

مقاله علمی-پژوهشی

## ارزیابی مدل‌های AquaCrop و DSSAT در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گیاه سیب‌زمینی تحت شرایط مختلف تنش آبی

حمید نیسی<sup>۱</sup>، اصلا ن اگدرنژاد<sup>۲\*</sup>، سالومه سپهری صادقیان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹

### چکیده

شبیه‌سازی رشد گیاه سیب‌زمینی به محققان کمک می‌کند تا بتوانند برنامه‌ریزی صحیحی در خصوص واکنش این گیاه زراعی نسبت به مقدار آب آبیاری داشته باشند. مدل‌های AquaCrop و DSSAT به‌عنوان دو مدل پرکاربرد در این خصوص مطرح هستند ولی تاکنون در شرایط یکسان برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گیاه سیب‌زمینی مورد ارزیابی قرار نگرفته‌اند. بر این اساس، در پژوهش حاضر از داده‌های دو ساله برداشت‌شده از یک مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان کرمانشاه برای ارزیابی این دو مدل تحت تنش‌های مختلف آب آبیاری استفاده شد. تیمارهای آبیاری مورد بررسی در این تحقیق شامل تأمین ۱۰۰ درصد؛ T2: تأمین ۷۵ درصد و T3: تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه سیب‌زمینی تحت شرایط آبیاری قطره‌ای سطحی بود. نتایج نشان داد که هر دو مدل AquaCrop و DSSAT در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گیاه سیب‌زمینی دچار خطای بیش برآوردی شدند ( $MBE < 0$ ). دقت این دو مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در دسته عالی قرار داشت ( $NRMSE < 0.10$ ). در مرحله واسنجی، خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گیاه سیب‌زمینی به ترتیب برابر با ۱/۳ تن در هکتار و ۰/۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود. در حالی که مقادیر خطا برای این پارامترها در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۱/۵ تن در هکتار و ۰/۲۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود. خطای مدل DSSAT در مرحله واسنجی برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب برابر با ۲/۴ تن در هکتار و ۰/۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب و در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۰/۶۱ تن در هکتار و ۰/۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود؛ بنابراین، هر دو مدل گیاهی مورد استفاده دارای خطای قابل قبولی بودند. مقادیر آماره EF برای عملکرد شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های AquaCrop و DSSAT به ترتیب برابر با ۰/۹۲ و ۰/۹۸ بود. مقادیر این آماره برای بهره‌وری آب این دو مدل به ترتیب برابر با ۲/۶- و ۰/۱۷ تعیین شد. با توجه به این نتایج، کاربرد هر دو مدل گیاهی AquaCrop و DSSAT برای شبیه‌سازی گیاه سیب‌زمینی پیشنهاد می‌شود. گرچه نتایج به‌دست‌آمده برای مدل DSSAT دقت و کارایی بهتری داشت.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری قطره‌ای، تنش آبی، مدل آب محور، مدل رشد گیاهی، نیاز آبی گیاه

### مقدمه

تولید هست (Fabeiro et al., 2001)؛ که عمدتاً در کشورهای درحال توسعه تولید می‌شود (Scott et al., 2000). متوسط سرانه مصرف سیب‌زمینی در ایران از ۵۰ کیلوگرم بیشتر است و این روند در حال افزایش است (اسکندری و همکاران، ۱۳۹۰؛ ادای و تدین، ۱۳۹۶).

این گیاه زراعی به دلیل دارا بودن ریشه‌های سطحی، به میزان آب آبیاری بسیار حساس است (اسکندری و همکاران، ۱۳۹۰)، به‌طوری‌که تنش آبی و یا کاهش مقدار آب آبیاری در مراحل رشد آن سبب تغییرات مورفولوژی و فیزیولوژی و کاهش رشد و نمو آن می‌شود (Irna and Mauromicale, 2006). با توجه به مواجه بودن کشور ایران با شرایط خشک‌سالی در دهه‌های آینده و بالا بودن

سیب‌زمینی به‌عنوان یکی از گیاهان باارزش محسوب می‌شود به‌طوری‌که بعد از گندم، برنج و ذرت چهارمین گیاه زراعی از نظر حجم

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

۳- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

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

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.5.17.5

شبیه‌سازی عملکرد زعفران داشت. کاترجی و همکاران از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت شرایط مختلف آبیاری استفاده کردند. این محققان نشان دادند که دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت مطلوب بود (Katerji et al., 2013). از مدل گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی سایر گیاهان زراعی از جمله جو (Araya et al., 2010) و پنبه (Massasi et al., 2020) نیز استفاده شده است. ماساسی و همکاران به ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پنبه پرداختند و نشان دادند که دقت این مدل برای شبیه‌سازی این گیاه زراعی مطلوب بود (Masasi et al., 2020). ایزدی و همکاران (۱۳۹۷) از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی تحت سناریوهای مختلف آبیاری 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 ۵/۳ و ۹/۵ درصد بود. طایی سمیرمی و همکاران (۱۳۹۶) از مدل DSSAT برای شبیه‌سازی سیب‌زمینی در منطقه جیرفت استفاده کردند. این محققان نشان دادند که عملکرد شبیه‌سازی شده سیب‌زمینی توسط مدل DSSAT تطابق مناسبی با عملکرد به‌دست‌آمده در مزرعه داشت. همچنین میزان خطای مدل DSSAT بر اساس آماره RMSE برابر با ۱۹ درصد (۱۲۱۰ کیلوگرم بر هکتار) بود که از نظر این محققان مقداری قابل قبول محسوب می‌شد. باین وجود، این محققان دقت این مدل را در همه شرایط تأیید نکردند. اداوی و تدین (۱۳۹۶) از مدل DSSAT برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی در منطقه فریدون‌شهر اصفهان استفاده کردند. نتایج این محققان نشان داد که دقت مدل DSSAT برای پارامتر عملکرد مطلوب بود به طوری که مقادیر آماره NRMSE برای این پارامتر کمتر از ۱۰ درصد محاسبه شد. استاستنا و همکاران از مدل DSSAT برای شبیه‌سازی رشد سیب‌زمینی در کشور چک و طی یک دوره نه‌ساله استفاده کردند. این محققان نشان دادند که در برخی از سال‌ها، ارتباط تنگاتنگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط این مدل گیاهی مشاهده شد ولی در مابقی سال‌ها دقت این مدل قابل قبول نبود (Stastna et al., 2010). رایماندو و همکاران از مدل DSSAT برای شبیه‌سازی سیب‌زمینی در شرایط محیطی گوناگون و طی ۸۷ آزمایش استفاده کردند و دقت و توانایی این مدل را قابل قبول گزارش کردند (Raymundo et al., 2017).

مرور منابع نشان داد که کاربرد مدل DSSAT برای شبیه‌سازی سیب‌زمینی در بین محققان بیشتر از مدل AquaCrop بوده است. با توجه به خصوصیات مدل AquaCrop، به نظر می‌رسد این مدل به دلیل دسترسی راحت‌تر و پارامترهای در دسترس برای محققان ابزار مناسب‌تری باشد. از طرف دیگر، کاربرد این دو مدل برای شرایط آبیاری قطره‌ای تاکنون به صورت هم‌زمان مورد ارزیابی قرار نگرفته

مصرف آب در بخش کشاورزی (Ahmadee et al., 2014)، اطلاع از کاربرد مقادیر مناسب آب آبیاری بر مقدار عملکرد سیب‌زمینی بسیار حائز اهمیت است. این موضوع می‌تواند به محققان و برنامه‌ریزان کمک کند تا بتوانند علاوه بر کاهش مقدار آب آبیاری در بخش کشاورزی به افزایش تولید سیب‌زمینی نیز کمک کنند. بهترین روش برای دستیابی به این مهم، استفاده از مدل‌های گیاهی است (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷)؛ زیرا استفاده از مدل‌های گیاهی سبب کاهش وقت و هزینه انجام آزمایش می‌گردد و به محققان و برنامه‌ریزان این امکان را می‌دهد تا بتوانند سناریوهای مختلف تأمین آب آبیاری را بر عملکرد گیاهان زراعی بررسی کنند (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸).

کلیه مدل‌های گیاهی بر اساس سه ماژول به شبیه‌سازی گیاهان زراعی می‌پردازند. این ماژول‌ها با در نظر گرفتن تولید محصول بر اساس تبدیل یکی از منابع غذایی گیاه شامل کربن، تابش و آب است (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷). مدل AquaCrop یکی از این مدل‌های گیاهی آب محور است که توسط سازمان خواروبار کشاورزی ملل متحد برای مناطق خشک و نیمه‌خشک بسط داده شده است (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷). این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان از میزان آب مصرف شده توسط گیاه (تعرق) استفاده می‌کند (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹). داده‌های موردنیاز برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی عمدتاً در مدل AquaCrop تعریف شده‌اند لیکن برخی از آن‌ها برای شرایط اقلیمی مختلف نیاز به واسنجی دارند (Raes et al., 2012). مدل DSSAT یا «نظام پشتیبانی از تصمیم برای انتقال فناوری کشاورزی» یکی دیگر از مدل‌های گیاهی پرکاربرد در سال‌های اخیر است که توسط جمعی از محققان بین‌المللی تدوین شده است (Uehara and Tsuji, 1998). این مدل با تکیه بر این ایده بسط داده شد که بتوان با اطلاع از شرایط خاک، اقلیم و گیاهان زراعی، شرایط تولید را به مکان‌های مختلف انتقال داده و تصمیم‌های بهتری اتخاذ کرد (Uehara, 1998). پیش از بسط مدل DSSAT، مدل‌های منحصربه‌فرد برای هر گیاه زراعی بسط داده شده بود. با توجه به اینکه مدل‌های مختلفی برای گیاهان زراعی وجود داشت؛ برای یکسان‌سازی داده‌های ورودی و مدیریت یکسان مدل‌ها، بسته‌ی نرم‌افزاری DSSAT طراحی شد. در حال حاضر، ۲۶ مدل گیاهی مختلف در DSSAT وجود دارد. مدل SUBSTOR در این مدل برای شبیه‌سازی سیب‌زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد (طایی سمیرمی و همکاران، ۱۳۹۶).

با توجه به اهمیت دو مدل AquaCrop و DSSAT، تاکنون محققان بسیاری از آن‌ها برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی استفاده کرده‌اند. ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۷) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف آبیاری استفاده کردند. این محققان نشان دادند که این مدل توانایی لازم برای

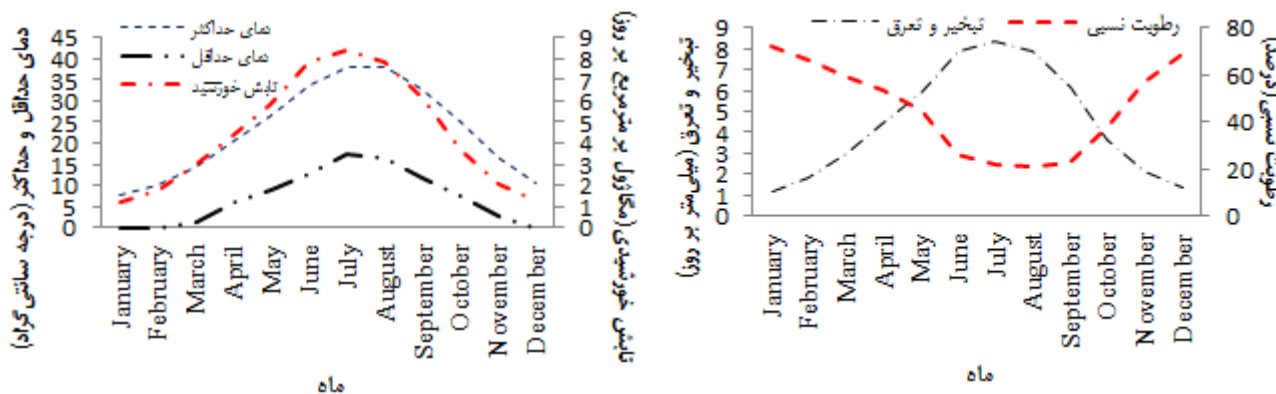
به صورت دستی بود و فاصله ردیف‌ها و غده‌ها به ترتیب ۷۵ و ۳۰ سانتی‌متر بود. عملیات کود دهی در طول دوره کشت و در سه نوبت انجام شد. در نوبت اول، کود پایه قبل از کاشت به زمین داده و با خاک مخلوط شد. این کود شامل سولفات پتاسیم، فسفات آمونیوم و اوره بود. در مراحل دوم و سوم از کود اوره استفاده شد که در هنگام گلدهی و برای افزایش حجم غده گیاه به صورت محلول‌پاشی انجام شد. در هر تیمار ۴ خط کاشت وجود داشت و فاصله خطوط کشت از یکدیگر ۷۵ سانتی‌متر بود. برای تعیین میزان آب آبیاری، داده‌های هواشناسی از ایستگاه هواشناسی کرمانشاه (واقع در فرودگاه شهید اشرفی اصفهانی) اخذ گردید (شکل ۱). پیش از کاشت با نمونه‌گیری‌های خاک منطقه مورد مطالعه، خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن تعیین شد (جدول ۱). همچنین خصوصیات آب آبیاری نیز بر اساس جدول (۲) تعیین شد.

است. از این رو، تحقیق حاضر با هدف ارزیابی دو مدل DSSAT و AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در شرایط آبیاری یکسان انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### عملیات مزرعه‌ای

پژوهش حاضر در یک مزرعه تحقیقاتی در شهرستان کرمانشاه در دو سال زراعی انجام شد. منطقه مورد مطالعه کوهستانی است و سراسر آن را قله‌ها و ارتفاعات کوه‌های زاگرس پوشانده است. این تحقیق در قالب بلوک‌های کاملاً تصادفی و در ۳ تکرار انجام گرفت. تیمارهای مورد مطالعه شامل T1: تأمین ۱۰۰ درصد؛ T2: تأمین ۷۵ درصد و T3: تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه سیب‌زمینی تحت شرایط آبیاری قطره‌ای سطحی بود. در این آزمایش، بذره‌های سیب‌زمینی رقم آگریا به مقدار ۴ تن در هکتار در اواخر اردیبهشت کاشته شدند. کاشت



شکل ۱- مشخصات هواشناسی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه

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

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب منطقه مورد مطالعه

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

مخصوص ظاهری خاک است. مقدار آب قابل استفاده و باقیمانده خاک ( $W_2$ ) و درصد تخلیه آب قابل استفاده (Re) در ناحیه ریشه گیاه با استفاده از روابط (۲) و (۳) محاسبه گردید.

$$W_2 = (D \times (w - pwp) \times Pb) / 100 \quad (2)$$

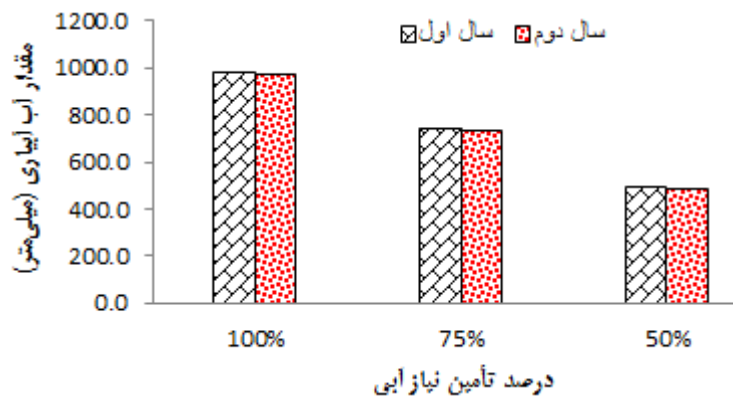
$$Re = ((w_2 - w_1) / Aw) \times 100 \quad (3)$$

مقدار آبیاری بعد از کاشت تا مرحله ۴ تا ۵ برگگی شدن در همه تیمارها یکسان و پس از آن آبیاری مطابق تیمارهای ذکر شده اعمال گردید. مقادیر آبیاری برای تیمارهای مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. در پایان فصل زراعی، برداشت محصول به صورت دستی انجام شد.

آبیاری توسط یک پمپ و لوله پلی اتیلن با قطر ۶۳ میلی‌متر به مزرعه آزمایشی منتقل می‌شد. از این لوله سه لوله دیگر با قطر ۶۳ میلی‌متر برای آبیاری تیپ منشعب گردید. در روی هر کدام از این لوله‌ها در ابتدای خط، یک شیر ۲ اینچی جهت قطع و وصل جریان آب و یک کنتور ۲ اینچی برای اندازه‌گیری جریان قرار گرفت. نوارهای آبیاری قطره‌ای مورد استفاده در هر قطعه بر روی این انشعابات قرار گرفت. پیش از آبیاری، مقدار رطوبت قابل استفاده لایه خاک در ناحیه ریشه گیاه (Aw) با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد.

$$Aw = (D \times (Fc - PWP) \times Pb) / 100 \quad (1)$$

که در این رابطه، D میزان تخلیه مجاز ریشه، Fc رطوبت در ظرفیت زراعی، PWP رطوبت در نقطه پژمردگی دائم و Pb جرم



شکل ۲- مقدار آب آبیاری برای تیمارهای مختلف در دو سال زراعی

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

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{CC_x^2}{CC_0} \times e^{-CGC} \quad (7)$$

$$CC = CC_x \left[ 1 - 0.05 \left( e^{\frac{CDC}{CC_x} \times t} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

در این روابط،  $CC_0$  پوشش گیاهی اولیه (سانتی‌متر مربع برای هر گیاه)،  $CGC$  ضریب رشد پوشش گیاهی (درصد روز)،  $CDC$  ضریب کاهش پوشش گیاهی (درصد روز) و  $t$  زمان است. از رابطه‌های (۶) تا (۸) به ترتیب برای تعیین پوشش گیاهی از ابتدای دوره رشد تا نیمه مرحله توسعه، از نیمه تا آخر مرحله توسعه و از ابتدای مرحله پیری تا انتهای دوره رشد استفاده می‌شود (Montoya et al., 2020).

#### مدل DSSAT

مدل DSSAT برای شبیه‌سازی از مدل سیستم محصولی ماژولی

#### مدل AquaCrop

این مدل برای تعیین عملکرد محصول بر اساس تبخیر-تعرق از رابطه (۴) استفاده می‌کند (Raes et al., 2012).

$$B = WP^* \sum_{i=1}^n \frac{Tr_i}{ETO_i} \quad (4)$$

در این معادله، B عملکرد زیست‌توده تجمعی (گرم بر مترمربع)،  $WP^*$  بهره‌وری آب نرمال شده (گرم بر مترمربع)،  $Tr_i$  تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز) و  $ETO_i$  تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر در روز)، n تعداد روزهای پس از کشت و i شماره روز است. میزان تعرق روزانه با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$Tr_i = K_s \times CC \times K_{CTrx} \times ET_{0i} \quad (5)$$

در این رابطه،  $K_s$  ضریب تنش آبی (-)،  $K_{CTrx}$  حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق (-) و  $CC$  ضریب پوشش گیاهی (-) است. در مدل AquaCrop تعیین میزان پوشش گیاهی بسیار با اهمیت است و سه مدل مختلف برای تعیین آن وجود دارد (رابطه‌های ۶ تا ۸).

$$PCARB = \frac{RUE \times PAR}{DENS} \times \quad (10)$$

که در این رابطه، PCARB پتانسیل جذب کربن (گرم بر گیاه در روز)، RUE راندمان مصرف تابش (گرم بر مگا ژول)، PAR تابش فعال فتوسنتزی (مگا ژول بر مترمربع)، DENS تراکم گیاه (گیاه بر مترمربع)، K ضریب نابودی نور (-)، LAI شاخص سطح برگ (مترمربع بر مترمربع) و PCO<sub>2</sub> شاخص پاسخ دی اکسید کربن نسبی (-) است. نرخ تثبیت واقعی کربن بر اساس رابطه (۱۱) تعیین می شود:

$$CARBO = PCARBO \times \quad (11)$$

$$MIN(PRFT, SWDF, NDEF) + 0.5 \times DDEADLF$$

که در این رابطه، CARBO نرخ تثبیت واقعی کربن (گرم بر گیاه در روز)، MIN کمینه مقدار فاکتورهای محدودکننده، PRFT شاخص تنش دمایی (-)، SWDF شاخص کمبود رطوبت خاک (-)، NDED شاخص کمبود نیتروژن (-) و DDEADLF مقدار کربن در برگ های پیر (-) است (Hoogenboom et al., 1999).

### تحلیل حساسیت

پیش از واسنجی هر دو مدل AquaCrop و DSSAT، تحلیل حساسیت بر اساس رابطه (۱۲) انجام شد (Geerts and Raes, 2009):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (12)$$

که در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P<sub>m</sub> مقدار برآورد شده پارامتر موردنظر بر اساس داده های ورودی تعدیل شده و P<sub>b</sub> مقدار برآورد پارامتر موردنظر بر اساس داده ورودی پایه می باشد. برای تحلیل حساسیت هر دو مدل AquaCrop و DSSAT، در هر مرحله یکی از عوامل ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده می شد و بقیه عوامل ثابت نگه داشته می شدند. در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، Sc > ۱۵ حساسیت بالا، ۲ < Sc < ۱۵ حساسیت متوسط و Sc < ۲ حساسیت پایین طبقه بندی شد (Geerts and Raes, 2009).

### واسنجی و صحت سنجی

برای واسنجی دو مدل AquaCrop و DSSAT، از داده های برداشت شده در سال زراعی اول استفاده شد. برای ارزیابی دقت و کارایی این دو مدل، از آماره های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب

استفاده می کند. در این مدل، شبیه سازی ها بر اساس کمیت های روزانه انجام شده و تخصیص مواد، تجمع زیست توده و رشد و نمو سیب زمینی تحت تأثیر دما، دوره ی نوری، تابش و عرضه ی آب، خاک و نیتروژن شبیه سازی می شود. همچنین این مدل، استراتژی های مدیریتی شامل چرخه ی محصول، آبیاری، کود دهی و فعالیت های ارگانیک را مدیریت می کند. این مدل ۱۶ محصول را در پایگاه داده خود جای داده است. این محصولات شامل ذرت، گندم، سورگوم، سویا، جو، برنج، سیب زمینی، گوجه فرنگی، ارزن، باقلا، بادام زمینی، نخود، کاساوا، نیشکر، باهیاباگرس و آفتابگردان هستند. مدل شبیه سازی رشد سیب زمینی SUBSTOR، یک مدل مناسب برای محصولات ریشه ای و غده ای است که در مدل DSSAT گنجانده شده است. بسیاری از ویژگی های اساسی این مدل با مدل های خانواده ی CERES مشترک است، تفاوت اصلی این دو مدل در این است که دوره ی نمو گلدهی و تولید دانه برای سیب زمینی اهمیت کمتری دارد و جای خود را به الگوریتم هایی که چگونگی شکل گیری غده را تعیین می کنند داده است. در این مدل مانند مدل CERES، نمو فنولوژیکی محصول مانند غده زایی با دما تجمعی کنترل می شود.

مدل های محصول دینامیکی - توصیفی گروه SUBSTOR از زیر مدل های مختلف تشکیل شده است که برای ورود داده ها، محاسبات ریاضی فرایندهای رشد و نمو و در نهایت برای ارائه ی خروجی های شبیه سازی شده به کار می روند. این مدل چندین محاسبه ی شبیه سازی را به طور هم زمان پردازش می کند تا بتواند توصیفی واقعی از سیستم محصول - خاک - هوا ارائه دهد. هر شبیه سازی شامل سه مرحله اصلی الف: محاسبه ی رشد و نمو ریشه، ب: محاسبه ی چگونگی تشکیل ماده خشک برگ، ساقه و ریشه و تقسیم مواد به آن ها و پ: محاسبه ی آب خاک در دسترس و بهره برداری از آن توسط ریشه و توازن نیتروژن و توزیع آن به ارگان های محصول است. در این مراحل، بیلان آب با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر تغییرات آب ذخیره شده در منطقه توسعه ریشه و به صورت رابطه (۹) محاسبه می شود:

$$\Delta S = I + P - E - T - D - R \quad (9)$$

که در این تحقیق،  $\Delta S$  تغییرات آب ذخیره شده در منطقه توسعه ریشه، I آبیاری، P آبیاری، E تبخیر واقعی، T تعرق واقعی، D نشت و نفوذ عمقی و R رواناب سطحی می باشد. برای شبیه سازی سیب زمینی با استفاده از مدل DSSAT، باید دیتابیس های آب و هوا، خاک، ژنتیک و عملیات تجربی ایجاد شوند. سپس با استفاده از زیر مدل SUBSTOR به شبیه سازی عملکرد سیب زمینی پرداخته می شود (Hoogenboom et al., 1999). این مدل برای تعیین ماده تولیدی توسط سیب زمینی از رابطه (۱۰) استفاده می کند.



مقادیر منفی متغیر است. مقدار این آماره اگر بیشتر از صفر باشد نشان‌دهنده کارایی مطلوب مدل‌های AquaCrop و DSSAT است. آماره  $d$  نیز کارایی مدل‌های AquaCrop و DSSAT را نشان می‌دهد و مقدار آن از صفر تا ۱ متغیر است. مقدار این آماره هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد کارایی مدل‌های AquaCrop و DSSAT بهتر است. مقدار  $R^2$  از صفر تا یک متغیر بوده و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برآزش بهتر داده‌ها در مدل‌های AquaCrop و DSSAT می‌باشد.

### نتایج و بحث

نتایج تحلیل حساسیت دو مدل AquaCrop و DSSAT در جدول (۳) نشان داده شده است. مدل AquaCrop به تغییرات شاخص برداشت حساسیت بالایی داشت درحالی‌که به تغییرات ضریب زوال پوشش گیاهی و حداکثر روز برای توسعه ریشه حساسیت کمی نشان داد. تغییرات سایر پارامترهای ورودی مانند ضریب رشد پوشش گیاهی و حداکثر پوشش گیاهی سبب حساسیت متوسط خروجی‌های مدل AquaCrop شد. این نتایج با مشاهدات اگدرنژاد و همکاران (۱۳۹۷)، احمدی و همکاران (۱۴۰۰) و ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت داشت. در مدل DSSAT، پنج پارامتر  $G_2$ ،  $G_3$ ،  $PD$ ،  $P_2$  و  $Tc$  نیاز به واسنجی داشتند. به همین دلیل تغییرات این پارامترها در نتایج مدل DSSAT مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل DSSAT نسبت به تغییرات این پنج پارامتر حساسیت متوسطی داشت. از این رو، پارامترهای ورودی این دو مدل مورد واسنجی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۴) نشان داده شده است.

ارزیابی این دو مدل در مرحله واسنجی نشان داد که 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  $d$  قابل قبول بود. آماره  $MBE$  نشان داد که مدل DSSAT در شبیه‌سازی هر دو پارامتر مورد مطالعه دچار خطای بیش برآوردی شد. آماره  $RMSE$  نشان داد که خطای مدل DSSAT در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب برابر با  $۲/۴$  تن در هکتار و  $۰/۳۴$  کیلوگرم بر مترمکعب بود. بر اساس آماره  $NRMSE$ ، دقت مدل DSSAT در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در دسته عالی قرار داشت.

تیبین ( $R^2$ ) استفاده شد. این آماره‌های به ترتیب در رابطه‌های (۱۳) تا (۱۸) نشان داده شده‌اند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵). در این مرحله، پارامترهای ورودی هر دو مدل گیاهی تغییر داده شدند تا نتایج به‌دست‌آمده از عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بر اساس آماره‌های بالا، قابل قبول باشد. پس از آن، مقادیر به‌دست‌آمده برای پارامترهای ورودی برای مرحله صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. در این مرحله از داده‌های برداشت‌شده در سال زراعی دوم استفاده شد. در این مرحله عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط پارامترهای اشاره‌شده مورد ارزیابی قرار گرفتند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (13)$$

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

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (15)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (17)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (18)$$

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 می‌باشد. مقدار  $RMSE$  و  $NRMSE$  به ترتیب نشان‌دهنده این است که خطا و دقت مدل‌های AquaCrop و DSSAT چقدر است. هر چه آماره  $RMSE$  به صفر نزدیک‌تر باشد خطای مدل‌های AquaCrop و DSSAT کمتر است. مقادیر آماره  $NRMSE$  اگر کمتر از  $۰/۱$  باشد نشان‌دهنده دقت عالی مدل‌های AquaCrop و DSSAT است. مقادیر بین  $۰/۱-۰/۲$  و  $۰/۲-۰/۳$  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 مدل‌های AquaCrop و DSSAT 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

جدول ۳- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل‌های AquaCrop و DSSAT

عامل	مقدار Sc در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
<b>مدل AquaCrop</b>			
ضریب رشد پوشش گیاهی	۱۰/۹	۱۳/۱	متوسط
حداکثر توسعه پوشش گیاهی	۲/۵	۱/۸	متوسط
ضریب زوال پوشش گیاهی	۱/۷	۰/۲	کم
حداکثر روز برای توسعه ریشه	۰/۸	۰/۱	کم
شاخص برداشت	۱۹/۳	۱۷/۴	زیاد
<b>مدل DSSAT</b>			
سرعت گسترش سطح برگ بعد از آغاز غده (ضریب G2)	۱/۲	۴/۹	متوسط
پتانسیل سرعت رشد غده (ضریب G3)	۷/۹	۶/۲	متوسط
شاخص رشد غده در طی دوره‌ی رشد گیاهی (ضریب PD)	۵/۷	۳/۱	متوسط
حساسیت آغاز غده دهی به فتوسنتز (ضریب P2)	۳/۵	۶/۲	متوسط
حساسیت رشد گیاه و شروع غده زایی به دمای هوا (ضریب Tc)	۲/۹	۲/۲	متوسط

جدول ۴- مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل‌های AquaCrop و DSSAT

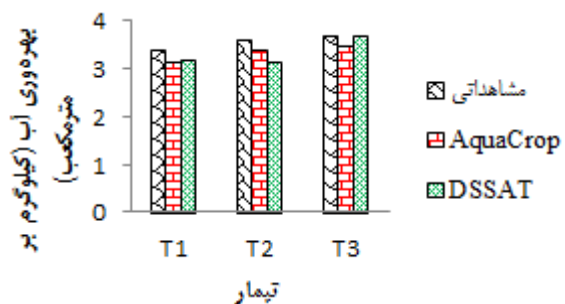
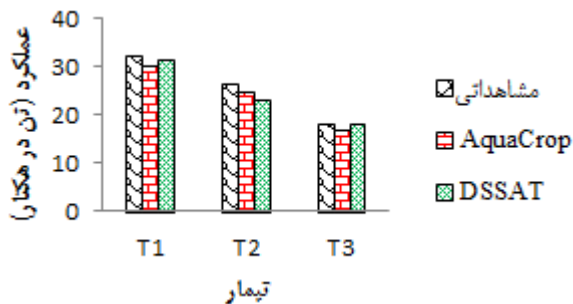
توضیح عامل	مقدار	واحد	توضیح
<b>مدل AquaCrop</b>			
دمای پایه	۲	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
دمای بالا	۲۶	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
تراکم کشت	۴۰۰۰۰	گیاه در هکتار	اندازه‌گیری
ضریب رشد کانوپی	۱۷/۵	درصد روز	واسنجی
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۱۳	سانتی‌متر مربع	پیش فرض
مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱۶	روز	واسنجی
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	پیش فرض
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۸	گرم بر مترمربع	پیش فرض
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 رشد پوشش	۱۷/۵	درصد روز	پیش فرض
ضریب کاهش پوشش	۰/۳	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۱	درصد بر روز	پیش فرض
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۳	-	پیش فرض
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۳	-	پیش فرض
<b>مدل DSSAT</b>			
سرعت گسترش سطح برگ بعد از آغاز غده (ضریب G2)	۲۰۰۰	سانتی‌مترمربع بر مترمربع روز	پیش فرض
پتانسیل سرعت رشد غده (ضریب G3)	۲۵	گرم بر مترمربع روز	پیش فرض
شاخص رشد غده در طی دوره‌ی رشد گیاهی (ضریب PD)	۰/۹	-	واسنجی
حساسیت آغاز غده‌دهی به فتوسنتز (ضریب P2)	۰/۸	-	واسنجی
حساسیت رشد گیاه و شروع غده‌زایی به دمای هوا (ضریب Tc)	۱۷	درجه سانتی‌گراد	واسنجی

جدول ۵- نتایج آنالیز آماری پارامترهای عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل‌های AquaCrop و DSSAT در مرحله واسنجی

نام مدل	پارامتر	واحد	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d	R <sup>2</sup>
AquaCrop	عملکرد	تن در هکتار	-۱/۲	۱/۳	۰/۰۵	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۹
	بهره‌وری آب	کیلوگرم بر مترمکعب	-۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۰۶	۰/۸۰	۰/۹۹	۰/۹۹
DSSAT	عملکرد	تن در هکتار	-۲/۲	۲/۴	۰/۰۹	۰/۸۵	۰/۹۹	۰/۸۲
	بهره‌وری آب	کیلوگرم بر مترمکعب	-۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۰۹	-۳/۱	۰/۹۹	۰/۸۹

وطن‌خواه و همکاران، ۱۳۹۵؛ Heng et al., 2009) در مدل DSSAT، عملکرد شبیه‌سازی شده از عملکرد مشاهداتی کمتر بود. اختلاف بین عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل DSSAT برای تیمارهای T1، T2 و T3 به ترتیب برابر با ۸/۷، ۱۰/۴ و ۵/۲ درصد بود. به‌صورت میانگین، اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مدل AquaCrop کمتر از مدل DSSAT بود. این نتایج با مراجعه به جدول (۵) نیز قابل تأیید است.

مقایسه عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی در شکل (۳) نشان داده شده است. اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده 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 بسیاری از محققان نیز نشان داده است که این مدل در شرایط تنش دچار خطای بیشتری می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛



شکل ۳- نتایج عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی گیاه سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل‌های AquaCrop و DSSAT در مرحله واسنجی (T1: تأمین ۱۰۰ درصد؛ T2: تأمین ۷۵ درصد و T3: تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی)

ضریب تبیین برای مدل AquaCrop در شبیه‌سازی بهره‌وری آب برابر با ۰/۹۷ بود که مقدار بیشتری نسبت به ضریب تبیین برای مدل DSSAT داشت.

نتایج آماری مقایسه بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد و بهره‌وری آب در مرحله صحت‌سنجی نشان داد که مدل AquaCrop در این مرحله نیز دچار خطای بیش برآوردی شد (جدول ۶). نتایج بسیاری از محققان نیز نشان داده است که این مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصولات مختلف دچار خطای بیش برآوردی است (Heng et al., 2009; Katerji et al., 2013; Zeleke et al., 2011). 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. مالک و همکاران مقدار خطای این مدل را در دامنه ۱/۱۷-۰/۰۷ تن در هکتار گزارش کردند (Malik et al., 2017). استریسویچ و همکاران نیز مقدار ۰/۲ تن در هکتار را برای آماره RMSE گزارش کردند (Stricevic et al., 2011). علی‌شیری و

مقایسه بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی در شکل (۳) نشان داده شده است. اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در تیمارهای T1، T2 و T3 به ترتیب برابر با ۴/۱، ۸/۱ و ۹/۰ درصد بود. افزایش اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده 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 جذب شده سبب کاهش دقت این مدل گردید. اختلاف بین بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل DSSAT برای تیمارهای اشاره شده به ترتیب برابر با ۹/۰، ۱۲/۸ و ۵/۸ درصد بود. در شبیه‌سازی بهره‌وری آب نیز دقت مدل AquaCrop بهتر از مدل DSSAT بود. همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی در مرحله واسنجی نشان داد که هر دو مدل AquaCrop و DSSAT توانایی بسیار خوبی برای تبعیت از تغییرات عملکرد داشتند. باین‌وجود



آمد که نسبت به تحقیقات سایر محققان از جمله طایی سمیرمی و همکاران (۱۳۹۶) نیز بهتر بود. این محققان بیان کردند که دقت مدل DSSAT حتی تا ۱/۲ تن در هکتار نیز قابل قبول است. ضیایی و همکاران (۱۳۹۳) با مقایسه دو مدل AquaCrop و DSSAT برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت نشان دادند که خطای مدل AquaCrop بین ۰/۲ تا ۰/۴ و خطای مدل DSSAT بین ۰/۲۱ تا ۰/۸ بود. این محققان گزارش کردند چون ساختار مدل AquaCrop بر پایه شبیه‌سازی عملکرد نسبت به مقدار آب است، می‌تواند دقت بهتری نسبت به مدل زراعی DSSAT داشته باشد. لیکن در تحقیق حاضر گرچه دقت دو مدل مورد استفاده نزدیک به هم بود، ولی در مجموع می‌توان دقت مدل DSSAT را اندکی بهتر ارزیابی کرد. علت این است که مدل AquaCrop در شرایط تأمین کافی آب آبیاری دقت مطلوبی دارد و با افزایش تنش از میزان دقت آن نیز کاسته می‌شود (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین در مدل DSSAT مدل‌های اختصاصی برای هر محصول زراعی در نظر گرفته شده است که ساختار مدل AquaCrop در این خصوص اندکی ضعیف‌تر است. کارایی مدل DSSAT برای شبیه‌سازی پارامترهای عملکرد و بهره‌وری آب مطلوب بود که با نتایج ادوای و تدین (۱۳۹۶) و استاستنا و همکاران (2010) مطابقت داشت (Stastna et al., 2010).

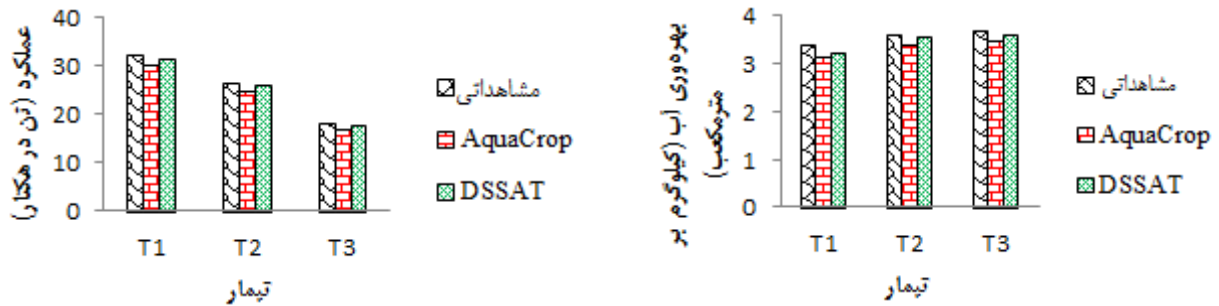
همکاران هم دامنه ۰/۶۴-۰/۱۵ تن در هکتار را برای شبیه‌سازی عملکرد توسط مدل AquaCrop بیان کردند (Alishiri et al., 2014). با مقایسه نتایج این تحقیق با مقادیر گزارش شده توسط محققان، مشاهده می‌شود که خطای این تحقیق بالاتر از مقادیر به دست آمده است. احتمالاً کاهش اندک دقت این مدل در تحقیق حاضر به دلیل بیشتر بودن تنش آبی نسبت به تحقیقات محققان دیگر است. کارایی مدل AquaCrop نیز بر اساس دو آماره EF و d مقدار مطلوبی داشت. استریسویچ و همکاران و مالک و همکاران مقدار ۰/۹ را برای آماره d گزارش کردند که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی داشت (Stricevic et al., 2011; Malik et al., 2017). همانند مرحله واسنجی، مدل DSSAT برای تعیین عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای کم‌برآوردی شد. این نتایج مشابه مدل AquaCrop بود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هر دو مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی دچار خطای کم‌برآوردی می‌شوند. دقت مدل DSSAT در مرحله صحت‌سنجی در دسته عالی قرار داشت. این نتایج با مشاهدات ادوای و تدین (۱۳۹۶) مطابقت داشت. این محققان دقت مدل DSSAT را برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی برابر با ۴/۹ درصد تعیین کردند. خطای مدل DSSAT در مرحله صحت‌سنجی کمتر از مدل AquaCrop بود. در تحقیق حاضر خطای مدل DSSAT برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی برابر با ۰/۶۱ تن در هکتار به دست

جدول ۶- نتایج آنالیز آماری پارامترهای عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل‌های AquaCrop و DSSAT در مرحله

صحت‌سنجی						واحد	پارامتر	نام مدل
R <sup>2</sup>	D	EF	NRMSE	RMSE	MBE			
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۰۶	۱/۵	-۱/۵	تن در هکتار	عملکرد	AquaCrop
۰/۹۹	۰/۹۹	-۲/۶	۰/۰۶	۰/۲۳	-۰/۲۳	کیلوگرم بر مترمکعب	بهره‌وری آب	
۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۰۲	۰/۶۱	-۰/۰۶	تن در هکتار	عملکرد	DSSAT
۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۱۱	-۰/۰۱	کیلوگرم بر مترمکعب	بهره‌وری آب	

مشاهداتی از نتایج شبیه‌سازی شده، چه برای عملکرد و چه برای بهره‌وری آب، بیشتر بود. این نتایج به صورت مشابه برای مدل DSSAT نیز مشاهده شد. اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی شده با مدل DSSAT و عملکرد مشاهداتی در تیمارهای T1، T2 و T3 به ترتیب برابر با ۲/۵، ۱/۹ و ۲/۸ درصد بود. اختلاف بین بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در تیمارهای T1، T2 و T3 به ترتیب برابر با ۵/۰، ۱/۲ و ۲/۴ درصد بود. مقایسه این نتایج با مدل AquaCrop نشان داد که دقت این مدل از AquaCrop بیشتر بود. این نتایج در جدول (۶) نیز تأیید شد.

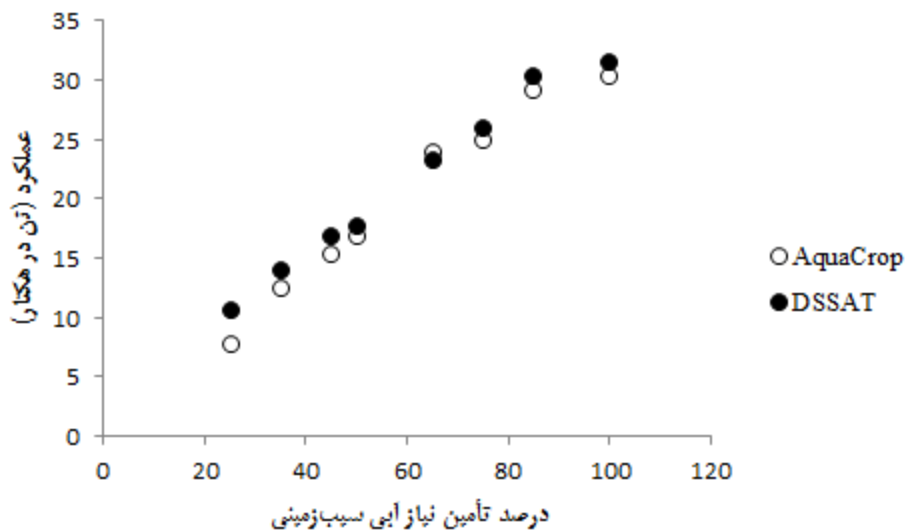
مقایسه بین عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل‌های AquaCrop و DSSAT در مرحله صحت‌سنجی در شکل (۴) نشان داده شده است. متوسط اختلاف بین عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop برابر با ۶/۲ درصد بود. اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دو تیمار T2 و T3 از تیمار T1 بیشتر بود. این نتیجه در مرحله واسنجی نیز مشاهده شد. علت آن نیز آب-محور بودن این مدل می‌باشد. نتایج بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در شکل (۴) نشان داده شده است. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برابر با ۶/۷ درصد بود. در همه تیمارها، مقادیر



شکل ۴- نتایج عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی گیاه سیب‌زمینی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل‌های AquaCrop و DSSAT در مرحله صحت‌سنجی (T1: تأمین ۱۰۰ درصد؛ T2: تأمین ۷۵ درصد و T3: تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی)

مختلف نیاز آب آبیاری سیب‌زمینی پراخته شد (شکل ۵). با توجه به این نتایج، کاهش مشهود عملکرد سیب‌زمینی با اعمال ۶۵ درصد آب آبیاری شروع شد. عملکرد سیب‌زمینی در ۴۵ درصد تأمین آب آبیاری به حدود نصف عملکرد در شرایط تأمین کامل آب آبیاری رسید. با افزایش تنش آبی به ۲۵ درصد، عملکرد به صورت متوسط ۷۰ درصد کاهش یافت. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های گیاهی نشان داد که در اکثر موارد عملکرد به‌دست‌آمده توسط مدل AquaCrop کمتر از مدل DSSAT بود. این اختلاف برای تنش‌های آبی شدیدتر بیشتر شد.

نتایج همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد و بهره‌وری آب توسط دو مدل AquaCrop و DSSAT در جدول (۶) نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، تمایل نقاط نشان داده شده به سمت محور افقی است. این نتایج بیانگر این است که مقادیر مشاهداتی همواره از مقادیر شبیه‌سازی شده توسط دو مدل AquaCrop و DSSAT بیشتر بود. با توجه به اینکه ضریب تبیین برای هر دو مدل AquaCrop و DSSAT بالا است، این دو مدل گیاهی توانایی بالایی است در شبیه‌سازی تغییرات داشتند. با استفاده از مدل‌های ارزیابی شده AquaCrop و DSSAT به شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در شرایط تأمین درصدهای



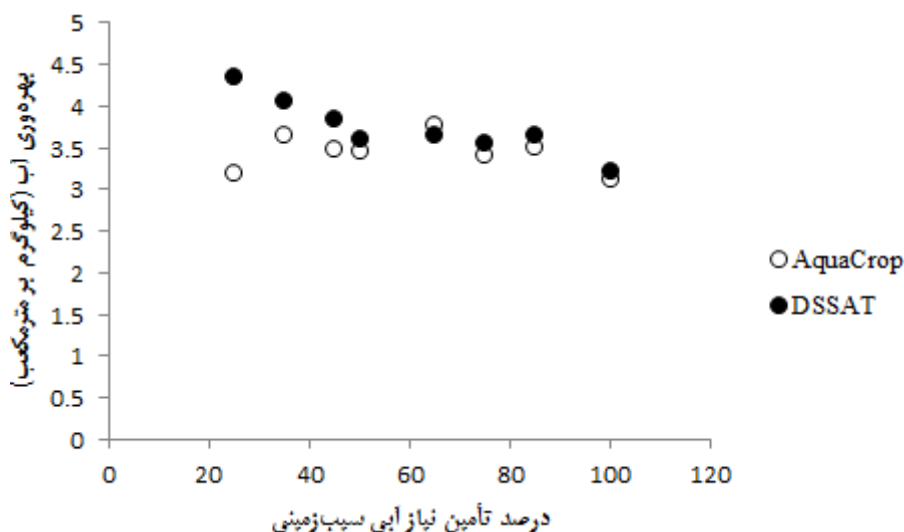
شکل ۵- عملکرد سیب‌زمینی در شرایط تأمین مقادیر مختلف آب آبیاری با استفاده از مدل‌های AquaCrop و DSSAT

AquaCrop است؛ بنابراین، بهره‌وری آب به‌دست‌آمده توسط مدل DSSAT به نتایج مزرعه‌ای نزدیک‌تر است. البته چون این مدل گیاهی دچار خطای کم‌برآوردی است، بهره‌وری آب در مزرعه قطعاً از نتایج این مدل اندکی بیشتر خواهد بود. بر این اساس، هر چه آب

مقادیر شبیه‌سازی شده بهره‌وری آب برای درصدهای مختلف تأمین آب آبیاری در شکل (۶) نشان داده شده است. مقدار بهره‌وری آب به‌دست‌آمده توسط مدل AquaCrop همواره از DSSAT کمتر بود. چون خطای مدل DSSAT در برآورد بهره‌وری آب کمتر از

در شرایط آبیاری ۶۵ و ۵۰ درصد بیشتر بود. درحالی که اختلاف بین بهره‌وری آب بین این دو تیمار تنها ۵ درصد بود؛ بنابراین اعمال تنش آبی ۶۵ درصد به‌عنوان شرایط بهینه آبیاری سیب‌زمینی تعیین می‌شود.

آبیاری کمتری مصرف شود بهره‌وری بالاتری به دست خواهد آمد. لیکن مقدار عملکرد در مزرعه نیز در تولید محصول مهم است. به همین دلیل لازم است سناریویی به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شود که عملکرد قابل قبولی نیز داشته باشد. اختلاف بین عملکرد سیب‌زمینی



شکل ۶- بهره‌وری آب سیب‌زمینی در شرایط تأمین مقادیر مختلف آب آبیاری با استفاده از مدل‌های AquaCrop و DSSAT

## منابع

ابراهیمی پاک، ن. ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت. مجله حفاظت منابع آب و خاک. ۱۸(۱): ۱۳۱-۱۱۷.

ابراهیمی پاک، 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): ۷۱۵-۷۲۶.

احمدی، م.، خاشعی سیوکی، ع. و سیاری، م. ح. ۱۳۹۵. بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (*Crocus sativus* L) و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. بوم‌شناسی. ۸(۴-۴): ۵۲۰-۵۰۵.

احمدی، م.، قنبرپوری، م. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۰. مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop. مدیریت آب در کشاورزی. ۱۸(۱): ۳۰-۱۵.

ادامی، ظ. و تدین، م. ر. ۱۳۹۶. تأثیر تغییر اقلیم بر تولید سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در منطقه فریدون‌شهر اصفهان-I- رشد و نمو. مجله بوم‌شناسی کشاورزی. ۹(۴): ۱۱۳۵-۱۱۱۷.

اسکندری، ع.، خزاعی، ح.، نظامی، ا.، کافی، م. و مجد آبادی، ع.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی سیب‌زمینی در شرایط آبیاری یکسان برای دو مدل AquaCrop و DSSAT در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از آماره NRMSE نشان داد که دقت این دو مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد به ترتیب برابر ۰/۰۲ و ۰/۰۶ و برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب به ترتیب برابر با ۰/۰۳ و ۰/۰۶ بود. بر اساس آماره EF کارایی هر دو مدل گیاهی در شبیه‌سازی عملکرد تقریباً یکسان بود لیکن مقدار این آماره برای بهره‌وری آب در دو مدل AquaCrop (۲/۶-) و DSSAT (۰/۱۷) متفاوت بود. با توجه به اینکه دو مدل AquaCrop و DSSAT از ساختارهای متفاوتی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی استفاده می‌کنند، این نتایج می‌تواند توجیه شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، دقت هر دو مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی مطلوب بود. گرچه نتایج به‌دست‌آمده از مدل DSSAT اندکی بهتر بود. مدل AquaCrop دارای ساختار آب-محور است و در تنش‌های آبی دچار خطا می‌شود؛ بنابراین مدل DSSAT برای شبیه‌سازی سیب‌زمینی بر مدل AquaCrop ارجح‌تر است. لیکن اگر شرایط تنش آبی وجود نداشته باشد، مدل AquaCrop به دلیل سهولت دسترسی و پارامترهای در دسترس پیشنهاد می‌شود.

- Simulation of sugarbeet growth under different water regimes and nitrogen levels by aquacrop. *International Journal of Biosciences*. 4(4): 1-9.
- 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.
- Fabeiro C., Martin de Santa Olalla F. and De Juan J. A. 2001. Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agricultural Water Management*. 48: 255-266.
- 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*. 101(3): 488-498.
- Hoogenboom, G., Wilkens, P. W. and Gordon, Y. T., 1999. DSSAT version 3. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer International Consortium for Agricultural Systems Application University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Irna, A. and Mauromicale, G. 2006. Physiological and growth response to moderate water deficit of off-season potatoes in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 82: 193-209.
- 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.
- Malik, A., Shakir, A, S., Ajmal, M., Jamal Khan, M. and Ali Khan, T. 2017. Assessment of AquaCrop Model in Simulating Sugar Beet Canopy Cover, Biomass and Root Yield under Different Irrigation and Field Management Practices in Semi-Arid Regions of Pakistan. *Water Resources Management*. 31: 4275-4292.
- Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P. H., Marek, G. and Boman, R. 2020. Validation and application of AquaCrop for irrigated cotton in the Southern Great Plains of US. *Irrigation Science*. 38: 593-607.
- Montoya, F., Camargo, D., Córcoles, J.I., Domínguez, A. and Ortega, J.F. 2020. Analysis of deficit irrigation strategies by using SUBSTOR-Potato model in a semi-arid area. *The Journal of Agricultural Science* 1-14.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Freres, E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
۱۳۹۰. تأثیر رژیم آبیاری بر خصوصیات فیزیولوژیکی، عملکرد و کارایی مصرف آب سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum L.*) در شرایط آب و هوایی مشهد. *مجله علوم باغبانی*. ۲۵(۳): ۲۱۰-۲۰۱.
- آگدرنژاد، ا.، ابراهیمی پاک، ن. ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. *مجله مدیریت آب در کشاورزی*. ۵(۲): ۶۴-۵۳.
- انصاری، م.، ع.، آگدرنژاد، ا. و ابراهیمی پاک، ن. ع. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum L.*) تحت شرایط آبیاری با استفاده از دو مدل AquaCrop و Cropsyst. *نشریه آکو فیزیولوژی گیاهان زراعی*. ۱۱۳(۲): ۲۸۷-۳۰۴.
- ایزدی، ز.، نصر الهی، ع. ح. و حقیقی، ب. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد سیب‌زمینی تحت تنش آبی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*. ۴۹(۱): ۱۸۰-۱۷۱.
- رحیمی خوب، 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.
- ضیایی، غ.، بابا زاده، ح.، عباسی، ف. و کاوه، ف. ۱۳۹۳. بررسی عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۴۵(۴-۳): ۴۴۵-۴۳۵.
- طایی سمیرمی، ج.، امیری، ا.، آیین، ا.، برومند، ن. و جوکار، م. ۱۳۹۶. ارزیابی کارایی مدل DSSAT برای تخمین عملکرد بالقوه سیب زمینی در نظام زراعی کشت پاییزه (مطالعه موردی: منطقه جیرفت). *مجله به زراعی کشاورزی*. ۱۹(۴): ۹۰۵-۸۹۳.
- محمدی، م.، داوری، ک.، قهرمان، ب.، انصاری، ح. و حق وردی، ا. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش هم‌زمان شوری و خشکی. *مجله پژوهش آب در کشاورزی*. ۲۹(۳): ۲۹۵-۲۷۷.
- وطن‌خواه، ا. و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در طول جوچیه. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*. ۴۷(۳): ۵۰۴-۴۹۵.
- Ahmadee, M., Khashei Siuki, A., and Hashemi, S. R., 2014. The effect of magnetic water and calcific and potasic zeolite on the yield of *Lepidium Sativum L.*, *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*. 2(6): 2051-2060.
- Alishiri, R., Pakmejad, F. and Aghayari, F. 2014.

- sunflower. *Agricultural Water Management*. 98(10): 1615-1621.
- Uehara, G. 1998. Synthesis. In: Tsuji G.Y., Hoogenboom G., Thornton P.K., (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*, (pp.389-392) Kluwer academic publishers, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. The Netherlands. 392 pp.
- Uehara, G. and Tsuji, G.Y. 1998. Overview of IBSNAT. In: Tsuji GY, Hoogenboom G, Thornton PK, (Eds). *Understanding Options for Agricultural Production*, (pp.1-7) Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. The Netherlands. 392 pp.
- Zelege, K. T., Lockett, D. and Cowley, R. 2011. Calibration and Testing of the FAO AquaCrop Model for Canola. *Agronomy Journal*. 103(6): 1610-1618.
- Raymundo, R., Prasad, R., Kleinwechter, U., Concha, J., Condori, B., Condori, B., Bowen, W., Wolf, J., Olesen, J. E., Dong, Q., Zotarelli, L., Gastelo, M., Alva, A., Travasso, M., Quiroz, R., Arora, V., Graham, W. and Porter, C. 2017. Performance of the SUBSTOR-potato model across contrasting growing conditions. *Field Crops Research*. 202: 57-76.
- Scott, G. J., Rosegrant, M.W. and Ringler, C. 2000. Global projections for root tuber crops to the year. *Food Policy*. 25:561-597.
- Stastna, M., Toman, F. and Dufkova, J. 2010. Usage of SUBSTOR model in potato yield prediction. *Agricultural Water Management*. 2: 286-290.
- 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

## Assessment the AquaCrop and DSSAT Models in Simulating Potato Yield and Water Productivity under Different Water Stress Conditions

H. Neysi<sup>1</sup>, A. Egdernezhad<sup>2\*</sup>, S. Sepehri Sadeghiyan<sup>3</sup>

Recived: Jun. 19, 2021

Accepted: Jun. 31, 2021

### Abstract

Simulation of Potato growth helps researchers to plan crop's response to the amount of irrigation water. AquaCrop and DSSAT are the most widely used crop models but have not yet been evaluated under the same conditions for potato simulation. Therefore, in the present study, biennial data collected from a research farm located in Kermanshah, Iran, were used to evaluate these two models under different irrigation water stresses. Irrigation treatments include: 100% supply; T2: 75% supply and T3: 50% water supply in surface drip irrigation. The results showed that both AquaCrop and DSSAT had overestimated errors in simulating potato yield and water productivity ( $MBE < 0$ ). The accuracy of these two models was excellent for simulating yield and water productivity ( $NRMSE < 0.10$ ). In calibration stage, the error of AquaCrop to simulate yield and water productivity of potato water was equal to  $1.3 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  and  $0.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. While the error values for these parameters in the validation stage were equal to  $1.5 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  and  $0.23 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. DSSAT model error in the calibration stage to simulate water yield and productivity is equal to  $2.4 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  and  $0.34 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively, and in the validation stage is equal to  $0.61 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  and  $0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. Therefore, both crop models used had acceptable error. The EF values for the yield simulated by AquaCrop and DSSAT models were 0.92 and 0.98, respectively. The EF values for water productivity of these two models were determined to be -2.6 and 0.17, respectively. According to these results, the use of both models for potato simulation is suggested. However, the results obtained for the DSSAT were better accurate and efficient.

**Key words:** Crop growth model, Drip irrigation, Water-driven model, Water requirement, Water stress.

---

1- MS.c Student, Department of Water Engineering and Sciences, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran  
2- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran  
3- Assistant professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran  
(\*-Corresponding author: Email: a\_eigder@ymail.com)