نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و سه / شماره چهارم / زمستان ۱۳۹۸

ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب سیب‌زمینی تحت مقادیر مختلف تنش آبی در دوره‌های متفاوت رشد

محمد علی انصاری[1]، اصلان اگدرنژاد [1]*و نیازعلی ابراهیمی‌پاک[2]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۴)

چکیده

پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد وکارایی مصرف سیب‌زمینی تحت شرایط تنش آبی در پنج سطح (E۰، E۱، E۲، E۳ و E۴ به‌ترتیب نشان دهنده ۱۰۰، ۸۵، ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درصد تأمین نیاز آبی) و زمان اعمال تنش در سه دوره زمانی از رشد (T۱، T۲ و T۳ به‌ترتیب نشان‌دهنده ۵۰ روز رشد اول (استقرار بذر و رشد رویشی)، دوم (مرحله میانی) و سوم (رسیدن فیزیولوژیکی گیاه) از کل دوره رشد) انجام شد. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دچار خطای بیش‌برآوردی و در تعیین کارایی مصرف آب دچار خطای کم‌برآوردی شد. مقادیر خطای این مدل با توجه به مقادیر RMSE و NRMSE برای هر دو پارامتر عملکرد و کارایی مصرف آب قابل قبول بود. بیشینه و کمینه خطای شبیه‌سازی عملکرد به‌ترتیب برابر با ۰/۳ (E۱T۳) و ۳/۱۵ (E۱T۲) بود. نتایج به‌دست آمده برای کارایی مصرف آب نیز نشان داد که بیشترین و کمترین خطا به‌ترتیب برابر با ۰/۵۳ (E۳T۲) و ۰/۰۳ (E۴T۲) بود. اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی برای تیمارهای E۱، E۲، E۳ و E۴ به‌ترتیب برابر با ۰/۲۴، ۰/۲۵، ۰/۱۹ و ۰/۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب و اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی برای تیمارهای T۱، T۲ و T۳ به‌ترتیب برابر با ۰/۱۹، ۰/۳۶ و ۰/۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود. بنابراین با افزایش میزان تنش و همچنین در اوایل دوره رشد سیب‌زمینی، مدل خطای بیشتری در برآورد کارایی مصرف آب داشت.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، عملکرد سیب‌زمینی، مدل‌سازی گیاهی، مدل AquaCrop

۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲. بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
*: مسئول مکاتبات: a_eigder@ymail.com

مقدمه

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع غذایی در جهان و ایران شناخته می‌شود (۳) به‌طوری که در رتبه‌بندی محصولات مهم غذایی در دنیا در رده پنجم و در کشور در رده دوم (۳) معرفی شده است. با این وجود در بیشتر مناطق کشور این محصول تحت تنش آبی قرار دارد و این روند در سال‌های آتی به‌دلیل کاهش منابع آب و اعمال سیاست‌های افزایش بهره‌وری مصرف آب (۴ و ۱۲) احتمالاً ادامه خواهد یافت. گرچه مطابق بیشتر گیاهان، اعمال تنش آبی سبب کاهش عملکرد این گیاه می‌شود؛ ولی در این گیاه کاهش عملکرد با کوچک شدن غده‌ها و عدم بازارپسندی مواجه خواهد شد. از طرف دیگر، اعمال تنش آبی در دوره‌های مختلف رشد اثرات متفاوتی بر این گیاه می‌گذارد. پژوهش‌های انجام شده در طی سال‌های گذشته نشان داده است که کلیه دوره‌های رشد این گیاه حساس به کم‌آبی است (۱۵ و ۱۶) ولی مراحل اولیه رشد نسبت به سایر مراحل دیگر حساسیت کمتری نسبت به کمبود آب دارد و تنها باعث کاهش زیست‌توده می‌شود (۱۵). مطالعات پژوهشگران داخلی (۵) و خارجی (۱۶) بیانگر این است که شروع تشکیل غده‌ها و اندکی پس از آن به میزان آب در دسترس حساسیت بیشتری دارد و اگر آب آبیاری کافی در این دوره‌ها در اختیار این گیاه قرار نگیرد تعداد و وزن محصول به‌شدت کاهش می‌یابد.

به‌منظور بررسی اثرات تنش آبی در مقادیر مختلف و همچنین در دوره‌های متفاوت رشد این گیاه، لازم است تا آزمایش‌های متعدد مزرعه‌ای در مناطق مختلف کشور انجام شود. انجام این آزمایش‌ها مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار خواهد بود. به‌منظور رفع این مشکل، پژوهشگران مدل‌های گیاهی مختلفی را بسط داده‌اند تا با استفاده از آنها بتوان سناریوهای مختلف تنش آبی را بر گیاهان زراعی بررسی کرد (۷). یکی از مهم‌ترین مدل‌های معرفی شده در این زمینه، مدل AquaCrop است که توسط سازمان خوار و بار کشاورزی (فائو) بسط داده شده است و به‌دلیل سادگی، نیاز به داده‌های کمتر، کاربردی بودن و دقت قابل نسبت به سایر مدل‌های رشد گیاهی برتری دارد (۹). این مدل گیاهی در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران مختلفی بوده است و به‌منظور شبیه‌سازی گیاهان مختلف از آن استفاده شده است. هنگ و همکاران (۹) با بررسی این مدل بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت نشان دادند که توانایی این مدل برای شبیه‌سازی این پارامترها قابل قبول بود. هیسائو و همکاران (۱۰) با استفاده از این مدل به بررسی ذرت پرداختند و نتایج مشابهی در خصوص این مدل گزارش کردند. در پژوهشی دیگر، کاترجی و همکاران (۱۱) از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت و گوجه‌فرنگی استفاده کردند و دقت قابل قبولی برای این مدل گزارش کردند. ماسانگانیس و همکاران (۱۳) عملکرد این مدل گیاهی را در شبیه‌سازی ذرت بررسی کردند و نشان دادند که دقت این مدل در حد مطلوب بود. گارسیا ویلا و فرس (۶) و حسن‌لی و همکاران (۸) نیز با کاربرد این مدل در مناطق مختلف برای گیاهان مختلف نشان دادند که دقت این مدل قابل قبول بود.

با توجه به اهمیت محصول سیب‌زمینی، مطالعاتی نیز با استفاده از این مدل روی این گیاه انجام شده است. از جمله نخستین پژوهش‌های انجام شده با استفاده از این مدل می‌توان به پژوهش گارسیا ویلا و فرس (۶) اشاره کرد. این پژوهشگران با استفاده از این مدل به مدیریت آبیاری در مزارع جنوب اسپانیا پرداختند و برخی سناریوهای حاکم بر این مزارع از جمله کاهش سطوح کشت و یا افزایش قیمت محصول را با تغییر سطوح آبیاری بررسی کردند. در مطالعه دیگری که توسط افشار و نشات (۱) انجام شد از این مدل به منظور بررسی اثر سه سطح آبیاری بر گیاه سیب‌زمینی استفاده شد. در همین راستا، مونتایا و همکاران (۱۴) در مزارع واقع در جنوب اسپانیا به بررسی دقت این مدل در شرایط تأمین آب ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی سیب‌زمینی پرداختند.

در کلیه این پژوهش‌ها دقت مدل AquaCrop مطلوب ارزیابی شد لیکن تیمارهای در نظر گرفته تنها به صورت کاهش نیاز آبی در کل دوره رشد در نظر گرفته شدند. درحالی که مرور

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

عمق (cm)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری ($g\ cm^{-3}$)	رطوبت ظرفیت زراعی (%)	رطوبت پژمردگی دائم (%)	EC ($dS\ m^{-1}$)	pH -	پتاسیم (ppm)	فسفر (ppm)	ازت کل (%)	کربن آلی (%)
۳۰-۰	سیلتی رسی لوم	۱/۴۸	۲۱/۴	۱۱/۶	۰/۳۵	۸/۰۷	۳۸۴	۸/۱۵	۰/۷۲	۰/۵۵
۶۰-۳۰	سیلتی لوم	۱/۴۸	۲۱/۴	۱۲/۲	۰/۳۲	۸/۰۷	۲۹۳	۷/۷	۰/۷۲	۰/۴۸

جدول ۲. نتایج تجزیه کیفیت آب آبیاری در مزارع آزمایشی

EC	pH	کلسیم	منیزیم	سدیم	پتاسیم	کربنات	بی‌کربنات	کلر	سولفات
($dS\ m^{-1}$)	-				($meq\ l^{-1}$)				
۰/۳۷	۷/۷	۳/۴	۳/۴	۰/۷	–	–	۲/۹	۰/۴	۰/۸

منابع در بالا بیانگر این بود که اعمال تنش آبی در دوره‌های مختلف رشد نیز اثرات متفاوتی بر عملکرد سیب‌زمینی دارد. به‌همین دلیل نیاز است تا دقت این مدل در شرایط اعمال تنش در دوره‌های مختلف رشد نیز بررسی شود. هدف این پژوهش بررسی اثر تنش آبی در مقادیر مختلف و در دوره‌های متفاوت رشد بر عملکرد و کارایی مصرف آب محصول است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop، داده‌های برداشت شده از مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی واقع در چهارتخته شهرکرد با طول جغرافیایی ′۵۶ °۵۰ شرقی و عرض جغرافیایی ′۳۲ °۱۸ شمالی و ارتفاع ۲۰۶۶ متر از سطح دریا در دو سال زراعی مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش مورد نظر به‌صورت کرت‌های خرد شده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی روی سیب‌زمینی رقم آگریا در سه تکرار انجام شد. در این تحقیق از دو تیمار مقدار تنش آبی و زمان اعمال تنش استفاده شد. مقدار تنش آبی در پنج سطح شامل E_0، E_1، E_2، E_3 و E_4 بود که به‌ترتیب نشان‌دهنده ۱۰۰، ۸۵، ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درصد تأمین نیاز آبی سیب‌زمینی می‌شد. زمان اعمال تنش نیز به سه بازه ۵۰ روزه شامل T_1، T_2 و T_3 تقسیم شد که به‌ترتیب بیانگر ۵۰ روز رشد اول (استقرار بذر و رشد رویشی)، دوم (مرحله میانی) و سوم (رسیدن فیزیولوژیکی گیاه) از کل دوره رشد بودند. مشخصات خاک آزمایش و آب آبیاری به‌ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.

مساحت کل زمین مورد استفاده ۱۵۰۰ مترمربع و مساحت هر تیمار ۱۵ متر مربع (۳×۵) بود. مقدار بذر مورد استفاده ۲۵۰۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد. بذرها در بیست و ششم اردیبهشت کاشته شدند و محصول نیز در اواخر مهر ماه برداشت شد. به‌منظور اعمال تنش آبی، از یک لایسی‌متر زهکش‌دار به عمق سه متر در مجاورت مزرعه مورد نظر استفاده شد. شرایط موجود در این لایسی‌متر مشابه کرت‌های مورد آزمایش بود. با تعیین مقدار آب مورد نیاز در لایسی‌متر بر اساس رابطه (۱)، آب آبیاری مورد نیاز با استفاده از لوله به هر کرت منتقل و با استفاده از کنتور اندازه‌گیری می‌شد. سپس به‌صورت ثقلی در سطح کرت پخش می‌شد.

$$ET_c = I + R - D \pm (Sw_2 - Sw_1) \qquad (1)$$

در این رابطه، ET_c تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه (میلی‌متر)، I میزان آب آبیاری مورد نیاز تا رسیدن به رطوبت ظرفیت زراعی (میلی‌متر)، R میزان بارندگی (میلی‌متر)، D عمق آب زهکش شده (میلی‌متر)، Sw_2 رطوبت لایه خاک در ابتدای دوره

اندازه‌گیری (میلی‌متر) و Sw_1 رطوبت لابه خاک در انتهای دوره اندازه‌گیری (میلی‌متر) بود. با اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک درون لایسی‌متر با استفاده از نوترون‌متر و تعیین مقدار تبخیر تعرق واقعی سیب‌زمینی، مقادیر آب آبیاری هر کرت محاسبه شد و آب آبیاری تا ابتدای کرت توسط لوله منتقل شد. سپس با استفاده از کنتور با دقت بالا مقدار آب آبیاری اندازه‌گیری و در اختیار هر کرت قرار داده شد. پس از رسیدن محصول، برداشت به‌صورت دستی انجام شد و میزان عملکرد و زیست‌توده با استفاده از ترازو سنجیده شدند.

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان مختلف از رابطه (۲) استفاده می‌کند (۷).

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

که در این رابطه، Y_x و Y_a به‌ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ET_x و ET_a به‌ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر- تعرق گیاه، و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر تعرق است. وزن غده سیب‌زمینی و زیست‌توده کل نیز به‌ترتیب از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند.

$$B = WP^*\left[\frac{Tr_i}{ET_{\circ,i}}\right] \qquad (۳)$$

$$Y = B \times HI \qquad (۴)$$

که در این روابط، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی (رابطه ۵)، WP بهره‌وری آب، ET_o تبخیر- تعرق گیاه مرجع، Y و B به‌ترتیب عملکرد و زیست‌توده خشک و HI شاخص برداشت است.

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_\circ \qquad (۵)$$

که در آن، K_s و K_c به‌ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و CC توسعه پوشش تاج از زمان جوانه‌زنی تا مقدار بیشینه (رابطه ۶) هستند.

$$CC = CC_\circ \times e^{CGC.t} \qquad (۶)$$

که در این رابطه، CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد)، $CC_\circ$ پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) 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. در واقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش یافته است و به‌تبع آن میزان تعرق گیاه کاهش می‌یابد. این عمل سبب کاهش ماده خشک تولیدی و عملکرد سیب‌زمینی می‌شود. کارایی مصرف آب نیز بر اساس رابطه (۷) تعیین می‌شود.

$$WUE = \frac{Y}{W} \qquad (۷)$$

که در این رابطه، WUE کارایی مصرف آب (کیلوگر بر مترمکعب)، Y عملکرد (کیلوگرم) و W مقدار آب مصرفی (مترمکعب) است. به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop، ابتدا حساسیت این مدل به پارامترهای ورودی با استفاده از رابطه ارائه شده توسط گیرت و رائس (۷) سنجیده شد (رابطه ۸).

$$Sc = \left|\frac{P_m - P_b}{P_b}\right| \times ۱۰۰ \qquad (۸)$$

که در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، Pm مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر بر اساس داده‌های ورودی تعدیل شده و Pb مقدار برآورد پارامتر مورد نظر بر اساس داده ورودی پایه است. برای تحلیل حساسیت مدل به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از عوامل ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده می‌شد و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته می‌شدند (۷). در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > ۱۵$ حساسیت بالا، $۱۵ > Sc > ۲$ حساسیت متوسط، $Sc < ۲$ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (۷). پارمترهای با حساسیت بیشتر از دو به‌منظور واسنجی این مدل در نظر گرفته شدند. مقادیر مورد استفاده پارامترهای مورد نظر در جدول (۳) نشان داده شده است.

پس از واسنجی نیز صحت‌سنجی این مدل نسبت به تنش آبی انجام شد. با توجه به اینکه این پژوهش در دو سال زراعی انجام شد، داده‌های سال اول برای واسنجی و داده‌های سال دوم برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شدند. معیار دقت این مدل در

جدول ۳. مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل AquaCrop

توضیح پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
دمای پایه	۲	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	۲۶	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
ضریب رشد کانوپی	۵	درصد روز	پیش‌فرض
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۵	سانتی‌مترمربع	پیش‌فرض
عمق مؤثر ریشه	۰/۳	متر	پیش‌فرض
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱۵	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۵۰	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۹۰	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۵۰	روز	واسنجی
بهره‌وری آب نرمال شده	۲۰	گرم بر مترمربع	واسنجی
بیشینه رشد کانوپی	۹۲	درصد	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۲	–	واسنجی
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۸	–	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۱۵/۵	درصد روز	واسنجی
ضریب کاهش پوشش	۱/۹	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۴	درصد بر روز	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی به‌منظور بسته شدن روزنه‌ها	۰/۵۷	–	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۰/۷۲	–	واسنجی

هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تبیین ($R^۲$) بررسی شد. این آماره‌ها به‌ترتیب در روابط (۹) تا (۱۴) نشان داده شده‌اند.

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=۱}^{n}(P_i-O_i)^۲}{n}} \qquad (۹)$$

$$\mathrm{NRMSE}=\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=۱}^{n}(P_i-O_i)^۲}{n}}}{\overline{O_i}} \qquad (۱۰)$$

$$\mathrm{MBE}=\frac{\sum_{i}^{n}\left(P_i-O_i\right)}{n} \qquad (۱۱)$$

$$\mathrm{EF}=۱-\frac{\sum_{i=۱}^{n}(P_i-O_i)^۲}{\sum_{i=۱}^{n}(O_i-\overline{O})^۲} \qquad (۱۲)$$

$$d=۱-\frac{\sum_{i=۱}^{n}(P_i-O_i)^۲}{\sum_{i=۱}^{n}(|P_i|+|O_i|)^۲} \qquad (۱۳)$$

$$R^۲=\frac{\left(\sum(P_i-\overline{P})(O_i-\overline{O})\right)^۲}{\sum(P_i-\overline{P})^۲\sum(O_i-\overline{O})^۲} \qquad (۱۴)$$

جدول ۴. ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی

پارامتر	مقدارSc در حالت ۲۵+ درصد	مقدارSc در حالت ۲۵- درصد	درجه حساسیت
رطوبت در ظرفیت زراعی	۱۵/۷	۱۵/۲	زیاد- زیاد
رطوبت در نقطه پژمردگی	۷/۵	۱۰/۵	متوسط- متوسط
رطوبت در حالت اشباع	۲/۶	۱/۴	متوسط- کم
ضریب گیاهی برای تعرق	۰/۲۳	۲/۶	کم- متوسط
عمق مؤثر ریشه	۲/۶	۱/۴	متوسط- کم
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۶/۹	۶/۲	متوسط- متوسط
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۸/۱	۱۰/۹	متوسط- متوسط
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۲۰/۵	۲/۱	زیاد- متوسط
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۲۲/۱	۴/۵	زیاد- متوسط

در معادله‌های بالا P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها است. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده دقت عالی مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به‌ترتیب نشان‌دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل رشد گیاهی مورد نظر مقدار پارامتر مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد پارامتر مورد نظر عدد کوچک‌تری به‌دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها است و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها است.

بحث و نتایج

تحلیل حساسیت

نتایج به‌دست آمده از تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در جدول (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود این مدل به تغییرات بیشتر پارامترهای ورودی حساسیت متوسطی داشت. گرچه کلیه پارامترها به‌دلیل محدودیت نگارش در این جدول نشان داده نشد. لیکن مشاهده می‌شود که مدل AquaCrop نسبت به تغییرات برخی پارامترهای مشاهداتی مانند "مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی" و "مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی" نیز حساسیت متوسط داشت. گرچه این پارامترها می‌بایست در مزرعه تعیین شوند لیکن دقت اندازه‌گیری آنها بالا نیست و بعضی به‌صورت حدودی در مزارع آزمایشی ثبت می‌شوند. تغییرات رطوبت ظرفیت زراعی در هر دو حالت افزایش و کاهش ۲۵ درصد بر خروجی مدل اثر زیادی داشت به‌همین دلیل حساسیت این مدل به این پارامتر زیاد بود. همین شرایط برای پارامترهای "مدت زمان کاشت تا برداشت محصول" و "مدت زمان کاشت تا دوره پیری" در شرایط افزایش مقادیر آنها نیز مشاهده شد. از طرف دیگر، کاهش پارامترهای "رطوبت در حالت اشباع" و "عمق مؤثر ریشه" بر خروجی مدل اثر بسیار اندکی داشتند به‌همین دلیل حساسیت این مدل نسبت به کاهش مقادیر این پارامترها کم بود. شرایط مشابه برای افزایش پارامتر "ضریب گیاهی برای تعرق" نیز مشاهده شد. با توجه به این نتایج، در مرحله واسنجی سعی شد برخی پارامترهای مشاهداتی که حساسیت

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های آماری برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب سیب‌زمینی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

مرحله از شبیه‌سازی	پارامتر	RMSE	NRMSE	MBE	EF	d
واسنجی	عملکرد (تن بر هکتار)	۲/۱	۰/۹	−۰/۲۵	۰/۹۹	۰/۹۹
	کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۰۶	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۹۹	۰/۹۹
صحت‌سنجی	عملکرد (تن بر هکتار)	۱/۵	۰/۰۵	−۰/۷۳	۰/۹۵	۰/۹۹
	کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱/۰۸	۰/۲۵	−۰/۹۸	۰/۹۱	۰/۹۷

مدل نسبت به تغییرات آنها متوسط و زیاد است نیز در نظر گرفته شود. به‌عنوان مثال "مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی" و "مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی" که مقادیر Sc برای آنها بیشتر از ۶/۲ بود؛ مورد واسنجی قرار گرفتند و مقادیر آنها در جدول (۳) آورده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این جدول برخی پارامترهای ورودی مدل نشان داده شده‌اند.

واسنجی مدل AquaCrop

نتایج واسنجی مدل با استفاده از این پارامترها در جدول (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ مقادیر RMSE برای عملکرد قابل قبول است. مقدار به‌دست آمده برای NRMSE نیز نشان داد که دقت این مدل در این مرحله عالی است. نتایج آماره MBE برای این مدل نشان داد که این مدل دچار خطای کم‌برآوردی در شبیه‌سازی عملکرد شده است ولی با این وجود کارایی این مدل با توجه به دو آماره EF و d قابل قبول است. نتایج به‌دست آمده برای کارایی مصرف آب در مرحله واسنجی نیز نشان داد که مقادیر به‌دست آمده برای این پارامتر با توجه به دو آماره RMSE و MBE قابل قبول است. گرچه مدل AquaCrop در شبیه‌سازی این پارامتر دچار خطای بیش برآوردی شد. این نتایج با مشاهدات کاترجی و همکاران (۱۱) و حسن‌لی و همکاران (۸) مطابقت داشت. مقدار آماره NRMSE برای این پارامتر نشان داد که دقت این مدل در شبیه‌سازی این پارامتر خوب است. آماره‌های EF و d نیز بیانگر قابل قبول بودن کارایی این مدل بودند.

صحت‌سنجی مدل AquaCrop

نتایج مشابه برای مرحله صحت‌سنجی نیز نشان داد که مقادیر به‌دست آمده برای عملکرد قابل قبول است (جدول ۵). مقادیر آماره‌های RMSE، NRMSE و MBE نشان دادند که خطای شبیه‌سازی این پارامتر در این مرحله قابل قبول است. خطای به دست آمده توسط این آماره‌ها برای شبیه‌سازی کارایی مصرف آب نیز مطلوب بود. گرچه مدل AquaCrop در برآورد هر دو پارامتر عملکرد و کارایی مصرف آب در مرحله صحت‌سنجی دچار خطای کم‌برآوردی شد. آماره‌های EF و d نیز برای هر دو پارامتر نشان داد که کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی آنها مناسب است. همچنین مقایسه نتایج در سطوح و زمان‌های مختلف تنش نشان داد که مدل AquaCrop در تنش‌های آبی شدیدتر دقت کمتری داشت (جدول ۶). دقت این مدل در زمان (T۲) نیز نسبت به دو زمان دیگر کاهش یافت. ضریب تبیین بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی عملکرد و کارایی مصرف آب در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این مقادیر برای هر دو پارامتر عملکرد و کارایی مصرف آب قابل قبول است. پژوهشگران دیگر از جمله ماسانگانیس و همکاران (۱۳) و حسن‌لی و همکاران (۸) به‌ترتیب مقادیر ضریب تبیین ۰/۷۲ و ۰/۷۵ را برای عملکرد محصولات مختلف گزارش کردند.

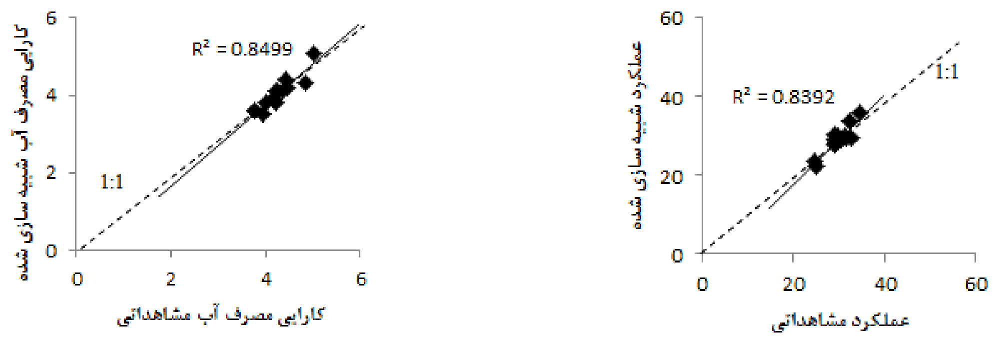
عملکرد سیب‌زمینی

با توجه به نتایج به‌دست آمده از مرحله واسنجی، مقادیر شبیه‌سازی عملکرد هر تیمار در مقابل مقادیر مشاهداتی آن

جدول ۶. مقادیر شاخص‌های آماری برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب سیب‌زمینی در تنش‌های مختلف

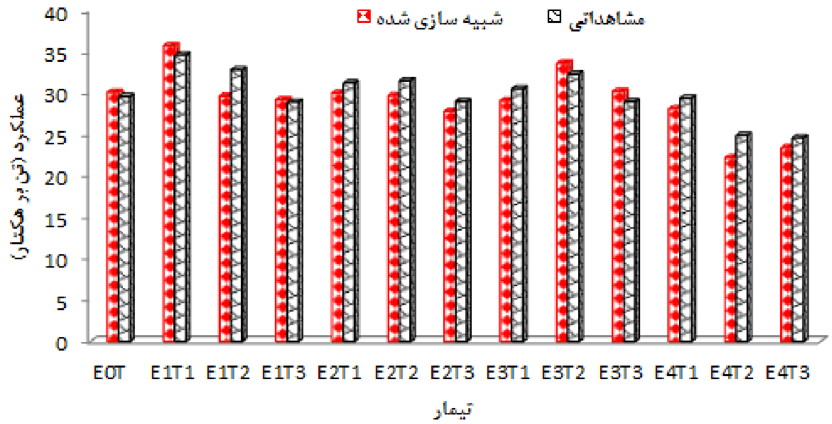
تیمار		عملکرد MBE (تن بر هکتار)	عملکرد RMSE (تن بر هکتار)	عملکرد EF	عملکرد NRMSE	عملکرد d	کارایی مصرف آب MBE (تن بر هکتار)	کارایی مصرف آب RMSE (تن بر هکتار)	کارایی مصرف آب EF	کارایی مصرف آب NRMSE	کارایی مصرف آب d
مقدار تنش آبی	E۱	−۰/۵۸	۱/۹۳	۰/۵۷	۰/۰۶	۰/۹۹	−۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۹۵	۰/۰۳	۰/۹۹
	E۲	−۱/۴۰	۱/۴۲	−۱/۱۴	۰/۰۴	۰/۹۹	−۰/۱۹	۰/۱۹	−۰/۹۹	۰/۰۴	۰/۹۹
	E۳	۰/۳۶	۱/۳۰	۰/۵۳	۰/۰۴	۰/۹۹	−۰/۳۶	۰/۳۹	−۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۹۹
	E۴	−۱/۷۳	۱/۸۶	۰/۴۶	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۱۸	۰/۲۱	−۱/۵۲	۰/۰۴	۰/۹۹
زمان اعمال تنش	T۱	−۰/۷	۱/۴۴	۰/۵۸	۰/۰۴	۰/۹۹	−۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۵۱	۰/۰۶	۰/۹۹
	T۲	−۱/۵۸	۲/۷۱	۰/۴۵	۰/۰۸	۰/۹۹	−۰/۲۳	۰/۳۴	−/۸۰	۰/۰۷	۰/۹۹
	T۳	−۰/۲۲	۱/۲۱	۰/۶۹	۰/۰۴	۰/۹۹	−۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۴۷	۰/۰۵	۰/۹۹

*: سطوح E۰، E۱، E۲، E۳ و E۴ به‌ترتیب نشان‌دهنده ۱۰۰، ۸۵، ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درصد تأمین نیاز آبی در کل دوره رشد و T۱، T۲ و T۳ به‌ترتیب نشان‌دهنده اعمال تنش در ۵۰ روز رشد اول (استقرار بذر و رشد رویشی)، ۵۰ روز دوم رشد (مرحله میانی) و ۵۰ روز سوم رشد (رسیدن فیزیولوژیکی گیاه) است.



شکل ۱. همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد (بر حسب تن بر هکتار) و کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) سیب‌زمینی (این شکل برای کلیه حالات تنش رسم شده است)

مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۲). همچنین مقادیر میانگین عملکرد و کارایی مصرف آب به تفکیک مقدار و زمان اعمال تنش نیز در جدول (۷) نشان داده شده است. متوسط اختلاف عملکرد شبیه‌سازی و مشاهداتی تیمارهای E۱، E۲، E۳ و E۴ به‌ترتیب برابر با ۰/۵۸، ۱/۴، ۰/۳۶ و ۱/۷ تن بر هکتار بود. این مقادیر برای تیمارهای T۱، T۲ و T۳ به‌ترتیب برابر با ۱/۲۵، ۲/۲۳ و ۰/۹۷ تن بر هکتار بود. این نتایج نشان داد که اگر تنش آبی در مرحله دوم رشد به این گیاه وارد شود؛ مدل AquaCrop دقت پایین‌تری نسبت به دوره‌های اول و سوم رشد برای شبیه‌سازی عملکرد آن دارد. تنش وارده در مرحله سوم باعث شد که خطای کمتری در شبیه‌سازی مشاهده شود. از طرف دیگر تنش آبی E۴ نیز بیشترین خطا را در شبیه‌سازی داشت. گرچه تحقیقات مختلف از جمله هنگ و همکاران (۹) و هسیائو و همکاران (۱۰) نشان داده است که خطای مدل AquaCrop با افزایش تنش آبی روند افزایشی دارد؛ لیکن در این مطالعه روند افزایشی مشاهده نشد. کمترین میزان خطا در تنش آبی E۳ و پس از آن در تنش آبی E۱ مشاهده شد. برهم‌کنش مقادیر تنش در مراحل مختلف رشد نیز نشان داد که کمترین و بیشترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی به‌ترتیب برابر با ۰/۳ (E۱T۳) و ۳/۱۵ (E۱T۲) تن بر هکتار بود. متوسط اختلاف



شکل ۲. مقایسه عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده سیب‌زمینی

جدول ۷. مقایسه میانگین نتایج عملکرد (تن بر هکتار) و کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) مدل AquaCrop در سطوح و زمان‌های مختلف تنش

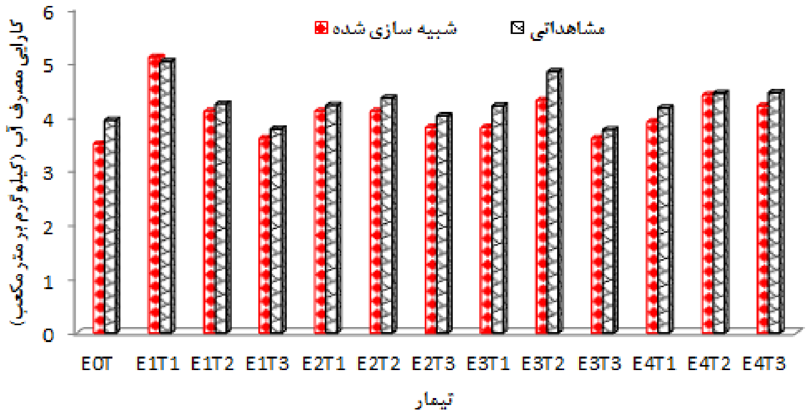
تیمار		عملکرد (تن بر هکتار)		کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	
		مشاهداتی	AquaCrop	مشاهداتی	AquaCrop
مقدار تنش آبی	E۰	۲۹/۶	۳۰/۱	۳/۹	۳/۵
	E۱	۳۲/۱	۳۱/۵	۳/۴	۴/۲
	E۲	۳۰/۵	۲۹/۱	۱/۴	۴/۰
	E۳	۳۰/۶	۳۰/۹	۴/۲	۳/۹
	E۴	۲۶/۳	۲۴/۵	۳/۴	۴/۱
زمان اعمال تنش	T۱	۳۱/۴	۳۰/۷	۳/۴	۴/۲
	T۲	۳۰/۳	۲۸/۸	۴/۵	۴/۲
	T۳	۲۷/۸	۲۷/۶	۳/۹	۳/۸

بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی تیر برابر با ۱/۴ تن در هکتار به‌دست آمد. به جز تیمار E۱T۲، در دو تیمار E۲T۲ و E۴T۲ نیز اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی بیشتر از ۱/۴ تن در هکتار بود. اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی در تیمار E۳T۲ نیز نزدیک به این مقدار و تنها هشت درصد از آن کمتر بود.

کارایی مصرف آب

مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی کارایی مصرف آب در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بیشتر تیمارها مقدار کارایی مصرف آب کمتر از مقادیر مشاهداتی بود که با نتایج در جدول (۵) مطابقت دارد. اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی برای تیمارهای E۱، E۲، E۳ و E۴ به‌ترتیب برابر با ۰/۲۴، ۰/۲۵، ۰/۱۹ و ۰/۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب بود. روند نسبتاً افزایشی در خطای مدل AquaCrop در مقادیر بسیار کم و بسیار زیاد تنش آبی مشاهده می‌شود.

بیشترین خطا در تنش آبی E۴ به‌دست آمد در نتیجه در این میزان تنش علاوه بر افزایش خطا در عملکرد، کارایی مصرف آب نیز افزایش یافت. اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی



شکل ۳. مقایسه کارایی مصرف آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده سیب‌زمینی

برای تیمارهای T۱، T۲ و T۳ بـه‌ترتیب برابـر بـا ۰/۱۹، ۰/۳۶ و ۰/۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. در نتیجه اعمـال تـنش در ابتدای دوره رشد سیب‌زمینی با خطای کمتری نسبت به سایر دوره‌های مواجه شد. بیشترین خطـا نیـز در اواسـط دوره رشـد به‌دست آمد. برهم‌کنش این دو تیمار نشـان داد کـه بیشـترین و کمترین خطا بـه‌ترتیب برابـر بـا ۰/۵۳ (E۳T۲) و ۰/۰۳ (E۴T۲) کیلوگرم بر مترمکعـب بـود. متوسـط خطـا نیـز برابـر بـا ۰/۲۳ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده در این مطالعه نشان داد کمترین میـزان خطـا در تنش آبی E۳ و پـس از آن در تـنش آبـی E۱ مشـاهده شـد. همچنین تنش وارده در مرحلـه دوم (T۲) سـبب افـزایش خطـا نسبت به دو مرحله دیگر رشد شد. نتـایج به‌دسـت آمـده بـرای کـارایی مصـرف آب نیـز نشـان داد کـه در تنش‌هـای E۴ و E۳ به‌ترتیب بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وجود داشت. در بین زمان‌های اعمـال تـنش نیز مقادیر شبیه‌سـازی شـده بـرای T۱ کمتـرین و T۲ بیشـترین اختلاف را با مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند. جمع‌بنـدی نتـایج نشان داد که مدل AquaCrop در برآورد عملکرد دچـار خطـای بیش‌بـرآوردی و در تعیـین کـارایی مصـرف آب دچـار خطـای کم‌برآوردی شد. مقادیر آماره‌های RMSE و NRMSE برای هر دو پارامتر عملکرد و کارایی مصرف آب نشان داد که این مـدل دارای خطای قابل قبول در شبیه‌سازی است. بنابراین می‌توان از این مدل برای شبیه‌سـازی مقـادیر مختلـف تـنش در زمان‌هـای گوناگون در طول دوره رشد سیب‌زمینی استفاده کرد.

منابع مورد استفاده

1. Afshar, A. and A. Neshat. 2013. Evaluation of AquaCrop computer model in the potato under irrigation management of continuity plan of Jiroft region, Kerman, Iran. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research* 1(12): 1669-1678.
2. Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage, Paper 33, Rome.
3. Ebrahimipak, N. A. 2014. Determination of the potato yield response factor (Ky) to deficit irrigation in different growth stages in shahrekord. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 4(15): 39-50.
4. Ebrahimipak, N. A., A. Egdernejad and D. Khodadadi Dehkordi. 2018. Evaluation of AquaCrop model to simulate corn yield under water deficit and superabsorbent application. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 8(3): 166-184. (In Farsi).
5. Eskandari, A., H. R. Khazaie, M. A. Nezami and M. Kafi. 2011. Study the effects of irrigation regimes on yield and some qualitative characteristics of three cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Water and Soil* 25(2): 240-247. (In Farsi).

6. Garcia-Vila, M. and E. Fereres. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Jornal of Agronomy* 36(1): 21-31.
7. Geerts, S. and D. Raes. 2009. Defecit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management* 96: 1275-1284.
8. Hassanli, M., P. Afrasiabi and H. Ebrahimian. 2015. Evaluation of AquaCrop vs Saltmed models to estimate crop yield and soil salinity. *Iranian Journal of Soil and Water* 46(3): 487-498. (In Farsi).
9. Heng, L. K., T. C. Hsiao, S. Evett, T. Howell and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal* 101(3): 488-498.
10. Hsiao, T. C., L. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal* 101(3): 448-459.
11. Katerji, N., P. Campi and M. Mastrorilli. 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.
12. Khoshravesh, M., A. Ghadamifiroozabadi, P. Shirazi and M. Najafimood. 2015. Cotton response simulation to dry and salinity stress by using of AquaCrop model. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 6(1): 166-179. (In Farsi)
13. Masanganise, J., K. Basira, B. Chipindu, E. Mashonjowa and T. Mhizha. 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.
14. Montaya, F., D. Camargo, J. F. Ortega, J. I. Corcoles and A. Dominguez. 2016. Evaluation of AquaCrop model for a potato crop under different irrigation conditions *Agricultural Water Management* 164(2): 267-280.
15. Shock, C. C. 2004. Efficient Irrigation Scheduling. Malheur Experiment Station, Oregon State University, Oregon, USA.
16. Yuan, B. Z., S. Nishiyama and Y. Kang. 2003. Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip- irrigated potato. *Agricultural Water Management* 63: 153-167.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 23, Winter 2020, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Evaluation of AquaCrop Model for the Simulation of Potato Yield and Water Use Efficiency under Different Water Stress Values in Different Growth Cycles

M. A. Ansari[1], A. Egdernezhad[1*] and N. A. Ebrahimipak[2]

(Received: March 12-2019 ; Accepted: June 25-2019)

Abstract

This study was conducted to evaluate AquaCrop for the simulation of potato yield and water use efficiency (WUE) under different water stress values at five levels (E0, E1, E2, E3 and E4, indicating 100, 85, 70, 50 and 30 percent of crop water needed, respectively) in three times during growth cycles (T1, T2, and T3, indicating 50, 100, and 150 days after sowing, respectively). The results showed that AquaCrop had overestimated and underestimated error for the simulation of yield and WUE, respectively. Based on RMSE and NRMSE values, the errors for yield and WUE were acceptable. The maximum and minimum error were also 0.3 (E1T3) and 3.15 (E1T2), respectively. The results obtained for WUE showed that the maximum and minimum were 0.53 (E3T2) and 0.03 (E4T2), respectively. The average differences between simulated and observed results (ADSO) of WUE for E1, E2, E3 and E4 were 0.24, 0.25, 0.19, and 0.44 $ton.ha^{-1}$, respectively; the ADSO of yield for T1, T2, and T3 was 0.19, 0.36, and 0.22 $ton.ha^{-1}$, respectively. Therefore, AquaCrop showed a high error for WUE when water stress was increased and crop was in its initial crop growth.

Keywords: AquaCrop model, Potato yield, Crop modeling, Water stress

1. Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
2. Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
*: Corresponding author: a_eigder@ymail.com