

نمذجة تداخل مياه البحر ضمن طبقة المياه الجوفية الحرة في المنطقة الواقعة بين نهري السن والروس في الساحل السوري

د. شريف بدر حايك *

د. علي محمد الأسعد **

ديمة محسن محمد ***

(تاريخ الإيداع 21/ 9/ 2020 . قُبِلَ للنشر في 12/ 5/ 2021)

□ ملخص □

يزداد الطلب على المياه العذبة في المناطق الساحلية بسبب زيادة النشاط الاقتصادي، مما يستدعي زيادة ضخ المياه الجوفية العذبة، وهذا يسبب خللاً في التوازن الهيدروديناميكي بين المياه الجوفية العذبة ومياه البحر. يهدف البحث إلى بناء نموذج رياضي في منطقة البحث باستخدام كود SEAWAT ضمن برنامج GMS. وبعد معايرة النموذج تم اقتراح سيناريو أمثل لاستثمار الموارد المائية في منطقة البحث دون حدوث التداخل بين مياه البحر والمياه العذبة، من خلال حفر 3 مجموعات آبار، تضم كل منها 4 آبار ويتصرف حوالي $100 \text{ m}^3/\text{day}$ لكل بئر ، إضافة إلى تخفيض معدل السحب من آبار الأهالي في منطقة البحث بنسبة 15%، حيث انخفض تركيز الأملاح إلى أقل من 1000 mg/l ، كما انخفض منسوب المياه الجوفية بحدود مقبولة تراوحت بين $0.1-0.9 \text{ m}$ ، وحدث نهوض في مناطق أخرى خاصة القريبة من منطقة تكثف الآبار شديدة الملوحة تراوح بين $0-0.7 \text{ m}$ ، وبالنتيجة من الأفضل حفر الآبار بعيداً عن شاطئ البحر على مسافة لا تقل عن 700 متر .

الكلمات المفتاحية: الطبقة الحاملة للمياه الجوفية الحرة، نموذج رياضي، تداخل مياه البحر، الساحل السوري.

* أستاذ- قسم الهندسة المائية والري- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

** أستاذ- قسم الهندسة المائية والري- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

*** طالبة دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الهندسة المائية والري- كلية الهندسة المدنية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

Modeling of seawater intrusion into unconfined aquifer in the area located between AL-Sin and AL-Ross Rivers in the Syrian Coast

Dr. Sharif Hayek *

Dr. Ali ALasaad **

Dimah Mohammad ***

(Received 21/ 9 / 2020 . Accepted 12/ 5/ 2021)

□ ABSTRACT □

The demand for fresh water in coastal areas increases due to the increase in economic activity, which calls for increased pumping of fresh groundwater, and this causes an imbalance in the hydrodynamic balance between fresh groundwater and sea water. The research aims to build a mathematical model in the research area using SEAWAT code within the GMS program. After calibrating the model, a scenario was proposed for investing water resources in the research area without sea water intrusion by digging 4 wells groups, each of which includes 5 wells, with discharge of 100 m³/day, and reducing the rate of pumping from wells in the research area by 15%, as it decreased The concentration of salts to less than 1000 mg/l, and the groundwater level decreased within acceptable limits, ranging between 0.1-0.9 m, and there was a rise in other areas ranging between 0-0.7 m. As a result, it is better to drilling wells away from the seashore at a distance of no less than 700 meters.

Keywords: Unconfined aquifer, mathematical model, sea water intrusion.

* Professor, Department of Water Engineering and Irrigation, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. sharif.hayek@yahoo.com.

** professor, Department of Water Engineering and Irrigation, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. ali.alasaad@tishreen.edu.sy.

***Postgraduate Student, Department of Water Engineering and irrigation, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. eng.dimah.86@gmail.com.

مقدمة

إن تسرب مياه البحر يمكن أن يصل إلى أنظمة المياه العذبة ويلوثها إذا ارتفع مستوى سطح البحر أو خلال موسم الجفاف [1]. حيث إن تداخل مياه البحر مع المياه الجوفية يحدث من خلال تقدم مياه البحر في الجزء السفلي من طبقة المياه الجوفية بسبب فرق الكثافة بين مياه البحر والمياه العذبة، ورشح مياه البحر من خلال الشاطئ نتيجة انخفاض منسوب المياه الجوفية واختلال التوازن الهيدروديناميكي في منطقة التماس مع مياه البحر بسبب الاستمرار الجائر للمياه الجوفية، مما يؤدي إلى اختلال التوازن الطبيعي بين المياه العذبة ومياه البحر [2].

تلاحظ مشكلة تملح المياه الجوفية عادة في السهول الساحلية، عندما ينعكس التوازن بين ضاغط المياه المالحة والمياه العذبة، وليس من السهل معالجة التملح عندما يحدث بشكل كامل حتى بعد رفع منسوب الطبقة الحاملة للمياه الجوفية. وصعوبة إزالة الملوثات الأخرى الناجمة عن المركبات السامة المستخدمة في الصناعة والزراعة والنشاطات البشرية الأخرى والتي تنتشر في الطبقة الحاملة للمياه الجوفية والطبقة تحت السطحية المشبعة وغير المشبعة، مسببة تلوث المياه الجوفية، مما قد يمنع استخدام المياه الجوفية لتردي نوعيتها [3].

لقد استندت التحريات عن تداخل مياه البحر ضمن طبقات المياه الجوفية العذبة على التقنيات الجيوفيزيائية، خاصة المقاومة الكهربائية والطرائق الكهرومغناطيسية التي تعتمد على تغير المقاومة الكهربائية عند الاقتراب من منطقة تداخل مياه البحر [4]. كما يمكن استخدام الدراسة الجيوكيميائية لتحديد إمكانية تسرب مياه البحر [5]. ومع ذلك، فإن الدمج بين التحليل الجيوفيزيائي والجيوكيميائي قد أثبت فعالية في الحصول على نتائج دقيقة [6].

ولما كانت التحريات عن المياه الجوفية مكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً، فقد برزت النمذجة الرياضية لتداخل مياه البحر كأداة مهمة لفهم آلية تدفق المياه الجوفية وحركتها [7]. هذه النمذجة، ستساعد على إبراز سلوك نظام المياه الجوفية الساحلية فيما يتعلق بالتحديات البيئية المستقبلية وتطوير تدابير مناسبة للسيطرة على تداخل مياه البحر ضمن المياه الجوفية [8].

إن المشاريع الزراعية الواسعة في السهول الساحلية السورية، والاحتياجات البشرية المتزايدة في هذه المنطقة أدت إلى استثمار جائر لموارد المياه الجوفية بوساطة عدد كبير من الآبار، حيث لوحظت ظاهرة تداخل مياه البحر مع المياه الجوفية العذبة في منطقة البحث، وبيّنت الدراسة السابقة في المنطقة بين مدينتي بانياس واللادقية أن امتداد إسفين التداخل داخل اليابسة بلغ 4-1 كم، وتملحت بعض الآبار، وذلك نتيجة زيادة معدل استثمار المياه الجوفية، مما أدى إلى انخفاض منسوبها، ومن ثم اختلال التوازن الهيدروديناميكي في منطقة التماس مع المياه المالحة، مع الإشارة إلى وجود عوامل عديدة أخرى تؤثر في هذه العملية تستدعي دراستها بتوسّع كما لم يتم إعداد نموذج رياضي لمنطقة البحث، ونظراً لأهمية المنطقة كان من الضروري نمذجتها وفق المعطيات والتحديات الجديدة [9].

أهمية البحث وأهدافه

تأتي أهمية البحث من ضرورة حماية الموارد المائية العذبة من خطر التلوث والاستنزاف؛ وتوظيف التقانات الحديثة وبرمجيات النمذجة الرياضية لتحقيق ذلك، اعتماداً على نتائج تقويم الوضع الراهن للموارد المائية والتنبؤ بتطوراتها المستقبلية. حيث يهدف البحث إلى بناء نموذج رياضي للتداخل بين مياه البحر والمياه الجوفية العذبة في منطقة البحث باستخدام كود SEAWAT ضمن برنامج GMS، ومن ثم وضع تنبؤات مستقبلية تبعاً لخطط الاستثمار

المقترحة لموارد المياه الجوفية في المنطقة. الأمر الذي يسمح برسم سياسات الأمن المائي في منطقة البحث وحمايتها من خطر الاستنزاف والتلح.

طرائق البحث ومواده

تقع المنطقة المدروسة في المنطقة السهلية بين نهري السن والروس في الساحل السوري، يحدها البحر المتوسط من الغرب، وطريق عام اللاذقية - طرطوس من الشرق. ويبلغ عرضها حوالي 4 كم وطولها 18 كم تقريباً بمساحة حوالي 72 كم². (الشكل 1).

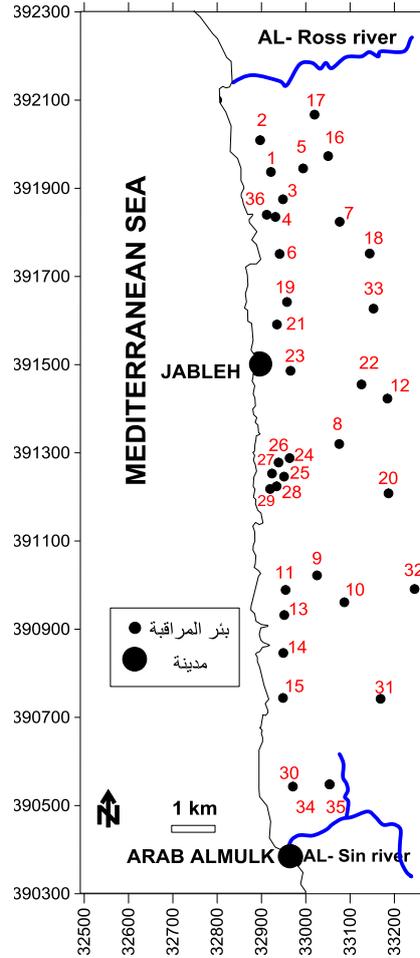
تعتمد عمليات مراقبة منسوب المياه للطبقة الحاملة للمياه الجوفية على شبكة من آبار المراقبة، تتوزع في المنطقة كلها بما يتناسب مع الظروف الطبيعية والاستثمارية للمنطقة المدروسة [10]. حيث اعتمد البحث على شبكة رصد موزعة في منطقة الدراسة تتألف من 36 بئراً تخترق الطبقة الحاملة للمياه الجوفية الحرة [11]. بدأ القياس فيها بشكل شهري من تشرين الأول عام 2016 إلى شهر أيلول 2017، وشملت القياسات التي استُخدم فيها جهاز Solinst:

- العمق الستاتيكي Static water depth، بدقة القياس ± 0.5 سم.
 - الناقلية الكهربائية للمياه الجوفية Electrical conductivity بدقة ± 1 ميكروموس/سم.
- كما أُجريت تحاليل كيميائية لعينات مياه مأخوذة من 8 آبار، مرة كل ثلاثة أشهر (بشكل فصلي)، واختيرت العينات بحيث تتوزع على مساحة المنطقة المدروسة كلها، وبما يتناسب مع البنية الجيولوجية في المنطقة.

جمعت البيانات وتمت معالجتها باستخدام برنامج Surfer 12 وبرنامج GIS. وتم استخدام نموذج Modflow لبناء النموذج الرياضي لحركة المياه الجوفية الحرة، حيث اعتمد الحل على طريقة الفروق المنتهية، كما استُخدم كود SEAWAT لدراسة حركة الأملاح في منطقة الدراسة، والذي يمثل حركة المياه الجوفية ذات الكثافة المتغيرة بالاتجاهات الثلاثة خلال الأوساط النفوذة. وهذه الظروف الهيدروجيولوجية تنطبق على الوضع الهيدروجيولوجي للطبقات الحاملة في منطقة البحث الساحلية والمتصلة هيدروليكياً بمياه البحر المالحة.

وقد تم تطوير هذا النموذج من خلال دمج النموذجين الرياضيين MODFLOW و MT3DMS في برنامج واحد لحل المعادلات الرياضية التي تصف حركة المياه الجوفية ومعادلة انتشار الأملاح الذائبة، حيث تم تعديل برنامج MODFLOW لأخذ تأثير الكثافة على حركة المياه الجوفية؛ بناءً على فرضية أن كثافة المائع المائي تعتمد فقط على درجة تركيز الأملاح الكلية الذائبة عند درجة حرارة معينة.

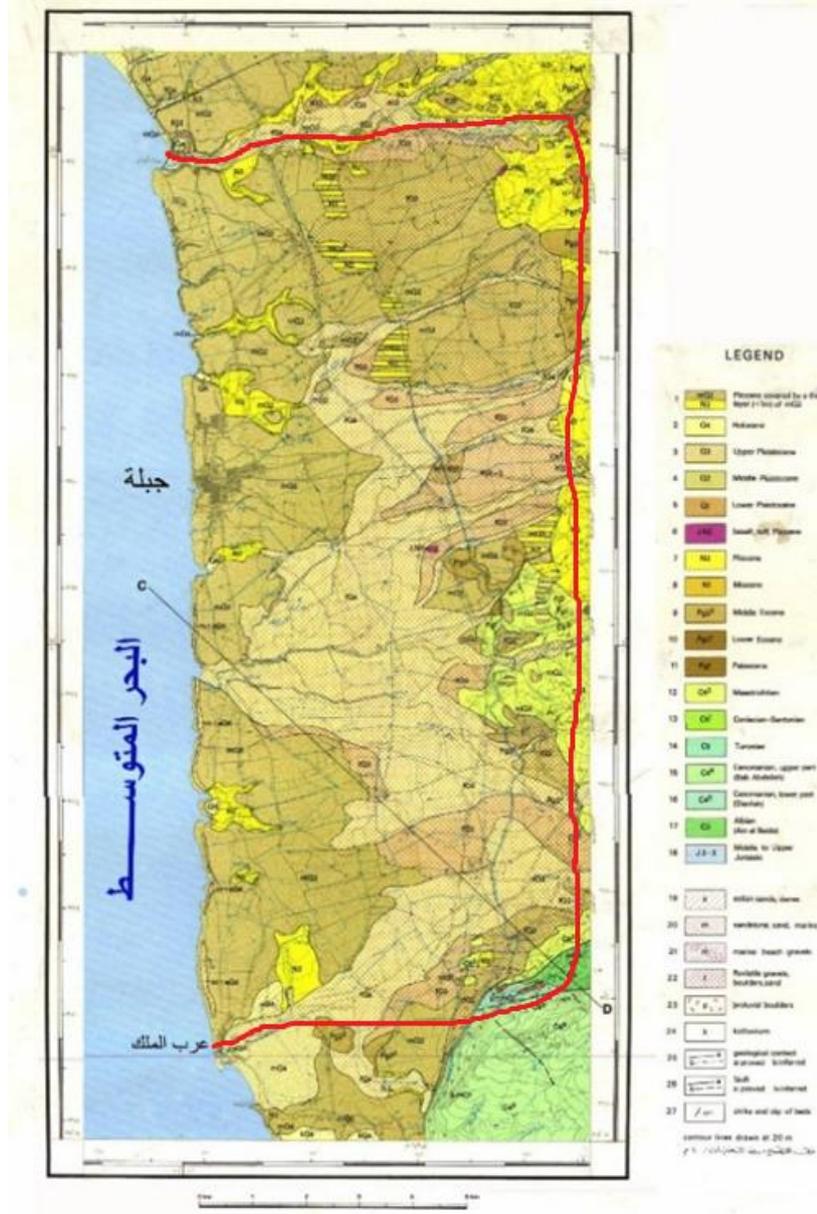
حيث ركزت الدراسات على استخدام البيانات المتاحة لإنتاج نموذج محاكاة منطور يأخذ بالحسبان معادلات جريان المياه الجوفية متغيرة الكثافة باستخدام برنامج SEAWAT [12]. كما تحرى الباحثون الملوحة لمسافات طويلة في طبقة المياه الجوفية الساحلية باستخدام نموذج SEAWAT. وتم استخدام تحليلات الحساسية لتقييم تأثير المعايير والظروف الحدودية على إسفين المياه المالحة، بما في ذلك الناقلية الهيدروليكية، والتباين الرأسي وتركيز الملوحة [13]. وتم أيضاً استخدام النموذج لتحديد المناطق المعرضة للملوحة مستقبلاً ومعرفة نسبة الملوحة فيها [14].



الشكل 1. خارطة منطقة البحث وتوزيع شبكة الرصد فيها.

الخصائص الجيولوجية والهيدروجيولوجية

يتكشف في منطقة الدراسة مختلف الأعمار الجيولوجية بدءاً من الجوراسي حتى الرباعي، حيث توضع رسوبيات الجوراسي في سحنات ساحلية، أما رسوبيات الكريتاسي والباليوجين فقد تكوّنت في بيئة شاطئية قليلة العمق، في حين تميز عصر النيوجين بنشاط تكتوني وبركاني مع اندفاع صبات بازلتية، كوّنت أهم التشكيلات الجيولوجية المنتشرة في المنطقة (الشكلان 2، 3) [15].



الشكل 2. الخارطة الجيولوجية لمنطقة الدراسة [14]

وفق معطيات المقطع الهيدروجيولوجي (C-D) (الشكل 3) [15]، والذي يمر قريباً من منطقة نبع السن والمبين مساره (الشكل 2) يلاحظ وجود الطبقات الآتية:

■ طبقة حاملة للمياه الجوفية: مؤلفة من توضعات من عمر الرباعي والنيوجين تتراوح سماكتها

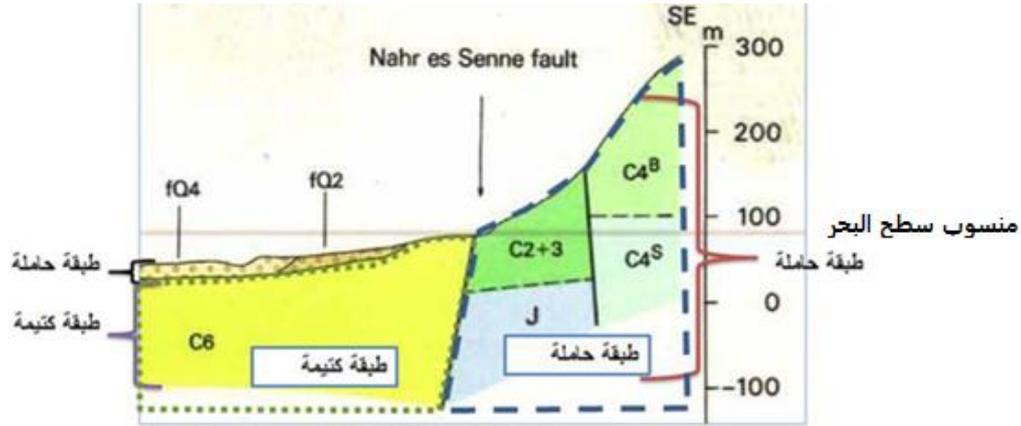
بين

15-50 m، حيث تعد المستويات الحصوية والرمالية المختلفة والتي تتوضع على أعماق بسيطة من سطح الأرض من الحوامل المائية الجيدة حيث تكون مياهها محجوزة فوق التوضعات الغضارية والمارلية التابعة للتوضعات الأقدم، وتختلف غزارتها من مكان لآخر، وتجري مياه هذه التوضعات

على شكل ينابيع صغيرة يجف بعضها في فصل الصيف، وتستثمر أيضاً عن طريق مجموعة من الآبار وبأعماق قليلة.

■ الطبقة الثانية: مؤلفة من تناوب كلس غضاري مع مارل من عمر الماستريخت C_6^2 ، تعتبر طبقة كتيمة سماكتها تتراوح بين 15-200 m.

■ الطبقة الثالثة: مؤلفة من توضعات الجوراسي والكريتاسي - السينومان- ترون (C5 - C4 - J) وتشكل هذه التوضعات حاملاً مائياً يؤمن للمياه لنبع السن تتراوح سماكتها بين 200-450 m.



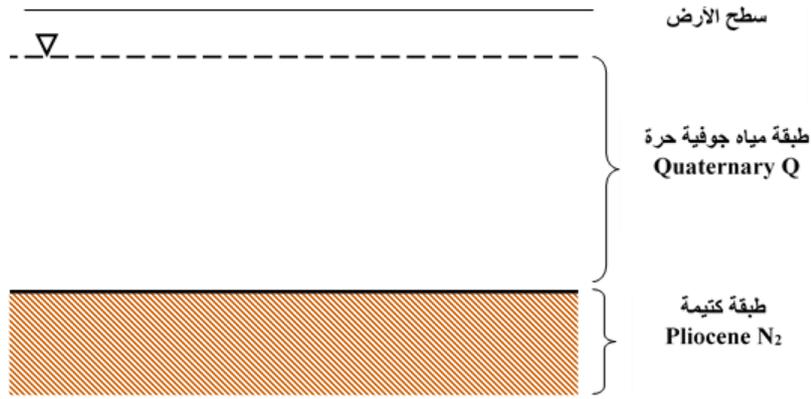
الشكل 3. التمثيل الهيدروجيولوجي للطبقات الحاملة للمياه الجوفية والكتيمة وفق معطيات المقطع رقم (C-D) [14]

النتائج والمناقشة

النموذج الاعتباري

لقد وُضع النموذج الهيدروجيولوجي الاعتباري لمنطقة البحث، الذي يمثل الظروف الهيدروجيولوجية للطبقة الحاملة للمياه الجوفية الحرّة، اعتماداً على البنية الجيولوجية والتكتونية والوضع الهيدروجيولوجي العام، ويتألف النموذج الاعتباري لمنطقة البحث (الشكل 4) من:

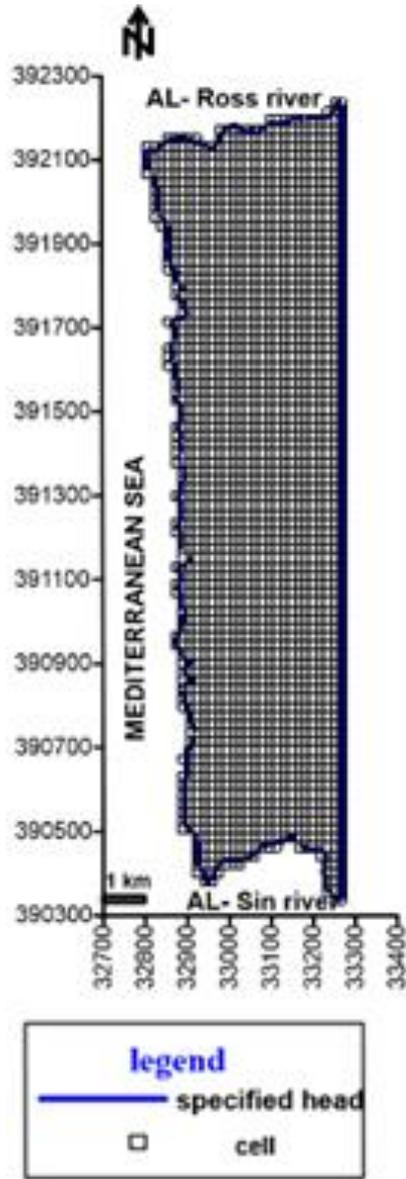
- ❖ طبقة حاملة للمياه الجوفية الحرّة تتألف من توضعات الرباعي، وهي عبارة عن غضار كربوناتي مع رمل وحصى، حجر رملي متطبق، وحجر رملي بحري، وكونغلوميرا نهريّة، وتوضعات ريحية، وتتراوح ناقليتها الهيدروليكية بين 0.3 - 50 م/يوم.
- ❖ طبقة شبه كتيمة (البليوسين N_2)، وتتألف من المارل أو الحجر الكلسي المارلي، والحجر الرملي والسيلت، وتتراوح سماكتها الإجمالية بين 100-200 م، وهي تشكّل مستوى الأساس ذا الامتداد الإقليمي في سهل جبلة، وتبلغ ناقليتها الهيدروليكية (0.1) م/يوم.



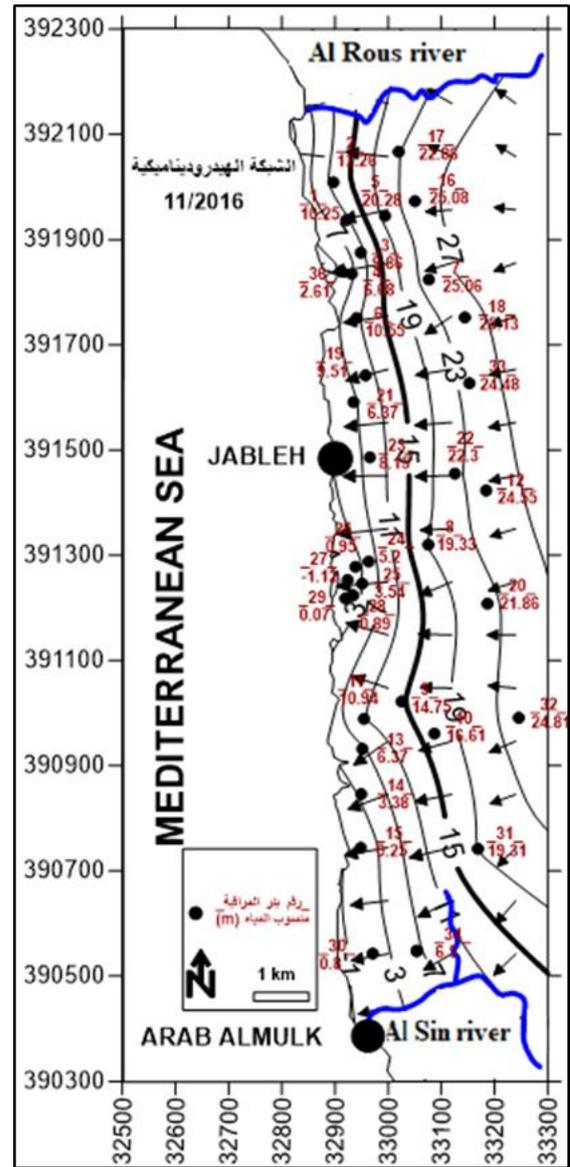
الشكل 4. النموذج الاعتباري لمنطقة البحث

الشروط الحدية والابتدائية

يحدّ نهر الروس منطقة البحث من الشمال، ويحدها نهر السن من الجنوب، فيمثلان شرطاً حدياً بضغط معلوم *Constant-head boundary*، يتعلّق بعمق المياه في النهرين ومنسوبهما بالنسبة لسطح البحر خلال فترة المحاكاة المختارة (تشرين الأول 2016 حتى أيلول 2017) وتركيز الأملاح الثابت 530 mg/l في نهر الروس. بينما كانت قيمته 550 mg/l في نهر السن. بينما يحدّ المنطقة من الغرب البحر المتوسط ممثلاً حدّاً بضغط ثابت $H = \text{const.} = 0$ خلال المحاكاة والحد الابتدائي الثابت لتركيز الأملاح 37 kg/m^3 عند حدود البحر [13]. الشرط الحدي الثابت للضغط وتركيز الأملاح على الجانب الشرقي تم اشتقاقهما من الشبكة الهيدروديناميكية والقياسات الحقلية لمنطقة البحث (الشكل 5). والشروط الابتدائية هي قيم الضغوط الهيدروليكي لكل خلية فعالة ذات ضغط ثابت في النموذج (الشكل 6).



الشكل 6. الشروط الحدية والابتدائية وشبكة الفروق المنتهية في منطقة البحث



الشكل 5. الشبكة الهيدروديناميكية لمنطقة البحث خلال شهر تشرين الثاني عام 2016 (m)

من المستحسن وضع قيم الضواغط الابتدائية قريبة من قيمها المقدرة من البيانات الحقلية في كل طبقة من طبقات النموذج، للنماذج المستقرة وللنماذج المتغيرة. وهذا سينقص الزمن اللازم للحل اعتماداً على النموذج، ويؤدي إلى تقارب أسرع باتجاه الحل، بشرط أن تكون البارامترات الأخرى للنموذج منطقية وقريبة من البيانات الحقلية المسجلة [16].

شبكة النموذج

يجب أن تساير شبكة النموذج حدود تغير البنية الجيولوجية، وتتوافق مع الظروف الهيدرولوجية والشروط الحدية للمنطقة، ويفضل أن تكون نسبة طول الخلية إلى عرضها (عامل الشكل) أقرب ما يمكن إلى الواحد لتحقيق استقرار النموذج [17]. فيما يتعلق بمنطقة البحث لدينا شبكة مستطيلة أبعادها (5.173×20.920 km). تتكون من

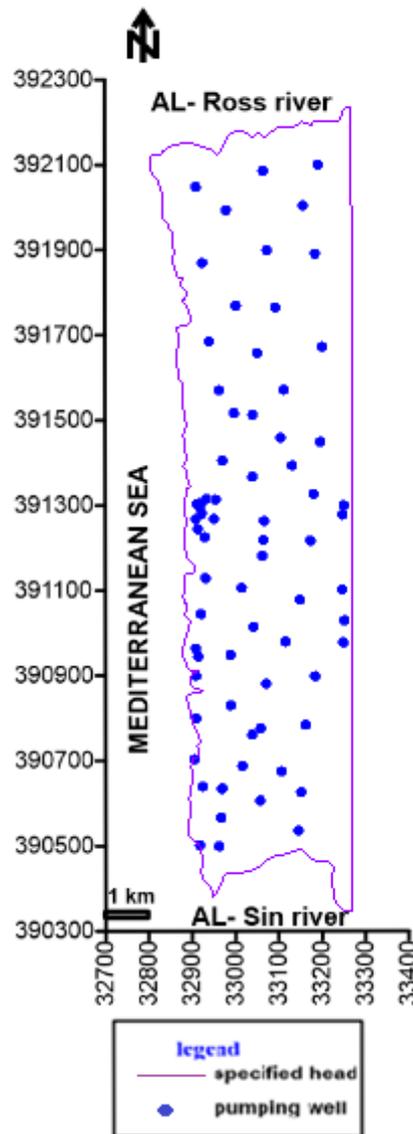
3000 خلية، منها 2031 خلية فعالة، بأبعاد (172 × 209 m) لكل خلية، بحيث يكون عامل الشكل 1.2 (الشكل 6).

تصميم النموذج

جرى تحميل مختلف المعطيات المطلوبة لبناء النموذج الرياضي، الذي تضمنت طبقاته المعطيات

الآتية:

طبقة التغذية والصرف (الشكل 7)



الشكل 7. طبقة التغذية-الصرف (m³/day)

تمت نمذجة حدود الضاغط المحدد Specified head boundaries، بواسطة Modflow بإدخال قيم الضاغط الحقيقي في عقد حدّ الضاغط الثابت في شهر تشرين الثاني لعام 2016؛ أي في نهر الروس الذي يحدّ منطقة البحث من الشمال، وفي نهر السن على الحدود الجنوبية. وأدخلت الحدود الشرقية لمنطقة البحث بصفتها حدّاً بضاغط ثابت اعتماداً على الشبكة الهيدروديناميكية، كما تم إدخال شبكة من آبار الأهالي البالغ عددها 72 بئراً منتشرة في منطقة البحث. وتراوح تصريف الآبار بين (50-500 m³/day).

طبقة التغذية (الشكل 8)

تم إنشاء حزمة التغذية، المصممة لمحاكاة التغذية الجوفية الطبيعية لنظام المياه الجوفية، باستخدام بيانات هطول الأمطار لشهر تشرين الثاني عام 2016. قدرت قيمة معدل التسرب في التوضعات اللحفية الحديثة بـ(40%) من مياه الأمطار، وبلغت نسبة التسرب من مياه الأمطار (10%) في مناطق انتشار توضعات الرباعي الأعلى للحفية السيلية. بينما تبلغ هذه النسبة في التوضعات البحرية للرباعي /الأوسط - الأسفل / (4%) من مياه الأمطار [18]. بينما تقدر كمية المياه المتسربة من مياه الري سنوياً بحدود 0.135 m/year [19]. اعتماداً على ما سبق، قُسمت منطقة البحث إلى تسعة مضلعات، وحملنا قيمة التغذية من مياه الري في مناطق انتشار شبكات الري، والتغذية من الأمطار على كامل مساحة المنطقة تبعاً للتكشفات الجيولوجية (الشكل 8).

طبقة الناقلية الهيدروليكية (الشكل 9)

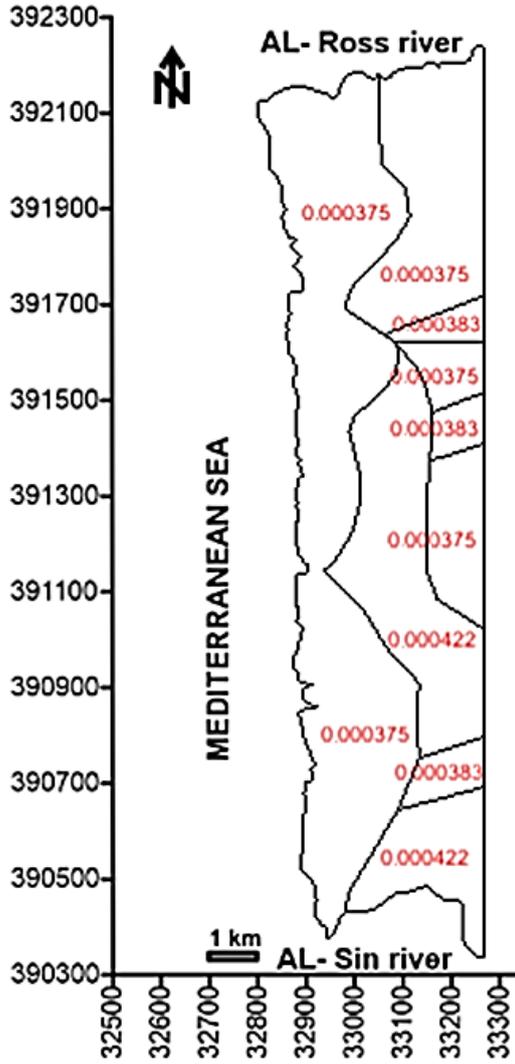
تتطلب نمذجة التدفق والانتقال إدخال شبكة منتظمة من قيم الناقلية الهيدروليكية، لأن أخذ عينات شاملة من مجال النفاذية غير ممكن واقعياً [20]. حيث حُدّدت قيم الناقلية الهيدروليكية اعتماداً على نتائج تجارب الضخ المنفذة في توضعات منطقة البحث [19]. قُسمت المنطقة تبعاً لقيم الناقلية الهيدروليكية (الشكل 9)، إلى 11 مضلعاً، حسب قيم الناقلية الهيدروليكية، التي تراوحت بين 1.67 و30 m/day، وجرى تدقيقها بعملية معايرة النموذج.

طبقة المسامية والانتشار

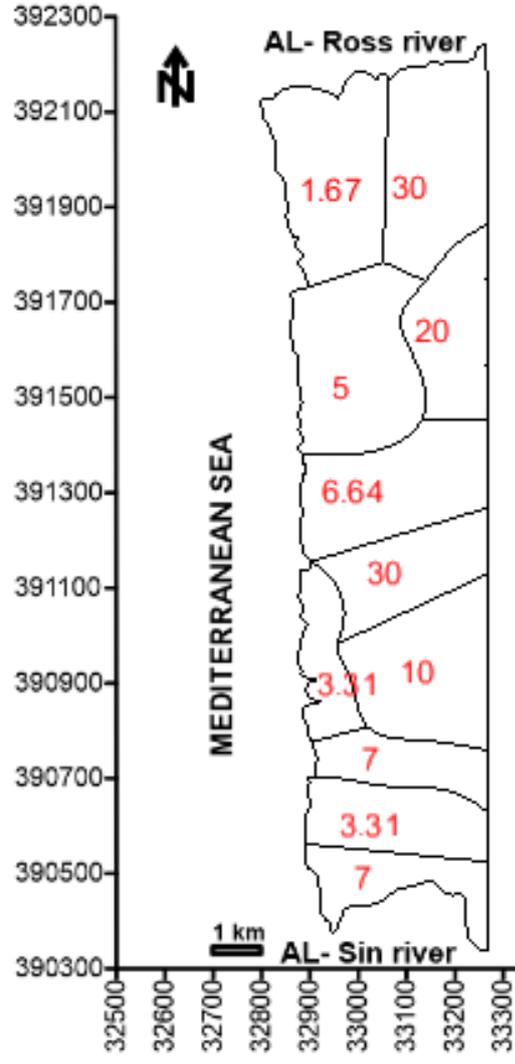
كما قمنا أيضاً بإدخال المسامية والتشنت كعامل مهم من أجل إعادة توزيع مستقر للضاغط الهيدروليكي، والملوحة، والتدفق في المنطقة الانتقالية بين المياه العذبة والمياه المالحة في نظام طبقات المياه الجوفية الساحلية. [21] كانت قيم معامل الانتشار في الجزء الشرقي من منطقة البحث 175 m بينما في الجزء الغربي سجل القيمة 75 m، وحُدّدت قيم المسامية اعتماداً على التركيب الليتولوجي للتوضعات في منطقة البحث، قُسمت المنطقة تبعاً لذلك إلى 6 مضلعات، وقد تراوحت بين 0.15-0.4، ودققت بعملية المعايرة.

تحليل الحساسية

قبل البدء بإنجاز عملية المعايرة التي تتضمن إجراء تغييرات متنوعة، وحيدة أو متعددة لبارامترات النموذج، يجب تحديد أي من هذه البارامترات أكثر حساسية للتغيرات بالعلاقة مع النتيجة النهائية للنموذج [22]. لإجراء تحليل حساسية البارامترات المدخلة، تم تشغيل النموذج مرات عدّة، وعند كل تشغيل تم تغيير قيمة بارامتر من البارامترات بنسبة ثابتة، ومراقبة استجابة النظام لهذا التغيير. فتبين أن النموذج أكثر حساسية للتغذية الراشحة.



الشكل 9. طبقة الناقلية الهيدروليكية (m/day)



الشكل 8. طبقة التغذية المساحية (m/day)

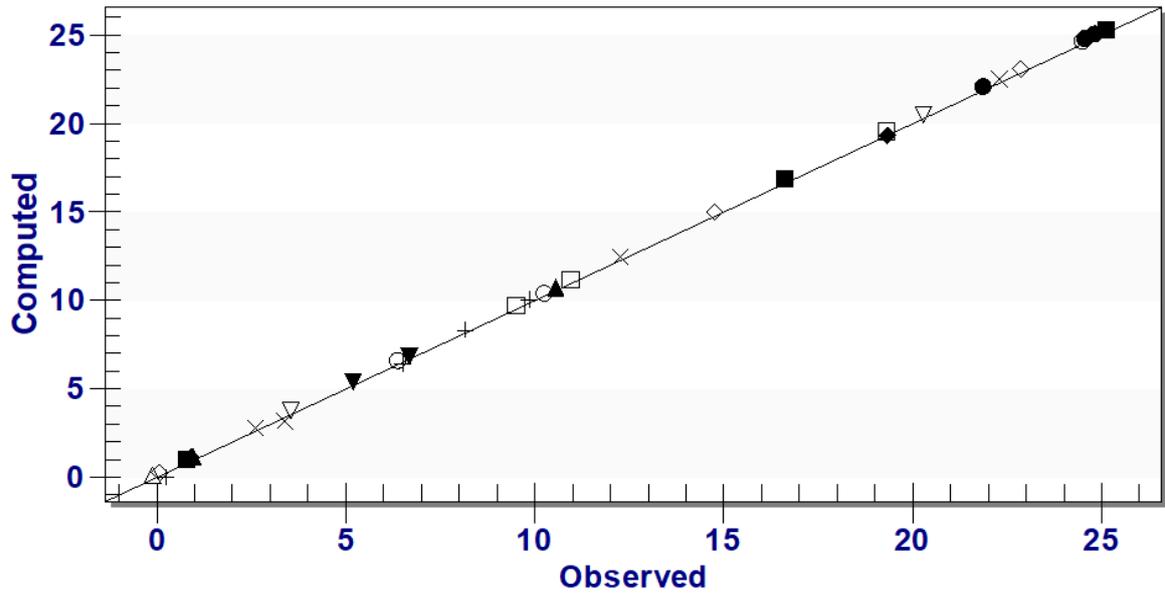
معايرة النموذج

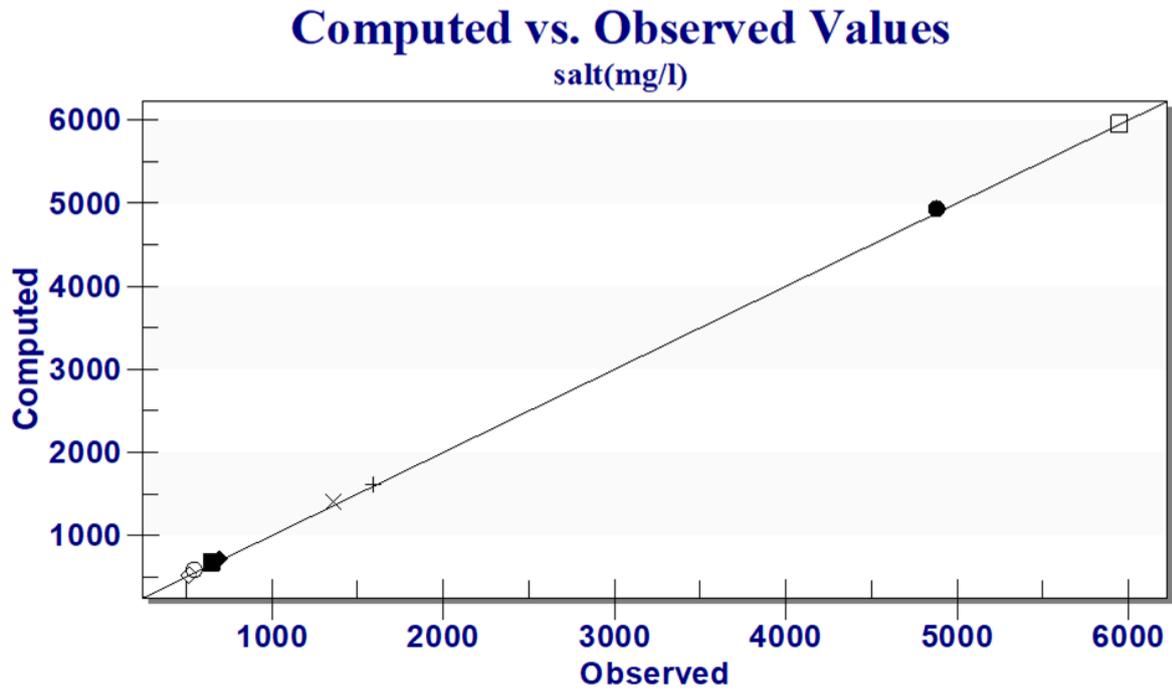
تتصف هذه المرحلة بأهمية خاصة في تمثيل حركة المياه الجوفية، والوصول إلى الشكل العام لسطح المياه الجوفية، تبعاً للظروف الهيدروجيولوجية والشروط الحديثة لمنطقة البحث. ونظراً للكفاءة العالية التي يتميز بها نظام Modflow المستخدم في تنفيذ هذا البحث، وإمكانية ربطه مع برمجيات مختلفة GIS, Excel، فقد جرى تشغيل النموذج أكثر من 700 مرة، ومن ثم الوصول إلى أفضل صورة لتمثيل نظام المياه الجوفية في منطقة البحث، حتى الوصول إلى أفضل موديل لتمثيل نظام المياه الجوفية في منطقة البحث، حيث كانت جميع فروق الضواغط بين القيم المحسوبة والمقاسة تتراوح بين (0.008-0.25 m)، في حين تراوحت الفروق في تراكيز الأملاح بين (4-49 mg/l) الشكل (10).

وقد حصلنا بنتيجة المعايرة على خارطة توزع مناسب سطح المياه الجوفية والتوزع الجغرافي لدرجة تركيز الأملاح الذاتية لشهر تشرين الثاني 2016، حيث تم اختيار هذه الفترة الزمنية للمعايرة لأنها فترة جافة

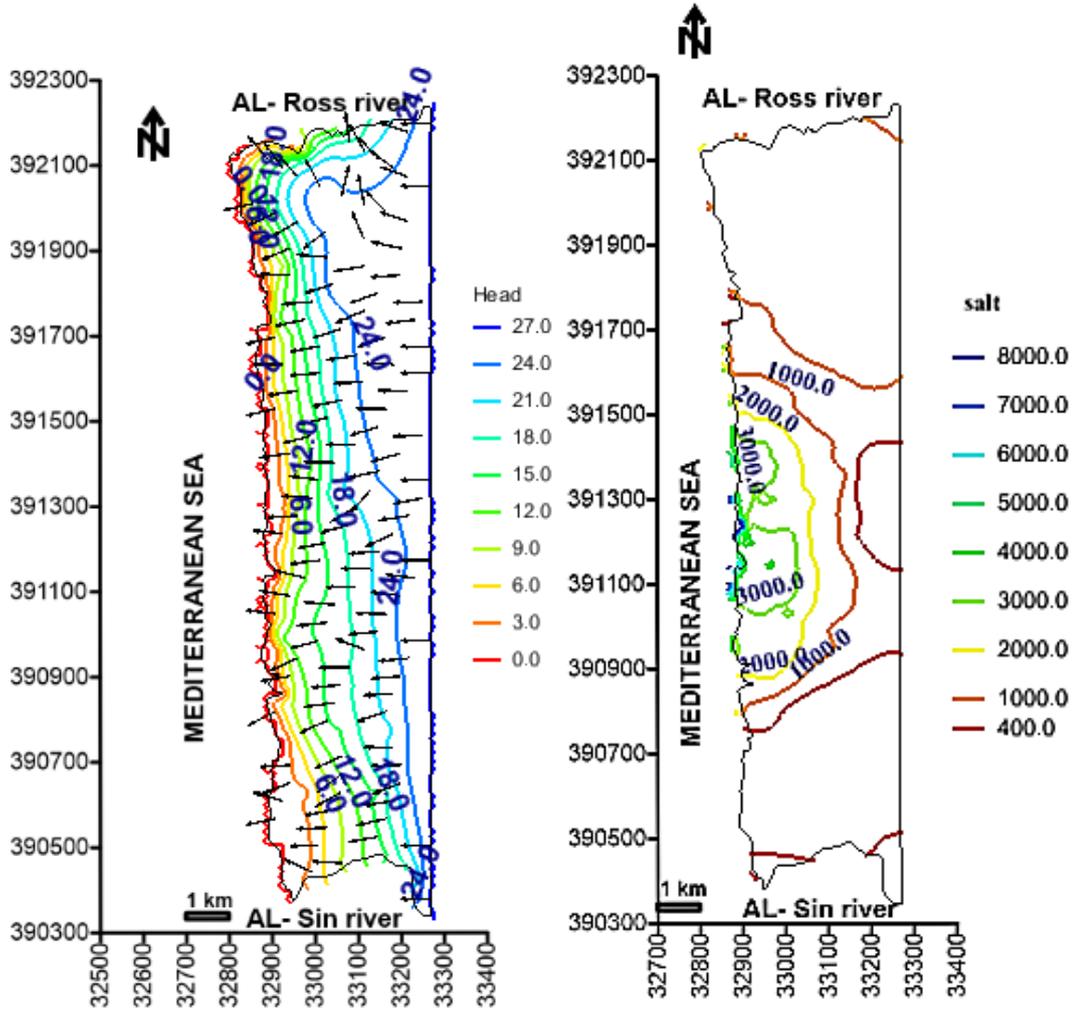
حرجة سبقها انحباس للأمطار في تلك السنة الشكل (11). وبعد التحقق من مقارنة نظام حركة المياه الجوفية الطبيعي المسجل نتيجة القياسات الحقلية والممثل بمخطط مناسب المياه الجوفية، مع نتائج النموذج الرياضي (الحل الرياضي الأكثر مطابقة مع الواقع) بعد إجراء عملية المعايرة، تم الحصول على الموازنة المائبة وعناصرها المختلفة الجدول (1).

Computed vs. Observed Values Head (m)





الشكل 10. الفرق بين القيم المقيسية لمناسيب المياه الجوفية وتلك المحسوبة (بعد المعايرة) لشهر تشرين الثاني 2016



الشكل (11). الشبكة الهيدروديناميكية وتوزيع الأملاح الذائبة (بعد المعايرة) لشهر تشرين الثاني 2016

الجدول (1) عناصر الموازنة المائية (m^3/day) لحالة الجريان المستقر في منطقة البحث (بعد المعايرة) لشهر تشرين الثاني 2016.

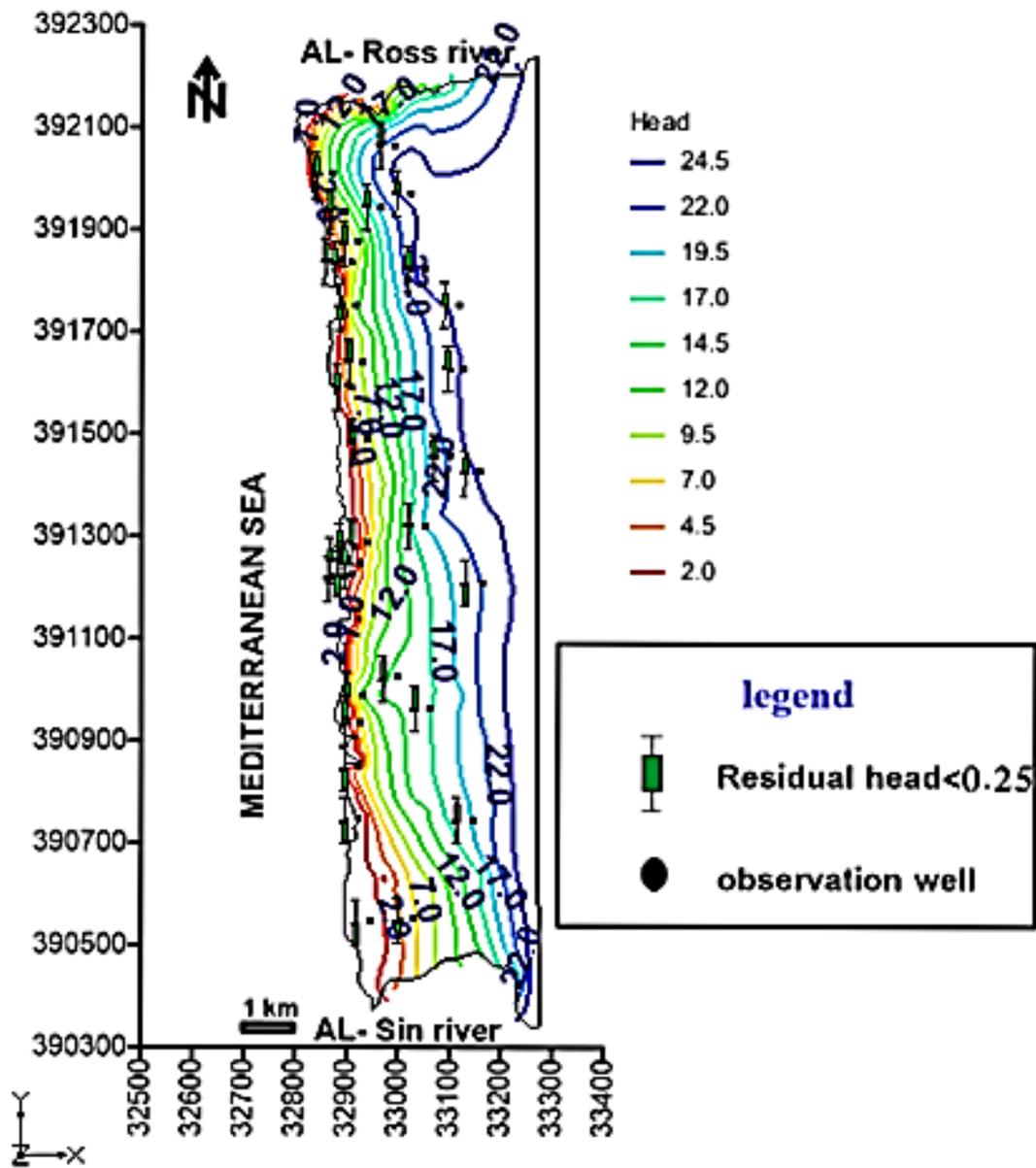
محصلة الجريان m^3/day	الجريان الخارج m^3/day	الجريان الداخل m^3/day	عناصر الموازنة
-3712	-24044	20332	(الضاغط الثابت) Constant Head
-9600	-9600	0	Wells (الاستثمار)
13312	0	13312	Recharge (التغذية)
0	-33644	33644	Total (المجموع)

تحقيق النموذج

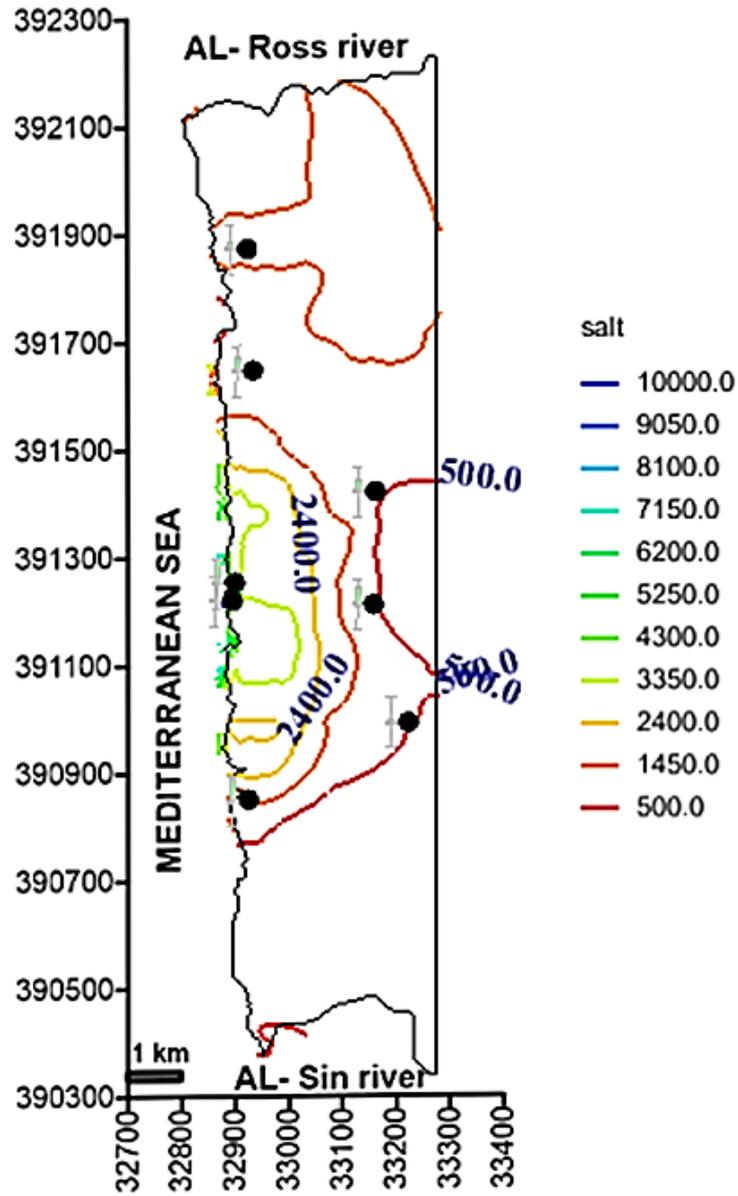
يُنجز تحقيق النموذج على مجموعة إضافية من البيانات الحقلية تبعاً للمحاكاة المستقرة، أو المتغيرة مع الزمن. وإذا صُمم النموذج وفق الشروط المتغيرة سيعطي توزيعاً للضواغط، يطابق كثيراً البيانات الجديدة لبيئ المراقبة، ومن ثم يتم التحقق من النموذج [16].

لذلك تم تحقيق النموذج اعتماداً على بيانات الرصد في شهر تشرين الأول عام 2016؛ لأنّ الشروط الحديّة متوافقة (منسوب النهر، والتدفق الجانبي)، والإجهادات (التغذية والصرف) تتغير تبعاً لظروف الشهر الذي تجرى فيه المعايرة. وقد أكدت نتائج الاختبار تحقيق النموذج، إذ أعطى النموذج توزيعاً للضواغط قريباً من

بيانات آبار المراقبة
 (0.06–0.25 m) الشكل (12)، وكانت تراكيز الأملاح في نقاط المراقبة أيضاً قريبة من القياسات الحقلية
 (6–48 mg/l) الشكل (13).



الشكل 12. مناسبة سطح المياه الجوفية الحرة وفروقها عن القيم المقاسة في نقاط المراقبة (تحقيق النموذج في تشرين الأول 2016).



الشكل 13. تراكيز الأملاح للمياه الجوفية الحرة في نقاط المراقبة (تحقيق النموذج في تشرين الأول 2016).

مرحلة التنبؤات

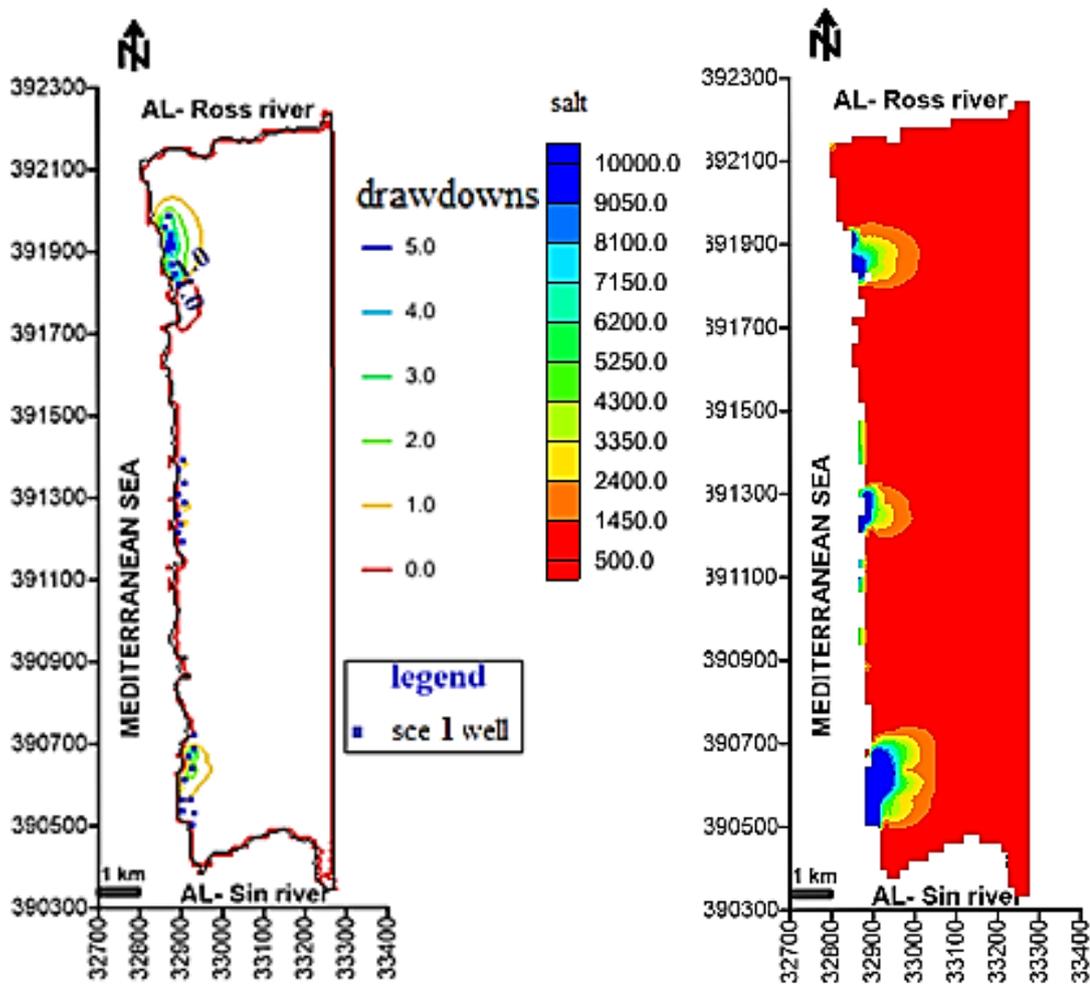
بعد معايرة النموذج أصبح قابلاً لحل المسائل التنبؤية واختبار سيناريوهات استثمار الموارد المائية الجوفية في منطقة البحث، تبعاً للحاجات المستقبلية منها، والتغيرات المتوقعة في الإجهادات والتغذية الطبيعية.

السيناريو الأول

في هذا السيناريو تم اقتراح حفر 8 آبار في الجزء الشمالي الغربي، و 9 آبار في الجزء الغربي قرب الشاطئ، و 10 آبار في الجزء الجنوبي الغربي (بالإضافة لآبار الأهالي)، تبعد عن بعضها ضمن كل مجموعة مسافة 200-500 m وعن الشاطئ تبعد حوالي 100-300 m، نظراً للحاجة المتوقعة لهذه الموارد المائية في الزراعة والسياحة، وبتصريف

150 m³/day لكل بئر. ولتقويم تأثير هذا السيناريو تم تشغيل النموذج المعايير لمدة عشر سنوات (2016-2026).

بالمقارنة مع نتائج النموذج المعايير لمنطقة البحث نجد أن هذا السيناريو يحدث انخفاضاً في مناسيب المياه الجوفية عند الآبار المقترحة خصوصاً وبشكل مسير لخط الشاطئ، الأمر الذي يؤدي إلى استنزاف المخزون الجوفي، كما أن مقدار الهبوط في مناسيب المياه الجوفية يصل إلى 5m عند مركز الآبار المقترحة في الجهة الغربية القريبة من الشاطئ الشكل (14). كما أشارت نتائج النموذج الرياضي في شهر تشرين الثاني عام 2026 إلى حدوث تغير في درجة تركيز الأملاح الكلية الذائبة عند مواقع آبار المراقبة كما هو مبين في الشكل (15)، حيث تصل قيم تركيز الأملاح الذائبة إلى أكثر من 8000 mg/l عند مراكز الآبار المقترحة في هذا السيناريو. وبالتالي تبين أنه يمكن أن يحصل تداخل لمياه البحر في منطقة البحث عند تطبيق هذا السيناريو حتى مسافة 500-700 m عن خط الشاطئ في المناطق المقترحة حفر الآبار فيها خصوصاً.



الشكل 14. توزع هبوط سطح المياه الجوفية خلال شهر 2 عام 2026 تحت تأثير تشغيل السيناريو الأول
الشكل 15. مخطط تركيز الأملاح خلال شهر 2 عام 2026 تحت تأثير تشغيل السيناريو الأول

أما التغيرات الملاحظة على الموازنة المائية لهذا السيناريو بالمقارنة مع الموازنة الناتجة عن معايرة النموذج في الشهر نفسه بعد عشر سنوات الجدول (2)، فشملت زيادةً في معدل الجريان الجوفي الداخل إلى منطقة البحث وكذلك انخفاضاً في معدل الجريان الجوفي تجاه البحر، مما يساعد على تغلغل مياه البحر ضمن الطبقة الحاملة للمياه الجوفية نتيجة استنزافها تحت تأثير تشغيل السيناريو الأول والزيادة المفاجئة للاستثمارات، لذلك يجب تقادي تطبيق هذا السيناريو كونه غير مفيد عملياً.

الجدول (2) عناصر الموازنة المائية (m³/day) للعام 2026 تحت تأثير السيناريو الأول.

عناصر الموازنة	الجريان الداخل	الجريان الخارج	محصلة الجريان
الجريان الأفقي	21192	-21904	-712
التغذية	0	-12600	-12600
الاستثمار	13312	0	13312
المجموع	34504	-34504	0

السيناريو الثاني

تم اقتراح تخفيض معدل السحب من آبار الأهالي في منطقة البحث بنسبة 15%، إضافةً إلى ثلاث مجموعات من الآبار كل مجموعة تضم 4 آبار، قرب القرى (جبلة - بسيسين - سيانو - عرب الملك)، وبتصريف حوالي 100 m³/day لكل بئر. يمثل هذا السيناريو أحد الظروف الهيدرولوجية التي تقترح تخفيض الاستثمار من الآبار القائمة حالياً لتخفيف الضغط على الطبقة الحاملة للمياه الجوفية خاصة القريبة من ساحل البحر حتى لا يحدث استنزاف في منطقة البحث، وبنفس الوقت الاستفادة من الإمكانيات المتاحة للمخزون الجوفي بالشكل الأفضل باقتراح آبار جديدة في المناطق التي لا توجد فيها كثافة في عدد الآبار. تم تشغيل النموذج المعايير تحت تأثير هذا السيناريو لمدة عشر سنوات متتالية (2016-2026)، ورسمنا وفقاً لهذا السيناريو مخططات هبوط المياه الجوفية وخطوط تساوي تراكيز الأملاح في شهر تشرين الثاني عام 2026.

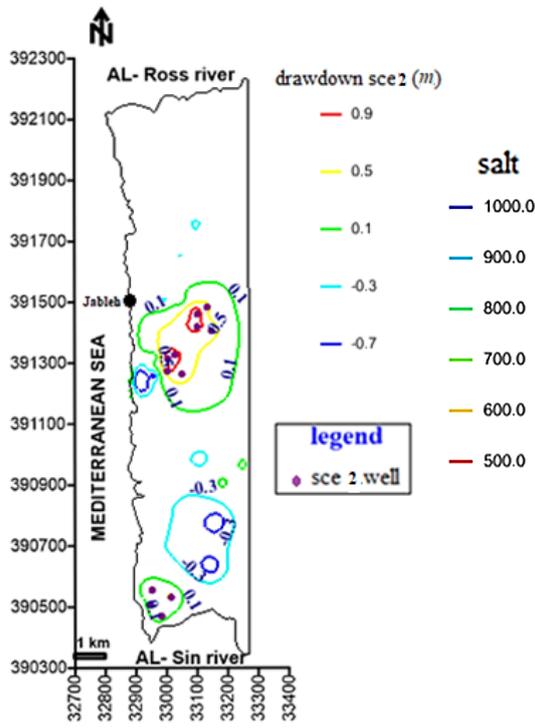
تشير نتائج النموذج الرياضي لدى اختبار هذا السيناريو إلى انخفاض حدود مقبولة في منسوب المياه الجوفية حول مراكز ثقل الآبار المقترحة تراوح بين 0.1-0.9 m، ونهوض في مناطق أخرى خاصة القريبة من منطقة تكثف الآبار شديدة الملوحة في منطقة البحث (البئر 27 و 29) تراوح بين 0-0.7 m، أي أن هذا السيناريو ينعكس إيجابياً في منطقة البحث ولا يؤدي إلى استنزاف المخزون الجوفي، بل على العكس يُحقق استقراراً في جبهة المياه المالحة والمياه العذبة وبنفس الوقت يقوم باستغلال إمكانيات الطبقة الحاملة للمياه الجوفية بالحد الممكن الشكل (16). بالنسبة لتأثير هذا السيناريو على التغير في درجة تركيز الأملاح الذائبة، فقد تراوحت قيم تراكيز الأملاح في مياه آبار المراقبة بين 528 mg/l في البئر رقم 27 و 872 mg/l في البئر رقم 19 في بداية فترة التنبؤ، واستقرت عند التركيز 508 mg/l في البئر رقم 27 و 563 mg/l في البئر رقم 19 بعد سنتين من تشغيل السيناريو وحتى نهاية فترة التنبؤ. وبالتالي تراجع الملوحة بشكل كبير ولم يعد هناك خطر لتقدم إسفين البحر. حيث من المتوقع انخفاض تراكيز الأملاح إل أقل من 1000 mg/l نتيجة استقرار مناسيب المياه الجوفية بوضع تكون فيه أعلى من منسوب سطح البحر خاصة

بالقرب من الشاطئ كما يبين الشكل (17). بالتالي يتبين أن تطبيق هذا السيناريو يمكن أن يكون الاستثمار الأفضل، حيث أنه يحول دون انعكاس الميل الهيدروليكي وتغلغل مياه البحر ضمن الطبقة الحاملة للمياه الجوفية في منطقة البحث، وبنفس الوقت يحقق متطلبات الاحتياج لبعض القرى دون آثار سلبية على الطبقة الحاملة، حيث أن المعدل المقترح للزيادة في الآبار لا يزال أقل من الإمكانيات المتاحة من التغذية من مياه الأمطار والري السطحي في المنطقة المقترح حفر الآبار فيها.

وعند مقارنة قيم الموازنة المائية للسيناريو الثاني مع مثيلاتها الناتجة عن معايرة النموذج في الشهر نفسه بعد عشر سنوات الجدول (3)، نلاحظ زيادة طفيفة في معدل الجريان الجوفي الداخل إلى المنطقة المدروسة (100 m³/day)، وفي الوقت نفسه ازدادت كمية الجريان الأفقي الخارج من المنطقة المدروسة إلى البحر فوصلت إلى 24296 m³/day. حيث أن زيادة معدل الجريان الجوفي تجاه البحر والذي يساعد على مجابهة تغلغل مياه البحر المالحة بالرغم من الانخفاض في معدل الاستثمارات من الآبار، يرجع إلى أن الانخفاض في معدل الاستثمارات لا يساهم في زيادة المخزون، بل يساهم في زيادة معدل الجريان الجوفي تجاه البحر وبالتالي فإن معدل الاستثمار ما يزال أقل من إمكانيات التغذية المتاحة للطبقة الحاملة للمياه الجوفية. وهذا السيناريو يحسن نوعية المياه الجوفية ويوصى بتطبيقه في منطقة البحث.

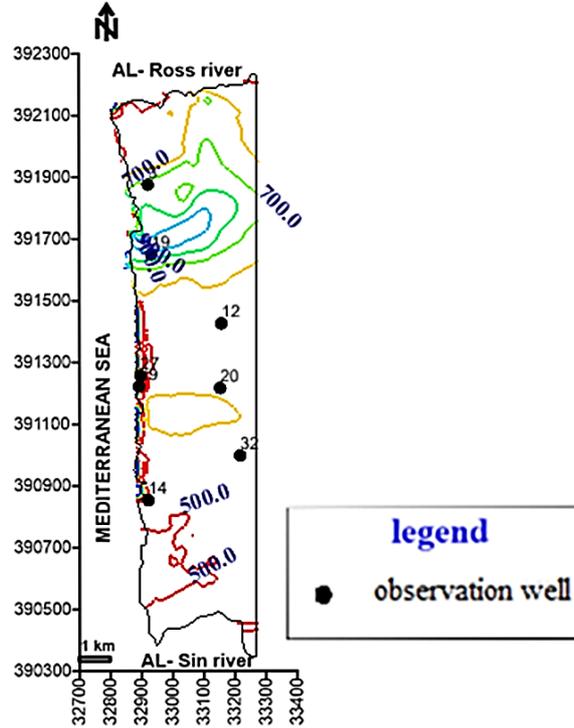
الجدول (3) عناصر الموازنة المائية (m³/day) للعام 2026 تحت تأثيرالسيناريو الثاني.

عناصر الموازنة	الجريان الداخل	الجريان الخارج	محصلة الجريان
الجريان الأفقي	20433	-24296	-3863
التغذية	0	-9450	-9450
الاستثمار	13312	0	13312
المجموع	33745	-33745	0



الشكل 17. مخطط تراكيز الأملاح

خلال شهر ت 2 عام 2026 تحت تأثير تشغيل السيناريو الثاني



الشكل 16. توزع هبوط سطح المياه الجوفية

خلال شهر ت 2 عام 2026 تحت تأثير تشغيل السيناريو الثاني

الاستنتاجات

1. تمتد المنطقة التي تتأثر بمياه البحر ضمن الطبقة الحاملة للمياه الجوفية الحرة في منطقة الدراسة من شاطئ البحر حتى مسافة 700 m.
2. انخفض تركيز الأملاح إلى أقل من 1000 mg/l في منطقة البحث عند تخفيض الضخ من الآبار بنسبة 15%، كما انخفض منسوب المياه الجوفية بحدود مقبولة (0.9 - 0.1 m) ، وحدث نهوض (حتى 0.7m) في مناطق أخرى، خاصةً القريبة من الآبار شديدة الملوحة، لذلك يعدّ هذا السيناريو الأفضل من بين السيناريوهات المقترحة في منطقة البحث؛ لأنه يحسّن نوعية المياه ويمنع اندساس مياه البحر ضمن طبقة المياه الجوفية.

التوصيات

1. استمرار مراقبة نظام المياه الجوفية في المنطقة بانتظام، وإعادة معايرة النموذج في حال وجود تغير في ظروف المنطقة أو بيانات إضافية.
2. عدم حفر آبار (بمسافة 300-700 m) عن شاطئ البحر منعاً لتداخل مياهها مع المياه الجوفية العذبة.
3. تخزين الفائض من مياه الأمطار لاستخدامها في أوقات الجفاف، وتطبيق التغذية الاصطناعية في المناطق المعرضة للجفاف في المستقبل.

References

- [1] ZHONGYUAN, XU; BILLX, HU; ZEXUAN, XU; and XIUJIE, WU (2019). *Numerical study of groundwater flow cycling controlled by seawater/freshwater interaction in Woodville Karst Plain*. Journal of hydrology. 579, 124-17.
- [2] MAO, X; ENOT, P; BARRY, D. A; BINLEY, A; and JENG, D. S (2005). *Tidal influence on behavior of a coastal aquifer adjacent to a low relief estuary*. Journal of Hydrology. 327, 110-127.
- [3] SATO, K; and IWASA, Y (2003). *Groundwater Hydraulics*. Nikkei printing, JAPAN, 204.
- [4] GOLDMAN, M; GILAD, D; RONEN, A; and MELLOUL, A (1996). *Mapping of Seawater Intrusion into the Coastal Aquifer of Palestine by the time Domain Electromagnetic Method*. J. Appl. Geophys.18, 153-174.
- [5] LEE, J.Y.; and SONG, S. H (2007). *Groundwater Chemistry and Ionic Ratios in a Western Coastal Aquifer of Buan, Korea; Implication for Seawater Intrusion*. Journ. Hyd. 3, 259-270.
- [6] HWANG, S; SHIN, J; PARK, I; and LEE, S (2004). *Assessment of Seawater Intrusion Using Geophysical Well Logging and Electrical Soundings in a Coastal Aquifer, Youngkwang-gun, Korea*. Exp. Geophys. 35, 99-164.
- [7] NORHAN, A; and Kuan, W (2004). *Simulation of groundwater flow and pollutant transport for alluvial aquifer in Kampung Tekek, Tioman Island*. Jurnal Teknologi. 41, 21-34
- [8] TODD, D. K; and MAYS, L. W (2005). *Groundwater Hydrology* 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc, United Kingdom, 636.
- [9] ALASAAD, A; and IBRAHEEM, A (1996). *Seawater intrusion with fresh Groundwater between Banias and Lattakia city*. Tishreen University Journal. 18, 72-91.
- [10] DELLEUR, J. W (2007). *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC press, U.S.A, 1348.
- [11] ALASAAD, A; HAYEK, SH; and MOHAMMAD, D (2018). *Evaluation the hydrogeological conditions of the unconfined aquifer in the area located between the AL-Sin and AL-Ross Rivers in the Syrian coast*. Tishreen University Journal. 6, 66-85.
- [12] LATHASHRI, U; and MAHESHA, A (2015). *Predictive Simulation of Seawater Intrusion in a Tropical Coastal Aquifer*. Journal of Environmental Engineering. 7, 321-336.
- [13] FEO, A; ZANINI, A; PETRELLA, E; HERNANDEZ-DIAZ, R; and CELICO, F (2019). *Analysis of the Saltwater Wedge in a Coastal Karst Aquifer with a Double Conduit Network*. water; 11(11): 2311, 2073-4441.
- [14] COLOMBANI, N; OSTI, A; VOLTA, G; and MASTROCICCO, M (2016). *Impact of Climate Change on Salinization of Coastal Water Resources*. Water Resources Management. 12, 102-117.
- [15] Geological map of Jableh patch scale 1: 50000 with the explanatory note (1978), the General Establishment for Geology and Mineral Resources.
- [16] KRESIC, N (2007). *Hydrogeology and Groundwater Modeling*. 2nd ed. Taylor & Francis Group, U.S.A, 807.

- [17] TODD, D. K; and MAYS, L. W (2005). Groundwater Hydrology 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc, United Kingdom, 636.
- [18] Hydrological and Hydrogeological Investigations in the Four Basins (Syria - Basin Coast) (1979), four volumes, Grozgeprovodkhuz. Tbilisi.
- [19] Project of development and modernization of irrigation and drainage systems in the Sin plain of 7500 hectares. 2005.
- [20] HUBBARD, S; and RUBIN, Y (2000). Hydrogeological parameter estimation using geophysical data: a review of selected techniques. *Journal of Contaminant Hydrology*. 45 (2000): 3–34.
- [21] SHOEMAKER, W (2004). Important observations and parameters for a salt water intrusion model. *Ground water*. 42(6): 829–840.
- [22] VISSMAN, Jr. W; and LEWIS, G. L (1995). Introduction to Hydrogeology. Addison, U.S.A, 760.
-