

ارزیابی شبیه‌سازی عملکرد، بهره‌وری آب گیاه آفتابگردان و شوری خاک تحت تنش‌های آبی و شوری با استفاده از مدل AquaCrop

معظم خالقی^{*۱}

۱) دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران.

*نویسنده مسئول مکاتبات: khaleghi.83@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

چکیده:

مدل AquaCrop ابزاری توانمند در شبیه‌سازی پاسخ گیاه به مدیریت‌های مختلف کمی و کیفی آبیاری می‌باشد که توسط سازمان جهانی خواروبار (FAO) توسعه یافته است. در این تحقیق جدیدترین نسخه این مدل (V. 6) به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد، بهره‌وری آب گیاه آفتابگردان و شوری خاک تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری با آب شور مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های مزرعه‌ای موردنیاز برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل طی دو سال زراعی (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴) جمع‌آوری شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب بلوک کامل تصادفی شامل دو فاکتور مدیریت کمی آبیاری در دو سطح (آبیاری کامل و آبیاری ناقص ریشه در سطح ۷۵ درصد) و مدیریت کیفی آب آبیاری در سه سطح (آب غیرشور، آب شور و تناوب آب شور و غیرشور) و در سه تکرار اجرا شد. با وجود کاهش ۳/۱ - ۳۲ درصدی در عملکرد دانه تحت تیمارهای مختلف آبیاری در مقایسه با FI (۴۷۰۶ و ۴۳۶۷ کیلوگرم در هکتار به ترتیب در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴)، تیمار PRD₁ کاهش جزئی ۳/۱٪ و ۵٪ را به ترتیب در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ نتیجه داد. تیمار FI حداکثر WP_{ET} (۰/۹ و ۰/۸۴ کیلوگرم بر مترمکعب به ترتیب در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴) را داشت و تیمارهای PRD₁، PRD₂، PRD₃، SI، FSI در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که حساسیت مدل نسبت به رطوبت حجمی خاک در نقطه اشباع و ظرفیت زراعی خاک، حداکثر پوشش تاجی، شاخص برداشت مرجع، مدت زمان کاشت تا گلدهی، مدت زمان کاشت تا حداکثر پوشش تاجی و ضریب رشد پوشش تاجی بیشتر از سایر پارامترهاست. بر اساس مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیست‌توده، مقادیر NRMSE در محدوده ۸/۱۴ - ۵/۹ درصد قرار داشت که بیانگر این است که مدل به خوبی قادر به شبیه‌سازی زیست‌توده آفتابگردان در طول فصل رشد می‌باشد. مقدار NRMSE کمتر از ۱۰ درصد در سال اول نشان از شبیه‌سازی ایده‌آل و مقدار بین ۱۰ تا ۳۰ درصد در سال دوم بیانگر شبیه‌سازی قابل قبول عملکرد دانه است. همبستگی خوبی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بهره‌وری آب با R² برابر با ۰/۸۶ و ۰/۷۵ به ترتیب برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بدست آمد. نتایج شبیه‌سازی شوری خاک حاکی از همبستگی قابل قبول بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف در هر دو سال می‌باشد (با R² برابر با ۰/۸۴ و ۰/۹۴ به ترتیب برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی). در نهایت می‌توان پیشنهاد کرد که مدل AquaCrop با تخمین‌های قابل اطمینان در پیش‌بینی پارامترهای تولیدی، بهره‌وری آب آفتابگردان و شوری خاک تحت سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: آب شور؛ آبیاری ناقص ریشه؛ شوری خاک؛ مدل شبیه‌سازی؛ مدیریت کیفی آبیاری

مقدمه

برای کاهش مصرف آب و یا جایگزین برای منابع محدود آب شیرین موجود باشند (Kang et al., 2010). از آنجایی که بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده منابع آبی می‌باشد، لذا افزایش بهره‌وری مصرف آب آبیاری با

بحران جهانی آب از یک سو و رقابت برای آب شیرین به‌منظور توسعه شهری، صنعت و کشاورزی از سوی دیگر محققان را بر آن داشته تا به‌دنبال راهکاری

است. سادگی، نیاز به حداقل داده ورودی و دقت قابل قبول از امتیازات این مدل می‌باشد (امیری و همکاران، ۱۳۹۴). از زمان توسعه این مدل تاکنون تحقیقات بی‌شماری به منظور ارزیابی آن صورت گرفته است. بابازاده و سرائی تبریزی (۱۳۹۱) کارآیی مدل AquaCrop را تحت شرایط مدیریت کم‌آبیاری سویا مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی‌های به‌دست آمده در این مطالعه نشان داد که مدل توانایی بالایی در پیش‌بینی عملکرد محصول، تبخیر و تعرق گیاهی و کارآیی مصرف آب سویا دارد. امیری و همکاران (۱۳۹۴) بر اساس یک تحقیق دو ساله مزرعه‌ای، به ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم تحت تنش آبی پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی بیوماس محصول و عملکرد دانه گندم است. نتایج گزارش شده توسط سعادت و همکاران (۱۳۹۷) مبین عملکرد خوب مدل AquaCrop در شبیه‌سازی پوشش گیاهی، ماده خشک و عملکرد گیاه چغندر قند و رطوبت خاک تحت رژیم‌های مختلف آبیاری است. تحقیقات Kheir و Hassan (۲۰۱۶) بر روی گیاه ذرت تحت رژیم‌های مختلف آبیاری نشان داد که مدل AquaCrop به خوبی قادر به پیش‌بینی عملکرد، بیوماس و بهره‌وری آب ذرت بوده و می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری خوب برای بررسی مدیریت‌های آبیاری در مصر در نظر گرفته شود. Todorovic و همکاران (۲۰۰۹) سه مدل گیاهی CropSyst، WOFOST و AquaCrop را در جنوب ایتالیا برای گیاه آفتابگردان تحت سه رژیم آبیاری ارزیابی و مقایسه کردند. نتایج نشان‌دهنده برتری مدل AquaCrop هم از لحاظ شبیه‌سازی عملکرد و هم داده‌های ورودی مورد نیاز بود. با توجه به اینکه بررسی اثرات تنش شوری بر رشد و عملکرد محصول در نسخه‌های جدید مدل AquaCrop (نسخه ۴ به بالا) امکان‌پذیر می‌باشد، تحقیقات زیادی در زمینه ارزیابی این مدل تحت تنش شوری اجرا نشده است. Hassanli و همکاران (۲۰۱۶)،

کاربرد تکنیک‌های جدید آبیاری نظیر کم‌آبیاری و آبیاری ناقص ریشه می‌تواند در کاهش فشار بر منابع آب با کیفیت موثر باشد (Sezen et al., 2011, Mousavi et al., 2010). همچنین در بسیاری از مناطق تحت تأثیر بحران آب، منابع آب شور به‌عنوان یک جایگزین به‌منظور آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرچند که کاربرد نادرست آن ممکن است کاهش عملکرد محصول و یا شور شدن خاک را در پی داشته باشد (Kang et al., 2010, Domínguez et al., 2011). ارزیابی روش‌ها و مدیریت‌های مختلف آبیاری با اجرای تحقیقات میدانی امکان‌پذیر می‌باشد. این شیوه نیازمند صرف هزینه، منابع انسانی و زمان زیادی می‌باشد. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، محدودیت‌های موجود در تحقیقات میدانی را به حداقل رسانده و امکان تحلیل واکنش گیاه به تنش‌های محیطی و سناریوهای مدیریتی را فراهم می‌کند (Oiganji et al., 2016). لازم به ذکر است که مدل‌ها به طور کامل نمی‌توانند جایگزین مطالعات صحرائی شوند و استفاده ترکیبی از مدل‌های پیش‌بینی و آزمایشات مزرعه‌ای راهکار قابل قبولی می‌باشد (Farahani et al., 2009). دقت نتایج حاصل از مدل‌ها به دقت داده‌های ورودی بستگی دارد. در صورت دسترسی به این داده‌ها و واسنجی صحیح، این مدل‌ها قادر به ارزیابی مدیریت‌های مختلف آبیاری و اثرات دراز مدت آن خواهند بود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴، Oiganji et al., 2016). مدل‌های شبیه‌سازی بسیاری وجود دارد که رشد گیاه، عملکرد محصول و شوری خاک را تحت تنش‌های محیطی مختلف همچون تنش آبی و شوری پیش‌بینی می‌کند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به SWAP، CERES-maize، SALTMED، CropSyst، WOFOST و AquaCrop اشاره کرد، که هر کدام دارای مزایا و معایبی نسبت به دیگری هستند (Hassanli et al., 2016). مدل AquaCrop یکی از ابزارهای توانمند در شبیه‌سازی پاسخ گیاه به مدیریت‌های مختلف زراعی و آبیاری می‌باشد که توسط سازمان جهانی خوارو بار (FAO) توسعه یافته

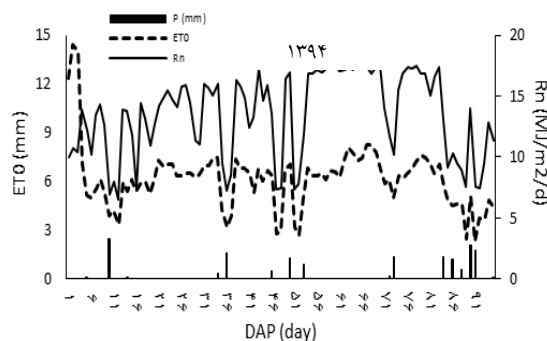
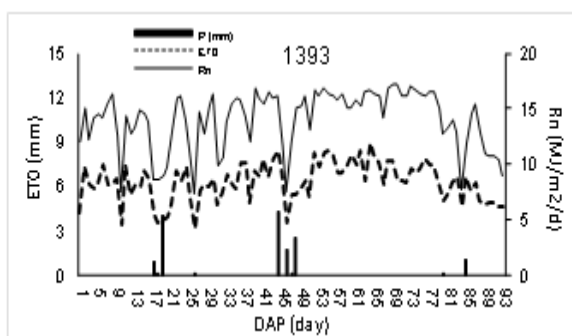
تاثیر مدیریت آبیاری ناقص ریشه با کاربرد آب شور حاصل از آب دریا می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

آزمایش مزرعه‌ای تحقیق حاضر طی دو فصل زراعی ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ در مزرعه پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با موقعیت جغرافیایی ۳۶/۳۹ درجه شمالی و ۵۳/۰۴ شرقی و ارتفاع از سطح دریای آزاد ۱۵ متر به اجرا درآمد. میانگین بارش سالانه ۶۱۶ میلی‌متر می‌باشد که قسمت عمده بارش‌ها (حدود ۷۰ درصد) در فصول پاییز و زمستان رخ می‌دهد. دمای بیشینه، کمینه و میانگین در بازه بلند مدت به ترتیب ۳۸/۹، ۶- و ۱۷/۳ درجه سانتی‌گراد است (Karandish, 2014). داده‌های هواشناسی مورد نیاز از ایستگاه هواشناسی مستقر در دانشگاه ساری جمع‌آوری شد. تغییرات زمانی متغیرهای هواشناسی در طول دو فصل زراعی در شکل (۱) ارائه شده است.

عملکرد ذرت را با استفاده از سه مدل AquaCrop، SALTMED و SWAP شبیه‌سازی کردند. این پژوهشگران گزارش کردند که عملکرد دو مدل SALTMED و SWAP در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت تنش شوری بهتر از مدل AquaCrop بود. خرسند و همکاران (۱۳۹۳) پیش‌بینی عملکرد گندم و شوری خاک را تحت تنش‌های شوری و کم‌آبی و با استفاده از مدل AquaCrop انجام دادند. نتایج نشان داد که این مدل با دقت زیادی عملکرد را شبیه‌سازی نمود. اما در پیش‌بینی شوری خاک در مقایسه با عملکرد دانه خطای بیشتری داشت. از آنجاییکه مطالعات اندکی در ارزیابی کارایی مدل AquaCrop در بررسی هم‌زمان تنش شوری و آبی صورت گرفته و نیز، ارزیابی این مدل برای گیاه آفتابگردان تحت تاثیر توامان دو تنش شوری و آبی تاکنون انجام نشده است، هدف اصلی این مقاله واسنجی و صحت‌سنجی جدیدترین نسخه مدل AquaCrop (نسخه ۶، مارس ۲۰۱۷) و شبیه‌سازی زیست توده، عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب گیاه آفتابگردان تحت



شکل ۱. تغییرات زمانی بارش (P)، تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) و تشعشع خالص (R_n) در فصل زراعی (الف) ۱۳۹۳ و (ب) ۱۳۹۴.

برخی خصوصیات فیزیکی خاک منطقه مطالعاتی در جدول (۱) ارائه شده است.

خاک مزرعه تحقیقاتی دارای بافت لوم رس شنی بوده است.

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی خاک منطقه مطالعاتی

ρ_b (gr/cm ³)	K_{SAT} Cm/day	θ_{PWP} (%)	θ_{FC} (%)	θ_{SAT} (%)	EC_e (1394) (dS/m)	EC_e (1393) (dS/m)	بافت خاک	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	عمق (cm)
۱/۴۲	۱۷/۹۶	۱۵	۳۰	۴۲	۰/۹	۲/۷	Sandy clay loam	۲۲	۲۴	۵۴	۰-۲۰
۱/۴۳	۱۷/۶۰	۱۵	۳۰	۴۱/۷	۰/۸۵	۲/۶	Sandy clay loam	۲۱	۲۳	۵۶	۲۰-۴۰
۱/۴۱	۲۰/۸	۱۵	۳۰	۴۲/۵	۱/۰۵	۲/۴	Sandy clay loam	۲۴	۲۱	۵۵	۴۰-۶۰
۱/۴۳	۲۰/۲۳	۱۵	۳۰	۴۲/۱	۱/۱	۲/۵	Sandy clay loam	۲۳	۲۰	۵۷	۶۰-۱۲۰

زمانی (TDR) مدل TRIME-FM در تیمار شاهد صورت گرفت. نیاز آبی (I_n) با استفاده از فرمول (۱) محاسبه شد (Karandish, 2014):

$$I_n = \sum_{i=1}^m ((\theta_{FCi} - \theta_{Bli}) \times D_i) \quad (1)$$

که در این رابطه، θ_{FCi} مقدار رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی (%/)، θ_{Bli} میزان رطوبت حجمی خاک قبل از هر نوبت آبیاری (%/)، D_i عمق خاک آبیاری شده به میلی‌متر، i شماره لایه و m عمقی از خاک می‌باشد، که آبیاری می‌شود. θ_{Bli} با استفاده از رطوبت‌سنج‌های TDR قبل از هر نوبت آبیاری تعیین شد. مقدار نیاز آبی تعیین شده بر اساس رابطه (۱) در تیمار آبیاری کامل در کل فصل رشد و در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه نیز تا ۵۵ و ۴۴ روز (به ترتیب در سال اول و دوم کشت) بعد از کاشت اعمال شد. از زمان شروع اعمال تیمار تا انتهای فصل کشت، میزان حجم آب آبیاری در تیمارهای PRD معادل ۷۵ درصد از حجم آب ارائه شده در تیمار آبیاری کامل بود که به یک طرف ریشه داده شد. همچنین درصد سطح خیس شده به صورت میانگین در طول فصل کشت ۰/۳۵ بوده که در محاسبات تعیین نیاز آبی در سیستم آبیاری موضعی اعمال شده است. زمان تغییر آبیاری از یک سمت به سمت دیگر در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه پس از هر سه نوبت آبیاری بود. در تیمارهای کاربرد تناوبی آب شور و شیرین نیز زمان تغییر نوع آب (از غیر

قبل از کشت و اجرای آزمایش مزرعه‌ای، سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی در زمین پیاده شد. ابعاد مزرعه ۱۵×۳۰ (۴۵۰ مترمربع) بود. هر کرت با در نظر گرفتن حاشیه ۲۵ مترمربع (۵ × ۵) بود. دو لوله آبده قطره‌ای (tape) به فاصله ۱۵ سانتی‌متر در دو طرف ردیف کشت گیاه برای همه تیمارها اختصاص داده شد. لوله آبده با قطر ۱۶ میلی‌متر دارای فاصله قطره‌چکان ۲۰ سانتی‌متر بر روی لوله و دبی خروجی ۲ لیتر بر ساعت با فشار کارکرد ۱۰۰ کیلوپاسکال بود. در تحقیق حاضر، به منظور مدیریت آبیاری در کشت آفتابگردان، دو فاکتور آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفت: مدیریت کمی آب آبیاری به‌عنوان فاکتور اول (در دو سطح) و مدیریت کیفی آب آبیاری به‌عنوان فاکتور دوم (در سه سطح) در قالب طرح فاکتوریل، به‌صورت طرح پایه بلوک کامل تصادفی و با سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل آبیاری کامل با آب غیر شور (FI)، آبیاری کامل با آب شور (SI)، آبیاری کامل با تناوب آب شور و غیرشور (FSI)، آبیاری ناقص ریشه در سطح ۷۵ درصد آب مورد نیاز با آب غیرشور (PRD₁)، آبیاری ناقص ریشه در سطح ۷۵ درصد آب مورد نیاز با آب شور (PRD₂) و آبیاری ناقص ریشه در سطح ۷۵ درصد آب مورد نیاز با تناوب آب شور و غیرشور (PRD₃) بود. دور آبیاری به‌صورت یک روز درمیان و با هدف تأمین کمبود رطوبت خاک تا عمق ۶۰ سانتی‌متری در تیمار آبیاری کامل و رساندن آن به حد ظرفیت زراعی خاک بود. اندازه‌گیری رطوبت در محدوده توسعه ریشه و تعیین نیاز آبی گیاه، با استفاده از دستگاه انعکاس‌سنجی

شور به شور و بالعکس) بعد از هر سه نوبت آبیاری در نظر گرفته شد. دو نوع آب با کیفیت متفاوت (غیرشور و شور) در این تحقیق استفاده شد. آب غیرشور از چاه موجود در مزرعه با شوری تقریبی ۱ دسی زیمنس بر متر تامین شده و آب شور مورد استفاده برای این پژوهش از اختلاط آب دریای خزر با آب غیرشور به دست آمد که در نهایت، منتج به آبی با شوری ۵/۴ دسی زیمنس بر متر شد. بذر آفتابگردان (رقم آذرگل) در تاریخ ۲۴ خرداد ماه سال ۱۳۹۳ و ۸ خرداد ماه سال ۱۳۹۴ با فاصله ۲۰ سانتی-متر روی ردیف، ۷۵ سانتی‌متر بین ردیف کاشت و ۵ ردیف در هر کرت کاشت شد. بر اساس نتایج آزمون اولیه خاک، نیاز کودی خاک شامل کمبود عناصر غذایی مهم نظیر پتاسیم، فسفر و ازت به ترتیب با مصرف کودهای سولفات پتاسیم (۵۰ کیلوگرم در هکتار) و سوپر فسفات تریپل (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) در ابتدای فصل کشت و کود اوره (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) به صورت سرک در دو مرحله (ابتدای کشت و سه هفته پس از کشت) تأمین شد.

جمع‌آوری داده

به منظور اندازه‌گیری پارامتر وزن خشک اندام هوایی (بیوماس) در طول هر دو فصل زراعی و در چند نوبت تا پایان فصل کشت در تیمارهای مختلف، از هر کرت آزمایشی با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای، سه بوته برداشت شد. طبق و برگ‌ها از ساقه جدا و توزین گردید. هر قسمت گیاه به‌طور مجزا در پاکت کاغذی قرار داده شد. پس از انتقال پاکت نمونه‌ها به آزمایشگاه و قرار دادن آن در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت، پاکت‌ها مجدداً توزین و وزن خشک آن‌ها ثبت شد. سپس بیوماس کل با تعمیم وزن خشک کل اندام هوایی به یک هکتار محاسبه شد. برداشت محصول در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک در سال اول در ۲۵ شهریور و در سال دوم در ۹ شهریور صورت گرفت. به‌منظور

تعیین عملکرد دانه، از هر کرت آزمایشی با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای، در مساحتی معادل یک متر مربع، کل بوته‌ها برداشت شد. طبق‌ها از بوته جدا و توزین شد. سپس دانه‌ها از طبق جدا و عملکرد دانه (با رطوبت ۱۴ درصد) اندازه‌گیری شد. شاخص برداشت از تقسیم عملکرد اقتصادی (دانه) به بیوماس کل محاسبه شد. پس از تعیین عملکرد دانه و با تقسیم آن بر مقدار کل تبخیر و تعرق در طول فصل کشت (تبخیر و تعرق کل فصل کشت در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ به ترتیب برابر با ۵۲۴ و ۵۱۴ بود)، مقدار بهره‌وری آب گیاه (WPET) برای هر تیمار و در دو فصل کشت قابل محاسبه می‌باشد (Raes et al., 2017). به‌منظور تعیین شوری خاک، نمونه‌های خاک در طول دو فصل رشد (۱، ۵۶، ۷۲، ۸۳ و ۹۴ روز پس از کشت در سال ۱۳۹۳ و ۱، ۵۹، ۷۲ و ۹۵ پس از کشت در سال ۱۳۹۴) با استفاده از اگر از عمق‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ و فواصل افقی ۰، ۷/۵ و ۱۵ سانتی‌متر از نوار تیپ برای همه تیمارهای آزمایشی و در سه تکرار جمع‌آوری شد. پس از هوا خشک شدن، کوبیدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پمپ خلا عصاره‌گیری شد. هدایت الکتریکی عصاره اشباع با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (ELMETRON. cc-401) اندازه‌گیری شد.

تشریح مدل

در پژوهش حاضر، به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و اجزای عملکرد، شاخص برداشت، بهره‌وری آب گیاه آفتابگردان و شوری خاک از مدل AquaCrop نسخه ۶ استفاده شد. تخمین عملکرد محصول توسط AquaCrop بر پایه رابطه دورنباس و کاسام (رابطه ۲) بوده که بر اساس معادله بیان آب عمل می‌کند (Raes et al., 2017, Raes et al., 2009):

دربرگیرنده اطلاعات اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه است. داده‌های اقلیمی شامل دمای حداقل و حداکثر، میانگین سالیانه غلظت CO₂، بارش و تبخیر و تعرق مرجع به صورت روزانه است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵، Hassanli et al., 2016). تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) با استفاده از روش فائو پنمن - مونیتیت محاسبه شد (Allen et al., 1998). برای میانگین غلظت CO₂ نیز از پیشفرض مدل استفاده شد که مقدار اندازه‌گیری شده از سال ۱۹۰۲ تا ۲۰۹۹ در رصدخانه Mauna Loa واقع در هاوایی می‌باشد (Raes et al., 2017). اطلاعات گیاهی از چهار بخش فنولوژی و پوشش تاج گیاه، تعرق، بیوماس و عملکرد قابل برداشت و تنش‌ها تشکیل شده است. تنش‌های در نظر گرفته شده در مدل در برگیرنده تنش‌های آبی، حاصلخیزی، درجه حرارت و شوری می‌باشد (خرسند و همکاران، ۱۳۹۳). خصوصیات خاک نظیر رطوبت در نقطه اشباع، ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم، هدایت هیدرولیکی اشباع، بافت و ضخامت هر لایه خاک به‌عنوان داده‌های ورودی بر اساس خاک مزرعه تحقیقاتی به مدل داده شد. اطلاعات لازم برای بخش مدیریت مزرعه خود در دو زیردسته مدیریت آبیاری و مدیریت زراعی و حاصلخیزی تقسیم‌بندی می‌شود. روش آبیاری قطره‌ای با سطح خیس شده ۴۰ درصد و برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس عمق و زمان آب آبیاری به‌کار برده شده در دو فصل زراعی و تیمارهای مختلف به‌عنوان ورودی بخش مدیریت آبیاری استفاده شد. حاصلخیزی خاک بر اساس شرایط مزرعه بدون محدودیت در نظر گرفته شد.

آنالیز حساسیت مدل

به‌منظور تعیین پارامترهای ورودی حساس و تأثیرگذار بر خروجی، تحلیل حساسیت مدل انجام گرفت. بدین صورت که در هر نوبت یکی از پارامترهای ورودی به میزان $\pm 5\%$ درصد تغییر داده شد و با ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها مدل اجرا شد. برای هر نوبت، مقادیر خروجی

$$\left(1 - \frac{Y}{Yx}\right) = Ky \left(1 - \frac{ET}{ETx}\right) \quad (2)$$

که در آن، Yx: حداکثر عملکرد، Y: عملکرد واقعی، ETx: حداکثر تبخیر و تعرق، ET: تبخیر و تعرق واقعی و Ky: فاکتور تناسب بین افت نسبی عملکرد و کاهش نسبی تبخیر و تعرق است. مدل AquaCrop با تفکیک تبخیر و تعرق به تعرق گیاه (Tr) و تبخیر از سطح خاک (E) مانع از مصرف غیرتولیدی آب از طریق تبخیر سطح خاک به خصوص در شرایط پوشش ناکامل گیاهی می‌گردد. محاسبه عملکرد (Y) در مدل با استفاده از شاخص برداشت (HI) و بیوماس (B) به صورت ذیل انجام می‌شود (Raes et al., 2017):

$$Y = HI \times B \quad (3)$$

اثر تنش آبی در مدل به وسیله ضریب Ks توصیف شده است که مقدار آن در شرایط تنش آبی بین صفر تا یک متغیر است. همچنین مدل AquaCrop (نسخه‌های ۴ به بالا) امکان در نظر گرفتن تنش شوری را علاوه بر تنش‌های دیگر نظیر تنش آبی و تنش کودی فراهم آورده است. تنش شوری موجب کاهش پتانسیل آب و افزایش فشار اسمزی در منطقه توسعه ریشه می‌شود. نیروی اسمزی حاصل از تنش شوری سبب تغییر مقادیر ضرایب K_{sen} (ضریب تنش آبی برای پیری زودرس)، K_{exp, w} (ضریب تنش آبی برای توسعه کانوپی) و K_{sto} (ضریب تنش آبی برای بسته شدن روزنه‌ها) می‌شود. در واقع با ضرب کردن ضریب تنش شوری (K_{sto, salt}) در حد بالا و پایین تخلیه آب (P_{lower} و P_{upper})، ضرایب K_{sen}، K_{exp, w} و K_{sto} این ضرایب در شرایط همزمان تنش آبی و شوری اصلاح می‌شوند (خرسند و همکاران، ۱۳۹۳).

پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل AquaCrop در چهار گروه اصلی دسته‌بندی می‌شود. این چهار گروه

پس از وارد کردن شرایط اولیه نظیر شوری و رطوبت اولیه خاک مدل اجرا گردید. بر اساس خروجی‌های به‌دست آمده، واسنجی مدل برای گیاه آفتابگردان آغاز شد. داده‌های بخش گیاهی به‌خصوص پارامترهای حساس مدل بر اساس آنالیز حساسیت، با توجه به مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بیوماس، عملکرد دانه و بهره‌وری آب اصلاح شد. فرآیند واسنجی ابتدا بر اساس تیمار شاهد صورت گرفت و سپس از طریق تأثیر ضرایب حساسیت گیاه به تنش‌های شوری و کم‌آبی شرایط تیمارهای تحت تنش اعمال شد. مرحله واسنجی با استفاده از روش سعی و خطا تا رسیدن به بهترین توافق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ادامه پیدا کرد. مقادیر پارامترهای گیاهی نهایی واسنجی شده در مدل در جدول (۲) ارائه شده است.

صحت‌سنجی یکی از مهم‌ترین مراحل تأیید مدل‌های شبیه‌سازی می‌باشد. صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای گیاه آفتابگردان با استفاده از داده‌های مزرعه به‌دست آمده از فصل زراعی دوم (۱۳۹۴) و بدون تغییر در پارامترهای نهایی شده در مرحله واسنجی برای تمامی تیمارهای مورد بررسی انجام شد. خروجی‌های به‌دست آمده از این مرحله نیز با مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر در آزمایش مزرعه‌ای مقایسه شد.

حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر مبنا مقایسه شد و از طریق رابطه (۵) ضریب حساسیت پارامتر تعیین شد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵):

$$Sc = \left(\frac{\frac{\Delta W}{\bar{W}}}{\frac{\Delta P}{\bar{P}}} \right) \quad (4)$$

که در آن، Sc: ضریب حساسیت بی‌بعد، ΔW : اختلاف مقدار خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، \bar{W} : متوسط مقدار خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، ΔP : اختلاف مقادیر پارامتر ورودی و \bar{P} : متوسط مقادیر پارامتر ورودی به مدل است. چنانچه مقدار ضریب حساسیت بدست آمده از رابطه (۵) بیش‌تر از ۱/۵ باشد، مدل نسبت به پارامتر مربوطه دارای حساسیت بالاست. اگر مقدار این ضریب بین ۰/۳ تا ۱/۵ باشد نشان‌دهنده حساسیت متوسط مدل به پارامتر ورودی مورد نظر می‌باشد. در نهایت اگر مقدار ضریب حساسیت کمتر از ۰/۳ و صفر باشد به ترتیب بیانگر حساسیت کم و بدون حساسیت بودن مدل نسبت به پارامتر تغییر یافته می‌باشد (Liu et al., 2007).

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

تمامی داده‌های ورودی مورد نیاز بر اساس داده‌های به‌دست آمده از فصل کشت اول (۱۳۹۳) وارد مدل شد.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای گیاهی نهایی واسنجی شده در مدل

پارامتر	مقدار	واحد	روش واسنجی
دمای پایه	۴	°C	پیش فرض
حداکثر دما	۳۰	°C	پیش فرض
تراکم گیاه	۶/۷	plants/m ²	اندازه گیری شده
ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل (KcTr)	۱/۱۵		آلن و همکاران (۱۹۹۸)
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه زنی ۹۰ درصد (CC0)	۰/۶	%	واسنجی شده
ضریب رشد پوشش تاجی (CGC)	۱۹/۳	% / day	واسنجی شده
ضریب کاهش پوشش تاجی (CDC)	۸/۳	% / day	واسنجی شده
حداکثر پوشش تاجی (CCx)	۹۰	%	اندازه گیری شده
مدت زمان کاشت تا جوانه زنی	۶	DAS	اندازه گیری شده
مدت زمان کاشت تا حداکثر پوشش تاجی	۴۵	DAS	اندازه گیری شده
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۸۴	DAS	واسنجی شده
مدت زمان کاشت تا بلوغ	۹۴	DAS	اندازه گیری شده
حداکثر عمق مؤثر ریشه	۱	m	واسنجی شده
حداقل عمق مؤثر ریشه	۰/۳	m	پیش فرض
بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)	۱۸	g/m ²	پیش فرض
شاخص برداشت مرجع (HI0)	۴۱	%	واسنجی شده
آستانه پایین شوری عصاره اشباع خاک	۴	dS/m	آلن و همکاران (۱۹۹۸)
آستانه بالای شوری عصاره اشباع خاک	۱۸	dS/m	آلن و همکاران (۱۹۹۸)
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی (Pupper)	۰/۰۲		واسنجی شده
آستانه پایین ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی (Plower)	۰/۳۵		واسنجی شده
ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه	۱/۱		واسنجی شده
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها (Pupper)	۰/۲۵		واسنجی شده
ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	۱/۸		واسنجی شده
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی (Pupper)	۰/۳۵		واسنجی شده
ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه	۲/۲		واسنجی شده

$$ME = \max |S_i - O_i| \quad (۹)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (۱۰)$$

که در این روابط، n ، O_i ، S_i ، \bar{O} و \bar{S} به ترتیب تعداد مشاهدات، مقدار اندازه‌گیری شده، مقادیر اندازه‌گیری شده، مقادیر شبیه‌سازی شده، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشد. در بهترین حالت یعنی برابری مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده، مقدار RMSE، NRMSE، CRM و ME برابر صفر و R^2 برابر یک خواهد بود. مقدار منفی شاخص CRM بیانگر

ارزیابی آماری مدل

کارایی مدل با استفاده از شاخص‌های ارزیابی آماری نظیر خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE)، خطای میانگین مربعات ریشه نرمال شده (NRMSE)، ضریب باقیمانده (CRM)، حداکثر خطا (ME) و ضریب تبیین (R^2) ارزیابی شد.

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2 \right\}^{0.5} \quad (۶)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (۷)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (۸)$$

تمایل مدل به بیش برآورد و مقدار مثبت آن تمایل مدل به کم برآورد می‌باشد. ضریب R^2 نشان‌دهنده نسبت پراکندگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است. مقدار NRMSE کمتر از ۱۰ درصد بیانگر شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد شبیه‌سازی خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد شبیه‌سازی متوسط و در نهایت مقادیر بالای ۳۰ درصد شبیه‌سازی ضعیف می‌باشد (Hassanli et al., 2016).

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت

مقادیر ضریب حساسیت محاسبه شده برای تعدادی از پارامترهای ورودی مدل AquaCrop در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به محدوده پیشنهاد شده توسط Liu و همکاران (۲۰۰۷)، نتایج بیانگر حساسیت کم مدل نسبت به تغییر در پارامترهای دمای پایه، حداکثر دما، پوشش گیاهی اولیه، ضریب کاهش پوشش تاجی، مدت زمان کاشت تا جوانه زنی، آستانه بالای شوری عصاره اشباع خاک، رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. بنابراین خطاهای

حاصل از اندازه‌گیری این پارامترها قابل اغماض می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که حساسیت مدل نسبت به پارامترهای رطوبت حجمی خاک در نقطه اشباع و ظرفیت زراعی خاک، حداکثر پوشش تاجی، شاخص برداشت مرجع، بهره‌وری آب، مدت زمان کاشت تا گلدهی، مدت زمان کاشت تا حداکثر پوشش تاجی و ضریب رشد پوشش تاجی بیشتر از سایر پارامترهاست. بنابراین لازم است که در اندازه‌گیری این پارامترها دقت بیشتری به‌عمل آورد، زیرا که موجبات خطای قابل‌توجهی را در خروجی مدل فراهم می‌آورد. این نتایج با نتایج تحقیق Geerts و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی داشت. همچنین، بابازاده و سرائی تبریزی (۱۳۹۱) حساسیت کم مدل به مدت زمان کاشت تا جوانه زنی و حساسیت بیشتر نسبت به ضریب رشد پوشش تاجی، شاخص برداشت مرجع و بهره‌وری آب نرمال شده را گزارش کردند. نتایج تحقیق محمدی و همکاران (۱۳۹۴) نیز نشان‌دهنده حساسیت بالای مدل به پارامترهای شاخص برداشت مرجع، رطوبت حجمی خاک در نقطه اشباع و ظرفیت زراعی خاک بود.

جدول ۳. مقادیر ضریب حساسیت برای تعدادی از پارامترهای ورودی مدل

پارامترهای ورودی مدل	Sc (+۵۰٪)	Sc (-۵۰٪)	درجه حساسیت
دمای پایه	۰/۰۰	۰/۰۰	بدون حساسیت
حداکثر دما	۰/۰۰	۰/۰۶	حساسیت کم
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه زنی ۹۰ درصد (CC ₀)	۰/۱۰	۰/۱۰	حساسیت کم
ضریب رشد پوشش تاجی (CGC)	۰/۲۷	۰/۶۶	حساسیت متوسط
ضریب کاهش پوشش تاجی (CDC)	۰/۰۱	۰/۰۱	حساسیت کم
حداکثر پوشش تاجی (CC _X)	۰/۶۴	۰/۷۲	حساسیت متوسط
مدت زمان کاشت تا جوانه زنی	۰/۱۴	۰/۰۰	حساسیت کم
مدت زمان کاشت تا حداکثر پوشش تاجی	۰/۶۰	۰/۲۸	حساسیت متوسط
مدت زمان کاشت تا گلدهی	۰/۳۸	۰/۳۰	حساسیت متوسط
بهره‌وری آب (WP*)	۰/۹۴	۱/۰۰	حساسیت متوسط
شاخص برداشت مرجع (HI ₀)	۱/۰۱	۱/۰۲	حساسیت متوسط
آستانه پایین شوری عصاره اشباع خاک	۰/۰۰	۰/۰۰	بدون حساسیت
آستانه بالای شوری عصاره اشباع خاک	۰/۰۰	۰/۰۸	حساسیت کم
رطوبت حجمی خاک در نقطه ظرفیت زراعی (θ _{FC})	۴/۵۵	۰/۰۱	حساسیت زیاد
رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم (θ _{PWP})	۰/۳۱	۰/۰۱	حساسیت کم
رطوبت حجمی خاک در نقطه اشباع (θ _{SAT})	۰/۰۱	۴/۴۱	حساسیت زیاد
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K _{SAT})	۰/۰۰	۰/۰۰	بدون حساسیت

زیست توده (بیوماس)

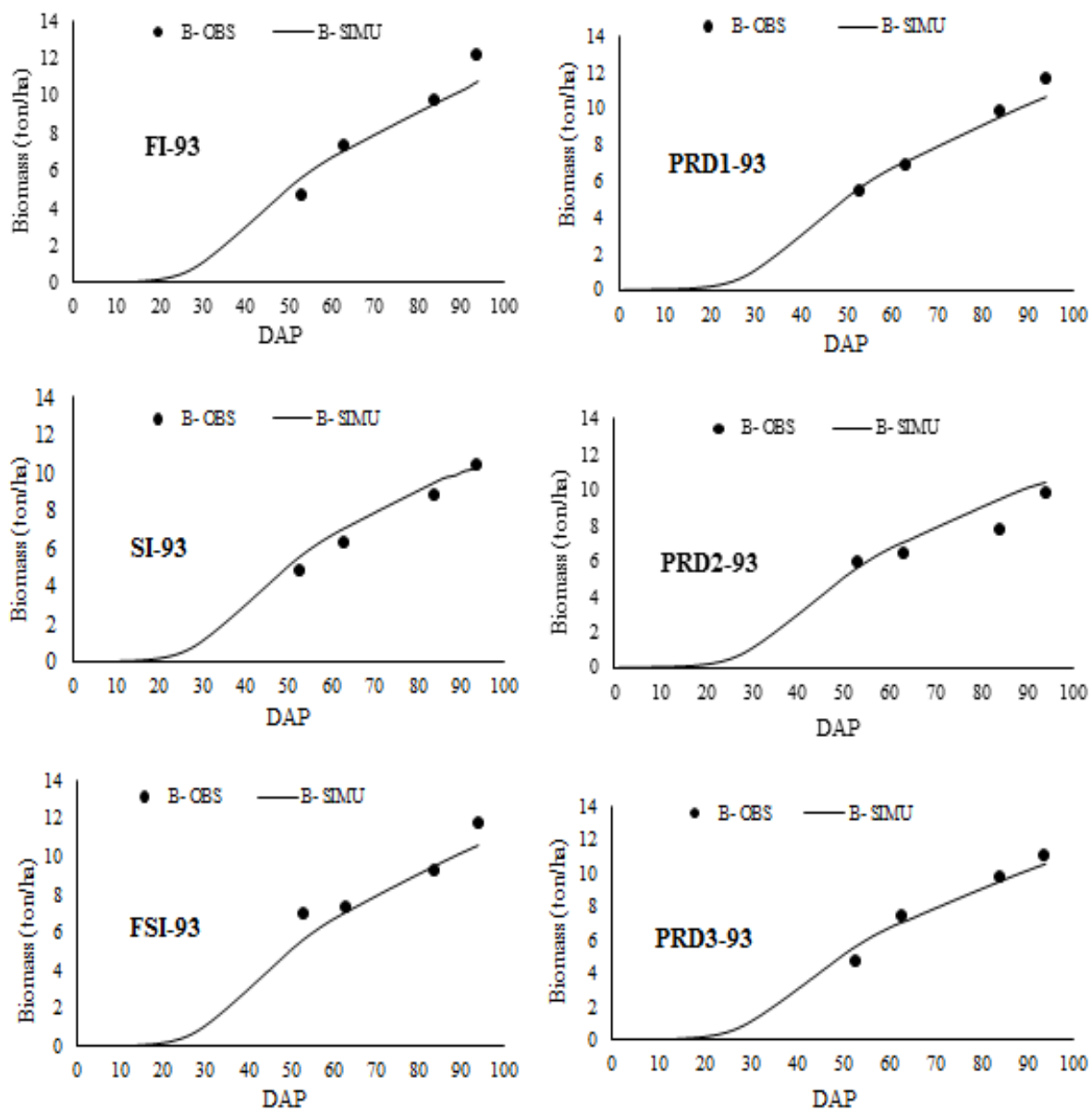
با توجه به مقادیر منفی شاخص CRM در تیمار PRD₂ (در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی) و در تیمار SI (در مرحله واسنجی)، مقادیر پیش بینی شده بیوماس از مقادیر واقعی بزرگتر بود. به عبارتی مدل در تیمارهای تحت تنش شوری (SI) و یا تنش توامان شوری و آبی (PRD₂) تمایل به بیش برآورد بیوماس دارد. امیری و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیق خود تمایل مدل AquaCrop به بیش برآورد بیوماس گندم تحت تنش آبی را گزارش کردند. در دیگر تیمارها و در هر دو فصل کشت، مقادیر مثبت شاخص CRM نشان از تمایل مدل به کم-برآورد کردن مقادیر بیوماس آفتابگردان می‌باشد.

شکل (۲) و (۳) مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی بیوماس در طول دوره‌ی رشد را برای تیمارهای مختلف آبیاری در مرحله واسنجی (۱۳۹۳) و صحت‌سنجی (۱۳۹۴) نشان می‌دهد. روند مشاهده شده در این شکل‌ها و همچنین مقادیر ضریب تبیین (R²) بدست آمده در همه تیمارها در هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی (جدول ۴) بیانگر همبستگی بالای مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل است. بطور مشابه، حسینی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیق خود ضریب تبیینی برابر با ۰/۹۷ و ۰/۸۹ به ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، برای شبیه‌سازی زیست توده سویا تحت مدیریت شوری و کم‌آبیاری گزارش کردند که با نتایج این تحقیق منطبق می‌باشد.

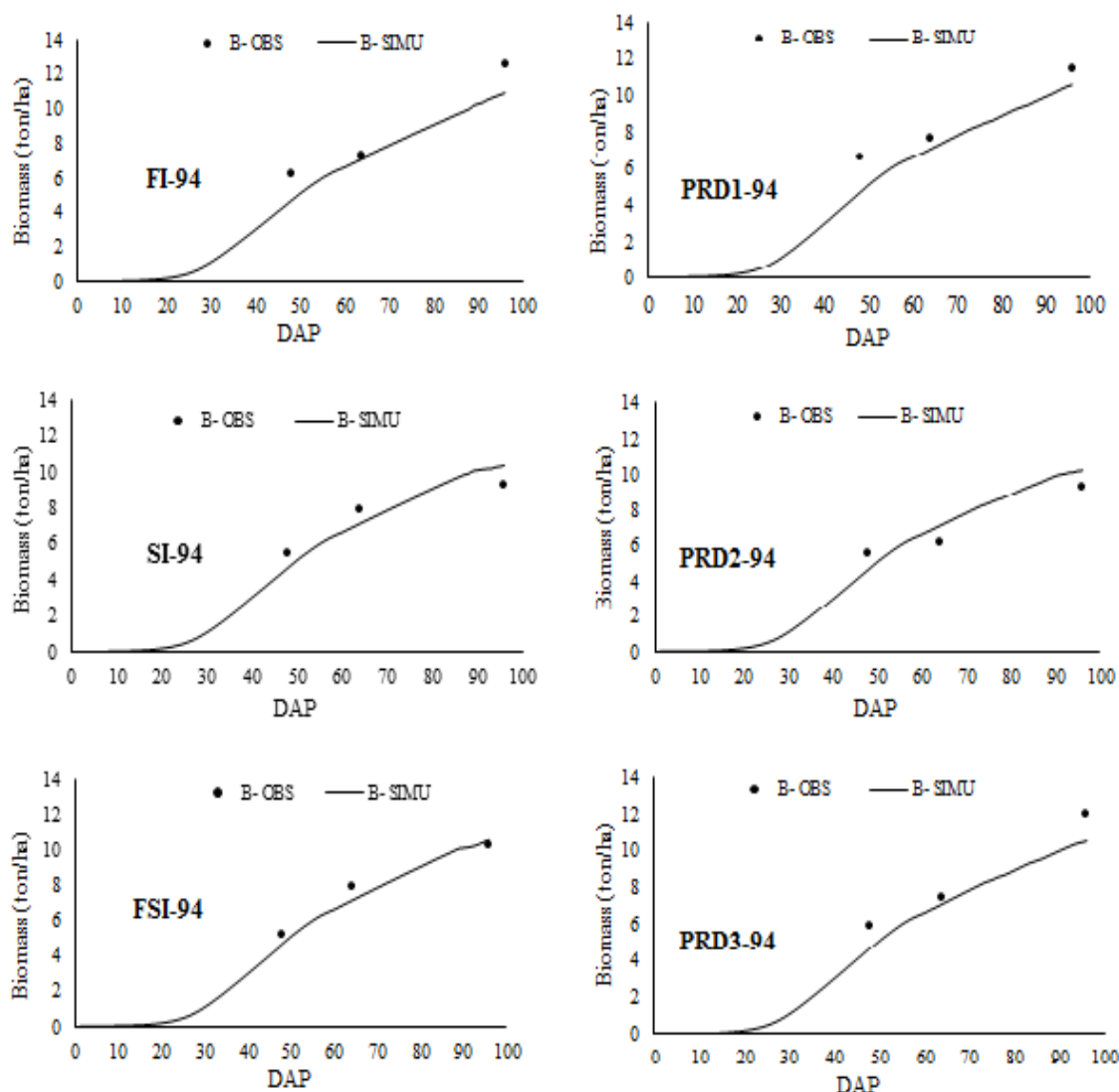
با توجه به شاخص‌های آماری محاسبه شده بر اساس مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی بیوماس در طول دو فصل کشت (جدول ۴)، مدل با خطای میانگین مربعات ریشه در محدوده ۰/۴۹-۱/۲۸ تن در هکتار، خطای میانگین مربعات ریشه نرمال شده در محدوده ۰/۸۲-۱۴/۸۷ درصد، ضریب باقیمانده در محدوده ۰/۱۳-۰/۸۷ حداکثر خطا در محدوده ۰/۷۳-۱/۸۹ تن در هکتار و ضریب تبیین در محدوده ۰/۸۸-۰/۹۹، دارای دقت قابل قبولی در پیش‌بینی بیوماس در طول دوره‌ی رشد در هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی در مدیریت‌های مختلف آبیاری بود. هرچند که بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه شده، مدل در مرحله واسنجی بهتر از مرحله صحت‌سنجی عمل نموده است. استریسیویچ و همکاران (۲۰۱۱) نتایجی مشابه با دست‌آورد تحقیق حاضر گزارش کردند. مقادیر NRMSE کمتر از ۱۵ درصد در تمامی مدیریت‌های آبیاری نشان‌دهنده کارایی بسیار خوب مدل در شبیه‌سازی زیست توده در طول فصل رشد آفتابگردان می‌باشد. نتایج مشابهی برای شبیه‌سازی بیوماس تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری توسط Paredes و همکاران (۲۰۱۴) و Oiganji و همکاران (۲۰۱۶) ارائه شده است. حیدری‌نیا و همکاران (۱۳۹۱)، درصد خطای نرمال شده این مدل برای شبیه‌سازی بیوماس آفتابگردان را کمتر از ۵ درصد گزارش نمودند.

جدول ۴. مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی بیوماس در تیمارهای مختلف آبیاری

تیمار آبیاری	۱۳۹۳					۱۳۹۴				
	RMSE (ton/ha)	NRMSE (%)	CRM (-)	ME (ton/ha)	R ² (-)	RMSE (ton/ha)	NRMSE (%)	CRM (-)	ME (ton/ha)	R ² (-)
FI	۰/۸۷	۱۰/۲۸	۰/۰۲	۱/۳۷	۰/۹۸	۱/۲۸	۱۴/۸۲	۰/۱۳	۱/۶۰	۰/۹۴
SI	۰/۶۰	۷/۰۳	-۰/۰۵	۰/۷۳	۰/۹۷	۰/۹۲	۱۲/۱۱	۰/۰۳	۱/۰۹	۰/۹۴
FSI	۰/۸۸	۱۰/۰۲	۰/۰۷	۱/۳۰	۰/۸۹	۰/۵۷	۷/۳۱	۰/۰۴	۰/۸۰	۰/۹۸
PRD1	۰/۴۹	۵/۸۷	۰/۰۲	۰/۹۲	۰/۹۹	۱/۲۶	۱۴/۷۲	۰/۱۳	۱/۸۹	۰/۹۶
PRD2	۰/۹۸	۱۳/۱۰	-۰/۰۹	۱/۷۵	۰/۸۸	۰/۹۲	۱۳/۱۵	-۰/۰۴	۰/۹۴	۰/۹۱
PRD3	۰/۶۰	۷/۲۹	۰/۰۰	۱/۰۲	۰/۹۸	۱/۱۲	۱۳/۳۶	۰/۱۲	۱/۵۲	۰/۹۷



شکل ۲. مقادیر مشاهده‌ای (OBS) و شبیه‌سازی (SIMU) بیوماس در طول دوره‌ی رشد برای تیمارهای مختلف آبیاری در مرحله واسنجی (۱۳۹۳)



شکل ۳. مقادیر مشاهده‌ای (OBS) و شبیه‌سازی (SIMU) بیوماس در طول دوره‌ی رشد برای تیمارهای مختلف آبیاری در مرحله صحت‌سنجی (۱۳۹۴)

در تحقیقی مشابه، مقادیر NRMSE کمتر از ۵

درصد را در پیش‌بینی عملکرد دانه گندم گزارش کردند. به استثنای دو تیمار تحت شوری ثابت (PRD₂ و SI)، مقادیر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد شاخص NRMSE در سال دوم بیانگر شبیه‌سازی خوب عملکرد دانه توسط مدل در مرحله صحت‌سنجی است. کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد این دو تیمار نام برده ضعیف بوده است (مقادیر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد شاخص NRMSE). هر چند که روند کاهش عملکرد تحت تاثیر تنش آبی و شوری به خوبی توسط مدل شبیه‌سازی شده است. کاهش دقت مدل در

عملکرد دانه

بر اساس جدول (۵)، معیارهای ارزیابی آماری نشان داد که شبیه‌سازی عملکرد دانه به صورت قابل‌قبولی توسط مدل AquaCrop صورت گرفته است. هر چند که بر اساس تمامی شاخص‌های بدست آمده، شبیه‌سازی عملکرد دانه همانند بیوماس در مرحله واسنجی بهتر از مرحله صحت‌سنجی بود. چنین روندی در تحقیق حسینی و همکاران (۱۳۹۵) نیز مشاهده شده است. مقادیر NRMSE کمتر از ۱۰ درصد در سال اول نشان از شبیه‌سازی ایده‌آل عملکرد دانه در مرحله واسنجی است. امیری و همکاران

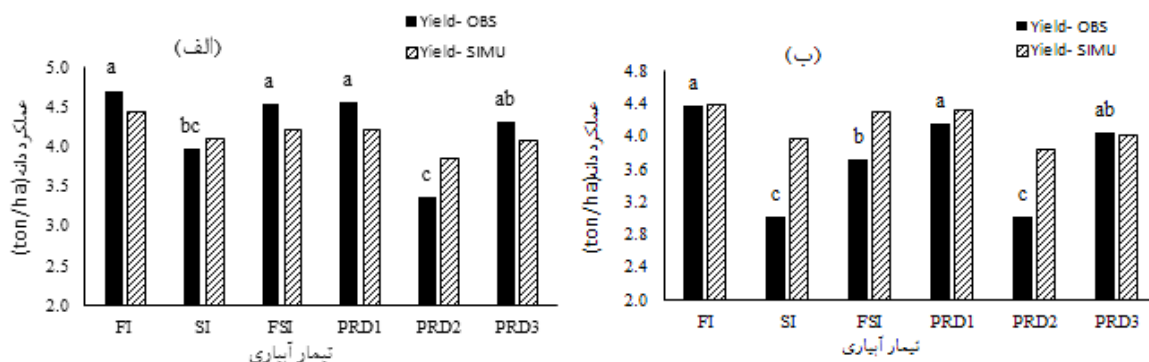
شبیه‌سازی عملکرد در شرایط تنش توسط حسینی و همکاران (۱۳۹۵) نیز گزارش شده است که مؤید نتایج این تحقیق می‌باشد.

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تیمارهای مختلف آبیاری

شاخص‌های آماری	مرحله شبیه‌سازی	تیمارهای آبیاری					
		FI	SI	FSI	PRD1	PRD2	PRD3
NRMSE (%)	واسنجی	۵/۷۱	۲/۹۲	۷/۱۹	۷/۳۳	۱۱/۱۷	۴/۷۷
	صحت‌سنجی	۱/۰۲	۲۵/۲۵	۱۵/۲۱	۴/۶۷	۲۱/۶۱	۰/۶۳
CRM (-)	واسنجی	۰/۰۵	-۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۷	-۰/۱۵	۰/۰۵
	صحت‌سنجی	-۰/۰۱	-۰/۳۲	-۰/۱۶	-۰/۰۴	-۰/۲۷	۰/۰۱
ME (ton/ha)	واسنجی	۰/۲۵	۰/۱۳	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۲۱
	صحت‌سنجی	۰/۰۴	۰/۹۶	۰/۵۸	۰/۱۸	۰/۸۲	۰/۰۲

ارزیابی، مدل نتایج قابل قبولی را برای شبیه‌سازی عملکرد دانه از خود نشان داده است. امیری و همکاران (۱۳۹۴)، Paredes و همکاران (۲۰۱۴) و Oiganji و همکاران (۲۰۱۶) نیز نتایج مشابهی را در مطالعات خود گزارش کردند. همچنین با توجه به شکل (۴)، با یک روند مشابه، نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عملکرد محصول به‌صورت معنی‌داری با اعمال تنش شوری و آبی کاهش یافته و حداکثر عملکرد در تیمار شاهد (FI) به‌دست آمد، که با نتایج حسینی و همکاران (۱۳۹۵) در شبیه‌سازی عملکرد سویا و زمانی و همکاران (۱۳۸۷) در شبیه‌سازی عملکرد گندم همخوانی دارد.

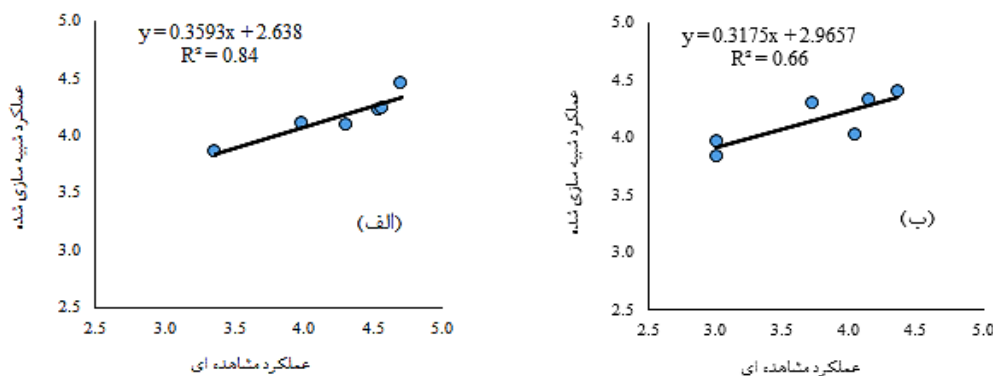
همچنین مطابق با جدول ۵، مقادیر منفی شاخص CRM در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای دو تیمار PRD₂ و SI نشان‌دهنده این است که مدل تمایل به بیش برآورد کردن عملکرد دانه برای تیمارهای شوری ثابت دارد که در شکل ۳ (الف) نیز این امر مشهود است. همچنین مقدار عددی بیشتر شاخص CRM در هر دو تیمار مذکور در مقایسه با دیگر تیمارها نشان می‌دهد که دقت مدل با تنش شوری کاهش می‌یابد. اختلاف مشاهده شده بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ممکن است به دلیل خطاهای اندازه‌گیری و یا شیوه به‌کار برده شده توسط مدل برای شبیه‌سازی ایجاد شده باشد (Kale, 2016). به‌طور کلی، مطابق با مقادیر به‌دست آمده برای معیارهای



شکل ۴. مقایسه مقادیر مشاهده‌ای (OBS) و شبیه‌سازی (SIMU) عملکرد دانه برای تیمارهای مختلف آبیاری در (الف) واستجی (ب) صحت‌سنجی، مقادیر با حروف یکسان بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن ($P \leq 0.05$) دارای اختلاف معنی‌دار نیستند

برابر با ۰/۹ و ۰/۸۷ را برای شبیه‌سازی عملکرد دو رقم گندم تحت تنش شوری و خشکی گزارش کردند، که در مقایسه با مقادیر به‌دست آمده در این تحقیق مقادیر بالاتری می‌باشد. علت این تفاوت احتمالاً به دلیل تفاوت در نوع گیاه مورد بررسی، شرایط اقلیمی و مدیریت آبیاری می‌باشد.

شکل (۵) همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده عملکرد آفتابگردان را در دو سال زراعی تحت تیمارهای مختلف مدیریت آبیاری نشان می‌دهد. مقادیر ضریب تبیین برابر با ۰/۸۴ (واسنجی) و ۰/۶۶ (صحت‌سنجی) نشان‌دهنده همبستگی قابل قبول مقادیر مقایسه شده می‌باشد. محمدی و همکاران (۱۳۹۴) مقادیر R^2



شکل ۵. همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی عملکرد دانه تیمارهای مختلف آبیاری در مرحله (الف) واستجی (ب) صحت‌سنجی.

آفتابگردان تحت تنش‌های اعمال شده دارد. مقادیر NRMSE به‌دست آمده برای این پارامتر در دو سال آزمایشی به‌ترتیب ۵/۸ و ۱۸/۱۶ درصد بود که نشان می‌دهد خطای مدل در سال دوم بیشتر از سال اول است.

شاخص برداشت

مقادیر معیارهای آماری برای ارزیابی مدل در شبیه‌سازی شاخص برداشت (جدول ۶) حاکی از آن است که مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی شاخص برداشت گیاه

مدل در اکثر تیمارها برای بیوماس تمایل به کم‌برآورد (مقادیر مثبت CRM) و برای عملکرد تمایل به بیش‌برآورد (مقادیر منفی CRM) دارد، و با در نظر گرفتن اینکه شاخص برداشت محصول نسبت عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیکی می‌باشد، قابل توجیه است.

هر چند که مقدار خطا در هر دو سال در محدوده قابل قبول (کم‌تر از ۳۰ درصد) می‌باشد. مقادیر منفی CRM بیانگر این است که مدل تا حدودی شاخص برداشت را بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده است که شدت آن در مرحله اعتبارسنجی بیشتر از مرحله واسنجی مدل بوده است. این نتیجه با توجه به اینکه به طور کلی

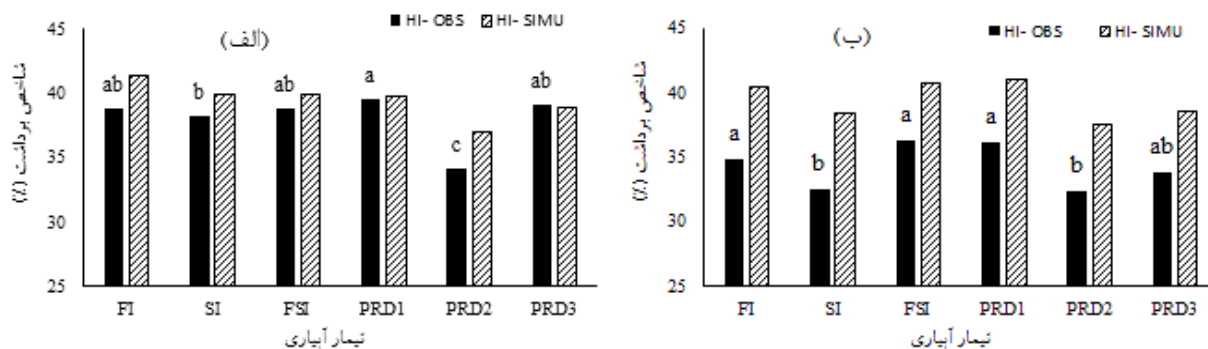
جدول ۶. مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی شاخص برداشت و بهره‌وری آب

پارامتر	سال	ME (*)	CRM (-)	NRMSE (%)	RMSE (*)
شاخص برداشت	۱۳۹۳	۲/۸۹	-۰/۰۴	۵/۸۰	۲/۲۱
	۱۳۹۴	۵/۸۹	-۰/۱۵	۱۸/۱۶	۶/۲۴
بهره‌وری آب	۱۳۹۳	۰/۱۰	۰/۰۳	۹/۶۳	۰/۰۸
	۱۳۹۴	۰/۱۷	-۰/۱۱	۱۸/۵۷	۰/۱۳

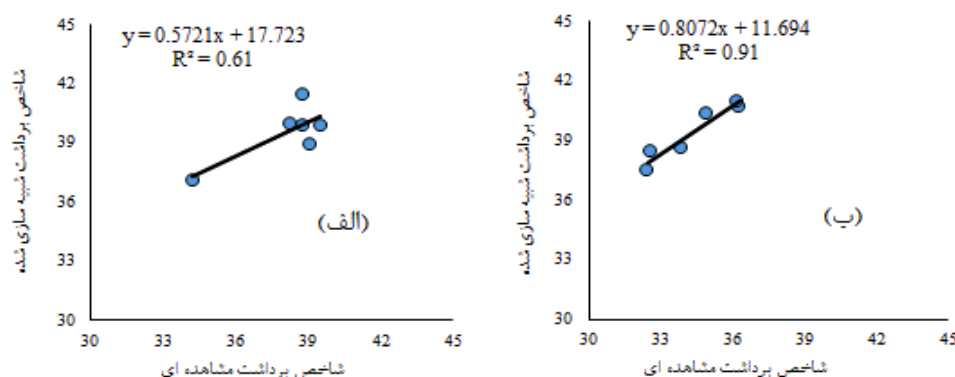
* واحد دو شاخص ME و RMSE برای شاخص برداشت برحسب (%) و بهره‌وری آب برحسب (kg/m³) می‌باشد.

ارائه نشده است که بتوان با نتایج این تحقیق مقایسه کرد. شکل (۷) نیز همبستگی قابل قبول مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده شاخص برداشت را در تیمارهای مختلف آبیاری در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد.

شکل (۶) مقایسه مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده شاخص برداشت را در تیمارهای مورد بررسی نشان می‌دهد. با توجه به بررسی منابع انجام شده لازم به ذکر است که در دیگر تحقیقات ارزیابی قابلیت‌های مدل AquaCrop گزارشی در مورد شبیه‌سازی شاخص برداشت



شکل ۶. مقایسه مقادیر مشاهده‌ای (OBS) و شبیه‌سازی (SIMU) شاخص برداشت برای تیمارهای آبیاری در (الف) واسنجی (ب) صحت‌سنجی، مقادیر با حروف یکسان بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن ($P \leq 0.05$) دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.



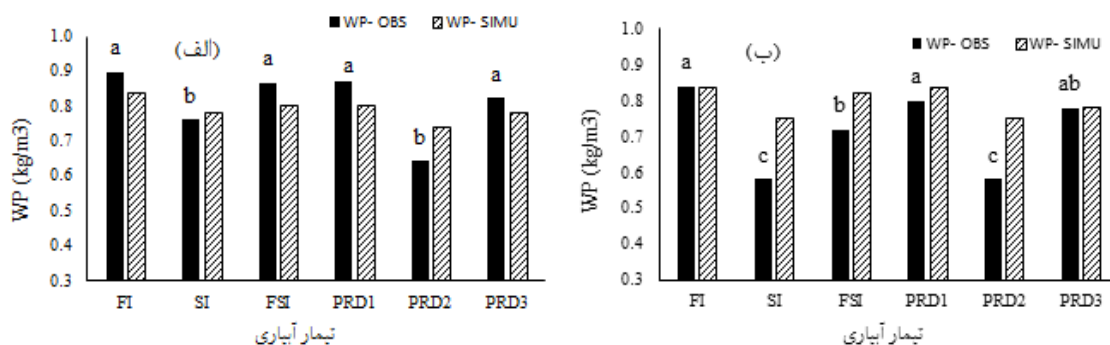
شکل ۷. همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شاخص برداشت تیمارهای مختلف آبیاری در مرحله (الف) واسنجی (ب) صحت‌سنجی

بهره‌وری آب

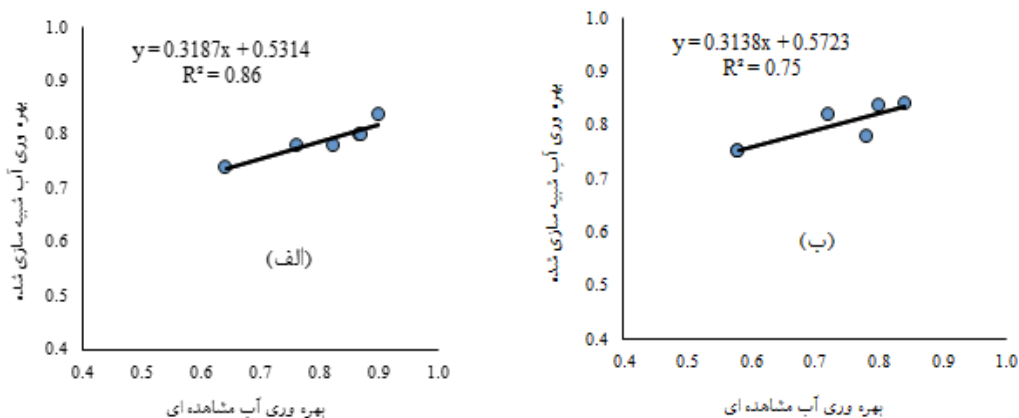
از مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بهره‌وری آب آفتابگردان و محاسبه شاخص‌های ارزیابی آماری چنین برمی‌آید که مدل AquaCrop به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی بهره‌وری آب است (جدول ۶). Kheir و Hassan (۲۰۱۶)، Heng و همکاران (۲۰۰۹) و Khoshravesh و همکاران (۲۰۱۳) نیز در تحقیقات خود قابلیت خوب این مدل را در شبیه‌سازی WP اذعان داشتند. مقدار شاخص RMSE برای بهره‌وری آب آفتابگردان در سال اول و دوم به ترتیب برابر با ۰/۰۸ و ۰/۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب بدست آمد. Khoshravesh و همکاران (۲۰۱۳) مقدار RMSE برای بهره‌وری آب سویا را ۰/۰۶ و ۰/۱ گزارش کردند که نزدیک به نتایج تحقیق حاضر است. مقدار بسیار نزدیک به صفر CRM در مرحله واسنجی (۰/۰۳) بیانگر این است که مدل بهره‌وری آب را تقریباً مشابه با مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده است. هرچند مدل در مرحله اعتبارسنجی تمایل به بیش برآورد مقادیر بهره‌وری آب دارد (CRM برابر با ۰/۱۱-). این اختلاف در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ممکن است به دلیل تفاوت در خطاهای اندازه‌گیری طی دو سال ایجاد شده باشد. شکل (۸) مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده این پارامتر را نشان می‌دهد. همانطور که

از شکل مذکور برمی‌آید در تیمارهای تحت تنش شوری مقادیر بهره‌وری آب کمتری هم در مقادیر اندازه‌گیری شده و هم در مقادیر شبیه‌سازی شده بدست آمد. این امر به دلیل عملکرد دانه کمتر در اثر تنش‌های وارده به گیاه و کاهش رشد گیاه و توان تولیدی در تیمارهای تحت تنش نسبت به دیگر تیمارها می‌باشد. همچنین نتایج هر دو سال نشان‌دهنده تشابه بهره‌وری آب در تیمار PRD₁ با تیمار شاهد (FI) می‌باشد. از جنبه‌ای دیگر، تفاوت در مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه می‌تواند به دلیل تفاوت در روش تعیین نیاز آبی در مدل (روش پنمن-مانتیث) و در مزرعه (رطوبت خاک) باشد، که ممکن است نیاز آبی گیاه در واقعیت با مدل یکسان نبوده و این امر سبب تفاوت مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد و در نتیجه بهره‌وری آب شود.

شکل (۹) همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بهره‌وری آب را برای تیمارهای مختلف آبیاری نشان می‌دهد. مقادیر ضریب تبیین برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۰/۸۶ و ۰/۷۵ بدست آمد، که با نتایج گزارش شده در مطالعات Heng و همکاران (۲۰۰۹) با R^2 برابر با ۰/۷۶ و Kheir و Hassan (۲۰۱۶) با R^2 برابر با ۰/۸۹ همخوانی دارد.



شکل ۸. مقایسه مقادیر مشاهده‌ای (OBS) و شبیه‌سازی (SIMU) بهره‌وری آب برای تیمارهای آبیاری در (الف) واسنجی (ب) صحت‌سنجی، مقادیر با حروف یکسان بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن ($P \leq 0.05$) دارای اختلاف معنی‌دار نیستند.



شکل ۹. همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی بهره‌وری آب تیمارهای مختلف آبیاری در مرحله (الف) واسنجی (ب) صحت‌سنجی

شوری خاک

مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده شوری خاک توسط مدل بر اساس شاخص‌های ارزیابی آماری در جدول ۷ ارائه شده است. در مرحله واسنجی مدل بر پایه مجموعه داده‌های فصل اول کشت، تیمار FSI و PRD₁ به ترتیب حداکثر (۲۲/۱۵٪) و حداقل (۱۱/۸۴٪) مقدار NRMSE را داشتند. در مرحله صحت‌سنجی بر

اساس مجموعه داده‌های فصل دوم کشت، حداکثر و حداقل مقدار NRMSE به ترتیب برای تیمار FSI (۲۷/۹۴٪) و PRD₃ (۱۳/۹۹٪) بدست آمد. این نتایج بیانگر شبیه‌سازی متوسط مدل برای شوری خاک می‌باشد. با توجه به مقادیر NRMSE، تیمارهای تحت تنش آبی پیش‌بینی‌های شوری خاک بهتری در مقایسه با تیمارهای متناظر خود در آبیاری کامل داشتند.

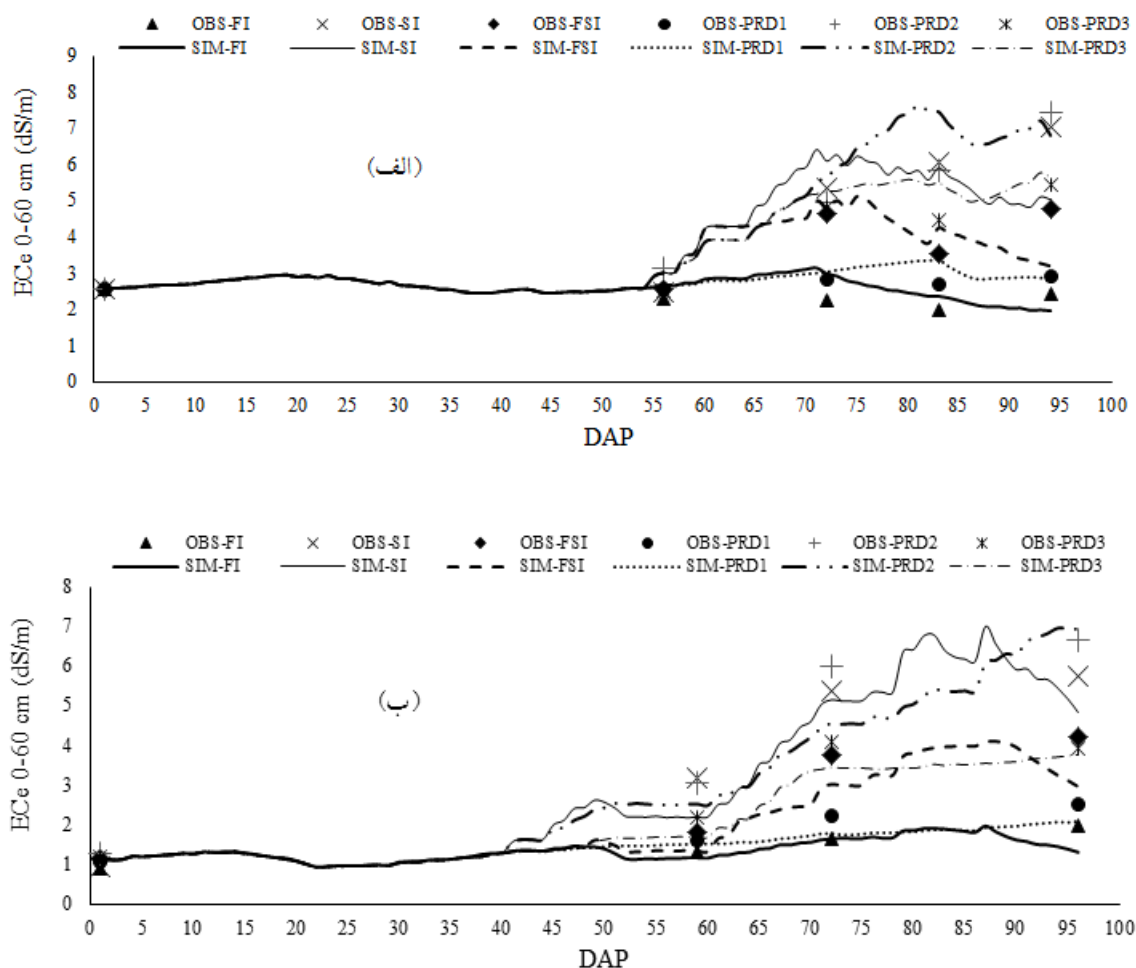
جدول ۷. مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی شوری خاک در تیمارهای مختلف آبیاری

تیمار آبیاری	۱۳۹۳					۱۳۹۴				
	RMSE (dS/m)	NRMSE (%)	CRM (-)	ME (dS/m)	RE (±%)	RMSE (dS/m)	NRMSE (%)	CRM (-)	ME (dS/m)	RE (±%)
FI	۰/۴۵	۱۹/۵۳	-۰/۱۱	۰/۷۵	۹/۷۷	۰/۳۵	۲۳/۸۸	۰/۱۰	۰/۶۵	-۴/۷۳
SI	۰/۹۸	۲۰/۸۸	۰/۰۴	۱/۹۸	۱/۲۳	۰/۶۷	۱۷/۶۸	۰/۱۲	۰/۹۷	-۷/۳۶
FSI	۰/۸۰	۲۲/۱۵	۰/۰۱	۱/۵۷	۲/۰۷	۰/۷۷	۲۷/۹۴	۰/۲۳	۱/۲۷	-۱۹/۳۳
PRD1	۰/۳۲	۱۱/۸۴	-۰/۰۸	۰/۶۷	۶/۴۹	۰/۳۱	۱۶/۷۹	۰/۱۳	۰/۴۶	-۱۰/۵۷
PRD2	۰/۸۴	۱۷/۳۹	-۰/۰۷	۱/۶۱	۵/۹۶	۰/۷۹	۱۸/۴۶	۰/۱۱	۱/۴۵	-۱۲/۳۴
PRD3	۰/۵۹	۱۵/۱۷	-۰/۱۵	۱/۰۲	۱۲/۶۲	۰/۴۰	۱۳/۹۹	۰/۱۲	۰/۶۲	-۱۱/۴۲

در مرحله صحت‌سنجی، مقادیر مثبت CRM و مقادیر منفی RE برای همه تیمارها نشان از تمایل مدل به کم-برآورد کردن شوری خاک دارد. این در حالیست که در مرحله واسنجی در برخی تیمارها کم‌برآورد و برخی بیش‌برآورد شوری مشاهده شد. Mohammadi و همکاران (۲۰۱۶) مقادیر میانگین NRMSE و CRM به ترتیب برابر با ۰/۲۴/۴٪ و ۰/۱۹ را در پیش‌بینی شوری خاک در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی گزارش کردند که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. تغییرات شاخص آماری RMSE در محدوده ۰/۹۴-۱/۳۵ دسی زیمنس بر متر برای شبیه‌سازی شوری خاک در مطالعات صورت گرفته توسط El Mokh و همکاران (۲۰۱۶) گزارش شده است که بیشتر از مقادیر RMSE به‌دست آمده در تحقیق حاضر (۰/۳۱-۰/۹۸ دسی زیمنس بر متر) است. هرچند این محققین تمایل زیاد مدل به بیش‌برآورد شوری خاک را در پژوهش خود گزارش نمودند. همچنین، مقایسه مقادیر NRMSE و RE (٪) شبیه‌سازی شوری خاک با مقادیر این شاخص‌های آماری در شبیه‌سازی دیگر پارامترها نشان از خطای بیشتر مدل و به عبارتی قابلیت کمتر آن در شبیه‌سازی شوری می‌دهد. خرسند و همکاران، (۱۳۹۳) و Hassanli و همکاران (۲۰۱۶) نیز توانایی کم‌تر مدل

AquaCrop در شبیه‌سازی شوری را در مطالعات خود گزارش کردند. یکی از دلایل این نتیجه را می‌توان به معادلات حاکم بر پدیده انتقال املاح نسبت داد. عوامل مختلف بر انتقال املاح در نیمرخ خاک مؤثرند؛ از جمله انتقال توده‌ای املاح، پخشیدگی، انتشار آبی، جذب املاح، تخریب املاح، رسوب و غیره که در AquaCrop تنها فرآیندهای انتقال توده‌ای و پخشیدگی در نظر گرفته شده است، درحالی‌که املاح تحت تأثیر فرایندهای دیگری نیز قرار دارند (خرسند و همکاران، ۱۳۹۳).

مقادیر میانگین شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده شوری برای تیمارهای مختلف در طول دو فصل کشت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌ها مشهود است، تیمارهای FI و PRD₁ مقادیر کمینه و تیمارهای SI و PRD₂ مقادیر بیشینه شوری خاک را در هر دو سال نتیجه دادند. چنین مقادیری با توجه به کمیت و کیفیت آب آبیاری مورد استفاده در تیمارهای مذکور قابل-توجیه می‌باشد. محققین دیگر نیز در شبیه‌سازی‌های خود با استفاده از مدل Aquacrop نشان دادند که با افزایش سطح شوری آب آبیاری، مقدار نمک تجمع یافته در منطقه توسعه ریشه افزایش می‌یابد (Hassanli et al., 2016، محمدی و همکاران، ۱۳۹۴)



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر مشاهده‌ای (OBS) و شبیه‌سازی (SIMU) شوری خاک در طول فصل کشت برای تیمارهای آبیاری در (الف) و اسنجی (ب) صحت‌سنجی،

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های دو ساله مزرعه‌ای برای گیاه آفتابگردان تحت مدیریت‌های مختلف کمی و کیفی آب آبیاری در استان مازندران واسنجی و صحت‌سنجی شد. این مدل برای شبیه‌سازی زیست توده (بیوماس) در طول فصل رشد، عملکرد دانه نهایی، شاخص برداشت، بهره‌وری آب آفتابگردان و نیز شوری خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده برای زیست توده شبیه‌سازی شده در طول فصل رشد و مقایسه آن با مقادیر

اندازه‌گیری شده می‌توان چنین بیان نمود که مدل به خوبی قادر به پیش‌بینی بیوماس در طول فصل رشد گیاه آفتابگردان در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی می‌باشد که با مطالعات Paredes و همکاران (۲۰۱۴)، Oiganji و همکاران (۲۰۱۶) و حسینی و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی قابل قبولی دارد. مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی از طریق شاخص‌های ارزیابی آماری نظیر RMSE, NRMSE, ME, CRM و R^2 صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی عملکرد دانه، شاخص برداشت، بهره‌وری آب و نیز شوری خاک نشان از کارایی قابل قبول

Heng (۱۳۹۴)، و همکاران (۲۰۰۹)، Khoshravesh و همکاران (۲۰۱۳)، Hassanli و همکاران (۲۰۱۶) و Kheir و Hassan (۲۰۱۶) نیز در تحقیقات مشابه، قابلیت خوب مدل AquaCrop را در شبیه‌سازی عملکرد، بهره‌وری آب و شوری خاک در گیاهان مختلف تحت مدیریت‌های مختلف کمی و کیفی آبیاری نشان دادند. در نهایت، می‌توان چنین اذعان داشت که مدل AquaCrop با یک سطح اطمینان قابل قبول می‌تواند در شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیک و اقتصادی، بهره‌وری آب گیاه آفتابگردان و شوری خاک تحت سناریوهای مختلف مدیریت کمی و کیفی آبیاری مورد استفاده قرار گیرد و به عنوان یک ابزار توانمند و کارآمد در جهت انتخاب مدیریت بهینه آبیاری به کشاورزان، طراحان، متخصصان و مدیران کشاورزی کمک نماید.

مدل در شبیه‌سازی این پارامترها داشت. مقادیر NRMSE در شبیه‌سازی بیوماس (۵/۸۷-۱۴/۸۲ درصد)، عملکرد دانه (۵/۸۰-۱۸/۱۶ درصد)، شاخص برداشت (۰/۶۳-۲۵/۲۵ درصد)، بهره‌وری آب (۹/۶۳-۱۸/۵۷ درصد) و شوری خاک (۲۷/۹۴-۱۱/۸۴ درصد) در محدوده قابل قبول بود. مقادیر حداکثر خطای مدل (ME) برای شبیه‌سازی بیوماس در محدوده‌ی ۰/۷۳-۱/۸۹ تن در هکتار، برای عملکرد دانه در محدوده‌ی ۰/۰۲-۰/۹۶ تن در هکتار، برای شاخص برداشت در محدوده‌ی ۵/۸۹-۲/۸۹ درصد، برای بهره‌وری آب در محدوده‌ی ۰/۱۰-۰/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب و برای شوری خاک در محدوده ۱/۹۸-۰/۶۲ دسی زیمنس بر متر بود که حاکی از قابلیت مطلوب مدل می‌باشد. همبستگی خوبی نیز بین مقادیر اندازه‌گیره شده و شبیه‌سازی شده در همه موارد و بر اساس داده‌های مزرعه‌ای هر دو سال مشاهده شد. خرسند و همکاران (۱۳۹۳)، امیری و همکاران (۱۳۹۴)، محمدی و همکاران

منابع مورد استفاده

- امیری، ا.، بحرانی، ع.، خورسند، ا. و حقجو، م. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه و بیوماس گندم، تحت تنش کم‌آبی. نشریه دانش آب و خاک، ۲۵ (۲): ۲۱۷-۲۲۹.
- بابازاده، ح. و سرائی تبریزی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت کم آبیاری سویا. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶ (۲): ۳۲۹-۳۳۹.
- حسینی، س. ط.، خوش روش، م.، ضیاتباب احمدی، م. خ. و قدمی فیروزآبادی، ع. ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد سویا با مدل AquaCrop تحت تأثیر مدیریت شوری و کم آبیاری. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۰ (۳): ۳۶۱-۳۷۲.
- حیدری‌نیا، م.، ناصری، ع. و برومندنسب، س. ۱۳۹۱. بررسی امکان کاربرد شبیه‌سازی AquaCrop در برنامه‌ریزی آبیاری آفتابگردان در اهواز. نشریه مهندسی منابع آب، ۵ (۱): ۳۷-۵۰.
- خرسند، ا.، رضاعوردی نژاد، و. و شهیدی، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم، رطوبت، شوری نیمرخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم آبی. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۴ (۱): ۸۹-۱۰۴.
- زمانی، غ.، شهیدی، ع.، کشکولی، ح. ع. و حسینی، س. م. ۱۳۸۷. اثر بر هم کنش شوری و کم آبیاری بر عملکرد کمی و کیفی دو رقم گندم. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، سازمان آب و برق خوزستان، ۱ بهمن ماه، ۸ ص.

سعادت، ز.، دلبری، م.، پناهی، م. و امیری، ا. ۱۳۹۷. شبیه‌سازی رشد چغندر قند تحت تنش آبی با استفاده از مدل AquaCrop. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۷(۳): ۱۹-۱.

محمدی، م.، قهرمان، ب.، داوری، ک.، انصاری، ح. و شهیدی، ع. ۱۳۹۴. اعتبار سنجی مدل AquaCrop به منظور شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب گندم زمستانه تحت شرایط هم‌زمان تنش شوری و خشکی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۹(۱): ۸۴-۶۷.

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guide-lines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Domínguez, A., Tarjuelo, J. M., Juan, J.A., López-Mata, E., Breidy, J. and Karam, F. 2011. Deficit irrigation under water stress and salinity conditions: The MOPECO-Salt Model. *Agricultural Water Management*, 98: 1451–1461.
- El Mokh, F., Vila-Garcia, M., Nagaz, K. and Fereres, E. 2016. Calibration of AquaCrop salinity stress parameters for barley under different irrigation regimes in a dry environment. *International Conference on Agricultural and Food Engineering (Cafei)*, 23-25 August.
- Farahani, H. J., Gabriella, I. and Oweis, T. Y. 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 101 (3): 469–476.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J. A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., and Steduto, P., 2009. Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101 (3): 499-508.
- Hassanli, M., Ebrahimian, H., Mohammadi, E., Rahimi, A. R. and Shokouhi, A. H. 2016. Simulating maize yields when irrigating with saline water, using the AquaCrop, SALTMED, and SWAP models. *Agricultural Water Management*, 176: 91–99.
- Heng, L. K., Hsiao, T., 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.
- Kale, S. 2016. Assessment of aquacrop model in the simulation of wheat growth under different water regimes. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, Vol. LIX.
- Kang, Y., Chen, M. and Wan, S. 2010. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var. ceratina Kulesh) in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97: 1303–1309.
- Karandish, F. 2014. Evaluation of HYDRUS-2D model for estimating maize evapotranspiration and virtual water content. *Journal of Applied Hydrology*, 1 (2): 19-28.
- Kheir, A. M. S. and Hassan, M. A. A. 2016. Performance Assessment of the FAO Aquacrop Model for Maize Yield, Biomass and Water Productivity along the River Nile, Egypt. *J. Soil Sci. and Agric. Eng., Mansoura Univ*, 7(10): 721- 728.
- Khoshravesh, M., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M. and Kiani, A. R. 2013. AquaCrop model simulation under different irrigation water and nitrogen strategies. *Water Science & Technology*, 67 (1): 232-238.
- Liu, H. F., Genard, M., Guichard, S. and Bertin, N. 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. *Journal of Experimental Botany*, 58 (13): 3567-3580.
- Mohammadi, M., Ghahraman, B., Davary, K., Ansari, H., Shahidi, A. and Bannayan, M. 2016. Nested validation of AquaCrop model for simulation of winter wheat grain yield, soil moisture and salinity profiles under simultaneous salinity and water stress. *Irrigation and Drainage*, V 65 (1): 112-128.
- Mousavi, S. F., Soltani-Gerdefamarzi, S. and Mostafazadeh-Fard, B. 2010. Effects of partial root zone drying on yield, yield components, and irrigation water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.). *Paddy Water Environ*, 8: 157–163.
- Oiganji, E., Igbadun, H. E., Mudiare, O.J. and Oyeboode, M. A. 2016. Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in Northern zone of Nigeria. *Agric. Eng. Int: CIGR Journal*, 18 (3): 1-13. Open access at <http://www.cigrjournal.org>.
- Paredes, P., Melo-Abreu, J. P., Alves, I. and Pereira, L.S. 2014. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*, 144: 81–97.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2017. Reference Manual AquaCrop (Version 6.0), Chapter 1, FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. AquaCrop Website <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop>.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2012. Reference Manual AquaCrop (Version 4.0), AquaCrop Website <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.

-
- Sezen, S. M., Yazar, A. and Tekin, S. 2011. Effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on yield and oil quality of sunflower in a Mediterranean environment. *Irrigation and Drainage*, 60: 499–508.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop — the FAO crop model to simulate yield response to water. I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101, 426-437.
- Stricevic, R., Djurovic, N., Cosic, M. and Pejic, B. 2011. Assessment of the aquacrop model in simulating rainfed and supplementally irrigated sweet sorghum growth. ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage, 15-23 October, Tehran, Iran.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi saab, M., Stwckle, C. and Steduto, P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101 (3): 509 – 521.



ISSN 2251-7480

Evaluation of the sunflower yield, water productivity and soil salinity simulation under water and salinity stresses using the AquaCrop model

Moazam Khaleghi^{1*}

^{1*} Ph.D. Graduated, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran.

*Corresponding author email: khaleghi.83@gmail.com

Received: 29-05 -2018 Accepted: 14 -01-2019

Abstract

The AquaCrop model is a powerful tool for the simulation of crop response to the different quantitative and qualitative management of irrigation that advanced by FAO. In this study, the latest version of this model (v. 6) was evaluated for simulating sunflower yield, water productivity and soil salinity under different irrigation management using saline water. Field data were collected in order to calibration and validation of model during two crop years (2014 and 2015). The experiment was conducted as a factorial design in completely randomized blocks including two factors: the quantitative irrigation management in two levels (full irrigation and partial root zone drying irrigation in 75%) and the qualitative irrigation management in three levels (non-saline water, saline water and non-saline and saline water alternation), with three replications. While a significant reduction of 3.1-32% in grain yield were observed under water-saving irrigation treatments compared to FI (4706.7 and 4367.2 kg ha⁻¹ in 2014 and 2015, respectively), the PRD1 treatment resulted in a slight reduction of 3.1% and 5% in grain yield, in 2014 and 2015, respectively. FI had the highest WPET (0.90 and 0.89 kg m⁻³ in 2014 and 2015, respectively), and PRD1, PRD3, FSI, SI and PRD2 treatments ranked next. Sensitive analysis result showed that the model sensitivity to the volumetric soil water content at soil saturation and field capacity point, maximum canopy cover, HIO, time to flowering, time to CCx and CGC is more than other input parameters. Based on the comparison of observed and simulated values of biomass, the NRMSE values ranged between 5.90 to 8.14 percent, indicating that the model was able to simulate the sunflower biomass during the growing season. The NRMSE values lower than 10% indicated an excellent simulation in the first year and the values between 10 to 30 percent indicated an acceptable grain yield simulation in the second year. There was a good correlation between the observed and simulated values of water productivity with R² values of 0.86 and 0.75 for the calibration and validation steps, respectively. The soil salinity results indicated an appropriate correlation between the observed and simulated values in different treatments in each of two years (with R² of 0.81 and 0.94 for the calibrated and validated data sets, respectively). Finally, it can be recommended that the AquaCrop model with the reliable estimates can be used for sunflower production, water productivity and soil salinity predictions under various scenarios of irrigation management.

Keywords: Irrigation qualitative management; Partial root-zone drying irrigation; Saline water; Simulation model; Soil salinity