تقييم آثار تغيُّر المناخ على المياه الجوفية

دليل تدريبي

الأمم المتحدة
الاسكوا
ESCWA

ازدهارُ البلدان كرامةُ الإنسان

جامعة الدول العربية
المنظمة العربية للتنمية الزراعية
ACSAD 1968

الأمم المتحدة
الاسكوا
ESCWA

ازدهارُ البلدان **كرامةُ الإنسان**

رؤيتنا

طاقاتٌ وابتكار، ومنطقتُنا استقرارٌ وعدلٌ وازدهار

رسالتنا

بشغَف وعزْم وعَمَل: نبتكِر، ننتج المعرفة، نقدِّمُ المشورة،
نبني التوافق، نواكب المنطقة العربية على مسار خطة عام 2030.

يداً بيد، نبني غداً مشرقاً لكلِّ إنسان.

اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا

تقييم آثار تغيُّر المناخ على المياه الجوفية

دليل تدريبي

الأمم المتحدة
الاسكوا
ESCWA

ازدهارُ البلدان كرامةُ الإنسان

E/ESCWA/CL1.CCS/2024/Manual.4

مطبوعات للأمم المتحدة تصدر عن الإسكوا، بيت الأمم المتحدة، ساحة رياض الصلح،
صندوق بريد: 8575-11، بيروت، لبنان.

الموقع الإلكتروني: www.unescwa.org.

2400570A

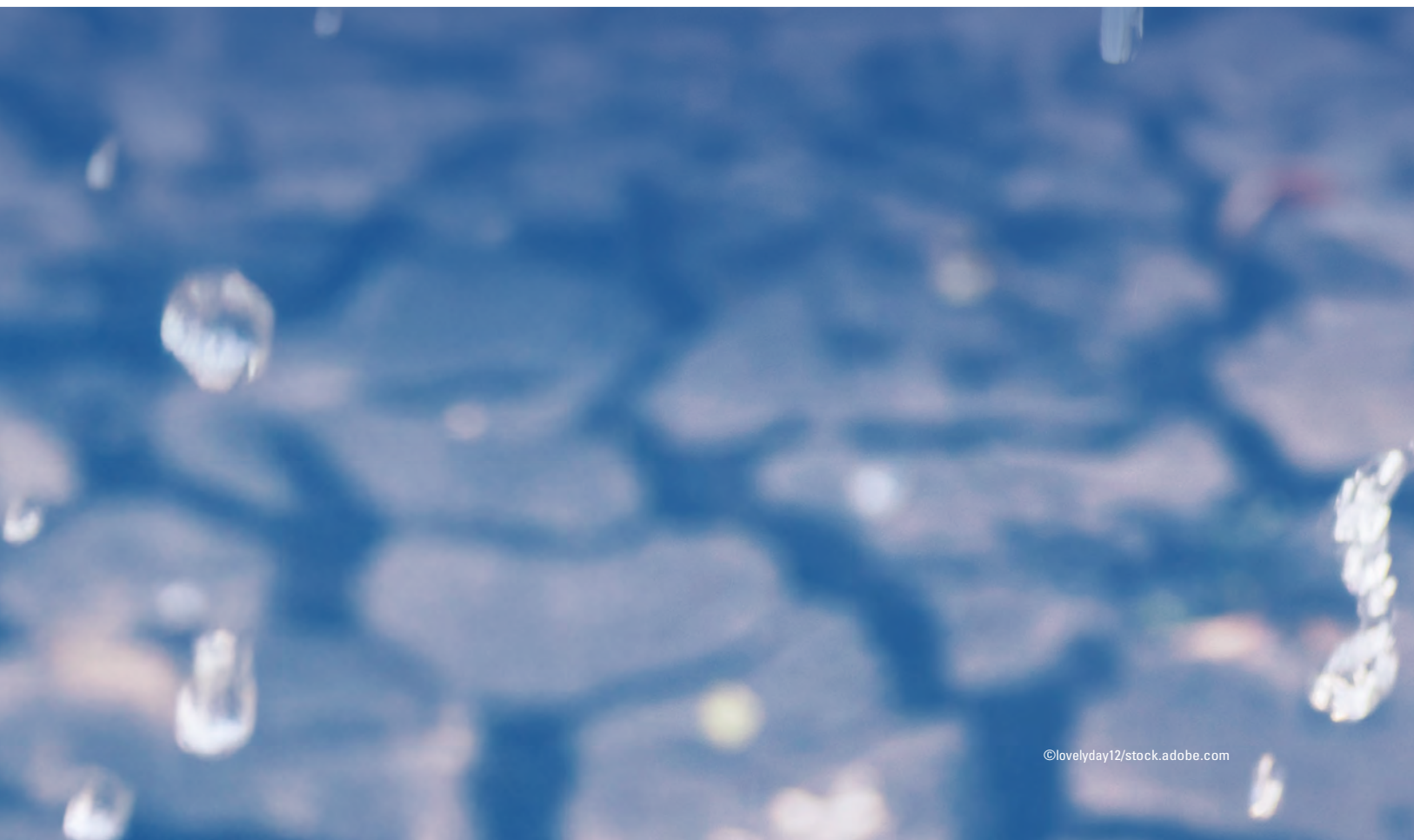
المحتويات

قائمة الجداول

قائمة الأشكال

1

التغيُّرات المناخية وبناء السيناريوهات المناخية



1-1 مقدمة عامة

تُعَدُّ المياه الجوفية مصدراً هاماً للمياه العذبة. وقد أصبح هذا المصدر مهدّداً بشكل خطير في المنطقة العربية، وذلك لأسبابٍ عدّة، منها تسارُع وتيرة الطلب على المياه العذبة مع تسارُع النمو السكاني؛ والاستغلال المفرط؛ والضخ الجائر؛ وتغيُّر المناخ. فتغيُّر المناخ يفرض ضغوطاً إضافية على الموارد المائية، ويزيد من تكرار حالات الجفاف، ويُخشى أن يعرّض المنطقة لفترات جفاف شديدة في المستقبل القريب. لذلك، بات من الضروري دراسة تأثّر مخزون المياه الجوفية بالتغيُّرات المناخية والطلب المتزايد على المياه.

ويهدف هذا التدريب إلى بناء القدرات ورفع الكفاءة في دراسة وتقييم أثر التغيُّرات المناخية على مخزون المياه الجوفية. وهو يصبّ في خانة الجهود المبذولة لترشيد إدارة الموارد المائية الجوفية، والحفاظ على الأمن المائي والغذائي في المنطقة العربية.

وتعتمد معظم تقديرات التغيُّرات الكبيرة في تخزين المياه الجوفية على النمذجة العددية التي تستخدم نواتج النمذجة المناخية الإقليمية (RCMs) بشكل عام. وفي هذا التدريب، ستُستخدم حالة دراسية محدّدة لتطوير نموذج مياه جوفية، وستُحمّل بيانات التغيُّرات المناخية (متمثلة بالهطولات المطرية) من النماذج المناخية الإقليمية للمنطقة العربية للفترات المستقبلية التي قد تمتد حتى نهاية القرن الحادي والعشرين. وقد طُوّرت هذه النماذج المناخية من خلال المبادرة الإقليمية لتقييم أثر تغيُّر المناخ على الموارد المائية وقابلية تأثر القطاعات الاجتماعية والاقتصادية في المنطقة العربية (ريكار). كذلك، سيتم حساب تغيُّر كميات تغذية المياه الجوفية المتوقعة وتطبيق القِيم على النموذج الرياضي واستنتاج مدى تأثر المخزون المائي الجوفي بتغيُّر الهطولات المطرية على المديَين القريب والمتوسط، أو في منتصف القرن ونهايته.

ويستهدف هذا التدريب المختصين المعنيّين في الوزارات والوكالات المسؤولة عن الزراعة والمياه والبيئة والأرصاد الجوية والتخطيط لبناء القدرات وتعزيز الكفاءات. وهو يرمي إلى إطلاعهم على التحديات المناخية الإقليمية التي تحول دون تحقيق الأمن المائي والغذائي؛ وإلى وضع توصيات لزيادة القدرة على إدارة موارد المياه الجوفية والتكيُّف مع التغيُّرات المناخية. ومن شروط المشاركة في هذا التدريب **أن يكون المتدرب على معرفة بالنمذجة الرياضية للمياه الجوفية.**

يتطلب تنفيذ هذا التدريب توفر المواد والبرامج التالية:

1. بيانات التغيُّرات المناخية المستقبلية (المتوفرة على بوابة بيانات المركز العربي الإقليمي للمعارف المتعلقة بتغيُّر المناخ) التابعة لمبادرة ريكار.
2. برنامج نُظُم المعلومات الجغرافية.
3. برنامج النمذجة الرياضية لحركة المياه الجوفية (MODFLOW).
4. نموذج رياضي لحركة المياه الجوفية باستخدام MODFLOW المعايَر (Calibrated) والمحقَّق (validated) لمنطقة معيّنة.
5. برامج MS Office.

2-1 التعرف على النماذج المناخية

النماذج المناخية هي آلية رئيسية يستخدمها الباحثون لفهم تغيُّر المناخ في الماضي، والتغيُّرات المتوقعة في المستقبل. وتحاكي النماذج المناخية العالمية (General circulation models (GCMs)) العمليات الفيزيائية على سطح الأرض وفي المحيطات والغلاف الجوي والغلاف الجليدي، وتهدف إلى التأكد من استجابة النظام لتركيزات غازات الدفيئة المتزايدة. ويتم تحديث هذه النماذج بانتظام، بناءً على بيانات ذات دقة مكانية أعلى وعمليات فيزيائية محسّنة ودورات بيوجيوكيميائية.

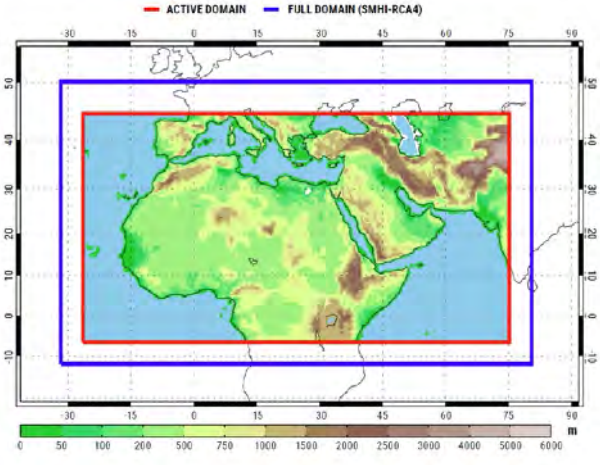
ومؤخراً، أصدرت الهيئة الحكومية الدولية المعنيّة بتغيُّر المناخ جزءاً من تقريرها التقييمي السادس (Sixth Assessment Report (AR6))، الذي تناولت فيه سيناريوهات مناخية محدّثة. وفي هذه السيناريوهات، طُوّرت خمسة مسارات تُعرف، مجتمعة، باسم المسارات الاجتماعية والاقتصادية المشتركة (Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)). وهذه المسارات تأخذ السكان، والنمو الاقتصادي، والتعليم، والتحضر، وديناميكيات أخرى، في الاعتبار. وتستند برامج التقرير التقييمي السادس إلى مسارات التركيز النموذجية (Representative Concentration Pathways (RCPs)) التي تضمّنها تقرير التقييم الخامس (AR5) الصادر عن الفريق الحكومي الدولي المعني بتغيُّر المناخ، والذي تناول أربعة مسارات محتملة استناداً إلى التأثير الإشعاعي لكل منها في عام 2100. وتتراوح هذه المسارات بين RCP2.6 وRCP8.5.

وتمثّل بيانات التغيُّر المناخي أحد أهم مخرجات المبادرة الإقليمية لتقييم أثر تغيُّر المناخ على الموارد المائية وقابلية تأثر القطاعات الاجتماعية والاقتصادية في المنطقة العربية (ريكار). وهي تغطّي النطاق العربي المبيّن في الشكل 1-1، وتتضمن بيانات عن معدلات الحرارة والأمطار والظواهر المناخية المتطرفة على امتداد ثلاث فترات (الفترة المرجعية – فترة منتصف القرن – فترة نهاية القرن)، وذلك لسيناريو الانبعاثات المتوسطة (RCP4.5) وسيناريو الانبعاثات المرتفعة (RCP8.5).

كما تتضمن بيانات التغيُّر المناخي بيانات عن الحرارة والأمطار اليومية المتوقعة للفترة (1951-2100)، وكذلك بيانات الأحداث المتطرفة الفصلية والسنوية لنفس الفترة، وفق الشروط المحيطية لثلاثة نماذج مناخ عالمية مدروسة (CNRM-CM5, EC-EARTH, and GFDL-ESM2M)، وهي متوفرة بدقة مكانية قدرها 50 كم (المعهد السويدي للأرصاد الجوية والهيدرولوجيا (SMHI)، 2017).

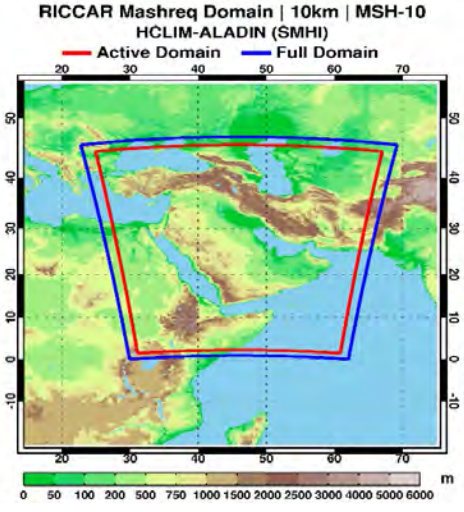
يمكن الاطّلاع على هذه البيانات وتحميلها بالصيغة المصحّحة (Bias-Corrected) من على بوابة بيانات المركز العربي الإقليمي للمعارف المتعلقة بتغير المناخ التابعة لمبادرة ريكار. أما بيانات النموذج المناخي الإقليمي غير المصحّحة، فيمكن الحصول عليها من بيانات Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment المتاحة على الموقع ESGF – Cordex.

الشكل 1-1 النطاق المناخي العربي



المصدر: المعهد السويدي للأرصاد الجوية والهيدرولوجيا، 2017.

الشكل 1-2 نطاق المشرق العربي



المصدر: الإسكوا والمعهد السويدي للأرصاد الجوية والهيدرولوجيا، 2021.

يشمل نطاق المشرق (الشكل 1-2)، المستخدَم للجزء الشمالي الشرقي من النطاق العربي، دول البحر الأبيض المتوسط الساحلية في بلاد الشام وشمال شرق أفريقيا، وكامل الحوض الساكب لنهري دجلة والفرات، وشبه الجزيرة العربية بأكملها. ومكّنت الدقة المكانية الجيدة من إجراء تحليلات مفصّلة للمناطق الساحلية والجبلية لتقييم تغيُّر المناخ بشكل أفضل في أحواض المياه السطحية. وتم تنفيذ النمذجة المناخية الإقليمية للنطاق بدقة مكانية (~10 km) 0.1. وتم اختيار ستة نماذج عالمية لنطاق المشرق (الجدول 1-1) من قِبل المعهد السويدي للأرصاد الجوية والهيدرولوجيا (SMHI) (ESCWA and SMHI, 2021).

الجدول 1-1 نماذج مناخية عالمية مختارة لنطاق المشرق العربي بدقة مكانية قدرها 10 كم

النموذج	المؤسسة
CMCC-CM2-SR5	المركز الأورومتوسطي المعني بتغيُّر المناخ
CNRM-ESM2-1	المركز الوطني لبحوث الأرصاد الجوية والمركز الأوروبي للبحوث والتدريب المتقدم في الحوسبة العلمية
EC-Earth3-Veg	الاتحاد الأوروبي
MPI-ESM1-2-LR	معهد ماكس بلانك للأرصاد الجوية
MRI-ESM2-0	معهد أبحاث الأرصاد الجوية
NorESM2-MM	مركز المناخ النرويجي

المصدر: الإسكوا والمعهد السويدي للأرصاد الجوية والهيدرولوجيا، 2022.

بالنسبة لدول شمال أفريقيا التي لا يغطيها نطاق المشرق، من الممكن استخدام النطاق الأوروبي «EURO-CORDEX»، وهو الفرع الأوروبي لمبادرة CORDEX الذي يشمل دول شمال أفريقيا. وتأخذ عمليات محاكاة EURO-CORDEX في الاعتبار نماذج المناخ العالمية، المصغّرة من المرحلة الخامسة من مشروع المقارنة بين النماذج المناخية المتقارنة CMIP5، وطويلة المدى حتى عام 2100: CNRM-CM5، EC-EARTH، HadGEM2-ES، IPSL-CM5A-MR، MPI-ESM-LR. وتستند هذه النماذج إلى مسارات التركيز التمثيلية RCPs بما في ذلك (RCP4.5) و(RCP8.5). وتُركز عمليات محاكاة EURO-CORDEX على دقة شبكة تبلغ حوالي 12 كم (0.11 درجة)*.

* https://www.euro-cordex.net.

2

النمذجة الرياضية لحركة المياه الجوفية

1-2 مقدمة

تُعَدُّ النمذجة الرياضية لحركة المياه الجوفية أداة فعالةً في التخطيط للطبقات المائية الجوفية المعقدة وإدارتها. فهذه النماذج تؤمّن إطاراً لجمع البيانات الحقلية والمعلومات، واختباراً للأفكار والفرضيات المختلفة عن مواصفات هذه الطبقات والترابط بينها. ويمكن للنماذج أن تحدّد مجالات الضعف في المعلومات، والمجالات التي تحتاج إلى مزيد من التحريات والمعلومات. كما يمكن للنمذجة الرياضية أن تساعد في اختيار الحل الأمثل لاستثمار هذه الطبقات.

وبواسطة النموذج، يتمّ تحديد عناصر الموازنة المائية للطبقة الجوفية بدقة، وتحديد الآفاق المستقبلية لمناطق الاستثمار الكثيف، الحالية أو التي ستحددها الجهة المسؤولة عن إدارة الطبقة الجوفية. ويمكن تشغيل النموذج حسب سيناريوهات مختلفة لدراسة تطوير إدارة الموارد المائية المتاحة. وهذه النتائج مهمة جداً إذ تتيح لصانعي القرار التخطيط لاستثمار الموارد المائية المحدودة بشكل رشيد.

2-2 إعداد النموذج الرياضي (Mathematical Model)

ببساطة، «النموذج» (Model) هو تمثيل لظاهرة واقعية حقيقية. ويمثّل النموذج الاعتباري (Conceptual model) افتراضاً مبسّطاً لكيفية عمل هذه الظاهرة. ويقوم النموذج الرياضي (Mathematical model) بالتعبير عن هذا الافتراض بمعادلات رياضية. ومن هنا، الهدف من المحاكاة (Simulation) أو النمذجة (Modelling) هو تبسيط الظاهرة إلى أقصى حد ممكن، مع المحافظة على الدقة المطلوبة وتأمين نتائج عالية الموثوقية.

وتُبنى معادلات حركة المياه الجوفية بشكل عام على معادلتين مشهورتين، هما قانون دارسي ومعادلة حفظ المادة. وجمع هاتين المعادلتين يعطي المعادلة التفاضلية الجزئية العامة والناظمة للجريان غير المستقر للمياه في الأوساط المسامية.

وتعتمد النمذجة الرياضية للمياه الجوفية على تمثيل الخزان المائي الجوفي وتمثيل عمليات التبادل المائي التي تجري بين عناصر الموازنة المائية، كعمليات تغذية المياه الجوفية، والجريان الجوفي الأفقي والرأسي، والتبادل المائي مع الأنهار والمصارف، والتبخر من سطح المياه الجوفية، وغيرها. كل ذلك بمعادلات رياضية تتضمن خصائص مختلف العناصر الهيدروجيولوجية المؤثرة في الموازنة المائية. ومن أهم هذه الخصائص معامل الرشح (K)، ومعامل النفوذية المائية (Hydraulic conductivity)، ومعامل المعطائية المائية النوعية (Specific yield Sy). وتتضمن هذه الخصائص أيضاً بعض العناصر الديناميكية، كمنسوب المياه الجوفية.

يمثَّل الجريان المائي الجوفي بالمعادلة التفاضلية الجزئية من المرتبة الثانية لطبقة مائية حرة بالمعادلة (2-1):

$$\frac{d}{dx}\left(K_x\frac{dh}{dx}\right)+\frac{d}{dy}\left(K_y\frac{dh}{dy}\right)+\frac{d}{dz}\left(K_z\frac{dh}{dz}\right)\pm W=S_y\frac{dh}{dt} \quad (2\text{-}1)$$

حيث:

- h = منسوب سطح المياه الجوفية غير المحصورة؛
- Kx ,Ky ,Kz = معاملات الرشح في الاتجاهات الثلاثة؛
- W = الواردات والصادرات. وهي تمثل قيمة موجبة في حالة تغذية المياه الجوفية، وقيمة سالبة في حالة الضخ من المياه الجوفية؛
- Sy = المعطائية المائية للطبقة غير المحصورة؛
- t = الزمن.

تُستخدم المعادلة السابقة لإيجاد منسوب المياه الجوفية في موقع وزمان محدّدين ($h_{i,j,k,t}$) بطرائق عديدة، منها

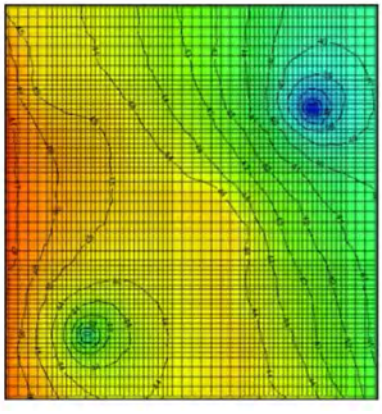
التحليلية والعددية. ويمكن في الحلول العددية أخذ الظروف الهيدروجيولوجية في الاعتبار بشكل أفضل.

وتنطوي الحلول العددية على عدة طرق، من أهمها طريقة الفروقات المحدودة وطريقة العناصر المحدودة.

2-3 طريقة الفروقات المحدودة (Finite difference)

يعتمد برنامج MODFLOW على هذه الطريقة في حل معادلة حركة المياه الجوفية. وتتكوّن شبكة النموذج من خلايا منتظمة (Structured) مستطيلة الشكل (Rectangular) (الشكل 2-1). وتعتبر هذه الطريقة من أكثر الطرق سهولةً وشيوعاً واستخداماً. ومن أهم ميزاتها القدرة على مصونية المادة (Conservation of mass)، ليس فقط على مستوى النموذج، إنما على مستوى الخلايا الفردية أيضاً. بمعنى آخر، يمكن من خلال هذه الطريقة حساب الموازنة المائية للنموذج كله، أو حساب الموازنة المائية لخلايا أو قطاعات محدّدة من النموذج بدقة عالية. ومن مساوئ هذه الطريقة عدم القدرة على تنعيم شبكة النموذج في مناطق الاهتمام (areas of interest)، دون الحاجة إلى تنعيم كامل السطور والأعمدة المارة من منطقة الاهتمام. ولكن، يمكن معالجة هذا الأمر جزئياً من خلال إنشاء شبكة محلية ناعمة باستخدام MODFLOW-LGR (Local Grid Refinement) تغطي منطقة الاهتمام.

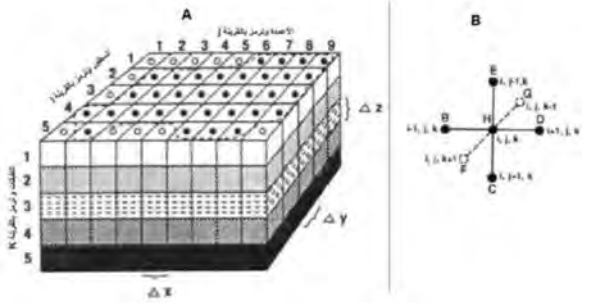
الشكل 2-1 شبكة النموذج المستخدمة مع طريقة الفروقات المحدودة



المصدر: Fenton, Cassandra, 2015.

تقوم طريقة الفروقات المحدودة على تمثيل الخزان المائي الجوفي بشبكة من الخلايا المنتظمة الثلاثية الأبعاد (الشكل 2-2).

الشكل 2-2 (A) تمثيل الخزان الجوفي بشبكة منتظمة ثلاثية الأبعاد (B) عنصر حسابي



المصدر: Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992.

تطبَّق في كل خلية من خلايا الشبكة المنتظمة قاعدة الميزان المائي، التي تنصّ على أن الفرق بين الوارد إلى الخلية والصادر منها يساوي التغيُّر في مخزونها، ويعبَّر عنها رياضياً بمعادلة الاستمرارية (المعادلة 2-2):

$$\Sigma Q_i = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (2\text{-}2)$$

حيث:

- Q_i = معدل التصريف الوارد إلى الخلية أو الصادر منها؛
- ΔV = تغيُّر حجم الماء في الخلية؛
- Δh = تغيُّر الضاغط المائي خلال الفترة الزمنية Δt؛
- S_y = المعطائية المائية في الحامل المائي الحر.

تكتَب المعادلة السابقة في كل خلية (i,j,k) من خلايا الشبكة وتحسب الجريانات الجوفية Qi القادمة لهذه الخلية من الخلايا المجاورة (الموجودة على الأوجه الستة لمتوازي المستطيلات الممثل للخلية) حسب

علاقة دارسي، وبناء على مناسيب المياه الجوفية في الخلايا المجاورة، بالعلاقة (2-3):

$$Bh_{i-1,j,k} + Ch_{i,j+1,k} + Dh_{i+1,j,k} + Eh_{i,j-1,k} + Fh_{i,jk+1} + Gh_{i,j,k-1} + Hh_{i,j} = RHS_{i,j,k} \quad (3\text{-}2)$$

حيث (B,C,D,E,F,G,H) هي معاملات جداء تعكس الخصائص الرشحية للطبقة. وتنتج عن كتابة المعادلة السابقة في كل خلايا الشبكة معادلة مصفوفات يعبَّر عنها بالعلاقة (2-4):

$$[A]\{h\} = \{f\} \quad (4\text{-}2)$$

حيث:

- [A] = مصفوفة معاملات الجداء؛
- {h} = مصفوفة مناسيب المياه الجوفية المجهولة؛
- {f} = مصفوفة تغيُّر المخزون المائي.

وتُحل معادلة المصفوفات السابقة بطرائق التكرار، ونتيجة حلّها هي مصفوفة مناسيب المياه الجوفية $h_{i,j,k}$.

2-4 مراحل تنفيذ النمذجة الرياضية

1. **جمع المعطيات:** تُجمع المعلومات والبيانات المتوفرة عن المنطقة المدروسة من مصادر مثل الخرائط الجيولوجية، والخرائط الهيدروجيولوجية، والخرائط التكتونية، والخرائط الهيدرولوجية، والخرائط الطوبوغرافية. وتنفّذ مختلف أعمال التحليل الهيدروجيولوجية، كدراسة العلاقات المتبادلة مع طبقات المياه الجوفية المجاورة والمياه السطحية ودراسة نظام المياه الجوفية في المنطقة المدروسة وغيرها. ويُستخدم نظام المعلومات الجغرافي في إعداد شرائح مدخلات النموذج والخرائط الغرضية الداعمة لعملية النمذجة. ويستفاد أيضاً من الدراسات الهيدروجيولوجية السابقة المنفَّذة في المنطقة المدروسة.

2. **إعداد النموذج الاعتباري (Conceptual model):** تبدأ عملية النمذجة بوضع نموذج اعتباري للمنطقة المدروسة يشكّل تبسيطاً للواقع الفعلي لنظام المياه الجوفية المعقّد. وهو يمثّل أهم الملامح السائدة، بدرجة مقبولة من الدقة، من دون أن يؤثر ذلك التبسيط على مصداقية النتائج. وبعد ذلك، تُعَدُّ مدخلات النموذج المختلفة للوضع المائي الجوفي للمنظومة.

3. **بناء النموذج الرياضي:** إنشاء نموذج رياضي يحاكي النموذج الاعتباري ويراعي الشروط الحدية لمنطقة الدراسة، ومن ثم يتم تحميل المدخلات إليه.

4. **المعايرة (Calibration):** يتم تشغيل النموذج الرياضي ومعايرته عن طريق مطابقة المتغيّرات المحسوبة مع المُقاسة، ويتم التأكد من تمثيله الصحيح لواقع المنظومة المائية الجوفية خلال فترة محدّدة. وتعرَّف معايرة النموذج الرياضي بأنها محاولات تجريبية لضبط قِيم المعاملات والحدود الهيدروليكية للخزان الجوفي، وذلك للحصول على مخرجات من النموذج الرياضي تماثل القِيم الحقيقية المُقاسة في الطبيعة. وتتم معايرة النموذج الرياضي لتمثيل حركة المياه الجوفية على أساس تعديل الأبعاد الهندسية للطبقات الحاملة، والمعاملات والحدود الهيدروليكية للنموذج، وتصحيحها بما يتناسب مع المعلومات المتوفرة عن الحوض المدروس والبنية الإقليمية المحيطة. وتتم المعايرة بشكل عام على مرحلتين:

- **المرحلة الأولى:** المعايرة لحالة ثبات الخزان الجوفي، حيث يفترض عدم حدوث تغيُّر ملحوظ في مناسيب المياه الجوفية في فترة المعايرة المحدّدة (مخزون ثابت للمياه الجوفية). وفي هذه المرحلة، يتم تدقيق ومعايرة مدخلات النموذج الرياضي وقِيم معامل النفوذية (Hydraulic conductivity K). ويتم استخدام آبار مراقبة مناسيب المياه الجوفية بشكل رئيسي للتحقق من دقة معايرة النموذج الرياضي، وذلك بمقارنة المناسيب المحسوبة بالنموذج مع المناسيب المقاسة، وتعديل قِيم البارامترات التي تتم معايرتها حتى يتحقق التقارب المقبول بين القِيم المحسوبة والقِيم المقاسة.

- **المرحلة الثانية:** المعايرة لحالة عدم الثبات، وتمثل مرحلة عدم ثبات الخزان الجوفي نتيجة التغيُّر في منسوب ومخزون المياه الجوفية مع الزمن، ويتم خلالها تدقيق قِيمٍ معاملات التخزين. وفي هذه المرحلة، يتم أيضاً استخدام آبار مراقبة مناسيب المياه للتحقق من دقة معايرة النموذج الرياضي، وذلك بمقارنة المناسيب المحسوبة بالنموذج مع المناسيب المقاسة وتعديل قِيم البارامترات التي تتم معايرتها، حتى يتحقق التقارب المقبول بين القِيم المحسوبة والقِيم المقاسة.

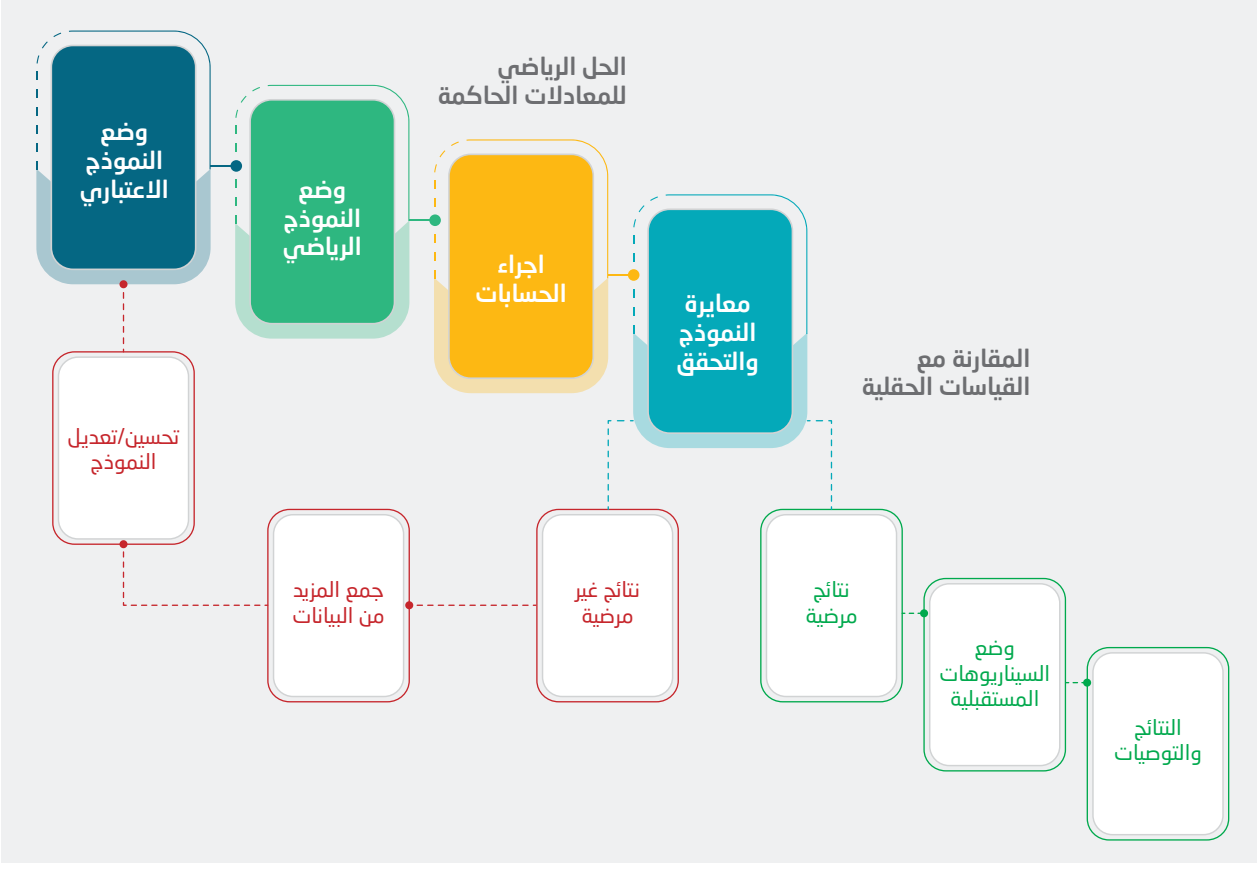
5. **مرحلة التحقق من النموذج (Validation):** في هذه المرحلة يتم التأكد من النموذج المعاير، بتطبيقه على فترات أخرى مقاسة لم يعاير عليها النموذج.

6. **مرحلة التشغيل والتنبؤ:** فيها يتم تشغيل النموذج، المعاير والمحقق، حسب سيناريوهات مختلفة للتنبؤ بتأثر الطبقة المائية نتيجة الاجهادات الجديدة المطبّقة.

7. **إعداد الموازنة المائية:** تُستخرج قِيم مركبات الميزان المائي من نموذج السيناريوهات المختلفة ولكل الطبقات المائية أو لأجزاء منها، بجمع قِيم كل مركبة في خلايا النموذج.

ويبين الشكل 2-3 ملخص مراحل بناء النماذج الرياضية للمياه الجوفية.

الشكل 2-3 مخطط العمل عند تطبيق النمذجة الرياضية في حل مسائل المياه الجوفية



المصدر: الإسكوا.

3

أثر التغيُّرات المناخية على المياه الجوفية

من الضروري تقدير تغيُّر مخزون المياه الجوفية بالاعتماد على النمذجة الرياضية وباستخدام نتائج النماذج المناخية الإقليمية، وذلك في ظل التغيُّرات المناخية الحاصلة والتوقعات بتزايد تكرار فترات الجفاف مستقبلاً، وخاصة في المنطقة العربية.

وتؤدي كميات الأمطار دوراً رئيسياً في تقدير كمية الراشح إلى المياه الجوفية. وهنا تبرز أهمية تقدير تغيُّر الراشح إلى المياه الجوفية من الهطولات المطرية المتوقعة في الفترة المستقبلية والمستخلصة من نتائج النمذجة المناخية.

1-3 تقدير قِيم الراشح (التغذية) إلى المياه الجوفية

يُقصد بمصطلح «الراشح» كمية تغذية المياه الجوفية، أي ما يصل إلى الطبقة المائية الجوفية، سواء من مياه الأمطار أو من أي مصدر مائي سطحي آخر (مثل مياه الري). ويُعَدُّ تقدير تغذية المياه الجوفية أمراً أساسياً لنماذج المياه الجوفية، وتحديداً لتقدير تغيُّر المخزون حسب السيناريوهات المناخية المختلفة من أجل إدارة المياه الجوفية على مستوى الأحواض إدارة سليمة.

1. العوامل المؤثّرة على تغذية المياه الجوفية

(أ) الهطول، ونظام توزّعه، ونوعه

يُعتبر الهطول بأشكاله المختلفة (مطر، ثلج، برَد...) مصدراً رئيسياً لتغذية المياه الجوفية. وتتأثر قيمة التغذية بكمية ونوعية وشدة الهطول. وتؤدي الهطولات الثلجية إلى قِيم تغذية أعلى عادة، نظراً إلى طول مدّة مكوث الثلج على سطح الأرض، إضافة إلى ضعف التبخر من سطح التربة. في المقابل، تؤدي الهطولات المطرية عالية الشدة (High rainfall intensity) إلى جريانات سطحية سريعة وانخفاض في تغذية المياه الجوفية.

(ب) مواصفات الطبقة غير المشبّعة

يمر الماء الراشح من سطح التربة عبر المنطقة غير المشبّعة قبل وصوله إلى سطح المياه الجوفية. لذلك، تؤدي مواصفات هذه الطبقة دوراً هاماً في تحديد كمية وزمن وصول الراشح (lag time) إلى طبقة المياه الجوفية. وتُعتبر النفوذية المائية غير المشبّعة $K(\theta)$ وسماكة الطبقة غير المشبّعة من أكثر العوامل تأثيراً. كذلك، تؤثّر الرطوبة المسبقة للتربة على نسبة الجريان السطحي وعلى كمية المياه الواصلة إلى الطبقة المائية الجوفية.

(ج) وجود جريان جوفي جانبي أو اتصال مع المياه السطحية

تتغذى الطبقات الجوفية أيضاً من المياه السطحية، مثل الأنهار والبحيرات. وتختلف قيمة هذه التغذية مكانياً وزمنياً حسب فرق المنسوب بين مناسيب المياه في الأنهار والبحيرات ومنسوب الطبقة الجوفية المجاورة، وحسب الناقلية المائية لسرير النهر أو البحيرة.

كذلك، قد تتغذى طبقة ما من جريان جوفي قادم نحوها من طبقة مائية مجاورة لها، وكذلك من الشروط الحدية لمنطقة الحوض المدروس، وهو ما يتعيّن التنبّه إليه قبل عملية النمذجة والتنبؤ.

(د) استخدامات الأراضي

يؤثّر استخدام الأراضي على كمية المياه الراشحة ونوعيتها. وتساعد الغابات والأحراج على التقليل من الراشح، لحجزها كميات كبيرة من مياه الامطار. كذلك، تخفّ كميات الراشح من الأمطار في المناطق الحضرية، مقابل زيادة كميات الراشح من شبكات تزويد المياه العذبة وشبكات الصرف الصحي.

2. الطرق المختلفة لتقدير الراشح إلى المياه الجوفية

(أ) الطرق المباشرة (Direct measurement)

تُعتبر طرق القياس المباشر من الطرق الدقيقة نسبياً، إذ تعتمد على تركيب جهاز لايزميتر (Lysimeter) في التربة لتقدير قيمة الجريان الراشح العميق (Deep Percolation) من أسفل منطقة الجذور عادة، والذي يقاس من خلال الجهاز ويمكن اعتباره مساوياً لقيمة تغذية المياه الجوفية. وإضافة إلى ارتفاع كلفتها، تتضمن مساوئ هذه الطريقة صعوبة التركيب، وصعوبة الحفاظ على التربة بدون تفكيك أو خلخلة. كما أنها تقدّم تقديراً نقطياً فقط للراشح (مكان وجود الجهاز).

(ب) قانون دارسي (Darcian approaches)

ينصّ قانون دارسي على أنه يمكن حساب جريان السوائل، مثل الراشح إلى المياه الجوفية، في حال كان كلّ من التدرج الهيدروليكي والناقلية المائية معروفاً. ويتم حساب الجريان باستخدام قانون دارسي في المنطقة غير المشبّعة وفقاً للمعادلة (1-3) (Perkins, K. and Nimmo J., 2006):

(1-3):

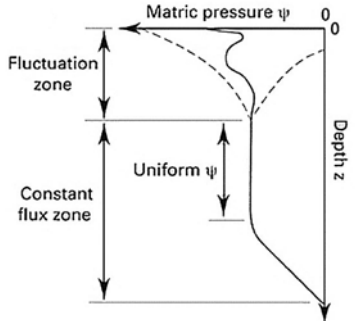
حيث: $q = -K(\theta)\,[d\psi/dz + 1]$

- q = معدل الجريان (T/L)؛
- K = الناقلية المائية (L/T)؛
- θ = محتوى الماء الحجمي بالتربة (بلا أبعاد)؛
- $d\psi/dz$ = التدرج الهيدروليكي [بلا أبعاد].

وباعتماد فرضية التدرج الهيدروليكي الواحدي (قيمة التدرج =1)، تكون قيمة الجهد المطبَّق على الراشح ثابتة مع العمق، أي أنّ ($d\psi/dz = 0$)، وتكون الجاذبية هي القوة المؤثرة الوحيدة على الراشح. لذلك، فإن الجريان (q) يساوي عددياً الناقلية المائية (K) للوسط عند المحتوى المائي في فاصل العمق الذي يكون فيه ($d\psi/dz = 0$)، أي عندما يكون محتوى الماء منتظماً (Uniform) مع العمق (الشكل 3-1). وإذا كانت قيمة (K) المقابلة لمحتوى الماء في الموقع معروفة، فيمكن اعتبار (K) على أنها معدل التغذية.

إنّ تطبيق طريقة دارسي في ظروف الجريان الثابت في المنطقة غير المشبّعة يمكن أن يعطي تقديراً جيداً للتغذية في مواقع محلية متنوّعة. وتوفّر هذه الطريقة معياراً للمقارنة بين المناطق الرطبة، حيث تكون بيانات الجريان مفيدة لتقدير التغذية، والمناطق الجافة التي لا تتوفر فيها بيانات كافية لتقدير التغذية.

الشكل 3-1 مخطط لحساب التغذية بالاعتماد على قانون دارسي



المصدر: Perkins K., Nimmo J., 2006.

وفي حال كان الجريان في ظل الظروف الحقلية ثابتاً ومتأثراً بالجاذبية وحدها، فوفقاً لقانون دارسي سيكون معدل الرشح نحو الأسفل مساوياً عددياً للناقلية المائية عند محتوى الماء المقاس في الموقع. وقد استُخدمت طريقة التدرج الواحدي لدارسي (Darcian unit-gradient method) في الأصل لتقدير متوسط معدلات التغذية الطويلة الأجل في المناطق القاحلة ذات النطاقات السميكة غير المشبّعة، حيث يُعتبر الجريان عند عمق محدّد ثابتاً ومدفوعاً بالجاذبية وحدها (Scanlon and others, 2002).

وقد تكون هذه الطريقة قابلة للتطبيق في بعض بيئات المناطق الضحلة، إذا كانت التغييرات في محتوى الماء طفيفة، أو إذا كان تغيُّر معدل التغذية قليلاً على مدار العام. وقد تَظهر هذه التغيُّرات بشكل موسمي، أو قد تكون متباينة بشكل متكرر.

(ج) نماذج المياه الجوفية، بما فيها تلك المعتمِدة على الذكاء الاصطناعي (Models, including AI methods)

تُستخدم النماذج الرياضية لحركة المياه الجوفية (بما فيها النماذج المعتمِدة على الذكاء الاصطناعي) أيضاً لتقدير قيمة

الراشح للمياه الجوفية وتوزّعه المكاني والزماني. وتعتمد دقة تنبؤات النموذج على دقة المعايرة، وعلى النجاح في التحقق من النموذج في تحديد تدفقات ومناسيب المياه الجوفية. وباعتبار أنّ تغذية المياه الجوفية مكوّن أساسي في نماذج المياه الجوفية، يجب أثناء المراجعة تقييم كيف تم تمثيل التغذية في نماذج المياه الجوفية وكيف تم تقديرها باستخدام نماذج المياه الجوفية.

(د) الطرائق النظائرية (Tracers)

تعتمد هذه الطرق على استخدام النظائر، حيث يتم استخدام المتتبعات البيئية والنظائر المستقرة والمشعّة (Isotopes and environmental tracers) الموجودة طبيعياً في المياه الجوفية لمعرفة المزيد عن منشأ المياه الجوفية ومعدّلات تجددها. ويُعتبر الكلوريد (Chloride) من أكثر المتتبعات المستخدمة، نظراً إلى توفره وتكلفته المنخفضة. ويتم تقدير الراشح اعتماداً على معادلات توازن الكتلة (Mass balance).

(هـ) الطرق التجريبية (Empirical methods)

يمكن تمييز حالتين: 1: علاقات تجريبية؛ 2: قِيم تجريبية متعلقة بنوع الصخور.

- **1: علاقات تجريبية:** تعتمد هذه الطرق على إيجاد علاقة تجريبية تربط بين كمية الهطول المطري وكمية الراشح إلى المياه الجوفية، بناءً على عدد من التجارب في أحواض مختلفة. وعلى الرغم من بساطة هذه الطرق وكثرة استخدامها، فهي ذات دقة غير موثوقة، ولا سيّما عند التنبؤ المستقبلي وعند حدوث أي تغيُّر فيزيائي في طبقة المياه الجوفية. وفيما يلي أمثلة عن بعض العلاقات التي توصّل إليها الباحثون في مناطق مختلفة من العالم (Walker, D. and others, 2018).

ويُظْهِرُ الشكل 3-2 العلاقة الناتجة من 102 حالة في 49 دراسة أجريت على أحواض مختلفة في إثيوبيا. وبيّنت نتائج هذه الدراسات العلاقة بين الراشح إلى المياه الجوفية والهطول المطري.

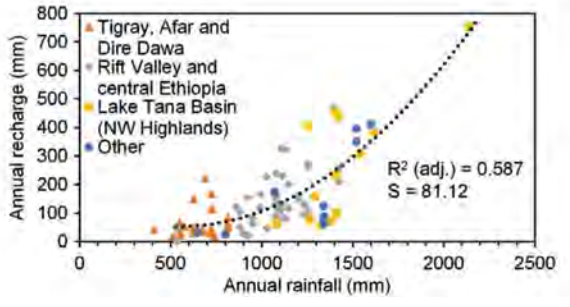
(3-2):

$$R=136.6-0.3005P+0.000271P^2$$

حيث:

- R= الراشح السنوي للمياه الجوفية (التغذية) (مم)؛
- وP= الهطول المطري السنوي (مم).

الشكل 3-2 كمية الراشح إلى المياه الجوفية مقابل كمية الهطول المطري، بناءً على عدد من التجارب في أحواض مختلفة في إثيوبيا



المصدر: Walker, D. and others, 2018.

- طوّر الباحث كريشنا راو في عام 1970 علاقة تجريبية لتحديد كمية الراشح إلى المياه الجوفية في مناطق مناخية ذات هطول متجانس (العلاقة 3-3). وبتطبيق هذه العلاقة على المعدلات المختلفة للهطول السنوي، حصل الباحث على العلاقات المبيّنة في الجدول 3-1 (Krishna Rao, P.R.,1970):

(3-3): $R= K(P-X)$

حيث:

- R= الراشح السنوي للمياه الجوفية (مم)؛
- P= الهطول المطري السنوي (مم)؛
- K,X= ثابتتان تتعلقان بالمنطقة المناخية من حيث كمية الهطول المطري.

الجدول 3-1 العلاقات الناتجة من دراسة كريشنا راو لحساب كميات الراشح من الهاطل المطري

للمناطق ذات الأمطار السنوية بين 400 و600 مم	R = 0.20 (P - 400)
للمناطق ذات الأمطار السنوية بين 600 و1,000 مم	R = 0.25 (P - 400)
للمناطق التي يزيد فيها الهاطل المطري السنوي عن 2,000 مم	R = 0.35 (P - 600)

المصدر: Krishna Rao, P.R., 1970.

مثلاً، بالنسبة لمنطقة «غوانا تانا/إثيوبيا»، التي يبلغ معدل هطول الأمطار السنوي فيها 1,399.8 مم، تكون معادلة التغذية على الشكل التالي: **R = 0.3 (P – 500)**.

- طوّر ماكسي وإيكِن (1949) علاقة تجريبية (3-4) بين متوسط هطول الأمطار السنوي للأحواض الجوفية الفرعية والراشح إلى المياه الجوفية من الأمطار، مع أخذ التبخر وجريان المياه السطحية في الاعتبار (Andualem T.G. and others, 2021).

(3-4): **R=P*a**

حيث:

- R= الراشح/التغذية السنوية (مم)؛
- P= الهاطل المطري السنوي (مم)؛
- a= نسبة مئوية.

كذلك، استُخدم مفهوم معامل التغذية (Recharge coefficient)، الذي يعرَّف كنسبة التغذية إلى هطول الأمطار الفعّال (نسبة مئوية). ويكون هطول الأمطار فعّالاً عندما يساهم في تغذية طبقات المياه الجوفية (Andualem T.G. and others, 2021)، ويُحسَب معامل التغذية كما في العلاقة (3-5).

(3-5): $R_{Coeff} = R/P_e$

حيث:

- RCoeff = معامل التغذية؛
- R= التغذية؛
- Pe = الهطول الفعّال.

ويبيّن الجدول 3-2 بعض العلاقات التجريبية التي خلُص إليها الباحثون في منطقة «غوانا تانا/إثيوبيا».

الجدول 3-2 بعض العلاقات التجريبية لحساب كميات الراشح من كميات الأمطار في منطقة غوانا تانا/إثيوبيا

حساب كميات الراشح من كميات الأمطار المسجلة			
الرقم	إسم المعادلة	المعادلة	تعريف نطاق قيمة المعلمة والمعامل
1	معادلة Chaturvedi (بالبوصة) (Chaturvedi, 1973)	$R = 2.0(P - 15)^{0.4}$	P = هطول الأمطار السنوي (بوصة)
2	معادلتي Chaturvedi المعدلتين (بالبوصة) (Kumar and Seethapathi, 2002)	$R = 1.35(P - 14)^{0.5}$	P = هطول الأمطار السنوي (بوصة)
3	علاقة كريشنا راو (مم) (Krishna Rao, 1970)	R = 0.30 (P - 500)	P = هطول الأمطار السنوي (بوصة)
4	طريقة Maxey-Eakin (1949) (بالمليمتر)	R = P*a	P = هطول الأمطار السنوي (بوصة)، a= 20 %
5	معادلة بريدنكامب وآخرون (1995) (بالمليمتر)	R = 0.32 (MAP - 360)	MAP = متوسط هطول الأمطار السنوي

المصدر: Andualem T.G. and others, 2021.

المثال 1: حساب قِيم الراشح بالاعتماد على علاقات تجريبية متنوّعة في شمال غرب إثيوبيا

يتضمن الجدول (3-3) معدل الهطول المطري السنوي، الذي يبلغ 1,399.8 مم في منطقة غوانا تانا في إثيوبيا (Andualem T.G. and others, 2021).

- **المطلوب:** حساب كمية الراشح إلى المياه الجوفية، وذلك بتطبيق العلاقات المذكورة في الجدول 3-2، وحساب متوسط التغذية ومعامل التغذية.

- **الحل:** تم تطبيق مباشر للعلاقات المذكورة في الجدول 3-2 باستخدام برنامج Excel، وجاءت النتائج كما في الجدول (3-3).

2: قِيم تجريبية حسب نوع التكشّفات الصخرية:

تضمنت معايير لجنة تقييم المياه الجوفية (Ground-water Estimation Committee Norms) في عام 1987 معايير مخصّصة لتقدير كمية التغذية الراشحة من مياه الأمطار على النحو التالي (Andualem T.G. and others, 2021):

- التكشّفات الغرينية (Alluvial): يمكن اعتبار أن التغذية تبلغ 20-25 في المائة من الأمطار في المناطق الرملية، و10-20 في المائة في المناطق ذات المحتوى الطيني العالي (أكثر من 40 في المائة من الطين).
- الأحجار الرملية متوسطة القساوة (Semi-consolidated sandstones): يمكن اعتبار أنّ التغذية تبلغ 10-15 في المائة من كميات الأمطار.
- مناطق الصخور الصلبة (Hard rock areas): الاطّلاع على التغذية في الجدول 3-4.

ويمكن استخدام هذه القِيم للاسترشاد فقط، حيث إنّها تتباين إلى حد بعيد حسب نوع الهطول ودرجة وكثافة تشقق الصخور ودرجة الحرارة وعوامل أخرى.

الجدول 3-3 حساب التغذية بتطبيق علاقات تجريبية مختلفة في منطقة غوانا تانا

الرقم	إسم المعادلة	هطول الأمطار (مم/سنة)	هطول الأمطار (بوصة/سنة)	الراشح (بوصة/سنة)	الراشح (مم)	عامل التغذية
1	معادلة Chaturvedi (بالبوصة) (Chaturvedi, 1973)	1,399.8	55.11	8.76	222.42	0.16
2	معادلة Chaturvedi المعدلة (بالبوصة) (Kumar and Seethapathi, 2002)	1,399.8	55.11	8.66	219.86	0.16
3	علاقة كريشنا راو (مم) (Krishna Rao, 1970)	1,399.8			269.94	0.19
4	طريقة ماكسي إيكين (1949)(بالمليمتر)	1,399.8			279.96	0.20
5	معادلة بريدنكامب وآخرون (1995) (بالمليمتر)	1,399.8			332.74	0.24
	المعدل				264.98	0.19

المصدر: Andualem T.G. and others, 2021.

الجدول 3-4 النسب المئوية لحساب التغذية من الأمطار بناءً على معايير لجنة تقدير المياه الجوفية للصخور الصلبة

التكشّفات الجرانيتية: للصخور المجواة والمشققة، 10-15 في المائة من الأمطار
للصخور غير المجواة: 5-10 في المائة من الأمطار
التضاريس البازلتية: 10-15 في المائة من الأمطار
البازلت المجوى: 4-10 في المائة من الأمطار

المصدر: Andualem T.G. and others, 2021.

المثال 2: حساب قيمة التغذية، مع أخذ نوع التكشّفات الصخرية في الاعتبار، باستخدام معايير لجنة تقدير المياه الجوفية في منطقة The Guna Tana landscape، إثيوبيا

يحتوي الجدول 3-5 على حقل المساحة (كم^2)، ويشمل مساحة التكشّفات الصخرية المختلفة ضمن منطقة الدراسة؛ وحقل الأمطار (مم) من المحطات المناخية؛ وحقل نسبة الراشح من الأمطار (Per cent of rainfall recharged) الموافق لكل نوع من الصخور – محسوب بطرق تجريبية متنوّعة.

المطلوب: حساب قيمة التغذية (بالميليمتر) الموافقة لكل نوع من التكشّفات الصخرية حسب نسبة التغذية من الأمطار والمساحة الخاصة بكل تكشف، ثم حساب إجمالي التغذية في منطقة الدراسة.

الحل:

- يتم حساب نسبة تكشّف كل نوع من الصخور بالنسبة للمساحة الكلية لمنطقة الدراسة (Area- Percentage).
- يتم حساب كمية الراشح لكل تكشّف صخري وفقاً للنسبة الموافقة له من الأمطار (Recharge as percentage of rainfall).
- يتم حساب كمية التغذية لكل تكشّف، مع أخذ مساحة التكشّف ونسبته إلى المساحة الكلية بعد تحويله إلى مم في الاعتبار.
- يتم حساب التغذية الكلية (Total) بجمع كل قِيم التغذية من التكشّفات الصخرية المختلفة.

تم انجاز الحسابات باستخدام Excel وجاءت النتائج كما في الجدول 3-5 (المخرج).

الجدول 3-5 مثال على حساب قيمة التغذية اعتماداً على التغذية الموافقة لكل نوع من التكشّفات الصخرية وفقاً لمعايير لجنة تقييم المياه الجوفية في منطقة «غوانا تانا/إثيوبيا»

الرقم	ليثولوجيا	المدخل				المخرج	
		المساحة		النسبة المئوية للتغذية من الأمطار	هطول الأمطار (مم)	الراشح كنسبة مئوية من هطول الأمطار	الراشح (مم)
		كم^2	النسبة المئويه				
1	تكشّف البازلت والبيروكلاست	16.66	0.47	10	1,246	124.6	0.59
2	رواسب اللاكوسترين الرباعية	859.56	24.31	20	1,358	271.6	66.04
3	البازلت العلوي والتراكيت	526.76	14.90	12	1,215	145.8	21.72
4	تراكيت	7.23	0.20	10	1,473	147.3	0.30
5	البازلت العلوي والبيروكلاست	17.63	0.50	10	1,430	143	0.71
6	تراكيت	29.05	0.82	8	1,430	114.4	0.94
7	الطف	224.75	6.36	10	1,430	143	9.09
8	البراكين الرباعية	132.44	3.75	10	1,461	146.1	5.47
9	تدفقات البازلت الأوسط	570.09	16.13	10	1,438	143.8	23.19
10	بازلت وتراكست	1,151.26	32.56	15	1,417	212.6	69.21
المجموع		**3,535.43**	**100.00**				**197.27**

المصدر: Andualem T.G. and others, 2021.

(و) طريقة قياس تذبذب منسوب المياه الجوفية (Water Table Fluctuation)

تُعتبر طريقة قياس تذبذب منسوب المياه الجوفية من أكثر الطرق شيوعاً، نظراً إلى سهولة استخدامها واعتمادها إلى عدد محدود من البيانات (لا سيّما تغيُّر منسوب المياه الجوفية وكميات الهطول المطري). وتعتمد هذه الطريقة على تحليل تغيُّرات منسوب المياه في آبار المراقبة، وتقوم على افتراض أن ارتفاع منسوب المياه الجوفية المقاس في الآبار ناتج عن التغذية من الهطول المطري، أي أن الارتفاع في مستوى المياه الجوفية في الخزان الجوفي غير المحصور يرجع فقط إلى تغذية المياه التي تصل إلى منسوب المياه الجوفية. ويتم تقدير الراشح R للمياه الجوفية في هذه الطريقة بالاعتماد على العلاقة (3-6).

$R = S_y * \Delta H/\Delta t$:(3-6)

حيث:

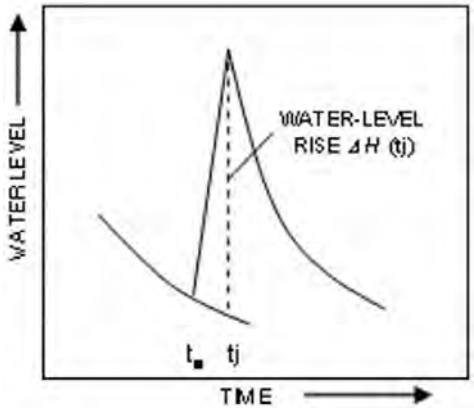
- R= الراشح إلى المياه الجوفية (مم/السنة)؛
- S_Y= المعطائية النوعية (Specific Yield)؛
- H= منسوب المياه الجوفية (م)؛
- t= الزمن (السنة).

يمكن ضرب قيمة الراشح R الناتج من المعادلة (3-6) بمساحة الحوض للتوصل إلى كمية التغذية الكلية للحوض المدروس (الحجم/الزمن).

لتقدير قيمة ΔH، من الضروري استقراء المنحنى الذي يعبّر عن تغيُّر المنسوب مقابل الزمن في الشكل 3-3، وتمديده إلى النقطة الواقعة أسفل القمة والتي تعبِّر عن أعلى منسوب تصل إليه المياه في حال التغذية المستمرة. وتكون قِيم الارتفاع الناتج عن التغذية ΔH هي المسافة الشاقولية من القمة إلى نقطة تقاطع الشاقول مع المنحنى.

على الرغم من بساطة هذه الطريقة من الناحية النظرية، فإن بعض الافتراضات الرئيسية المتأصلة فيها لها تأثير كبير على تطبيقها الناجح: (1) يمثل مخطط هيدروغراف البئر المرصود التقلبات الطبيعية في منسوب المياه الجوفية الناتجة عن تغذية المياه الجوفية وتصريفها فقط؛ (2) قيمة S_Y معروفة وثابتة خلال الفترة الزمنية لتقلبات منسوب المياه الجوفية؛ (3) يمكن استقراء انحسار مستوى المياه لما ما بعد التغذية لتحديد ΔH.

الشكل 3-3 طريقة تذبذب مناسيب المياه الجوفية لتقدير تغذية المياه الجوفية



المصدر: USGS, n.d.

يتم تطبيق طريقة تذبذب مناسيب المياه الجوفية بشكل أفضل على طبقات المياه الجوفية الحرة ذات مناسيب المياه الضحلة التي تُظْهِرُ ارتفاعات وانخفاضات حادة. ولكن، من شروط نجاح هذه الطريقة التأكد من أن تغيُّرات منسوب المياه ترجع بالفعل إلى التغذية التي تصل إلى المياه الجوفية. فهذه الطريقة قادرة فقط على تقدير التغذية عندما يصل الماء إلى منسوب المياه الجوفية وبمعدل أكبر من حجم الماء المستنزف بسبب حركة المياه الجوفية خارج الحوض. فقد يبدو أحياناً أن منحنى تغيُّر المنسوب مع الزمن آخذ بالانخفاض وأن التغذية مستمرة، أي قد لا يكون التجاوب بين ارتفاع المنسوب والتغذية مباشراً. ويعود ذلك إلى أن معدل التغذية قد يكون أقل من معدل حركة المياه الجوفية، مما يؤدي إلى استنزاف المخزون وبالتالي إلى انخفاض المنسوب بدلاً من ارتفاعه.

المثال 3: حساب التغذية بطريقة تذبذب منسوب المياه الجوفية

يحتوي الجدول 3-6 على مناسيب المياه الجوفية لسنتين متتاليتين، ومعدل هطول الأمطار السنوي (110 مم/السنة).

- **المطلوب:** حساب تغذية المياه الجوفية من الأمطار بطريقة تذبذب منسوب المياه الجوفية، وذلك باستخدام قيمة المعطائية النوعية التي تساوي 0.02.

- **الحل:** يتم حساب التغذية بطريقة تذبذب مناسيب المياه الجوفية في Excel، على النحو التالي:

- إعداد مخطط نقاط التبعثر (Scatter) لتبيان تغيُّر المنسوب مع الزمن.
- رسم خط منحنٍ يلامس النقاط المعبِّرة عن تغيُّر المنسوب في منحنى الهبوط، ومدّه حتى تقع نهايته تحت الذروة التالية التي تعبِّر عن أعلى منسوب.
- رسم خط مستقيم شاقولي من الذروة يتقاطع مع المنحنى. وتحسب قيمة التغيُّر (Δh) على طول الخط المستقيم الشاقولي.
- توضع قيمة (Δh) بالمعادلة الرياضية التي تأخذ المعطائية النوعية في الاعتبار.
- حساب التغذية الناتجة من المعادلة خلال فترة زمنية (سنة واحدة كما هو مبيّن في هذا المثال) بالمتر.
- تحويل قِيم التغذية إلى مم وقسمتها على مجموع الهاطل المطري السنوي (110 مم في هذا المثال)، للحصول على نسبة مئوية تعبِّر عن كميات التغذية من الأمطار.

الجدول 3-6 مناسيب مستوى المياه الجوفية في أحد آبار المراقبة

التاريخ	المستوى (م)	التاريخ	المستوى (م)
3/1/2010	-	3/1/2011	8.32
4/1/2010	8.32	4/1/2011	8.36
5/1/2010	8.27	5/1/2011	8.38
6/1/2010	8.22	6/1/2011	8.39
7/1/2010	8.18	7/1/2011	8.38
8/1/2010	8.14	8/1/2011	8.34
9/1/2010	8.11	9/1/2011	8.25
10/1/2010	8.1	10/1/2011	8.2
11/1/2010	8.13	11/1/2011	8.1
12/1/2010	8.17	12/1/2011	8.08
1/1/2011	8.2	1/1/2012	8.15
2/1/2011	8.26	2/1/2012	8.3

المصدر: Krautstrunk, Melanie Lynn, 2012.

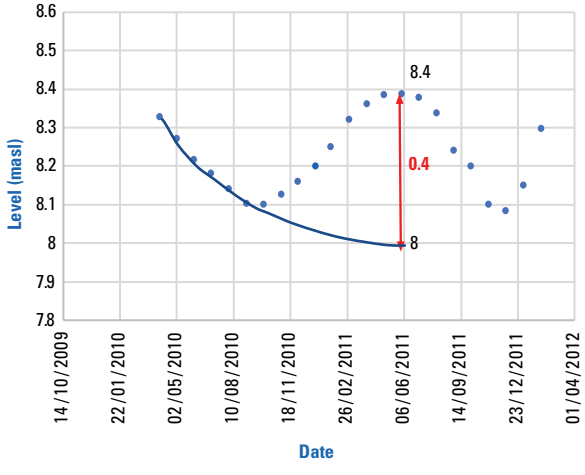
تم استخدام Excel لتطبيق طريقة تذبذب المياه الجوفية في حساب التغذية، وبلغت القيمة Δh=0.4 m كما في الشكل 3-4.

وتكون قيمة التغذية حسب العلاقة (3-6) كالتالي:

- R= 0.02* 0.4= 008 m= 8 mm

أي حوالي 7.3 في المائة من الهطول المطري السنوي (110).

الشكل 3-4 مثال على حساب التغذية بالاعتماد على طريقة تذبذب منسوب المياه الجوفية في حوض نهر ناغوبو/غانا



المصدر: Krautstrunk, Melanie Lynn, 2012.

3. مناقشة

على الرغم من المنهجيات المتعددة المستخدمة لتقدير التغذية، لا تزال عملية التقدير معقّدة. ويمثّل التقدير تحدياً كبيراً بفعل العوامل الطبيعية وتك الناجمة عن الإنسان، مثل الاتصال الهيدروليكي بين المياه السطحية والجوفية وخصائص التربة، وعدم التجانس الجيولوجي، والميول الطوبوغرافية، واستخدامات الأراضي، والغطاء الأرضي، وتغيُّر المناخ، والعوامل البشرية، وما إلى ذلك. كما تؤثر خبرة الباحث ومدى توفر المطلوب من البيانات على طريقة التقدير المستخدمة.

وبشكل عام، يجب أن يُسترشد، عند اختيار طريقة تقدير التغذية، بأهداف الدراسة والبيانات المتاحة وإمكانيات الحصول على البيانات المساعدة. لذلك، من المفيد العمل قدر الإمكان على تطبيق طرق تقدير متعددة للوصول إلى نتائج موثوقة إلى حد ما.

وبعد اعتماد العلاقة المناسبة لحساب التغذية من الأمطار أو حساب النسبة المئوية المعبِّرة عن كميات التغذية من الأمطار، يتم تطبيقها على البيانات المطرية المستخرجة من المحطات المناخية للفترات المستقبلية وفقاً للنموذج المناخي المعتمد. وتُستخدم كميات التغذية الناتجة في النموذج الرياضي للتنبؤ بالحالة المستقبلية للتخزين ووضع مناسيب المياه الجوفية.

4. إيجاد العلاقة بين كميات التغذية والأمطار بناءً على البيانات المتاحة لعدة سنوات

إذا كانت التغذية (المحدّدة بواسطة إحدى الطرق المذكورة في الفقرة السابقة) وكميات الهاطل المطري معروفة لعدة سنوات في حوض ما، يمكن اشتقاق علاقة تجريبية بين التغذية وهطول الأمطار. ويمكن استخدام العلاقة الناتجة

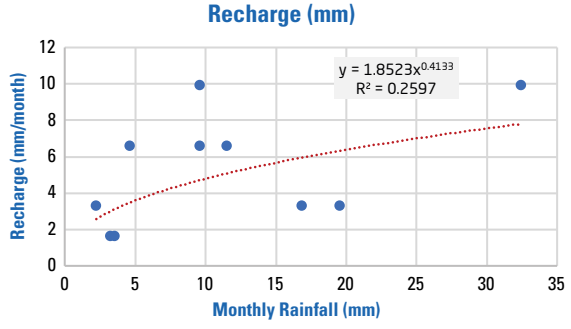
لتقدير قيمة تغذية المياه الجوفية من الأمطار المتوقعة خلال الفترة المستقبلية، والتي يتم الحصول عليها من نتائج النماذج المناخية.

ويُستفاد من التغذية المحسوبة من هذه العلاقة في تشغيل النماذج الرياضية للمياه الجوفية من أجل فترة التنبؤ المستقبلية، أخذاً بالاعتبار كمية الراشح من الأمطار المستقبلية الناتجة من النماذج المناخية. والهدف هو تقدير المخزون المائي الجوفي بالحوض المطلوب، والتنبؤ بالوضع المائي المستقبلي، ومراقبة تأثير تغيُّر كميات الهاطل المطري على مخزون الطبقة الجوفية في ظل التغيُّرات المناخية. غير أنّ **دقة البيانات المقدّرة تتوقف على دقة البيانات المتوفرة وعلى طول مدة السجل الزمني المتاح.**

المثال 4: إيجاد العلاقة بين كميات التغذية والأمطار بناءً على البيانات المتاحة لعدة سنوات – منطقة دراسية صحراوية

يبيّن الجدول 3-7 كميات الأمطار الشهرية خلال الفترة (2014-2017)، وكميات التغذية المقابلة لها محسوبة بطريقة تذبذب منسوب المياه الجوفية.

الشكل 3-5 العلاقة بين قِيم التغذية الشهرية ومعدل الأمطار الشهري في منطقة الدراسة



المصدر: الإسكوا، 2022.

- **المطلوب:** إيجاد العلاقة بين الأمطار المقاسة والتغذية المحسوبة، لاستخدامها في حساب كميات التغذية الشهرية بناءً على كميات الأمطار الناتجة من النماذج المناخية، لإدراجها في النموذج الرياضي وتشغيله للتنبؤ بالوضع المائي المستقبلي في الحوض المطلوب.

- **الحل:** أُدرجت بيانات التغذية والأمطار الشهرية المقاسة من الجدول 3-7 في برنامج Excel، وتم توليد عدة علاقات (خطية ولوغاريتمية وأسية). وكانت أفضل نتيجة في العلاقة الأسية (3-7) المبيّنة في الشكل 3-5.

$$y = 1.0609\ x^{0.6994} \quad (3\text{-}7)$$

حيث:

- X = الأمطار الشهرية (مم)؛
- Y = قِيم التغذية (مم).

الجدول 3-7 كميات الأمطار الشهرية والتغذية الشهرية الموافقة لها في منطقة الدراسة

السنة	الشهر	هطول الأمطار (مم)	الراشح (مم)	السنة	الشهر	هطول الأمطار (مم)	الراشح (مم)
2014	تشرين الأول/أكتوبر	11.5	6.6	2015	كانون الأول/ديسمبر	32.4	9.9
2014	تشرين الثاني/نوفمبر	9.6	9.9	2016	أيار/مايو	2.2	3.3
2015	كانون الثاني/يناير	3.5	1.65	2017	كانون الثاني/يناير	9.6	6.6
2015	شباط/فبراير	3.2	1.65	2017	شباط/فبراير	4.6	6.6
2015	تشرين الأول/أكتوبر	19.5	3.3	2017	آذار/مارس	16.8	3.3

المصدر: الإسكوا، 2022.

4

تقييم أثر التغيُّرات المناخية على المياه الجوفية (دراسة حالة)

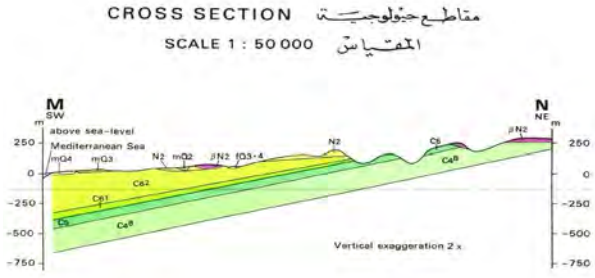
1-4 المعطيات

تقع منطقة الدراسة في سهل ساحلي (الشكل 4-1). وتغطي المنطقة طبقة رسوبات رباعية كونغلوميراتية غير متماسكة ذات ملاط غضاري (الشكل 4-2)، تتفاوت سماكتها بين عدة أمتار وأكثر من 150 متراً، وتتميّز بنفوذية متوسطة إلى عالية. وتلي الطبقة الكونغلوميراتية تجمعات من الحجر الكلسي الدولوميتي تعود إلى الجوراسي والكريتاسي. وتتكشّف هذه التوضعات بالجهة الشرقية من منطقة الدراسة. وتتراوح مناسيب سطح الأرض بين صفر عند سطح البحر غرباً، و30م فوق سطح البحر شرقاً. وتبلغ مساحة منطقة الدراسة حوالي 4 كم^2. وتشهد المنطقة نشاطاً زراعياً مكثّفاً، وهي تعتمد على مياه الأمطار شتاءً مع الري التكميلي، وعلى مياه الآبار للري صيفاً. ويبلغ متوسط الهطول المطري في منطقة الدراسة حوالي 415 مم/سنة.

الشكل 4-1 موقع منطقة الدراسة

المصدر: غروزغيبر وفودخوز، 1979.

الشكل 4-2 مقطع جيولوجي في منطقة الدراسة



المصدر: غروزغيبر وفودخوز، 1979.

2-4 خطوات تقييم أثر التغيُّرات المناخية على المياه الجوفية في منطقة الدراسة

1. تجهيز النموذج الاعتباري (conceptual model)

يوجد في منطقة الدراسة حامل مائي واحد حر (غير مضغوط)، وهو يتمثل في طبقة واحدة سماكتها حوالي 50 متراً. ويشكل البحر الحد الغربي للنموذج، وهو حد ضاغط ثابت يساوي صفراً. كما أن الحد الشمالي الشرقي هو حد ضاغط محدّد متغيّر مع الوقت (CHD Time Variant Specified Head)، حيث يكون المنسوب حوالي 7.8-8 أمتار بتغذية جوفية جانبية من الطبقات المحاذية. أما بقية حدود النموذج، فهي حدود عدم جريان (no flow boundary).

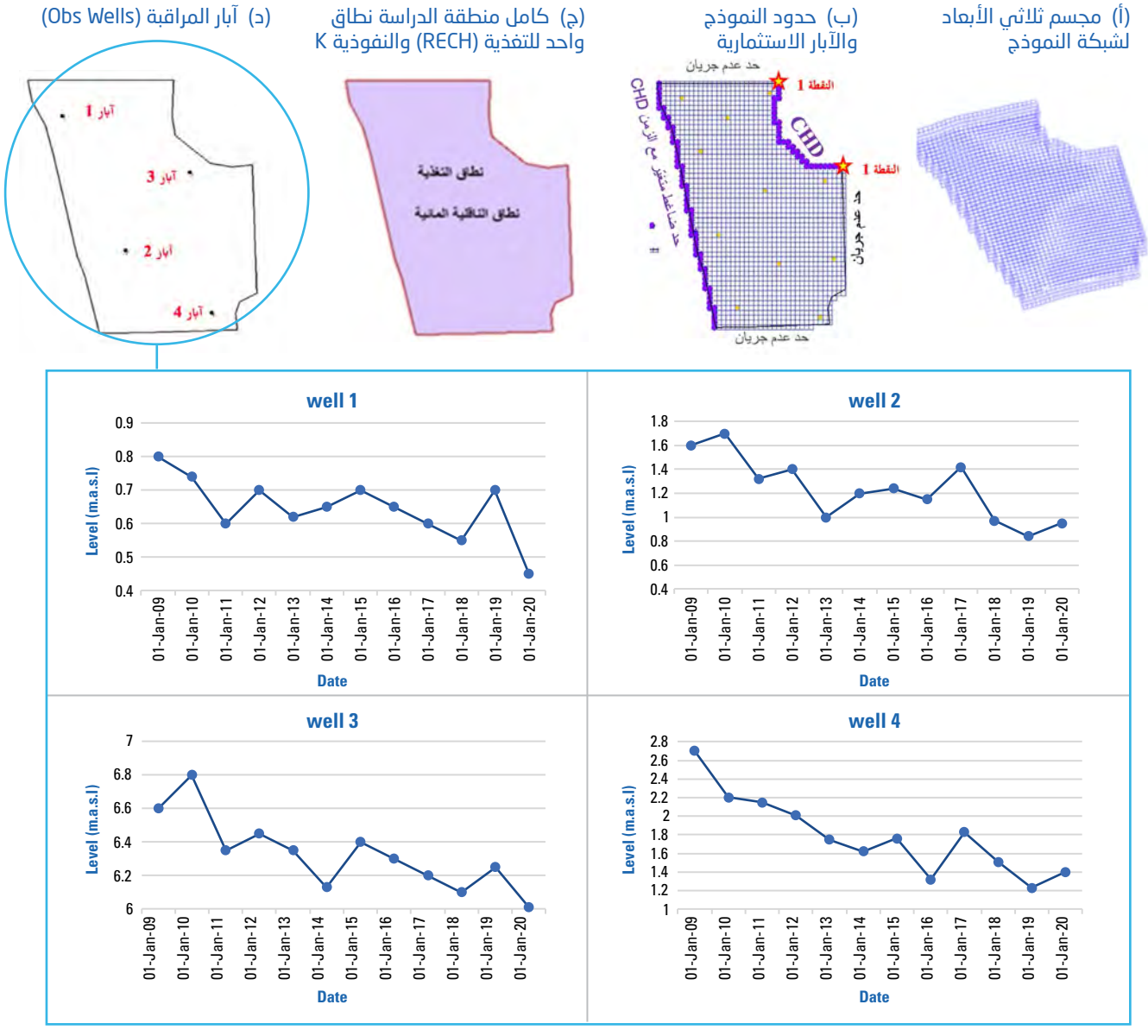
وضمن منطقة الدراسة، الطبقة متجانسة وذات نفاذية متوسطة إلى عالية. وتبلغ قيمة النفوذية المائية K (Hydraulic conductivity)، بعد المعايرة، 5 م/يوم وقيمة المعطائية المائية (Specific yield) 0.15.

ويتغذى الحامل المائي من الراشح من مياه الأمطار والراشح من مياه الري والجريان الجانبي من الحد الشمالي الشرقي الذي يمكن أن يكون مصدراً لتغذية

الحامل المائي أو للصرف من الحامل المائي، حسب قيمة الضاغط المحسوب ضمن خلايا النموذج في جوار الحد الشمالي الشرقي.

وتُصرف المياه من الحامل المائي بالجريان باتجاه الحد الغربي إلى البحر ومن خلال الضخ من الآبار الاستثمارية، حيث يوجد ضمن منطقة الدراسة 11 بئراً استثمارياً بأعماق تتراوح بين 30 م و40 م، وسُجلت فيها المناسيب من متر واحد عن سطح البحر (بالقرب من حدود البحر) إلى 8 أمتار في الجهة الشرقية من النموذج (الشكل 4-3). وتُستخدم هذه الآبار للري والاستخدامات المنزلية على مدار العام. وبلغت كمية الضخ من كل بئر 100 م³/اليوم عام 2009 (في حالة الثبات)، وازدادت خطياً خلال فترة عدم الثبات (2009-2020) حتى بلغت 155 م³/اليوم عام 2020.

الشكل 4-3 النموذج الاعتباري وآبار المراقبة



المصدر: الإسكوا وأكساد.

2. تقدير قِيم الراشح

طُبِّقت طريقة تذبذب منسوب المياه الجوفية بناءً على البيانات الشهرية لمنسوب المياه الجوفية في بئر المراقبة الموجود خارج منطقة النموذج في الجهة الشمالية الشرقية، وتم ربط هذه البيانات ببيانات الهطول المطري لمدة 18 شهراً (آذار/مارس 2009 – أيلول/سبتمبر 2010) من المحطة المناخية شمال شرق النموذج. وبلغت قيمة Δh 0.7 تقريباً (الشكل 4-4). واستُخدمت البيانات المسجّلة في هذا البئر لأنها بيانات شهرية لتغيُّر منسوب المياه الجوفية، ويمكن اعتبارها ناتجة عن التغذية من الراشح من مياه الأمطار بشكل رئيسي، وذلك نظراً إلى ضعف النشاط الزراعي في المنطقة المجاورة للبئر.

وباستخدام قيمة المعطائية النوعية البالغة 0.15، ومعدل هطول الأمطار السنوي في تلك الفترة البالغ 622 مم، تم حساب قيمة التغذية التي بلغت حسب العلاقة (3-6):

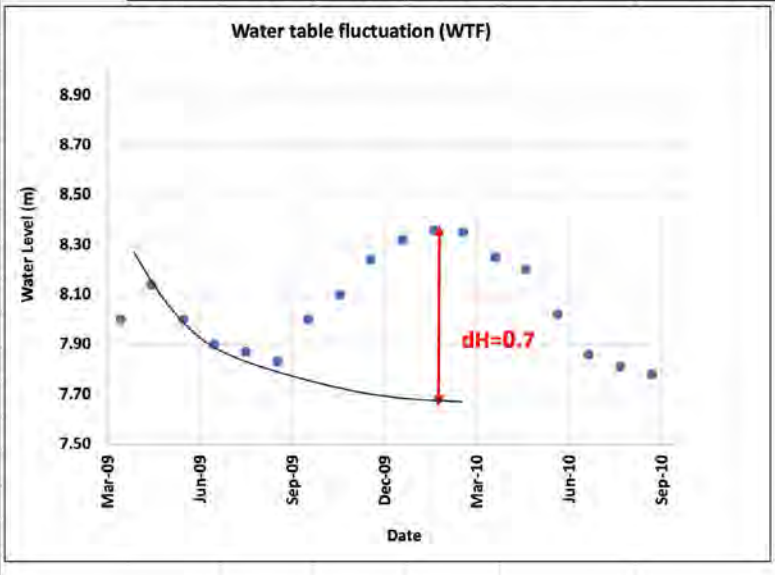
- R=0.7*0.15=0.105 m = 105 mm/y

أي حوالي 88.61 في المائة من كمية الأمطار.

الشكل 4-4 تقدير قِيم الراشح في منطقة الدراسة باستخدام طريقة تذبذب مستوى المياه الجوفية في بئر المراقبة

Dh	Sy	Rm	Rmm	annual Prec (mm)	percentage %
0.7	0.15	0.1050	105	622	16.88

Month	monthly Prec(mm)	Level (m)
31/03/2009	2.7	8.00
30/04/2009	11.1	8.14
31/05/2009	7.6	8.00
30/06/2009	21.9	7.90
31/07/2009	0.3	7.87
31/08/2009	3.1	7.83
30/09/2009	17.2	8.00
31/10/2009	68.5	8.10
30/11/2009	44.7	8.24
31/12/2009	199.3	8.32
31/01/2010	194.4	8.36
28/02/2010	46.4	8.35
31/03/2010	7.0	8.25
30/04/2010	113.8	8.20
31/05/2010	15.8	8.02
30/06/2010	18.3	7.86
31/07/2010	0.4	7.81
31/08/2010	1.3	7.78
30/09/2010	27.3	8.05
31/10/2010	47.3	8.10
30/11/2010	63.7	8.11
31/12/2010	2.1	8.20
المعدل السنوي	622	Apr 2009 - Mar 2010

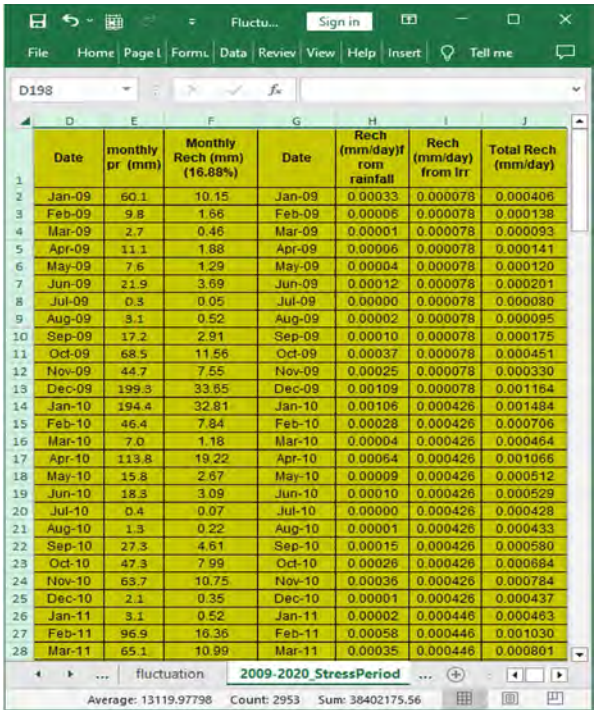


المصدر: الإسكوا وأكساد.

في حال توفر بيانات عن الهطولات المطرية ومناسيب المياه الجوفية لفترات أطول، يمكن تحديد التغذية في كل فترة هطول حسب الطريقة السابقة، ثم إيجاد علاقة بين الهطولات والتغذية (كما هو مبيّن في الفقرة 4). غير أنه نظراً إلى عدم توفر قياسات أخرى، استُخدمت هذه النسبة في حساب كميات التغذية الشهرية لفترة المعايرة من عام 2009 حتى عام 2020 كتبسيط، باعتبار أنّ التغذية لا تتعلق فقط بكمية الهطول، بل أيضاً بنمط توزّعه (Pattern) المكاني والزماني، ونوعه (ثلجي، مطري...)، وتغيُّر الغطاء النباتي، وتطوّر استخدام الأراضي. كما استُخدمت هذه النسبة في حساب التغذية اليومية لإدراجها في النموذج الرياضي المتعلق بالفترات المستقبلية (2070-2021).

أمّا المكوّن الآخر للتغذية، فهو الراجع من مياه الري. وقد قُدّرت نسبته بحوالي 25 في المائة من كمية مياه الري، وتم حسابه وتوزيعه بشكل منتظم على كامل العام. وإنّ اضافة الراشح من مياه الأمطار إلى الراشح من مياه الري تعطي كمية الراشح الكليّة، كما هو مبيّن في الشكل 4-5.

الشكل 4-5 حساب قِيم الراشح من مياه المطر ورواجع مياه الري في منطقة الدراسة



Date	monthly pr (mm)	Monthly Rech (mm) (16.88%)	Date	Rech (mm/day)from rainfall	Rech (mm/day) from Irr	Total Rech (mm/day)
Jan-09	60.1	10.15	Jan-09	0.00033	0.000078	0.000406
Feb-09	9.8	1.66	Feb-09	0.00006	0.000078	0.000138
Mar-09	2.7	0.46	Mar-09	0.00001	0.000078	0.000093
Apr-09	11.1	1.88	Apr-09	0.00006	0.000078	0.000141
May-09	7.6	1.29	May-09	0.00004	0.000078	0.000120
Jun-09	21.9	3.69	Jun-09	0.00012	0.000078	0.000201
Jul-09	0.3	0.05	Jul-09	0.00000	0.000078	0.000080
Aug-09	3.1	0.52	Aug-09	0.00002	0.000078	0.000095
Sep-09	17.2	2.91	Sep-09	0.00010	0.000078	0.000175
Oct-09	68.5	11.56	Oct-09	0.00037	0.000078	0.000451
Nov-09	44.7	7.55	Nov-09	0.00025	0.000078	0.000330
Dec-09	199.3	33.65	Dec-09	0.00109	0.000078	0.001164
Jan-10	194.4	32.81	Jan-10	0.00106	0.000426	0.001484
Feb-10	46.4	7.84	Feb-10	0.00028	0.000426	0.000706
Mar-10	7.0	1.18	Mar-10	0.00004	0.000426	0.000464
Apr-10	113.8	19.22	Apr-10	0.00064	0.000426	0.001066
May-10	15.8	2.67	May-10	0.00009	0.000426	0.000512
Jun-10	18.3	3.09	Jun-10	0.00010	0.000426	0.000529
Jul-10	0.4	0.07	Jul-10	0.00000	0.000426	0.000428
Aug-10	1.3	0.22	Aug-10	0.00001	0.000426	0.000433
Sep-10	27.3	4.61	Sep-10	0.00015	0.000426	0.000580
Oct-10	47.3	7.99	Oct-10	0.00026	0.000426	0.000684
Nov-10	63.7	10.75	Nov-10	0.00036	0.000426	0.000784
Dec-10	2.1	0.35	Dec-10	0.00001	0.000426	0.000437
Jan-11	3.1	0.52	Jan-11	0.00002	0.000446	0.000463
Feb-11	96.9	16.36	Feb-11	0.00058	0.000446	0.001030
Mar-11	65.1	10.99	Mar-11	0.00035	0.000446	0.000801

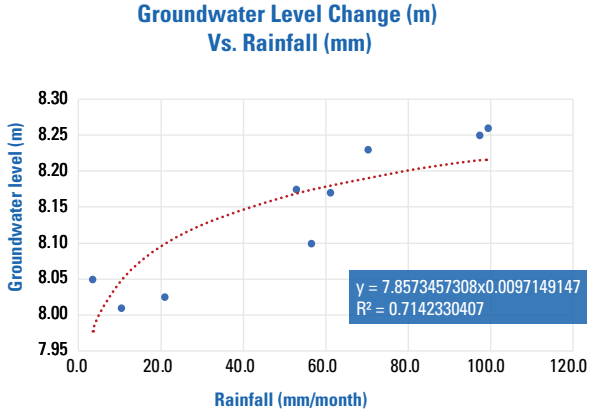
المصدر: الإسكوا وأكساد.

3. تقدير تغيُّرات منسوب المياه الجوفية وفقاً للهطول المطري خلال فترة المعايرة

تؤدّي الشروط الحديّة في نماذج المياه الجوفية دوراً كبيراً في سلوك النموذج. ويحتوي النموذج الاعتباري للحامل المائي في منطقة الدراسة على شرطين حديين متغيّرين مع الزمن. الأول هو حد الضاغط (Time Variant Specified Head)، ويقع على الجانب الغربي – حد البحر ويُعتبر ثابتاً. والحد الثاني هو الواقع جهة الشمال الشرقي، ويعبِّر عن جريان جوفي جانبي يمكن أن يكون تغذية جانبية لمنطقة النموذج أو يمكن أن يكون صرفاً من منطقة النموذج (الشكل 4-3). إنّ قِيم الضاغط عند الشرط الحدي هي مدخل من مدخلات النموذج، ويجب تحديدها قبل تشغيل النموذج. أي يجب تحديد قِيم الضاغط لكل خطوة زمنية خلال فترة التنبؤ. وهذه القِيم تتأثر بالهطول المطري (بافتراض أنه لم يحدث أي تغيُّر كبير في استثمار الطبقات الجوفية المجاورة). ويمكن إيجاد علاقة تقريبية تربط بين قِيم الضاغط والهطول المطري خلال فترة المعايرة واستخدامها لفترة التنبؤ.

الشكل 6-4 استخراج علاقة تجريبية بين هطول الأمطار ومناسيب المياه الجوفية للأشهر الماطرة عند الشرط الحدي شمال شرق النموذج

التاريخ	الهطول الشهري (مم)	المستوى (م)
3/31/2009	4.8	8.05
4/30/2009	62.5	8.17
5/31/2009	11.7	8.01
9/30/2009	22.3	8.03
10/31/2009	57.9	8.10
11/30/2009	54.2	8.18
12/31/2009	100.7	8.26
1/31/2010	98.7	8.25
2/28/2010	71.7	8.23



المصدر: الإسكوا وأكساد.

تم استخدام البيانات الشهرية المتاحة لوضع علاقة رياضية إحصائية تمكّن من حساب قِيم منسوب المياه عند الحدود الشرقية الشمالية للنموذج خلال فترة المعايرة، وذلك بافتراض عدم وجود تأخير زمني بين الهطولات والتغذية. وتم اشتقاق هذه العلاقة خلال الأشهر الممطرة باستخدام قِيم هطول الأمطار الشهرية من شهر تشرين الأول/أكتوبر إلى شهر أيار/مايو من العام التالي وقِيم تغيُّر مستوى المياه الجوفية (الشكل 6-4). وكانت العلاقة الناتجة لأفضل منحنى يمر من هذه القِيم على النحو التالي:

(1-4): $y = 7.857\ x^{0.0097}$

حيث:

- Y = تغيُّر المنسوب (م)؛
- X = الهطولات الشهرية (مم).

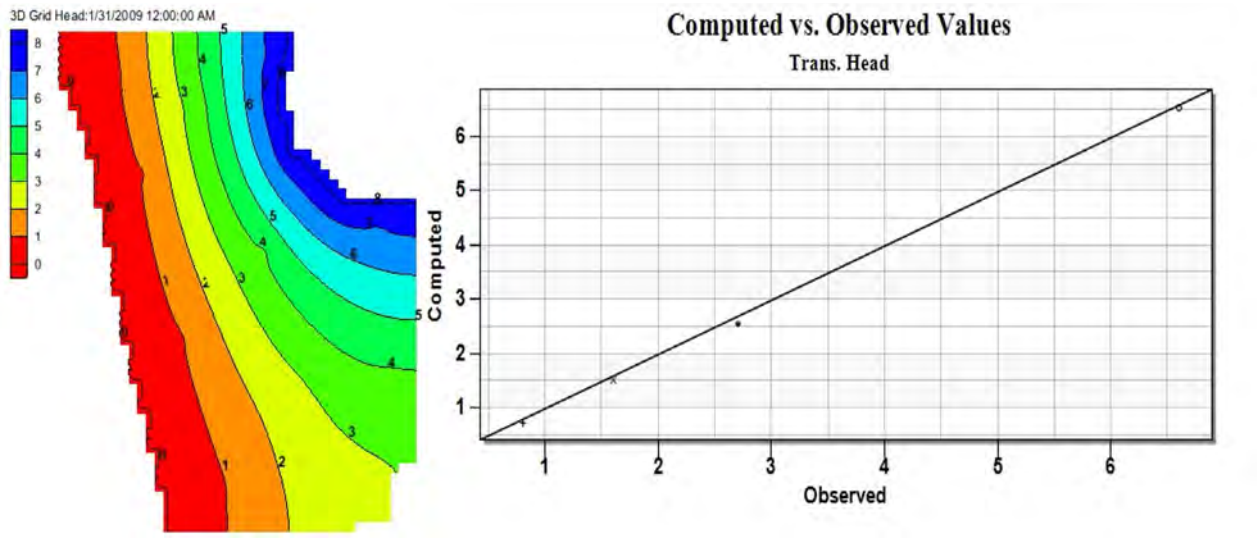
وخلال الأشهر الجافة، أي عندما لا تهطل الأمطار، ينخفض مستوى المياه الجوفية بسبب استمرار الإجهادات على الحوض، وهو ما يختلف من منطقة إلى أخرى. وبشكل عام، يمكن، بالاعتماد على قياس المناسيب في الأشهر الجافة، تقدير نسبة انخفاض المنسوب مقارنة بالأشهر الماطرة. وقد قدرت في أشهر الجفاف (من حزيران/يونيو إلى أيلول/سبتمبر) بانخفاض المنسوب كل شهر بنسبة 10 في المائة تقريباً عن الشهر السابق.

وتم استخدام العلاقة (1-4) لتقدير مستوى المياه الجوفية وحساب قِيم الضاغط للحد الشرقي الشمالي CHD لفترة المعايرة (2009-2020)، ولفترة التنبؤ (2021-2070)، باستخدام بيانات الأمطار الناتجة من النماذج المناخية المستخدمة.

4. تجهيز ومعايرة النموذج الرياضي

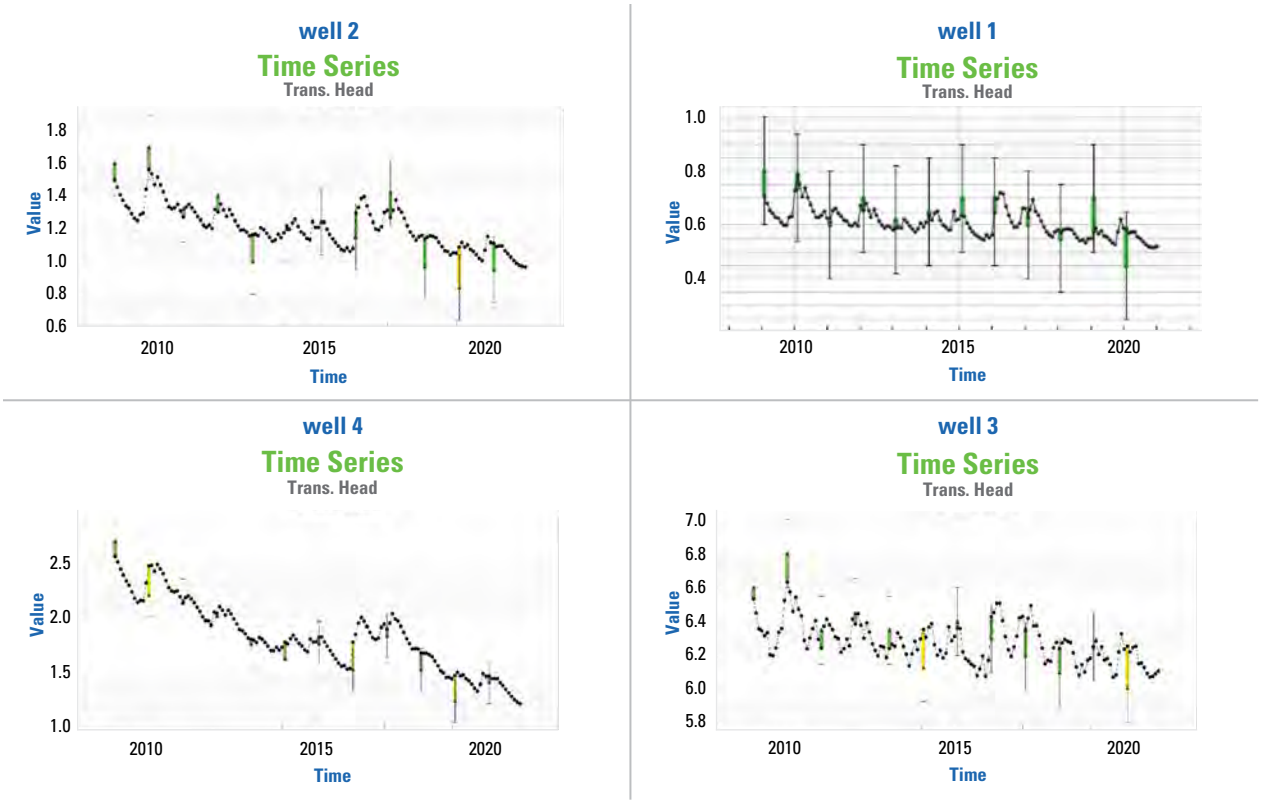
استُخدم برنامج Modflow ضمن منصة GMS (النسخة GMS 10.6.1). وتمّ تمثيل الحامل المائي في منطقة الدراسة بشبكة ثلاثية الأبعاد مؤلفة من طبقة واحدة سماكتها 50 متراً وتتضمن 1,534 خلية فعّالة، حيث الخلية مربعة ويبلغ طول ضلعها 50 متراً (الشكل 4-3). وأسندت الشروط الحدية وقِيم الضخ وقِيم التغذية إلى الشبكة وقيمة بدائية للنفوذية المائية K (Hydraulic conductivity) وقيمة بدائية للمعطائية المائية (Specific yield). وجرى تشغيل النموذج الرياضي للمياه الجوفية ومعايرته لحالة الثبات، ثم لحالة عدم الثبات (2009-2020) باستخدام قياسات مستوى المياه الجوفية في آبار المراقبة للمعايرة. ويبيّن الشكلان 4-7 و4-8 نتائج معايرة النموذج لحالتَي الثبات وعدم الثبات.

الشكل 4-7 معايرة النموذج لحالة الثبات



المصدر: الإسكوا وأكساد.

الشكل 4-8 معايرة النموذج لحالة عدم الثبات



المصدر: الإسكوا وأكساد.

5. إعداد بيانات الهطولات المطرية من النماذج المناخية

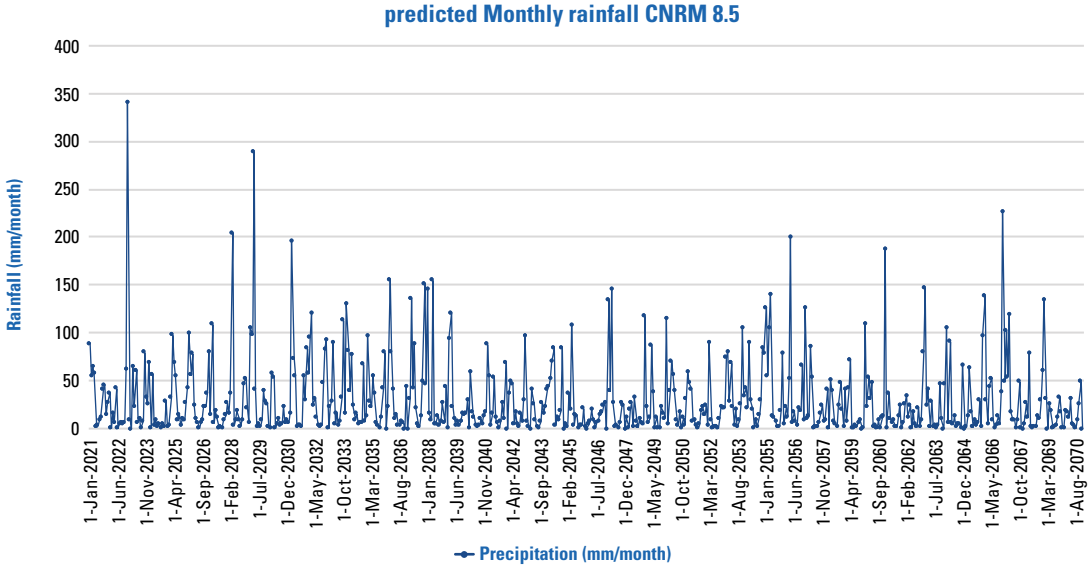
تم استخلاص السلاسل الزمنية للهطولات المطرية الشهرية لكل نموذج من النماذج المناخية الثلاثة: CNRM وEcEarth وGFDL في نقطة واحدة وسط النموذج (الشكل 4-9)، وذلك للفترة من عام 2021 حتى عام 2070 حسب الطريقة المبيّنة في المرفق.

الشكل 4-9 موقع استخراج البيانات المطرية للنماذج المناخية الثلاثة وموقع بئر مراقبة مناسيب المياه الجوفية

المصدر: الإسكوا وأكساد.

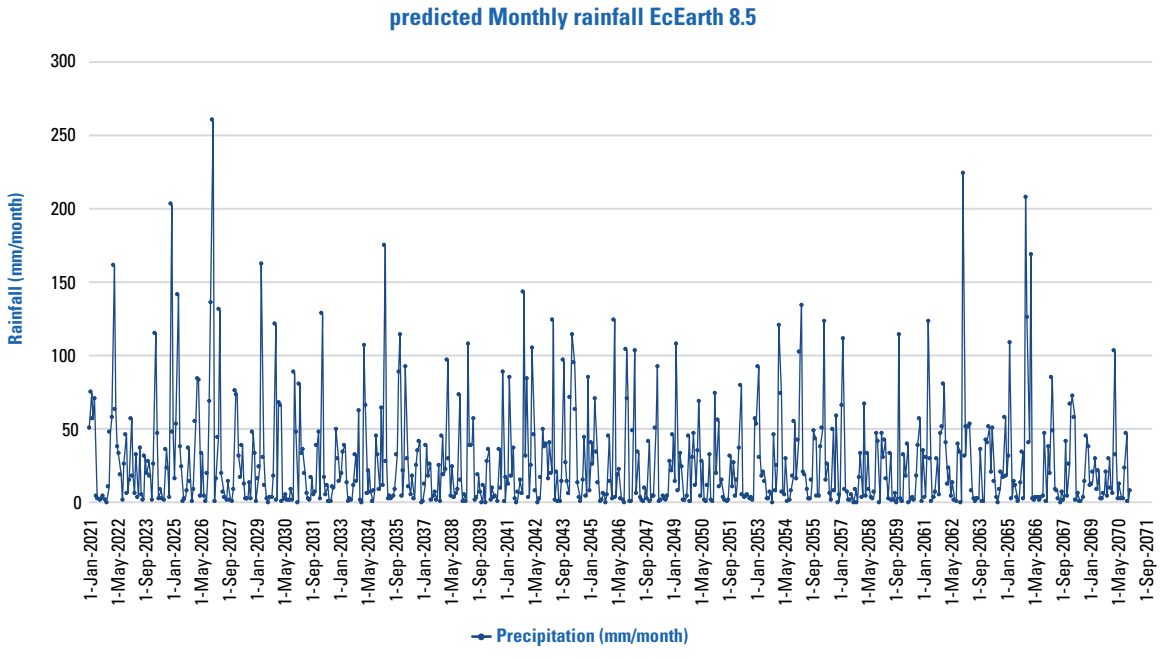
تمثل الأشكال من 4-10 حتى 4-12 قِيم الهطولات المطرية المتنبّأ بها للنماذج الثلاثة للفترة من عام 2021 حتى عام 2070.

الشكل 4-10 الأمطار الشهرية المتوقعة في منطقة الدراسة وفق النموذج المناخي (CNRM 8.5)



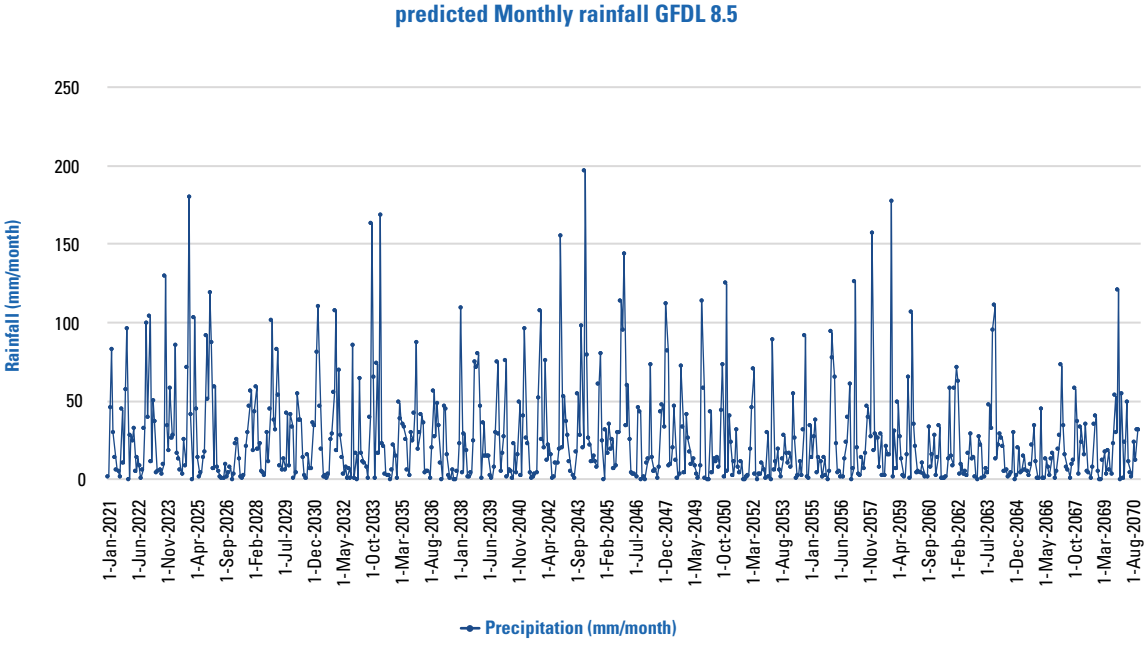
المصدر: الإسكوا وأكساد.

الشكل 4-11 الأمطار الشهرية المتوقعة في منطقة الدراسة وفق النموذج المناخي (EcEarth 8.5)



المصدر: الإسكوا وأكساد.

الشكل 4-12 الأمطار الشهرية المتوقعة في منطقة الدراسة وفق النموذج المناخي (GFDL 8.5)



المصدر: الإسكوا وأكساد.

ملخص الأمطار وتغيُّراتها كل عشر سنوات مقارنة بالفترة المرجعية

يبيّن الجدول 4-1 متوسط الهطول المطري المتوقع كل عشر سنوات في منطقة الدراسة من النماذج المناخية وتغيُّراتها (2021-2070) مقارنة بمتوسط الأمطار للفترة المرجعية (2009-2020).

الجدول 4-1 ملخص متوسط الهطول المطري لفترة المعايرة (2009-2020) وفترة التنبؤ (2021-2070)

هطول الأمطار (مم/السنة)							
	2020-2009	2030-2021	2040-2031	2050-2041	2060-2051	2070-2061	المتوسط
CNRM 8.5	415.0	376.8	422.6	288.7	347.2	312.4	**349.6**
EcEarth 8.5	415.0	394.6	291.6	331.9	293.2	326.7	**327.6**
GFDL 8.5	415.0	348.0	327.8	371.5	261.5	225.7	**306.9**
التغيُّر %*							
	2020-2009	2030-2021	2040-2031	2050-2041	2060-2051	2070-2061	المتوسط
CNRM 8.5	0.0%	-9.2%	1.8%	-30.4%	-16.3%	-24.7%	**-15.8**
EcEarth 8.5	0.0%	-4.9%	-29.7%	-20.0%	-29.3%	-21.3%	**-21.1**
GFDL 8.5	0.0%	-16.1%	-21.0%	-10.5%	-37.0%	-45.6%	**-26.0**

المصدر: الإسكوا وأكساد.

*التغيُّر (نسبة مئوية) = (القيمة المطلوب حساب التغيُّر لها – القيمة المرجعية) / (القيمة المرجعية) × 100.

ملخص الأمطار مقابل التغذية

باستخدام معامل التغذية البالغ 16.88في المائة في منطقة الدراسة لحساب كميات التغذية لفترة المعايرة (2009-2020) وفترة الإسقاط (2021-2070)، بلغت قِيم الأمطار مقابل التغذية البيانات الواردة في الجدول 4-2.

الجدول 4-2 ملخص كميات التغذية والأمطار لفترة المعايرة (2009-2020) وفترات التنبؤ المستقبلية (2021-2070)

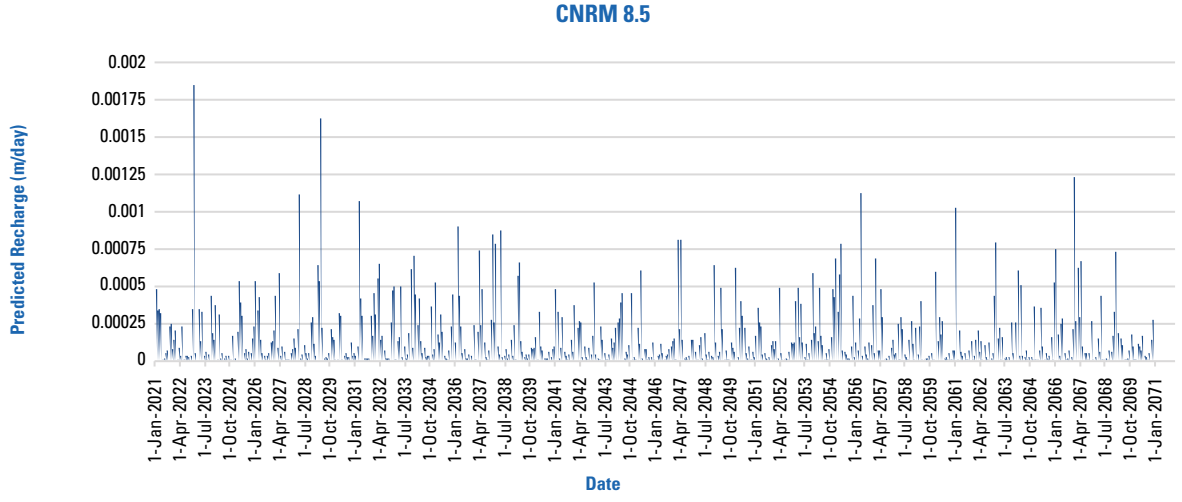
هطول الأمطار (مم/السنة)							
	2020-2009	2030-2021	2040-2031	2050-2041	2060-2051	2070-2061	المتوسط
CNRM 8.5	415.0	376.8	422.6	288.7	347.2	312.4	**349.6**
EcEarth 8.5	415.0	394.6	291.6	331.9	293.2	326.7	**327.6**
GFDL 8.5	415.0	348.0	327.8	371.5	261.5	225.7	**306.9**
التغذية (مم³/السنة)							
	2020-2009	2030-2021	2040-2031	2050-2041	2060-2051	2070-2061	المتوسط
CNRM 8.5	0.24	0.22	0.25	0.17	0.20	0.18	**0.20**
EcEarth 8.5	0.24	0.23	0.17	0.19	0.17	0.19	**0.19**
GFDL 8.5	0.24	0.20	0.19	0.22	0.15	0.13	**0.18**

المصدر: الإسكوا وأكساد.

6. حساب الراشح من الأمطار للنماذج المناخية المختلفة للفترة 2021-2070

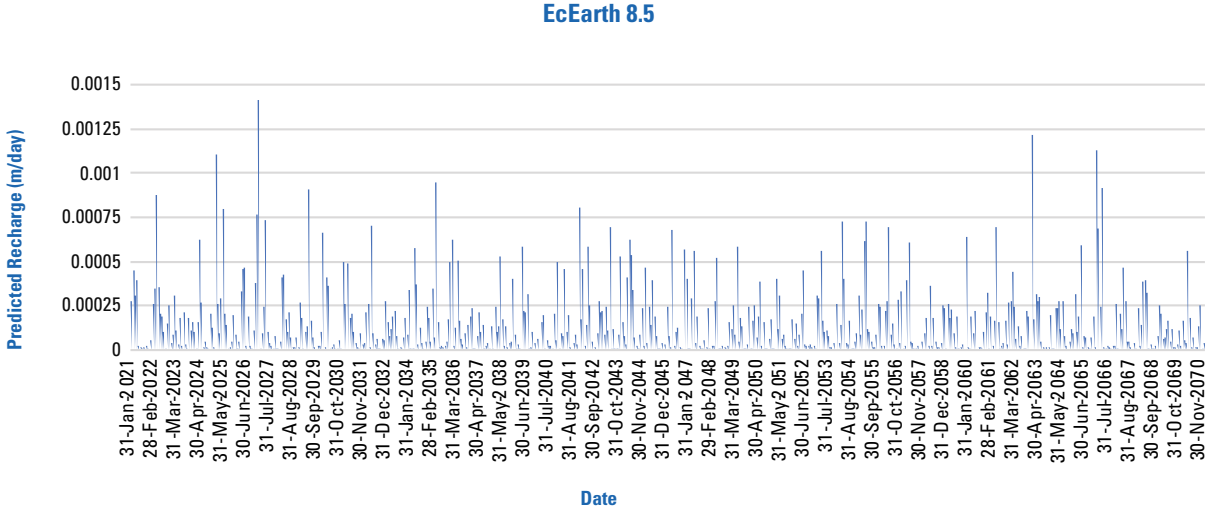
تتضمن الأشكال من 4-13 حتى 4-15 قِيم التغذية من مياه الأمطار للفترة 2021-2070، وذلك مقابل التغذية البالغة 16.88 في المائة التي تم الحصول عليها من البيانات المتوفرة للهطول المطري ومناسيب المياه الجوفية في منطقة الدراسة باستخدام طريقة تذبذب مناسيب المياه الجوفية.

الشكل 4-13 قِيم التغذية المحسوبة باستخدام بيانات الأمطار المتوقعة للنموذج المناخي CNRM 8.5



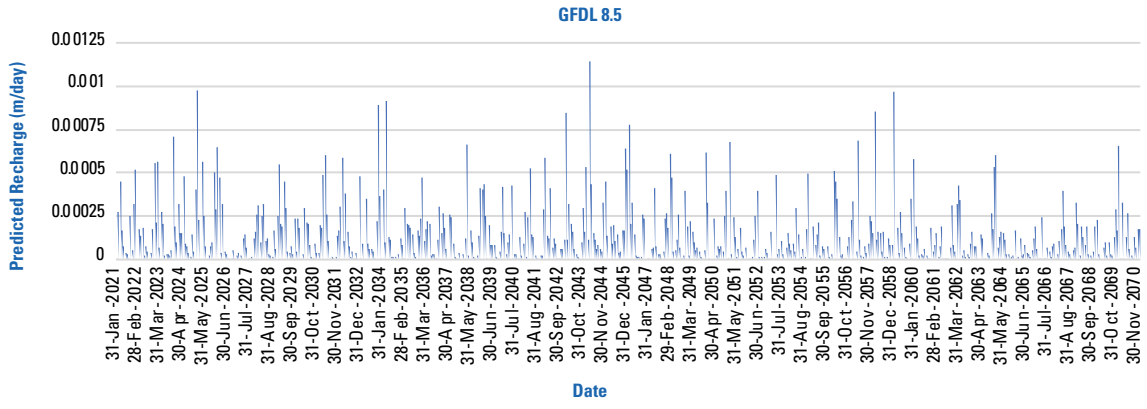
المصدر: الإسكوا وأكساد.

الشكل 4-14 قِيم التغذية المحسوبة باستخدام بيانات الأمطار المتوقعة للنموذج المناخي EcEarth 8.5



المصدر: الإسكوا وأكساد.

الشكل 4-15 قِيم التغذية المحسوبة باستخدام بيانات الأمطار المتوقعة للنموذج المناخي GFDL 8.5

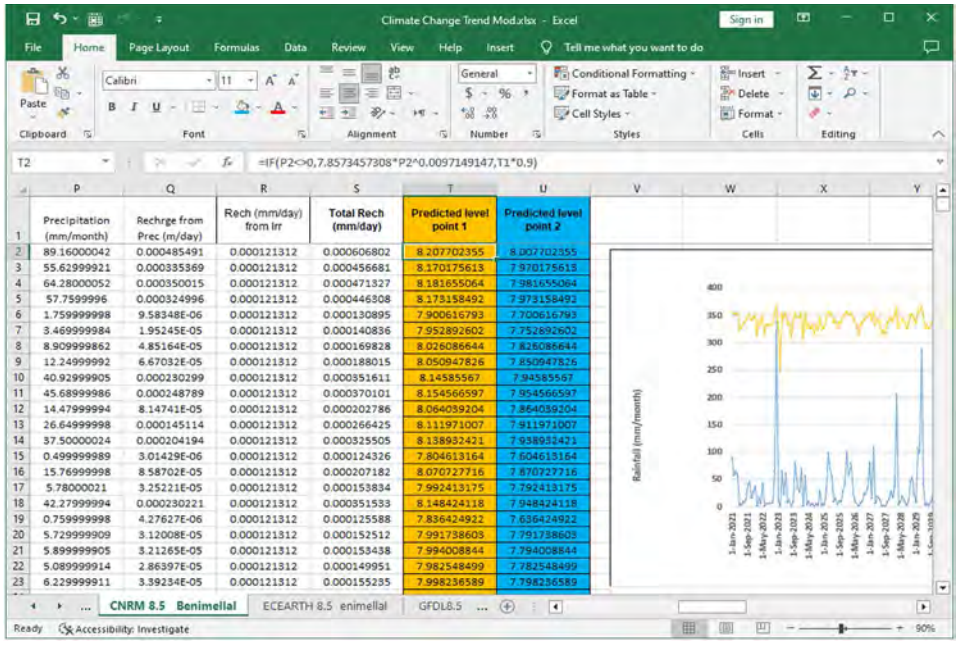


المصدر: الإسكوا وأكساد.

7. حساب الضاغط المتغيّر للحد الشمالي الشرقي وفقاً لأمطار النماذج المناخية المختلفة للفترة 2021-2070

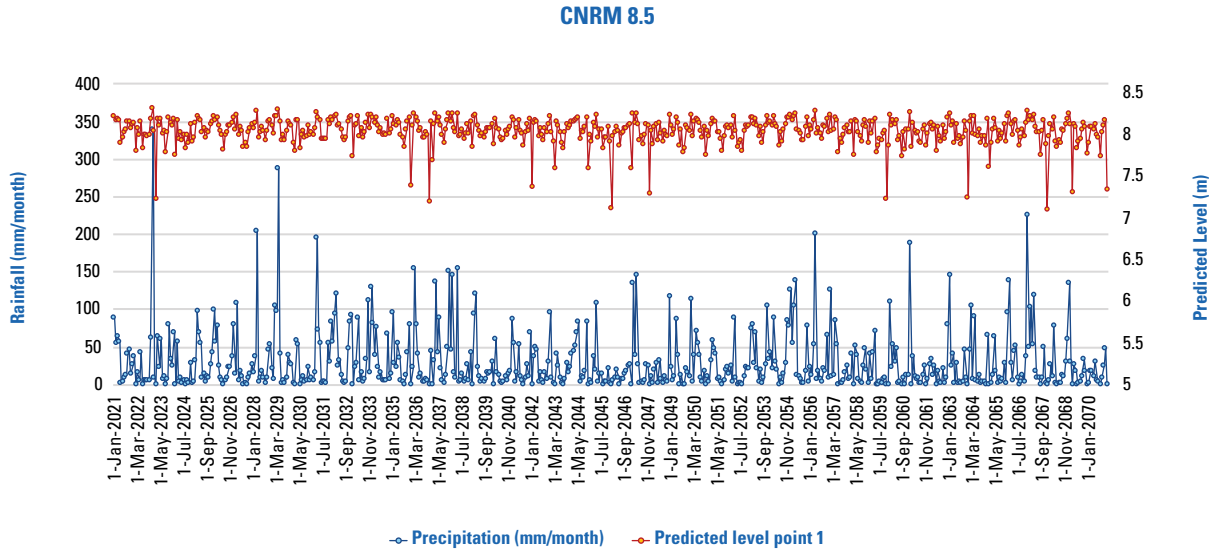
تتضمن الأشكال من 4-17 حتى 4-19 الهطولات المطرية المتنبأ بها وقِيم مناسيب المياه الجوفية في النقطة p1 من حد الضاغط المتغيّر في الجهة الشمالية الشرقية من النموذج (الشكل 4-3) المستنتجة للفترة المستقبلية (2021-2070)، والمحسوبة بناءً على المعادلة المستنتجة من فترة المعايرة (العلاقة 4-1) كما هو مبيّن في الشكل 4-13، والمعتمَدة في النموذج الرياضي على الحد الشمالي الشرقي من النموذج، وذلك لكل النماذج المناخية.

الشكل 4-16 حساب قِيم مناسيب الضاغط المتغيّر باستخدام بيانات الأمطار المتوقعة



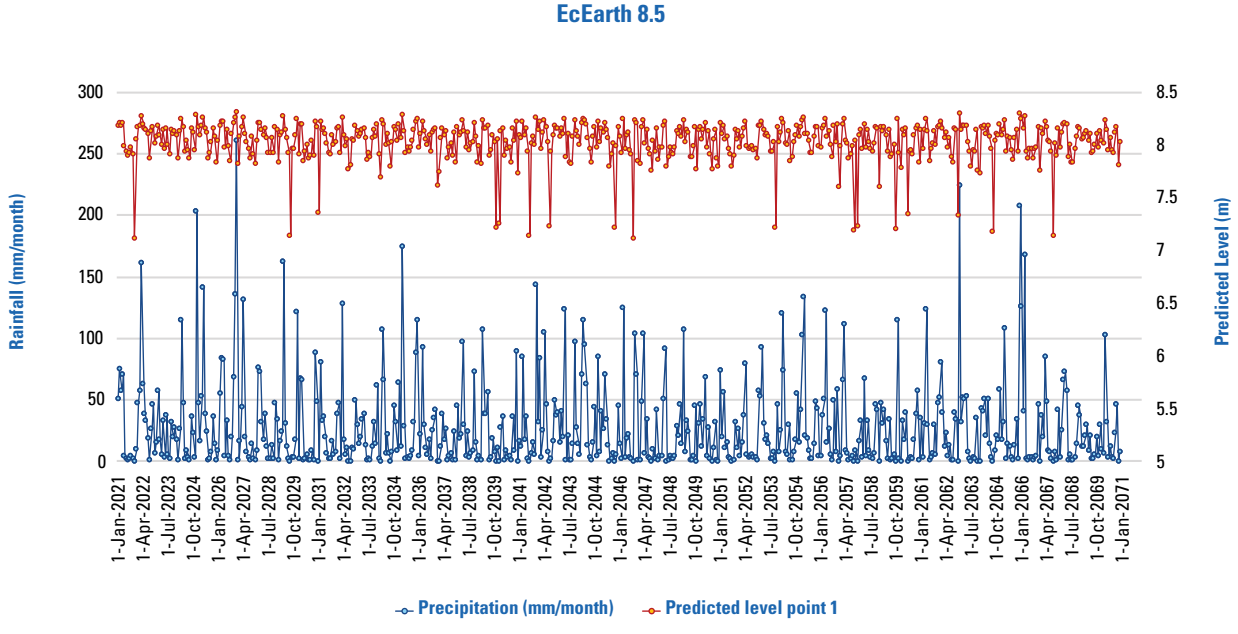
المصدر: الإسكوا وأكساد.

الشكل 4-17 مناسيب المياه الجوفية المحسوبة من الأمطار المتوقعة للشرط الحدودي (النقطة P1) بناءً على نتائج النموذج المناخي (CNRM 8.5)



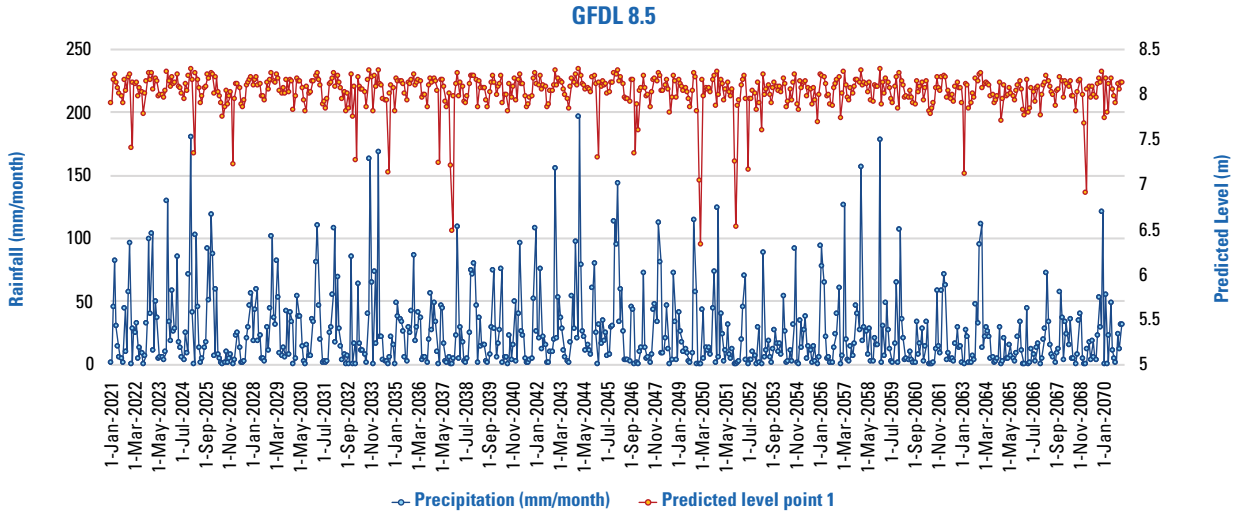
المصدر: الإسكوا وأكساد.

الشكل 4-18 مناسيب المياه الجوفية المحسوبة من الأمطار المتوقعة للشرط الحدودي (النقطة P1) بناءً على نتائج النموذج المناخي (Ec-Earth 8.5)



المصدر: الإسكوا وأكساد.

الشكل 4-19 مناسيب المياه الجوفية المحسوبة من الأمطار المتوقعة للشرط الحدودي (النقطة P1) بناءً على نتائج النموذج المناخي (GFDL 8.5)



المصدر: الإسكوا وأكساد.

تشغيل النموذج لفترة التنبؤ 2021-2070

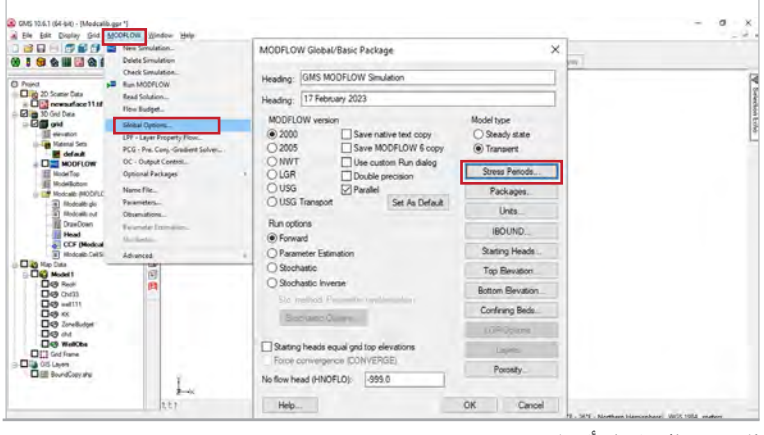
بعد تحديد التغيُّرات المتوقّع أن تطرأ على الإجهادات والشروط الحدية لفترة التنبؤ (2021-2070)، يعاد تشغيل النموذج الرياضي لمنطقة الدراسة. ويتم ذلك باستخدام قِيم التغذية وقِيم الضاغط المتغيّر عند الحد الشمالي الشرقي، والمحسوبة من المعادلات الناتجة من بيانات فترة المعايرة، بعد تطبيقها على الأمطار المتوقعة للنماذج المناخية الثلاثة. وتكون كميات الضخ من كل بئر ثابتة عند معدل (155 م^3/يوم) في فترة التنبؤات (2021-2070)، أي أنها تساوي نفس كمية الضخ لآخر خطوة زمنية في المعايرة. وقد تم تثبيت كميات الضخ لكامل فترة التنبؤ بهدف معاينة أثر تغيُّر كميات الأمطار على تغذية المياه الجوفية.

في الخطوات اللاحقة، سيتم تعديل مدخلات النموذج بناءً على معطيات النموذج المناخي CNRM 8.5.

ويعاد تشغيل النموذج لفترة التنبؤ باتباع الخطوات التالية:

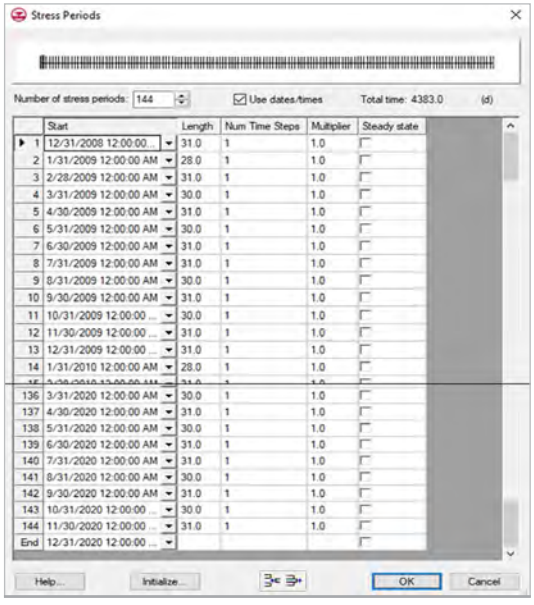
تعديل فترة المحاكاة لتمتد حتى عام 2070

نختار من واجهة البرنامج القائمة
Modflow > Global Option> Stress Periods



المصدر: الإسكوا وأكساد.

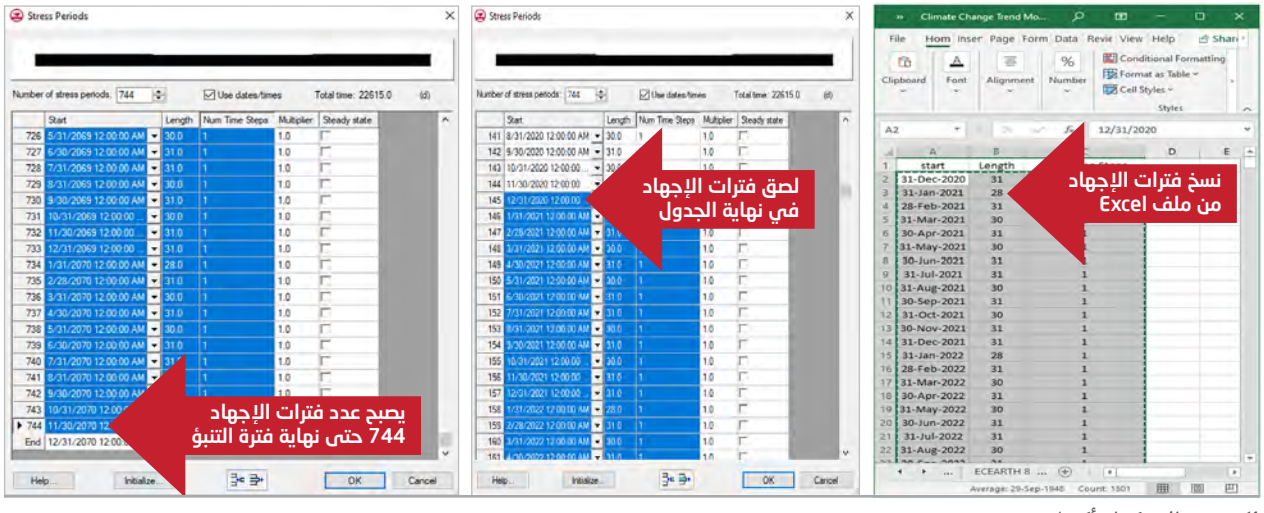
فتظهر واجهة Stress Periods حيث تمتد المحاكاة في فترة المعايرة من 31 كانون الأول/ديسمبر 2008 حتى 31 كانون الأول/ديسمبر 2020، وتكون مقسمة إلى 144 فترة إجهاد (Stress Period) يبلغ طول كل منها شهراً واحداً.



المصدر: الإسكوا وأكساد.

تعديل مدة المحاكاة وعدد فترات الإجهاد لتشمل فترة التنبؤ حتى نهاية عام 2070

لإضافة فترات الإجهاد من 31 كانون الأول/ديسمبر 2020 حتى 31 كانون الأول/ديسمبر 2070 (600 فترة إجهاد يبلغ كل منها شهراً واحداً)، يُنسخ الجدول المعدّ في ملف Excel ويُلصق في نهاية الجدول Stress Periods، ليصبح عدد فترات الإجهاد 744.



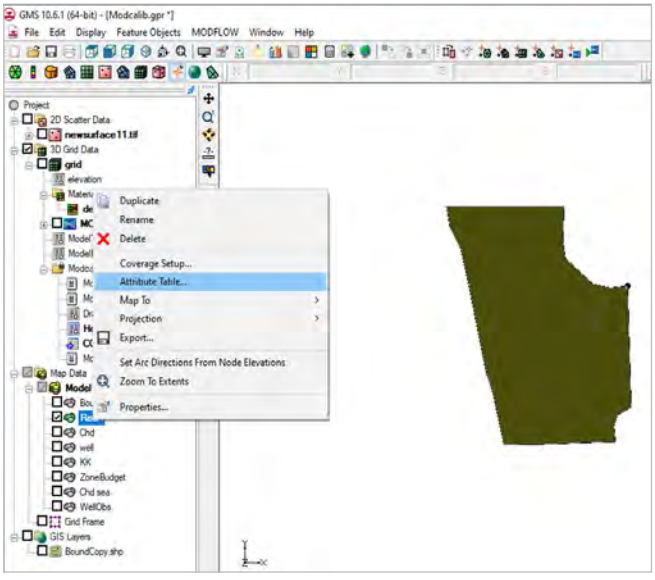
المصدر: الإسكوا وأكساد.

إضافة مدخلات النموذج للشروط الحدية والإجهادات لفترة التنبؤ من عام 2021 حتى عام 2070

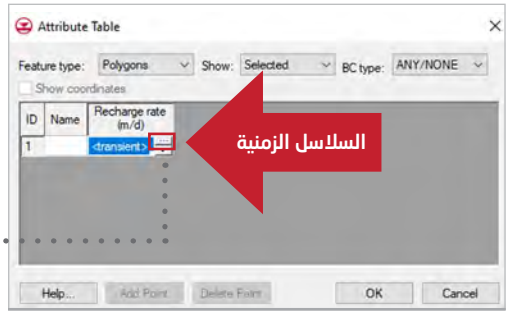
عند تشغيل النموذج لفترة التنبؤ، يجب إضافة قِيم التغذية Rech الناجمة عن الأمطار والتي ستتغيّر وفقاً للأمطار المتوقعة، وقِيم العقد في حد الضاغط المحدّد CHD، وقِيم الضخ من الآبار الاستثمارية، وذلك للفترة الممتدة من عام 2021 حتى عام 2070.

تعديل قِيم التغذية Rech

نختار من النافذة اليسرى من Map Data الغطاء Rech، ونضغط على الزر الأيمن، ونختار من القائمة المنسدلة Attribute Table فتُفتح واجهة Attribute Table.

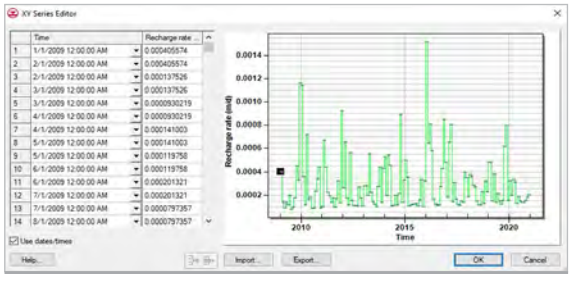


في الواجهة «Attribute Table»، نختار زر السلاسل الزمنية.



المصدر: الإسكوا وأكساد.

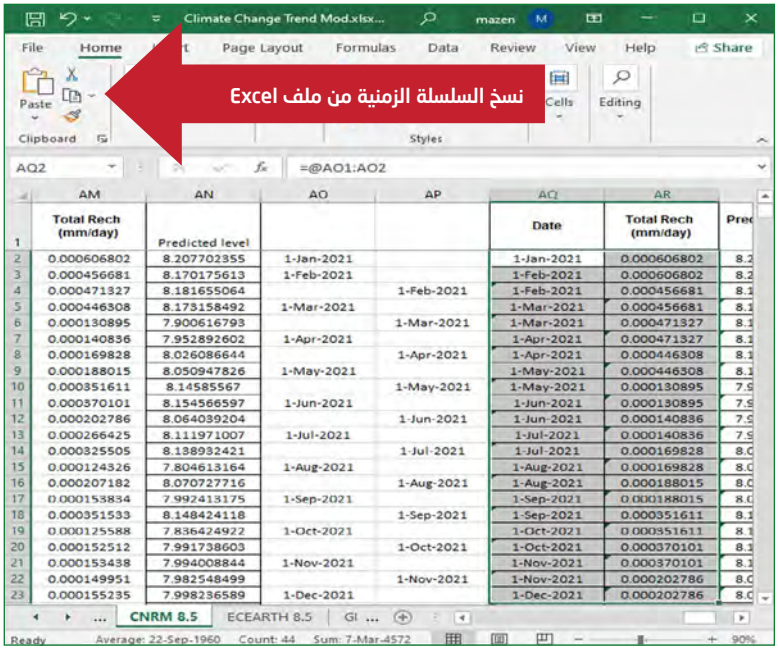
عندئذٍ، تُفتح واجهة XY Series Editor.



المصدر: الإسكوا وأكساد.

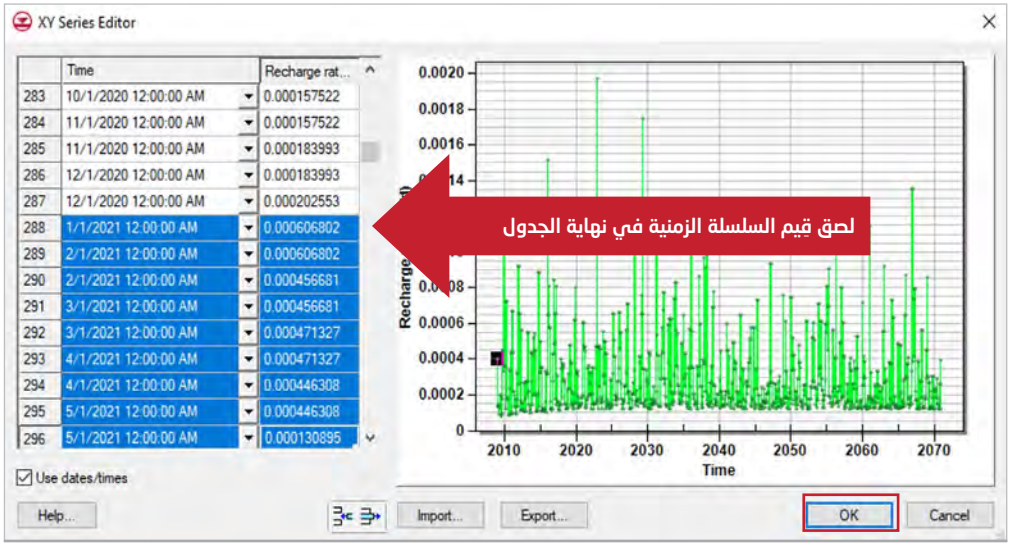
تمتد السلسلة الزمنية في نافذة قِيم التغذية خلال فترة المعايرة من 1 كانون الثاني/يناير 2009 حتى 1 كانون الثاني/يناير 2021. ويجب تمديد السلسلة الزمنية حتى نهاية فترة التنبؤ في 31 كانون الأول/ديسمبر 2070.

ولإضافة قِيم التغذية من 31 كانون الأول/ديسمبر 2020 حتى 31 كانون الأول/ديسمبر 2070، يُنسخ الجدول المعدّ في ملف Excel ويُلصَق في نهاية الجدول في الواجهة «XY Series Editor»:



	AM	AN	AO	AP	AQ	AR
1	Total Rech (mm/day)	Predicted level			Date	Total Rech (mm/day)
2	0.000606802	8.207702355	1-Jan-2021		1-Jan-2021	0.000606802
3	0.000456681	8.170175613	1-Feb-2021		1-Feb-2021	0.000606802
4	0.000471327	8.181655064		1-Feb-2021	1-Feb-2021	0.000456681
5	0.000446308	8.173158492	1-Mar-2021		1-Mar-2021	0.000456681
6	0.000130895	7.900616793		1-Mar-2021	1-Mar-2021	0.000471327
7	0.000140836	7.952892602	1-Apr-2021		1-Apr-2021	0.000471327
8	0.000169828	8.026086644		1-Apr-2021	1-Apr-2021	0.000446308
9	0.000188015	8.050947826	1-May-2021		1-May-2021	0.000446308
10	0.000351611	8.14585567		1-May-2021	1-May-2021	0.000130895
11	0.000370101	8.154566597	1-Jun-2021		1-Jun-2021	0.000130895
12	0.000202786	8.064039204		1-Jun-2021	1-Jun-2021	0.000140836
13	0.000266425	8.111971007	1-Jul-2021		1-Jul-2021	0.000140836
14	0.000325505	8.138932421		1-Jul-2021	1-Jul-2021	0.000169828
15	0.000124326	7.804613164	1-Aug-2021		1-Aug-2021	0.000169828
16	0.000207182	8.070727716		1-Aug-2021	1-Aug-2021	0.000188015
17	0.000153834	7.992413175	1-Sep-2021		1-Sep-2021	0.000188015
18	0.000351533	8.148424118		1-Sep-2021	1-Sep-2021	0.000351611
19	0.000125588	7.836424922	1-Oct-2021		1-Oct-2021	0.000351611
20	0.000152512	7.991738603		1-Oct-2021	1-Oct-2021	0.000370101
21	0.000153438	7.994008844	1-Nov-2021		1-Nov-2021	0.000370101
22	0.000149951	7.982548499		1-Nov-2021	1-Nov-2021	0.000202786
23	0.000155235	7.998236589	1-Dec-2021		1-Dec-2021	0.000202786

بعد ذلك، يُضغَط على OK لحفظ التعديلات على السلسلة الزمنية.

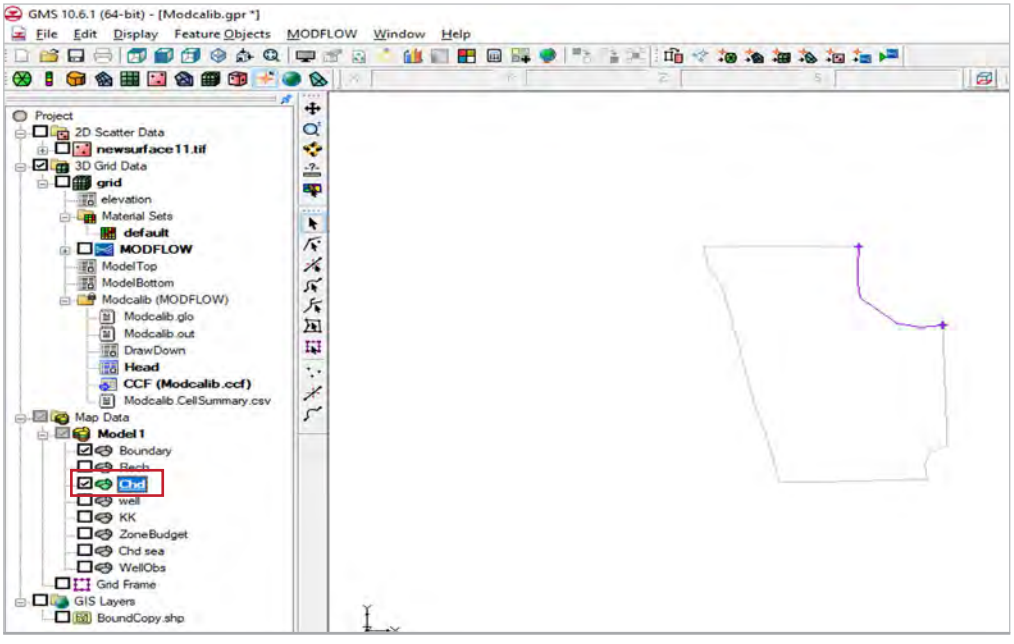


المصدر: الإسكوا وأكساد.

تعديل قِيم العُقد في الضاغط المحدّد المتغيّر مع الزمن شمال شرق النموذج

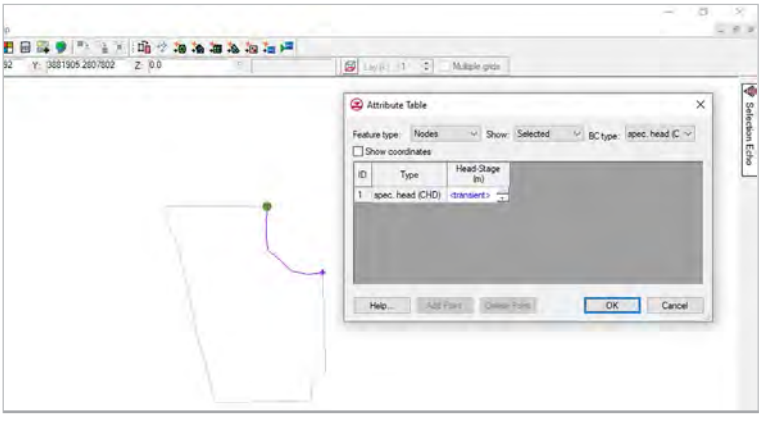
بعد تعديل قِيم التغذية Rech، يجب تعديل قِيم الضاغط المحدّد CHD في الشمال الشرقي من النموذج.

نختار من النافذة اليسرى من Map Data الغطاء CHD، فيَظهر خط الضاغط المحدّد في الشمال الشرقي من النموذج. وهو محدّد بعقدتين، ويتم إسناد قِيم الضاغط المحدّد لهذا الحد من خلالهما بإدخال سلسلة زمنية لكل عقدة. ويقوم GMS بإجراء استيفاء (interpolation) لحساب قيمة الضاغط المحدّد في كل خلية بين العقدتين:



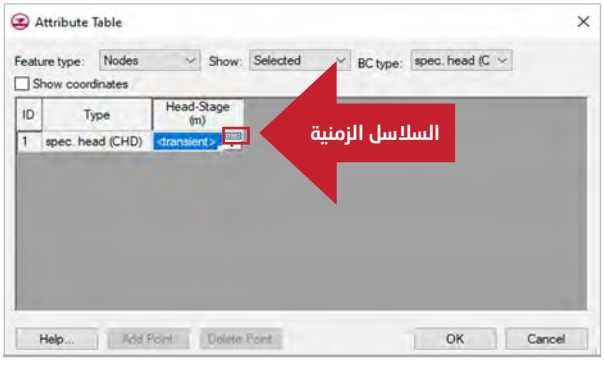
المصدر: الإسكوا وأكساد.

وبوضع المؤشر على العقدة 1 (العقدة العلوية) والنقر المزدوج على الزر اليساري، تُفتح واجهة Attribute Table للعقدة 1، حيث يتم اختيار زر السلاسل الزمنية لتعديل السلسلة الزمنية لحد الضاغط المحدّد كي تمتد حتى عام 2070:



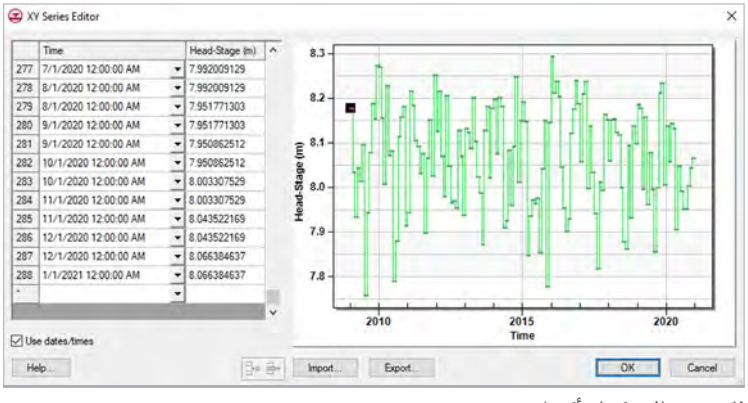
المصدر: الإسكوا وأكساد.

بالضغط على زر السلاسل الزمنية:



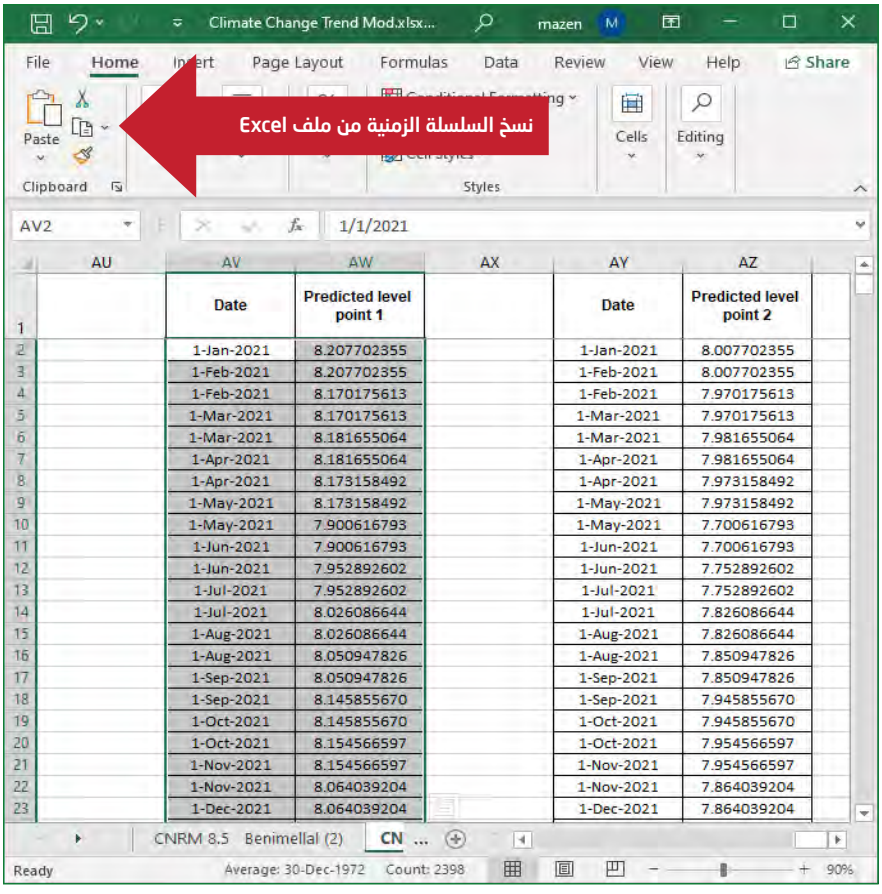
المصدر: الإسكوا وأكساد.

تُفتح واجهة XY Series Editor، وتكون السلسلة الزمنية في النافذة لقِيم الضاغط المحدّد في العقدة 1 خلال فترة المعايرة من 1 كانون الثاني/يناير 2009 حتى 1 كانون الثاني/يناير 2021. ويجب تمديد السلسلة الزمنية حتى نهاية فترة التنبؤ في 31 كانون الأول/ديسمبر 2070.

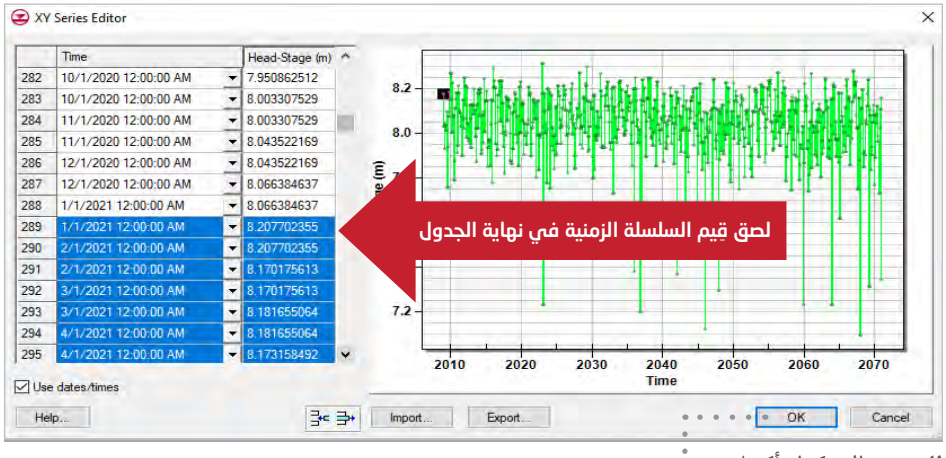


المصدر: الإسكوا وأكساد.

لإضافة قِيم الضاغط المحدّد من 31 كانون الأول/ديسمبر 2020 حتى 31 كانون الأول/ديسمبر 2070، يُنسخ الجدول المعدّ في ملف Excel ويُلصَق في نهاية الجدول في الواجهة XY Series Editor:



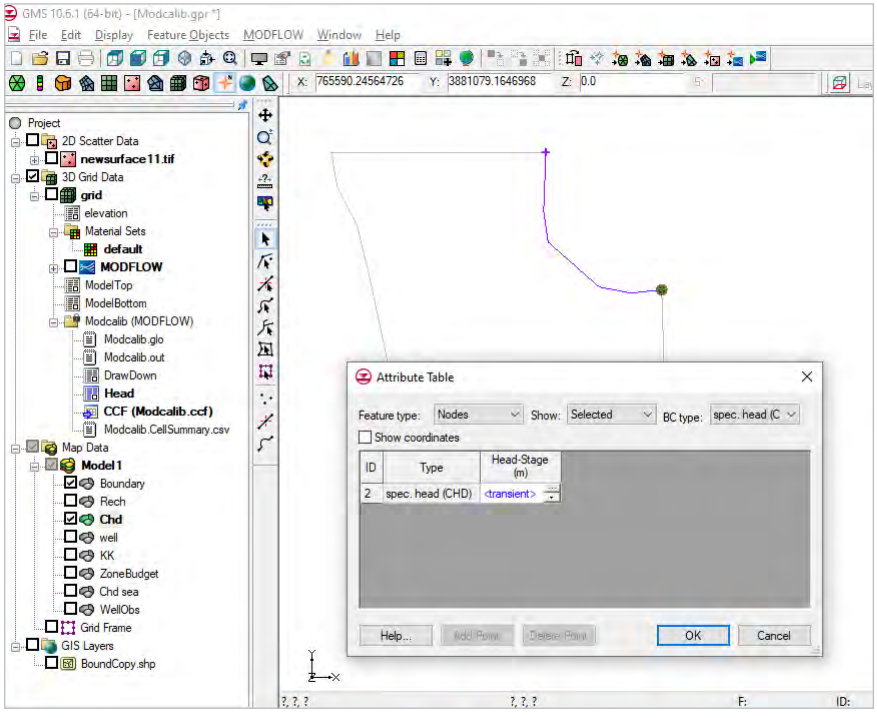
	AU	AV	AW	AX	AY	AZ
1		Date	Predicted level point 1		Date	Predicted level point 2
2		1-Jan-2021	8.207702355		1-Jan-2021	8.007702355
3		1-Feb-2021	8.207702355		1-Feb-2021	8.007702355
4		1-Feb-2021	8.170175613		1-Feb-2021	7.970175613
5		1-Mar-2021	8.170175613		1-Mar-2021	7.970175613
6		1-Mar-2021	8.181655064		1-Mar-2021	7.981655064
7		1-Apr-2021	8.181655064		1-Apr-2021	7.981655064
8		1-Apr-2021	8.173158492		1-Apr-2021	7.973158492
9		1-May-2021	8.173158492		1-May-2021	7.973158492
10		1-May-2021	7.900616793		1-May-2021	7.700616793
11		1-Jun-2021	7.900616793		1-Jun-2021	7.700616793
12		1-Jun-2021	7.952892602		1-Jun-2021	7.752892602
13		1-Jul-2021	7.952892602		1-Jul-2021	7.752892602
14		1-Jul-2021	8.026086644		1-Jul-2021	7.826086644
15		1-Aug-2021	8.026086644		1-Aug-2021	7.826086644
16		1-Aug-2021	8.050947826		1-Aug-2021	7.850947826
17		1-Sep-2021	8.050947826		1-Sep-2021	7.850947826
18		1-Sep-2021	8.145855670		1-Sep-2021	7.945855670
19		1-Oct-2021	8.145855670		1-Oct-2021	7.945855670
20		1-Oct-2021	8.154566597		1-Oct-2021	7.954566597
21		1-Nov-2021	8.154566597		1-Nov-2021	7.954566597
22		1-Nov-2021	8.064039204		1-Nov-2021	7.864039204
23		1-Dec-2021	8.064039204		1-Dec-2021	7.864039204

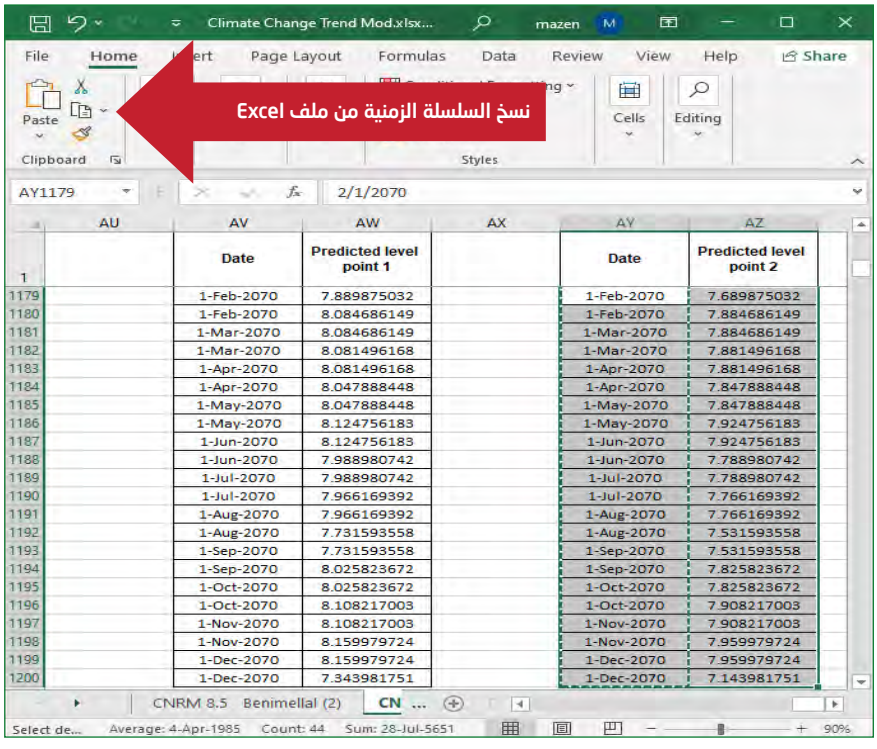


المصدر: الإسكوا وأكساد.

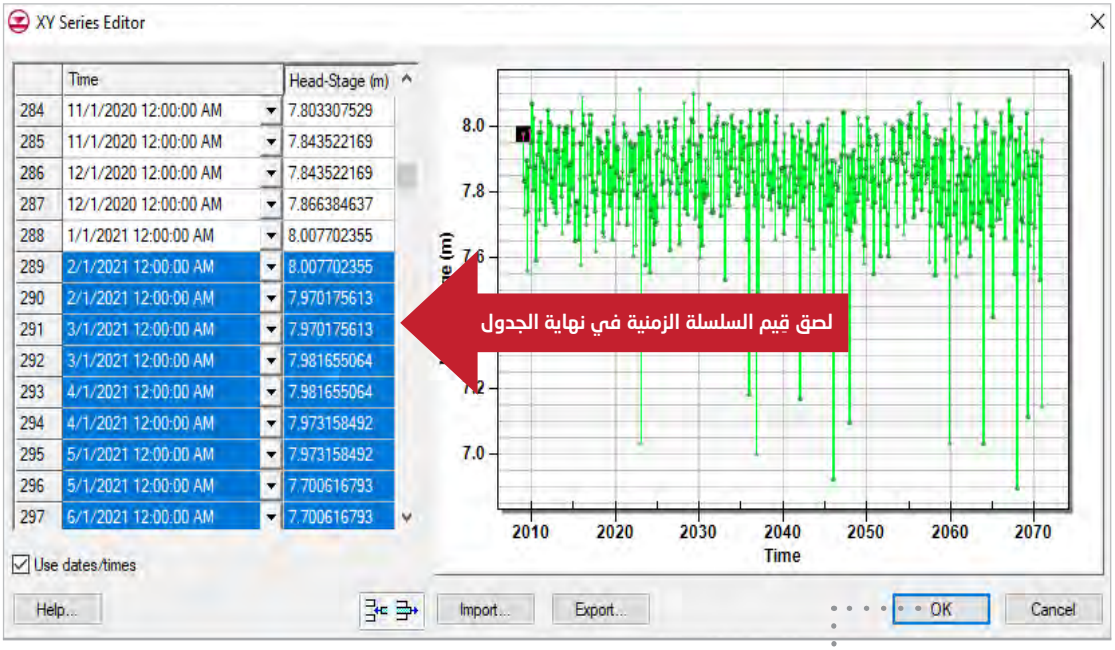
يُضغَط على OK لحفظ التعديلات على السلسلة الزمنية.

وبنفس الطريقة، يوضع المؤشّر على العقدة 2 (العقدة السفلية). وبالنقر المزدوج على الزر الأيسر، تُفتح واجهة Attribute Table للعقدة 2، حيث يتم اختيار زر السلاسل الزمنية لتعديل السلسلة الزمنية لحد الضاغط المحدّد كي تمتد حتى عام 2070:





	AU	AV	AW	AX	AY	AZ
1		Date	Predicted level point 1		Date	Predicted level point 2
1179		1-Feb-2070	7.889875032		1-Feb-2070	7.689875032
1180		1-Feb-2070	8.084686149		1-Feb-2070	7.884686149
1181		1-Mar-2070	8.084686149		1-Mar-2070	7.884686149
1182		1-Mar-2070	8.081496168		1-Mar-2070	7.881496168
1183		1-Apr-2070	8.081496168		1-Apr-2070	7.881496168
1184		1-Apr-2070	8.047888448		1-Apr-2070	7.847888448
1185		1-May-2070	8.047888448		1-May-2070	7.847888448
1186		1-May-2070	8.124756183		1-May-2070	7.924756183
1187		1-Jun-2070	8.124756183		1-Jun-2070	7.924756183
1188		1-Jun-2070	7.988980742		1-Jun-2070	7.788980742
1189		1-Jul-2070	7.988980742		1-Jul-2070	7.788980742
1190		1-Jul-2070	7.966169392		1-Jul-2070	7.766169392
1191		1-Aug-2070	7.966169392		1-Aug-2070	7.766169392
1192		1-Aug-2070	7.731593558		1-Aug-2070	7.531593558
1193		1-Sep-2070	7.731593558		1-Sep-2070	7.531593558
1194		1-Sep-2070	8.025823672		1-Sep-2070	7.825823672
1195		1-Oct-2070	8.025823672		1-Oct-2070	7.825823672
1196		1-Oct-2070	8.108217003		1-Oct-2070	7.908217003
1197		1-Nov-2070	8.108217003		1-Nov-2070	7.908217003
1198		1-Nov-2070	8.159979724		1-Nov-2070	7.959979724
1199		1-Dec-2070	8.159979724		1-Dec-2070	7.959979724
1200		1-Dec-2070	7.343981751		1-Dec-2070	7.143981751

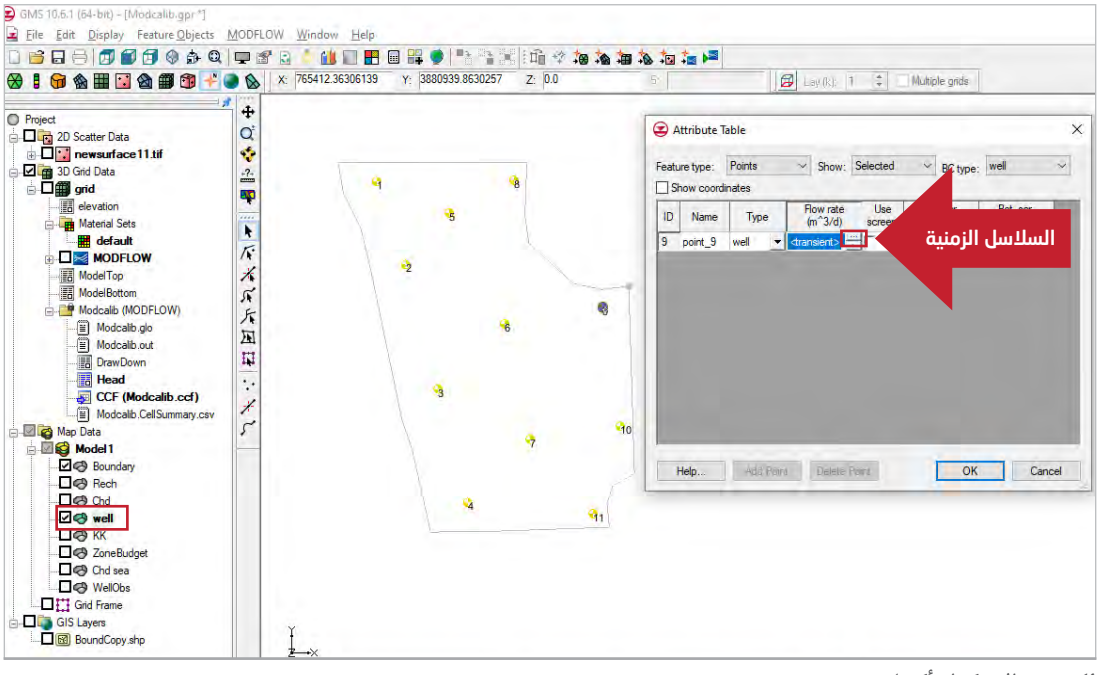


المصدر: الإسكوا وأكساد.

يُضغَط على OK لحفظ التعديلات على السلسلة الزمنية.

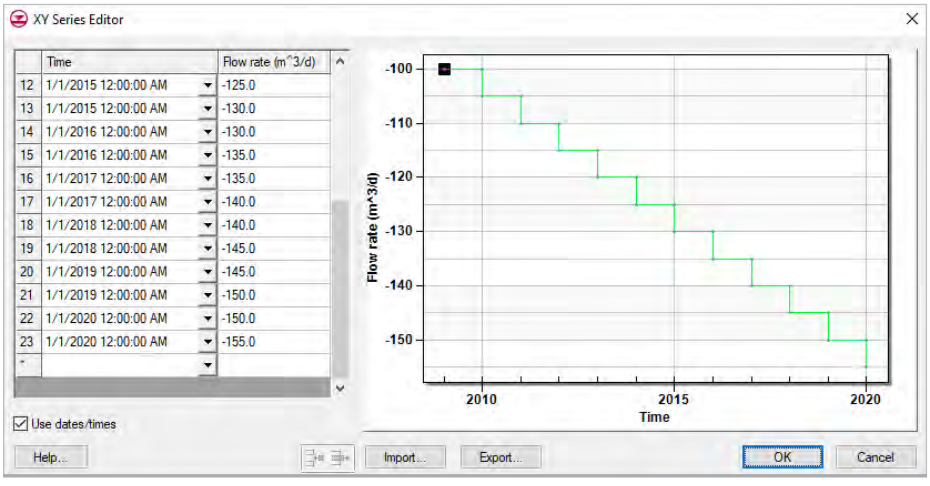
تعديل قِيم الضخ من الآبار الاستثمارية

نختار من النافذة اليسرى من Map Data الغطاء Well، فتَظهر الآبار الاستثمارية (11 بئراً):



المصدر: الإسكوا وأكساد.

بوضع المؤشر على أي بئر، وبالنقر المزدوج بالزر الأيسر، تُفتح واجهة Attribute Table. يتم اختيار زر السلاسل الزمنية، فيَظهر جدول ومخطط الضخ من البئر لفترة المعايرة، وهو يزداد من 100 م^3/اليوم عام 2009 حتى 155 م^3/اليوم عام 2020:

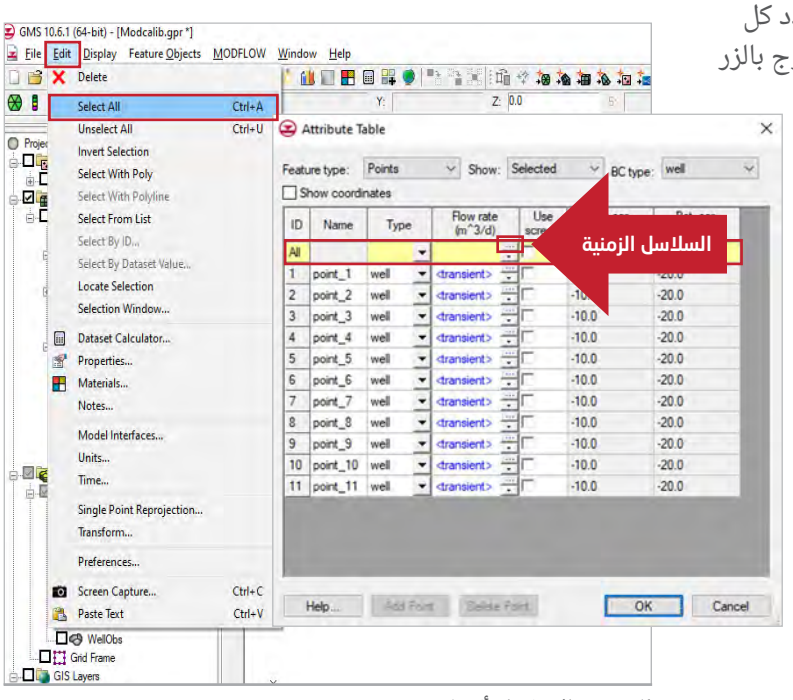


المصدر: الإسكوا وأكساد.

يجب تعديل جدول الضخ من الآبار الاستثمارية وتمديده حتى نهاية فترة التنبؤ (عام 2070)، حيث سيتم تثبيت قيمة الضخ من الآبار عند 155 م^3/اليوم من عام 2021 حتى نهاية عام 2070.

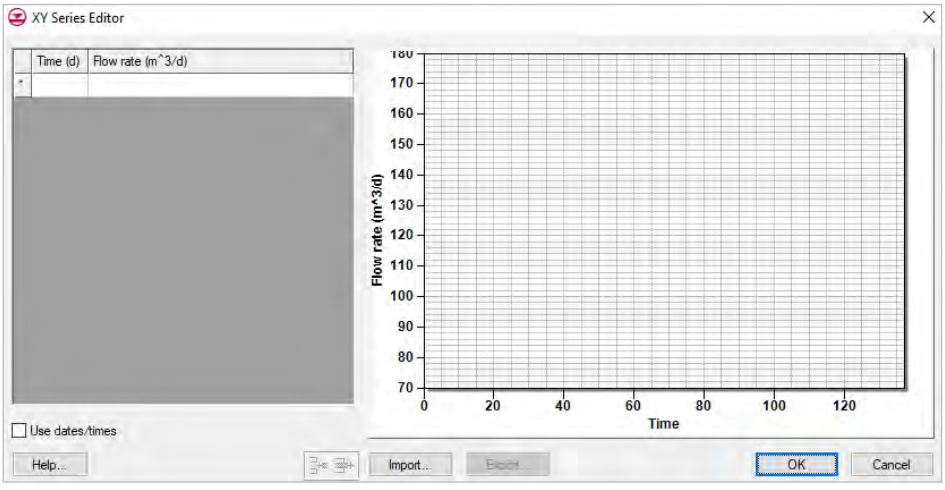
وبما أن كل الآبار الاستثمارية لها نفس جدول الضخ، يمكن تعديل هذا الجدول لكل الآبار دفعة واحدة، كما يلي:

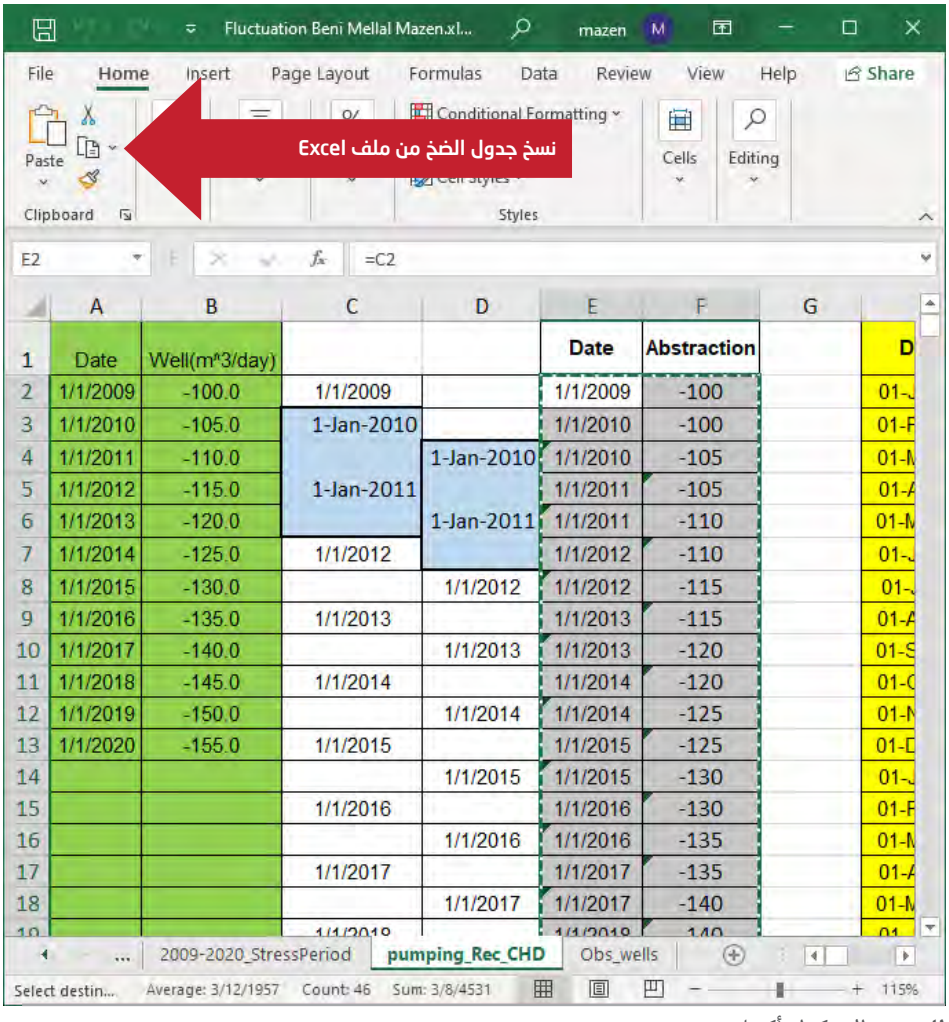
من قائمة Edit، يتم اختيار Select All، فتتحدّد كل الآبار، بوضع المؤشر على أي بئر. وبالنقر المزدوج بالزر الأيسر، تُفتح واجهة Attribute Table، حيث يمكن اختيار زر السلاسل الزمنية في السطر All ولصق جدول الضخ الذي سيُسنَد إلى جميع الآبار الاستثمارية:



المصدر: الإسكوا وأكساد.

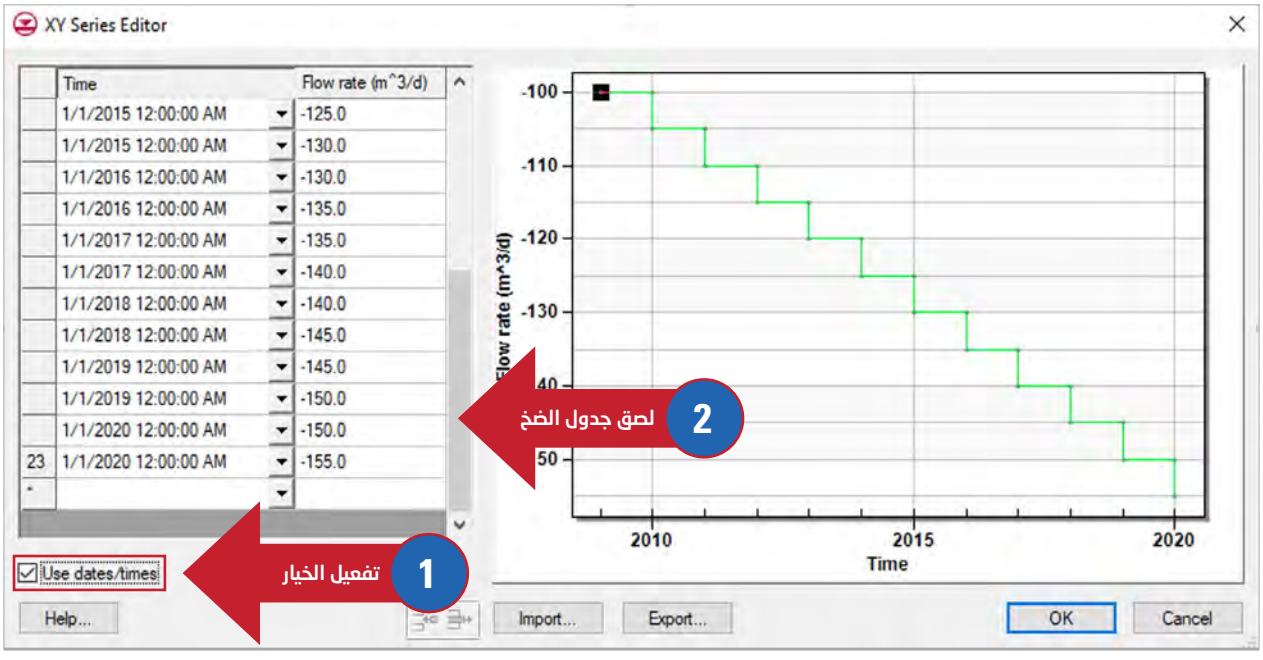
وباختيار زر السلاسل الزمنية في السطر All، تُفتح نافذة XY Series Editor:





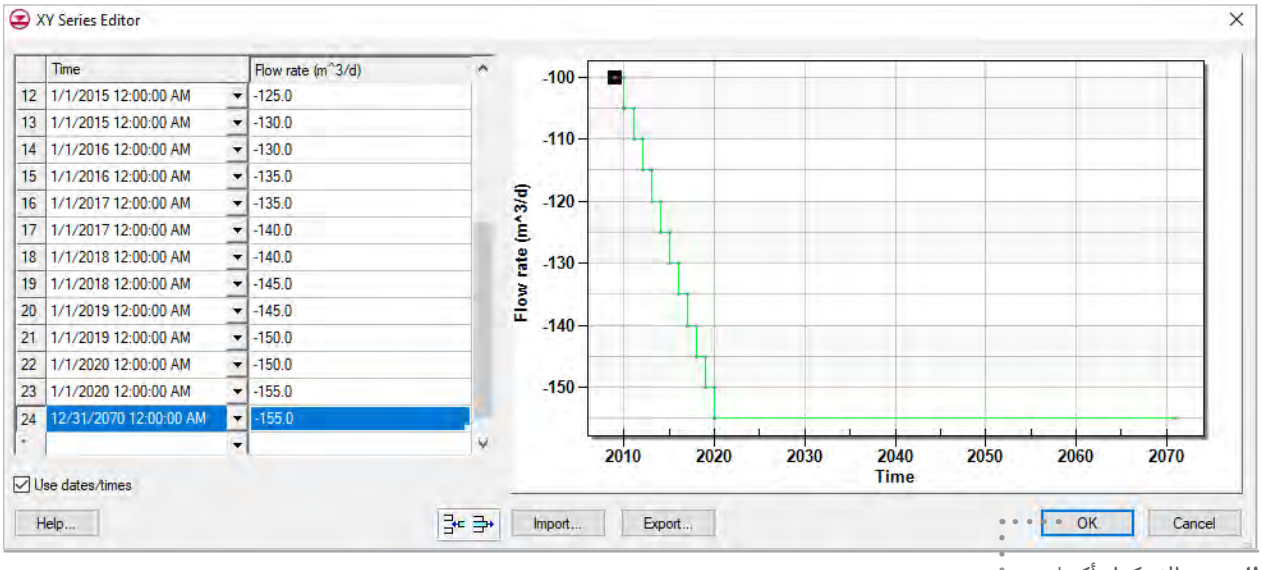
المصدر: الإسكوا وأكساد.

قبل لصق جدول الضخ، يجب تفعيل الخيار Use Dates Time ثم لصق جدول الضخ لفترة المعايرة الممتد حتى نهاية 2020 بحيث تكون كمية الضخ 155 م³/اليوم:



المصدر: الإسكوا وأكساد.

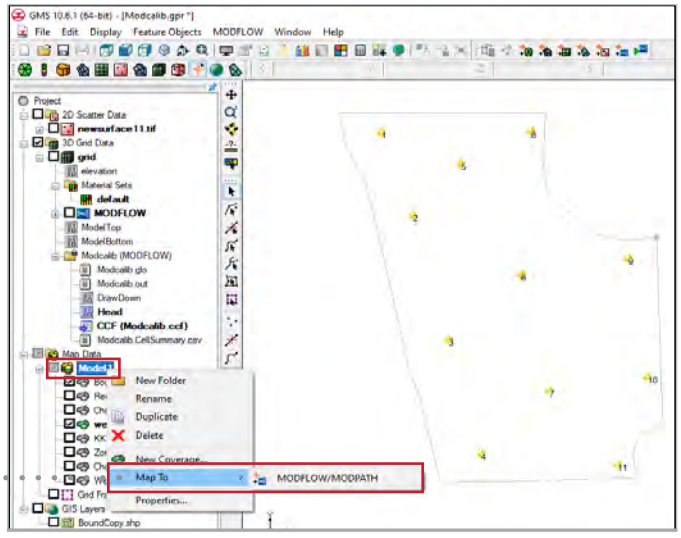
لتثبيت معدل الضخ عند 155 م³/اليوم حتى نهاية 2070، يُضاف سطر على الجدول، كما هو مبيّن في الشكل أدناه.



المصدر: الإسكوا وأكساد.

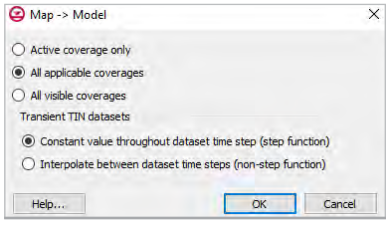
يتم اختيار OK في الواجهة XY Series Editor لإسناد جدول الضخ لكل الآبار، ثم اختيار OK في الواجهة Attribute Table لحفظ التعديلات.

بعد إجراء كل التعديلات اللازمة في Map Data، يجب إسناد هذه التعديلات إلى الشبكة الثلاثية الأبعاد وإعادة التشغيل. ويتم ذلك باختيار Model 1 في Map Data والنقر على الزر الأيمن لتَظهر القائمة المنسدلة. ومن القائمة المنسدلة، يتم اختيار Map to>MODFLOW/MODPATH:



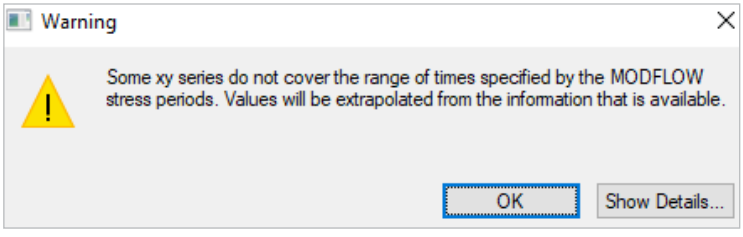
المصدر: الإسكوا وأكساد.

تَظهر الرسالة أدناه، فنختار OK.

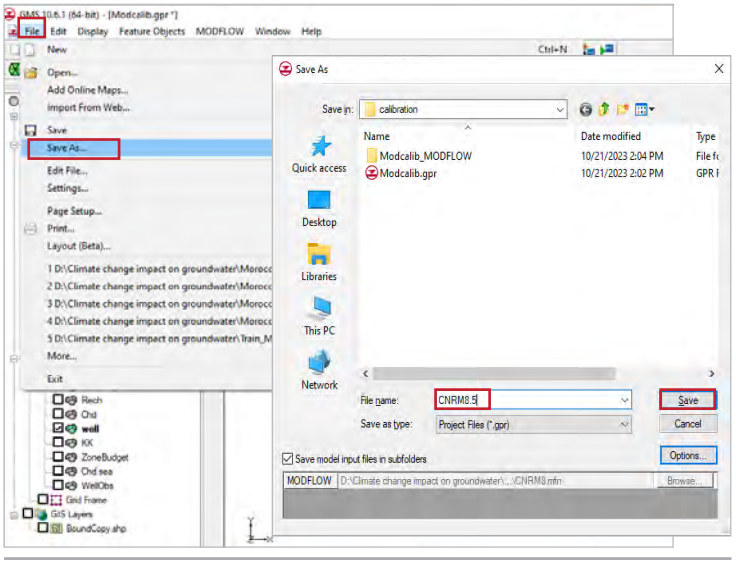


المصدر: الإسكوا وأكساد.

ثم تَظهر الرسالة أدناه، فنختار OK.



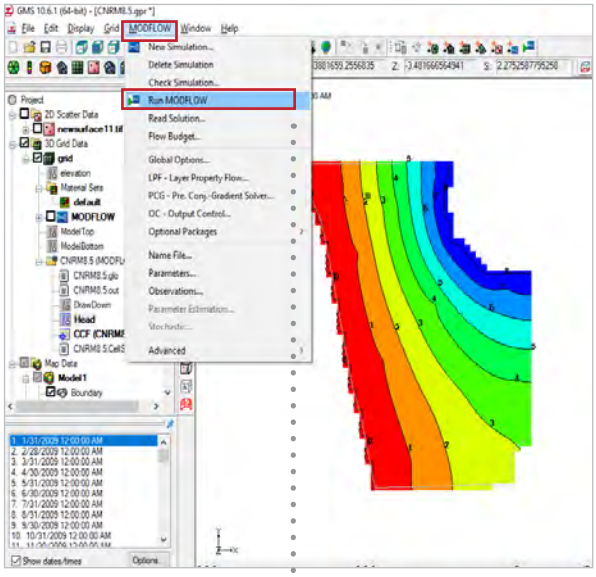
بعد إسناد التعديلات إلى الشبكة، نختار من القائمة File الأمر Save As، ونقوم بحفظ النموذج باسم CNRM 8.5.



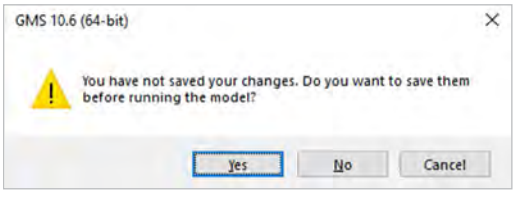
المصدر: الإسكوا وأكساد.

تشغيل النموذج وتلخيص النتائج

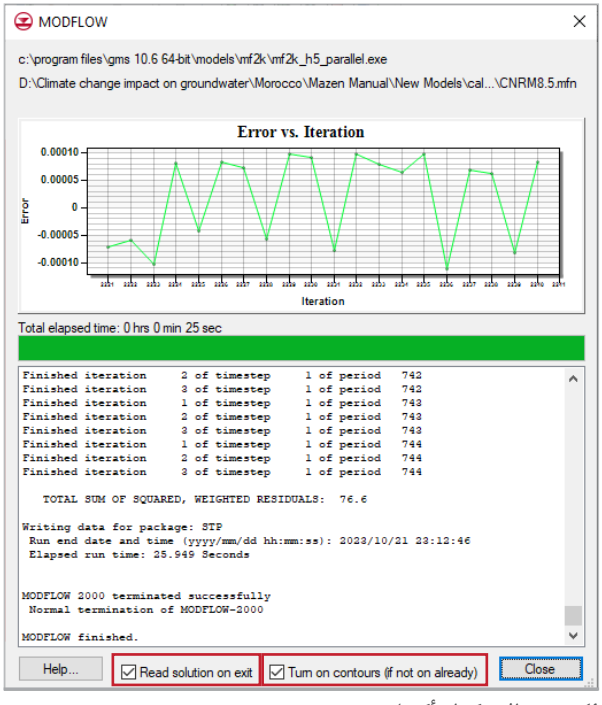
من القائمة Modflow، نختار الأمر Run Modflow.



بعد ذلك، تَظهر الرسالة التالية:



نختار Yes، فتَظهر نافذة Modflow:



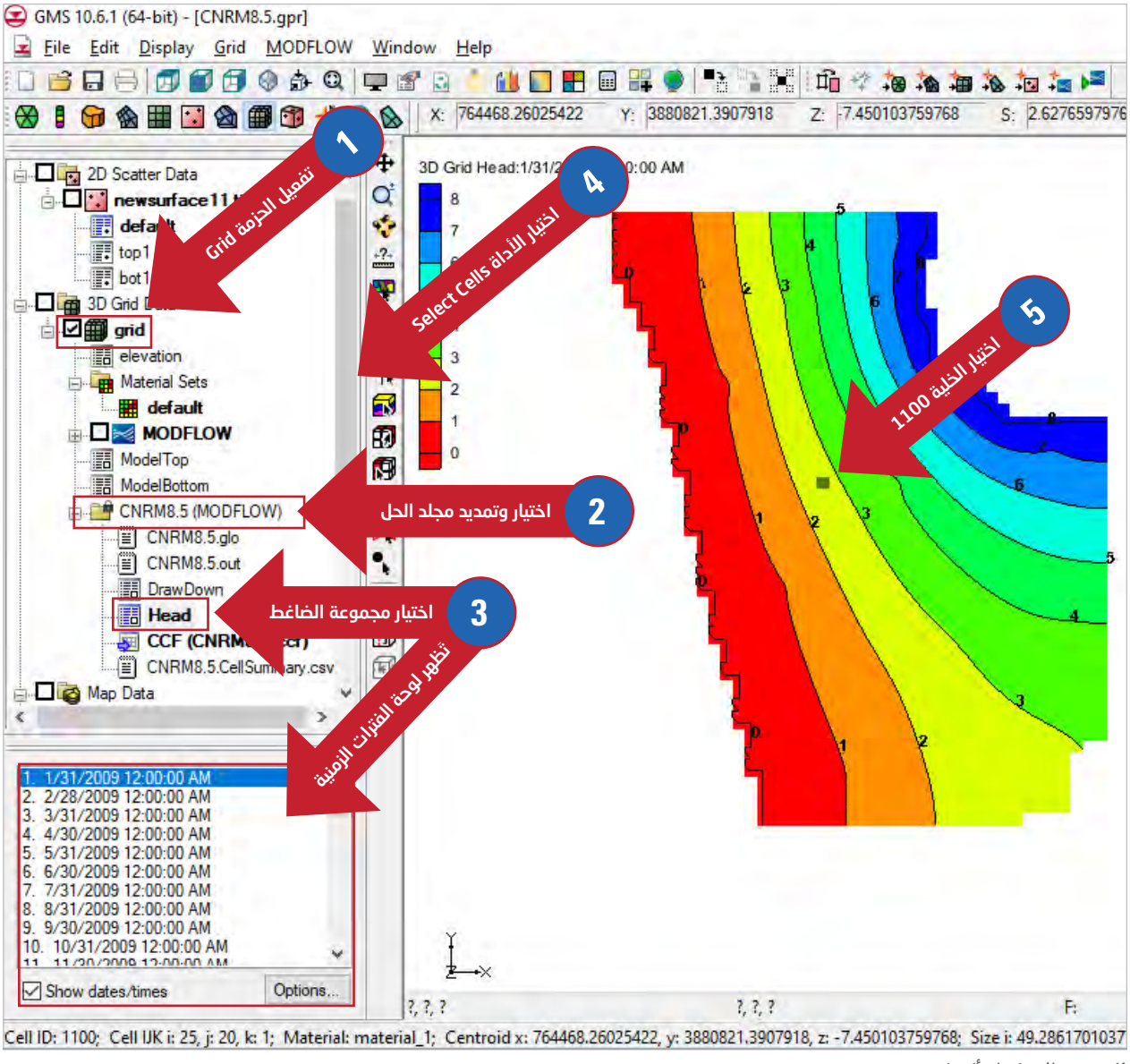
المصدر: الإسكوا وأكساد.

عند انتهاء المحاكاة، يجري التأكّد من تفعيل الخيارين Read solution on exit وTurn on contours، ثم اختيار Close.

عرض تغيُّرات مناسيب المياه الجوفية

لعرض تغيُّرات منسوب المياه الجوفية عند أي نقطة من النموذج، تُتّبع الخطوات التالية:

- التأكد من أنّ الحزمة الفعالة هي Grid.
- اختيار مجلّد الحل (MODFLOW) CNRM8.5.
- اختيار مجموعة بيانات الضاغط Head، فتَظهر لوحة الفترات الزمنية للمحاكاة أسفل النافذة.
- بعد ذلك، اختيار الأداة Select cell واختيار الخلية من الشبكة بالنقر عليها بالزر الأيسر (الخلية 1,100).

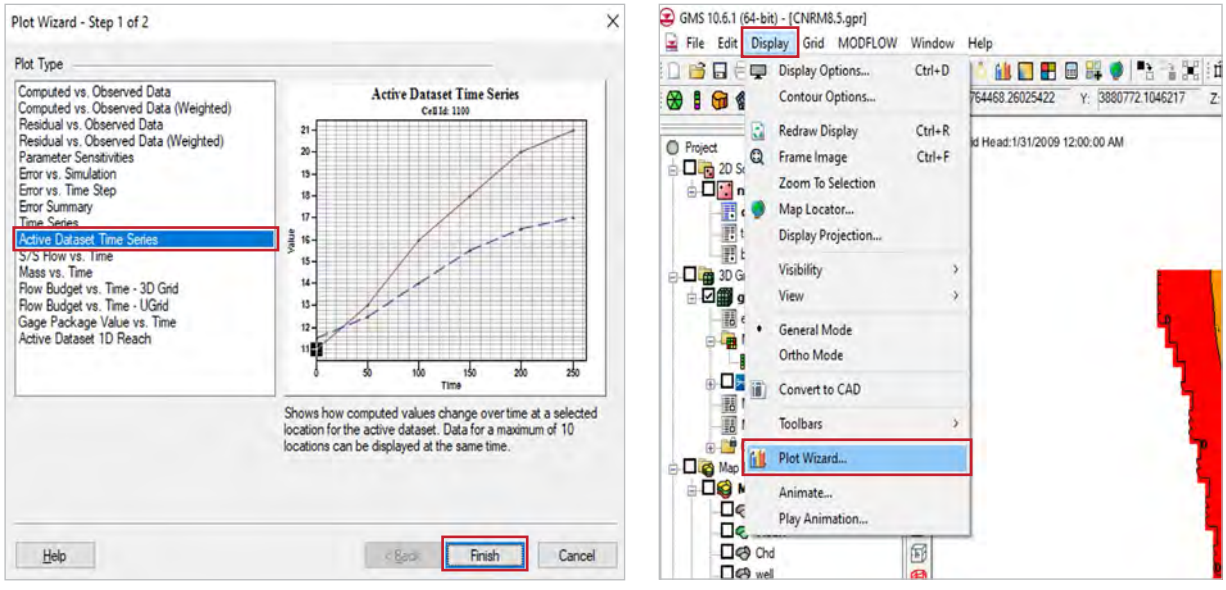


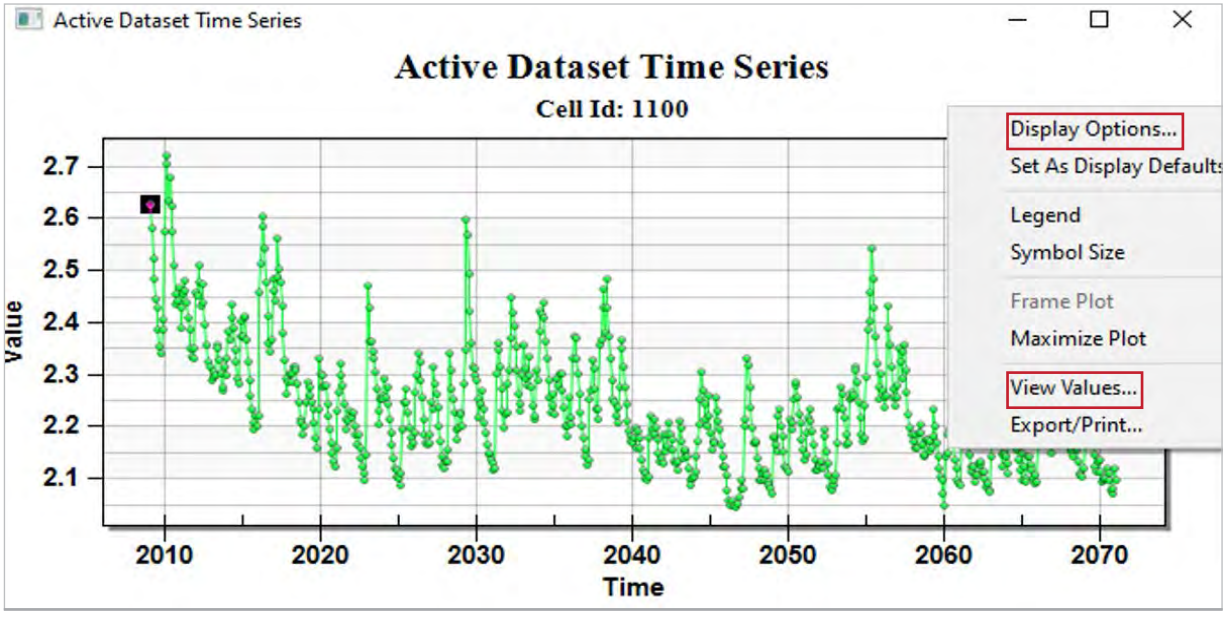
المصدر: الإسكوا وأكساد.

لعرض مخطط تغيُّر مناسيب المياه الجوفية في الخلية المحدّدة:

- من القائمة Display، نختار الأمر Plot Wizard.
- في الواجهة Plot Wizard، نختار Active Dataset Time Series ثم نختار Finish.
- يَظهر مخطط مناسيب المياه الجوفية في الخلية 1,100 لكامل فترة المحاكاة.

يمكن تغيُّر مدة المخطط (فترة عرض البيانات) من القائمة المنسدلة بالزر الأيمن، واختيار Display Options. ويمكن إظهار قِيم الضاغط المحسوبة في الخلية من القائمة المنسدلة بالزر الأيمن واختيار View Values.



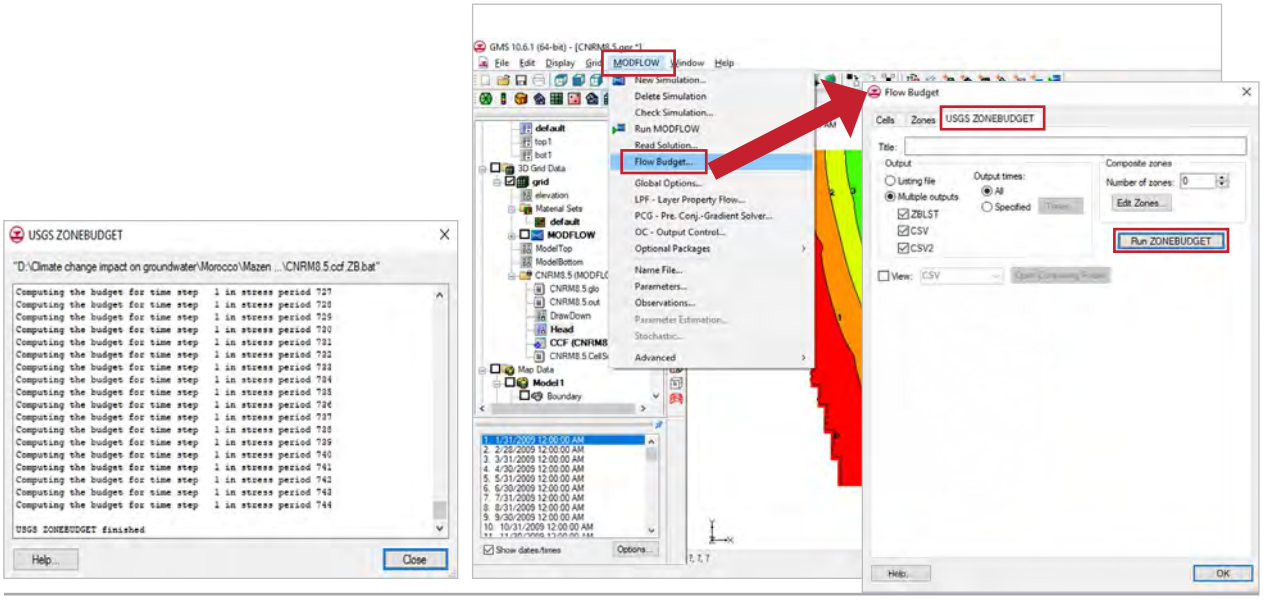


المصدر: الإسكوا وأكساد.

ملخص الموازنة المائية لفترة المحاكاة

يمكن الحصول على الموازنة المائية لفترة المحاكاة باتباع الخطوات التالية:

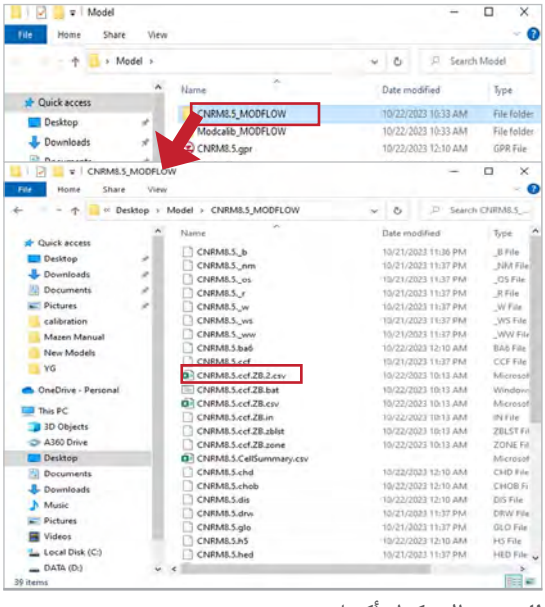
1. اختيار Flow Budget من القائمة MODFLOW.
2. اختيار الواجهة USGS ZONEBUDGET في نافذة Flow Budget.
3. اختيار Run ZONEBUDGET في الواجهة USGS ZONEBUDGET، فتُفتح نافذة USGS ZONEBUDGET.



المصدر: الإسكوا وأكساد.

عند انتهاء حساب الموازنة المائية في نافذة USGS ZONEBUDGET، نختار Close، ثم نختار OK في نافذة Flow Budget.

ويمكن الوصول إلى ملف الموازنة المائية CNRM8.5.ccf.ZB.2.csv الذي تم حسابه في المجلد CNRM8.5_MODFLOW. وهذا المجلد يحتوي على كل ملفات النموذج.



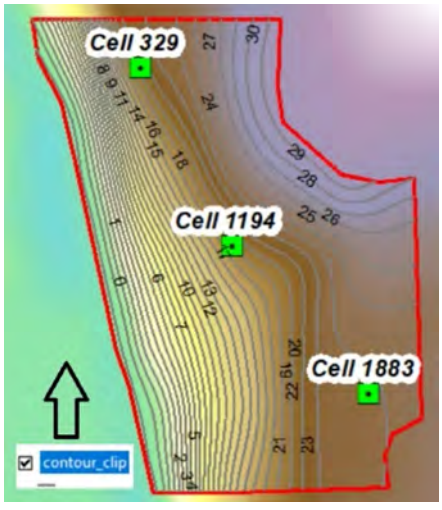
المصدر: الإسكوا وأكساد.

نتائج النموذج بتشغيله بعد إدخال بيانات النماذج المناخية المختلفة

سيتم عرض نتائج نموذج المياه الجوفية على النحو التالي:

- تغيُّرات مستوى المياه الجوفية عند ثلاث نقاط (الخلايا: Cell 329, Cell 1194, Cell 1883) موزّعة شمال ووسط وجنوب منطقة النموذج، وهي تعكس تغيُّرات الضاغط في أجزاء مختلفة من الحوض (الشكل 4-20).
- خرائط مستوى المياه الجوفية في بداية فترة التنبؤ ومنتصفها ونهايتها (2021 و2045 و2070).
- ملخص ميزانية المياه الجوفية لكل عشر سنوات في فترة التنبؤ وفترة المعايرة، وتشمل التغيُّرات في التغذية والصرف والتدفق الجانبي بالإضافة للمخزون الجوفي.
- خرائط هبوط منسوب المياه الجوفية للنموذج والتي تضمنت خريطة فرق المنسوب بين العامين 2021 و2070.

الشكل 4-20 خارطة تَساوي مناسيب سطح الأرض مبيَّنة عليها مواقع النقاط (الخلايا: Cell 1883, Cell 1194, Cell 329)



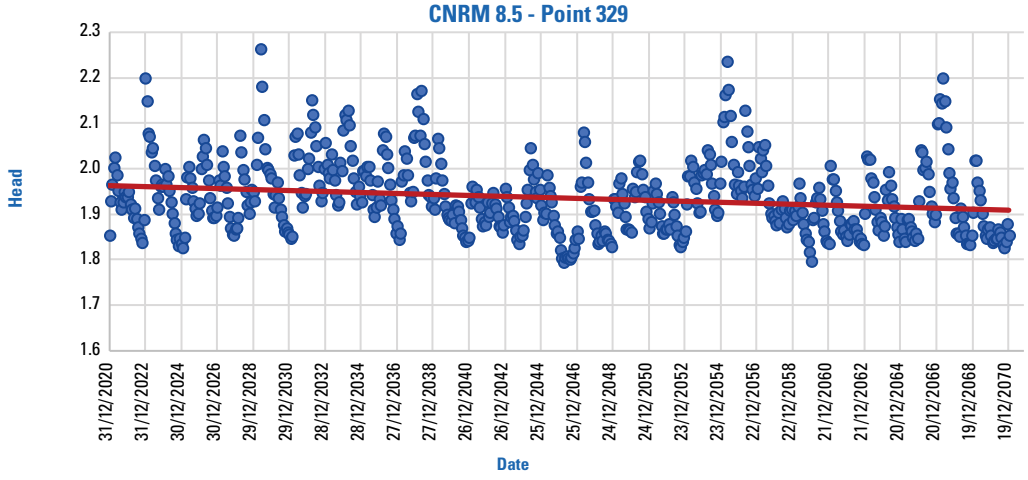
المصدر: الإسكوا وأكساد.

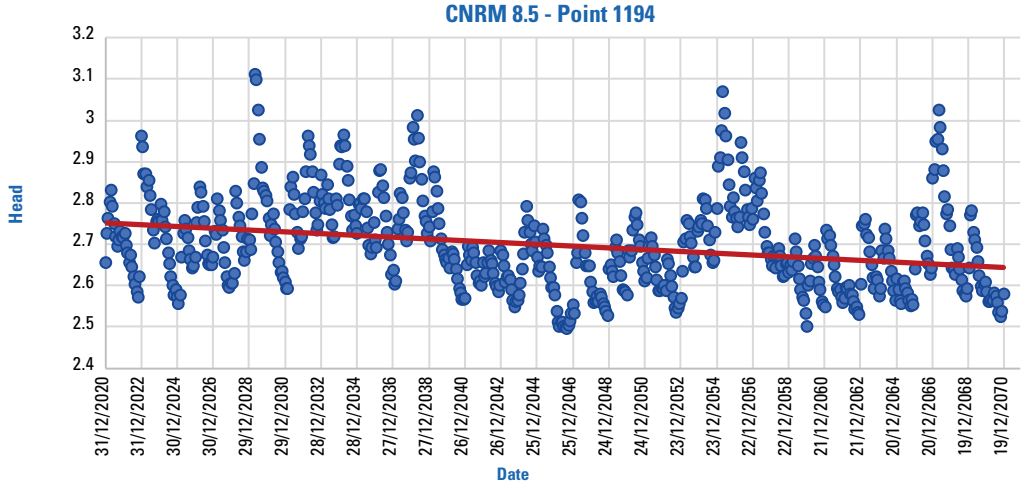
4-3 نتائج نموذج المناخ CNRM 8.5

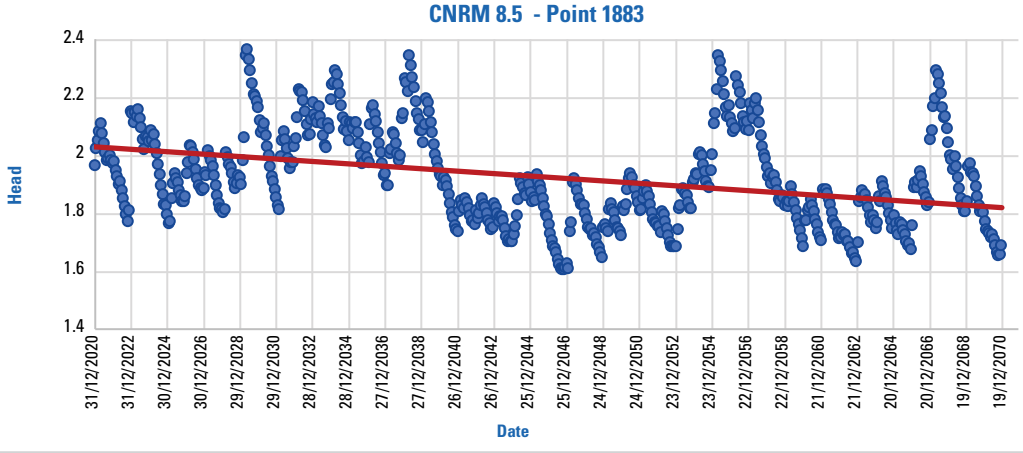
1. تغيُّرات مستوى المياه الجوفية عند نقاط معلومة من النموذج CNRM 8.5

يبيّن الشكل (4-21) تذبذب مستوى المياه الجوفية. وهو يُظْهِرُ أنّ المنسوب يميل بشكل عام نحو الانخفاض من الشمال إلى الجنوب، حيث ينخفض في الشمال Cell 329 حوالي 0.1 م، وفي الوسط Cell 1194 حوالي 0.18 م، وفي الجنوب Cell 1883 حوالي 0.33 م في أيلول/سبتمبر عام 2070 مقارنة بشهر أيلول/سبتمبر عام 2021. ويعود ذلك إلى تلقي النموذج تغذية جانبية من الحد الشرقي للنموذج في الجزء الشمالي من الحوض، وإلى عدم وجود تغذية جانبية في الجنوب.

الشكل 4-21 تغيُّر مناسيب المياه الجوفية المتوقع في النقاط (Cell 329, Cell 1194, Cell 1883) خلال فترة المحاكاة (2021-2070) بناءً على مخرجات النموذج المناخي CNRM 8.5





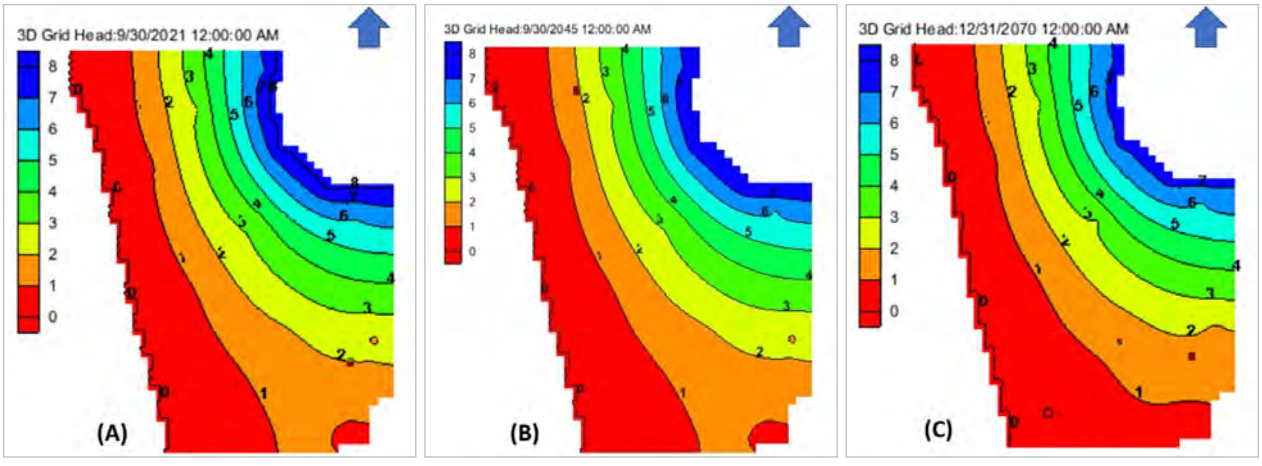


المصدر: الإسكوا وأكساد.

2. خرائط مستوى المياه الجوفية لفترات محدّدة CNRM 8.5

يبيّن الشكل (4-22) خرائط مناسيب (Head) المياه الجوفية في بداية التنبؤ – منتصف مدة التنبؤ – نهاية مدة التنبؤ حيث: (A) = نهاية 9/2021، (B) = نهاية 9/2045، (C) = نهاية 9/2070.

الشكل 4-22 خرائط مناسيب المياه الجوفية لمنطقة الدراسة في نهاية الشهر التاسع من السنوات 2021 و2045 و2070، للنموذج المناخي CNRM 8.5



المصدر: الإسكوا وأكساد.

تشير هذه الخرائط إلى انخفاض طفيف في مستوى المياه الجوفية اعتباراً من الشمال الشرقي باتجاه الغرب والجنوب في بداية المحاكاة (A) ومنتصف المحاكاة (B) ونهاية المحاكاة (C). وانخفاض مستوى المياه الجوفية في الجنوب الشرقي عند منتصف مدة المحاكاة ونهايتها أوضح مما هو عليه في شمال شرق منطقة النموذج. ويعود ذلك إلى وجود التغذية الجانبية من الجهة الشمالية الشرقية.

3. ملخص الموازنة المائية للنموذج CNRM 8.5

يلخص الجدول 4-3 الموازنة المائية خلال فترة التنبؤ (2021-2070)، مقارنة بالفترة المرجعية (2009-2020) بناءً على نتائج النموذج المناخي CNRM 8.5.

يلاحَظ انخفاض متوسط كميات التغذية من الراشح من الهاطل المطري بنسبة 15.8 في المائة خلال فترة المحاكاة، وازدياد التغذية من التدفق الجانبي الداخل بنسبة 6 في المائة، وازدياد السحب من الآبار بنسبة 21.6 في المائة، وازدياد الراشح من مياه الري بنفس النسبة، أي 21.6 في المائة، وانخفاض الصرف بالتدفق الجانبي الخارج بنسبة 14.4 في المائة، مما أدى إلى انخفاض في المخزون الجوفي بشكل وسطي، وذلك بقيمة 623 م^3/السنة، وهو ما يعادل انخفاضاً أقل بنسبة 97.7 في المائة من تغيُّر المخزون مقارنة بالفترة المرجعية.

الجدول 4-3 ملخص الموازنة المائية للفترة المرجعية 2009-2020 والفترات المستقبلية 2021-2070، بالاعتماد على مخرجات النموذج المناخي CNRM 8.5

ميزانية المياه/CNRM 8.5 (م³/السنة)						
المدى	مدخلات			مخرجات		مدخلات-مخرجات
	التغذية من هطول الأمطار	التغذية من الري	التدفق الجانبي	الآبار	التدفق الجانبي	تغيُّر متوسط المخزون السنوي
الفترة المرجعية (2009-2020)	245,685	127,978	803,951	511,863	692,882	-27,131
2021-2030	222,094	155,581	848,505	622,325	604,191	-337
2031-2040	249,738	155,581	840,845	622,325	625,448	-1,609
2041-2050	171,137	155,581	863,194	622,325	565,224	2,364
2051-2060	205,974	155,581	853,515	622,325	594,430	-1,685
2061-2070	185,349	155,581	855,225	622,325	575,677	-1,847
المتوسط	**206,858**	**155,581**	**852,257**	**622,325**	**592,994**	**-623**
التغيُّر النسبي مقارنة بالفترة المرجعية (نسبة مئوية)						
2021-2030	-9.6	21.6	5.5	21.6	-12.8	-98.8
2031-2040	1.6	21.6	4.6	21.6	-9.7	-94.1
2041-2050	-30.3	21.6	7.4	21.6	-18.4	-108.7
2051-2060	-16.2	21.6	6.2	21.6	-14.2	-93.8
2061-2070	-24.6	21.6	6.4	21.6	-16.9	-93.2
المتوسط	**-15.8**	**21.6**	**6.0**	**21.6**	**-14.4**	**-97.7**

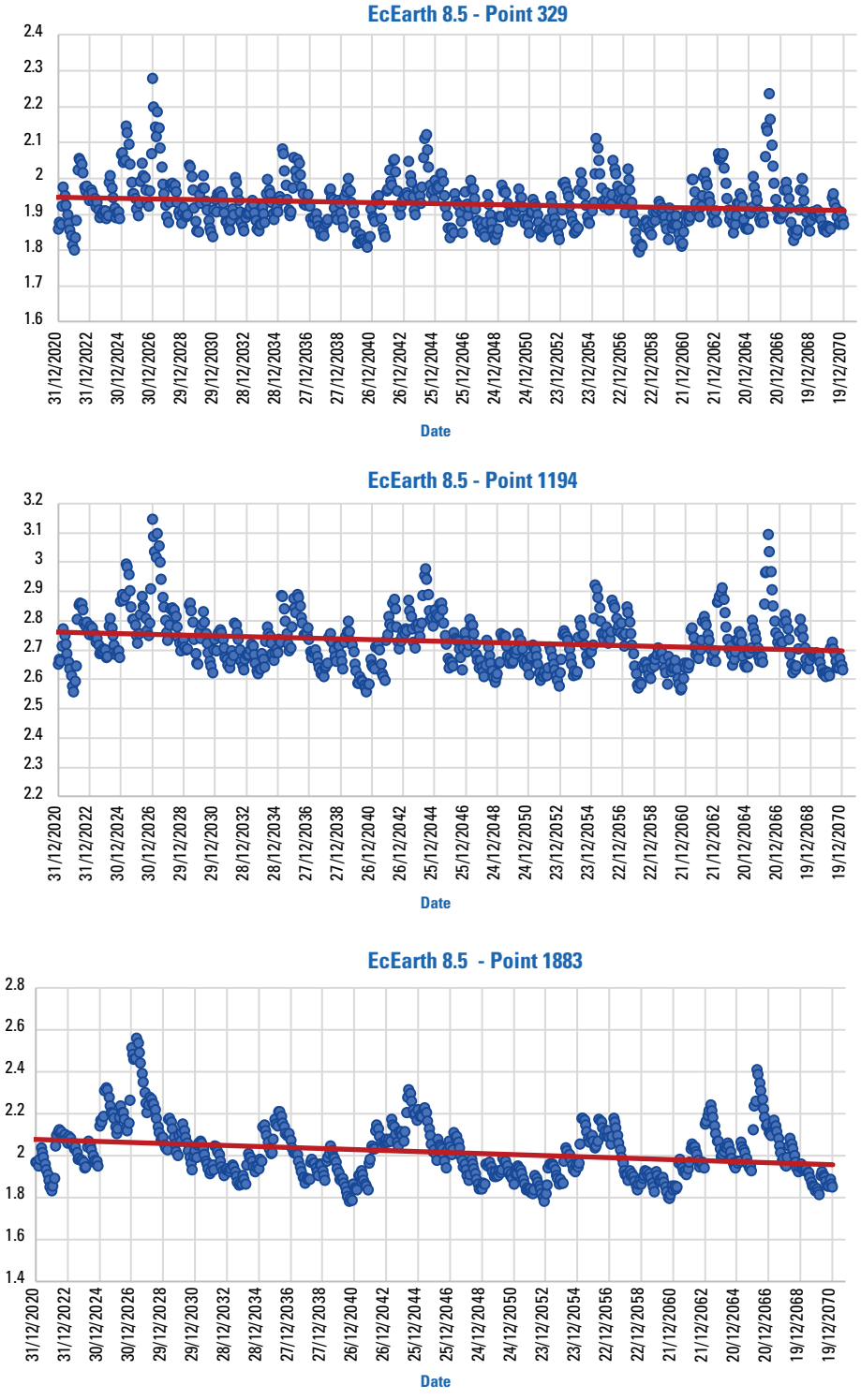
المصدر: الإسكوا وأكساد.

4-4 نتائج نموذج المناخ EcEarth 8.5

1. تغيُّرات مستوى المياه الجوفية عند نقاط محدّدة من النموذج EcEarth 8.5

يبيّن الشكل (4-23) تذبذب مستوى المياه الجوفية. وبشكل عام، يميل المنسوب نحو الانخفاض من الشمال إلى الجنوب. وهو يرتفع في الشمال (Cell 329) بحوالي 0.02 م؛ وفي الوسط (Cell 1194) بحوالي 0.004 م؛ وينخفض في الجنوب (Cell 1883) بحوالي 0.05 م في شهر أيلول/سبتمبر 2070، مقارنة بشهر أيلول/سبتمبر عام 2021. ويعود ذلك إلى تلقّي النموذج تغذية جانبية شبه ثابتة من الحد الشرقي للنموذج بالجزء الشمالي من الحوض، وعدم وجود تغذية جانبية في الجنوب.

الشكل 4-23 التغيُّر المتوقّع في مناسيب المياه الجوفية في النقاط (Cell 329, Cell 1194, Cell 1883) خلال فترة المحاكاة (2020-2070) بناءً على مخرجات النموذج المناخي EcEarth 8.5

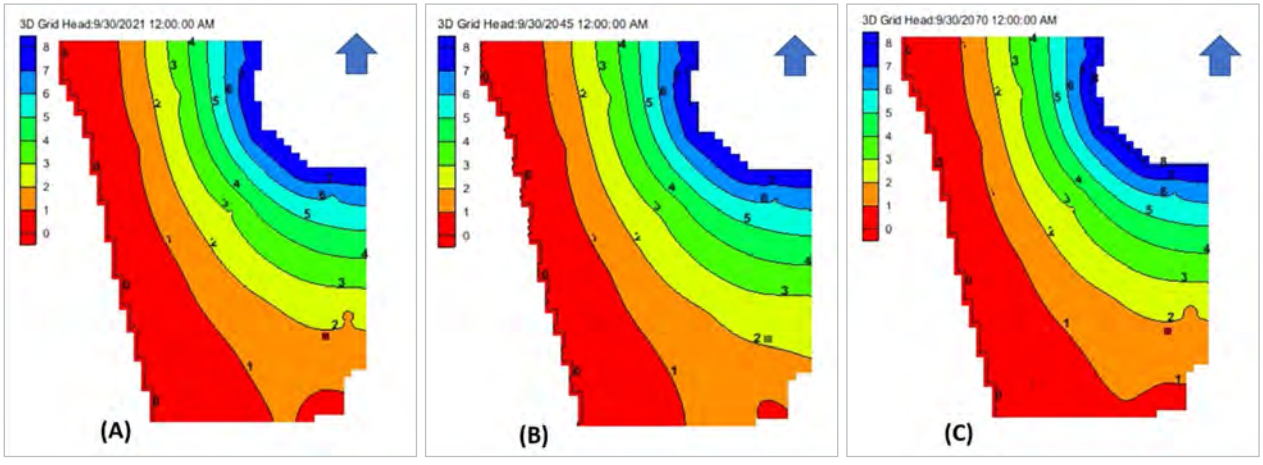


المصدر: الإسكوا وأكساد.

2. خرائط مستوى المياه الجوفية لفترات محدّدة EcEarth 8.5

يبيّن الشكل 4-24 خرائط مناسيب (Head) المياه الجوفية في بداية التنبؤ – منتصف مدة التنبؤ – نهاية مدة التنبؤ حيث: (A) = نهاية 9/2021، (B) = نهاية 9/2045، (C) = نهاية 9/2070.

الشكل 4-24 خرائط مناسيب (Head) المياه الجوفية لمنطقة الدراسة في بداية التنبؤ - منتصف مدة التنبؤ - نهاية مدة التنبؤ حيث: (A) = نهاية 9/2021، (B) = نهاية 9/2045، (C) = نهاية 9/2070



المصدر: الإسكوا وأكساد.

تشير هذه الخرائط إلى انخفاض مستوى المياه الجوفية من الشمال الشرقي باتجاه الغرب والجنوب في بداية المحاكاة (A) ومنتصف المحاكاة (B) ونهاية المحاكاة (C)، ويعود ذلك إلى التغذية الجانبية من الجهة الشمالية الشرقية.

3. ملخص الموازنة المائية للنموذج EcEarth 8.5

يلخص الجدول 4-4 الموازنة المائية خلال فترة التنبؤ (2021-2070)، ويقارنها بالفترة المرجعية (2009-2020) بناءً على نتائج النموذج المناخي EcEarth 8.5.

يلاحَظ انخفاض متوسط كميات التغذية من الراشح من الهاطل المطري بنسبة 21.6 في المائة خلال فترة المحاكاة، وازدياد التغذية من التدفق الجانبي الداخل بنسبة 6.5 في المائة، وازدياد السحب من الآبار بنسبة 21.6 في المائة، وازدياد الراشح من مياه الري بنفس النسبة، أي 21.6 في المائة، ونقص الصرف بالتدفق الجانبي الخارج بنسبة 15.9 في المائة. وأدى ذلك إلى انخفاض المخزون الجوفي بشكل وسطي وبقيمة 221 م^3/السنة، وهو ما يعادل انخفاضاً أقل بنسبة 99.2 في المائة من تغيُّر المخزون مقارنة بالفترة المرجعية.

الجدول 4-4 ملخص الموازنة المائية للفترة المرجعية 2009-2020 والفترات المستقبلية 2021-2070، بالاعتماد على مخرجات النموذج المناخي EcEarth 8.5

ميزانية المياه/EcEarth 8.5 (م³/السنة)						
المدى	مدخلات			مخرجات		مدخلات-مخرجات
	التغذية من هطول الأمطار	التغذية من الري	التدفق الجانبي	الآبار	التدفق الجانبي	تغيُّر متوسط المخزون السنوي
الفترة المرجعية (2009-2020)	245,685	127,978	803,955	511,863	692,879	-272,810
2021-2030	228,414	155,581	848,368	622,325	606,387	3,651
2031-2040	173,225	155,581	863,166	622,325	571,264	-1,616
2041-2050	196,639	155,581	853,781	622,325	584,885	-1,209
2051-2060	172,016	155,581	861,286	622,325	567,112	-554
2061-2070	192,213	155,581	856,156	622,325	583,000	-1,375
المتوسط	**192,501**	**155,581**	**856,551**	**622,325**	**582,530**	**-221**
التغيُّر النسبي مقارنة بالفترة المرجعية (نسبة مئوية)						
2021-2030	-7.0	21.6	5.5	21.6	-12.5	-113.5
2031-2040	-29.5	21.6	7.4	21.6	-17.6	-94.0
2041-2050	-20.0	21.6	6.2	21.6	-15.6	-95.5
2051-2060	-30.0	21.6	7.1	21.6	-18.2	-98.0
2061-2070	-21.8	21.6	6.5	21.6	-15.9	-94.9
المتوسط	**-21.6**	**21.6**	**6.5**	**21.6**	**-15.9**	**-99.2**

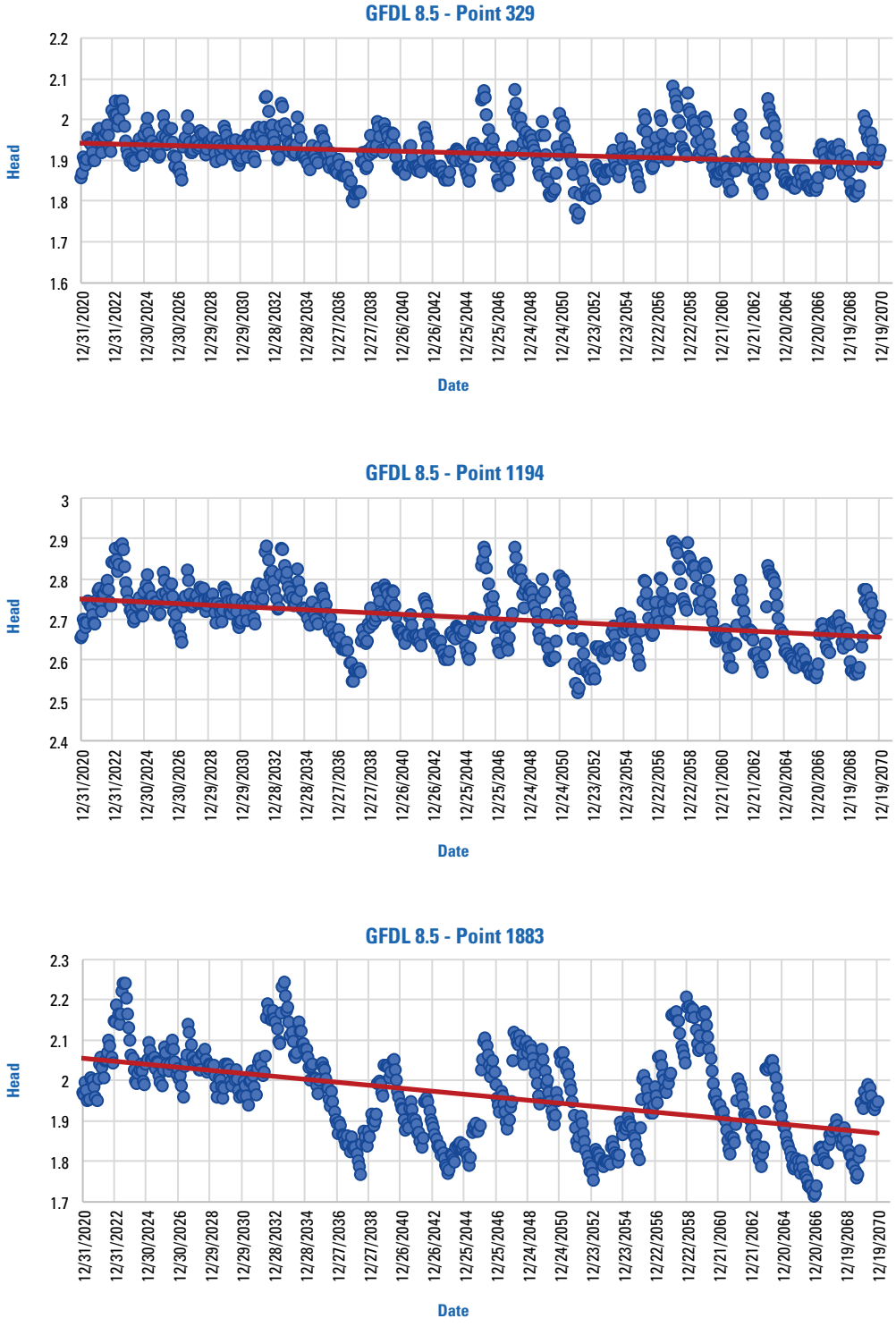
المصدر: الإسكوا وأكساد.

5-4 نتائج نموذج المناخ GFDL 8.5

1. تغيُّرات مستوى المياه الجوفية عند نقاط محدّدة من النموذج GFDL 8.5

يبيّن الشكل 4-25 تذبذب مستوى المياه الجوفية. ويميل المنسوب بشكل عام نحو الانخفاض من الشمال إلى الجنوب، حيث ينخفض في الشمال (Cell 329) بحوالي 0.016 م، وينخفض في الوسط (Cell 1194) بحوالي 0.026 م، وينخفض في الجنوب (Cell 1883) بحوالي 0.045 م في شهر أيلول/سبتمبر عام 2070 مقارنة بشهر أيلول/سبتمبر عام 2021. ويعود ذلك إلى تلقّي النموذج تغذية جانبية شبه ثابتة من الحد الشرقي للنموذج في الجزء الشمالي من الحوض، وعدم وجود تغذية جانبية في الجنوب.

الشكل 4-25 تغيُّر مناسيب المياه الجوفية المتوقع في النقاط (Cell 329, Cell 1194, Cell 1883) خلال فترة المحاكاة (2020-2070)، بناءً على مخرجات النموذج المناخي GFDL 8.5

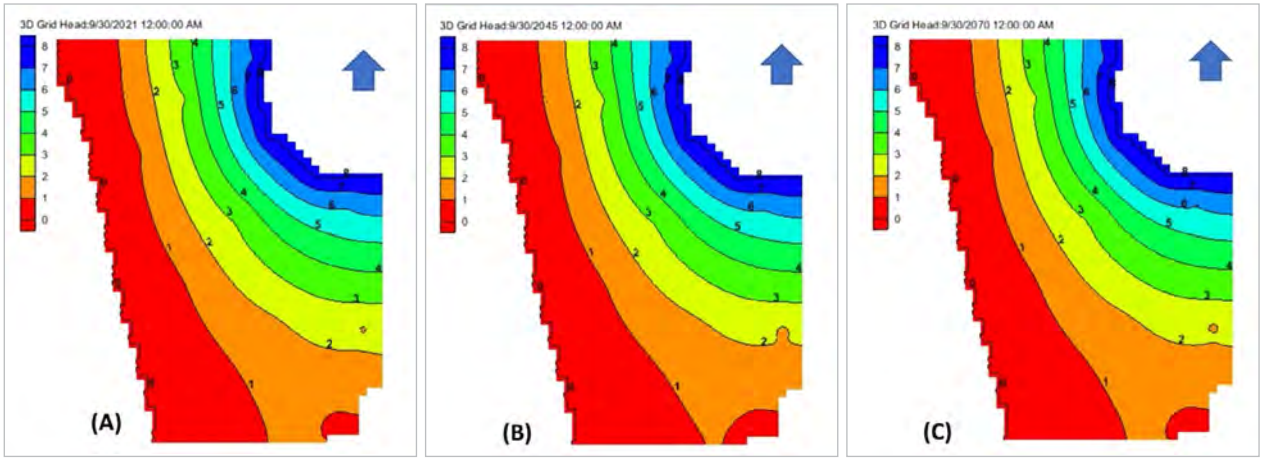


المصدر: الإسكوا وأكساد.

2. خرائط مستوى المياه الجوفية لفترات محدّدة GFDL 8.5

يبيّن الشكل 4-26 خرائط مناسيب (Head) المياه الجوفية لمنطقة الدراسة في بداية التنبؤ – منتصف مدة التنبؤ – نهاية مدة التنبؤ حيث: (A) = نهاية 9/2021، (B) = نهاية 9/2045، (C) = نهاية 9/2070.

الشكل 4-26 خرائط مناسيب المياه الجوفية في نهاية الشهر التاسع من السنوات 2021 و2045 و2070 للنموذج المناخي GFDL 8.5



المصدر: الإسكوا وأكساد.

تشير هذه الخرائط إلى انخفاض طفيف في مستوى المياه الجوفية من الجنوب الشرقي باتجاه الغرب والجنوب في بداية المحاكاة (A) ومنتصف المحاكاة (B) ونهاية المحاكاة (C)، ويعود ذلك إلى التغذية الجانبية من الجهة الشمالية الشرقية.

3. ملخص الموازنة المائية للنموذج GFDL 8.5

يلخص الجدول 4-5 الموازنة المائية في منطقة الدراسة خلال فترة التنبؤ (2021-2070)، مقارنة بالفترة المرجعية (2009-2020) وبناءً على نتائج النموذج المناخي **GFDL 8.5**.

يلاحَظ انخفاض متوسط كميات التغذية من الراشح من الهاطل المطري بنسبة 28.5 في المائة خلال فترة المحاكاة، وازدياد التغذية من التدفق الجانبي الداخل بنسبة 7.3 في المائة، وازدياد السحب من الآبار بنسبة 21.6 في المائة، وازدياد الراشح من مياه الري بنفس النسبة، أي 21.6 في المائة، ونقص الصرف بالتدفق الجانبي الخارج بنسبة 17.6 في المائة. وأدى ذلك إلى تذبذب تغيُّر المخزون بين زيادة ونقصان. وكان متوسط التغيُّر زيادة المخزون بمقدار 739 م^3/السنة، وهو ما يعادل انخفاضاً بنسبة 102.7 في المائة في السحب من المخزون مقارنة بالفترة المرجعية.

الجدول 4-5 ملخص الموازنة المائية للفترة المرجعية 2009-2020 والفترات المستقبلية 2021-2070، بالاعتماد على مخرجات النموذج المناخي GFDL 8.5

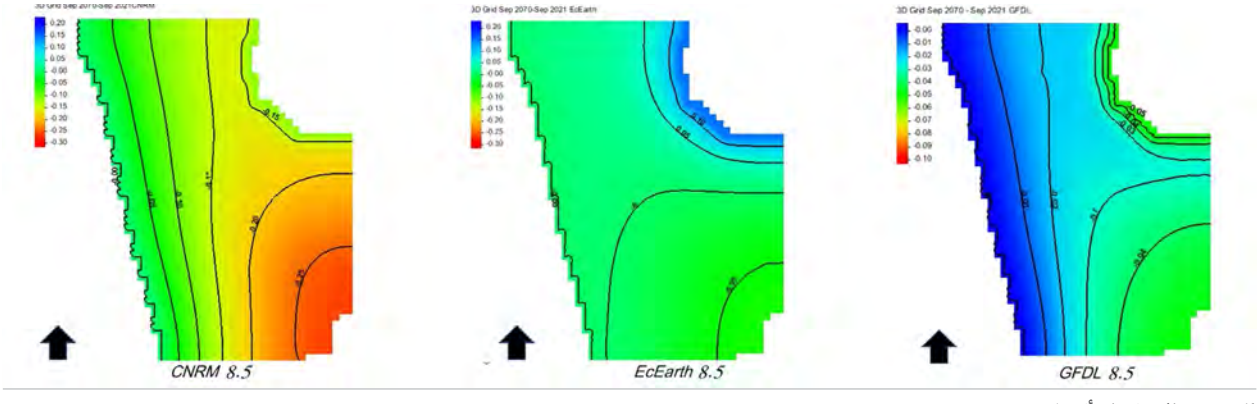
ميزانية المياه/GFDL 8.5 (م³/السنة)						
المدى	مدخلات			مخرجات		مدخلات-مخرجات
	التغذية من هطول الأمطار	التغذية من الري	التدفق الجانبي	الآبار	التدفق الجانبي	تغيُّر متوسط المخزون السنوي
الفترة المرجعية (2009-2020)	245,685	127,978	803,955	511,863	692,879	-272,810
2021-2030	199,455	155,581	858,461	622,325	589,213	1,959
2031-2040	187,438	155,581	857,204	622,325	578,813	-915
2041-2050	172,395	155,581	867,199	622,325	566,038	6,813
2051-2060	170,770	155,581	860,202	622,325	569,578	-5,350
2061-2070	147,921	155,581	869,767	622,325	549,755	1,188
المتوسط	**175,596**	**155,581**	**862,567**	**622,325**	**570,680**	**739**
التغيُّر النسبي مقارنة بالفترة المرجعية (نسبة مئوية)						
2021-2030	-18.8	21.6	6.8	21.6	-15.0	-107.2
2031-2040	-23.7	21.6	6.6	21.6	-16.5	-96.6
2041-2050	-29.8	21.6	7.9	21.6	-18.3	-125.1
2051-2060	-30.5	21.6	7.0	21.6	-17.8	-80.3
2061-2070	-39.8	21.6	8.2	21.6	-20.7	-104.4
المتوسط	**-28.5**	**21.6**	**7.3**	**21.6**	**-17.6**	**-102.7**

المصدر: الإسكوا وأكساد.

4-6 خرائط هبوط منسوب المياه الجوفية

يتضمّن الشكل (4-27) الخرائط الكنتورية للانخفاض في مستويات المياه الجوفية خلال فترة التنبؤ (2021-2070). وتعبّر هذه الخرائط عن فرق الضاغط بين فترة الإجهاد أيلول/سبتمبر 2021 وفترة الإجهاد أيلول/سبتمبر 2070 من المحاكاة.

الشكل 4-27 خرائط انخفاض مناسيب المياه الجوفية (Head Sep/2021 - Head Sep/2070) للنماذج المناخية: CNRM 8.5, EcEarth 8.5, GFDL 8.5



المصدر: الإسكوا وأكساد.

يتبيّن أن أكبر انخفاض يقع في الجهة الجنوبية الشرقية للنماذج الثلاثة. ويعود ذلك إلى عدم وجود تغذية جانبية عند هذه الجهة من النموذج. ولا يزيد فرق الضاغط بين فترة الإجهاد (أيلول/سبتمبر 2021) وفترة الإجهاد (أيلول/سبتمبر 2070) عن 0.3م، وذلك لكل النماذج.

7-4 ملخص ميزانيات المياه لكل السيناريوهات المناخية

يلخص الجدول 4-6 متوسط ميزانية المياه على مدار فترة المحاكاة بأكملها لجميع النماذج المناخية في طبقة المياه الجوفية.

ومن المتوقع أن يزداد متوسط الضخ بنسبة 21.6 في المائة عما هو عليه في الفترة المرجعية (2009-2020)، وأن يزداد الراشح من مياه الري بنفس النسبة، أي 21.6 في المائة. ويُتوقّع أن تنقص التغذية من الأمطار بنسبة 22 في المائة مع زيادة التدفق الجانبي الداخل بنسبة 6.6 في المائة ونقص التدفق الخارج بنسبة 16 في المائة، مما يؤدي إلى تقليص الفرق بين الداخل والخارج إلى 35 م^3/السنة، أي أقل بنسبة 99.9 في المائة من تغيُّر المخزون مقارنة بالفترة المرجعية.

الجدول 4-6 ملخص الموازنة المائية للحامل المائي للفترة المرجعية 2009-2020 والفترات المستقبلية 2021-2070، لكل النماذج المناخية

ميزانية المياه (متوسط)						
النموذج المناخي	مدخلات			مخرجات		مدخلات-مخرجات
	التغذية من هطول الأمطار	التغذية من الري	التدفق الجانبي	الآبار	التدفق الجانبي	التخزين السنوي
	م^3/السنة					
الفترة المرجعية (2009-2020)	245,685	127,978	803,951	511,863	692,882	-27,131
الفترات المستقبلية (2021-2070)						
النموذج المناخي	تغيُّر متوسط التغذية السنوية من هطول الأمطار	تغيُّر متوسط التغذية السنوية من الري	التدفق الجانبي	الآبار	التدفق الجانبي	تغيُّر متوسط التخزين السنوي
CNRM 8.5	206,858	155,581	852,257	622,325	592,994	-623
EcEarth 8.5	192,501	155,581	856,551	622,325	582,530	-221
GFDL 8.5	175,596	155,581	862,567	622,325	570,680	739
المتوسط	**191,652**	**155,581**	**857,125**	**622,325**	**582,068**	**-35**
التغيُّر النسبي مقارنة بالفترة المرجعية (في المائة)						
النموذج المناخي	تغيُّر متوسط التغذية السنوية من هطول الأمطار	تغيُّر متوسط التغذية السنوية من الري	التدفق الجانبي	الآبار	التدفق الجانبي	تغيُّر متوسط التخزين السنوي
CNRM 8.5	-15.8	21.6	6.0	21.6	-14.4	-97.7
EcEarth 8.5	-21.6	21.6	6.5	21.6	-15.9	-99.2
GFDL 8.5	-28.5	21.6	7.3	21.6	-17.6	-102.7
المتوسط	**-22.0**	**21.6**	**6.6**	**21.6**	**-16.0**	**-99.9**

المصدر: الإسكوا وأكساد.

5

الخلاصة والتوصيات

تُعَدُّ النمذجة الرياضية لحركة المياه الجوفية أداة فعالةً في تخطيط الطبقات المائية الجوفية المعقدة وإدارتها، حيث تُؤمّن هذه النماذج إطاراً لجمع البيانات الحقلية والمعلومات، واختباراً للأفكار والفرضيات المختلفة عن مواصفات هذه الطبقات والترابط بينها. ويتم، بواسطة النموذج، تحديد عناصر الموازنة المائية ومخزون الطبقة الجوفية بدقة نتيجة سيناريوهات مختلفة.

ويؤثّر تغيُّر المناخ على المياه الجوفية بأشكال مختلفة، وذلك إما مباشرة عن طريق تغيُّر قِيم الراشح وتغذية المياه الجوفية من الهطولات، وإما بشكل غير مباشر عن طريق زيادة السحب الجوفي لتغطية العجز في الموارد المائية السطحية. وتمثّل النمذجة الرياضية لحركة المياه الجوفية طريقة ملائمة لإدخال هذه العوامل المختلفة وفحص تأثيرها على مخزون المياه الجوفي المستقبلي.

وقد أصبح تقدير تغيُّر مخزون المياه الجوفية بالاعتماد على النمذجة الرياضية نتيجة تغيُّر المناخ، وباستخدام نتائج النماذج المناخية الإقليمية، أمراً ضرورياً في ظل التغيُّرات المناخية الحاصلة والتوقّعات بتزايد تكرار فترات الجفاف مستقبلاً، وخاصة في المنطقة العربية. وتؤدي كميات الأمطار دوراً رئيسياً في تقدير كمية الراشح إلى المياه الجوفية. وهنا تبرز أهمية تقدير تغيُّر الراشح إلى المياه الجوفية من الهطولات المطرية المتوقعة في الفترة المستقبلية والمستخلصة من نتائج النمذجة المناخية.

وبواسطة النموذج، يتم تحديد عناصر الموازنة المائية للطبقة الجوفية بدقة، وتحديد الآفاق المستقبلية لمناطق الاستثمار الكثيف، سواء منها الحالية أو التي ستحدّدها الجهة المسؤولة عن إدارة الطبقة الجوفية. كذلك، يمكن تشغيل النموذج حسب سيناريوهات مختلفة لدراسة تطوير إدارة الموارد المائية المتاحة. وهذه النتائج مهمة جداً، إذ إنها تتيح لصانعي القرار التخطيط لاستثمار الموارد المائية المحدودة بشكل رشيد.

وقد عُرض في هذا الدليل مثال على تطبيق النمذجة الرياضية. واتضح من دراسة نتائج النماذج المناخية ومتوسطات التغذية والصرف بشكل عام أن تغيُّر الهطولات المطرية يؤثر على مخزون المياه الجوفية بشكل مباشر. وفي هذا المثال، مالت التغذية من الأمطار إلى الانخفاض على طول فترة المحاكاة، كما استمر السحب من المخزون، مسبّباً انخفاضاً في مناسيب المياه الجوفية بحدود 0.3 م كحد أقصى، مع تثبيت كمية الضخ من الآبار لكامل فترة المحاكاة (2021-2070) عند 155 م^3/اليوم للبئر. أما في حال ازدياد كميات الضخ من الآبار في الفترة من 2021 حتى 2070، وهو ما يقتضيه انخفاض الهطول وارتفاع درجات الحرارة وما يصاحب ذلك من ازدياد في الاحتياج المائي للمحاصيل، فإن السحب من المخزون سيزداد بشكل أكبر، مسبّباً انخفاضاً أعلى في مناسيب المياه الجوفية.

ومن المتوقّع أن ترتفع معدلات الضخ من الآبار أو أن يزداد عدد الآبار الاستثمارية (ما يعني ازدياد كميات السحب من المياه الجوفية). وسيفاقم ذلك استنفاد الخزان الجوفي، ولا سيّما إذا ترافق مع انخفاض الهطول المطري أكثر مما هو متوقع في الحالة الدراسية (يُتوقع انخفاض الهطول المطري بنسب تصل إلى 50 في المائة في بعض المناطق العربية)، وهو ما يمكن التنبؤ به باستخدام النماذج الرياضية.

بشكل عام، يوصى بما يلي للتكيُّف مع تغيُّر المناخ:

1. اعتماد تقنيات أفضل لإدارة الري، مما يتطلب جدولة الري واستخدام كمية من مياه الري المطابقة لمتطلبات المياه الفعلية للمحصول، لتجنّب خسائر المياه بسبب التبخّر والتسرّب العميق.
2. تحسين إنتاجية المياه، من خلال تطبيق الري الناقص. والري الناقص هو استجابة تكيُّفية فعّالة لتغيُّر المناخ. وقد يكون انخفاض الغلة الناتج صغيراً مقارنة بالفوائد المكتسبة من تحويل المياه المتوفرة لري المحاصيل الأخرى التي لا تكفيها المياه عادةً في ظل ممارسات الري التقليدية.
3. تحسين كفاءة استخدام المياه من خلال تطبيق طرق الري الحديثة.
4. استخدام تقنيات حصاد المياه السطحية حيث أمكن، لاستخدامها كبديل عن المياه الجوفية للري أو لاستخدامها لتغذية وشحن المياه الجوفية.
5. زيادة استثمار المياه غير التقليدية (المياه العادمة المعالَجة) واستخدامها في الري لتخفيف الضغط عن الحوامل الجوفية.
6. يمكن لممارسات الزراعة المحافِظة أيضاً أن تساهم في جعل الأنظمة الزراعية أكثر مرونة في مواجهة تغيُّر المناخ. وتعتمد الزراعة العضوية على ثلاثة مبادئ:
   - الحد الأدنى من الاضطراب الميكانيكي للتربة.
   - تنويع الأنواع من خلال دورات المحاصيل المتنوّعة التي تشمل ثلاثة محاصيل مختلفة على الأقل.
   - غطاء عضوي دائم للتربة من مخلفات المحاصيل، يوفر غطاء لمخلفات مياه الري ويزيد تدريجياً من المادة العضوية في التربة، ويقضي على الأعشاب الضارة. ويمكن أن يؤدي أيضاً إلى خفض تكاليف الآلات والوقود والوقت المرتبط بالحرث. كذلك، تحسِّن الزراعة العضوية خصائص التربة الفيزيائية.


©Passionwith/stock.adobe.com

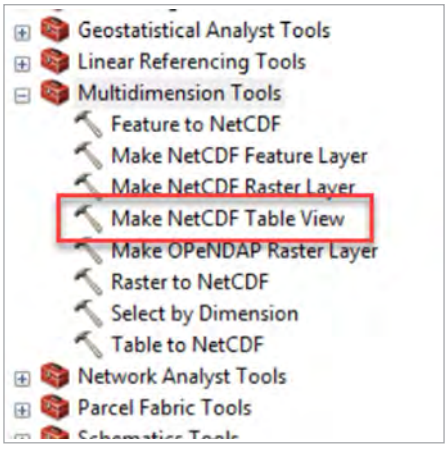
المرفق

منهجية تحميل البيانات المناخية

استخلاص بيانات الأمطار اليومية من ملفات NetCDF لنماذج المنطقة العربية

يمكن استخدام الأداة Make NetCDF Table View الموجودة تحت الحزمة Multidimension Tools في Arctoolbox في نظام ArcGIS لإنشاء جدول لجميع القِيم من ملف NetCDF عند موقعٍ معيّن (شكل المرفق 1).

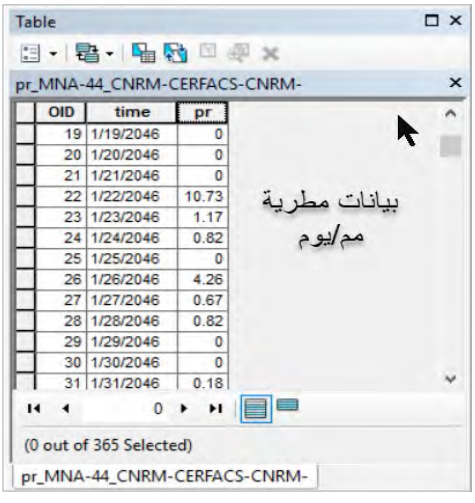
شكل المرفق 1. الأداة Make NetCDF Table View ضمن نافذة Arctoolbox



عند فتح الأداة، يتم تحديد ملف NetCDF المناسب، ثم تحديد متحوّل المناخ المطلوب، واختيار الوقت Time من أجل «row dimensions»، ثم اختيار nlon وnlat من أجل: X-Dimension وY-Dimension على التوالي، ثم إدخال قِيم إحداثيات nlon وnlat المناسبة للموقع المحدّد (شكل المرفق 2).

شكل المرفق 2. إدخال المعلومات اللازمة ضمن نافذة الأداة Make NetCDF Table View

شكل المرفق 3. جدول بيانات الأمطار اليومية الناتج عن أداة Make NetCDF Table View



OID	time	pr
19	1/19/2046	0
20	1/20/2046	0
21	1/21/2046	0
22	1/22/2046	10.73
23	1/23/2046	1.17
24	1/24/2046	0.82
25	1/25/2046	0
26	1/26/2046	4.26
27	1/27/2046	0.67
28	1/28/2046	0.82
29	1/29/2046	0
30	1/30/2046	0
31	1/31/2046	0.18

بعد ذلك، يتم توليد جدولٍ للقِيم في الموقع المطلوب (شكل المرفق 3). وهنا، لا بدّ من الانتباه إلى الدقة الزمنية لملف NetCDF والتي تُستخدم في توليد القياسات الصحيحة للمتحوّل المناخي المدروس. على سبيل المثال، بيانات الأمطار هي عبارةٌ عن بياناتٍ يومية. لذلك، تمثل القِيم في الجدول البيانات المطرية اليومية (مم/اليوم). وكذلك الأمر بالنسبة للمتحوّلات المناخية الموسمية، بما أن وحدات القياس تكون على شكل يوم/فصل/سنة.

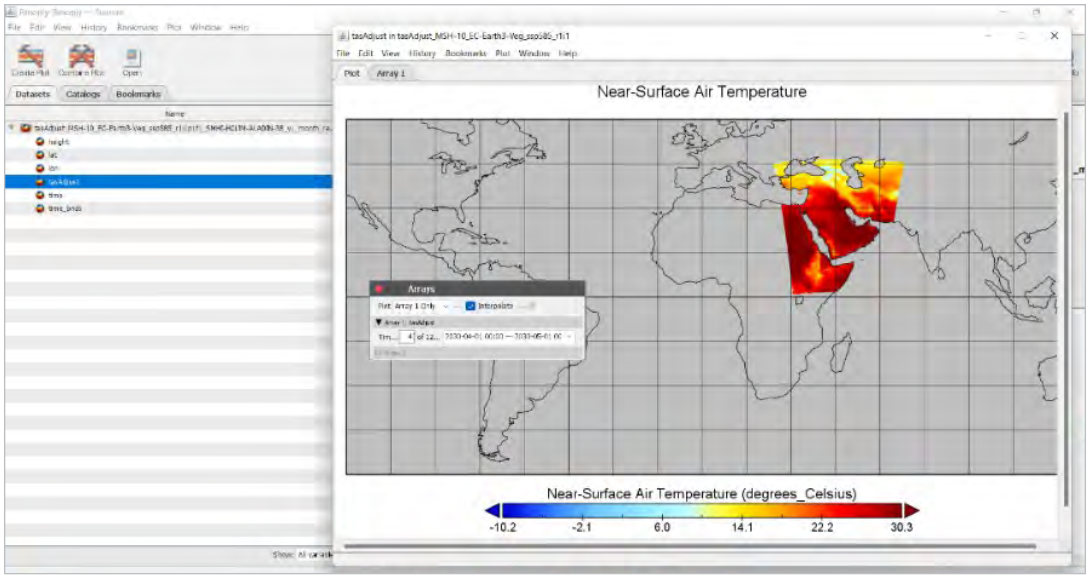
تحميل بيانات التغيُّرات المناخية RICCAR لنماذج المشرق العربي

تعتمد منهجية تحميل بيانات التغيُّرات المناخية لنماذج المشرق العربي دقة 10 كم. ويبلغ عدد هذه النماذج ستة، هي: CMCC-CM2-SR5، CNRM-ESM2-1، MPI-ESM1-2-LR، MRI-ESM2-0، NorESM2-MM. وهي تتعلق بالحرارة القصوى والحرارة الدنيا وكمية الهطول المطري بشكل يومي وشهري وبتنسيق الملفات من نوع NetCDF، والتي تشمل جميع المعلومات الجغرافية (إحداثيات الموقع) وتلك المتعلقة بالسلسلة الزمنية (1961-2075) والعنصر المناخي (حرارة أو هطول). وتتوافق ملفات NetCDF مع العديد من حزم البرامج مفتوحة المصدر والمرخصة، ومنها نُظُم المعلومات الجغرافية مثل ArcMap, QGIS. وتعمل آلية تحميل البيانات من خلال منصتين مفتوحتي المصدر:

1. climate data operators (CDO): هي مجموعة من عوامل تشغيل بيانات المناخ، تعتمد على أنظمة التشغيل المفتوحة المصدر LINUX، أو على تطبيق محاكاة لـ LINUX ضمن windows مثل طرفية Cygwin64 Terminal CDO، أو نظام Ubuntu Windows Subsystem for Linux (WSL) وهو البرنامج الأكثر شيوعاً الذي يمكّن بيئة Linux على نظام Windows 10 أو Windows 11، ويتضمن مجموعة من الأوامر السطرية المستخدمة لتحميل البيانات المناخية وتحليلها. والبرنامج متوافق مع كل من NetCDF-3 (المعروف أيضاً باسم NetCDF-classic) وNetCDF-4 وGRIB1 وGRIB2 وتنسيقات أخرى. ولا تقتصر CDO على تطبيقات البيانات المناخية فقط، بل يمكن تطبيق العديد من وظائفها على مجموعات البيانات الشبكية الأخرى. وتتضمن CDO أكثر من 650 وظيفة مستخدمة لتحميل البيانات واقتطاع مجموعات البيانات، وإجراء العمليات الحسابية، ودمج الملفات وتقسيمها، وتنفيذ العمليات الإحصائية، وحساب مؤشرات الأحداث المتطرفة.

2. عارض Panoply لبيانات NetCDF وHDF وGRIB، الذي طوّره معهد جودارد لدراسات الفضاء التابع لإدارة الطيران والفضاء الوطنية (ناسا). ويعتبر هذا النظام عارض بيانات بشكل رئيسي، إذ لا يمكن تعديل الملفات أو تحويلها إلى سمات نقطية للعمل في نُظُم المعلومات الجغرافية. ومن المفيد مراجعة ملفات البيانات وخصائصها، حتى لو لم يتم الإشارة إليها جغرافياً بشبكة خطوط الطول والعرض التقليدية. ويمتلك النظام واجهة سهلة الاستخدام ويمكن تشغيلها على أنظمة MacOS وWindows وLinux وأنظمة الكمبيوتر الأخرى.

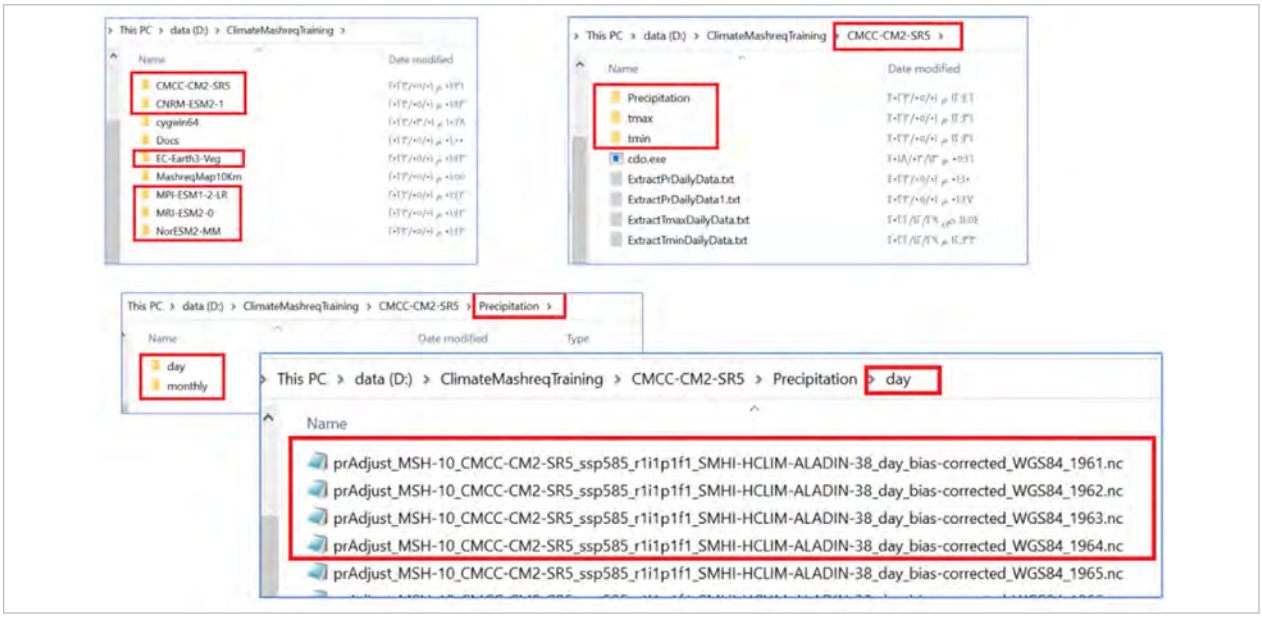
شكل المرفق 4. واجهة تطبيق عارض البيانات المناخية (Panoply)



مثال: آلية تحميل وتجهيز بيانات الأمطار لأحد النماذج المناخية باستخدام منصة CDO

يتم التعامل مع البيانات المناخية المخزّنة على القرص الصلب والمنزّلة من RICCAR بدقة 10 كم.

محتويات مجلد البيانات (ClimateMashreqTraining): ستة مجلدات بأسماء النماذج المناخية، يحتوي كل منها على 3 مجلدات للأمطار والحرارة العظمى والحرارة الصغرى. ويحتوي مجلد الأمطار على مجلد للأمطار اليومية (per day) والأمطار الشهرية (per month). ويحتوي مجلد الأمطار اليومية على مجموعة ملفات، وكل ملف يعبِّر عن عام اعتباراً من 1961 ولغاية 2070.

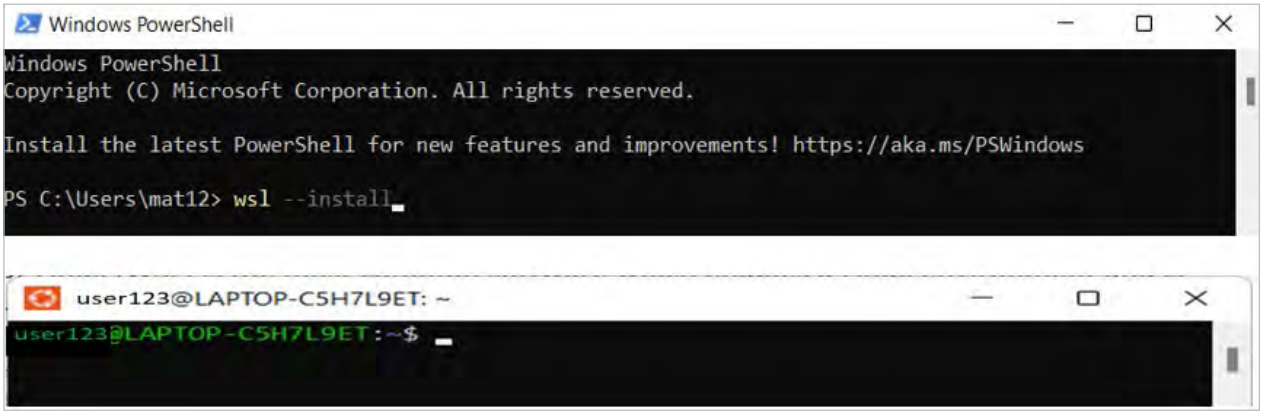


ضمن مجلد البيانات (ClimateMashreqTraining)، يوجد أيضاً مجلد بالبرمجية (Cgwin64)، وهو يحتوي على عدة مجلدات فرعية وبرنامج (Cgwin.bat) لتشغيل البرمجية.

وضمن فولدر البيانات الخاص بالنموذج، توجد عدة ملفات، منها (ExtactPrDailyDailyData1.txt) الذي يحتوي على أوامر استخراج البيانات.

تثبيت البرنامج

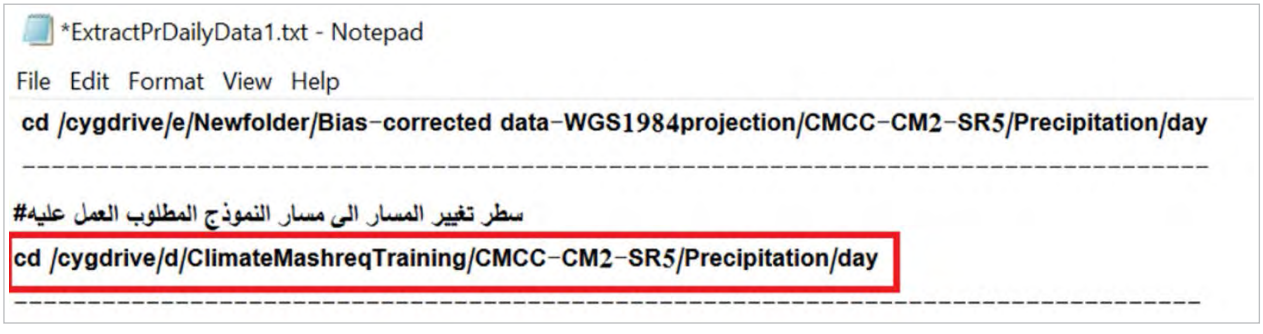
يجب على المستخدِم أولاً تثبيت البرنامج (WSL) على النحو التالي: تحديد موقع تطبيق Windows PowerShell باستخدام شريط بحث Windows، والضغط بزرّ الفأرة الأيمن للتشغيل كمسؤول في موجّه الأوامر ضمن نوع Windows PowerShell، على wsl–install.



تجهيز ملف الإجرائية (ExtactPrDailyDailyData1.txt): يجب تجهيز هذا الملف قبل البدء بإعطاء الأوامر على الشكل التالي:

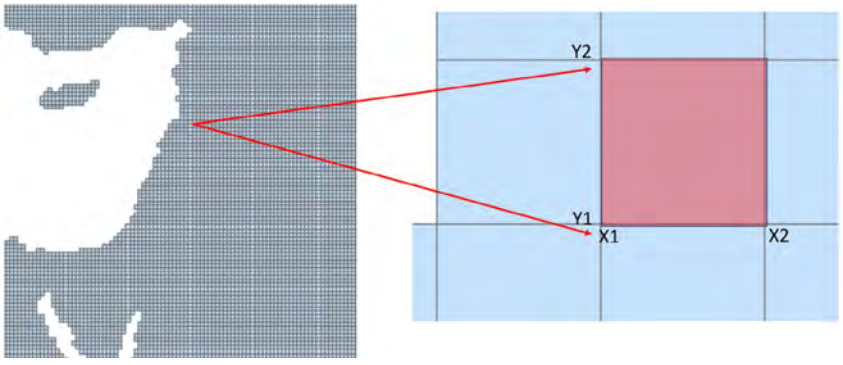
- تجهيز المسار المؤدي إلى بيانات النموذج: فمثلاً، عند التعامل مع البيانات اليومية للأمطار للنموذج CMCC، نغيِّر المسار إلى المجلد الذي يتضمن البيانات – ونضعه مبدئياً في الملف ExtactPrDailyDailyData1.txt ليكون جاهزاً للنسخ عند تنفيذ البرنامج، ويأخذ الشكل التالي:

cd/cygdrive/d/ClimateMashreqTraining/CMCC-CM2-SR5/Precipitation/day



- تجهيز إحداثيات النقطة المطلوب استخراج بياناتها، ويتم ذلك بتشغيل arcmap وفتح الخارطة التي تحتوي على الشبكة (من المجلد MashreqMap10Km). بعد ذلك، نشغّل MashreqMap.mxd، وننتقل إلى الخلية التي تحتوي على النقطة المطلوبة، ونأخذ إحداثيات x1,x2 للخلية ثم y1,y2.

شكل المرفق 5. تجهيز إحداثيات النقطة المناخية

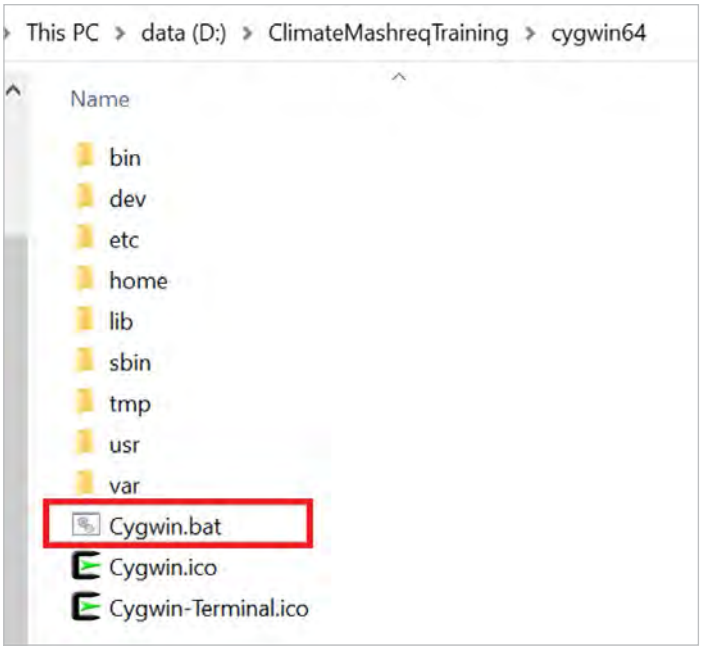


توضع الإحداثيات في ملف الإجرائية لكل الأسطر المطلوبة على الشكل التالي:

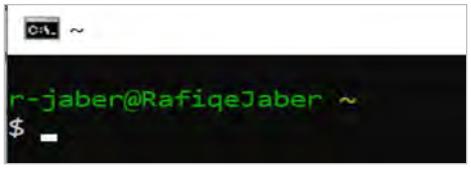
```
#ضبط الاحداثيات        ..........  x1, x2,   y1,   y2
cdo -L -P 8 -sellonlatbox 32,14.8,32.1,14.9 prAdjust_MSH-10_CMCC-CM2-SR5_ssp585_r1i1p1f1_
cdo -L -P 8 -sellonlatbox 32,14.8,32.1,14.9 prAdjust_MSH-10_CMCC-CM2-SR5_ssp585_r1i1p1f1_
cdo -L -P 8 -sellonlatbox 32,14.8,32.1,14.9 prAdjust_MSH-10_CMCC-CM2-SR5_ssp585_r1i1p1f1_
```

التشغيل

1. تنفيذ برنامج تشغيل البرمجية D:\ClimateMashreqTraining\cygwin64\Cygwin.bat.



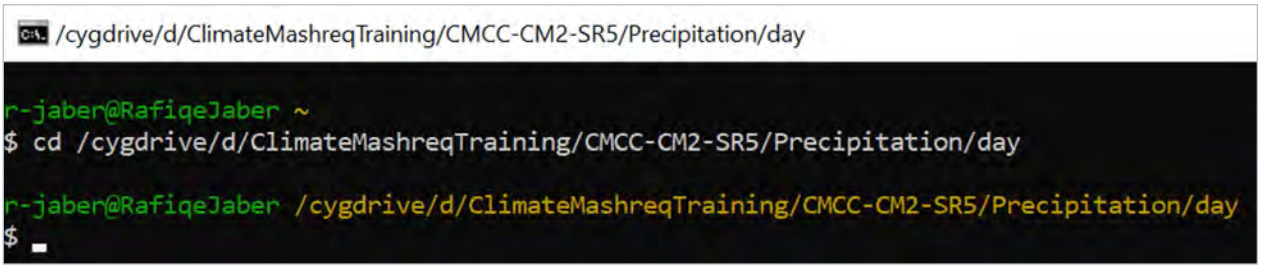
وعند تنفيذ Cgwin.bat، تَظهر الشاشة التالية وتتضمن إشارة الجاهزية لتلقّي أوامر الإجرائية:



2. ننسخ المسار المطلوب من ملف الإجرائية إلى إشارة جاهزية البرنامج:

```
cd /cygdrive/d/ClimateMashreqTraining/CMCC-CM2-SR5/Precipitation/day
```

ثم نضغط على Enter، فتَظهر الشاشة على الشكل التالي:



3. ننسخ مجموعة الأسطر التي تعبِّر عن مجموعة سنوات التنفيذ، فيقوم البرنامج بتحميل بيانات الهطول المطري للنقطة المطلوبة وتخزينها بملفات nc. ويمكن تحميل سنة واحدة أو مجموعة سنوات، ثم دمجها وتحويلها إلى ملف نصّي يمكن فتحه في Excel والتعامل معه.

مثال: سطر أوامر تحميل بيانات لنقطة واحدة في سنة محدّدة (1961) للنموذج CMCC-CM2-SR5

```
cdo -L -P 8 -sellonlatbox,32,14.8,32.1,14.9 prAdjust_MSH-10_CMCC-CM2-SR5_ssp585_r1i1p1f1_SMHI-HCLIM-ALADIN-38_day_bias-corrected_WGS84_1961.nc prday1961.nc
```

المراجع

Anderson, M.P. and Woessner, W.W. (1992). Applied Groundwater Modeling— Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, Inc., San Diego, CA, 381.

Andualem ,T.G .and others .(2021) Groundwater recharge estimation using empirical methods from rainfall and streamflow records .Article in Journal of Hydrology :Regional Studies. https//:www.researchgate.net/publication355770831/.

Fenton, Cassandra (2015). A combined FastScape χ-value and 10Be erosion rate approach to evaluate topographic equilibrium in evolving landscapes: Examples from Namibia and the central Himalaya. 10.13140/RG.2.1.2047.5360.

Krautstrunk, Melanie Lynn (2012). An Estimate of Groundwater Recharge in the Nabogo River Basin, Ghana Using Water Table Fluctuation Method and Chloride Mass Balance, University of Nevada. https://digitalscholarship.unlv.edu/thesesdissertations/1745/.

Krishna Rao, P.R. (1970). Hydrometeorological aspects of estimating groundwater potential. In: Seminar Volume. Groundwater Potential of Hard Rock Areas of India. Bangalore, p. 1.

Perkins, K. and Nimmo J. (2006). Applicability of the Darcian method for recharge estimation. https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/DarcianRecharge/.

Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge, Hydrogeology Journal. vol. 10:18–39. https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-001-0176-2.

Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) (2017). Regional Climate Modelling and Regional Hydrological Modelling Applications in the Arab Region. RICCAR Technical Note, Beirut, E/ESCWA/SDPD/2017/RICCAR/Technical Note.1.

United Nations Economic and Social Commission for Western Asia, and Swedish Meteorological and Hydrological Institute (2021). Future Climate Projections for the Mashreq Region. Beirut. E/ESCWA/CL1.CCS/2021/RICCAR/TECHNICAL REPORT.7.

USGS (n.d.). Water-Table Fluctuation (WTF) method. https://water.usgs.gov/ogw/gwrp/methods/wtf/.

Walker, D., and others (2018). Insights From a Multi-Method Recharge Estimation Comparison Study. Article in Ground Water June 2018. https://www.researchgate.net/publication/325739733.

الإسكوا (2022). أثر تغيُّر المناخ على موارد المياه الجوفية في نظام خزّان الدبدبة الجوفي، العراق. E/ESCWA/CL1.CCS/2021/RICCAR/TECHNICAL REPORT.9.

الإسكوا والمعهد السويدي للأرصاد الجوية والهيدرولوجيا (2021). الإسقاطات المناخية المستقبلية لمنطقة المشرق: النتائج الموجزة. E/ESCWA/CL1.CCS/2021/RICCAR/TECHNICAL REPORT.7/REV.

غروزغيبر وفودخوز (1979). التحريات الجيولوجية والهيدرولوجية في الأحواض الأربعة (سورية – حوض الساحل) أربعة مجلدات، تبليسي.

تُعَدُّ المياه الجوفية مصدراً هاماً للمياه العذبة في المنطقة العربية، ويتزايد الطلب عليها في ظلّ تسارُع النمو السكاني. وقد أصبحت طبقات المياه الجوفية في المنطقة مهدّدة بشكل خطير بسبب الاستغلال المفرط والضخ الجائر. كذلك، ستؤدي آثار تغيُّر المناخ المتوقعة على الموارد المائية في المنطقة إلى زيادة الاعتماد على المياه الجوفيّة، في وقت يُتوقّع فيه أيضاً حصول تراجعٍ في تغذية المياه الجوفيّة، ما يستلزم إدارةً مشتركة للمياه السطحية والجوفيّة. ويجب التركيز على آثار تغيُّر المناخ على المياه الجوفيّة إقليميّاً عند تنفيذ تدابير تقنية تعزِّز قدرة المجتمعات على الصمود. لذلك، بات من الضروري دراسة أثر تغيُّر المناخ على مخزون المياه الجوفيّة في ظل الطلب المتزايد على المياه.

ويهدف هذا الدليل التدريبي إلى بناء القدرات ورفع الكفاءة في دراسة وتقييم أثر التغيُّرات المناخية على مخزون المياه الجوفيّة، وذلك لتعزيز الإدارة الرشيدة للموارد المائية الجوفيّة، على نحو يخدم الأمن المائي والغذائي في المنطقة العربية. ويستند الدليل إلى حالة دراسية محدّدة لتطوير نموذج مياه جوفيّة، وتحميل بيانات التغيُّرات المناخية متمثلة بالهطولات المطرية من النماذج المناخية الإقليمية للمنطقة العربية التي تم تطويرها من خلال المبادرة الإقليمية لتقييم أثر تغيُّر المناخ على الموارد المائية وقابلية تأثُّر القطاعات الاجتماعية والاقتصادية في المنطقة العربية (ريكار)، وذلك للفترات المستقبلية التي قد تمتد حتى نهاية القرن.

2400570A