

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ارقام مختلف برنج تحت شرایط مختلف کاشت با کاربرد مدل‌های AquaCrop، CropSyst و WOFOST

سید امیرحسین موسوی^۱، اصلا ن آگدرنژاد^{۲*} و عبدالعلی گیلانی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۸/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۹

چکیده

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب برنج با کاربرد مدل‌های AquaCrop، CropSyst و WOFOST، پژوهشی در ایستگاه شاور، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان انجام شد. در این پژوهش، دو عامل روش کاشت (نشایی، مستقیم رایج در منطقه و خشکه‌کاری) و ارقام برنج (عنبری قرمز، چمپا و دانیال) مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که دقت مدل AquaCrop برای تعیین عملکرد بر اساس آماره‌های میانگین خطای اریب (۰/۳۶ تن بر هکتار)، جذر میانگین مربعات خطا (۱/۰۷ تن بر هکتار) و جذر میانگین مربعات نرمال شده (۱۴ درصد) قابل قبول بود. مقادیر آماره‌های میانگین خطای اریب، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات نرمال شده برای بهره‌وری مصرف آب در مدل AquaCrop به ترتیب برابر با ۰/۱۱- کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۱۵ به دست آمد. این مقادیر برای عملکرد دانه توسط مدل WOFOST به ترتیب برابر با ۰/۰۶ تن بر هکتار، ۱/۱۴ تن بر هکتار و ۱ درصد و برای بهره‌وری مصرف آب توسط این مدل به ترتیب برابر با ۰/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱۳ درصد برآورد گردید. همین مقادیر برای مدل CropSyst به ترتیب برابر با ۰/۱۱ تن بر هکتار، ۰/۸۰ تن بر هکتار و ۲۴ درصد برای عملکرد دانه و ۰/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱۴ درصد برای بهره‌وری مصرف آب شبیه‌سازی شد. با توجه به این نتایج، دقت هر سه مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب مطلوب بودند. با این وجود، مدل WOFOST دقت بهتری نسبت به دو مدل دیگر در اکثر تیمارها داشت. بنابراین، این مدل را می‌توان برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ارقام مختلف برنج در نظر گرفت.

واژگان کلیدی: روش خشکه‌کاری، مدل آب محور، مدل تابش محور، مدل‌سازی گیاهی، مدل کرین

محور.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. (نگارنده مسئول) a_eigder@ymail.com

۳- استادیار بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

مقدمه

برنج یکی از منابع اصلی تأمین غذای مردم در جهان است به طوری که بر اساس آمار منتشر شده از سازمان خواروبار کشاورزی بیش از نیمی از مردم جهان از این گیاه برای مصرف خود استفاده می‌کنند (Anonymous, 2017; Gilani *et al.*, 2017). بر اساس آمار منتشر شده، جهت تأمین غذای مردم تا سال ۲۰۳۵ آینده نیاز است سطح زیر کشت این گیاه زراعی یا عملکرد آن در واحد سطح حدود شش درصد افزایش یابد (Anonymous, 2008). بنابراین، جهت این افزایش، می‌بایست روش‌های مختلف کشت و ارقام مختلف برنج در مناطق مختلف اصلاح شود. سه روش کشت نشایی، خشکه کاری و مستقیم برای زراعت برنج در جهان رایج است. بنابراین، برای هر منطقه می‌بایست بر اساس عوامل مختلف یکی از این سه روش کشت انتخاب شود. رقم‌های مختلف برنج نیز برای مناطق مختلف پیشنهاد شده است که انتخاب هر کدام از آنها نیازمند انجام آزمایش‌های متعدد و صرف وقت و هزینه بالا است. برای رفع این مشکل، محققان مدل‌های گیاهی مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند که برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب می‌توانند مورداستفاده قرار گیرند (Geerts *et al.*, 2009).

مدل SORKAM از جمله اولین مدل‌هایی است که ارائه شد و پس از آن مدل‌های متعددی توسط سازمان‌های تحقیقاتی در سطح جهان ارائه شده است. مدل AquaCrop توسط سازمان خواروبار کشاورزی و برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی متعدد بسط داده شد (Geerts and Raes, 2009). این مدل آب محور بوده و توسط بسیاری از محققان مورداستفاده قرار گرفته است (Hsiao *et*

al., 2009; Farahani *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009; Garcia-villa *et al.*, 2009; Todorovic *et al.*, 2009; Saadati *et al.*, 2011; Esmaeilian and Ramroudi, 2018). این محققان در تحقیقات خود نشان دادند که مدل AquaCrop از دقت کافی برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی برخوردار بود.

مدل WOFOST یکی از مدل‌های گیاهی کربن محور است که توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی با همکاری دانشگاه واگنینگن هلند و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک تولید شد (Bouman *et al.*, 1996). این مدل پایه بسیاری از مدل‌های گیاهی از جمله SWAP محسوب می‌شود و به منظور شبیه‌سازی واکنش گیاهان مختلف زراعی به عوامل مختلف از جمله مقدار آب مصرفی بسط داده شده است (Sanjani, 2012). محققان دیگری نیز از این مدل برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی استفاده کرده‌اند (Eitzinger *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2004; Song *et al.*, 2006; Canfalonieri and Bocchi, 2005) اشاره کرد. این محققان در تحقیقات خود به دقت بالای این مدل اشاره کردند.

مدل CropSyst یکی از مدل‌های گیاهی تابش محور است که توسط استوکل و نلسون ارائه گردیده است (Stockle and Nelson, 1996). با توجه به اهمیت این مدل گیاهی تاکنون مطالعات بی‌شماری بر روی آن انجام شده و تاکنون مدل CropSyst برای شبیه‌سازی محصولات کشاورزی مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Moriondo *et al.*, 2007; Ansari *et al.*, 2019). در تحقیقی پالا و همکاران (Pala *et al.*, 1996) جهت تشخیص کارایی مدل CropSyst در شبیه‌سازی تولید ماده خشک و عملکرد در واکنش به آب و

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به صورت کرت‌های خرد شده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ایستگاه شاوور مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان واقع در طول جغرافیایی $31^{\circ} 49'$ و عرض جغرافیایی $25^{\circ} 48'$ انجام شد. در این تحقیق، دو عامل روش کاشت (D_1 : نشایی، D_2 : مستقیم رایج در منطقه و D_3 : خشکه‌کاری) و رقم برنج (V_1 : عنبروری قرمز، V_2 : چمپا و V_3 : دانپال) در کرت‌هایی با مساحت ۱۲ متر مربع مورد بررسی قرار گرفت. محل انجام طرح آزمایشی در شکل (۱) نشان داده شده است. آماده‌سازی زمین قبل از شروع کاشت انجام شد. بدین منظور از خاک مزارع به صورت تصادفی نمونه‌برداری انجام و مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات خاک محل آزمایش در جدول (۱) نشان داده شده است. به منظور آبیاری این گیاه زراعی، ابتدا ضریب گیاهی آن تعیین و سپس مقدار آب آبیاری برای هر روش کاشت محاسبه و اعمال گردید. جهت جلوگیری از هر گونه نفوذ عمقی و جانبی آب از کرت‌ها، تمام پشته‌ها تا عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک توسط پلاستیک پوشانده شد. مشخصات آب آبیاری در جدول (۲) نشان داده شده است. در انتهای فصل رشد عملکرد و بهره‌وری مصرف تعیین و نتایج آن به همراه سایر پارامترهای مورد بررسی در قالب طرح پژوهشی منتشر شد (Gilani *et al.*, 2010).

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد برنج، از تبخیر-تعرق (ET) محاسبه شده (رابطه ۱) با فرض تفکیک آن استفاده می‌کند. تفکیک این مولفه به دو جز تبخیر (E) و تعرق (Tr) سبب می‌شود تا مصرف غیرتولیدی آب از معادلات حذف شود (رابطه ۲).

نیترژن محصولات مجزا در یک فصل جداگانه و تحت شرایط آزمایشی، ترتیب وسیعی از شرایط خشک تا کاملاً آبیاری شده و از مقدار کم نیترژن موجود در خاک تا شرایط عالی را مورد بررسی قرار دادند. در این ارزیابی‌ها، مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برابر با ۰/۴۴۳ تن بر هکتار گزارش شد. همچنین، در تحقیقات سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2008) برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم، دقت بالا و کارایی مناسبی برای این مدل گزارش شد. در تحقیقات مومنی و همکاران (Moumeni *et al.*, 2008) و محسنی و همکاران (Mohseni *et al.*, 2009) برای پهنه‌بندی بهره‌وری مصرف آب گندم با استفاده از مدل رشد گیاهی CropSyst به شبیه‌سازی مقادیر مختلف تأمین آب بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم پرداخته و نشان دادند که عملکرد دانه‌ی شبیه‌سازی شده سازگاری مطلوبی با مقادیر واقعی داشت.

استان خوزستان به‌عنوان یکی از مناطق عمده کشت برنج در کشور پس از سه استان شمالی، همواره با کمبود آب برای حصول عملکرد بالا مواجه است. با توجه به سابقه تحقیق، مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst دقت بالایی برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاهان زراعی داشتند. با توجه به اهمیت موضوع، تحقیق حاضر به‌منظور ارزیابی دقت این سه مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب برنج انجام شد. با توجه به اینکه تاکنون مقایسه این سه مدل بدین منظور استفاده نشده است؛ نوآوری تحقیق حاضر شامل شبیه‌سازی روش کاشت، ارقام مختلف برنج و استفاده از سه مدل گیاهی آب محور، کربن محور و تابش محور است.

هکتار) است. داده‌های مورد استفاده در این مدل در چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه دسته‌بندی می‌شوند. هر گروه از داده‌ها، بر اساس آزمایش‌های مزرعه‌ای و یا داده‌های موجود به مدل معرفی شدند.

مدل WOFOST یک مدل شبیه‌ساز رشد گیاه بر مبنای چرخه کربن و دارای ساختار پیچیده است. این مدل رشد گیاه را در سه وضعیت عدم وجود عامل محدود کننده، محدودیت آب و محدودیت مواد غذایی شبیه‌سازی می‌کند. در مدل WOFOST رشد محصولات بر اساس فرآیندهای اکو-فیزیولوژیکی شبیه‌سازی می‌شود. فرآیندهای اصلی شامل توسعه فنولوژیکی، جذب دی‌اکسیدکربن، تعرق، تنفس، تجزیه و توزیع میزان ماده خشک بین اندام‌های مختلف بر اساس مرحله نمو صورت می‌گیرد. رشد در حالت پتانسیل و محدودیت آبی به صورت دینامیکی با گام زمانی یک روزه شبیه‌سازی می‌شود (Boogaard, 1988). مدل WOFOST میزان رشد محصولات را با استفاده از رابطه (۶) به دست می‌آورد:

$$\Delta W = C_e \times (A - R_m) \quad (6)$$

در این رابطه، ΔW میزان رشد (کیلوگرم بر هکتار بر روز)، A میزان ناخالص جذب (کیلوگرم بر هکتار بر روز)، R_m میزان تعرق نگهداری (کیلوگرم بر هکتار بر روز) و C_e راندمان تبدیل جذب به زیست‌توده (-) است. این مدل از معادله ساده نشان داده شده در رابطه (۷) برای تعیین میزان جذب و رشد گیاه در شرایط کم‌آبیاری استفاده می‌کند:

$$Y = B \times HI \quad (7)$$

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (1)$$

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (2)$$

در این روابط، Y_a و Y_x به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول (تن در هکتار)، ET_a و ET_x به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه (میلی‌متر بر روز)، و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق (-)، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش‌های آبی و گیاهی و CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) است که توسط رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$CC = CC_0 \times e^{CGC \cdot t} \quad (3)$$

در این رابطه، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (کسر روز) و t زمان (روز) می‌باشد. با تعیین تعرق و تبخیر-تعرق، بیوماس خشک نیز طبق رابطه (۴) برآورد می‌گردد:

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (4)$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی (میلی‌متر)، WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر) و B عملکرد بیوماس خشک (کیلوگرم) است. مقدار عملکرد (Y) نیز با استفاده از ماده‌ی خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$Y = B \times HI \quad (5)$$

در این رابطه، Y عملکرد (تن در هکتار)، HI شاخص برداشت (-) و B بیوماس خشک (تن در

$$AGB_{PT} = \frac{K_{BT} T_P}{VPD} \quad (9)$$

که در این رابطه AGB_{PT} رشد وابسته به تعرق (کیلوگرم بر متر در روز)، T_P تعرق واقعی گیاه (کیلوگرم بر متر مربع در روز)، k_{BT} نسبت ماده خشک-تعرق (کیلو پاسکال) و VPD میانگین روزانه کمبود فشار بخار (کیلو پاسکال) هستند. پیش از انجام واسنجی و مدل سازی با AquaCrop ابتدا این مدل با استفاده از رابطه (۶) مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت (Geerts *et al.*, 2009):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (10)$$

در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد شده عامل مورد نظر براساس داده های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد عامل مورد نظر بر اساس داده ورودی پایه می باشد. به منظور تحلیل حساسیت هر عامل بر مقدار خروجی، آن عامل به میزان ۲۵ درصد مقدارش افزایش و کاهش می یافت. سپس مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > 15$ حساسیت بالا، $15 > Sc > 2$ حساسیت متوسط و $Sc < 2$ حساسیت پایین اندازه گیری شد (Geerts *et al.*, 2009).

به منظور واسنجی این مدل ها، یک طرح با تیمارهای مشابه در زمین های زراعی اطراف مرکز تحقیقات انجام شد. داده های برداشت شده از این طرح شامل عملکرد و بهره وری مصرف آب برنج بود. با استفاده از این داده ها، هر سه مدل گیاهی مورد استفاده مورد واسنجی قرار گرفتند. در مرحله واسنجی، با استفاده از آزمون و خطا، سعی شد نتایج شبیه سازی عملکرد و بهره وری مصرف آب برنج با استفاده از هر سه مدل گیاهی

در این رابطه، A جذب واقعی (کیلوگرم بر هکتار بر روز)، A_p جذب پتانسیل (کیلوگرم بر هکتار بر روز)، T_a تعرق واقعی (میلی متر بر روز) و T_p تعرق پتانسیل (میلی متر بر روز) است.

مدل گیاهی CropSyst یک مدل شبیه سازی سیستم های کشت چند ساله، چند محصوله و با گام زمانی روزانه است که به عنوان ابزاری جهت تحلیل اثر اقلیم، خاک و مدیریت در بهره وری سیستم های کشت و محیط توسعه یافته است (Stockle and Nelson, 1996). در این مدل، رشد روزانه گیاه بر اساس دو روش تعیین می شود. روش اول بر اساس ارتباط افزایش ماده خشک و تشعشع است، که در این روش ماده خشک تولید شده روزانه به وسیله رابطه (۸) شبیه سازی می شود.

$$G_R = 0.5 \times e \times f \times S_t \quad (8)$$

که در این رابطه G_R ماده خشک تولیدی روزانه (کیلوگرم بر متر مربع در روز)، e بازده تبدیل ماده خشک برای تابش خورشیدی^۱ (گرم بر مگاژول مربع)، f جزء تابش جذب شده توسط پوشش گیاهی و S_t تابش خورشیدی روزانه (مگاژول بر متر مربع در روز) هستند. بازده تبدیل تابش خورشیدی (-)، به عنوان پارامتر مشخص کننده تولید ماده خشک به ازای هر واحد تابش جذب شده برای هر گیاه یا متغیر، جزو ورودی های مدل است. روش دوم ارتباط بین رشد ماده خشک و تعرق بر اساس تخمین تعرق پتانسیل گیاه است، که در این روش ماده خشک تولید شده به وسیله معادله زیر شبیه سازی می شود.

۱- Biomass conversion efficiency for solar radiation

به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان دهنده‌ی دقت عالی مدل است. همچنین، مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل‌های رشد گیاهی مقدار عامل مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد عامل مورد نظر عدد کوچک‌تری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد (Ahmadee et al., 2015).

نتایج و بحث

با توجه به شرایط کشت مختلف در این تحقیق، میزان آب مصرفی برای هر کدام از روش‌های کاشت در طول آزمایش محاسبه شد. بر اساس این نتایج، اختلاف بین مقادیر آب آبیاری برای هر کدام از این روش‌ها بلافاصله پس از رشد ابتدایی شروع شد. عملکرد دانه نیز با سنجش محصول هر تیمار اندازه‌گیری شد. نتایج واسنجی مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst در جدول (۳) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، اکثر پارامترهای ورودی بر نتایج این مدل‌های گیاهی حساسیت متوسطی داشتند. به همین دلیل از این پارامترها برای واسنجی این سه مدل استفاده شد. در جدول (۴) نتایج واسنجی این مدل‌ها نشان داده شده است. در این جدول علاوه بر پارامترهای واسنجی شده، برخی از

AquaCrop، WOFOST و CropSyst به نتایج مشاهداتی نزدیک باشد. برای این کار از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۱۱) تا (۱۶) نشان داده شده‌اند. پس از واسنجی، صحت‌سنجی انجام شد. برای این کار، از عملکرد و بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده در طرح آزمایشی با مساحت ۱۲ متر مربع استفاده شد. در این مرحله، همانند واسنجی، از آماره‌های اشاره شده در روابط (۱۱) تا (۱۶) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad (12)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (13)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (15)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه

مشاهداتی به ترتیب برابر با ۱/۲۶ و ۰/۰۳ تن بر هکتار بود. این مقادیر به ترتیب در تیمارهای D_1V_1 و D_2V_1 به دست آمد. متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه برنج نیز برابر با ۰/۴۶ تن بر هکتار بود. این مقادیر نسبت به مدل AquaCrop کمتر بود. علت آن را می توان به دلیل ماهیت مدل WOFOST دانست. این مدل کربن محور است و حساسیت بالایی نسبت به تغییرات، نوع آبیاری و مقدار مصرف آن ندارد. مدل WOFOST در تعیین عملکرد دقت بهتری نشان داد؛ لیکن در برآورد کل ماده خشک دقت پایین تری نسبت به AquaCrop داشت.

مقایسه نتایج عملکرد شبیه سازی شده برنج با مدل CropSyst و مقادیر مشاهداتی آن در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده به ترتیب برابر با ۱/۱۲ و ۰/۱۲ تن در هکتار بود. این مقادیر به ترتیب در تیمارهای D_3V_3 و D_3V_2 مشاهده شد. متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده با این مدل و مقادیر مشاهداتی نیز برابر با ۰/۶۰ تن در هکتار بود. مشاهدات سعادت و همکاران (Saadati et al., 2013) نشان داد که خطای مدل CropSyst برای شبیه سازی ارقام مختلف برنج کمتر از ۲۱ درصد بود. متوسط خطای شبیه سازی شده عملکرد برای مدل CropSyst در تحقیق حاضر برابر با ۱۱ درصد بود که با توجه به نتایج سعادت و همکاران (Saadati et al., 2013) قابل قبول بود. این مقدار از نتایج به دست آمده توسط مدل AquaCrop کمتر ولی نسبت به نتایج مدل WOFOST بیشتر بود.

مقایسه بهره وری مصرف آب شبیه سازی شده و مشاهداتی برای هر سه مدل AquaCrop و

پارامترهای ثابت نیز نشان داده شده است که به صورت پیش فرض برای مدل های مورد استفاده باقی ماندند. این پارامترها برای هر سه رقم ثابت بوده و در صحت سنجی نتایج برای هر سه رقم مورد استفاده به صورت یکسان مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به تعداد داده های زیاد مدل های گیاهی مورد استفاده، تنها بخشی از آنها در جداول تحلیل حساسیت و واسنجی ذکر شدند.

با در نظر گرفتن مقادیر مشاهداتی، عملکرد دانه برنج در روش های کاشت نشایی، مستقیم و خشکه کاری به ترتیب برابر با ۶/۳، ۴/۶ و ۴/۹ تن بر هکتار بود. عملکرد دانه برنج در رقم های عنبوری قرمز، چمپا و دانیال نیز به ترتیب برابر با ۴/۳، ۴/۶ و ۶/۹ تن در هکتار به دست آمد. نتایج به دست آمده از مدل AquaCrop در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف بین نتایج شبیه سازی شده و مشاهداتی به ترتیب برابر با ۲/۶ و ۰/۰۷ تن بر هکتار بود. این مقادیر به ترتیب در تیمارهای D_2V_3 و D_1V_2 به دست آمد. این مقادیر برای تیمارهای D_3V_3 برابر با ۰/۰۷۷ تن در هکتار بود. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده نیز برابر با ۰/۶۴ تن بر هکتار (۹ درصد) به دست آمد. این نتایج با مشاهدات علایی بازکیایی و همکاران (Aalae Bazkiaei et al., 2020) مطابقت داشت. این محققان گزارش کردند که دقت مدل AquaCrop برای تعیین عملکرد مطلوب بود. به طوری که خطای شبیه سازی عملکرد در این مدل گیاهی برای اکثر تیمارها کمتر از ۶ درصد بود. نتایج شبیه سازی عملکرد دانه برنج با استفاده از مدل WOFOST در شکل (۲) مشاهده می شود. بر اساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده و

تبیین نتایج به‌دست آمده برای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب برنج با استفاده از مدل WOFOST به ترتیب برابر با ۰/۸۲ و ۰/۹۵ بود. مقادیر این پارامتر برای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب از مقادیر به دست آمده توسط مدل AquaCrop بیشتر بود. نحوه‌ی همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب با استفاده از مدل CropSyst و مقادیر مشاهداتی به‌ترتیب برابر با ۰/۸۰ و ۰/۹۶ بود که نشان‌دهنده‌ی تبعیت مناسب این مدل از تغییرات نتایج واقعی است. مقایسه مقادیر ضریب تبیین این مدل با دو مدل AquaCrop و WOFOST نشان داد که مدل CropSyst برای پارامترهای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نسبت به مدل AquaCrop بهتر بود ولی در تعیین عملکرد نسبت به مدل WOFOST همبستگی کمتری داشت.

مقایسه آماری مقادیر شبیه‌سازی شده برای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب دو مدل مورد استفاده نسبت به مقادیر مشاهداتی در جدول (۵) نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده برای مدل AquaCrop، آماره‌های RMSE، MBE و NRMSE برای عملکرد دانه برنج به‌ترتیب برابر با ۰/۳۶ تن در هکتار، ۱/۰۷ تن در هکتار و ۱۴ درصد بود. بنابراین، این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دچار خطای بیش‌برآوردی شده است و مقدار خطا نیز تا حدودی بالا است. با توجه به آماره NRMSE دقت این مدل خوب است. این نتایج با مشاهدات سایر محققان مطابقت داشت (Hsiao *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009; Farahani *et al.*, 2009). با توجه به دو آماره EF و d، کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج مطلوب نبود. این مدل در تعیین بهره‌وری مصرف آب دچار خطای کم‌برآوردی شد

و WOFOST در شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف این پارامتر برای مدل AquaCrop به‌ترتیب برابر با ۰/۱۲ و ۰/۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این مقادیر به‌ترتیب به تیمارهای D_1V_2 و D_2V_3 اختصاص داشت. متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نیز برابر با ۰/۰۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود؛ گرچه در تیمار D_2V_3 اختلاف مقادیر زیادی بین نتایج AquaCrop و داده‌های اندازه‌گیری شده مشاهده شد. علت آن، بالا بودن میزان بهره‌وری مصرف آب در این تیمار بود. اگر اختلاف نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بر اساس درصد بیان شود؛ بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به‌ترتیب برابر با ۵۰ و ۱ درصد خواهد بود. با توجه به شکل (۳)، بیشترین، کمترین و متوسط مقدار بهره‌وری مصرف آب شبیه‌سازی شده توسط مدل WOFOST به‌ترتیب برابر با ۰/۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۲ بود. مقادیر بیشینه و کمینه این پارامتر به ترتیب در تیمارهای D_1V_1 و D_2V_3 به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده از بهره‌وری مصرف آب توسط مدل CropSyst نشان داد که کمترین و بیشترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای این پارامتر به‌ترتیب برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. متوسط اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز برابر با ۰/۰۲ بود. در شکل (۴)، مقدار ضریب تبیین بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد برای مدل AquaCrop برابر با ۰/۶۶ به‌دست آمد که قابل قبول است. ضریب تبیین برای بهره‌وری مصرف آب برابر با ۰/۸۵ بود (شکل ۵). ضریب

عملکرد مطلوب بود ولی در تعیین بهره‌وری مصرف آب از کارایی آن کاسته شد. مقایسه این نتایج با دو مدل AquaCrop و WOFOST نشان داد که دقت مدل CropSyst از مدل AquaCrop بهتر و نسبت به مدل WOFOST ضعیف‌تر بود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد که دقت مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst برای تعیین عملکرد برنج بر اساس آماره NRMSE به ترتیب برابر با ۱۴، ۲۴ و ۱ درصد بود. دقت این مدل‌ها برای تعیین بهره‌وری مصرف آب به ترتیب برابر با ۱۵، ۱۴ و ۱۳ درصد بود. کارایی مدل WOFOST ($EF = 0/91$) برای تعیین عملکرد برنج بهتر از دو مدل گیاهی دیگر بود. برای شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب، کارایی هر سه مدل، بر اساس آماره EF، تقریباً یکسان و پایین بود. بر اساس کلیه نتایج، هر سه مدل گیاهی مورد استفاده دقت و کارایی مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب برنج داشتند؛ لیکن نتایج به دست آمده از مدل WOFOST نسبت به سایر مدل‌های گیاهی بهتر بود، بنابراین استفاده از این مدل می‌تواند مورد توجه باشد.

و دقت آن قابل قبول بود. کارایی مدل AquaCrop برای تعیین این پارامتر مطلوب بود. آماره MBE برای عملکرد دانه برنج برابر با ۰/۰۳ تن در هکتار بود که نشان‌دهنده بیش برآوردی اندک مدل WOFOST بود. مقادیر RMSE (۱/۱۴) تن در هکتار) و NRMSE (۱ درصد) نشان داد که این مدل در تعیین عملکرد دقت عالی داشت. این نتایج با مشاهدات سایر محققان (Farahani *et al.*, 2009; Saadati *et al.*, 2011) مطابقت داشت. کارایی WOFOST برای تعیین عملکرد نیز قابل قبول بود ($EF = 0/91$). مقایسه آماره‌های به دست آمده برای بهره‌وری مصرف آب نیز نشان داد که مدل WOFOST دچار خطای بیش برآوردی شد و دقت آن نیز اندکی کاهش داشت. با این وجود دقت آن قابل قبول بود، گرچه کارایی آن مطلوب نبود. نتایج آماره‌های به دست آمده برای مدل CropSyst در تعیین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نشان داد که این مدل دچار خطای بیش برآوردی شد. دقت این مدل برای تعیین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب خوب بود. نتایج به دست آمده با مشاهدات سایر محققان (Etzinger *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2004; Song *et al.*, 2006) مطابقت داشت. کارایی این مدل نیز در تعیین



شکل ۱- محل طرح آزمایشی انجام شده

Figure 1-Location of the plan

جدول ۱- تجزیه شیمیایی نمونه خاک محل اجرای آزمایش

Table 1-Physico-chemical properties of soil

Cl me ⁻¹	Ca me ⁻¹	Mg me ⁻¹	Na me ⁻¹	K ppm	P ppm	O.C. (%)	pH	EC (dS/m)
10	14	11	12.5	254	8	0.88	7.7	2.9

جدول ۲- تجزیه شیمیایی آب آبیاری محل آزمایش

Table 2-Chemical properties of irrigation water

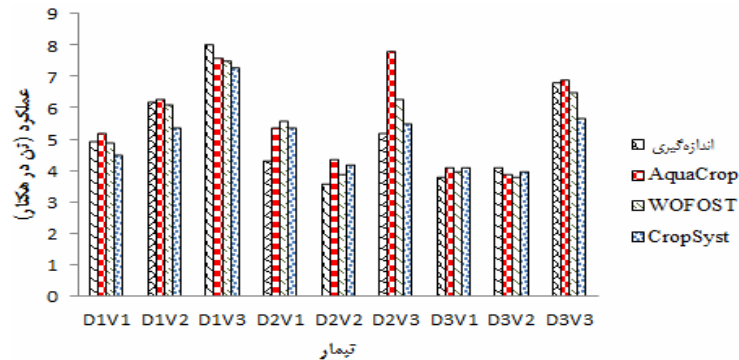
سدیم Na	منیزیم Mg	کلسیم Ca	کلر Cl	بیکربنات CO ₃	کربنات HCO ₃	بافت خاک Soil texture	pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)
Meq.L ⁻¹								
4.8	4.5	4.0	2.6	3.9	0	Silty clay	7.7	1.2

جدول ۳- نتایج تحلیل حساسیت مدل‌های AquaCrop، CropSyst و WOFOST
Table 3-Results for Scensivity analysis of AquaCrop, CropSyst and WOFOST

میزان حساسیت Scensitivity rate	Sc (+25%)	Sc (-25%)	پارامتر Parameter
AquaCrop			
ضریب رشد پوشش گیاهی Canopy growth coefficient	10.9	3	متوسط Average
بهره‌وری آب نرمال شده Normalized water productivity	12	5	متوسط Average
شاخص برداشت Harvest index	3.9	5.1	متوسط Average
حد بالای مربوط به توسعه پوشش گیاهی Soil water depletion threshold for canopy expansion- Upper	8.5	7.4	متوسط Average
حد پایین مربوط به توسعه پوشش گیاهی Soil water depletion threshold for canopy expansion- Lower	10.1	6.9	متوسط Average
حد بالای مربوط به بسته شدن روزنه‌ها Soil water depletion threshold for canopy expansion- Upper	5.9	10.8	متوسط Average
WOFOST			
سرعت جذب نگهداشت نسبی در ساقه‌ها The absorption rate of relative retention in the stems	6.5	4.3	متوسط Average
سرعت جذب نگهداشت نسبی در ریشه‌ها The absorption rate of relative retention in roots	9	7.4	متوسط Average
سرعت جذب نگهداشت نسبی در برگ The absorption rate of relative retention in leaves	6.5	5.1	متوسط Average
حداکثر سرعت جذب دی‌اکسید کربن در برگ Maximum CO ₂ absorption rate in leaves	4.9	8.6	متوسط Average
CropSyst			
ضریب ماده خشک تعرق Transpiration dry matter coefficient	4.6	4.4	متوسط Average
ضریب تبدیل نور به ماده خشک The conversion factor of light to dry matter	5.1	9.6	متوسط Average
حداکثر شاخص برگ مورد انتظار Expected maximum leaf area index	6.8	2.2	متوسط Average
کسری از حداکثر شاخص برگ در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی Fraction of maximum leaf index at physiological maturity stage	3.9	7.1	متوسط Average

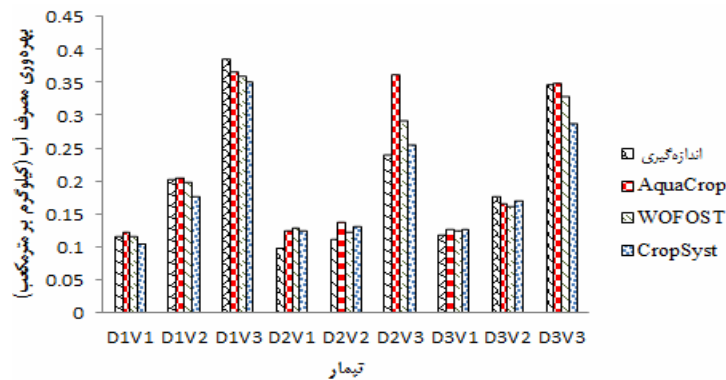
جدول ۴- نتایج پارامترهای واسنجی شده و پیش‌فرض مدل‌های AquaCrop و CropSyst و WOFOST
Table 4-Results for calibrated and default parameters of AquaCrop and CropSyst and WOFOST

پارامتر Parameter	واحد Unit	مقدار Value			توضیحات Description
		دانیال Dania	چمپا Champa	عنبروری قرمز Red-Anbori	
AquaCrop					
پوشش گیاهی اولیه Initial canopy cover	%	1.25	1.25	1.25	پیش‌فرض Default
ضریب رشد پوشش گیاهی Canopy growth coefficient	% \cdot day ⁻¹	19.1	19.8	19.8	واسنجی شده Calibrated
حداکثر پوشش گیاهی Maximum canopy cover	%	75	75	75	واسنجی شده Calibrated
ضریب کاهش پوشش Canopy decline coefficient	% \cdot day ⁻¹	8	8	8	پیش‌فرض Default
بهره‌وری آب نرمال شده Normalized water productivity	g \cdot m ⁻²	15	19	19	واسنجی شده Calibrated
شاخص برداشت Harvest index	%	0.4	0.3	0.3	واسنجی شده Calibrated
حداکثر عمق ریشه Maximum rooting depth	M	0.35	0.35	0.35	پیش‌فرض Default
حد بالای مربوط به توسعه پوشش گیاهی Soil water depletion threshold for canopy expansion-Upper	-	0.18	0.15	0.10	واسنجی شده Calibrated
حد پایین مربوط به توسعه پوشش گیاهی Soil water depletion threshold for canopy expansion-Lower	-	0.5	0.4	0.3	واسنجی شده Calibrated
حد بالای مربوط به بسته شدن روزنه‌ها Soil water depletion threshold for canopy expansion-Upper	-	0.4	0.5	0.5	واسنجی شده Calibrated
ضریب شکل منحنی مربوط به بسته شدن روزنه‌ها Soil water shape factor for canopy expansion-Upper	-	4	4	4	واسنجی شده Calibrated
WOFOST					
حد پایین دما برای جوانه‌زنی Low germination rate	°C	0	0	0	پیش‌فرض Default
حد بالای جوانه‌زنی High limit of germination	°C	0	0	0	پیش‌فرض Default
مجموع دما از کاشت تا جوانه‌زنی Total temperature from planting to germination	°C \cdot day ⁻¹	0	0	0	پیش‌فرض Default
مدت زنده‌مانی برگ در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد Leaf viability at 35 °C	Day	18	18	18	پیش‌فرض Default
حداکثر سرعت جذب دی‌اکسید کربن در برگ Maximum CO ₂ absorption rate in leaves	Kg \cdot ha ⁻¹ \cdot h ⁻¹	40	42	42	واسنجی شده Calibrated
فاکتور تصحیح سرعت جذب Absorption rate correction factor	%	1.2	1.0	1.1	واسنجی شده Calibrated
حداکثر عمق ریشه Maximum root depth	M	0.35	0.35	0.35	واسنجی شده Calibrated
سرعت جذب نگهداشت نسبی در برگ The absorption rate of relative retention in leaves	Kg \cdot kg ⁻¹ \cdot day ⁻¹	0.04	0.03	0.03	واسنجی شده Calibrated
سرعت جذب نگهداشت نسبی در اندام‌های ذخیره The absorption rate of relative retention in storage organs	Kg \cdot kg ⁻¹ \cdot day ⁻¹	0.004	0.003	0.004	واسنجی شده Calibrated
سرعت جذب نگهداشت نسبی در ریشه‌ها The absorption rate of relative retention in roots	Kg \cdot kg ⁻¹ \cdot day ⁻¹	0.01	0.01	0.01	واسنجی شده Calibrated
سرعت جذب نگهداشت نسبی در ساقه‌ها The absorption rate of relative retention in the stems	Kg \cdot kg ⁻¹ \cdot day ⁻¹	0.016	0.013	0.015	واسنجی شده Calibrated
CropSyst					
ضریب ماده خشک تعرق Transpiration dry matter coefficient	kPa \cdot kg \cdot m ⁻³	6	5	5	واسنجی شده Calibrated
ضریب تبدیل نور به ماده خشک The conversion factor of light to dry matter	g \cdot MJ ⁻¹	4	3	4	واسنجی شده Calibrated
نسبت تعرق واقعی به پتانسیل در محدود کردن شاخص سطح برگ The ratio of actual transpiration to potential in limiting leaf area index	-	0.95	0.95	0.95	واسنجی شده Calibrated
دمای بهینه روزانه برای رشد Optimal daily temperature for growth	°C	27	27	27	واسنجی شده Calibrated
حداکثر جذب آب Maximum water uptake	mm \cdot day ⁻¹	13	13	13	پیش‌فرض Default
حداکثر عمق ریشه Maximum root depth	M	0.35	0.35	0.35	پیش‌فرض Default
حداکثر شاخص برگ مورد انتظار Expected maximum leaf area index	m ² \cdot m ⁻²	6.1	5.9	5.9	واسنجی شده Calibrated
ضریب خاموشی تابش خورشیدی Solar radiation extinction coefficient	-	0.5	0.5	0.5	پیش‌فرض Default
ضریب تبخیر-تعرق در حالت پوشش کامل Evapotranspiration coefficient in full coverage mode	-	1.05	1.05	1.05	پیش‌فرض Default
شاخص برداشت در شرایط عدم تنش Harvest index under non-stress conditions	-	0.6	0.6	0.6	پیش‌فرض Default
کسری از حداکثر شاخص برگ در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی Fraction of maximum leaf index at physiological maturity stage	-	0.4	0.5	0.5	واسنجی شده Calibrated



شکل ۲- مقایسه عملکرد (تن بر هکتار) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل‌های AquaCrop و CropSyst و WOFOST

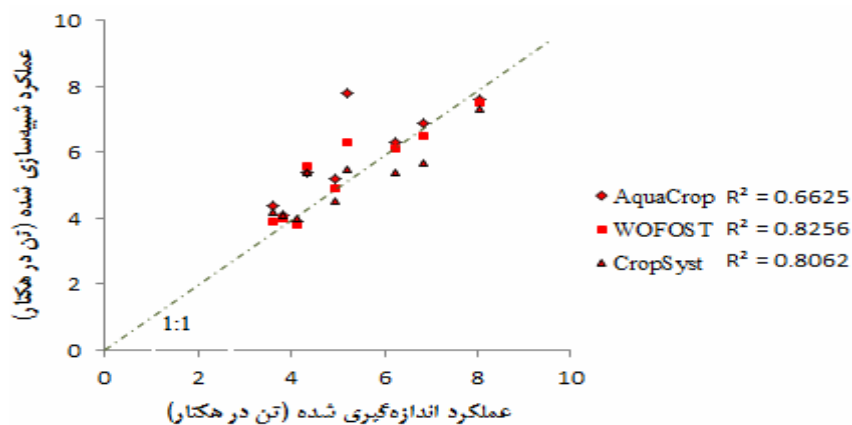
Figure 2- Comparison between observed and simulated yield (ton per hectare) using AquaCrop, CropSyst and WOFOST



شکل ۳- مقایسه بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst

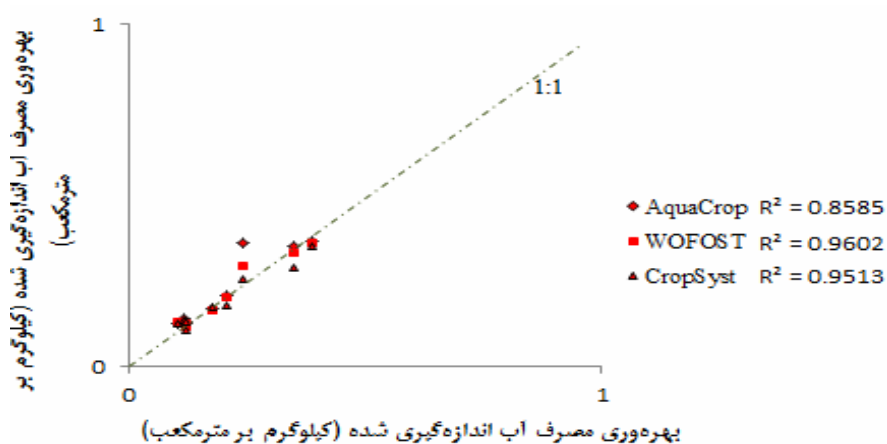
Figure 3- Comparison between observed and simulated water productivity (kilogram per cubic meter) using AquaCrop, CropSyst and WOFOST

(V1: عنبری قرمز، V2: چمپا و V3: دانیال؛ D1: روش نشایی، D2: روش مستقیم و D3: روش خشکه‌کاری)



شکل ۴- همبستگی بین عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برنج (تن بر هکتار) با مدل‌های AquaCrop، CropSyst و WOFOST

Figure 4- Comparison of simulated rice yield (ton per hectare) by AquaCrop, CropSyst and WOFOST



شکل ۵- همبستگی بین بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برنج با مدل‌های AquaCrop، CropSyst و WOFOST

Figure 5-Comparison of simulated rice water productivity (kilogram per cubic meter) by AquaCrop, CropSyst and WOFOST

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های آماری برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب برنج

Table 5-Values of statistical criteria for simulation of rice yield and water productivity

Parameter پارامتر	Model مدل	d	EF	MBE	RMSE	NRMSE
Yield عملکرد	AquaCrop	0.99	0.90	0.36	1.07	0.14
	CropSyst	0.99	0.82	0.11	0.80	0.24
	WOFOST	0.99	0.91	0.06	1.14	0.01
Water productivity بهره‌وری مصرف آب	AquaCrop	0.99	0.31	-0.11	0.40	0.15
	CropSyst	0.99	0.30	0.15	0.40	0.14
	WOFOST	0.99	0.30	0.15	0.40	0.13

References

منابع مورد استفاده

- Aalae Bazkiaei, P., B. Kamkar, E. Amiri, M. Rezaei, H. Kazemi, and S. Akbarzadeh. 2020. Simulation of growth and yield and evaluation of rice production productivity under irrigation management and planting date using AquaCrop model. *Water and Soil Resources Conservation*. 9(2): 17-34. (In Persian).
- Ahmadee, M., A. Khashei Siuki, and M.H. Sayyari. 2015. Comparison of efficiency of different equations to estimate the water requirement of saffron (*Crocus sativus* L.) (case study: Birjand plain, Iran). *Journal of Agronomy*. 8(4): 505-520. (In Persian).
- Anonymous. 2008. IRRI Background paper: The rice crisis: What needs to be done? IRRI, Los Baños, Philippines, www.irri.org/12pp.
- Anonymous. 2017. FAOSTAT. Statistical Databases. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org>.
- Ansari, M.A., A. Egdernezhad, and N.A. Ebrahimipak. 2019. Simulating of potato (*Solanum tuberosum* L.) yield under different irrigation conditions using AquaCrop and CropSyst models. *Crop Ecophysiology*. 13(50-2): 287-304. (In Persian).
- Boogaard, H.L., C.A. van Diepen, R.P. Rotter, J.M.C.A. Cabrera, and H.H. van Laar. 1998. WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 (No. 52). SC-DLO.
- Bouman, B.A.M., H. van Keulen, H.H. van Laar, and R. Rabbinge. 1996. The School of de Wit, crop growth simulation models: pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*. 52: 171-198.
- Canfalonieri, R., and S. Bocchi. 2005. Evaluation of CropSyst for simulation the yield of flooded rice in Northern Italy. *European Journal of Agronomy*. 23:315-326.
- Eitzinger, J., M. Trnka, J. Hosch, Z. Zalud, and M. Dubrovsk. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecological Modelling*. 171: 223-246.
- Esmaeilian, Y., and M. Ramroudi. 2018. Evaluation of AquaCrop model in simulating yield and water productivity of three corn hybrid under hot-dry climatic conditions. *Crop Ecophysiology*. 12(47-3): 355-376. (In Persian).
- Farahani, H.J., G. Izzi, P. Steduto, and T.Y. Oweis. 2009. Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy*. 101: 469-476.
- Garcia-Vila, M., E. Fereres, L. Mateos, F. Orgaz, and P. Steduto. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy*. 101: 477-487.
- Geerts, S., and D. Raes. 2009. Defecit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96: 1275-1284.
- Geerts, S., D. Raes, M. Garcia, R. Miranda, and J.A. Cusicanqui. 2009. Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with FAO-AquaCrop. *Agronomy*. 101: 499-508.

- Gilani, A., S. Ataallah, S. Jalali, and K. Limouchi. 2017. Evaluation the effects of sowing dates on the peduncle anatomy and grain yield of the rice cultivars in the climatic condition of Khuzestan province. *Crop Ecophysiology*. 10(40-4): 975-990. (In Persian).
- Gilani, A.A., Sh. Absalan, and S, Jalali. 2010. Comparison of dry bed seeding to current cultivation methods of rice based on water consumption. Research Project. Rice Research Institute of Iran. 22 p. (In Persian).
- Heng, L.k., T.C. Hsiao, S. Evett, T. Howell, and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*. 101(3):488-498.
- Hsiao, T.C., L. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101(3): 448-459.
- Mohseni, M., A.A. Montazar, and A. Rahimi Khoub. 2009. Evaluation of CropSyst model for water-nitrogen interactions in wheat yield and water productivity. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 3(1): 113-125. (In Persian).
- Moriondo, M., F. Maselli, and M. Bindi. 2007. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy*. 26: 266-274.
- Moumeni, R., S.M.R. Behbahani, M.H. Nazarifar, and B. Azadegan. 2008. Zoning of water productivity of water by CropSyst model in different water periods (Case studt: Karkheh watershed). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2(1): 63-76. (In Persian).
- Pala, M., C.O. Stockle, and H.C. Harris. 1996. Simulation of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum) growth under different water and nitrogen regimes in a Mediterranean environment using CropSyst. *Agricultural Systems*. 51(2): 147-163.
- Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres. 2009. AquaCrop- the FAO crop model to simulate yield response to water II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 101: 438-447.
- Saadati, Z., N. Pirmoradian, and M. Rezaei. 2013. Yield response simulation of two local rice varieties to irrigation management using CropSyst model. *Water and Soil Science*. 17(64): 69-81. (In Persian).
- Saadati, Z., N. Pirmoradianand, and M. Rezaei. 2011. Calibration and evaluation of AquaCrop model in rice growth simulation under different irrigation managements. 21th International Congress on Irrigation and Drainage. October19-23, Tehran, Iran, 589-600.
- Sanjani, S. 2012. Agroecological zoning and study of yield gap of wheat, sugar beet and corn in Khorasan province. Ph.D. Thesis. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
- Singh, A.K., R. Tripathy, and U.K. Chopra. 2008. Evaluation of CERES- wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*. 95(7): 776-786.

- Song, Y.I., D.L. Chen, and W.J. Dong. 2006. Influence of climate on winter wheat productivity in different climate regions of China, 1961–2000. *Climate Research*. 32: 219–227.
- Stockle, C.O. and R.L. Nelson. 1996. Cropsyst User's manual (Version 2.0). Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman, WA, USA.
- Todorovic, M., R. Albrizio, L. Zivotic, M. Abisaab, and C. Stwckle. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy*. 101: 509-521.
- Yang, H.S., A. Dobermann, J.L. Lindquist, D.T. Wolters, T.J. Arkebauer, and K.G. Cassman. 2004. Hybrid-maize—A maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research*. 87: 131–154.

Research Article

DOI: 10.30495/jcep.2021.683383

Yield and Water Productivity Simulation of Different Rice Cultivars under Various Planting Methods using AquaCrop, CropSyst and WOFOST Models

Seyed Amir Hossein Mousavi¹, Aslan Egdernezhad^{2*} and Abdolali Gilani³

Received: November 2019, Revised: 1 November 2020, Accepted: 3 December 2020

Abstract

Simulation of rice yield and its water productivity studied using AquaCrop, WOFOST and CropSyst models, in an experiment at Khuzestan Agricultural Research Station. In this study, three types of planting methods (D_1 : transplanting, D_2 : direct seeding, and D_3 : dry bed seeding) and three rice cultivars (V_1 : Red-Anbori, V_2 : Champa, V_3 : Danial) were considered. Results of MBE (0.36 t.ha^{-1}), RMSE ($0.1.07 \text{ t.ha}^{-1}$) and NRMSE (0.14 t.ha^{-1}). MBE, RMSE and NRMSE values for water productivity calculated by using AquaCrop model were -0.11 kg.m^{-3} , 0.40 kg.m^{-3} and 0.15 , respectively. The values for yield simulation using WOFSOT model were 0.06 ton.ha^{-1} , 1.14 t.ha^{-1} and -0.01 , respectively, and aforementioned values for water productivity simulated by WOFOST were 0.15 kg.m^{-3} , 0.40 kg.m^{-3} and -0.13 , respectively. The mentioned values for CropSyst simulated as 0.11 t.ha^{-1} , 0.80 t.ha^{-1} and -0.24 for yield and 0.15 kg.m^{-3} , 0.40 kg.m^{-3} and -0.14 for water productivity, respectively. According to the results, accuracy for all models were accepted to simulate rice yield and water productivity. However, WOFOST accuracy was better than the other models in most treatments. Thus, it is recommended to use WOFOST for simulation of rice yield and water productivity at different rice cultivars.

Key words: Carbon- driven Model, Crop Modeling, Dry Bed Seeding, Radiation-driven Model, Water-driven Model.

1- M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

3- Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Ahvaz, Iran.

*Corresponding Author: a_eigder@ymail.com