تحسين إدارة المياه الجوفية في المنطقة العربية

تقييم آثار تغير المناخ على موارد المياه الجوفية

ورشة عمل وطنية للأردن ودولة فلسطين

عمّان، 27-29 شباط/فبراير 2024

Training on:

ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON GROUNDWATER RESOURCES

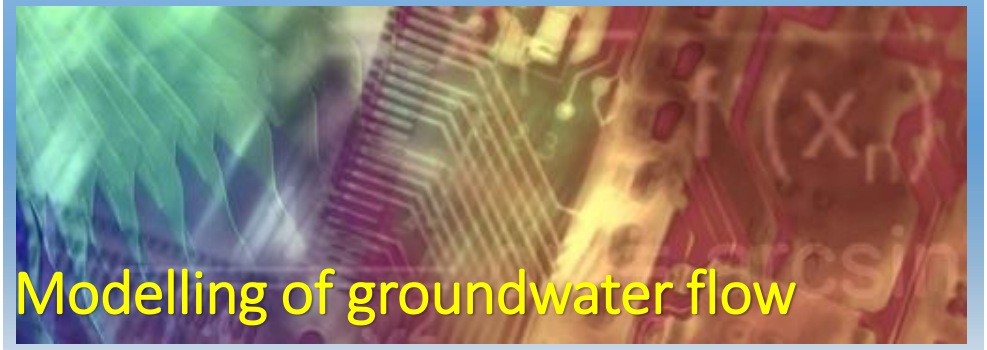
د.م محمود السباعي
استشاري، المركز العربي لدراسات المناطق الجافة والأراضي القاحلة

Dr. Mahmoud Al-Sibai
Consultant, Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands

محتويات العرض

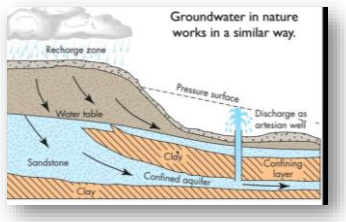
- مقدمة
- خطوات النمذجة الرياضية
- النموذج الاعتباري
- اشتقاق معادلات جريان المياه الجوفية
- الشروط الأولية والشروط الحدية
- المعايرة والتنبؤ

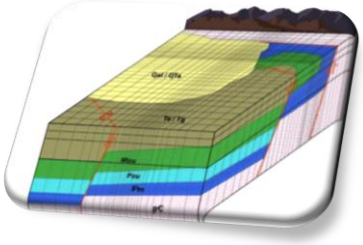
- Introduction
- Groundwater Modelling process
- Conceptual model,
- Deriving Groundwater flow Equations
- Initial Conditions & Boundary conditions
- Calibration and Predication



النمذجة الرياضية لحركة المياه الجوفية

النمذجة الرياضية لحركة المياه الجوفية

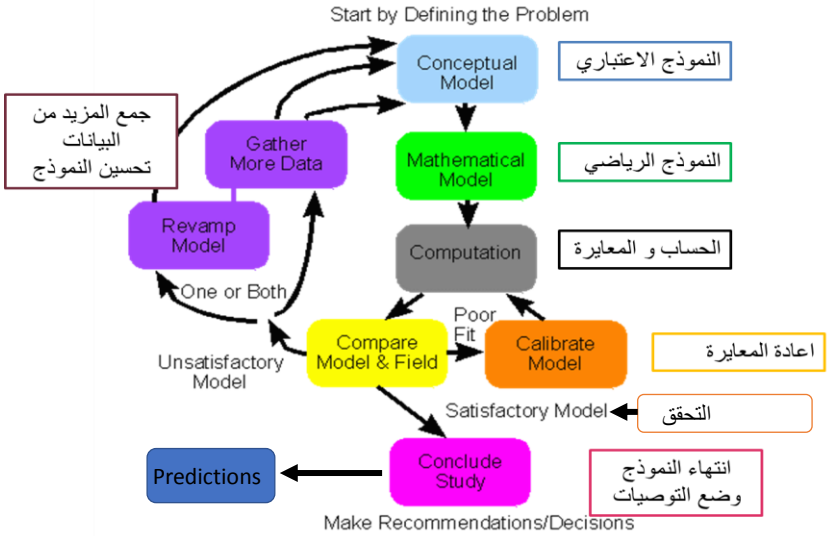




- تتطلب الإدارة الجيدة للأحواض المائية الجوفية القدرة على التنبؤ بنظام حركة الماء الجوفي و الأملاح و التنبؤ بما سيؤول الأمر إليه نتيجة للتغيرات التي تفرضها الطبيعة و النشاطات الإنسانية على الحوض من خلال تشغيلها حسب سيناريوهات مختلفة.
- يتم بواسطة النموذج تحديد عناصر الموازنة المائية للحوض و تحديد الآفاق المستقبلية لمناطق الاستثمار الكثيف سواءً منها الحالية أو التي ستحددها الجهة المشرفة على الحوض كما يمكن لهذه الجهة استخدامه كإطار لتقييم وتجميع المعلومات الحقلية ذات العلاقة.
- تساعد النماذج الرياضية على فهم أفضل لديناميكية النظام المائي الجوفي.
- إن هذه النتائج مهمة جدا لمتخذ القرار لتخطيط استثمار الموارد المائية المحدودة بشكل رشيد.

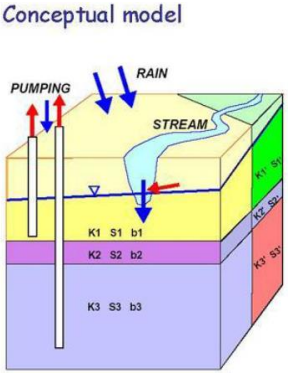
د. محمود السباعي، تقييم آثار تغير المناخ على موارد المياه الجوفية، 2024

خطوات بناء النموذج الرياضي



1- بناء النموذج الاعتباري (Conceptual Model)

- النموذج الاعتباري هو تبسيط للواقع الفعلي لنظام المياه الجوفية المعقد بحيث يمثل أهم الملامح السائدة بدرجة مقبولة من الدقة بدون أن يؤثر ذلك التبسيط على مصداقية النتائج.
- هو تمثيل وصفي لنظام المياه الجوفية (A pictorial representation of the ground-water flow system)
  - يتضمن تفسير وفهم للظروف الجيولوجية والهيدرولوجية
  - ما هي العمليات الهامة التي يجب ادخالها في لنموذج؟
  - ما هي الحدود؟
  - ما هي قيم المعاملات المتاحة؟
  - ما هي المعاملات التي يجب جمعها وقياسها؟
- **إن البناء الصحيح للنموذج الاعتباري هو خطوة هامة جدا في العمل.**



2- بناء النموذج الرياضي

Deriving Groundwater flow Equations
اشتقاق المعادلات الحاكمة

الجريان الداخل – الجريان الخارج = التغير في التخزين

principle of mass conservation
قانون حفظ المادة

Darcy's Law
قانون دارسي

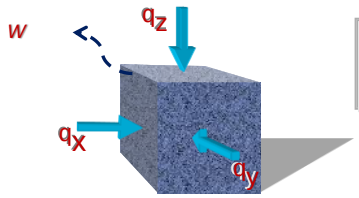
$$Q \propto A\frac{\Delta h}{\Delta x} \quad \Rightarrow \quad Q = -K\,A\frac{\Delta h}{\Delta x}$$

GW Flow Equations
معادلة حركة المياه

3D MASS BALANCE Equation

Summing the mass balance equation for each coordinate direction gives the total net inflow per unit volume into the REV

- Add a source term volumetric flow rate per unit volume injected into REV



$$-\frac{\partial q_x}{\partial x}-\frac{\partial q_y}{\partial y}-\frac{\partial q_z}{\partial z}=W+S_s\frac{\partial h}{\partial t}$$

Net inflow* = Change in volume stored*

*per unit volume per unit time

- Substitute components of q from 3-D **Darcy's law**

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)=W+S_s\frac{\partial h}{\partial t}$$

المعادلة التفاضلية الجزئية الحاكمة لحركة المياه الجوفية

يعطي جمع قانون دارسي و معادلة حفظ المادة المعادلة التفاضلية الجزئية PDE العامة التالية و الحاكمة للجريان غير المستقر للمياه في الأوساط المسامية :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)=W+S_s\frac{\partial h}{\partial t}$$

حيث

- k النفوذية للحامل المائي في الاتجاهات الإحداثية x,y,z (LT^{-1})
- h الضاغط الهيدروليكي عند الزمن t (L)
- S_s التخزين النوعي Specific Storage و يعادل μ المعطائية المائية (specific yield) (في حالة الحامل المائي الحر)
- W حد يمثل التغذية أو السحب (T^{-1})

يتعلق الحد $Ss\frac{\partial h}{\partial t}$ بحركة سطح الماء الحر في الحالة غير المستقرة فعندما يتحرك سطح الماء إلى الأعلى أو الأسفل يتحرر الماء من مخزون التربة أو يضاف إليه و تعرف بأنها حجم الماء المحرر أو المضاف إلى المخزون في واحدة المساحة من سطح الحامل في واحدة التغير في الارتفاع العامودي على السطح.

الحالة المستقرة والحالة غير المستقرة

- الحالة المستقرة Stead state: وهي الحالة التي لا يتغير فيها منسوب الماء مع الزمن ولا يتغير المخزون مع الزمن (الجريان الداخل يساوي الخارج) ويكون الحد $S_s\frac{\partial h}{\partial t}$ في المعادلة السابقة مساويا للصفر

- الحالة غير المستقرة Transient state:وهي التي يتغير فيها منسوب الماء نتيجة لتغير التخزين مع الزمن

د. محمود السباعي، تقييم آثار تغير المناخ على موارد المياه الجوفية، 2024

3- طرق حل المعادلات الحاكمة في النموذج الرياضي

Types of Mathematical Models Solutions

- **أنواع الحلول في النماذج الرياضية**

- Deterministic Solution (الحلول المحدَّدة)
  - In **deterministic** models, the output of the model is fully determined by the parameter values and the initial conditions.

وتكون نتائج النموذج محددة تماما بقيم البارمترات والشروط الأولية ويكون الحل وحيد وفريد

- Stochastic Solution: (الحلول الإحصائية)
  - Account for uncertainty
    - **Stochastic** models possess some inherent randomness. The same set of parameter values and initial conditions will lead to an ensemble of different outputs.

وهذا يتم توصيف البارمترات بقيم او توزيعات احتمالية بدلا من وصفها بقيمة وحيدة وبالتالي تنتج النماذج الإحصائية مجموعة متنوعة من الحلول المحتملة، والتي تسمح بتقييم عدم اليقين الموجود أصلا في نمذجة الأنظمة الطبيعية

Deterministic Solution

- **Analytical Solution حلول تحليلية**:

Simplified conditions (provides a continuous solution over the model domain)

- (example: Theis equation., Thiem Equation)

و هي إيجاد الحل الحقيقي للمعادلة بشروطها الحدية و الأولية باتباع طرق رياضية معقدة و يكون هذا الحل إن وجد حل دقيق غير أنه من الصعب جدا الحصول دائما على هذا الحل إلا باقتراض تبسيط كبير للظاهرة و لشروطها الحدية و الأولية Simplified conditions

- **Numerical Solution حلول عددية**:

More complex conditions (provides a discrete solution - i.e. values are calculated at only a few points)

وهي حلول لحالات أكثر تعقيدا complex conditions (توفر حلاً تقريبيا غير مستمر، أي يتم حساب القيم عند نقاط قليلة فقط) وقد أصبحت اليوم كثيرة الاستعمال لقدرتها على حل المسائل المعقدة و لملاءمتها بشكل كبير لطبيعة عمل الحاسب

الحلول العددية

Numerical Solutions

في الحلول العددية نستطيع الأخذ بعين الاعتبار الظروف الواقعية بشكل اكبر

can solve Real-world problems with using computers to handle:

- الوضع الجيولوجي المعقد
- التغير في المواصفات الهيدروليكية
- اعداد الآبار الكبيرة والضخ المتغير
- الظروف الحدية المختلفة
- الاتصال بين المياه السطحية والجوفية
- التغير في قيم الراشح والتبخر مكانيا وزمانيا

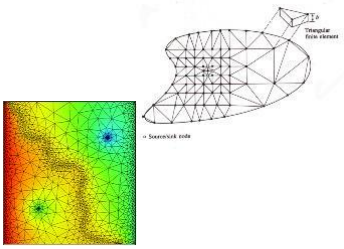
د. محمود السباعي، تقييم آثار تغير المناخ على موارد المياه الجوفية، 2024

طرق الحل العددي

1. طريقة العناصر المحدودة

Finite Element Method

و هي تفترض توابع للمتغيرات غير المستقلة و العوامل بدلاً عن الصياغة التكاملية المكافئة للمعادلات التفاضلية.

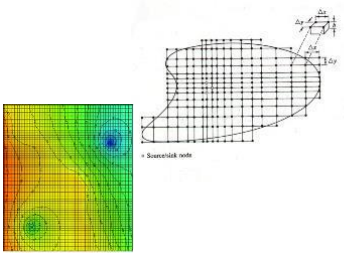


- Femwater
- Feflow

2. طريقة الفروقات المحدودة

Finite Difference Method

و هي تقوم بتقريب الاشتقاق الأول للمعادلات التفاضلية الجزئية بفروقات للمتغيرات المستقلة في النقاط المتجاورة وعلى مستويين زمنيين متتاليين و هي قد تكون ظاهرية Explicit أو ضمنية Implicit.



- **Modflow** (1988,1996,2000,2005,2017)

إن كلتا الطريقتين تتطلب تقسيما فراغيا و زمانيا Discretization للظاهرة المدروسة و تقوم بتحويل حل المعادلات التفاضلية إلى حل جملة من المعادلات الخطية.

متطلبات حل المعادلات التفاضلية

1- الشروط الأولية

Initial Conditions

- توزع قيم منسوب الماء عند الزمن $t_o = 0$

known head distribution at time t_0

2-الشروط الحدية

Boundary Conditions

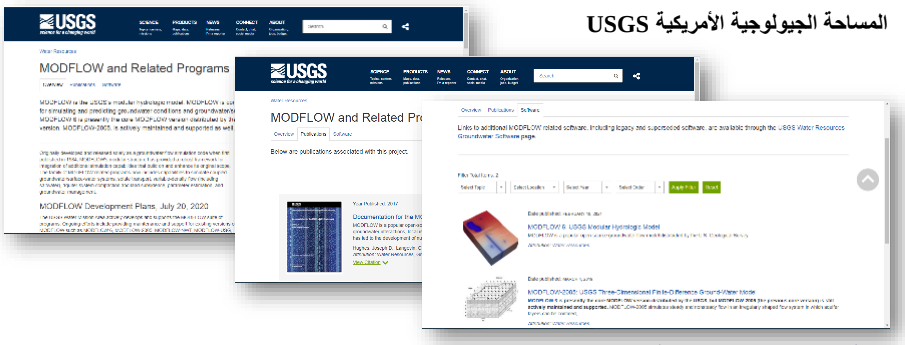
الشروط الحدية عبارة عن علاقات رياضية لحساب المتغير (الضاغط) أو مشتقه (الجريان) عند حدود منطقة الدراسة

هناك نوعين من الحدود

- **حدود فيزيائية** نتيجة وجود تكشفات لطبقة كتيمة او نهر او بحيرة مثلا
- **حدود هيدروليكية** مثل خطوط الجريان (Streamlines) او خطوط تقسيم المياه الجوفية (Groundwater divides)

MODFLOW (Modular 3D finite-difference ground-water flow model)

يعد برنامج MODFLOW البرنامج الأكثر شيوعا في العالم للنمذجة العددية لحركة المياه الجوفية. وهو برنامج ثلاثي الأبعاد، يعتمد على طريقة الفروقات المحدودة لحل المعادلة التفاضلية الجزئية لحركة المياه، طور من قبل هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية USGS

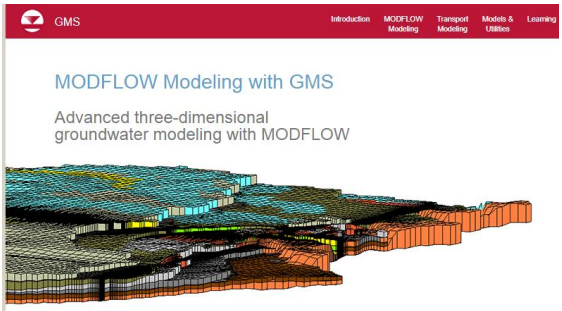


هناك عدة إصدارات من البرنامج Several versions available

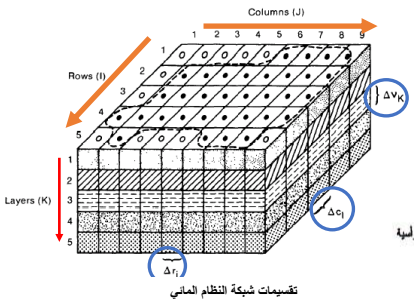
There have been six major releases of the core MODFLOW version:
MODFLOW-84, MODFLOW-88, MODFLOW-96, MODFLOW-2000, **MODFLOW-2005, and MODFLOW 6.**

- هناك العديد من الواجهات للبرنامج

- Some Graphical user interfaces for MODFLOW
  - **GMS**
  - **PMWIN**
  - **ModelMuse** (free)
  - **GWVVisual MODFLOW**
- Each includes MODFLOW code “core code”



GMS MODFLOW Premium Package



تقسيمات شبكة النظام المائي

Types of Layers نوع الطبقة (LAYCON array)
- Confined مضغوطة (حبيسة)
- Unconfined غير مضغوطة (حرة)
- Convertible متغيرة

(Useful to think in terms of a layer transmissivity.)

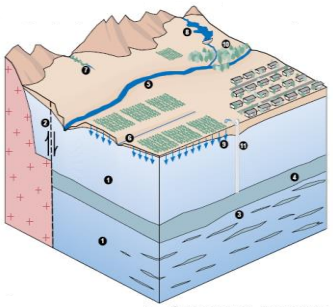
أهم الحزم البرمجية في برنامج Modflow

Stress Packages in MODFLOW أهم الحزم البرمجية في برنامج

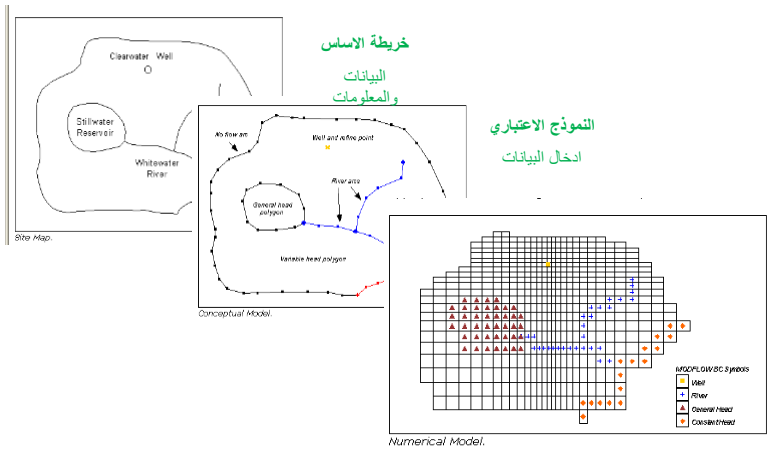
1. Well package
2. Recharge package
3. River package
4. Drain package
5. Evaporation package
6. General head package

Specified Flux

Head-Dependent Flux



تشغيل النموذج الرياضي



خريطة الاساس

البيانات والمعلومات

النموذج الاعتباري

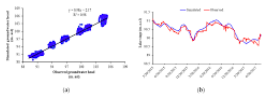
ادخال البيانات

النموذج الرياضي

حل المعادلات التفاضلية

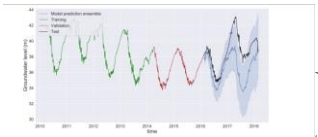
المعايرة والتنبؤ

المعايرة Calibration: يتم تشغيل النموذج الرياضي ومعايرته بمطابقة المتغيرات المحسوبة مع المقاسة والتأكد من تمثيله الصحيح لواقع المنظومة المائية الجوفية خلال فترة محددة. وتتم المعايرة بشكل عام على مرحلتين:



المرحلة الأولى: المعايرة لحالة الثبات للخزان الجوفي، حيث يفترض عدم حدوث تغير ملحوظ في مناسيب المياه الجوفية في فترة المعايرة المحددة (مخزون ثابت للمياه الجوفية).

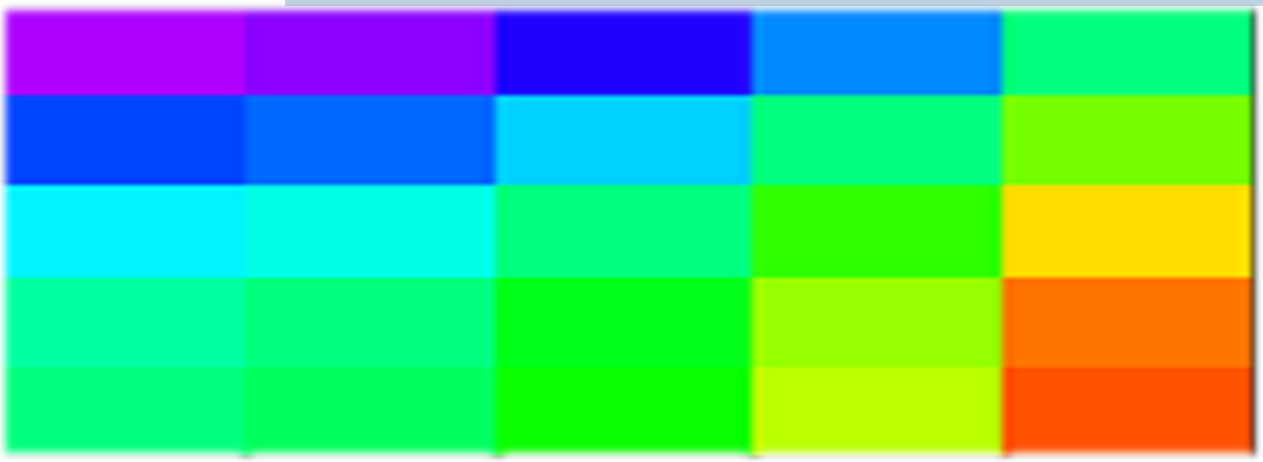
المرحلة الثانية: المعايرة لحالة عدم الثبات، وتمثل مرحلة عدم الثبات للخزان الجوفي نتيجة التغير في منسوب ومخزون المياه الجوفية مع الزمن ويتم خلالها تدقيق قيم معاملات التخزين..



مرحلة التحقق من النموذج Validation: فيها يتم التأكد من النموذج المعاير بتطبيقه على فترات اخرى مقاسة لم يعاير عليها النموذج

مرحلة التشغيل والتنبؤ: وفيها يتم تشغيل النموذج، المعاير والمحقق، حسب سيناريوهات مختلفة للتنبؤ بتأثر الطبقة المائية نتيجة الاجهادات الجديدة المطبقة.

اعداد الموازنة المائية: تُستخرج قيم مركبات الميزان المائي من النموذج للسيناريوهات المختلفة ولكل الطبقات المائية أو لأجزاء منها بجمع قيم كل مركبة في خلايا النموذج.



End