به‌زراعی نهال و بذر
جلد ۲-۲۹، شماره ۳، سال ۱۳۹۲

شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، زیست توده و عملکرد دانه ارقام برنج در سنین مختلف گیاهچه‌ای با استفاده از مدل ORYZA2000

Simulation of Leaf Area Index, Biomass and Grain Yield of Rice Cultivars at Different Seedling Ages Using ORYZA2000 Model

بهمن امیری‌لاریجانی[۱]، زین‌العابدین طهماسبی سروستانی[۲] و قربانعلی نعمت‌زاده[۳]

۱- رئیس گروه تکنولوژی زراعی مرکز ترویج و توسعه تکنولوژی هراز، آمل (نگارنده مسئول)
۲- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۲۸

چکیده

امیری‌لایجانی، ب.، طهماسبی سروستانی، ز. و نعمت‌زاده، ق. ع. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، زیست توده و عملکرد دانه ارقام برنج در سنین مختلف گیاهچه‌ای با استفاده از مدل ORYZA2000. **مجله به‌زراعی نهال و بذر ۲-۲۹ (۳):** ۳۰۲ - ۲۸۳.

به منظور واسنجی پارامترهای گیاهی و ارزیابی مدل "اوریزا ۲۰۰۰" (ORYZA2000) تحت شرایط بالقوه تولید و شبیه سازی شاخص سطح برگ، زیست توده اندامهای مختلف گیاهی و عملکرد دانه سه رقم برنج در سنین مختلف گیاهچه‌ای آزمایشی مزرعه‌ای بصورت کرت های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۹ تیمار وسه تکرار در سال های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ در مرکز ترویج و توسعه تکنولوژی هراز انجام گردید. کرت‌های اصلی شامل سه رقم برنج طارم، فجر و قائم۱ و کرت‌های فرعی شامل گیاهچه های ۱۷ روزه (جوان)، ۲۴ روزه (نیمه بالغ) و ۳۳ روزه (بالغ) بودند. بر اساس نتایج حاصله مدل برآورد مناسبی در شبیه سازی عملکرد دانه، زیست توده و شاخص سطح برگ از زمان نشاکاری تا برداشت محصول ارائه نمود. میانگین جذر میانگین مربعات خطای نرمال ($RMSE_n$) در طول فصل رشد عبارت از ۱۳٪ تا ۱۵٪ برای وزن خشک کل، ۱۸٪ تا ۲۱٪ برای وزن خشک برگ سبز، ۱۷٪ تا ۲۰٪ برای وزن خشک ساقه، ۱۶٪ تا ۲۳٪ برای وزن خشک خوشه، ۶٪ تا ۹٪ برای عملکرد دانه و ۲۴٪ تا ۲۶٪ برای شاخص سطح برگ بود. با توجه به نتایج بدست آمده مدل "اوریزا ۲۰۰۰" (ORYZA2000) از قابلیت مناسبی برای شبیه سازی رشد و عملکرد دانه ارقام برنج برخوردار بوده و می تواند بعنوان ابزار مناسبی برای برنامه‌ریزی بهتر مدیریت مزرعه شالیزاری و نیز جایگزین مناسبی برای آزمون سازگاری ارقام برنج باشد.

واژه‌های کلیدی: "اوریزا ۲۰۰۰"، میانگین مربعات خطای نرمال، وزن خشک کل، وزن خشک خوشه، شالیزار و مدیریت مزرعه.

آدرس الکترونیکی نگارنده مسئول: amiri_931@yahoo.com

مقدمه

به نژادی و معرفی ارقام جدید برنج با اهدافی چون افزایش عملکرد دانه، بهبود کیفیت تغذیه‌ای و پخت، عطر و طعم و افزایش مقاومت به تنش‌های زنده و غیرزنده انجام می‌گیرد. آگاهی از پتانسیل تولید و برآورد عملکرد دانه ارقام اصلاح شده در مناطق تحت کشت همواره یکی از مباحث مهم در برنامه‌های به‌نژادی و معرفی ارقام در ایران می‌باشد. برای حصول پتانسیل عملکرد در ارقام برنج، سازگاری رقم کشت شده با شرایط اقلیمی و اکولوژیک منطقه بسیار حائز اهمیت است و هر گونه تغییر در مراحل فنولوژیک حساس به درجه حرارت که باعث تغییر در طول دوره رشد می‌شود، باعث کاهش عملکرد دانه در اثر تشکیل ضعیف منبع یا مخزن می‌گردد (Khanal, 2005). امروزه سعی می‌شود که فرآیندهای رشد و نمو گیاهان از دیدگاه کمی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد تا بتوان با استفاده از مدل‌های ریاضی نتایج تحقیقات موجود را در مقیاس وسیع‌تری استفاده و کاربردی نمود.

در اواسط دهه ۱۹۹۰ مرکز تحقیقاتی گروه اکولوژی دانشگاه واگنینگن و موسسه بین‌المللی تحقیقات برنج مدل اوریزا (ORYZA) را در خصوص رشد برنج در اراضی پست مناطق گرمسیری ارائه دادند. در سال ۲۰۰۱ با تلفیق و بهبود همه مدل‌های قبلی سری اوریزا نسخه جدیدی از این سری مدل‌ها بنام اوریزا ۲۰۰۰ (ORYZA2000) منتشر شد (Bouman *et al.*, 2001). مدل اوریزا ۲۰۰۰، یک مدل اکوفیزیولوژیک رشد می‌باشد که نمایه‌ای از رشد برنج اراضی پایین دست را تحت شرایط متفاوت تولید ارائه می‌دهد. با هدف دستیابی به پتانسیل عملکرد بالا در محیط‌های مختلف از زیر مدل‌های اوریزا ۲۰۰۰ استفاده می‌شود. یکی از این مدلها "اوریزا ۱" است که الگوی واقعی شبیه‌سازی رشد گیاه برنج می‌باشد و در آن توسط تابع داده‌های هواشناسی روزانه، مشخصات گیاهی و پارامترهای مدیریتی، رشد و نمو گیاه برنج برآورد می‌شود (Bouman *et al.*, 2001).

اوریزا۲۰۰۰ برای محاسبه سرعت تولید ماده خشک اندامهای گیاهی و سرعت نمو فنولوژیکی از الگوی محاسبه روزانه پیروی می‌کند. با استفاده از مجموع این مقادیر در طول زمان، تولید ماده خشک و مرحله نمو در سراسر فصل رشد شبیه‌سازی می‌شوند. روشهای محاسبه تولید ماده خشک به خوبی مستند شده است (Goudriaan and Van Laar, 1994; Spitters *et al.*, 1989; Van Laar *et al.*, 1997). کل مقدار آسیمیلاسیون روزانه دی اکسیدکربن توسط پوشش گیاهی از طریق تابش ورودی، درجه حرارت و شاخص سطح برگ محاسبه می‌شود.

زمانی که گیاه برنج نشاکاری می‌شود، شاخص سطح برگ و زیست توده بر اساس تراکم بوته بعد از نشاکاری، از نو آغاز می‌شود. رشد گیاه زراعی تنها زمانی از سر گرفته می‌شود

که «شوک نشاکاری» سپری شده باشد. روش کشت نشائی بعلت شوک نشاکاری (صدمه دیدن ساقه و ریشه نشاها در طی کندن از خزانه)، به طورکلی باعث تاخیر نمو فنولوژیک در برنج می‌شود. میزان اثرگذاری شوک نشاکاری ممکن است بسته به خصوصیات نشا و شرایط آب و هوائی قبل و بعد از نشاکاری متفاوت باشد (Kotera, 2004).

مطالعات و تحقیقات قابل توجهی بر پایه مدل اوریزا در سالهای اخیر در کشورهای آسیائی انجام شده است. مثال‌هایی از این تحقیقات عبارتند از: کاربرد اوریزا در فیلیپین (Bouman and Van Laar, 2006)، هند (Arora, 2006)، اندونزی (Boling *et al.*, 2007)، چین (Belder *et al.*, 2007; Jing *et al.*, 2008; Bouman *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2007) و ایران (Amiri and Rezaei, 2009; Amiri Larijani, *et al.*, 2011).

بنایان و همکاران (Bannayan, *et al.*, 2005) مدل اوریزا ۲۰۰۰ را برای بررسی اثر متقابل افزایش دی اکسیدکربن هوا و کود نیتروژنی در شمال ژاپن مورد استفاده قرار دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش میزان دی اکسیدکربن مدل اوریزا ۲۰۰۰ شاخص سطح برگ را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی کرده، ولی مقدار زیست توده کل بالای سطح زمین را با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌کند. همچنین پیشنهاد نمودند که برای شرایط اثر متقابل افزایش دی اکسیدکربن وکود نیتروژن برای شبیه‌سازی بهتر عملکرد دانه و شاخص سطح برگ مدل نیاز به اصلاح مجدد دارد.

بولینگ و همکاران (Boling *et al.*, 2007) توانستند برای برنج نشایی و کشت مستقیم در شرایط اراضی آپلند مدل اوریزا ۲۰۰۰ را واسنجی کنند. بر اساس اطلاعات حاصل از ۸ فصل زراعی ضریب تبیین (R^2) برای عملکرد و زیست توده کل به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۸۹ بدست آمد. آنها طرح ۱۵ تاریخ کاشت مختلف را به کمک مدل مورد بررسی قرار داده و کشت زود هنگام را برای افزایش عملکرد پیشنهاد کردند. بومن و وان لار (Bouman and Van Laar, 2006) با استفاده از مدل اوریزا ۲۰۰۰ رشد برنج را تحت شرایط کمبود نیتروژن برای اطلاعات مربوط به پنج مزرعه برنج تحت آبیاری در موسسه بین‌المللی تحقیقات برنج، در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۳ مورد ارزیابی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که به طور کلی شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده (بویژه زمانی که مقدار نیتروژن اندک باشد) بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود.

بلدر و همکاران (Belder *et al.*, 2007)، در چین و فیلیپین از اوریزا ۲۰۰۰ برای شبیه‌سازی زیست توده کل و شاخص سطح برگ برای تیمارهای آبیاری غرقابی و آبیاری متناوب واریته‌های برنج در اراضی پایین دست و مرتفع استفاده نمودند. فنگ و همکاران

(Feng *et al.*, 2007) از داده‌های چهار ساله آزمایش مزرعه‌ای در شرایط آبیاری غرقابی و آبیاری متناوب برنج اراضی پست و برنج هوازی، برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل اوریزا ۲۰۰۰ در کشور چین استفاده کردند و میزان مصرف آب و عملکرد دانه را شبیه‌سازی نمودند. نتایج حاصله نشان داد که مدل اوریزا ۲۰۰۰ توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی شرایط محیطی حاکم بر آن منطقه دارد. امیری و رضایی (Amiri and Rezaei, 2009) مدل اوریزا ۲۰۰۰ را به منظور بررسی رشد برنج تحت تیمارهای مختلف آبیاری غرقابی و متناوب در استان گیلان مورد ارزیابی قرار داد. در این آزمایش مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده صفاتی چون شاخص سطح برگ، زیست توده برگ، ساقه، خوشه و زیست توده کل مقایسه گردیدند. نتایج نشان داد که شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده بود.

ویکارمپاپراهارن و کوسیتساکولچای (Wikarmpapraharn and Kositsakulchai, 2010)، مدلهای اوریزا ۲۰۰۰ و سرس- رایس (CERES-Rice) را تحت شرایط رشد بالقوه در دشتهای مرکزی تایلند ارزیابی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که هر دو مدل برای شبیه‌سازی رشد و نمو برنج مناسب بودند به خصوص مدل اوریزا ۲۰۰۰ می‌تواند بعنوان یک ابزار تحقیقاتی جایگزین برای تصمیمات مدیریتی در سطح مزرعه‌ای در دشت مرکزی تایلند مورد استفاده قرار گیرد.

هدف از این پژوهش واسنجی و اعتبارسنجی مدل اوریزا ۲۰۰۰ تحت شرایط تولید بالقوه بر پایه داده‌های آزمایشی برای شبیه‌سازی و کمی کردن تولید ماده خشک و پیش‌بینی عملکرد دانه برنج در سنین مختلف گیاهچه برای بهبود برنامه‌های به‌نژادی ارقام و مدیریت بهتر مزرعه برنج در مناطق شمالی و توسعه آن در سایر مناطق برنجکاری ایران بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مرکز ترویج و توسعه تکنولوژی هراز واقع در ۱۰ کیلومتری جاده آمل به محمودآباد با عرض جغرافیائی ۳۶ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیائی ۵۲ درجه و ۲۳ دقیقه شرقی و ارتفاع ۲۳/۷ متر از سطح دریا اجرا شد. بافت خاک محل اجرای آزمایش لومی (۲۰ درصد رس، ۴۴ درصد سیلت و ۳۶ درصد شن) و اسیدیته آن ۷/۶ بود.

آزمایش بصورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ اجرا شد. کرت‌های اصلی سه رقم برنج طارم محلی (بومی و زودرس)، فجر (اصلاح شده، پرمحصول و میان‌رس) و قائم۱ (اصلاح شده و زودرس) بودند. کرت‌های فرعی شامل سنین مختلف گیاهچه‌ای (گیاهچه‌های جوان ۱۷ روزه، نیمه بالغ ۲۴ روزه و بالغ ۳۳ روزه بودند (جدول ۱) که با سه تاریخ مختلف بذرپاشی در خزانه و

جدول ۱- مشخصات تیمارهای آزمایشی
Table 1. Description and details of experimental treatments

رقم برنج Rice cultivar	سن گیاهچه (روز) Seedling stage (days)	تیمار Treatment
قائم۱ Qaem1	33	GS1
	24	GS2
	17	GS3
طارم Tarom	33	TS1
	24	TS2
	17	TS3
فجر Fajr	33	FS1
	24	FS2
	17	FS3

نشاکاری همزمان بدست آمدند.

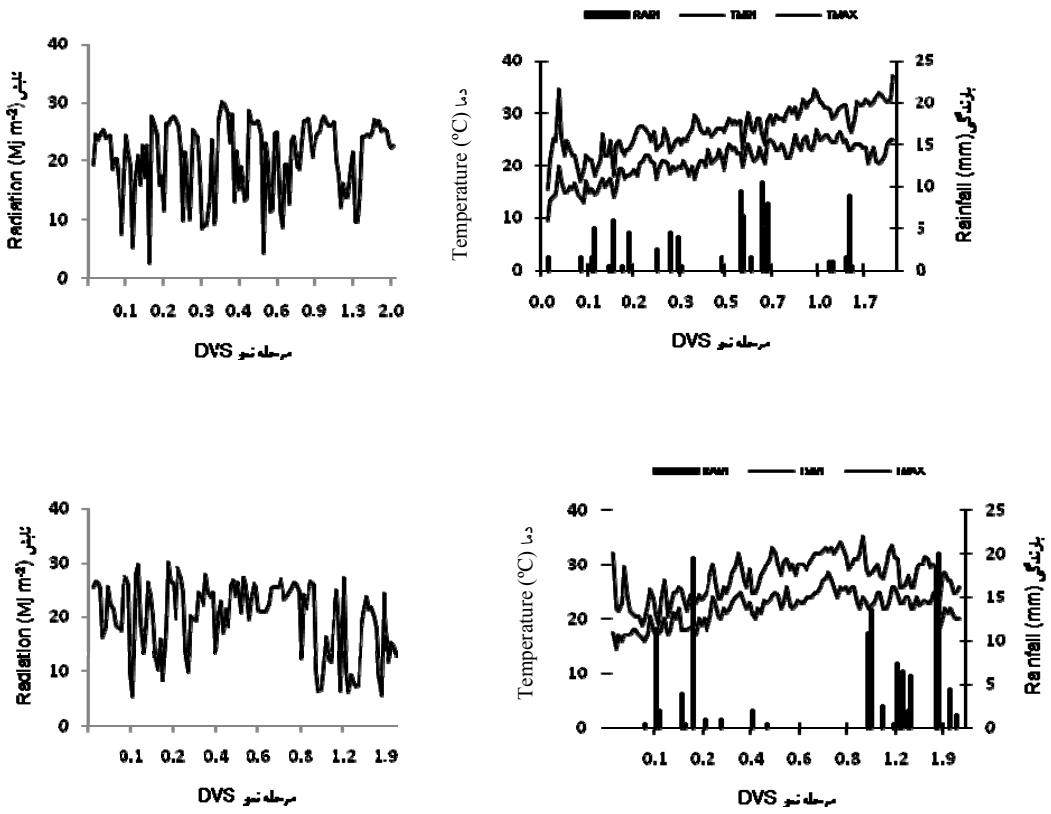
برای هر تاریخ بذرپاشی، بذور جوانه‌دار (یک روز خیساندن، یک روز ضدعفونی و یک روز قرار دادن در اتاقک رشد) در جعبه‌های پلاستیکی با ابعاد ۳ × ۳۰ × ۶۰ سانتیمتر به مقدار ۱۰۰ گرم در هر جعبه به فاصله ۸ تا ۹ روز بذرپاشی شده و گیاهچه‌ها در جعبه‌های نشاء پرورش یافتند. گیاهچه‌ها با سنین مختلف در سال اول در تاریخ ۱۳۸۷/۳/۴ و در سال دوم در تاریخ ۱۳۸۸/۳/۱۳ در کرت‌هایی به ابعاد ۳ × ۴ متر با فاصله ۳۰ × ۱۶ سانتیمتر و به تعداد یک گیاهچه‌در کپه نشاکاری شدند.

با توجه به اینکه آزمایش در شرایط تولید بالقوه اجرا گردید از بروز هر گونه تنش عناصر غذائی و تنش خشکی اجتناب شده و در طول دوره رشد، مزرعه عاری از هر گونه آفت، بیماری و علف‌های هرز نگهداری شد. مقادیر کود مصرفی بر اساس توصیه‌های فنی برای هر یک از ارقام و با هدف تامین نیاز غذائی همه ارقام در طول دوره فصل رشد بصورت پایه و سرک مصرف شدند. در هر دو سال آزمایش علاوه بر ثبت مراحل فنولوژیک، برای هر کرت فرعی در طول دوره رشد رویشی و زایشی در ۵ تا ۶ مرحله اقدام به کف برکردن ۴ کپه برای اندازه‌گیری وزن ماده خشک برگهای سبز، برگهای مرده یا زرد، ساقه‌ها (بعلاوه غلاف برگ)، خوشه‌ها و نیز شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شد. وزن ماده خشک اندامهای مختلف گیاهی بعد از قرار گرفتن نمونه‌ها در داخل آون در حرارت ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۷۲ ساعت تا تثبیت وزن آنها بدست آمد.

در زمان رسیدگی بعد از حذف اثر حاشیه‌ای، از کپه‌های سطحی معادل دو مترمربع از مرکز هر کرت به منظور اندازه‌گیری عملکرد دانه برداشت و مقدار عملکرد شلتوک بر اساس رطوبت ۱۴ درصد محاسبه گردید.

در طول دوره رشد از بذرپاشی در خزانه تا

برداشت، اطلاعات هواشناسی روزانه شامل درجه حرارت حداقل و حداکثر هوا، تابش خورشیدی، سرعت باد، فشار بخار و مقدار بارندگی از ایستگاه هواشناسی واقع در فاصله ۱۰۰ متری محل اجرای آزمایش ثبت گردید (شکل ۱).



شکل ۱- تغییرات درجه حرارت حداکثر و حداقل هوا، بارندگی و تابش خورشیدی محل اجرای آزمایش در سال ۱۳۸۷ (بالا) و سال ۱۳۸۸ (پایین) در طول دوره رشد برنج

Fig. 1. Variation of daily maximum and minimum temperatures, rainfall and solar radiation in 2008 (above) and 2009 (below) during rice growing seasons. (DVS: Development stage of rice plant; seedling emergence = 0; Panicle initiation = 0.65; Flowering = 1 and maturity = 2)

داده‌های ورودی و واسنجی مدل

روش واسنجی مدل بوسیله بومن و فان لار (Bouman and Van Laar, 2006) و نیز لی و همکاران (Li *et al.*, 2009) تشریح گردید. از آنجائی که آزمایش در سطح بالقوه تولید اجرا گردید، واسنجی مدل اوریزا ۲۰۰۰ بوسیله کالیبراسیون فایل داده‌های هواشناسی، فایل داده‌های آزمایشی و فایل داده‌های گیاهی انجام شد. تعداد ۹ مجموعه اجرائی مدل در قالب ۹ تیمار آزمایشی متشکل از سه رقم برنج و سه سن مختلف گیاهچه در زمان نشاکاری ساخته شدند. برای هر مجموعه اجرائی مدل از داده‌های

بدست آمده از آزمایش مزرعه‌ای سال ۱۳۸۷ بعنوان مجموعه داده‌های مورد نیاز برای واسنجی مدل استفاده گردید. سرعت نمو گیاه (Development Rate = DVR) در مراحل مختلف فنولوژیک، ضرایب تسهیم مواد فتوسنتزی، سطح ویژه برگ (Specific Leaf Area = SLA)، سرعت مرگ و میر برگ و کسر ذخایر ساقه از بهترین مشخصات و خصوصیات برای واسنجی شرایط محیطی و واریته‌ای می‌باشند که در این پژوهش محاسبه و مورد استفاده قرار گرفتند.

سرعت‌های نمو با استفاده از تاریخهای ثبت شده مراحل مختلف فنولوژیک شامل خروج گیاهچه از سطح خاک خزانه (سبز شدن)، نشاکاری، تشکیل خوشه اولیه، گلدهی و رسیدگی محاسبه گردیدند. سطح ویژه برگ با استفاده از سطح برگ سبز اندازه‌گیری شده و وزن خشک برگ محاسبه شد. علاوه بر پارامترهای ذکر شده، پارامترهای خاص به منظور واسنجی مدل در آزمایش شوک نشاکاری برای نمو فنولوژیکی و نیز برای توسعه سطح برگ بودند.

برای هر یک از ۹ مجموعه از مدلهای اجرائی در این آزمایش، مقادیر شوک نشاکاری (تاخیر نمو در واحد سن گیاهچه بر پایه درجه روز) بر اساس مجموعه داده‌های مزرعه‌ای سال ۱۳۸۷ برای هر ۹ تیمار محاسبه و مقادیر بدست آمده در فایل خصوصیات گیاهی منظور گردید. بنابراین فایلهای هواشناسی و عملیات زراعی و مدیریت مزرعه برای همه مجموعه مدلهای شبیه‌سازی در یک آزمایش مشابه بودند به جز سنین مختلف گیاهچه و خصوصیات ارقام مختلف مورد استفاده که در آزمایش مورد آزمون قرار گرفتند.

کلیه داده‌های آزمایشی بطور یکجا در شرایط بالقوه تولید برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. برای گیاه برنج شرایط بالقوه تولید به معنای تامین مقدار کافی و مورد نیاز آب و نیتروژن و نیز عدم بروز خسارت آفات و بیماریها می‌باشد. پارامترها و مقادیر محاسبه شده که برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند برای اعتبار سنجی مدل نیز استفاده شدند (Li *et al*., 2009).

ارزیابی مدل

عملکرد مدل اوریزا ۲۰۰۰ در این آزمایش بطور جداگانه برای مجموعه داده‌های سال اول آزمایش (داده‌های واسنجی) و نیز سال دوم آزمایش (داده‌های اعتبارسنجی) مورد ارزیابی قرار گرفت. تکرار استفاده از یک مدل در شرایط مطلوب آزمایشی و مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه می‌تواند باعث افزایش سطح اطمینان در پایداری مدل برای منظوری خاص گردد. ترکیبی از نمایش گرافیکی و اندازه‌گیری‌های آماری برای ارزیابی عملکرد مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

با استفاده از روش‌های بومن و فان لار

(Bouman and Van Laar, 2006) در این آزمایش نیز اقدام به مقایسه گرافیکی مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده گردید. نمودار پراکنش داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده و خطوط ۱:۱ نیز به منظور نشان دادن تناسب کلی مدل (عملکرد کلی مدل) مورد استفاده قرار گرفت. برای متغیرهای مشابه، شیب خط (α)، عرض از مبدا (β) و ضریب تبیین (R^2) رگرسیون خطی بین مقادیر شبیه سازی شده (Y) و اندازه‌گیری شده (X) محاسبه گردید. علاوه بر این، آزمون مقایسه میانگین واریانس نامساوی [P (t)] و جذر میانگین مربعات خطای مطلق ($RMSE_a$ = Root Mean Square $Error_{absolute}$) و نرمال شده ($RMSE_n$ = Root Mean Square $Error_{normalized}$) نیز بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بر اساس فرمولهای زیر محاسبه گردیدند.

$$RMSE_a = (1/n\ \Sigma(Y_i - X_i)^2)^{0.5} \quad (1)$$

$$RMSE_n = 100 \times RMSE_a / \Sigma X_i/n \quad (2)$$

که در آن n تعداد مشاهدات است.

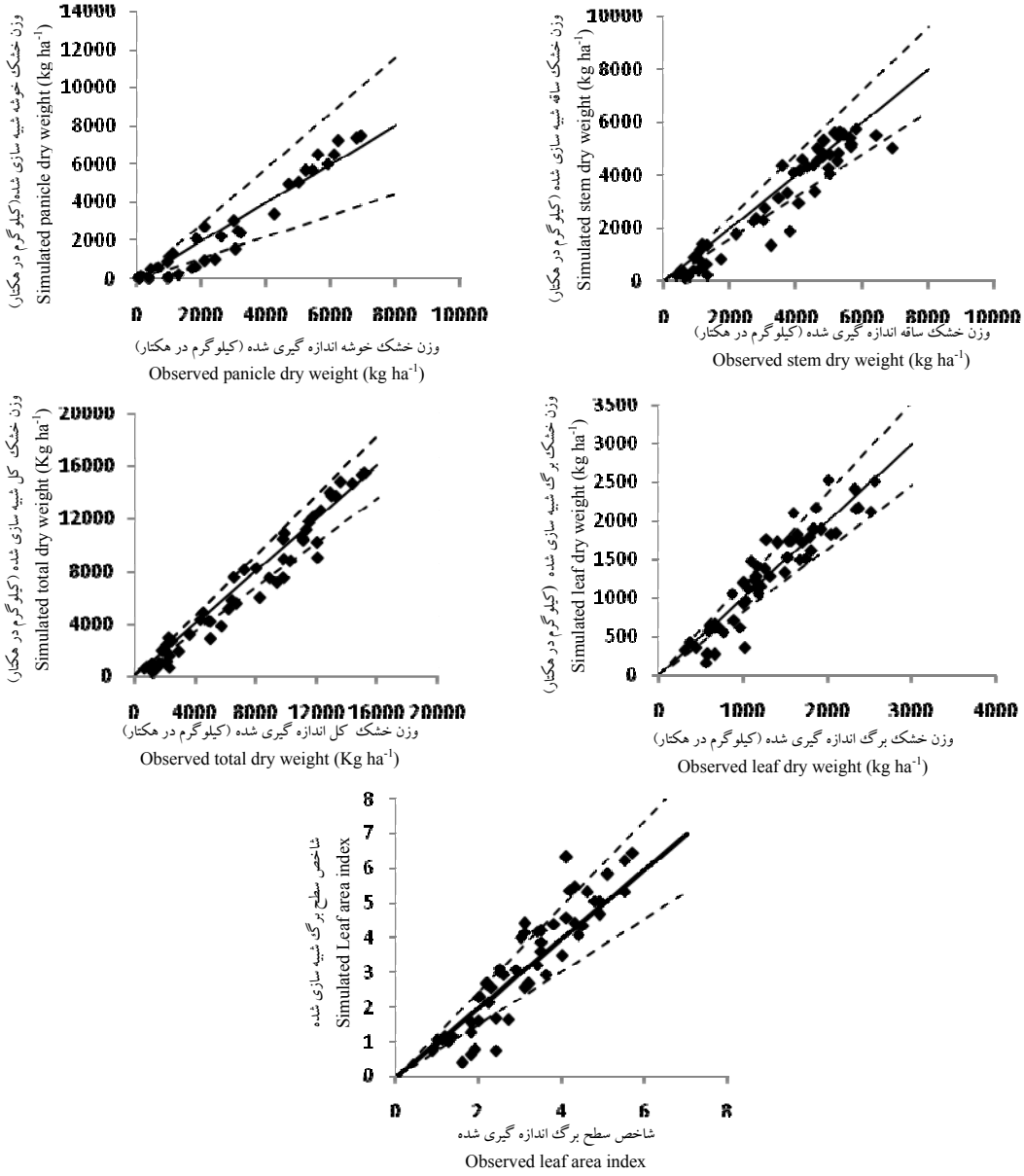
یک مدل زمانی می‌تواند بهترین پیش بینی و بازتولید داده‌های آزمایشی را داشته باشد که α مساوی ۱، و β مساوی صفر، R^2 برابر ۱، P(t*) بزرگتر از ۵ درصد، $RMSE_a$ مشابه با انحراف معیار و $RMSE_n$ برابر با ضریب تغییرات داده‌های اندازه‌گیری شده باشند. چنانچه ضریب تغییرات داده‌های اندازه‌گیری شده در دسترس نباشد می‌توان از روش استاندارد ارائه شده توسط جامیسون و همکاران (Jamieson *et al.*, 1991) استفاده نمود. در روش دیگری که توسط رینالدی و همکاران (Rinaldi *et al.*, 2003) ارائه شد چنانچه مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده کم تر از ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و بیشتر از ۳۰ باشد بترتیب نشان دهنده حالت عالی، خوب، متوسط و ضعیف شبیه‌سازی می‌باشد.

نتایج و بحث

زیست توده اندام‌های مختلف گیاهی و شاخص سطح برگ (مجموعه داده‌های واسنجی مدل)

مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده متغیرهای رشد گیاه زراعی برای همه مجموعه داده‌های واسنجی در شکل ۲ نشان داده شده است. خط ۱:۱ و انحراف معیار متغیرهای اندازه‌گیری شده نیز نشان داده شده است. بهترین نتیجه برای کل ماده خشک بدست آمد جائی که اکثر نقاط بین خطوط انحراف معیار مثبت و منفی SD ± زیست توده اندازه‌گیری شده قرار گرفتند. انحراف معیار زیست توده خوشه بیشتر از متغیرهای دیگر بود. هر چند بیشترین پراکندگی برای شاخص سطح برگ مشاهده شد بطوری که در LAI > ۲ بیشتر نقاط بالای لاین SD + بودند. این موضوع نشان‌دهنده این است که مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند.

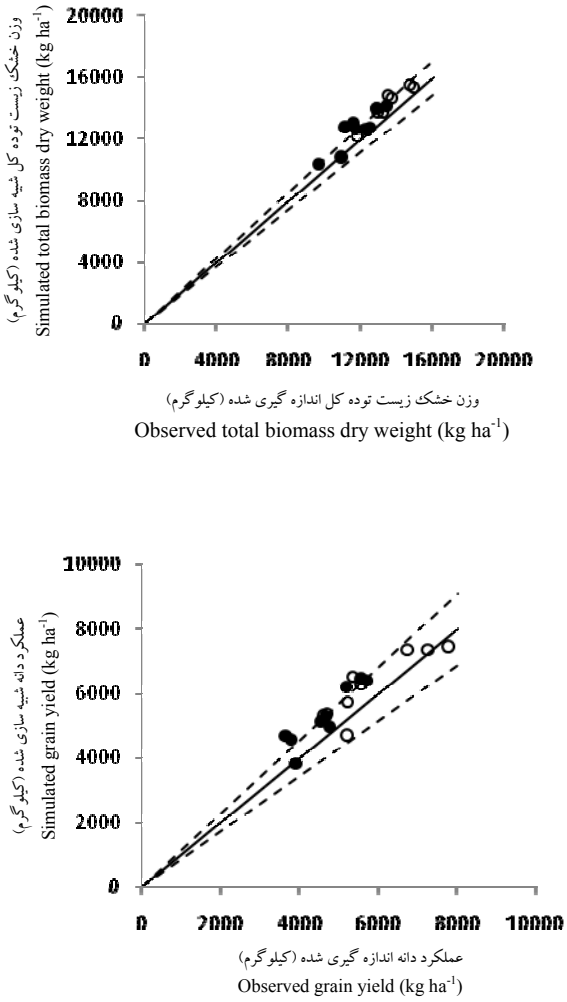
شکل ۳ نشان‌دهنده مقادیر شبیه‌سازی شده و



شکل ۲- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ و زیست توده خوشه، ساقه، برگ و کل ماده خشک (علائم) در طول دوره فصل رشد برای مجموعه داده‌های واسنجی در سال اول آزمایش. خطوط توپر رابطه ۱:۱ می‌باشند و خطوط منقطع انحراف معیار نسبت به خط ۱:۱ می‌باشند.

Fig. 2. Simulated vs. observed leaf area index, biomass of panicle, stem, leaf and total biomass for the calibration set at the first year of trial. Solid lines are the 1:1 line relationship and broken lines are ± standard deviation of the 1:1.

اندازه‌گیری شده زیست توده نهائی در زمان برداشت و عملکرد دانه و خط ۱:۱ همراه با خطوط انحراف معیار داده‌ها می‌باشد. همه مقادیر شبیه‌سازی شده زیست توده و اکثر مقادیر عملکرد دانه بالاتر از خط ۱:۱ بودند که این امر بیانگر بیشتر بودن مقادیر شبیه‌سازی شده



شکل۳. مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده زیست توده کل نهائی در زمان برداشت و عملکرد نهائی دانه. علائم توخالی مجموعه داده های واسنجی و علائم توپر مجموعه داده های اعتبار سنجی مدل می باشند. خطوط ممتد و توپر رابطه ۱:۱ و خطوط منقطع انحراف معیار داده ها از خط ۱:۱ می باشند.

Fig. 3. Simulated vs. observed end-of-season total biomass and grain yield. Open symbols are the calibration data set and closed symbols are the validation data set. Solid lines are the 1:1 line relationship and broken lines are ± standard deviations of the 1:1 line.

می‌باشد. اما همه مقادیر شبیه‌سازی شده نزدیک به خطوط ۱:۱ و انحراف معیار بودند.

نتایج آنالیز آماری و میزان تناسب پارامترها برای متغیرهای رشد گیاه زراعی در طول دوره رشد و در زمان برداشت محصول برای مجموعه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی ملاحظه می‌گردد (جدول۲). با در نظر گرفتن کل داده های واسنجی مدل، آزمون t نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشد.

برای همه مقادیر محاسبه شده، شیب خط رگرسیونی (α) نزدیک به ۱ بود اما عرض از

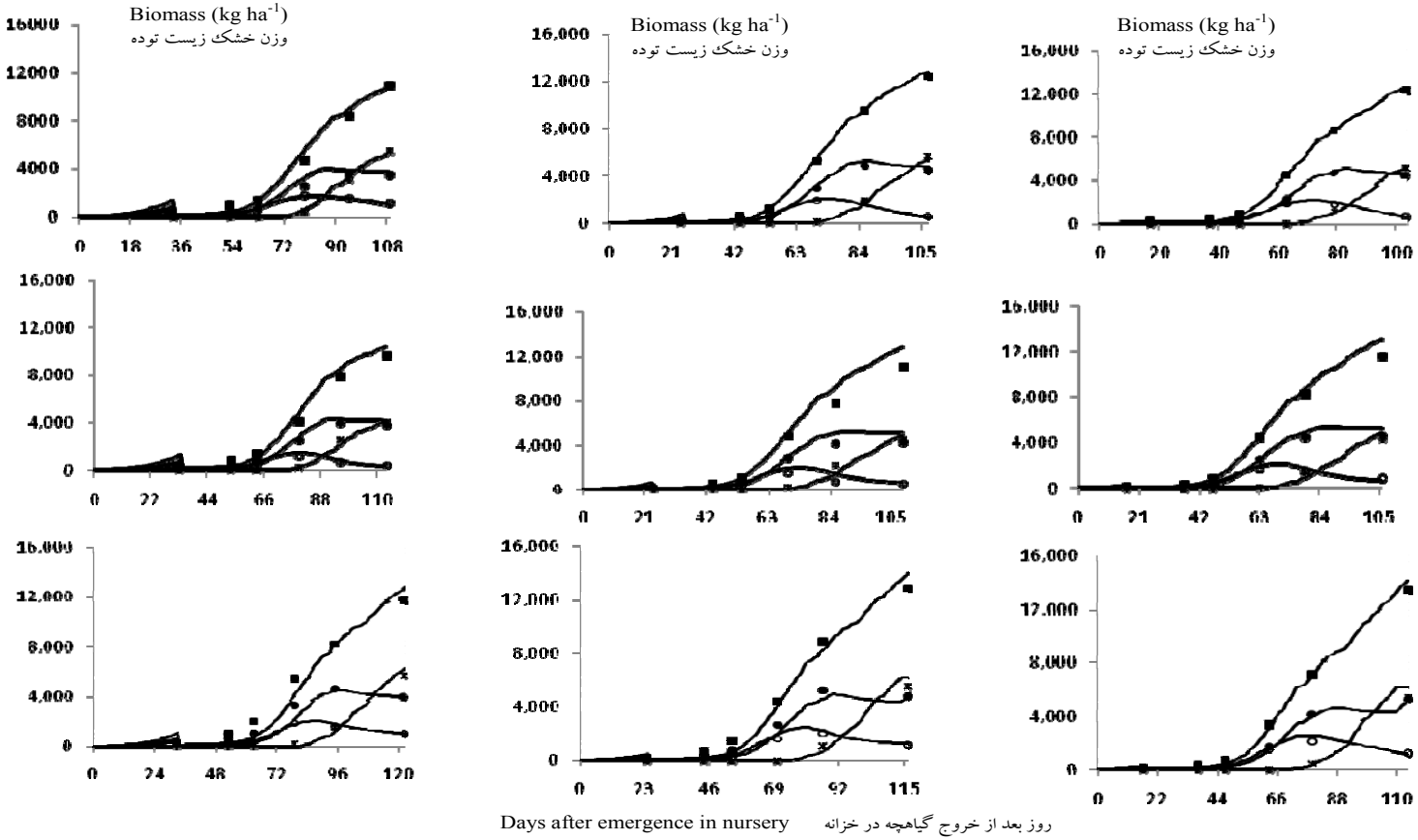
مبدا (β) منفی بود که نشاندهنده پائین‌تر بودن مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. علت اصلی این امر بیشتر به برآورد پائین متغیرهای رشد گیاه زراعی در اوایل و اواسط طول دوره رشد می‌باشد. بالا بودن نسبی R^2 بیانگر پراکندگی پائین داده‌ها بود که کمترین مقدار R^2 برای شاخص سطح برگ و برابر ۰/۸۵ بدست آمد. مقدار $RMSE_n$ نسبتاً پائین و برابر ۱۵ تا ۲۴درصد بود. مقدار $RMSE_n$ شاخص سطح برگ بیش از سایر متغیرها و کل زیست توده از کمترین مقدار $RMSE_n$ برخوردار بود. برای عملکرد نهائی دانه و زیست توده زمان برداشت تناسب بیشتری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده زیست توده در مقایسه با عملکرد دانه مشاهده می‌شود. بطوری که $RMSE_n$ برای زیست توده زمان برداشت ۶ درصد و برای عملکرد نهائی دانه ۱۲ درصد بدست آمد.

زیست توده اندام‌های گیاهی و شاخص سطح برگ (مجموعه داده‌های اعتبارسنجی مدل)

شکل‌های ۴ و ۵ نمودارهای شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده متغیرهای رشد گیاه زراعی برنج در کل طول دوره رشد از زمان خروج تا رسیدگی فیزیولوژیکی را در تیمار های مختلف آزمایشی برای مجموعه داده‌های اعتبار سنجی مدل نمایش می‌دهند. اگرچه زیست توده و شاخص سطح برگ در واریته‌ها و مراحل مختلف گیاهچه‌ای متفاوت بودند ولی مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبتاً خوب بودند. روند شبیه‌سازی در شاخص سطح برگ نشان‌دهنده برآورد بالای مدل برای گیاهچه‌های جوان‌تر می‌باشد (شکل۵). بطور کلی مقادیر عددی زیست توده اندامهای مختلف گیاهی و شاخص سطح برگ در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی در سال دوم آزمایش کمتر از داده‌های سال اول بودند که علت آن تاخیر در زمان نشاکاری و شرایط نامناسب آب و هوائی در زمان گلدهی و طول دوره پر شدن دانه می‌باشد.

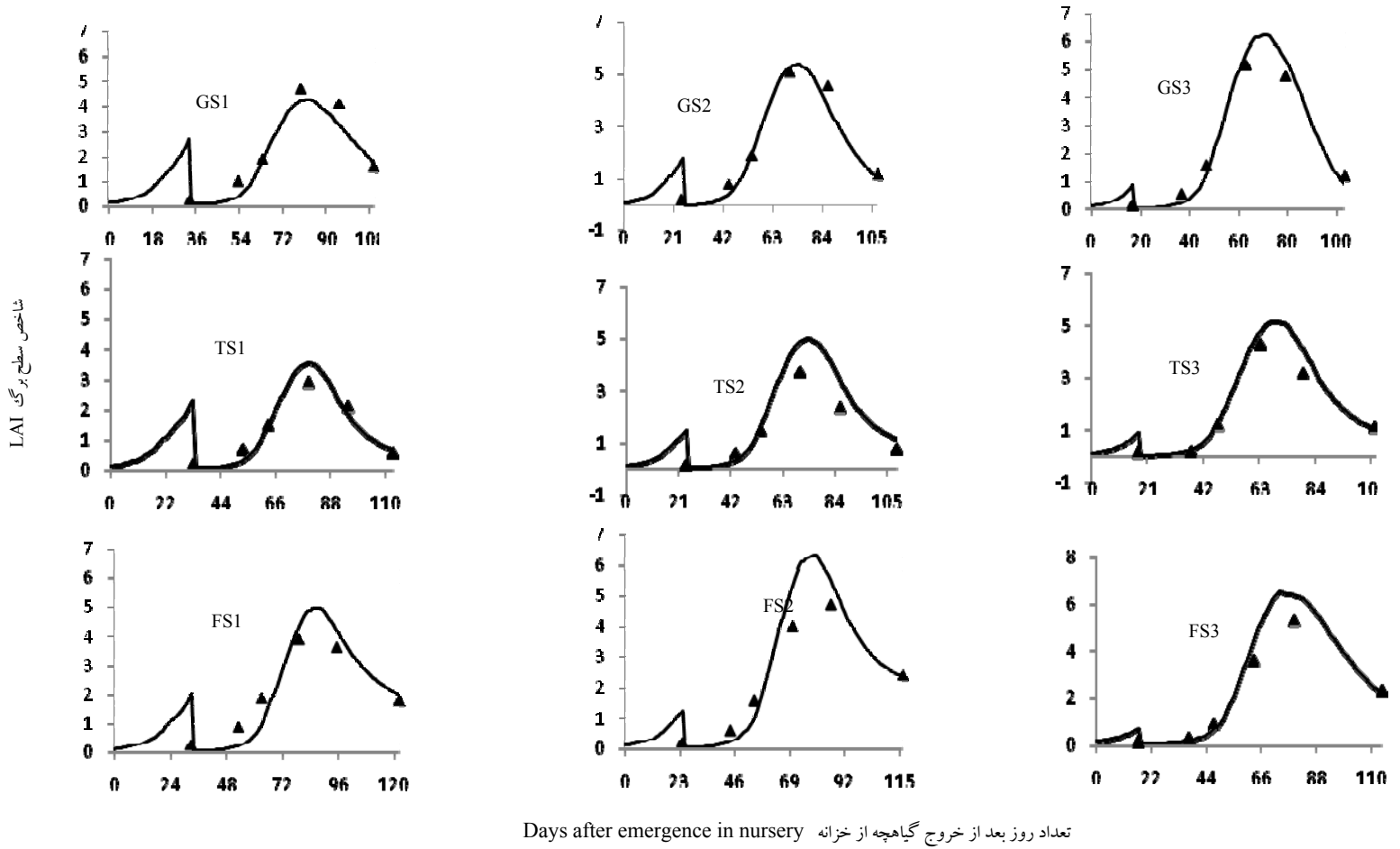
شکل ۶ نشان‌دهنده مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده متغیرهای رشد گیاه زراعی برنج برای مجموعه داده‌های اعتبارسنجی همراه با خطوط ۱:۱ و انحراف معیار می‌باشد. در مقایسه با مجموعه داده‌های واسنجی (شکل ۲)، پراکندگی در این مجموعه داده‌ها کمتر بود. مقدار زیست توده کل شبیه‌سازی شده بین خطوط انحراف معیار یا نزدیک به خط ۱:۱ بود. زیست توده ساقه و خوشه بسیار خوب شبیه‌سازی شده بود. همانند داده‌های واسنجی، شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده در LAI> ۲ معمولاً بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. در شکل ۳ مقادیر شبیه‌سازی شده زیست توده نهایی و عملکرد دانه اغلب بین خطوط انحراف معیار یا نزدیک به خط ۱:۱ بودند.

پارامترهای آماری مورد استناد برای متغیرهای طول دوره رشد و زمان برداشت در



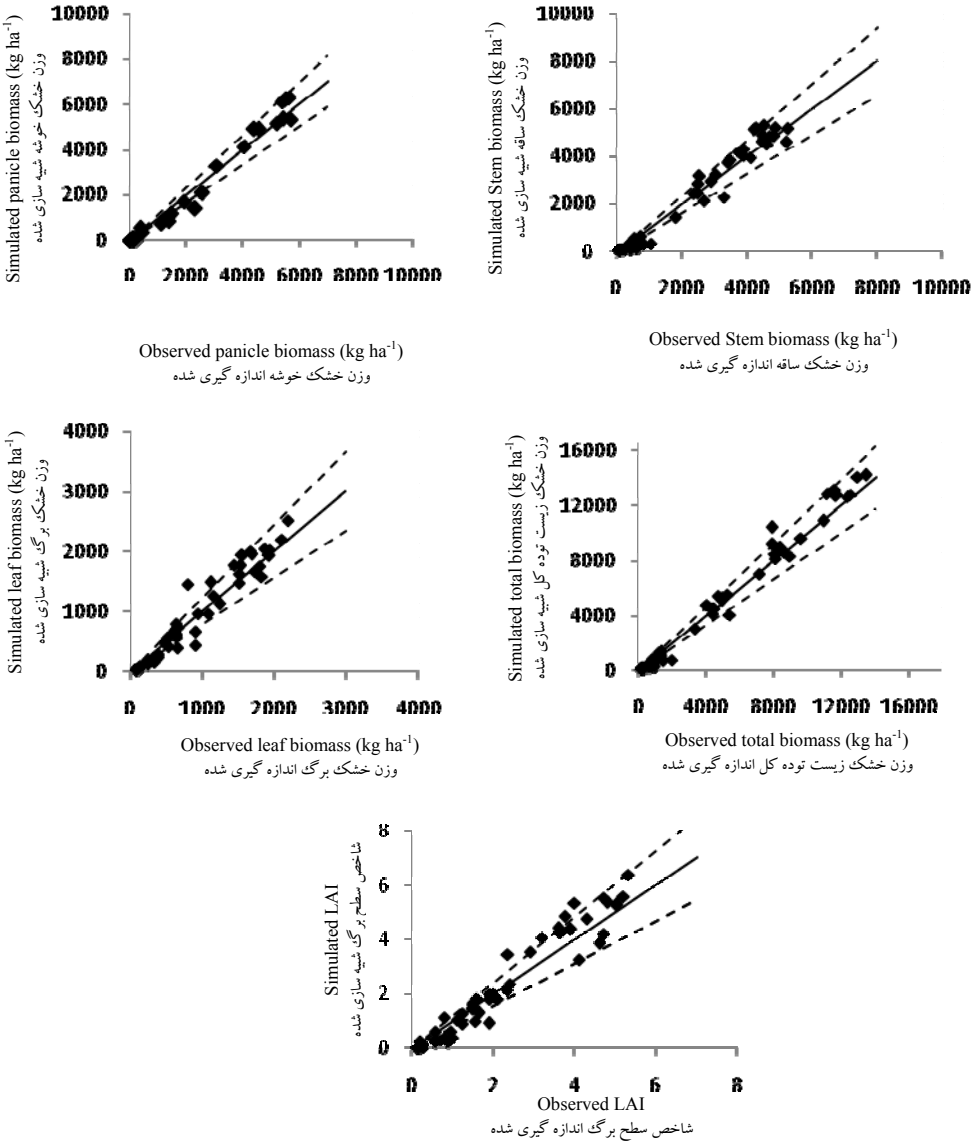
شکل ۴- مقادیر شبیه‌سازی شده (خط) و اندازه گیری‌شده کل ماده خشک اندام هوائی (■)، برگ سبز(○)، ساقه (●) و خوشه (*) در طول دوره فصل رشد برای مجموعه داده‌های اعتبارسنجی مدل. برای خصوصیات تیمارها به جدول ۱ مراجعه کنید.

Fig. 4. Simulated (line) and observed of total aboveground dry matter (■) , green leaves (○), stems (●), and panicles (*) for the growing season of validation data set. For treatment description, please see Table 1.



شکل ۵- مقادیر شبیه‌سازی شده (خط) و اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ (▲) در طول دوره فصل رشد برای مجموعه داده‌های اعتبارسنجی مدل. برای خصوصیات تیمارها به جدول ۱ مراجعه کنید.

Fig. 5. Simulated (line) and observed leaf area index (LAI) (▲) during the growing season of validation data set. For treatment description please see Table 1.



شکل ۶- مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای زیست توده ساقه، برگ، خوشه و زیست توده کل و شاخص سطح برگ (علائم) برای مجموعه داده‌های اعتبار سنجی مدل. خطوط توپر رابطه ۱:۱ هستند وخطوط منقطع انحراف از خط ۱:۱ می‌باشند.

Fig. 6. Simulated vs. observed biomass of panicle, stem, leaf and total biomass, and leaf area index (LAI) for the calibration set. Solid lines are the 1:1 line relationship and broken lines are ± standard deviation of the 1:1 line.

جدول ۲ برای تعیین تناسب مقادیر برآورد شده تـوده کـل در طـول دوره فصـل رشـد هماننـد ارائه شده‌اند. با توجـه بـه نتـایج حاصـله، زیسـت مجموعـه داده‌هـای واسـنجی بـود امـا مقـادیر

جدول ۲– ارزیابی نتایج برای شبیه سازی زیست توده نهائی و عملکرد دانه در زمان برداشت برای داده های واسنجی و اعتبارسنجی مدل ORYZA2000

Table 2. Evaluation results for ORYZA2000 simulations of final biomass and grain yield at harvest for calibration and validation data sets

متغیرهای گیاهی Crop variable	تعداد داده‌های جفت شده Number of data pairs	میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده (انحراف معیار) Mean of observed values (standard deviation)	میانگین مقادیر شبیه سازی شده (انحراف معیار) Mean of simulated values (standard deviation)	آزمون t $P(t^*)$	شیب خط رگرسیون Slope of linear regression	عرض از مبدا Intercept	ضریب تبیین R^2	جذر میانگین مربعات خطای مطلق Absolute root mean square error	جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده Normalized root mean square error (%)
داده های واسنجی Calibration set									
Total biomass (kg ha^{-1})	54	7051 (4503)	6611 (4788)	0.31*	1.040	-728.000	0.96	1086	15
Biomass of green leaves	54	1313 (588)	1297 (648)	0.45*	1.026	-51.000	0.87	235	18
Biomass of stems	54	3416 (1898)	3048 (1981)	0.16*	0.999	-365.000	0.92	675	20
Biomass of panicles	31	3078 (2167)	2892 (2573)	0.38*	1.152	-654.000	0.94	721	23
Leaf area index	54	3.0 (1.31)	3.2 (1.72)	0.36*	1.205	-0.521	0.85	0.72	24
Final biomass	9	13290 (1045)	14055 (1141)	0.08	1.041	211.000	0.91	831	6
Yield (kg ha^{-1})	9	5803 (1143)	6237 (1013)	0.20	0.782	1699.000	0.78	667	12
داده های اعتبارسنجی Validation set									
Total biomass (kg ha^{-1})	54	4454 (4395)	4495 (4789)	0.48*	1.084	-335.000	0.99	598	13
Biomass of green leaves	54	840 (659)	842 (750)	0.49*	1.112	-91.000	0.95	175	21
Biomass of stems	54	2076 (1866)	2042 (2049)	0.46*	1.082	-206.000	0.97	350	17
Biomass of panicles	27	2313 (2180)	2281 (2377)	0.48*	1.079	-214.000	0.97	374	16
Leaf area index	54	1.9 (1.64)	2.1 (1.95)	0.48*	1.153	-0.287	0.94	0.52	26
Final biomass	9	11763 (1150)	12609 (1264)	0.08	0.970	1195.000	0.78	1015	9
Yield (kg ha^{-1})	9	4624 (758)	5289 (907)	0.06	1.092	237.000	0.83	754	16

*: عدم اختلاف معنی‌دار مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد.

*: Simulated and observed values are not significantly different at the 5% probability level.

شبیه‌سازی شده زیست توده خوشه و ساقه در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی نمایش بهتری از خود نشان دادند. برای شاخص سطح برگ مقدار جذر میانگین مربع خطای نرمال شده در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی بزرگتر از داده‌های واسنجی بود. در حالیکه برای زیست توده کل برعکس بود. مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده زیست توده زمان برداشت و عملکرد دانه اختلاف معنی‌داری نداشتند. هر چند که با توجه به ارزیابی‌های گرافیکی و مقادیر α، β و RMSE، ثابت می‌شود که مقادیر شبیه‌سازی شده در زمان برداشت بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بودند.

نتایج حاصل از ارزیابی مدل نشان داد که اوریزا ۲۰۰۰ توانست عملکرد دانه، شاخص سطح برگ و زیست توده اندامهای گیاهی را در طول زمان برای واریته‌های مختلف برنج در مراحل متفاوت گیاهچه‌ای به خوبی شبیه‌سازی کند. بطور میانگین، جذر میانگین مربعات خطای مدل (RMSEa) عبارت از ۱۰۸۶-۵۹۸ کیلوگرم در هکتار برای وزن زیست توده کل، ۱۷۵-۲۳۵ کیلوگرم در هکتار برای وزن خشک برگ سبز، ۳۵۰-۶۷۵ کیلوگرم در هکتار برای وزن خشک ساقه، ۳۷۴-۷۲۱ کیلوگرم در هکتار برای وزن خشک خوشه و ۰/۵۲-۰/۷۲ برای شاخص سطح برگ بود. مقادیر جذر میانگین مربعات خطای نرمال ($RMSE_n$) برای متغیرهای فوق عبارت از ۱۳-۱۵ درصد برای وزن ماده خشک کل، ۱۸-۲۱ درصد برای وزن ماده خشک برگ سبز، ۱۷-۲۰ درصد برای وزن ماده خشک ساقه، ۱۶-۲۳ درصد برای وزن ماده خشک خوشه و ۲۴-۲۶ درصد برای شاخص سطح برگ بود (جدول ۲).

بومن و فان لار (Bouman and Van Laar, 2006) مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده ماده خشک برگ، ساقه، خوشه و کل را تحت شرایط مدیریت کود نیتروژن، درشرایط واسنجی مدل بترتیب در محدوده ۵۹-۲۳، ۵۷-۱۳، ۳۲-۹ و ۲۱-۵ درصد و در شرایط اعتبارسنجی مدل به ترتیب در محدوده ۳۷-۱۰، ۳۵-۱۳؛ ۳۱-۹ و ۱۶-۳ درصد گزارش کرد.

مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ برای واریته‌ها و سنین مختلف گیاهچه متفاوت بودند. بطور کلی شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برای گیاهچه‌های جوان‌تر بودند و بهترین حالت برای گیاهچه‌های مسن واریته‌های زودرس (GS1,TS1) مشاهده شد. مشکلات نسبی در مدلسازی شاخص سطح برگ به خوبی شناخته شده است و خطاهای شبیه‌سازی برای مدلهای دیگر نیز گزارش شده است. برای مثال بومن و فان لار (Bouman and Van Laar, 2006) برای مدل اوریزا ۲۰۰۰، تیمسینا و هومفریز (Timsina and Humphreys, 2003) برای مدل سرس- رایس (CERES-Rice) که برآوردی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده را به

نمایش می‌گذارد و مدل وفوست (WOFOS) توسط روتر و همکاران (Roetter *et al.*, 1998) که برآوردی بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.

جذر میانگین مربعات خطای مدل برای عملکرد نهائی دانه و وزن ماده خشک کل به ترتیب ۶۶۷-۷۵۴ کیلوگرم در هکتار و ۸۳۱-۱۰۱۵ کیلوگرم در هکتار و جذر میانگین مربعات خطای نرمال به ترتیب برابر ۱۲-۱۶درصد و۶-۹درصد بودند (جدول ۳). بومن و فان لار (Bouman and Van Laar, 2006)، بلدر و همکاران (Belder *et al.*, 2007)، جینگ و همکاران (Jing *et al.* ,2008) و ژیو و همکاران (Xue *et al.*, 2008) مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده زیست توده کل را ۷، ۱۹، ۹ و ۱۱ درصد و در شرایط اعتبارسنجی مدل ۹، ۱۳، ۱۱ و۱۱ درصد بدست آوردند. در این آزمایشها مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده عملکرد دانه در شرایط واسنجی ۱۳، ۱۳، ۱۶ و ۱۸ درصد و درشرایط اعتبار سنجی مدل ۱۱، ۱۳، ۱۱ و ۱۰ درصد گزارش شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل اوریزا ۲۰۰۰ در شرایط تولید بالقوه و برای دستیابی به ضرایب رشد و نمو، تسهیم ماده خشک و سطح ویژه برگ در مراحل مختلف گیاهچه‌ای واسنجی و ارزیابی گردید. هر چه قدر مقادیر اندازه‌گیری شده از دقت بالاتری برخوردار باشند، مقادیر واسنجی شده نیز از خطای کمتری برخوردارند که این موضوع مدیریت دقیق مزرعه را نیز می‌طلبد. البته این نکته قابل ذکر است که مدل های پیش‌بینی رشد، نمو و عملکرد محصولات زراعی بعنوان ابزارهای پشتیبان تصمیم‌سازی هستند و به تنهایی قادر به مدیریت مزرعه نخواهند بود.

با توجه به نتایج بدست آمده مدل اوریزا ۲۰۰۰ می‌تواند بعنوان یک ابزار تحقیقاتی قابل قبول برای انتخاب مناسب‌ترین راهکار قبل از انجام آزمایشات مزرعه‌ای همچون پیش‌بینی عملکرد دانه و یافتن بالقوه عملکرد دانه ارقام در مناطق مختلف و تعیین بهترین روشهای مدیریت مزرعه با هدف دستیابی به حداکثر عملکرد دانه در مناطق برنجکاری ایران مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت و پشتیبانی مالی دانشگاه تربیت مدرس و مرکز ترویج و توسعه تکنولوژی هراز انجام گردید. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های جناب آقای مهندس رعیت‌پناه رئیس مرکز هراز و نیز زحمات آقای مهندس سید جلال حسینی برای انجام اندازه‌گیری‌های مزرعه ای و آزمایشگاهی قدردانی نمایند.

References

Amiri, E., and Rezaei, M. 2009. Testing the modeling capability of ORYZA2000 under water-nitrogen limit condition in northern Iran. World Applied Sciences Journal 6: 1113-1122.

Amiri Larijani, B., Tahmasebi Sarvestani, Z., Nematzadeh, Gh. A., Amiri, E., and Esfahani, M. 2011. Simulation of phonological development and growth duration of three rice cultivars at different seedling ages using ORYZA2000 model**.** Iranian Journal of Crop Sciences 13 (3): 466-480. (In Persian)**.**

Arora, V. K. 2006. Application of a rice growth and water balance model in an irrigated semi-arid subtropical environment. Agricultural Water Management 88: 51-57.

Bannayan, M., Kobayashi, K., Kim, H. Y., Lieffering, M., Okada, M., and Miura, Sh. 2005. Modeling the interactive effects of atmospheric CO2 and N on rice growth and yield. Field Crops Research 93: 237-251.

Belder, P., Bouman, B. A. M., Spiertz, J. H. J., and Guoan, L. 2007. Exploring Option for water saving in lowland rice using a modeling approach. Agricultural Systems 92:91-114.

Boling, A., Bouman, B. A. M., Toung, T. P., Murty, M. V. R., and Jatmico, S. Y. 2007. Increasing rainfed rice productivity in centreal Java, Indinesia: A modeling approach using ORYZA2000. Agricultural Systems 92: 115-139.

Bouman, B. A. M., and Van Laar, H. H. 2006. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. Agricultural Systems 3: 249-273.

Bouman, B. A. M., Kropff, M. J., Toung, T. P., Wopereis, M. C. S., Ten Berg, H. F. M., and Van Laar, H. H. 2001. ORYZA2000: Modeling lowland rice. International Rice Research Institute, Wageningen University and Research Center, Los banos, Philippines, Wageningen, Netherlands. 235 pp.

Bouman, B. A. M., Feng, L., Tuong, T. P., Lu, G., Wang, H., and Feng, Y. 2007. Exploring options to grow rice under water-short condition in northern China using a modeling approach. II: Quantifying yield, water balance components and water productivity. Agricultural Water Management 88: 23-33.

Feng, L., Bouman, B. A. M., Tuong, T. P., Cabangon, R. J., Li, Y., Lu, G., and Feng, Y. 2007. Exploring options to grow rice under water-short condition in northern China using a modeling approach. I: Field experiments and model evaluation. Agricultural Water Management 88: 1-13.

Goudriaan, J., and Van Laar, H. H. 1994. Simulation of crop growth processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 238 pp.

Jamieson, P. D., Porter, J. R., and Wilson, D. R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research 27(4): 337-350.

Jing, Q., Bouman, B. A. M., Keulen, H. V., Hengsdijk, H., Cao, W., and Dai, T. 2008. Disentangling the effect of environmental factors on yield and nitrogen uptake of irrigated rice in Asia. Agricultural Systems 98:177-188.

Khanal, R. R. 2005. Phyllochron and leaf development in field grown rice genotypes under varying thermal environments of a high altitude cropping system. MSc. Thesis. University of Zu Bonn, Germany.

Kotera, A., Nawata, E., Chuong, P., Giao, N. N., and Sakuratani, T. 2004. A model for phenological development of Vietnamese rice influenced by transplanting shock. Plant Production Science 7: 62–69.

Li, T., Bouman, B. A. M., and Boling, A. 2009. The calibration and validation of ORYZA2000. International Rice Research Institute. Los Banos, Philippines.

Rinaldi, M., Losavio, N., and Flagella, Z. 2003. Evaluation of OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. Agicultural Systems 78: 17-30.

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. IRRI Discussion Paper Series 28. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, 110 pp.

Spitters, C. J. T., Van Keulen, H., and Van Kraalingen, D. W. G. 1989. A simple and universal crop growth simulator, SUCROS87. Pp. 147-181. In: Rabbinge, R., Ward, S. A., Van Laar, H. H. (eds.). Simulation and Systems Management in Crop Protection, Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.

Timsina, J., and Humphreys, E. 2003. Performance and application of CERES and SWAGMAN Destiny models for rice-wheat cropping systems in Asia and

Australia, a review. CSIRO Land and Water Technical Report 16/03. CSIRO Land and Water, Griffith, NSW 2680, Australia. 57pp.

Van Laar, H. H., Goudriaan, J., and Van Keulen, H. (eds.). 1997. SUCROS97, simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. Quantitative Approaches in Systems Analysis 14. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and AB-DLO, Wageningen, The Netherlands. 52 pp.

Wikarmpapraharn, C., and Kositsakulchai, E. 2010. Evaluation of ORYZA2000 and CERESS-Rice models under potential growth condition in the central plain of Thailand. Thai Journal of Agricultural Science 43(1): 17-29.

Xue, C., Yang, X., Bouman, B. A. M., Deng, W., Zhang, Q., Yan, W., Zhang, T., Rouzi, A., and Wang, H. 2008. Optimizing yield, water requirements, and water productivity of aerobic rice for the north China plain. Irrigation Science 26: 459-474.