek أن العكس صحيح أيضًا، أي أن استخراج المائع يمكن أن يؤدي إلى فقدان حجم المسام.

استنتج ماينزر (Meinzer) أن الفرق بين حجم الاستخراج وحجم التغذية يمكن حله عن طريق الانخفاض في حجم المكمن المائي. فالتغيير في حجم المكمن المائي اعتبر حدوثه بسبب قوى التصلب العمودية، $\Delta V_{pore} \setminus V_{pore} = \Delta b \setminus b$ حيث تشير Δ إلى التغيير في حجم المسام قبل وبعد الضخ، أو الفرق بينهما، و V_{pore} تمثل حجم المسام الأولي، و b هو سمك المكمن المائي الأولي. إن اقتصار التشوه على بُعد واحد هو إضفاء الطابع المثالي على مشكلة ثلاثية الأبعاد، ولكن كثيرًا ما يتم تطبيقه على مكامن المياه التي لها امتداد مساحي كبير. إن افتراض وجود إجهاد جانبي يساوي صفر (الإجهاد هو مقياس للتغير النسبي في الطول أو المساحة أو الحجم) يقلل من مشكلة مقارعة البعد الرأسي فقط مع الإجهاد الرأسي المحدد ليكون $\varepsilon_v = -db \setminus b = 4.4 \setminus 60$ ft = 0.6% ٪ 0.6 (Meinzer, 1928, page 281)، حيث اصطلاح العلامة ε_v هو أن الضغط يعتبر موجبًا. فالإجهاد الرأسي بنسبة 0.6٪ يعني أن انخفاض المسامية المطلوب كان من 38.2٪ إلى 37.6٪. مع هذه التعريفات، فإن خط تفكير ماينزر (Meinzer) للتعليل، أملا أن المياه المزاحة بمقدار 4.4 بوصات (0.11 م) بسبب ضغط المكمن المائي على مساحة 648 ميلًا مربعًا (1680 كم^2) من 18 بلدة ستكون كافية لإنتاج 2500 جالون \ دقيقة (9.5 م^3 \ دقيقة) لمدة 38 عاما. وهكذا، فإن "انضغاط مكامن المياه الارتوازية" في عنوان ورقة ماينزر (Meinzer) حلت مشكلة توازن الكتلة. لقد قدمت عرضًا واضحًا للأساس الطبيعي لخزن المياه الجوفية في المكمن المائي المحصور.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

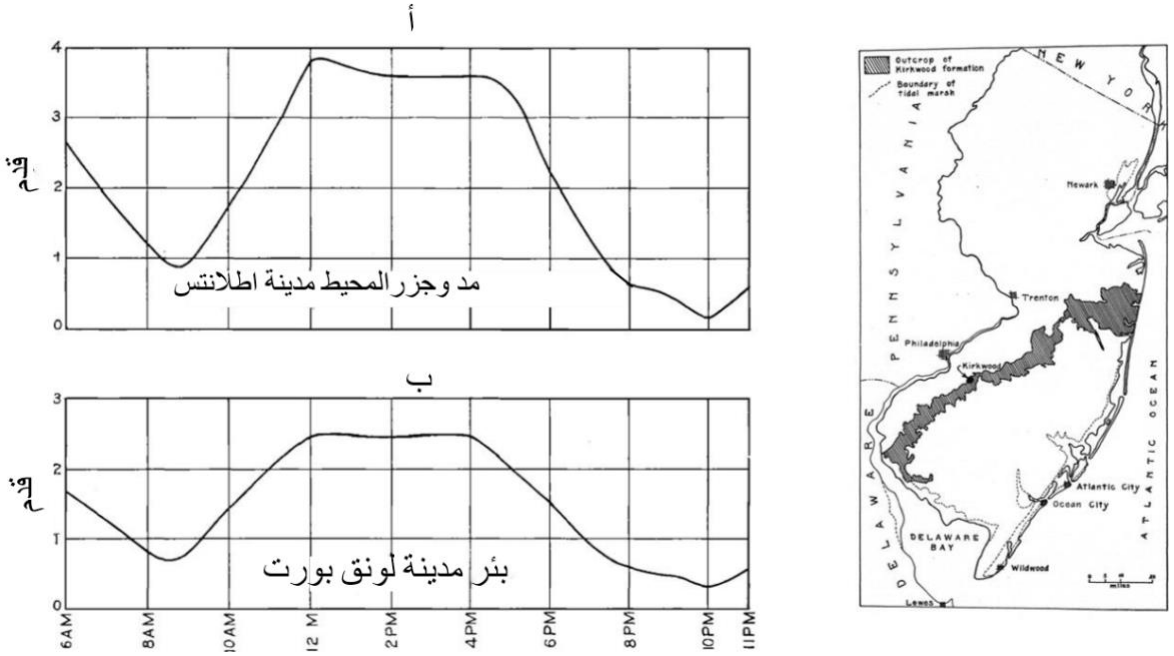


الشكل 4 - التغيرات في مستوى الماء (عند النقطة بعمق 40 قدمًا (12 مترًا) و140 قدمًا (43 مترًا) المسجلة من مسارات القطار) والناتجة عن حركة القطارات، كما تم قياسه بواسطة عوامة متصلة بذراع رافعة بقلم يرتكز على أسطوانة موجهة رأسياً والتي تدور بمرور الوقت في الجزء العلوي من البئر لتسجيل ارتفاع مستوى الماء وهبوطه توضح بحركة القلم (King, 1892).

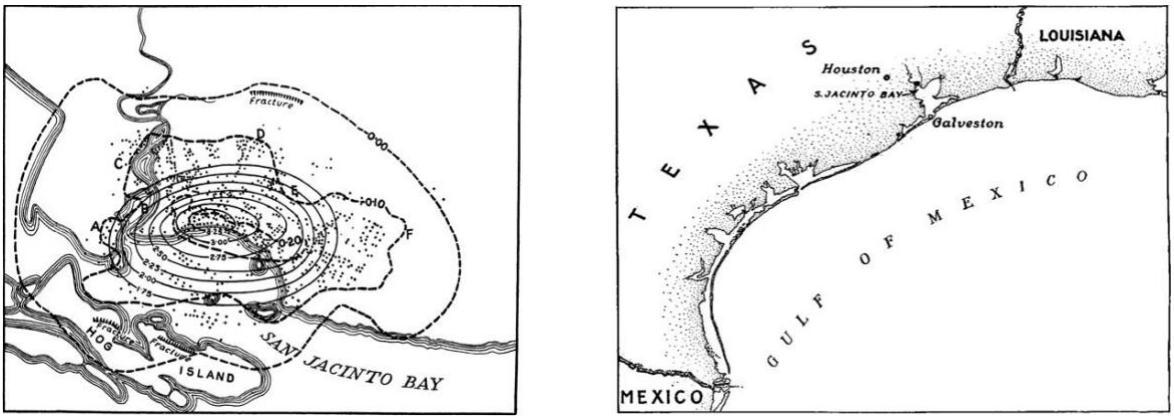


الشكل 5 – انخفاض المسامية مع زيادة الضغط الرأسي ("الضغط" في الملصق ↓ للمحور الأفقي). تتوافق المنطقة المربعة بين النقطتين a وb تقريبًا مع انخفاض ضغط السائل في المكمن المائي في داكوتا (أعيد رسمها بواسطة Meinzer (1928) من (1925) Terzaghi)).

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم



الشكل 6 – في اليسار: المد والجزر في المحيط (الرسم البياني A) في 22 يناير 1926 تم قياسه في أطلانتس سيتي، نيو جيرسي، 7 أميال (11 كم) شمال شرق موقع تسجيل مستويات المياه (الرسم البياني B) في بئر بعمق 800 قدم في لونق بورت، نيو جيرسي (أعيد رسمها بواسطة Meinzer (1928) من (Schureman, 1926)). تعتبر مرحلة الاستجابة لمستويات الآبار للمد والجزر في المحيطات دليلًا على التحميل الميكانيكي، لأن وقت التأخر سيكون واضحًا إذا كانت مستويات المياه تستجيب لتدفق السوائل. إلى اليمين: خارطة من ثومسون (Thompson,1926). الشريط المظلل هو نتوء لتكوين كيرك وود الذي يُعتقد أنه يشمل الرمال على عمق 800 قدم في بئر لونك بورت.



الشكل 7 - حدث هبوط لعدة أقدام (انخفاض في ارتفاع الأرض) نتيجة لاستخراج النفط والغاز والمياه والرمل من حقل نفط غوس كريك على خليج جالفستون (برات وجونسون، 1926). إلى اليسار: خطوط مناسيب بيضاوية الشكل بمسافات متقاربة لمدة 8 سنوات؛ الخطوط المتقطعة وغير منتظمة الشكل هي لمدة سنة واحدة. كل بئر منفرد ممثل بشكل نقطة. حاولت ولاية تكساس المطالبة بملكية الحقل بعد أن غمر الحقل لأن الولاية تملك حق ملكية الأرض المغمورة بالمياه. إلى اليمين: خريطة أيضًا من Pratt and Johnson (1926).

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

3 حل ثايس Theis

غالبًا ما يقابل مفهوم الخزن في جيولوجيا المياه كمعامل يرمز له بالرمز "S" في حل ثايس Theis '(1935). وضع ثايس مفهومًا لمشكلة انخفاض منسوب الماء في البئر كالمفهوم المتداول في مصطلحات التوصيل الحراري، والتي عبر عنها في مراسلاته مع زميله السابق في الكلية، كلارنس لوبين، الذي أصبح أستاذًا للرياضيات في جامعة سينسيناتي (Freeze، 1985).

"إن تدفق المياه الجوفية له العديد من التناظر الوظيفي لتدفق الحرارة بالتوصيل. إذ لدينا تشابهات دقيقة في نظرية المياه الجوفية للتدرج الحراري والتوصيل الحراري والحرارة المحددة. أعتقد أن مقاربة قريبة لحل بعض مشاكلنا [كذا] ربما تكون قد نجحت بالفعل في نظرية التوصيل الحراري. فهل تم حل هذه المشكلة في التدفق الشعاعي؟ لنأخذ صفيحة ذات سمك ثابت وخصائص حرارية ثابتة عند درجة حرارة أولية منتظمة لحساب درجات الحرارة من خلال اللوحة في أي وقت بعد إدخال قيمة النقصان التي يتم الاحتفاظ بها عند درجة حرارة 0؟ والأكثر نفعا من وجهة نظرنا: إعطاء نفس اللوحة تحت نفس الظروف لحساب درجات الحرارة بعد إدخال قيمة النقصان التي تتدفق اليها الحرارة بمعدل منتظم؟ لقد نسيت أن أقول إن اللوحة يمكن اعتبارها ذات مساحة لانهائية ".

زود لوبن (Lubin) ثايس بالحل من Carslaw (1921)[5] وفقًا لـبانكس (Banks، 2015) الذي أشار إليه ثايس على النحو الواجب في ورقته التي ذكر فيها بوضوح تشبيه تدفق الحرارة، كما فعل في رسالته السابقة إلى لوبن.

"قانون دارسي مشابه لقانون تدفق الحرارة بالتوصيل، والضغط الهيدروليكي مماثل لدرجة الحرارة، وتدرج الضغط إلى التدرج الحراري، والنفاذية للتوصيل الحراري، والإنتاج المحدد للحرارة المحددة. لذلك، فإن النظرية الرياضية للتوصيل الحراري التي طورها فوريير والكتاب اللاحقون وجدوها قابلة للتطبيق إلى حد كبير على النظرية الهيدروليكية. تم التعرف على هذا القياس، على الأقل منذ عمل سليختر (Slichter)[6]، ولكن من الواضح أنه لم يتم إجراء أي محاولة لإدخال وظيفة الوقت في رياضيات هيدرولوجيا المياه الجوفية. "

" في التوصيل الحراري يتم فقدان كمية معينة من الحرارة بالتزامن مع انخفاض درجة الحرارة. يبدو انه من المحتمل، وعلى نحو مماثل، في مكامن المياه الارتوازية المرنة، يتم تصريف كمية محددة من الماء على الفور من مخزون المياه مع انخفاض الضغط. "

بالنسبة لخزن المياه الجوفية، استخدم ثايس المتغير S، والذي أطلق عليه في الأصل " بالإنتاج المحدد" في الاقتباس أعلاه وعدم الخلط بينه وبين " ألإنتاج المحدد" للمكمن المائي غير المحصور. ويعد، التشبيه بالحرارة المحددة[7] هو السمة الوحيدة التي قدمها ثايس للمتغير S، على النقيض من وصف موجز للمعنى المادي لمعامل الناقلية (T). ثايس في ورقته البحثية عام 1935 لم يقدم أي رؤية ميكانيكية لخزن المياه الجوفية؛ كانت خاصية يُستدل عليها من قياس تدفق الحرارة. ومع ذلك، أوضح ثايس لاحقًا ملاحظته حول الرمز S في ورقته البحثية لعام 1935 التي أعيد طبعها من قبل هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS) عام 1952.

[5] H.S. Carslaw and J. C. Jaeger's book "Conduction of Heat in Solids" (second edition) published by Clarendon Press in 1959, is a rich source of theory and analytical solutions applicable to quantitative hydrogeology.

[6] Slichter's history was summarized in 1987 by H. F. Wang in the article "Charles Sumner Slichter: An engineer in mathematician's clothing"*in* History of Geophysics, volume 3, The History of Hydrology, edited by Edward R. Landa and Simon Ince, pages 103-112.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

"يسمى العامل S في المعادلات المعطاة " بالعطاء المحدد " في نص الورقة. وأظهرت دراسة لاحقة أنه من المستحسن تسمية هذا المصطلح "بمعامل الخزن" للمكمن المائي وتعريفه على أنه كمية المياه بالأقدام المكعبة التي يتم تصريفها من كل موشور رأسي للمكمن المائي بمساحة قاعدية تساوي قدمًا مربعة واحدة وارتفاع يساوي ارتفاع المكمن المائي عندما ينخفض مستوى الماء قدمًا واحدًا ".

هنا، يتراجع ثايس عن استخدام مصطلح "العطاء المحدد" للمكمن المائي المحصور. اليوم، يتم استخدام "الخزن" بشكل مرادف لـ "معامل الخزن"، والتعريف اللفظي لثايس هو التعريف المتوفر بشكل شائع في الكتب المدرسية ويتم توضيحه للمكمن المائي المحصور في الشكل رقم 1.

تعريف Theis لمعامل الخزن هو للتدفق الشعاعي الثنائي الأبعاد. أما في التدفق ذو الأبعاد الثلاثة، يكون الخزن المحدد مناظرا للحرارة المحددة، حيث يتم نسبة كمية الماء التي تمت إزالتها من الحجم الأولي الممثل REV لكل وحدة انخفاض الى الحجم الأولي الممثل REV. من أجل الدقة، سيتم ترجمة التعريف اللفظي إلى معادلة، على الرغم من أن معظم كتب الجيولوجيا المائية تتبع ثايس لكنها تتجاهل القيام بذلك. الكمية الرئيسية التي يجب تحديدها هي الزيادة في محتوى السوائل، ζ (المعادلة 1)، والتي تعود أصولها إلى ميكانيكا التربة ونظرية المرونة المسامية (انظر Biot, 1941; Wang, 2000).

$$\zeta = \frac{\Delta V_w}{V} \qquad (1)$$

حيث:

ΔV_w = حجم الماء المضاف أو المزال من الخزن في REV (L^3)

V = الحجم الأولي الممثل (L^3)

تكون الكمية ΔV_w موجبة عند إضافة الماء إلى المكمن المائي وسالبة عند إزالة الماء منه. تمثل الكمية ΔV_w حجمًا من المياه المنقولة إلى أو من مصدر خارجي عند ضغط مرجعي، عادةً الضغط الجوي، لأن مقاييس الضغط تقيس عادةً الفرق بين الضغط المطلق والضغط الجوي ويسمى ("ضغط المقياس"). وبالتالي، فإن ΔV_w عبارة عن زيادة في حجم المياه المضافة إلى المكمن المائي أو إزالتها منه، الحالة شبيه بقدر ما يمثله إضافة الأموال إلى حساب بنكي أو سحبها منه. يتم ضبط كمية المياه المضافة إلى المكمن المائي أو إزالته منه بواسطة الحجم V من REV. إن ترجمة كلمات ثايس إلى معادلة تعطي تعريفًا رياضيًا للخزن المحدد كما هو موضح في المعادلتين 2أ و 2ب.

[7] Theis later in his paper uses the term “specific heat per unit-volume,” which is the analogue of “specific storage” defined as storage capacity per unit volume. Because “specific” generally refers to the per unit mass value of a quantity, “specific heat per unit-volume” is called “volumetric heat capacity.”

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

$$S_s = \frac{\zeta}{\Delta h} \quad (أ2)$$

الخزن المحدد Ss يوصف بوحدات معكوس الارتفاع، مثل معكوس المتر، 1 \ م. يمكن أيضًا التعبير عن تعريف التغيير في ضغط المائع لأن $\varrho_w g \Delta h = \Delta p$. أما السمت (h)، المنسوب الجوفي للمياه فقد تم تعريفه ومناقشته في كتاب مشروع المياه الجوفية (GW-Project) من تأليف ووسنر و بوتر (Woessner and Poeter, 2020).

$$S_s = \rho_w g \frac{\zeta}{\Delta p} \quad (ب2)$$

حيث تمثل:

ϱ_w = كثافة الماء ($L^3 \setminus M$)

g = التسارع بسبب الجاذبية ($T^2 \setminus L$)

في التدفق الشعاعي ثنائي الأبعاد، الخزن S للمكمن المائي المحصور ذو سمك b، هو حاصل ضرب الخزن محددة (Ss) في سمك المكمن المائي، $S = S_s b$، لأن الخزن وفقًا لتعريف ثايس هو كمية المياه "التي يتم تصريفها من كل موشور عمودي من المكمن المائي " لوحدة المساحة لكل وحدة انخفاض في المنسوب الجوفي للمياه. صفة الخزن Storativity تكون بلا أبعاد حيث أن أبعاد S_s هي معكوس الطول.

توضح إعادة سرد حل Theis لعام 1935 لانخفاض منسوب الماء بسبب ضخ بئر في مكمن مائي أفقي، الدور المهم الذي لعبه تشبيه التوصيل الحراري في تطوير مفهوم الخزن الهيدروجيولوجي. هذا التشابه النسبي هو فيزيائي ورياضي (انظر الجدول 1). المنسوب الجوفي للمياه \ درجة الحرارة هي الإمكانات الدافعة لتدفق الماء \ تدفق الحرارة وفقًا لقانون دارسي \ فوريير. الخزن المحدد الذي يمثل (حجم الماء المفرغ من الخزن من وحدة حجم المكمن المائي لكل وحدة انخفاض في المنسوب الجوفي للمياه) ويناظر الحرارة المحددة لكل وحدة حجم (والتي تمثل الحرارة المضافة المطلوبة لرفع درجة حرارة وحدة حجم من المادة درجة واحدة). التناقض المثير للاهتمام بين هذا الزوج التناظري هو أن تعريف الخزن المحدد يتم التعبير عنه عادةً على أنه سلبي مزدوج (تصريف لكل انخفاض) نظرًا لأهمية استخراج المياه من المكمن المائي، في حين يتم التعبير عن تعريف الحرارة المحددة على أنها موجبة مزدوجة (إضافة للرفع). لم يكتمل الجدول 1 بعد حيث ستتم مناقشة المعادلات الحاكمة للمزدوج في القسم 5 الخاص بشأن معادلة الانتشار.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

الجدول 1 - الكميات المتشابهة بين تدفق المياه الجوفية والتدفق الحراري (Wang and Anderson، 1982؛ Wang، 2000؛ Anderson، 2007).

تدفق المياه الجوفية	التدفق الحراري
سمت السائل $h = p/(\rho_w g) + z\ [m]$	درجة الحرارة $T\ [°K]$
الماء الذي يضاف الى الخزن $\Delta V_w\ [m^3]$	الحرارة $\Delta Q\ [J]$
دفق المياه الجوفية $[m^3/m^2/s = m/s]$	دفق الحرارة $q[J/(m^2 s) = W/m^2]$
التوصيل الهيدروليكي $K\ [m/s]$	التوصيل الحراري $K[J/(m\,°K s) = W/(m\,°K)]$
الخزن المحدد $S_s = S/b[1/m]$	السعة الحرارية المحددة (لكل وحدة حجم) ρc[J/ (°K m^3)]
الانتشار الهيدروليكي $K/S_s\ [m^2/s]$	الانتشار الحراري $K/(\rho c)\ [m^2/s]$ (تمثل K هنا التوصيل الحراري كما في أعلاه)
قانون دارسي $q = -K(dh/dx)$	قانون فورير $q = -K(dT/dx)$

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

4 صيغة جاكوب للانضغاط لخزن مكامن المياه

التقدم الكبير الذي أحرز في فهم هيدروجيولوجية الخزن كان بواسطة جاكوب C. E. Jacob وفقا لتيتوس (Titus, 1973)، إذ بين في ورقته عام 1940 الربط لمفهوم ثايس للخزن كخاصية تشبه السعة الحرارية بتحليل ماينزر(Meinzer) للمياه المخزنة في المكمن المائي في داكوتا بسبب انضغاط المكمن المائي. كما يوضح جاكوب في اعترافه، مشاركة أفكاره مع زميله ثايس في الجمعية الجيولوجية الأمريكية (USGS). كان هدف جاكوب هو اشتقاق مكافئ المياه الجوفية للمعادلة التفاضلية الجزئية لتدفق الحرارة المعتمد على الوقت، وبالتالي وضع الوصف الرياضي لتدفق المياه الجوفية على أرضية مادية أكثر صلابة من التشبيه المعقول.

يقترح الكاتب اشتقاق "من نقطة الصفر" المعادلة التفاضلية الأساسية التي تحكم تدفق المياه في المكمن المائي الارتوازي المرن، مع الأخذ في الاعتبار بدور كل الافتراضات الضرورية لاشتقاق المعادلة".

قام جاكوب بحساب توازن الكتلة في الحجم الأولي الممثل (REV) على مدى خطوة زمنية حدث فيها تغيير في الضغط Δp. استند اشتقاقه على ثلاثة مبادئ فيزيائية: (1) انخفاض ضغط السائل يعادل زيادة فعالة في الإجهاد الرأسي. (2) يؤدي انخفاض ضغط المائع إلى طرد حجم ماء مساوٍ لفقدان المسامية المرتبط بانضغاط المكمن المائي. (3) يؤدي انخفاض ضغط السائل إلى تمدد حجم الماء في المسام بسبب انضغاط الماء نفسه.

1. لفت عنوان ورقة Meinzer لعام 1928 الانتباه إلى دور "الانضغاطية والمرونة لمكامن المياه الارتوازية". كدليل، قدم تجربة تيرزاهي Terzaghi التي تسبب فيها الضغط العمودي الى فقدان المسامية في الحجر الرملي (الشكل 5). تم تصوير تأثير خفض ضغط المسام ليكون له نفس تأثير الزيادة المتساوية في الإجهاد الرأسي (الشكل 8). هذا المفهوم يذكر رسميًا باسم "قانون الإجهاد الفعال" كما هو موضح في المعادلة 3.

$$\varepsilon_v = \beta_v(\sigma_v - p) = \beta_v\sigma_e \qquad (3)$$

حيث تمثل

$\beta_v = \varepsilon_v / \sigma_v$ = الانضغاط الرأسي لـ p = 0 (في ظروف التصريف)

$\sigma_e = \sigma_v - p$ = الإجهاد الرأسي الفعال يعرف على أنه الفرق بين الضغط الرأسي وضغط المسام

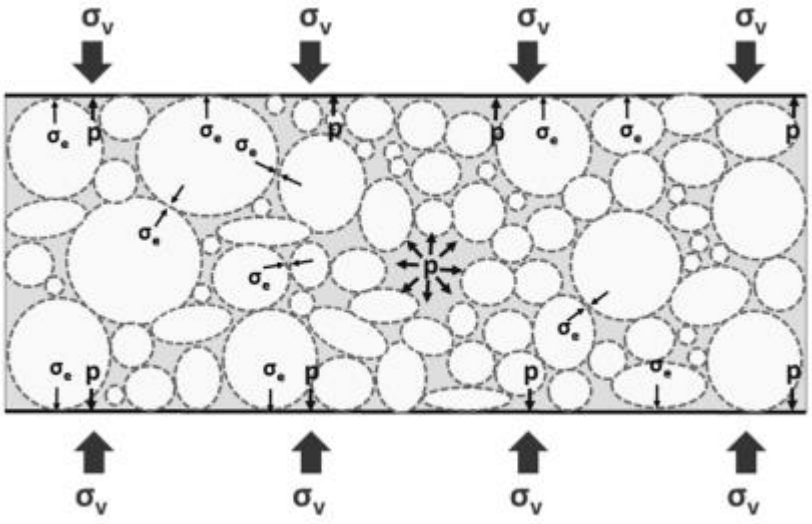
علامة اصطلاح الاجهاد الضاغط هو موجب.

2. استنتج جاكوب أن استخراج المياه من المكمن المائي لا يغير الاجهاد الرأسي الكلي. مع ثابت الإجهاد الرأسي الكلي، تكون الزيادة في الإجهاد الفعال مساوية لانخفاض ضغط المائع النقيض، أي، $\Delta\sigma e = -\Delta p$، لذلك تتحول المعادلة 3 الى المعادلة 4.

$$\Delta\varepsilon_v = -\beta_v\Delta p \qquad (4)$$

[8] "*The writer is greatly indebted to his colleagues in the Geological Survey for timely suggestions and criticism, and especially to C. V. Theis, as many of the ideas expressed herein have been taken from his personal communications to the writer.*"

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم



الشكل 8 - ينص قانون الإجهاد الفعال على أن الإجهاد الرأسي الفعال $\sigma e = v - p$ يتحكم في التوتر الرأسي (من قبل Atkinson، 2000).

اصطلاح الإشارة هو أن التوتر العمودي والاجهاد العمودي موجبان في الضغط. بالنظر إلى افتراض عدم وجود توتر جانبي، فإن التوتر الرأسي يساوي الانخفاض في المسامية، مع التحذير من أن انضغاط الحبيبات الصلبة يجب إهماله. بمعنى آخر، $\Delta\varepsilon v$ يساوي حجم الماء لكل وحدة حجم من الحجم الأولي الممثل REV الذي يتم إزالته من الخزن بسبب انضغاط المكمن المائي.

3. بالإضافة إلى ذلك، يجب تضمين تمدد حجم مياه المسامية استجابة لانخفاض ضغط السائل في الموازنة المائية للحجم الأولي الممثل REV (المعادلة 5).

$$\frac{\Delta V_w}{V_w} = -\beta_w \Delta p \qquad (5)$$

حيث:

β_w= انضغاطية الماء (4.5×10^{-10} باسكال $^{-1}$)

$V_w = nV$ ، حيث n هي المسامية و V هي حجم REV

من خلال إضافة مصدري المياه المنطلقين من الخزن لتقليل ضغط المسام $-\Delta p$، استخرج جاكوب صيغة لمعامل الخزن، S، تتضمن انضغاطية المكمن المائي وانضغاطية الماء بالإضافة إلى سمك المكمن المائي والمسامية كما هو موضح في المعادلتين 6أ و 6ب.

$$S = \rho_w g b(\beta_v + n\beta_w) \qquad (6أ)$$

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

وبالتقسيم على سمك المكمن المائي نحصل على الخزن المحدد (S_s).

$$S_s = \rho_w g(\beta_v + n\beta_w) \qquad (6ب)$$

في النظام الدولي للوحدات (SI) تكون وحدات S_s هي 1/م كما هو موضح في المعادلة 2.

من قانون حفظ الكتلة حصل جاكوب على المعادلة التفاضلية الجزئية للتدفق الشعاعي في المكمن المائي بسمك b والتي بانت مطابقة في صيغتها لما استنتجه ثايس بالتشابه مع التوصيل الحراري. إن الاختلاف بين التوجهين هو أن معامل الخزن S تم التعبير عنه من خلال الانضغاطية بدلاً من الكمية المحددة عن طريق القياس.

يمكن استخدام تجربة Terzaghi لتقدير الخزن المحدد للرمل غير المتماسك (أنظر الشكل 5 والمعادلة 6ب). حسب الانضغاط الرأسي βv بين النقطتين أ وب من المنحدر ليكون 7×10^{-10} Pa^{-1} بعد التحويل من الوحدات الإنجليزية. والصيغة $n\beta_w = 2 \times 10^{-10}$ Pa^{-1} هو لمسامية قيمتها 38٪. بجمع الصيغ وضربها في العامل $\rho_w g$ تعطي خزن محددة تبلغ قيمته 2.3×10^{-4} م$^{-1}$ ونسبة انضغاط الرمل إلى الماء هي 3.5. تعتمد قيم الخزن المحدد على نوع الصخور وكذلك التباين داخل الصخر.

مع هذه التوضيحات، يوفر الجدول 2 قيمًا مرتبة من حيث الحجم لمجموعة صغيرة من المواد الجيولوجية. تبين كمية المياه التي تم الحصول عليها للري من المكمن المائي في داكوتا أنه يمكن خزن كميات كبيرة من السوائل في مواد أرضية شديدة الانضغاط. ومع ذلك، فإن قيم الخزن المحدد في الجدول 2 ذات رتب من حيث الحجم أصغر من العطاء المحدد لمكامن المياه غير المحصورة التي تمثل قيمها مسامية المكمن المائي.

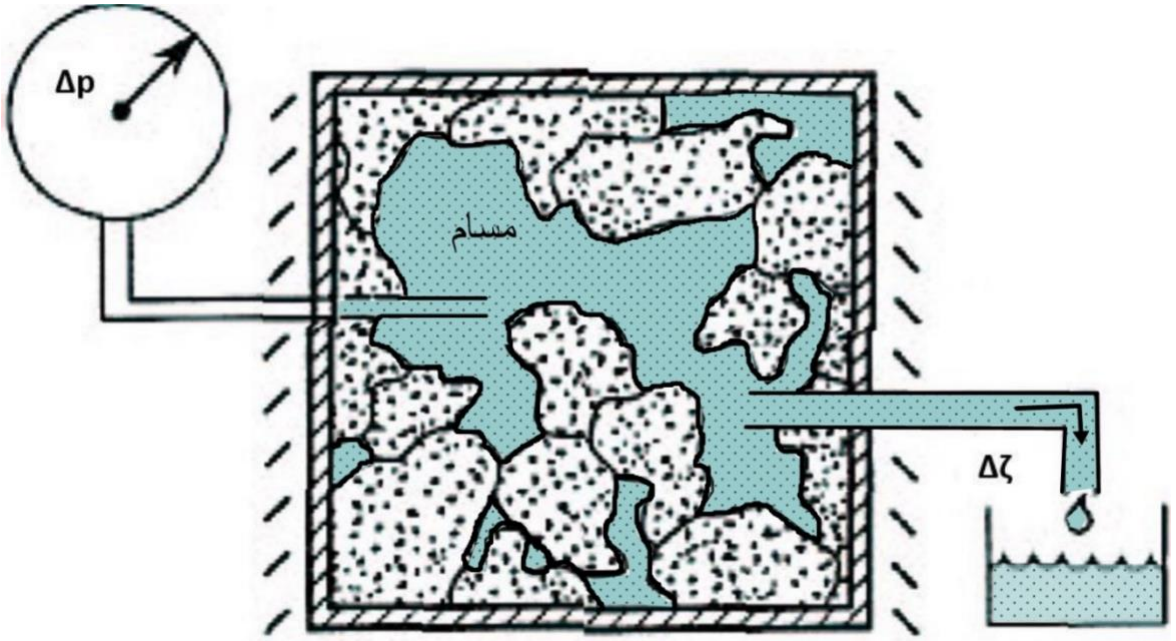
في علم المياه الجوفية، تعطى الأهمية لقابلية انضغاط المكمن المائي أكثر من قابلية انضغاط الماء. من ناحية أخرى، اعتبر مهندسو البترول عمومًا أن مكامن النفط غير قابلة للانضغاط لأنها على عمق أكبر. أختبر جاكوب هذا الافتراض لحقل نفط شرق تكساس الذي وصفه موسكات (Muskat , 1937) في أطروحته الكلاسيكية تدفق السوائل المتجانسة عبر الوسائط المسامية. أنتج الحقل 500 مليون برميل (80 مليون متر مكعب) من النفط مع انخفاض ضغط قدره 375 رطل / بوصة مربعة (2.6 ميجا باسكال). بافتراض وجود خزان صلب، اشترط موسكات أن يحتوي الزيت الموجود في مكانه على غاز مذاب كافٍ لزيادة انضغاط السائل بمعامل مقداره 20 لإنتاج هذه الكمية من انضغاط السائل وحده، على الرغم من أن الزيت غير مشبع. غير ان جاكوب اقترح بدلاً من ذلك أن الانضغاطية لرمال المكمن ودبن (Woodbine) وما يرتبط بها من طبقات طينية من المرجح أن تكون هي المسؤولة عن الإنتاج.

يجب التأكيد على أن معاملات الخزن S وS_S في المعادلة 6أ أو 6ب يمكن قياسها مباشرة في الحقل من اختبار الضخ أو في المختبر من خلال الالتزام بتعريفها على أنها نسبة حجم الماء الذي تم إزالته من الخزن بسبب تغير ضغط المسام (الشكل 9). ومع ذلك، يصعب إجراء هذا القياس المباشر بدقة لأنه يجب تضمين خزن السوائل في الأنابيب المتصلة بحجم مسام عينة الصخور أثناء إجراء الحسابات.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

الجدول 2 - انضغاط الصخور والخزن المحدد لبعض المواد الجيولوجية وفقا لبالسيوسكاس و دومينيكو (Palciauskas and Domenico, 1989). إن قابلية انضغاط الصخور وقيم الخزن المحدد هي للإجهاد الحاصر المتناظر، وليس للإجهاد الرأسي. تأتي القيم من مصادر متنوعة. قياسات الحجر الجيري هي لأحمال الضغط الجوي أو المد والجزر. بينما القيم الأخرى وردت من الكتيبات وتم حسابها بالافتراضات. حسب الخزن المحدد من صيغة المنسوب الجوفي للمياه حيث قيمته الممثلة بالضغط باستخدام ρ_w = 1000 كغم / م^3 و g = 9.8 م/ثانية^2. للمقارنة، فإن انضغاطية الماء βw = 4.5 x 10^{-10} Pa^{-1}

المواد الصخرية	انضغاطية الصخور $\beta, 10^{-10} Pa^{-1}$	الخزن المحدد ضمن مفهوم الضغط $S_s / (\rho_w g), 10^{-10} Pa^{-1}$	الخزن المحدد ضمن مفهوم السمت $S_s, 10^{-6} m^{-1}$
الطين	160	162	159
الحجر الطيني	4.6	5.4	5.3
الحجر الرملي لكاينتا	1.1	1.2	1.2
الحجر الجيري	0.3	0.95	0.93
بازالت هانفورد	0.22	0.44	0.43



الشكل 9 - قياس الخزن المحدد اعتمادا على التغيير في ضغط المائع وفقا للمعادلة 2ب (انظر Wang, 2000).

بالإضافة إلى المعادلة 6أ، اشتق جاكوب معادلات لاستجابة مستوى الماء لتحميل المكمن المائي عن طريق المد المائي أو التغيرات في الضغط الجوي، أيضًا بصيغة انضغاط المكمن المائي والماء، والتي يمكن أن توفر قياسًا غير مباشر لمعامل الخزن. ويؤدي المدى الأفقي الكبير المفترض للحمل إلى توليد ضغط للسائل في المكمن المائي لأن السائل لا يمكنه الهروب أثناء الضغط عليه. في ميكانيكا التربة، يقال إن المكمن المائي غير منزوح الماء. في حالة المد والجزر أو وجود الضغط الجوي، يكون الضغط الرأسي بالتأكيد غير ثابت. حينئذ يمكن إضافة الماء إلى الخزن أو إزالته من الخزن عند تطبيق إجهاد رأسي بالإضافة إلى تغيير ضغط المسام (قارن مع المعادلة 2ب). لذلك، وبشكل عام، يجب التعبير عن الزيادة في محتوى السائل من حيث التغيرات في كل من الضغط الرأسي وضغط المسام حيث تأخذ المعادلة في الاعتبار الزيادة في محتوى السائل لتكون دالة خطية لكلا المتغيرين.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

$$\zeta = \beta_v \Delta\sigma_v + \rho_w g S_s \Delta p \quad (7أ)$$

اصطلاح الإشارة هو أن ζ يكون موجبًا عند إضافة الماء إلى الحجم الأولي الممثل (REV) ويكون $\Delta\sigma_v$ موجبًا عند انضغاط (REV). المصطلح الأول على اليمين في المعادلة 7أ يمثل زيادة محتوى السائل المرتبط بتغيير الضغط الرأسي عندما لا يكون هناك تغيير في ضغط المائع. افترض جاكوب أن حجم المياه المخزنة في الحجم الأولي الممثل (REV) يتناقص بنفس المقدار الذي يقل فيه حجم REV نفسه، أي أن تغيير الماء في الخزن هو سلبي للتوتر، وهذا هو السبب في أن معامل $\Delta\sigma_v$ في المعادلة 7أ هو β_v. أما المصطلح الثاني على اليمين في المعادلة 7أ تمثل زيادة محتوى السائل المرتبط بالتغير في ضغط المائع عندما لا يكون هناك تغيير في الضغط الرأسي، وهو بالضبط تعريف الخزن المحدد (قارن مع المعادلة 2).

المعادلة 7أ هي واحدة من معادلتين أساسيتين لمرونة المسامية للحالة الخاصة للتحميل الرأسي الواسع النطاق (Wang، 2000). وتربط المعادلة التأسيسية الأخرى خطيًا التوتر العمودي بالتغيرات التي تحدث في الضغط العمودي وضغط المسام.

$$\Delta\varepsilon_v = \beta_v \Delta\sigma_v - \beta_v \Delta p \quad (7ب)$$

تقدم المعادلة 7ب التوتر الرأسي كمجموع من حدين. ينص المصطلح الأول على أن التوتر العمودي هو الذي يتولد بسبب تغير الأجهاد الرأسي عندما لا يكون هناك تغيير في ضغط المائع والمصطلح الثاني هو التوتر الرأسي المرتبط بالتغير في ضغط المائع عندما لا يكون هناك تغيير في الاجهاد العمودي. أما معامل التناسب β_v هو لكلا المصطلحين بموجب قانون الإجهاد الفعال، أي أن المعادلة 7ب هي مجرد إعادة صياغة للمعادلة 3.

استشهد مينزر (Meinzer) باستجابة مستويات المياه في المكمن المائي لمد المحيطات في طور واحد (الشكل 6) كدليل على مرونة المكمن المائي. تسمى نسبة الزيادة في مستوى الماء في البئر إلى الزيادة في مستوى المحيط، بكفاءة المد والجزر، (T.E.). هذه النسبة تساوي نسبة $\Delta\sigma_v \backslash \Delta p$. وبافتراض عدم دخول الماء إلى المكمن المائي أو مغادرته بسبب الامتداد المساحي الكبير للتحميل وإدخال حالة المكمن غير المنزوح، ζ = 0، في المعادلة 7أ يعطي استجابة ضغط المسام غير المنزوح لتكون $\Delta p = \beta_v \sigma_v / (w_g S_S)$. ثم استبدال المعادلة 6ب بالمعامل S_S نحصل على المعادلة 8.

$$T.E. = \frac{\beta_v}{\beta_v + n\beta_w} \quad (8)$$

تعرف الكفاءة البارومترية، (B.E.)، بالمثل على أنها نسبة الزيادة في مستوى الماء إلى الزيادة في الإجهاد الرأسي (معبرًا عنه بما يكافئ الزيادة في السمت). الاختلاف عن كفاءة المد والجزر من حيث استجابة البئر هو أن التغيير في الضغط الجوي يغير مباشرة مستوى الماء في البئر بمقدار $-\Delta p/\varrho_w g$. يجب أن يضاف هذا التغيير إلى الكمية المستحثة في المكمن المائي عن طريق تحميل الغلاف الجوي كما في حالة تحميل المد والجزر. وهكذا، فإن (B.E.= 1 – T.E.) ويمكن التعبير عنها بالمعادلة 9.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

$$B.E. = \frac{n\beta_w}{\beta_v + n\beta_w} \quad (9)$$

تحتوي الصيغ الخاصة بكفاءة المد والجزر والكفاءة البارومترية على نفس خصائص المكمن المائي مثل معامل الخزن، أي الانضغاط الرأسي وانضغاط الماء والمسامية. إن قياس كفاءة المد والجزر أو الكفاءة البارومترية وبافتراض أن n وβ_w معروفان يعني أنه يمكن الحصول على β_v، وبالتالي، S_s من المعادلة 8 أو 9 ويمكن حساب نسبة مساهمة انضغاط الماء، $n\beta_w$، إلى انضغاط الخزان الجوفي، β_v.

استخدم جاكوب (1941) كفاءة المد والجزر لحساب معامل الخزن بشكل غير مباشر لأنه تحديده أكثر سهولة من تحديد كفاءة البارومتر. وقارن المساهمات النسبية لمرونة المكمن المائي وانضغاط الماء من استجابات المد والجزر (على سبيل المثال، انظر الشكل 6)، مع تلك الناتجة عن اختبارات الضخ على أعماق تتراوح بين 715 و800 قدم في رمل تكوين لويد (LIoyd) في منطقة لونغ آيلاند في الولايات المتحدة. كانت نسبة انضغاط المكمن المائي إلى ضغط الماء المتحصل عليها من كفاءة المد والجزر 1.7 بينما كانت 2.8 من تحليل اختبار الضخ.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

5 معادلة الانتشار

دراسة انتشار الحرارة لها تاريخ طويل ومخزن في الفيزياء الرياضية بدءًا من فوريير (Fourier) في عام 1822. يعتمد معدل انتقال الحرارة عبر مادة ما، بالطبع، على التوصيل الحراري، أيضًا على الخزن، لأن معدل تغير درجة الحرارة في الحجم الأولي الممثل (REV) يعتمد على مقدار الحرارة التي يجب نقلها لتغيير درجة حرارتها. بالنسبة لنفس الموصلية الحرارية، يكون انتشار الحرارة أبطأ في حالة السعة الحرارية العالية مقارنة بالسعة الحرارية المنخفضة. وبالتالي، فإن السعة الحرارية هي شيء يشبه بالغلاف للتوصيل الحراري. يتم التقاط هذا الدور العكسي للخزن إلى الموصلية في تحديد معدل الانتشار من خلال أخذ نسبتها. في نقل الحرارة، يُطلق عليه الانتشار بالحراري، $\kappa = K / (\rho c)$، حيث K هي الموصلية الحرارية، وρ هي الكثافة، و c هي السعة الحرارية المحددة، و$c\rho$ هي الحرارة المحددة لكل وحدة حجم. نظير المياه الجوفية هو أن $\kappa = T / S$ للتدفق الأفقي ثنائي الأبعاد؛ و$\kappa = K / S_S$ للتدفق الخطي أحادي البعد. جميع وحدات الانتشار لها وحدات المتر مربع \ ثانية. ويعرض الجدول (3) الذي هو استمرار للجدول (1)، تعريفات الانتشار الهيدروليكي والحراري. كما لم يضمن ثايس معادلة الانتشار في ورقته البحثية عام 1935، ربما لأنها كانت معروفة جيدًا في الفيزياء الرياضية، ولذلك تم تضمينها في الجدول 3. ومع ذلك، قدم ثايس اشتقاق لوبين (Lubin) للحل الحراري لمماثل ضخ البئر. بدأ الاشتقاق بحل "مصدر الخط اللحظي الذي يتزامن مع محور z للقوة Q "[9] (الجدول 3). يكون الحل المماثل للمنسوب الجوفي للمياه، h، هو نفسه إذا تم تفسير Q على أنها كمية الماء المضافة إلى البئر لكل وحدة طول.

التطابق الفردي بين الأعمدة في الجدولين 1 و3 هو التشبيه الفيزيائي والرياضي الذي استغله ثايس. تخضع كل من درجة الحرارة والمنسوب الجوفي للمياه لمعادلة الانتشار. في التدفق الشعاعي ثنائي الأبعاد، تعني الناقلية العالية أن السائل ينتقل بسرعة في المكان الذي يتحرك فيه. من ناحية أخرى، الخزن العالي يؤخر الحركة لأنه يوجب نقل المزيد من السوائل داخل أو خارج الخزن لإحداث تغيير معين في المنسوب الجوفي للمياه. في أقصى الحدود، إذا كان نظام المكمن المائي يحتوي على خزن قيمته صفر، فسيتم استيعاب أي تغيير في ظروف الحدود الداخلية أو الخارجية في التدفق أو الضغط بسرعة من خلال حالة مستقرة جديدة.

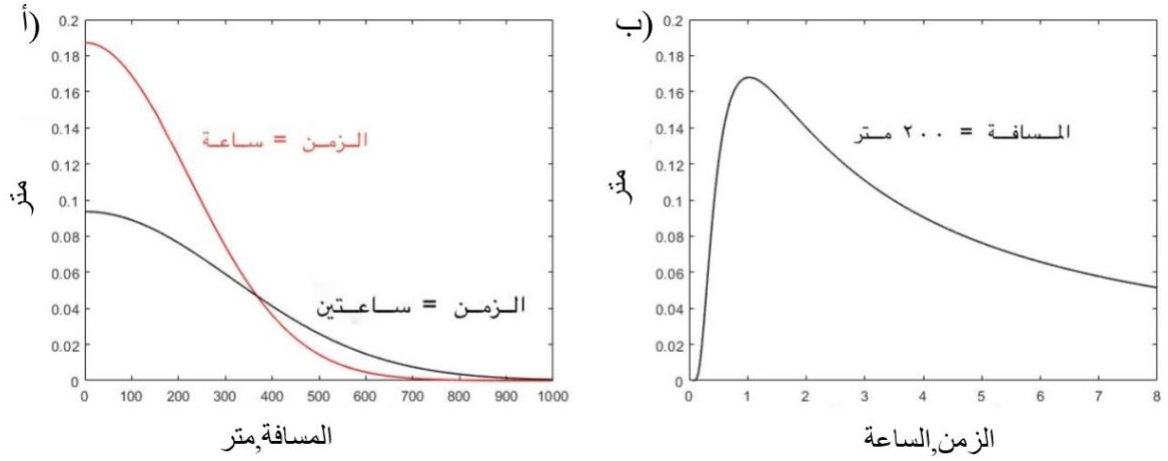
الجدول 3 - معادلة الانتشار وحل ثايس لتدفق المياه الجوفية وتدفق الحرارة.

	تدفق المياه الجوفية	تدفق الحرارة
الانتشار	الانتشار الهيدروليكي $K/S_s\ [m^2/s]$	الانتشار الحراري $K/(pc)\ [m^2/s]$
المعادلة الجامعة للتدفق الصفائحي	$K(\frac{d^2h}{dx^2}+\frac{d^2h}{dy^2})=\frac{dh}{dt}$	$K(\frac{d^2T}{dx^2}+\frac{d^2T}{dy^2})=\frac{dT}{dt}$
خط مصدر الحل	$h=\frac{Q}{4\pi St}e^{-(x^2+y^2)/4Kt}$	$T=\frac{Q}{4\pi St}e^{-(x^2+y^2)/4Kt}$
خط مصدر التعريف	Q تمثل حجم الماء في وحدة الطول المضاف الى المكمن في خط يمثل مصدر الإضافة	Q تمثل حجم الحرارة في وحدة الطول المضاف الى صفيحة في خط يمثل مصدر الإضافة
امتداد الزمن التقريبي الى x	$t = x^2 / (2\kappa)$	

يحدد الانتشار الهيدروليكي مدى سرعة انتشار الاضطراب، مثل الحقن المفاجئ في بئر أو البدء في ضخ بئر أو تغيير حالة الحدود، التي تنتشر عبر المكمن المائي. طبيعة الانتشار هي أن الارتفاع الأولي في المنسوب الجوفي للمياه ينتشر ويقل في السعة. يؤدي الانتشار إلى "تسطيح الانحدار" بحيث يتباطأ نهج النظام للوصول الى حالة الاستقرار بمرور الوقت (الشكل10أ). في هذه الأثناء، في أي نقطة بعيدة عن المصدر، يزداد فيها الاضطراب مع مرور الوقت، ويبلغ

مشروع المياه الجوفية © المؤلف ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

ذروته، ثم يتحلل (الشكل 10ب). يحدث وقت وصول الذروة عند الزمن $t = x^2 \setminus (2K)$ في حالة التدفق الخطي أحادي البعد. هذه القيمة للزمن t هي وقت مميز للوقت الذي يستغرقه التغيير المفاجئ في الأصل حتى يتلاشى وينتشر إلى مسافة x. في المثال الوارد في الشكل 10ب، تستغرق القمة حوالي ساعة واحدة للوصول إلى مسافة 200 متر لانتشار قيمته 6.8 م^2\ ثانية.



شكل 10 - حلول آنية لكمية مياه يتم حقنها في بئر لمكمن المائي ذو انتشار هيدروليكي 6.8 م^2 / ثانية. a) ملفات التعريف في أوقات مختلفة توضح كيف يعمل الانتشار الهيدروليكي على تسطيح التدرج. b) يُظهر التاريخ الزمني تأخيرًا لمدة ساعة تقريبًا للوصول إلى قمة الذروة لمسافة 200 متر.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

6 الملخص

ان الاقرار بخزن المكمن المائي وأساسه المادي هو العامل الرئيسي لحل مشكلتين في فهم منشأ المياه الجوفية وحركتها. أظهر Meinzer (1928) أن انضغاط المكمن المائي وفقدان حجم المسام نتيجة انخفاض ضغط المسام يمثلان حوالي 80 ٪ من المياه المستهلكة عن طريق الري في ولاية ساوث داكوتا على مدار 40 عامًا تقريبًا في مطلع القرن العشرين. كما ضمن ثايس (1935) خاصية الخزن بالقياس مع النقل الحراري لحل مشكلة التغيير المعتمد على الوقت في المنسوب الجوفي للمياه بسبب ضخ البئر. اشتق جاكوب (1940) معادلة تدفق المياه الجوفية من نقطة الصفر من خلال النظر بوضوح في الأساس الفيزيائي للخزن من حيث انضغاط المكمن المائي وانضغاط الماء. نقلت نصوص الأعمال الثلاثة هذه الى فهم تدفق المياه الجوفية من الحالة المستقرة إلى حالة "عدم التوازن"، والذي يمثل السلوك الناقل.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

7 تمارين

التمرين 1

يوفر سينكها Singha (2008) تمرينًا تعليميًا فعالا لإدخال مفهوم استخراج المياه الجوفية من مكامن المياه المحصورة. يستخدم هذا التمرين وعاء العصير كشبيه بسيطً لمسام ذات حيز مضغوط، ويوضح كيف يؤدي انخفاض ضغط السوائل نتيجة الضخ إلى زيادة الضغط الفعال بافتراض إجهاد إجمالي ثابت.

باختصار، يتم استخدام كيس من العصير لتمثيل المسام في مكمن مائي محصور. يُطلب من المجرب تطبيق قوة الى الأسفل على الجزء العلوي من وعاء العصير لتمثيل وزن المادة المثقلة والحفاظ على هذه القوة الثابتة أثناء الاستمرار في التجربة. هذه القوة تمثل الإجهاد الكلي. يجب على القائم بالتجربة ان يفكر في: 1) لماذا لا ينهار الكيس الحاوي على العصير استجابة للقوة؛ و2) ما سيحدث مع إدخال الانبوبة الماصة في الحاوية. ثم يقوم المجرب بإدخال الأنبوبة الماصة (التي تمثل بئر في مكمن مائي محصور). بعد ذلك، مع الحفاظ على القوة المسلطة على السطح العلوي للكيس، "يمثل ضخ الماء" من المكمن المائي عن طريق احتساء العصير من الأنبوبة الماصة. سيلاحظ المجرب أن حجم وعاء العصير يتناقص وعليه ان يأخذ الاعتبار ان هذا ما يحدث في " المكمن المائي". سيرى المجرب أن الحاوية لا تنهار قبل سحب العصير (الضخ) عندما يتم تطبيق قوة التحميل الزائد لأن الضغط الفعال للمكمن المائي (الحاوية)، وضغط السائل في المسام (العصير) يدفعان ضد وزن الطبقة الغطائية (الضغط المسلط باليد). اعتمادًا على حجم القوة المسلطة وطول المصاصة، قد يتدفق العصير إلى الخارج عند إدخال المصاصة وهو ما يماثل تدفق البئر الارتوازي. فإذا لم تكن القوة كبيرة، سيرتفع العصير في الأنبوبة الماصة فوق سطح الحاوية، لكنه لن يتدفق من المصاصة. و يوفر سينكها (Singha, 2008) مزيدًا من التفاصيل.

التمرين 2

الهدف من هذه التجربة هو قياس الخزن المحدد S_S للبالون، والذي يحاكي مرونة المكمن المائي. تم تصميم التجربة لتوفير تفسير يعتمد على ملاحظة المتغير، وزيادة محتوى السائل، وتأثير حالة الاجهاد على الخزن المحدد.

باختصار، يتم شد بالون في نهاية سحاحة مثبتة بعصا مترية ومثبتة بحامل دائري طويل. تمتلئ البالون والسحاحة بحجم معروف من الماء إلى ارتفاع عشوائي يقرأ على العصا المترية بحيث يمكن تحديد الحجم في البالون. ثم يُضاف حجم مُقاس من الماء، وبافتراض انضغاط الماء والسحاحة صغير، يجب أن يدخل حجم الماء إما البالون أو السحاحة. يمكن تحديد الحجم الذي يدخل البالون من خلال معرفة الحجم الذي دخل إلى السحاحة كما هو محدد من مستوى الماء في السحاحة. ثم يتم تحديد خصائص الخزن ثلاثية الأبعاد للبالون بإضافة الماء مع ملاحظة تغير السمت في السحاحة. ويتم تكرار العملية عدة مرات لتحديد ما إذا كانت قيمة الخزن ثابتة. يمكن إزالة الماء وتكرار العملية لتحديد ما إذا كان البالون مرنًا. أخيرًا، يمكن تكرار التجربة مع وضع البالون جانبياً في أنبوب زجاجي شبكي للحصول على الخزن المحدد أحادي البعد (S_s) للبالون والذي يمكن مقارنته بالقياس في حالة التمدد ثلاثي الأبعاد للبالون.

تتوفر تفاصيل التمرين (بما في ذلك الرسوم البيانية) أيضًا، بالإضافة إلى معلومات حول استخدام التمرين لتدريس المفهوم، على مركز موارد تعليم العلوم في موقع كلية كارلتون↗. يتوفر هنا ملف pdf↗للتمرين المخبري بعنوان "مرونة المكمن المائي والخزن النوعي↗". تمت مناقشة النظرية الأساسية في هذا الكتاب وكذلك في فصل من الكتاب المدرسي بواسطة Herb F. Wang المتاح على نفس الموقع (فصل الكتاب المدرسي↗).

مشروع المياه الجوفية © المؤلف ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

8 المراجع

Anderson, M. P., 2007, Introducing groundwater physics. Physics Today, volume 60, issue 5, pages 42-47.

Atkinson, John, 2000, Based on part of the GeotechniCAL reference package by Professor John Atkinson, http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/stresses/stresses.htm#EFFECTIVE↗.

Banks, D., 2015, Horatio Scott Carslaw and the origins of the well function and line source heat function. Scottish Journal of Geology, volume 51, issue 1, pages 100-104, http://dx.doi.org/10.1144/sjg2014-021↗.

Biot, M. A., 1941, General theory of three-dimensional consolidation. Journal of Applied Physics, volume 12, pages 155-164.

Bredehoeft, J. D., C. E. Neuzil, and P.C.D. Milly, 1983, Regional Flow in the Dakota Aquifer: A Study of the Role of Confining Layers. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2237, 45 pages.

Carslaw, H.S., 1921, Introduction to the Mathematical Theory of the Conduction of Heat in Solids, second edition. Macmillan and Company, London, United Kingdom, 152 pages.

Carslaw, H.S., and J. C. Jaeger, 1959, Conduction of Heat in Solids, second edition. Clarendon Press, Oxford, United Kingdom.

Chamberlin, T. C., 1885, The requisite and qualifying conditions of artesian wells. United States Geological Survey Annual Report, number 5, pages 125-173.

Darton, N. H., 1896, Preliminary report on artesian waters of a portion of the Dakotas. United States Geological Survey Annual Report, number 17, part 2, pages 609-691.

Darton, N.H., 1900, United Stated Geological Survey Field photo of Woonsocket Well.

Darton, N. H., 1901, Geology and water resources of the southern half of the Black Hills and adjoining regions in South Dakota and Wyoming. United States Geological Survey Annual Report, number 21, part 4, pages 489-599.

Darton, N. H., 1909, Geology and Underground Waters of South Dakota. United States Geological Survey Water-Supply Paper 227, 156 pages.

Fabry, M., 2016, Now You Know: Why Are There Two Dakotas? Time Magazine, United States, https://time.com/4377423/dakota-north-south-history-two↗.

Freeze, R. A., 1985, Historical correspondence between C. V. Theis and C. I. Lubin, Eos, volume 66, number 20, May 14, 1985, p. 442.

Heath, R. H., 1983, Basic Ground-Water Hydrology. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 86 pages.

مشروع المياه الجوفية © المؤلف ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

Jacob, C. E., 1940, On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Transactions of the American Geophysical Union, volume 21, number 2, pages 574-588.

Jacob, C. E., 1941, Notes on the elasticity of the Lloyd sand on Long Island, New York. in Transactions of the American Geophysical Union, volume 22, number 3, pages 783-787.

King, Franklin Hiram, 1892, Observations and experiments on the fluctuations in the level and rate of movement of ground-water on the Wisconsin agricultural experiment station farm and at Whitewater, Wisconsin. Bulletin of the United States Weather Bureau, volume 5, Washington, D.C. https://books.google.com/books?id=VuifAAAAMAAJ↗.

King, P. B., 1949, Memorial to Nelson Horatio Darton: Proceedings of the Geological Society of America. Annual Report for 1948, pages 145-170.

Meinzer, O. E. and H.A. Hard, 1925, The Artesian Water Supply of the Dakota Sandstone in North Dakota, with Special Reference to the Edgeley Quadrangle, in Contributions to the Hydrology of the United States 1923-1924. United States Geological Survey Water-Supply Paper 520, Washington, District of Columbia, United States, pages 73-95.

Meinzer, O. E., 1928, Compressibility and elasticity of artesian aquifers. Economic Geology, volume 23, number 3, pages 263-291.

Muskat, M., 1937, The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. McGraw-Hill, New York, United States, 763 pages.

Palciauskas, V. V. and P.A. Domenico, 1989, Fluid pressures in deforming porous rocks. Water Resources Research, volume 25, issue 2, pages 203-213.

Pratt, W. E. and D.W. Johnson, 1926, Local subsidence of the Goose Creek Oil Field. Journal of Geology, volume 34, pages 577-590.

Ross, J. F., 2018, The Visionary John Wesley Powell Had a Plan for Developing the West, But Nobody Listened. Smithsonian Institution, https://www.smithsonianmag.com/smithsonian-institution/visionary-john-wesley-powell-had-plan-developing-west-nobody-listened-180969182/↗.

Schureman, P., 1926, Tides in wells. Geographical Review, volume 16, number 3, pages 479-483.

Singha, K., 2008, An active learning exercise for introducing ground-water extraction from confined aquifers, Journal of Geoscience Education, volume 56, number 2, pages 131-135, https://people.mines.edu/ksingha/wp-content/uploads/sites/44/2018/12/singha2008.pdf↗.

Stegner, W., 1954, Beyond the Hundredth Meridian: John Wesley Powell and the Second Opening of the West. Houghton Mifflin, 438 pages.

مشروع المياه الجوفية © المؤلف ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

Terzaghi, Charles, 1925, Principles of soil mechanics: VI – Elastic behavior of sand and clay. Engineering News Record, volume 95, pages 987-990 (reprinted in History of Progress, 2003: Selected Papers in Geotechnical Engineering, edited by W. Allen Marr American Society of Civil Engineers, pages 26-29), https://www.google.com/books/edition/_/vGCqACNvq7UC?gbpv=1↗.

Theis, C. V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. American Geophysical Union Transactions, volume 16, pages 519-524.

Thompson, D. G., 1926, Ground-water problems on the barrier beaches of New Jersey. Geological Society of America Bulletin, volume 37, pages 463-474.

Titus, F.B., 1973, Memorial to Charles Edward Jacob; 1914-1970. Geological Society of America, volume 2, pages 76-78.

Wang H.F., 1987, Charles Sumner Slichter: An engineer in mathematician's clothing, in History of Hydrology, volume 3, E.R. Landa and S. Ince, editors, pages 103-112.

Wang, H. F., 2000, An Introduction to the Linear Theory of Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology. Princeton University Press, 287 pages.

Wang, H. F. and M.P. Anderson, 1982, Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods. Academic Press, Appendix D3, page 222.

Woessner, William W. and Eileen P. Poeter, 2020, Hydrologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 207 pages.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

لمحة عن المؤلف

الدكتور هيرب وانج هو أستاذ متمرس لعلوم الأرض في جامعة ويسكونسن-ماديسون، التي انضم الى عضوية هيئة التدريس فيها عام 1972. تناولت ابحاثه مرونة المسامية والتفاعل بين الإجهاد وضغط سائل المسام. كان بحثه الأخير في هذا المجال في سياق أنظمة طاقة الأرض الحرارية المحفزة (Enhanced Geothermal System EGS). ومن ابحاثه الأخرى الحديثة هي في استشعار توزيع الصوت (Distribution Acoustic sensing DAS)، حيث يستخدم فيه سلك الألياف الضوئية لاستشعار الموجات الزلزالية. تضمنت محاضرات الدكتور وانج المواضيع التالية؛ المياه الجوفية، ونماذج التمثيل الرياضي للمياه الجوفية، والفيزياء التكتونية، وميكانيكا الصخور، والعدالة البيئية. اشرف على 15 طالب دكتوراه في الكلية، ونشر كتبا في نماذج التمثيل الرياضي للمياه الجوفية وفي مرونة المسام (انظر هذه المصادر في المراجع أعلاه)، كما نشر ما يقارب 100 مقالة بحثية. حصل على جائزة التدريس المتميز لعام 2003 من فرع Phi Beta Kappa alpha التابع لولاية ويسكونسن وجائزة أعضاء هيئة التدريس المتميزين لعام 2004 من مجلس زوار قسم علم الأرض.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

لمحة عن المترجمين

الأستاذ الدكتور قصي ياسين الكبيسي خريج كلية العلوم في جامعة بغداد بدرجة البكالوريوس في عام 1984، وحصل على الماجستير في تخصص هيدروليكية الابار والمكامن المائية (1992) وعلى الدكتوراه في الموارد المائية والبيئة من جامعة بغداد (1996). عمل في التدريس والبحث في قسم علم الأرض، كلية العلوم، جامعة بغداد. لديه أكثر من 200 بحثًا منشورًا في مجلات علمية تتعامل مع الدراسات الهيدروليكية، وتوازن المياه، والهيدروكيمياء، والدراسات البيئية. أشرف على أكثر من 50 رسالة ماجستير واطروحة دكتوراه. عمل جيولوجي في مجال البحث العلمي العراقي منذ عام 1984 ولغاية 1992. شغل منصب رئيس قسم علم الارض، جامعة بغداد خلال الفترة 1999-2000، ومعاون عميد كلية العلوم بجامعة بغداد خلال الفترة 2004-2005.

E-mail: Qusaikubs@yahoo.com

محمود حافظ ذياب الكبيسي تخرج من جامعة الأنبار كلية العلوم مع درجة البكالوريوس في 2012، ونال درجة الماجستير في تخصص الموارد المائية والجيولوجيا البيئية في 2019 من جامعة بغداد. له أربعة بحوث منشورة في مجلات علمية وثلاث بحوث نوقشت في مؤتمرات علمية، تتناول دراسات هيدروليكية وتوازن المياه وهيدروكيمياء ودراسات بيئية. يعمل حاليا عضو هيئة تدريس في جامعة الأنبار.

E-mail: mahmoodgeologist@uoanbar.edu.iq

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم

يرجى الاشتراك في القائمة البريدية لمشروع المياه الجوفية والبقاء على إطلاع حول إصدارات الكتب الجديدة، الفعاليات وطرق المشاركة في مشروع المياه الجوفية. إن الاشتراك في قائمة البريد الإلكتروني الخاصة بنا يساعدنا في بناء مجتمع عالمي للمياه الجوفية. ↗الاشتراك.

مشروع المياه الجوفية © **المؤلف** ينزل الكتاب مجانا من موقع مشروع المياه الجوفية gw-project.org
أي شخص يمكنه استخدام أو مشاركة روابط gw-project.org. وإعادة توزيع هذا الكتاب محظورة بشكل صارم