

بهینه‌سازی مصرف آب و عملکرد برنج در شرایط تنش خشکی (مطالعه موردی: شبکه آبیاری نکوآباد - اصفهان)

حمیدرضا سالمی*، بهرام اندرزیان و سارا گوانجی**

* نگارنده مسئول: بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران. ص. پ. ۱۹۹-۸۱۷۸۵، تلفن: ۰۳۱)۳۷۷۶۰۰۶۱،

پایم‌نگار: hr_salemiuk@yahoo.com

** به ترتیب: استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان؛ استادیار بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه صنعتی اصفهان
تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۱۶

چکیده

مدل شبیه‌سازی AquaCrop که عملکرد محصول را بر اساس آب قابل استفاده تحت شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری شبیه‌سازی می‌کند، ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت آب در سطح مزرعه است. به منظور ارزیابی کارکرد این مدل در مزرعه برنج، از داده‌های یک آزمایش دو ساله برنج رقم زاینده‌رود، در شبکه آبیاری نکوآباد استفاده شده است که خاکی با بافت سنگین دارد و آب آن نسبتاً شور است. تیمارهای آبیاری شامل دو تیمار غرقاب دائم با ارتفاع ۳۵ و ۲۲ میلی‌متر و یک تیمار متناوب از ارتفاع صفر (حالت اشباع) تا ۱۵ میلی‌متر بوده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل AquaCrop قادر است عملکرد برنج را در تیمار آبیاری کامل و در کم‌آبیاری‌های ملایم به خوبی شبیه‌سازی کند ولی با شدت یافتن کم‌آبیاری، دقت مدل در برآورد کاهش عملکرد دانه و پوشش سایه‌انداز کاهش می‌یابد. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب توافق ویلموت (d) و ضریب مقادیر باقیمانده (CRM) برای مشخصه عملکرد دانه به ترتیب ۱/۰۳، ۰/۷۱ و ۰/۰۶ به دست آمد. مدل مورد مطالعه، عملکرد دانه (Y)، ماده خشک اندام‌های هوایی (B) و تغییرات پوشش سایه‌انداز (CC) را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. بهترین منحنی برازش داده شده برای تابع تولید (عملکرد - آب) برای رقم و منطقه مورد نظر یک تابع درجه ۲ بود، که در این حالت تابع تولید استخراج شده با ضریب تبیین قابل قبول ۰/۹۱ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی

برنج، تابع تولید محصول، کم‌آبیاری، AquaCrop

مقدمه

آب و بالا بودن تبخیر بالقوه، موضوع آب و چالش‌های آن امری جدی است و از این رو می‌توان خشکی را از اجزای ذاتی کشاورزی در استان اصفهان به شمار آورد. از مجموع ۶/۴ میلیون هکتار زمین فاریاب در ایران، ۸/۹ درصد (۵۷/۰ میلیون هکتار) به کشت برنج اختصاص یافته، در صورتی که از ۷۳ میلیارد متر مکعب آب در بخش کشاورزی، ۹/۶ درصد برای آبیاری شالیزارها به مصرف می‌رسد (Anon, 2012). با توجه به مطالب فوق،

با توجه به بحران خشکسالی در سال‌های اخیر و مقاومت برنج‌کاران در برابر حذف برنج از الگوی کشت، صرفه‌جویی در آب آبیاری، می‌تواند آب بخش‌های شرب و صنعت استان اصفهان را تأمین کند. شرایط آب و هوایی چند سال گذشته مشکلات را در این استان حاد کرده است. در سال‌های نرمال نیز به علت پائین بودن میزان بارش نسبت به میانگین بارندگی در جهان و حتی شوری

کاهش عملکرد محصول می‌شود. این پژوهشگران سناریوهای کم‌آبیاری پنبه را با مدل بررسی و نتایج را رضایت‌بخش اعلام کرده‌اند. شائو و همکاران (Hsiao *et al.*, 2009) با استفاده از داده‌های ۶ ساله ذرت در دانشگاه دیویس کالیفرنیا مدل AquaCrop را آزمودند و پارامترهای ثابت آن را واسنجی کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل قادر است پوشش سایه‌انداز، رشد وزنی ماده خشک اندام‌های هوایی و عملکرد دانه را در شش فصل رشد مختلف با تراکم، تاریخ کاشت و تعرق‌های مختلف با تیمارهای مختلف آبیاری به طور مناسب شبیه‌سازی کند. در جزیره گوا واقع در کشور هند، اشوینی و مانجونات (Ashwini & manjunath, 2012) مدل AquaCrop را برای یک رقم محلی برنج تحت شرایط دیم ارزیابی کردند. این مدل با خطای ۰/۱ تن در هکتار مشخصه عملکرد محصول را به خوبی پیش‌بینی کرده است که برای ارزیابی سناریوهای برنج دیم در جنوب شرق آسیا بسیار مفید و کاربردی است. در ایران، رضایی و همکاران (Rezaei *et al.*, 2012) در سناریوهای کم‌آبیاری نشان دادند که بهترین روش آبیاری برنج با آب شور در مناطق مرطوب، آبیاری متناوب به اندازه رساندن خاک به حد FC (ظرفیت زراعی) است. اروانه و عباسی (Arvaneh & Abbasi, 2014) مدل را برای کلزا در ایلام واسنجی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد مشخصه کارایی مصرف آب به دست آمده از مدل، سازگاری خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد و مدل، عملکرد محصول، تغییرات رطوبت خاک، عمق توسعه ریشه و ماده خشک اندام‌های هوایی را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. در پژوهش امیری و همکاران (Amiri *et al.*, 2014) کارایی مدل‌های ORYZA2000، AquaCrop و CERES-Rice در شبیه‌سازی و تخمین عملکرد دانه و ماده خشک اندام‌های هوایی برنج در فواصل مختلف آبیاری، بالاتر از شبیه‌سازی تحت سطوح مختلف

بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی، که یکی از مصرف‌کنندگان اصلی منابع آب استان است، الزامی است. حوزه آبریز زاینده‌رود در حال حاضر وارد مرحله بحرانی شده و در صورت ادامه روند فعلی افزایش رشد تقاضای آب، سراسر حوزه آبریز زاینده‌رود با مشکلات فراوان رو به رو خواهد شد.

لزوم افزایش بهره‌وری آب به عنوان ابزار مدیریت صرفه‌جویی در منابع آب محدود جهان، سازمان خوار و بار و کشاورزی جهان (فائو) را ترغیب کرده است تا مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی واکنش محصولات زراعی به مقدار آب مصرفی توسعه دهد. در این مدل، نوعی توازن منطقی بین سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده وجود دارد. اصول اساسی مدل برای شبیه‌سازی اجزای مختلف رشد گیاه را استدیوتو و همکاران (Steduto *et al.*, 2009) و الگوریتم مورد استفاده در نرم‌افزار مدل و توصیف عملیات را راس و همکاران (Raes *et al.*, 2009) ارائه داده‌اند. مدل AquaCrop به واسنجی دقیق و گسترده برای همه گیاهان در سراسر دنیا نیاز دارد. تاکنون این خواسته برای برنج در مناطق خشک و نیمه‌خشک عملی نشده ولی فراهانی و همکاران (Farahani *et al.*, 2009) مدل را برای پنبه در سوریه واسنجی کرده‌اند. عملکرد پیش‌بینی شده برای محصول پنبه در رژیم آبیاری کامل فقط دارای ۱۰ درصد انحراف از مقادیر مزرعه‌ای را نشان می‌دهد ولی در سناریوهای آبیاری ۶۰ و ۸۰ درصد، این خطا به ۳۲ درصد رسیده است. مدل مذکور را هنگ و همکاران (Heng *et al.*, 2009) برای ذرت در اسپانیا، تگزاس و فلوریدا، واسنجی کرده‌اند. همچنین حیدری‌نیا و همکاران (Heidarinia *et al.*, 2010) در پژوهشی در هاشم‌آباد گرگان برای تعیین عمق بهینه و زمان آبیاری پنبه از مدل AquaCrop استفاده کردند و نشان دادند که آبیاری قبل از دوره گلدهی و ادامه آن تا انتهای دوره گلدهی، سبب

مساحت تقریبی ۳۷۵ متر مربع، تا عمق ۴۰ سانتی‌متر شخم زده شد. فواصل کرت‌ها ۱۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از نفوذ جانبی آب در تیمارهای آبیاری از پلاستیک ضخیم استفاده شد که به طور عمودی و تا عمق ۲۵ سانتی‌متر در طول کرت‌ها در خاک فرو رفته بود. پس از آبیاری، زمین اصلی در حالی که همچنان غرقاب بود صاف و پس از خارج شدن از حالت گل‌آب، نشاکاری شد. تاریخ نشاکاری در سال‌های اول و دوم به ترتیب اول و دهم خرداد بود. فاصله ردیف‌ها و بوته‌ها به ترتیب ۲۵ و ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر و در هر کپه ۶ نشا لحاظ شد. سه تیمار آبیاری شامل غرقاب دائم با ارتفاع آب ۳۵ میلی‌متر، غرقاب دائم با ارتفاع آب ۲۲ میلی‌متر و غرقاب متناوب با ارتفاع آب ۱۵-۰ میلی‌متر در ۳ کرت (مساحت ۱۵×۲/۲ مترمربع) در نظر گرفته شد. در تیمار سوم آبیاری، هنگامی که ارتفاع آب در کرت به صفر می‌رسید (ارتفاع صفر همان حالت اشباع خاک است)، آبیاری تا ارتفاع ۱۵ میلی‌متر شروع می‌شد. میزان آب مصرفی با استفاده از خط‌کش مدرج و کنتور حجمی اندازه‌گیری می‌شد. زمین خزانه و زمین اصلی از لحاظ مواد غذایی کمبود نداشتند و کود مصرفی برای تیمارها به صورت یکسان و بر اساس نتایج تجزیه خاک و طبق توصیه مؤسسه خاک و آب به میزان مشخص و در مراحل مختلف رشد به زمین اصلی اضافه شد. از آنجا که تناوب شبدر- برنج به عنوان کود سبز بسیار مناسب است، خزانه از قبل زیر کشت شبدر بود. کود مصرفی در زمین خزانه (۳۰۰ متر مربع) به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره ۴۶ درصد در نظر گرفته شد. در زمین اصلی، کود مصرفی برای تیمارها به صورت یکسان به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات دوپتاس ۴۶ درصد و ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره محاسبه شد. کود اوره در سه مرحله مصرف شد؛ قبل از کاشت، بعد از پنجاه‌دهی کامل و بعد از

نیترژن است. در این تحقیق که در شمال کشور اجرا شد، مدل‌های AquaCrop و CERES-Rice بالاترین دقت را تحت سطوح مختلف نیترژن، در شبیه‌سازی عملکرد و ماده خشک اندام‌های هوایی برنج نشان دادند. با این حال، مدل شبیه‌سازی AquaCrop برآورد دقیق‌تری از عملکرد ماده خشک اندام‌های هوایی ($RMSE = 15$)، در مقایسه با دیگر مدل‌های مورد مطالعه داشت.

هدف از این پژوهش، ارزیابی توانایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی واکنش عملکرد برنج با داده‌های اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای در یک خاک سنگین با مقادیر مختلف آب آبیاری با اعمال کم‌آبیاری (آبیاری تناوبی) در شرایط بدون محدودیت مواد مغذی است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دو سال زراعی ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ در مزرعه تحقیقاتی شهید فزوه در غرب شهر اصفهان اجرا شد. این ایستگاه در ارتفاع ۱۶۴۹ متر از سطح دریا و در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیای ۵۱ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی واقع است. متوسط بارش سالانه این ایستگاه ۱۴۵ میلی‌متر است و جزء مناطق خشک محسوب می‌شود. حداقل و حداکثر دمای هوا در این ایستگاه به ترتیب ۲۱- و ۴۳ درجه سلسیوس است. آزمایش به صورت طرح آماری کرت‌های خرد شده در قالب بلوک کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. در این پژوهش از برنج رقم محلی زاینده‌رود برای ارزیابی مدل آکواکراپ و از خزانه سنتی استفاده شد که قبلاً زیر کشت شبدر بوده است. بر اساس باور عمومی، تناوب شبدر- برنج بسیار مناسب است (Pirmoradian et al., 2002). زمین خزانه در فروردین هر سال شخم‌زنی و پس از آن آبیاری و تخت‌آب می‌گردید. پس از صاف کردن زمین خزانه و خارج شدن آن از حالت گل‌آب، بذر پاشیده می‌شد. زمین اصلی، به

خوشه‌دهی. کود فسفره کلاً قبل از کاشت و پتاس ۴۰ روز پس از کاشت به زمین اضافه شد. با توجه به غالب بودن سوروف به عنوان علف هرز خزانه برنج، از علف‌کش‌های اردرام و ساترن به مقدار ۷ و ۶ لیتر در هکتار استفاده شد. علف‌های هرز زمین اصلی با سموم بوتاکلر و رونستاد (علف‌کش‌های مجاز در بازار) و همچنین با وجین کنترل گردید. به منظور مبارزه با رشد

جلبک در خزانه و زمین اصلی نیز از سولفات مس به میزان ۳۰ کیلوگرم در هکتار استفاده شد. با توجه به بافت سنگین خاک، آبیاری مزرعه آزمایشی ۱۰ روز قبل از برداشت محصول متوقف شد (Salemi & Abedi, 2006). برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و آب مزرعه مورد مطالعه در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی لایه‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

شوری عمصاره اشباع خاک (دسی‌زیمنس بر متر)	هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر بر روز)	کل آب قابل دسترس (میلی‌متر بر متر)	رطوبت اشباع (درصد حجمی)	رطوبت نقطه ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	رطوبت نقطه پژمردگی (درصد حجمی)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	عمق (سانتی‌متر)
۶/۲	۱۵۰	۲۱۰	۴۸/۸	۳۷	۱۹	۱/۴۳	۰-۲۰
۴/۲	اندازه‌گیری نشد	۲۱۰	۴۷/۳	۳۵	۱۸	۱/۴۶	۲۰-۴۰

جدول ۲- نتایج تجزیه آب آبیاری

میلی اکی والان در لیتر								
مجموع کاتیون‌ها	سدیم (Na ⁺)	کلسیم + منیزیم (Mg ²⁺ + Ca ²⁺)	مجموع آنیون‌ها	سولفات (SO ₄ ²⁻)	کلر (Cl)	بی‌کربنات (CO ₃ H ⁻)	اسیدیته (pH)	شوری (دسی‌زیمنس بر متر)
۳۵/۵	۱۸/۵	۱۷	۳۵	۸/۶	۲۴	۲/۴	۷/۴	۳/۹

با توجه به این واقعیت که برنج با حد بحرانی شوری آب ۴ دسی‌زیمنس بر متر، گیاهی کاملاً حساس به شوری است، شوری ۳/۹ دسی‌زیمنس بر متر در جدول فوق که بالاترین سطح شوری آب در زمان اجرای تحقیق در منطقه بوده بر عملکرد شلتوک اثر منفی داشته است. سدیم و کلر معمولاً متداول‌ترین یون‌ها در خاک یا آب شور هستند و با ایجاد تأثیرات زیان‌آوری که به سمیت‌های ویژه یون‌ها مربوط می‌شود موجب کاهش عملکرد برنج می‌شوند. درجه‌ای از رشد که بر اثر شوری کاهش می‌یابد، تا حد زیادی با وارپته گیاه تفاوت می‌کند. یکی از پارامترهای مهم ضروری برای سنجش کیفیت آب آبیاری،

آن‌یون بی‌کربنات است؛ بی‌کربنات به ویژه در آب‌های زیرزمینی باعث رسوب کلسیم و به مقدار کمتری رسوب منیزیم می‌شود. حضور بی‌کربنات در خاک باعث کاهش قابلیت جذب گیاه به عناصر غذایی به ویژه روی و آهن می‌شود. با توجه به جدول ۲، مقدار بی‌کربنات در آب آبیاری چاه مزرعه نزدیک به ۲/۵ میلی اکی والان در لیتر است که در محدوده مرزی قابل تحمل و نامناسب برای آبیاری برنج قرار دارد. کمبود روی در برنج غرقابی مربوط به حضور غلظت‌های بالای بی‌کربنات در خاک و تفاوت در کارایی ارقام مختلف احتمالاً نتیجه‌ای از تأثیرات بازدارندگی متفاوت بی‌کربنات روی رشد آن‌ها است.

خاک. K_s یک ضریب اصلاح کننده است که مقدار آن بین یک (شرایط بدون تنش) تا صفر (تنش کامل) تغییر می کند. شکل منحنی K_s معرف میزان تأثیر تنش بر فرایند گیاهی مورد نظر است (در بازه ای که گیاه دچار تنش می شود). برای مثال، تنش آبی که خود شامل تنش کم آبی و تنش ماندابی است، تأثیراتی بر توسعه ریشه، هوادهی ریشه، توسعه پوشش سایه انداز، پیری پوشش سبز، گرده افشانی، بسته شدن روزنه ها، کاهش تبخیر و تعرق، و شاخص برداشت گیاه دارد. هر یک از مشخصه های گفته شده در بازه ای از کل آب قابل دسترس خاک¹ (که معادل حجم آب بین ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی است) تحت تأثیر قرار می گیرند که در ضمیمه مدل اکثر این بازه ها مشخص شده است (Raes et al., 2012).

داده های ورودی به مدل عبارت است از داده های اقلیمی، گیاه، مدیریت آبیاری، مدیریت زراعی و پروفیل خاک. در بخش آب و هوا از داده های هواشناسی روزانه ایستگاه نجف آباد (نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی به مزرعه تحقیقاتی) استفاده شد. اطلاعات مورد نیاز در بخش آب و هوا عبارتند از اطلاعات روزانه بارندگی، دمای حداقل، دمای حداکثر روزانه هوا، و میانگین غلظت دی اکسید کربن سالانه در جو. یادآوری می شود که با توجه به حرکت وضعی زمین و سیال بودن توده های جوی، غلظت دی اکسید کربن معمولاً در دوره های زمانی یک هفته ای ثابت فرض می شود و هرگونه تغییر در غلظت دی اکسید کربن در نقطه ای از کره زمین می تواند طی ۴۸ تا ۷۲ ساعت در تمام کره زمین تعدل می شود. به همین دلیل غلظت دی اکسید کربن در چند نقطه از کره زمین اندازه گیری می شود که قابلیت کاربرد در همه نقاط کره زمین را دارد. یکی دیگر از اطلاعات مورد نیاز در بخش آب و هوا، تبخیر و تعرق مرجع است که برای محاسبه این پارامتر از نرم افزار ET_o Calculator استفاده

سولفات نیز از جمله آنیون هایی است که بیشترین تأثیر را بر تعداد پنجه بارور در کپه در آبیاری اشباع دارد (Gholami et al., 2004). با توجه به توضیحات فوق به نظر می رسد منطقه مورد مطالعه دارای شوری غیر معمول آب و خاک برای رشد برنج است.

داده های ورودی مدل AquaCrop

مدل AquaCrop عملکرد عمده محصولات زراعی را بر اساس آب مصرفی در شرایط دیم، آبیاری کامل و کم آبیاری شبیه سازی می کند. این مدل تعرق گیاه را با استفاده از یک پارامتر گیاهی ثابت خاص، و بر اساس میزان آب آبیاری، محاسبه می کند و پس از آن میزان ماده خشک اندام های هوایی را به دست می آورد. بهره وری آب نرمال شده برای تقاضای تبخیر و تعرق جوی و غلظت دی اکسید کربن به دست آمده است. این پارامتر برای هر گیاه ثابت است و مدل را برای موقعیت های جغرافیایی و فصل های مختلف قابل استفاده می کند.

در این مدل، شبیه سازی برای سه بازه زمانی شامل روزانه، دهه ای و ماهانه انجام می گیرد. علاوه بر دوره های زمانی فوق، مشخصه درجه روز رشد نیز می تواند مبنای پیش بینی های مدل قرار گیرد. عملکرد محصول با استفاده از ماده خشک اندام های هوایی و شاخص برداشت به دست می آید. شاخص برداشت، با شروع گلدهی و با یک تأخیر زمانی به صورت خطی افزایش می یابد و این روند تا زمانی ادامه دارد که گیاه به رسیدگی فیزیولوژیک نزدیک شود. شاخص برداشت ممکن است به طور افزایشی و یا به طور کاهشی تغییر یابد که این وابسته به زمان، مقدار تنش و طول دوره تنش است (Andarzian et al., 2011).

تأثیر تنش های محیطی بر رشد گیاه با ضریب تنش ها (K_s) توصیف می شود که مشتمل است بر تنش آبی، تنش دمایی، تنش شوری خاک و تنش محدودیت حاصل خیزی

1- Total Available Water (TAW)

دیگر جلوگیری شد. در بخش پروفیل خاک، خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی لایه‌های خاک و عمق لایه محدودکننده (۴۰ سانتی‌متر، به علت عملیات شخم‌زنی) وارد می‌شود.

در بخش شرایط اولیه، شوری خاک در لایه‌های مختلف و رطوبت حجمی آب خاک در زمان نشاکاری (حالت اشباع) وارد می‌شود.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای برنج

قبل از استفاده از مدل برای شبیه‌سازی واکنش برنج به کم‌آبیاری، مدل باید تحت شرایط مناسب (آبیاری کامل) واسنجی و پس از آن صحت‌سنجی شود. در این مطالعه از نتایج تیمار اول در سال اول به منظور واسنجی مدل و از نتایج تیمارهای باقیمانده در طول دو سال برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. برای واسنجی مدل ابتدا مقادیر ثابت گیاهی در مدل وارد شد. این مقادیر همان مقادیر پیشنهادی فانو است که در مرحله صحت‌سنجی برای ارزیابی مدل نیز به کار می‌روند. این پارامترها شامل ضریب رشد پوشش سایه‌انداز، ضریب کاهش پوشش سایه‌انداز، حداکثر ضریب گیاهی، بهره‌وری آب نرمال شده، حد بالا و پایین کسر آب قابل استفاده در توسعه پوشش سایه‌انداز در شرایط تنش آبی، حد بالای کسر آب قابل استفاده در بسته شدن روزنه‌ها و در پیری زودرس در شرایط تنش آبی، و ضرایب اصلاح شاخص برداشت مرتبط با رشد گیاهی و بسته شدن روزنه است (Tavakoli et al., 2013).

برای پارامترهای متغیر از مقادیر اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای استفاده می‌شود (Steduto et al., 2009). در این مدل به منظور محاسبه تعرق گیاه و تفکیک تبخیر (از سطح خاک) از تعرق، به جای استفاده از شاخص سطح برگ (LAI)^۱ از پوشش سایه‌انداز استفاده می‌شود که سطح زمین را می‌پوشاند^۲. برای پوشش سایه‌انداز اولیه از

می‌شود که در آن معادله پنمن مانیتیت فانو به کار گرفته شده است. در این مدل علاوه بر دمای حداقل و دمای حداکثر روزانه، ساعات آفتابی، سرعت باد در ارتفاع دو متری و حداکثر و حداقل رطوبت نسبی نیز مورد نیاز خواهد بود.

پارامترهای گیاهی در دو دسته ثابت و متغیر تعریف می‌شوند:

- پارامترهای ثابت پارامترهای خاص گیاه هستند و اساساً با زمان، مدیریت‌های زراعی و موقعیت جغرافیایی یا آب و هوایی تغییر نمی‌کنند. این پارامترها نیز مانند دمای پایه و دمای حداکثر رشد، با استفاده از داده‌های رشد گیاه در شرایط مطلوب بدون تنش، واسنجی شده‌اند (Raes et al., 2012).

- پارامترهای متغیر پارامترهایی مانند زمان شروع پیری و طول دوره گلدهی هستند که مختص رقم گیاه‌اند و تحت تأثیر آب و هوا، مدیریت مزرعه و شرایط پروفیل خاک قرار می‌گیرند (Raes et al., 2012).

در بخش مدیریت آبیاری، روش آبیاری کرتی و شوری آب آبیاری نیز در همه مراحل رشد ثابت و برابر با ۳/۹ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شد. همچنین گزینه برنامه‌ریزی آبیاری برای وارد کردن زمان و ارتفاع آبیاری به مدل انتخاب شد.

در بخش مدیریت زراعی این موضوع‌ها مشخص می‌شود: ارتفاع دیواره کرت، رواناب سطحی، استفاده از مالچ، عمق تبخیر از خاک سطحی و محدودیت حاصلخیزی خاک در تولید ماده خشک. زمین اصلی به این دلیل که از لحاظ مواد غذایی کمبودی نداشت در تولید ماده خشک هم محدودیتی ایجاد نکرد. ارتفاع دیواره کرت برابر ۲۰ سانتی‌متر وارد مدل شد. به دلیل روش خاص آبیاری در کشت برنج، رواناب ایجاد نشد و به دلیل وجود عایق پلاستیک (به طور عمودی و تا عمق ۲۵ سانتی‌متر) بین کرت‌ها، از تراوش آب از کرتی به کرت

1- Leaf Area Index (LAI)

2- Canopy Green Cover

- ضریب تبیین (R^2) ^۳

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(S_i - \bar{S}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (۳)$$

- ضریب مقادیر باقیمانده (CRM) ^۴

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (۴)$$

که در آن،

S_i = مقادیر شبیه‌سازی (پیش‌بینی) شده؛ M_i = مقادیر اندازه‌گیری (مشاهده) شده؛ n = تعداد نمونه؛ \bar{M} = مقدار متوسط پارامترهای مشاهده شده؛ و \bar{S} = مقدار متوسط پارامترهای پیش‌بینی شده است. شاخص توافق و پلموت یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن بین $-\infty$ تا 1 متغیر است. هرچه این شاخص منفی‌تر باشد به معنای آن است که بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهده شده فاصله زیاد است و به عکس، هرچه این شاخص به 1 نزدیک‌تر باشد، سازگاری دو متغیر بیشتر است (Hsiao et al., 2009). مقدار جذر میانگین مربعات خطا بین صفر تا ∞ متغیر و واحد آن همانند S_i و M_i است. هرچه جذر میانگین مربعات خطا به صفر نزدیک‌تر باشد درصد دقت مدل بالاتر است (Sepaskhah et al., 2006) چون نشان‌دهنده تفاوت کمتر مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهده شده است. نزدیک‌تر بودن ضریب تبیین به 1 نشان‌دهنده همبستگی بیشتر مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده است یعنی پیش‌بینی مدل به واقعیت نزدیک‌تر است (Homaei et al., 2002).

نتایج و بحث

پارامترهای گیاهی ثابت و پارامترهای گیاهی متغیر واسنجی شده در مدل آکواکراپ برای برنج رقم زاینده‌رود به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

تخمین مدل کمک گرفته شد به این صورت که فاصله ردیف‌ها و فاصله کاشت روی ردیف‌ها وارد مدل شد. مدل به طور خودکار میزان توسعه پوشش سایه‌انداز را بعد از وارد کردن اطلاعات فنولوژیکی، مثل زمان رسیدن به مرحله بازبایی، ماکزیمم پوشش سایه‌انداز، پیری و رسیدگی فیزیولوژیک تخمین می‌زند. تغییرات پوشش سایه‌انداز در دوره رشد به صورت مزرعه‌ای نیز اندازه‌گیری شد. زمان گلدهی، طول دوره گلدهی و شاخص برداشت مرجع نیز برای محاسبه عملکرد دانه تعیین گردید. پارامترهای گیاهی متغیر در بازه پیشنهادی فائو قرار گرفت. ارزیابی یا صحت‌سنجی، مرحله‌ای مهم از تأیید مدل است که شامل مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل است. از مجموع داده‌هایی که مستقل از داده‌های مورد استفاده برای واسنجی مدل بوده‌اند برای ارزیابی استفاده شد (Andarzian et al., 2011). در این تحقیق از عملکرد دانه، ماده خشک اندام‌های هوایی و درصد پوشش سایه‌انداز به منظور ارزیابی مدل استفاده شد.

برای ارزیابی قابل اعتماد بودن مدل از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده استفاده شد. شاخص‌های آماری استفاده شده در این پژوهش عبارت‌اند از:

- جذر میانگین مربعات خطا $(RMSE)$ ^۱

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}} \quad (۱)$$

- شاخص توافق و پلموت (d) ^۲

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (۲)$$

1- Root Mean Square Error (RMSE)

2- Index of Agreement = d

3- Coefficient of Determination = R^2

۳۱ 4- Coefficient of Residual Mass (CRM)

جدول ۳- پارامترهای گیاهی ثابت وارد شده به مدل AquaCrop

اطلاعات گیاهی	مقادیر	واحد
دمای پایه	۸	درجه سلسیوس
دمای حداکثر رشد	۳۰	درجه سلسیوس
پوشش سایه‌انداز اولیه (CC ₀)	۴	درصد
ضریب رشد پوشش سایه‌انداز (CGC)	۰/۰۰۶-۰/۰۰۸	بر درجه روز رشد
ضریب کاهش پوشش سایه‌انداز (CDC)	۰/۰۰۵	بر درجه روز رشد
میزان انحنای نمودار رشد ریشه	۲-۳	-
حداکثر ضریب گیاهی (قبل از پیری)	۱/۱	-
درصد کاهش روزانه ضریب گیاهی در زمان پیری	۰/۱۵	درصد در روز
تأثیر پوشش سایه‌انداز بر کاهش تبخیر از سطح خاک در اواخر دوره رشد	۵۰	درصد
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۹	گرم بر متر مربع
بهره‌وری آب نرمال شده در طول تشکیل محصول	۱۰۰	درصد از بهره‌وری آب نرمال شده قبل از تشکیل محصول
تأثیر مثبت تنش آبی بر افزایش شاخص برداشت قبل از گلدهی	وجود ندارد	-
تأثیر مثبت تنش آبی بر شاخص برداشت به خاطر تأثیر بر رشد گیاهی در طول تشکیل محصول	کم	-
تأثیر منفی تنش آبی بر شاخص برداشت به خاطر بسته شدن روزنه‌ها در خلال تشکیل محصول	متوسط	-
حداکثر افزایش ممکن در شاخص برداشت در اثر تنش آبی	۱۵	درصد
حد بالا و حد پایین کسر تخلیه آب از TAW در توسعه پوشش سایه‌انداز در تنش آبی	۰/۱-۰/۶۵	-
میزان انحنای نمودار ضریب تنش آبی بر توسعه پوشش سایه‌انداز	۳	-
حد بالای کسر تخلیه آب از TAW در بسته شدن روزنه‌ها در تنش آبی	۰/۳۵	-
میزان انحنای نمودار ضریب تنش آبی بر بسته شدن روزنه‌ها	۳	-
حد بالای کسر تخلیه آب از TAW در پیری زودرس در تنش آبی	۰/۷۵	-
میزان انحنای نمودار ضریب تنش آبی بر پیری زودرس	۳	-
حد پایین و حد بالای دمایی در توقف گرده افشانی	۸-۳۵	درجه سلسیوس
حد بالا و حد پایین شوری قابل تحمل گیاه (عصاره اشباع خاک)	۳-۱۱/۳	دسی‌زیمنس بر متر

جدول ۴- پارامترهای گیاهی متغیر وارد شده به مدل AquaCrop

اطلاعات گیاهی	سال ۱۳۸۳	سال ۱۳۸۴	واحد
تاریخ نشاکاری	۱ خرداد	۱۰ خرداد	-
تراکم کاشت	۱۱۴۲۸۵۷	۱۱۴۲۸۵۷	گیاه در هکتار
زمان رسیدن به مرحله بازبایی از زمان انتقال نشا	۷ (۹۴)	۶ (۸۱)	روز (درجه روز رشد)
زمان رسیدن به حداکثر پوشش سایه‌انداز از زمان انتقال نشا	۷۰ (۱۰۸۲)	۶۷ (۱۰۶۶)	روز (درجه روز رشد)
زمان رسیدن به پیری از زمان انتقال نشا	۱۰۰ (۱۵۶۲)	۹۸ (۱۵۳۷)	روز (درجه روز رشد)
زمان رسیدن به رسیدگی فیزیولوژیک از زمان انتقال نشا	۱۳۴ (۱۹۹۹)	۱۲۹ (۱۹۳۸)	روز (درجه روز رشد)
زمان رسیدن به مرحله گلدهی از زمان انتقال نشا	۸۹ (۱۳۹۱)	۸۸ (۱۳۹۴)	روز (درجه روز رشد)
طول دوره گلدهی*	۱۴ (۲۱۷)	۱۶ (۲۳۰)	روز (درجه روز رشد)
حداکثر پوشش سایه‌انداز	۹۰	۹۰	درصد
حداکثر عمق مؤثر ریشه	۰/۴۵	۰/۴۵	متر
حداقل عمق مؤثر ریشه	۰/۳	۰/۳	متر
شاخص برداشت مرجع (HI ₀)	۴۳	۴۳	-

* میانگین دما در کل دوره رشد برای سال اول ۲۵/۴ درجه سلسیوس و برای سال دوم ۲۵/۹۳ و میانگین دما تا قبل از دوره گلدهی برای سال اول ۲۶/۵ و برای سال دوم ۲۷/۲۸ درجه سلسیوس بوده است. میانگین دما در طول دوره گلدهی برای سال اول ۲۶/۶ و برای سال دوم ۲۴/۹ درجه سلسیوس است که نشان می‌دهد دما در طول دوره گلدهی در سال دوم پایین‌تر است و از این رو برای تأمین درجه روز رشد مورد نیاز گیاه، باید تعداد روز بیشتری سپری می‌شده است.

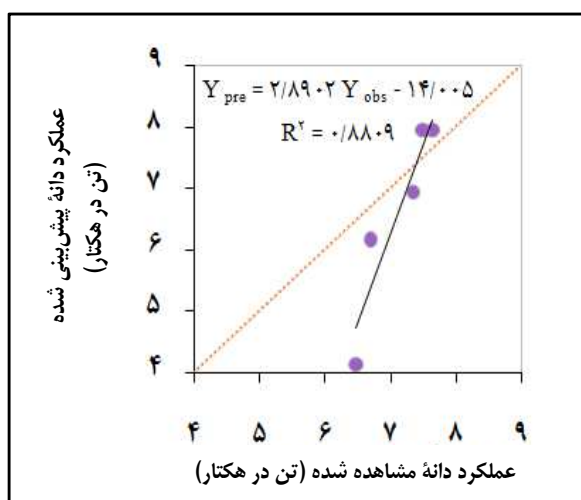
عملکرد دانه

مربعات خطای عملکرد دانه برابر ۱/۰۳ به معنای آن است که مدل این پارامتر را خوب پیش‌بینی می‌کند. ضریب مقادیر باقیمانده برای عملکرد دانه برابر ۰/۰۶ محاسبه شده که نشان می‌دهد مدل برای این پارامتر نیز برآوردی نزدیک به واقعیت دارد ولی به مقدار خیلی جزئی بیش از واقعیت برآورد می‌کند. همچنین مقدار شاخص توافق ویلموت برابر ۰/۷۱ شده که نشان‌دهنده سازگاری نه چندان خوب مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش‌بینی شده است. شرایط نه چندان مناسب آب، شوری نسبی خاک (برای کشت برنج) و اعمال کم‌آبیاری را می‌توان از دلایل تقلیل ضریب توافق به ۰/۷۵ قلمداد کرد. تدورویک و همکاران (Todorovic *et al.*, 2009) نیز با ضریب توافق ۰/۷۹، مدل AquaCrop را برای آفتابگردان ارزیابی کردند. نتایج شبیه‌سازی مدل در تیمارهای دوم و سوم از دلایل این موضوع است.

به منظور بررسی عملکرد برنج سفید در کنار شلتوک، بیان این مطلب ضروری است که میزان پوکی برنج سفید در تیمار اول ۸، در تیمار دوم ۸/۹ و در تیمار سوم ۱۱/۷ درصد گزارش شده است (Salemi & Abedi, 2006). این نتایج نشان می‌دهد مطابق با روند کاهشی عملکرد شلتوک در اثر کاهش ارتفاع آب پای بوته‌ها، درصد پوکی شلتوک افزایش یافته است. مقادیر پیش‌بینی شده عملکرد دانه شلتوک در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن همراه با خط همسانی (خط ۱:۱) (در تیمارهای تعیین شده برای صحت‌سنجی) در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که خط رگرسیونی بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش‌بینی شده دارای ضریب همبستگی ۰/۸۸ است که به مفهوم همبستگی نسبتاً خوب این دو سری از مقادیر و حاکی از آن است که پیش‌بینی مدل به واقعیت نزدیک است. با توجه به جدول ۵، مقدار جذر میانگین

جدول ۵- شاخص‌های آماری در تعیین درجه اعتماد مدل در برآورد عملکرد دانه، ماده خشک اندام‌های هوایی، و پوشش سایه‌انداز

شاخص بهره‌وری آب	پوشش سایه‌انداز	ماده خشک اندام‌های هوایی	عملکرد دانه	پارامتر
۰/۱۶	۷/۷۳	۲/۰۵	۱/۰۳	جذر میانگین مربعات خطا
۰/۱	-۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۶	ضریب مقادیر باقیمانده
۰/۸۲	۰/۹۸	۰/۷۵	۰/۷۱	ضریب توافق ویلموت



شکل ۱- رگرسیون خطی بین مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده عملکرد دانه

نتایج مدل در فایل خروجی مقادیر تبخیر از سطح خاک (E)، تعرق گیاه (Tr) و فرونشست عمقی (Dp) را تحت مدیریت کم‌آبیاری و بدون احتساب آب مصرفی در مرحله خزان به ترتیب ۲۴۶، ۵۱۳ و ۱۷۲/۴ میلی‌متر در طول فصل رشد (اردیبهشت- شهریور) به دست می‌دهد. میزان عملکرد دانه استحصالی ۶/۷ تن در هکتار شبیه‌سازی شده است. مقادیر آب مصرفی و پیش‌بینی مدل در میزان تبخیر و تعرق به تفکیک برای ۳ تیمار آبیاری در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- مقادیر آب مصرفی (پیش‌بینی مدل برای میزان تبخیر)، تعرق (با احتساب فرونشست عمقی) و عملکرد محصول در ۳ تیمار آبیاری

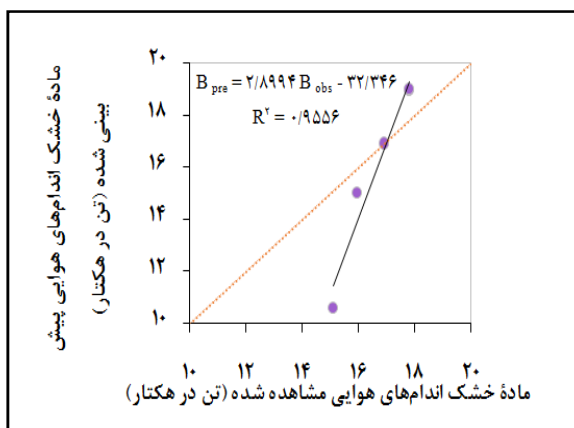
تیمار سوم	تیمار دوم	تیمار اول
۲۰۱	۲۱۰/۵	۲۲۷/۲
۵۰۰	۵۷۷/۴	۶۱۸/۶
۶/۶۸۵	۸/۲۵۱	۸/۲۶۱
۹۳۱	۱۰۵۰	۱۳۲۳

همچنین، مقدار شاخص توافق ویلموت برابر ۰/۷۵، نشانه سازگاری نه چندان خوب مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش‌بینی شده است. مدل، عملکرد برنج حاصل از کم‌آبیاری را کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی کرده است. از دلایل اختلاف بیشتر بین مقدار مشاهده شده و مقدار پیش‌بینی شده و نیز از دلایل برآورد کمتر از واقعیت مدل برای تیمار سوم از سال دوم، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- گیاه علاوه بر تنش شوری، به دلیل تیمار آبیاری متناوب با تنش خشکی نیز مواجه شده و این مورد در تیمار سوم از سال اول نیز وجود دارد ۲- به دلیل انتقال دیرتر نشاها در سال دوم، گیاه زودتر با روزهای گرم، مواجه شده که همین عامل باعث شده است تا گیاه با تنش خشکی بیشتری مواجه شود و روزه‌های خود را، نسبت به سال اول، بیشتر ببندد ۳- با توجه به دو دلیل بیان شده، از پوشش سایه‌انداز گیاه نیز کاسته شده که خود عاملی مهم در کاهش میزان عملکرد است.

ماده خشک اندام‌های هوایی

مقادیر پیش‌بینی شده ماده خشک اندام‌های هوایی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن همراه با خط همسانی (خط ۱:۱) (برای تیمارهای تعیین شده برای صحت‌سنجی) در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که خط رگرسیونی بین مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده دارای ضریب همبستگی ۰/۹۶ است که حاکی از همبستگی خوب این دو سری از مقادیر است و نشان می‌دهد پیش‌بینی مدل به واقعیت نزدیک است. با توجه به جدول ۵، مقدار جذر میانگین مربعات خطای ماده خشک اندام‌های هوایی برابر ۲/۰۵ است که نشان می‌دهد مدل این پارامتر را تقریباً خوب پیش‌بینی کرده است. ضریب مقادیر باقیمانده برای ماده خشک اندام‌های هوایی برابر ۰/۰۲ برآورد شده که نشان می‌دهد مدل برای این پارامتر برآوردی نزدیک به واقعیت دارد (به مقدار خیلی جزئی بیش از واقعیت برآورد کرده است).

بهبوده‌سازی مصرف آب و عملکرد برنج در شرایط تنش...

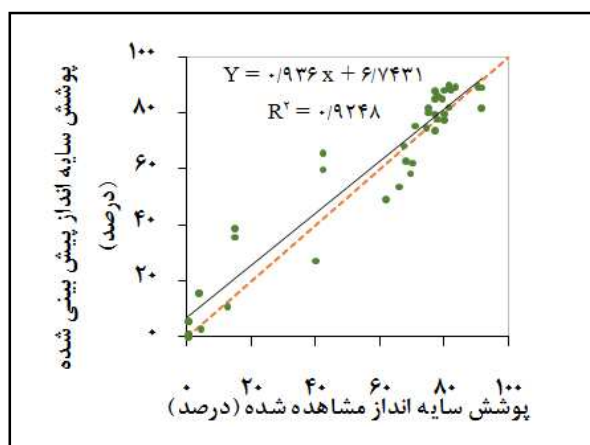


شکل ۲- رگرسیون خطی بین مشاهده و پیش‌بینی شده ماده خشک اندام‌های هوایی

پوشش سایه‌انداز

نزدیک است. با توجه به جدول ۵، مقدار جذر میانگین مربعات خطای پوشش سایه‌انداز برابر ۷/۷۳ شده که حاکی است مدل این پارامتر را چندان خوب پیش‌بینی نکرده است. مقدار ضریب توده باقیمانده برای پوشش سایه‌انداز، برابر ۰/۰۶- نشان می‌دهد که مدل برای این پارامتر برآوردی نزدیک به واقعیت دارد (به مقدار خیلی جزئی کمتر از واقعیت برآورد می‌کند). همچنین مقدار شاخص توافق ویلموت برابر ۰/۹۸ شده که نشان‌دهنده سازگاری نسبتاً خوب مقادیر مشاهده و مقادیر پیش‌بینی شده است.

مقادیر پیش‌بینی شده پوشش سایه‌انداز در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن همراه با خط همسانی (خط ۱:۱) (برای تیمارهای تعیین شده برای صحت‌سنجی) در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که خط رگرسیونی بین مقادیر مشاهده و مقادیر پیش‌بینی شده دارای همبستگی ۰/۹۲ است که نشانه‌ای از همبستگی خوب این دو سری از مقادیر و به این معنا است که پیش‌بینی مدل به واقعیت



شکل ۳- رگرسیون خطی بین مقادیر مشاهده و مقادیر پیش‌بینی شده پوشش سایه‌انداز

یکدیگر است ولی مدل پوشش سایه‌انداز تیمار ۳ را با مقادیری کمتر از دو تیمار ۱ و ۲ برآورد می‌کند به این

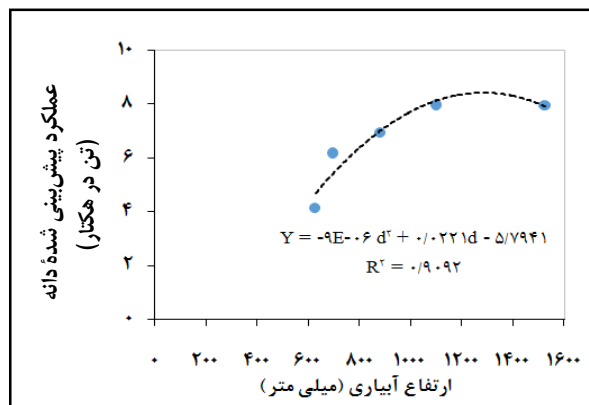
با توجه به نتایج پیش‌بینی مدل، پوشش سایه‌انداز برای دو تیمار ۱ و ۲ در هر دو سال زراعی تقریباً مشابه

این تحقیق حاکی از کاهش معنی‌دار ارتفاع گیاه در اثر کاهش ارتفاع آب آبیاری است. این کاهش در ارتفاع گیاه مترادف است با تعداد برگ کمتر و کاهش ظرفیت فتوسنتز گیاه. در فیزیولوژی به این حالت کاهش ظرفیت مخزن^۱ نسبت به منبع^۲ گفته می‌شود، بدین معنا که به رغم وجود منابع (نور کافی)، گیاه قادر به استفاده از تمامی ظرفیت‌ها نیست. نتایج مشابهی در خصوص ارتباط کاهش ارتفاع گیاه و شاخص سطح برگ برنج گزارش شده است (Bouman *et al.*, 2006).

تابع تولید

با توجه به بحرانی شدن وضعیت منابع آب منطقه مورد مطالعه، استخراج توابع عملکرد با لحاظ کردن آب موجود و با هدف افزایش بهره‌وری در بخش کشاورزی از الزامات شرایط به وجود آمده است. بدین منظور تابع تولید (عملکرد - آب) گیاه برنج با استفاده از روابط حاکم بر مدل AquaCrop و داده‌های ورودی ارتفاع آبیاری به مدل و مقادیر خروجی (شبیه‌سازی شلتوک) از مدل برای منطقه مورد مطالعه به دست آمد که در شکل ۴ ارائه شده است. برای بررسی اثر دقیق مقدار آب آبیاری بر مقادیر عملکرد برنج به دست آمده از مدل، تابع تولید محصول نسبت به آب آبیاری و به شکل رابطه درجه ۲ محاسبه شد.

دلیل که در دو تیمار ۱ و ۲ تنش شوری وجود داشته و در تیمار ۲ به میزان ملایمی کم‌آبیاری اعمال شده و گیاه به میزانی ناچیز روزه‌های خود را می‌بندد هرچند این میزان بسته شدن روزه‌ها به حدی نیست که تعرق گیاهی دچار اختلال شود. در مورد تیمار ۳ کم‌آبیاری شدیدتر است و گیاه با شدت بیشتری روزه‌های خود را می‌بندد که همین عامل سبب کاهش تعرق گیاهی و در نتیجه کاهش پوشش سایه‌انداز می‌شود. در مورد مقایسه پوشش سایه‌انداز پیش‌بینی شده برای تیمار سوم در دو سال زراعی، دلیل کمتر برآورده شدن این مشخصه در سال اول نسبت به سال دوم زراعی، انتقال دیرتر نشاها به زمین اصلی است که باعث می‌شود گیاه با فاز گرمایی زودتر مواجه شود و مکانیسم مقابله‌ای خود (بسته شدن روزه‌ها) را زودتر اجرا کند، بنابراین گیاه تعرق کمتری دارد و پوشش سایه‌انداز کمتری را هم تولید می‌کند. که مدل این فرایند را نشان می‌دهد. ضمناً مقادیر پیش‌بینی شده شاخص بهره‌وری آب توسط مدل حاکی از آن است که با کاهش میزان آب آبیاری، این پارامتر افزایش می‌یابد که مقادیر میانگین دو سال این پارامتر برای تیمارهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۸ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمده است. رابطه مستقیم و مثبت بین ارتفاع بوته و آب آبیاری کاربردی در تحقیق دو ساله سالمی و عابدی (Salemi & Abedi, 2006) نشان داده شده است. نتایج



شکل ۴- تابع تولید (عملکرد- آب) محصول برنج

تحلیل وضعیت کنونی برنجکاری

در شرایط کنونی حوزه زاینده‌رود که خشکسالی حاکم است و با توجه به بحران شدید آب سطحی در این حوزه، بخش کشاورزی به منظور حفظ تولید حداقلی، فشار خود را از طریق استحصال آب‌های زیرزمینی ادامه می‌دهد که منجر به تشدید بحران منابع آب‌های زیرزمینی نیز می‌شود. در سال ۹۳-۹۲، بر اساس تصمیم شورای حوزه آبریز زاینده‌رود و اطلاعات محلی، ۵۱/۴۷ میلیون متر مکعب آب (تحويل در محل دریاچه‌های آبگیر نیرپیک) از رودخانه زاینده‌رود به منظور حفظ باغ‌های تحت آبیاری شبکه نکوآباد در نظر گرفته شده است. با استفاده از اندازه‌گیری‌ها و تحقیقات میدانی مشخص شده است که محصولات بهاره شامل ارزن، ماش، صیفی، برنج و یونجه نیز در بخش‌هایی از شهرستان‌های مبارکه، خمینی‌شهر، نجف‌آباد و فلاورجان اضافه بر آب چاه از بخشی از این تخصیص بهره می‌برند. از این آب فقط حدود ۶/۵ میلیون متر مکعب صرف آبیاری اراضی تحت کشت برنج شده است. آب کاربردی صرفاً از محل آب سطحی (شبکه آبیاری) نیست و بخشی از تولید با استفاده از آب چاه‌های منطقه تأمین می‌شود، از این رو با احتساب سهم آب زیرزمینی، میزان آب مصرفی واقعی (کاربردی) این گیاه که از اندازه‌گیری‌ها و مطالعات میدانی به دست آمده است در محدوده ۱۲۸۶۶ تا ۱۵۰۰۰ مترمکعب در هکتار برآورد می‌گردد. با استفاده از نتایج مدل آکواکراپ و اعمال سناریوی آبیاری متناوب (مدیریت کم‌آبیاری)، میزان آب مورد نیاز در این سناریو ۹۳۰۰ مترمکعب است. مقدار محصول شلتوک استحصالی در این سناریو ۶/۷ تن در هکتار توسط مدل و ۷/۵۵ تن در هکتار از زمین به دست آمده است. در سال‌های اخیر با شدیدتر شدن بحران آب در منطقه، برنجکاران برخی از مناطق واقع در شبکه آبیاری نکوآباد مجبور به استفاده از روش‌های آبیاری با راندمان بالاتر مثل آبیاری متناوب در زراعت برنج شده‌اند.

اگرچه محدوده آب کاربردی (۱۲۸۶۶ تا ۱۵۰۰۰ مترمکعب در هکتار) در این مناطق نسبتاً وسیع است ولی اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و داده‌های میدانی نشان می‌دهد عملکرد شلتوک واقعی در بخش اعظم اراضی شبکه با مصرف آب حدود ۱۰۰۰۰ مترمکعب در هکتار بالاتر از عملکرد اخذ شده از مدل AquaCrop (۶/۷ تن در هکتار) است.

با توجه به واقعیت وجود آب برگشتی حاصل از آب آبیاری در زراعت برنج که منجر به دستیابی به راندمان بالای آبیاری در این کشت گردیده و همچنین تبخیر از سطح خاک و فرونشست عمقی از لایه پایینی خاک، مدل AquaCrop نیز حجم آب مصرفی در تیمار مدیریتی آبیاری کامل را در محدوده فوق (۱۲۸۶۶ تا ۱۵۰۰۰ مترمکعب در هکتار) برآورد می‌کند. میزان آب مصرفی در تیمار سه‌گانه مدیریتی در جدول ۶ ارائه شده است. یادآوری این موضوع ضروری است که مساحت قطعات زمین‌های کشاورزی منطقه مورد مطالعه کوچک و کشت برنج در منطقه دارای سابقه‌ای طولانی است لذا کشاورزان مهارت خاصی در تسطیح کرت برای کنترل آبیاری دارند و به هنگام نشاکاری ناهمواری‌های موجود را بر طرف می‌کنند. با توجه به بافت و ساختمان خاک و مواد آلی موجود در خاک در صورت به صفر رساندن موقتی ارتفاع آب در سطح خاک، شکاف عمیق به وجود نخواهد آمد و با کنترل دقیق علف‌های هرز در ابتدای دوره و ایزوله کردن محل، هیچگونه علف هرزی بعد از مبارزه شیمیایی مشاهده نخواهد شد. با توجه به محدودیت آب قابل دسترس و تلاش برای خاتمه سریع‌تر عملیات آبیاری، تیمار غرقاب تناوبی گزینه‌ای مناسب خواهد بود تا بر اساس روش‌های کم‌آبیاری بتوان برنامه‌ریزی آبیاری منطقه و محصولات را تنظیم کرد. بدیهی است میزان آب صرفه‌جویی شده نقش بسزایی در کاهش فشار بر منابع آب‌های زیرزمینی خواهد داشت. تحقیقات میدانی در

کند. افزایش میزان تنش آبی در سطوح بالای کم‌آبیاری موجب کاهش دقت تخمین مشخصه‌های شبیه‌سازی گیاه برنج در این نسخه از مدل (Ver. 4.3) می‌شود. نتایج به دست آمده از مدل نشانگر مصرف ۹۳۰۷ مترمکعب آب در هکتار به ازای ۶/۷ تن شلتوک استحصالی تحت مدیریت کم‌آبیاری (آبیاری متناوب) در طول فصل رشد است. پیاده‌سازی مدیریت کم‌آبیاری در برنجکاری موجب خواهد شد که در بحران‌های جدی‌تر کمبود آب که طی سال‌های آتی به وقوع خواهد پیوست، از فشار بر منابع زیرزمینی کاسته شود. این هشدار را سالمی و مورای راست (Salemi & Murray-Rust, 2002) در جریان مطالعات مدیریت جامع حوزه آبریز زاینده‌رود پیشتر داده‌اند. از آنجا که عملکرد محصول به عوامل متعددی از جمله حاصلخیزی خاک و شوری آب و خاک بستگی دارد و نسخه موجود مدل با توجه به این عوامل واسنجی شده است، تابع تولید استخراج شده برای محصول برنج در این تحقیق از اعتبار بالایی برخوردار است. یادآوری می‌شود که تعیین حدود مجاز تغییرات آب موردنیاز و اعمال سناریوهای مختلف کاشت برنج با استفاده از این تابع امکان‌پذیر است.

مناطق برنجکاری شهرستان لنجان طی سال‌های اخیر نشان می‌دهد که کشاورزان به طور خودجوش تمهیداتی برای مدیریت کاراتر آب اندیشیده‌اند. نتایج مدل در ارتباط با شاخص بهره‌وری آب (WP) مؤید مطلب فوق است. در مراحل مختلف رشد این گیاه، WP از ۰/۵ تا ۰/۸ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمده که در مقایسه با مناطق دیگر جهان (Salemi & Abedi, 2006) چشمگیر است. نگهداری طولانی‌تر نشا در محل خزانه با هدف کمینه‌سازی آب مصرفی در واحد سطح و افزایش تراکم بوته در زمین اصلی یکی از این راهکارها است. با توجه به تحلیل بالا ضروری است تا مدیریت جامع و یکپارچه آب در سطح حوزه آبریز در نظر داشته باشد که تخصیص منابع آبی به اراضی کشاورزی واقع در مناطق بالادست استان اصفهان با لحاظ کردن مدیریت کم‌آبیاری صورت گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مدل قادر است واکنش میزان عملکرد به مقدار آب آبیاری را در سطوح آبیاری کامل و کم‌آبیاری‌های ملایم به خوبی شبیه‌سازی

قدردانی

این پژوهش برگرفته از طرح تحقیقاتی مصوب مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی با عنوان "بررسی واکنش ارقام بومی برنج نسبت به سطوح مختلف آب مصرفی در منطقه لنجان اصفهان"، به شماره ۸۱۰۶۹-۲۰-۱۸-۱۰۳ است. نویسندگان این مقاله از مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- Amiri, E., Rezaei, M., Eyshi Rezaei, E. and Bannayan, M. 2014. Evaluation of Ceres-Rice, Aquacrop and Oryza 2000 models in simulation of rice yield response to different irrigation and nitrogen management strategies. *J. Plant Nutr.* 37(11): 1749-1769.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A. and Rahnema, A. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agric. Water Manage.* 100(1): 1-8.

- Anon. 2012. Statistics Report of Iran: Agricultural Year 2011-2012. Crop Production. Planning, Administrative & Financial Affairs of the Agricultural Organization, Ministry of Jihad-e-Agriculture, Iran.
- Arvaneh, H. and Abbasi, F. 2014. Calibration and verification of AquaCrop model for canola in farm condition. Water Res. Iran J. 14, 1-10. (in Farsi)
- Ashwini, P. and manjunath, B. L. 2012. Calibration and validation of AquaCrop model for local rice grown in Goa, India. UNW-DPC Pub. Series.7, 46-48.
- Bouman, B. A. M., Humphereys, E., Tuong, T. P. and Borker, R. 2006. Rice and Water. Adv. Agron. 92, 187-237.
- Farahani, H. J., Gabriella, I. and Oweis, T. Y. 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. Agron. J. 101, 469-476.
- Gholami, R., Zarghami, R. and Amiri, A. 2004. Effects of consumption of fertilizers, urea, sulfate and phosphate on yield components of rice (*Oriza sativa*.) In Terms of Irrigation. Asian J. Plant Sci. 1(1): 25-27.
- Heidarinia, M., Naseri, A., Borumandnasab, S. and Sohrabi-Moshkabadi, B. 2010. Calibration of AquaCrop model for cotton irrigation schedule in Gorgan. Proceeding of the 3rd National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management. Mar. 12. Shahid Chamran University of Ahvaz. (in Farsi)
- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett S, Howell, T. and Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. Agron. J. 101, 488-498.
- Homaee, M., Dirksen, C. and Feddes, R. A. 2002. Simulation of Root Water Uptake. I. Nonuniform Transient Salinity Stress Using Different Macroscopic Reduction Functions. Agric. Water Manage. 57(2): 89-109.
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop. The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. Agron. J. 101, 448-459.
- Pirmoradian, N., Kamkar-Haghighi, A. A. and Sepaskhah, A. R. 2002. Crop coefficient and water requirement of rice in Kushkak. Fars. J. Sci. Tech. Agric. Natural Resources. 6(3): 15-22. (in Farsi)
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2009. AquaCrop. The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agron. J. 101, 438-447.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2012. AquaCrop. FAO Crop – Water productivity model to simulate yield response to water. Reference Manual. Ver. 4. FAO. Land and Water Division. Rome. Italy.
- Rezaei, M., Davatgar, N., Khaledian, M. R. and Pirmoradian, N. 2012. Effect of intermittent irrigation with saline water on rice yield in Rasht. Iran. Acta Agric. Slovanica. 101, 49-57.
- Salemi, H. R. and Murray-Rust, H. 2002. Water supply and demand forecasting in the Zayandeh Rud basin. Iran. Iran-IWMI Collaborative Research Project. Research Paper No.13. (in Farsi)
- Salemi, H. R. and Abedi, H. 2006. Investigation on response of rice cultivars and lines to various water irrigation depths in Lengjan district of Isfahan. J. Agric. Eng. Res. 28 (7): 79-92. (in Farsi)
- Sepaskhah, A. R., Tavakoli, A. R. and Mousavi, F. 2006. Bases and application of deficit irrigation (Eds.).Iranian national committee on irrigation and drainage press. 288. (in Farsi).
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop. The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agron. J. 101, 426-437.
- Tavakoli, A. R., Liaghat, A. and Alizadeh, A. 2013. Soil water balance, sowing date and wheat yield using AquaCrop model under rainfed and limited irrigation. J. Agric. Eng. Res. 14, 41-55. (in Farsi).
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M. T., Stockle, C. and Steduto, P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. Agron. J. 101, 509-521.



Assessment of Yield Optimization and Water Use for Local Rice under Water Deficit Conditions in Nekuabad Irrigation Network in Isfahan, Iran

H. R. Salemi^{*}, B. Andarzian and S. Gavanji

* Corresponding author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Educational and Research Center, AREEO, P. O. Box: 81785-199, Isfahan, Iran.
Email: hr_salemiuk@yahoo.com

Received: 9 February 2015, Accepted: 6 June 2015

Simulation models are important for evaluation of the effects of environmental stress on crop yield. The AquaCrop model is a valuable tool for improving farm-level water management because of its excellent crop yield simulation under full, deficit, and supplemental irrigation. The present study evaluated the AquaCrop model over two years of experimental data for the Zayandehrud rice cultivar on research conducted in the Nekuabad irrigation network, which features clay soil texture and mildly saline water. The irrigation treatments consist of continuous flooding to depths of 22 and 35 mm and alternative wetting-and-drying soil saturation levels from 0 (saturation) to 15 mm in depth. The model was able to accurately simulate rice yield under full irrigation and mild deficit irrigation scenarios. Increasing the water stress decreased the accuracy of model simulation for grain yield and canopy cover. The results of the reliability indices were 1.03 for root mean square error, 0.71 for index of agreement, and 0.6 for coefficient of residual mass. The model provided excellent simulations of grain yield, biomass and canopy cover. The best fitted curve for the crop water production function for the cultivar and region was a second-order function with an acceptable coefficient of determination of $R^2 = 0.91$.

Keywords: AquaCrop, CWPF, Deficit Irrigation, Rice