شبیه‌سازی پاسخ عملکرد دو رقم برنج محلی به مدیریت آبیاری با استفاده از مدل CropSyst

زهرا سعادتی[۱]، نادر پیرمرادیان[۱*] و مجتبی رضایی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۷/۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۳/۲۷)

چکیده

شبیه‌سازی پاسخ عملکرد گیاه نسبت به آب، نقشی کلیدی در بهینه نمودن بهره‌وری آب کشاورزی بازی می‌کند. در این تحقیق از مدل CropSyst جهت شبیه‌سازی پاسخ عملکرد دو رقم برنج محلی تحت پنج رژیم آبیاری شامل آبیاری برنج به صورت غرقاب دائم و آبیاری صفر، سه، شش و نه روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین در منطقه رشت در دو فصل زراعی ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ استفاده شد. ضرایب واسنجی مدل با استفاده از داده‌های سال ۱۳۸۲ به‌دست آمد و ارزیابی مدل توسط داده‌های سال ۱۳۸۳ انجام گرفت. نتایج انجام آزمون F حاکی از عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد در هر دو رقم بینام و حسنی بود. خطای نسبی برآورد عملکرد در سال ۱۳۸۲ برای رقم بینام بین ۰/۸۱- تا ۱۲/۵۸ درصد و برای رقم حسنی بین ۲/۴- تا ۱۹/۴۲ درصد و در سال ۱۳۸۳ برای رقم بینام بین ۰/۸۳ تا ۱۶/۴ درصد و برای رقم حسنی بین ۲/۸۲- تا ۲۱/۲۷ درصد به‌دست آمد. با توجه به توانایی مدل CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد گیاه برنج تحت رژیم‌های مختلف آبیاری، این مدل می‌تواند در تعیین استراتژی‌های بهینه مدیریت برای بهبود بهره‌وری آب در کشت برنج مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: برنج، مدل CropSyst، بهره‌وری آب، مدیریت آبیاری

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲. مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: npirmoradian@guilan.ac.ir

مقدمه

برنج به عنوان غذای اساسی مردم در آسیا و قسمت‌های دیگر جهان، مانند کشورهای اروپایی اطراف دریای مدیترانه محسوب می‌شود (۱۰). با توجه به نیاز آبی بالای برنج، افزایش بهره‌وری مصرف آب، عامل کلیدی برای رفع بزرگ‌ترین چالش کنونی بخش کشاورزی در مناطق کم آب است. برای نیل به این هدف از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه می‌توان به عنوان یک ابزار استفاده نمود. یک مدل گیاهی با استفاده از مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی وابسته و خصوصیات ژنتیکی می‌تواند رشد، توسعه و عملکرد یک گیاه را پیش‌بینی کند (۱۴). کاربرد دیگر مدل‌های گیاهی استفاده از آنها به عنوان ابزار تصمیم‌گیری برای مدیریت سیستم است (۱۹). برای تعیین زمان بندی مطلوب در کم آبیاری نیاز به درک درستی از واکنش گیاه به تنش آبی است، که این امر می‌تواند با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه صورت گیرد (۱۱).

مدل شبیه‌ساز CropSyst در طول ۱۵ سال گذشته توسعه پیدا کرده و تبدیل به یک مدل با قابلیت شبیه‌سازی چندساله و چندگیاهی و توانایی برقراری ارتباط با نرم افزار GIS شده است. مدل مذکور شبیه‌سازی رشد گیاه را بر اساس میزان آب و تابش رسیده انجام می‌دهد. این مدل برای مناطق مختلف و در موارد متعددی مورد استفاده قرار گرفته است (۱۸). در جنوب شرقی استرالیا، مدل CropSyst توانست فنولوژی، ماده خشک و عملکرد گندم، نخود سبز و خردل را به خوبی شبیه‌سازی کند (۷). در شمال ایتالیا، عملکرد گیاه برنج توسط این مدل به خوبی شبیه‌سازی شد (۵). ارزیابی بیلان آب و نیتروژن در مدل CropSyst برای سیستم‌های مختلف کشت در منطقه جنوب ایتالیا بر روی گیاه ذرت، نشان داد که مطابقت خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده رطوبت خاک و نیترات وجود دارد (۹). هم‌چنین نتایج مشابهی، برای گیاه ذرت در مرکز ایتالیا به‌دست آمد (۱۷). سینگ و همکاران (۱۸) مدل‌های CERES-Wheat و CropSyst را در شبیه‌سازی اثر توامان آب و نیتروژن روی گیاه گندم ارزیابی کردند. نتایج حاصل نشان داد که مدل CropSyst عملکرد و ماده خشک گندم را با دقت بیشتری نسبت به مدل CERES-Wheat شبیه‌سازی می‌کند.

پالا و همکاران (۱۵) جهت تشخیص کارایی مدل CropSyst در شبیه‌سازی تولید ماده خشک و عملکرد در واکنش به آب و نیتروژن محصولات مجزا در یک فصل جداگانه و تحت شرایط آزمایشی، ترتیب وسیعی از شرایط خشک تا کاملا آبیاری شده و از مقدار کم نیتروژن موجود در خاک تا شرایط عالی را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیقات محسنی و همکاران (۲) برای شبیه‌سازی اثر آب و نیتروژن بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم عملکرد دانه شبیه‌سازی شده سازگاری مطلوبی با مقادیر واقعی داشته به طوری که ریشه میانگین مربعات خطا در طول سه فصل رشد معادل ۰/۴۱، ۰/۳۳ و ۰/۳۴ تن در هکتار به‌دست آمد. قابلیت شبیه‌سازی تناوب گیاهی مدل CropSyst در نقاطی از شمال و جنوب ایتالیا تحت ارزیابی قرار گرفت (۸). ارزیابی عملکردهای شبیه‌سازی شده سیستم‌های کشت مختلف در هفت سال متوالی به استثناء شبیه‌سازی محصولات تابستانه بعد از برداشت جو به طور کلی نتایج خوبی را نشان داد. هم‌چنین صحت این مدل برای گندم پاییزه و بهاره تحت مدیریت‌های مختلف خاک مورد ارزیابی و تایید قرار گرفت. استوکل و همکاران (۲۲) با استفاده از مدل CropSyst سازگاری مناسبی بین عملکرد دانه و ماده خشک شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده گندم پاییزه و بهاره با ۷۷ سری داده، که در دو محل کاشته شده بود، یافتند. در تحقیقات مومنی و همکاران (۳) برای پهنه‌بندی بهره‌وری مصرف آب گندم با استفاده از مدل رشد گیاهی CropSyst در دوره‌های آبی متفاوت در منطقه کرخه عملکرد دانه شبیه‌سازی شده سازگاری مطلوبی با مقادیر واقعی داشته به طوری که ریشه میانگین مربعات خطای آن ۰/۰۳۹ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. هدف از این مطالعه واسنجی و ارزیابی توانایی مدل CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم برنج بینام و حسنی تحت پنج تیمار آبیاری مختلف در منطقه رشت بود.

مواد و روش‌ها

۱. موقعیت محل آزمایش

بخشی از اطلاعات مورد نیاز این پژوهش از یک آزمایش مزرعه‌ای انجام شده در منطقه رشت با عرض جغرافیایی ″۱۲ °۳۷ شمالی و طول جغرافیایی ″۳۹ °۴۹ شرقی و ارتفاع ۳۶/۷ متر از سطح دریا، در طی ۲ سال زراعی ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ به‌دست آمد (۱). اطلاعات هواشناسی شامل بارندگی، ساعات آفتابی روزانه، سرعت باد، دما و رطوبت نسبی از ایستگاه هواشناسی مجاور محل آزمایش برداشت شد. برای یک دوره آماری ۴۰ ساله (۱۹۶۵–۲۰۰۵) محدوده تغییرات دمای رشت از ۱۴/۴ تا ۱۸/۳ درجه سانتی‌گراد با میانگین دمای ۱۶/۱ درجه سانتی‌گراد، محدوده تغییرات رطوبت نسبی از ۷۵ تا ۸۸ درصد با میانگین رطوبت نسبی ۸۲/۳ درصد است. هم‌چنین میانگین بارش در دوره آماری فوق ۱۳۷۱/۷۵ میلی‌متر است. در جدول ۱ پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. دلیل تفاوت در برخی اعداد این جدول برای رقم‌های بینام و حسنی، تفاوت در طول دوره‌ی رشد گیاه برای این رقم‌ها است.

۲. اطلاعات خاک محل آزمایش

برخی خصوصیات خاک محل آزمایش به عنوان بخشی از اطلاعات ورودی مدل CropSyst در جدول ۲ ارائه شده است. خاک منطقه آزمایش دارای دو لایه با بافت سیلت رسی بود.

۳. آزمایش‌های مزرعه‌ای

اندازه‌گیری‌های مورد نیاز جهت واسنجی و ارزیابی مدل، از یک آزمایش مزرعه‌ای در منطقه رشت در طی دو فصل زراعی ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ بر روی دو رقم برنج محلی بینام (B) و حسنی (H) به‌دست آمد. تیمارهای آزمایش شامل آبیاری برنج به صورت غرقاب دائم (CI) و آبیاری صفر (DIS0)، سه (DIS3)، شش (DIS6) و نه (DIS9) روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین بود. منظور از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین عدم وجود آب به صورت پیوسته روی سطح است و اگر به صورت پراکنده آب روی سطح زمین بود در نظر گرفته نمی‌شد. اطلاعات مربوط به تاریخ کاشت و برداشت برای ارقام بینام و حسنی در جدول ۳ ارائه شده است.

ابتدا زمین مورد نظر جهت انجام آزمایش انتخاب و با روش‌های معمول آماده‌سازی زمین، شخم زده شد. جهت جلوگیری از فرار آب، مرز کرت‌ها با ورقه نایلون تا عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک پوشانیده شد. آن‌گاه نشاءهای برنج را که قبلاً در خزانه آماده شده بود به زمین اصلی منتقل نموده و به فاصله ۲۰×۲۰ سانتی‌متر از هم نشاء شد. سطح در نظر گرفته برای هر کرت ۱۵ (۵×۳) متر مربع بود. به منظور استقرار نشاء تیمارهای آبیاری تا ۱۰ روز پس از نشا اعمال نشدند. آن‌گاه برای اعمال تیمارهای مختلف به گونه‌ای عمل شد که صفر، سه، شش و یا نه روز پس از ناپدید شدن آب از سطح مزرعه، کرت مزبور به ارتفاع ۵ سانتی‌متر آبیاری شود. حجم آب ورودی به کرت توسط کنتور حجمی اندازه‌گیری شد.

۴. توصیف مدل CropSyst

در این تحقیق از نسخه ۳ مدل CropSyst استفاده شد. مدل گیاهی CropSyst یک مدل شبیه‌سازی سیستم‌های کشت چندساله، چند محصوله و با گام زمانی روزانه است که به عنوان ابزاری جهت تحلیل اثر اقلیم، خاک و مدیریت در بهره‌وری سیستم‌های کشت و محیط توسعه یافته است. این مدل توانایی شبیه‌سازی بودجه آبی خاک، بودجه نیتروژن گیاه–خاک، فنولوژی محصول، سطح سایه‌انداز گیاه و رشد ریشه، تولید ماده خشک، عملکرد محصول، تولید و تجزیه باقی‌مانده، فرسایش آبی خاک و شوری را دارا می‌باشد. این فرآیندها تحت تاثیر شرایط آب و هوایی، مشخصات خاک و گیاه و گزینه‌های مدیریتی سیستم‌های کشت شامل تناوب محصول، انتخاب نوع شخم و شیار، آبیاری، کوددهی نیتروژن، شوری آب آبیاری و خاک، عملیات کشت و مدیریت باقی‌مانده‌ها قرار می‌گیرند (۲۱). اجزای اصلی مدل شامل توسعه گیاه، رشد گیاه، موازنه

جدول ۱. پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد برای دو رقم بینام و حسنی در منطقه رشت

پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد	۱۳۸۲		۱۳۸۳	
	بینام	حسنی	بینام	حسنی
تابش طول موج کوتاه، $MJm^{-2}d^{-1}$	۲۶/۰۴	۲۶/۲۳	۲۶/۰۷	۲۵/۸۴
میانگین حداقل دمای روزانه، C°	۱۹/۴	۱۹/۴	۱۸/۷	۱۸/۷
میانگین حداکثر دمای روزانه، C°	۲۸/۳	۲۸/۲	۲۷/۵	۲۷/۳
درصد رطوبت نسبی	۷۶	۷۶/۰۵	۷۸/۶	۷۸/۹
تبخیر، mm	۳۱۶	۳۰۰/۲	۳۰۹/۱	۲۹۱/۸
کل بارش، mm	۱۳۰/۱	۱۲۷/۲	۳۱۷	۳۱۷

جدول ۲. برخی خصوصیات خاک محل آزمایش

عمق (سانتی‌متر)	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	pH
۰-۳۰	۱۳/۳۳	۴۰/۶۷	۴۶	۷/۲۱
۳۰-۶۰	۱۰	۴۲	۴۸	۷

جدول ۳. اطلاعات مربوط به تاریخ کاشت و برداشت در دو رقم بینام و حسنی

سال	تاریخ بذرپاشی	تاریخ نشاء	تاریخ برداشت	
			بینام	حسنی
۱۳۸۲	۱۳ اردیبهشت	۶ خرداد	۲۹ مرداد	۲۵ مرداد
۱۳۸۳	۳۰ فروردین	۲۰ اردیبهشت	۲۱ مرداد	۱۷ مرداد

آب و موازنه نیتروژن هستند. در بخش توسعه گیاه، سرعت توسعه گیاه براساس نیازهای زمان حرارتی(Thermal time)، فتوپریود و بهاره‌سازی(Vernalization) تخمین زده می‌شود.

در این مدل، رشد روزانه گیاه بر اساس دو روش ارتباط افزایش ماده خشک و تابش (۱۲) و یا ارتباط بین رشد ماده خشک و تعرق (۲۳) شبیه‌سازی می‌شود، که در این تحقیق از روش اول استفاده شد. هسته محاسبه ماده خشک روزانه در مدل CropSyst مربوط به تعیین ماده خشک تحت شرایط بدون تنش بر مبنای تعرق پتانسیل گیاه و تابش فعال فتوسنتزی (Photosynthetically active radiation)(PAR) است. سپس مقدار پتانسیل، تحت تاثیر محدودیت آب و نیتروژن تصحیح شده و مقدار واقعی ماده خشک روزانه به‌دست می‌آید.

شبیه‌سازی عملکرد بستگی به کل ماده خشک تجمعی در بلوغ فیزیولوژیک گیاه و شاخص برداشت دارد. شاخص برداشت بر مبنای یک شاخص برداشت بدون تنش که مطابق با شدت تنش (آب و نیتروژن) و حساسیت محصول به تنش در طول گلدهی و پر شدن اصلاح می‌شود، تعیین شده است.

۵. پارامترهای ورودی و خروجی مدل

برای اجرای مدل CropSyst، چهار دسته داده شامل فایل‌های موقعیت جغرافیایی، خاک، گیاه و مدیریت به عنوان ورودی مورد نیاز است. تعریف، کاربرد و دامنه تغییرات تمام پارامترهای مورد نیاز در راهنمای مدل بیان شده است (۲۰). اطلاعات هواشناسی مورد نیاز مدل شامل بارش، حداکثر و

حداقل دما، تابش، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی و میانگین سرعت باد است. تبخیر- تعرق گیاه با استفاده از معادله پریستلی- تیلور یا معادله پنمن-مانتیث محاسبه می‌شود که در این تحقیق از معادله پنمن-مانتیث استفاده شد. فایل گیاه شامل اطلاعات فنولوژی، مورفولوژی، رشد، پس‌ماند، نیتروژن و شاخص برداشت است. فایل کنترل شبیه‌سازی، انواع مختلف فایل‌های ورودی را در صورت مناسب بودن برای اجرای یک شبیه‌سازی مشخص، ترکیب می‌نماید. هم‌چنین روز شروع و پایان شبیه‌سازی و تناوب محصولی که باید شبیه‌سازی شود را تعیین و مقادیر کلیه پارامترهای مورد نیاز را وارد می‌کند.

خروجی‌های اصلی مدل عبارتند از: زمان برداشت، زمان سبز شدن، تاریخ رسیدگی، تاریخ رکود کاشت (Dormancy date)، میزان محصول، وزن خشک اندام هوایی، آب زهکش شده از خاک، تبخیر- تعرق واقعی، کل نیتروژن جذب شده و نیتروژن آبشویی شده از خاک.

۶. بهره‌وری آب

بر اساس نتایج حاصل از مدل CropSyst مقادیر بهره‌وری آب بر اساس میزان تعرق، تبخیر- تعرق و مجموع آب مصرفی و بارش در تیمارهای مختلف به ترتیب با استفاده از معادلات زیر محاسبه شد (۱۲):

$$WP_T = \frac{Y_g}{T} \quad [۱]$$

$$WP_{ET} = \frac{Y_g}{E+T} = \frac{Y_g}{ET} \quad [۲]$$

$$WP_{I+R} = \frac{Y_g}{I+R} \quad [۳]$$

در روابط بالا WP_T بهره‌وری آب براساس میزان تعرق (کیلوگرم بر مترمکعب)، WP_{ET} بهره‌وری آب براساس میزان تبخیر- تعرق (کیلوگرم بر مترمکعب)، WP_{I+R} بهره‌وری آب براساس مجموع آب مصرفی و بارش (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y_g عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)، T مقدار تعرق شبیه‌سازی شده توسط مدل (میلی‌متر)، E مقدار تبخیر شبیه‌سازی شده توسط مدل (میلی‌متر)، I مقدار آبیاری (میلی‌متر) و R مقدار بارش (میلی‌متر) است.

۷. معیارهای ارزیابی مدل

مدل CropSyst با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای سال ۱۳۸۲ واسنجی شد و ارزیابی مدل توسط داده‌های سال ۱۳۸۳ انجام گرفت. در ارزیابی گرافیکی مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده پارامترها از ضریب تبیین (R^2) استفاده گردید. براساس داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده و با استفاده از معیارهای خطای نسبی (E_r)، ضریب جرم باقی‌مانده‌ها (C_{RM})، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE) ارزیابی آماری مدل انجام گرفت. مقادیر E_r، C_{RM}، RMSE و RRMSE هر چه به صفر نزدیک‌تر باشند، نشان دهنده این مطلب است که مدل شبیه‌سازی را بهتر انجام داده است.

نتایج و بحث

۱. نتایج واسنجی مدل

اطلاعات ورودی مدل CropSyst در قالب فایل‌های اطلاعات هواشناسی (بارش، حداکثر و حداقل دما، تابش خورشیدی، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی و سرعت باد روزانه)، اطلاعات گیاه، اطلاعات خاک و مدیریت آماده‌سازی شد. مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای سال ۱۳۸۲ واسنجی شد و ارزیابی مدل توسط داده‌های سال ۱۳۸۳ انجام گرفت. با تغییر ضرایب واسنجی مدل و بر اساس بهترین تطابق نتایج خروجی، ضرایب واسنجی به صورت مقادیر گزارش شده در جدول ۴ به‌دست آمد.

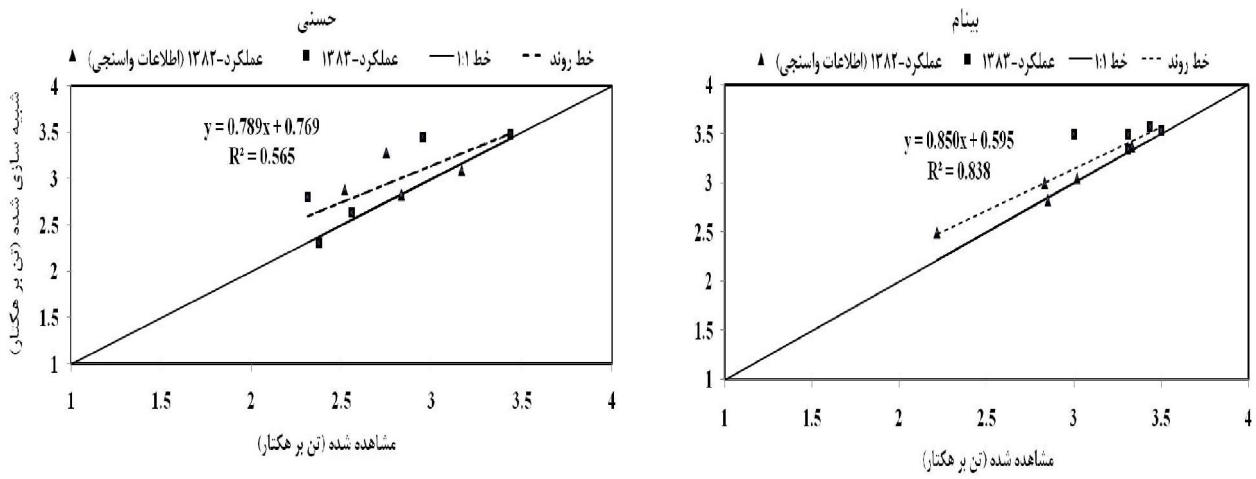
۲. ارزیابی مدل

مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده عملکرد برای سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ در دو رقم بینام و حسنی با خط یک به یک در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، در اکثر تیمارها نقاط در بالای خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند و این بدین معنی است که در این تیمارها مدل مقدار عملکرد را بیش از مقدار مشاهده

جدول ۴. پارامترهای گیاهی استفاده شده در مدل CropSyst برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه برنج

پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد
ضریب ماده خشک- تعرق (BTR)	۵	$kPa\ kg\ m^{-3}$	ضریب نسبت ساقه به برگ (SLP)	۴/۵	–
ضریب تبدیل نور به ماده خشک (LtBC)	۳	$g\ MJ^{-1}$	دوام برگ	۷۰۰	°C-days
نسبت تعرق واقعی به پتانسیل در محدود کردن شاخص سطح برگ	۰/۹۵	–	ضریب خاموشی تابش خورشیدی (k)	۰/۵	–
نسبت تعرق واقعی به پتانسیل در محدود کردن رشد ریشه	۰/۵	–	ضریب تبخیر- تعرق گیاه در پوشش کامل گیاهی	۱/۰۵	–
دمای بهینه روزانه برای رشد (T_{opt})	۲۷	°C	درجه روز جوانه‌زنی	۸۲	°C-days
حداکثر جذب آب	۱۳	$mm\ day^{-1}$	درجه روز حداکثر شاخص سطح برگ	۸۰۰	°C-days
پتانسیل آب برگ در شروع بسته شدن روزنه	۱۲۰۰	$J\ kg^{-1}$	درجه روز گلدهی	۸۲۵	°C-days
پتانسیل آب برگ در زمان پژمردگی	۱۸۰۰	$J\ kg^{-1}$	درجه روز شروع پر شدن دانه	۸۶۴	°C-days
حداکثر عمق ریشه	۰/۳۵	m	درجه روز رسیدگی فیزیولوژیکی	۱۰۸۷	°C-days
حداکثر شاخص سطح برگ مورد انتظار	۵/۹	$m^2\ m^{-2}$	دمای پایه (T_{base})	۱۲	°C
کسری از حداکثر شاخص سطح برگ در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک	۰/۵	–	دمای قطع (T_{cutoff})	۳۰	°C
سطح ویژه برگ (SLA)	۲۷	$m^2\ kg^{-1}$			



شکل ۱. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده عملکرد برنج برای دو رقم بینام و حسنی

شده شبیه‌سازی کرده است. برای رقم بینام تطابق بهتر (R^2=۰/۸۳۸) مقادیر عملکرد مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نسبت به رقم حسنی (R^2=۰/۵۶۵) حاکی از موفقیت بیشتر مدل در شبیه‌سازی میزان عملکرد دانه برای این رقم است. تجزیه و تحلیل‌های آماری از طریق آزمون F برای مقایسه خط ۱:۱ و خط روند نشان داد که در سطح احتمال یک درصد (۹۹ درصد اطمینان) اختلاف معنی‌داری از لحاظ شیب و عرض از مبداء بین خط ۱:۱ و خط روند وجود ندارد و در نتیجه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد در هر دو رقم بینام و حسنی از نظر آماری اختلاف معنی‌دار ندارند.

مقادیر خطای نسبی مدل در شبیه‌سازی عملکرد ارقام مورد آزمایش در تیمارهای مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. هم‌چنین معیارهای ارزیابی مدل در این شبیه‌سازی شامل RMSE، C_{RM} و RRMSE در جدول ۶ آمده است.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود مقدار خطای نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد در سال ۱۳۸۲ برای رقم بینام بین ۰/۸۱- تا ۱۲/۵۸ درصد و برای رقم حسنی بین ۲/۴- تا ۱۹/۴۲ درصد و در سال ۱۳۸۳ برای رقم بینام بین ۰/۸۳ تا ۱۶/۴ درصد و برای رقم حسنی بین ۲/۸۲- تا ۲۱/۲۷ درصد است. مدل CropSyst برای برخی از گیاهان خاص مورد واسنجی قرار گرفته است. در تحقیقات محسنی و همکاران (۲) برای شبیه‌سازی رشد گیاه گندم دامنه مقدار خطای مطلق بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده عملکرد بین ۲/۷ تا ۳۷/۲ درصد و برای ماده خشک بین ۲/۲ تا ۳۰ درصد به‌دست آمد. هم‌چنین بنلی و همکاران (۴) عملکرد گندم زمستانه را با استفاده از مدل CropSyst شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که دامنه مقدار خطا بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده عملکرد بین ۹/۷۱- تا ۱۴/۱۶ درصد، برای ماده خشک بین ۱۲/۹۵- تا ۶۶/۹۸ درصد و برای تبخیر- تعرق بین ۱۷/۸۷- تا ۲/۶۳ درصد است. بر این اساس، نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که مدل CropSyst عملکرد ارقام مورد مطالعه برنج را نیز توانسته به خوبی شبیه‌سازی کند.

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۶ و با توجه به مقادیر پایین‌تر معیارهای ارزیابی برای رقم بینام، شبیه‌سازی رشد این رقم نسبت به رقم حسنی با دقت بیشتری صورت گرفته است. برای هر دو سال واسنجی و ارزیابی مقدار ضریب جرم باقی‌مانده‌ها برای هر دو رقم بینام و حسنی منفی به‌دست آمده که نشان دهنده این مطلب است که مقادیر شبیه‌سازی شده در اکثر تیمارها بیشتر از مقادیر مشاهده شده است.

در مطالعات پالا و همکاران (۱۵) در شبیه‌سازی تولید ماده خشک و عملکرد مقدار RMSE برابر با ۰/۴۴۳ تن بر هکتار گزارش شد. هم‌چنین در تحقیقات سادرس (۱۶) برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم مقدار RMSE برابر با ۰/۲۱ مگاگرم بر هکتار و مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برابر با ۰/۷۲ به‌دست آمد. در تحقیقات محسنی و همکاران (۲) برای شبیه‌سازی اثر آب و نیتروژن بر عملکرد گندم مقدار RMSE در طول سه فصل رشد معادل ۰/۴۱، ۰/۳۳ و ۰/۳۴ تن در هکتار به‌دست آمد. در تحقیقات کانفالونیری و باچی (۶)، بر روی شبیه‌سازی رشد گیاه برنج در شمال ایتالیا برای شبیه‌سازی ماده خشک دامنه RRMSE برای سال واسنجی و ارزیابی به ترتیب ۱۱ تا ۲۹ درصد و ۱۰ تا ۵۲ درصد و دامنه C_{RM} برای سال واسنجی و ارزیابی به ترتیب ۰/۰۳- تا ۰/۱۷ و ۰/۰۲- تا ۰/۱۷ به‌دست آمد. هم‌چنین در تحقیقات سینگ و همکاران (۱۸)، در ارزیابی مدل‌های CERES-Wheat و CropSyst در شبیه‌سازی رشد گیاه گندم، مقدار RMSE بین عملکرد مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در مدل‌های CropSyst و CERES-Wheat به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۶۳ مگاگرم بر هکتار به‌دست آمد. این مقادیر برای شبیه‌سازی ماده خشک به ترتیب برابر ۱/۲۷ و ۱/۹۴ مگاگرم بر هکتار به‌دست آمد. مقایسه این نتایج با مقادیر به‌دست آمده در این پژوهش حاکی از توانایی قابل قبول مدل CropSyst در شبیه‌سازی رشد گیاه برنج برای رقم‌های مورد مطالعه است.

با توجه به مقادیر دیده شده عملکرد و اندازه‌گیری میزان آب مصرفی و بارش مقادیر بهره‌وری براساس مجموع آب

جدول ۵. مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و درصد خطای نسبی

تیمار	۱۳۸۲			۱۳۸۳		
	مشاهده شده (تن بر هکتار)	شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	خطای نسبی (درصد)	مشاهده شده (تن بر هکتار)	شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	خطای نسبی (درصد)
B-CI	۳/۰۱۷	۳/۰۵۳	۱/۱۹	۳	۳/۴۹۲	۱۶/۴
B-DIS0	۳/۳۳۳	۳/۳۶۸	۱/۰۵	۳/۴۳۷	۳/۵۶۹	۳/۸۴
B-DIS3	۲/۸۳۳	۲/۹۹۴	۵/۶۸	۳/۳۱۲	۳/۴۹۱	۵/۴
B-DIS6	۲/۲۱۷	۲/۴۹۶	۱۲/۵۸	۳/۳۱۲	۳/۳۴۶	۱/۰۳
B-DIS9	۲/۸۵	۲/۸۲۷	−۰/۸۱	۳/۵	۳/۵۲۹	۰/۸۳
H-CI	۳/۱۶۷	۳/۰۹۱	−۲/۴	۲/۹۵	۳/۴۵۱	۱۶/۹۸
H-DIS0	۲/۸۳۳	۲/۸۲۳	−۰/۳۵	۲/۳۱۳	۲/۸۰۵	۲۱/۲۷
H-DIS3	۲/۷۵	۳/۲۸۴	۱۹/۴۲	۳/۴۳۷	۳/۴۸۱	۱/۲۸
H-DIS6	۲/۸۳۳	۲/۸۳۵	۰/۰۷	۲/۳۷۵	۲/۳۰۸	−۲/۸۲
H-DIS9	۲/۵۱۷	۲/۸۸۵	۱۴/۶۲	۲/۵۵۶	۲/۶۳۱	۲/۹۳

جدول ۶. مقادیر RMSE، C_{RM} و RRMSE برای نتایج شبیه‌سازی عملکرد

رقم	۱۳۸۲			۱۳۸۳		
	RMSE (tha^{-1})	C_{RM}	RRMSE (%)	RMSE (tha^{-1})	C_{RM}	RRMSE (%)
بینام	۰/۱۵	−۰/۰۳	۵/۱۳	۰/۲۴	−۰/۰۵	۷/۳۱
حسنی	۰/۲۹	−۰/۰۶	۱۰/۳۶	۰/۳۲	−۰/۰۸	۱۱/۶۶

مصرفی و بارش در تیمارهای مختلف آبیاری در جدول ۷ ارائه شده است. مقادیر بهره‌وری آب بر اساس مجموع آب مصرفی و بارش در هر دو سال واسنجی و ارزیابی برای رقم بینام در تیمار DIS9 و برای رقم حسنی در تیمار DIS3 بیشترین مقدار را داشته است.

با توجه به تغییرات میزان بارش در سال‌های مختلف، ارزیابی بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف براساس مجموع بارش و آبیاری ارجح است. مدل CropSyst براساس نتایج شبیه‌سازی، میزان بهره‌وری آب را در شکل‌های مختلف ارائه می‌دهد. بر این اساس، مقادیر بهره‌وری بر اساس میزان تعرق، بهره‌وری براساس میزان تبخیر- تعرق و بهره‌وری براساس مجموع آبیاری و بارش در تیمارهای مختلف در جدول ۸ ارائه شده است. بهره‌وری براساس میزان تعرق روی مکانیسم گیاه بحث می‌کند. بهره‌وری براساس میزان تبخیر- تعرق بر روی مسائل مربوط به خاک، گیاه و سایه‌اندازی بحث می‌کند. برای افزایش این شاخص باید تا حد امکان سطح مزرعه را با گیاه پوشش داده و حداکثر بوته را در زمین مستقر ساخت تا بیشترین مقدار آب صرف تعرق شود و نه تبخیر از سطح خاک. بهره‌وری براساس مجموع آبیاری و بارش بیشتر به راهکارهای مدیریتی مربوط می‌شود و باید به عنوان ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان داد که مقادیر بهره‌وری براساس میزان تعرق برای هر دو سال واسنجی و ارزیابی در تیمار DIS6 بیشترین مقدار را داراست. این نتیجه بیانگر آن است که مکانیسم گیاه در تولید عملکرد علی‌رغم

جدول ۷. مقادیر مشاهده شده بهره‌وری بر اساس مجموع آب آبیاری و بارش (WP_{I+R}) در تیمارهای مختلف

تیمار	۱۳۸۲				۱۳۸۳			
	عملکرد مشاهده شده (کیلوگرم بر هکتار)	مقدار آب مصرفی (میلی‌متر)	بارش (میلی‌متر)	WP_{I+R} (کیلوگرم بر مترمکعب)	عملکرد مشاهده شده (کیلوگرم بر هکتار)	مقدار آب مصرفی (میلی‌متر)	بارش (میلی‌متر)	WP_{I+R} (کیلوگرم بر مترمکعب)
B-CI	۳۰۱۷	۴۷۷		۰/۵	۳۰۰۰	۲۹۵		۰/۶
B-DIS0	۳۳۳۳	۳۶۳		۰/۶۷۶	۳۴۳۷	۱۹۴		۰/۶۷
B-DIS3	۲۸۳۳	۳۰۰	۱۳۰/۱	۰/۵۵	۳۳۱۲	۲۰۹	۳۱۷	۰/۶۳
B-DIS6	۲۲۱۷	۲۳۸		۰/۶	۳۳۱۲	۱۱۸		۰/۷۶
B-DIS9	۲۸۵۰	۲۸۹		۰/۶۸	۳۵۰۰	۱۷۳		۰/۷۱
H-CI	۳۱۶۷	۵۱۹		۰/۵	۲۹۵۰	۲۷۹		۰/۵
H-DIS0	۲۸۳۳	۴۸۹		۰/۴۶	۲۳۱۳	۲۰۶		۰/۴۳
H-DIS3	۲۷۵۰	۳۵۲	۱۲۷/۲	۰/۵۷۴	۳۴۳۷	۱۲۵	۳۱۷	۰/۶۴۸
H-DIS6	۲۸۳۳	۴۹۸		۰/۴۵	۲۳۷۵	۱۰۱		۰/۶۴۷
H-DIS9	۲۵۱۷	۳۱۳		۰/۵۷۲	۲۵۵۶	۱۴۳		۰/۶۱

جدول ۸ مقادیر بهره‌وری آب براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل CropSyst در تیمارهای مختلف

تیمار	۱۳۸۲			۱۳۸۳		
	WP_T * ($kg\ m^{-3}$)	WP_{ET} * ($kg\ m^{-3}$)	WP_{I+P} * ($kg\ m^{-3}$)	WP_T ($kg\ m^{-3}$)	WP_{ET} ($kg\ m^{-3}$)	WP_{I+P} ($kg\ m^{-3}$)
B-CI	۱/۶	۱/۱۳	۰/۵	۲/۰۸	۱/۱۹	۰/۵۷
B-DIS0	۱/۸۷	۱/۱۶	۰/۶۸	۲/۰۱	۱/۲۲	۰/۷
B-DIS3	۱/۸۶	۱/۲۴	۰/۷	۲/۰۱	۱/۲	۰/۶۶
B-DIS6	۱/۹۳	۱/۱۴	۰/۶۸	۲/۱۷	۱/۳۱	۰/۷۷
B-DIS9	۱/۸۹	۱/۲	۰/۶۷	۲/۱۵	۱/۳۶	۰/۷۲
H-CI	۱/۸۶	۰/۹۸	۰/۴۸	۲/۰۹	۱/۱۸	۰/۵۸
H-DIS0	۱/۸۵	۰/۹۵	۰/۴۶	۱/۷۸	۱/۳۵	۰/۵۴
H-DIS3	۱/۸۸	۱/۱۶	۰/۶۹	۲/۱۶	۱/۲۹	۰/۷۹
H-DIS6	۲/۰۳	۱/۱۸	۰/۴۵	۱/۸۳	۱/۳	۰/۵۵
H-DIS9	۱/۸۴	۱/۱۹	۰/۶۶	۱/۹۶	۱/۳۳	۰/۵۷

* WP_T: بهره‌وری براساس میزان تعرق؛ WP_{ET}: بهره‌وری براساس میزان تبخیر- تعرق WP_{I+P}: بهره‌وری براساس مجموع آبیاری و بارش

کاهش میزان آب در دسترس تا این سطح، موفق بوده است. از این شاخص می‌توان جهت مقایسه ارقام در شرایط تنش خشکی و انتخاب رقم مقاوم استفاده نمود. مقادیر بهره‌وری بر اساس میزان تبخیر-تعرق برای سال واسنجی در تیمار DIS3 و برای سال ارزیابی در تیمار DIS9 بیشترین مقدار را داراست. هم‌چنین در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل، بیشترین مقدار بهره‌وری بر اساس مجموع آبیاری و بارش برای رقم بینام در تیمار DIS6 و برای رقم حسنی در تیمار DIS3 به‌دست آمد (جدول ۸). این نتیجه با نتایج حاصل از مقادیر دیده شده (جدول ۷) مطابقت دارد. بر این اساس مدل در برآورد بهره‌وری بر اساس مجموع آبیاری و بارش موفق بوده و از آن می‌توان به عنوان ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری با لحاظ سناریوهای مختلف مدیریت آب و انتخاب بهترین سناریو با توجه به حصول بیشینه بهره‌وری آب استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی می‌توانند به عنوان ابزار تصمیم‌گیری برای مدیریت سیستم مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق مدل شبیه‌ساز CropSyst به منظور بررسی اثر مدیریت آبیاری بر عملکرد دو رقم برنج محلی بینام و حسنی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل آزمون F، بین مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل CropSyst و مقادیر مشاهده شده عملکرد در هر دو رقم بینام و حسنی، از نظر آماری اختلاف معنی‌دار وجود نداشت. موفقیت شبیه‌سازی برای رقم بینام بیشتر از رقم حسنی بود. با نگاه استفاده از مدل به عنوان ابزار تصمیم‌گیری برای مدیریت سیستم و با توجه به نتایج ارزیابی مدل، تیمارهای B-DIS6 و H-DIS3 به ترتیب برای ارقام بینام و حسنی بیشترین مقدار بهره‌وری را بر اساس مجموع آبیاری و بارش حاصل نمودند. بنابراین مدیریت‌های مذکور آبیاری می‌تواند برای رقم‌های فوق در منطقه مورد مطالعه توصیه شود. به طور کلی یافته‌های تحقیق، کارایی مطلوب مدل در شبیه‌سازی فرآیند رشد و تاثیر آب بر عملکرد و بهره‌وری آب برنج در مناطق مرطوب را تایید می‌نماید. از اینرو استفاده از مدل CropSyst به عنوان ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری برای دستیابی به بهره‌وری مطلوب آب در کشت برنج در مناطق شمالی کشور توصیه می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. رضایی، م. و م. نحوی. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر دور آبیاری در خاک‌های رسی بر کارایی مصرف آب و برخی از صفات دو رقم برنج محلی در استان گیلان. پژوهشنامه علوم کشاورزی ۱(۹): ۲۵-۱۵.

۲. محسنی، م.، ع. ا. منتظر و ع. رحیمی خوب. ۱۳۸۸. ارزیابی مدل گیاهی CropSyst در شبیه‌سازی اثر توامان آب و نیتروژن بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم. مجله آبیاری و زه‌کشی ایران ۳(۱): ۱۲۵-۱۲۳.

۳. مومنی، ر.، س. م. ر. بهبهانی، م. ه. نظری‌فر و ب. آزادگان. ۱۳۸۷. پهنه‌بندی بهره‌وری مصرف آب گندم با استفاده از مدل رشد گیاهی CropSyst در دوره‌های آبی متفاوت (مطالعه موردی: حوزه کرخه). مجله آبیاری و زهکشی ایران ۲(۱): ۷۶-۶۳.

4. Benli, B., M. Pala, C. Stockle and T. Oweis. 2007. Assessment of winter wheat production under early sowing with supplemental irrigation in a cold highland environment using CropSyst simulation model. Agric. Water Manage. 93: 45-53.

5. Bocchi, S., R. Confalonieri and L. Bechini. 2001. CropSyst for rice in Northern Italy. Proc. 2nd Modelling Cropping Sys. Intl. Symp., Florence, Italy.

6. Confalonieri, R. and S. Bocchi. 2005. Evaluation of CropSyst for simulating the yield of flooded rice in northern Italy. Eur. J. Agron. 23: 315–326.

7. Diaz-Ambrona, C. G. H., G. J. O'Leary, M. G. O'Connell and D. J. Connor. 2001. Application of CropSyst to a new location and crops: advantages and limitations. Proc. 2nd Intl. Symp. Modelling Cropping Systems, Florence, Italy.

8. Donatelli, M., C. O. Stockle , E. Ceotto and M. Rinaldi. 1996. CropSyst validation for cropping systems at two locations of Northern and Southern Italy. Eur. J. Agron. 6: 35-45.
9. Donatelli, M., P. Spallacci, R. Marchetti and R. Papini. 1996. Evaluation of CropSyst simulations of growth of maize and of water balance and soil nitrate content following organic and mineral fertilization applied to maize. Proc. 4th Eur. Society for Agronomy. Cong., Veldhoven-Wageningen, The Netherlands.
10. FAO. 1995. World Rice Information. issue NO. 1. FAO, Rome.
11. Farahani, H. J., G. Izzi and T. Y. Oweis. 2009. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. Agron. J. 101: 469–476.
12. Govindarajan, S., N. K. Ambujam and K. Karunakaran. 2008. Estimation of paddy water productivity (WP) using hydrological model: An experimental study. Paddy Water Environ. 6: 327–339.
13. Monteith, J. L. 1977. Climate and crop efficiency of crop production in Britain. Phil. Trans. Res. Soc. Lond. Ser. B 281: 277-329.
14. Monteith, J. L. 1996. The quest for balance in crop modelling. Agron. J. 88: 695–697.
15. Pala, M., C. O. Stockle and H. C. Harris. 1996. Simulation of durum wheat (*Triticum durum*) growth under differential water and nitrogen regimes in a Mediterranean type of environment using CropSys. Agric. Sys. 51: 147-163.
16. Sadras, V. O. 2002. Interaction between rainfall and nitrogen fertilisation of wheat in environments prone to terminal drought: economic and environmental risk analysis. Field Crops Res. 77: 201-215.
17. Silvestri, N., G. Bellocchi, M. Mazzoncini and S. Menini. 1999. Evaluation of the CropSyst model for simulating soil water, soil nitrate, green area index and above-ground biomass of maize under different management. Proceedings First International Symposium Modelling Cropping Systems, Lleida, Spain, 21-23 June, pp: 253-254.
18. Singh, A. K., R. Tripathy and U. K. Chopra. 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water–nitrogen interactions in wheat crop. Agron. J. 95: 776-786.
19. Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. Agron. J. 101: 426–437.
20. Stockle, C. O. and R. L. Nelson. 2000. Cropsyst User's manual (Version 3.0). Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman, WA.
21. Stockle, C. O., M. Donatelli and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. Eur. J. Agron. 18: 289–307.
22. Stockle, C. O., S. Martin and G. S. Campbell. 1994. CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. Agric. Sys. 46: 335-359.
23. Tanner, C. B. and T. R. Sinclair. 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search? *In*: Taylor, H. M., jordan, W. R. and Sinclair, T. R. (Eds.), Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. Amer. Soc. Agron, Madison, WI.

Yield Response Simulation of Two Local Rice Varieties to Irrigation Management Using CropSyst Model

Z. Saadati[1], N. Pirmoradian[1]* and M. Rezaei[2]

(Received: Sep. 25-2011 ; Accepted : June 16-2012)

Abstract

The modeling of yield response to water is expected to play an increasingly important role in the optimization of crop water productivity (WP) in agriculture. In this study, the CropSyst model was used to simulate two local rice varieties yield response under five irrigation treatments consisting of continuous flooding irrigation and irrigation at 0, 3, 6 and 9 days after the disappearance of water from the soil surface. The experiment was conducted at Rasht region during two growing seasons of 2003 and 2004. The model was calibrated using the first year data and validation of that was done using the second year data set. The result of F test shows that there was not a significant difference between the measured and simulated yield at confidence level of 99%. The relative errors of yield estimation were obtained between -0.81 to 12.58% and -2.4 to 19.42% for Binam and Hasani cultivars in 2003, respectively. These values were 0.83 to 16.4% and -2.82 to 21.27% in 2004, respectively. The results showed that due to the CropSyst model ability in simulating yield of rice under different irrigation regimes, this model can be used to explore management optimum options to improve rice water productivity.

Keywords: Rice, CropSyst model, Water productivity, Irrigation management.

1. Dept. of Water Eng., College of Agric. Sci., The Univ. of Guilan, Rasht, Iran.
2. Rice Res. Inst. of Iran, Rasht, Iran.
*: Corresponding Author, Email: npirmoradian@guilan.ac.ir