

ارزیابی مدل‌های گیاهی WOFOST و SWAP، ORYZA2000

در مدیریت‌های مختلف آبیاری

ابراهیم امیری*، مسعود کاوسی و فریدون کاوه**

* نگارنده مسئول، نشانی: لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، ص. پ. ۱۶۱۶، تلفن: ۰۱۴۱(۲۲۲۹۰۸۱).

پیام‌نگار: eamiri57@yahoo.com

** به ترتیب استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان؛ استادیار پژوهش مؤسسه تحقیقات برنج کشور؛ و دانشیار دانشگاه آزاد

اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

تاریخ دریافت: ۸۷/۶/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۵/۳

چکیده

مدل‌های SWAP، ORYZA2000 و WOFOST رشد و توسعه برنج را در شرایط تولید پتانسیل و کمبود آب شبیه‌سازی می‌کنند. برای ارزیابی مدل‌ها، تحقیقی در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات برنج کشور، در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با ۶ مدیریت آبیاری به عنوان تیمار، در سه تکرار طی سال زراعی ۸۴ روی رقم هاشمی اجرا شد. مدیریت‌های آبیاری شامل غرقاب دائم، آبیاری پس از ۱، ۳، و ۵ روز محو شدن آب از سطح زمین و آبیاری با دوره‌های ۵ و ۸ روز بود. مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده بیوماس کل، بیوماس پانیکول، شاخص سطح برگ، و عملکرد نهایی با استفاده از پارامترهای ضریب تبیین، جذر میانگین مجذور خطا و جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده ارزیابی شد. به طور میانگین، مقدار جذر میانگین مجذور خطای بیوماس کل سه مدل SWAP، ORYZA2000 و WOFOST به ترتیب ۱۶۳، ۴۵۸ و ۵۸۹ و بیوماس پانیکول ۳۷۵، ۲۸۴ و ۳۳۵ کیلوگرم بر هکتار و شاخص سطح برگ ۰/۴۱، ۰/۵۳ و ۰/۵۰ محاسبه شد. در بررسی شبیه‌سازی مقدار عملکرد نهایی با این سه مدل مشخص شد که مدل ORYZA2000 نسبت به دو مدل دیگر دقت بیشتری دارد.

واژه‌های کلیدی

ارزیابی، برنج، بیوماس، شبیه‌سازی، مدل

مقدمه

(De Wit, 1965) است. استفاده از آن گزارش در شبیه‌سازی فرایندهای گیاهی، با مدل ELCROS (De Wit et al., 1970) آغاز شد. ELCROS به مدل جامع‌تر BACROS (De Wit et al., 1978) توسعه یافت، که میزان رشد پتانسیل و تعرق گیاه را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل‌ها شروعی بود برای توسعه مدل‌های رشد گیاهی مانند مدل SUCROS. برای شبیه‌سازی فرایندهای رشد گیاهی و شبیه‌سازی تأثیر عوامل محیطی (تنش آبی، شوری، آفات و...) بر گیاهان از طریق تغییر پارامترهای خاص گیاه و انتخاب روش‌های مشخص، مدل‌های متعددی از مدل SUCROS ایجاد شد، که هر یک روی مدل اصلی SUCROS ساخته شده است، که از آن جمله می‌توان مدل‌های SWAP، ORYZA2000 و WOFOST

مدل‌سازی در ابتدا برای افزایش دانش علمی در زمینه چگونگی سپری شدن مراحل رشد در گیاهان به کار برده می‌شد، بعد از آنکه تلاش‌ها در تحقیقات کشاورزی به سمت استفاده‌های علمی به‌جای یافته‌های تئوریک تغییر مسیر داد، توسعه مدل‌سازی به‌واسطه تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی به منظور پیش‌بینی عملکرد گیاهان سوق پیدا کرد (Bouman et al., 1996). برای توسعه مدل‌های کشاورزی در دنیا گروه‌هایی متفاوت وجود دارند که یکی از آنها، گروه «مدرسه دی ویت، دانشگاه واگنینگن» (Bouman et al., 1996) است. منشا مدل‌های گیاهی گروه مدرسه دی ویت، گزارش منتشر شده دی ویت در مورد تخمین فتوسنتز کانوبی برگ

فدس و همکاران (Feddes *et al.*, 1978) برای شبیه‌سازی جریان آب، مدل زراعی هیدرولوژیکی SWATR را توسعه داد، که ون دام و همکاران (van Dam *et al.*, 1997)، آن را برای جریان آب، املاح، گرما، و بیوماس گیاهی گیاهان مختلف با عنوان SWAP توسعه دادند که توانایی شبیه‌سازی رشد و نمو را در شرایط پتانسیل و محدودیت آبی و شوری دارد. در ایران، خانی قریه گپی و همکاران (Khani Gharieghi *et al.*, 2007) این مدل را به منظور برآورد عملکرد چغندر قند در شرایط آبیاری و تنش شوری مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که این مدل عملکرد را کمتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی می‌کند؛ ضریب تبیین (R^2) بین عملکرد شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده ۰/۸۶ محاسبه شد. محققانی از SWAP برای شبیه‌سازی رشد گیاه در شرایط تنش آب و شوری استفاده کردند که از بین آنها می‌توان به: سینگ (Singh, 2005)، نیوت و همکاران (Neut *et al.*, 1995) و ون دم و مالیک (van Dam & Malik, 2003) اشاره کرد.

هدف از این مقاله ارزیابی مدل‌های ORYZA2000، SWAP و WOFOST است که شامل واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها برای شبیه‌سازی اجزای مختلف گیاهی (بیوماس کل اندام هوایی، بیوماس پانیکول و شاخص سطح برگ) و عملکرد برنج است.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل‌های ORYZA2000، SWAP و WOFOST
مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش، توسعه فنولوژی، شکل‌گیری، و رشد گیاه را از آغاز جوانه‌زنی تا زمان رسیدن بر اساس خواص گیاهان و شرایط محیطی شبیه‌سازی می‌کنند. اصول محاسبه، تولید ماده خشک بر اساس سرعت ناخالص جذب دی اکسید کربن از سطح سایه‌انداز است، که به انرژی تابشی جذب شده بستگی

را نام برد. مدل (World Food Studies) WOFOST در چارچوب مطالعات جهانی امنیت غذا، توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی ایجاد شد که توانایی شبیه‌سازی بیوماس را در اندام‌های مختلف گیاهی، شاخص سطح برگ^۱، و عملکرد در شرایط بدون تنش (حالت پتانسیل)، تنش آبی، و تنش مواد مغذی دارد (Boogaard *et al.*, 1998). اولین مطالعه بر مبنای WOFOST به تولید پتانسیل مواد غذایی می‌پردازد که منجر به افزایش استفاده از کودشیمیایی در سه کشور آفریقایی و بوکینافاسو، غنا، و کنیا شد (Anon, 1985; Huygen, 1990). رویتر از این مدل برای شبیه‌سازی رشد برنج در آسیا استفاده کرد (Roetter *et al.*, 1998). از مدل WOFOST در سیستم پایش رشد گیاهی برای تخمین عملکرد گیاهان مختلف نظیر گندم، جو، پنبه، آفتابگردان، برنج، سویا، سیب‌زمینی و دانه‌های روغنی در اتحادیه اروپا استفاده شده است (Rabbinge & van Latesteijn, 1992; Boogaard *et al.*, 2002).

مرکز تحقیقاتی دانشگاه واگنینگن و مؤسسه بین‌المللی تحقیقات برنج در اواسط دهه ۹۰ مدل ORYZA را در مورد رشد برنج در زمین‌های پست استوایی ارائه دادند. اولین نسخه مدل، ORYZA1 مربوط به تولید پتانسیل (Kropff *et al.*, 1994)، دومین نسخه مدل، ORYZA-N برای رشد در شرایط محدودیت به نیتروژن (Drenth *et al.*, 1994)، و سپس ORYZA-W برای تولید تحت شرایط کمبود آب (Wopereis *et al.*, 1996) معرفی شد. آخرین نسخه این مدل ORYZA2000 است. مدل ORYZA2000، رشد و نمو گیاه برنج را در شرایط عملکرد پتانسیل، محدودیت آبی، و محدودیت نیتروژن شبیه‌سازی می‌کند (Bouman *et al.*, 2001). از محققانی که از مدل ORYZA2000 استفاده کرده‌اند بلدر و همکاران (Belder *et al.*, 2007)، بولینگ و بومن و فان لار (Bouling *et al.*, 2007) و van Laar (2006) هستند.

مدل **WOFOST** می‌تواند رشد و نمو بسیاری از گیاهان زراعی را شبیه‌سازی کند اما فقط در شرایط محدودیت آبیاری؛ بین سه مدل مورد استفاده در این پژوهش این مدل تنها مدلی است که می‌تواند تأثیر کیفیت آب (شوری) را بر گیاهان شبیه‌سازی کند.

بخشی از داده‌های ورودی به مدل‌ها یکسان است نظیر پارامترهای هواشناسی (حداقل دما، حداکثر دما، بارندگی، سرعت باد، رطوبت نسبی، و ساعات آفتابی)، مقدار و زمان آبیاری، و برخی خواص هیدرولیکی لایه‌های خاک. اما اختلاف بین مدل‌ها در داده‌های ورودی بدین شرح است که مدل **ORYZA2000** دوره زندگی برنج در خزانه را نیز در بر می‌گیرد ولی دو مدل دیگر فقط دوره زندگی برنج در زمین اصلی را به عنوان داده ورودی مدل در نظر می‌گیرند. مدل **ORYZA2000** نیاز به داده‌های بیشتری از گیاه و خاک دارد نظیر تعداد کپه در هر متر مربع، تعداد نشا در هر کپه، و مقدار نشت و نفوذ عمقی. مدل **WOFOST**، یک لایه عمق توسعه ریشه دوانی را در نظر می‌گیرد اما در دو مدل دیگر می‌توان چند لایه خاک را معرفی نمود.

بارزترین اختلاف سه مدل، علاوه بر موارد ذکر شده، در زیر مدل جذب آب خاک توسط ریشه است: برای شبیه‌سازی مقدار جذب آب در شرایط تنش آبی در مدل **SWAP** از توابع ریچاردز و فدس استفاده می‌شود (Brooks & Corey, 1964; Mualem, 1976; Feddes *et al.*, 1978; van Genuchten, 1980). مدل **WOFOST**، محدوده رطوبت خاک برای رشد بدون کاهش عملکرد گیاهان تابعی از تعرق است. در مدل **WOFOST** به منظور تخمین مقدار آب در خاک برای جذب گیاه از اصول بیلان آب استفاده می‌شود (Doorenbos & Kassam, 1979; Driessen, 1986). در مدل **ORYZA2000**، تمام عوامل خشکی تابعی از مکش آب- خاک (pF) در اطراف ریشه تعریف

دارد و تابعی از تشعشع و سطح برگ گیاه است. در مراحل اولیه رشد، برگ‌ها روی یکدیگر سایه نمی‌اندازند و رشد سطح برگ بر اثر مقدار جذب موجود محدود نمی‌شود. در این مرحله، معادله رشد سطح برگ به صورت نمایشی است. پس از آنکه برگ‌ها روی یکدیگر شروع به سایه‌اندازی می‌کنند، رشد سطح برگ بر اثر مقدار کربوهیدرات موجود برای رشد برگ محدود می‌شود. در این حالت، معادله رشد سطح برگ خطی است؛ افزایش سطح برگ بر اساس افزایش وزن برگ محاسبه می‌شود که تابعی از مرحله رشد است. امکان شبیه‌سازی فرایندهای رشد در مدل‌ها به صورت دینامیکی با گام زمانی متغیر، یک روزه است (van Dam *et al.*, 1997; Boogaard *et al.*, 1998; Bouman *et al.*, 2001).

دو مدل **SWAP** و **WOFOST** در بخش توسعه فنولوژیکی، کل دوره رشد گیاه برنج را به دو بخش تقسیم می‌کنند: ۱- دوره رویشی: از نشا تا زمان گلدهی و ۲- دوره زایشی: از گلدهی تا زمان رسیدگی فیزیولوژیکی که از اصول مجموع درجه حرارت برای تخمین یا تعیین سرعت رشد استفاده می‌کنند (Boogaard *et al.*, 1998; van Dam *et al.*, 1997). در مدل **ORYZA2000**، دوره رشد برنج به چهار مرحله فنولوژیکی تقسیم می‌شود: ۱- از جوانه‌زنی تا شروع مرحله حساس به نور (دوره رویشی)، ۲- از پایان دوره رویشی پایه تا ظهور پانیکول، ۳- از ظهور پانیکول تا گلدهی، و ۴- از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژی (Bouman *et al.*, 2001).

مدل **WOFOST** توانایی شبیه‌سازی رشد و نمو بسیاری از گیاهان زراعی را در شرایط محدودیت آبیاری، محدودیت مواد مغذی (نیتروژن، فسفر، و پتاسیم) دارد. مدل **ORYZA2000** مدل اختصاصی برنج است و رشد و نمو گیاه برنج را در شرایط محدودیت آبیاری و کود نیتروژن‌دار شبیه‌سازی می‌کند. مدل **SWAP** نیز مانند

می‌شود:

$$pF = \log | h/ \quad (1)$$

که در آن، h = مکش آب - خاک (سانتی متر) است.

مشخصات محل پژوهش

محل اجرای پژوهش، مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات برنج کشور (رشت) در موقعیت ۴۹ درجه و ۳۸ دقیقه و ۲۸ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۲ دقیقه و ۱۹ ثانیه عرض شمالی در ارتفاع ۷ متری پایین تر از سطح دریای آزاد واقع شده است.

مدیریت‌های آبیاری و اندازه‌گیری گیاهی و خاک

برای واسنجی و صحت‌سنجی سه مدل WOFOST، SWAP، ORYZA2000 در سال زراعی ۱۳۸۴ مدیریت‌های آبیاری مختلفی در سه تکرار و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی روی گیاه برنج رقم هاشمی اجرا شد. مدیریت‌های آبیاری شامل آبیاری غرقاب دائم، آبیاری پس از ۱، ۳، و ۵ روز از محو شدن آب از سطح زمین، و آبیاری با دور ۵ و ۸ روزه هستند. مقدار آب در مدیریت‌های آبیاری به ترتیب ۶۸۶، ۵۳۲، ۴۰۱، ۳۸۳، ۳۶۲ و ۲۹۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. دفعات آبیاری به ترتیب ۲۰، ۱۴، ۱۱، ۱۰ و ۸ روز برای هر مدیریت آبیاری بود. برخی از خصوصیات خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

عمق (سانتی‌متر)	رس (درصد)	لوم (درصد)	شن (درصد)	رطوبت ظرفیت زراعی (حجمی)	رطوبت نقطه پژمردگی (حجمی)	وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	فسفر قابل جذب (قسمت در میلیون)	کربن آلی (درصد)	نیترژن کل (درصد)	پتاسیم قابل جذب (قسمت در میلیون)
۰-۱۰	۴۷	۳۹	۱۷	۰/۴	۰/۲۷	۱/۱	۱۰/۱	۱/۷۲	۰/۱۶	۱۹۵
۱۰-۲۰	۴۴	۳۹	۱۷	۰/۴	۰/۳۰	۱/۲	۷/۳	۱/۵۴	۰/۱۴	۱۷۶
۲۰-۳۰	۴۷	۴۴	۹	۰/۴۱	۰/۳۰	۱/۳۲	۵/۲	۱/۲۵	۰/۰۷۴	۱۸۵
۳۰-۴۰	۴۷	۴۲	۱۱	۰/۴۲	۰/۳۰	۱/۳۱	۳/۲	۰/۷۶	۰/۰۴۷	۱۶۱

آزمایش‌ها در کرت‌هایی به ابعاد ۵×۳ متر اجرا شد. بذرپاشی در خزانه در اواخر فروردین انجام شد؛ نشاها پس از ۳-۴ برگی شدن؛ در اوایل خرداد به زمین اصلی منتقل شدند. تعداد نشا در هر کپه ۳-۴ و فاصله کپه از یکدیگر ۲۰ سانتی‌متر بود. پس از انتقال نشاها به زمین اصلی، کرت‌ها به مدت ۱۰ روز تمام غرقاب دائم نگه داشته شدند تا نشاها استقرار یابند. پس از آن تیمارهای آب در کرت‌ها بر مبنای برنامه اعمال شد. مقدار آب مورد نیاز

برای هر کرت با سیستم لوله‌کشی مجهز به شیر فلکه‌های کنترل تأمین و توسط کنترلر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ماده خشک در اجزای مختلف برنج (برگ، ساقه، و پانیکول) که برای واسنجی هر سه مدل مورد نیاز بود، در طول فصل زراعی در مدیریت‌های آبیاری در هر نوبت اندازه‌گیری، تعداد ۸-۱۲ کپه از هر مدیریت برداشت شد. ابتدا مقدار سطح برگ سبز با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ مدل L13100 ساخت شرکت

اندازه‌گیری‌های واقعی اجزای گیاهی؛ \bar{O} = میانگین مقادیر اندازه‌گیری واقعی اجزای گیاهی؛ $RMSE$ = جذر میانگین مجذور خطا؛ و $RMSE_n$ = جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده است. مقادیر جذر میانگین مجذور خطا و جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده در حالت اپتیمم یا حالتی که مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده مساوی باشند، برابر با صفر هستند، آشکار است هر چه مقدار این دو پارامتر به صفر نزدیک‌تر باشد مدل دقیق‌تر است.

نتایج و بحث

برای واسنجی پارامترهای گیاهی هر سه مدل، از مقادیر اندازه‌گیری شده بیوماس (برگ، برگ مرده، ساقه، و پانیکول) و شاخص سطح برگ تحت شرایط تولید پتانسیل (آبیاری در شرایط غرقاب) استفاده گردید. از مقادیر اندازه‌گیری شده بیوماس (کل و پانیکول) و شاخص سطح برگ تحت شرایط غیرغرقاب برای صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شد. پارامترهایی که در مرحله واسنجی ORYZA2000 باید تغییر می‌یافتند شامل: سرعت توسعه فنولوژیکی در چهار فاز (رویشی پایه، حساسیت به نور، شکل‌گیری پانیکول، و پر شدن دانه)، حداکثر سرعت رشد نسبی سطح برگ، کسر ذخیره ساقه، سرعت مرگ برگ در دوره رویش، سطح ویژه برگ در دوره رویش، و فاکتور تفکیک ماده خشک بین برگ، ساقه، و پانیکول در دوره رویش بودند.

در جدول ۲ پارامترهای آماری ارزیابی (واسنجی و صحت‌سنجی) نتایج مدل‌ها ارائه شده است. جذر میانگین مجذور خطای بیوماس کل اندام هوایی مدل ORYZA2000 در شرایط واسنجی ۵۸۰ کیلوگرم در هکتار و در صحت‌سنجی در محدوده ۵۳۲ تا ۸۷۱ کیلوگرم در هکتار، جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده بیوماس کل در واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده ۱۴ تا ۲۴ درصد محاسبه شد. جذر میانگین مجذور خطای بیوماس

Li-COR به دست آمد و پس از آن اجزای مختلف گیاه در داخل گرمخانه به مدت ۲ روز در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. پس از توزین نمونه‌ها، میزان ماده خشک در اجزای مختلف برنج ثبت گردید. با مراجعه به مزرعه تاریخ اولین خوشه‌دهی، گلدهی، و رسیدگی در مدیریت‌های آبیاری ثبت شد. برای تعیین عملکرد دانه، ۵ متر مربع از هر کرت پس از حذف حاشیه، درو و مقدار آن ثبت شد. با استفاده از دستگاه صفحات فشاری، مقدار رطوبت‌های مورد نیاز (میزان رطوبت در نقطه پژمردگی، ظرفیت مزرعه‌ای) محاسبه شد. مدل‌ها نیاز به هدایت هیدرولیکی اشباع در محدوده توسعه ریشه و رطوبت در نقطه اشباع دارند که با کمک مدل ROSETTA که با مدل RETC لینک شده است، این موارد تخمین زده شد (van Genuchten *et al.*, 1991).

معیارهای ارزیابی نتایج مدل‌ها

در ارزیابی مدل‌ها، از ترکیب پارامترهای آماری و گرافیکی (نمایشی) استفاده شد. مقدار شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده بیوماس کل، بیوماس پانیکول، شاخص سطح برگ، و عملکرد نهایی برای هر مدیریت آبیاری با تعیین ضریب تبیین (R^2) به صورت گرافیکی مقایسه شد. جهت ارزیابی آماری نتایج شبیه‌سازی بیوماس کل، بیوماس پانیکول، شاخص سطح برگ، و عملکرد نهایی از پارامترهای آماری زیر استفاده شد (Bouman & van Laar, 2006):

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right)^{0.5} \quad (2)$$

$$RMSE_n = 100 \left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right)^{0.5} / \bar{O} \quad (3)$$

که در آن، P_i = مقدار شبیه‌سازی اجزای گیاهی مدل؛ O_i = مقدار اندازه‌گیری واقعی اجزای گیاهی؛ n = تعداد

برداشت) است. سایر پارامترهای گیاهی مدل WOFOST که در مرحله واسنجی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در شرایط آبیاری غرقاب دایم به دست می‌آید عبارت است از: ماده خشک اولیه در روز انتقال نشا به زمین اصلی، سطح ویژه برگ در دوره رویش، بازده مصرف نور توسط تک برگ، و فاکتور تفکیک ماده خشک بین برگ، ساقه، و پانیکول در دوره رویش. در مرحله صحت‌سنجی مدل، به علت اینکه شرایط غیرغرقاب وجود دارد، مدل نیاز به داده ورودی خاک نیز دارد.

جذر میانگین مجذور خطای بیوماس کل در حالت واسنجی مدل WOFOST، ۴۴۵ و در صحت‌سنجی ۳۸۹ تا ۵۵۳ کیلوگرم بر هکتار، جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده بیوماس کل در واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده ۱۰ تا ۱۴ درصد محاسبه شد. جذر میانگین مجذور خطای بیوماس پانیکول در واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده ۱۳۹ تا ۴۲۰ کیلوگرم بر هکتار، جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده بیوماس پانیکول در واسنجی و صحت‌سنجی ۷ تا ۱۶ درصد محاسبه گردید. جذر میانگین مجذور خطای شاخص سطح برگ در حالت واسنجی ۰/۴۶ و در شرایط صحت‌سنجی ۰/۵۱-۰/۵۸ متر مربع برگ بر متر مربع زمین و جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده شاخص سطح برگ در واسنجی و صحت‌سنجی ۵۴ تا ۸۳ درصد به دست آمد. مقدار ضریب تبیین بیوماس کل در محدوده ۰/۹۷ تا ۰/۹۸، بیوماس پانیکول ۰/۹۵-۰/۹۹ و شاخص سطح برگ ۰/۶۶-۰/۷۸ محاسبه شد. مدل در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ دقت مناسبی ندارد و مقدار آن را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی می‌کند، نتایج تحقیق رویتر و همکاران (Roetter et al., 1998) نیز همین یافته را نشان می‌دهد.

پانیکول در واسنجی ۲۳۴ و در صحت‌سنجی در محدوده ۳۶۹ تا ۴۷۳ کیلوگرم در هکتار، جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده بیوماس پانیکول در واسنجی و صحت‌سنجی ۱۰ تا ۲۴ محاسبه شد. جذر میانگین مجذور خطای شاخص سطح برگ در شرایط واسنجی ۰/۲۳ و در شرایط صحت‌سنجی ۰/۳۵ تا ۰/۵۲ متر مربع برگ بر متر مربع زمین، جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده شاخص سطح برگ در واسنجی و صحت‌سنجی ۷۰ تا ۲۷ درصد به دست آمد. همچنین مقدار ضریب تبیین بیوماس کل در محدوده ۰/۹۴ تا ۰/۹۸، بیوماس پانیکول ۰/۹۴ تا ۰/۹۸ و شاخص سطح برگ ۰/۶۴ تا ۰/۹۲ محاسبه گردید. در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ می‌توان تغییرات شبیه‌سازی- اندازه‌گیری بیوماس کل، بیوماس پانیکول و شاخص سطح برگ را در مدیریت‌های آبیاری در دوره رویش برنج برای سه مدل استفاده شده در این پژوهش مشاهده کرد. نتایج، نشان از قابل قبول بودن دقت مدل به منظور شبیه‌سازی بیوماس کل و پانیکول دارد. نتایج تحقیق بولینگ و همکاران (Boling et al., 2007)، بلدر و همکاران (Belder et al., 2007)، و بومن و فان لار (Bouman & van Laar, 2006) مناسب بودن مدل ORYZA2000 را در شبیه‌سازی بیوماس کل و پانیکول نشان می‌دهد، اما این مدل در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ دقت مناسب ندارد و مقدار آن را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی می‌کند. نتایج تحقیق بومن و فان لار (Bouman & van Laar, 2006)، شبیه‌سازی بیشتر شاخص سطح برگ توسط مدل را نشان داد.

در مدل WOFOST، اولین جزیی که باید واسنجی شود معرفی فنولوژی گیاه برنج است که شامل دوره رشد رویشی (نشا- گلدهی) و دوره رشد زایشی (گلدهی-

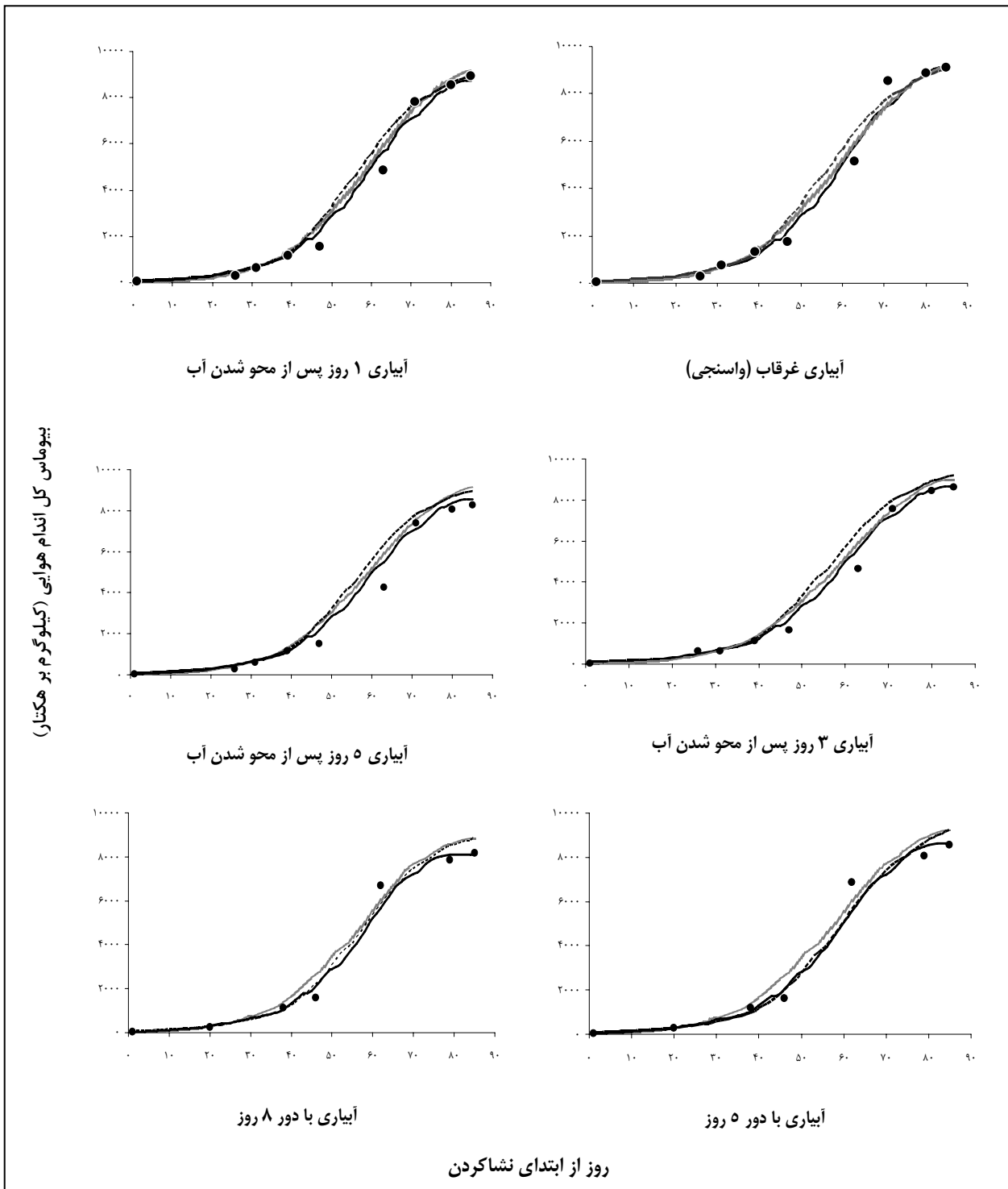
جدول ۲- مقایسه آماری و گرافیکی (نمایشی) نتایج سه مدل SWAP، WOFOST و ORYZA2000

ضریب تبیین			جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده									جذر میانگین مجذور خطا									مدیریت آبیاری								
			بیوماس پانیکول (-)			بیوماس کل (-)			شاخص سطح برگ (درصد)			بیوماس پانیکول (درصد)			بیوماس کل (درصد)			شاخص سطح برگ (-)				بیوماس پانیکول (کیلوگرم بر هکتار)			بیوماس کل (کیلوگرم بر هکتار)				
S	W	O	S	W	O	S	W	O	S	W	O	S	W	O	S	W	O	S	W	O	S	W	O	S	W	O	S	W	O
۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۹۲	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۵۵	۵۴	۲۷	۶	۷	۱۰	۱۳	۱۱	۱۴	۰/۴۷	۰/۴۶	۰/۲۳	۱۴۸	۱۳۹	۲۳۴	۵۲۸	۴۴۵	۵۸۰	غرقاب		
۰/۱۶	۰/۱۶۷	۰/۱۷۷	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۷۹	۷۸	۴۷	۱۰	۱۲	۲۱	۱۳	۱۱	۱۶	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۳۵	۲۲۴	۲۱۶	۳۹۲	۵۰۱	۴۲۲	۶۲۰	۱ روز پس از محو شدن آب		
۰/۱۵۶	۰/۱۶۶	۰/۱۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۴	۸۴	۷۷	۶۷	۱۲	۱۴	۲۰	۱۴	۱۰	۲۰	۰/۶۱	۰/۵۶	۰/۴۹	۲۵۸	۲۵۰	۳۶۹	۵۳۲	۳۸۹	۷۶۱	۳ روز پس از محو شدن آب		
۰/۱۶۸	۰/۱۷۸	۰/۱۷۲	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۶	۹۳	۸۳	۶۹	۱۸	۱۳	۲۴	۲۱	۱۴	۲۴	۰/۶۲	۰/۵۵	۰/۴۲	۳۶۴	۲۳۳	۴۰۷	۷۳۶	۵۰۶	۸۷۱	۵ روز پس از محو شدن آب		
۰/۱۷۹	۰/۱۷۳	۰/۱۶۷	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۴۷	۷۷	۷۰	۲۲	۱۵	۲۰	۱۶	۱۴	۱۵	۰/۳۴	۰/۵۶	۰/۵۲	۴۳۷	۴۲۰	۳۹۶	۶۳۷	۵۵۳	۵۵۵	دور آبیاری ۵ روزه		
۰/۱۷۷	۰/۱۷۶	۰/۱۶۴	۰/۹۲	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۵۴	۷۳	۷۰	۲۴	۱۶	۲۴	۱۶	۱۱	۱۴	۰/۳۸	۰/۵۱	۰/۴۹	۵۸۲	۳۱۶	۴۷۳	۶۰۱	۴۳۷	۵۳۲	دور آبیاری ۸ روزه		
			۰/۱۶۰	۰/۱۶۲	۰/۱۸۳				۵	۵	۲				۱۷۵	۲۳۵	۵۸							عملکرد					

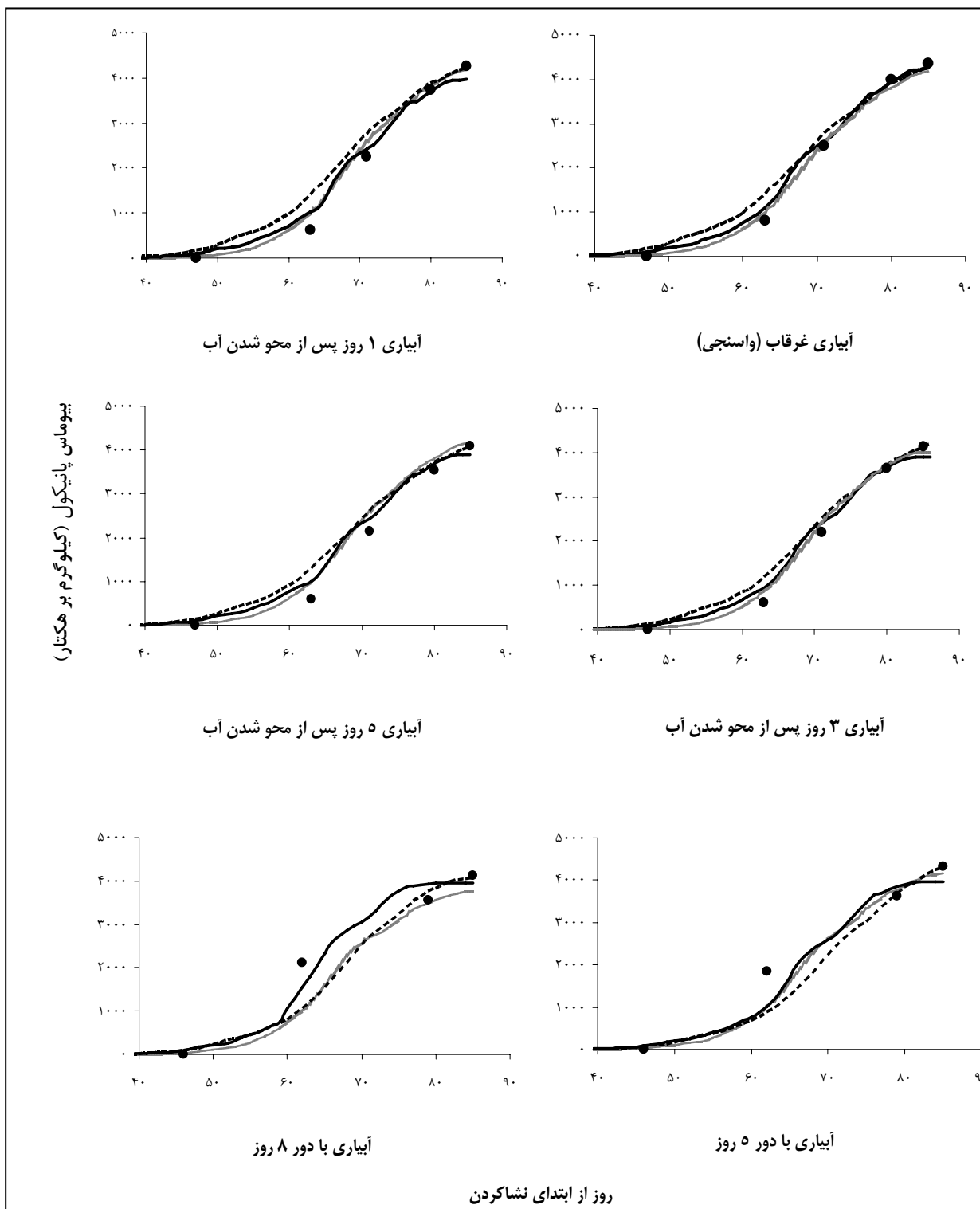
O=مدل ORYZA2000، S=مدل SWAP، W=مدل WOFOST

برگ بر متر مربع زمین و جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده شاخص سطح برگ در واسنجی و صحت-سنجی ۴۷ تا ۹۳ درصد به دست آمد. همچنین ضریب تبیین بیوماس کل در محدوده ۰/۹۷ تا ۰/۹۹، بیوماس پانیکول ۰/۹۲ تا ۰/۹۹ و شاخص سطح برگ ۰/۵۶ تا ۰/۷۹ محاسبه شد. نتایج تحقیقات ون دام و مالیک (van Dam & Malik, 2003)، وان دام (van Dam, 2000)، و سینگ (Singh, 2005) مناسب بودن مدل PEST را به منظور واسنجی پارامترهای گیاهی (همانند پارامترهای مدل WOFOST) و خاک (معادله ون گنوختن - معلم) مدل SWAP نشان داده است. نتایج شبیه‌سازی مقدار بیوماس کل و بیوماس پانیکول، نشان از دقت مدل در شبیه‌سازی آنها دارد. نتایج تحقیق ون دام و مالیک (van Dam & Malik, 2003) و سینگ (Singh, 2005) نیز مناسب بودن مدل SWAP را در شبیه‌سازی بیوماس کل و پانیکول برای برنج نشان می‌دهد. اما مدل در تخمین شاخص سطح برگ دقت مناسب ندارد. نتایج تحقیق ون دام و مالیک (van Dam & Malik, 2003) و سینگ (Singh, 2005)، شبیه‌سازی بیشتر شاخص سطح برگ مدل SWAP را برای برنج نشان می‌دهد.

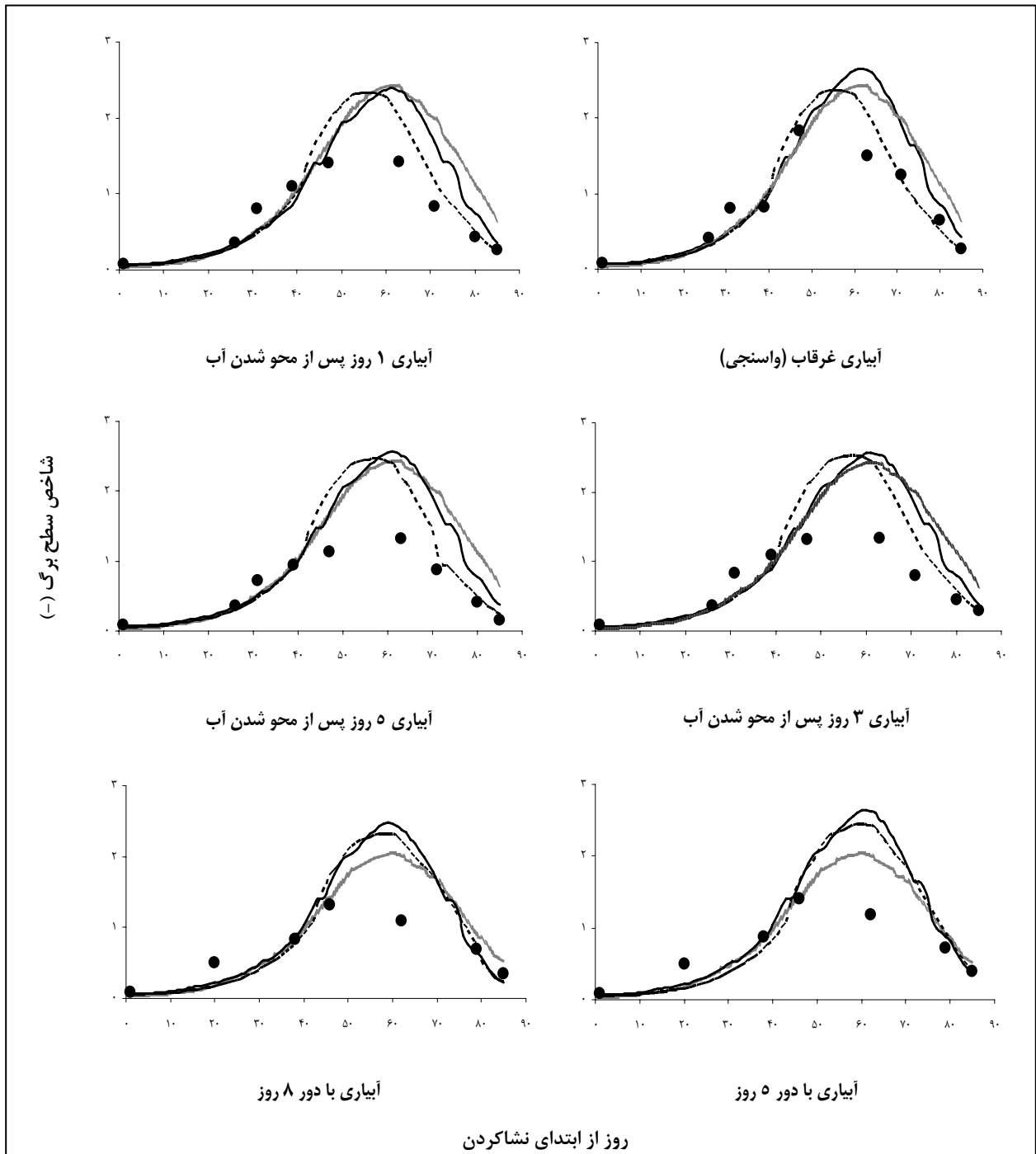
به منظور واسنجی پارامترهای مدل SWAP، از مدل PEST^۱ استفاده شد. مدل PEST ساختار غیرخطی حاکم بر روابط مدل‌ها را به ساختار خطی تبدیل می‌کند. سپس با ایجاد یک تابع هدف، که مجموع انحراف مجذور بین خروجی مدل و مقادیر اندازه‌گیری واقعی است، واسنجی می‌کند و در مرحله واسنجی از الگوریتم گاوس - مارکواردت - لونبرگ استفاده می‌کند. برای واسنجی پارامترهای خاک و گیاه مدل SWAP از مدل PEST که اصطلاحاً به آن مدل‌سازی معکوس گفته می‌شود، استفاده شد (Doherty, 2005). جذر میانگین مجذور خطای بیوماس کل در حالت واسنجی ۵۲۸ و در صحت‌سنجی ۵۰۱ تا ۷۳۶ کیلوگرم بر هکتار و جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده بیوماس کل در واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده ۱۳ تا ۲۱ درصد محاسبه گردید. جذر میانگین مجذور خطای بیوماس پانیکول در واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده ۱۴۸ تا ۵۸۲ کیلوگرم بر هکتار و جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده بیوماس پانیکول در واسنجی و صحت‌سنجی ۶ تا ۲۴ درصد محاسبه شد. جذر میانگین مجذور خطای شاخص سطح برگ در حالت واسنجی و در حالت صحت‌سنجی ۰/۳۴ تا ۰/۶۲ متر مربع



شکل ۱- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی مدل‌های WOFOST (—)، SWAP (---) و ORYZA2000 (- -) و اندازه‌گیری بیوماس کل (●) در دوره رویش در مدیریت‌های آبیاری



شکل ۲- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی مدل‌های WOFOST (---)، SWAP (—) و ORYZA2000 (---) و اندازه‌گیری بیوماس پانیکول در دوره رویش در مدیریت‌های آبیاری (●)



شکل ۳- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی مدل‌های WOFOST (—)، SWAP (---) و ORYZA2000 (- -) و اندازه‌گیری شاخص سطح برگ (●) در دوره‌ی رویش در مدیریت‌های آبیاری

مقدار آب آبیاری مقدار عملکرد واقعی کم می‌شود. سه مدل نیز افت مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهند. اما مدل SWAP نسبت به دو مدل دیگر عملکرد را کمتر شبیه‌سازی می‌کند. نتایج مقایسه عملکرد شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که مدل ORYZA2000 نسبت به دو مدل دیگر دقت بهتری دارد. همچنین، در بسیاری از مدیریت‌های آبیاری هر سه مدل مقدار عملکرد را کمتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی می‌کنند.

در بررسی شبیه‌سازی مقدار عملکرد در ۳ مدل استفاده شده در این پژوهش، مدل ORYZA2000 با جذر میانگین مجذور خطای ۵۸ کیلوگرم بر هکتار، جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده ۲ درصد و ضریب تبیین ۰/۸۳ نسبت به دو مدل دیگر دقت بیشتری دارد. مقایسه مقدار عملکرد شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در سه مدل در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط غرقاب هر سه مدل مقدار عملکرد را کمتر شبیه‌سازی می‌کنند. با تغییر مدیریت آبیاری و کاهش



شکل ۴- مقایسه عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده سه مدل ORYZA2000, SWAP و WOFOST

تنها دو مرحله فنولوژی (نشا- گلدهی و گلدهی- رسیدگی) برای دوره رشد برنج در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که مدل ORYZA2000 یک مدل اختصاصی برای برنج است نیاز به اطلاعات بیشتری در مورد گیاه و خاک دارد (از جمله تعداد روز در خزانه، تعداد کپه در هر متر مربع، تعداد نشا در هر متر مربع، و روش کشت و همچنین تعداد لایه‌های گلخراب و میزان نفوذ عمقی)؛ اطلاعات بیشتر منجر به شبیه‌سازی بهتر می‌شود. بر اساس ارزیابی‌ها، هیچ یک از این سه مدل شاخص سطح برگ را به خوبی

نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی سه مدل ORYZA2000, WOFOST و SWAP برای شبیه‌سازی بیوماس کل، بیوماس پانیکول، و شاخص سطح برگ نشان از دقت قابل قبول سه مدل در شبیه‌سازی بیوماس کل، بیوماس پانیکول دارد. در بررسی شبیه‌سازی مقدار عملکرد در این پژوهش، مدل ORYZA2000 در شبیه‌سازی عملکرد نسبت به دو مدل دیگر برتری دارد؛ علت آن را می‌توان بدین صورت بیان کرد که در این مدل چهار مرحله فنولوژی اما در دو مدل دیگر

ارزیابی مدل‌های گیاهی ORYZA2000، SWAP و WOFOST در...

شبیه‌سازی نمی‌کند که می‌توان علت آن را تعریف نشدن مناسب حالت رشد نمایی سطح برگ به حالت خطی در مدل‌ها و استفاده از مقادیر ثابت سطح ویژه برگ دانست که پارامتری تعیین‌کننده برای شبیه‌سازی شاخص سطح برگ توسط مدل‌هاست (Bouman & van Laar, 2006). همچنین، مقدار سطح ویژه برگ در شرایط غیرغرقاب نسبت به شرایط غرقاب تغییر می‌کند، که مدل‌ها توانایی ایجاد این تغییر را برای شرایط غیرغرقاب ندارند.

مراجع

- Anon. 1985. CWFS. Potential food production increases from fertilizer aid: a case study of Burkina Faso. Ghana and Kenya. Wageningen.
- Belder, P., Bouman, B. A. M., Spiertz, J. H. J. 2007. Exploring options for water savings in lowland rice using a modeling approach. *Agric. Sys.* 92, 91-114.
- Boling, A., Bouman, B. A. M. Tuong, T. P., Murty, M. V. R. and Jatmiko, S. Y. 2007. Increasing rainfed rice productivity in Central Java, Indonesia: a modeling approach using ORYZA2000. *Agric. Sys.* 92, 115-139.
- Boogaard, H. L., Diepen, C. A. van Rötter, R. P., Cabrera, J. M. C. A. and van Laar, H. H. 1998. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST control center 1.5. Technical Document 52. DLO Winand Staring Centre. Wageningen. Netherlands.
- Boogaard, H. L., Diepen, C. A., van Eerens, H., Kempeneers, P., Piccard, I., Verheijen, Y. and Supit, I. 2002. Description of the MARS Crop Yield Forecasting System (MCYFS). METAMP (Methodology Assessment of MARS Predictions) Report 1/3, Alterra. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO). Supit Consultancy. Wageningen. Mol. Houten.
- Bouman, B. A. M. and van Laar, H. H. 2006. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. *Agric. Sys.* 87, 249-273.
- Bouman, B. A. M., van Keulen, H., van Laar, H. H. and Rabbinge, R. 1996. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: pedigree and historical overview. *Agric. Sys.* 52, 171-198.
- Bouman, B. A. M., Krop, M. J., Tuong, T. P., Wopereis, M. C. S., Ten Berge, H. F. M. and van Laar, H. H. 2001. ORYZA2000: Modelling Lowland Rice. International Rice Research Institute, Wageningen University and Research Centre. Los Ban os. Philippines. Wageningen. The Netherlands.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State Univ., Hydrology Paper No. 3.
- De Wit, C. T. 1965. Photosynthesis of Leaf Canopies. Agricultural Research Report No. 663. Pudoc. Wageningen. The Netherlands.
- De Wit, C. T., Brouwer, R. and Penning de Vries, F. W. T. 1970. The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.) Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. Proceedings IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. Pudoc. Wageningen. The Netherlands.

- De Wit, C. T., Goudriaan, J., van Laar, H. H., Penning de Vries, F. W. T., Rabbinge, R., van Keulen, H., Louwerse, W., Sibma, L. and De Jonge, C. 1978. Simulation of Assimilation, Respiration and Translocation of Crops. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen. The Netherlands.
- Doherty, 2005. PEST: Software for Model-Independent Parameter Estimation. Watermark Numerical Computing, Australia.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO. Rome. Italy.
- Drenth, H., ten Berge F. F. M. and Riethoven, J. J. M. 1994. ORYZA simulation modules for potential and nitrogen limited rice production. SARP Research Proceedings. Wageningen. The Netherlands.
- Driessen, P. M. 1986. The water balance of the soil. In: van Keulen, H. and Wolf, J. (Eds.) Modelling of agricultural production: weather, soils and crop. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen. The Netherlands.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J. and Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen.
- Huygen, J. (Ed.). 1990. Simulation studies on the limitations to maize production in Zambia. Report No. 27. DLO Winand Staring Centre. Wageningen.
- Khani Ghariegapi, M. Davari, K., Alizadeh, A., Hasheminia, S. and Zolfagharian, A. 2007. SWAP model assessment for simulating sugar beet yield under different irrigation water quantities and Qualities. Iranian J. Irrig. Drain. 2, 107-117.
- Kropff, M. J., van Laar, H. H. and Matthews R. B. (Eds.). 1994. ORYZA1: an ecophysiological model for irrigated rice production. SARP Research Proceedings. Wageningen. The Netherlands.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12, 513-522.
- Neut, D., van der Dam, J. C. van. and Feddes, R. A. 1995. Effects of higher surface water levels in 'De Hoeksche Waard'. An evaluation of yield reductions of potatoes and sugar beets at 4 drainage depths during 42 years. Report No. 48. Subdep. Water Resour. Wageningen University Pub.
- Rabbinge, R. and van Latesteijn, H. C. 1992. Long-term options for land use in the European Community. Agric. Sys. 40, 195-210.
- Roetter, R., Hoanh, C. T. and Teng, P. S. 1998. A systems approach to analyzing land use options for sustainable rural development in South and Southeast Asia. IRR I Discussion Paper Series 28. International Rice Research Institute. Los Ban os. Philippines.

ارزیابی مدل‌های گیاهی ORYZA2000، SWAP و WOFOST در...

- Singh, R. 2005. Water productivity analysis from field to regional Scale- Integration of crop and soil modeling, remote sensing and geographical information. Ph.D. Thesis. Wageningen University Pub.
- van Dam, J. C. 2000. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts. Parameter estimation, and case studies. PhD Thesis. Wageningen University. Wageningen. The Netherlands.
- van Dam, J. C. and Malik, R. S. (Eds.). 2003. Water productivity of irrigated crops in Sirsa district, India. Integration of remote sensing, crop and soil models and geographical information systems. WATPRO Final Report.
- van Dam, J. C., Huygen, J., Wesseling, J. G., Feddes, R. A., Kabat, P., van Walsum, P. E. V., Groenendijk, P. and van Diepen, C. A. 1997. Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water Flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant Environment. Technical Document 45. DLO Winand Staring Centre. Wageningen.
- van Genuchten, M. T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.
- van Genuchten, M. T., Leij, F. J. and Yates, S. R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions for unsaturated soils. U.S. Salinity Laboratory. Riverside. California.
- Wopereis, M. C. S. Bouman, B. A. M., Tuong, T. P., ten Berge, H. F. M. and Kropff, M. J. 1996. ORYZA_W: rice growth model for irrigated and rainfed environments. SARP Research Proceedings. Wageningen. The Netherlands.



Evaluation of Crop Growth Models ORYZA2000, SWAP and WOFOST under Different Types of Irrigation Management

E. Amiri*, M. Kavooosi and F. Kaveh

*Corresponding Author: Assistant Professor, Islamic Azad University, P. O. Box: 1616, Lahijan, Iran. E-mail: eamiri57@yahoo.com

The models ORYZA2000, SWAP and WOFOST simulate the growth and development of rice under conditions of potential production and water limitation. The models were evaluated against a data set of field experiments. The study was laid out in RCBD with three replications for one traditional landrace, Hashemi, carried out in 2005 at the Rice Research Institute of Iran in Rasht. The irrigation managements were: I1 (continuous irrigation); I2, I3, and I4 (irrigation at 1, 3 and 5 days, respectively, after disappearance of ponded water) and I5 and I6 (irrigation at 5 and 8 day intervals, respectively). In this paper, simulated and measured leaf area index (LAI), biomass panicles, total aboveground biomass and yield by adjusted coefficient of correlation (R^2), and absolute and normalized root mean square errors (RMSE) were compared. On average, RMSE total aboveground biomass was 653 kg/ha for ORYZA2000, 458 kg/ha for WOFOST and 589 kg/ha for SWAP. RMSE biomass panicles biomass was 375 kg/ha for ORYZA2000, 284 kg/ha for WOFOST and 335 kg/ha for SWAP. RMSE LAI was 0.41(-) for ORYZA2000, 0.53(-) for WOFOST and 0.5(-) for SWAP. ORYZA2000, in contrast to WOFOST and SWAP, simulated the yield of rice well.

Key Words: Biomass, Evaluation, Model, Rice, Simulation