

## تقييم أداء النموذجين AquaCrop و CropWat في محاكاة تأثير الري الناقص في محصول القطن

فؤاد حسين<sup>(1)</sup> و عبدالله يعقوب<sup>(2)</sup> و مصدق جانات<sup>(3)</sup>

### الملخص

أجريت هذه الدراسة بهدف تقييم أداء النموذجين AquaCrop و CropWat في محاكاة تأثير الري الناقص في محصول القطن. عُوِير النموذجان باستعمال بيانات تجريبية حقلية لدراسة تأثير الري الناقص في محصول القطن لموسم نمو 2007، فيما قِيم أداء النموذجين بمقارنة نتائجهما لمؤشري الإنتاجية والاستهلاك المائي (ETc) بقيمهما المقيسة في موسمي 2008 و 2009. بيّنت العلاقة بين القيم المقيسة والقيم المتوقعة أن أداء AquaCrop كان أفضل بكثير من أداء CropWat في التنبؤ بتأثير الإجهاد المائي في الإنتاجية و ETc، إذ كانت قيمة الميل في معادلات الانحدار لـ AquaCrop أقرب إلى الواحد وكانت قيم القاطع صغيرة. كما كانت قيم دليل التوافق (d) بين القيم المقيسة والقيم المتوقعة لكلا النموذجين قريبة جداً من الواحد، باستثناء قيمته في CropWat في موسم 2009 بالنسبة إلى ETc. وقد تمكن كلا النموذجين من محاكاة المنحى العام لتغيرات المحتوى المائي للتربة في معاملات السري المختلفة بصورة جيدة. تشجع نتائج هذه الدراسة على التحول من استعمال CropWat إلى AquaCrop لإدارة الري وتخطيطه فهو نموذج تطبيقي يحافظ على التوازن بين دقة النتائج والبساطة.

الكلمات المفتاحية: الإجهاد المائي، الانحدار الخطي، الأداء، النمذجة.

(1)، (2) قسم الهندسة الريفية، كلية الزراعة، ص.ب. 30621، جامعة دمشق، سورية.  
(3) دائرة الري والمقننات المائية، قسم الزراعة، هيئة الطاقة الذرية السورية، ص.ب. 6091. سورية.

## Assessment of AquaCrop and CropWat Models in the Simulation of Deficit Irrigation Impact on Cotton Crop

F. Hussein<sup>(1)</sup>; A. Yakoub<sup>(2)</sup> and M. Janat<sup>(3)</sup>

### ABSTRACT

This study was carried out to compare the performance of the FAO AquaCrop and CropWat models in simulating the effects of deficit irrigation on cotton crop. The models were calibrated using data from the 2007 growing season of a field study conducted to assess deficit irrigation effects on cotton, whereas the models were validated by comparing their outputs for yield and water use (ETc) with the measured values of the two variables in the 2008 and 2009. The relationship between measured and predicted values of yield and ETc revealed that the AquaCrop was better than CropWat in predicting water stress impact on yield and ETc. The linear regression equation for AquaCrop had a small intercept and its slope was very close to unity. The index of agreement (d) was close to one for both models, except its value for ETc in the 2009 year. Both models could reproduce the general trend of the changes in soil water content in the different irrigation levels. Accordingly, the use of AquaCrop instead of CropWat should be encouraged for management and planning of irrigation, since it is a practitioner type model keeps a good balance between output accuracy and simplicity.

**Key words:** Linear regression; Modeling; Performance; Water stress.

---

<sup>(1),(2)</sup> Dept. Rural Engineering, Faculty of Agriculture, P O Box 30621, Damascus University, Syria.

<sup>(3)</sup> Department of Agriculture, Atomic Energy Commission, Damascus, Syria P.O. Box 6091. Fax: 00963-11-6112289. E-mail: [scientific@acc.org.sy](mailto:scientific@acc.org.sy)

## المقدمة

يكتسب التنبؤ باستجابة الإنتاج لمستوى الري أهمية متزايدة لدوره في تحديد معدل الري الأنسب في ظروف محدودة توفر الماء، وبغية تحقيق الاستدامة في الإنتاج والريعية العالية (Evet and Tolk 2009). عبرت منظمة الأغذية والزراعة (FAO) عن هذه الأهمية عبر طرحها لنموذج محاكاة الإنتاجية المائية AquaCrop، مع مراعاة البساطة وعدم التعقيد (Farahani *et al.*, 2009). طُوِّرَ النموذج AquaCrop ليحل محل الإجراءات الواردة في ورقة الـ FAO رقم 33 (FAO, 1979) المستعملة في تقدير الإنتاجية المائية وعلاقتها بكمية المياه المضافة وأساليب الإدارة الزراعية. تتألف المدخلات من البيانات المناخية، وخصائص المحصول، وخصائص التربة والإدارة، أي باختصار مفردات البيئة المحيطة بالمحصول. يقوم النموذج على مجموعة من الخوارزميات والإجراءات الحسابية لنمذجة تسرب الماء في التربة، وصرف الماء خارج منطقة انتشار الجذور، ومعدل التبخر ومعدل النتح، وتطور المجموعتين الخضري والجذري، وإنتاج الكتلة الحية والإنتاج الثمري. توصف آليات استجابة المحصول للإجهاد المائي في AquaCrop عبر ثلاثة حدود حرجة للمحتوى المائي للتربة تقابل تراجع النمو الخضري، وانغلاق المسامات وتسارع تدهور النبات وتوقف نموه (Steduto *et al.*, 2009). هناك خيار في النموذج يسمح بالتقدم في تنفيذ المحاكاة يومياً، ومن ثمّ يمكن الوقوف على التغيرات اليومية لعدة مؤشرات (المحتوى المائي للتربة، وتطور المحصول، والتغيرات في معدلي التبخر والنتح، وإنتاج الكتلة الحيوية وتطور الإنتاج). كما يمكن إيقاف المحاكاة في أية لحظة في موسم النمو، ومن ثمّ تحديد تأثير التغيرات في مدخلات الماء (مستويات الري) في المحصول، مما يجعل النموذج ذا فائدة خاصة في تطوير استراتيجيات الري الناقص وتحليل البدائل الممكنة (Raes *et al.*, 2009; Geerts *et al.*, 2009; Garcia.Vila *et al.*, 2009). ويدعم ذلك أيضاً دقة نتائج هذا النموذج مقارنةً بالنماذج الأكثر تعقيداً وتطوراً مثل CropSyst و WOFOST (Todorvic *et al.*, 2009).

أما النموذج القديم CropWat فهو نموذج لإدارة عملية الري، طُوِّرَته إدارة تطوير الأراضي والمياه في منظمة الأغذية والزراعة (FAO, 1992). يمكن باستعمال هذا النموذج وباستعمال خوارزمية الميزان المائي اليومي الموجودة فيه نمذجة البدائل الممكنة لعملية الري وتقدير الانخفاض المتوقع في الإنتاج. تقوم الدوال الأساسية في النموذج CropWat بحساب التبخر نتح المرجعي Reference Evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) وفقاً لمعادلة بنمان- مونتيث (FAO, 1998)، والاحتياجات المائية للمحصول ومقننات الري، وذلك لتطوير جداول للري في ظروف إدارة مختلفة. كما يُحاكى تأثير الإجهاد المائي في

المحصول باستعمال عامل استجابة الإنتاج (ky) Yield response factor فقط (FAO, 1979).

يتمتع محصول القطن في سورية بأهمية اقتصادية واجتماعية، ولضمان استدامة العملية الإنتاجية لهذا المحصول لابد من دراسة البدائل جميعها التي تسهم في تخفيض تكلفة الإنتاج. تؤدي النماذج دوراً مفيداً في تطوير توصيات وإيجاد بدائل عملية لإدارة ري المحاصيل من شأنها تحقيق استقرار العملية الإنتاجية في ظروف شح الموارد المائية.

#### أهداف البحث

نفذت هذه الدراسة بهدف معايرة النموذجين AquaCrop و CropWat وتقييمهما، ومقارنة أدائهما في محاكاة تأثير الري الناقص في محصول القطن.

#### مواد البحث وطرقه

##### معايرة النموذجين وتقييمهما :Models calibration and validation

عُوِّير النموذجان باستعمال البيانات المناخية والبيانات اللازمة من التجارب الحقلية لموسم 2007، أما التقييم فكان بمقارنة النتائج المقيسة لمؤشري الإنتاج والاستهلاك المائي في موسمي 2008 و 2009 بالقيم المتوقعة باستعمال النموذجين. يتطلب الإصدار (CropWat for Windows 4.3) للنموذج CropWat قيم المتوسطات الشهرية فقط لبعض المؤشرات المناخية. في حين يحتاج AquaCrop (version 3.1, 2010) إلى قيم المتوسطات اليومية لعدد من المؤشرات المناخية. جمعت البيانات المناخية من محطة مناخية قريبة من الحقل، وهي درجات الحرارة العظمى والصغرى، والرطوبة النسبية، وسرعة الرياح، والسطوع الشمسي والهطولات المطرية.

##### التجارب الحقلية وجمع البيانات اللازمة:

أجريت التجارب الحقلية في ثلاثة مواسم متتالية (2007 - 2009) في محطة دير الحجر التابعة لهيئة الطاقة الذرية، وهي تقع على مسافة 35 كم إلى الجنوب الشرقي من مدينة دمشق على خط عرض  $33^{\circ} 21'$  وخط طول  $36^{\circ} 28'$  وعلى ارتفاع 617 م عن سطح البحر. وهي منطقة لا يتجاوز المعدل السنوي للأمطار فيها 121 مم. تتصف تربة الموقع بأنها لومية طينية رملية، تقع الرطوبة عند السعة الحقلية بين 30.7 و 36.1 والرطوبة عند نقطة الذبول بين 11.5 و 17.1% حجماً، أما الكثافة الظاهرية فتبلغ 1.11 إلى 1.21 غ/سم<sup>3</sup> في الطبقة 0-60 سم.

زُرِع القطن (حلب 1/33) في الأسبوع الثاني أو الثالث من شهر نيسان بعد تحضير الأرض للزراعة وتركيب شبكة الري وملحقاتها (حافنة السماد) في أرض التجربة. زرعت بذور القطن يدوياً على خطوط بمسافة قدرها 75 سم بين الخطوط و 30 سم بين

النباتات، ونُفذت عمليات الخدمة اللازمة. قُطف المحصول يدوياً على دفعتين وقدر الإنتاج الكلي للقطن على أساس مجموع القطفتين. حسب الاستهلاك المائي Crop evapotranspiration (ETc) الموسمي لمحصول القطن باستعمال معادلة الموازنة المائية:

$$ETc = I + P \pm DSW - Dp - Ro$$

إذ I كمية ماء الري المضافة (مم)، و P كمية الأمطار خلال موسم النمو (مم)، و DSW الفرق بين المحتوى المائي النهائي والمحتوى المائي الابتدائي في التربة (مم)، و Dp الرش العميق (مم)، و Ro الجريان السطحي (مم). ونظراً إلى الفعالية العالية لنظام الري (92-95%) عُدَّ الجريان السطحي معدوماً، كما بيّنت قياسات المحتوى المائي أن الرش العميق كان مهماً. وحسبت قيمة Kc لكل مرحلة من مراحل النمو بقسمة ETc على ETo المحسوب بمعادلة بنمان - مونتنيث. وحددت قيمة عامل استجابة الإنتاجية (ky) باستعمال معادلة (FAO, 1979):

$$1 - Ya/Ym = ky(1 - ETa/ETm)$$

إذ Ym, Ya الإنتاجية الكلية الفعلية والأعظمية على الترتيب (كغ هـ<sup>-1</sup>)، ETa, ETm الاستهلاك المائي الموسمي الفعلي والأعظمي لمحصول القطن على الترتيب (م<sup>3</sup>).

#### تحليل البيانات:

اعتمدت قيمة مؤشري الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE) Root mean squared error ودليل التوافق (d) Index of agreement لمقارنة نتائج النمذجة بالنتائج المقيسة والوقوف على جودة أداء النموذج.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}$$

إذ Si و Oi هما القيمة المتوقعة والقيمة المقيسة للمؤشر المدروس، و n عدد القياسات. ويتحسن أداء النموذج كلما اقتربت قيمة RMSE من الصفر.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2} \quad (\text{Willmott 1982})$$

إذ  $\bar{O}$  متوسط القيم المتوقعة، ويتحسن أداء النموذج كلما اقتربت قيمة d من الواحد.

## النتائج و المناقشة

### معايرة النموذجين:

يبين الجدول (1) قيم المؤشرات المعتمدة في معايرة النموذج CropWat. أُجريت المعايرة وفقاً للطريقة المتبعة في معايرة هذا النموذج (Smith *et al.*, 2000). كانت قيم KC المحسوبة مناسبة وأعطت نتائج جيدة، باستثناء القيمة (0.42) في مرحلة الإنبات والنمو حيث كانت مرتفعة قليلاً وأدت إلى انخفاض بسيط في الإنتاج؛ لذلك عدلت تدريجياً إلى 0.35. أمّا قيمة ky المحسوبة لكامل الموسم (1.02 كمتوسط لموسم 2007) فكانت منخفضة و عدلت تدريجياً إلى 1.20 التي كانت مناسبة لمحاكاة تأثير الري الناقص. اعتمدت القيم التلقائية لنسبة الاستنزاف كما هي في قاعدة بيانات النموذج. يبلغ العمق الفعال للجذور 0.90-1.20 م (FAO, 1979) لذلك اعتمد العمق 0.90 م، رغم أن قيمته لم تزد على 0.60 م من ملاحظة نمط استنزاف المحتوى المائي للتربة.

### الجدول (1) قيم المؤشرات المستعملة في معايرة النموذج CropWat.

مرحلة النمو (الزراعة في 23 نيسان)					المؤشر
النضج الكلي	الزهر	قمة الإزهار وتشكل الجوزات	النمو الخضري	الإنبات والنمو	
170	30	60	50	30	طول مدة النمو (يوم)
	0.90	0.90	0.60	0.30	عمق الجذور (م)
	0.90	0.60	0.60	0.60	نسبة الاستنزاف P
	0.60	1.1	0.80	0.35	معامل المحصول Kc
1.20	0.30	0.60	0.35	0.35	عامل استجابة الإنتاجية ky

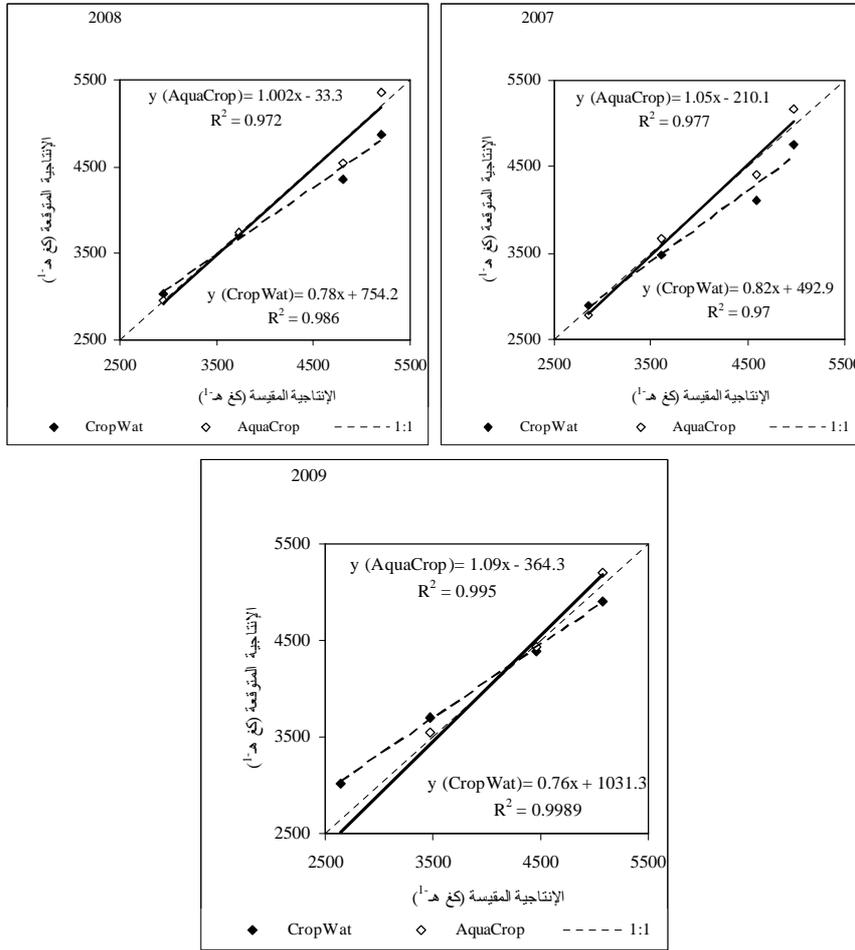
يبين الجدول (2) المؤشرات الأساسية في معايرة النموذج AquaCrop، وقد وجد في هذه الدراسة أنه من الضروري إدخال معاملة من معاملات الري الناقص في المعايرة. إذ لا بدّ من معايرة النموذج بالتقليل بين معاملة الري الكامل وإحدى معاملات الري الناقص وتغيير قيم المؤشرات لضمان تحقيق الدقة المتوخاة في المحاكاة (Hsiao *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009). وجرى التأكيد أن القيم المقترحة لمؤشرات الاستجابة للإجهاد المائي من قبل (Farahani *et al.*, 2009) كانت مناسبة وأفضت إلى محاكاة جيدة. إن قيمة الإنتاجية المائية Normalized water productivity (NWP) ثابتة من أجل نوع نباتي محدد (Steduto *et al.*, 2009) وتقع قيمتها بين 15-20 غ/م<sup>2</sup> في النباتات التي تثبت الكربون وفق المسار C3 مثل القطن (Raes *et al.*, 2010)، وقد غيرت قيمة هذا المؤشر إلى أن حصلنا على نتائج مرضية في المعاملات المختلفة في موسم 2007 من أجل  $NWP=15.8$  غ/م<sup>2</sup>. أفضت المحاولات المتكررة لنمذجة الإنتاج بصورة جيدة إلى

التوصل إلى قيمة 0.30 لدليل الحصاد، وقد أعطي القيمة ذاتها في دراسة ( Farahani et al., 2009 ) في حين كانت قيمته 0.35 في دراسة ( Garcia.Vila et al., 2009 ).

#### الجدول (2) قيم المؤشرات المستعملة في معايرة النموذج AquaCrop.

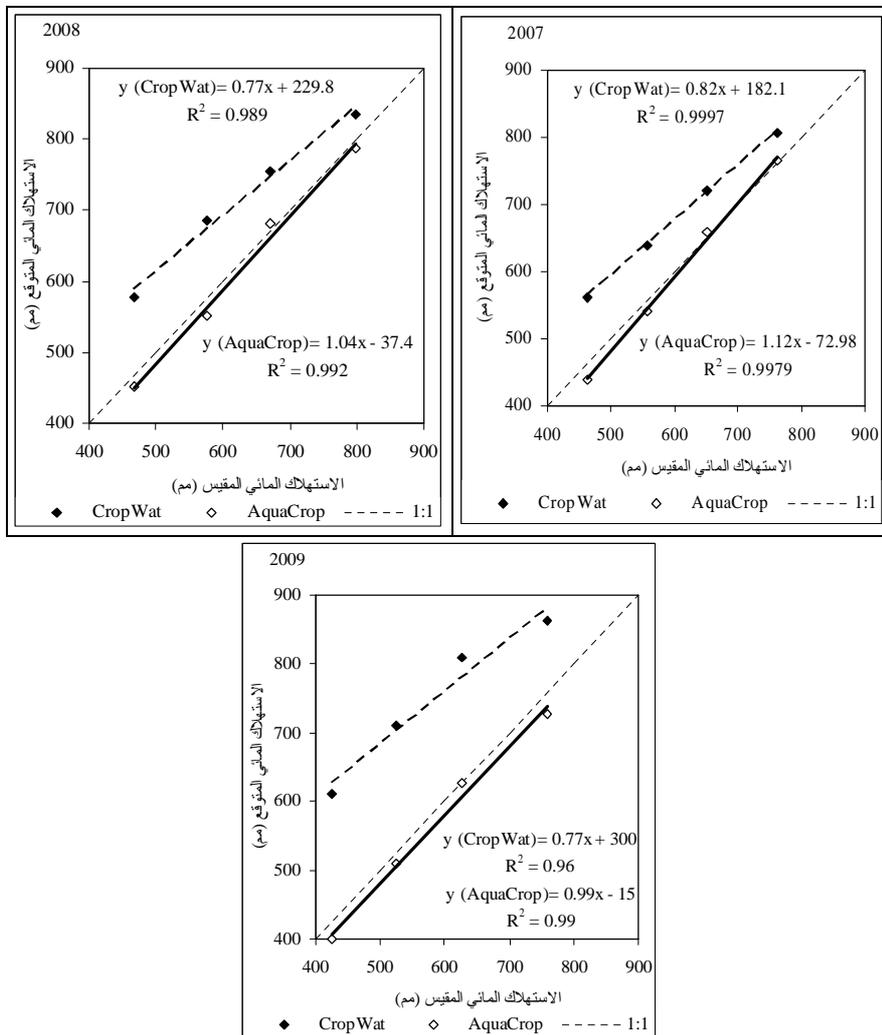
المؤشر	قيمه
<b>مؤشرات النمو:</b>	
الزيادة اليومية في نسبة التغطية النباتية (%)	7.2
الانخفاض اليومي في نسبة التغطية النباتية (%)	3
<b>مؤشرات الاستجابة للإجهاد المائي:</b>	
عامل استنزاف ماء التربة المحدد لنمو الأوراق، الحد الأعلى	0.25
عامل استنزاف ماء التربة المحدد لنمو الأوراق، الحد الأدنى	0.70
معامل الإجهاد المائي المحدد لنمو الأوراق، عامل الشكل	4.0
عامل استنزاف ماء التربة للتحكم المسامي	0.55
معامل الإجهاد المائي للتحكم المسامي، عامل الشكل	0
عامل استنزاف ماء التربة المترافق بتوقف النمو الخضري	0.75
معامل الإجهاد المائي المترافق بتوقف النمو الخضري، عامل الشكل	1.0
<b>مؤشرات إنتاج:</b>	
الإنتاجية المائية (غ/م <sup>2</sup> )	15.8
انخفاض الإنتاجية المائية في أثناء تشكل الإنتاج (%)	0
دليل الجني (%)	30

يبين الجدول (3) القيم المقيسة والقيم المتوقعة باستعمال النموذجين للإنتاجية والاستهلاك المائي في مواسم النمو الثلاثة. بالنسبة إلى الموسم 2007 (موسم المعايرة) كانت نتائج CropWat جيدة بالنسبة إلى الإنتاجية، مما يدل على توافق جيد بين القيم المقيسة والقيم المتوقعة. كذلك الأمر بالنسبة إلى النموذج AquaCrop كانت محاكاة الإنتاجية جيدة حيث كانت قيمة  $RMSE = 142$  كغ هـ<sup>-1</sup> وقيمة  $d = 0.990$  (الجدول 4). إلا أن الشكل (1) يوضح أن أداء AquaCrop كان أفضل من أداء CropWat حيث تمتاز علاقة الانحدار الخطي في AquaCrop بميل قريب جداً من الواحد. أمّا بالنسبة إلى الاستهلاك المائي فقد كانت قيم المؤشرات الاحصائية بالنسبة إلى النموذج AquaCrop جيدة نسبياً ( $RMSE = 77$  مم،  $d = 0.970$ ) إلا أن الشكل (2) يوضح أن النموذج يعطي دائماً قيمة لـ ETC أعلى من قيمتها الفعلية. في حين كانت نتائج AquaCrop على درجة عالية من الدقة ( $RMSE = 15$  مم،  $d = 0.996$ ) في محاكاة ETC، ويؤكد ذلك أيضاً العلاقة الخطية القوية بين قيم ETC المقيسة وقيم AquaCrop المتوقعة له حيث الميل قريب من الواحد وقيمة القاطع صغيرة الشكل (2).

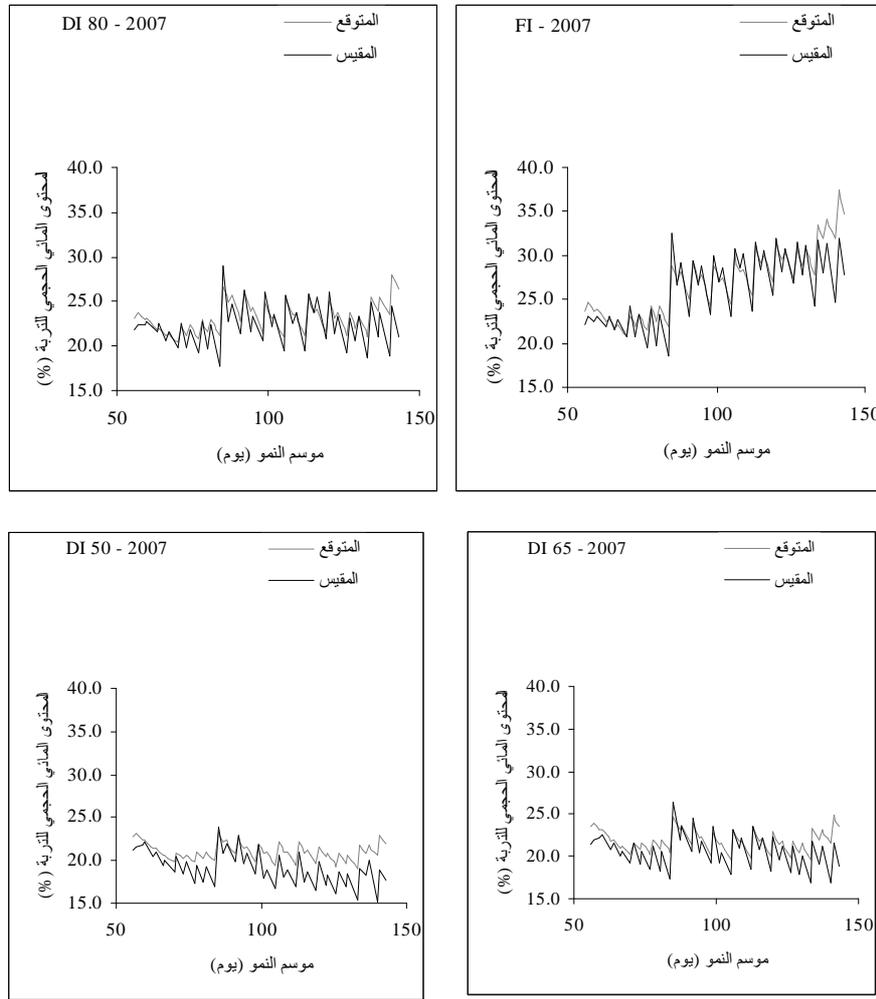


الشكل (1) العلاقة بين القيم المتوقعة باستعمال النموذجين والقيم المقاسة لإنتاجية محصول القطن في معاملات الري المختلفة.

وفيما يتعلق بمحاكاة النموذجين لتغيرات المحتوى المائي في التربة Soil water content (SWC) فقد تمكن كلا النموذجين من إعادة إنتاج المنحى العام لتغيرات المحتوى المائي في معاملات الري المختلفة في مواسم النمو الثلاثة، وعلى سبيل المثال يبين الشكلان (3) و(4) تغيرات SWC في المعاملات المختلفة في موسم 2007. تتفق هذه النتيجة مع ما أشار إليه (Farahani *et al.*, 2009) بالنسبة إلى النموذج AquaCrop.



الشكل (2) العلاقة بين القيم المتوقعة باستعمال النموذجين والقيم المقاسة للاستهلاك المائي لمحصول القطن في معاملات الري المختلفة.



الشكل (3) تغيرات المحتوى المائي المقيس والمتوقع باستعمال النموذج AquaCrop للعمق 60-0 سم في موسم 2007.

الجدول (3) القيم المقيسة للإنتاج الكلي والاستهلاك المائي لمحصول القطن في معاملات الري المختلفة مقابل القيم المتوقعة باستعمال النموذجين.

الاستهلاك المائي مم			الإنتاجية كغ هـ <sup>1</sup>			المعاملة	الموسم
CropWat	AquaCrop	المقيس	CropWat	AquaCrop	المقيسة		
807	766	762	4757	5171	4971	FI	2007
721	659	652	4106	4407	4589	DI80	
639	541	556	3480	3668	3615	DI65	
562	438	463	2893	2790	2858	DI50	
835	788	797	4875	5366	5208	FI	2008
754	681	671	4359	4548	4812	DI80	
685	551	576	3708	3742	3733	DI65	
578	451	466	3031	2948	2959	DI50	
863	727	758	4906	5203	5079	FI	2009
809	627	628	4398	4438	4459	DI80	
710	510	526	3708	3540	3472	DI65	
611	399	425	3022	2462	2635	DI50	

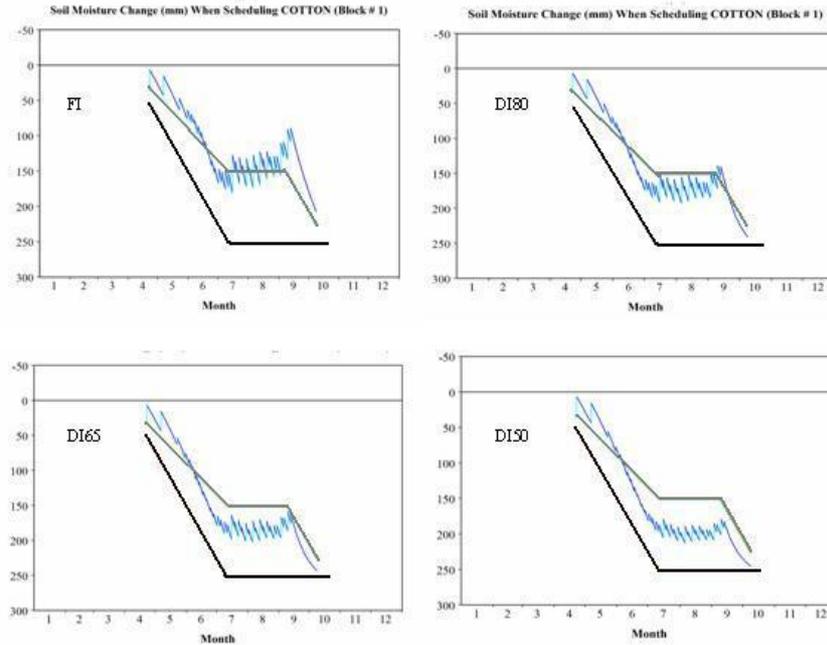
#### تقييم النموذجين:

سلكت نتائج المحاكاة لكلا النموذجين في موسمي 2008 و 2009 منحنيًا مشابهًا لسلوكها في موسم 2007، إذ كانت نتائج CropWat جيدة بالنسبة إلى الإنتاجية، وكانت قيمة  $RMSE = 284$  و  $244$  كغ/هـ وقيمة  $d = 0.992$  و  $0.994$  لموسمي 2008 و 2009 على التوالي (الجدول 4)، مما يدل على توافق جيد نسبيًا بين القيم المقيسة والقيم المتوقعة للإنتاجية بـ CropWat. في حين كان أداء النموذج AquaCrop أفضل من حيث قيم المؤشرات الإحصائية ( $RMSE = 154$  و  $112$  كغ/هـ لموسمي 2008 و 2009 على التوالي،  $d = 0.990$  في كلا الموسمين) ومن حيث قوة علاقة الانحدار الخطي بين القيم المقيسة للإنتاجية والقيم المتوقعة لها الشكل (1). أما بالنسبة إلى محاكاة CropWat للاستهلاك المائي فقد كانت قيم المؤشرات الإحصائية جيدة نسبيًا في موسم 2008 ( $RMSE = 90$  مم،  $d = 0.964$ )، إلا أنها تراجعت كثيرًا في موسم 2009. كما يوضح الشكل (2) أن النموذج يعطي دائمًا قيمة لـ ETc أعلى من قيمتها الفعلية، ويلاحظ ذلك في موسم 2009 واضحًا وجليًا. في حين كان أداء AquaCrop جيدًا وكانت نتائجه دقيقة ( $RMSE = 16$  و  $22$  مم،  $d = 0.996$  و  $0.992$ )، ويدعم ذلك أيضًا العلاقة الخطية القوية بين قيم ETc المقيسة وقيم AquaCrop له الشكل (2).

الجدول (4) قيم RMSE و d للنموذجين بالنسبة إلى مؤشري الإنتاجية والاستهلاك المائي.

الاستهلاك المائي مم		الإنتاجية كغ هـ <sup>1</sup>		الموسم	النموذج
d	RMSE	d <sup>2</sup>	RMSE <sup>1</sup>		
0.996	15	0.990	142	2007	AquaCrop
0.996	16	0.990	154	2008	
0.992	22	0.997	112	2009	
0.970	77	0.992	273	2007	CropWat
0.964	90	0.992	284	2008	
0.919	168	0.994	244	2009	

<sup>1</sup> الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ <sup>2</sup> دليل التوافق



الشكل (4) تغيرات المحتوى المائي المتوقع باستعمال النموذج CropWat لمعاملات الري المختلفة في موسم 2007.

\_\_\_ ماء التربة المتاح بسهولة (RAW) Readily available water  
 \_\_\_ الماء الكلي المتاح (TAW) Total available water.

وعليه يمكن أن يُوصى بناءً على نتائج هذا البحث بالتحول عن CropWat إلى AquaCrop، حيث يمتاز النموذج الجديد بدقة نتائجه مع المحافظة على التوازن الصعب بين الدقة والبساطة التي تردُّ إلى محدودية البيانات الواجب جمعها والمؤشرات التي تحتاج قيمها إلى الضبط.

## المراجع REFERENCES

- Evett, S. R. and J. A. Tolck. (2009). Introduction: Can water use efficiency be modeled well enough to impact crop management? *Agron J* 101: 423-425.
- FAO. (1979). Yield response to water by J. Doorenbos and A. Kassam. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome.
- FAO. (1992). CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management by Smith M. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 26. Rome.
- FAO. (1998). Crop evapotranspiration by Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome.
- Farahani, H. J., G. Izzi, T. Y. Oweis. (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agron J* 101: 469–476.
- García.Vila, M., E. Fereres, L. Mateos, F. Orgaz, P. Steduto. (2009). Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agron J* 101: 477–487.
- Geerts, S., D. Raes, M. Garcia, R. Miranda, J. A. Cusicanqui, C. Taboada, J. Mendoza, R. Huanca, A. Mamani, O. Condori, J. Mamani, B. Morales, V. Osco, P. Steduto. (2009). Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. *Agron J* 101: 499–508.
- Heng, L. K., T. C. Hsiao, S. Evett, T. Howell, P. Steduto. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agron J* 101: 488–498.
- Hsiao, T. C., L. K. Heng, P. Steduto, B. Rojas.Lara, D. Raes, E. Fereres. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron J* 101: 448–459.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agron J* 101: 438–447.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres, G. Izzi, L. K. Heng. (2010). AquaCrop (version 3.1) Reference Manual. FAO, Rome.
- Smith, M., D. Kivumbi, L. K. Heng. (2000). Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies. In: Kirda C., Moutonnet P., Hera C., Nielsen D. R., eds. Crop yield response to deficit irrigation. P. 17-27. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes, E. Fereres. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron J* 101: 426–437.
- Todorovic, M., R. Albrizio, L. Zivotic, M. Abi Saab, C. Stöckle, P. Steduto. (2009). Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agron J* 101: 509–521.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bull Am Meteorol Soc* 63: 1309-1313.

Received	2010/11/22	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2011/03/31	قبول البحث للنشر