

الگوبندی عملکرد محصولات مختلف در شرایط شوری آب آبیاری با استفاده از مدل SWAP

وحید رضا وردی نژاد^{۱*}، تیمور سهرابی^۲، محمد فیضی^۳، نادر حیدری^۴ و شهاب عراقی نژاد^۲

تاریخ دریافت: 88/6/18 تاریخ پذیرش: 89/3/18

- 1- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه
- 2- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران
- 3- پژوهنده، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، اصفهان
- 4- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج

* مسئول مکاتبه Email: verdinejad@gmail.com

چکیده

در این تحقیق تأثیر کمیت و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری بر عملکرد محصولات، انتقال آب و املاح در نیمرخ خاک، با استفاده از مدل SWAP شبیه‌سازی شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای بررسی مدیریت‌های مختلف آبیاری با آب شور بر عملکرد، اجزای عملکرد و شوری خاک طی چند سال در ایستگاه تحقیقات زهکشی رودشت اصفهان بر روی شش محصول عمده منطقه شامل گندم، جو، پنبه، آفتابگردان، پیاز و چغندر قند انجام گردید. واسنجی مدل SWAP به روش مدلسازی معکوس و با لینک آن به مدل PEST صورت گرفت. واسنجی مدل شامل پارامترهای هیدرولیکی لایه‌های خاک، پارامترهای انتقال املاح خاک و پارامترهای گیاهی بوده و برای سنجش اعتبار مدلسازی، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا، حداکثر خطا، کارایی مدلسازی و ضریب باقیمانده استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل SWAP با واسنجی دقیق و کامل، در تخمین انتقال آب و املاح خاک و نیز عملکرد محصول در شرایط شوری خاک از دقت خوبی برخوردار است. برای تعیین توابع تولید-آب-شوری، مدل SWAP به مدل SENSAN لینک گردید و با تغییر خودکار عمق و شوری آب آبیاری، مدل اجرا گردید. برای تعیین تابع تولید بهینه هر محصول، شش مدل خطی، کاب داگلاس، نمایی، ترانسلوگ، درجه دوم و لئونتیف تعمیم یافته فرض و پارامترهای این مدل‌ها به روش حداقل مربعات معمولی توسط نرم افزار شازم، استخراج گردید. بر اساس شاخص‌های آماری، تابع بهینه تولید-آب-شوری محصولات گندم، جو، چغندر قند، پیاز و پنبه لئونتیف تعمیم یافته و آفتابگردان درجه دوم بدست آمد.

واژه های کلیدی: تابع تولید، شوری، عملکرد، مدلسازی معکوس و مدل SWAP

Patterning Different Crops Yield with Saline Water Irrigation Condition Using SWAP Model

VR Verdinejad^{1*}, T Sohrabi², M Feizi³, N Heydari⁴ and SH Araghinejad²

Received: 09 September 2009 Accepted: 08 June 2010

1-Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Univ. of Urmia, Iran

2-Prof. and Assoc. Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation Eng., University of Tehran, Iran

3-Researcher, Esfahan Agricultural and Natural Resources Research Center, Iran

4-Assoc. Prof., Iranian Agricultural Engineering Research Institute, Iran

*Corresponding author: Email: verdinejad@gmail.com

Abstract

In this study, the effects of different quality and quantity levels of irrigation water on crop yield, soil water and solute transport were simulated using SWAP model. Field experiments were conducted for the six main crops of the region such as wheat, barley, onion, sunflower and sugar beet at Rudasht drainage and soil reclamation research station. The effects of water salinity under different irrigation managements on crop yield, crop yield components and soil salinity were investigated. The SWAP model was calibrated by inverse modeling and was linked with the PEST model. The model calibration consisted of hydraulic parameters of soil layers as well as solute transport and crop parameters. In order to evaluate modeling validity, statistical indices such as coefficient of determination, root mean square error, modeling efficiency and coefficient of residual mass were calculated. Result of the model analysis showed that with precise calibration, SWAP model is able to predict soil water and solute transport and crop yield with high degree of accuracy. To determine crop-water-salinity production functions, SWAP model was linked to the SENSAN model, then by changing irrigation water depth and salinity values, the model was executed. In order to determine optimal production function for each crop, six functions including linear, Cobb Douglas, transcendental, translog, quadratic and the Leontief were examined and the pertinent parameters were determined with ordinary least square method using SHAZAM model. Based on statistical indices the optimal production function for wheat, barley, sugar beet, onion and cotton were adjusted Leontief and for sunflower was quadratic.

Keywords: Crop yield, Inverse modeling, Production function, Salinity, SWAP model

مقدمه

به ترتیب 1/18، 3/38، 0/33 و 1/72 کیلوگرم بر مترمکعب برای محصولات فوق بدست آمد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تبخیر مستقیم از خاک موجب کاهش 11 تا 27 درصدی بهره‌وری تبخیر و تعرق در مقایسه با بهره‌وری تعرق در محصولات فوق‌الذکر می‌گردد. سینگ (2004) SWAP را برای منطقه‌ای نیمه خشک در شمال غرب هند، برای مدیریت آبیاری با آب شور در کشت متناوب گندم و پنبه بکار گرفت و نتیجه گرفت که امکان استفاده متناوب از آب شور و آب کانال با شوری به ترتیب 14 و 2 دسی‌زیمنس بر متر وجود دارد. کیانی (1386) با استفاده از SWAP انتقال آب، املاح و عملکرد نسبی گندم را برای دو سال شبیه‌سازی کرد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی رطوبت خاک، شوری عصاره اشباع و عملکرد، همبستگی بالاتر از 0/80 را نشان داد. در سال دوم به دلیل بارندگی فراوان و بالا آمدن سطح ایستابی، نتایج شبیه‌سازی رطوبت خاک رضایت بخش نبود. هدف از این تحقیق واسنجی SWAP برای محصولات منطقه، تخمین عملکرد محصول تحت کمیت و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری، بررسی انتقال آب و املاح در نیمرخ خاک توسط مدل SWAP و تعیین توابع تولید-آب-شوری محصولات برای برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

ایستگاه تحقیقات زهکشی رودشت اصفهان در طول و عرض جغرافیایی 52 درجه شرقی، 32/5 درجه شمالی، ارتفاع 1500 متر از سطح دریا و از نظر اقلیم، خشک، با متوسط بارش سالانه 120 میلیمتر می‌باشد. به منظور تعیین اثر مدیریت‌های مختلف شوری و مقدار آبیاری بر عملکرد محصول، رطوبت و شوری خاک، آزمایش‌های مزرعه‌ای در ایستگاه تحقیقات زهکشی رودشت در قالب طرح‌های تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی اصفهان انجام گرفت. این آزمایش‌ها بر روی محصولات گندم، جو، پنبه، چغندر قند، پیاز و آفتابگردان

شوری آب و خاک یکی از مسائل مهم کشاورزی فاریاب در جهان است. آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین و تحلیل مدیریت‌های مختلف آبیاری با آب شور مفید بوده اما محدودیت‌های قابل توجهی نیز دارند. از جمله محدود شدن اعتبار آزمایش‌ها به شرایط فیزیکی، کوتاه بودن زمان آزمایش برای تعیین اثر برخی از عوامل از جمله شوری و محدودیت تعداد سناریوهایی که توسط آزمایش بررسی می‌شوند. (روسو و باکر 1986). از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به عنوان طرح توسعه یافته‌ای از آزمایش‌های صحرایی برای غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده کرد. دقت مدل‌های شبیه‌سازی به دقت داده‌های ورودی بستگی داشته و در صورت واسنجی صحیح، بدون محدودیت زمانی و مکانی موجود در آزمایش و نیز صرف زمان و هزینه، می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری به کار گیرند (مصطفی زاده و همکاران 2009). یکی از مدل‌های تخمین عملکرد محصول، SWAP می‌باشد که یک مدل جامع برای بررسی انتقال آب، املاح و گرما در محیط اشباع و غیر اشباع خاک بوده و شامل زیر مدل‌هایی برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال املاح و حرارت در خاک، تبخیر از خاک و تعرق گیاه، مدیریت آبیاری، رشد و عملکرد محصول می‌باشد (کروس و ون دم 2008). دروگرز و همکاران (2000) در بررسی اثر تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری بر شوری خاک و عملکرد پنبه در منطقه رودشت اصفهان از SWAP استفاده و بیان داشتند که این مدل در تخمین عملکرد پنبه و شوری نیمرخ خاک، دقیق، سریع و قابل انتقال به شرایط مشابه دیگر در منطقه می‌باشد. وظیفه دوست و همکاران (2008) به منظور افزایش بهره‌وری آب محصولات گندم، آفتابگردان، چغندر قند و ذرت علوفه‌ای، تحقیقی را به کمک SWAP در شرایط محدودیت آب در منطقه برخوار اصفهان انجام و مدل را واسنجی نمودند. بر اساس نتایج، مقدار بهره‌وری تعرق

کلیماتولوژی رودشت، بصورت روزانه جمع‌آوری گردید. پارامترهای مربوط به خاک برای پنبه، جو و آفتابگردان از سه عمق 0-20، 20-40، 40-60 و برای سایر محصولات، از سه عمق 0-30، 30-60 و 60-90 سانتیمتری نمونه‌برداری شده است.

مدل شبیه‌سازی SWAP

در مدل SWAP حرکت آب در پروفیل خاک براساس معادله ریچاردز و حل آن به روش عددی تفاضل‌های محدود و با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی معین صورت می‌گیرد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C_w(h) \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(z) \quad [1]$$

که در آن θ رطوبت خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، C_w ظرفیت ویژه آب خاک (cm^{-1})، h بار فشار آب خاک (cm)، K هدایت هیدرولیکی (cm d^{-1})، S حجم آب جذب شده توسط ریشه در واحد حجم خاک در واحد زمان ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{S}^{-1}$) و z عمق خاک (cm) می‌باشد.

جدول 2- پارامترهای اندازه‌گیری یا جمع‌آوری شده برای هر کدام از محصولات زراعی.

پارامتر	روش اندازه‌گیری	تعداد دفعات
بافت خاک	روش USDA	یکبار
چگالی ظاهری خاک	نمونه‌گیر مغزی	یکبار
هدایت آبی اشباع خاک	روش بار افتان	یکبار
رطوبت خاک	روش وزنی	قبل هر آبیاری
شوری عصاره اشباع	هدایت الکتریکی سنج	3-7 بار
رطوبت FC و PWP	صفحات فشاری	یکبار
حجم (عمق) آب	کتور حجمی	هر آبیاری
ارتفاع گیاه	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	5-6 بار
شاخص سطح برگ	LAI متر	5-6 بار
عمق توسعه ریشه	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	5-6 بار
عملکرد دانه و بیوماس	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	یکبار

به عنوان محصولات عمده منطقه (جدول 1) طی چند سال توسط فیضی (1378) انجام شده است. روش آبیاری تمام محصولات کرتی و مقدار و زمان کوددهی براساس توصیه مرکز تحقیقات خاک آب صورت گرفت. برای تمام محصولات سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم یا روی در زمان کشت و اوره در دو نوبت زمان کشت و اواسط فصل رشد استفاده گردید.

جدول 1- تاریخ کشت، برداشت و رقم محصولات انتخابی.

محصول	کاشت	برداشت	نوع رقم
گندم	84/10/1	85/3/20	M-73-18
جو	76/09/01	77/03/18	ریحان
پنبه	76/02/17	76/09/01	ورامین
پیاز	85/07/25	86/4/10	نگراس ارلی گراند
آفتابگردان	76/04/04	76/07/21	زاریا
چغندر قند	86/02/10	86/07/21	هیبرید-P29-MC SC2-7233

برای پنج محصول گندم، جو، پنبه، چغندر قند و آفتابگردان سه تیمار کیفیت آب آبیاری Q_1 ، Q_2 و Q_3 (به ترتیب با شوری‌های 2، 8 و 12 دسی‌زیمنس بر متر) و دو تیمار آبتشویی LR_0 و LR_1 (به ترتیب بدون آبتشویی و آبتشویی بر اساس 75 درصد عملکرد محصول) و دو تیمار مدیریت آبیاری GU (کاربرد آب شیرین با شوری 2ds/m تا استقرار گیاه و از این مرحله تا پایان فصل زراعی کاربرد سه سطح شوری فوق) و GQ (اعمال سه سطح شوری فوق برای کل فصل زراعی) در چهار تکرار به صورت طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی انجام گردید. برای پیاز چهار سطح شوری (1/5، 3، 5 و 7 دسی‌زیمنس بر متر) و با عمق ثابت 65 میلیمتر در هر نوبت آبیاری اعمال گردید. در جدول 2 پارامترهای اندازه‌گیری شده برای هر کدام از محصولات ارائه شده است. داده‌های هواشناسی مورد نیاز مربوط به هر محصول، از ایستگاه هواشناسی

(d^{-1}) و K_r فاکتور ترجیحی جذب ریشه (-) می‌باشد. برای تعیین میزان جذب املاح در سطح ذرات خاک از ایزوترم جذب غیرخطی فروندلیخ^۱ استفاده می‌کند. غلظت اولیه املاح در خاک و متوسط غلظت آب زیرزمینی به عنوان شرایط اولیه و غلظت آب آبیاری و بارش به عنوان شرایط مرزی بالادست در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی پایین دست براساس جهت و مقدار جریان تعیین می‌شود. در مدل، میزان کاهش جذب به علت کاهش میزان آب و افزایش شوری به ترتیب از توابع پیشنهادی فوس (1978) و ماس و هافمن (1977) استفاده می‌شود. برای محاسبه میزان جذب واقعی توسط ریشه گیاه در مدل، از نظریه ضرب‌پذیری استفاده می‌شود (اسکچ 2006):

$$S_a(z) = \alpha_{rd} \alpha_{rw} \alpha_{rs} \alpha_{rf} S_p(z) \quad [5]$$

که در آن $S_a(z)$ و $S_p(z)$ فلاکس واقعی و پتانسیل جذب آب توسط ریشه $(cm^3 cm^{-3} S^{-1})$ ، α_{rs} ، α_{rw} ، α_{rd} و α_{rf} به ترتیب توابع کاهششی بخاطر تنش ماندابی (کمبود اکسیژن)، خشکی، شوری و تنش یخبندان خاک می‌باشد. برای شبیه‌سازی رشد محصول دو الگوریتم وجود دارد. یکی الگوریتم ساده دورنبوس و کسام (1979) می‌باشد و الگوریتم دوم با استفاده از یک مدل پیشرفته^۲ (WOFOST) رشد محصول را شبیه‌سازی می‌کند (سوپیت 1994). مزیت الگوریتم دوم، شبیه‌سازی بیوماس پتانسیل و واقعی و نیز عملکرد پتانسیل و واقعی دانه می‌باشد؛ در حالی که الگوریتم ساده تنها عملکرد نسبی را شبیه‌سازی می‌کند. در الگوریتم پیشرفته، نرخ رشد بیوماس $(kg ha^{-1} d^{-1})$ با محاسبه جذب و ماده سازی ناخالص پوشش سبز^۳ (A_{pgross}) $(kgCO_2 ha^{-1} d^{-1})$ در شرایط بهینه صورت می‌گیرد. فرم این تابع نمایی می‌باشد (سوپیت 1994).

$$A_{pgross} = A_{max} (1 - \exp(-\epsilon_{PAR} \times PAR_{L,a} / A_{max})) \quad [6]$$

^۱ Freundlich adsorption

^۲ World food studies crop model

^۳ Assimilation

ارتباط بین رطوبت خاک، بار هیدرولیکی و ضرایب هیدرولیکی در تابع رطوبتی و تابع هدایت آبی غیر اشباع مشخص می‌گردد که این توابع برای هر لایه از خاک برای شبیه‌سازی مورد نیاز هستند. توابع هیدرولیک خاک به عنوان روابط بین هدایت هیدرولیکی (K)، رطوبت خاک (θ) و بار فشاری آب خاک (h) تعریف می‌شوند. در SWAP توابع تحلیلی ارائه شده توسط ون‌گنوختن (1980) برای تعریف منحنی مشخصه رطوبتی و مدل کاپیلاری معلم (1976) برای منحنی هدایت آبی غیر اشباع استفاده می‌شود.

$$\theta(h) = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{\left[1 + |\alpha h|^n\right]^{n-1/n}} \quad [2]$$

که در آن θ_{res} رطوبت باقیمانده $(cm^3 cm^{-3})$ ، θ_{sat} رطوبت اشباع $(cm^3 cm^{-3})$ ، α (cm^{-1}) و n پارامترهای تجربی شکل هستند.

$$K(\theta) = K_{sat} S_e^\lambda \left[1 - (1 - S_e^{n/n-1})^{n-1/n}\right]^2 \quad [3]$$

که در آن K_{sat} هدایت آبی اشباع خاک $(cm d^{-1})$ ، $S_e = (\theta - \theta_{res}) / (\theta_{sat} - \theta_{res})$ اشباع نسبی (-) و λ ضریب تجربی (-) می‌باشد. در مدل SWAP برای تعیین انتقال املاح در خاک از معادله بیلان انتقال املاح در جهت قائم در حالت اشباع و غیراشباع استفاده می‌شود (کروس و ون دم 2008).

$$\frac{\partial(\theta c + Q\rho_b)}{\partial t} = -\frac{\partial(qc)}{\partial z} + \frac{\partial\left[\theta(D_{dif} + D_{dis})\frac{\partial c}{\partial z}\right]}{\partial z} - \mu(\theta c + Q\rho_b) - K_r S c \quad [4]$$

که در آن c غلظت املاح در آب خاک $(g cm^{-3})$ ، ρ_b چگالی ظاهری خاک $(g cm^{-3})$ ، q شدت جریان آب $(cm day^{-1})$ ، D_{dif} ضریب انتشار $(cm^2 day^{-1})$ ، D_{dis} پخشیدگی املاح $(cm^2 day^{-1})$ ، Q میزان جذب املاح در سطح ذرات خاک $(g g^{-1})$ ، μ ضریب شدت از نوع درجه یک برای املاح (d^{-1}) ، S نرخ جذب توسط ریشه

هوا، میزان تشعشع، سرعت باد و بارندگی روزانه در فایلی ساخته شد. شرایط مرز پایین حالت حضور سطح ایستابی بوده و سری زمانی آن بصورت ماهانه برای هر محصول به مدل داده شد. تغییرات سطح ایستابی طی انجام آزمایش ها، بین 1/9 تا 2/9 متر متغیر بود.

بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک

بر اساس بافت خاک، تعداد لایه های نیمرخ خاک در مدل مشخص گردید. نیمرخ خاک تا عمق 90 سانتی متر، در 2 تا 3 لایه، و ضرایب توابع هیدرولیکی خاک (پارامترهای روابط 2 و 3) وارد مدل گردید. از بین پارامترهای روابط منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت آبی غیراشباع، θ_{sat} و K_{sat} دارای معنی فیزیکی بوده و اندازه گیری شده بودند. برای پارامترهای λ ، θ_{res} ، α و n با استفاده از توابع انتقالی یک تخمین اولیه به عمل آمد و برای برآورد دقیق آنها روش بهینه سازی بکار گرفته شد. به همین منظور مدل PEST به SWAP لینک گردید. تابع هدف برای برآورد پارامترها، کمینه کردن اختلاف بین رطوبت شبیه سازی و مشاهدات تعریف گردید (عباسی 1386).

$$\min \varphi(\theta, b) = \sum_{i=1}^N w_i [\theta_{obs}(z, t_i) - \theta_{sim}(z, b, t_i)]^2 \quad [8]$$

که در آن $b(\lambda, \theta_{res}, n, \alpha)$ بردار مجهولات، $\theta_{obs}(z, t_i)$ رطوبت مشاهده شده در عمق Z و زمان t_i ؛ $\theta_{sim}(z, b, t_i)$ مقادیر شبیه سازی شده با استفاده از آرایه بردار مجهولات، N تعداد مشاهدات و w_i ضرایب وزنی هر قرائت می باشد. در رابطه فوق هدف یافتن مقدار منحصر به فرد b به گونه ای بود که تابع هدف کمینه شود. برای هر یک از آزمایش های مزرعه ای، مقادیر پارامترهای مجهول بهینه گردید.

بهینه سازی پارامترهای انتقال املاح خاک

برای شرایط مرزی بالا، غلظت املاح باران صفر و برای شرایط اولیه، غلظت املاح خاک به عنوان تابعی از عمق نیمرخ خاک، در مدل منظور شد. عوامل مؤثر بر

که در آن A_{max} حداکثر سرعت تثبیت در شدت اشباعی نور $(kg CO_2 ha^{-1} d^{-1})$ ، ϵ_{PAR} شیب در مبدا یا راندمان مصرف نور $(kg CO_2 J^{-1})$ ، $PAR_{L,a}$ شدت تشعشع جذب شده توسط پوشش سبز در عمق L ($Jm^{-2}d^{-1}$). راندمان مصرف نور شاخصه فرایندی بیوفیزیکی بوده و تابعی از نوع گیاه (C3 یا C4) و دما است. در مدل، عملکرد بیوماس از رابطه 7 محاسبه می شود (سوپی 1994).

$$Y = C_c \sum_{t=1}^N \left(\frac{30}{44} TT_p^{-1}(t) A_{pgross}(t) - R_m(t) \right) \quad [7]$$

(TT_p^{-1}) پارامتری برای کمی کردن تثبیت ناخالص واقعی به دلیل تنش ماندابی، شوری، خشکی و یا یخبندان، R_m نرخ تنفس گیاه $(kg ha^{-1}d^{-1})$ ، N طول دوره رشد گیاه، C_c متوسط فاکتور تبدیل برای ریشه، ساقه، دانه و برگ $(kg kg^{-1})$ می باشد. کل بیوماس تولیدی بین اندام های گیاه و بر اساس ضرایب تبدیلی تقسیم می گردد. برای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل، شاخص های ارزیابی مدل بکار گرفته شد. این شاخص ها شامل ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، حداکثر خطا (ME)، کارایی مدل سازی (EF) و ضریب باقیمانده (CRM) می باشند.

آماده سازی داده های ورودی مدل

لینک مدل SWAP به PEST¹

در این تحقیق برای تخمین بهینه پارامترها از نسخه WinPEST استفاده گردید که پارامترها را به روش رگرسیون غیرخطی (الگوریتم گوس-مارکوارد لاونبرگ) بهینه می کند (دورتنی 1995). بخش های مدل شامل تعریف و شناسایی پارامترها، داده های مشاهده ای و نهایتاً اجرای مدل و برآورد پارامترها می باشد.

مرز بالا و پایین

داده های هواشناسی مورد نیاز برای مرز بالا بصورت روزانه شامل دمای ماکزیمم و مینیمم، رطوبت

¹ Parameter estimation

شیب کاهش جذب. عمده پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری و وارد مدل گردید. بخشی از پارامترهای گیاهی از قبیل تقسیم‌بندی وزن خشک به اجزا چهارگانه گیاه، نگهداری تنفس اجزا، پارامترهای تابع جذب فوس، پارامترهای تابع جذب مس و هافمن و ضریب جذب نور بر اساس تحقیقات پیشین به مدل داده شد. پارامترهایی که در تحقیقات پیشین مقادیر آنها در قالب یک دامنه ارائه شده بودند، مقادیر آنها براساس روش بهینه‌سازی معکوس با لینک به PEST، تخمین زده شد. این پارامترها شامل، SLA ، A_{max} و ε_{PAR} بوده و توابع هدف بصورت روابط زیر تعریف شد.

$$\min \varphi(DM, b) = \sum_{i=1}^N w_i [DM_{obs}(t_i) - DM_{sim}(b, t_i)]^2 \quad [10]$$

$$\min \varphi(SO, b) = \sum_{i=1}^N w_i [SO_{obs}(t_i) - SO_{sim}(b, t_i)]^2 \quad [11]$$

DM_{obs} و SO_{obs} به ترتیب مقدار عملکرد بیوماس و دانه مشاهده شده، DM_{sim} و SO_{sim} مقدار عملکرد بیوماس و دانه شبیه‌سازی شده توسط مدل در روز t ام از دوره رشد گیاه، N تعداد اندازه‌گیری‌ها در طول فصل رشد محصول و $b(A_{max}, SLA, \varepsilon_{PAR})$ بردار مجهولات می‌باشد.

تحلیل حساسیت مدل SWAP

نتایج تحلیل حساسیت مدل بیانگر تأثیر تغییرات داده‌های ورودی بر خروجی‌ها بوده و به خاطر داشتن دقت قابل قبول در اندازه‌گیری داده‌های ورودی، حائز اهمیت می‌باشد. به منظور تحلیل حساسیت، مدل با استفاده از داده‌های ورودی اجرا و خروجی‌ها به عنوان خروجی پایه فرض شد. سپس هر بار اجرا، یکی از داده‌های ورودی مدل به مقدار ± 50 و ± 25 درصد تغییر و سایر ورودی‌های مدل ثابت نگه‌داشته شد. برای بیان کمی میزان حساسیت پارامترهای ورودی مدل، از رابطه 12 استفاده گردید (لیو 2007).

$$S_c = \left(\frac{\Delta O}{O}\right) \times \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^{-1} \quad [12]$$

انتقال املاح خاک در SWAP، انتقال توده‌ای، پخشیدگی، انتشار آبی و جذب املاح می‌باشد. رابطه بین مقدار جذب و غلظت املاح، براساس ایزوترم فروندلیخ برآورد می‌شود. تخمین پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس و با لینک به PEST انجام شد. این پارامترها، ضرایب پخشیدگی مولکولی (D_{dif})، انتشارپذیری (γ) و ضرایب تجربی ایزوترم فروندلیخ (K_d, β) لحاظ گردید. تابع هدف برای برآورد پارامترهای انتقال املاح، کمینه کردن تفاوت بین شوری عصاره اشباع شبیه‌سازی مدل و مشاهدات تعریف گردید (عباسی 1386).

$$\min \varphi(EC_e, b) = \sum_{i=1}^N w_i [EC_{e-obs}(z, t_i) - EC_{e-sim}(z, b, t_i)]^2 \quad [9]$$

که در آن $b(\gamma, D_{dif}, K_d, \beta)$ بردار مجهولات، $EC_{e-obs}(z, t_i)$ شوری مشاهده شده در عمق z و زمان t_i و $EC_{e-sim}(z, b, t_i)$ مقادیر شبیه‌سازی با استفاده از آرایه بردار مجهولات می‌باشد.

پارامترهای گیاهی

به منظور شبیه‌سازی عملکرد محصولات (به غیر از پنبه و پیاز)، مدل پیشرفته گیاه در نظر گرفته شد. مهمترین پارامترهای ورودی مدل پیشرفته عبارتند از: سری‌های زمانی ارتفاع گیاه، عمق ریشه، شاخص سطح برگ، سطح ویژه برگ و حداکثر میزان همانند سازی دی اکسید کربن به عنوان تابعی از مراحل توسعه، فاکتور کاهش حداکثر میزان همانند سازی دی اکسید کربن به عنوان تابعی از میانگین دمای روزانه و حداقل دما روزانه، تفکیک وزن خشک به اجزا چهارگانه گیاه¹، نگهداری تنفس اجزا²، حداکثر نرخ افزایش شاخص سطح برگ، مجموع دمای روزانه از جوانه زدن تا گلدهی و از گلدهی تا رسیدن، راندمان مصرف نور، ضریب جذب نور، مقادیر مکش خاک در ارتباط با سهولت جذب آب (پارامترهای تابع جذب فوس)، شوری حد آستانه و

¹ Partitioning

² Maintenance respiration

مقادیر رطوبت شبیه‌سازی کمتر از مشاهده شده برآورد شد. یکی از دلایل آن را می‌توان به تغییر بافت و خطا در حل عددی معادله حاکم دانست. در جدول 4 مقادیر بهینه این پارامترها برای گندم ارائه شده است. بعد از واسنجی پارامترهای هیدرولیکی، پارامترهای انتقال املاح خاک برای هر محصول، واسنجی گردید. شکل 2، مقادیر شوری خاک شبیه‌سازی و مشاهدهای برای محصولات گندم و چغندر قند را طی رشد نشان می‌دهد. پس از واسنجی پارامترها، تطابق بسیار خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهدهای حاصل شد. مقادیر بهینه پارامترهای انتقال املاح برای محصول گندم نیز در جدول 4 ارائه شده است. آخرین واسنجی مربوط به پارامترهای گیاهی و عملکرد محصول بوده طوری که اختلاف عملکرد شبیه‌سازی و مشاهدهای حداقل گردد. در جدول 5، مقادیر پارامترهای گیاهی مورد استفاده برای هر محصول ارائه شده است.

تخمین عملکرد محصول انتخابی

در شکل 3، عملکرد شبیه‌سازی و مشاهدهای برای محصولات انتخابی ارائه شده است. مقایسه عملکردهای بدست آمده از مدل و عملکردهای اندازه‌گیری شده در مزرعه نشان داد که همبستگی خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی و واقعی وجود دارد. آماره‌های سنجش اعتبار مدل در این تحقیق بیشتر از تحقیقات قبلی مشابه بدست آمد که یکی از دلایل آن را می‌توان به واسنجی کامل مدل نسبت داد.

در این تحقیق تمام پارامترهای مدل شامل خصوصیات هیدرولیکی خاک، پارامترهای انتقال املاح و پارامترهای گیاه، با استفاده از مدل PEST واسنجی و بهینه گردید. به منظور ارزیابی و سنجش اعتبار مدل، مقادیر شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE، ME، EF و CRM تعیین گردید که نتایج آن در جدول 6 ارائه شده است. براساس نتایج، حداقل ضریب همبستگی مربوط به آفتابگردان (0/877) و حداکثر آن مربوط به محصول پیاز (0/982) حاصل شد. با اینکه برای گندم و

که در آن S_c ضریب حساسیت، ΔO اختلاف پارامتر خروجی قبل و بعد تغییر، \bar{O} متوسط پارامتر خروجی، ΔI اختلاف پارامتر ورودی قبل و بعد تغییر و \bar{I} متوسط پارامتر ورودی می‌باشد. S_c معادل صفر نشان دهنده عدم حساسیت، بین صفر و 0/3 حساسیت کم، بین 0/3 و 1/5 حساسیت متوسط و بیشتر از 1/5 حساسیت زیاد می‌باشد (لیو 2007). در این تحقیق تحلیل حساسیت مدل بر روی محصول گندم انجام و تأثیر پارامترهای ورودی شامل مقدار تشعشع، درجه حرارت، بارندگی، سرعت باد، ضرایب هیدرولیکی لایه‌های خاک، پارامترهای انتقال املاح خاک، عمق آب آبیاری، شوری آب آبیاری و پارامترهای زراعی عمق ریشه و شاخص سطح برگ بر روی پارامتر خروجی عملکرد دانه بررسی شد.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل حساسیت مدل SWAP

نتایج تحلیل حساسیت مدل برای محصول گندم نشان داد که از بین پارامترهای بررسی شده، عمق آب آبیاری با ضریب حساسیت 2/81، دارای حساسیت زیاد و بارندگی و شوری آب آبیاری دارای حساسیت متوسط می‌باشند. ضریب حساسیت سایر پارامترها در جدول 3 ارائه شده است.

واسنجی مدل SWAP

به منظور بررسی کارایی مدل SWAP، مدل برای محصولات انتخابی واسنجی گردید. ابتدا پارامترهای هیدرولیکی خاک $(\lambda, \theta_{res}, n, \alpha)$ برای هر محصول و سه عمق خاک واسنجی شد. در شکل 1، مقادیر رطوبت شبیه‌سازی و مشاهدهای برای محصولات گندم و چغندر قند طی دوره رشد و برای دوعمق 0-30 و 60-90 سانتیمتر نشان داده شده است. با بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی، مقادیر رطوبت شبیه‌سازی و مشاهدهای طی دوره رشد محصولات انطباق داشت. برای لایه دوم خاک و در مدل‌سازی بیشتر مواقع،

کند. کارایی مدل‌سازی در تمام موارد بیشتر از 0/8 بوده که نشانگر اعتبار مدل‌سازی می‌باشد.

تعیین توابع تولید-آب- شوری محصولات

برای تعیین توابع تولید-آب-شوری نیاز به دامنه گسترده از داده‌های عملکرد متناسب با مقادیر شوری و عمق آب آبیاری می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد مشاهدات مزرعه‌ای برای تخمین این توابع معمولاً کم می‌باشد؛ لذا برای افزایش دقت توابع، از مدل SWAP و اسنجی شده، استفاده گردید. برای اجرای SWAP و تغییر سریع عمق و شوری، SWAP به SENSAN لینک و با تغییر عمق آب آبیاری و شوری، اجرا شد. برای تعیین تابع تولید بهینه، شش مدل خطی، خطی لگاریتمی (کاب داگلاس)، نمایی، ترانسلوگ، درجه دوم و لئونتیف تعمیم در نظر گرفته شد. فرم این شش مدل به ترتیب در روابط 13 تا 18 ارائه شده است (ذولفقاران 1386).

$$y = a + bI + c.C \quad [13]$$

$$\ln y = a + b \ln I + c \ln C \quad [14]$$

$$\ln y = a + b \ln I + c \ln C + dI + e.C \quad [15]$$

$$\ln y = a + b \ln I + c \ln C + d \ln I^2 + e \ln C^2 + f \ln I \ln C \quad [16]$$

$$y = a + bI + c.C + dI^2 + e.C^2 + fI.C \quad [17]$$

$$y = a + bI^{0.5} + c.C^{0.5} + dI + e.C + fI^{0.5}.C^{0.5} \quad [18]$$

در این روابط I و C عمق آبیاری و غلظت املاح در آب آبیاری و y عملکرد محصول می‌باشد. پارامترهای پنج مدل فوق (a, b, c, d, e, f) به روش حداقل مربعات معمولی تعیین شد. برای انتخاب تابع تولید بهینه، از پنج شاخص ارزیابی اعتبار مدل استفاده شد. برای تعیین تابع تولید بهینه، هر یک از توابع براساس آماره‌های فوق الذکر، درجه‌بندی شدند. به این ترتیب تابعی که در آن مقادیر هر یک از شاخص‌های RMSE، CRM و ME حداقل و EF و R² نزدیک 1 باشند، درجه یک نسبت داده شد. پس از درجه‌بندی هر یک از شاخص‌های آماری، میانگین آنها با مقایسه گردید.

آفتابگردان، شاخص‌های ضریب تبیین، حداکثر خطا و کارایی مدل‌سازی قابل قبول بوده ولی مقادیر RMSE

جدول 3- میانگین ضریب حساسیت پارامترهای مختلف ورودی مدل SWAP برای محصول گندم.

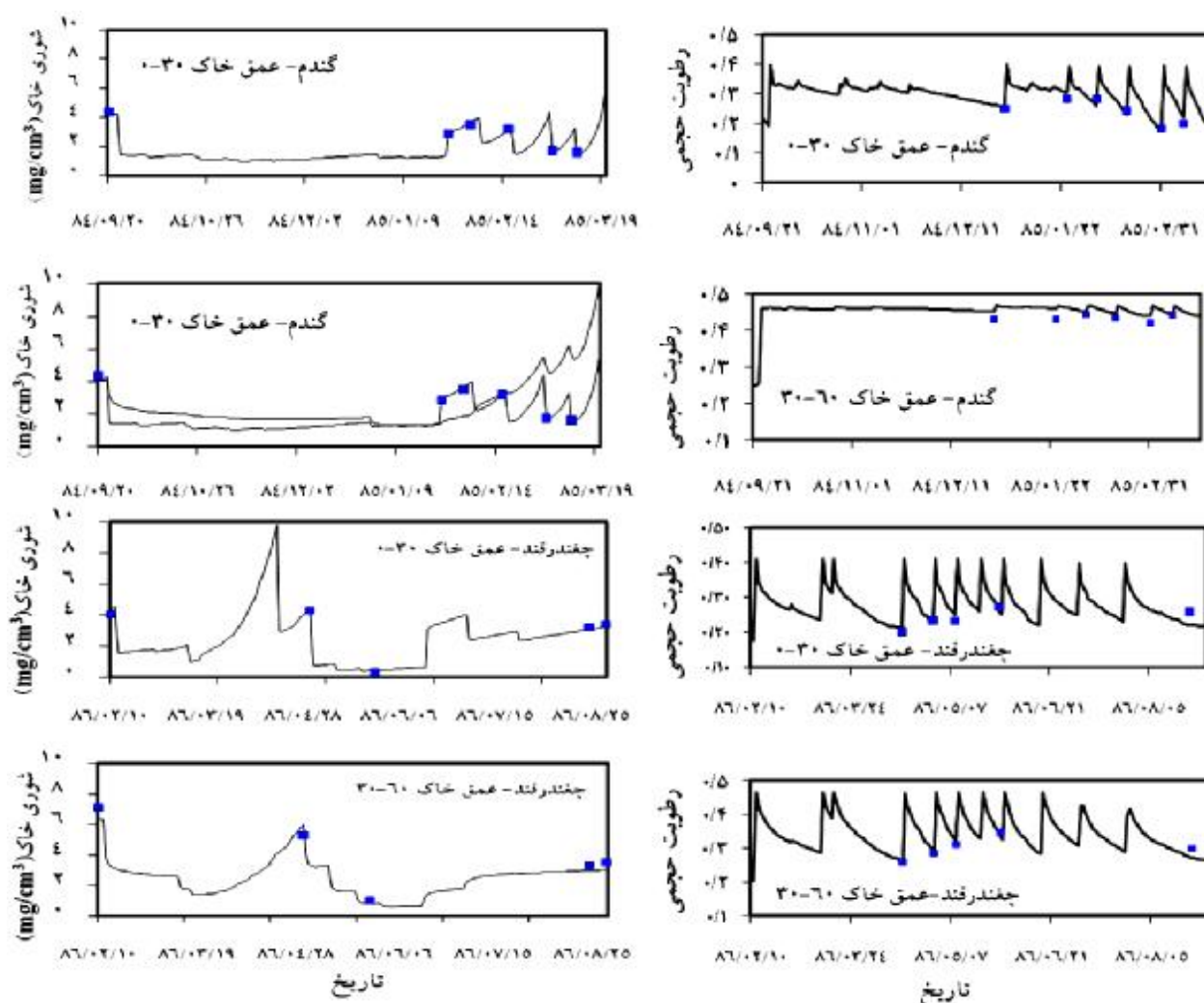
پارامتر ورودی	ضریب حساسیت (S _c)
مقدار تشعشع	0/34
حداکثر درجه حرارت	0/09
حداقل درجه حرارت	0/11
بارندگی	1/47
سرعت باد	0/07
ضرایب هیدرولیکی لایه‌های	0/75
پارامترهای انتقال املاح خاک	0/25
عمق آب آبیاری	2/81
شوری آب آبیاری	1/33
شاخص سطح برگ	0/05
عمق ریشه	1/01

جدول 4- مقادیر متوسط پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح

خاک برای محصول گندم، عمق 0-30 سانتیمتر

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
a (cm ⁻¹)	0/0205	b (-)	1/15
n (-)	1/2727	K _d (cm ³ mg ⁻¹)	5/71
q _{res} (cm ³ cm ⁻³)	0/01	D _{diff} (cm ² day ⁻¹)	1/4
I (-)	-1/282	g (cm)	5/1
K _s (cm day ⁻¹)	58/7	-	-
q _s (cm ³ cm ⁻³)	0/43	-	-
r _b (gcm ⁻³)	1/22	-	-

بیشتر بوده که این پارامتر تأثیر نامطلوب بر فرایند شبیه‌سازی دارد. علامت منفی CRM نشان می‌دهد که مدل عملکرد محصولات جو، پنبه و آفتابگردان را در اکثر موارد بیشتر از مقدار واقعی و عملکرد گندم، چغندر قند و پیاز را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌



شکل 1- مقادیر رطوبت شبیه‌سازی و مشاهده‌ای محصولات چغندر قند و گندم تیمار: Q₁LR₁-GU.

شکل 2- مقادیر شوری خاک شبیه‌سازی و مشاهده‌ای گندم و چغندر قند تیمار: Q₂LR₁ GU.

تابع تولید، کاربردی‌ترین نتایج این تحقیق است که برای تعیین عمق بهینه آبیاری هر محصول، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب و تهیه منحنی‌های هم عملکرد کاربرد دارد. این منحنی‌ها نشان دهنده مکان هندسی ترکیبات مختلف عمق و شوری آب آبیاری است. منحنی‌های هم عملکرد گندم در شکل 4 ارائه شده است.

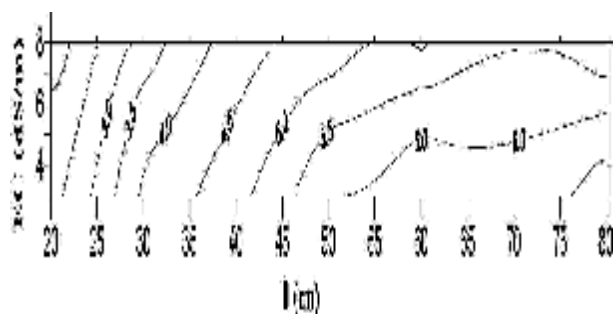
(همایی و همکاران 2002). حداقل میانگین رتبه به عنوان تابع بهینه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل‌های درجه دوم و لئونتیف تعمیم یافته برازش خوبی با داده‌ها داشته و مدل بهینه می‌باشند. مدل بهینه گندم، جو، چغندر قند، پیاز، پنبه لئونتیف تعمیم یافته و برای آفتابگردان درجه دوم بدست آمد. توابع تولید-آب-شوری بهینه برای گندم، جو، پنبه، پیاز، آفتابگردان و چغندر قند به ترتیب در روابط 19 تا 24 ارائه شده است. در این روابط I و EC به ترتیب عمق آب آبیاری (cm) و شوری آب آبیاری (ds/m) می‌باشد.

جدول 5- مقادیر پارامترهای گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات انتخابی.

پياز	آفتابگردان	چغندر قند	پنبه	جو	گندم	پارامتر گیاهی
1204	1462	500	2906	790	1217	مجموع دما از جوانه زنی تا گلدهی (°C)
1792	1329	2250	1421	1231	695	مجموع دما از رسیدن تا رسیدن (°C)
0/029	0/030	0/032	0/028	0/040	0/035	حداکثر افزایش نسبی سطح برگ ($m^2m^{-2}d^{-1}$)
-	/0037	0/0025	-	0/00168	0/0017	سطح برگ ویژه ($ha\ kg^{-1}$)
0/56	0/55	0/62	0/5	0/5	0/46	راندمان مصرف نور ($kg\ ha^{-1}hr^{-1}/(Jm^{-2}s^{-1})$)
-	0/47	0/46	-	0/44	0/45	حداکثر نرخ اسیمولاسیون CO_2 ($kg\ ha^{-1}hr^{-1}$)
-	0/59	0/72	-	0/72	0/72	کارایی تبدیل اسیمولاسیون به بیوماس برگ (-)
-	0/71	0/71	-	0/68	0/69	کارایی تبدیل اسیمولاسیون به بیوماس دانه (-)
-	0/71	0/72	-	0/70	0/71	کارایی تبدیل اسیمولاسیون به بیوماس ریشه (-)
-	0/73	0/69	-	0/67	0/68	کارایی تبدیل اسیمولاسیون به بیوماس ساقه (-)

جمع‌بندی

نتایج نشان داد که می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار مناسب جهت پیش بینی حرکت آب و املاح در نیمرخ خاک و عملکرد محصولات تحت کمیت و کیفیت های مختلف آب آبیاری استفاده نمود. براساس نتایج این تحقیق، دقت مدل SWAP عمدتاً به دقت داده‌های ورودی مدل بستگی داشته و در صورتی که بطور کامل واسنجی شود، بدون محدودیت زمانی و مکانی موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای و نیز صرف زمان و هزینه می‌توان برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری بکار گرفت.



شکل 4- منحنی‌های هم عملکرد محصول گندم.

منحنی‌های هم عملکرد سایر محصولات به راحتی از روابط 20 تا 24 قابل استخراج می‌باشد. به عنوان مثال، گندم با میزان آبیاری 40cm و شوری 2dS/m، عملکرد 5/2 t/ha دارد. با افزایش شوری به 7 dS/m و دستیابی به همان عملکرد، عمق آبیاری باید 61cm گردد. حداکثر عملکرد گندم برای شوری‌های مختلف، از رابطه 19 قابل استخراج می‌باشد. حداکثر عملکرد گندم تحت شوری 7dS/m برابر 5/2 t/ha می‌باشد. با همین مقدار شوری، با افزایش عمق از 30cm به 50cm، عملکرد افزایش شدید داشته و از 3/4 به 5 t/ha می‌رسد. با افزایش عمق از 50cm به 70cm، عملکرد فقط افزایش ملایم داشته و 0/5 تن افزایش یافته و به 5/5 t/ha می‌رسد که حاکی از آن است که در صورت افزایش شوری آب آبیاری در یک منطقه و برای رسیدن به عملکرد قبلی، باید میزان آب کاربردی افزایش یابد که این مقدار افزایش بستگی به واکنش محصول نسبت به عمق و شوری دارد و از روابط 19 تا 24 تعیین می‌گردد.

نسبت به توابع درجه دوم و نمایی، برای تخمین عملکرد محصولات در شرایط شور ارجحیت داشته و بهتر عمل می‌کند.

در تحقیقات پیشین فرم لئونتیف تعمیم یافته برای تابع تولید کمتر بکار گرفته شده و عمدتاً از توابع درجه دوم و نمایی استفاده کرده‌اند (ذولفقاران 1386، کیانی 1386، اکبری 1385، لتی و همکاران 1986، روسو و باکر 1986)؛ تحقیق جاری نشان داد که این نوع تابع

جدول 6- مقادیر پارامترهای آماری برای ارزیابی مدل.

CRM	EF	ME ton ha ⁻¹	RMSE ton ha ⁻¹	R ²	محصول
-	-			-	
0/02	0/85	1/27	18/22	0/903	گندم
0/02	0/80	5/06	5/37	0/887	چغندر قند
0/02	0/97	5/75	7/17	0/982	پیاز
-0/03	0/90	0/49	8/20	0/951	جو
-0/04	0/88	0/29	6/94	0/921	پنبه
-0/08	0/82	0/33	17/45	0/877	آفتابگردان

$$y = -15280 - 210.1I - 890EC + 4241I^{0.5} + 4306EC^{0.5} - 224I^{0.5} \times EC^{0.5} \quad [19]$$

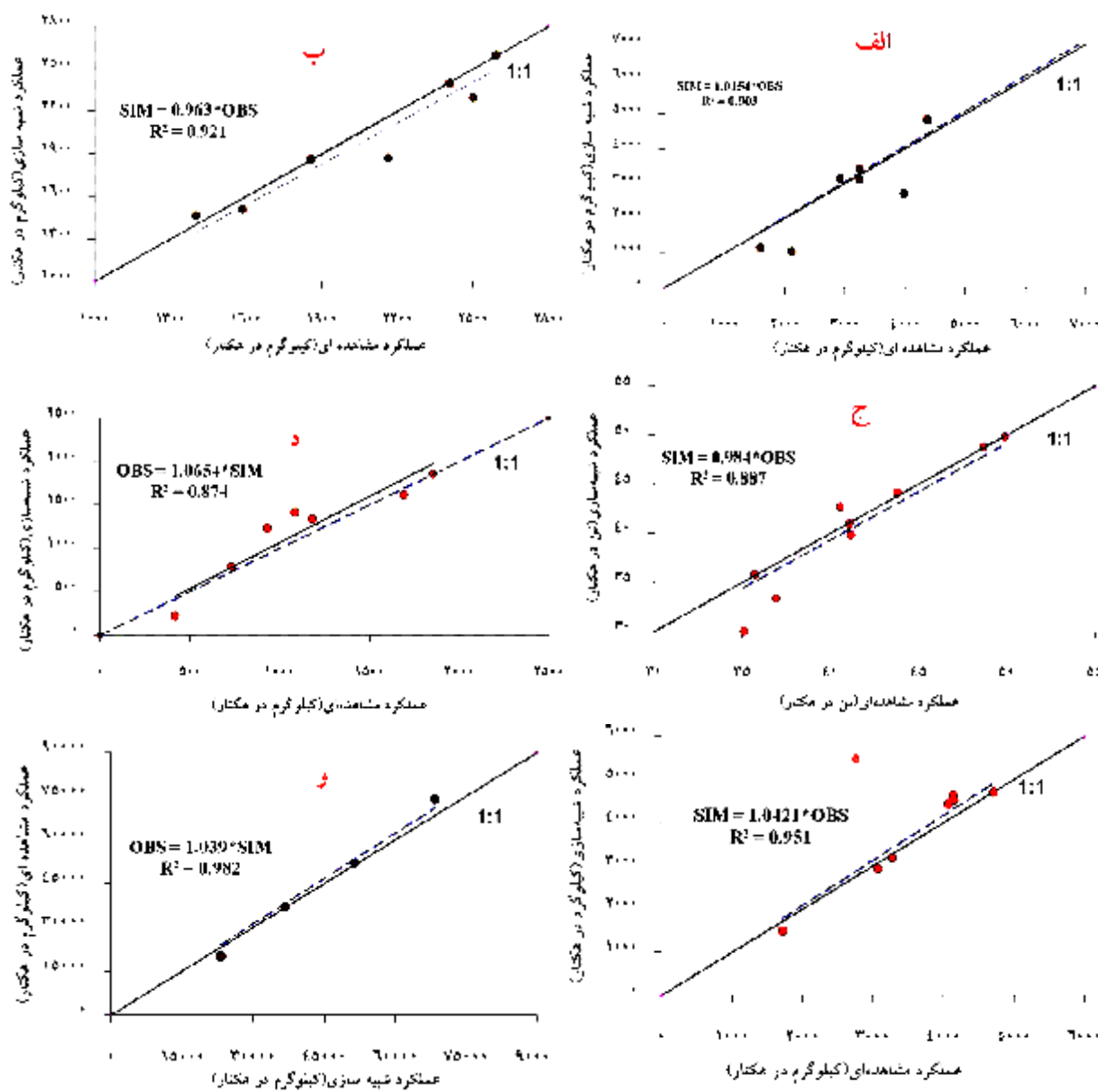
$$y = -13533 - 230.1I - 409.4EC + 4154I^{0.5} + 1822.9EC^{0.5} - 72.5I^{0.5} \times EC^{0.5} \quad [20]$$

$$y = -3830.2 - 50.9I - 238.3EC + 1131.2I^{0.5} + 772.7EC^{0.5} + 1.79I^{0.5} \times EC^{0.5} \quad [21]$$

$$y = -29141 - 852.3I - 3787EC + 26791I^{0.5} - 20326EC^{0.5} - 3634I^{0.5} \times EC^{0.5} \quad [22]$$

$$y = 458.75 + 43.94I - 4.65EC - 0.2257I^2 - 4.5EC^2 - 0.481I \times EC \quad [23]$$

$$y = -93041 - 1000.3I - 3303.7EC + 23780I^{0.5} + 13959EC^{0.5} - 387.4I^{0.5} \times EC^{0.5} \quad [24]$$



شکل 3- عملکرد شبیه‌سازی و مشاهده شده محصولات زراعی الف: گندم، ب: پنبه، ج: چغندر قند، د: آفتابگردان، ه: جو، و: پیاز.

منابع مورد استفاده

زولفقاران، 1386. بررسی اثر مقدار آب آبیاری بر عملکرد گندم در شوری‌های مختلف با آبیاری بارانی. نهمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه باهنر کرمان.

عباسی ف، 1386. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. 250 ص.

فیضی م، ۱۳۷۸. بررسی مدیریت‌های مختلف استفاده از آب شور بر عملکرد آفتابگردان. گزارش نهایی، بخش تحقیقات خاک و آب اصفهان.

فیضی م، ۱۳۷۸. بررسی مدیریت‌های مختلف استفاده از آب شور بر عملکرد جو. گزارش نهایی، بخش تحقیقات خاک و آب اصفهان.

فیضی م، ۱۳۷۸. بررسی مدیریت‌های مختلف استفاده از آب شور بر عملکرد پنبه. گزارش نهایی، بخش تحقیقات خاک و آب اصفهان.

کیانی ع، ۱۳۸۶. استفاده از مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب، املاح و عملکرد نسبی گندم. مجموعه مقالات نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه باهنر کرمان.

Doorenbos J and Kassam AH, 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33 Rome, Italy.

Doherty J, Brebber L and Whyte P, 1995. PEST: Model Independent Parameter Estimation. Australian Centre for Tropical Freshwater Research, James Cooke University, Townsville, Australia.

Droogers P, Akbari M Torabi M and Pazira E, 2000. Exploring field scale salinity using simulation modeling, Example for Rudasht area, Esfahan Province, Iran, IAEIR-IWMI Research Report 2.

Feddes RA Kowalik PJ and Zaradny H, 1978. Simulation of field water use and crop yield, Pudoc. Wageningen.

Homaee M, Dirksen C and Feddes RA, 2002a. Simulation of root and water uptake, I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction function, Agricultural Water Manag 57:89-109.

Kroes JG and Van Dam JC, 2008. Reference manual SWAP version 3.2., Alterra Green World Research, Wageningen, Report 1649 (Available at: www.alterra.nl/models/swap)

Letey J, Dinar A and Knapp KC, 1985. Crop-water production function model for saline irrigation waters. Soil Science Society of America Journal 49(4):1005-1009.

Liu HF, Genard M Guichard S and Bertin N, 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes, Journal of Experimental Botany 58(13): 3567-3580.

Mass EV and Hoffman GJ, 1977. Crop salt tolerance current assessment, J Irrigation and Drainage Division, ASCE 103(IR2):115-134.

Mostafazadeh-fard B, Mansouri Mousavi H and SF Feyzi M, 2009. Effects of different levels of irrigation water salinity and leaching on yield and yield components of wheat in an arid region. J Irri and Drain Eng 135(1): 32-38.

Mualem Y, 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resource Research 12: 513-522.

- Russo D and Bakker D, 1986. Crop water production functions for sweet corn and cotton irrigated with saline waters, *Soil Science Society American J* 51:1554-1562.
- Singh R, 2004. Simulation on direct and cyclic use of saline waters for sustaining cotton-wheat in a semi-arid area of north-west India, *J. of Agri. Water Manag* 66: 153-162.
- Skaggs TH, van Genuchten, MTh Shouse PJ and Poss JA, 2006. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agricultural Water Management* 86: 140-149.
- Supit I, Hooyer AA Van Diepen CA, 1994. System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS, Vol. 1: Theory and Algorithms. EUR publication 15956, Agricul Series, Luxembourg.
- Vazifedoust M, Van Dam JC Feddes RA and Feizi M, 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agricultural Water Management* 95:89-102.
- Van Genuchten MTh, 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal* 44: 892–898.