

# الأطر الجيولوجية لنماذج التمثيل الرياضي في محاكاة تدفق المياه الجوفية

J.P. Brandenburg

ترجمة: مجد تركى شهله

# الأطر الجيولوجية لنماذج التمثيل الرياضي في محاكاة تدفق المياه الجوفية

مشروع المياه الجوفية

*The Groundwater Project*

*J.P. Brandenburg*

جيولوجي أول  
هالاي وألدريتش ، إنكوربوريتد  
آن أربور ، ميشيغان ، الولايات المتحدة

ترجمة: مجد تركي شهله  
المراجعة اللغوية والعلمية: د. خليل إبراهيم السامرائي

# الأطر الجيولوجية لنماذج التمثيل الرياضي في محاكاة تدفق المياه الجوفية

مشروع المياه الجوفية (GW-Project)  
كوليف، أونتاريو، كندا

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 الإلكتروني الآتي: [permissions@gw-project.org](mailto:permissions@gw-project.org)). يحظر بشكل صارم توزيع أو إعادة إصدار الكتاب لأغراض تجارية.

يمكن تحميل أعمال مشروع المياه الجوفية (GW-Project) مجاناً من الموقع الإلكتروني: [gw-project.org](http://gw-project.org). يمكن لأي شخص استخدام روابط [gw-project.org](http://gw-project.org) لتحميل أي عمل من أعمال مشروع المياه الجوفية. ولا يجوز رفع أعمال مشروع المياه الجوفية على مواقع الويب الأخرى كما لا يجوز إرسال نسخ من هذه المستندات بشكل مباشر إلى الآخرين.

حقوق الطبع والنشر © J.P. Brandenburg 2020 (المؤلف)

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

Brandenburg, J.P.

الأطر الجيولوجية لنماذج التمثيل الرياضي في محاكاة تدفق المياه الجوفية / J.P. Brandenburg Guelph، أونتاريو، كندا، 2020.

28 pages. ISBN: 978-1-7770541-9-9

ترجمة: مجد تركي شهله، 2021، (28 صفحة)

ISBN: 978-1-77470-075-4

يرجى الاشتراك في القائمة البريدية لمشروع المياه الجوفية (GW-Project) والبقاء على إطلاع حول إصدارات الكتب الجديدة، الفعاليات وطرائق المشاركة في مشروع المياه الجوفية (GW-Project). إن الاشتراك بقائمة البريد الإلكتروني الخاصة بنا يساعدنا في بناء مجتمع عالمي للمياه الجوفية. [الاشتراك](#).

Brandenburg, J.P., 2020 [The Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models](#): الاقتباس:

Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada,



Eileen Poeter و John Cherry

محرري المجال:

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, Yan Zheng.

J.P. Brandenburg 2020

صورة الغلاف:

ترجمة عربية: مجد تركي شهله

## جدول المحتويات

VI.....	كلمة المشروع (GW-PROJECT).....	
VII.....	الكلمة الأولى.....	
VIII.....	التمهيد للنسخة العربية.....	
IX.....	التمهيد.....	
X.....	الشكر والتقدير.....	
XI.....	شكر وتقدير المترجم.....	
1.....	1 نظرة عامة.....	
2.....	2 المدخل.....	
3.....	3 السياق والغرض من الكتاب.....	
3.....	3.1 نماذج التمثيل المتعلقة بالمفاهيم.....	
3.....	3.2 الجيولوجيا الموقعية.....	
3.....	3.3 الجيولوجيا البنيوية.....	
4.....	4.3 التراص الصخري.....	
4.....	4 بناء الإطار.....	
5.....	1.4 الخرائط والمقاطع العرضية.....	
5.....	2.4 السطوح.....	
8.....	3.4 تمثيل الشبكة.....	
11.....	5 حساب الخصائص.....	
11.....	1.5 السمك الإجمالي.....	
12.....	2.5 السمك الفعلي.....	
13.....	3.5 نسبة السمك الفعلي للسمك الإجمالي.....	
13.....	4.5 الخصائص.....	
15.....	6 النموذج.....	
16.....	7 بناء نموذج مستقر من خرائط السحنات الجيولوجية.....	
17.....	8 بناء نموذج التمثيل المستقر بالاعتماد على الخصائص المحسنة.....	
19.....	9 بناء نموذج التمثيل المستقر من بيانات نوع الصخور.....	
20.....	10 الملخص.....	
21.....	11 المراجع.....	
22.....	12 التمارين.....	
22.....	1 تمرين.....	
22.....	2 تمرين.....	
22.....	3 تمرين.....	
23.....	الإطار 1 - بناء الشبكة في حال كون البيانات متناثرة.....	
25.....	13 حل التمارين.....	
25.....	التمرين 1 - الحل.....	
25.....	التمرين 2 - الحل.....	

25	التمرين 3 – الحل
26	14 لمحة عن الكاتب
27	15 لمحة عن المترجم
29	التعديلات على الإصدار الأصلي

عادة ما يقرر أعضاء الأمم المتحدة للمياه وشركائهم موضوعهم السنوي مقدماً بسنوات. إن الفكرة الأنسب كشعار لظهور أوائل كتب مشروع المياه الجوفية في عام 2020، والتي هدفها جعل المياه الجوفية شيء مرئي.

إن مشروع المياه الجوفية، 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: و

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

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

إن مشروع المياه الجوفية هو اجتهاد مستمر وسيستمر بمئات الكتب التي سيتم نشرها عبر الإنترنت خلال السنوات القادمة، أولاً باللغة الإنجليزية، ثم بلغات أخرى، لتحميلها أينما يتوفر الإنترنت. تشمل منشورات مشروع المياه الجوفية أيضاً 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 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. 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

تتطلب الهيدروجيولوجيا التطبيقية تطبيق النماذج المتعلقة بالمفاهيم لتمثيل شروط تدفق المياه الجوفية والتي تعتبر المفتاح لحل مشاكل تنمية المياه الجوفية وتلوثها. يبدأ فهم شروط المياه الجوفية بفهم الجيولوجيا واستخدام تلك المعلومات الجيولوجية لتقدير الناقلية الهيدروليكية والمسامية. وبدوره، يستخدم توزيع الناقلية الهيدروليكية والمسامية التي تم استنتاجها من المعلومات الجيولوجية لإنشاء مثيلات هيدروجيولوجية لنظام تدفق المياه الجوفية. قبل عام 1970 م، كان هذا التحويل يتم باستخدام ورق وقلم رصاص ولكنه الآن يتم باستخدام البرامج المتاحة بسهولة. ومع ذلك، من أجل استخدام البرنامج بشكل فعال، فمن الضروري فهم عملية التحويل هذه. إن هذا الكتاب: الأطر الجيولوجية لنماذج التمثيل الرياضي في محاكاة تدفق المياه الجوفية للمؤلف J.P. Brandenburg هو مقدمة لعملية التحويل التي أصبحت راسخة في مجال البترول، لكنها تأخرت في مجال الهيدروجيولوجيا. يقر علماء الهيدروجيولوجيا أن نماذج التدفق العددية ثلاثية الأبعاد هي شيء أساسي، لكن عملية تحويل البيانات الجيولوجية إلى النموذج الهيدروجيولوجي هو الذي يحتاج إلى إدراك أوضح. يعرف هذا التحويل باسم: "النمذجة المستقرة"، وهي التي تسمى "النمذجة الديناميكية". تشير نمذجة تمثيل الحركة (الديناميكية) إلى تمثيل نمذجة التدفق والنقل (أي أن طبقات المياه الجوفية لا تتحرك إذن هي ثابتة، ولكن السوائل هي في وضع الحركة لذلك هي ديناميكية).

إن براند ينبرك J.P. Brandenburg، مؤلف هذا الكتاب، مؤهل بشكل استثنائي لهذه المهمة بحيث أن لديه إلمام في كل من الجيولوجيا وتدفق السوائل على نطاق واسع. لقد نفذ تحويلات للنماذج الثابتة والديناميكية المتطورة في صناعة البترول ويركز حالياً على التحويلات لنماذج المياه الجوفية المعقدة ثلاثية الأبعاد.

جون جيرى مدير مشروع المياه الجوفية (GW-Project)

كوليف، أونتاريو، كندا، تشرين الثاني 2020

تتعرض المياه الجوفية في الوطن العربي لضغوط كثيرة ومخيفة ومن المتوقع أن تتزايد أكثر في المستقبل، ولاسيما الضغوط المتعلقة، بالنمو السكاني، وبآثار تغير المناخ. ومن هنا تأتي أهمية العمل في مجال نمذجة التمثيل الرياضي لتدفق المياه الجوفية والفهم الصحيح لهذا العمل ومراحل بناء نماذج التمثيل الرياضية للمياه الجوفية والتي تساعد في تطوير إدارة الموارد المائية الجوفية بشكل كبير.

يعتبر هذا الكتاب الأول من نوعه في العالم العربي ككتاب يقدم شرح الخطوات العملية لبناء نموذج التمثيل الرياضي لتدفق المياه الجوفية ثلاثية الأبعاد بشكل مفصل. وذلك بدءاً من بناء نموذج متعلق بالمفاهيم ثم الانتقال إلى نموذج عددي ثلاثي الأبعاد (3D)، وينتهي بعملية استخدام الإطار الجيولوجي لإنشاء نموذج تمثيل تدفق المياه. يؤكد هذا الكتاب على ضرورة امتلاك المعرفة الجيدة بالجيولوجيا عند العاملين في مجال النمذجة الرياضية مهما بلغ تطور برامج نماذج التمثيل العددية المستخدمة لبناء نموذج تدفق المياه الجوفية بحيث يساعد الفهم الصحيح لظروف الجيولوجيا بالوصول إلى التفسير الأقرب إلى الواقع لما يحدث في الموقع المدروس.

يعود الفضل في هذه الإضافة العلمية إلى الجهود الرائعة التي يبذلها المتطوعون في مشروع المياه الجوفية من مؤلفين و مترجمين ومشرفين وأخص بالذكر الدكتور خليل إبراهيم السامرائي الذي أشرف على ترجمتي لهذا الكتاب مشكوراً. ولا بد من التذكير بأنه بفضل مشروع المياه الجوفية يتم نشر أفضل الكتب المتعلقة بمجال المياه الجوفية بكافة اللغات وبشكل مجاني.

مجد شعله، مهندسة موارد مائية، متطوعة

في مشروع المياه الجوفية (GW-Project)

أبريل 2022

يجب أن يكون المختصون بنمذجة تمثيل المياه الجوفية على معرفة جيدة ولديهم القدرة على الوصول للأساليب المنهجية لترجمة الجيولوجيا الفيزيائية تحت الأرض إلى تمثيل رقمي. كما يستفيد علماء الهيدرولوجيا الآخرين أيضاً من فهم عملية التمثيل هذه. يقدم هذا الكتاب تقنيات لإنشاء الإطار الجيولوجي الأساسي لنماذج تمثيل تدفق المياه الجوفية. يتم إعداده لموقع افتراضي يحوي مياه جوفية ملوثة، وذلك بدءاً من مناقشة جمع البيانات والتفسير الجيولوجي، ثم الانتقال لتحديد الخطوات اللازمة لبناء نموذج عددي واقعي. سيجد القارئ أن العديد من الأساليب والحسابات يمكن تطبيقها بأدوات بسيطة كورقة وقلم رصاص. تم تضمين روابط موارد الحوسبة المتاحة للعامة قدر الإمكان.

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 The Groundwater Project، 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.

أقدم خالص الشكر والامتنان للأفراد في القائمة الآتية لمراجعاتهم الشاملة والمفيدة ولمساهماتهم في ترجمة هذا الكتاب:

- ❖ الدكتور خليل ابراهيم السامرائي: إستشاري جيولوجي متقاعد، أستاذ سابق في جامعة طرابلس، كلية الهندسة، قسم الهندسة الجيولوجية. طرابلس – ليبيا.
- ❖ أماندا سيلس (Amanda Sills) و كابريل فيرا (Gabriel Vieira) و إميلي هوروديزني (Emily Horodezny) من مشروع المياه الجوفية (GW-Project).

## 1 نظرة عامة

قبل البدء بنمذجة التمثيل الرياضي لتدفق المياه الجوفية نحتاج لبناء الهيكل الجيولوجي تحت الأرض. لقد حدد قطاع البترول خطوات نمذجة التمثيل الجيولوجية بشكل أفضل مما هو عليه في قطاع المياه الجوفية، لذا يقدم The Groundwater Project هذا الكتاب لاستعراض المنهج الأساسي لنمذجة التمثيل تحت الأرض بما تحويه من تقنيات من وجهتي نظر قطاعي البترول والمياه الجوفية معاً. مراعاة للمصالح التجارية في صناعة البترول، يتركز الاهتمام في مجال البترول على محاكاة حجم وتدفق واستخراج السوائل من باطن الأرض بشكل دقيق. والتقنيات الموصوفة في هذا الكتاب بشكل خاص مفهوم السمك الصافي (سمك طبقات الحبيبات الأخشن التي تدعم تدفق السائل) في مقابل مفهوم السمك الكلي (السمك العمودي الإجمالي بين الوحدات الجيولوجية المحيطة)، لهذين المفهومين أهمية ليس فقط في مجال البترول ولكنهما متعلقان أيضاً بمحاكاة تدفق المياه الجوفية. كما يمكن أن تكون محط اهتمام العاملين في مجال نمذجة الموارد المائية لتقدير حجم خزن أحواض المياه الجوفية.

تتطلب نماذج التمثيل العددية التي يتم إنشاؤها لمحاكاة انتقال ومصير الملوثات توصيفا أكثر تفصيلاً للجيولوجيا. من أجل هذا الغرض نحن بحاجة لمعرفة التوزيع الجيولوجي غير المتجانس حيث أن الملوثات تتبع مسارات تفضيلية عبر المناطق المتصلة مع بعضها بناقلية هيدروليكية عالية. إن العديد من عمليات انتقال الملوثات ومصيرها تعتمد على تبادل السوائل ذات الخواص الكيميائية المختلفة بين المناطق ذات الناقلية الهيدروليكية المختلفة.

إن تقنيات تمثيل النماذج المعروضة في هذا الكتاب تطبق فقط على الأحواض الرسوبية الفتاتية، والتي تتكون بدورها من رواسب أو صخور رسوبية ناتجة عن التجوية الميكانيكية، وهي بشكل أساسي مزيج من الحصى والرمل والطين والطمي. قد تكون هذه الأحواض غير متماسكة (حبيبات غير مترابطة وغير مترابطة) أو متماسكة (حبيبات مترابطة بشكل جيد ومترابطة). لا تطبق هذه التقنيات على الصخور المتكسرة الواقعة تحت التربة أو الكارستية أو مكامن المياه الجوفية الأخرى التي تشكل المسامية الثانوية فيها المسار السائد للتدفق.

تم استخدام برنامج المياه الجوفية [Visual MODFLOW FLEX](#) من شركة Waterloo Hydrogeologic. وهو برنامج للحاسب الإلكتروني يسهل تمثيل نموذج تدفق المياه الجوفية باستخدام أداة محاكاة تدفق المياه الجوفية الأكثر استخداماً: قواعد نموذج تمثيل التدفق [MODFLOW code](#) المستخدم من قبل هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية. كما أنه من ميزات هذه القواعد مشاركتها بعض الخواص الأصيلة مع برنامج Schlumberger's Petrel، والذي هو برنامج أساس في صناعة النفط والغاز لبناء نماذج التمثيل الجيولوجية تحت الأرض. وقد تم أيضاً استخدام برنامج نماذج التمثيل الجيولوجية [RockWorks](#) في هذا الكتاب، وذلك لإنشاء البنية الجيولوجية التي يتم ربطها مع خصائص هيدروليكية يمكن تحويلها إلى قيم تستخدم في شبكة نماذج تمثيل المياه الجوفية كالمحددة بواسطة برنامج نموذج تمثيل التدفق (MODFLOW).

## 2 المدخل

يعمل أخصائيو الهيدروجيولوجيا مع الجيولوجيين والمهندسين الآخرين لإنشاء إطار يوفر الأساس لتحديد خصائص نموذج تمثيل تدفق المياه الجوفية في عملية مؤلفة من خطوتين: الأولى التمثيل المستقر ويتبعها التمثيل الديناميكي لتدفق السائل.

يتم توصيف الخصائص الجيولوجية التي لا تتغير في نموذج التمثيل الرياضي المستقر، بينما تتم محاكاة تدفق السائل في النموذج الديناميكي، وتعديل الخصائص الهيدروليكية إذا أدت التغيرات في نظام التدفق إلى تغييرها.

على سبيل المثال، يؤدي انخفاض الضغط أثناء استخراج السوائل إلى انضغاط المواد الجيولوجية، مما يقلل من قيم الناقلية الهيدروليكية والمسامية (تمثل الخصائص الديناميكية). في نفس الوقت فإن كمية الرمل بالنسبة للطفل في الحوض الجوفي لن تتغير (تمثل خاصية الاستقرار). يتم بناء نموذج التمثيل المستقر باستخدام الأبعاد الهندسية ويستخدم هذا النموذج المستقر لتزويد قواعد التدفق بالخصائص الهيدروليكية. يتم بناء نموذج التمثيل الديناميكي باستخدام برنامج تمثيل التدفق (يستخدم عادة برنامج MODFLOW لنمذجة تمثيل المياه الجوفية)، ويستخدم لضبط الخصائص الهيدروليكية عن طريق مطابقة المحاكاة مع البيانات المقاسة في الحقل بحيث تقوم عملية المحاكاة التوقع بشكل معقول، التغييرات في نظام التدفق استجابة للضغوط. تقليدياً يقوم الجيولوجيون عادة ببناء النموذج المستقر ثم يتم تسليمه للمهندسين ليكملوا بناء النموذج الديناميكي. ولكن أظهرت التجربة أن هذه العملية ذات اتجاه واحد وفيها بعض التقييد حيث أن معايرة النموذج الديناميكي يمكن أن توفر رؤية إضافية للجيولوجيا. كما أن فهم الجيولوجيا يمكن أن يقيد المعاملات المطلوبة للمعايرة. واليوم تميل العملية لأن تكون ذات محاولات تكرارية أكثر. إن المسؤول عن نمذجة التمثيل في مجال استثمار المياه الجوفية هو عادة شخص ذو مهارات في الرياضيات والهندسة والجيولوجيا، أو يقوم مجموعة من الخبراء بالعمل سوية لتطوير النموذج. يحتاج إنشاء نماذج التمثيل الرياضي للمياه الجوفية إلى عمليات مكثفة من الناحية الجغرافية مع التركيز على تفاصيل مشهد الخريطة وتقسيم مبسط لما تحت الأرض إلى أحواض جوفية أو وحدات تدفق مائية طباقية. إن هذا النهج هو الأنسب لنمذجة التمثيل على نطاق إقليمي أو مستجمعات المياه بالتأكيد، كما أن العديد من أدوات نظم المعلومات الجغرافية المتطورة متاحة لمثل هذا العمل. ولكن هذه الأدوات والأساليب يمكن أن تكون مرهقة عند التعامل مع نماذج على نطاق الموقع، والتي قد لا تزيد مساحتها عن بضعة مئات أو آلاف الأمتار المربعة.

يركز هذا الكتاب على بناء نماذج تمثيل المياه الجوفية الملوثة على نطاق موقعي مستخدماً نهج العمل المطبق في وضع نماذج التمثيل المستقرة لخزانات النفط. ليس هناك دعوة أو توجيه لاستخدام برنامج معين لنموذج التمثيل الرياضي حيث أن الجزء الأكبر من العمل يمكن انجازه بواسطة ورقة وقلم رصاص أو بواسطة البرامج العامة لتحديد خطوط المناسيب. إن العديد من المفاهيم الأساسية يسبق وجودها وجود أجهزة الكمبيوتر الحديثة ذات الإمكانيات لرسم الأشكال التوضيحية وهذه المفاهيم لم تتغير مع التقدم في إمكانيات البرامج.

سنستعرض هنا خطة سير عمل النمذجة المستقرة كسلسلة من خطوات بناء نموذج تمثيل موقع افتراضي ملوث (الذي هو موقع الاختبار). تبدأ خطة سير العمل هذه بتمارين التفكير اللازمة لبناء نموذج متعلق بالمفاهيم مفيد، ومن ثم ينتقل إلى تقنيات تحويل النموذج المتعلق بالمفاهيم إلى نموذج عددي ثلاثي الأبعاد (3D)، وينتهي بعملية استخدام الإطار الجيولوجي لإنشاء نموذج تمثيل تدفق المياه.

### 3 السياق والغرض من الكتاب

قبل البدء بأي مشروع نموذج تمثيل يجب تحديد أهداف هذا المشروع بوضوح. وإن إجراء التقييمات المفيدة للتدفق ونقل الملوثات يتم تنفيذها عن طريق استخدام النماذج التحليلية، وتتم غالباً عبر جدول بيانات. من الجيد البدء بالقلم الرصاص وورقة ومعرفة عدد الأسئلة التي يمكن الإجابة عليها قبل إنشاء نموذج رقمي معقد. فإذا لم نستطيع الحصول على شيء آخر مفيد في النموذج المتعلق بالمفاهيم، فإن الحسابات الدقيقة توفر أساساً لتقييم الوظائف الأساسية لنماذج تمثيل التدفق المستقبلية الأكثر تعقيداً.

#### 1.3 نماذج التمثيل المتعلقة بالمفاهيم

تتطلب معظم المشاريع البيئية لمواقع المياه الجوفية الملوثة إعداد نموذج متعلق بالمفاهيم بهدف الامتثال للقوانين الحكومية. فالنموذج المتعلق بالمفاهيم يحدد التفاصيل الأساسية لمكمن المياه الجوفية الملوثة؛ الأبعاد الهندسية للمكمن المائي، عمق المكمن وسمكه، ومدى تباين قيم الناقلية الهيدروليكية، وقيم رؤوس السمات الهيدروليكية التي تتم مراقبتها، ومعالم النظام الذي يؤثر على السلوك الهيدروليكي مثل المسطحات المائية وآبار الضخ. بالنسبة للمواقع الملوثة الصغيرة المساحة، فمن الممكن أن تكون تفاصيل النموذج المتعلق بالمفاهيم مقبولة لتلبية المتطلبات التنظيمية، ولكنها لا توفر تفاصيل كافية لنماذج التمثيل من أجل التنبؤ بشكل فعال بسلوك النظام، وبالتالي لتصميم خطة معالجة الموقع الملوثة. أما بالنسبة لنماذج التمثيل المتعلقة بالمفاهيم التي توصف الطبقات السميكة ومتجانسة الخصائص فإنها تحتاج إلى مراجعة معمقة للأدلة لتحسين نموذج التمثيل.

#### 2.3 الجيولوجيا الموقعية

إن الإلمام بالجيولوجيا المحلية للموقع هو أمر ضروري لأي نمذجة تمثيل رياضية تحت سطح الأرض. عادة ما تتوفر معلومات عن حُفر آبار إمدادات المياه، والتحريات الجيوتقنية، والتطبيقات الأخرى بشكل وفير، وغالباً ما تكون هذه المعلومات موجودة في السجلات المتاحة للعمامة والتفسيرات المنشورة. ومن المفيد مراجعة تقارير مشاريع المياه الجوفية الأخرى في المنطقة للحصول على معلومات حول خصائص وظروف المنطقة تحت سطح الأرض، والاستفادة من المشكلات التي واجهها من عمل في مشاريع مماثلة.

#### 3.3 الجيولوجيا البنيوية

إن البيانات المطلوبة لتحديد السمات الجيولوجية لتشكيل الصخور هي بيانات ضرورية ولكنها بالنسبة للعديد من المواقع الملوثة لا تعتبر كافية. وكنتيجة لعدم كفاية البيانات فقد لا يتم تحديد الصدوع في البنية الجيولوجية، وغالباً ما يتم وصف سطح صخر الأساس كسطح منبسط غير متغير أو كعمق نموذجي، بينما قد يكون له في الواقع تضاريس معقدة. يعتبر سطح الصخر الأساس مهماً للغاية في المواقع التي تعاني من الملوثات الكثيفة غير المائية في الطور السائل (DNAPL) لأن هذا النوع من الملوثات يغوص إلى طبقات منخفضة النفاذية ويكون انتقال الملوثات إلى مدى أبعد محكوماً بطبيعة تضاريس السطح. عملياً يمكن أن توجد الصدوع في كل مكان في العالم. على سبيل المثال، تتأثر مناطق ساحل خليج تكساس بالتشوه السطحي المرتبط بالصدوع المنزلفة على الرغم من أن هذا الجزء من

أمريكا الشمالية ساكن تكتونياً. عادة ما يتم تشخيص الصدوع الصغيرة في المواقع الملوثة بملاحظة وجود ميل هيدروليكي أكثر حدة في موقع الصدع. موقع الاختبار المعروض كمثل في هذا الكتاب يحتوي على صدع عادي صغير.

### 4.3 التراص الصخري

يُبرز تناثر البيانات في المواقع الملوثة أيضاً تحديات لرسم الطبقات الصخرية. مع ذلك، فقد تم جمع المزيد من البيانات عن الطبقات في السنوات الأخيرة حيث يثبت التعقيد الطبقي في كثير من الأحيان أنه عامل مقيد رئيسي في طريق المعالجة الناجحة للمواقع الملوثة. إن طرائق المعالجة التي تتضمن سحب المياه الجوفية وحققها يمكن أن تكون مقيدة بإعاقة التدفق بالحواجز الطبقيّة ذات النفاذية المنخفضة. إن للطبقات الرقيقة من التربة الدقيقة الحبيبات الغنية بالأطيان والمواد العضوية قدرة عالية على حبس ملوثات المياه الجوفية بعد معالجة الأجزاء الأكثر نفاذية من المكنم المائي الجوفي، يمكن لهذه الملوثات أن تنتشر مرة أخرى في المياه الجوفية النظيفة، مما يتسبب في ارتفاع غير متوقع في تراكيزها. أما بخصوص الطبقات الرقيقة، فإنه بسهولة يتم إغفالها في حال استخدام التقنيات القديمة مثل المثقاب والحفر الدوراني. لذا يمكن استخدام أدوات تسجيل البئر الإلكترونية وأدوات استشعار الدفع المباشر عالية الدقة لإنشاء سجلات بالمستوى اللازم من التفاصيل. مع ذلك، فإن استخدام مبادئ علم الطبقات مطلوب لتحديد موجهٍ لكيفية امتداد هذه التفاصيل الجيولوجية بين الآبار. ويستعان بوثائق الإرشاد كالتالي وضعها شولتز (Schultz et al., 2017) لاحتوائها على معلومات مفصلة وخطط سير عمل حول كيفية إجراء مثل هذه التقييمات للطبقات الصخرية.

بالنسبة للخزانات الجوفية للنفط والغاز، يتم إجراء الكثير من التوصيفات من خلال دراسة ومقارنة سمات سحنات ترسيب الرسوبيات (كما ورد عن Shepherd, 2009). على سبيل المثال يؤدي التجانس النسبي لسحنات الرسوبيات الرياحية (كالكتبان الرملية) إلى خاصية توصيل أفضل للخزان الجوفي من طبقات المياه العميقة ذات الطبيعة الطبقيّة المقسمة والمترسبة في القنوات العكرة. هذا الموضوع يستحق أن يخصص له كتاب ولن تتم مناقشته هنا باستثناء القول أن المشاريع البيئية يمكن أن تستفيد من نفس خطوط الاستفسار. وسنشير مرة أخرى أنه غالباً ما تكون مواقع المياه الجوفية الملوثة محدودة النطاق أو أنها تفتقر إلى التمويل اللازم لجمع البيانات الضرورية، مما يجعل مثل هذا التحليل للتراص الصخري مستحيلاً.

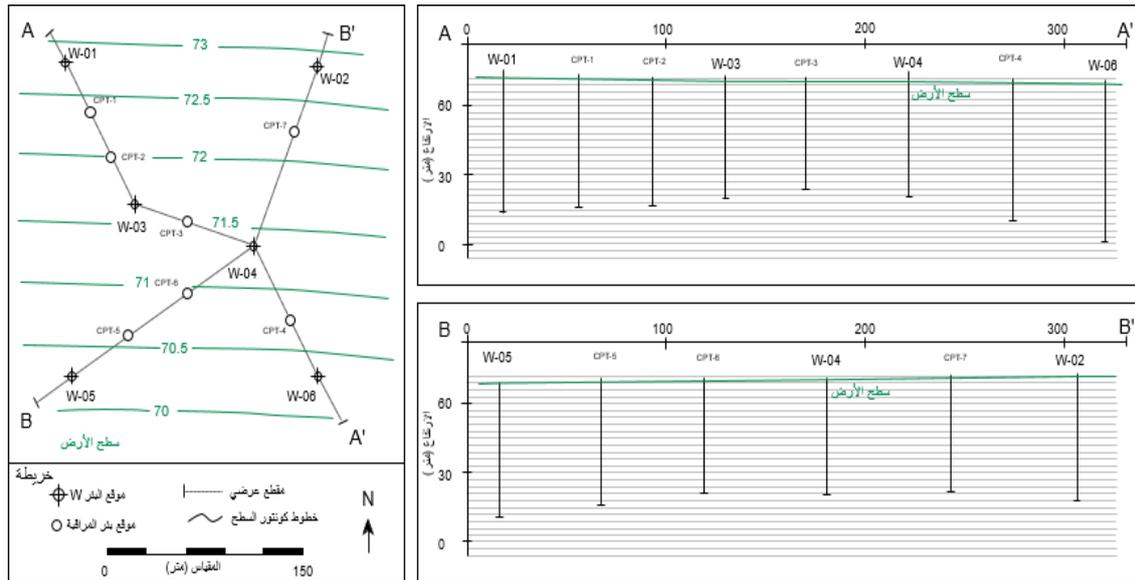
## 4 بناء الإطار

إن الإطار الهندسي هو الأساس لبناء نموذج تمثيل مستقر. هذه القاعدة تنظم الموقع الملوث في ثلاث أبعاد أخذاً في الاعتبار الآبار التي تعرفه.

### 1.4 الخرائط والمقاطع العرضية

شكلت الخرائط والمقاطع العرضية الإطار الكامل لتمثيل نماذج مستقرة لسنوات عديدة. أما الآن فيتم بناء النموذج المستقر باستخدام برامج الحواسيب الحديثة في تمثيل البيانات المغمورة ثلاثية الأبعاد التي تُمكن من وضع التصورات المكانية. ومع ذلك لا تزال الخرائط والمقاطع العرضية تشكل أساس التفسيرات ثلاثية الأبعاد بعدة طرائق. في هذا المثال، يتم استخدام الخرائط التقليدية والمقاطع العرضية لتشكيل التفسير.

تبلغ مساحة موقع الاختبار حوالي 9 هكتار ويتسم بوجود 14 بئراً. تم ترتيب الآبار في مقطعين متقاطعين و متعامدين تقريباً. حفرت هذه الآبار ضمن راسب غير متماسكة وتنتهي عند الجزء العلوي من الصخر الأساس. يرتفع منسوب سطح الأرض ما بين 70-73 متراً فوق مستوى سطح البحر، وينحدر نحو الجنوب. و يتواجد الصخر الأساس على أعماق تتباين من 40 إلى 70 متراً تحت سطح الأرض. يبين الشكل 1 التفاصيل الهندسية المستخدمة في إنشاء إطار تفسير النموذج حيث تم ترتيب المقطعين العرضيين بجوار الخريطة مباشرة، وقد تم رسم كل شيء بمقياس محدد.



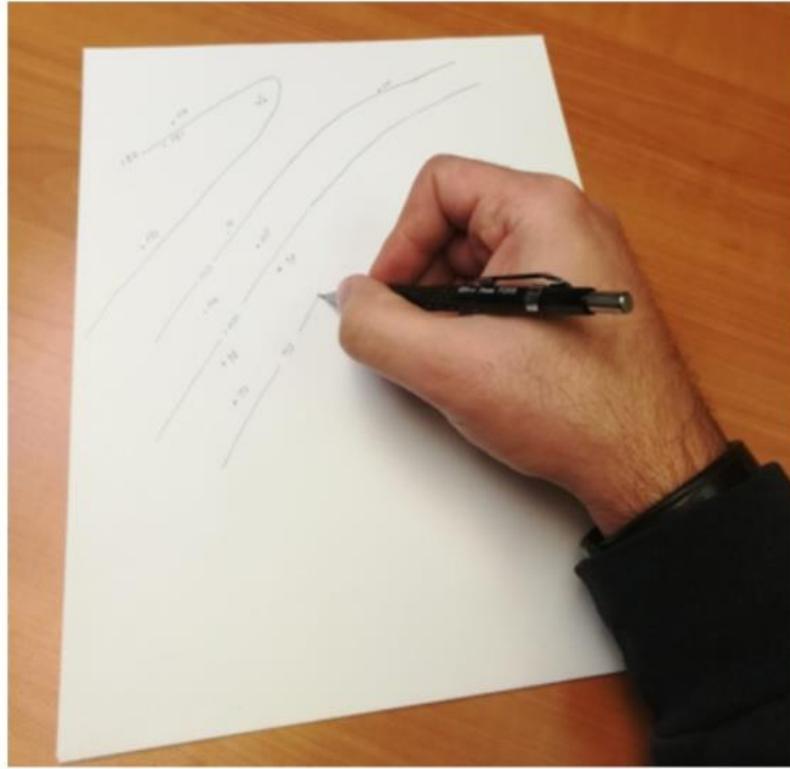
الشكل 1 - إطار التفسير (Brandenburg, 2020)

### 2.4 السطوح

تتضمن التفسيرات الجيولوجية تقسيم الجيولوجيا ما تحت السطح إلى طبقات. يهتم علماء طبقات الأرض بالطبقات والمناطق التي تمثل أزمنة جيولوجية محددة، ويحاول الجيولوجيون الإنشائيون تحديد السطوح التي كانت أفقية في الأصل، بينما يبحث علماء الجيوفيزياء عن طبقات ذات خصائص صخرية صوتية متناقضة. بغض النظر عن الأساس، فإن بناء السطوح ثلاثية الأبعاد هو جزء أساسي من النمذجة

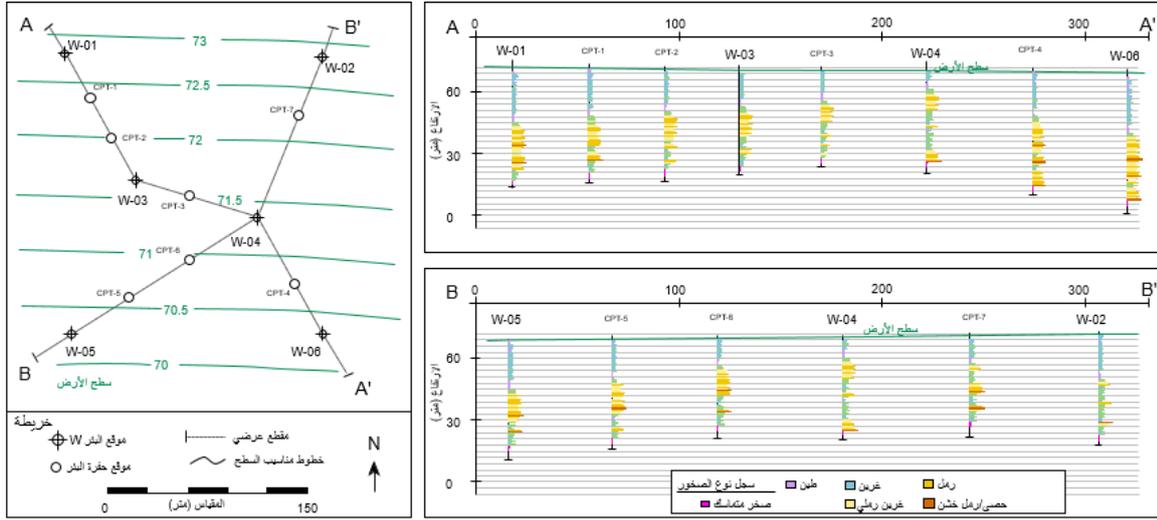
الجيولوجية تحت سطح الأرض. و أسلم طريقة للقيام بذلك هي رسم خطوط الكونتور للبيانات التي تحدد السطح الذي نهتم بدراسته، وإنشاء خطوط الكونتور البنيوية: وهي خرائط ذات خطوط متساوية الارتفاع تحدد السطح الجيولوجي الذي نهتم بدراسته. تكون خرائط الكونتور البنيوية مماثلة لخرائط خطوط الكونتور الطبوغرافية.

إن فائدة رسم خطوط الكونتور باليد (الشكل 2) بدلاً من الاعتماد على خوارزمية حاسوبية تتضمن فهم الإنسان للخصائص الجيولوجية النموذجية في عملية الرسم، في حين استخدام البرمجيات لا تستفيد من الإحساس العام لدى الإنسان في المناطق التي تكون فيها البيانات متناثرة. تعتبر الخرائط اليدوية مفيدة كمرجع لتحكيم جودة خطوط الكونتور التي يتم إنشاؤها باستخدام برامج الحاسوب، خاصة بالنسبة للسطوح غير المستمرة بسبب التصدع.



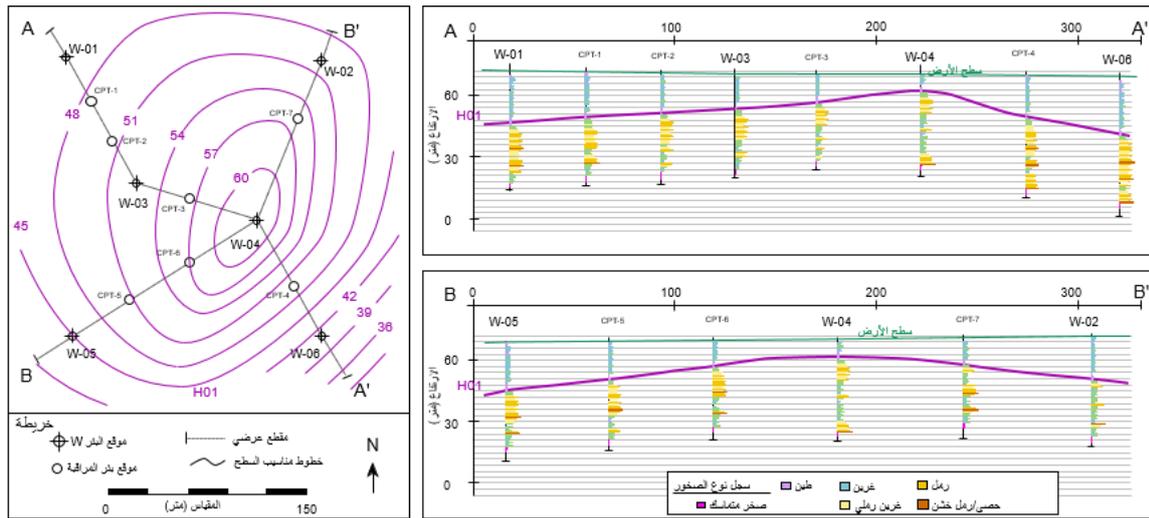
الشكل 2- رسم المناسيب البنيوية باليد هي طريقة موثوقة للتفسيرات الجيولوجية. (Brandenburg, 2020)

تم في موقع الاختبار إنشاء سجلات وصف الصخور مفصلة لكل بئر بواسطة مجموعتين من العينات إحداهما تم جمعها أثناء الحفر والأخرى تم جمعها عن طريق أجهزة استشعار الآبار (الشكل 3). نشأت تسجيلات وصف الصخور باستخدام اختبار الاحتراق المخروطي (CPT): وهي طريقة استشعار مباشرة للتغيرات في الخصائص الميكانيكية للمواد غير المتماسكة أثناء الحفر. وتستخدم طريقة CPT عادة لإجراء التحريات البنيوية، ولها ميزة عرض التسجيلات على فترات مفصلة بدلاً من منحنى مستمر. بالنسبة لموقع الاختبار، تفرق سجلات وصف الصخور المنفصلة بين الحجر الأساس وست أصناف من الأطنان والغرين والرمل والحصى.



الشكل 3 - سجلات وصف الصخور منفصلة في موقع الاختبار. وتظهر خطوط مناسيب السطح ارتفاع سطح الأرض فوق مستوى سطح البحر (Brandenburg, 2020).

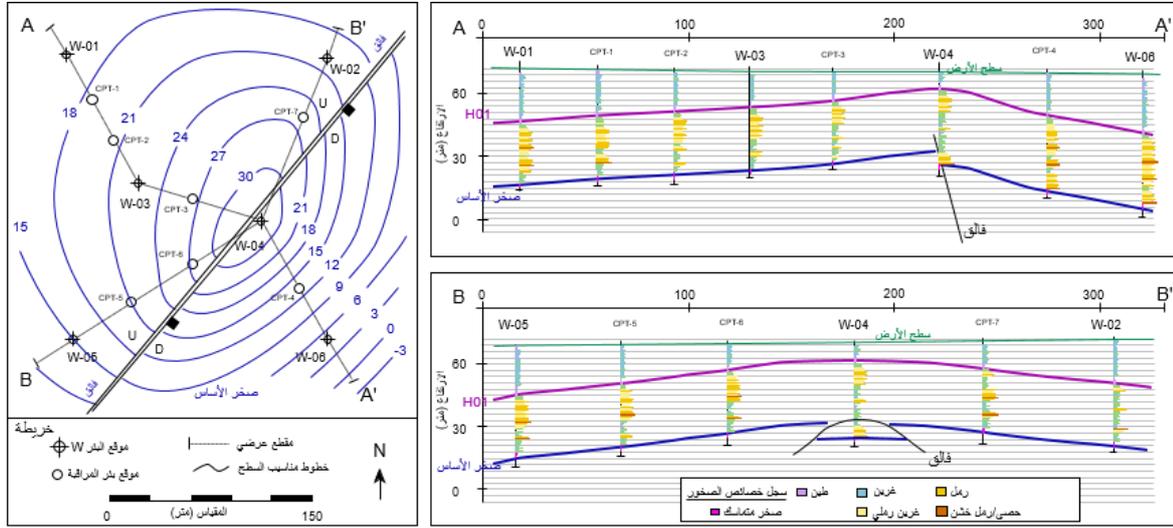
تحليل السجلات يظهر نعومة حجم الرسوبيات إلى أعلى الطبقات ويقل سمكها على طول ارتفاعات الصخور الأساس. السطوح الرئيسية التي تم تحديدها هي: سطح الجزء العلوي من الصخر الأساس، وسطح الطبقات الطينية المستمرة أفقياً التي تفصل الطبقات الخشنة عن طبقات الغرين والطين الضحلة. استناداً إلى الظروف الارتوازية الضئيلة التي لوحظت عند إنشاء آبار المراقبة، تعمل طبقة الطين كطبقة عازلة مسربة. يتم تعيين هذه الطبقة H01 كما هو مبين في الشكل 4.



الشكل 4 - الأفق الطبقي H01. تظهر خطوط مناسيب السطح ارتفاع الطبقة H01 فوق مستوى سطح البحر (Brandenburg, 2020).

ومن المعروف عن الصخر الأساس في هذا الموقع أنه متأثر بفوالق عادية في الاتجاه شمال شرق- جنوب غرب. تم الكشف عن وجود الانحدار من خلال ملاحظة وجود وحدة جيولوجية خشنة الحبيبات موجودة في قاع البئر W-04 والتي لم يتم ملاحظتها في آبار أخرى. ملاحظة أخرى هي أن الفسحة الطباقية بين الطبقة H01 والصخر الأساس أكبر في الآبار CPT-7 و W-04 و W-02 مقارنة بالسمك في الآبار CPT-6 و CPT-5 و W-05. تشير هذه الملاحظة إلى أن الفالق هو فالتق متنامي غالباً لا يصل إلى مستوى H01. ولهذا نحن بحاجة إلى إزاحة في سطح الأساس في خريطة المناسيب المعروضة في الشكل 5.

هذا النوع من انحدارات الفوالق الصغيرة المدفونة هو أمر شائع، لاسيما في المناطق النشطة تكتونياً مثل غرب الولايات المتحدة. إن تمثيل الفوالق في البئر هو موضوع آخر غني، يتجاوز نطاق هذا الكتاب. في موقع الاختبار، يكون الفالق مهم لأن القسم الرملى أكثر سمكاً وحجم حبيباته أكبر على الجانب المنهار من الفالق. إذا كانت هذه الخاصية مهمة للمشروع (مثلاً إذا كان هناك تلوث من الملوثات غير المائية في الطور السائل، DNAPL)، فإنه يمكن توظيف الطرائق الجيوفيزيائية الحساسة لعمق السطح البيني بين الرواسب والصخر الأساس.



الشكل 5 - السطح الهيكلي يحدد الوجه العلوي لصخر الأساس. تُبين سطوح المناسيب ارتفاع الوجه العلوي للصخر الأساس فوق مستوى سطح البحر. تكون سطوح المناسيب منقطعة عبر الفالق (Brandenburg, 2020, gw-project.org).

تركز نماذج تمثيل الاستقرار في مجال صناعة البترول على جزء الخزان الجوفي الذي فيه السوائل المتحركة. لذا فإن الجزء الذي نركز الاهتمام عليه في مثال موقع الاختبار هو الطبقة ذات الحبيبات الخشنة بين السطح العلوي من صخر الأساس والطبقة H01. وفي مجال تقييم النفط والغاز، يشار إلى حجم الصخور المحصورة بين هذين السطحين بالخزان. أما هنا، فهذه الطبقة تسمى بمكن الماء الجوفي. وفي بعض مشاريع المياه الجوفية تكون طبيعة المواد ذات الحبيبات الدقيقة مهمة من أجل توصيف قدرتها على تخزين المياه أو تحريرها، أو لتوصيف خواصها الكيميائية وإمكانية نقل المكونات الكيميائية عن طريق الانتشار.

### 3.4 تمثيل الشبكة

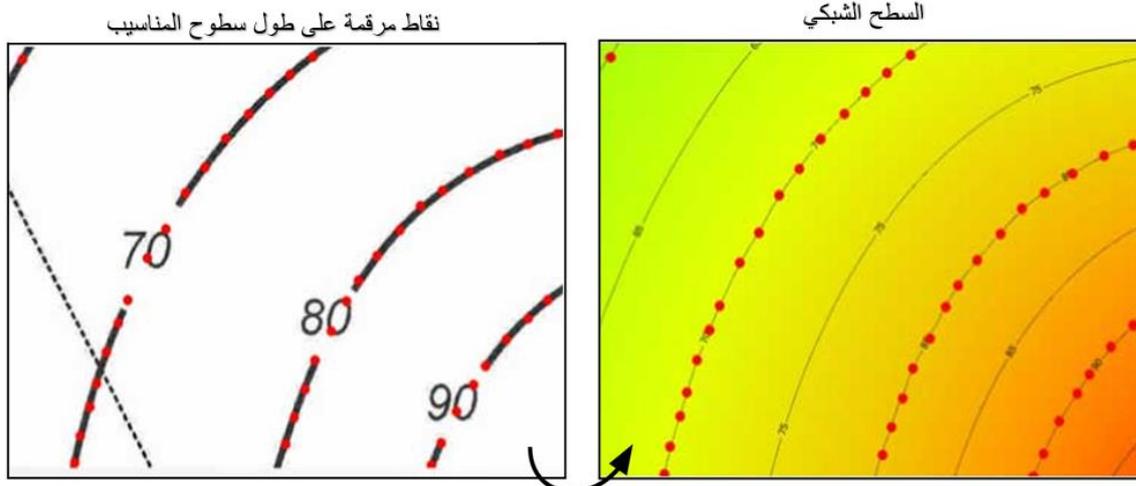
بعد تعريف السطوح على طول المقاطع العرضية يتم توسعتها باستخدام تقنية الاستقراء (التي يشار إليها باسم إنشاء الشبكة) من أجل تعيين مسقط أفقي ثنائي البعد للارتفاعات. وهذا يزودنا بارتفاع محدد لكل سطح على مسافات منتظمة في الشبكة، ممتدة على كامل الموقع وهذا التوزيع للارتفاعات مطلوب لتنفيذ المحاكاة ثلاثية الأبعاد. إن أبسط طريقة لبناء الشبكة هي استخدام بيانات مراقبة نقطية مثل ارتفاع الطبقة في آبار معينة كمدخلات مباشرة إلى خوارزميات الشبكة، والتي يمكن القيام بها في البرامج التجارية مثل [EVS](#) أو [Surfer](#). تستخدم هذه البرامج بشكل أساسي لتمثيل البيانات بشكل صوري ولكن يمكن استخدامها أيضاً لإعداد سطوح شبكية للنماذج.

إن جودة بيانات الإدخال مهمة جداً لهذه العملية. فمجموعة البيانات المثالية تحتوي على نقاط تفصل بينها مسافات متساوية، وتغطي كامل المنطقة التي سيتم بناء شبكة لها، وقد تمت مراجعتها وتفحص تناقضاتها والتحقق من صحتها. في حال استخدام هذه البيانات، فإن معظم الخوارزميات سوف تنتج نفس السطوح الشبكية. إن استخدام البيانات المتناثرة الموزعة على مسافات غير متساوية وغير المنطقية تكون مصدراً رئيسياً للخطأ في تمثيل النماذج الجيولوجية. يمكن أن يختلف إخراج الخوارزميات المختلفة لبناء الشبكة بشكل كبير وذلك استجابةً للبيانات غير المتناسقة والقيم المتطرفة (الشاذة) للبيانات.

بعض أدوات التشبيك المتداولة تشبه عيون الثور حول نقاط مفردة وحول السطوح تمتد إلى ما بعد الحدود المعلومة الأساسية (انظر [الإطار رقم 1](#) للحصول على أمثلة).

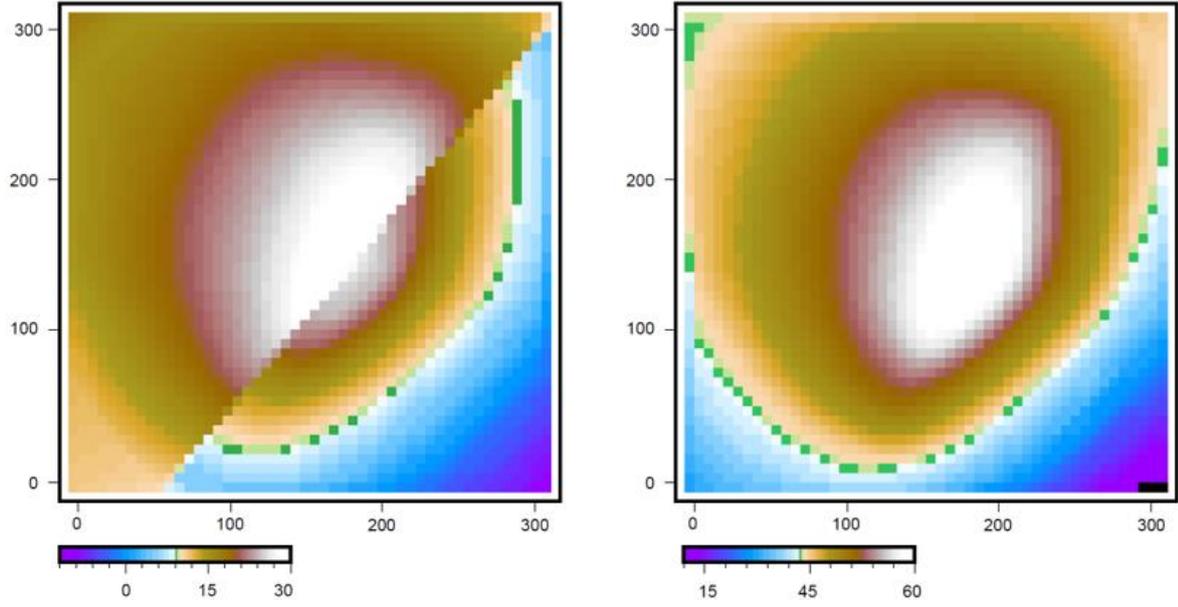
في الحالات التي تكون فيها البيانات متناثرة أو غير منتظمة، يتطلب تطبيق طريقة منهجية تعتمد ذهنياً على أسس الجيولوجيا لتوجيه خوارزمية الشبكة في هذه "المساحة البيضاء" بين قيم تسجيل آبار المراقبة. البرامج المتاحة لهذا النوع من نماذج التمثيل الجيولوجية ثلاثية الأبعاد، هي على سبيل المثال [Visual MODFLOW Flex](#) و [RockWorks](#).

بالنسبة لموقع الاختبار، يتم استخدام طريقة بسيطة نسبياً لترقيم خطوط المناسيب المرسومة باليد لإنشاء نقاط بيانات إضافية لخوارزمية إنشاء الشبكة حيث لا يتطلب ذلك أي برنامج خاص (الشكل 6).



الشكل 6 - تحتاج خوارزميات إنشاء الشبكة إلى توجيه في المناطق ذات البيانات المبعثرة. يتم هنا ترقيم سطوح المناسيب المرسومة باليد لتوفير البيانات لخوارزمية إنشاء الشبكة (Brandenburg, 2020).

في نموذج تمثيل موقع الاختبار، تم ترقيم بيانات سطوح المناسيب المرسومة باليد، ثم إنشاء شبكة تمثيل لها بعدد 20×20 عقدة للشبكة (خلايا الشبكة حوالي 15 متراً مضروبة في 15 متراً). هذه الشبكة بقياس 20×20 ستستخدم للحسابات في بقية أجزاء الكتاب.



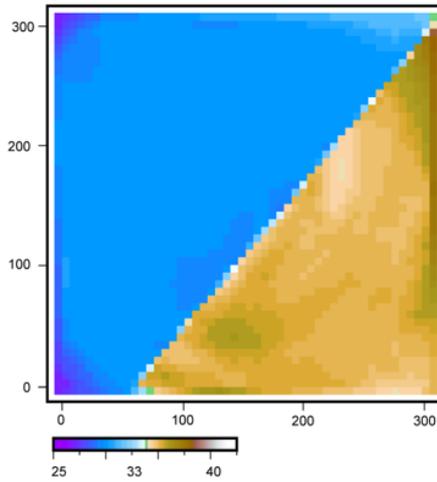
الشكل - 7 السطوح الشبكية للوجه العلوي للصخر الأساس (في الجهة اليسرى) و  $H01$  (في الجهة اليمنى). يمثل كل مربع قيمة تم استقرارها لارتفاع السطح مع الإشارة إلى حجمها بواسطة لون المربع. تم رسم هذا الشكل باستخدام أدوات المصادر المفتوحة المولدة للخرائط (GMT) (Brandenburg, 2020).

## 5 حساب الخصائص

بمجرد تحديد الإطار الجيولوجي ثلاثي الأبعاد وبناء الشبكة له، فإن الخطوة التالية هي تزويد الشبكة بقيم الخصائص الهيدروليكية اللازمة للمحاكاة.

### 1.5 السمك الإجمالي

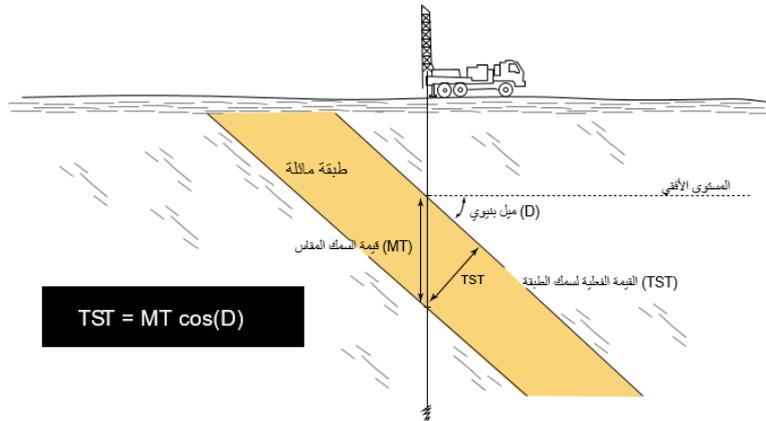
إن أبسط خاصية هي سمك الخزان أو سمك طبقة المياه الجوفية، ويعرف السمك بأنه المسافة العمودية بين السطح العلوي للطبقة وسطحها السفلي (الشكل 8).



السمك الإجمالي للمكمن المائي الجوفي (م)

الشكل - 8 سمك طبقة المياه الجوفية هو الفرق بين شبكة الطبقة HO1 والسطح العلوي للصخر الأساس (Brandenburg, 2020).

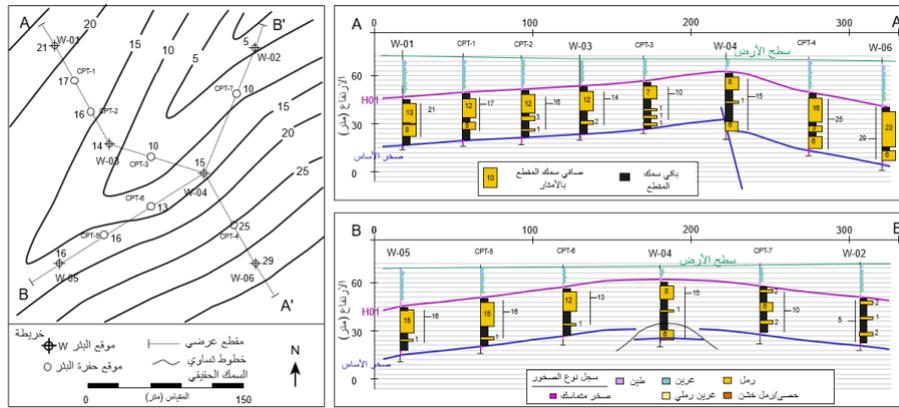
بالنسبة للطبقات المطوية أو المائلة، قد يكون من الضروري تطبيق حساب المثلثات لتصحيح الانحدار (الشكل 9). في مثال موقع الاختبار، فإن التشوه الهيكلي بسيط نسبياً، لذلك لا يتم تطبيق تصحيح الانحدار.



الشكل 9 - حساب سمك الطبقة الحقيقي من قياس السمك المائل للطبقة في حفرة البئر (Brandenburg, 2020).

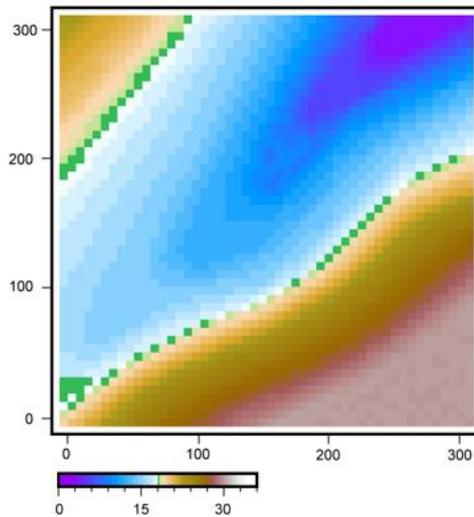
## 2.5 السمك الفعلي

إن للأطيان والصخور ذات الصلة مثل الطفل الصفاحي مسامية كبيرة ولكنها مسامية غير متصلة وتمثل حجم من طبقة المياه الجوفية لا يشارك فيه التدفق الفعال، وهو أمر مهم في تقييم مواقع تلوث المياه الجوفية (Payne et al., 2008). يتم تحديد الجزء من الخزان أو طبقة المياه الجوفية الذي يحدث فيه التدفق "بالمقطع الفعلي". لتحديد ذلك، يتم اختيار قيمة حدية لحجم حبيبي خشن، كما يتم تقسيم قيم التسجيلات الجيولوجية إلى "مقاطع" تمثل مناطق مشاركة بالتدفق الفعلي بشكل كلي (الرواسب خشنة الحجم الحبيبي) ومناطق غير مشاركة بالتدفق الفعلي بشكل كلي (رواسب دقيقة الحجم الحبيبي). يتم حساب سمك المقطع المشارك في التدفق (المقطع الفعلي) لكل تسجيل، ثم يستخدم لإنشاء الخطوط الكونتورية للسمك الحقيقي كما هو موضح في الشكل 10. في هذه الحالة، الخارطة هي خارطة خطوط توزيع سمك الطبقات حيث تمثل خطوط تساوي الكونتور، خطوط سمك ثابتة بدلاً من خطوط ارتفاع ثابت.



الشكل - 10 قياس السمك الفعلي بواسطة سجلات مقسمة إلى مقاطع وخارطة توزيع السمك (Brandenburg, 2020).

ثم يتم إنشاء شبكة لخطوط متساوية السمك باستخدام نفس العملية التي استُخدمت في حال الأفاق في الخطوات السابقة (الشكل 11).

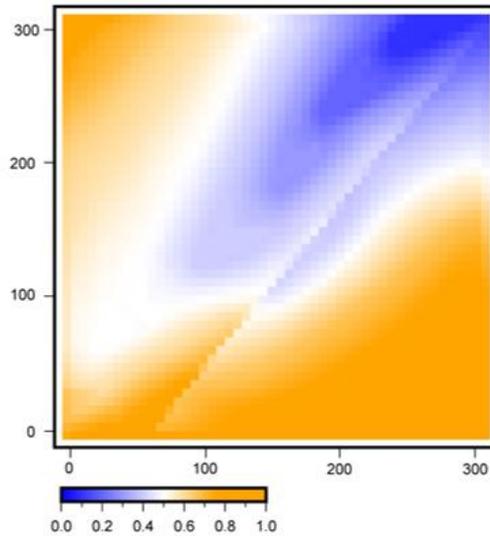


سمك الممكن المائي الجوفي الفعلي (م)

الشكل - 11 خارطة السمك الحقيقي بعد بناء الشبكة لها (Brandenburg, 2020, gw-project.org).

### 3.5 نسبة السمك الفعلي للسمك الإجمالي

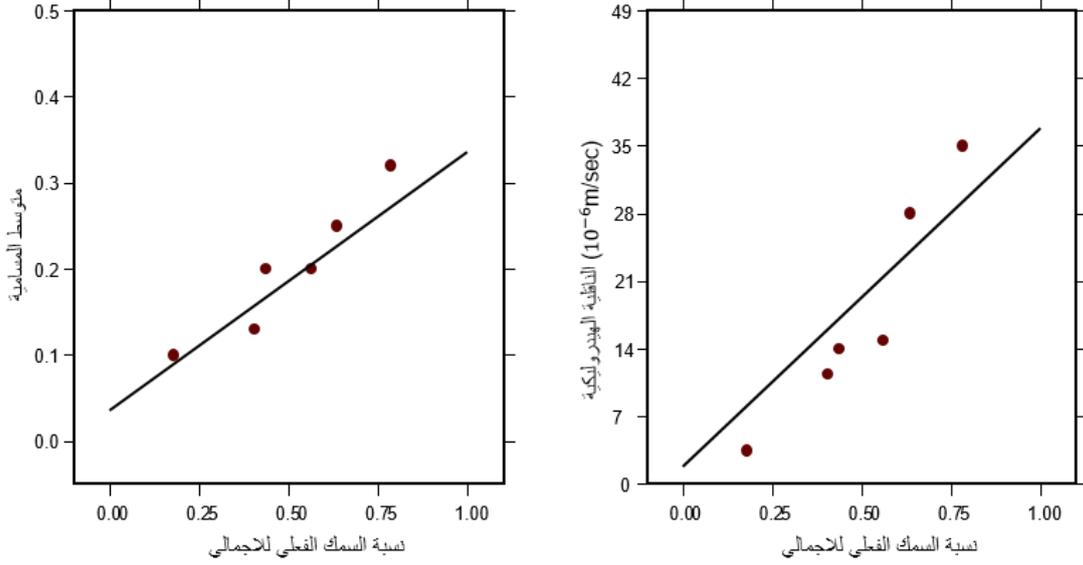
حالما يتم إنشاء الخرائط من بيانات السمك الإجمالية والفعلية وبناء شبكة لها، تؤخذ النسبة بينهما مباشرة. فيعطي حاصل قسمة السمك الفعلي على السمك الإجمالي نسبة السمك الفعلي للإجمالي، وهي قيمة بين 0 و1 ويشار إليها بعبارة "الفعلي للإجمالي" (الشكل 12). بغض النظر عن السحنات الرسوبية، فإن نسبة الفعلي للإجمالي العالية للطبقات تشير إلى أن هذه الطبقات ذات نفاذية جيدة ومتصلة هيدروليكيًا بشكل جيد. في حين أن الطبقات التي فيها نسبة الفعلي للإجمالي منخفضة يمكن أن تكون مؤشراً على أن هذه الطبقات نفوذة في أبار فردية، ومن المرجح أن يتم فصلها إلى أجزاء غير متصلة هيدروليكيًا.



الشكل - 12 نسبة السمك الفعلي للسمك الإجمالي بعد بناء الشبكة (Brandenburg, 2020)

### 4.5 الخصائص

لقد كان معروفاً لمدة زمنية طويلة في عملية تقييم خزان النفط والغاز أن نسبة السمك الفعلي إلى الإجمالي في خزانات الرسوبيات الفتاتية (المتككة) ترتبط بشكل موثوق مع العديد من خصائص جسم الخزان. وغالباً ما يتم إنشاء خريطتي المسامية و النفاذية بالاعتماد مباشرة على قيمة نسبة السمك الفعلي للسمك الإجمالي باستخدام وظائف الاستنباط المخصصة لحقل نفط معين. وفي موقع الاختبار، يتم تقدير المسامية والناقلية الهيدروليكية بناء على الارتباط بين نسبة السمك الفعلي إلى الإجمالي مع قياسات المسامية والناقلية الهيدروليكية التي تم إجراؤها في أبار المراقبة الدائمة كما هو موضح في الشكل 13.



الشكل - 13 العلاقة بين نسبة السمك الفعلي للإجمالي في كل بنر وقياسات المسامية و الناقلية الهيدروليكية في البنر نفسه.

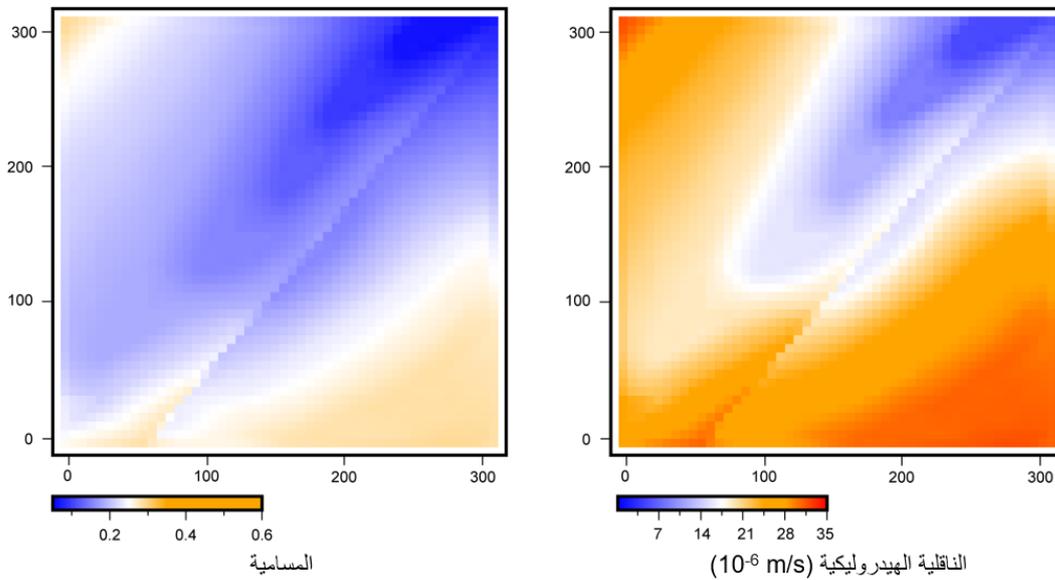
(Brandenburg, 2020)

معادلات الخطوط البيانية في الشكل 13 هي (المعادلات 1 و 2):

$$(1) \text{المسامية: } = \emptyset 0.035 + \left[ \frac{N}{G} \right] 0.3$$

$$(2) \text{الناقلية الهيدروليكية: } K = (1.8 \times 10^{-6}) + \left[ \frac{N}{G} \right] (35 \times 10^{-6})$$

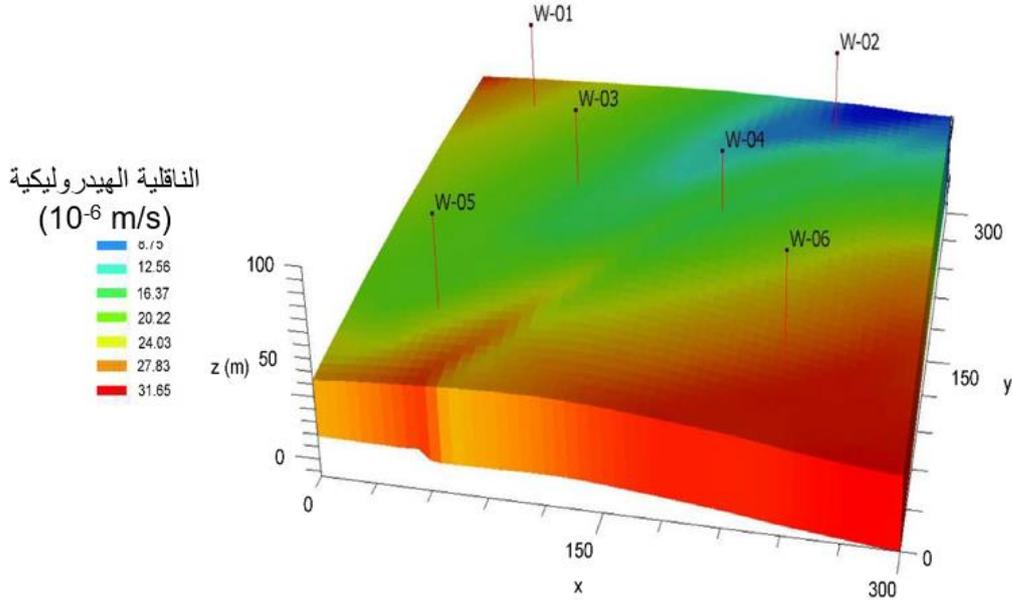
ما أن يتم تأسيس علاقات المكنم المائي الجوفي هذه، يمكن حساب هذه الخصائص لكل موقع في الشبكة والذي تم إعطاء قيمة السمك الفعلي للإجمالي له من أجل إنشاء خصائص الحوض المائي الجوفي لكل خلية من شبكة بمقياس 20x20 (الشكل 14).



الشكل - 14 شبكة المسامية و الناقلية الهيدروليكية التي تم حسابها من المعادلات 1 و 2 (Brandenburg, 2020).

## 6 النموذج

بني النموذج الموضح في الشكل 15 باستخدام البرنامج Visual Modflow FLEX حيث تم ملئ الشبكة باستخدام علاقات المسامية والناقلية الهيدروليكية من القسم السابق.



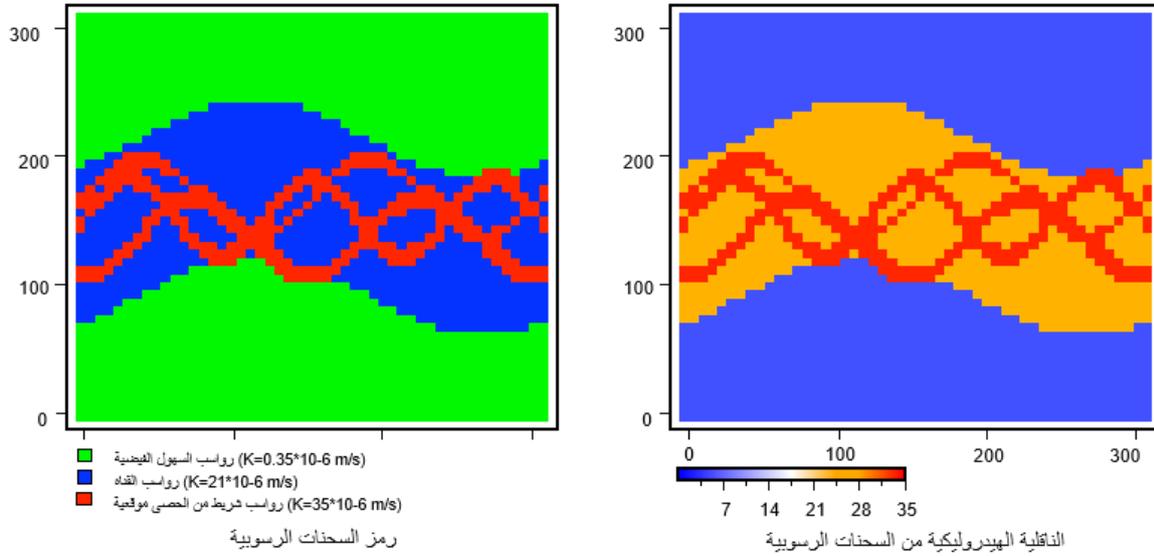
الشكل - 15 الناقلية الهيدروليكية ممثلة في الشبكة النموذجية ثلاثية الأبعاد في برنامج Visual MODFLOW FLEX

في هذه المرحلة، يكون نموذج التمثيل جاهزاً لاستخدامه في عمليات المحاكاة الديناميكية. على أية حال، يقدم هذا النموذج لتوضيح مبادئ التخطيط تحت سطح الأرض من بيانات آبار المراقبة. يمثل هذا النموذج الموقع كطبقة واحدة، بينما تتطلب نماذج تمثيل المياه الجوفية عادة طبقات متعددة لتمثيل أنظمة المياه الجوفية في مكامن مائية متعددة، وتمثيل المعالم الهندسية داخل نظام المياه الجوفية، و/ أو عدم التجانس الجيولوجي المعقد، خاصة عند محاكاة نقل أو معالجة الملوثات.

بالنسبة لنموذج محاكاة متعدد الطبقات، يمكن تمثيل طباقية الطبقات الرقيقة باستخدام نفس الأساليب الموضحة في هذا الكتاب. قد يتم أيضاً تطبيق الأساليب الجيولوجية الإحصائية؛ على سبيل المثال، إن معظم برامج نماذج تمثيل المياه الجوفية ما قبل المعالجة تسمح للخصائص كالتوصيلية الهيدروليكية للاستقراء بين قيمها المرصودة باستخدام الخوارزميات الإحصائية كما هو الحال في طريقة التنبؤ البيئي الموزون (Kriging).

## 7 بناء نموذج مستقر من خرائط السحنات الجيولوجية

في كثير من الأحيان تستخدم خرائط السحنات الجيولوجية لالتقاط صفة عدم التجانس في نماذج تمثيل استقرار حركة النفط. فالسحنات الجيولوجية هي تجمعات الصخور أو الرواسب أو التربة ذات الأصل والتاريخ الجيولوجي المشترك، والذي سيؤدي في هذا السياق إلى سلوك هيدرولوجي متماثل. على سبيل المثال، في الأنظمة النهرية، فإن رواسب السهول الفيضية تميل إلى أن يكون لها الكثير من الطبقات الطينية دقيقة الحبيبات، مؤدية إلى ناقلية هيدروليكية منخفضة، ونسبة الناقلية الهيدروليكية العمودية إلى الأفقية تكون أقل بكثير من واحد. وبالعكس من ذلك، فإن ترسبات شريط من الحصى الموقعية سيكون لها ناقلية هيدروليكية عالية مع نسبة ناقلية عمودية إلى الأفقية أقرب إلى الواحد. في رسم خرائط السحنات الجيولوجية، يتم ربط كل خلية في الشبكة برمز معين للسحنة، ثم يتم بعد ذلك عمل خارطة له لتقابل مجموعة من المعاملات الهيدروليكية (الشكل 16).



الشكل - 16 خصائص الناقلية الهيدروليكية من خرائط السحنات الجيولوجية. (Brandenburg, 2020)

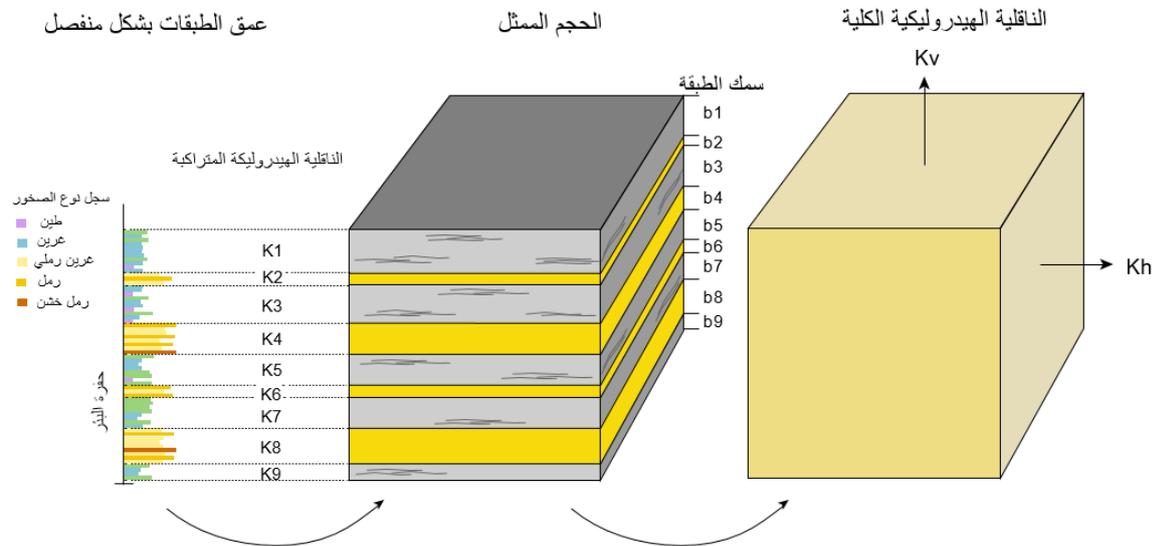
بالطبع، أن السحنات قد عرفت فقط في مواقع آبار المراقبة؛ أما باقي البيانات، يجب تعيينها بتطبيق بعض العمليات. في أبسط سيناريو، يتم تعيين هذه البيانات بناءً على حدس صانع النموذج. ومع ذلك، يمكن بسهولة تطوير العديد من خرائط السحنات المختلفة والمقبولة بنفس النسبة. هذا يعطي الأساس للنماذج الجيولوجية الإحصائية الأكثر تقدماً التي تأخذ بعين الاعتبار كل من القيود الإحصائية والمبادئ الجيولوجية في الوقت نفسه. بعض هذه النماذج تكون معقدة جداً بحيث تمثل أنواع عدم التجانس التي لوحظت في التكتشافات الصخرية المقاسة بعناية وفي دراسات جيولوجية أخرى على نطاق أدق بكثير من دقة شبكة نموذج تمثيل التدفق. يتطلب استخدام هذا المفهوم كأساس لنموذج تمثيل التدفق، تقنية التحسين الكمي للتأكد من أن التدفق الذي تم قياسه على نطاق أدق يحتفظ بخصائصه ضمن الشبكة ذات حجم خلايا أكبر.

## 8 بناء نموذج التمثيل المستقر بالاعتماد على الخصائص المحسنة

إن المنهجية الأكثر مباشرة ولكن تحتاج إلى عمل كثير هي تزويد نموذج التمثيل بالخصائص الهيدروليكية "التي تم تحسين دقتها" من أفضل البيانات المتاحة.

إذا تم جمع اللباب من آبار السبر (عينات لتربة غير مشوّهة وصخور)، يمكن إرسالها إلى المختبر من أجل اختبارات المسامية و الناقلية الهيدروليكية. هذه الاختبارات تسمح بالربط بين الخصائص الصخرية والخصائص الهيدروليكية بمقياس الإنج. بعد ذلك يتم بناء حجم ممثل مع مخطط الطبقات يمثل أنواع الصخور الرئيسية للعينة. يتم تحديد ناقلية هيدروليكية (من قيم مختلفة) لكل طبقة ممثلة والتي تمثل المعدل الإحصائي للقياسات المختبرية للناقلية الهيدروليكية لنوع صخور الطبقة. ثم يتم ترجمة هذه الطبقات إلى الناقلية الهيدروليكية الإجمالية، العمودية ( $K_v$ ) والأفقية ( $K_h$ ) (الشكل 17).

و تحسب الناقلة الهيدروليكية الأفقية الإجمالية كمتوسط حسابي للطبقات المدمجة، كما هو موضح في المعادلة 3 للمثال في الشكل 17.



الشكل 17- الارتقاء من الناقلة الهيدروليكية للطبقات بشكل منفصل إلى الناقلة الهيدروليكية الإجمالية (Brandenburg, 2020).

$$(3) \quad \frac{K_9 b_9 + K_8 b_8 + K_7 b_7 + K_6 b_6 + K_5 b_5 + K_4 b_4 + K_3 b_3 + K_2 b_2 + K_1 b_1}{b_9 + b_8 + b_7 + b_6 + b_5 + b_4 + b_3 + b_2 + b_1} = K_h$$

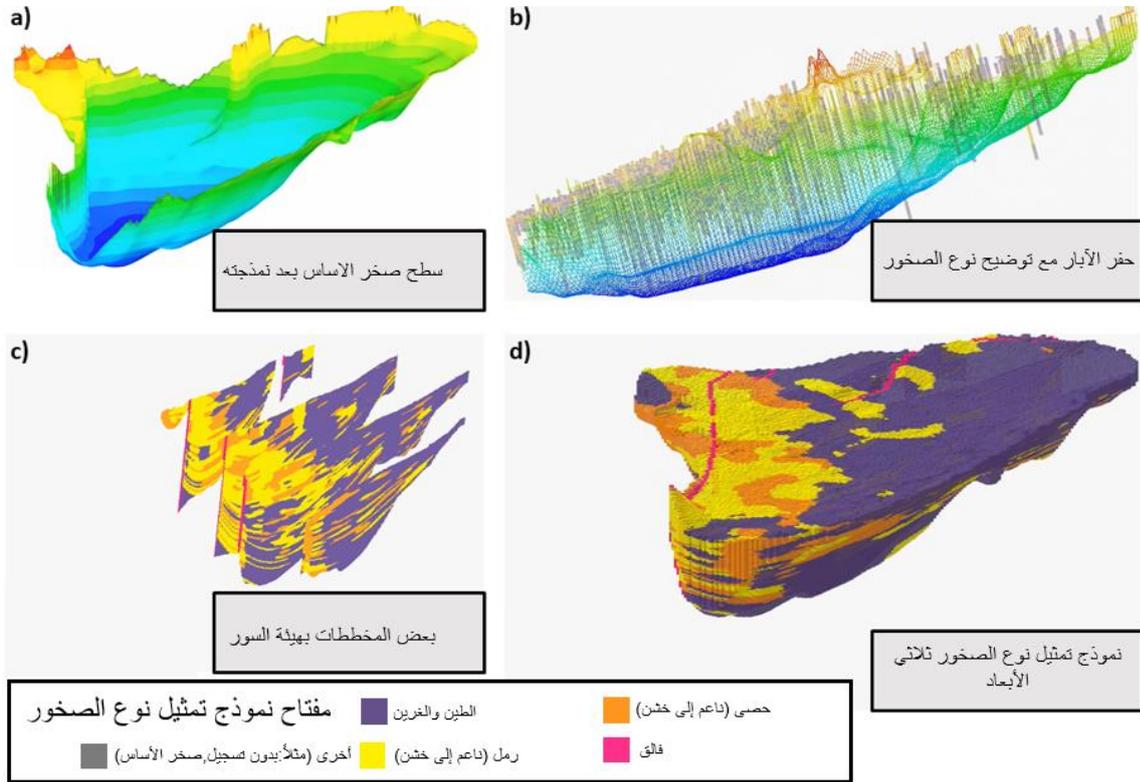
يتم حساب المسامية الإجمالية أيضاً كمتوسط حسابي (Arithmetic Mean). أما حساب الناقلة الهيدروليكية العمودية الإجمالية فتحسب كمتوسط توافقي (Harmonic Mean) للطبقات المدمجة، كما هو موضح في المعادلة 4 للمثال في الشكل 17.

$$(4) \quad \frac{b_9 + b_8 + b_7 + b_6 + b_5 + b_4 + b_3 + b_2 + b_1}{\frac{b_9}{K_9} + \frac{b_8}{K_8} + \frac{b_7}{K_7} + \frac{b_6}{K_6} + \frac{b_5}{K_5} + \frac{b_4}{K_4} + \frac{b_3}{K_3} + \frac{b_2}{K_2} + \frac{b_1}{K_1}} = K_v$$

بشكل عام، فإن المتوسط التوافقي هو ممثل لـ  $(K)$  للطبقات العمودية على اتجاه التدفق، بينما يمثل المتوسط الحسابي  $(K)$  للطبقات الموازية للتدفق. في حين أن النتائج تكون دقيقة في الحجم المحيط مباشرة بآبار السبر، ولا تزال هناك حاجة إلى بعض الطرائق المنهجية لتبني هذه النتائج على مستوى باقي حجم نموذج التمثيل. عادة ما يتم إنجاز ذلك عملياً من خلال الجمع بين طرائق التقييس مع أساليب النمذجة الرياضية العشوائية.

## 9 بناء نموذج التمثيل المستقر من بيانات نوع الصخور

عندما تتوفر بيانات جيولوجية كافية لتحديد أطر نمذجة التمثيل الرياضي للمياه الجوفية، يمكن استخدام برامج النمذجة الرياضية مثل [RockWorks](#) لإنشاء شبكة للأشياء الصخرية ضمن مجال نموذج التمثيل الرياضي، مع ربط الخصائص الهيدروليكية بكل نوع من الصخور (الشكل 17 8). [يمكن مشاهدة عرض متحرك للنموذج في هذا الفيديو](#). خلال عرض الرسوم المتحركة لمدة 35 ثانية (~ 80 ميغابايت) يتم تدوير الحوض المائي الجوفي في مجال ثلاثي الأبعاد، ويظهر العرض الأشياء الآتية: سطح الصخر الأساس؛ تسجيلات أنواع الصخور التي استخدمت لتحديد توزيع الصخور؛ مخططات القاطع على طول بعض المقاطع العرضية؛ والنموذج المجسم النهائي الذي قسم بالتتابع إلى شرائح من الغرب إلى الشرق وبالعكس، ثم من الجنوب إلى الشمال وبالعكس. كما تعرض مواد التربة ناعمة الحبات باللون الأرجواني، والحبات المتوسطة باللون الأصفر، وذات الحجم الخشن باللون البرتقالي مع إظهار الفوالق باللون الأحمر.



الشكل 17 8 - نموذج تمثيل نوع الصخور بدءاً من (أ) تعريف سطح الأساس الصخري، (ب) تعريف أنواع الصخور في كل حفرة بئر، (ج) عدد من مخططات بهيئة السور تم استقراؤها واستنباطها بين الآبار لأنواع الصخور الموجودة، (د) نموذج تمثيل نوع الصخور ثلاثي الأبعاد. أنتجت هذه الصور باستخدام البرنامج RockWare (2020)

## 10 الملخص

إن مفاهيم نمذجة التمثيل الرياضي تحت سطح الأرض، المقدمة في هذا الكتاب هي في سياق خطة عمل تبدأ ببناء نموذج التمثيل المستقر ومن ثم نموذج التمثيل الديناميكي. إن كل مشروع يخص المياه الجوفية هو حالة فريدة من نوعه، وينبغي أن يُنظر لخطط سير العمل هذه على أنها هيكل عمل تنظيمي موصى به وليس كإجراء يوجب الالتزام به. على مستوى التحري الموقعي فإن تبعثر محدودية البيانات يجعل من وضع المفاهيم الأولية لنماذج تمثيل التراكيب وتطابق الطبقات الخطوة الأولى في العملية. إن فائدة مناهج خطط العمل هذه، هي في تزويد عملية التأكد من أن التعديلات والافتراضات وقيود البيانات تنتقل لجميع مستويات المشروع المكتمل.

على الرغم من أن بعض التقنيات التي نوقشت في الكتاب يتم تطبيقها فقط في المكامن الرسوبية الفتاتية، إلا أن طريقة إنشاء إطار نموذج ثلاثي الأبعاد من الخرائط والمقاطع العرضية، وسطوح المناسيب هي طريقة قابلة للتطبيق عالمياً. إن كل طرائق النمذجة الإحصائية ونماذج تمثيل الصخرية الأكثر تقدماً، والتي تم مناقشتها لا تزال تعتمد على إطار متين ثلاثي الأبعاد. والعمل كفريق لرسم الأطر ثلاثية الأبعاد بواسطة قلم رصاص وورقة أو سبورة هو أيضاً طريقة ممتازة لتكوين توافق في الآراء، وتحديد الافتراضات وتسهيل التواصل. ويعد استخدام هذه الطريقة كنقطة انطلاق لمشاريع تمثيل النمذجة من أفضل التطبيقات.

## 11 المراجع

Brandenburg, J.P., 2020, Original figures.

Payne, F., J. Quinnan, and S. Potter, 2008, Remediation Hydraulics, 1<sup>st</sup> Edition. Chemical Rubber Company (CRC) Press.

RockWare, 2020, <https://ww.rockware.com/product/rockworks/>.

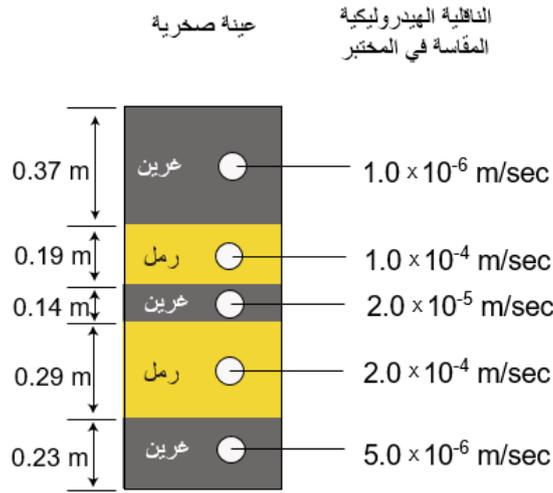
Schultz, M., R. Cramer, C. Plank, H. Levine, K. Ehman, 2017, Best practices for environmental site management: A practical guide for applying environmental sequence stratigraphy to improve conceptual site models. Technical Report.

[https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=536250&Lab=NRMRL](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=536250&Lab=NRMRL).

Shepherd, M., 2009, Oil field production geology, AAPG Memoir 91, The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 350 pages.

## 12 التمارين

إحدى الطرائق لتحليل لباب التربة والصخور التي تم جمعها أثناء الحفر هي قياس الخصائص الهيدروليكية للعينات الصغيرة الحجم المقاسة بالسنتيمتر والتي تقطع من لباب أكبر (" شكل سداة من اللباب") في المختبر. قبل أن يتم استخدام النتائج لمحاكاة التدفق، يُطلب حساب خصائص الكتلة. نأخذ في الاعتبار عينة اللباب التالية التي تم جمعها من رواسب الطبقات الرملية و الغرينية. طول عينة اللباب يساوي 1.22 متر، وقد تم تحضيرها بشكل عمودي، ثم حساب الناقلية الهيدروليكية لخمس سدادات من اللباب.



### تمرين 1

إذا كان التدفق المهم هو فقط تدفق المياه الجوفية عبر الرمل، فما هي نسبة الفعلي الإجمالي لهذا اللباب؟

[انقر هنا للذهاب لحل التمرين 1](#)

### تمرين 2

ما هي قيم الناقلية الهيدروليكية الكلية العمودية والأفقية المحسوبة في الحجم الممثل؟

[انقر هنا للذهاب لحل التمرين 2](#)

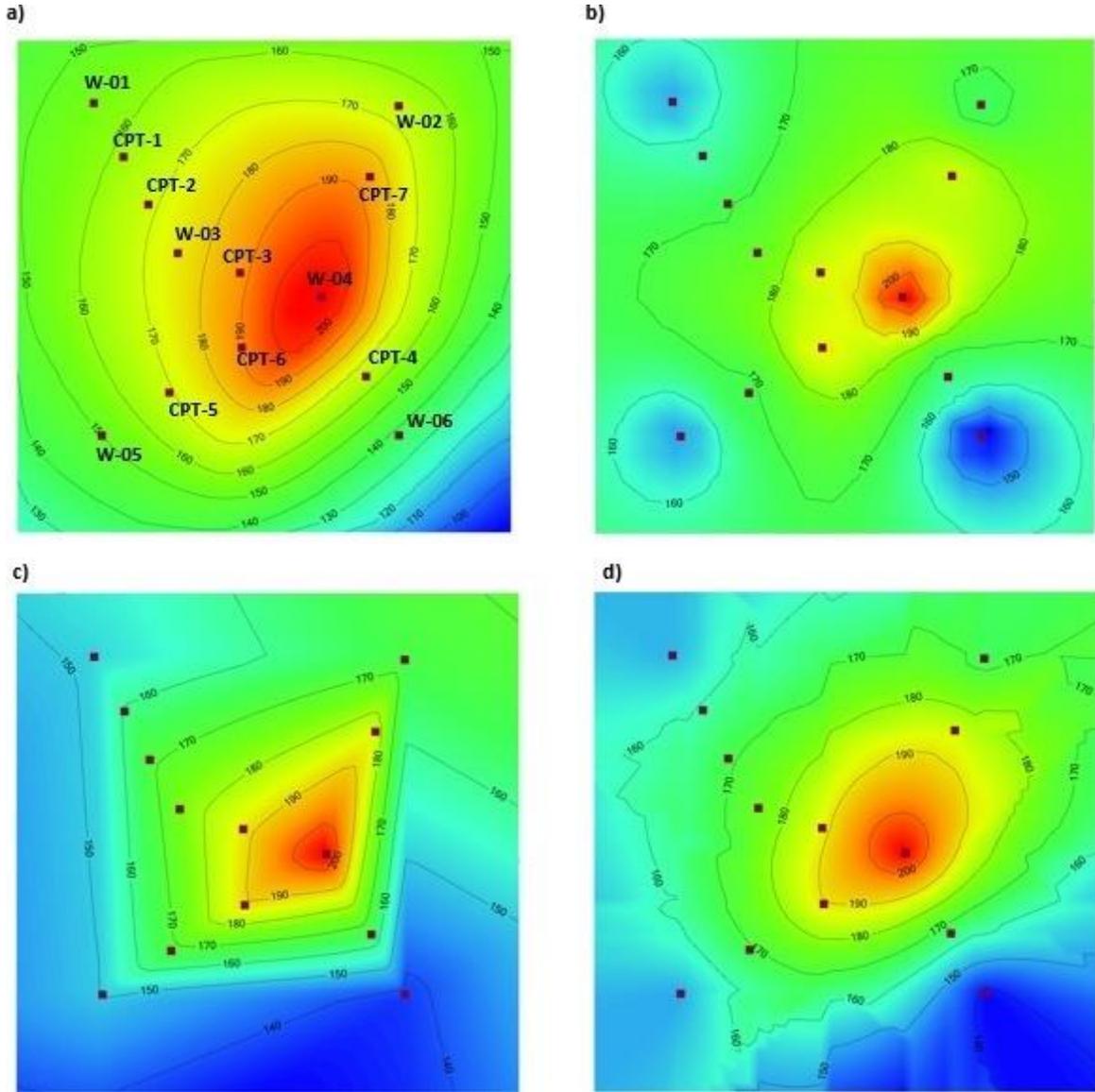
### تمرين 3

ماذا تحتاج أيضاً للتفكير به قبل استخدام الخصائص الهيدروليكية الكلية المحسوبة في بناء نموذج تمثيل التدفق؟

[انقر هنا للذهاب لحل التمرين 3](#)

## الإطار 1 - بناء الشبكة في حال كون البيانات متناثرة

إذا كان لدينا بيانات من عدد كافٍ من الآبار، من المفترض أن تقوم جميع خوارزميات بناء الشبكة بإعادة إنتاج السطح الجيولوجي نفسه. أما إذا كانت البيانات متناثرة فسوف يختلف شكل السطح الجيولوجي الذي يتم تشكيله من شكل لآخر. بالنسبة لموقع الاختبار، يبين شكل 1- الأطار 1 بناء شبكة سطح الطبقة H01 باستخدام بيانات الارتفاع فقط، المقاسة في 14 بئر سبر باستخدام عدد قليل من الطرائق المختلفة.



الإطار 1 الشكل - 1 بناء شبكة السطح H01 باستخدام فقط بيانات الارتفاع المقاسة في 14 بئر باستخدام: (a) سطوح كونتور هيكلية مرسومة باليد تمثل "الواقع" الجيولوجي، (b) خوارزمية معكوس المسافة المرجحة (IDW)، (c) خوارزمية الجوار الطبيعي، (d) خوارزمية التنبؤ البيئي الموزون (Kriging). (Brandenburg, 2020, gw-project.org).

تم إنشاء هذه الصور باستخدام خوارزميات بناء الشبكة المتوفرة في برنامج Visual MODFLOW FLEX (Waterloo Hydrogeologic, 2020) باستخدام المعاملات الافتراضية بشكل رئيسي. مع التجربة، يمكن تعديل معاملات بناء الشبكة لإنشاء سطح أقرب إلى ما هو متوقع للطبقة الرقيقة H01. يكون هذا صحيح بشكل خاص بالنسبة لطريقة التنبؤ البيئي الموزون (Kriging)، والتي تم تصميمها لمجموعات البيانات الجيولوجية غير المنتظمة. على أية حال و بغض النظر عن اختيار الخوارزمية، فإن وجود مفهوم مسبق للجيولوجيا هو شيء ضروري. يكون أداء خوارزميات بناء الشبكة دائماً الأضعف بالقرب من الحدود الخارجية للشبكة. بحيث تقوم الخوارزميات بإجراء عملية الاستقراء في داخل المنطقة التي تم رسمها بواسطة نقاط البيانات، كما يتم تنفيذ عملية الاستنباط خارج هذه المنطقة. إن الاستنباط بطبيعته يعطي نتائج تكون غير مؤكدة، والذي يمكن أن يؤدي إلى نتائج بناء شبكة بعيدة عن الواقع عندما تكون الحدود بعيدة عن نقاط البيانات.

[العودة إلى حيث يرتبط النص مع الإطار 1](#)

## 13 حل التمارين

## التمرين – 1 الحل

إذا كان التدفق ذو الأهمية هو فقط تدفق المياه الجوفية عبر الرمل، فما هي نسبة السمك الفعلي/الإجمالي لهذا اللباب؟

نسبة السمك الفعلي/الإجمالي:

$$Net/Gross = \frac{0.19+0.29}{0.37+0.19+0.14+0.29+0.23} = 0.39$$

[العودة إلى التمرين 1](#)

## التمرين – 2 الحل

ما هي قيم الناقلية الهيدروليكية الكلية العمودية والأفقية المحسوبة في الحجم الممثل؟

$$Kv = \frac{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23}{\frac{0.37}{1.0 \times 10^{-6}} + \frac{0.19}{1.0 \times 10^{-4}} + \frac{0.14}{2.0 \times 10^{-5}} + \frac{0.29}{2.0 \times 10^{-4}} + \frac{0.23}{5.0 \times 10^{-6}}}$$

$$Kv = 2.9 \times 10^{-6} \frac{m}{s} \text{ الناقلية الهيدروليكية الكلية العمودية}$$

$$Kh = \frac{(1.0 \times 10^{-6} * 0.37) + (1.0 \times 10^{-4} * 0.19) + (2.0 \times 10^{-5} * 0.14) + (2.0 \times 10^{-4} * 0.29) + (5.0 \times 10^{-6} * 0.23)}{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23}$$

$$Kh = 6.7 \times 10^{-5} \frac{m}{s} \text{ الناقلية الهيدروليكية الكلية الأفقية}$$

[العودة إلى التمرين 2](#)

## التمرين 3 – الحل

ماذا تحتاج أيضاً للتفكير به قبل استخدام الخصائص الهيدروليكية الكلية المحسوبة في بناء نموذج تمثيل التدفق؟

ستحتاج إلى معرفة كيف يتناسب بهذا اللباب مع حجم الإطار الجيولوجي لنموذج التمثيل. بعض الأسئلة الرئيسية التي يجب طرحها هي: ما هو مقياس نموذج التمثيل مقارنة بمقياس اللباب؟ سيكون هذا اللباب ممثلاً منطقياً لوحدة التدفق بسمك بضعة أمتار، ولكن ليس للوحدات التي سمكها عشرات الأمتار. السؤال الآخر هو هل الطبقة الرقيقة ذات الامتداد الأفقي هي أفقية تماماً؟ أم هناك ميل قابل للقياس؟ إذا كان هناك ميل، فقد يكون من الضروري تطبيق تصحيح الميل، كما هو الحال في القسم 5. ضع في اعتبارك أنه من الممكن أن تتباين الجيولوجيا في الاتجاه الأفقي بقدر ما تتباين عمودياً، لذلك سيكون وجود اللباب الإضافي ضروري لتطبيق هذه المنهجية بشكل دقيق.

[العودة إلى التمرين 3](#)

## 14 لمحة عن الكاتب

الدكتور JP Brandenburg: هو جيولوجي محترف في شركة Haley & Aldrich حيث يعمل في مجال نمذجة تمثيل المياه الجوفية لمجموعة متنوعة من التطبيقات البيئية واستخراج المعادن والموارد المائية. بدأ مهنته في نمذجة التمثيل العددية في الجيوديناميكا بدراسة الحمل الحراري اللزج في وشاح الأرض في جامعة ميشيغان. ثم انضم إلى المنظمة البحثية في شركة Royal Dutch Shell، يعمل على تطوير طرق لنمذجة تمثيل الجيولوجيا الهيكلية المعقدة تحت سطح الأرض في الأحواض الجوفية للهيدروكربون. بعد عدة سنوات من توظيف هذه التقنيات في منظمة Shell للتحري والإنتاج، حول الدكتور براندنبورغ اهتمامه للتركيز على المجال البيئي. بالإضافة إلى النمذجة التطبيقية، يستمر الدكتور براندنبورغ في بناء التجربة متعددة التخصصات لتطوير طرائق جديدة للالتقاط وتحديد عدم التجانس الجيولوجي تحت سطح الأرض. لدى الدكتور براندنبورغ عدد من المنشورات في الجيوديناميكا، و جيولوجيا النفط، والجيولوجيا الهيكلية ونمذجة التمثيل العددي.



## 15 لمحة عن المترجم

م. مجد شهله: ماجستير في الهندسة الهيدرولوجية من كلية علوم الأرض والهندسة في جامعة مشكولتس - هنغاريا. إجازة في هندسة وإدارة الموارد المائية من جامعة البعث - حمص - سوريا. قدمت الأطروحة البحثية لنيل درجة الماجستير في مجال تكنولوجيا الترشيح الطبيعي لضفاف الأنهار لإنتاج مياه الشرب والعوامل المؤثرة. مهتمة في مجال نماذج التمثيل الهيدرولوجية الرياضية وحركة المياه الجوفية.



يرجى الاشتراك في القائمة البريدية لـ The Groundwater Project والبقاء على إطلاع حول إصدارات الكتب الجديدة، الفعاليات وطرق المشاركة في The Groundwater Project. إن الاشتراك في قائمة البريد الإلكتروني الخاصة بنا يساعدنا في بناء مجتمع عالمي للمياه الجوفية. [الاشتراك](#).



## Modifications to Original Release

### التعديلات على الإصدار الأصلي

#### General changes:

#### التعديلات العامة

- Bold font in equations was removed except for the final answer in the exercise solutions.
- تمت إزالة الخط الغامق في المعادلات باستثناء الإجابة النهائية في حلول التمرين.
- External links in blue font within the body of the book were changed to black font.
- تم تغيير الروابط الخارجية المكتوبة بالخط الأزرق داخل نص الكتاب إلى الخط الأسود.
- The external link symbol was added after links where it was missing.
- تمت إضافة رمز الارتباط الخارجي بعد الروابط حيث كان مفقودا.
- The internal link symbol was added after links where it was missing.
- تمت إضافة رمز الارتباط الداخلي بعد الروابط حيث كان مفقودا.
- False bookmarks were removed from the navigation pane.
- تمت إزالة الإشارات المرجعية غير الصحيحة من جزء التنقل.

#### Specific changes:

#### تعديلات محددة

- page iii, Added citation information and the book DOI.
- الصفحة iii، إضافة معلومات الاقتباس والكتاب DOI
- page 9, "20 by 20" was changed to "50 by 50"
- الصفحة 9، تم تغيير "20 x 20" إلى "50 x 50"
- page 9, A hyphen was added in the caption of Figure 7 between the words: "Open" and "Source".
- الصفحة 9، أضيفت واصلة في التسمية التوضيحية للشكل 7 بين الكلمتين "فتح" و "المصدر".
- page 13, "20x20" was changed to "50x50"
- الصفحة 13، تم تغيير "20 x 20" إلى "50 x 50"
- page 16, Denominator of equation 4 was corrected to change  $b_8/K_5$  to  $b_8/K_8$  and to include the additional term  $b_9/K_9$
- الصفحة 16، تغيير المقام  $K_5 \setminus b_8$  في المعادلة 4 إلى  $K_8 \setminus b_8$  وكذلك تضمين الصيغة الإضافية  $K_9 \setminus b_9$
- page 18, An erroneous line break was removed from the last reference.
- الصفحة 18، تمت إزالة فاصل خاطئ للأسطر من المرجع الأخير.