نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۱، بهار و تابستان۱۴۰۲، ص. ۳۲-۱۵

Water Management in Agriculture
Vol. 10, No. 1 Spring and Summer 2023, 15-32

مقاله علمی- پژوهشی

تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاهی برای ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه سیب‌زمینی در مدیریت‌های مختلف آب آبیاری در کرمانشاه

حمید نیسی[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲]* و سالومه سپهری صادقیان[۳]

چکیده

سیب‌زمینی یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی است که نسبت به مقدار آب آبیاری بسیار حساس است. این موضوع سبب می‌شود تا تحقیقات بسیاری برای تعیین عملکرد و بهره‌وری آب آن، در شرایط مختلف آبیاری انجام شود. انجام این تحقیقات مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار است. به همین دلیل محققان پیشنهاد نموده‌اند مدل‌های گیاهی نظیر AquaCrop برای شبیه‌سازی این گیاه در شرایط مختلف مورد تحلیل حساسیت و ارزیابی واقع شوند. با توجه به این موضوع، تحقیق حاضر در یک مزرعه تحقیقاتی در شهرستان کرمانشاه در دو سال زراعی با استفاده از سه تیمار آبیاری قطره‌ای تیپ شامل T1، تأمین ۱۰۰ درصد؛ T2، تأمین ۷۵ درصد و T3، تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی سیب‌زمینی انجام شد. برای تحلیل حساسیت این مدل گیاهی از روش Beven و برای ارزیابی آن از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF) و شاخص توافق (d) استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop به تغییرات پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده بسیار حساس بود. حساسیت این مدل گیاهی به تغییرات حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق و ضریب رشد پوشش متوسط و نسبت به تغییرات پوشش گیاهی اولیه و ضریب زوال پوشش کم بود. بر اساس آماره MBE، مدل AquaCrop دچار خطای کم‌برآوردی در تعیین عملکرد و بهره‌وری شد. خطای این مدل گیاهی برای تعیین عملکرد (RMSE=1.5) و بهره‌وری آب (RMSE=0.23) قابل‌قبول بود. دقت آن نیز برای شبیه‌سازی عملکرد (NRMSE=0.06) و بهره‌وری آب (NRMSE=0.06) در دسته عالی قرار داشت. بر اساس مقادیر دو آماره EF و d، کارایی AquaCrop برای تعیین عملکرد (EF=0.92, d=0.99) بهتر از بهره‌وری آب (EF=0.75, d=0.99) بود؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که از این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی سیب‌زمینی در شرایط مشابه استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای رشد گیاه، تنش آبی، مدل AquaCrop، نیاز آبی گیاه

مقدمه

سیب‌زمینی با نام علمی *Solanum tuberosom* گیاهی یک‌ساله است و اهمیت زیادی در تأمین انرژی ازنظر غذایی و صنعتی دارد (پژوهنده و همکاران، ۱۳۹۶). سیب‌زمینی بعد از ذرت، برنج و گندم مهم‌ترین محصول زراعی در جهان است (FAO, 2018). بر اساس آمار منتشرشده، ایران سیزدهمین تولیدکننده سیب‌زمینی در جهان است و از حدود ۱۵۹ هزار زمین تحت کشت این گیاه زراعی، حدود پنج میلیون تن محصول برداشت می‌شود (پژوهنده و همکاران، ۱۳۹۶؛ FAO, 2018). این گیاه زراعی در مناطق معتدل رشد خوبی دارد و شرایط محیطی و خاک اثر قابل‌توجهی بر عملکرد آن دارد (حسین پناهی و همکاران، ۱۳۸۸). سیب‌زمینی دارای سیستم ریشه‌ای کم‌عمق است و به تنش‌های غیر زیستی مانند خشکی نیز

[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 پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹
DOR: 20.1001.1.24764531.1402.10.1.2.0

حساس است (حاجی‌برات و همکاران، ۱۳۹۹). به همین دلیل شرایط نامناسب و کم‌آبیاری سبب کاهش غده و عملکرد آن می‌گردد (Tourneux et al., 2003). از طرف دیگر، شرایط اقلیمی ایران و کمبود منابع آب در بخش کشاورزی سبب شده است تا کم‌آبیاری به‌عنوان یکی از راهکارهای اساسی در تولید محصولات کشاورزی به شمار آید؛ بنابراین لازم است حجم بهینه و مناسب از آب مورد نیاز سیب‌زمینی تأمین شود. انجام آزمایش‌های متعدد برای دستیابی به این هدف مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار است. برای رفع این مشکل، مدل‌های گیاهی مختلفی توسط دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی در سراسر جهان بسط داده‌شده است (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛ ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸؛ امداد و همکاران، ۱۳۹۷).

مدل AquaCrop یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد است که در سال ۲۰۰۹ توسط سازمان خواروبار کشاورزی ملل متحد (فائو) ارائه شد (Raes et al., 2012). این مدل گیاهی به دلیل دسترسی آسان، رایگان بودن، داده‌های در دسترس و سهولت به‌کارگیری در بین محققان جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. به‌دلیل اهمیت و قابلیت‌های مدل AquaCrop، توجه محققان بسیاری به آن معطوف بوده است. محققانی نظیر سرکهکی و همکاران (۱۴۰۰)، کریمی و همکاران (۱۴۰۰)، هنگ و همکاران، ماسانگانیس و همکاران، هسیائو و همکاران و کاترجی و همکاران از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت شرایط مختلف آبیاری از مدل گیاهی AquaCrop استفاده و دقت و کارایی آن را قابل‌قبول گزارش کرده‌اند (Heng et al., 2009, Hsiao et al., 2009, Masanganise et al., 2013, Katerji et al., 2013). با توجه به خصوصیات این مدل گیاهی، برای گیاهان خاص مانند زعفران نیز توسط این مدل شبیه‌سازی‌شده‌اند. در تحقیقی که توسط ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۷) انجام شد، عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف آبیاری با استفاده از مدل AquaCrop شبیه‌سازی و دقت آن مطلوب گزارش شد. از این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی سایر گیاهان زراعی ازجمله جو (Araya et al., 2010) و پنبه (Masasi et l., 2020) نیز استفاده‌شده است. همچنین از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم تحت سناریوهای مختلف آبیاری در منطقه اهواز استفاده شد و خطای این مدل برای شبیه‌سازی کمتر از ده درصد گزارش‌شده است (Andarzian et al., 2011). در پژوهشی دیگر مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پنبه ارزیابی شد. بر اساس این پژوهش دقت این مدل برای شبیه‌سازی پنبه مطلوب بود (Masasi et al., 2020). بهمنش و همکاران (۱۴۰۰) از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گلرنگ تحت سناریوهای مختلف آبیاری استفاده نمودند. این محققان گزارش کردند که مدل AquaCrop دقت و کارایی خوبی برای شبیه‌سازی عملکرد گلرنگ دارد.

با توجه به اهمیت گیاه سیب‌زمینی، مطالعات مختلفی برای شبیه‌سازی عملکرد آن توسط مدل AquaCrop انجام‌شده است. ایزدی و همکاران (۱۳۹۷) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی تحت سناریوهای مختلف آبیاری در کرت‌هایی با مساحت ۱۲ مترمربع استفاده کردند. این محققان نشان دادند که ضریب R^2 برای عملکرد و زیست‌توده به ترتیب برابر با ۰/۹۲ و ۰/۹۹ بود. همچنین میانگین مربعات خطا در آبیاری کامل برای عملکرد و زیست‌توده به ترتیب برابر با ۹/۵ و ۵/۳ درصد بود. این محققان در ادامه این تحقیق با استفاده از مدل AquaCrop به شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد سیب‌زمینی پرداختند (ایزدی و همکاران، ۱۳۹۸). رزاقی و همکاران در تحقیقی به شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی در شرایط معتدل پرداختند. این محققان از سه سناریوی آبیاری کامل، کم‌آبیاری و بدون آبیاری برای ارزیابی مدل AquaCrop استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop در دو سناریوی آبیاری کامل و کم‌آبیاری دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی داشت، اما در شرایط بدون آبیاری، دقت این مدل گیاهی مطلوب نبود (Razzaghi et al., 2017).

داده‌های موردنیاز برای استفاده از مدل AquaCrop شامل دو دسته ثابت و غیرثابت هستند. داده‌های ثابت در این مدل توسط بسط دهندگان آن تعیین و پیشنهادشده که برای شبیه‌سازی تغییر نکنند. داده‌های غیرثابت در هر شبیه‌سازی باید

به‌وسیله کاربران واسنجی و برآورد شوند (Raes et al., 2012). بااین‌وجود تحقیقات اخیر نشان داده است که کلیه داده‌ها در این مدل برای شرایط محیطی مختلف ثابت نیستند (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹). بدین ترتیب قبل از استفاده از این مدل گیاهی می‌بایست اثر تغییرات پارامترهای ورودی بر مقدار خروجی مورد تحلیل حساسیت قرار گیرد. در اکثر تحقیقات انجام‌شده، محققان تنها به تحلیل حساسیت داده‌های غیرثابت پرداخته‌اند. از طرف دیگر، با توجه به گسترش استفاده از روش آبیاری تیپ برای زراعت سیب‌زمینی، ارزیابی مدل AquaCrop تحت این نوع سیستم آبیاری اهمیت خاصی دارد. با توجه به این موضوع، تحقیق حاضر با دو هدف تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاه سیب‌زمینی با استفاده از روشی متفاوت و بررسی دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی در کرمانشاه انجام شد.

مواد و روش‌ها

عملیات مزرعه‌ای

به‌منظور بررسی اثر کم‌آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه سیب‌زمینی تحقیقی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در ۳ تکرار طی دو سال زراعی، در یک مزرعه تحقیقاتی در شهرستان کرمانشاه انجام گرفت. تیمارهای موردمطالعه شامل T1، تأمین ۱۰۰ درصد؛ T2، تأمین ۷۵ درصد و T3، تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی سیب‌زمینی تحت آبیاری قطره‌ای تیپ بود. در این طرح، زمین مورد آزمایش در پاییز شخم زده شد و عملیات تهیه زمین و کاشت آن نیز در نیمه اردیبهشت‌ماه انجام گردید. بذرهای سیب‌زمینی، رقم آگریا به مقدار ۴ تن در هکتار، در ردیف‌هایی بافاصله ۷۵ و فاصله بین دو غده بذری ۳۰ سانتی‌متر به‌صورت دستی کاشته شدند. کلیه آبیاری‌ها بعد از کاشت تا مرحله ۴ تا ۵ برگی شدن گیاه در همه تیمارها یکسان و پس‌ازآن آبیاری مطابق تیمارهای ذکرشده با استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای تیپ اعمال گردید. میزان آب‌داده شده به هر یک از تیمارها از طریق کنتورهای حجمی کنترل شد. در این طرح در طول دوره کشت سه بار عملیات کود دهی انجام گرفت. ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اسید بوریک قبل از کاشت و ۴۰۰ کیلوگرم اوره طی سه مرحله (که یک‌سوم آن قبل از کاشت) به زمین داده شد (با توجه به توصیه کودی آزمایشگاه خاک‌شناسی). مراحل دوم و سوم از کود اوره استفاده شد که یک‌بار در هنگام گلدهی سیب‌زمینی و بار دیگر برای افزایش حجم غده گیاه به‌صورت محلول‌پاشی، عمل کود دهی انجام شد. پیش از کاشت با نمونه‌گیری‌های خاک منطقه موردمطالعه، خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن تعیین شد (جدول ۱). همچنین خصوصیات آب آبیاری نیز بر اساس جدول (۲) تعیین شد. در پایان فصل زراعی، برداشت محصول به‌صورت دستی انجام‌شده و به‌منظور حذف اثرات حاشیه‌ای برداشت از ۶ متر وسط دو خط کاشت میانی هر کرت انجام گرفت.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

EC	جرم مخصوص ظاهری	پژمردگی دائم	ظرفیت زراعی	کربن آلی	Sand	Silt	Clay	نوع بافت
میکروموس بر سانتی‌متر	گرم بر سانتی‌متر مکعب	درصد حجمی		درصد				
۱/۲	۱/۲۹	۲۵/۹	۴۲/۵	۱/۳۸	۳/۷	۴۲/۳	۴۵	سیلتی رسی

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب

EC	TDS	pH	کربنات	بی‌کربنات	کلر	سولفات	مجموع آنیون‌ها	مجموع کلسیم و منیزیم	سدیم	مجموع کاتیون‌ها	درصد سدیم محلول
میکرو موس بر سانتی‌متر	میلی‌گرم بر لیتر		میلی‌اکی‌والانت بر لیتر								درصد
۱۰۰۰	۶۴۰	۷/۱	۰	۶/۱۵	۱/۹	۱/۱۸	۹/۲۳	۸/۱۵	۱/۰۸	۹/۲۳	۱۱/۷

برای تعیین میزان آب آبیاری، داده‌های تشت تبخیر کلاس A واقع در ایستگاه هواشناسی کرمانشاه (واقع در فرودگاه شهید اشرفی اصفهانی) در مجاورت مزرعه تحقیقاتی اخذ گردید. آبیاری قطره‌ای تیپ در مزرعه موردمطالعه با دور آبیاری ۲ تا ۳ روز در نظر گرفته شد و از داده‌های روزانه تشتک تبخیر در کل دوره کشت استفاده گردید که بر اساس آن و با در نظر گرفتن ضریب تشت تبخیر جدول (۳) و نیز با توجه به ضریب گیاهی سیب-زمینی در طول دوره رشد، میزان نیاز آبی خالص روزانه با توجه به رابطه زیر به دست آمد.

$$ET_c = K_c \times E_{pan} \times K_p \quad (۱)$$

که در این رابطه، Kc و Kp به ترتیب ضریب گیاهی سیب-زمینی و ضریب تشت تبخیر کلاس A، ETc و Epan به ترتیب میزان تبخیر از تشت کلاس A و نیاز آبی خالص گیاه سیب-زمینی (میلی‌متر بر روز) است. سپس با احتساب مساحت تحت کشت، حجم آب موردنیاز برای تیمارهای ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ نیاز آبی برحسب میلی‌متر و راندمان آبیاری ۹۰٪ محاسبه گردید.

جدول ۳- ضریب تشتک کلاس A برای برآورد تبخیر از سطح آزاد آب

ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ضریب	۰/۶۲	۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۶۹	۰/۶۳	۰/۵۸

مدل AquaCrop

مدل AquaCrop از تبخیر-تعرق (ET) محاسبه‌شده (رابطه ۲) 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 ۳).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (۲)$$

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (۳)$$

در این روابط، Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ET_x و ET_a 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_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) که توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (۴)$$

در این رابطه، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) است.

با تعیین تعرق و تبخیر-تعرق، بیوماس خشک نیز طبق رابطه (۵) برآورد می‌گردد.

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}}\right] \quad (۵)$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_o تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد (Y) نیز با استفاده از ماده‌ی خشک تولیدشده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$Y = B \times HI \quad (۶)$$

در این رابطه، Y عملکرد، HI شاخص برداشت و B بیوماس خشک است. در این مدل، شدت تنش آبی (K_s) مؤثر بر توسعه پوشش تاج (CC)، هدایت روزنه‌ای (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به‌وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. درواقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش‌یافته و به‌تبع آن میزان تعرق گیاه کاهش می‌یابد.

تحلیل حساسیت

با توجه به روابط حاکم بر مدل AquaCrop، پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)، حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx})، پوشش گیاهی اولیه (CC_0)، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) و شاخص برداشت (HI) در شبیه‌سازی زیست‌توده از اهمیت بسیاری برخوردار هستند؛ بنابراین در پژوهش حاضر حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامترها بررسی شد. مقادیر اولیه و دامنه تغییرات این پارامترها در جدول (۴) نشان داده‌شده است. میزان نمو هر پارامتر نیز بر اساس ماهیت آن و اثرگذاری مقادیر پارامتر بر نتایج خروجی تعیین شد. به‌منظور تحلیل حساسیت از رابطه ارائه‌شده توسط Beven (۱۹۷۹) استفاده شد (رابطه ۷).

$$S_{pi} = \lim_{\Delta Pi \to 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta P_i}{P_i}} = \frac{\partial y}{\partial P_i} \times \frac{P_i}{y} \qquad (۷)$$

در این رابطه، S_{pi} ضریب حساسیت، P_i پارامتر موردبررسی و y مقدار زیست‌توده است. مقادیر S_{pi} برحسب نوع پارامتر می‌تواند مثبت یا منفی باشد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش زیست‌توده با تغییر پارامتر موردنظر است. مقادیر منفی نیز نشان‌دهنده کاهش زیست‌توده با تغییرات پارامتر موردنظر است. مقدار ضریب حساسیت با توجه به جدول (۵) در چهار گروه کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار می‌گیرند (Lenhart et al., 2002).

جدول ٤- مقادیر اولیه و دامنه تغییرات پارامترهای موردبررسی

پارامتر	علامت	واحد	مقدار اولیه	حد پایین	حد بالا	نمو تغییرات
بهره‌وری آب نرمال شده	WP^*	$g.m^{-2}$	۱۸	۱۶	۲۰	۱/۰۰
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	K_{CTrx}	-	۱	۰/۷۵	۱/۲	۰/۰۵
پوشش گیاهی اولیه	CCo	$cm^2.plant^{-1}$	۱/۵	۱	۱/۸	۰/۱۰
ضریب رشد پوشش گیاهی	CGC	$\%day^{-1}$	۸/۷	۵/۷	۱۵/۷	۱/۰۰
ضریب کاهش پوشش گیاهی	CDC	$\%day^{-1}$	۸	۳	۱۳	۱/۰۰
شاخص برداشت	HI	%	۷۵	۷۱	۷۹	۱/۰۰

جدول ۵- طبقه‌بندی ضریب حساسیت

گروه	دامنه تغییرات	درجه
۱	$0 \le \lvert Sp \rvert < 0.05$	کم
۲	$0.05 \le \lvert Sp \rvert < 0.2$	متوسط
۳	$0.2 \le \lvert Sp \rvert < 1$	زیاد
۴	$1 \le \lvert Sp \rvert$	بسیار زیاد

واسنجی و صحت‌سنجی

با استفاده از داده‌های سال اول، مدل AquaCrop واسنجی و با استفاده از داده‌های سال دوم کشت صحت‌سنجی انجام شد. به‌منظور ارزیابی دقت مدل در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌های به ترتیب در رابطه‌های (۸) تا (۱۳) نشان داده‌شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}{n}} \qquad (۸)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}{n}}}{\overline{O_i}} \qquad (۹)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i}^{n} (P_i - O_i)}{n} \quad (۱۰)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۱)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (۱۲)$$

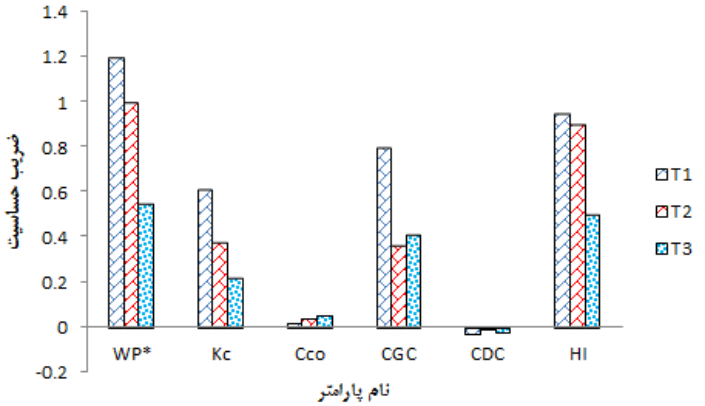
$$R^2 = \frac{\left(\sum (P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum (P_i - \overline{P})^2 \sum (O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۳)$$

در روابط فوق P_i مقدار برآورد شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر برآورد شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها هست. مقدار RMSE و NRMSE به ترتیب نشان‌دهنده این است که خطا و دقت مدل AquaCrop چقدر است. هر چه آماره RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد خطای مدل AquaCrop کمتر است. مقادیر آماره NRMSE اگر کمتر از ۰/۱ باشد نشان‌دهنده دقت عالی مدل AquaCrop است. مقادیر بین ۰/۲-۰/۱ و ۰/۳-۰/۲ به ترتیب نشان‌دهنده دقت خوب و متوسط این مدل است. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۳ نشان‌دهنده دقت کم این مدل است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل AquaCrop مقدار پارامتر موردنظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که این مدل در برآورد پارامتر موردنظر عدد کوچک‌تری به دست داده است. آماره EF، مقادیر برآورد شده را با میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند و مقدار آن از ۱ تا مقادیر منفی متغیر است. مقدار این آماره اگر بیشتر از صفر باشد نشان‌دهنده کارایی مطلوب مدل AquaCrop است. آماره d نیز کارایی مدل AquaCrop را نشان می‌دهد و مقدار آن از صفر تا ۱ متغیر است. مقدار این آماره هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد کارایی مدل AquaCrop بهتر است. مقدار R^2 از صفر تا یک متغیر بوده و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها در مدل AquaCrop است.

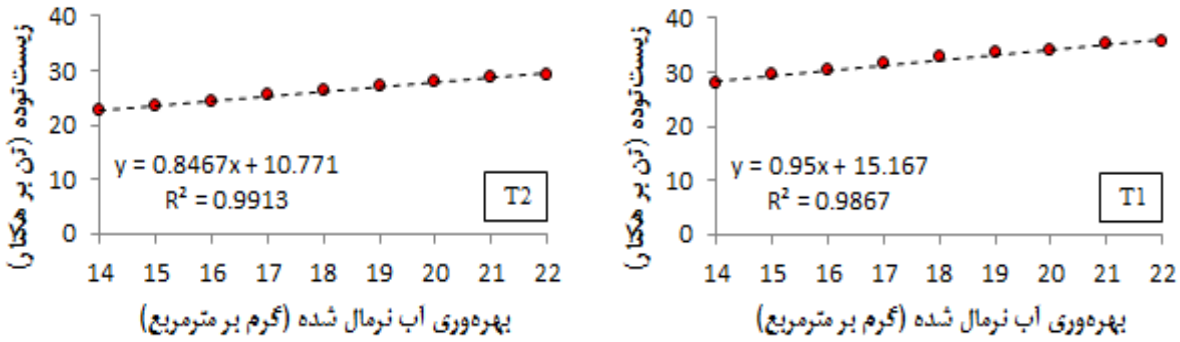
نتایج و بحث

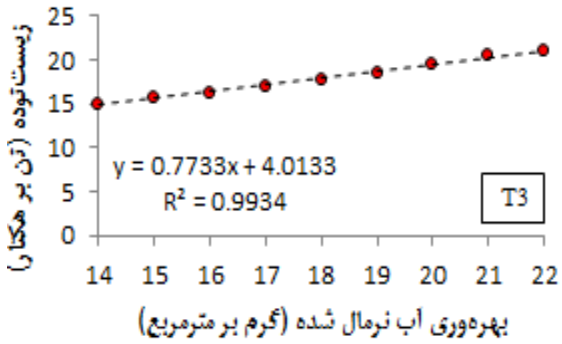
در شکل (۱)، ضریب حساسیت برای پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده (*WP)، حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق (KCTrx)، ضریب پوشش گیاهی اولیه (CCo)، ضریب توسعه پوشش گیاهی (CGC)، ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) و شاخص برداشت (HI) به تفکیک تیمارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. بیشترین حساسیت به پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (*WP) اختصاص داشت. نتایج پژوهش رزاقی و همکاران و احمدی و همکاران (۱۴۰۰) نیز گزارش نمودند که حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر زیاد بود (Razzaghi et al., 2017). سه پارامتر شاخص برداشت (HI)، حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق (KCTrx) و ضریب توسعه پوشش گیاهی (CGC) نیز از حساسیت بالایی برخوردار بودند. در پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده (*WP)، شاخص برداشت (HI)، حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق (KCTrx) و ضریب توسعه پوشش گیاهی (CGC)، با کاهش مقدار آب آبیاری میزان حساسیت نیز کاهش یافت. این پدیده در پارامتر ضریب پوشش گیاهی اولیه (CCo) به‌صورت عکس مشاهده شد. با کاهش مقدار آب آبیاری، میزان حساسیت مدل افزایش یافت. درنتیجه در زراعت سیب‌زمینی، اگر کم‌آبیاری انجام شود احتمال حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات ضریب پوشش گیاهی اولیه افزایش خواهد یافت. حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) بسیار اندک بود. حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده (*WP) (شکل ۲) و شاخص برداشت (HI) (شکل ۳) زیاد بود. ضریب خط برازش داده‌شده در این دو شکل نسبت به سایر پارامترها (در شکل‌های ۴ تا ۷) بیشتر است. به همین دلیل اگر مقادیر این دو پارامتر در بازه‌های موردنظر تغییر داده شود، مقادیر زیست‌توده سیب‌زمینی (که عملکرد نیز جزئی از آن است) به‌شدت تغییر می‌یابد. در همه پارامترها، به‌جز ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC)، افزایش مقدار پارامتر سبب افزایش عملکرد سیب‌زمینی می‌شود. ولی در پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC)، هر چه مقدار این پارامتر افزایش یابد مقدار

عملکرد کاهش می‌یابد. این نتایج در مرحله واسنجی مورداستفاده قرار گرفت و نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۶) ارائه شد.

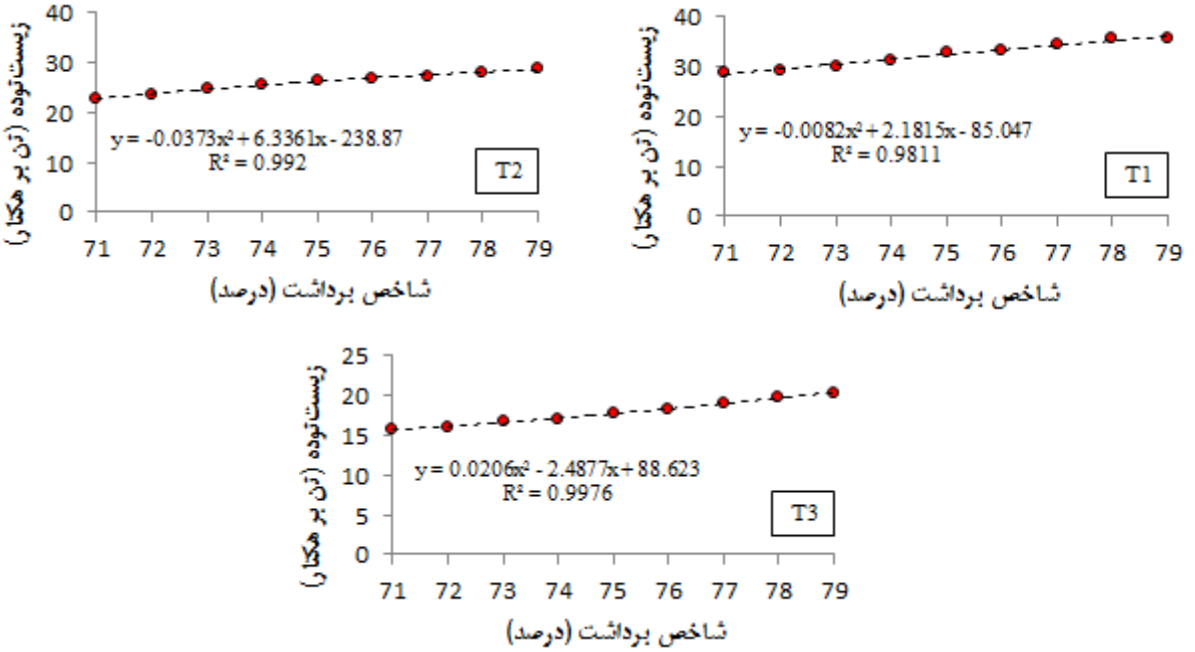


شکل ۱- مقادیر ضریب حساسیت پارامترهای رشد سیب‌زمینی در تیمارها

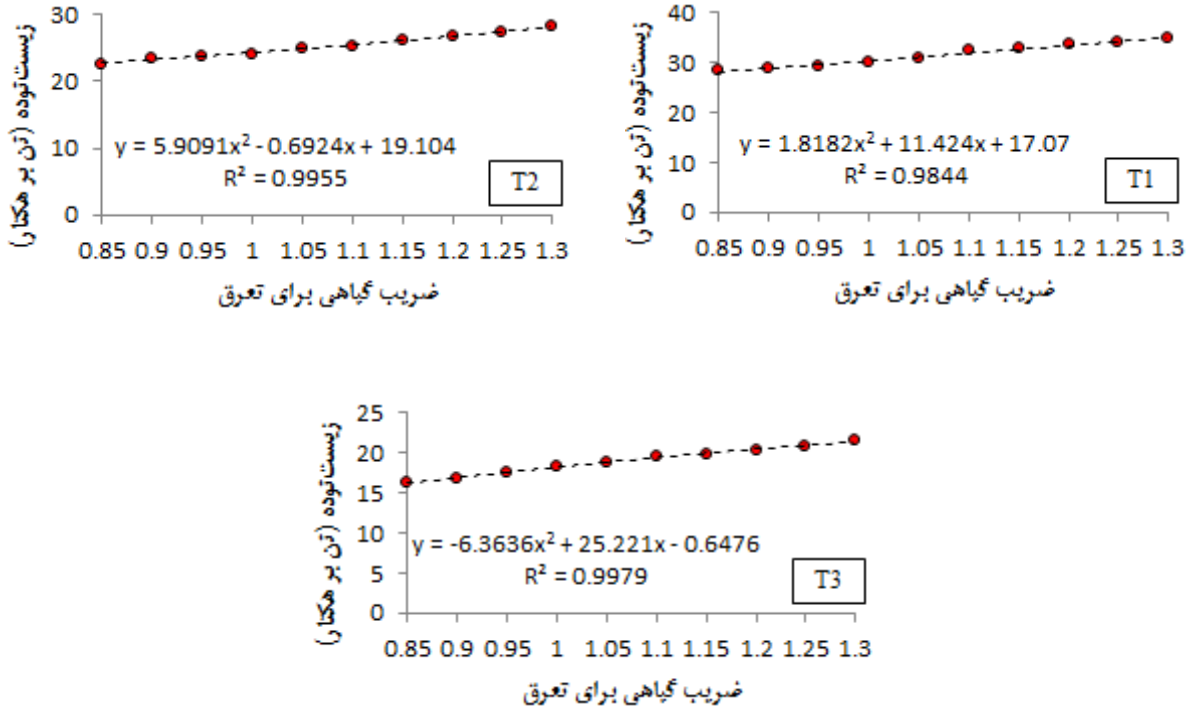




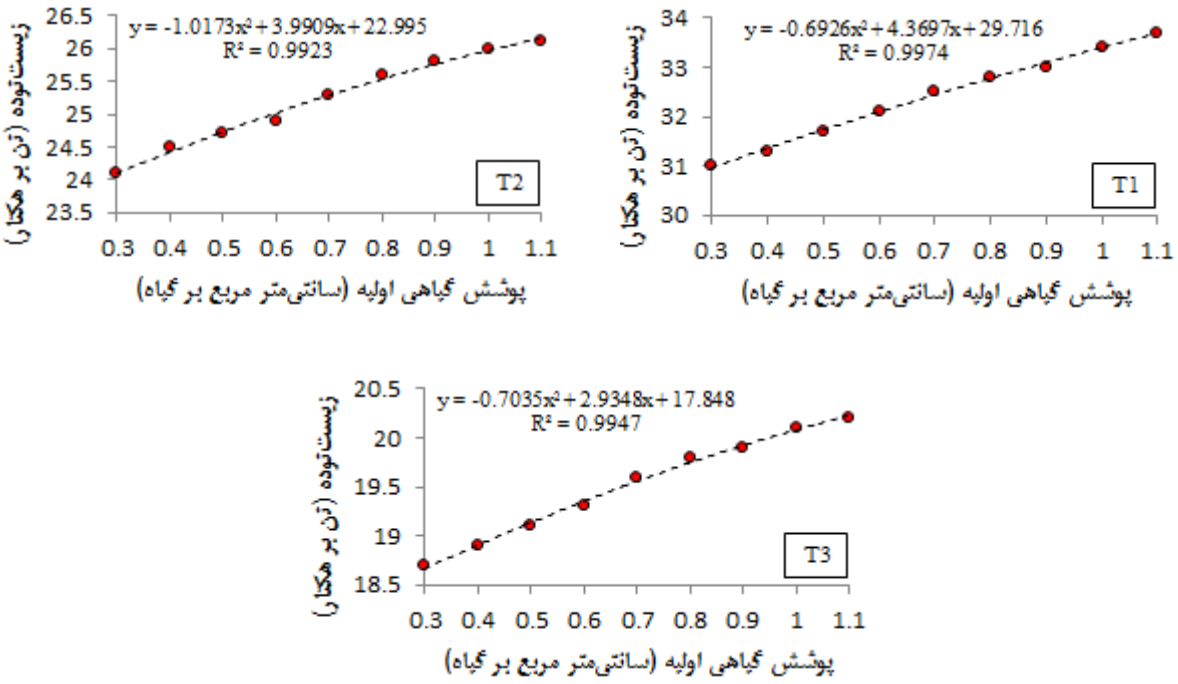
شکل ۲- اثر تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) در تیمارهای مختلف بر مقادیر زیست‌توده سیب‌زمینی



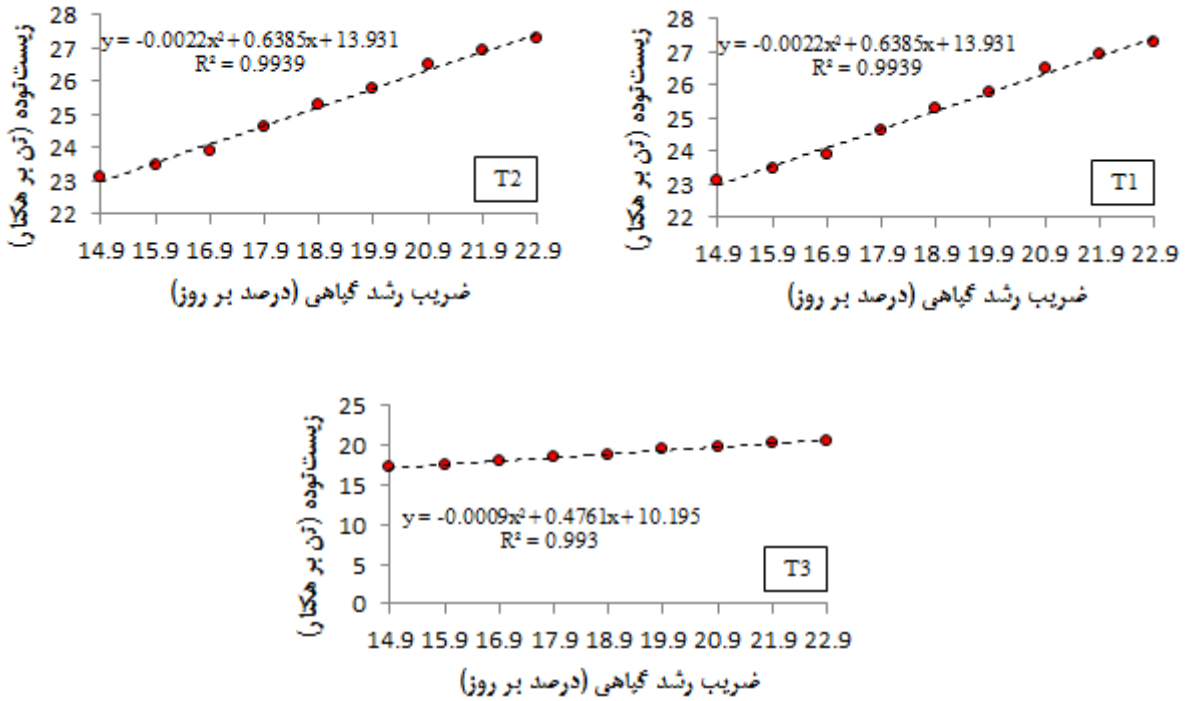
شکل ۳- اثر تغییرات شاخص برداشت (HI) در تیمارهای مختلف بر مقادیر زیست‌توده سیب‌زمینی



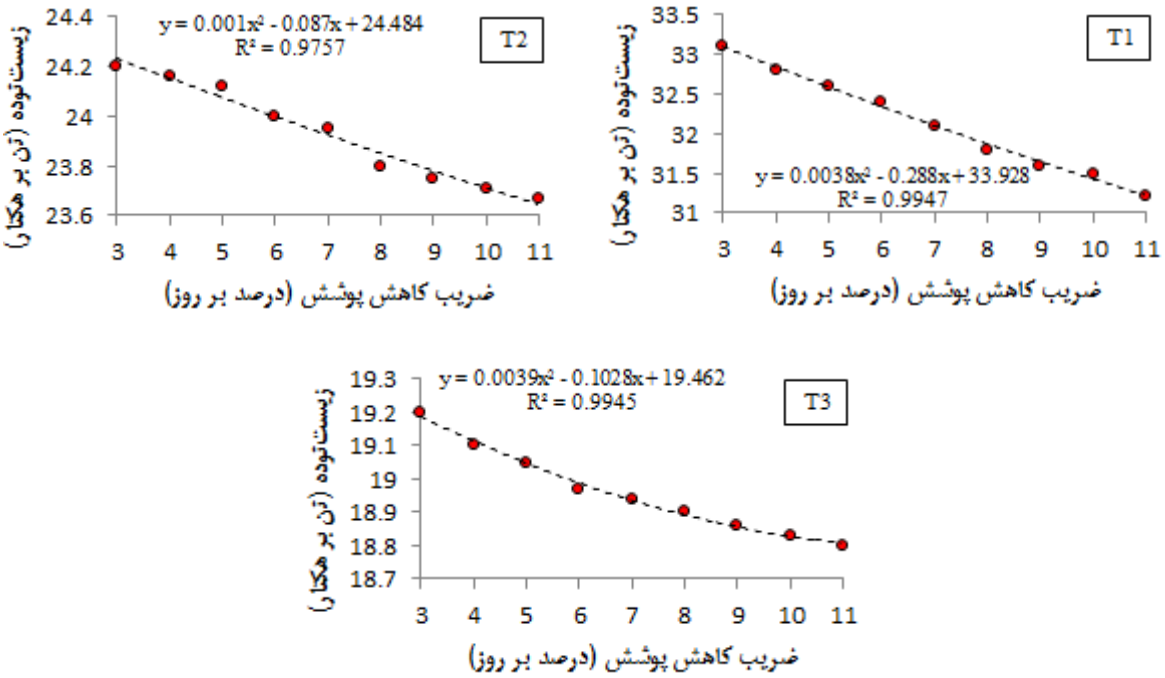
شکل ٤- اثر تغییرات حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق (K_{CTrx}) در تیمارهای بر مقادیر زیست‌توده سیب‌زمینی



شکل ۵- اثر تغییرات ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0) در تیمارهای مختلف بر مقادیر زیست‌توده سیب‌زمینی



شکل ٦- اثر تغییرات ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) در تیمارهای مختلف بر مقادیر زیست‌توده سیب‌زمینی



شکل ۷- اثر تغییرات ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) در تیمارهای مختلف بر مقادیر زیست‌توده سیب‌زمینی

جدول ٦- مقادیر عوامل گیاهی مورداستفاده در مدل AquaCrop

پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
دمای پایه	۲	درجه‌سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	۲۶	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
تراکم کشت	۴۰۰۰۰	گیاه در هکتار	اندازه‌گیری
ضریب رشد کانوپی	۱۷/۵	درصد روز	واسنجی
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۱۳	سانتی‌متر مربع	پیش‌فرض
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱۶	روز	واسنجی
مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۵۶	روز	واسنجی
مدت‌زمان کاشت تا دوره پیری	۹۰	روز	واسنجی
مدت‌زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۲۱	روز	واسنجی
حداکثر عمق مؤثر ریشه	۱/۵	متر	پیش‌فرض
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۸	گرم بر مترمربع	پیش‌فرض
شاخص برداشت	۷۸	درصد	واسنجی
پوشش گیاهی اولیه	۰/۵	درصد	واسنجی
بیشینه رشد کانوپی	۹۵	درصد	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۲۲	–	واسنجی
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۶۵	–	واسنجی
ضریب کاهش پوشش	۰/۳	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۱	درصد بر روز	پیش‌فرض
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۳	–	پیش‌فرض
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۳	–	پیش‌فرض

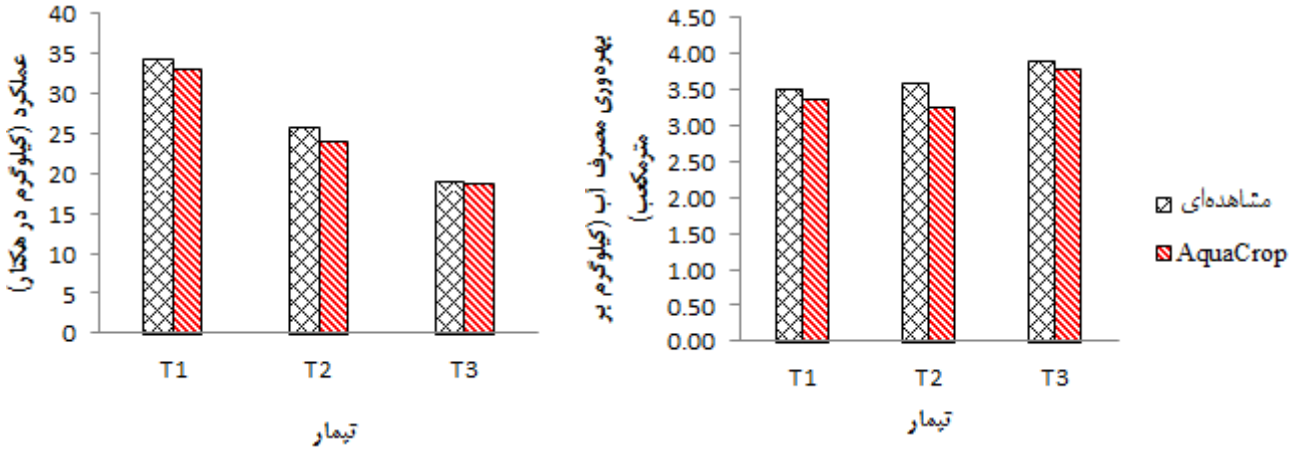
نتایج مقایسه آماری عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی در جدول (۷) نشان داده‌شده است. بر اساس این نتایج، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای بیش برآوردی شد. مقدار خطای این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد برابر با ۱/۳ تن در هکتار و برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب برابر با ۰/۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود. دقت این مدل برای شبیه‌سازی این دو پارامتر در دسته عالی قرار داشت. کارایی مدل AquaCrop در این مرحله با توجه به دو آماره EF و d قابل‌قبول بود.

مقایسه عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی در شکل (۸) نشان داده‌شده است. اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در تیمارهای T1، T2 و T3 به ترتیب برابر با ۳/۸، ۷/۸ و ۸/۷ درصد است. با توجه به این نتایج، با افزایش تنش آبی، میزان خطا در شبیه‌سازی عملکرد افزایش داشت. نتایج تحقیقات دیگر ازجمله ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۷)، احمدی و همکاران (۱۴۰۰)، اگدرنژاد و همکاران (۱۳۹۷)، امداد و تافته (۱۴۰۰) و رزاقی و همکاران (Razzaghi et al., 2017) نیز نشان داده است که این مدل در شرایط تنش دچار خطای بیشتری می‌شود.

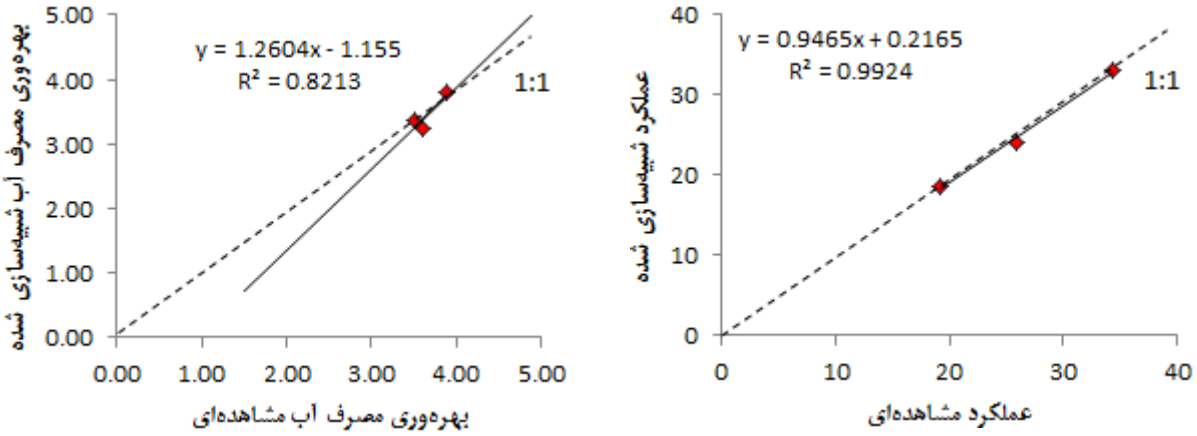
مقایسه بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی در شکل (۸) نشان داده‌شده است. اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در تیمارهای T1، T2 و T3 به ترتیب برابر با ۴/۱، ۸/۱ و ۹/۰ درصد است. افزایش اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در این پارامتر نیز مشاهده شد. علت آن ماهیت مدل AquaCrop است. این مدل آب-محور است یعنی برای تعیین عملکرد از ضریب گیاهی برای تعرق به‌عنوان یک فاکتور مهم استفاده می‌کند. به همین دلیل کاهش تعرق در اثر کاهش آب جذب‌شده سبب کاهش دقت این مدل می‌گردد. همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در مرحله واسنجی نشان داد که مدل AquaCrop توانایی بسیار خوبی برای تبعیت از تغییرات عملکرد و بهره‌وری مصرف آب داشت (شکل ۹).

جدول ۷- نتایج آماری عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

پارامتر	واحد	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
عملکرد	تن در هکتار	-۱/۲	۱/۳	۰/۰۵	۰/۹۵	۰/۹۹
بهره‌وری آب	کیلوگرم بر مترمکعب	-۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۰۶	۰/۸۰	۰/۹۹



شکل ۸- نتایج عملکرد و بهره‌وری مصرف آب مشاهده‌ای سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

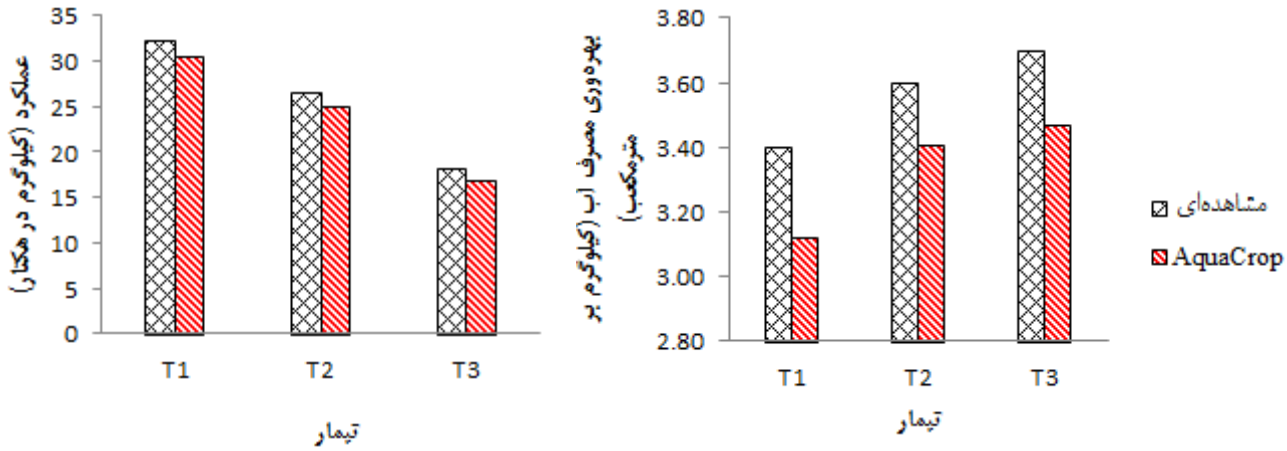


شکل ۹- همبستگی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب مشاهده‌ای سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی‌شده در مرحله واسنجی

نتایج آماری مقایسه بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده عملکرد و بهره‌وری آب در مرحله صحت‌سنجی نشان داد که مدل AquaCrop در این مرحله نیز دچار خطای بیش برآوردی شد (جدول ۸). مقدار خطای این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد برابر با ۱/۵ تن در هکتار و برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب برابر با ۰/۲۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود. بر اساس آماره NRMSE، دقت مدل AquaCrop در دسته عالی قرار داشت. کارایی مدل AquaCrop نیز بر اساس دو آماره EF و d مقدار مطلوبی داشت. بر اساس نتایج رزاقی و همکاران مقادیر آماره NRMSE برای عملکرد سیب‌زمینی بین ۰/۲۱–۰/۰۷ و آماره d برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه سیب‌زمینی بین ۰/۹۹–۰/۹۱ متغیر بود (Razzaghi et al., 2017). مقایسه بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی در شکل (۱۰) نشان داده‌شده است. متوسط اختلاف بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل AquaCrop برابر با ۶/۲ درصد بود. اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در دو تیمار T2 و T3 از تیمار T1 بیشتر بود. این نتیجه در مرحله واسنجی نیز مشاهده شد. علت آن نیز آب–محور بودن این مدل است. نتایج بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop نیز در شکل (۱۰) نشان داده‌شده است. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده برابر با ۶/۷ درصد بود. در همه تیمارها، مقادیر مشاهده‌ای از نتایج شبیه‌سازی‌شده (هم برای عملکرد و هم برای بهره‌وری آب)، بیشتر بود.

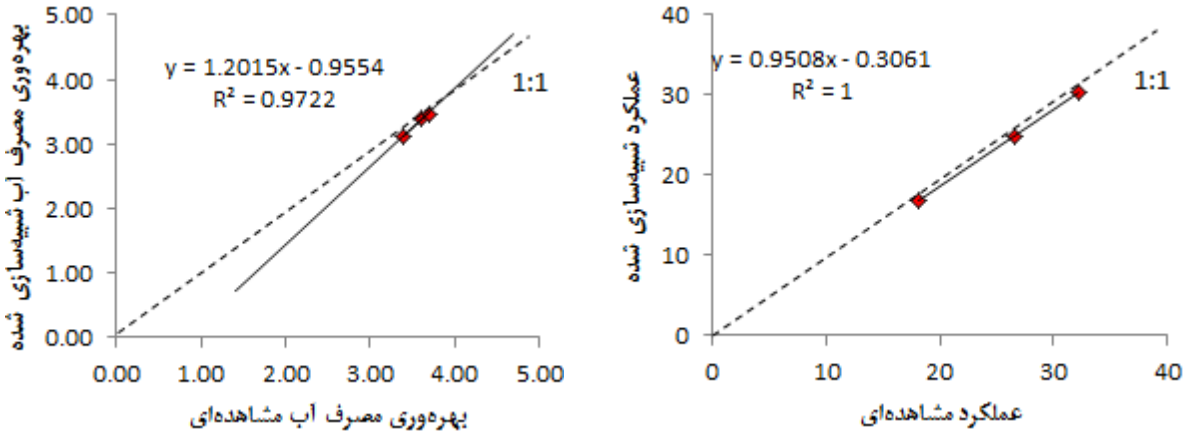
جدول ۸- نتایج آماری عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی

پارامتر	واحد	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
عملکرد	تن در هکتار	−۱/۵	۱/۵	۰/۰۶	۰/۹۲	۰/۹۹
بهره‌وری آب	کیلوگرم بر مترمکعب	−۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۰۶	۰/۷۵	۰/۹۹



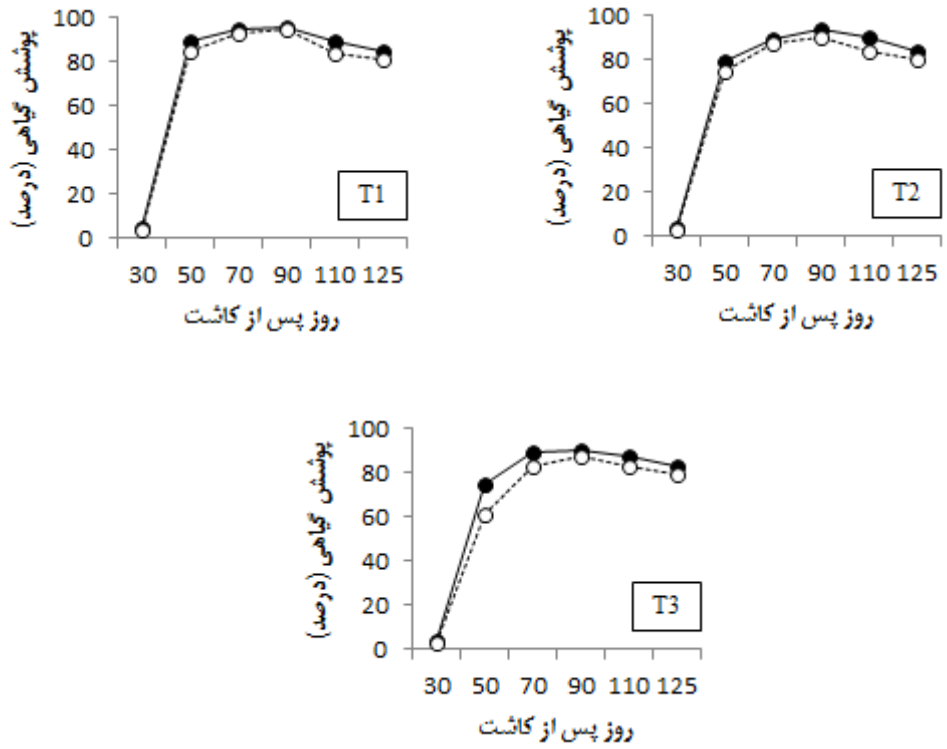
شکل ۱۰- نتایج عملکرد و بهره‌وری مصرف آب مشاهده‌ای گیاه سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی

نتایج همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده عملکرد و بهره‌وری آب توسط مدل AquaCrop در شکل (۱۱) نشان داده‌شده است. با توجه به این نتایج، تمایل نقاط نشان داده‌شده به سمت محور افقی است. این نتایج بیانگر این است که مقادیر مشاهده‌ای همواره از مقادیر شبیه‌سازی‌شده بیشتر بود. با توجه به اینکه ضریب تبیین در این شکل بالا است، مدل AquaCrop توانایی بالایی است در شبیه‌سازی تغییرات داشت.



شکل ۱۱- همبستگی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب مشاهده‌ای گیاه سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی

در طول فصل زراعی، در شش مرحله، پوشش گیاهی گیاه سیب‌زمینی در تیمارهای مورد بررسی، برداشت شد. مقایسه نتایج برای این پارامتر نشان داد که در هر سه تیمار T1، T2 و T3 مقدار پوشش گیاهی مشاهده‌ای بیشتر از شبیه‌سازی‌شده بود (شکل ۱۲). اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در تیمار T1 کمتر از دو تیمار دیگر بود؛ بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۸) تأیید می‌شود؛ زیرا برآورد دقیق‌تر این پارامتر سبب تعیین بهتر عملکرد می‌گردد.



شکل ۱۲- مقایسه پوشش گیاهی مشاهده‌ای (سفید) و شبیه‌سازی‌شده (سیاه) گیاه سیب‌زمینی برای تیمارهای مورد بررسی

نتیجه‌گیری

این تحقیق به‌منظور تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب سیب‌زمینی تحت مقادیر مختلف آبیاری در سیستم آبیاری قطره-ای تیپ انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که حساسیت این مدل گیاهی نسبت به تغییرات پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) بسیار زیاد بود. حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق (K_{CTrx}) و ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، متوسط و نسبت به تغییرات ضریب زوال پوشش (CDC) و ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0)، کم بود. به‌جز ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC)، تغییرات همه پارامترها سبب افزایش عملکرد سیب‌زمینی شد. ارزیابی مدل AquaCrop نشان داد که این مدل گیاهی در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب دچار خطای کم‌برآوردی شد. مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد (RMSE=1.5) و بهره‌وری آب (RMSE=0.23) دارای خطای قابل‌قبول بود. همچنین دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد (NRMSE=0.06) و بهره‌وری آب (NRMSE=0.06) در دسته عالی قرار داشت. کارایی این مدل گیاهی نیز بر اساس دو آماره EF و d، برای تعیین عملکرد و بهره‌وری آب قابل‌قبول بود. با توجه به این نتایج، پیشنهاد می‌شود از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی سیب‌زمینی تحت شرایط مدیریت آبیاری مشابه استفاده شود. لیکن پیش از استفاده، لازم است مقادیر بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*)، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) و حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق (K_{CTrx}) با دقت بیشتری نسبت به سایر پارامترهای گیاهی تعیین شوند. از طرف دیگر، به دلیل حساسیت بالای این پارامترها، اگر اندازه‌گیری آن‌ها در مزرعه انجام نمی‌شود، بهتر است به حالت پیش‌فرض در مدل باقی بمانند.

منابع

ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی‌سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۸ (۱): ۱۳۱-۱۱۷.

ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۳-۷۵): ۷۲۶-۷۱۵.

احمدی، م.، قنبرپوری، م. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۰. مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۸ (۱): ۳۰-۱۵.

اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۵ (۲): ۶۴-۵۳.

امداد، م. ر.، تافته، آ. و غالبی، س. ۱۳۹۷. اعتبارسنجی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم متأثر از تعداد نوبت‌های آبیاری. مجله آب و خاک. ۳۲ (۳): ۴۷۳-۴۶۳.

امداد، م. ر. و تافته، آ. ۱۴۰۰. مقایسه کارایی دو مدل دیست و آکواکراپ در شبیه سازی عملکرد گندم. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵(۱): ۲۳۳-۲۲۳.

ایزدی، ز.، نصرالهی، ع. ح. و حقیقتی بروجنی، ب. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد محصول سیب‌زمینی با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۹(۳۵): ۱۵۸-۱۴۳.

ایزدی، ز.، نصرالهی، ع. ح. و حقیقتی، ب. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد سیب‌زمینی تحت تنش آبی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹ (۱): ۱۸۰-۱۷۱.

بهمنش، ع.، اگدرنژاد، ا. و سپهری، س. ۱۴۰۰. تحلیل حساسیت پارامترهای رشدی گلرنگ در مدل AquaCrop با مدیریت‌های مختلف آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵(۳): ۶۱۱-۶۲۳.

پژوهنده، م.، کاروان، غ. و رضوی، ع. س. ۱۳۹۶. مروری بر مهندسی ژنتیک سیب‌زمینی تاکنون. دو فصلنامه مهندسی ژنتیک و ایمنی زیستی. ۶ (۱): ۱۸۸-۱۷۵.

حاجی‌برات، ز.، سعیدی، ع.، موسی‌پور گرجی، ا.، غفاری، م. و زین‌العابدینی، م. ۱۳۹۹. ارزیابی شاخص‌های تحمل به خشکی گیاه سیب‌زمینی در پاسخ به استرس کم‌آبیاری. فصلنامه پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی. ۱۲(۳۵): ۱۱۲-۱۰۲.

حسین‌پناهی، ف.، کوچکی، ع.، نصیری محلاتی، م. و قربانی، ر. ۱۳۸۸. ارزیابی عملکرد و اجزای عملکرد در کشت مخلوط ذرت و سیب‌زمینی. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. ۷ (۱): ۳۰-۲۳.

رحیمی‌خوب، ح.، سهرابی، ت. و دلشاد، م. ۱۳۹۹. تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه ریحان در مدل AquaCrop تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱ (۶): ۱۳۵۱-۱۳۴۱.

سرکهکی، ا.، اگدرنژاد، ا. و مینایی، س. ۱۴۰۰. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب در کشت ذرت با مدیریت‌های مختلف آبیاری تحت تنش شوری. مجله پژوهش آب ایران. ۴۰: ۱۳۳-۱۴۷.

کریمی، ش.، اگدرنژاد، ا. و نخجوانی مقدم، م. م. ۱۴۰۰. بررسی دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ذرت دانه‌ای در تراکم‌های کاشت متفاوت و مقادیر مختلف آب. مجله محیط‌زیست و مهندسی آب. ۷ (۱): ۷۲-۵۹.

Andarzian, A., 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.

Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A. and Dejene, T. 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficit

2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 27(9-10), 645-654.

Masanganise, J., Basira, K., Chipindu, B., Mashonjowa, E. and Mhizha, T. 2013. Testing the utility of a crop growth simulation model in predicting maize yield in a changing climate in Zimbabwe. International Journal of Agricultural and Food Science. 3(4): 157-163.

Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P. H., Marek, G. and Boman, R. 2020. Validation and application of AquaCrop for irrigated cotton in the Sothern Great Plains of US. Irrigation Science. 38: 593-607.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Freres, E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.

Razzaghi, F., Zhou, Z., Andersen, M. N. and Plauborg, F. 2017. Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. Agricultural Water Management. 191: 113–123.

Tourneux, C., Devaux, A., Camacho, M., Mamani, P. and Ledent, J. F. 2003. Effects of water shortage on six potato genotypes in the highlands of Bolivia (I): Morphological Parameters, Growth and Yield, 23(2): 169-179.

and irrigated barely. Agricultural Water Management. 97:1838–1846.

Beven, K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. Journal of Hydrology. 44(3-4): 169-190.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2018. FAOSTAT statistical database. FAO, Rome. Available from internet: http://www.fao.org.

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. 101(3): 488-498.

Hsiao, T. C., Heng, L. K., Steduto, P., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. Agronomy. 101: 448-459.

Katerji, N., Campi, P. and Mastrorilli, M. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. Agricultural Water Management. 130: 14-26.

Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N. and Frede, H.

Water Management in Agriculture
Vol. 10, No. 1 Spring and Summer 2023, 15-32

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۱، بهار و تابستان۱۴۰۲، ص. ۳۲-۱۵

Sensitivity Analysis of Crop Growth Parameters for Evaluation of AquaCrop in Potato Simulation under Different Irrigation Water Management in Kermanshah

H. Neysi[1] A. Egdernezhad [*2] and S. Sepehri Sadeghiyan[3]

Abstract

Potato is one of the most important crops, which is very sensitive to the amount of irrigation water. This leads to a lot of research to determine its yield and water productivity in different irrigation conditions. Doing the researches waste time and cost. For this reason, researchers have suggested that crop growth models such as AquaCrop be sensitively analyzed and evaluated to simulate the crop under different conditions. Due to this issue, the present study was conducted using three irrigation treatments including T1: 100% supply; T2: 75% supply and T3: 50% supply of potato water requirement. To analyze the sensitivity step, Beven method was used. To evaluate AquaCrop, statistics criteria root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (NRMSE), mean bias error (MBE), efficiency factor (EF) and agreement index (d) were used. The results showed that AquaCrop model was very sensitive to changes in water productivity parameters. The sensitivity of this model to changes in evapotranspiration coefficient and crop growth coefficient was moderate and to changes in initial crop canopy and crop decay coefficient was low. According to MBE values, AquaCrop model suffered a low estimation error in determining yield and water productivity. The error of this crop model was acceptable for determining yield (RMSE=1.5) and water productivity (RMSE=0.23). Its accuracy was also excellent for simulating yield (NRMSE=0.06) and water productivity (NRMSE=0.06). Based on the values of EF and d, AquaCrop was more efficient than water productivity in determining yield. Therefore, it is suggested that this crop model be used to simulate potatoes under similar conditions.

Keywords: Crop Growth Parameters, Water Stress, AquaCrop Model, Water Requirement.

[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 (*Corresponding Author, Email:a_eigder@ymail.com)
[3]Assistant professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
Received: 30 Oct 2021
Accepted: 20 Dec 2021