

ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب در کشت ذرت با مدیریت‌های مختلف آبیاری تحت تنش شوری

افشین سرکهکی^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*} و سهراب مینایی^۳

چکیده

با توجه به اهمیت مدل‌های گیاهی در برنامه‌ریزی بخش کشاورزی، باید دقت و کارایی آنها در شرایط مختلف سنجیده شود. به همین منظور، پژوهش حاضر برای ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شوری خاک در کشت ذرت انجام شد. تیمارهای مورد مطالعه در این پژوهش، شامل روش آبیاری (D: آبیاری بارانی با آب شور و F: آبیاری بارانی با کاربرد آب شور و شیرین و S: آبیاری سطحی) و کیفیت آب آبیاری (S1: ۲/۵، S2: ۳/۲، S3: ۳/۹، S4: ۴/۶ و S5: ۵/۱ دسی‌زیمنس بر متر) بود. نتایج، نشان‌دهنده آماره‌های جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده برای پارامترهای عملکرد، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شوری خاک به ترتیب، برابر با ۰/۰۷، ۰/۰۹، ۰/۰۷ و ۰/۱۴ بود؛ بنابراین، دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی شوری خاک خوب و برای عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب، عالی بود. براساس آماره میانگین خطای اریب، این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب، دچار خطای کم‌برآوردی و برای شبیه‌سازی زیست‌توده و شوری خاک، دچار خطای بیش‌برآوردی شد. براساس آماره‌های کارایی مدل و شاخص توافق، این مدل در شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و شوری خاک، کارایی مطلوبی داشت؛ ولی کارایی آن برای شبیه‌سازی کارایی مصرف آب، چندان مطلوب نبود. همچنین، تلفیق روش‌های آبیاری نشان داد که دقت و کارایی این مدل در هر سه روش آبیاری مورد مطالعه یکسان بود؛ بنابراین، روش آبیاری بر دقت و کارایی مدل AquaCrop اثری نداشت.

واژه‌های کلیدی: آبیاری بارانی، روش آبیاری، کیفیت آب آبیاری.

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

۱- 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- دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: a_eigder@ymail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳

مقدمه

ذرت یکی از گیاهان زراعی مهم است که سازگاری خوبی با مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد (دی‌خوان والرو، ۲۰۰۵). این گیاه، چهارکربنه است و مقدار و کیفیت آب آبیاری، اثر مهمی بر عملکرد و اجزای عملکرد آن دارد (آرایا و همکاران، ۲۰۱۰)؛ به همین دلیل، پژوهشگران مختلف کوشیده‌اند اثر روش‌های گوناگون آبیاری و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری را بر عملکرد و زیست‌توده آن بررسی کنند. اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران، این موضوع را تأیید می‌کند که باید بهترین روش آبیاری به همراه کیفیت‌های مختلف آب آبیاری بر رشد این گیاه زراعی بررسی شود؛ اما دستیابی به این هدف، نیازمند انجام‌دادن آزمایش‌های مزرعه‌ای بسیاری است که علاوه بر زمان‌بر بودن، سبب صرف هزینه‌های زیادی نیز می‌شود. برای رفع این مشکلات، مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی واکنش گیاهان به شرایط مختلف مزرعه‌ای پیشنهاد شده است (گارسیاویلا و همکاران، ۲۰۰۹؛ گیرتس و رائس، ۲۰۰۹؛ هنگ و همکاران، ۲۰۰۹).

هر کدام از این مدل‌ها، مزایا و معایبی دارد. علی‌رغم این موضوع، بسیاری از پژوهشگران به مدل AquaCrop، که سازمان خواروبار کشاورزی (فائو) ارائه کرده است، به‌علت سادگی، داده‌های ورودی کم، کاربرپسند بودن، دقت زیاد و نزدیکی مطلوب شرایط مدل‌سازی با مدیریت مزرعه در شرایط واقعی (تودوروویچ و همکاران، ۲۰۰۹؛ کاترجی و همکاران، ۲۰۱۳) توجه کرده‌اند. ازجمله این مطالعات می‌توان به پژوهش‌های آرایا و همکاران (۲۰۱۰) بر محصول جو اشاره کرد. این پژوهشگران با ارزیابی مدل AquaCrop نشان دادند دقت و کارایی این مدل برای شبیه‌سازی این گیاه زراعی، مطلوب بود. از دیگر پژوهش‌های انجام‌شده روی این مدل می‌توان به پژوهش‌های استریسویچ و همکاران (۲۰۱۱) بر محصولات ذرت و چغندر قند و ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۸) بر کلزا و محمدی‌معله‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) بر محصول نیشکر اشاره کرد. این پژوهشگران نشان دادند مدل AquaCrop در مطالعات انجام‌شده، قابلیت زیادی دارد و خطای آن قابل اغماض بود.

با توجه به اهمیت گیاه زراعی ذرت، شبیه‌سازی رشد آن با استفاده از مدل AquaCrop را پژوهشگران مختلف انجام داده‌اند. هنگ و همکاران (۲۰۰۹)، از این مدل برای

شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده ذرت تحت شرایط مختلف آبیاری استفاده کردند. آنها گزارش دادند دقت این مدل برای شبیه‌سازی دو پارامتر ذکرشده در شرایط تنش آبی، مطلوب نبود. در پژوهشی دیگر، شائو و همکاران (۲۰۰۹) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت استفاده کردند. آنها نشان دادند دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی ذرت مطلوب بود. روپیندار و ایرماک (۲۰۱۹) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت تحت شرایط دیم، کم‌آبیاری و آبیاری کامل استفاده کردند و نشان دادند به دقت این مدل می‌توان تکیه کرد. فالویه و همکاران (۲۰۲۰)، AquaCrop را برای مدل‌سازی رشد و عملکرد دانه ذرت تحت شرایط استفاده‌کردن و نکردن از بیوجار به کار بردند. بررسی نتایج نشان داد تطابق خوبی بین مقادیر پوشش سطح، عملکرد و زیست‌توده شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی وجود داشت. از دیگر پژوهش‌ها، که دقت و کارایی این مدل را تأیید کرده‌اند، به مطالعات ماسانگانیس و همکاران (۲۰۱۳)، کاترجی و همکاران (۲۰۱۳) و گائو و همکاران (۲۰۱۹) می‌توان اشاره کرد. در کشور ما نیز از این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی ذرت استفاده شده است؛ برای نمونه، به مطالعات ضیایی و همکاران (۱۳۹۳) و علیزاده و عباسی (۱۳۹۶) می‌توان اشاره کرد. مهرآذر و همکاران (۱۳۹۵) از مدل AquaCrop در شرایط تنش شوری برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت استفاده کردند و نشان دادند براساس شاخص آماری CRM، این مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت، متأثر از تنش شوری نسبت به عملکرد اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه، دچار خطای بیش‌برآورد شد. همچنین، آنها گزارش کردند با افزایش میزان شوری، عملکرد شبیه‌سازی‌شده، دچار خطای بیشتری شد. وطن‌خواه و ابراهیمیان (۱۳۹۵) با استفاده از این مدل، عملکرد دانه ذرت را در شرایط آبیاری جویچه‌ای شبیه‌سازی کردند و با استفاده از آماره NRMSE نشان دادند دقت این مدل در محدوده مطلوب بود.

استان خوزستان، یکی از مراکز مهم کشت ذرت در کشور است. با وجود این، با مشکلات مختلفی، ازجمله کاهش آب در دسترس برای کشاورزی و کیفیت نامطلوب آب آبیاری مواجه است؛ به همین علت، روش‌های آبیاری بارانی در کنار آبیاری سطحی برای کشت این گیاه زراعی پیشنهاد شده است. با توجه به مرور منابع و اهمیت

آب و برق خوزستان ارسال و اندازه‌گیری شد. مقدار نیاز خالص آب آبیاری براساس پایش رطوبتی خاک و با روش نمونه‌برداری وزنی از خاک تعیین شد. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، نمونه خاک با مته نمونه‌برداری از اعماق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری برداشت شد. مشخصات خاک مدنظر در جدول ۱ نشان داده شده است. عمق خالص آب آبیاری از معادله (۱) تعیین شد:

$$d_N = (FC - PWP) \times D \times 10 \quad (1)$$

در این معادله، d_N عمق آب آبیاری برحسب میلی‌متر، FC رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی برحسب درصد حجمی، PWP مقدار رطوبت خاک قبل از آبیاری برحسب درصد حجمی و D عمق ریشه برحسب متر است. عمق ناخالص آبیاری با در نظر گرفتن ۱۰ درصد تلفات برای تبخیر و بادبردگی در روش آبیاری بارانی و غیریکنواختی توزیع آب در روش آبیاری سطحی و ۲۵ درصد عمق خالص برای تأمین نیاز آبیاری عمق ناخالص آب آبیاری برای هر دو روش آبیاری به دست آمد (معادله (۲)):

$$d_g = d_N \times 1.35 \quad (2)$$

در این معادله، d_g عمق ناخالص آب آبیاری است. حجم ناخالص آب آبیاری نیز از رابطه ذیل محاسبه شد:

$$V_g = d_g \times A \quad (3)$$

در این معادله، V_g حجم ناخالص آب آبیاری و A مساحت تیمار آبیاری است.

زمان کاشت برای کشت اول در تاریخ ۱۳۹۱/۱۲/۷ تا ۱۳۹۱/۱۲/۸ و برای کشت دوم در تاریخ ۱۳۹۲/۴/۲۸ تا ۱۳۹۲/۴/۳۰ بود. آبیاری یک روز بعد از کاشت انجام شد. مقادیر آب آبیاری برای تیمارهای مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است.

برای آبیاری بارانی، جویچه‌هایی با طول ۷۵ متر و برای آبیاری سطحی، جویچه‌هایی با طول ۴ متر ایجاد شد. برای هر تیمار، ۵ جویچه در نظر گرفته شد. برای کاهش اثر شوری بر جوانه‌زنی بذور، از کشت بذرها در بالایی پشته‌ها پرهیز شد و بذرها روی شیب جانبی پشته و به فاصله یک‌سوم از بالای آن کشت شد. بذرها به عمق ۴ تا ۷ سانتی‌متر و با تراکم ۷۶۰۰۰ بذر در هکتار، یعنی با فاصله ۱۸ سانتی‌متر از هم روی هر پشته کشت شد. در طول فصل رشد، درصد پوشش گیاهی با عکس‌برداری از مزرعه و استفاده از نرم‌افزار Green Crop Tracke تعیین شد. بعد

موضوع باید دقت مدل AquaCrop در شرایط ذکرشده برای کشت ذرت بررسی شود. این عمل سبب می‌شود برای مناطق مختلف کشت این گیاه زراعی در استان خوزستان، تصمیم‌گیری بهتری بتوان کرد؛ به همین علت، هدف این پژوهش، تعیین دقت و کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شوری خاک تحت کشت جویچه‌ای ذرت و اعمال آبیاری سطحی و بارانی است.

مواد و روش‌ها

روش تحقیق

پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های برداشت‌شده مینایی (۱۳۹۳) در مزرعه‌ای تحقیقاتی در شهرستان اهواز در دو فصل زراعی (۱۳۹۱-۱۳۹۲) روی گیاه زراعی ذرت انجام شد. در این پژوهش، روش آبیاری (D: آبیاری بارانی با آب شور و F: آبیاری بارانی با کاربرد آب شور و شیرین و S: آبیاری سطحی) با پنج کیفیت آب آبیاری (S1: ۲/۵، S2: ۳/۲، S3: ۳/۹، S4: ۴/۶ و S5: ۵/۱ دسی‌زیمنس بر متر) با سه تکرار بررسی شد. حداقل شوری (S1) برابر با شوری آب کارون (به‌طور متوسط، ۲/۳ دسی‌زیمنس بر متر) انتخاب شد. حداکثر شوری (S5) نیز برای کاهش ۵۰ درصدی عملکرد دانه ذرت در آبیاری سطحی در نظر گرفته شد. شوری تیمارهای S2، S3 و S4 نیز حد واسط این دو تیمار و به‌طور متوسط، برابر با ۳/۰، ۳/۷ و ۴/۲ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شد. تیمارهای شوری پس از استقرار محصول، یعنی رشد ذرت تا مرحله ۶ برگی اعمال شد. برای تهیه شوری این تیمارها، ترکیب مشخصی از نمک‌های کلرید کلسیم (CaCl₂)، کلرید منیزیم (MgCl₂) و کلرید سدیم (NaCl) به کار رفت. مقادیر ترکیب نمک در تیمارهای S2، S3 و S4 به‌ترتیب، نسبت ۱، ۱، ۲ داشت. تغییر مقدار ترکیب نمک‌ها به‌علت تغییر ترکیب نمک‌های موجود در آب و نزدیک‌تر شدن مقادیر SAR آب شور به مقادیر SAR آب رودخانه کارون در شرایط شوری واقعی این رودخانه و منابع آب شور موجود در منطقه بود. در زمان انجام پژوهش، مقادیر شاخص شوری آب (EC) برای هر نوبت آبیاری با یک دستگاه EC متر قابل حمل، اندازه‌گیری شد. املاح و یون‌های آب نیز چندین مرتبه در فصل کشت برای آب رودخانه کارون و مخزن آب شور به آزمایشگاه معاونت مطالعه پایه سازمان

$$WUE = \frac{Y}{W} \quad (۴)$$

که در این معادله، WUE کارایی مصرف آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، Y عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم و W مقدار آب مصرفی بر حسب مترمکعب است.

از رسیدگی کامل و فیزیولوژیکی گیاه، برداشت محصول انجام شد. پس از تعیین عملکرد و زیست‌توده گیاه با استفاده از ترازو در آزمایشگاه، کارایی مصرف آب با استفاده از معادله (۴) تعیین شد (علیزاده، ۱۳۹۳):

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

عمق خاک (سانتی‌متر)	رطوبت در FC (سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب)	رطوبت در PWP (سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	شوری خاک	
				دسی‌زیمنس بر متر	بافت خاک
۰-۳۰	۲۸/۳	۱۳/۱	۱/۵۹	۲/۶۱	لوم
۳۰-۶۰	۲۸/۳	۱۴/۶	۱/۶۲	۲/۵۵	لوم
۶۰-۹۰	۲۹/۴	۱۴/۵	۱/۵۰	۲/۵۰	لوم

جدول ۲- مقادیر آب آبیاری برای تیمارهای مختلف

شماره آبیاری	دور آبیاری	نیاز ناخالص (میلی‌متر)	شماره آبیاری	دور آبیاری	نیاز ناخالص (میلی‌متر)	شماره آبیاری	دور آبیاری	نیاز ناخالص (میلی‌متر)
آبیاری بارانی با آب شور (D)			آبیاری بارانی با کاربرد آب شور و شیرین (F)			آبیاری سطحی (S)		
۱	۰	۴۵	۱	۰	۴۲	۱	۰	۳۶
۲	۳	۴	۲	۳	۲۷	۲	۲	۳
۳	۲	*	۳	۲	*	۳	۴	۳
۴	۲	۷	۴	۲	۸	۴	۳	۰
۵	۳	۱۸	۵	۳	۶	۵	۴	۹
۶	۴	۹	۶	۴	۱۹	۶	۵	۳۴
۷	۵	۱۱	۷	۵	۳۲	۷	۷	۶۳
۸	۴	۲۸	۸	۴	۵۵	۸	۶	۵۱
۹	۵	۵۱	۹	۵	۵۹	۹	۷	۸۱
۱۰	۷	۶۱	۱۰	۶	۷۶	۱۰	۷	۶۱
۱۱	۴	۳۵	۱۱	۸	۷۷	۱۱	۷	۶۸
۱۲	۷	۳۴	۱۲	۷	۱۰۱	۱۲	۷	۷۷
۱۳	۷	۸۰	۱۳	۷	۷۳	۱۳	۷	۷۳
۱۴	۷	۶۹	۱۴	۸	۱۱۷	۱۴	۷	۵۳
۱۵	۷	۷۴	۱۵	۷	۷۰	۱۵	۷	۸۵
۱۶	۷	۵۸	۱۶	۷	۵۵	۱۶	۷	۵۱
۱۷	۷	۱۰۵	۱۷	۷	۱۱۵	۱۷	۸	۳۱
۱۸	۷	۳۰	۱۸	۸	۷۴			
۱۹	۷	۳۹						

* آب مختصر برای سله‌شکنی در نظر گرفته شد.

داده‌های ورودی مدل AquaCrop

داده‌های استفاده‌شده در این مدل در چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه دسته‌بندی می‌شود. هر گروه از داده‌ها براساس آزمایش‌های مزرعه‌ای و یا داده‌های موجود به مدل معرفی شد. داده‌های اقلیمی

لازم برای این مدل، شامل بارندگی، تبخیرتورق، دمای حداقل و حداکثر و غلظت دی‌اکسید کربن است. داده‌های هواشناسی از مؤسسه تحقیقات خرما در دو کیلومتری محل آزمایش برداشت و تبخیرتورق با استفاده از رابطه فائو-پنمن-مانتیت محاسبه شد. غلظت دی‌اکسید کربن

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (10)$$

در این معادله، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، Pm مقدار برآورد شده عامل مدنظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و Pb مقدار برآورد عامل مدنظر براساس داده ورودی پایه است. برای تحلیل حساسیت هر عامل بر مقدار خروجی، آن عامل به میزان ۲۵ درصد مقدارش افزایش و کاهش می‌یافت؛ سپس مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس $Sc > 15$ حساسیت زیاد، $15 > Sc > 2$ حساسیت متوسط، $Sc < 2$ حساسیت کم طبقه‌بندی شد (گیرتس و رائس، ۲۰۰۹). مقادیر حساسیت برخی از این پارامترها در جدول ۲ نشان داده شده است.

نیز براساس مقدار پیش‌فرض تعیین شد که در رصدخانه مائونالوای هاوایی اندازه‌گیری شد. داده‌های خاک، شامل بافت خاک و رطوبت حجمی خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم است. این پارامترها براساس مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش خاک در جدول ۱ به مدل معرفی شد. داده‌های مدیریت مزرعه نیز شامل الف) مدیریت مزرعه و حاصلخیزی و ب) آبیاری است. مدیریت مزرعه بدون محدودیت به مدل، تعریف و آبیاری نیز براساس جدول ۲ به مدل وارد شد.

تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی

پیش از انجام دادن واسنجی و مدل‌سازی با AquaCrop ابتدا، پارامترهای ورودی این مدل با استفاده از معادله (۱۰) تحلیل حساسیت شد (گیرتس و رائس، ۲۰۰۹).

جدول ۲- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند

عامل	مقدار Sc در حالت +/۲۵	مقدار Sc در حالت -/۲۵	درجه حساسیت
ضریب گیاهی برای تعرق	۷/۲	۲/۹	متوسط
حداکثر عمق ریشه	۵/۵	۸/۵	متوسط
مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۸/۰	۶/۳	متوسط
مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی	۹/۲	۱/۰	متوسط-کم
مدت‌زمان کاشت تا برداشت محصول	۵/۱	۸/۹	متوسط
مدت‌زمان کاشت تا دوره پیری	۸/۸	۳/۴	متوسط
حد آستانه بالای دما	۷/۱	۷/۰	متوسط

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n \bar{O}_i}} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| - |O_i|)^2} \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

در این معادلات، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌هاست. مقدار آماره RMSE همواره مثبت است و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده دقت عالی مدل است (ایوزیان و

سپس واسنجی مدل برای داده‌های برداشت‌شده در فصل اول کشت و برای کلیه تیمارها براساس توصیه بسط‌دهندگان مدل (گیرتس و رائس، ۲۰۰۹) انجام شد. مقادیر واسنجی شده و برخی از مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌فرض در جدول ۳ نشان داده شده است.

پس از آن، شبیه‌سازی، انجام و نتایج حاصل از آن با داده‌های برداشت‌شده از مزرعه آزمایشی مقایسه شد. بدین‌منظور از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در معادلات (۷) تا (۱۰) نشان داده شده است (ایوزیان و واقفی، ۱۳۸۹).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

عدد کوچک‌تری به دست داده است (ایوزیان و واقفی، ۱۳۸۹). مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌هاست و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌هاست.

واقفی، ۱۳۸۹). همچنین، مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۱-۰/۲، ۰/۲-۰/۳، ۰/۳-۰/۴ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب، نشان‌دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان می‌دهد مدل رشد گیاهی AquaCrop، مقدار عامل مدنظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی نشان می‌دهد مدل در برآورد عامل مدنظر،

جدول ۳- مقادیر عوامل گیاهی استفاده‌شده در مدل AquaCrop

توضیح	واحد	مقدار	توضیح عامل
پیش فرض	درجه سانتی‌گراد	۸	دمای پایه
پیش فرض	درجه سانتی‌گراد	۳۰	دمای بالا
اندازه‌گیری	گیاه در هکتار	۷۶۰۰۰	تراکم کشت
پیش فرض	درصد روز	۱۶/۵	ضریب رشد کانوپی
پیش فرض	سانتی‌متر مربع	۶/۵	پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی
واسنجی	روز	۵	مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی
واسنجی	روز	۶۰	مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی
واسنجی	روز	۱۰۰	مدت زمان کاشت تا دوره پیری
واسنجی	روز	۱۲۵	مدت زمان کاشت تا برداشت محصول
واسنجی	گرم بر مترمربع	۲۵	بهره‌وری آب نرمال شده
واسنجی	درصد	۰/۵	پوشش گیاهی اولیه
واسنجی	درصد	۹۱	بیشینه رشد کانوپی
واسنجی	-	۰/۱۵	حد بالای ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه
واسنجی	-	۰/۷۹	حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه
پیش فرض	درصد بر روز	۱/۰۵	حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق
واسنجی	-	۵/۶	ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای بسته‌شدن روزنه‌ها
واسنجی	-	۲/۵	ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری

نتایج و بحث

دقت و کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده و کارایی مصرف آب نیز مطلوب بود؛ ولی این مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده و کارایی مصرف آب، دچار خطای بیش‌برآوردی شد. دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی شوری خاک در مرحله واسنجی مطلوب بود و این مدل، دچار خطای بیش‌برآوردی شد. کارایی این مدل در شبیه‌سازی شوری خاک نیز مطلوب بود.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت با استفاده از مدل AquaCrop در شکل ۱ نشان داده شده است. براساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی، برابر با ۰/۷ و ۰/۱ تن در هکتار بود. این مقادیر به ترتیب در تیمارهای SS5 و FS1 به دست آمد. متوسط این مقادیر نیز برابر با ۰/۳ تن در هکتار بود. این نتایج نشان داد به‌صورت میانگین، این مدل گیاهی، خطایی برابر با ۳۰۰ کیلوگرم داشت. اختلاف

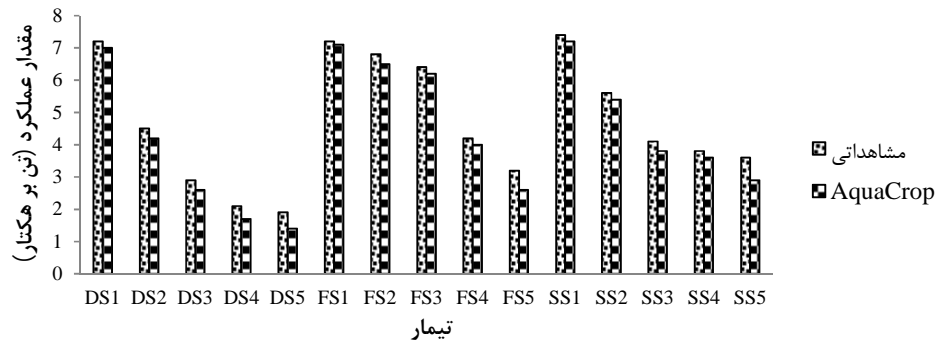
در جدول ۲، نتایج تحلیل حساسیت برخی از پارامترهای ورودی مدل AquaCrop نشان داده شده است. تغییرات بیشتر این پارامترها بر نتایج خروجی مدل AquaCrop حساسیت متوسطی داشت؛ بنابراین، بیشتر این پارامترها برای واسنجی این مدل استفاده شد. نتایج واسنجی برخی از این پارامترها در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه تعداد پارامترهای ورودی این مدل زیاد بود، فقط بخشی از آنها در این پژوهش ذکر شد. مدل AquaCrop با استفاده از این پارامترها واسنجی شد. نتایج آماری این مرحله در جدول ۴ نشان داده شده است. براساس این نتایج، دقت مدل AquaCrop در مرحله واسنجی برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت، مطلوب بود؛ ولی این مدل، دچار خطای کم‌برآوردی شد. کارایی این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد در مرحله واسنجی نیز مطلوب بود.

آبیاری مشاهده شد. نتایج پوشش سطح شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop، این نتایج را تأیید می‌کند (شکل ۳). همانگونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، افزایش سطح شوری سبب شد در انتهای فصل رشد به سرعت کاهش یابد. مقایسه نتایج کارایی مصرف آب در شکل ۴ نشان داده شده است. براساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی، برابر با ۰/۰۸ و ۰/۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود. متوسط این اختلاف نیز برابر با ۰/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود.

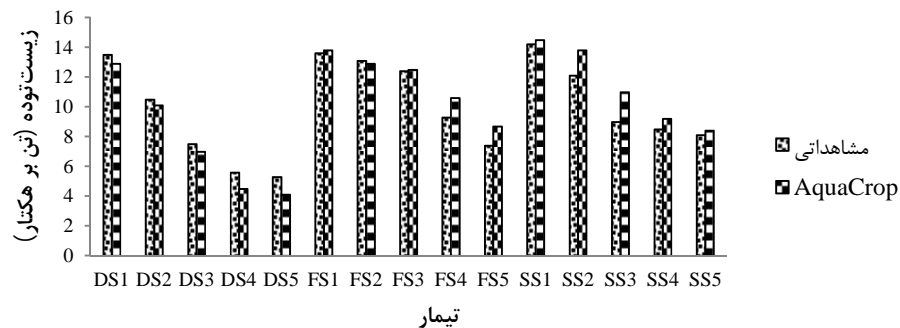
بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده زیست‌توده در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس این نتایج، بیشترین و کمترین مقادیر اختلاف، برابر با ۲ و ۰/۱ تن در هکتار بود که به ترتیب در تیمارهای SS3 و FS3 به دست آمد. متوسط این اختلاف نیز برابر با ۰/۷ تن در هکتار به دست آمد. مقایسه نتایج زیست‌توده و عملکرد نشان داد اختلاف نتایج بین عملکرد، کمتر از زیست‌توده بود. با افزایش مقدار شوری آب، میزان کاهش عملکرد و زیست‌توده به صورت خطی افزایش یافت. این نتایج در هر سه روش

جدول ۴- مقایسه آماری نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده ذرت با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

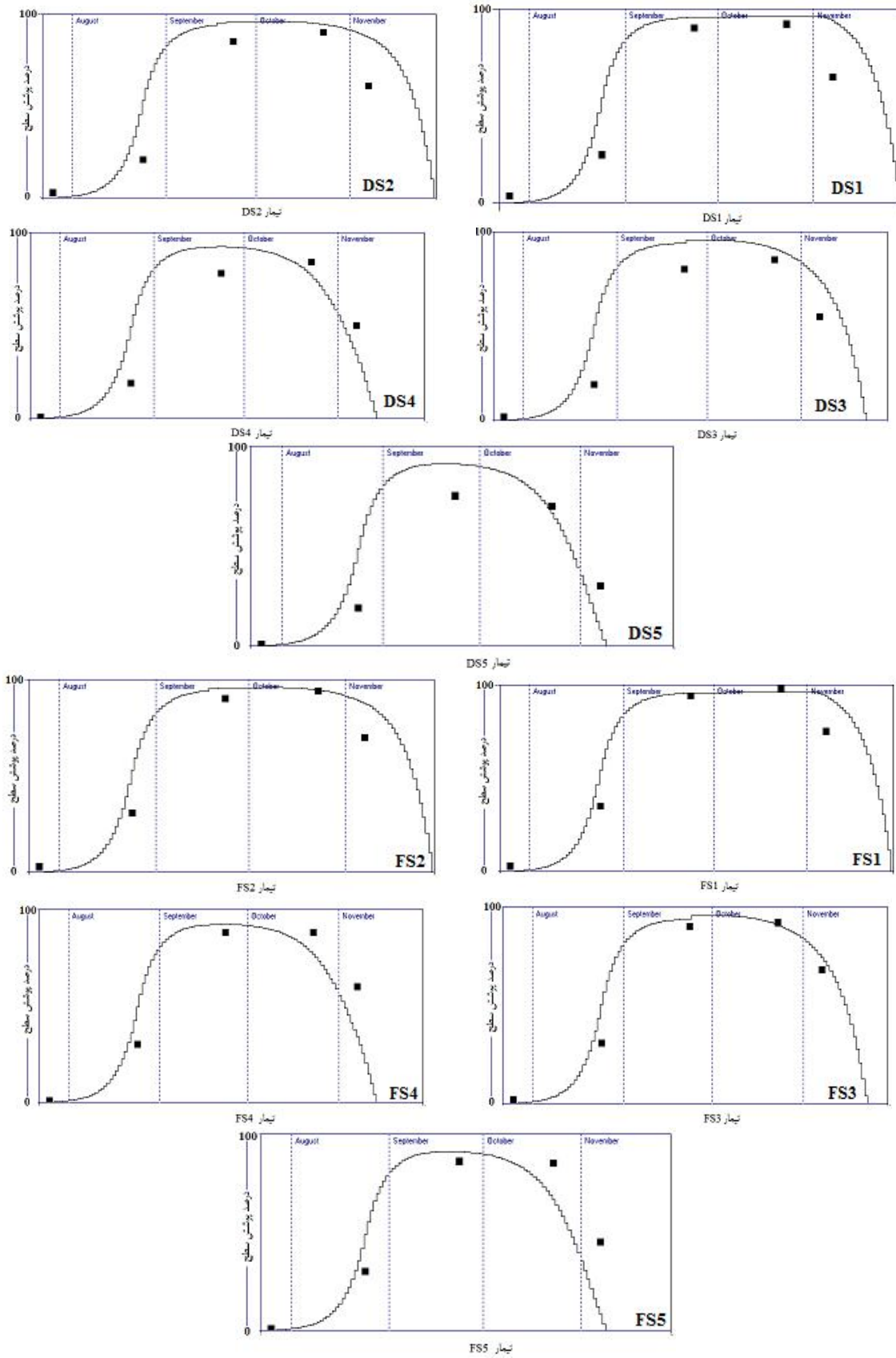
پارامتر	MBE	RMSE	NRMSE	EF	D
عملکرد	-۰/۱۱	۰/۲۰	-۰/۰۵	-۰/۸۳	-۰/۹۹
زیست‌توده	۰/۱۵	۰/۴۱	۰/۰۷	-۰/۹۰	-۰/۹۹
کارایی مصرف آب	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۴	-۰/۶۵	-۰/۹۹
شوری خاک	۰/۲۰	۰/۵۳	۰/۱۰	-۰/۸۶	-۰/۹۹



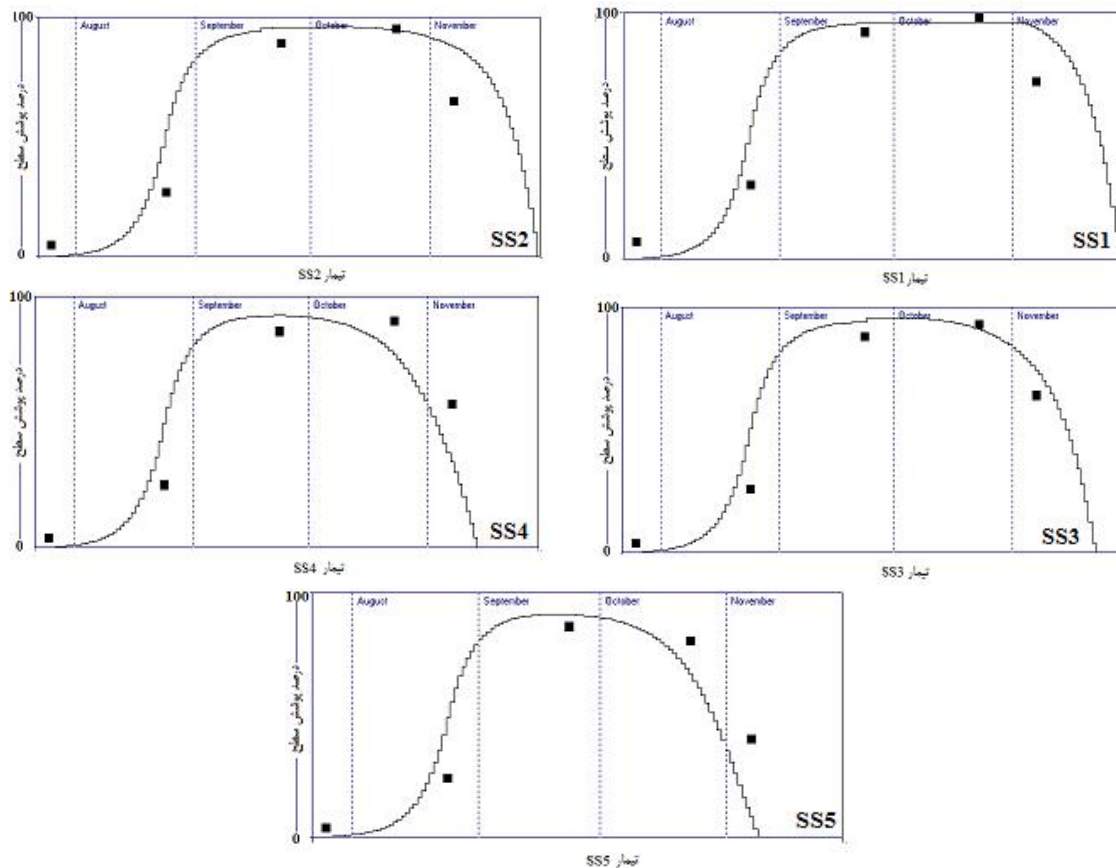
شکل ۱- مقایسه نتایج عملکرد دانه ذرت اندازه‌گیری‌شده و مشاهداتی با استفاده از مدل AquaCrop (D, F و S به ترتیب آبیاری بارانی با آب شور، آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین و آبیاری سطحی و S1, S2, S3, S4 و S5 به ترتیب شوری آب آبیاری به میزان ۳/۲، ۳/۵، ۳/۹، ۴/۶ و ۵/۱ دسی‌زیمنس بر متر است).



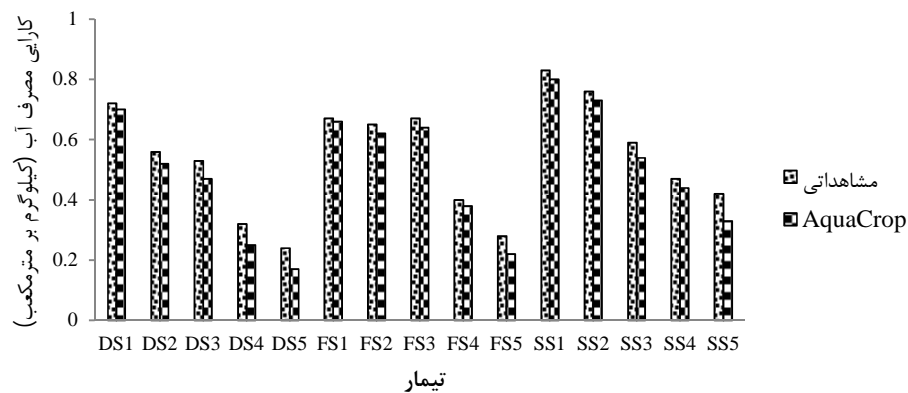
شکل ۲- مقایسه نتایج زیست‌توده اندازه‌گیری‌شده و مشاهداتی ذرت با استفاده از مدل AquaCrop (D, F و S به ترتیب آبیاری بارانی با آب شور، آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین و آبیاری سطحی و S1, S2, S3, S4 و S5 به ترتیب شوری آب آبیاری به میزان ۳/۲، ۳/۵، ۳/۹، ۴/۶ و ۵/۱ دسی‌زیمنس بر متر است).



شکل ۳- مقایسه پوشش سطح مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ذرت با استفاده از مدل AquaCrop



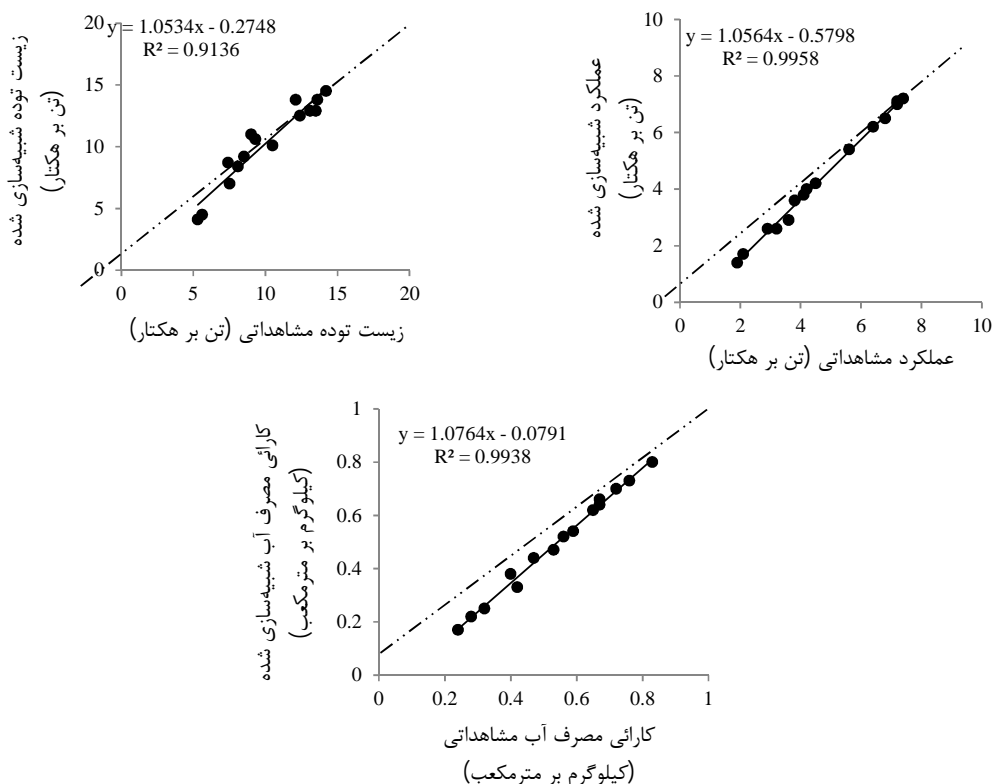
شکل ۳- مقایسه پوشش سطح مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ذرت با استفاده از مدل AquaCrop (D, F و S به ترتیب، آبیاری بارانی با آب شور، آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین و آبیاری سطحی و S1, S2, S3, S4 و S5 به ترتیب، شوری آب آبیاری به میزان ۲/۵، ۳/۲، ۳/۹، ۴/۶ و ۵/۱ دسی‌زیمنس بر متر است).



شکل ۴- مقایسه نتایج کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده و مشاهداتی ذرت با استفاده از مدل AquaCrop (D, F و S به ترتیب، آبیاری بارانی با آب شور، آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین و آبیاری سطحی و S1, S2, S3, S4 و S5 به ترتیب، شوری آب آبیاری به میزان ۲/۵، ۳/۲، ۳/۹، ۴/۶ و ۵/۱ دسی‌زیمنس بر متر است).

بود؛ بنابراین، مدل AquaCrop توانایی زیادی در پیروی کردن تغییرات عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب مشاهداتی داشت.

همبستگی بین نتایج عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در شکل ۴ نشان داده شده است. براساس این نتایج، مقدار ضریب تبیین برای هر کدام از این پارامترها به ترتیب، برابر ۰/۹۹، ۰/۹۱ و ۰/۹۹



شکل ۴- نتایج همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب ذرت با استفاده از مدل AquaCrop

بیش‌برآوردی شد. کارایی این مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده، بهتر از عملکرد بود. نتایج آماره‌های RMSE و NRMSE برای کارایی مصرف آب نشان داد دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب عالی بود؛ ولی این مدل، دچار خطای کم‌برآوردی شد. با وجود این، کارایی مدل AquaCrop در تعیین این پارامتر، چندان مطلوب نبود.

تفکیک نتایج به دست آمده براساس نوع روش آبیاری در جدول ۶ نشان داده شده است. براساس این نتایج، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت در هر سه روش آبیاری استفاده‌شده، دچار خطای کم‌برآوردی شد. البته دقت این مدل در هر سه روش آبیاری، تقریباً یکسان بود و در دسته عالی قرار داشت. با مراجعه به جدول ۵، کارایی این مدل براساس آماره EF برای هر کدام از روش‌های آبیاری استفاده‌شده، کمتر از مقداری بود که در حالت کلی تعیین شده بود. مدل AquaCrop در شبیه‌سازی آبیاری بارانی با آب شور (D)، دچار خطای کم‌برآوردی برای شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت شد. این مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت در دو روش آبیاری F

برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب با مدل AquaCrop و داده‌های برداشت‌شده از مزرعه از آماره‌های MBE، RMSE، NRMSE، EF و d استفاده شد. نتایج به دست آمده از این آماره‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. براساس نتایج دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت، دقت مطلوبی داشت. با مراجعه به رابطه (۸)، مشاهده شد دقت این مدل در دسته عالی قرار داشت. این نتایج با مشاهدات محمدی و همکاران (۱۳۹۴) و مهرآذر و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت داشت. با وجود این، این مدل، دچار خطای کم‌برآوردی شد. با توجه به دو آماره EF و d، کارایی این مدل در برآورد عملکرد نیز مطلوب بود. استریسویچ و همکاران (۲۰۱۱) و مالک و همکاران (۲۰۱۷) نیز در شبیه‌سازی گیاهان زراعی با مدل AquaCrop، مقدار ۰/۹ را برای آماره d گزارش کردند که با نتایج پژوهش حاضر، همخوانی دارد. دقت مدل AquaCrop در تعیین زیست‌توده نیز مطلوب بود. براساس آماره NRMSE، دقت این مدل در دسته عالی قرار داشت. براساس نتایج آماره MBE، این مدل، دچار خطای

بیشتری داشت. این نتایج با مشاهدات محمدی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت داشت. آنها نیز دقت مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد، بیشتر از کارایی مصرف آب نشان دادند. مقایسه آماری مقدار پوشش سطح مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای تیمارهای مختلف در جدول ۷ نشان داده شده است. براساس این نتایج، کارایی و دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی رشد پوشش سطح مطلوب بود.

و S، دچار خطای بیش‌برآوردی شد. دقت این مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت در روش آبیاری سطحی (S)، کمتر از آبیاری بارانی بود. کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی زیست‌توده، مطلوب بود. دقت و کارایی این مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب ذرت در هر سه روش آبیاری، تقریباً یکسان و مطلوب بود. مقایسه دو آماره NRMSE برای دو پارامتر عملکرد و کارایی مصرف آب نشان داد این مدل دقت در شبیه‌سازی عملکرد، دقت

جدول ۵- مقایسه نتایج آماری نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب ذرت

عامل	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
عملکرد دانه ذرت (تن در هکتار)	-۰/۳۱	۰/۳۵	۰/۰۷	۰/۶۰	۰/۹۹
زیست‌توده (تن در هکتار)	۰/۲۶	۰/۹۸	۰/۰۹	۰/۹۰	۰/۹۹
کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	-۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۷	-۴/۴	۰/۹۹

جدول ۶- مقایسه نتایج آماری عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب ذرت برای روش‌های آبیاری مختلف

عامل	روش آبیاری*	MBE	RMSE	NRMSE	EF	D
عملکرد دانه ذرت (تن در هکتار)	D	-۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۰۹	-۰/۵۸	۰/۹۹
	F	-۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۰۵	-۰/۸۵	۰/۹۹
	S	-۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۰۷	-۰/۴۲	۰/۹۹
زیست‌توده (تن در هکتار)	D	-۰/۲۵	۰/۸۲	۰/۰۹	۰/۷۰	۰/۹۹
	F	۰/۱۸	۰/۸۳	۰/۰۷	۰/۷۱	۰/۹۹
	S	-۰/۳۳	۱/۲	۰/۱۱	۰/۸۶	۰/۹۹
کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	D	-۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۱۳	-۰/۸	۰/۹۹
	F	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۱۱	-۰/۹	۰/۹۹
	S	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۱۴	-۰/۰۷	۰/۹۹

*D, F و S به ترتیب، آبیاری بارانی با آب شور، آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین و آبیاری سطحی است.

جدول ۷- مقایسه نتایج آماری پوشش سطح ذرت برای تیمارهای مختلف

تیمار	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	FS1	FS2	FS3	FS4	FS5	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5
R ²	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۸۰	۰/۷۰	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۷۷	۰/۷۱
RMSE	۱۸/۸	۱۹/۵	۱۸/۱	۱۷/۰	۱۸/۰	۱۲/۲	۱۳/۰	۹/۶	۱۵/۴	۲۰/۳	۱۵/۱	۱۵/۹	۱۲/۵	۱۶/۴	۱۹/۲
NRMSE	۳۴	۳۷/۴	۳۷/۵	۳۶/۵	۴۶/۲	۲۰	۲۲/۶	۱۶/۹	۲۸/۸	۴۱/۱	۲۵/۲	۲۸/۴	۲۲/۸	۳۱/۳	۴۹/۹
EF	۰/۷۲	۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۷۳	۰/۶۱	۰/۸۹	۰/۸۶	۰/۹۳	۰/۷۹	۰/۶۱	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۸۷	۰/۷۶	۰/۶۴
d	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۰	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۹۱

(D, F و S به ترتیب، آبیاری بارانی با آب شور، آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین و آبیاری سطحی و S1, S2, S3, S4 و S5 به ترتیب، شوری آب آبیاری به میزان ۲/۵، ۳/۲، ۳/۹، ۴/۶ و ۵/۱ دسی‌زیمنس بر متر است).

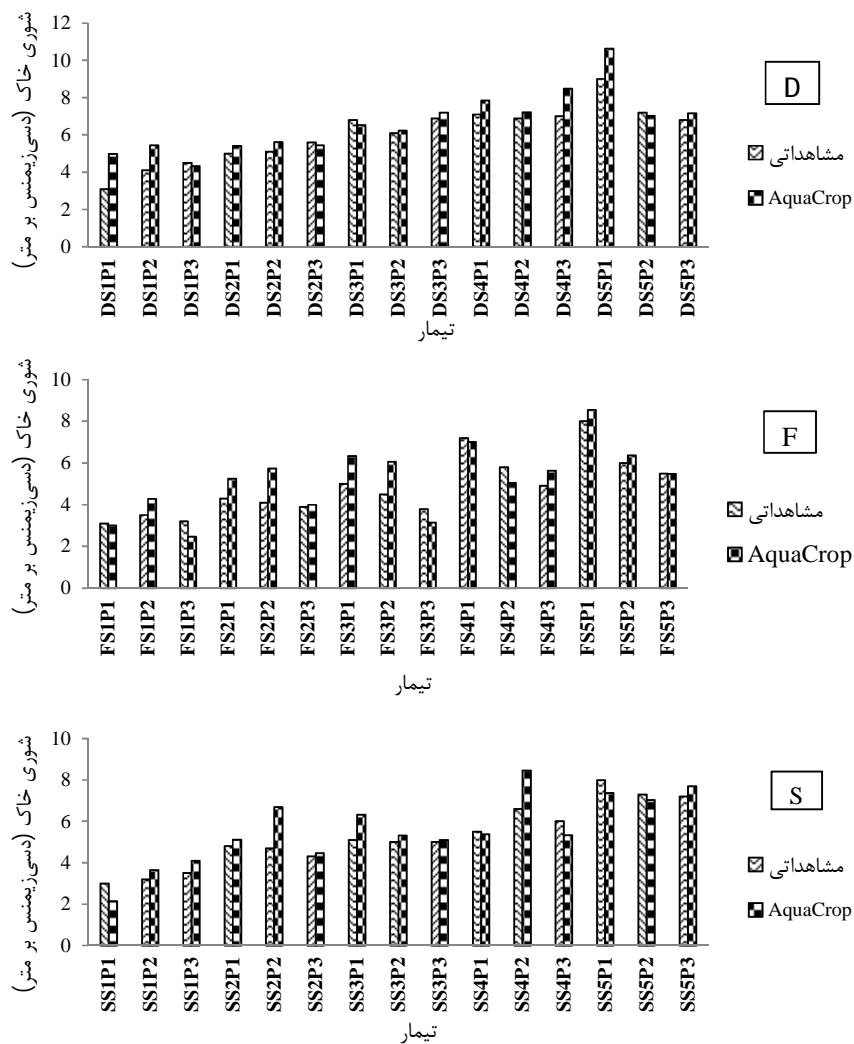
(شکل ۵-F) و برای روش آبیاری سطحی، برابر با ۰/۶۶ دسی‌زیمنس بر متر (شکل ۵-S) بود. این نتایج نشان داد مدل AquaCrop، دقت مناسبی برای شبیه‌سازی شوری خاک در هر سه روش آبیاری داشت و اختلاف زیادی بین روش آبیاری و نتایج مدل مشاهده نشد. بیشترین و کمترین مقدار شوری خاک در روش آبیاری بارانی با آب شور به ترتیب، برابر با ۰/۱۳ و ۱/۸۹ دسی‌زیمنس بر متر

نتایج شبیه‌سازی شوری خاک با مدل AquaCrop برای سه روش آبیاری استفاده شده در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس این نتایج، متوسط اختلاف بین نتایج مدل AquaCrop و مقادیر شوری خاک مشاهداتی در روش آبیاری بارانی با آب شور، برابر با ۰/۶۶ دسی‌زیمنس بر متر بود (شکل ۵-D). این نتایج برای آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین، برابر با ۰/۶۹ دسی‌زیمنس بر متر

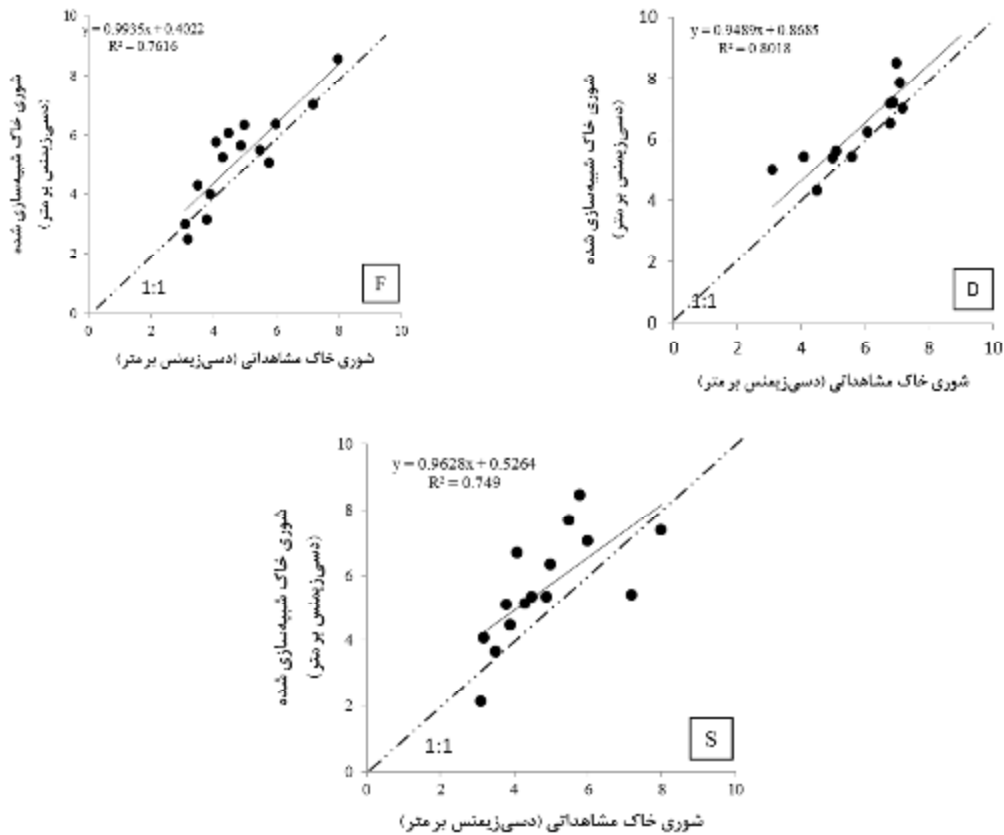
زیادی بین روش‌های مختلف آبیاری از نظر این آماره وجود نداشت. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقادیر شوری خاک در هر سه روش آبیاری بالای خط یک به یک بود؛ بنابراین، مدل AquaCrop در تعیین شوری خاک در هر سه روش آبیاری، دچار خطای بیش‌برآوردی شد. این نتایج با مراجعه به نتایج آماره MBE در جدول ۸ نیز مشاهده می‌شود. مقادیر آماره‌های RMSE و NRMSE نشان داد دقت مدل AquaCrop در تعیین شوری خاک در حالت کلی و به‌صورت تفکیکی برای هر روش آبیاری در دسته خوب قرار داشت. دو آماره EF و d نیز نشان دادند کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی شوری خاک، مطلوب بود.

بود. این نتایج برای روش آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین به‌ترتیب، برابر با ۰/۰۲ و ۱/۶۴ دسی‌زیمنس بر متر و برای روش آبیاری سطحی به‌ترتیب، برابر با ۰/۱۰ و ۱/۹۸ دسی‌زیمنس بر متر بود؛ بنابراین، دامنه تغییرات اختلاف شوری در شرایط واقعی و شبیه‌سازی‌شده نیز مطلوب بود.

نتایج همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده شوری خاک در شکل ۶ و مقایسه آماری نتایج در جدول ۸ نشان داده شده است. براساس این نتایج، مدل AquaCrop توانایی مطلوبی برای پیروی از تغییرات شوری خاک داشت. ضریب تبیین در روش آبیاری بارانی با آب شور نسبت به دو روش آبیاری دیگر، بالاتر بود؛ ولی تفاوت



شکل ۵- مقایسه نتایج شوری خاک مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل AquaCrop (D, F و S به‌ترتیب آبیاری بارانی با آب شور، آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین و آبیاری سطحی؛ S1, S2, S3, S4 و S5 به‌ترتیب، شوری آب آبیاری به میزان ۳/۲، ۳/۵، ۴/۶، ۵/۱ و ۵/۱ دسی‌زیمنس بر متر و P1, P2 و P3 به‌ترتیب، عمق ۱۵، ۴۵ و ۷۵ سانتی‌متر است).



شکل ۶- همبستگی شوری خاک مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل AquaCrop (D, F) و به ترتیب آبیاری بارانی با آب شور، آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین و آبیاری سطحی است).

جدول ۸- مقایسه نتایج آماری نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده شوری خاک تحت کشت ذرت

d	EF	NRMSE	RMSE	MBE	روش آبیاری*
۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۱۴	۰/۸۷	۰/۴۱	مجموع D, F و S
۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۱۳	۰/۸۸	۰/۵۵	D
۰/۹۹	۰/۹۰	۰/۱۶	۰/۸۵	۰/۳۷	F
۰/۹۹	۰/۹۱	۰/۱۵	۰/۸۷	۰/۳۳	S

*D, F و S به ترتیب، آبیاری بارانی با آب شور، آبیاری بارانی با تلفیق آب شور و شیرین و آبیاری سطحی است.

نتیجه‌گیری

بیش‌برآوردی شد؛ ولی دقت آن در دسته خوب قرار داشت. کارایی این مدل نیز برای شبیه‌سازی شوری خاک، مطلوب بود. با تفکیک روش‌های آبیاری، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت، کارایی چندانی مطلوبی در هیچ‌کدام از روش‌های آبیاری نداشت. با وجود این، دقت آن در روش‌های آبیاری مورد مطالعه عالی بود. مدل AquaCrop در شبیه‌سازی زیست‌توده، کارایی خوبی در روش‌های آبیاری مورد مطالعه داشت. دقت این مدل نیز برای شبیه‌سازی زیست‌توده در روش‌های بارانی، عالی و در روش سطحی، خوب بود. این مدل، دقت خوبی برای شبیه‌سازی کارایی مصرف آب داشت. کارایی AquaCrop

این پژوهش برای ارزیابی دقت مدل AquaCrop در تعیین عملکرد، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شوری خاک در کشت ذرت تحت دو سیستم آبیاری مختلف (بارانی و سطحی) و تنش شوری انجام شد. نتایج نشان داد مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت، دچار خطای کم‌برآوردی شد. دقت این مدل برای شبیه‌سازی هر دو پارامتر ذکر شده در دسته عالی قرار داشت. کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت مطلوب بود و دقت آن در دسته عالی قرار داشت. این مدل در شبیه‌سازی شوری خاک، دچار خطای

۹. مینایی س. ۱۳۹۳. بررسی تأثیر مدیریت آبیاری بارانی با آب شور بر عملکرد و جذب یون‌ها برای ذرت در اقلیم اهواز. پایان‌نامه دکتري رشته آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۱۵ ص.

۱۰. وطن‌خواه ا. و ابراهیمیان ح. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت علوفه‌ای در طول جویچه. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۷(۳): ۴۹۵-۵۰۴.

برای شبیه‌سازی این پارامتر، چندان مطلوب نبود. دقت و کارایی این مدل برای شبیه‌سازی شوری خاک عالی بود. با وجود این، در هر روش‌های آبیاری مورد مطالعه، دقت و کارایی AquaCrop مطلوب و یکسان بود؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت روش آبیاری، اثر چندان بر دقت و کارایی مدل AquaCrop نداشت.

منابع

۱. ابراهیمی‌پاک ن. اگدرنژاد ا. تافته آ. و احمدی م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین، آبیاری و زهکشی، ۱۳(۳-۷۵): ۷۱۵-۷۲۶.
۲. ایوزیان م. و واقفی ا. ۱۳۸۹. مبانی احتمالات و آمار مهندسی. انتشارات ترمه. ۵۰۴ ص.
۳. ضیایی غ. بابازاده ح. عباسی ف. و کاوه ف. ۱۳۹۳. بررسی عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد دانه ذرت. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵(۴): ۴۳۵-۴۴۵.
۴. علیزاده ا. ۱۳۹۳. اصول طراحی سیستم‌های آبیاری در مزرعه. دانشگاه صنعتی سجاد. ۸۲۰ ص.
۵. علیزاده ح. ع. و عباسی ف. ۱۳۹۶. بررسی واکنش عملکرد دانه ذرت دانه‌ای به سطوح مختلف آب و کود مصرفی با استفاده از مدل AquaCrop. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰(۲): ۱۱۹-۱۳۴.
۶. محمدی م. داوری ک. قهرمان ب. انصاری ح. و حق‌وردی ا. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش هم‌زمان شوری و خشکی. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹(۳): ۲۷۷-۲۹۵.
۷. محمدی معله‌زاده ج. ناصری ع. ع. و هوشمند ع. ۱۳۹۸. بررسی کارایی مدل AquaCrop در تعیین زمان آبیاری گیاه نیشکر و پایش آن با شاخص تنش آبی گیاه، آبیاری و زهکشی. ۱۳(۵-۷۷): ۱۴۳۹-۱۴۵۰.
۸. مهرآذر آ. سلطانی ج. و رحمتی ا. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت (*Zea mays L.*) تحت شرایط تنش شوری. آب و خاک. ۳۰(۵): ۱۴۲۶-۱۴۳۹.
- 11.24. Guo D. Zhao R. Xing X. and Ma X. 2019. Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions. *Agronomy and Soil Science*. 66(8): 1115-1133.
12. 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.
13. De Juan Valero J. A. M. Maturano A. Artigao J. M. Ramirez T. M. B. and Ortega A. J. F. 2005. Growth and nitrogen use efficiency of irrigated maize in a semiarid region as affected by nitrogen fertilization. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 3(1): 134-144.
14. Faloye O. T. Ajayi A. E. Alatis M. O. Ewulo B. S. and Horn H. 2020. Maize growth and yield modelling using AquaCrop under deficit irrigation with sole and combined application of biochar and inorganic fertilizer. *Soil Science and Plant Nutrition*. Access at <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00310-120>; 2440-2453.
15. Garcia-Vila M. Fereres E. Mateos L. Orgaz F. and Steduto P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy*. 101: 477-487.
16. 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.
17. 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.
18. Hsiao T. C. Heng L. K. Steduto P. Raes D. and Fereres E. 2009. AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy*. 101: 448-459.
19. 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.
20. Malik A. Shakir A. S. Ajmal M. Jamal Khan M. and Ali Kan T. 2017. 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.
 21. Masanganise J. Basira K. Chipindu B. Mashonjowa E. and Mhizha T. 2013. Testing the utility of a crop growth simulation model in predicting maize yield in a changing climate in Zimbabwe. *International Journal of Agricultural and Food Science*. 3(4): 157-163.
 22. Rupinder S. and Irmak S. 2019. Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*. 223: 105687.
 23. Stricevic R. Cosic M. Djurovic N. Pejic B. and Maksimovic L. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 98: 1615-1621.
 24. Todorovic M. Albrizio R. Zivotic L. Abisaab M. and Stwckle C. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy*. 101: 509-521.

