

شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام مختلف برنج تحت شرایط مختلف کاشت با استفاده از دو مدل AquaCrop و SWAP*

سید امیرحسین موسوی^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*} و عبدالعلی گیلانی^۳

چکیده

به منظور شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب برنج توسط دو مدل AquaCrop و SWAP، تحقیقی در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان (ایستگاه شاور) انجام شد. در این تحقیق، دو عامل روش کاشت (D1: نشایی، D2: مستقیم رایج در منطقه و D3: خشکه‌کاری) و رقم برنج (V1: عنبروری قرمز، V2: چمپا و V3: دانیال) مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که دقت مدل AquaCrop برای تعیین عملکرد براساس آماره‌های MBE (۰/۳۶ تن بر هکتار)، RSME (۱/۰۷ تن بر هکتار) و NRMSE (۰/۱۴) قابل قبول بود. مقادیر این آماره‌ها برای مدل SWAP به ترتیب برابر با ۰/۵۴ تن بر هکتار، ۱/۰۹ تن بر هکتار و ۰/۱۵ بود که نشان داد دقت این مدل نیز قابل قبول بود. مقادیر آماره‌های MBE، RMSE و NRMSE برای کارایی مصرف آب توسط مدل AquaCrop به ترتیب برابر با ۰/۱۱- کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۱۵ و توسط مدل SWAP به ترتیب برابر با ۰/۱۰- کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۱۵ بود. متوسط اختلاف عملکرد برای مدل‌های AquaCrop و SWAP به ترتیب برابر با ۰/۶۴ و ۰/۶۷ تن بر هکتار و متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده کارایی مصرف آب توسط مدل‌های AquaCrop و SWAP به ترتیب برابر با ۰/۰۲ و ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شد. مجموع نتایج نشان داد که هر دو مدل AquaCrop و SWAP دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب برنج تحت شرایط مختلف کاشت برای ارقام گوناگون داشتند؛ لیکن دقت مدل AquaCrop از عملکرد بهتری برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: رقم چمپا، رقم دانیال، رقم عنبروری قرمز، روش خشکه‌کاری، نشاء برنج، مدل‌سازی گیاهی.

مقدمه

می‌شود لیکن روش‌های مستقیم به دلیل حذف یا کاهش برخی مشکلات در بین محققان و کشاورزان مورد توجه قرار گرفته است. در روش نشاکاری، کشت برنج در یک بستر گل‌خرابی انجام می‌شود. این بستر اگرچه از طریق کاهش تلفات نفوذ آب، کنترل مناسب علف‌های هرز، تسهیل استقرار گیاهچه، ایجاد شرایط بی‌هوایی جهت افزایش فراهمی و در دسترس بودن مواد مغذی برای برنج سودمند است؛ اما تکرار گل‌خرابی اثرات منفی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک از طریق تخریب خاکدانه‌ها، کاهش تراوایی در لایه‌های زیرسطحی و تشکیل لایه‌های سخت در اعماق لایه سطحی خاک دارد (Sharma et al., 2003). در روش‌های مستقیم، بذر برنج روی یک بستر خشک یا تر پخش می‌شود. در این روش‌ها مقدار آب مصرفی کمتر شده و هزینه‌های کارگری نیز به شدت کم می‌شود. در نتیجه امکان گسترش کشت آن نیز به وجود می‌آید. با این وجود تغییر عملکرد و میزان آب مصرفی در هر کدام از روش‌های معرفی شده می‌بایست برای مناطق مختلف و ارقام گوناگون برنج بررسی شود. مطالعه کلیه این آزمایش‌ها بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است. به منظور رفع این مشکل مدل‌های گیاهی مختلفی توسط محققان بسط داده شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به SWAP و

برنج یکی از مهم‌ترین منابع غذایی انسان بوده به طوری که غذای بیش از پنجاه درصد از مردم جهان را شامل می‌شود (FAO, 2017). با توجه به رشد جمعیت جهان، پیش‌بینی شده است که تولید این محصول زراعی می‌بایست تا سال ۲۰۳۵ حدود ۲۶ درصد نسبت به وضعیت ابتدا قرن بیست و یکم افزایش یابد (IRRI, 2008). در حالت فعلی، کشت برنج در اکثر نقاط جهان به صورت نشاکاری انجام

^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. (* نویسنده 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.

* مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

تاریخ دریافت: ۹۸/۲/۱۵

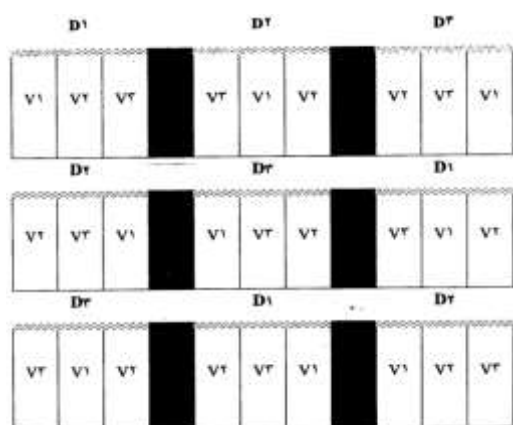
تاریخ پذیرش: ۹۸/۶/۳۰

پارامترهای موردنظر قابل قبول بود (Amiri, 2016). بونفانت و بوما از این مدل برای شبیه‌سازی اثرات کمبود آب بر عملکرد ذرت در شرایط تغییر اقلیم استفاده کردند و با اعتماد به نتایج این مدل به بررسی سناریوهای مختلف پرداختند (Bonafante and Bouma, 2015). ما و همکاران از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گندم زمستانه پرداختند و نشان دادند که مقادیر RMSE و MRE برای عملکرد گندم به ترتیب برابر با ۲/۴ و ۸ درصد بود (Ma et al, 2011).

با توجه به سابقه تحقیق، تاکنون ارزیابی دو مدل SWAP و AquaCrop تحت شرایط مختلف کاشت و برای ارقام مختلف برنج موردبررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق به بررسی دقت این دو مدل گیاهی بر برنج پرداخته شد.

مواد و روش

پژوهش حاضر به صورت کرت‌های خردشده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان واقع در طول جغرافیایی ۳۱° ۴۹' و عرض جغرافیایی ۴۸° ۲۵' انجام شد. در این تحقیق، دو عامل روش کاشت (D1: نشایی، D2: مستقیم رایج در منطقه و D3: خشکه‌کاری) و رقم برنج (V1: عنبروی قرمز، V2: چمپا و V3: دانیال) در کرت‌هایی با مساحت ۱۲ مترمربع موردبررسی قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱- شماتیک طرح آزمایشی انجام شده

آماده‌سازی زمین قبل از شروع کاشت انجام شد. بدین منظور از خاک مزارع به صورت تصادفی نمونه‌برداری انجام شد و موردبررسی قرار گرفت. خصوصیات خاک محل آزمایش در جدول (۱) نشان داده شده است. به منظور آبیاری این گیاه زراعی، ابتدا ضریب گیاهی آن تعیین

Geerts et al., ;Van Dam et al., 1997) اشاره کرد (AquaCrop 2009).

مدل AquaCrop توسط سازمان خواروبار کشاورزی و برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی متعدد بسط داده شد (Geerts and Raes, 2009). مدل گیاهی SWAP توسط دانشگاه واگنینگن هلند و به منظور شبیه‌سازی هم‌زمان اتمسفر، گیاه، خاک و آب بسط داده شد (Van Dam et al., 1997). نتایج محققان مختلف نشان داده است که دقت این دو مدل برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی مطلوب بوده است. هسیائو و همکاران دقت مدل AquaCrop را در تعیین عملکرد ذرت بررسی کردند. این محققان نشان دادند که بیشترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری برای عملکرد دانه برابر با ۲۴ درصد بود (Hsiao et al., 2009). هنگ و همکاران دقت مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت شرایط مختلف تأمین رطوبت بررسی کردند. این محققان نشان دادند که دقت این مدل قابل قبول است (Heng et al, 2009). از جمله تحقیقات دیگر می‌توان به مطالعات فرهانی و همکاران بر روی گیاه پنبه (Farahani et al., 2009)، گارسیا ویلا و همکاران بر روی گیاه پنبه (Garcia-villa et al., 2009) تودوروویس و همکاران بر روی گیاه آفتابگردان (Todorovic et al., 2009) اشاره کرد. سعادت و همکاران از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی برنج تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری استفاده کردند. این محققان نشان دادند که خطای نسبی شبیه‌سازی عملکرد بین ۰/۱ تا ۷/۸ بود (Saadati et al., 2011).

جنوبی و همکاران به منظور افزایش کارایی مصرف آب برنج در شمال کشور از مدل SWAP تحت سناریوهای مختلف آبیاری استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار RMSE برای عملکرد برنج برابر با ۴/۹۴ درصد بود به همین دلیل از این مدل برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری استفاده شد (Jonubi et al., 2018). در تحقیقی دیگر بونفانت و همکاران از این مدل برای شبیه‌سازی خصوصیات خاک تحت کشت ذرت در شمال ایتالیا استفاده کرد. نتایج این تحقیق حاکی از این بود که دقت مدل SWAP برای برآورد پارامترهای مزرعه مناسب بود (Bonafant et al., 2010). یوج و همکاران از این مدل برای شبیه‌سازی زهکشی مزارع برنج استفاده کردند و نشان دادند که دقت این مدل برای این هدف قابل قبول بود (Yuge et al., 2016). امیری از مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت در شیراز استفاده کردند و نشان داد که در حالت کلی دقت این مدل برای شبیه‌سازی

تمام پشته‌ها تا عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک توسط پلاستیک پوشانده شد. مشخصات آب آبیاری در جدول (۲) آمده است.

شد سپس مقدار آب آبیاری برای هر روش کاشت محاسبه و اعمال گردید. جهت جلوگیری از هرگونه نفوذ عمقی و جانبی آب از کرت‌ها،

جدول ۱- تجزیه شیمیایی نمونه خاک محل اجرای آزمایش

Cl (meq.l ⁻¹)	Ca (meq.l ⁻¹)	Mg (meq.l ⁻¹)	Na (meq.l ⁻¹)	K (ppm)	P (ppm)	O.C. (%)	PH	EC (dS/m)
۱۰	۱۴	۱۱	۱۲/۵	۲۵۴	۸	۰/۸۸	۷/۷	۲/۹

جدول ۲- تجزیه شیمیایی آب آبیاری محل آزمایش

Na	Mg	Ca	Cl	CO ₃	HCO ₃	بافت خاک	PH	EC (dS/m)
۴/۸	۴/۵	۴	۲/۶	۳/۹	۰	Silty clay	۷/۷	۱/۲

خشک تولیدشده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$Y = B \times HI \quad (۵)$$

در این رابطه، Y عملکرد، HI شاخص برداشت و B بیوماس خشک است. داده‌های مورد استفاده در این مدل در چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه دسته‌بندی می‌شوند. هر گروه از داده‌های بر اساس آزمایش‌های مزرعه‌ای و یا داده‌های موجود به مدل معرفی شدند.

در مدل SWAP، شبیه‌سازی رشد و تولید محصول به کمک فاکتورهای زراعی اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه انجام می‌شود. بدین منظور، با استفاده از رابطه (۶)، میزان تولید محصول تعیین می‌شود.

$$1 - \frac{Y_{a,k}}{Y_{p,k}} = K_{y,k} \left(1 - \frac{T_{a,k}}{T_{p,k}} \right) \quad (۶)$$

که در این رابطه، $K_{y,k}$ ضریب واکنش گیاه به مرحله‌ی رشد K، $T_{a,k}$ و $T_{p,k}$ تعرق واقعی و پتانسیل در طول دوره‌ی رشد K (سانتی‌متر)، $Y_{a,k}$ و $Y_{p,k}$ محصول واقعی و پتانسیل در طول دوره‌ی رشد K (کیلوگرم بر هکتار) است. محصول نسبی در کل فصل رشد با استفاده از محصول نسبی در هر مرحله از رشد، از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود.

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{k=1}^n \left(\frac{Y_{a,k}}{Y_{p,k}} \right) \quad (۷)$$

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

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (۱)$$

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (۲)$$

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

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (۳)$$

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

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (۴)$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد (Y) نیز با استفاده از ماده‌ی

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

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

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (13)$$

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

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، Q_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 به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده‌ی دقت عالی مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۱-۰/۲، ۰/۲-۰/۳ 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 موردنظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد عامل موردنظر 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 R2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

با توجه به شرایط کشت مختلف در این تحقیق، میزان آب مصرفی برای هرکدام از روش‌های کاشت در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، اختلاف بین مقادیر آب آبیاری برای هرکدام از این روش‌ها بلافاصله پس از رشد ابتدایی شروع شد. متوسط مقدار آب مصرفی در روش‌های نشایی، مستقیم و خشکه‌کاری به ترتیب برابر با ۳۸۹۸۱، ۲۸۵۳۱ و ۲۰۶۹۱ مترمکعب در هکتار بود.

که در این رابطه، Y_a محصول تجمعی واقعی در طول کل فصل رشد (کیلوگرم بر هکتار)، Y_p محصول تجمعی پتانسیل در طول کل فصل رشد (کیلوگرم بر هکتار)، k مرحله رشد و n تعداد مراحل رشد تعریف شده است. در صورت وجود رابطه خطی بین Y_a/Y_p و T_a/T_p در طول کل دوره رشد و یا زمانی که هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد ضریب واکنش به‌عنوان تابعی از مراحل رشد (Ds) برای یک گیاه خاص موجود نباشد، یک مرحله رشد (k) برای گیاه زراعی موردنظر تعریف می‌شود.

پیش از انجام واسنجی و مدل‌سازی با AquaCrop ابتدا این مدل با استفاده از رابطه (۸) مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت (Geerts et al., 2009):

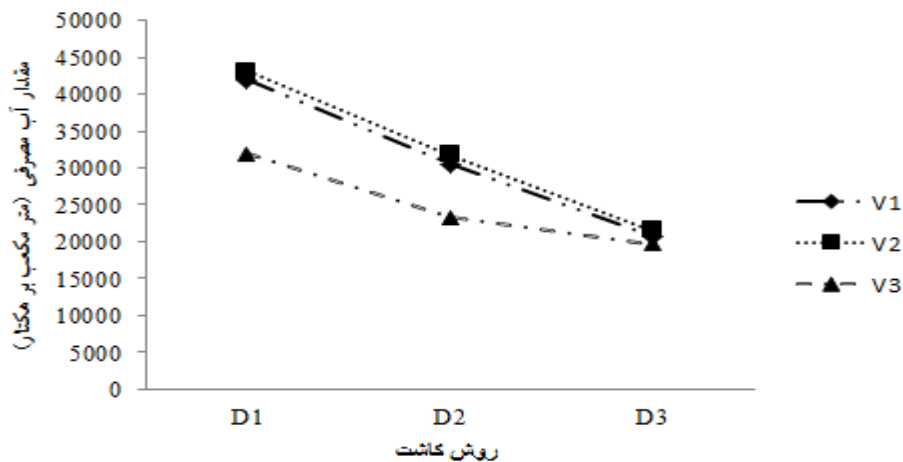
$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (8)$$

در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد شده عامل موردنظر بر اساس داده‌های ورودی تعدیل‌شده و P_b مقدار برآورد عامل موردنظر بر اساس داده ورودی پایه می‌باشد. به‌منظور تحلیل حساسیت هر عامل بر مقدار خروجی، آن عامل به میزان ۲۵ درصد مقدارش افزایش و کاهش می‌یافت. سپس مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > 15$ حساسیت بالا، $2 < Sc < 15$ حساسیت متوسط، $Sc < 2$ حساسیت پایین اندازه‌گیری شد (Geerts et al., 2009).

به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب برنج، از داده‌های برداشت‌شده از مزارع موجود در این منطقه و هم‌زمان با آزمایش استفاده شد. پس از واسنجی، این مدل با استفاده از داده‌های سال سوم مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. بدین منظور 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 (R2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۹) تا (۱۴) نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\frac{n}{\bar{O}_i}}} \quad (10)$$



شکل ۲- مقایسه مقدار آب مصرفی برای روش‌های مختلف کاشت و رقم‌های مختلف (V1: عنبروی قرمز، V2: چمپا و V3: دانیال؛ D1: روش نشایی، D2: روش مستقیم و D3: روش خشکه‌کاری)

جدول ۳- نتایج تحلیل حساسیت مدل‌های AquaCrop و SWAP

میزان حساسیت	Sc (-25%)	Sc (+25%)	پارامتر
AquaCrop			
متوسط	۹/۱	۲/۶	رطوبت در ظرفیت زراعی
متوسط	۶/۵	۶	رطوبت در نقطه پژمردگی
متوسط	۴/۴	۲/۴	رطوبت اشباع
متوسط	۶/۱	۳/۷	دمای حداقل
متوسط	۷/۲	۷/۴	دمای حداکثر
متوسط	۱۰/۹	۳	ضریب رشد پوشش گیاهی
متوسط	۱۲	۵	بهره‌وری آب نرمال شده
متوسط	۳/۹	۵/۱	شاخص برداشت
متوسط	۸/۵	۷/۴	حد بالای مربوط به توسعه پوشش گیاهی
متوسط	۱۰/۱	۶/۹	حد پایین مربوط به توسعه پوشش گیاهی
متوسط	۵/۹	۱۰/۸	حد بالای مربوط به بسته شدن روزنه‌ها
SWAP			
متوسط	۶/۲	۵/۵	دمای حداکثر
متوسط	۷/۱	۲/۳	دمای حداقل
کم-متوسط	۲/۵	۱/۴	ضریب تبخیر-تعرق
متوسط	۲/۱	۴/۳	بارفشاری برای شروع جذب آب توسط ریشه
متوسط	۳/۲	۳/۹	بارفشاری برای شروع بهینه جذب آب توسط ریشه

پارامترها برای واسنجی این دو مدل استفاده شد. در جدول (۴) نتایج واسنجی این مدل‌ها نشان داده شده است. در این جدول علاوه بر پارامترهای واسنجی شده، برخی از پارامترهای ثابت نیز نشان

نتایج واسنجی مدل‌های AquaCrop و SWAP در جدول (۳) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، اکثر پارامترهای ورودی بر نتایج این مدل حساسیت متوسطی داشتند. به همین دلیل از این

مورد استفاده، تنها بخشی از آن‌ها در جداول تحلیل حساسیت و واسنجی ذکر شدند.

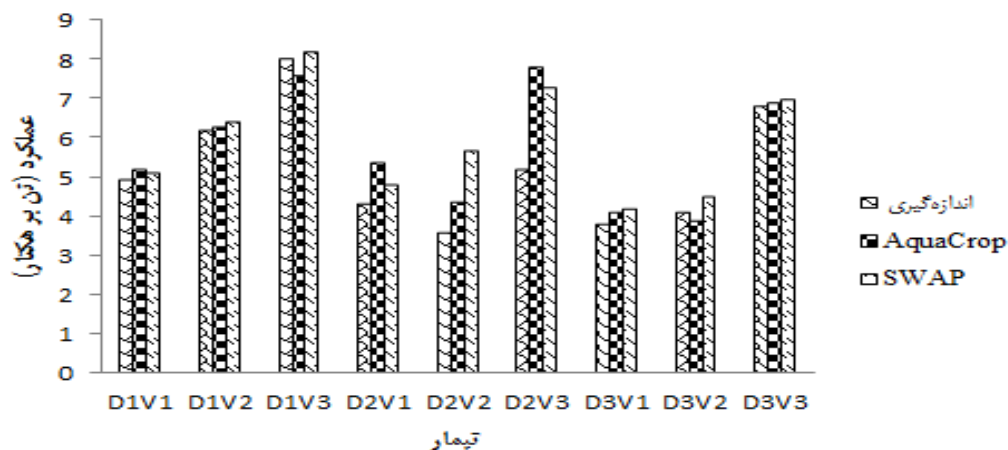
داده شده است. این پارامترها برای هر سه رقم ثابت بوده و در صحت‌سنجی نتایج برای هر سه رقم مورد استفاده به صورت یکسان مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به تعداد داده‌های زیاد دو مدل

جدول ۴- نتایج پارامترهای واسنجی شده و پیش‌فرض مدل‌های AquaCrop و SWAP

توضیحات	واحد	مقدار			پارامتر
		دانیال	چمپا	عنبروری قرمز	
AquaCrop					
پیش فرض	%	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	پوشش گیاهی اولیه
واسنجی شده	% .day ⁻¹	۱۹/۱	۱۹/۸	۱۹/۸	ضریب رشد پوشش گیاهی
واسنجی شده	%	۷۵	۷۵	۷۵	حداکثر پوشش گیاهی
پیش فرض	% .day ⁻¹	۸	۸	۸	ضریب کاهش پوشش
واسنجی شده	g.m ⁻²	۱۵	۱۹	۱۹	بهره‌وری نرمال شده
واسنجی شده	%	۰/۴	۰/۳	۰/۳	شاخص برداشت
پیش فرض	M	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	حداکثر عمق ریشه
واسنجی شده	-	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۰	حد بالای مربوط به توسعه پوشش گیاهی
واسنجی شده	-	۰/۵	۰/۴	۰/۳	حد پایین مربوط به توسعه پوشش گیاهی
واسنجی شده	-	۰/۴	۰/۵	۰/۵	حد بالای مربوط به بسته شدن روزنه‌ها
واسنجی شده	-	۴	۴	۴	ضریب شکل منحنی مربوط به بسته شدن روزنه‌ها
SWAP					
پیش فرض	-	۰/۶	۰/۶	۰/۶	ضریب نابودی نور پخش شده
پیش فرض	-	۰/۷	۰/۷	۰/۷	ضریب نابودی نور مستقیم
واسنجی شده	Cm	-۲۰	-۱۵	-۱۵	بارفشاری برای شروع جذب آب توسط ریشه
واسنجی شده	Cm	-۳۰	-۳۰	-۳۰	بارفشاری برای شروع بهینه جذب آب توسط ریشه
واسنجی شده	Kg CO ₂ .J ⁻¹	۰/۴	۰/۴	۰/۴	کارایی مصرف نور

D3V3 برابر با ۰/۰۷۷ تن در هکتار بود. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز برابر با ۰/۶۴ تن بر هکتار به دست آمد. در اکثر تیمارها مقدار شبیه‌سازی شده بیشتر از مقادیر مشاهداتی بود که در شکل (۲) نیز قابل مشاهده است. نتایج به دست آمده از مدل SWAP برای پارامتر عملکرد نشان داد که بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۲/۱ و ۰/۱۶ تن در هکتار بود (شکل ۳). این مقادیر به ترتیب در تیمارهای D2V3 و D1V3 مشاهده شد. متوسط اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد با مدل SWAP و داده‌های اندازه‌گیری شده نیز برابر با ۰/۶۷ تن در هکتار بود.

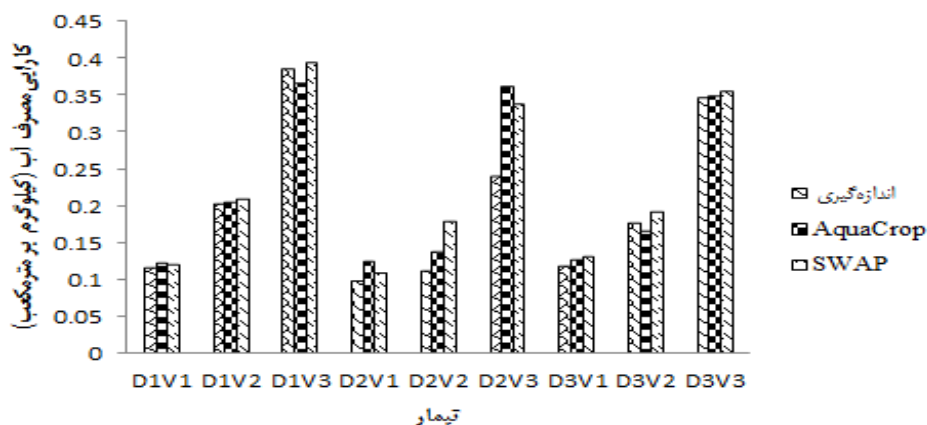
با در نظر گرفتن مقادیر مشاهداتی، عملکرد دانه برنج در روش‌های کاشت نشایی، مستقیم و خشکه‌کاری به ترتیب برابر با ۶/۳، ۴/۶ و ۴/۹ تن بر هکتار بود. عملکرد دانه برنج در رقم‌های عنبروری قرمز، چمپا و دانیال نیز به ترتیب برابر با ۴/۳، ۴/۶ و ۶/۹ تن در هکتار به دست آمد. نتایج به دست آمده از مدل AquaCrop در شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به ترتیب برابر با ۲/۶ و ۰/۰۷ تن بر هکتار بود. این مقادیر به ترتیب در تیمارهای D2V3 و D1V2 به دست آمد. این مقادیر برای تیمارهای



شکل ۳- مقایسه نتایج بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد با مدل‌های AquaCrop و SWAP (V1: عنبوری قرمز، V2: چمپا و V3: دانیال؛ D1: روش نشایی، D2: روش مستقیم و D3: روش خشکه کاری)

نتایج AquaCrop و داده‌های اندازه‌گیری شده مشاهده شد لیکن میزان کارایی مصرف آب در این تیمار نیز بالا بود. اگر اختلاف نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده براساس درصد بیان شود؛ بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به ترتیب برابر با ۵۰ و ۱ درصد خواهد بود. بیشترین و کمترین اختلاف نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهداتی کارایی مصرف آب توسط مدل SWAP به ترتیب برابر با ۰/۰۹ و ۰/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب بود. متوسط این اختلاف نیز برابر با ۰/۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد.

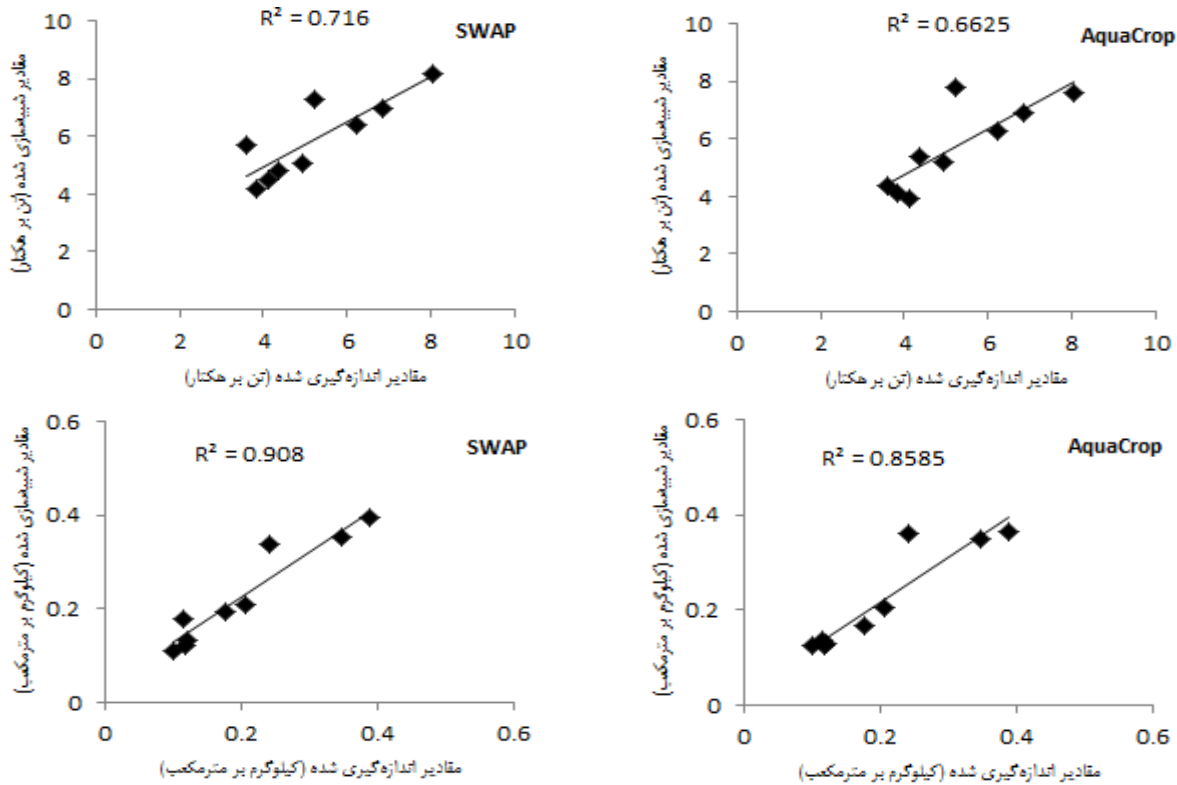
مقایسه کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای هر دو مدل AquaCrop و SWAP در شکل (۴) نشان داده شده است. براساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف این پارامتر برای مدل AquaCrop به ترتیب برابر با ۰/۱۲ و ۰/۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این مقادیر به ترتیب به تیمارهای D2V3 و D1V2 اختصاص داشت. متوسط اختلاف 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 D2V3 اختلاف مقادیر زیادی بین



شکل ۴- مقایسه نتایج بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده کارایی مصرف آب با مدل‌های AquaCrop و SWAP (V1: عنبوری قرمز، V2: چمپا و V3: دانیال؛ D1: روش نشایی، D2: روش مستقیم و D3: روش خشکه کاری)

شبه‌سازی شده عملکرد و کارایی مصرف آب برنج با استفاده از مدل SWAP به ترتیب برابر با ۰/۷۰ و ۰/۹۰ بود. مقایسه این نتایج با مدل AquaCrop بیانگر این بود که همبستگی نتایج به دست آمده توسط این مدل نسبت به مدل AquaCrop بهتر بود.

در شکل (۴)، مقدار ضریب تبیین بین مقادیر مشاهداتی و شبه‌سازی شده عملکرد برای مدل AquaCrop برابر با ۰/۶۶ به دست آمد که قابل قبول است. ضریب تبیین برای کارایی مصرف آب برابر با ۰/۸۵ بود. همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و



شکل ۵- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبه‌سازی شده عملکرد برنج با مدل AquaCrop (بالا-راست) و SWAP (بالا-چپ) و کارایی مصرف آب برنج با مدل AquaCrop (پایین-راست) و SWAP (پایین-چپ)

قابل قبول بود. این مدل در تعیین کارایی مصرف آب دچار خطای کم‌برآوردی شد و دقت آن قابل قبول بود. کارایی مدل AquaCrop برای تعیین این پارامتر مطلوب بود. مدل SWAP دقت قابل قبولی برای تعیین عملکرد برنج داشت. در محاسبه عملکرد برنج، مدل SWAP دچار خطای کم‌برآوردی شد. کارایی این مدل برای تعیین عملکرد دانه برنج قابل قبول بود. این نتایج به مشاهدات Jonubi et al. (2018)؛ Bonefant et al. (2010)؛ Amiri (2016) و Ma et al. (2011) مطابقت داشت. نتایج به دست آمده برای تعیین کارایی مصرف آب نشان داد که این مدل دچار خطای بیش‌برآوردی شد و برای تعیین این پارامتر دقت خوبی داشت. کارایی این مدل برای تعیین این پارامتر نسبتاً خوب بود.

مقایسه آماری مقادیر شبه‌سازی شده برای عملکرد و کارایی مصرف آب دو مدل مورد استفاده نسبت به مقادیر مشاهداتی در جدول (۵) نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده برای مدل AquaCrop، آماره‌های MBE، RMSE و NRMSE برای عملکرد دانه برنج به ترتیب برابر با ۰/۳۶ تن در هکتار، ۱/۰۷ تن در هکتار و ۰/۱۴ بود؛ بنابراین این مدل در شبه‌سازی 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 Hsiao et al. (2009)، Heng et al. (2009) و Farahani et al. (2009) مطابقت داشت. با توجه به دو آماره EF و d، کارایی مدل AquaCrop برای شبه‌سازی عملکرد دانه برنج

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های آماری برای شبه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب برنج

d	EF	MBE	RMSE	NRMSE	مدل	پارامتر
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۳۶	۱/۰۷	۰/۱۴	AquaCrop	عملکرد
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۵۴	۱/۰۹	۰/۱۵	SWAP	
۰/۹۹	۰/۳۱	-۰/۱۱	۰/۴۰	۰/۱۵	AquaCrop	کارایی مصرف آب
۰/۹۹	۰/۳۱	-۰/۱۰	۰/۴۰	۰/۱۵	SWAP	

effects of climate change and crop breeding on future land use. *Geroderma*. 250-260: 187-195.

FAO, 2017. FAOSTAT. Statistical Databases. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org>.

Farahani H. J., Izzi G., Steduto P. and Oweis T Y 2009. Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy*. 101: 469-476.

Garcia-Vila M., Fereres E., Mateos L., Orgaz F and Steduto P 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy*. 101: 477-487.

Geerts S., Raes D., Garcia M., Miranda R and Cusicanqui J A 2009. Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with FAO-AquaCrop. *Agronomy*. 101: 499-508.

Geerts, S., and Raes, D. 2009. Defecit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96: 1275-1284.

Heng, L.k., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T., and Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize, *Agronomy Journal*. 101(3):488-498.

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(3), 448-459.

IRRI 2008. Background Paper: The Rice Crisis: What Needs to Be Done? IRRI, Los Baños, Philippines, www.irri.org/12pp

Jonubi, R., Rezaverdinejad, V., Salemi, H. 2017. Enhancing field scale water productivity for several rice cultivars under limited water supply. *Paddy and Water Environment*. 16(1): 125-141.

رهیافت ترویجی

براساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین و کمترین اختلاف بین نتایج شبه‌سازی‌شده و مشاهداتی با مدل AquaCrop به ترتیب برابر با ۲/۶ و ۰/۰۷ تن بر هکتار بود. بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبه‌سازی‌شده عملکرد با استفاده از مدل SWAP به ترتیب برابر با ۲/۱ و ۰/۱۶ تن در هکتار بود. متوسط اختلاف عملکرد برای مدل‌های AquaCrop و SWAP به ترتیب برابر با ۰/۶۴ و ۰/۶۷ تن بر هکتار بود. بیشترین و کمترین اختلاف کارایی مصرف آب برای مدل AquaCrop به ترتیب برابر با ۰/۱۲ و ۰/۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب و برای مدل SWAP به ترتیب برابر با ۰/۰۹ و ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب بود. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبه‌سازی‌شده کارایی مصرف آب توسط مدل‌های AquaCrop و SWAP نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۲ و ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شد. مجموع نتایج نشان داد که هر دو مدل AquaCrop و SWAP دقت مناسبی برای شبه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب برنج تحت شرایط مختلف کاشت برای ارقام گوناگون داشتند؛ لیکن دقت مدل AquaCrop اندکی بهتر بود.

منابع

- Amiri, E. 2017. Evaluation of water schemes for maize under arid are in Iran using the SWAP model. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 48(16): 1963-1976.
- Bonefante, A., Basile, A., Acutis, M., Mascellis, R. De., Manna, P., Perego, A., Terribile, F. 2010. SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in northern Italy. *Agricultural Water Management*. 97(7): 1051-1062.
- Bonefante, A., Bouma, J. 2015. The role of soil series in quantitative land evaluation when expressing

- Stricevic R., Cosic M., Djurovic N., Pejic B and Maksimovic L 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 98: 1615-1621.
- Todorovic M., Albrizio R., Zivotic L., Abisaab M and Stwckle C 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy*. 101: 509-521.
- Van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P. van Diepen, C. A. 1997. Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department of Water Resources, Wageningen Agricultural University, 167 pp.
- Yung, K., Anan, M., Hamada, K. 2016. Evaluation of drainage ability of a shallow subsurface drain in a rotational rice paddy field. CIGR-AgEng Conference, 26-29 June 2016, Aarhus, Denmark. Pp. 1-9.
- Ma, Y., Feng, Sh., Huo, Z., Song, X. 2011. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. *Mathematical and Computer Modeling*. 54(3-4): 1044-1052.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. 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. Pirmoradianand M. Rezaei. 2011. Calibration and evaluation of AquaCrop model in rice growth simulation under different irrigation managements. 21th International Congress on Irrigation and Drainage, October19-23,2011,Tehran,Iran,589-600.
- Sharma, P. K., Ladha, J. K. and Bhushan, L. 2003. Soil physical effects of puddling in rice-wheat cropping systems. In “Improving the Productivity and Sustainability of Rice-Wheat Systems: Issues and Impacts” (J. K. Ladha, J. E. Hill, J. M. Duxbury, R. K. Gupta, and R. J. Buresh, Eds.), pp. 97–113. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, ASA Special Publication 65.

Yield and Water Use Efficiency Simulation of Different Rice Cultivars under Various Cultivation Methods Using AquaCrop and SWAP

A. H. Mousavi^۱, A. Egdernezhad^{۲*} and A. Gilani^۳

Abstract

So as to simulate rice yield and water use efficiency using AquaCrop and SWAP models, a research study was conducted at Khuzistan Agricultural Research Station. In this study, three types of cultivation (D1: transplanting, D2: current direct seeding consorted seeding, and D3: dry bed seeding) and rice cultivars (V1: Red-Anbori, V2: Champa, V3: Danial) were considered. Results of MBE (0.36 ton.ha^{-1}), RMSE ($0.1.07 \text{ ton.ha}^{-1}$) and NRMSE (0.14 ton.ha^{-1}) showed that AquaCrop had good accuracy for simulation of rice yield. Mentioned statistical criteria for yield simulated by SWAP were 0.54 ton.ha^{-1} , 1.09 ton.ha^{-1} and 0.15, respectively, which showed a good accuracy for this model. MBE, RMSE and NRMSE values for water use efficiency calculated by AquaCrop were -0.11 kg.m^{-3} , 0.40 kg.m^{-3} and 0.15, respectively, and by SWAP were -0.10 kg.m^{-3} , 0.40 kg.m^{-3} and 0.15, respectively. Average difference between observed and simulated yield by AquaCrop and SWAP were 0.64 ton.ha^{-1} and 0.67 ton.ha^{-1} , respectively. Those values for water use efficiency were 0.02 kg.m^{-3} and 0.025 kg.m^{-3} , respectively. The results revealed that both AquaCrop and SWAP had acceptable accuracy for simulation of different rice cultivars yield and water use efficiency under various cultivation types, however, AquaCrop had a bit better accuracy.

Key words: Champa Variety, Crop Modeling, Danial Variety, Dry Bed Seeding, Red-Anbori Variety, Rice Transplanting.

^۱ M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

^۲ Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. (Corresponding author: a_eigder@gmail.com)

^۳ Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Ahvaz, Iran.

Received: 5 May 2019

Accepted: 21 Sep 2019

