

ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد سیب‌زمینی تحت تنش آبی

زهرة ایزدی^۱، علی حیدر نصرالهی^{۲*}، بیژن حقیقتی بروجنی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

۳. استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و

بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۱۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۵/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۶/۴)

چکیده

در این تحقیق مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد سیب‌زمینی تحت سطوح مختلف آبیاری ارزیابی شد. برای ارزیابی مدل از نتایج دو ساله آزمایشات مزرعه‌ای شامل سه سطح آبیاری کامل (FI)، ۸۰ درصد نیاز آبی (I₈₀) و ۶۵ درصد نیاز آبی (I₆₅) استفاده شد. در مرحله واسنجی شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال برای عملکرد و زیتوده در تیمارهای FI، I₈₀ و I₆₅ به ترتیب ۸/۵ و ۹/۵۸، ۱۸/۱۶ و ۱۴/۴۲ و ۳۰/۵۹ و ۲۵/۰۸ درصد بدست آمد. ضریب R² برای عملکرد و زیتوده در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۹ متغیر بود که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی بود. کمترین دقت شبیه‌سازی در تیمار I₆₅ رخ داد به طوری که شاخص سازگاری برای زیتوده و عملکرد به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۹۱ تعیین شد. سرانجام اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده کارایی مصرف آب برای تیمارهای FI، I₆₅ و I₈₀ به ترتیب ۹/۲، ۱۱/۸ و ۱۵/۱ درصد محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: واسنجی، صحت‌سنجی، کارایی مصرف آب، کم‌آبیاری.

مقدمه

سیب‌زمینی یکی از منابع غذایی با ارزش و مورد توجه در سراسر جهان است. سطح زیر کشت این محصول در جهان در سال ۲۰۱۲ حدود ۱۹/۲ میلیون هکتار و تولید سالانه آن نزدیک به ۳۶۵ میلیون تن بوده است (FAO, 2014). این محصول از نظر میزان تولید در دنیا پس از گندم، برنج و ذرت در مقام چهارم قرار دارد (Haghighati Borujeni, 2015). سیب‌زمینی از نظر تولید ماده خشک و قرار گرفتن در جیره غذایی دارای اهمیت زیادی است و یکی از محصولات غذایی مهمی است که در انواع مختلف خاک و شرایط آب و هوایی کشت می‌شود. ایران سومین تولیدکننده سیب‌زمینی در آسیاست که میزان تولید آن در سال ۱۳۹۰ حدود ۵/۶ میلیون تن با میانگین ۳۰ تن در هکتار بوده است (Haghighati Borujeni, 2015). سیب‌زمینی به کمبود رطوبت خاک بسیار حساس است بطوری که تنش آبی اثرات نامطلوبی بر رشد و عملکرد آن می‌گذارد. از این رو به منظور دستیابی به عملکرد بالا و با کیفیت این محصول، مدیریت آبیاری آن حائز اهمیت فراوانی است. مدل‌های شبیه‌سازی رشد

گیاه از آنجایی که توان پیش‌بینی عملکرد محصول و وضعیت رطوبتی خاک را در شرایط مختلف مدیریتی دارند سبب صرفه-جوئی در وقت و هزینه شده و ابزار مناسبی جهت مدیریت آبیاری در مزرعه می‌باشند. مدل AquaCrop یکی از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه است که از سوی سازمان خواربار جهانی ارائه شده و از آنجایی که تعداد داده‌های ورودی آن نسبت به سایر مدل‌های مشابه کمتر است لذا سهولت کاربرد آن افزایش می‌یابد (Raes et al., 2009). مزیت دیگر مدل AquaCrop نسبت به سایر مدل‌ها در این است که این مدل برای گیاهان، خاک‌ها، سیستم‌های آبیاری مختلف و راهکارهای مدیریت آبیاری قابل استفاده بوده و نیز قابلیت شبیه‌سازی اثرات تنش‌های محیطی از جمله: آبی، شوری، حاصلخیزی، گرما و ماندابی را دارد. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در دنیا و ایران به منظور ارزیابی این مدل برای محصولات مختلف انجام شده است. ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد پنبه تحت سطوح مختلف آبیاری در شمال سوریه نشان داد که مقدار خطای پیش‌بینی مدل در تنش‌های بالا بیش از ۳۲ درصد ولی در حالت آبیاری کامل و تنش ملایم حدود ۱۰ درصد گزارش شد (Farahani et al., 2009). واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop تحت شرایط آبیاری کامل و تنش آبی گندم در

مربعات خطای نرمال شده برای هر کدام از پارامترها به ترتیب ۱۴، ۲۷، ۱۱ و ۲۵ درصد محاسبه شد (Mirsafi et al., 2016). واسنجی مدل AquaCrop روی دو پارامتر متغیر درجه روز رشد تا رسیدن محصول و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای جو در منطقه پاکدشت و با سه تقویم زراعی زود هنگام، کاشت به موقع و دیر هنگام انجام شد و نتایج نشان داد که مدل با ضریب تعیین ۰/۹۹ و جذر میانگین مربعات خطای ۰/۵۹ تن در هکتار تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد (Karimi Uregani et al., 2016). بررسی نتایج تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد هر چند با افزایش سطوح تنش آبی دقت مدل کاهش می‌یابد اما مدل AquaCrop ابزاری توانمند برای شبیه‌سازی رشد گیاه و وضعیت رطوبتی خاک تحت شرایط مدیریت-های مختلف آبیاری است. علاوه بر این مدل AquaCrop تا به حال در ایران برای محصولات مختلفی از جمله؛ ذرت، گندم، سویا و جو در بسیاری از مناطق مورد ارزیابی قرار گرفته در حالی که تا به حال تحقیقی در زمینه ارزیابی این مدل برای پیش‌بینی رشد سیب‌زمینی گزارش نشده است. از آنجایی که سیب‌زمینی یکی از محصولات عمده استان چهارمحال و بختیاری است و به دلیل حساسیت این محصول نسبت به تنش آبی لذا هدف از این تحقیق واسنجی و صحت سنجی مدل AquaCrop به منظور شبیه‌سازی رشد و عملکرد سیب‌زمینی تحت سطوح مختلف آبیاری در این منطقه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

اطلاعات مزرعه‌ای

در این تحقیق برای ارزیابی مدل AquaCrop از نتایج تحقیقات صورت گرفته روی مدیریت آبیاری سیب‌زمینی (رقم بورن) در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ استفاده شد (Haghighati Borujeni, 2015). مطالعات صحرایی در ایستگاه تحقیقاتی چهارتخته شهرکرد واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری اجرا شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه مرطوب با تابستان‌های معتدل و زمستان‌های بسیار سرد است. میانگین ۳۰ ساله برخی از پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک شهرکرد در جدول (۱) آورده شده است. آزمایشات مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار آبیاری کامل (FI)، ۸۰ درصد نیاز آبی (I_{80}) و ۶۵ درصد نیاز آبی (I_{65}) در سه تکرار و برای دو سال متوالی انجام شد. ابعاد کرت-های آزمایشی ۴×۳۰ متر بود که داخل هر کرت چهار ردیف کشت با فاصله بین ردیف‌های ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بذرها ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس

ایران انجام شد (Andarzian et al., 2011). نتایج آن تحقیق نشان داد که مدل AquaCrop قادر است میزان رطوبت خاک، زیتوده و عملکرد دانه را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند بطوری که در همه موارد مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده کمتر از ۱۰ درصد بدست آمد. در تحقیقی پارامتر درجه روز رشد از کاشت بذر تا شروع به مرحله پیری گیاه که یکی از متغیرهای ورودی مدل است برای ذرت در منطقه قزوین مورد واسنجی قرار گرفت و شاخص‌های آماری ضریب تعیین، جذر میانگین مربع خطا و میانگین انحراف خطا به ترتیب برابر ۰/۹۳، ۱/۵ تن در هکتار و ۰/۵ تن در هکتار برآورد شدند (Rahimikhoob et al., 2014). مقایسه عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize در برآورد رطوبت خاک و عملکرد ذرت نشان داد که مدل AquaCrop در برآورد رطوبت خاک و عملکرد محصول از مدل CERES-Maize مناسبتر است بطوری که شاخص توافق برای هر دو مدل در برآورد رطوبت به ترتیب بین ۸۵ تا ۹۴ درصد و ۵۸ تا ۶۴ درصد متغیر است و نیز ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده جهت شبیه‌سازی عملکرد محصول برای مدل AquaCrop بین ۲۰ تا ۴۰ درصد و برای مدل CERES-Maize بین ۲۰ تا ۸۰ درصد بود (Ziaee et al., 2014). به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop برای گندم زمستانه تحت شرایط کم‌آبیاری در چین، مدل مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت و ریشه میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه و زیتوده در فرآیند اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۸۷ تن در هکتار به دست آمد و بر این اساس مدل به عنوان ابزاری معتبر جهت مدیریت آبیاری گندم در منطقه پیشنهاد شد (Iqbal et al., 2014). ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی محصول جو تحت شرایط کم‌آبیاری و کشت دیم در ایران صورت گرفت و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای شبیه‌سازی درصد پوشش سبز، رطوبت خاک و عملکرد به ترتیب ۸/۷، ۱۲/۴ و ۹/۲ درصد بدست آمد که نشان دهنده دقت بالای مدل بود (Tavakoli et al., 2015). بررسی قابلیت مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد و زیتوده ارقام مختلف گندم زمستانه تحت تنش آبی صورت گرفت و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای عملکرد دانه در مرحله واسنجی و اعتبار سنجی به ترتیب در محدوده ۰/۵ تا ۲ و ۲ تا ۹ درصد و برای زیتوده در مراحل فوق به ترتیب ۲ تا ۵ و ۳ تا ۶ درصد محاسبه گردید (Amiri et al., 2015). نتایج ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد زعفران نشان داد که مدل توانایی پیش‌بینی رطوبت خاک، تبخیر و تعرق، عملکرد و زیتوده را تحت سطوح مختلف آبیاری داراست و ریشه میانگین

شامل هدایت هیدرولیکی اشباع (Ksat)، رطوبت اشباع، رطوبت نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی در لایه‌های مختلف خاک است که در مزرعه و آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در جدول (۲) ارائه شده است. داده‌های لازم در بخش مدیریت آبیاری شامل تاریخ و عمق آبیاری برای تیمارهای مختلف از داده‌های برنامه‌ریزی آبیاری در مزرعه استخراج شد. اطلاعات فایل گیاهی مدل شامل پارامترهای ثابت و پارامترهای مدیریتی هستند که بسته به اقلیم و شرایط آزمایش متفاوت می‌باشند و در ادامه بطور کامل ارائه شده‌اند. برای محاسبه شاخص کارایی مصرف آب نیز که نسبت عملکرد غده به تبخیر و تعرق گیاه است با استفاده از رابطه بیلان آب در خاک میزان تبخیر و تعرق واقعی گیاه برای تیمارهای مختلف در طول دوره رشد محاسبه و عملکرد نهایی نیز در پایان فصل اندازه‌گیری شد.

جدول ۱. میانگین ۳۰ ساله برخی پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک شهرکرد

| پارامتر | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور | مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند |
|-----------------|---------|----------|-------|------|-------|--------|-----|------|------|------|------|-------|
| دمای متوسط (°C) | ۸/۷ | ۱۳/۳ | ۱۸/۲ | ۲۲/۶ | ۲۲/۲ | ۱۸/۹ | ۱۴ | ۸/۲ | ۲/۳ | -۱/۹ | ۰ | ۵/۱ |
| بارندگی (mm) | ۶۴/۶ | ۱۶/۷ | ۲/۲ | ۰/۹ | ۰/۱ | ۰/۹ | ۰/۶ | ۴۷/۵ | ۶۰/۷ | ۴۸/۴ | ۶۰/۵ | ۳۷/۶ |
| رطوبت نسبی (%) | ۴۸ | ۴۴ | ۳۲ | ۲۹ | ۲۷ | ۳۰ | ۳۴ | ۵۱ | ۶۲ | ۶۴ | ۶۲ | ۴۷ |

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

| عمق نمونه خاک (cm) | بافت خاک | ρ_b (gr.cm ⁻³) | F.C (% Θ_m) | P.W.P (% Θ_m) | E.C ds.m ⁻¹ | PH | O.C % |
|--------------------|-----------|---------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|------|-------|
| ۰-۳۰ | لوم | ۱/۳۶ | ۲۴/۰۱ | ۹/۳ | ۰/۶۱۵ | ۷/۹۲ | ۰/۵۲۷ |
| ۳۰-۶۰ | لوم سیلتی | ۱/۴۱ | ۲۵/۲۰ | ۸/۳ | ۰/۹۳۳ | ۷/۷۶ | ۰/۴۰۷ |

عنوان بخش مولد محسوب می‌شود، تعرق گیاه و بخش پوشش سبز محصول است (Raes et al., 2009). تفکیک تبخیر و تعرق به E و T_r از اثر مصرف غیر تولیدی آب از طریق تبخیر بویژه در شرایط عدم تکمیل پوشش گیاهی جلوگیری می‌کند. تعرق روزانه با استفاده از تبخیر و تعرق روزانه محاسبه شده و سپس عملکرد بیولوژیک روزانه (زیتوده) تابعی از آن و بهره‌وری آب است که با استفاده از نیاز تبخیری و غلظت CO_2 اتمسفری نرمال شده است.

$$T_r = (K_s \cdot K_{c_{T_r}}) ET_0 \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$B_i = WP^* \left(\frac{T_{ri}}{ET_{0i}} \right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این روابط T_{ri} و T_r تعرق و تعرق روزانه بر حسب میلی‌متر، ET_0 و ET_{0i} تبخیر و تعرق و تبخیر و تعرق روزانه بر

کمبود رطوبت خاک منطقه ریشه بود. در این تحقیق از نسخه ۵ مدل AquaCrop که در اکتبر ۲۰۱۵ به روز شده است استفاده شد. ورودی‌های مدل شامل چهار بخش داده‌های اقلیمی، اطلاعات گیاهی، اطلاعات مدیریتی و خاک است. مهمترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز مدل عبارت از بیشینه و کمینه درجه حرارت روزانه، تبخیر و تعرق مرجع و بارندگی روزانه در طول دوره رشد می‌باشند که از ایستگاه هواشناسی واقع در مرکز تحقیقات تهیه گردید. لازم به ذکر است که با استفاده از پارامترهای هواشناسی، تبخیر و تعرق مرجع به روش فائو-پنمن مانیت و با استفاده از نرم افزار ET0 Calculator محاسبه شد. مدل AquaCrop از دماهای روزانه بیشینه و کمینه برای محاسبه درجه روز رشد (GDD) به منظور تعدیل عملکرد زیتوده بر اثر خسارات ناشی از سرما و گرما استفاده می‌کند (Raes et al., 2009). اطلاعات مورد نیاز مدل در بخش خاک

تئوری مدل AquaCrop

مدل AquaCrop در تمام دوره رشد گیاه، مقدار آب ذخیره شده در ناحیه ریشه را از طریق بیلان جریان آب ورودی (آبیاری و بارندگی) و خروجی (رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق) در ناحیه ریشه شبیه‌سازی می‌کند. مدل AquaCrop برپایه رابطه بین عملکرد نسبی و تبخیر و تعرق نسبی ارائه شده است.

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

که در آن، Y_x عملکرد ماکزیمم، Y_a عملکرد واقعی، ET_x تبخیر و تعرق ماکزیمم، ET_a تبخیر و تعرق واقعی و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی تبخیر و تعرق می‌باشد. در مدل AquaCrop تبخیر و تعرق به دو جزء تبخیر از سطح خاک E و تعرق از سطح گیاه T_r تفکیک می‌شود. آنچه به

سازگاری^۵ (d) و ضریب تبیین^۶ (R^2) استفاده شد که جزئیات آنها در منابع مختلف موجود است (Babazadeh et al., 2012; Mirsafai et al., 2016). مقدار NRMSE (۱۰٪، ۱۰ تا ۲۰٪ و ۲۰ تا ۳۰٪) به ترتیب نشانگر وضعیت عالی، مناسب و متوسط مدل در شبیه‌سازی است و زمانی که مقدار این ضریب بیش از ۳۰٪ باشد نشان دهنده عدم اطمینان از مدل است. آماره CRM نیز یک شاخص بدون بعد بوده و بیانگر تمایل مدل برای بیش برآورد (مقادیر منفی) و یا کم‌برآورد (مقادیر مثبت) در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. شاخص سازگاری (d) یک شاخص بدون بعد است که دامنه تغییرات آن بین صفر و یک بوده و مقدار یک آن بیانگر بهترین برازش می‌باشد.

نتایج و بحث

واسنجی مدل AquaCrop

واسنجی مدل به منظور تعدیل پارامترهای مدل جهت تطابق بین عملکرد زیتوده و عملکرد غده اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل صورت گرفت. پارامترهای مختلف مدل AquaCrop که در مرحله واسنجی نهایی شد در جدول (۳) آمده است. در این مرحله همچنان که ملاحظه می‌شود برخی پارامترهای مدل اندازه‌گیری شده و سایر پارامترها یا برابر مقادیر پیش‌فرض در نظر گرفته شد و یا با تغییر آنها واسنجی شد.

نتایج واسنجی مدل برای شبیه‌سازی زیتوده و عملکرد غده سیب‌زمینی در شکل‌های (۱) تا (۶) نشان داده شده است. شاخص‌های آماری جهت ارزیابی نتایج مدل در این مرحله محاسبه شد (جدول ۴). بررسی مقادیر جدول نشان می‌دهد که برای زیتوده و عملکرد بهترین نتایج مربوط به تیمار آبیاری کامل (FI) است بطوری که در این تیمار شاخص NRMSE برای زیتوده و عملکرد کمترین مقدار و به ترتیب ۹/۵۸ و ۸/۵ درصد به دست آمد. همچنین شاخص سازگاری مدل برای این تیمار مقادیر ۰/۹۴ و ۰/۹۹ محاسبه شد که نسبت به تیمارهای دیگر بیشتر است. بررسی نتایج این بخش نشان می‌دهد که با افزایش تنش آبی اختلاف بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده زیادت‌ر شده بطوری که در تیمار تنش آبی I_{65} مقادیر NRMSE و d برای شبیه‌سازی زیتوده ۲۵/۰۸ درصد و ۰/۸۲ و برای عملکرد غده ۳۰/۵۹ درصد و ۰/۹۲ حاصل شد. این نتایج با نتایج Farahani et al. (2009) و Iqbal et al. (2014) نیز مطابقت دارد. مقایسه مقادیر ضریب CRM نیز نشان می‌دهد که مدل در تیمارهای FI و I_{80} کم برآورد داشته زیرا مقدار آن مثبت است

حسب میلی‌متر، K_s و K_{cTr} به ترتیب ضریب تنش آبی و ضریب تعرق گیاهی، B_1 عملکرد زیتوده بر حسب کیلوگرم بر متر مربع و WP^* بهره‌وری آب نرمال شده بر حسب کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد که مقدار آن برای شرایط اقلیمی متفاوت نرمال شده و به پارامتری ثابت تبدیل شده است (Steduto et al., 2009). برتری رابطه استفاده شده در مدل AquaCrop یا رابطه (۳) نسبت به رابطه (۱) در این است که شبیه‌سازی فرآیندهای رشد گیاه در آن با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد در حالی که در رابطه (۱) شبیه‌سازی به صورت ماهانه یا فصلی انجام می‌شود. مقدار ضرایب تنش آبی K_s مؤثر بر توسعه پوشش تاج CC، هدایت روزنه‌ای تعرق (شدت تعرق در واحد پوشش تاج)، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در پایان مدل عملکرد نهایی Y را به عنوان تابعی از زیتوده نهایی B و شاخص برداشت HI برآورد می‌نماید.

$$Y = B \times HI \quad (\text{رابطه ۴})$$

واسنجی و صحت سنجی مدل

واسنجی عبارت است از تخمین پارامترهای مدل به نحوی که اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده یک یا چند متغیر و مقادیر شبیه‌سازی شده آنها توسط مدل به حداقل برسد. پس از واسنجی مدل با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۲، صحت سنجی مدل به منظور اثبات کارایی آن در شبیه‌سازی توسط داده‌های سال ۱۳۹۳ انجام شد. در این تحقیق واسنجی به منظور مقایسه مقادیر عملکرد بیولوژیک (جرم کل ماده خشک تولیدی) و عملکرد غده سیب‌زمینی (جرم خشک غده) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در پنج مرحله مختلف از رشد صورت گرفت. در این مرحله ابتدا با استفاده از تیمار آبیاری کامل یعنی تیمار بدون تنش (FI) پارامترهای مختلف مدل واسنجی شده و در ادامه پارامترهای مربوط به تنش آب از جمله ضرایب تنش مربوط به گسترش کانوپی، بسته شدن روزنه‌ها و پیری کانوپی با استفاده از تیمارهای تنش I_{80} و I_{65} واسنجی شد. لازم به ذکر است که پارامترهای گیاهی مدل شامل دو دسته پارامترهای ثابت و پارامترهای مدیریتی است که واسنجی روی پارامترهای ثابت انجام شد. در این پژوهش برای ارزیابی مدل، از ریشه میانگین مربعات خطای نرمال^۲ (NRMSE)، ضریب باقیمانده^۳ (CRM)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا^۴ (RMSE)، شاخص

4. Index of agreement
5. Coefficient of determination

1. Normalize root mean square error
3. Coefficient of residual mass
3. Root mean square error

خطای ۰/۹ و ۰/۶۷ تن در هکتار برای شبیه سازی زیتوده و عملکرد تطابق خوبی با داده های اندازه گیری شده دارد.

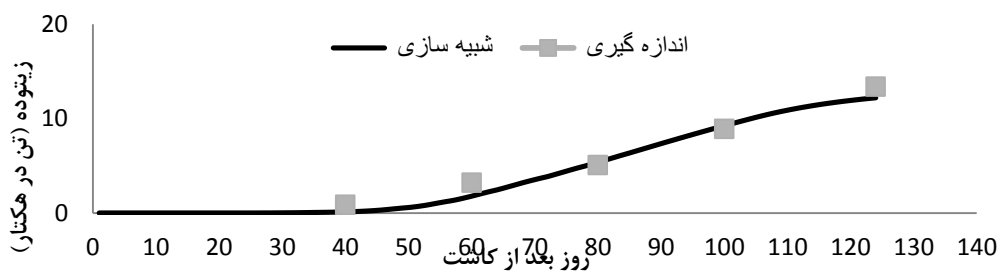
اما برای تیمار I₆₅ مقدار این ضریب برای زیتوده و عملکرد غده به ترتیب ۰/۰۵- و ۰/۱۷- است که نشان دهنده بیش برآورد مدل است. برای تیمار I₈₀ نیز مدل با جذر میانگین مربعات

جدول ۳- پارامترهای ورودی مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

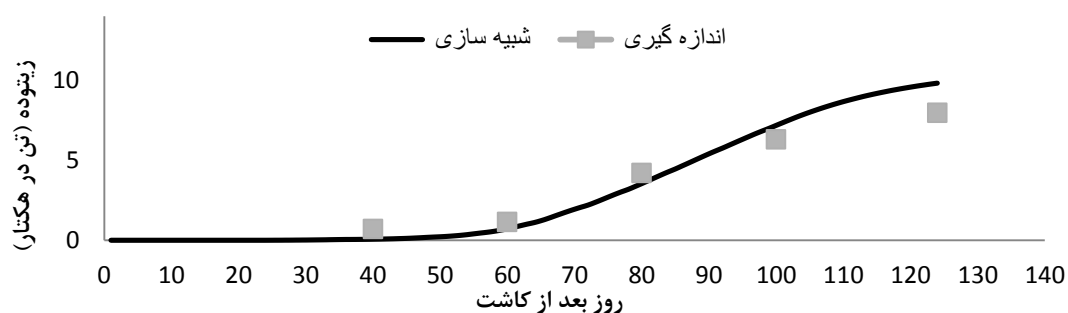
| پارامتر | مقدار | روش تهیه |
|--|-------|-------------|
| دمای پایه رشد (درجه سانتی گراد) | ۲ | پیش فرض |
| دمای بالا (درجه سانتی گراد) | ۲۶ | پیش فرض |
| پوشش کانوپی اولیه (درصد) | ۰/۳۳ | واسنجی |
| تراکم کشت (بوته در هکتار) | ۶۶۶۶۷ | اندازه گیری |
| ضریب رشد کانوپی (درصد بر روز) | ۲۰/۴ | واسنجی |
| ضریب کاهش کانوپی (درصد بر روز) | ۵/۲ | واسنجی |
| حداکثر پوشش گیاهی (درصد) | ۹۴ | اندازه گیری |
| زمان شروع جوانه زنی (روز بعد از کاشت) | ۲۴ | اندازه گیری |
| زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی (روز بعد از کاشت) | ۶۴ | اندازه گیری |
| زمان شروع دوره کاهش (روز بعد از کاشت) | ۹۰ | اندازه گیری |
| زمان برداشت و رسیدگی فیزیولوژیکی (روز بعد از کاشت) | ۱۲۴ | اندازه گیری |
| زمان تشکیل غده (روز بعد از کاشت) | ۵۵ | اندازه گیری |
| ماکزیمم عمق مؤثر ریشه (متر) | ۰/۸ | اندازه گیری |
| ضریب تعرق گیاهی (Kc tr) | ۱/۰۵ | واسنجی |
| بهره وری آب نرمال شده (گرم بر مترمربع) | ۱۹/۵ | واسنجی |
| شاخص برداشت مرجع (درصد) | ۸۰ | واسنجی |
| آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی | ۰/۲۵ | واسنجی |
| آستانه پایین ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی | ۰/۷ | واسنجی |
| ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی | ۳ | پیش فرض |
| آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه ها | ۰/۶ | واسنجی |
| ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه ها | ۳ | پیش فرض |
| آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری کانوپی | ۰/۸ | واسنجی |
| ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری کانوپی | ۳ | پیش فرض |



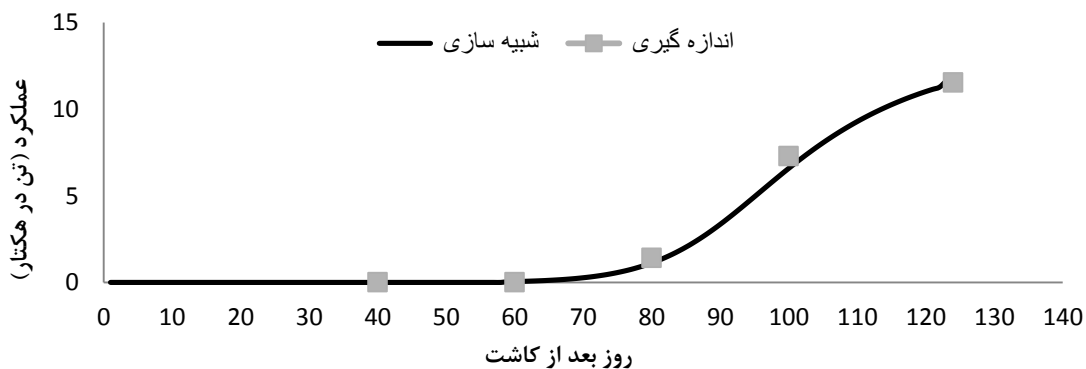
شکل ۱- روند تغییرات زیتوده شبیه سازی و اندازه گیری شده تیمار FI در طول دوره رشد طی فرآیند واسنجی مدل



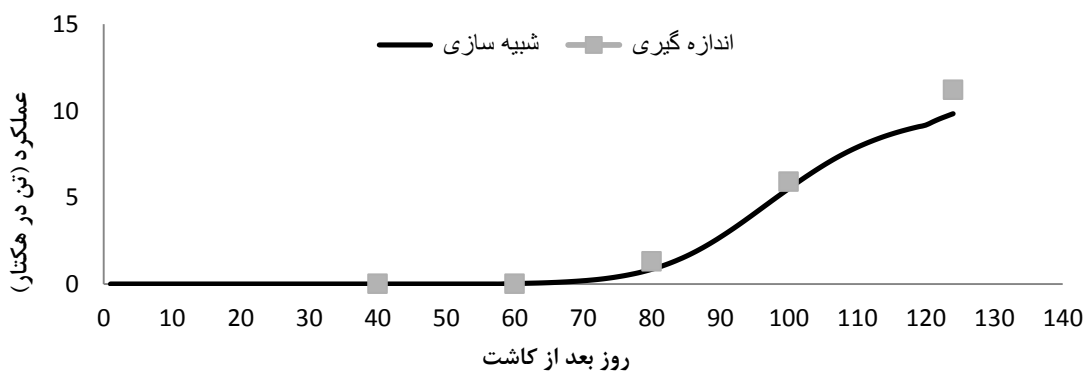
شکل ۲- روند تغییرات زیتوده شبیه سازی و اندازه گیری شده تیمار I₈₀ در طول دوره رشد طی فرآیند واسنجی مدل



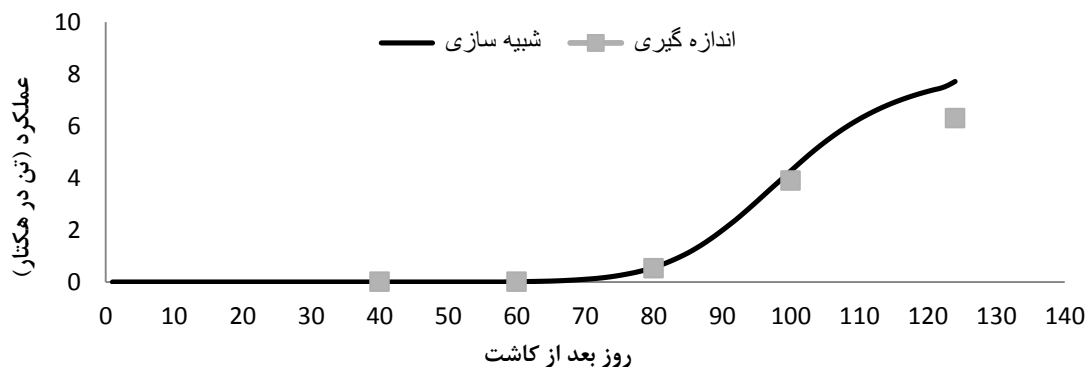
شکل ۳- روند تغییرات زیتوده شبیه سازی و اندازه گیری شده تیمار I₆₅ در طول دوره رشد طی فرآیند واسنجی مدل



شکل ۴- روند تغییرات عملکرد شبیه سازی و اندازه گیری شده تیمار FI در طول دوره رشد طی فرآیند واسنجی مدل



شکل ۵- روند تغییرات عملکرد شبیه سازی و اندازه گیری شده تیمار I₈₀ در طول دوره رشد طی فرآیند واسنجی مدل



شکل ۶- روند تغییرات عملکرد شبیه سازی و اندازه گیری شده تیمار I₆₅ در طول دوره رشد طی فرآیند واسنجی مدل جدول ۴- مقادیر شاخص های مختلف آماری در مرحله واسنجی مدل

| تیمار | زیتوده | | | | عملکرد | | | |
|-----------------|--------------|----------|--------|------|--------------|----------|--------|------|
| | RMSE(ton/ha) | NRMSE(%) | CRM(-) | d(-) | RMSE(ton/ha) | NRMSE(%) | CRM(-) | d(-) |
| FI | ۰/۷۳ | ۹/۵۸ | ۰/۰۶ | ۰/۹۴ | ۰/۳۴ | ۸/۵ | ۰/۰۴ | ۰/۹۹ |
| I ₈₀ | ۰/۹ | ۱۴/۴۲ | ۰/۰۸ | ۰/۹ | ۰/۶۷ | ۱۸/۱۶ | ۰/۱۲ | ۰/۹۴ |
| I ₆₅ | ۱/۰۲ | ۲۵/۰۸ | -۰/۰۵ | ۰/۸۲ | ۰/۶۶ | ۳۰/۵۹ | -۰/۱۷ | ۰/۹۲ |

عملکرد و زیتوده به ترتیب ۲۸ و ۲۷ درصد تعیین شد که دقت متوسط مدل را در این حالت نشان می دهد. Mirsafii et al. (2016) نیز مقدار این شاخص را برای عملکرد و زیتوده زعفران Ziaee et al. (2014) این ضریب بین ۲۰ تا ۴۰ درصد گزارش شده است که این تفاوت ها می تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله دقت اندازه گیری یا شرایط اقلیمی متفاوت باشد. جذر میانگین مربعات خطا نیز برای زیتوده در تیمارهای FI، I₈₀ و I₆₅ به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۷۷ و ۱/۰۵ تن در هکتار و برای عملکرد ۰/۶۹، ۰/۷۱ و ۰/۶۶ تن در هکتار بدست آمد که با نتایج سایر محققان نیز مطابقت دارد (Rahimikhoob et al, 2014; Iqbal et al, 2016; Karimi Uregani et al., 2014). با توجه به جدول (۵) مقدار شاخص CRM در همه موارد مثبت است و این نشان می دهد که مدل مقادیر شبیه سازی شده را کمتر از مقادیر واقعی برآورد کرده است. شاخص سازگاری (d) از مقدار ۰/۷۹ برای شبیه سازی زیتوده در تیمار I₆₅ تا ۰/۹۴ برای شبیه سازی عملکرد در تیمار FI متغیر است و همان طور که پیش از این نیز گفته شده هر چه این ضریب به یک نزدیکتر باشد بیانگر دقت بیشتر شبیه سازی است. بر این اساس شاخص سازگاری در تیمارهای آبیاری کامل و تنش ملایم به یک نزدیکتر بوده و در تیمار I₆₅ بخصوص برای شبیه سازی زیتوده کمترین مقدار را دارد.

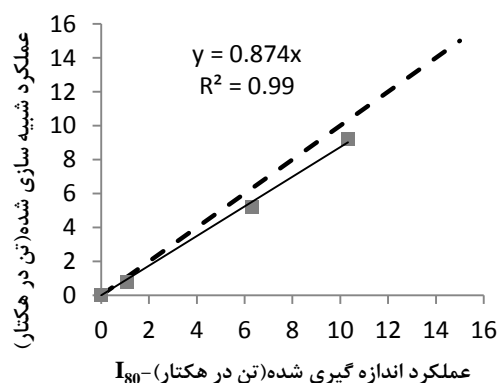
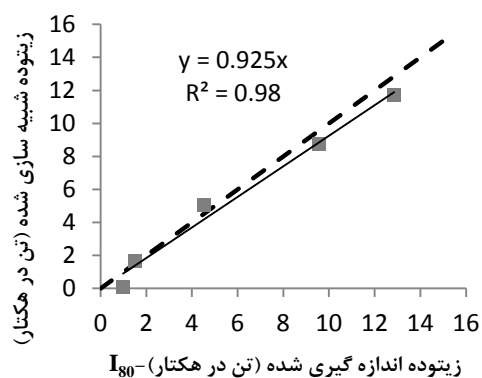
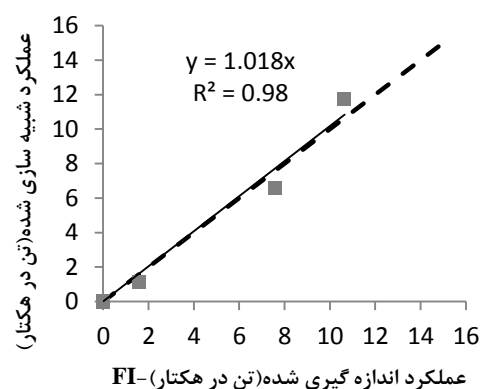
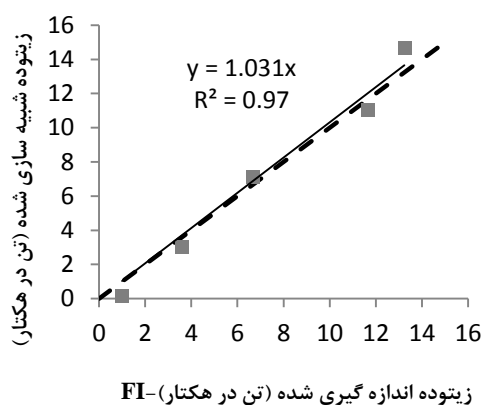
صحت سنجی مدل AquaCrop

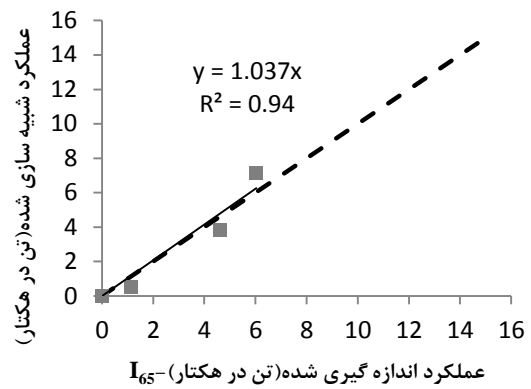
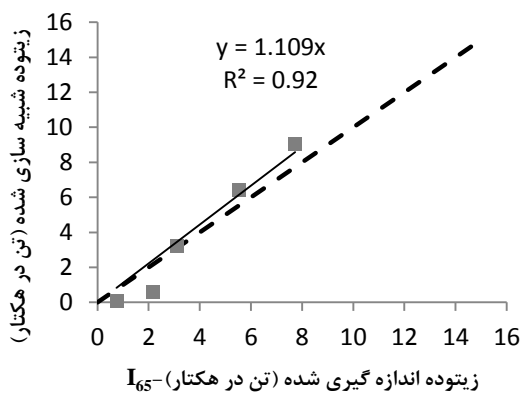
شبیه سازی عملکرد و زیتوده

برای بررسی توانایی مدل در شبیه سازی عملکرد و زیتوده پس از واسنجی مدل، از اطلاعات سال ۱۳۹۳ برای صحت سنجی مدل استفاده شد. مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده عملکرد و زیتوده با استفاده از نمودار یک به یک در شکل (۷) نشان داده شده است. مقایسه ضریب R² در تیمارهای مختلف نشان می دهد که مقدار این ضریب برای تیمارهای آبیاری کامل (FI) و تنش ملایم (I₈₀) از ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ نوسان دارد و از آنجا که هر چه مقدار این ضریب به یک نزدیکتر و نیز خط برازش داده شده به نیمساز نزدیکتر باشد دقت شبیه سازی بیشتر است لذا می توان نتیجه گرفت که مدل قادر است با دقت بالایی عملکرد غده و زیتوده سیب زمینی را تحت شرایط آبیاری کامل و تنش ملایم شبیه سازی نماید. از طرفی ضریب R² در تیمار تنش آبی شدید (I₆₅) برای زیتوده و عملکرد به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۴ بدست آمد که در مقایسه با دو تیمار دیگر کاهش داشته و نشان دهنده دقت پایین تر شبیه سازی مدل در این حالت است. برای ارزیابی بهتر مدل شاخص های آماری دیگر نیز محاسبه شد (جدول ۵). بر این اساس مقدار شاخص NRMSE برای زیتوده و عملکرد در تیمارهای FI و I₈₀ کمتر از ۲۰ درصد است که نشان دهنده دقت مناسب مدل در شبیه سازی است و این در حالی است که مقدار این شاخص در تیمار I₆₅ برای

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های مختلف آماری در مرحله صحت‌سنجی مدل

| تیمار | زیتوده | | | | عملکرد | | | |
|-----------------|--------------|----------|--------|------|--------------|----------|--------|------|
| | RMSE(ton/ha) | NRMSE(%) | CRM(-) | d(-) | RMSE(ton/ha) | NRMSE(%) | CRM(-) | d(-) |
| FI | ۰/۸۵ | ۱۱/۷۷ | ۰/۰۱ | ۰/۹۲ | ۰/۶۹ | ۱۷/۳۶ | ۰/۰۲ | ۰/۹۴ |
| I ₈₀ | ۰/۷۷ | ۱۳/۱۴ | ۰/۰۷ | ۰/۹۳ | ۰/۷۱ | ۱۹/۹۲ | ۰/۱۴ | ۰/۹۳ |
| I ₆₅ | ۱/۰۵ | ۲۷/۱۳ | ۰/۰۱ | ۰/۷۹ | ۰/۶۶ | ۲۷/۹۹ | ۰/۰۳ | ۰/۹۱ |



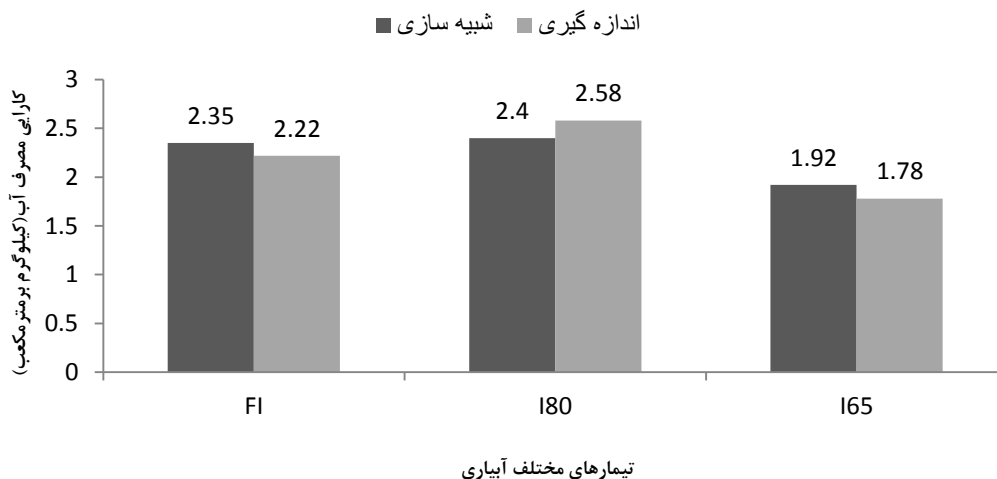


شکل ۷- مقایسه عملکرد و زیتوده شبیه سازی و اندازه گیری شده در طول دوره رشد طی فرآیند صحت سنجی مدل

دقت کمتری برخوردار بود. علاوه بر این بررسی مقادیر اندازه-گیری شده و شبیه سازی شده کارایی مصرف آب نشان می دهد که مدل برای تیمار I80 کم برآورد و برای تیمارهای FI و I65 مقداری بیش برآورد نشان می دهد. همانطور که از شکل (۷) نیز مشخص است برآورد عملکرد در انتهای فصل توسط مدل برای تیمار I80 کمتر و برای تیمارهای FI و I65 بیشتر از مقادیر واقعی است. با این حال کارایی مصرف آب تابع عملکرد و تبخیر و تعرق می باشد لذا این تفاوتها می تواند علاوه بر تفاوت در برآورد عملکرد ناشی از برآورد تبخیر و تعرق توسط مدل نیز باشد.

شبیه سازی کارایی مصرف آب (WUE)

پس از صحت سنجی مدل برای شبیه سازی عملکرد و زیتوده، مقادیر کارایی مصرف آب اندازه گیری شده در پایان فصل برای تیمارهای مختلف با مقادیر شبیه سازی شده توسط مدل مقایسه شد. شکل (۸) تفاوت کارایی مصرف آب اندازه گیری شده و شبیه سازی شده را نشان می دهد. درصد اختلاف بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده کارایی مصرف آب برای تیمارهای FI، I80 و I65 به ترتیب ۹/۲، ۱۱/۸ و ۱۵/۱ درصد محاسبه شد که کمترین تفاوت بین مقادیر در تیمار آبیاری کامل حاصل شد و با افزایش شدت تنش آبی برآورد مدل از



شکل ۸- مقایسه کارایی مصرف آب شبیه سازی و اندازه گیری شده در تیمارهای مختلف

انجام شد. نتیجه فرآیند واسنجی برآورد پارامترهای مختلف مدل AquaCrop تحت شرایط اقلیمی و مدیریتی تحقیق حاضر بود. در این مرحله شاخص سازگاری بین ۰/۸۲ تا ۰/۹۹ محاسبه شد که بیانگر دقت بالای واسنجی مدل بود هر چند در تیمار

نتیجه گیری

در این پژوهش مدل AquaCrop تحت سطوح مختلف آبیاری سیب زمینی در اقلیم شهرکرد مورد ارزیابی قرار گرفت. واسنجی مدل به منظور شبیه سازی عملکرد غده سیب زمینی و زیتوده

شد و بیشترین درصد اختلاف بین مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده ۱۵/۱ درصد و در تیمار I₆₅ حاصل شد. از این رو با توجه به نتایج بدست آمده به منظور دستیابی به عملکرد بهینه سبب زمینی در منطقه مورد نظر بخصوص در شرایط کمبود آب و مدیریت بهتر مصرف آب این محصول استفاده از مدل AquaCrop پیشنهاد می‌گردد.

تنش آبی ۶۵ درصد (I₆₅) کمترین دقت را داشت. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد و زیتوده در مرحله صحت سنجی مدل نیز نشان داد که مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی بخصوص در تیمارهای آبیاری کامل (FI) و تنش ملایم (I₈₀) دارد بطوری که جذر میانگین مربعات خطا در این حالات بین ۰/۷ تا ۰/۸۵ تن در هکتار متغیر است. علاوه بر این میزان کارایی مصرف آب نیز در تیمارهای مختلف شبیه‌سازی

REFERENCES

- Amiri, A., Bohrani, A., Khorsand, A. and Haghjoo, M. (2015). Evaluating AquaCrop model performance to predict grain yield and wheat biomass, under water stress. *Soil and Water Science*, 25(2), 217-229. (In Farsi)
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A. and Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1-8.
- Babazadeh, H. and Sarai Tabrizi, A. (2012). Assessment of AquaCrop model under Soybean deficit irrigation management conditions. *Journal of Soil and Water*, 26(2), 329-339. (In Farsi)
- Farahani, H. J., Izzi, G., and Oweis, T.Y. (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy journal*, 101(3), 469-476
- Food and Agricultural Organization. (2014). FAOSTAT database for agriculture. from <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC>.
- Haghighati Boroujeni, B. (2015). *Effect of different deficit irrigation managements on water use efficiency of potato in furrow and tape drip methods*. Ph.D. Dissertation, Shahid Chamran University of Ahwaz, Faculty of Water Science Engineering. (In Farsi)
- Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A. and Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*. 135, 61-72.
- Karimi Uregani, H., Rahimikhoob, A. and Nazarifard, M.H. (2016). Validation and testing of the AquaCrop model for barley in Pakdasht area. *Journal of Soil and Water Research*, 47(3), 539-549. (In Farsi)
- Mirsafi, Z.S., Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H. and Kamgar-Haghighi, A.A. (2016). Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of Saffron (*Crocus sativus* L.). *Agricultural Water Management*. 211, 343-351.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., and Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: Reference Manual Annexes.
- Rahimikhoob, H., Sotoodehnia, A., and Massahbavani, A. R. (2014). Calibration and evaluation of AquaCrop for Maize in Qazvin region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8(1), 108-115.
- 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. *Agronomy Journal*, 101, 426-437.
- Tavakoli, A.R., Mahdavi Moghadam, M. and Sepaskhah, A.R. (2015). Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. *Agricultural Water Management*. 161, 136-146.
- Ziaee, G., Babazadeh, H., Abbasi, F., and Kaveh, F. (2014). Evaluation of the AquaCrop and CERES-Maize Models in assessment of soil water balance and Maize yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(4), 369-518. (In Farsi)