

مقاله علمی-پژوهشی

## ارزیابی مدل‌های AquaCrop و WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی تحت شرایط مختلف تنش آبی

محمدعلی انصاری<sup>۱</sup>، اصیلان اگدرنژاد<sup>۲\*</sup> و نیازعلی ابراهیمی پاک<sup>۳</sup>

### چکیده

با توجه به اهمیت گیاه سیب‌زمینی، شبیه‌سازی عملکرد آن تحت تنش‌های آبی با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهی به محققان کمک می‌کند تا برنامه‌ریزی بهتری برای آبیاری آن انجام دهند. بدین منظور، این تحقیق برای ارزیابی دقت دو مدل آب محور AquaCrop و کرین محور WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی تحت شرایط کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد انجام شد. از این رو، داده‌های برداشت شده از یک مزرعه تحقیقاتی در چهارتخته شهرکرد در دو سال زراعی مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها شامل پنج سطح تنش آبی (E0، E1، E2، E3 و E4 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ۱۰۰، ۸۵، ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درصد تأمین نیاز آبی) و سه زمان اعمال تنش (T1، T2 و T3 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ۵۰ روز رشد اول (استقرار بذر و رشد رویشی)، دوم (رشد کامل) و سوم (رسیدن گیاه) از کل دوره رشد گیاه بود. مقادیر آماره RMSE برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی توسط مدل‌های AquaCrop و WOFOST به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۲/۲ تن در هکتار بود. کارایی این دو مدل براساس آماره EF به ترتیب برابر با ۰/۹۵ و ۰/۹۸ بود. با توجه به آماره‌های MBE و NRMSE، دقت مدل AquaCrop بهتر از مدل WOFOST بود؛ بنابراین با توجه به تعداد داده‌های کمتر، دقت بهتر و واسنجی راحت‌تر مدل AquaCrop، کاربرد این مدل برای شبیه‌سازی سیب‌زمینی پیشنهاد می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** بهره‌وری آب، شبیه‌سازی رشد گیاهی، کم‌آبیاری، مدل آب‌محور، مدل کرین‌محور

### مقدمه

روش‌های مختلف می‌تواند اعمال شود و بررسی همه‌ی روش‌های ممکن مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار باشد. وجود این تناقض سبب شده است تا محققان از روش‌های غیرمستقیم برای بررسی سناریوهای مختلف کم‌آبی بر محصولات کشاورزی استفاده کنند. نتیجه این روش‌ها سبب پیدایش مدل‌های مختلف گیاهی به منظور شبیه‌سازی اثرات مختلف تنش آبی بر عملکرد گیاهان بوده است (Geerts and Raes, 2009; Raes et al., 2009). از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل WOFOST اشاره کرد که به‌عنوان یک مدل کرین‌محور توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی با همکاری دانشگاه واگنینگن و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک در

کمبود منابع آب در ایران و اهمیت افزایش بهره‌وری آب سبب شده است تا محققان به کم‌آبیاری گیاهان توجه بیشتری نشان دهند (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷). کم‌آبیاری به

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

\* نویسنده مسئول: (Email: a\_eigder@gmail.com)

<sup>۳</sup> دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۶

جو، ذرت، چغندر قند و ذرت نیز با استفاده از این مدل مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است (Heng et al., 2009; Hsiao et al., 2009; Araya et al., 2010; Stricevic et al., 2011; Masanganise et al., 2013; Katerji et al., 2013) سیب‌زمینی<sup>۲</sup> به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع غذایی در جهان و ایران، توجه برخی محققان را برای ارزیابی مدل‌های گیاهی جهت شبیه‌سازی عملکرد آن به خود جلب کرده است. در خصوص مدل WOFOST می‌توان به مطالعات دیوا و همکاران اشاره کرد (Dua et al., 2013 & 2014). گارسیا و فررس و موتویا نیز با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای در جنوب اسپانیا به ارزیابی مدل AquaCrop تحت تأمین نیاز آبیاری ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد پرداختند (Garcia & Ferreres, 2012; Montoya et al., 2016). گرچه مطالعات نشان داده است که گیاه سیب‌زمینی به تنش آبی حساس است (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸)؛ با این‌وجود به دلیل شرایط اقلیمی کشور، زراعت آن در بسیاری از استان‌ها با اعمال تنش آبی مواجه است (ابراهیمی‌پاک، ۱۳۹۳؛ خیری‌شلمزاری و همکاران، ۱۳۹۹). گزارش‌های منتشر شده از واکنش این گیاه زراعی به شرایط مختلف حاکی از آن است که در شرایط اقلیمی و زراعی مختلف، این گیاه واکنش متفاوتی را به کم‌آبی نشان می‌دهد. اکثر مطالعات حاکی از آن است که در زمان‌های پیدایش غده و اندکی پس‌از آن بیشترین حساسیت گیاه سیب‌زمینی نسبت به تنش آبی وجود دارد. به همین دلیل اعمال تنش آبی در این دوره سبب کاهش شدید عملکرد سیب‌زمینی می‌شود.

گرچه نتایج انتشار یافته از تحقیقات اشاره شده در بالا بیانگر این است که دو مدل WOFOST و AquaCrop از دقت مطلوبی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان برخوردار هستند، لیکن نتایج مدل‌های گیاهی همواره با خطا همراه است و دقیقاً مشابه عملکرد مزرعه نیست. همچنین با توجه به ماهیت متفاوت این دو مدل، انتظار می‌رود که واکنش متفاوتی نسبت به شرایط یکسان مزرعه‌ای به‌منظور تعیین نتایج داشته باشند. به همین دلیل نیاز است مدلی برای شبیه‌سازی انتخاب شود که دقت

طی مطالعات جهانی امنیت غذا و پتانسیل جهانی تولید غذا در دانشگاه واگنینگن هلند توسعه یافت (Bouman et al., 1996). اهمیت این مدل گیاهی سبب شده است تا محققان به ارزیابی آن به‌منظور شبیه‌سازی گیاهان مختلف از آن استفاده کنند. در تحقیقی که توسط ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۸) انجام شد، از این مدل برای شبیه‌سازی کلزا در منطقه قزوین استفاده کردند. نتایج این محققان نشان داد که خطای مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده کلزا به ترتیب برابر با ۱۰ و ۴ درصد بود. این ویژگی سبب شده است تا گیاهان زراعی دیگر از جمله گندم و جو (Eitzinger et al., 2004)، ذرت (Yang et al., 2004)، گندم (Marletto et al., 2006; Song et al., 2007) و برنج (Confalonieri & Bocchi, 2005) با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شوند. مدل AquaCrop نیز یکی دیگر از مدل‌های گیاهی است که به‌عنوان یک مدل آب‌محور توسط سازمان خواروبار کشاورزی (فائو) بسط داده شده است. این مدل به دلیل محیط کاربرپسند، سادگی، نیاز به داده‌های کمتر نسبت به سایر مدل‌های مشابه و دقت قابل قبول توسط محققان مورد استقبال قرار گرفته است (Heng et al., 2009). مدل AquaCrop نیز همانند مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیقی که توسط ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از این مدل روی گیاه زعفران انجام شد؛ مشاهده گردید که دقت این مدل براساس آماره‌های NRMSE و MBE به ترتیب برابر با ۹ درصد و ۰/۴۸ کیلوگرم در هکتار بود. موسوی و همکاران (۱۳۹۸) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب برنج استفاده کردند و نشان دادند که خطای این مدل برای شبیه‌سازی این دو پارامتر به ترتیب برابر با ۱۴ و ۱۵ درصد بود. در تحقیقی دیگر، سیاحی و همکاران (۱۳۹۹) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند استفاده کردند. این محققان گزارش کردند که دقت و کارایی این مدل برای شبیه‌سازی این گیاه زراعی به ترتیب برابر با ۱/۷۹ تن در هکتار و ۰/۹۹ بود. به دلیل توانایی این مدل، گیاهان زراعی مانند کلزا،

<sup>۲</sup> *Solanum tuberosum L.*

به‌منظور واسنجی این مدل‌ها و سال دوم نیز به‌منظور صحت‌سنجی آن‌ها مورداستفاده قرار گرفت. در این مزرعه آزمایشی ۴۵ کرت برای ۱۵ تیمار در نظر گرفته شد و آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به‌صورت کرت‌های خردشده انجام شد. مساحت هر کرت برابر با ۱۵ مترمربع بود و بذر به میزان ۲۵۰۰ تن در هکتار در نظر گرفته شد. تیمارهای موردنظر شامل مقدار تنش آبی در پنج سطح E0, E1, E2, E3 و E4 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ۱۰۰، ۸۵، ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درصد تأمین نیاز آبی و زمان اعمال تنش در سه نوبت T1, T2 و T3 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ۵۰ روز رشد اول (استقرار بذر و رشد رویشی)، دوم (رشد کامل) و سوم (رسیدن گیاه) از کل دوره رشد گیاه بود. در زمان برداشت، با حذف اثر حاشیه‌ای از مزارع آزمایشی نمونه‌برداری شد. سپس وزن غده برای هر تیمار با استفاده از ترازو سنجیده شد. بهره‌وری آب نیز مطابق به رابطه (۱) محاسبه شد.

$$WUE = \frac{Y}{W} \quad (1)$$

که در این رابطه، WUE بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y عملکرد (کیلوگرم) و W مقدار آب مصرفی (مترمکعب) است. مشخصات خاک آزمایش و آب آبیاری به-ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

بالتری در شرایط موردنظر داشته باشد. این موضوع سبب شده است تا برخی محققان به مقایسه این دو مدل در شبیه‌سازی یک گیاه زراعی بپردازند. به‌عنوان مثال تودوروویچ و همکاران به مقایسه این دو مدل برای شبیه‌سازی عملکرد آفتاب‌گردان پرداختند (Todorovic et al., 2009). در تحقیقی دیگر، هووانگ و همکاران از این دو مدل برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت استفاده کردند (Huang et al., 2017). با توجه به اهمیت گیاه سیب‌زمینی، نیاز است دقت دو مدل AquaCrop و WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب این گیاه زراعی تعیین و با یکدیگر مقایسه شود. با توجه به این موضوع، هدف پژوهش حاضر شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی با استفاده از دو مدل رشد گیاهی WOFOST و AquaCrop تحت مدیریت‌های مختلف آب آبیاری در طول دوره رشد است.

## مواد و روش‌ها

### نحوه آزمایش

به‌منظور مقایسه دو مدل AquaCrop و WOFOST از داده‌های برداشت‌شده یک مزرعه تحقیقاتی در چهارتخته شهرکرد واقع در طول جغرافیایی ۵۶° ۵۰' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲° ۱۸' شمالی و ارتفاع ۲۰۶۶ متر از سطح دریا استفاده شد. این داده‌ها از دو سال زراعی (۱۳۷۷-۱۳۷۸) کاشت سیب‌زمینی رقم آگریا برداشت شدند به‌طوری‌که سال اول

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

عمق (سانتی‌متر)	پتاسیم (پی پی ام)	فسفر (پی پی ام)	ازت کل (درصد)	کربن آلی (درصد)	EC (دسی‌زیمنس بر متر)	pH	رطوبت در	رطوبت در	جرم
							ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی دائم	مخصوص ظاهری
۰-۳۰	۳۸۴	۸/۱۵	۰/۷۲	۰/۵۵	۰/۴۵	۸/۰۷	۲۱/۴	۱۱/۶	۱/۴۸
۳۰-۶۰	۲۹۳	۷/۷	۰/۷۲	۰/۴۸	۰/۳۲	۸/۰۷	۲۱/۴	۱۲/۲	۱/۴۸

جدول ۲- خصوصیات آب آبیاری

EC (دسی‌زیمنس بر متر)	pH	کلسیم	منیزیم	سدیم	پتاسیم	کربنات	بی‌کربنات	کلر	سولفات
۰/۳۷	-	۳/۴	۳/۴	۰/۷	-	-	۲/۹	۰/۴	۰/۸

رابطه (۴) برای تعیین میزان جذب و رشد گیاه در شرایط کم آبیاری استفاده می‌کند:

$$A = \frac{T_a}{T_p} \times A_p \quad (4)$$

در این رابطه،  $A$  جذب واقعی (کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر هکتار بر روز)،  $A_p$  جذب پتانسیل (کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر هکتار بر روز)،  $T_a$  تعرق واقعی (میلی‌متر بر روز) و  $T_p$  تعرق پتانسیل (میلی‌متر بر روز) است.

### مدل AquaCrop

مدل AquaCrop با استفاده از تبخیر-تعرق (رابطه ۵) و تفکیک آن به دو جزء تبخیر از سطح خاک ( $E$ ) و تعرق از سطح گیاه ( $Tr$ ) به شبیه‌سازی عملکرد می‌پردازد. البته در این مدل مفهوم پوشش تاج گیاه بر اساس رابطه (۶) جایگزین شاخص سطح برگ شده است.

$$\left( \frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left( \frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (5)$$

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (6)$$

در این رابطه،  $Y_x$  و  $Y_a$  به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول (تن بر هکتار)،  $ET_x$  و  $ET_a$  به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه (میلی‌متر بر روز) و  $K_y$  ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق،  $CC$  پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد)،  $CC_0$  پوشش تاج اولیه (درصد)،  $CGC$  ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و  $t$  زمان (روز) می‌باشد. بدین ترتیب میزان تعرق گیاه بر اساس پوشش تاج از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (7)$$

در این رابطه،  $K_s$  و  $K_c$  به ترتیب ضرایب تنش آبی (-) و گیاهی (-) هستند. میزان تولید روزانه شاخص برداشت نیز از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

عملیات کاشت در اوایل خرداد انجام و برداشت محصول نیز در اواخر مهر انجام شد. به منظور اعمال تنش آبی، از یک لایسی متر زهکش دار در مجاورت مزرعه مورد نظر به ابعاد قطر ۳ متر و عمق

۲/۵ متر استفاده شد. شرایط خاک و آب آبیاری مورد استفاده در این لایسی متر، مشابه کرت‌های مورد آزمایش بود. این لایسی متر دارای قطر ۳ متر و عمق ۲/۵ متر بود با تعیین مقدار نیاز آب در لایسی متر بر اساس رابطه (۲)، آب آبیاری مورد نیاز با استفاده از لوله به هر کرت منتقل و با استفاده از کنتور اندازه‌گیری و سپس به صورت ثقلی در سطح کرت پخش می‌گردید.

$$ET_c = I + R - D \pm (Sw_2 - Sw_1) \quad (2)$$

که 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 لایه خاک در انتهای دوره اندازه‌گیری (میلی‌متر) بود.

### مدل WOFOST

مدل WOFOST میزان رشد محصولات را با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آورد.

$$\Delta W = C_e \times (A - R_m) \quad (3)$$

در این رابطه،  $\Delta W$  میزان رشد (کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر هکتار بر روز)،  $A$  میزان ناخالص جذب (کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر هکتار بر روز)،  $R_m$  میزان تعرق نگهداری (کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر هکتار بر روز) و  $C_e$  راندمان تبدیل جذب به زیست‌توده (-) است. این مدل از معادله ساده نشان داده شده در

شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) در نظر گرفته شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۱۰) تا (۱۵) نشان داده شده‌اند.

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

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

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (12)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (14)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

که در این روابط P<sub>i</sub>: مقدار شبیه‌سازی شده، O<sub>i</sub>: مقدار اندازه‌گیری شده،  $\bar{P}$ : میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده،  $\bar{O}$ : میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n: برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده‌ی دقت عالی مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۳، ۰/۱-۰/۲، و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل رشد گیاهی موردنظر مقدار پارامتر موردنظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد پارامتر موردنظر عدد کوچک‌تری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و

$$HI_i = \frac{HI_{ini} HI_0}{HI_{ini} + (HI_0 - HI_{ini}) \exp^{-(HIGC)t}} \quad (8)$$

در این رابطه، HI شاخص برداشت در روز t<sup>ام</sup> (-)، HI<sub>0</sub> شاخص برداشت مرجع (-)، شاخص برداشت اولیه (-)، ضریب رشد شاخص برداشت (عکس روز) و t زمان (روز) است.

## تحلیل حساسیت

به منظور ارزیابی هر دو مدل گیاهی، ابتدا حساسیت آن‌ها به پارامترهای ورودی با استفاده از رابطه ارائه شده توسط گارسیا و ریز بررسی شد (Geerts & Raes, 2009).

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (9)$$

که در این رابطه، S<sub>c</sub> ضریب حساسیت بدون بعد، P<sub>m</sub> مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P<sub>b</sub> مقدار برآورد پارامتر موردنظر براساس داده ورودی پایه می‌باشد. برای تحلیل حساسیت مدل به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از عوامل ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده می‌شود و بقیه پارامترها ثابت نگه‌داشته می‌شوند (Geerts & Raes, 2009). در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، S<sub>c</sub> > ۱۵ حساسیت بالا، ۱۵ < S<sub>c</sub> < ۲ حساسیت متوسط، S<sub>c</sub> < ۲ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (Geerts & Raes, 2009). در این مطالعه، پارامترهایی با حساسیت بیشتر از ۲ به منظور واسنجی این مدل در نظر گرفته شدند.

## واسنجی و صحت‌سنجی

برای واسنجی از داده‌های سال اول استفاده شد. پس از واسنجی، با استفاده از داده‌های سال دوم صحت‌سنجی انجام شد. برای تعیین میزان دقت و کارایی هر دو مدل مورد استفاده، در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)،

از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برآزش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار  $R^2$  از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برآزش بهتر داده‌ها می‌باشد (ایوزیان و واقفی، ۱۳۸۹).

## نتایج و بحث

### تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت دو مدل AquaCrop و WOFOST نسبت به تغییرات برخی از پارامترهای ورودی در جدول (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود؛ مدل AquaCrop نسبت به تغییرات افزایشی و کاهش "رطوبت در

ظرفیت زراعی" و مقادیر افزایشی "مدت زمان کاشت تا برداشت محصول" و "مدت‌زمان کاشت تا دوره پیری" حساسیت زیاد داشت. این مدل نسبت به تغییرات افزایشی و کاهش "ضریب گیاهی برای تعرق" و مقادیر کاهش "رطوبت در حالت اشباع" و "عمق مؤثر ریشه" حساسیت کم داشت. حساسیت این مدل نسبت به تغییرات سایر پارامترها متوسط بود. مدل WOFOST نسبت به تغییرات اکثر پارامترها حساسیت متوسط داشت و تنها برای تغییرات پارامتر "کارایی ماده جذب‌شده به ساقه" حساسیت کم داشت. با توجه به این نتایج، واسنجی مدل‌های AquaCrop و WOFOST انجام شد.

جدول ۳- ضریب حساسیت برخی پارامترهای مدل‌های رشد گیاهی AquaCrop و WOFOST

پارامتر	مقدار برای +۲۵٪	مقدار برای -۲۵٪	میزان حساسیت
مدل AquaCrop			
رطوبت در FC	۱۵/۷	۱۵/۲	بالا
رطوبت در PWP	۷/۵	۱۰/۵	متوسط
رطوبت در حالت اشباع	۲/۶	۱/۴	متوسط-کم
ضریب گیاهی برای تعرق	۰/۲۳	۲/۴	کم-متوسط
عمق مؤثر ریشه	۲/۶	۱/۴	متوسط-کم
زمان از کاشت تا جوانه‌زنی	۶/۹	۶/۲	متوسط
زمان از کاشت تا رسیدن به حداکثر توسعه تاج	۸/۱	۱۰/۹	متوسط
زمان از کاشت تا برداشت	۲۰/۵	۱/۲	زیاد-متوسط
زمان از کاشت تا پیری	۲۲/۱	۴/۵	زیاد-متوسط
مدل WOFOST			
ضریب نابودی نور مرئی پخش‌شده	۷/۴	۱۲/۸	متوسط
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۵/۱	۸/۹	متوسط
کارایی تبدیل ماده غذایی به برگ	۹/۲	۴/۵	متوسط
کارایی تبدیل ماده غذایی به ارگان ذخیره‌ای	۴/۸	۱۲/۵	متوسط
کارایی تبدیل ماده غذایی به ریشه	۷/۱	۶/۰	متوسط
کارایی تبدیل ماده غذایی به ساقه	۰/۱۵	۰/۴۴	کم

### شبیه‌سازی عملکرد توسط مدل‌های گیاهی

نتایج به‌دست‌آمده از واسنجی در جدول (۴) نشان داده‌شده است. با استفاده از این پارامترها، واسنجی مدل‌های موردنظر انجام و با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل

AquaCrop در تعیین عملکرد دارای خطای کم‌برآوردی به میزان ۰/۲۵ تن در هکتار بود. همچنین مقادیر آماره‌های RMSE و NRMSE نشان داد که دقت این مدل در برآورد عملکرد قابل‌قبول است. کارایی این مدل نیز با توجه به مقادیر

کشت انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نیز با نتایج مشاهداتی مقایسه شد. نتایج برای مدل AquaCrop نشان داد که این مدل همانند مرحله واسنجی دارای خطای کم‌برآوردی به میزان ۰/۷۳ تن در هکتار بود. همچنین دقت این مدل و کارایی آن نیز با توجه به آماره‌های ارائه‌شده در جدول (۵) مطلوب بود. نتایج به‌دست‌آمده برای مدل WOFOST نشان داد که این مدل دارای خطای بیش‌برآوردی به میزان ۰/۲۲ تن در هکتار بود و دقت و کارایی آن نیز مطلوب بود.

آماره‌های EF و d مطلوب بود. نتایج مشابه برای مدل WOFOST نشان داد که این مدل دارای خطای بیش‌برآوردی به میزان ۰/۱۷ تن در هکتار بود. همچنین دقت این مدل با توجه به آماره RMSE قابل‌قبول بود و آماره NRMSE نیز نشان داد که دقت این مدل عالی بود. مقادیر آماره‌های EF و d نیز نشان داد که کارایی این مدل قابل‌قبول بود؛ بنابراین، صحت‌سنجی مدل‌های AquaCrop و WOFOST با استفاده از پارامترهای واسنجی‌شده و داده‌های مشاهداتی سال دوم

جدول ۴- برخی پارامترهای ورودی مدل‌های رشد گیاهی AquaCrop و WOFOST

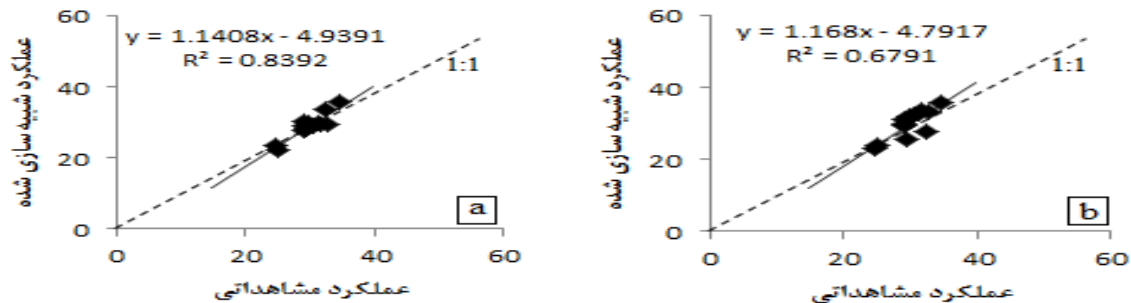
توضیحات	مقدار	واحد	پارامتر
مدل AquaCrop			
پیش‌فرض	۲	درجه سانتی‌گراد	دمای پایه
پیش‌فرض	۲۶	درجه سانتی‌گراد	دمای بیشینه
واسنجی	۲۰	گرم بر مترمربع	بهره‌وری آب نرمال‌شده
واسنجی	۵	درصد	پوشش گیاهی اولیه
واسنجی	۹۲	درصد	حداکثر پوشش گیاهی
واسنجی	۰/۲	-	آستانه بالای تخلیه رطوبت خاک برای گسترش پوشش گیاهی
واسنجی	۰/۸	-	آستانه پایین تخلیه رطوبت خاک برای گسترش پوشش گیاهی
واسنجی	۱۵/۵	درصد روز	ضریب گسترش پوشش گیاهی
واسنجی	۱/۹	درصد روز	ضریب کاهش پوشش گیاهی
واسنجی	۱/۴	درصد روز	ضریب گیاهی برای تعرق
مدل WOFOST			
واسنجی	۰-۰، ۰-۱	-	ضریب نابودی نور مری
واسنجی	۱-۰، ۲-۰	کیلوگرم در هکتار بر ژول مربع	کارایی مصرف نور برای یک برگ
واسنجی	۰/۷۲	کیلوگرم بر کیلوگرم	کارایی تبدیل ماده غذایی به برگ
واسنجی	۰/۷۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	کارایی تبدیل ماده غذایی به ارگان ذخیره‌ای
واسنجی	۰/۸۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	کارایی تبدیل ماده غذایی به ریشه
واسنجی	۰/۶۹	کیلوگرم بر کیلوگرم	کارایی تبدیل ماده غذایی به ساقه
واسنجی	۳۰-۰، ۰-۰	کیلوگرم بر هکتار بر ساعت	بیشترین نرخ تولید دی‌اکسید کربن
واسنجی	۱/۰	-	فاکتور تصحیح برای تعرق

جدول ۵- نتایج آماره‌ها برای مقایسه عملکرد مدل‌های رشد گیاهی AquaCrop و WOFOST

مدل گیاهی	مرحله	RMSE (تن در هکتار)	NRMSE	MBE (تن در هکتار)	EF	d
AquaCrop	واسنجی	۲/۱	۰/۰۹	-۰/۲۵	۰/۹۹	۰/۹۹
	صحت‌سنجی	۱/۵	۰/۰۵	-۰/۷۳	۰/۹۵	۰/۹۹
WOFOST	واسنجی	۲/۰	۰/۱۰	-۰/۱۷	۰/۹۹	۰/۹۹
	صحت‌سنجی	۲/۲۵	۰/۰۷	-۰/۲۲	۰/۹۸	۰/۹۹

داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، ضریب تعیین برای مدل AquaCrop بهتر از مدل WOFOST است.

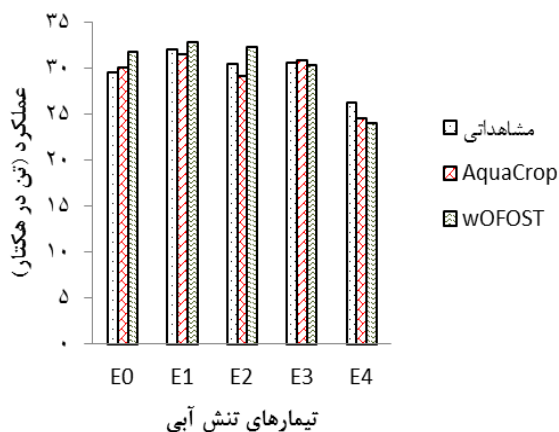
همبستگی بین مقادیر نتایج مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل های AquaCrop و WOFOST در شکل (۱) نشان



شکل ۱- همبستگی مقادیر عملکرد (تن در هکتار) مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل AquaCrop (a) و مدل WOFOST (b) در سال دوم در مرحله صحت سنجی

شبیه سازی شده با AquaCrop وجود داشت. در این مرحله مقدار نتایج شبیه سازی ۵/۲ درصد نسبت به مقدار مشاهداتی کمتر بود. نتایج شبیه سازی در مراحل T3 و T1 به ترتیب ۲/۲ و ۰/۸ درصد نسبت به مقادیر مشاهداتی کمتر بود. نتایج شبیه سازی با استفاده از مدل WOFOST نیز نشان داد که بیشترین اختلاف با مقادیر مشاهداتی در زمان T2 بود. در این مرحله از رشد، عملکرد شبیه سازی شده به میزان ۲/۱ درصد کمتر از مقدار مشاهداتی به دست آمد.

با توجه به اینکه نتایج صحت سنجی قابل قبول بود، نتایج شبیه سازی شده توسط هر دو مدل AquaCrop و WOFOST در مقابل مقادیر مشاهداتی مقایسه شد. این مقایسه بر اساس تیمارهای مقدار تنش (شکل ۲)، زمان تنش (شکل ۳) و برهم-کش این دو تیمار (شکل ۴) بود. نتایج به دست آمده از مقایسه نتایج مدل های مورد بررسی و مقادیر مشاهداتی بر اساس تیمار مقدار تنش نشان داد که اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی با AquaCrop برای تیمارهای E0، E1، E2، E3 و E4 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۵۸، ۱/۴، ۰/۳۶ و ۱/۷۳ تن در هکتار بود. همین مقادیر برای مدل WOFOST به ترتیب برابر با ۲/۲۶، ۰/۸۱، ۱/۷۵، ۰/۱۷ و ۲/۱۶ تن در هکتار بود. در تنش های آبی E4 و E3 دقت مدل AquaCrop بهتر از مدل WOFOST بود ولی در تنش های آبی خفیف تر رابطه مشخصی بین نتایج شبیه سازی مشاهده نشد. این نتایج نشان داد که در تنش های آبی شدید دقت مدل AquaCrop بهتر از مدل WOFOST است. این نتایج با مطالعات هووانگ و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت داشت. این محققان نیز گزارش کردند که مدل AquaCrop به دلیل ماهیت آب محور بودن، دقت بیشتری در شرایط تنش آبی داشت.



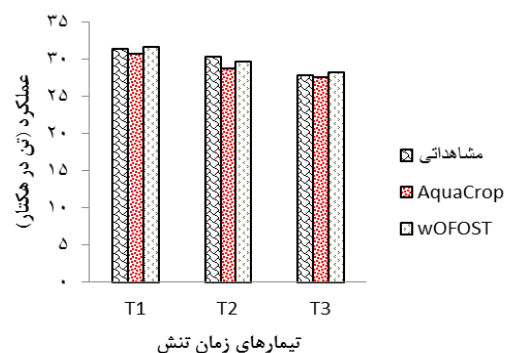
شکل ۲- مقایسه عملکرد (تن در هکتار) شبیه سازی شده توسط مدل های AquaCrop و WOFOST با مقادیر مشاهداتی در مقادیر مختلف تنش آبی در سال دوم در مرحله صحت سنجی

نتایج در زمان های T1، T2 و T3 نشان داد که در مرحله T2 بیشترین مقدار اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و

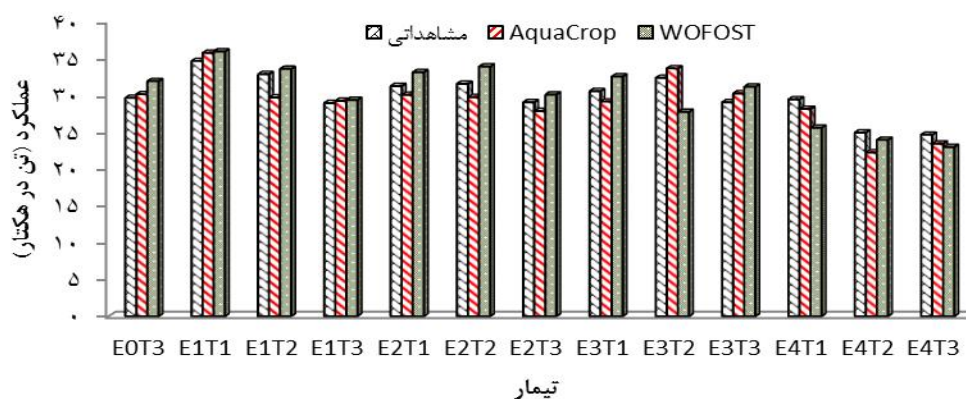


متوسط اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده با این مدل و مقادیر مشاهداتی نیز برابر با ۱/۴۱ تن در هکتار بود. به جز تیمار E1T2، اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده در سه تیمار دیگر (شامل E2T2، E3T1 و E4T2) نیز بیشتر از ۱/۴۱ تن در هکتار مشاهده شد. بیشترین، کمترین و متوسط اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده با WOFOST و مقادیر مشاهداتی به ترتیب برابر با ۴/۶ (E3T2)، ۰/۴۲ (E1T3) و ۱/۹۳ تن در هکتار بود. همچنین نتایج حاکی از این بود که این اختلاف در اکثر تیمارها کمتر از ۱/۹۳ تن در هکتار بود. این نتایج نشان داد که گرچه نتایج شبیه‌سازی عملکرد برای هر دو مدل تقریباً یکسان بود ولی در حالت کلی دقت مدل AquaCrop از مدل WOFOST بهتر بود. این نتایج با مشاهدات تودورویک و همکاران مطابقت داشت. این محققان نیز با مقایسه این دو مدل در شبیه‌سازی آفتابگردان گزارش کردند که دقت این دو مدل تقریباً یکسان بود. با این وجود بیان کردند که مدل AquaCrop به دلیل نیاز به اطلاعات ورودی کمتر برای شبیه‌سازی و واسنجی راحت‌تر این مدل نسبت به مدل WOFOST ارجحیت دارد (Todorovic et al., 2009). این موضوع به خصوص در شرایط کشور ایران که داده‌ها موردنیاز مدل‌های گیاهی به‌سختی جمع‌آوری می‌شود یا معمولاً در دسترس نیست؛ می‌تواند قابل توجه باشد.

اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST و مشاهداتی در زمان‌های T1 و T3 به ترتیب برابر با ۱/۰ و ۱/۷ درصد بود. این نتایج نشان داد که هر دو مدل AquaCrop و WOFOST در شبیه‌سازی مرحله دوم از رشد سیب‌زمینی خطای زیادی داشتند. احتمالاً علت آن حساسیت این مرحله از رشد گیاه سیب‌زمینی به تنش آبی باشد. نتایج شبیه‌سازی برهم‌کنش اثر مقدار و زمان تنش با مدل AquaCrop نشان داد که بیشترین و کمترین میزان اختلاف بین این مقادیر با نتایج مشاهداتی به تیمارهای E1T2 (۱۵/۳ تن در هکتار) و E1T3 (۳/۰ تن در هکتار) اختصاص داشت.



شکل ۳- مقایسه عملکرد (تن در هکتار) شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های AquaCrop و WOFOST با مقادیر مشاهداتی در مراحل مختلف رشد در سال دوم در مرحله صحت‌سنجی



شکل ۴- مقایسه عملکرد (تن در هکتار) شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های AquaCrop و WOFOST با مقادیر مشاهداتی در سال دوم در مرحله صحت‌سنجی

### شبیه‌سازی بهره‌وری آب توسط مدل‌های گیاهی

در جدول (۶) مقادیر شاخص‌های آماری برای بهره‌وری آب سیب‌زمینی در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ذکر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو مدل مورداستفاده مقدار کارایی مدل براساس آماره‌های EF و d قابل قبول است. همچنین خطای هر دو مدل با استفاده از آماره NRMSE کمتر از ۰/۱ بود و در محدوده عالی قرار داشت.

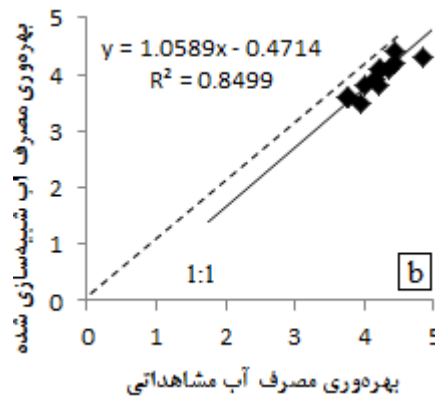
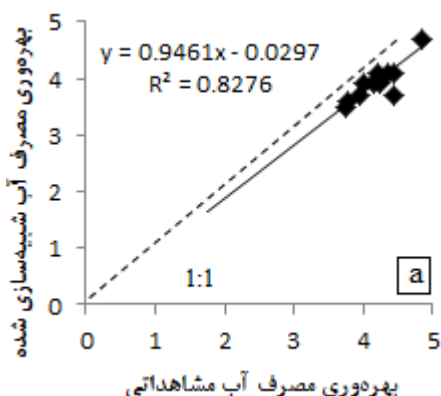
مقادیر آماره MBE برای مدل AquaCrop در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۰/۲۵- و ۰/۲۲- کیلوگرم بر مترمکعب و برای مدل WOFOST به ترتیب برابر با ۰/۱۳- و ۰/۲۰- بود؛ بنابراین، دقت مدل AquaCrop بهتر از مدل WOFOST بود و مدل‌های مورد مطالعه در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی دارای خطای کم‌برآوردی بودند.

جدول ۶- نتایج آماره‌ها برای مقایسه بهره‌وری آب مدل‌های رشد گیاهی AquaCrop و WOFOST

مدل گیاهی	مرحله	RMSE (تن در هکتار)	NRMSE	MBE (تن در هکتار)	EF	d
AquaCrop	واسنجی	۰/۴۰	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۹۹	۰/۹۹
	صحت‌سنجی	۰/۲۷	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۹۷	۰/۹۹
WOFOST	واسنجی	۰/۳۵	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۹۶	۰/۹۹
	صحت‌سنجی	۰/۵۰	۰/۰۸	۰/۲۰	۰/۹۵	۰/۹۹

گرچه ضریب تبیین مدل AquaCrop اندکی بالاتر از WOFOST بود.

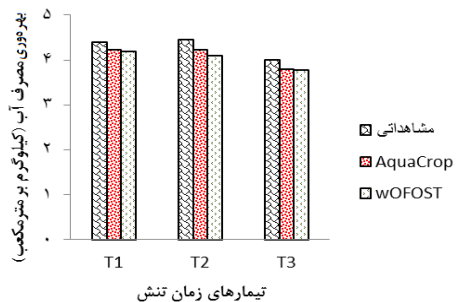
همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بهره‌وری آب توسط دو مدل AquaCrop و WOFOST در شکل (۵) نشان داده شده است. مقادیر آماره R<sup>2</sup> نشان داد که هر دو مدل توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی این پارامتر داشتند



شکل ۵- همبستگی مقادیر بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop (a) و مدل WOFOST (b) در سال دوم در مرحله صحت‌سنجی

AquaCrop به ترتیب برابر با ۰/۴۴ و ۰/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این مقادیر به ترتیب در تیمارهای E4 و E2 مشاهده شد. این مقادیر برای مدل WOFOST به ترتیب برابر با ۰/۴۳ و ۰/۰۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود و در تیمارهای E0 و

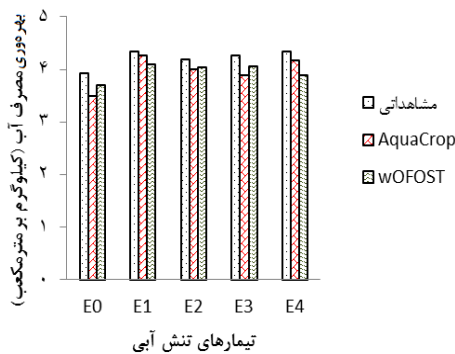
نتایج مقایسه مقادیر به دست آمده از هر دو مدل مورداستفاده نیز به تفکیک مقدار و زمان تنش به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. براساس شکل (۶)، بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط



شکل ۷- مقایسه بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های AquaCrop و WOFOST با مقادیر مشاهداتی در مراحل مختلف رشد در سال دوم در مرحله صحت‌سنجی

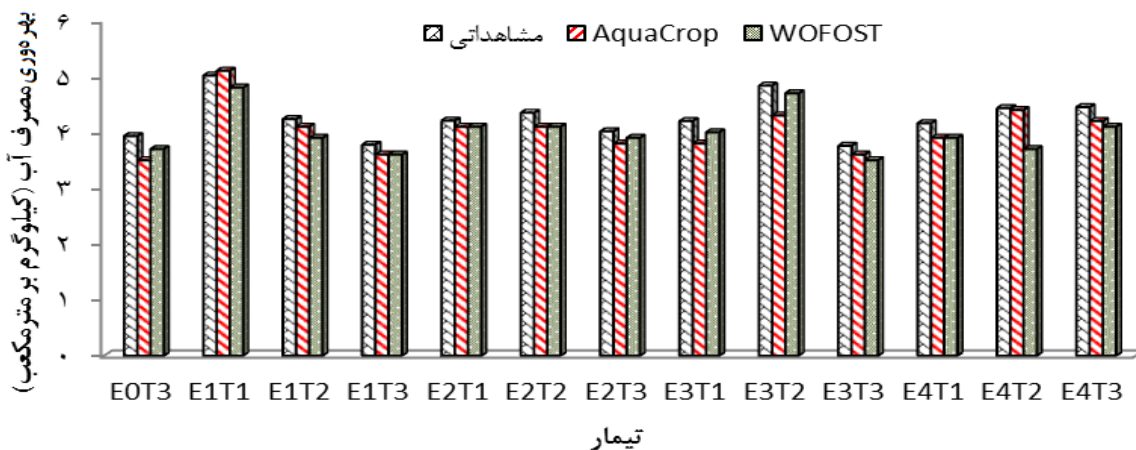
اثر متقابل هر دو تنش بر بهره‌وری آب توسط مدل‌های AquaCrop و WOFOST در شکل (۸) نشان داده شده است. براساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop و مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با ۰/۵۳ و ۰/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود. مقادیر مشابه برای مدل WOFOST به ترتیب برابر با ۰/۷۳ و ۰/۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود. متوسط اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دو مدل AquaCrop و WOFOST با مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با ۰/۲۳ و ۰/۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. این نتایج نشان داد که دقت هر دو مدل در تعیین این پارامتر نسبتاً پایین بوده است. علت این است که این پارامتر تحت تأثیر پارامترهای دیگری نظیر مدیریت مزرعه، نهاده‌ها و شرایط آب و هوایی قرار دارد و شبیه‌سازی آن معمولاً با خطا همراه است.

E1 مشاهده شد. در حالت کلی، با افزایش تنش آبی میزان خطای مدل AquaCrop در تعیین بهره‌وری آب افزایش یافت ولی روند منظمی بین مقادیر به‌دست‌آمده برای مدل WOFOST مشاهده نشد.



شکل ۶- مقایسه بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های AquaCrop و WOFOST با مقادیر مشاهداتی در مقادیر مختلف تنش آبی در سال دوم در مرحله صحت‌سنجی

نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۷) نشان داد که در هر دو مدل، میزان خطای مدل‌ها در تنش اعمال‌شده در مرحله رشد کامل (T2) افزایش یافت و کمترین خطا به تنش در مرحله استقرار بذر و رشد رویشی (T1) اختصاص داشت. علت این است که هر دو مدل در زمان افزایش مصرف آب توسط گیاه خطای بیشتری دارند. همچنین اوایل دوره رشد در هر دو مدل حساسیت کمتری نسبت به سایر دوره‌ها دارد.



شکل ۸- مقایسه بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های AquaCrop و WOFOST با مقادیر مشاهداتی در سال دوم در مرحله صحت‌سنجی

## نتیجه گیری

این تحقیق به منظور ارزیابی دقت دو مدل AquaCrop و WOFOST در شبیه سازی عملکرد سیب زمینی تحت شرایط مختلف تنش آبی در مراحل متفاوت رشد انجام شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل خطای نسبتاً قابل قبولی داشتند با این وجود مدل AquaCrop دچار خطای کم برآوردی و مدل WOFOST دچار خطای بیش برآوردی شدند. براساس نتایج به دست آمده، هر دو مدل در مرحله T2 دقت پایینی در شبیه سازی داشتند. در سایر مراحل دقت مدل AquaCrop نسبتاً از مدل WOFOST بهتر بود. علت آن نیز به ماهیت هر دو مدل برمی گردد. مدل AquaCrop به دلیل آب محور بودن انعطاف بیشتری نسبت به مدل WOFOST در شرایط تنش دارد؛ بنابراین با توجه به تعداد داده های کمتر در مدل AquaCrop و دقت بهتر، کاربرد این مدل برای شبیه سازی سیب زمینی پیشنهاد می شود.

## منابع

- ابراهیمی پاک، ن. ع. ۱۳۹۳. تعیین ضریب واکنش عملکرد سیب زمینی نسبت به کم آبیاری در مراحل مختلف رشد در شهرکرد. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۴(۱۵): ۵۰-۳۹.
- ابراهیمی پاک، ن. ع.، تافته، آ.، اسدی کپورچال، ص. و اگدرنژاد، ا. ۱۳۹۸. ارزیابی توابع تولید محصول به منظور برآورد عملکرد سیب زمینی در تیمارهای مختلف آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی. ۱۳(۶): ۱۷۳۲-۱۷۲۱.
- ابراهیمی پاک، ن.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم آبیاری و مصرف ژئولیت. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۸(۱): ۱۱۷-۱۳۲.
- ابراهیمی پاک، ن. ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی. ۱۳(۳): ۷۲۶-۷۱۵.
- ابراهیمی پاک، ن. ع.، اگدرنژاد، ا. و خدادادی دهکردی، د. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد ذرت تحت تیمارهای کم آبیاری و کاربرد سطوح مختلف سوپرچاد. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۸(۳): ۱۸۴-۱۶۶.
- ایوزیان، م. و واقفی، ا. ۱۳۸۹. مبانی احتمالات و آمار مهندسی. انتشارات ترمه. ۵۰۴ صفحه.
- خیری شلمزاری، ک.، برومند نسب، س.، سلطانی محمدی، ا. و حقیقتی بروجنی، ب. ۱۳۹۹. اثر مدیریت های آبیاری در سامانه های آبیاری قطره ای سطحی و زیرسطحی بر عملکرد و بهره وری آب سیب زمینی. نشریه آبیاری و زهکشی. ۱۴(۱): ۳۲۰-۳۱۰.
- سیاحی، ح.، اگدرنژاد، ا. و ابراهیمی پاک، ن. ع. ۱۳۹۹. مقایسه دو مدل AquaCrop و SWAP در شبیه سازی عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند تحت دوره های مختلف آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی. ۱۴(۴): ۱۳۲۱-۱۳۱۱.
- موسوی، س. ا. ح.، اگدرنژاد، ا. و گیلانی، ع. ع. ۱۳۹۸. شبیه سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام مختلف برنج تحت شرایط مختلف کاشت با استفاده از دو مدل AquaCrop و SWAP. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۱۶(۱): ۱۳۴-۱۲۳.
- 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 and irrigated barely. *Agricultural Water Management*. 97: 1838-1846.
- Bouman, B. A. M., Van Keulen, H., Van Laar, H. H. and Rabbinge, R. 1996. The "School of de Wit", crop growth simulation models: pedigree and historical overview, *Agricultural System*. 52: 171-198.
- Confalonieri, R. and Bocchi, S. 2005. Evaluation of CropSyst for Simulation the Yield of Flooded Rice in Northern Italy, *European Journal of Agronomy*. 23: 315-326.
- Dua, V. K., Govindakrishnan, P. M. and Singh, B. P. 2014. Calibration of WOFOST model for potato in India, *Potato Journal*. 41(2): 105-112.
- Dua, V. K., Singh, B. P., Govindakrishnan, P. M., Kumar, S. and Lal, S. S. 2013. Impact of climate change on potato productivity in Punjab-a simulation study. *Current Science*. 105(6): 787-794.
- Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z. and Dubrovsk, M. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions, *Ecological Modeling*. 171: 223-246.

- Garcia-Vila, M. and Fereres, E. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*. 36(1): 21-31.
- Geerts, S. and Raes, D. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas, *Agricultural Water Management*. 96: 1275-1284.
- Heng, L. k., Hsiao, T. C., Evett, S., Howell, T. and Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize. *Agronomy Journal*. 101(3): 488-498.
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101(3): 448-459.
- Huang, X., Huang, G., Yu, Ch., Ni, Sh. and Yu, L. 2017. A multiple crop model ensemble for improving broad scale yield prediction using Bayesian model averaging. *Field Crop Research*. 211: 114-124.
- 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.
- Marletto, V., Ventura, F., Fontana, G. and Tomei, F. 2007. Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model. *Agricultural Meteorology*. 147: 71-79.
- 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.
- Montoya, F., Carmargo, D., Ortega, J. F., Corcoles, J. I. and Dominguez, A. 2016. Evaluation of AquaCrop model for a potato crop under different irrigation conditions, *Agricultural Water Management*. 164: 267-280.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 101: 438-447.
- Song, Y. I., Chen, D. L. and Dong, W. J. 2006. Influence of climate on winter wheat productivity in different climate regions of China, 1961–2000. *Climatology Research*. 32: 219–227.
- Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B. and Maksimovic, L. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 98: 1615-1621.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saad, M., Stockle, C. and Steduto, P. 2009. Assessment of AquaCrop, Cropsyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal Abstract-Symposium Papers*. 101(3): 509-521.
- Yang, H. S., Dobermann, A., Lindquist, J. L., Wolters, D. T., Arkebauer, T. J. and Cassman, K. G. 2004. Hybrid-maize-A maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research*. 87:131–154

## Evaluation of AquaCrop and WOFOST Model to Simulating Potato Yield under Different Water Stress Conditions

M. A. Ansari<sup>1</sup>, A. Egdernezhad<sup>2\*</sup> and N. A. Ebrahimipak<sup>3</sup>

### Abstract

Due to importance of potato plant, simulating its yield under water stress using plant growth simulation models helps researchers to better plan for irrigation. So, this study was conducted to evaluate water driven (AquaCrop) and carbon driven (WOFOST) to simulate potato yield under different water deficit during various cropping stages. To do this end, data collected from a research station in ChaharTakhteh, Shahrekord, during two years (1998-1999) was used. The data was consisted of water stress at five levels (E0, E1, E2, E3, and E4 indicating 100, 85, 70, 50, and 30 percent of crop water needed, respectively) in three time (T1, T2, and T3 indicating 50, 100, and 150 days after sowing, respectively). RMSE values for simulation of yield using AquaCrop and WOFOST were 1.5 and 2.2 ton.ha<sup>-1</sup>, respectively. Model efficiencies based on EF values were 0.95 and 0.98, respectively. According to MBE and NRMSE values, AquaCrop accuracy was better than WOFOST. In both calibration and validation period, AquaCrop suffered from under estimate error and WOFOST suffered from over-estimate error. Regarding the results, it is recommended to use AquaCrop for simulation potato yield since it needs less data, have better precision and easier calibration.

**Keywords:** Carbon Driven Model, Crop Simulation Models, Deficit Irrigation, Water Driven Model, Water Productivity.

---

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

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran (\*Corresponded Author E-mail: a\_eigder@ymail.com)

<sup>3</sup> Associated professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 30 September 2020

Accepted: 16 December 2020