

شبیه سازی واکنش دو رقم سویا به کم آبیاری با کاربرد مدل WOFOST

پریسا شاهین رخسار^{۱*}، ابراهیم امیری، سامیه رئیسی و محمد اسماعیل اسدی

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گیلان.

pshahinroksar@yahoo.com

دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی لاهیجان.

eamiri57@yahoo.com

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان.

saraeisi@yahoo.com

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان.

iwc977127@yahoo.com

چکیده

امروزه حتی در مناطق مرطوب کشور، بحران آب یک مشکل عمده کشاورزی و افزایش بهره‌وری مصرف آب یکی از ملزومات توسعه پایدار است. با توجه به این امر، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه به‌عنوان ابزاری برای مدیریت بحران آب مفید به نظر می‌رسد. در این پژوهش از مدل WOFOST جهت شبیه‌سازی عملکرد دو رقم سویا تحت مدیریت کم آبیاری در منطقه گرگان استفاده شد. با استفاده از عملکرد اندازه‌گیری شده و اجزای بیلان آب شبیه‌سازی شده از مدل، مقدار متوسط بهره‌وری تبخیر تعرق (WP_{ET}) مبتنی بر عملکرد دانه 0.72 کیلوگرم دانه به ازای هر متر مکعب تبخیر تعرق حاصل شد. با افزایش تنش خشکی، بهره‌وری آب بر پایه مجموع آبیاری و بارش (WP_{I+R}) و بهره‌وری آب بر پایه مقدار آبیاری (WP_I) در هر دو رقم افزایش یافت ولی رقم دی پی ایکس در مواجهه با تنش خشکی دارای بهره‌وری آب بالاتری نسبت به رقم سپیده بود. نتایج ارزیابی عملکرد و دقت مدل WOFOST نشان داد شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نسبی ($nRSME$) عملکرد دانه و بیوماس کل در هر دو رقم مورد بررسی کمتر از 10% درصد، شاخص ضریب جرم باقی‌مانده‌ها (CRM) نزدیک به صفر، ضریب کار آبی مدل (EF) 0.89 ، ضریب تبیین (R^2) 0.93 و شاخص توافق ویلموت (IOA) در حدود 0.89 به دست آمد. به‌طور کلی یافته‌های این تحقیق کار آبی مطلوب مدل را در شبیه‌سازی فرآیند رشد و تأثیر آب بر عملکرد و بهره‌وری آب سویا تأیید می‌کند و رقم دی پی ایکس در شرایط محدودیت آب برای کشت در استان گلستان توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بیوماس، سویا رقم دی پی ایکس، عملکرد، بهره‌وری آب.

۱- آدرس نویسنده مسئول: رشت، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گیلان.

* - دریافت: خرداد ۱۳۹۴ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۴

مقدمه

سویا (*Glycine max L.*) یکی از قدیمی ترین گیاهان زراعی جهت تولید روغن و پروتئین محسوب می شود و میانگین عملکرد جهانی سویا ۲/۳ تن در هکتار است (خواججه پور ۱۳۸۶). بر اساس آخرین آمار منتشر شده در سال ۱۳۸۹ بیش از ۸۰ درصد سطح زیر کشت سویای کشور آبی بوده است؛ که در این میان استان گلستان ۷۶ درصد از سطح زیر کشت و ۷۴ درصد تولید سویای کل کشور را به عهده داشته است (اسدی ۱۳۹۱).

مطالعات نشان می دهد که ارقام مختلف سویا عکس العمل متفاوتی به وضعیت رطوبتی خاک از خود نشان می دهند. مطالعه واکنش گیاه سویا نسبت به شرایط تنش آبی جهت معرفی رقم هایی که قادر به تحمل چنین شرایطی از تنش رطوبتی باشند، می تواند موجب افزایش بهره وری آب گردد. بررسی واکنش ارقام مختلف سویا به میزان آب مصرفی نشان داد کم آبیاری در تمام ارقام مورد بررسی موجب افزایش تولید کل در منطقه شده است ولی رقم دی پی ایکس نسبت به بقیه ارقام واکنش مطلوب تری نسبت به آب برای تولید سویا دارد (کیانی ۱۳۸۹). از طرف دیگر یکی از شاخص های مورد استفاده در مباحث عملکرد گیاه و آب مصرفی که مبنای اقتصادی دارد، بهره وری آب است که به صورت نسبت عملکرد محصول به مقدار آب مصرفی تعریف می شود.

نتایج بررسی برخی از محققین نیز تأثیر کم آبیاری در بهبود شاخص بهره وری آب را مورد تأکید قرار داده اند (کانگ و همکاران ۲۰۰۰). امینی فر و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی تأثیر کم آبیاری بر عملکرد و بهره وری آب در هفت رقم سویا در رشت دریافتند که رقم ۳۳ سویا با تولید ۱۵۱۲ کیلوگرم در هکتار، بیشترین بهره وری آب آبیاری در عملکرد دانه به میزان ۱/۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب را دارا بود. بر اساس نتایج محققان مذکور، مدیریت آبیاری عاملی مهم در افزایش تولید محصول سویا است؛ بنابراین به نظر می رسد می توان به منظور صرفه جویی و افزایش بهره وری در مصرف آب از

مدیریت کم آبیاری استفاده کرد. در این میان به منظور استفاده بهینه از منابع بیوفیزیکی نظیر آب و خاک استفاده از مدل های شبیه سازی رشد برای گیاهانی نظیر سویا گسترش یافته است (اتزینگر و همکاران ۲۰۰۴). این مدل ها ابزاری مناسب برای تعیین و پیش بینی اثرات مدیریت های زراعی نظیر آبیاری بر عملکرد محصول می باشند. به طوری که در صورت واسنجی صحیح مدل ها در هزینه و زمان مطالعات مزرعه ای صرفه جویی متناهی خواهند داشت، استفاده از مدل های نظیر WOFOST^۱ به دلیل نیاز به داده های ورودی کمتر به منظور پیش بینی میزان محصول، کارایی مصرف آب و بررسی تأثیر تنش آب در سویا توصیه می شود (پدرسون و همکاران ۲۰۰۴ و ستیونوا و همکاران ۲۰۱۰).

در WOFOST، رشد گیاه در شرایط آبیاری بهینه و محدود (کم آبیاری) به صورت دینامیکی با گام زمانی یک روزه بر اساس خصوصیات گیاهی، پارامترهای روزانه هواشناسی و خصوصیات فیزیکی خاک شبیه سازی می شود (بوگارد و همکاران ۱۹۹۸). در ارتباط با توانایی این مدل در شبیه سازی عملکرد سویا تحقیقات زیادی صورت نگرفته است؛ تنها ستیونوا و همکاران (۲۰۱۰) از چهار مدل رشد گیاهی برای شبیه سازی رشد و عملکرد سویا استفاده کردند بر اساس نتایج شبیه سازی، مقدار RMSE^۲ عملکرد دانه برای مدل CROPGRO-Soybean و Sinclair-Soybean و WOFOST^۳ SoySim به ترتیب ۰/۷۲، ۰/۹۱، ۱/۶۱ و ۰/۴۶ تن در هکتار حاصل شد. ضریب تبیین رگرسیون خطی (R^2) یک به یک محاسبه شده بین عملکرد دانه شبیه سازی شده و مشاهده شده در مدل های مورد بررسی به ترتیب برابر با ۰/۲۶، ۰/۱۲، ۰/۲۶ و ۰/۹۴ به دست آمد. تمامی چهار

¹ World FOod STudies

² Root Mean Square Error

³ Soybean Growth Simulation Model

مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس دارای خطای متوسط (ME)^۱ بزرگ‌تر از صفر بودند.

کارایی بالای مدل WOFOST برای سایر محصولات نظیر گندم، ذرت و برنج مورد تأیید بسیاری از محققین قرار گرفته است. به‌عنوان مثال مارلتو و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های هواشناسی و مدل گیاهی WOFOST شبیه‌سازی رشد گندم زمستانه در شرایط محدودیت آب، عملکرد دانه و رشد گیاه را پیش‌بینی نمودند. در ایران، امیری و رضایی (۱۳۹۰) و سعادت‌ی و همکاران (۱۳۹۱) مدل WOFOST را برای شبیه‌سازی رشد و نمو برنج مورد استفاده قرار دادند. یافته‌های تحقیق آنان نشان داد مدل WOFOST در شبیه‌سازی فرآیند رشد و تأثیر آب بر عملکرد و بهره‌وری آب برنج در مناطق مرطوب دارای کارایی مطلوبی است.

با توجه به اینکه تاکنون گزارش‌های زیادی در خصوص استفاده از مدل‌های رشد گیاهی نظیر WOFOST در ارتباط با سویا منتشر نشده است، به نظر می‌رسد بتوان با استفاده از این ابزار، عکس‌العمل ارقام مختلف سویا را در شرایط محدودیت آب شبیه‌سازی نمود، لذا هدف از این پژوهش، واسنجی و ارزیابی توانایی آخرین نسخه مدل WOFOST در شبیه‌سازی واکنش کشت دو رقم سویا سپیده و دی پی ایکس در شرایط کم‌آبایی و بهینه‌سازی بهره‌وری مصرف آب در منطقه گرگان است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای برآورد پارامترهای گیاهی و ارزیابی مدل WOFOST از داده‌های مستخرج از مقاله شاهین‌رخسار و رئیسی (۱۳۹۰) نظیر میزان آب آبیاری، تیپ رشدی ارقام مورد بررسی و زمان وقوع مراحل فنولوژیکی استفاده شد. پژوهش مذکور در سال ۱۳۸۷ در ایستگاه تحقیقات گرگان با موقعیت جغرافیایی طول ۵۴ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و عرض ۳۶ درجه و ۵۵ دقیقه

شمالی و با ارتفاع از سطح دریا ۵/۵ متر انجام شده بود. تیمارهای اعمال شده در پژوهش عبارت بودند از دو تیمار کم‌آبایی ۵۰ (I₅₀)، ۷۵ (I₇₅) و ۱۰۰ (I₁₀₀) درصد نیاز آبی به عنوان عامل اصلی و دو تیمار رقم سپیده (رقم معرفی شده در استان گلستان) و دی پی ایکس به ترتیب زودرس و دیررس که به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شده بود (جدول ۱ و ۲).

پارامترهای ورودی مدل WOFOST

پارامترهای هواشناسی نظیر تابش، میانگین حداقل دمای روزانه، میانگین حداکثر دمای روزانه، سرعت باد در ارتفاع دو متری و کل بارش، در طول دوره رشد به صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی فرودگاه گرگان اخذ و وارد فایل هواشناسی مدل WOFOST نسخه ۷.۱.۲ شد (جدول ۳).

اطلاعات مربوط به مدیریت مزرعه، تاریخ کاشت و میانگین عملکرد و بیوماس واقعی و پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری شده (مجموع درجه حرارت از جوانه‌زدن تا گلدهی، مجموع درجه حرارت از گلدهی تا رسیدگی، عملکرد و بیوماس کل و سطح برگ) از مقاله شاهین‌رخسار و رئیسی (۱۳۹۰) و اطلاعات واسنجی شده سویا از مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی محاسبه شد (جدول ۴). برای واسنجی مدل از بخش RERUN به‌عنوان جزئی از مدل استفاده شد.

اطلاعات مربوط به مدیریت مزرعه، تاریخ کاشت و میانگین عملکرد و بیوماس واقعی و پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری شده (مجموع درجه حرارت از جوانه‌زدن تا گلدهی، مجموع درجه حرارت از گلدهی تا رسیدگی، عملکرد و بیوماس کل و سطح برگ) از مقاله شاهین‌رخسار و رئیسی (۱۳۹۰) و اطلاعات واسنجی شده سویا از مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی محاسبه شد (جدول ۴). برای واسنجی مدل از بخش RERUN به‌عنوان جزئی از مدل استفاده شد.

¹ Modeling Efficiency

جدول ۱- مشخصات تیپ رشدی ارقام مورد بررسی

وزن هزار دانه (گرم)	گروه رسیدگی	تیپ شاخه بندی	ارتفاع	دوره رشد (روز)	تیپ رشدی	رقم
۲۰۰	۵ (دیررس)	چند شاخه	پا بلند	۱۲۰-۱۴۰	نیمه محدود	دی پی ایکس
۱۸۰	۳ (زودرس)	تک شاخه	پا بلند	۹۰-۱۱۰	نامحدود	سپیده

جدول ۲- زمان وقوع مراحل فنولوژیکی بر اساس شماره روز از ابتدای سال میلادی (روز ژولیوسی)

رقم	مرحله فنولوژیکی	کاشت	جوانه زنی	گلدهی	رسیدگی فیزیولوژی
سپیده	شماره روز	۱۵۸	۱۶۴	۱۹۲	۲۷۰
دی پی ایکس	شماره روز	۱۵۸	۱۶۶	۲۱۳	۳۰۵

جدول ۳- پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد برای دو رقم سویا در منطقه گرگان

پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد	سپیده	دی پی ایکس
تابش با طول موج کوتاه، MJm ⁻² d ⁻¹	۱۸/۶۵	۱۸/۱۳
میانگین حداقل دمای روزانه، °C	۲۲/۸	۲۲/۴
میانگین حداکثر دمای روزانه، °C	۳۳/۲	۳۲/۸
سرعت باد در ارتفاع دو متری، ms ⁻¹	۵/۴	۵/۴
کل بارش، mm	۲۴	۲۷

جدول ۴- پارامترهای گیاهی سویا اندازه گیری شده و یا واسنجی شده از مدل

پارامتر	شرح	رقم	مقدار	واحد
^۱ TSUM ₁	مجموع درجه حرارت از جوانه زدن تا گلدهی*	سپیده دی پی ایکس	۶۰۰ ۱۰۶۰	°Cday
^۲ TSUM ₂	مجموع درجه حرارت از گلدهی تا رسیدگی*	سپیده دی پی ایکس	۱۶۵۰ ۱۸۰۰	°Cday
^۳ SLA	سطح برگ ویژه	سپیده دی پی ایکس	۰/۰۰۱۴ ۰/۰۰۱۴	ha kg ⁻¹
^۴ RGRLAI	حداکثر افزایش نسبی در شاخص برگ	سپیده دی پی ایکس	۰/۰۱ ۰/۰۱	m ² m ⁻² hr ⁻¹
^۵ KDIF	ضریب روشنایی نور	سپیده دی پی ایکس	۰/۸ ۰/۸	-
^۶ EFF	راندمان مصرف نور	سپیده دی پی ایکس	۰/۴۰ ۰/۴۵	-
^۷ AMAX	حداکثر شدت جذب CO ₂	سپیده دی پی ایکس	۳۵ ۳۵	kg ha ⁻¹ hr ⁻¹

* بالای صفر فیزیولوژیکی

1 Temperature sum from emergence to anthesis

2 Temperature sum from anthesis to maturity

3 Specific leaf area

4 Maximum relative increase in LAI

5 Extinction coefficient for diffuse visible light as function of development stage

6 Initial light-use efficiency of CO₂ assimilation of single leaves as function of daily temperature

7 Maximum leaf CO₂ assimilation rate at development stage of the crop growth

استفاده از روابط زیر محاسبه شد (جنسن و هبرگر ۱۹۹۵ و نش و سوتکلیف ۱۹۷۰).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O} \times 100} \quad (3)$$

$$EF = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (4)$$

$$CRM = \frac{[\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i]}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5)$$

$$ME = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)}{n} \quad (6)$$

که در آن:

P_i : مقدار شبیه‌سازی مدل اجزای گیاهی، O_i : مقدار اندازه‌گیری واقعی اجزای گیاهی، n : تعداد اندازه‌گیری واقعی اجزای گیاهی، \bar{O} : میانگین مقادیر اندازه‌گیری اجزای گیاهی است. معادله ۸ نحوه‌ی برآورد شاخص توافق ویلموت (IOA) را نشان می‌دهد (اترینگر و همکاران ۲۰۰۴).

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

که در آن:

P_i : مقدار شبیه‌سازی مدل، O_i : مقدار اندازه‌گیری واقعی، n : تعداد اندازه‌گیری واقعی، \bar{P} و \bar{O} : به ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی است.

بیان و بهره‌وری آب

معادله بیان آب در طول فصل زراعی به صورت زیر در نظر گرفته شد.

$$I + R = E + T + D + \Delta W \quad (8)$$

که اجزای آن شامل I : آبیاری، R : بارندگی، E : تبخیر واقعی، T : تعرق واقعی، D : نشت و نفوذ عمقی و ΔW :

پارامترهای موردنیاز مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک در محدوده توسعه ریشه، نظیر رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی با استفاده از دستگاه صفحات فشاری و پارامترهای هدایت هیدرولیکی به کمک برنامه RETC^۱ تخمین زده شد. برنامه RETC به منظور تحلیل منحنی رطوبتی و توابع هدایت هیدرولیکی به عنوان توابع کلیدی در توصیف کمی جریان غیراشباع آب ارائه شده است (ون گنوختن و همکاران ۱۹۹۱). برای این منظور داده‌های توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری خاک به همراه مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مکش‌های مختلف به نرم افزار RETC وارد و پارامترهای معادله ون گنوختن تعیین شد. برخی خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش عبارت بودند از بافت سیلتی لوم، وزن مخصوص ظاهری ۱/۴ گرم بر سانتی متر مکعب، رطوبت حجمی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی به ترتیب ۳۹ و ۱۷ درصد، رطوبت حجمی در نقطه اشباع ۴۵ درصد و هدایت هیدرولیکی اشباع ۱۸ سانتی متر بر روز (شاهین رخسار و رئیسی ۱۳۹۰).

معیارهای ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل WOFOST از ترکیب روش‌های گرافیکی و آماری، مقایسه مقدار شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک (بیوماس کل) استفاده شد. نمودار پراکنش داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده و خطوط ۱:۱ نیز به منظور نشان دادن تناسب کلی مدل مورد استفاده قرار گرفت. جهت ارزیابی آماری نتایج شبیه‌سازی مدل آزمون t و متغیرهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا، ($RMSE$)، ریشه میانگین مربعات خطای نسبی، ($nRMSE$)، ضریب جرم باقی‌مانده‌ها، (CRM)^۲ و ضریب کارایی مدل (EF)^۳ و خطای متوسط (ME)^۴ با

^۱ Retention Curve

^۲ Root Mean Square Error

^۳ Normalized Root Mean Square Error

^۴ Coefficient of Residual Mass

^۵ Modeling Efficiency

^۶ Mean Error

^۷ Index of Agreement (IOA)

$$WP(I + R) = \frac{Yg}{(I + R)} \quad (12)$$

در روابط فوق WP_I ، WP_{ET} و WP_{I+R} : اجزای بهره‌وری آب (WP_I): بهره‌وری بر اساس میزان آب آبیاری، WP_{ET} : بهره‌وری بر اساس میزان تبخیرتعرق و WP_{I+R} : بهره‌وری بر اساس مجموع آب آبیاری و بارش)، Yg : مقدار عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، T : مقدار تعرق شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی مدل (میلی‌متر)، E : مقدار تبخیر واقعی شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی مدل (میلی‌متر)، R : مقدار بارش (میلی‌متر) و I : مقدار آبیاری (مترمکعب) است. مدل با استفاده از داده‌های آبیاری بهینه واسنجی شد و بر این اساس ضرایب واسنجی مدل به دست آمد. چنانچه مقدار نتیجه آزمون t بیشتر از $0/05$ باشد، بدان مفهوم است که مقادیر شبیه‌سازی پارامتر در سطح احتمال ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری با مقدار اندازه‌گیری شده ندارد.

نتایج و بحث

واسنجی و کارایی مدل در برآورد

نتایج آزمون t نشان داد که مقادیر عملکرد و بیوماس کل شبیه‌سازی شده مدل در سطح احتمال ۹۵ است ($T_{test} > 0/05$) (جدول ۶). نتایج ارزیابی کارایی مدل در برآورد میزان عملکرد نهایی (عملکرد دانه و بیوماس کل) نشان داد بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مطابقت مطلوبی وجود دارد که نشان‌دهنده کارایی بالای مدل است (جدول ۶). ریشه میانگین مربعات خطای عملکرد (RMSE) دو رقم DPX و سپیده $0/23$ و $0/14$ تن در هکتار است. نتایج ستیونوا و همکاران (۲۰۱۰) این مقدار را برای مدل WOFOST $1/61$ تن در هکتار به دست آمد. شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (nRMSE) عملکرد دانه و بیوماس کل در هر دو رقم مورد بررسی کمتر از 10 درصد حاصل شد که در دامنه مورد قبول قرار دارد (جامیسن و همکاران ۱۹۹۱). همچنین بررسی شاخص ضریب جرم باقی‌مانده‌ها از نظر

تغییرات آب ذخیره شده در منطقه توسعه ریشه، است. مقدار آبیاری برای هر کرت توسط کنتور اندازه‌گیری شد (شاهین رخسار و رئیس ۱۳۹۰). عمق آبیاری با هدف جایگزین نمودن رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه تا حد ظرفیت زراعی (FC) برای تیمار آبیاری 100 درصد محاسبه و برای بقیه تیمارها ضرایب مربوطه (75 و 50 درصد) اعمال شد (رابطه ۹). برای به دست آوردن عمق توسعه ریشه در نوبت‌های مختلف آبیاری، از نقاط مختلف مزرعه نمونه‌برداری و عمق توسعه ریشه اندازه‌گیری شد. دور آبیاری تابع میزان تخلیه رطوبت از نیم‌رخ خاک بود. بنابراین دور آبیاری طی فصل رشد یکسان نبوده ولیکن آبیاری تیمارهای آبی به‌طور همزمان انجام می‌پذیرفت. جهت تغییرات آب ذخیره‌شده در منطقه توسعه ریشه رطوبت خاک قبل و بعد از آبیاری با استفاده از روش وزنی، از منطقه توسعه ریشه نمونه‌برداری و اندازه‌گیری شد. پس از توزین نمونه‌ها و خشک‌کردن آن‌ها در آون و به دست آوردن وزن خشک، میزان نشت و نفوذ عمقی و تغییرات آب ذخیره شده در منطقه توسعه ریشه تعیین شد.

$$I = (\theta_{fc} - \theta_i) \times \rho_b \times D_z \quad (9)$$

که در آن:

I : عمق خالص آبیاری، θ_{fc} و θ_i : به ترتیب درصد رطوبت‌های وزنی خاک قبل از آبیاری و ظرفیت مزرعه، ρ_b : وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و D_z : عمق توسعه ریشه (سانتی‌متر) می‌باشند. مقدار بارندگی از ایستگاه هواشناسی فرودگاه گرگان دریافت شد. پتانسیل تبخیرتعرق بر اساس روش پنمن ماتنیث و با استفاده از نرم‌افزار ET.Calculator به‌صورت روزانه محاسبه گردید (فائو ۲۰۰۹). برای محاسبه اجزای بهره‌وری آب از روابط زیر استفاده شد (سینت و همکاران ۲۰۰۸).

$$WPI = \frac{Yg}{I} \quad (10)$$

$$WPET = \frac{Yg}{(E + T)} = \frac{Yg}{ET} \quad (11)$$

رقم سپیده ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برابر ۷/۰۱ درصد، ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۱۴ تن در هکتار، ضریب جرم باقی مانده‌های برابر ۰/۰۹ و شاخص توافق ویلموت ۰/۸۹ در مقایسه با رقم دی پی ایکس با ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برابر ۷/۵۲ درصد، ریشه میانگین مربعات خطای برابر ۰/۲۳ تن در هکتار، ضریب جرم باقی مانده‌های برابر ۰/۰۸ و شاخص توافق ویلموت ۰/۵۷ حاصل شد (جدول ۶). ارزیابی نتایج شبیه‌سازی بیوماس کل ارقام مورد بررسی به‌وسیله‌ی مدل نیز نشان داد ارقام مورد بررسی اختلاف اندکی از نظر شاخص‌های ارزیابی دارند (جدول ۷).

عملکرد دانه و بیوماس کل نزدیک به صفر گزارش شد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی پارامترهای اندازه‌گیری شده است (نش و سوتکلیف ۱۹۷۰). نتایج نشان داد که به جز عملکرد دانه در رقم دی پی ایکس، بقیه پارامترهای مورد بررسی از نظر ارزیابی بر اساس شاخص توافق ویلموت در محدود مطلوب و مقبولی (در حدود ۰/۸۹) هستند که نزدیک بودن به عدد یک نشان‌دهنده قابل اطمینان بودن مقادیر شبیه‌سازی شده است (اتزینگرو همکاران ۲۰۰۴). ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عملکرد دو رقم مورد بررسی از نظر متغیرهای آماری نشان داد در مدل رقم سپیده تطابق بهتری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده وجود دارد. به‌طوری‌که در

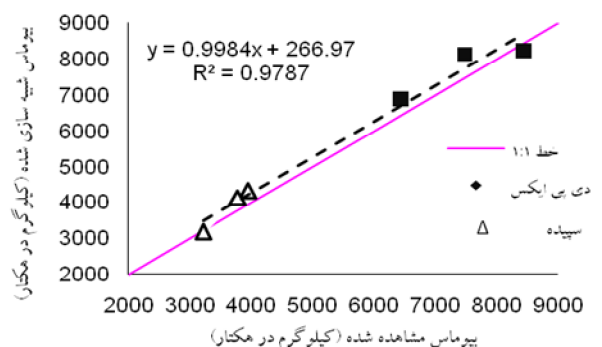
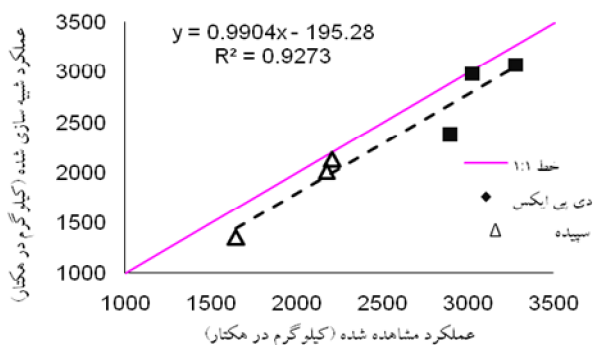
جدول ۶- ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عملکرد و بیوماس کل ارقام مورد بررسی به‌وسیله‌ی مدل WOFOST

رقم	test	CRM	EF	IOA	RMSE (تن در هکتار)	nRMSE (درصد)
عملکرد						
دی پی ایکس	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۹۸	۰/۵۷	۰/۲۳	۷/۵۲
سپیده	۰/۲۹	۰/۰۹	۰/۹۸	۰/۸۹	۰/۱۴	۷/۰۱
بیوماس کل						
دی پی ایکس	۰/۳۵	-۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۰	۰/۳۳	۴
سپیده	۰/۳۱	-۰/۰۶	۰/۹۹	۰/۸۷	۰/۲۱	۵/۶۸

بیوماس کل شبیه‌سازی شده و مشاهده شده به ترتیب برابر با ۰/۹۳ و ۰/۹۹ حاصل شد که کارکرد این مدل را در پیش‌بینی عملکرد سویا مورد تأیید قرار می‌دهد. ستیونوا و همکاران (۲۰۱۰) ضریب تبیین رگرسیون خطی (R^2) را با استفاده از مدل WOFOST ۰/۲۶ به دست آورد.

مقایسه مقادیر عملکرد دانه و بیوماس کل، مشاهده شده و مقادیر شبیه‌سازی شده آن به‌وسیله‌ی مدل، در دو رقم سپیده و دی پی ایکس با خط یک به یک در شکل ۱ نشان داده شده است. ضریب تبیین رگرسیون خطی (R^2) یک‌به‌یک محاسبه شده بین عملکرد دانه و

شکل ۱- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده عملکرد دانه و بیوماس کل برای دو رقم سپیده و دی پی ایکس



در جدول ۸ عملکرد شبیه سازی شده و مشاهده شده ارقام مختلف سویا و درصد خطای متوسط (ME) شبیه سازی به وسیله مدل WOFOST در تیمارهای مختلف آبیاری مشاهده می شود. همان گونه که انتظار می رفت با کاهش مقدار آب مورد نیاز، مقدار عملکرد اندازه گیری شده کاهش یافت و مدل نیز با دقت قابل قبولی کاهش عملکرد شبیه سازی شده را نشان داد. مقادیر منفی خطای متوسط نشان دهنده تخمین کمتر از مقدار مشاهده شده است (نش و سوتکلیف ۱۹۷۰). بر اساس نتایج جدول ۸ مدل در تمام تیمارهای آبیاری عملکرد شبیه سازی شده را کمتر از مقدار مشاهده شده تخمین زده است و با افزایش تنش خشکی مقدار خطای متوسط در هر دو رقم افزایش یافته است. نتایج شبیه سازی ستیونوا و همکاران (۲۰۱۰) با چهار مدل رشد گیاهی سویا نظیر CROPGRO-Soybean، Sinclair-، SoySim و WOFOST نشان داد تمامی

چهار مدل در شبیه سازی عملکرد دانه و بیوماس دارای خطای متوسط (ME) بزرگ تر از صفر بودند که نشان دهنده بیش تخمین مقادیر شبیه سازی شده است. مقایسه کاهش عملکرد بین تیمار آبیاری کامل (I₁₀₀) و تنش شدید (I₅₀) بین دو رقم مورد بررسی نشان داد با افزایش تنش خشکی میزان کاهش عملکرد در رقم سپیده و دی پی ایکس به ترتیب ۳۴ درصد و ۱۳ درصد است. همان گونه که ملاحظه می شود رقم زودرس سپیده در مواجهه با تنش خشکی میزان کاهش عملکرد بیشتری در مقایسه با رقم دیررس دی پی ایکس از خود نشان داد که با نتایج برخی پژوهشگران هم خوانی دارد (هو ۲۰۰۹). نتایج در جدول ۸ نشان داد شبیه سازی به وسیله مدل این برآورد را ۵۷ درصد و ۲۹ درصد تخمین زد که بر اساس میزان خطای نسبی آن در محدوده قابل قبول بود (نش و سوتکلیف ۱۹۷۰).

جدول ۸- مقایسه عملکرد مشاهده و شبیه سازی شده و درصد خطای نسبی شبیه سازی به وسیله مدل WOFOST

تیمار	مشاهده شده		شبیه سازی شده		دی پی ایکس
	(تن بر هکتار)	(تن بر هکتار)	(درصد)	(تن بر هکتار)	
I ₁₀₀	۲/۲۱۰	۳/۲۸۱	-۳/۶	۲/۱۳۰	خطای متوسط (درصد)
I ₇₅	۲/۱۷۵	۳/۰۲۷	-۷/۵	۲/۰۱۲	خطای متوسط (درصد)
I ₅₀	۱/۶۴۸	۲/۸۹۸	-۱۷/۸	۱/۳۵۴	خطای متوسط (درصد)

نتایج بررسی مقادیر بیوماس کل شبیه سازی شده و مشاهده شده ارقام مختلف سویا و درصد خطای نسبی شبیه سازی در مدیریت های مختلف آبیاری به وسیله مدل WOFOST در جدول ۹ نشان داد که مدل برای رقم دی پی ایکس در شرایط آبیاری کامل بیوماس کل را ۲/۵ درصد تخمین کمتر از حد و در شرایط کم آبیاری I₇₅ و I₅₀ بیوماس کل را به ترتیب ۸/۶ و ۶/۹ درصد تخمین بیشتر از حد شبیه سازی می کند. با وجودی که مدل برای رقم سپیده در تیمارهای آبیاری I₇₅ و I₁₀₀ دارای تخمین بیش از حد بود، ولی این

اختلاف ناچیز (خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد) است. در تیمار I₅₀ نیز مدل تخمین کمتر از مقدار مشاهده شده گزارش داد که مقدار اختلاف آن قابل قبول و در حدود ۱/۶ درصد بود. همان گونه که در جدول ۹ ملاحظه می شود تنش خشکی موجب کاهش بیوماس کل در هر دو رقم شد. مدل کاهش بیوماس کل تحت شرایط تنش خشکی را به خوبی شبیه سازی کرد، بنابراین ارزیابی مدل WOFOST بر اساس معیار خطای متوسط (ME) نشان دهنده توانایی مطلوب مدل مذکور در شبیه سازی عملکرد و بیوماس کل ارقام مورد بررسی سویا است.

جدول ۹- مقایسه بیوماس مشاهده و شبیه‌سازی شده و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی به‌وسیله‌ی مدل WOFOST

تیمار	مشاهده‌شده			سپیده		
	مشاهده‌شده (تن بر هکتار)	شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	خطای متوسط (درصد)	مشاهده‌شده (تن بر هکتار)	شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	خطای متوسط (درصد)
I ₁₀₀	۳/۹۵۷	۸/۴۴۰	+۹	۴/۳۱۲	۸/۲۳۲	-۲/۵
I ₇₅	۳/۷۷۸	۷/۴۸۲	+۹/۵	۴/۱۳۷	۸/۱۲۹	+۸/۶
I ₅₀	۳/۲۱۸	۶/۴۴۰	-۱/۶	۳/۱۶۶	۶/۸۸۷	+۶/۹

بیان آب

بررسی اجزای بیان آب و عملکرد سویا نشان داد در تیمارهای کم‌آبیاری به دلیل تنش آبی تعرق گیاه کاهش یافته است (جدول ۱۰). مقدار تعرق در دوره رشد، تحت تأثیر شرایط و وضعیت رطوبتی خاک، کم‌آبی و میزان پوشش گیاهی است. رقم دی پی ایکس بیشترین تبخیر و تعرق را در تیمار آبیاری کامل به میزان ۴۴۴ میلی‌متر داشت. حتی در شرایط تنش خشکی (تیمار آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی) رقم مذکور تبخیر تعرق بیشتری

در مقایسه با رقم سپیده در شرایط آبیاری کامل داشت. بر اساس نتایج کیانی (۱۳۸۹) کاهش عملکرد رقم دی پی ایکس متناسب با کاهش تبخیر تعرق آن نیست و به عبارت دیگر رقم مذکور در مقابل خشکی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. مقایسه میزان آب مصرفی دو رقم نشان داد در شرایط آبیاری کامل مقدار آب مصرفی (مجموع آبیاری و بارندگی) ارقام سپیده و دی پی ایکس به ترتیب ۵۱۳ و ۶۲۵ میلی‌متر برآورد شده است.

جدول ۱۰- اجزای بیان آب و عملکرد سویا در ارقام مختلف در شرایط کم‌آبیاری

رقم	آبیاری	تبخیر (mm)	تعرق (mm)	آبیاری (mm)	تلفات (mm)	بارندگی (mm)	ذخیره
							$\Delta W(mm)$
سپیده	I ₁₀₀	۸۴	۲۱۸	۴۰۸	۱۵۹		۳۰
	I ₇₅	۷۵	۲۰۹	۳۲۰	۸۴	۲۳	۲۵
	I ₅₀	۹۳	۱۵۶	۲۰۰	۸۴		۱۱۰
دی پی ایکس	I ₁₀₀	۸۳	۳۶۱	۵۶۳	۲۱۳		۳۲
	I ₇₅	۸۳	۳۵۶	۴۴۴	۱۲۶	۶۲	۵۹
	I ₅₀	۹۰	۳۰۰	۲۸۵	۴۹		۹۲

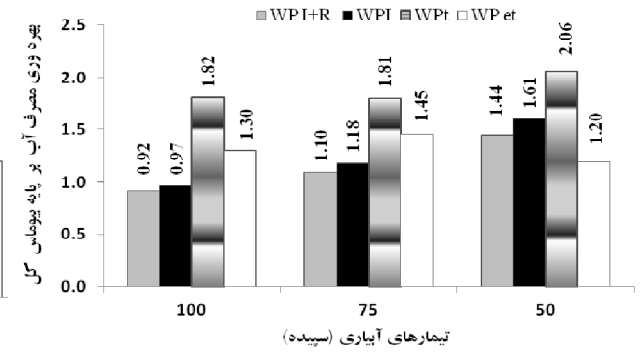
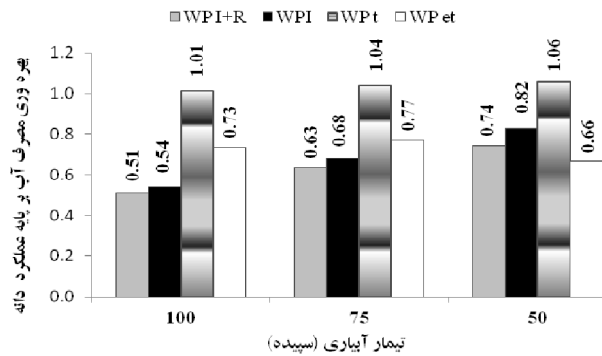
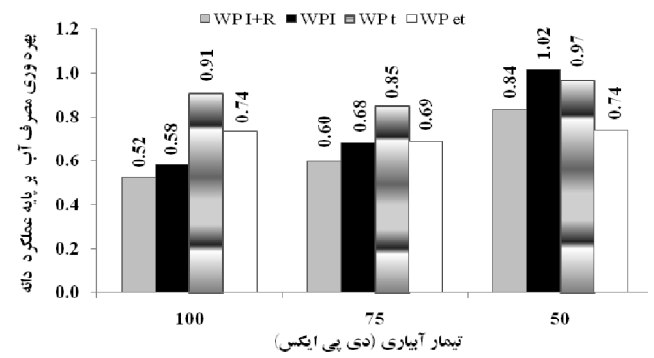
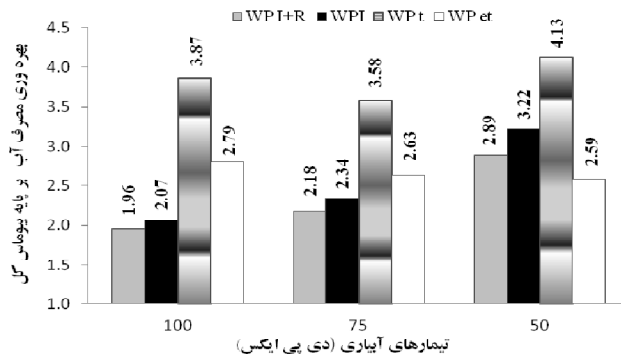
بهره‌وری آب

به‌منظور تخمین اجزای بهره‌وری آب (WP_{I+R} ، WP_I و WP_{ET}) برای مدیریت‌های آبیاری از پارامترهای بیان آب و مقدار عملکرد و بیوماس اندازه‌گیری شده واقعی استفاده شد (شکل ۲ و ۳). نتایج نشان داد که با کاهش مقدار آبیاری، شاخص بهره‌وری مجموع آبیاری و بارش (WP_{I+R}) و بهره‌وری مقدار آبیاری (WP_I) مبتنی بر عملکرد و بیوماس کل در هر دو رقم افزایش یافت که با نتایج امینی فر و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت دارد ولی در

کیانی (۱۳۸۹) دامنه میزان آب کاربردی (مجموع باران مؤثر و آب آبیاری) در شرایط آب و هوایی گرگان برای سه رقم سویا (سحر، G3، DPX) به ترتیب به مقدار ۵۵۰، ۵۸۰ و ۶۴۰ میلی‌متر گزارش کرد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با اعمال کم‌آبیاری تلفات (نفوذ عمقی و رواناب) کاهش یافته است. به‌طوری‌که حداکثر مقدار تلفات آب در آبیاری کامل و رقم دی پی ایکس برابر ۲۱۳ میلی‌متر است. درحالی‌که در همین رقم در شرایط تنش خشکی تلفات ۴۹ میلی‌متر مشاهده شد (جدول ۱۰).

شاخه بندی با تعداد شاخه بیشتر در مقایسه با رقم سپیده عملکرد و بیوماس بیشتری تولید می کند و همین مسئله موجب افزایش بهره وری آب رقم مذکور در شرایط تنش خشکی شده است.

رقم دی پی ایکس با اعمال تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی میزان افزایش این دو شاخص هم در عملکرد و هم در بیوماس کل به ترتیب در حدود ۲۰ و ۵۰ درصد بیشتر از رقم سپیده حاصل شد (شکل ۳ و ۴). به نظر می رسد این رقم از نظر تیپ رشدی با دوره کشت طولانی تر و از نظر تیپ



شکل ۲- مقایسه میزان بهره وری آب در تیمارهای مختلف آبیاری برای ارقام سویا

به دلیل خصوصیات ژنتیکی خود رقم باشد. چرا که از نظر ژنتیکی رقم دی پی ایکس جزء ارقام رشد نیمه محدود است این خاصیت کمک می کند تا این رقم بخشی از آثار زیان بار عوامل محیطی را با ادامه رشد زایشی تعدیل کند (کیانی ۱۳۸۹).

نتیجه گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج ارزیابی آماری و گرافیکی مدل در شبیه سازی فرایند رشد و تأثیر کم آبیاری بر عملکرد دانه و بیوماس کل، کارایی بالای مدل WOFOST تأیید شد. به طوری که شاخص های آماری مورد بررسی در محدوده قابل قبول و مطلوب ارزیابی شدند. از این رو به

تأثیر کاهش تعرق ناشی از تنش خشکی بر افزایش بهره وری آب بر پایه تبخیر تعرق (WP_{ET}) در اشکال ۳ و ۴ ملاحظه می شود، بهره وری آب عملکرد دانه بر پایه تبخیر تعرق (WP_{ET}) به طور متوسط ۰/۷۲ کیلوگرم دانه به ازای هر مترمکعب تبخیر تعرق برای هر دو رقم حاصل شد (شکل ۲ و ۳). مقایسه بهره وری آب بیوماس کل بر پایه تبخیر تعرق (WP_{ET}) نشان داد از رقم دی پی ایکس در آبیاری کامل به ازای هر متر مکعب تبخیر تعرق، بهره وری آب بیشتری یعنی در حدود ۲/۷۹ کیلوگرم بر مترمکعب در مقایسه با رقم سپیده به میزان ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب حاصل شده است (شکل ۳). به نظر می رسد بالا بودن بهره وری آب این رقم در شرایط محدودیت آب

سنجی و واسنجی نهایی مدل انجام شود. بر اساس این نتایج و به دلیل بهره‌وری بالای آب رقم دی پی ایکس، این رقم در شرایط محدودیت آب برای کشت در منطقه گلستان توصیه می‌شود.

نظر می‌رسد می‌توان از این مدل در تعیین استراتژی‌های بهینه مدیریت آب در شرایط کمبود آب و برای کشت سویا استفاده کرد. هرچند پیشنهاد می‌شود مطالعات مزرعه‌ای در چند سال متوالی و با ارقام دیگر برای اعتبار

فهرست منابع

۱. اسدی، م. ا. ۱۳۹۱. مدیریت بهینه آب در گیاهان زراعی. انتشارات نروزی. گرگان.
۲. امیری، ا. رضایی، م. معتمد، م. ک. و امامی، س. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل رشد گیاهی WOFOST در شرایط مدیریت آبیاری. نشریه زراعت (پژوهش و سازندگی) ۹۰: ۹-۱۷.
۳. امینی فر، ج. بیگلویی، م. ح. محسن آبادی، غ. و سمیع زاده، ح. ۱۳۹۰. تأثیر کم آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب در هفت رقم سویا در منطقه رشت. نشریه دانش آب‌وخاک (۴) ۲۱: ۸۱-۹۲.
۴. خواجه پور، م. ر. ۱۳۸۶. گیاهان صنعتی. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان.
۵. سعادت، ز. پیرمردیان، ن. امیری، ا. و رضایی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم برنج تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. نشریه پژوهش آب در کشاورزی (۳) ۲۶: ۳۲۳-۳۳۷.
۶. شاهین رخسار، پ. و رئیسی، س. ۱۳۹۰. بهینه کردن مصرف آب سویا در شرایط خشک‌سالی. نشریه دانش آب‌وخاک، (۴) ۲۱: ۵۳-۶۴.
۷. کیانی، ع. ر. ۱۳۸۹. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری بر اساس رابطه‌ی آب - عملکرد در چند رقم سویا. نشریه تحقیقات مهندسی کشاورزی (۱) ۱۱: ۸۵-۱۰۲.
8. Boogaard, H.L., Van Diepen, C.A., Rotter, R.P., Cabrera, J.C.M. and H.H. Van Laar. 1998. WOFOST 7.1 User guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5, Technical Document 52. DLO Winand Staring Center. Wageningen, the Netherlands.
9. Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z., and M. Dubrovsky. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions, Ecological Modeling. 171: 223-246.
10. FAO, 2009. ETo calculator version 3.1. In: evapotranspiration from Reference Surface. FAO, Land and Water Division, Rome Italy, pp. 1-65.
11. Farahani, H.J., Izzi, G., and T.Y. Oweis. 2009. Parameterization and evaluation of the Aqua Crop model for full and deficit irrigated cotton, Agronomy Journal, 101: 469-476.
12. Hu, X. 2009. Comparative response of early – maturing and late – maturing soybean cultivars to an irrigation gradient. M.sc. thesis. University of arkansas.USA. Division of agriculture. P133.
13. Jamieson, P.D., Porter, J.R., and D.R. Wilson. 1991. A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research, 27: 337-350.
14. Janssen, P.H.M., and P.S.C. Heuberger. 1995. Calibration of process-oriented models. Ecological Modeling, 83: 55-66.
15. Kang, S., Shi, W., and J. Zhang. 2000. An improved water use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. Field Crop Resource, 67: 207-214.

16. Marletto, V., Ventura, F., Fontana, G., and F. Tomei. 2007. Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model. *Agriculture Meteorology*, 147: 71–79.
17. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part 1. A discussion of principles, *Hydrology Journal*. 10:282–290.
18. Pedersen, P., Boote, K. J., Jones, J.W., and J.G. Lauer. 2004. Modifying the CROPGRO Soybean model to improve predictions for the upper Midwest. *Agronomy Journal*, 96:556–564.
19. Setiyono, T.D., Cassman, K.G., Spechta, J.E., Dobermann, A., Weis, A., Yang, H., Conley, S.P., Robinson, A.P., Pedersen, P., and J.L. De Bruin. 2010. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. *Field Crops Research*, 119:161–174.
20. Singh, A.K., Tripathy, R., and U. K. Chopra. 2008. Evaluation of CERES Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95: 776-786.
21. Van Genuchten, M.T.H., Leij, F.J., and S.R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. U.S. Salinity Laboratory. Department of agriculture, Agricultural research service. Riverside, California.