نمذجة حركة المياه الجوفية «حالة حوض الفرات الأدنى»

محمود السباعي

قسم هندسة الري والصرف ـ كلية الهندسة المدنية ـ جامعة البعث ـ سورية

تاريـخ الإيداع 2005/03/06

قبل للنشـر في 2005/06/20

الملخص

تعد مشكلة تملح الأراضي الزراعية من أخطر المشاكل التي تواجه الأراضي المروية في المناطق الجافة و شبة الجافة ذات الصرف السيئ. يعاني حوض الفرات في سورية من هذه المشكلة الناتجة عن ارتفاع مستوى الماء الجوفي ومعدل التبخر وهي مشكلة خطيرة وتجب معالجتها بسرعة لما تسببه من خفض للإنتاج الزراعي أو تدهور للأرض في حالاته القصوى. من هنا كانت فكرة إعداد نموذج رياضي لحركة الماء الجوفي في حوض الفرات الأدنى (القطاع السادس) خطوة في الاتجاه الصحيح للاستفادة منه في تحديد الصرف الأمثل للحوض بتحديد المواقع المثلى لآبار الصرف الشاقولي في المناطق الأكثر خطورة وخفض مستوى المياه الجوفية ووقف تدهور الأراضي الزراعية.

تم بناء النموذج الاعتباري بناء على الدراسات والتحريات الهيدروجيولوجية للشركة العامة للدراسات المائية. يشكل القطاع السادس جزءاً من الضفة اليسرى لنهر الفرات الأدنى، ويبدأ من منطقة التقاء نهري الفرات والخابور ويمتد إلى الجنوب الشرقي بمقدار 25 كم وبعرض وسطي 5 كم حتى نهاية المصطبة الأولى للنهر والتي تتشكل من لحفيات الألوفيوم الرباعي بسماكة كلية بين 5-25 م. الحوض محاط بحدود فيزيائية واضحة محددة بنهر الفرات من الجنوب الغربي وجروف شديدة الانحدار تعود للمصطبة الثانية لنهر الفرات ينعدم فيها الوارد الجوفي نحو القطاع من الشمال الشرقي. تتغذى الطبقة المائية بشكل رئيسي من رشوحات الري (28.5 مليون متر مكعب سنوياً) في حين يعد التبخر هو الفاقد الرئيسي (8 مليون متر مكعب سنويا).

تم اعتماد نظام Modflow لحل المعادلات الرئيسية لحركة المياه الجوفية حيث قسمت منطقة الدراسة إلى 890 خلية تغطي مساحة القطاع البالغة 125 كم2. باستعمال نظام المعلومات الجغرافي، تم بناء مايقارب من 70 شريحة تمثل مدخلات النموذج. تمت معايرة النموذج لحالة عدم الثبات للعام 98-99 وإجراء العديد من تجارب الحساسية لتحديد العوامل الأكثر أهمية للمعايرة.

أظهرت الدراسة أن الصرف الطبيعي في القطاع سيئ بشكل عام و القطاع في الوقت الراهن يعاني من مشكلة صرف تؤدي إلى ارتفاع تدريجي في مستوى الماء الجوفي. استخدم النموذج لفحص تأثير إضافة 15 و25 بئر صرف شاقولياً على مستوى المياه الجوفية. تم بالاستفادة من النموذج تحديد مواقع هذه الآبار في الأماكن ذات مستويات الماء المرتفعة والأماكن ذات العوامل الهيدروليكية الملائمة وتحديد تصاريفها. أدت إضافة هذه الآبار إلى انخفاض مستوى المياه الجوفية في معظم المناطق الأخطر إلى أقل من 1.5 متر وانخفاض في حجم التبخر خلال عام واحد بنسبة 20% و 26.3% على الترتيب.

إن إعداد النموذج أخذ بالحسبان مختلف الشروط الهيدروجيولوجية السائدة في المنطقة، ومن ثم هو تمثيل رياضي للواقع القائم للمعقد المائي. يمثل النموذج أداة مهمة للتعامل مع الخطط الاستثمارية ضمن إطار الظروف الطبيعية القائمة، وهو بذلك أداة فعالة لاستثمار تلك المنطقة بالشكل الأمثل.

الكلمات المفتاحية: النمذجة الرياضية للمياه الجوفية، الصرف الشاقولي، حوض الفرات الأدنى، تملح الترب الزراعية

Groundwater Flow Modeling "Lower Euphrates Valley"

Mohmoud Al-Sibai
Department of Irrigation and drainage Engineering-Faculty of Civil Engineering-Al Baath University-Syria

Received 06/03/2005
Accepted 20/06/2005

ABSTRACT

The provision of adequate drainage and the accompanying problem of accumulation of salt in soil have plagued irrigated agriculture for centuries. Soil salinity is one of the major problems in arid and semi-arid zones. In Euphrates valley the high groundwater level and its high evaporation rate caused a serious salinity problem. This study was aimed to allocate the dangerous areas in terms of high water level resulted from the recent and expected activities. Drainage wells will be drilled at these areas in order to lower the groundwater level and prevent further soil salinity. To achieve this, a mathematical model for groundwater flow was developed for one of the lower Euphrates valley basin (sector 6).

The conceptual model was build according to the hydrogeological investigation done by the general company of hydraulic studies. The sector area started from confluence of Euphrates and Khabour rivers and continues 35 km downstream with an average width of 5 km. The basin consists of alluvium sediments with an overall thickness between 5 and 25m.

The hydrogeological investigations revealed that the basin is surrounded with different physical boundaries. River boundaries are at the south west and a no-flow boundary at the north east.

The aquifer main recharge is from irrigation (28.5 Mcm/year) while evaporation is a main groundwater discharge (8 Mcm/year).

MODFLOW code was used as a generic model. The area has been simulated in a network of 890 cells covering the basin area of 125 km^2. GIS was used in building around 70 layers formed the model input data. The model was calibrated for non-steady state of year 98-99 and various sensitive experiments were carried out.

The study showed that the current drainage situation is inadequate and the water table continues to rise. The model was used to test the affect of adding 15 and 25 drainage wells. The sites of these wells were chosen in the areas of high water table and high transmisivity. The test showed that the water table in most of the dangerous area felled to about 1.5 m, and the evaporation volume decreased by 20% and 26.3% respectly.

The model is a presentation of the water system complex that is strongly depends on the available hydrogeological information. The model is a tool for the decision maker to manage and set up proper plan for the area reclamation and development.

Key Words: Groundwater flow modeling, Vertical drainage, Lower Euphrates valley, Soil Salinity

المقـدمـة

تتطلب الإدارة الجيدة للأحواض المائية الجوفية القدرة على التنبؤ بنظام حركة الماء الجوفي والأملاح والتنبؤ بما سيؤول الأمر إليه نتيجة للتغيرات التي تفرضها الطبيعة والنشاطات الإنسانية على الحوض، وتشكل النماذج الرياضية إحدى أشهر طرائق تحليل حركة المياه والأملاح منذ مطلع الخمسينيات وقد تطورت هذه الطرائق مستفيدة من تطور الحواسب لها.

يتم بواسطة النموذج تحديد عناصر الموازنة المائية للحوض بدقة وتحديد الآفاق المستقبلية لمناطق الاستثمار الكثيف سواء منها الحالية أو التي ستحددها الدولة، كما يمكن تشغيل النموذج حسب سيناريوهات مختلفة لدراسة تطوير إدارة الموارد المائية المتاحة. إن هذه النتائج مهمة جداً لمتخذ القرار لتخطيط استثمار الموارد المائية المحدودة في القطر بشكل رشيد.

يعد حوض الفرات من المناطق الحيوية في القطر العربي السوري وقد لاقى الكثير من الاهتمام من الدولة. يعاني هذا الحوض من مشكلة التملح الناتجة عن ارتفاع مستوى الماء الجوفي، وهي مشكلة خطيرة وتجب معالجتها بسرعة لما تسببه من خفض شديد للإنتاج الزراعي. من هنا كانت فكرة إعداد نموذج رياضي لحركة الماء الجوفي في حوض الفرات الأدنى خطوة في الاتجاه الصحيح للاستفادة منه في تحديد الصرف الأمثل للحوض حسب رؤية مصمم المشروع ككل.

لمحة نظرية

أبسط تعريف لكلمة نموذج Model هو أنه تمثيل لظاهرة واقعية حقيقية، من جهة أخرى النموذج الاعتباري Conceptual Model هو افتراض مبسط لكيفية عمل هذه الظاهرة ويقوم النموذج الرياضي Mathematical Model بالتعبير عن هذا الافتراض بمعادلات رياضية. ومن هنا يكون الهدف من المحاكاة Simulation أو النمذجة هو الوصول إلى التبسيط الأعظم للظاهرة مع المحافظة على الدقة المطلوبة وتأمين موثوقية عالية للنتائج (Hulme, 2000).

المعادلات الناظمة لحركة المياه الجوفية

تبنى معادلات حركة المياه الجوفية بشكل عام على معادلتين مشهورتين هما: قانون دارسي ومعادلة انحفاظ المادة وإن جمع هاتين المعادلتين يعطي المعادلة التفاضلية الجزئية العامة التالية والناظمة للجريان غير المستقر للمياه في الأوساط المسامية (*Konikow & Reily*, 1999):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)=-W+\mu\frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

حيث: k نفاذية الحامل المائي في الاتجاهات الإحداثية x,y,z (LT^{-1})

h الضاغط الهيدروليكي عند الزمن t (L)

μ المعطائية المائية (specific yield) (في حالة الحامل المائي الحر)

W حد يمثل التغذية أو السحب (T^{-1})

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

إن المعادلة السابقة (1) معقدة ولا يمكن حلها بشروطها العامة بشكل تحليلي، رغم وجود بعض الحلول التحليلية للحالات الخاصة، لذلك اعتمد على الطرائق العددية لحلها وخاصة طريقة الفروقات المحدودة لوضوحها الأكثر. في هذه الطريقة يتم حل المعادلة التفاضلية الجزئية السابقة باستبدال الوسط المستمر الممثل في المعادلة (1) بمجموعة محددة من النقاط (عقد عند مراكز الخلايا) المنفصلة فراغياً وزمانياً (الشكل 1)، تعطى الموازنة المائية لكل خلية بالعلاقة الآتية المعتمدة على معادلة الاستمرار (*McDonald & Harbaugh* ,1988):

$$\sum Q_i = S_S\,\frac{\Delta h}{\Delta t}\,\Delta V \qquad (2)$$

حيث: Q_i معدل الجريانات من الخلية وإليها (L^3T^{-1})

ΔV حجم الخلية (L^3)

Δh تغير الضاغط خلال الزمن Δt (L)

تتصل كل خلية بست من الخلايا المجاورة بشكل عام، ويكون الجريان المتجه من كل خلية مجاورة إلى تلك الخلية مساوياً حسب دارسي إلى جداء النفاذية بين هاتين

العقدتين في مساحة المقطع المتعامد على الجريان مضروباً بالتدرج الهيدروليكي، فمثلاً الجريان من الخلية ($i,j-1,k$) إلى (i,j,k) يعطى بالعلاقة:

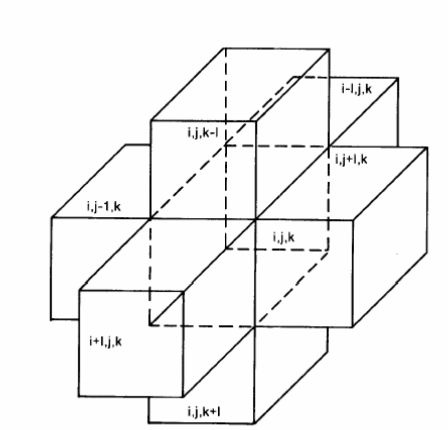
$$q_{i,j-\frac{1}{2},k} = k_{i,j-\frac{1}{2},k} \Delta c_i \ \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-\frac{1}{2}}} \qquad (3)$$

حيث: k النفاذية بين العقدتين.

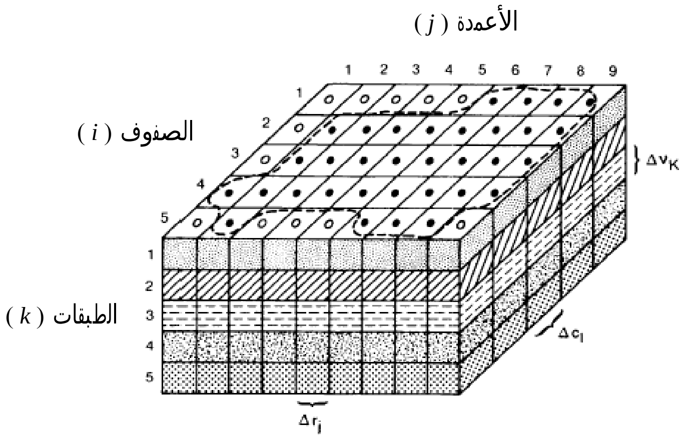
$\Delta C_i \ \Delta V_k$ مساحة المقطع المتعامد على الجريان (انظر الشكل 2).

Δr المسافة بين العقدتين.

h الضاغط المائي في العقدة.



الشكل (1) التقسيم الفراغي للحامل المائي المعتمد بواسطة شبكة ثلاثية الأبعاد يحدد موقع كل خلية فيها برقم السطر (i) والعامود (j) والطبقة (k) الواقعة بهم، في مركز كل خلية توجد العقدة التي سيحسب الضاغط بها.



الشكل (2) الحامل المائي بعد التقسيم

إن تأثير العوامل الخارجية على الحامل المائي (مثل التسرب من المجاري المائية و التغذية و التبخر ..الخ) يمكن تمثيله لكل خلية n بالصيغة الآتية:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n}\, h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n}$$

حيث: $a_{i,j,k,n,}$ تمثل كمية تأثير العامل الخارجي n في الخلية (i,j,k) (L^3T^{-1}).

$p_{i,j,k,n}$, $q_{i,j,k,n}$ ثوابت لها واحدة (L^3T^{-1}) , (L^2T^{-1}) على الترتيب.

ومن ثـم يكون مجموع جميع التأثيرات على الخلية:

$$\sum_{n=1}^{N} a_{i,j,k,n} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \qquad (4)$$

بالعودة إلى المعادلة 2 وإدخال تأثير الجريانات من الخلايا المجاورة ومن المصادر الخارجية تصبح معادلة الاستمرار:

$$q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2}$$

$$+ P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \; \Delta c_i \; \Delta v_k$$

يكتب المشتق الزمني للضاغط بواسطة نظام الحل الضمني Implicit scheme بالشكل:

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}\right)_m = \frac{h^m_{i,j,k} - h^{m-1}_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}}$$

هذا النظام له ميزة عن نظام الحل الظاهري أو الصريح Explicit scheme بأنه مستقر دوماً ولا يتأثر بأبعاد الخطوة الزمنية (*Smith,* 1985) لتلك الغاية نقسم الحامل المائي إلى شبكة في الاتجاهات المكانية الثلاثة كما في الشكل (1) إضافة إلى التقسيم الزمني (الدالة *m*) وبتطبيق تلك التقسيمات تصبح المعادلة السابقة باستخدام الفروقات المحدودة بالطريقة الضمنية و بعد التبديل:

$$CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} h^m_{i,j,k-1} + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} h^m_{i-1,j,k} + CR_{i,j-\frac{1}{2},k} h^m_{i,j-1,k} + (-CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} - CC_{i-\frac{1}{2},j,k}$$
$$- CR_{i,j-\frac{1}{2},k} - CR_{i,j+\frac{1}{2},k} - CC_{i+\frac{1}{2},j,k} - CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} + HCOF_{i,j,k}) h^m_{i,j,k} + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} h^m_{i,j+1,k} +$$
$$CC_{i+\frac{1}{2},j,k} h^m_{i+1,j,k} + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} h^m_{i,j,k+1} = RHS_{i,j,k}$$

حيث:

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SC1_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}};$$
$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} \frac{SC1_{i,j,k} h^{m-1}_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}};$$
$$SC1_{i,j,k} = \mu_{i,j,k} \Delta r_j \; \Delta c_i \; \Delta v_k .$$

CR, CV, CC معاملات التوصيل الهيدروليكي Conductance Coefficient وتساوي جداء النفاذية بين العقدتين في مساحة المقطع المتعامد على الجريان مقسوماً على طول الجريان.

إن المعادلة السابقة هي الحل العددي حسب طريقة الفروقات المحدودة للمعادلة 1 والضاغط الوحيد المعروف هو $h_{i,j,k}^{m-1}$ الذي يمثل الضاغط عند بداية الفترة الزمنية *m-1* للخلية *i,j,k* والضغوط المجهولة هي الضغوط عند الزمن *m* للخلية نفسها والخلايا الست المجاورة لها، لذلك لا يمكن حل المعادلة السابقة منفردة وإنما يجب حلها بالترابط مع الخلايا المجاورة المرتبطة في شبكة النموذج، وهذا يستدعي حل *n* معادلة بآن واحد عند كل فترة زمنية حيث *n* هو عدد خلايا الشبكة ويعطي الحل الآني لهذه المعادلات معاً قيم الضاغط *h* في نقاط وأزمنة محددة.

الحل الآني للمعادلات الخطية الجبرية:

يتم حل المعادلات الخطية الجبرية الناتجة معاً بواسطة طرائق التكرار Iteration Methods. يستخدم التكرار عند كل فترة زمنية يتم تشغيل النموذج الرياضي لها حيث تُفرض في البداية قيم أولية للضاغط في كل خلية وبعد المباشرة بالحل نحصل على قيم أخرى أقرب إلى الحل الفعلي للمعادلات. تؤخذ هذه القيم كأساس جديد بدلاً من القيم الأولية، ونكرر الحل هكذا حتى يصبح الفرق بين القيم المدخلة والقيم الناتجة صغيراً إلى الحد المقبول فنحصل على القيم التي تعطي الحل الأقرب لجملة المعادلات.

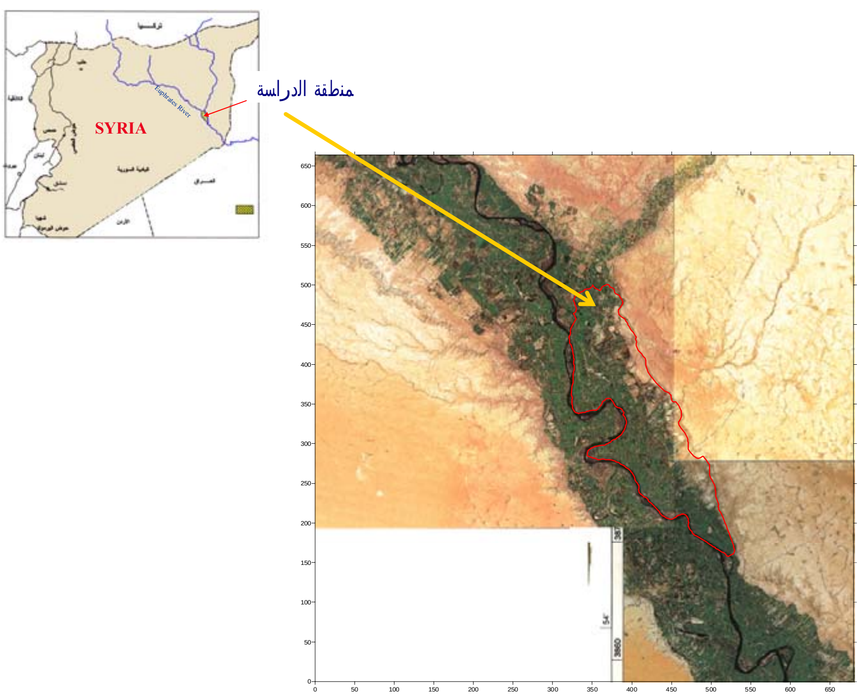
وقد تم اعتماد نظام Modflow المطور من قبل *U.S. Geological Survey* (*McDonald, M. G. & Harbaugh, A. W.* 1988) لحل المعادلات الرئيسية لحركة المياه الجوفية لما يتمتع به هذا النظام من موثوقية ومرونة لتطويره وإضافة برامج فرعية إليه ليلائم الحالة المدروسة.

النموذج الرياضي للمياه الجوفية في حوض الفرات الأدنى

1 ـ النموذج الاعتباري

تقع منطقة الدراسة في القطاع السادس الذي يشكل جزءاً من الضفة اليسرى لنهر الفرات الأدنى، ويبدأ من منطقة التقاء نهري الفرات والخابور ويمتد إلى الجنوب الشرقي بمقدار 25 كم وبعرض وسطي 5 كم حتى نهاية المصطبة الأولى للنهر (الشكل 3) والتي تتشكل من اللحقيات الرباعية، تتوضع هذه اللحقيات على توضعات النيوجين المارلية والتي تظهر على المصطبة الثانية للنهر وتشكل عموماً طبقة كتيمة. تم بناء النموذج الاعتباري لمنطقة الدراسة بناء على الدراسات والتحريات الهيدروجيولوجية السابقة المتاحة.

يحيط بهذا القطاع من الجنوب الغربي مجرى نهر الفرات المتعرج حيث يعد نهر الفرات كحد من النوع الثالث يحقق العلاقة (*Anderson & Woessner 1992*):



الشكل (3) موقع منطقة الدراسة.

$$Q_{river} = C_{river}(h_{river} - h_{i,j,k})$$

حيث: Q_{river} : الجريان بين النهر والحامل المائي.

C_{river} : الناقلية الهيدروليكية لسرير النهر (تساوي إلى $\frac{KLW}{M}$ حيث K نفاذية سرير النهر وL طول جزء النهر المعتبر وW عرض مجرى النهر وM سماكة سرير النهر).

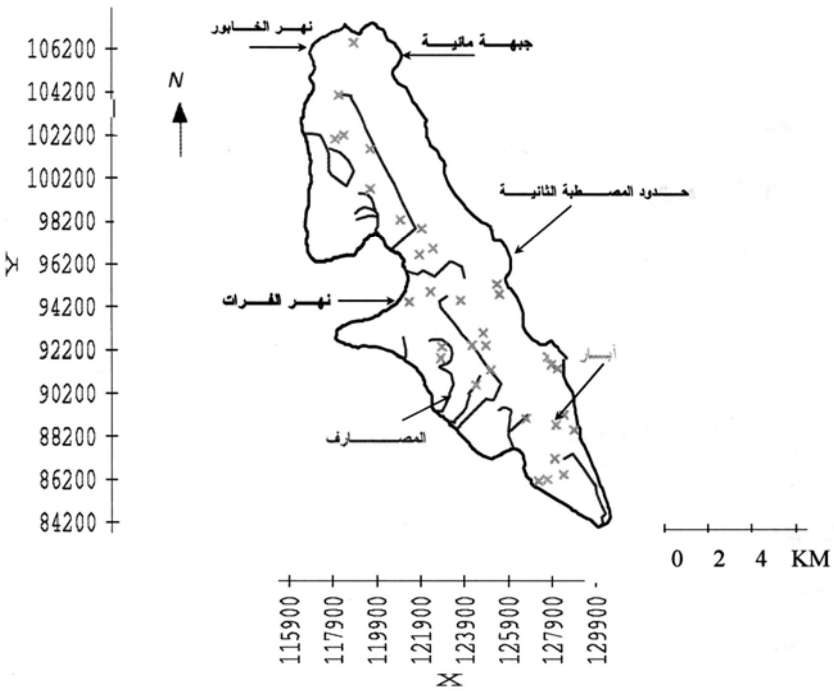
h_{river} : مستوى الماء في النهر.

$h_{i,j,k}$: مستوى الماء في الخلية المجاورة من الحامل المائي.

أما من الشرق فتحده جروف شديدة الانحدار تعود للمصطبة الثانية لنهر الفرات (توضعات النيوجين) وقد أظهرت التحريات الهيدروجيولوجية التي قامت بها شركة الدراسات المائية أنه يمكن اعتبارها حدوداً غير نفاذة، وفيما إذا لوحظ جريان للمياه الجوفية عبرها فهو ذو قيمة ضعيفة جداً. تتوضع في أسفل الحامل المائي طبقة خشنة

من الحصويات والرمل بسماكة تتراوح بين 0.0-7.0 م لها معامل رشح مرتفع نسبياً وبمجال يتراوح من متر في اليوم تقريباً إلى عدة عشرات عند وجود حصى مصنف بشكل جيد (well sorted gravel). وفي الأعلى طبقة من الغضار والرمل بسماكة تتراوح بين 0.0-5.0 م بمعامل رشح منخفض نسبياً بقيم وسطية بين 0.1-0.5 متر/يوم (جرسار، 1984). وقد دلت عمليات الرصد والدراسات السابقة على أن مستوى المياه واحد لهاتين الطبقتين وأنه يمكن دراستهما كطبقة واحدة ناقلة للماء (جرسار، 1984). تم اعتماد نفاذية موزونة كقيمة وسطية وذلك بالأخذ بالحسبان سماكة كل طبقة وسماكة الماء الوسطية الكلية (*Boonstra & de Ridder* 1981).

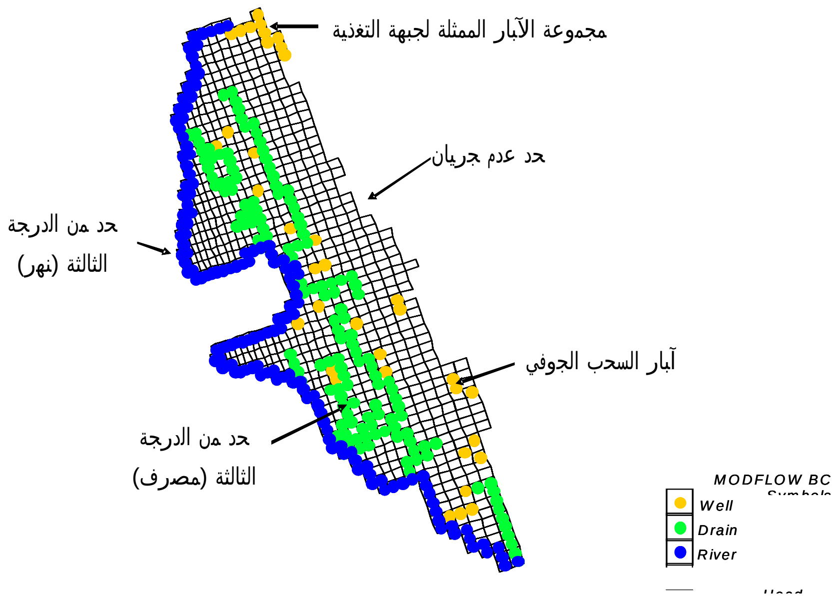
تتم التغذية الأساسية للحامل عن طريق رشوحات مياه الري، كما لوحظ وجود تغذية بسيطة عن طريق الجريان الجوفي الجانبي للمياه من طرف المصطبة النهرية لنهر الخابور باتجاه هذا القطاع (الشكل 4) .



الشكل (4) الشروط الحدية للنموذج.

2 ـ تصميم شبكة النموذج

لتطبيق حل الفروقات المحدودة يلزمنا بناء شبكة على الحوض المدروس، لهذا استخدمت شبكة من المستطيلات كما في الشكل (5) بحيث تمت زيادة كثافة الشبكة عند طرف القطاع المجاور للنهر لزيادة الفعاليات وآبار الرصد عنده مقارنة مع طرف القطاع البعيد عن النهر (من الشرق) وحصلنا بذلك على شبكة فيها أبعاد الخلايا القريبة من النهر زهاء 210m X 396m وتتزايد خطياً لتصبح عند الطرف البعيد عن النهر للقطاع 547m X 396m وبعدد كلي للخلايا مساوٍ لـ 880 خلية.



الشكل (5) شبكة النموذج موزعة عليها الشروط الحدية

3 ـ مدخلات النموذج

تم تحديد جميع المدخلات اللازمة للنموذج بالتعاون مع الشركة العامة للدراسات المائية بحمص، وقد أنشئت الجداول والخرائط بشكل أساسي من المعطيات التي قدمت من الشركة والموجودة في التقرير الهيدروجيولوجي للدراسة، حيث تم ربطها بنظام المعلومات الجغرافي Geographical Information System (GIS). بعد ذلك صدرت

هذه المعطيات إلى خلايا النموذج بحيث أخذت كل خلية القيمة الموافقة لها، وهذه المدخلات هي:

1- مستويات سطح الأرض الطبيعية:

2- الناقلية المائية

تم إنشاء خريطة للنفاذية المائية في المنطقة اعتماداً على قيم الناقلية المائية المحسوبة من نتائج تجارب الضخ المنفذة من الشركة ومن دراسات سابقة لعدد من الآبار الموزعة على كامل المنطقة (34 بئراً) ومن قيم سماكة الحامل المائي. ويظهر الشكل 6 توزع قيم النفاذية المعتمدة لمنطقة الدراسة.

3- مستوى الطبقة الكتيمة أسفل الحامل المائي

تم إدخال مستويات الطبقة الكتيمة أسفل الحوض ورسم خطوط الكونتور، ومن ثم تصديرها إلى خلايا النموذج.

4- المعطائية المائية

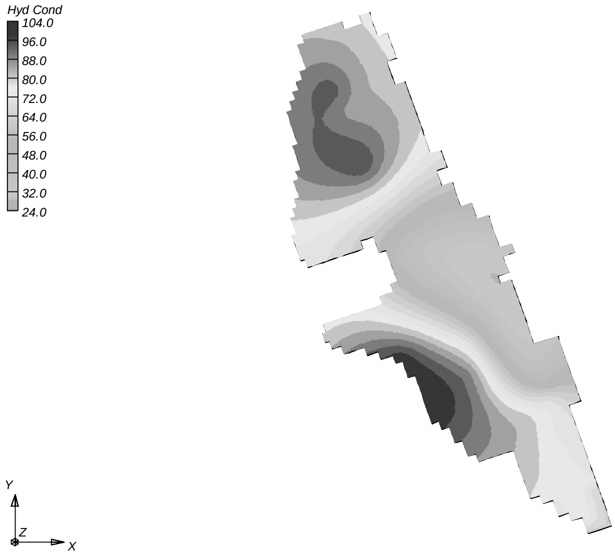
أظهرت المعطيات المتاحة والدراسات السابقة للتربة أنه يمكن اعتماد قيمة أولية وسطية للمعطائية المائية للطبقة العلوية من الحوض والتي يتذبذب بها مستوى المياه مساوية إلى 0.1 (جرسار، 1984).

5- مستويات سطح الماء الجوفي المقيس

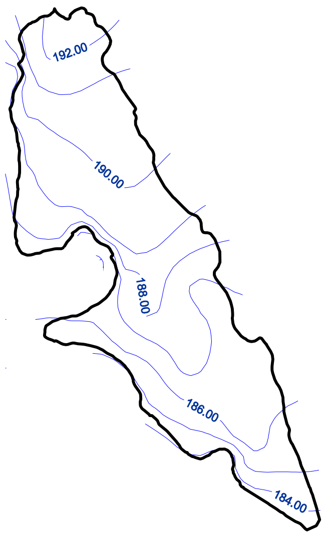
و يمكن الحصول عليها من رسم خرائط خطوط تساوي مستويات الماء الجوفي حسب معطيات الرصد الشهرية لـ 33 بئراً موزعة على كامل القطاع. يظهر الشكل (7) مستوى المياه الجوفيه المقيسة في شهر كانون الأول 1998.

6- التغذية الصافية من الري

تم إدخال التغذية الصافية من الري والراشحة إلى المياه الجوفية حسب الدراسات السابقة للشركة والتي تراوحت بين 9% إلى 30% تبعاً للمحاصيل المختلفة وزمن الري ومناطق توزع محاصيل القطن والذرة والقمح مع الشوندر والسمسم مع الخضار. وقد تم إهمال الراشح من الهطول المطري لضآلته النسبية. تم إدخال مواقع هذه المحاصيل مكانياً بالاستعانة بنظام GIS (الشكل 8) ومن ثم إدخال الراشح من ري كل محصول زمنياً داخل النموذج.



الشكل (6) النفوذية المائية للحامل المدروس (م/يوم).



الشكل (7) مستوى المياه الجوفية المقيسة (ك1، 98).

الشكل (8) الأراضي المزروعة بالقطن (المضلعات المهشرة).

7- التبخر من المياه الجوفية

يتبخر الماء من سطح المياه الجوفية نتيجة فرق الكمون الحراري والصعود الشعري. تتأثر قيمة هذا التبخر بعمق الماء الجوفي ونوع التربة وشدة الحرارة ووجود غطاء نباتي أم لا، وقد تمت معالجة موضوع التبخر بشكل مفصل لأهميته وبالاستعانة بنظام المعلومات الجغرافي GIS. إن نوع التربة يحدد العمق الذي يبدأ التبخر عنده بالحدوث والعمق الذي يصبح فيه التبخر أعظمياً (يتوضع مستوى المياه على أعماق أقل من 1 متر إلى 7.5 متر عن سطح الأرض). وقد كان من المفضل وجود قيم واقعية لهذه القيم باستخدام اللايزومترات (Lysimeter) وخاصة عند أماكن وجود التملح ولكن بسبب عدم توافر مثل هذه الدراسات فقد تمت الاستعانة بالقيم المعطاة من قبل منظمة الـ FAO. تم في البداية تحديد أنواع الترب حسب معطيات شركة الدراسات المائية وشكلت شريحة الترب ثم شكلت شريحة مستويات الأرض الطبيعية بالاعتماد على خرائط المساحة العسكرية ثم تمت مقاطعة الشريحتين السابقتين. بعد ذلك حددت ثلاث شرائح، شريحة

للأراضي البور وأخرى للأراضي التي تخلو من الزراعة بين حصاد القمح وزراعة الذرة وشريحة للأراضي التي تخلو من الزراعة بعد حصاد القطن، ومن ثم أدخل التغير الزمني للتبخر لكل شريحة. تمت مقاطعة هذه الشرائح ومن ثم تصديرها إلى خلايا النموذج مكانياً بحيث احتوت كل خلية على نوع تربتها ومستوى سطح الأرض بها وقيم التبخر مع الزمن.

8- الرشح إلى المصارف

يوجد في القطاع شبكة كثيفة من المصارف السطحية ولحساب قيم الرشح إليها يجب تحديد مستوى قاع المصرف والناقلية الهيدروليكية لسرير المصرف إضافة إلى مستوى الماء الجوفي المجاور.

بالنسبة لحساب الناقلية الهيدروليكية لسرير المصارف، لتمثيلها كحد من الدرجة الثالثة، نحتاج لمعرفة التدفق المار في المصارف في نقاط عديدة و بفترات مختلفة محددة مع قيم مستوى الماء الجوفي الموافقة لها في نقاط مجاورة. تمت الاستفادة من جميع القياسات المتوافرة من الخرائط المساحية والمسوحات الحقلية لتحديد المعاملات السابقة.

9- الاستجرار من آبار الفلاحين

كان هناك عدد كبير من آبار الفلاحين في المنطقة (143 بئراً). تم تقسيم هذه الآبار إلى مجموعات تضم كل مجموعة عدداً من الآبار المتجاورة والمتماثلة في نظام الضخ. تم من خلال المسح الحقلي تحديد مواقع هذه المجموعات (المجموعات هي الآبار المبينة في الشكل 4،5) وتصريفها وحالة استخدامها إضافة إلى نظام تشغيلها الشهري خلال عام المعايرة (1998-1999) حيث بلغ حجم الضخ السنوي لعام المعايرة 4.9 مليون متر مكعب. أدخلت جميع هذه المعطيات مكانياً وزمانياً كنقاط سحب للمياه الجوفية من الحوض.

10- آبار جرسار للصرف الشاقولي

هناك عدد من الآبار التي أنشئت لتضخ المياه أتوماتيكياً عند وصول مستوى المياه الجوفية إلى حد معين حسب دراسة قديمة أجريت من شركة فرنسية (جرسار). تم تحديد موقعها وتدفقها ونظام عملها بشكل تقريبي خلال عام المعايرة (تشرين الأول 1998 - أيلول 1999) من خلال المسح الحقلي وإدخالها كما في الفقرة السابقة.

11- الرشح من النهر وإليه

بعد تحديد موقع النهر، تم تحديد قيم تغير المستوى مع الزمن من القراءات الشهرية للميرات المركبة على النهر خلال عام المعايرة، وتم اعتبار أن مستوى الماء في النهر يتغير خطياً بين هذه الميرات. تم تقدير الناقلية المائية لسرير النهر من خلال تقارب خطوط مستويات المياه الجوفية وفحص الارتباط بين مستويات المياه في الآبار المجاورة

للنهر ومستويات الماء في النهر، وبحيث يعاد تدقيقها فيما بعد في أثناء المعايرة وذلك لتمثيله كحد من الدرجة الثالثة كما وضح سابقاً.

4 ـ المعايرة (حالة عدم الثبات non-Steady State)

استخدمت في المعايرة مستويات المياه الشهرية في آبار الرصد من شهر تشرين الأول 1998 حتى نهاية شهر أيلول 1999 ضمناً (12 شهراً).

تشكل معايرة النموذج Model Calibration خطوة أساسية في تحديد القيم النهائية للمعاملات الهيدروليكية و قيم الإجهادات المطبقة على الحوض المائي، وكلما كانت القيم المعطاة أدق كانت المعايرة أفضل و النتائج أدق، وبالعكس كلما كانت المعطيات تقريبية أكثر ازداد عدد المعاملات الخاضعة للمعايرة وازدادت صعوبة الوصول إلى المعايرة الأصح وقلت دقة النتائج (*Boonstra & de Ridder* 1981). لذلك تم تدقيق معظم المعطيات وخاصة معطيات الضخ و الري من الفلاحين كونهما الإجهادين الرئيسين على الحوض؛ حيث تمت الاستفادة – قدر الإمكان – من معطيات مديريات الزراعة والمسح الحقلي خلال عام المعايرة وسؤال الفلاحين. بالنسبة لقيم الناقلية المائية فقد تمت مناقشة نتائج الدراسات السابقة (جرسار، 84) ونتائج تجارب مؤسسة استصلاح الأراضي وتجارب شركة الدراسات المائية واستخلاص القيم الأكثر تمثيلاً للواقع.

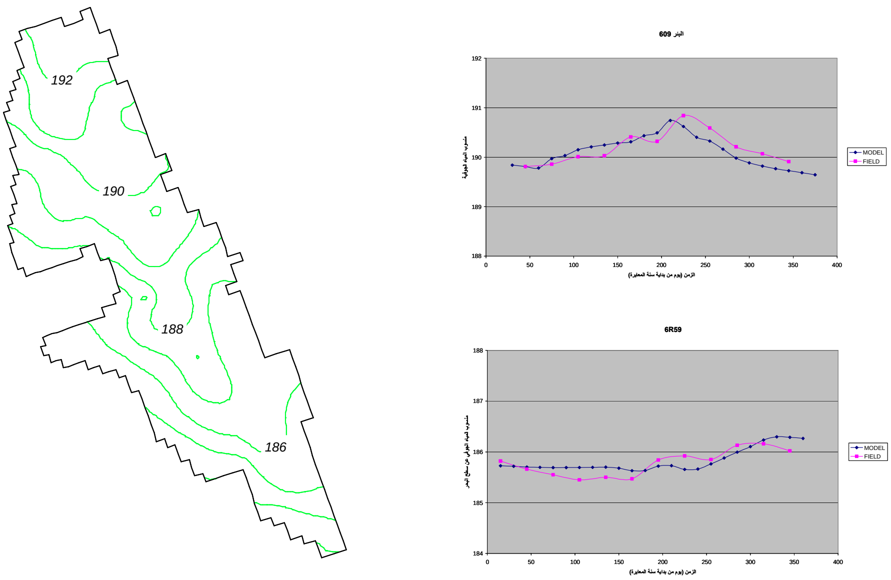
أظهرت اختبارات الحساسية لتشغيل النموذج لحالة عدم الثبات أن قيم التغذية وتوزعها مع الزمن كانت الأهم والأكثر تأثيراً إضافة إلى قيم ثوابت التبخر مما استدعى إعطاء الجهد الأكبر لتحديدها ومعايرتها، كما أظهرت الاختبارات أهمية أقل لقيم الناقلية المائية لسرير المصارف وهذا على الأغلب عائد إلى ارتفاع مستوى قاع معظم المصارف ومن ثم إلى ضعف تأثيرها. بالنسبة لبقية المعاملات الهيدروليكية للحامل فقد كان تأثير تغييرها ضعيفاً بشكل عام.

كانت الناقلية المائية لسرير النهر ذات أهمية كبيرة في تحديد الكميات المنصرفة مـن الحوض باتجاه النهر إلا أن ندرة آبار الرصد قرب النهر شكلت عائقاً أمام المعايرة لقلـة المعلومات المتوافرة.

كذلك أظهرت المعايرة وجود جبهة مائية قادمة من حوض الخابور عند الزاوية الشمالية الشرقية للحوض، وقد أكد ذلك وجود امتداد ضيق لحوض الخابور إلى داخل الحوض المدروس في الخريطة الهيدروجيولوجية للمنطقة. هذه الجبهة وجد أنها غير ثابتة وإنما متغيرة مع الزمن و قد كانت قيم قراءات آبار الرصد التي تقع مباشرة على الجبهة ذات أهمية كبيرة في تحديد ذلك التغير. يتم تمثيل الجبهة بمجموعة من الآبار المغذية (*McDonald & Harbaugh* 1988) حيث حددت كميات هذه المياه القادمة وتغيرها مع الزمن من خلال المعايرة، وكانت تعادل سنوياً 0.2 مليون متر مكعب.

ظهر من المعايرة أن بعض المصارف كانت غالباً مجرد أقنية ناقلة لمياه آبار جرسار حيث أظهرت آبار الرصد الموجودة قربها ارتفاعات شاذة مفاجئة تتزامن مع مرور الماء بهذه المصارف نتيجة صب المياه من آبار الصرف المجاورة لها مما استدعى إهمال هذه الآبار في المعايرة خاصة وأنه لاتوجد أية محطات مراقبة على هذه المصارف.

لقد احتاج النموذج إلى إجراء 75 عملية معايرة رئيسة للوصول إلى أفضل حل ممكن بالنسبة للمعطيات المقدمة. ويبين الشكل (9) مقارنات بين نتائج الرصد في بعض الآبار (استخدمت القياسات الشهرية لـ 33 بئر رصد من أجل المعايرة) والنتائج المعطاة من النموذج وكان هناك بشكل عام تقارب جيد في النتائج (نظراً لتذبذبات في القياسات نتيجة الضخ) نقطياً ومساحياً. يعطي الجدول (1) الأحجام النهائية للموازنة المائية للحوض والمحسوبة من النموذج خلال فترة الدراسة (12 شهراً) مقدرة بمليون متر مكعب في السنة.



الشكل (9) نتائج المعايرة في بعض الآبار خلال سنة المعايرة ومستوى المياه الجوفية المحسوب لشهر كانون الأول 98.

الجدول (1) الموازنة المائية للحوض مقدرة بمليون متر مكعب في السنة

المركبة	القيم الداخلة للحوض من المركبة (*IN*)	القيم الخارجة من الحوض من المركبة (*OUT*)

التخزين في الماء الجوفي	9.2876	10.404
الآبار	0.2025	4.9463
التسرب النهري	0.1203	10.482
المصارف	0	4.1108
التغذية	28.595	0
التبخر	0	7.9525
الكمية الكلية	38.207	37.894
الفرق بين الداخل و الخارج	**0.31304**	

وكانت النسبة المئوية للخطأ Percent Discrepancy والمحسوبة بالعلاقة (*McDonald, M. G. & Harbaugh, A. W.* 1988):

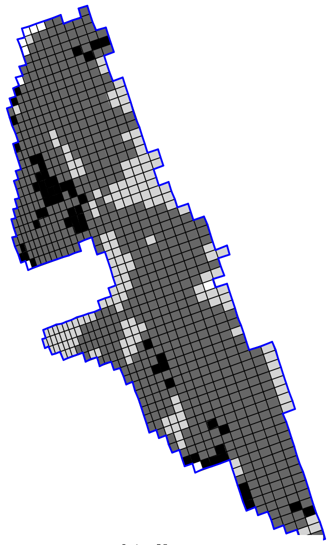
$$D = 100\frac{(IN - OUT)}{(IN + OUT)/2}$$

تساوي 0.82 و هذه تعد دقة عالية للحل العددي.

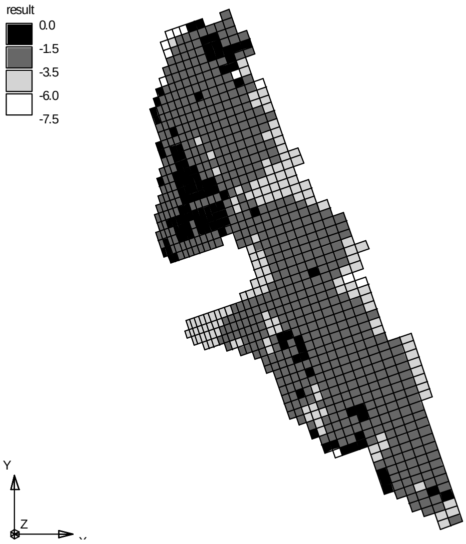
5 ـ التـنـبـؤ

يعد التنبؤ أحد أهم الفوائد المكتسبة من استخدام النماذج الرياضية حيث نستطيع بتشغيل النموذج إلى أي عدد من السنين (نظرياً) التنبؤ بما سيحصل بعد هذه السنين، وقد ذكرنا كلمة نظرياً لأن هناك حداً معيناً لزمن التنبؤ تصبح النتائج بعدها غير دقيقة وأحياناً مضللة (*Anderson & Woessner* 1992; *ASTM*, 1993)، وهذا الأمر يعتمد على عاملين اثنين هما:

1- المدة الزمنية التي استخدمت لمعايرة النموذج (عدد السنين)
2- دقة المعطيات المستخدمة في أثناء المعايرة.



الشكل (10)
عمق الماء الجوفي في نهاية سنة المعايرة.



الشكل (11)
عمق الماء الجوفى المتوقع بعد عامين.

يظهر الشكلان (10 و11) خريطة أعماق الماء الجوفي في نهاية سنة المعايرة وبعد عامين منه باستخدام الإجهادات والمعطيات نفسها (تغذية، ضخ، صرف، تبخر ...الخ) لعام المعايرة. تظهر النتائج ازدياداً مستمراً في ارتفاع مستوى الماء دلالة على عدم قدرة الصرف الطبيعي والاصطناعي الحالي على تصريف الراشح من الري (الجدول 1) مما سيساعد على ازياد نسبة التبخر من المياه الجوفية ومن ثم إلى ازدياد التملح مع الزمن.

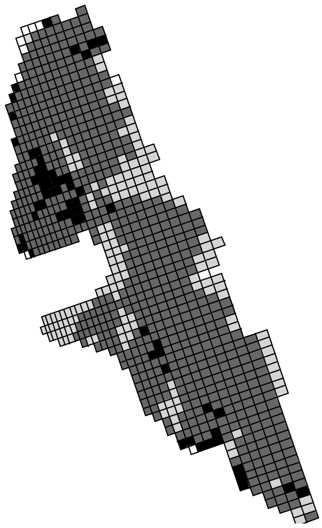
تطبيق على النموذج

استخدم النموذج لفحص سيناريوهين يتضمنان تأثير إضافة 15 و 25 بئر صرف شاقولي على مستوى المياه الجوفية. تم تحديد مواقع هذه الآبار في الأماكن ذات مستويات الماء المرتفعة (عمق المياه الجوفية أقل من 1.5م) وذات العوامل الهيدروليكية الملائمة (ناقلية مائية جيدة وسمك جيد لطبقة الحصى) وذلك بالاستفادة من نتائج النموذج ومن شرائح الناقلية المائية وسماكة الحامل المائي وحددت تصاريفها حسب سماكة الحامل المائي وناقليته في تلك المواقع. تم إدخال هذه الآبار في النموذج ومن ثم تشغيل النموذج لمدة عامين ورسمت النتائج وحددت الموازنة المائية. أظهرت النتائج أن عمق الماء الجوفي انخفض في هذه الأماكن وكان الانخفاض أوسع في السيناريو الثاني (25 بئراً) كما يبين الشكلان 12 و13.

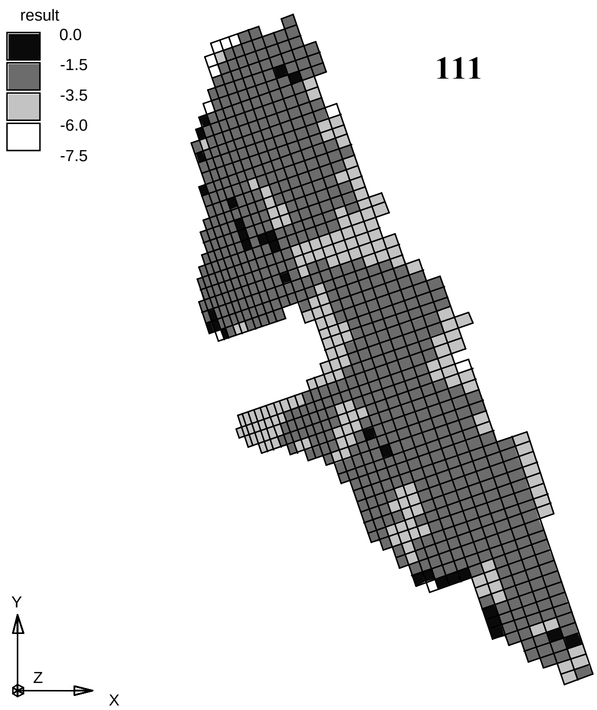
بينت الموازنة المائية الكلية لهذين السيناريوهين أن حجم التبخر خلال عام واحد في السيناريو الأول (15 بئر صرف) قد انخفض بنسـبة 20% (6.418 مليون متر مكعب مقارنة مع 7.952 مليون متر مكعب عند عدم وجود هذه الآبار) طبعاً هذا دليل واضح على انخفاض معدل التملح أيضاً. كذلك أصبح الضخ الكلي السنوي من الآبار مساوياً إلى 9.5 مليون متر مكعب بازدياد 4.5 مليون متر مكعب عن سنة المعايرة (ضخت من آبار الصرف الجديدة).

وبينت الموازنة المائية الكلية أن حجم التبخر خلال عام واحد في السيناريو الثاني (25 بئر صرف) قد انخفض بنسبة 26.3% ليصبح 5.858 مليون متر مكعب مؤدياً إلى تسارع أكبر في انخفاض معدل التملح. كذلك ازداد الضخ من الآبار ليصبح مساوياً إلى 12.3 مليون متر مكعب بازدياد 7.3 مليون متر مكعب عن سنة المعايرة (ضخت من آبار الصرف الجديدة).

يمثل هذا العمل تطبيقاً للنموذج ولا يمثل حلاً لمشكلة الصرف الحالية. إن هذه الدراسة هي الجزء الأول لدراسة أشمل تشمل خطة استثمار جديدة وشاملة للقطاع؛ لذلك عالج الجزء الثاني من الدراسة بشكل مفصل خطة الصرف حسب خطة الاستثمار الجديدة، وحدد الأجزاء الأكثر عرضة للتملح نتيجة هذه الخطة و التوزيع الأفضل لمواقع آبار الصرف لحفظ مستوى المياه الجوفية على عمق آمن.



الشكل (12) عمق الماء الجوفي بعد عامين من السيناريو الأول (15 بئراً).



الشكل (13) عمق الماء الجوفي بعد عامين من السيناريو الثاني (25 بئراً).

الخـاتمـة

اعتماداً على التحريات التي قامت بها الشركة العامة للدراسات المائية تم إعداد النموذج الرياضي لحركة المياه الجوفية في حوض الفرات الأدنى (القطاع السادس) ومعايرته وتشغيله.

إن القطاع يعاني حالياً من ارتفاع في مستوى المياه الجوفية في كثير من الأماكن. الصرف الطبيعي في القطاع سيئ بشكل عام وغير كافٍ والقطاع في الوقت الراهن يعاني من مشكلة صرف تؤدي إلى ارتفاع تدريجي في مستوى الماء الجوفي.

إن خطة الاستثمار الشاملة المستقبلية للقطاع والمحددة حسب خطة الدولة ستؤدي إلى زيادة كبيرة في كمية الراشح إلى المياه الجوفية (من 28.5 إلى 62.202 مليون متر مكعب). هذه الزيادة يجب أن تصرف بمعظمها بشكل اصطناعي (صرف شاقولي للحالة هنا) وهذا سيؤدي إلى الحاجة إلى حفر عدد كبير من الآبار لتفي بحاجة الصرف ولتؤمن مستوى آمناً للمياه الجوفية يمنع التبخر وتملح الأراضي. استخدم هذا النموذج في تحديد

التوزع الأفضل لهذه الآبار في المنطقة وتقدير القيم المثلى لتصاريفها لحفظ مستوى مياه الجوفية على عمق آمن وذلك حسب هذه الخطة الجديدة الشاملة لاستثمار الحوض وهذا سيكون موضوع ورقة قادمة.

إن إعداد النموذج أخذ بالحسبان مختلف الشروط الهيدروجيولوجية السائدة في المنطقة، ومن ثم هو تمثيل رياضي للواقع القائم للمعقد المائي، و قد بين النموذج مدى حساسية النظام المائي لازدياد كمية الراشح من الري والذي قد ينتج عن زيادة التكثيف الزراعي في المنطقة كما هو مخطط له.

ومن الجدير بالذكر بأن المنطقة تحتاج إلى تقييم مستمر ومراقبة دائمة للوصول إلى الصورة الأكثر تمثيلاً للواقع، وليصبح بذلك النموذج أداة فعالة لاستثمار تلك المنطقة بالشكل الأمثل. إن نتائج النموذج تمثل تقييماً ديناميكياً لموارد الحوض وأداة مهمة للتعامل مع الخطط الاستثمارية ضمن إطار الظروف الطبيعية القائمة.

REFERENCES المـراجـع

1- American Society of Testing and Material (ASTM) (1993). Standard Guide for Comparing Groundwater flow Model Simulation to Site-Specific Information; Designation: D 5490-93; USA.

2- Anderson, M. P. & Woessner, W. W. (1992). Applied Groundwater Modelling; *Academic Press*, San Diego.

3- Boonstra, J. & de Ridder, N. A. (1981). Numerical Modelling of Groundwater Basins; *International Institute for Land Reclamation and Improvement ILRI*, publication 29; The Netherlands.

4- Hulme, P. (2000). Introduction to Groundwater Flow Modelling; *Hydroinformatics and Management Systems*; Environment Agency, UK.

5- Konikow, L. F. & Reily, T. E. (1999). Groundwater Modeling, *The Handbook of Groundwater Engineering* (editor J. W. Delleur); CRC press LLC; USA.

6- McDonald, M. G. & Harbaugh, A. W. (1988). A Modular Three-Dimension Finite-Difference Groundwater Flow Model. *Techniques of Water-Res. Invests. Of the U.S. Geol. Survey*, USA.

7- Smith, G. D. (1985). Numerical Solution of Partial Difference Equations. Finite Difference Methods. Oxford University Press. Oxford.

8- جرسار. (1984). استصلاح وادي الفرات الأسفل، المؤسسة العامة لاستثمار حوض الفرات.