

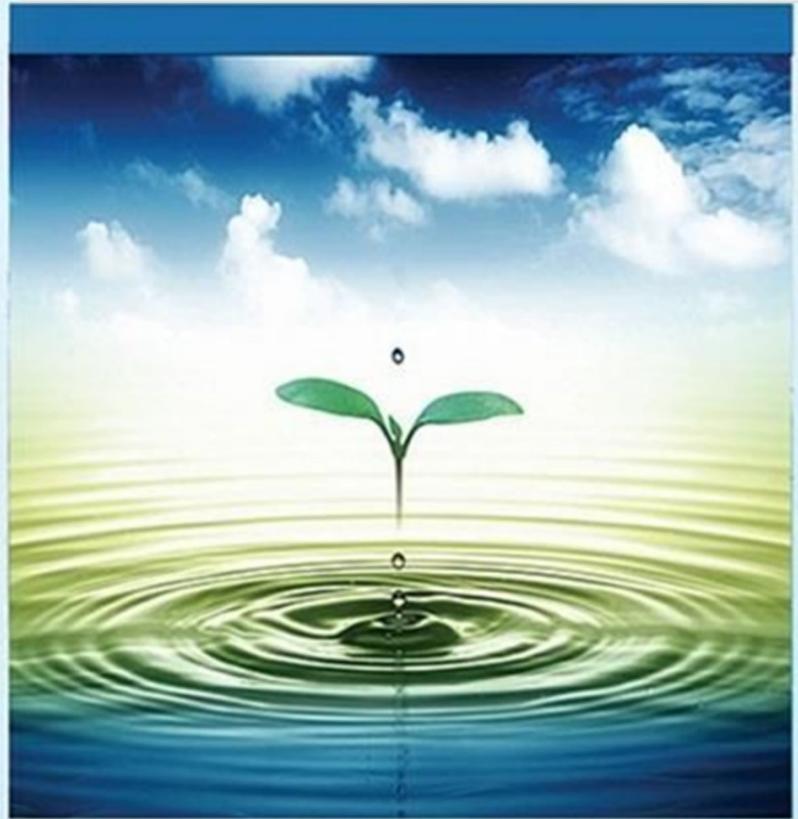
بررسی دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ذرت دانه‌ای در تراکم‌های کاشت متفاوت و مقادیر مختلف آب

شکوه کریمی، اصلان اگدرنژاد و محمدمهدی نخجوانی مقدم

دوره ۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، صفحات ۷۲-۵۹

Vol. 7(1), Spring 2021, 59-72

DOI: 10.22034/jewe.2020.247901.1419



Assessing Aquacrop Model Accuracy for Simulation of Corn Yield and Water Use Efficiency in Different Plant Densities and Water Amount

Karimi, S., Egdernezhad, A. and Nakhjavanimoghaddam, M.

www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

کریمی ش.، اگدرنژاد ا. و نخجوانی مقدم م. (۱۴۰۰). بررسی دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ذرت دانه‌ای در تراکم‌های کاشت متفاوت و مقادیر مختلف آب. محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۱، صفحات: ۷۲-۵۹.

Citing this paper: Karimi, S., Egdernezhad, A. and Nakhjavanimoghaddam, M. (2021). Assessing AquaCrop model accuracy for simulation of corn yield and water use efficiency in different plant densities and water amount. Environ. Water Eng., 7(1), 59-72. DOI: 10.22034/jewe.2020.247901.1419.

مقاله پژوهشی

بررسی دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ذرت دانه‌ای در تراکم‌های کاشت متفاوت و مقادیر مختلف آب

شکوه کریمی^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*} و محمدمهدی نخجوانی مقدم^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، 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: a_eigder@iauhvaz.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۰۸/۱۷]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۰۸/۱۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۰۶/۲۲]

چکیده

اهمیت گیاه ذرت سبب کشت گسترده رقم‌های مختلف این گیاه زراعی در بسیاری از مناطق ایران شده است. از آنجایی که بررسی عوامل محیطی و مدیریتی نظیر تراکم کاشت، مقدار آبیاری و رقم گیاه بر روی عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب گیاهان زراعی نیازمند آزمایش‌های مزرعه‌ای هزینه‌بر و زمان‌بر می‌باشد، به‌نظر می‌رسد می‌توان اثر عوامل مختلف بر عملکرد این گیاه زراعی به‌وسیله مدل‌های گیاهی را شبیه‌سازی کرد. پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی مدل گیاهی AquaCrop برای دو رقم ذرت دانه‌ای رقم متوسط‌ترس SC500 و زودرس SC302 تحت تراکم‌های کشت ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ plant/ha در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ plant/ha در رقم SC302 با مقادیر مختلف آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵٪ آبیاری انجام شد. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب ذرت از دقت مطلوب (RSME: ۰/۸۹ ton/ha و NRSME: ۰/۱۰) و کارایی مناسبی (EF و $d = ۰/۹۹$) برخوردار بود. در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت نیز این مدل گیاهی دقت قابل‌قبول (RSME = ۲/۴۷ ton/ha و NRSME = ۰/۱۴) و کارایی مناسبی (EF = ۰/۹۸ و $d = ۰/۹۹$) داشت. مدل AquaCrop در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب ذرت نیز دقت (RSME = ۰/۰۷ kg/m³ و NRSME = ۰/۰۷) و کارایی (EF و $d = ۰/۹۹$) مناسبی داشت. بر اساس این نتایج، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی ارقام ذرت تحت شرایط ذکرشده پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تابع تولید؛ رقم زودرس؛ رقم متوسط‌ترس؛ مدل آب-محور؛ مدل رشد گیاهی.

۱- مقدمه

ذرت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات جهان، به لحاظ چهار کربنه بودن و گرماپسندی، با مناطق خشک و نیمه‌خشک سازگاری خوبی دارد (De Juan Valero et al. 2005). حال‌آنکه کاهش مصرف آب در زراعت این گیاه علی‌رغم افزایش بهره‌وری مصرف، سبب کاهش عملکرد و زیست‌توده آن می‌شود (Xiong et al. 2002; Cheong et al. 2003; Geerts and Raes 2009). نتایج پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده است که می‌توان با مدیریت بهینه تراکم کشت در شرایط کم‌آبیاری یا بیش‌آبیاری عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب به شرایط بهینه‌ای برسند. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و بالا بودن مصرف آب در بخش کشاورزی نیاز است دقت بیشتری در تعیین میزان آب آبیاری و تراکم کشت ذرت به عمل آید. بررسی این شرایط در مزارع مختلف نیازمند صرف وقت و هزینه بسیار است. به همین دلیل مدل‌های گیاهی مختلفی به‌منظور رفع این محدودیت‌ها بسط داده‌شده‌اند (Raes et al. 2009).

سازمان خواروبار کشاورزی^۱ به‌منظور رفع این مشکل، مدل AquaCrop را در سال ۲۰۰۹ ارائه کرد. این مدل آب-محور و کاربرپسند است و به داده‌های کمی برای شبیه‌سازی نیاز دارد (Todorovic 2009; Heng et al. 2009). پژوهش-گران برای استفاده از این مدل در شرایط مختلف، به ارزیابی دقت آن پرداختند. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به Araya et al. (2010) بر محصول جو و Stricevic et al. (2011) بر محصولات ذرت و چغندر قند اشاره کرد. این پژوهش‌گران نشان دادند که مدل AquaCrop در پژوهش انجام‌شده دارای قابلیت بالایی بود و خطای آن قابل‌اغماض است. در پژوهشی دیگر، Ebrahimipak et al. (2018) به ارزیابی دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب زعفران در شرایط مختلف تأمین آب پرداختند. این پژوهش‌گران گزارش کردند که نتایج آماره‌های NRMSE، MBE و EF نشان داد که مدل AquaCrop از دقت و کارایی لازم برای شبیه‌سازی این گیاه زراعی برخوردار بود. (Egdernezhad et al. 2019). برای شبیه‌سازی اثر مدیریت مصرف آب بر محصول کلزا

استفاده کردند. این پژوهش‌گران با تکیه بر مدل واسنجی شده AquaCrop، برنامه‌های مختلفی برای آبیاری این گیاه زراعی ارائه کردند.

همچنین، Ebrahimipak et al. (2019) به ارزیابی دقت مدل AquaCrop نسبت به دو مدل گیاهی WOFOST و CropSyst به‌منظور شبیه‌سازی گیاه زراعی کلزا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که کارایی و دقت مدل AquaCrop بسیار مناسب بود و به‌دلیل سادگی و محیط کاربری راحت‌تر نسبت به دو مدل گیاهی مذکور، به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کلزا بهتر است.

در خصوص گیاه زراعی ذرت نیز پژوهش‌های متعددی توسط پژوهش‌گران انجام‌شده است. به‌عنوان مثال، Heng et al. (2009) در پژوهشی نشان دادند که مدل AquaCrop دقت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده ذرت تحت شرایط تأمین آبیاری کامل و تنش آبی ملایم داشت (Heng et al. 2009). ولی شبیه‌سازی دو پارامتر عملکرد دانه و زیست‌توده در شرایط تنش شدید آبی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نکرد. در پژوهشی دیگر، Hsiao et al. (2009) نشان دادند که مدل AquaCrop دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط گوناگون تراکم بوته، تاریخ کاشت متفاوت و مقادیر مختلف نیاز آبی داشت (Hsiao et al. 2009). در پژوهشی دیگر، Masanganise et al. (2013) با استفاده از مدل AquaCrop به شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط زراعی کشور زیمبابوه پرداختند (Masanganise et al. 2013). این پژوهش‌گران نشان دادند که این مدل گیاهی دقت بالایی برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت داشت. از جمله پژوهش‌های دیگر می‌توان به مطالعات Katerji et al. (2013) اشاره کرد. آن‌ها نیز دقت مدل AquaCrop را در شرایط مختلف تأمین آب و سناریوهای مختلف کم‌آبیاری بررسی کردند. بر اساس نتایج منتشرشده این پژوهش‌گران، دقت مدل AquaCrop قابل‌قبول بود.

پژوهش‌های مرور شده در ادبیات پژوهش تضمین می‌کند که مدل AquaCrop می‌تواند دقت مناسبی در شبیه‌سازی عملکرد ذرت داشته باشد. لیکن این پژوهش‌ها در شرایط آبیاری سطحی و بدون در نظر گرفتن تراکم کشت به‌همراه

^۱FAO

نوع تراکم متغیر بود. برای کاشت بذر از مارکر چوب استفاده شد. در هر چاله تعداد ۳ عدد بذر کاشته شد و در مرحله ۸ برگی تنک شد. هر تیمار در ۵ ردیف به طول ۱۲ m کشت شد که سه خط وسط، اصلی و دو خط کناری حاشیه بودند. برای تعیین بافت و خصوصیات فیزیکی خاک محل انجام آزمایش نمونه‌هایی از اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ cm گرفته شد (جدول ۱).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش

Soil depth (cm)	Soil texture	Moisture in PWP (cm^3/cm^3)	Moisture in FC (cm^3/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)
0-20	Loamy	12.1	26.3	1.36
20-40	Loamy	13.7	27.0	1.42
40-60	Loamy	15.1	28.6	1.42

۲-۲- عملیات آبیاری

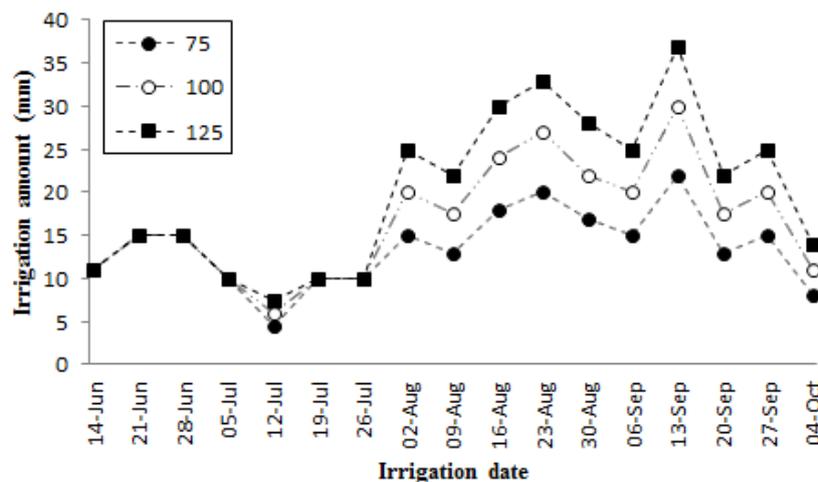
برای آبیاری از آپاش برنجی قابل تنظیم از نوع VYR 50 استفاده شد. رطوبت خاک قبل از هر نوبت آبیاری در کلیه تیمارها در طول هر فصل رشد با استفاده از دستگاه TRIME در عمق توسعه ریشه اندازه‌گیری شد. زمان آبیاری در تمامی تیمارهای آزمایشی بر اساس ۵۰٪ متوسط میزان تخلیه مجاز رطوبتی، در تراکم‌های مختلف تیمار شاهد (تیمار ۱۰۰٪ نیاز آبی) در نظر گرفته شد. میزان آب موردنیاز تیمارهای آزمایشی نیز بر اساس کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت زراعی تعیین و با استفاده از کنتور حجمی در اختیار گیاه قرار گرفت. مقادیر آب آبیاری برای هر کدام از تیمارها در شکل (۱) نشان داده شده است.

مقادیر مختلف آب آبیاری انجام شده است. به همین دلیل، پژوهش حاضر به منظور ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی ذرت تحت شرایط مختلف تأمین آب آبیاری به روش بارانی انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- عملیات زراعی

اطلاعات و داده‌های مورد استفاده در این پژوهش برگرفته از نتایج یک پژوهش دو ساله در شهرستان کرج است (Nakhjavani Moghaddam et al. 2011; Nakhjavani Moghaddam et al. 2013). در این پژوهش، دو رقم ذرت متوسط رس SC500 و زودرس SC302، تحت سه سطح آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵٪ نیاز آبی گیاه مورد مطالعه قرار گرفت. برای رقم متوسط رس تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ plant/ha و برای رقم زودرس در نظر گرفته شد. شهرستان کرج در شرایط آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک واقع شده است. میانگین بارندگی سالیانه کرج ۲۵۰ mm، حداکثر بارندگی در فروردین‌ماه معادل ۵/۲۹ mm و حداقل میزان بارندگی در تیرماه معادل ۰/۵ mm است. بیش‌ترین معدل درجه حرارت در تیرماه ۳۸ °C-، کم‌ترین معدل درجه حرارت در دی‌ماه ۶ °C- و متوسط درجه حرارت روزانه ۱۶/۶ °C است. در هر دو سال انجام آزمایش در نیمه اول خرداد ماه زمین برای کشت آماده شد. عملیات کاشت به صورت دستی انجام شد. فاصله بین ردیف‌های کشت ۷۵ cm و فاصله بین بوته‌ها در روی هر ردیف نیز بسته به



شکل ۱- میزان آب آبیاری برای تیمارهای آبیاری مختلف در طول دوره رشد ذرت

Fig. 1 Amount of irrigation water during corn growth period

زمان (day) می‌باشد. میزان تعرق گیاه بر اساس پوشش تاج از رابط (۴) محاسبه می‌شود.

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (4)$$

که، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی هستند. زیست‌توده خشک نیز طبق رابطه (۵) برآورد می‌گردد.

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (5)$$

که، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد وزن دانه (Y) نیز با استفاده از ماده‌ی خشک تولیدشده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$Y = B \times HI \quad (6)$$

شدت تنش آبی (K_s) مؤثر بر توسعه پوشش تاج (CC)، هدایت روزنه‌ای (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در واقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش یافته و به تبع آن میزان تعرق گیاه کاهش می‌یابد. این عمل سبب کاهش ماده خشک تولیدی و عملکرد دانه می‌شود.

۲-۴- تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل

برای تحلیل حساسیت مدل AquaCrop، در هر مرحله یکی از پارامترهای ورودی مدل به مقدار ۲۵٪ افزایش و سپس کاهش داده می‌شد و بقیه پارامترها ثابت نگه‌داشته می‌شدند (Geerts et al. 2009). نتایج به دست آمده پس از تغییر پارامترها یادداشت شد. سپس تحلیل حساسیت این مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی با استفاده از رابطه (۷) تعیین شد (Geerts et al. 2009).

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (7)$$

که، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر بر اساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد پارامتر مورد نظر بر اساس داده ورودی پایه می‌باشد. ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > 15$ حساسیت

پس از استقرار کامل بوته‌ها و کسب اطمینان از اینکه بوته‌ها خطرات اولیه (آفات خاکزی و سرمای اول فصل) را گذرانده‌اند، اقدام به تنک کردن بوته‌های اضافی گردید. مقدار کود مصرفی بر اساس آزمون خاک‌شناسی محاسبه شد و کود فسفات آمونیوم به مقدار 250 kg/ha به انضمام نیمی از کود اوره موردنیاز (200 kg/ha) پیش از کاشت مورد استفاده قرار گرفت. نیمی دیگر از کود اوره (200 kg/ha) در مرحله ۸-۹ برگگی به صورت سرک به مزرعه داده شد. در این آزمایش به غیر از سم علف‌کش از هیچ‌گونه سمی جهت مبارزه با آفات و بیماری‌ها استفاده نشد. در انتهای فصل نیز عملیات برداشت انجام شد و عملکرد و زیست‌توده به وسیله ترازو در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای تعیین بهره‌وری مصرف آب از رابطه (۱) استفاده شد.

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

که، WUE بهره‌وری مصرف آب (kg/m^3)، Y عملکرد ذرت (kg) و W مقدار آب مصرفی (m^3) می‌باشد.

۲-۳- مدل AquaCrop

این مدل برای تعیین عملکرد محصول بر اساس تبخیر-تعرق از رابطه (۲) استفاده می‌کند.

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (2)$$

که، Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول (ton/ha)، ET_x و ET_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه (mm) و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق است. این مدل با تفکیک تبخیر-تعرق (ET) به دو جزء تبخیر از سطح خاک (E) و تعرق از سطح گیاه (Tr)، از مصرف غیرتولیدی آب از طریق تبخیر جلوگیری می‌کند. این عمل با شبیه‌سازی پوشش تاج گیاه به جای شاخص سطح برگ (LAI) انجام می‌شود. بدین ترتیب که توسعه پوشش تاج گیاه از زمان جوانه‌زنی تا مقدار بیشینه پوشش تاج از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$CC = CC_0 \times e^{CGC \cdot t} \quad (3)$$

که، CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه ($/$)، CC_0 پوشش تاج اولیه ($/$)، CGC ضریب رشد پوشش تاج ($1/\text{day}$) و t

صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کم‌تر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده دقت عالی مدل است. هم‌چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۱-۰/۲، ۰/۲-۰/۳ و بیش‌تر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل رشد گیاهی AquaCrop مقدار عامل مورد نظر را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که این مدل در برآورد عامل مورد نظر عدد کوچک‌تری به دست داده‌اند. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 نیز از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- تحلیل حساسیت

پیش از واسنجی مقدار حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات پارامترهای ورودی بررسی شد. نتایج تحلیل حساسیت در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به تعدد پارامترهای ورودی، تنها برخی از آن‌ها در این جدول ذکر شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل AquaCrop نسبت به افزایش یا کاهش ۲۵٪ اکثر پارامترها ($Sc \pm 25\%$)، حساسیت متوسط داشت؛ بنابراین پارامترهای مذکور برای واسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. این مدل به تغییرات برخی پارامترها نظیر مدت زمان کاشت تا برداشت محصول، عمق مؤثر ریشه و ضریب رشد پوشش نیز حساسیت کم داشت.

۳-۲- نتایج واسنجی

نتایج واسنجی مدل AquaCrop در جدول (۳) نشان داده شده است. در این جدول برخی از پارامترها که برای هر دو رقم ذرت ثابت و به صورت یکسان نوشته شده است. برخی پارامترها نیز برای هر کدام از دو رقم مورد واسنجی قرار گرفت. پارامترهایی مانند عمق ریشه نیز به صورت پیش فرض در مدل قرار گرفت. چون معمولاً برای همه ارقام ذرت به همین صورت استفاده می‌شود (Geerts and Raes 2009)؛

بالا، $15 < Sc < 2$ حساسیت متوسط، $Sc < 2$ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد. پس از تحلیل حساسیت، واسنجی این مدل با استفاده از داده‌های سال اول انجام شد. در مرحله واسنجی، مقادیر پارامترهای با حساسیت متوسط و زیاد آن قدر تغییر داده شدند تا نتایج شبیه‌سازی شده به نتایج مشاهداتی در سال اول کشت نزدیک شود. معیار نزدیکی نتایج در این مرحله، مقادیر آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) بود. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۸) تا (۱۳) نشان داده شده‌اند. پس از اتمام واسنجی، مقادیر کلیه پارامترهای ورودی یادداشت شده و در مرحله صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. در این مرحله نیز برای آزمون دقت و کارایی مدل AquaCrop، از آماره‌های اشاره شده در بخش واسنجی استفاده شد.

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

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad (9)$$

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

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

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (12)$$

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

که، 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 داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به



بنابراین پارامترهایی مانند عمق ریشه واسنجی نشد. همانند جدول تحلیل حساسیت، به علت تعدد پارامترهای ورودی پارامترهای واسنجی شده نوشته شد.

جدول ۲- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی AquaCrop
Table 2 Sensitivity analysis for some AquaCrop input parameters

Parameter	Sensitivity rate	Sc at -0.25%	Sc at +0.25%
Day after owing to emergence	Average	2.0	2.1
Day after owing to maximum canopy	Average	1.2	2.4
Day after owing to senescence	Average	2.9	2.5
Day after owing to maturity	Low- Average	3.8	1.7
Rooting effective depth	Low	1.3	1.0
Normalized water productivity	Average	8.6	10.4
Maximum canopy cover	Average	2.9	4.5
Canopy expansion threshold for canopy expansion-upper	Average	4.4	6.8
Canopy expansion threshold for canopy expansion-lower	Average	7.3	8.2
Canopy growth coefficient	Low- Average	1.8	3.4
Decline canopy cover	Average	4.2	7.6
Crop coefficient for transpiration	Average	10.1	12.3
Shape factor for stomata closure	Average	8.3	6.6
Shape factor for early canopy senescence	Average	4.5	7.9

جدول ۳- مقادیر پارامترهای گیاهی در مدل AquaCrop
Table 3 Values of AquaCrop input parameters

Parameter	Description	Value	
		KSC 302	KSC 500
Base temperature	Default	8	8
Upper temperature	Default	30	30
Canopy growth coefficient	Calibrated	16.5	15.0
Initial canopy cover	Default	6.5	6.5
Day after owing to emergence	Calibrated	6	6
Day after owing to maximum canopy	Calibrated	55	60
Day after owing to senescence	Calibrated	105	115
Effective rooting depth	Default	2.30	2.30
Normalized water productivity	Calibrated	33.7	33.0
Maximum canopy cover	Calibrated	95	95
Canopy expansion threshold for canopy expansion-upper	Calibrated	0.17	0.17
Canopy expansion threshold for canopy expansion-lower	Calibrated	0.7	0.7
Decline canopy cover	Calibrated	11.5	11.0
Crop coefficient for transpiration	Default	1.05	1.05
Shape factor for stomata closure	Calibrated	0.65	0.65
Shape factor for early canopy senescence	Default	0.69	0.69

این مدل برابر با ۰/۰۶ بود. این مقدار نشان داد که خطای مدل AquaCrop در مرحله واسنجی در دسته عالی قرار داشت. کارایی این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد دانه بسیار مطلوب بود به طوری که مقادیر دو آماره EF و d بسیار نزدیک به عدد یک بودند. بر اساس آماره RSME، مقدار خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت حدود ۱ ton/ha بود. یکسان‌سازی این مقدار بر اساس متوسط زیست‌توده به‌دست‌آمده نشان داد که دقت این مدل در محدوده خوب قرار داشت. مقایسه دو پارامتر زیست‌توده و عملکرد دانه نشان داد که مدل AquaCrop دقت بیشتری

نتایج حاصل از واسنجی مدل AquaCrop از نظر آماری بررسی و در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب ذرت به ترتیب دچار خطای بیش‌برآوردی، کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی شد. بر اساس آماره RSME، دقت این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه قابل‌قبول بود. این مدل در مرحله واسنجی خطایی برابر با ۰/۵ ton/ha برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت داشت. با یکسان‌سازی این خطا بر اساس مقدار عملکرد به‌دست‌آمده، مشاهده شد که نسبت خطای

آب به‌طور متوسط برابر با 0.06 kg/m^3 بود. بر اساس مقدار متوسط این پارامتر، دقت مدل AquaCrop برابر با 0.03 به دست آمد. با توجه به دامنه تغییرات آماره NRMSE، این دقت در محدوده عالی قرار داشت. کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پارامتر بهره‌وری مصرف آب نیز مطلوب بود.

برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت داشت. کارایی این مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده نیز بر اساس دو آماره EF و d بسیار مطلوب بود. دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب ذرت مطلوب بود. بر اساس آماره RMSE، خطای این مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف

جدول ۴- مقایسه آماری نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی

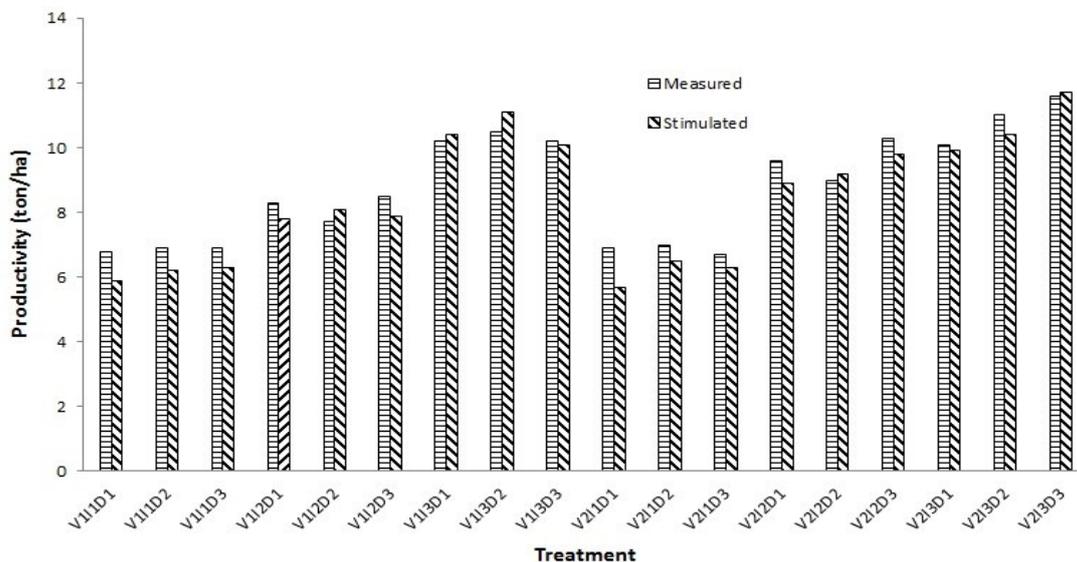
Table 4 Comparison of corn observed and simulated in calibration period

Parameter	D	EF	NRMSE	RMSE	MBE
Yield (ton/ha)	0.99	0.99	0.06	0.51	0.22
Biomass (ton/ha)	0.99	0.99	0.11	1.05	-0.94
Water productivity (kg/m ³)	0.99	0.99	0.03	0.06	0.04

دست آمد. مقایسه متوسط عملکرد شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نشان داد که احتمالاً مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت در بسیاری از تیمارها دچار خطای کم‌برآوردی به میزان $8/75 \text{ ton/ha}$ شده است. اختلاف بین متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برابر با 0.49 ton/ha بود؛ بنابراین به‌طور متوسط، مدل AquaCrop، خطایی برابر با 0.5 ton/ha برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت در مرحله صحت‌سنجی داشت. با این وجود بررسی مدل AquaCrop نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری خطای بسیار کمی به‌ترتیب برابر با $1/23$ و 0.08 ton/ha بود.

۳-۳- نتایج صحت‌سنجی

پس از مرحله واسنجی، مدل AquaCrop با استفاده از پارامترهای به‌دست‌آمده در جدول (۲) و داده‌های اندازه‌گیری شده در سال دوم صحت‌سنجی شد. نتایج شبیه‌سازی شده عملکرد ذرت به‌وسیله مدل AquaCrop در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار عملکرد اندازه‌گیری شده در مزرعه به‌ترتیب برابر با $11/62$ و $6/79 \text{ ton/ha}$ بود. متوسط مقدار عملکرد اندازه‌گیری شده در مزرعه نیز برابر با $9/08 \text{ ton/ha}$ بود. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل AquaCrop به‌ترتیب برابر با $5/7$ و $11/7 \text{ ton/ha}$ به-



شکل ۲- مقایسه نتایج بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد ذرت با مدل AquaCrop (V1 و V2 به‌ترتیب نشان‌دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2، I3 به‌ترتیب نشان‌دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵٪؛ D1، D2 و D3 به‌ترتیب نشان‌دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ plant/ha در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ plant/ha در رقم SC302 هستند)
Fig. 2 Comparison results for simulated and observed water productivity using AquaCrop (V1 and V2 represent SC500 and SC302, I1, I2, I3 represent 75, 100 and 125%, and D1, D2 and D3 present 75000, 85000, and 95000 plant/ha in SC500 and 80000, 90000 and 100000 plant/ha in SC302, respectively)

جدول ۵- مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط اختلاف بین عملکرد، زیست توده و بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با

مدل AquaCrop

Table 5 Minimum, maximum and average values for difference between observed and simulated yield, biomass and water productivity using AquaCrop

Parameter	Treatments	Description	Average	Maximum	Minimum
Yield					
Variety	V1	SC500	0.53	0.98	0.13
	V2	SC302	0.50	1.23	0.08
Irrigation amount (%)	I1	75	0.76	1.23	0.49
	I2	100	0.49	0.70	0.12
	I3	125	0.30	0.61	0.08
Plant density (plan/ha)	D1	75000-80000	0.65	1.23	0.20
	D2	85000-90000	0.48	0.73	0.12
	D3	9500-100000	0.41	0.66	0.08
Biomass					
Variety	V1	SC500	1.66	2.60	0.46
	V2	SC302	1.18	2.27	0.05
Irrigation amount (%)	I1	75	1.17	2.60	0.53
	I2	100	0.95	2.38	0.05
	I3	125	2.14	2.73	1.46
Plant density (plan/ha)	D1	75000-80000	2.05	2.60	1.17
	D2	85000-90000	1.06	2.27	0.05
	D3	9500-100000	1.16	2.73	0.53
Water Productivity					
Variety	V1	SC500	0.042	0.093	0.086
	V2	SC302	0.028	0.061	0.022
Irrigation amount (%)	I1	75	0.056	0.093	0.022
	I2	100	0.039	0.099	0.002
	I3	125	0.010	0.046	0.022
Plant density (plan/ha)	D1	75000-80000	0.047	0.099	0.001
	D2	85000-90000	0.029	0.086	0.014
	D3	9500-100000	0.029	0.083	0.022

از خاک و در نظر گرفتن آن برای رشد است. مقایسه مقادیر حداقل اختلاف برای هر سه تیمار آبیاری نشان داد که دقت مدل AquaCrop کم‌تر از ۰/۳۰ ton/ha نشد. اختلاف دقت مدل AquaCrop بین دو تیمار ۱۱ و ۱۲ برابر با ۱۲ ton/ha و ۰/۲۷ و بین دو تیمار ۱۲ و ۱۳ برابر با ۱۳ ton/ha و ۰/۱۹ شد. با توجه به روند منظم بین مقادیر به‌دست‌آمده، احتمالاً افزایش میزان آب آبیاری از ۱۳ به مقادیر بالاتر اثر چندانی بر دقت این مدل نخواهد داشت. لیکن کاهش میزان آب آبیاری پایین‌تر از ۱۱ سبب بروز اختلافی بیش‌تر از ۰/۹۲ ton/ha بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده خواهد شد. نتایج به‌دست‌آمده برای تراکم بوته نشان داد که دقت مدل AquaCrop با افزایش میزان تراکم بوته افزایش یافت. در تراکم D1، متوسط اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برابر با ۰/۶۵ ton/ha بود. این مقدار برای دو تراکم D2 و D3 به ترتیب برابر با ۰/۴۸ و ۰/۴۱ ton/ha مشاهده شد. بر این اساس، اختلاف دقت این مدل بین دو

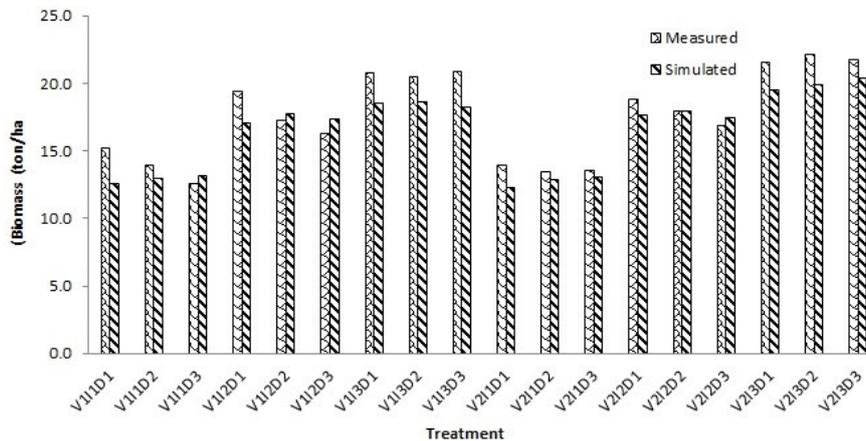
در جدول (۵) مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به تفکیک تیمارهای مختلف نشان داده شده است. مقایسه بین دو رقم SC500 و SC302 نشان داد که مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه برای رقم SC500 حدود ۰/۳٪ دقت بیش‌تر داشت. مقایسه مقادیر آبیاری نیز نشان داد که با افزایش تنش آبی، از دقت مدل AquaCrop کاسته شد طوری که مقادیر متوسط اختلاف عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای تیمارهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب ۰/۷۶، ۰/۴۹ و ۰/۳۰ ton/ha به دست آمد. اعمال تیمار کم‌آبیاری سبب کاهش دقت این مدل ولی در محدوده قابل قبول گردید. بسیاری از پژوهش‌گران نیز بر این نکته توافق نظر دارند که دقت مدل AquaCrop در شرایط تنش آبی نسبت به شرایط تأمین کامل آب آبیاری پایین‌تر است (Heng et al. 2010; Araya et al. 2010; Jaterji et al. 2013; al. 2009). به نظر می‌رسد علت آن کاهش دقت شبیه‌سازی آب جذب شده

نسبت به دو تیمار ۱۱ و ۱۲ کم‌تر بود. نتایج به‌دست‌آمده برای تراکم‌های D1 و D2 نشان داد که با افزایش تراکم، متوسط، حداقل و حداکثر اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده زیست‌توده و مقادیر اندازه‌گیری شده آن کاهش یافت. لیکن این روند بین دو تراکم D2 و D3 مشاهده نشد. با این وجود متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده زیست‌توده ذرت در تراکم D3 کم‌تر از D1 بود.

تفکیک تیمارها در جدول (۵) نشان داد که حداقل و حداکثر اختلاف بین بهره‌وری مصرف آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در رقم SC500 به ترتیب برابر با ۰/۰۸۶ و ۰/۰۹۳ kg/m^3 بود. این مقادیر برای رقم SC302 به ترتیب برابر با ۰/۰۲۲- و ۰/۰۶۱ kg/m^3 به‌دست آمد. متوسط اختلاف مقادیر بین بهره‌وری مصرف آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نیز برای دو رقم SC500 و SC302 به ترتیب برابر با ۰/۰۴۲ و ۰/۰۲۸ kg/m^3 بود. بر اساس این نتایج، دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پارامتر بهره‌وری مصرف آب در رقم SC302 بیش‌تر از رقم SC500 بود. متوسط اختلاف بین مقادیر بهره‌وری مصرف آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای تیمارهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب برابر با ۰/۰۵۶، ۰/۰۳۹ و ۰/۰۱۰ kg/m^3 بود.

تراکم D1 و D2 برابر با ۰/۱۵ ton/ha و بین دو تراکم D2 و D3 برابر با ۰/۰۷ ton/ha بود. با توجه به روند منظمی که بین افزایش تراکم مشاهده شد، ظاهراً در تراکم‌های بیش‌تر از D3 دقت این مدل چندان تغییری نداشته باشد.

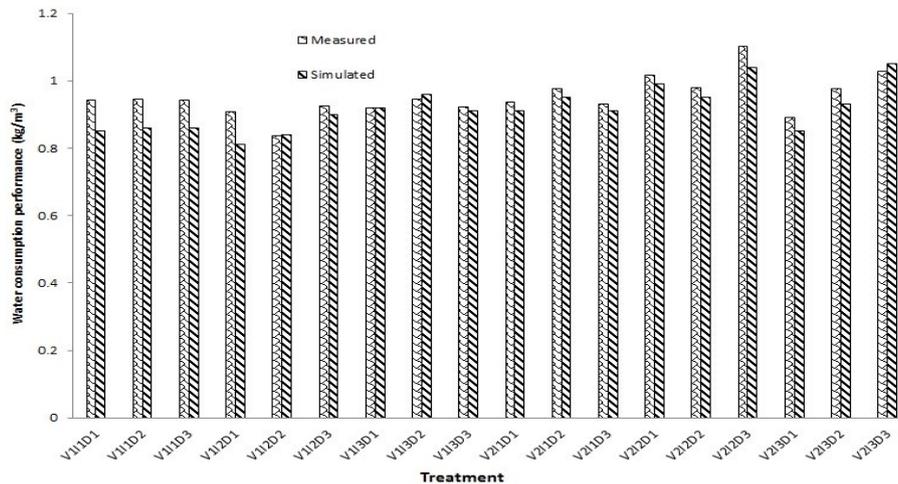
مقایسه مقادیر زیست‌توده برای تیمارهای مختلف با یکدیگر در جدول (۵) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، حداقل اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیست‌توده در رقم SC500 بیش‌تر از رقم SC302 بود. حداکثر این اختلاف نیز در رقم SC302 کم‌تر از SC500 بود. مقایسه اختلاف بین متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیست‌توده نیز نشان داد که دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی رقم SC302 بیش‌تر از رقم SC500 بود. با افزایش مقدار آب آبیاری از ۱۱ به ۱۲، متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده کاهش یافت. این نتایج برای حداقل و حداکثر اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نیز مشاهده شد. بر اساس این نتایج، با افزایش مقدار آب آبیاری تا آبیاری کامل، دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت افزایش یافت. پس از آن، با افزایش آب آبیاری تا ۱۳، متوسط اختلاف بین مقادیر زیست‌توده شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده افزایش یافت. در نتیجه دقت این مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت



شکل ۳- مقایسه نتایج بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد ذرت با مدل AquaCrop (V1 و V2 به ترتیب نشان‌دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2، I3 به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵٪؛ D1، D2، D3 به ترتیب نشان‌دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰، ۹۵۰۰۰ plant/ha در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ plant/ha در رقم SC302 هستند).

Fig. 3 Comparison results for simulated and observed water productivity using AquaCrop (V1 and V2 represent SC500 and SC302, I1, I2, I3 represent 75, 100 and 125%, and D1, D2 and D3 present 75000, 85000, and 95000 plant/ha in SC500 and 80000, 90000 and 100000 plant/ha in SC302, respectively)

مقادیر بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop و اندازه‌گیری شده در شکل (۴) نشان داده شده است. متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده بهره‌وری مصرف آب برابر با 0.95 kg/m^3 است. متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده بهره‌وری مصرف آب برابر با 0.92 kg/m^3 بود. حداقل مقدار بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده برابر با 0.83 kg/m^3 و حداقل مقدار بهره‌وری مصرف آب شبیه‌سازی شده برابر با 0.81 kg/m^3 بود. حداکثر مقدار بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نیز به ترتیب برابر با 1.05 kg/m^3 و 1.01 kg/m^3 و به دست آمد. حداقل و حداکثر اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با 0.01 و 0.35 kg/m^3 بود. متوسط این اختلاف نیز برابر با 0.35 به دست آمد.



شکل ۴- مقایسه نتایج بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد ذرت با مدل AquaCrop (V1 و V2 به ترتیب نشان‌دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2، I3 به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵٪ و D1، D2، D3 به ترتیب نشان‌دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ plant/ha در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ plant/ha در رقم SC302 هستند).

Fig. 4 Comparison results for simulated and observed water productivity using AquaCrop (V1 and V2 represent SC500 and SC302, I1, I2, I3 represent 75, 100 and 125%, and D1, D2 and D3 present 75000, 85000, and 95000 plant/ha in SC500 and 80000, 90000 and 100000 plant/ha in SC302, respectively)

نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که با افزایش میزان آب آبیاری، دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پارامتر بهره‌وری مصرف آب بیشتر شد. این نتایج برای پارامتر تراکم بوته نیز مشاهده شد. با افزایش تراکم بوته ذرت از D1 به D3، دقت مدل AquaCrop حدود ۶۰٪ افزایش یافت. مقایسه آماری نتایج به دست آمده در مرحله صحت‌سنجی در جدول (۶) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی هر سه پارامتر عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب دچار خطای کم‌برآوردی

نتایج به دست آمده برای مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیست‌توده ذرت در شکل (۳) نشان داده شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار زیست‌توده اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با $22/2$ و $12/6 \text{ ton/ha}$ بود. این مقادیر برای زیست‌توده شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop به ترتیب برابر با $20/4 \text{ ton/ha}$ و $12/3$ بود. متوسط زیست‌توده اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop به ترتیب برابر با $17/9$ و $16/9 \text{ ton/ha}$ بود. بر اساس این نتایج، احتمالاً مدل AquaCrop در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت در مرحله صحت‌سنجی دچار خطای کم‌برآوردی به میزان $1/3 \text{ ton/ha}$ شد. حداقل و حداکثر اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده زیست‌توده به ترتیب برابر با $2/73 \text{ ton/ha}$ و $0/5$ بود.

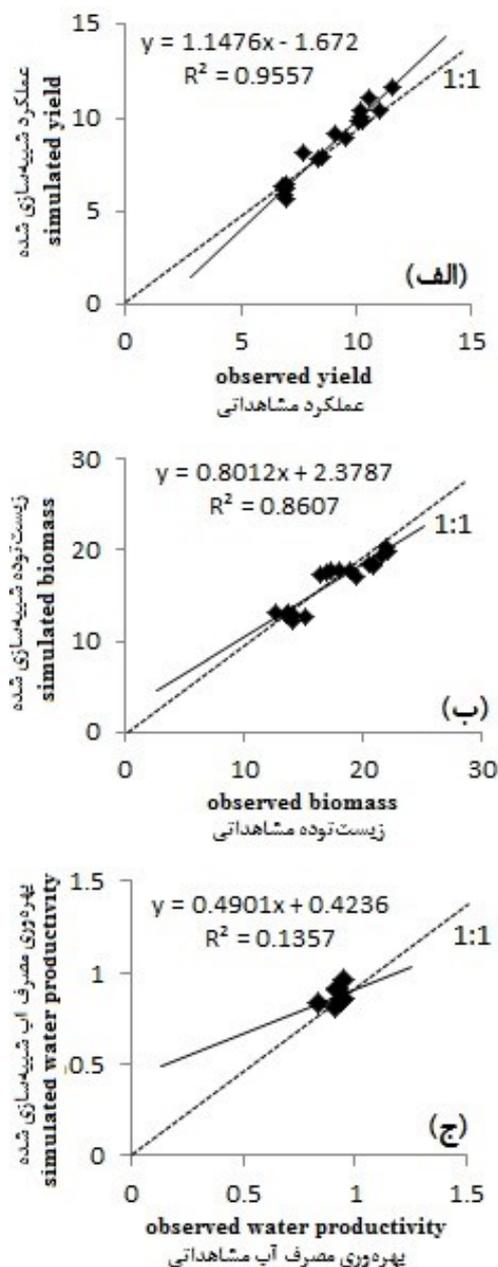
نیز بسیار مطلوب بود.

جدول ۶- مقایسه آماری نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی

Table 6 Comparison of corn observed and simulated in validation period

Parameter	D	EF	NRMSE	RMSE	MBE
Yield (ton/ha)	0.99	0.99	0.10	0.89	-0.83
Biomass (ton/ha)	0.99	0.99	0.14	2.47	-2.54
Water productivity (kg/m ³)	0.99	0.99	0.07	0.07	-0.08

در شکل (۵)، همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد ذرت نشان داده شده است. بر اساس این شکل، ضریب تبیین به‌دست‌آمده بسیار بالا بود. این نتایج نشان داد که مدل AquaCrop توانایی لازم را برای تطبیق نتایج خود با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت. بر اساس معادله به‌دست‌آمده برای رگرسیون بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، در مقادیر عملکرد دانه پایین‌تر از ۱۱/۳ ton/ha، مدل AquaCrop دچار خطای کم‌برآوردی می‌شود. لیکن در مقادیر بیش‌تر از ۱۱/۳ ton/ha، این مدل عملکرد دانه را بیش‌تر از مقادیر واقعی برآورد می‌کند. با توجه به اینکه در همه تیمارها (به‌جز V113D3) مقدار عملکرد پایین‌تر از این مقدار بود، مدل AquaCrop دچار خطای کم‌برآوردی شد. دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت، بر اساس آماره‌های RMSE و NRMSE، در دسته خوب قرار داشت. کارایی این مدل نیز برای شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب مطلوب بود. مقدار ضریب تبیین بین زیست‌توده شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برابر با ۰/۸۶ به‌دست آمد. این مقدار کم‌تر از ضریب تبیین عملکرد دانه ذرت بود لیکن مقدار آن قابل‌قبول بود. معادله رگرسیون به‌دست‌آمده در این شکل نیز نشان داد که همواره مدل AquaCrop دچار خطای کم‌برآوردی برای شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت می‌شود. نتایج آماره‌های RMSE و NRMSE برای بهره‌وری مصرف آب ذرت نیز نشان داد که مدل AquaCrop دقت عالی و کارایی مطلوب برای شبیه‌سازی این پارامتر داشت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۵)، ضریب تبیین به‌دست‌آمده برای این پارامتر نیز قابل‌قبول بود. این نتایج نشان داد که مدل AquaCrop توانایی لازم برای تطابق نتایج بهره‌وری مصرف آب شبیه‌سازی شده با مقادیر واقعی آن را داشت.



شکل ۵- همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد: الف- زیست‌توده، ب- بهره‌وری مصرف آب و ج- ذرت با استفاده از مدل AquaCrop

Fig. 5 Correlation between simulated and observed a) yield, b) biomass, and c) water productivity

۲- افزایش تراکم بوته سبب افزایش دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب شد.

۳- مدل AquaCrop دقت بیشتری برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب رقم SC302 داشت. گرچه دقت این مدل برای شبیه‌سازی رقم SC500 نیز قابل‌قبول بود.

۴- به‌طورکلی مدل AquaCrop با توجه به دسترسی راحت و رایگان بودن و همچنین دقت و کارایی مناسب برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب ذرت پیشنهاد می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده (یا تولید شده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

References

- Ahmadee M., Khashei Siuki, A. and Sayyari, M. H. (2015). Comparison of efficiency of different equations to estimate the water requirement of saffron (*crocus sativus* L.) (Case study: Birjand plain, Iran). *J. Agronom.*, 8(4), 505-520 [In Persian].
- 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. *J. Agricultural Water Management.*, 97, 1838-1846.
- Cheong Y. H., Kim, K. N., Pandey, G. K., Gupta, R., Grant, J. J., and Luan, S. (2003). A calcium sensor that differentially regulates salt, drought and cold responses in *Arabidopsis*. *J. The Plant Cell.*, 15, 1833-1845.
- 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. *J. Spanish Journal of Agricultural Research.*, 3(1), 134-144.
- Ebrahimipak N., Ahmadee, M., Egdernezhad, A., Khashei Siuki, A. (2018). Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (*crocus sativus* L.) yield under different water management scenarios and zeolite amount. *J. Water and Soil Resources Conservation.*, 8(1), 117-132 [In Persian].
- Ebrahimipak N., Egdernezhad, A., Tafteh, A., and Ahmadee, M. (2019). Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to Simulate Rapeseed Yield. *J. Irrigation and Drainage.*, 13(3-75), 715-726 [In Persian].
- Egdernezhad A., Ebrahimipak, N., Tafteh, A., Ahmadee, M. (2019). Canola Irrigation Scheduling using AquaCrop Model in Qazvin Plain. *J. Water Management in Agriculture.*, 5(2), 53-64 [In Persian].
- Geerts S., and Raes, D. (2009). Defecit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *J. Agricultural Water Management.*, 96: 1275-1284.
- Heng L. k., Hsiao, T. C., Evett, S., Howell, T. and P. Steduto. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize. *J. Agronomy.*, 101(3), 488-498.
- Hsiao T. C., Heng, L K., Steduto, P., Raes, D. and E. Fereres. (2009). AquaCrop-Model

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سه تیمار مقدار آب آبیاری، رقم ذرت و تراکم کشت موردبررسی قرار گرفت. مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب ذرت از دقت مطلوب (RSME: ۰/۸۹ ton/ha و NRSME: ۰/۱۰) و کارایی مناسبی (EF و d: ۰/۹۹) برخوردار بود. در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت نیز این مدل گیاهی دقت قابل‌قبول (RSME: ۲/۴۷ ton/ha و NRSME: ۰/۱۴) و کارایی مناسبی (EF: ۰/۹۸ و d: ۰/۹۹) داشت. سایر نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش به‌صورت زیر است:

۱- در تیمار تنش آبی دقت مدل AquaCrop پایین‌تر از زمانی بود که تأمین کامل آب آبیاری انجام شد. با این وجود دقت این مدل در همه تیمارهای آبی در محدوده قابل‌قبول قرار داشت.



- parameterization and testing for maize. *J. Agronomy.*, 101, 448-459.
- 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. *J. Agricultural Water Management.*, 130, 14-26.
- 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. *J. Agricultural and Food Science.*, 3(4), 157-163.
- Nakhjavani Moghaddam M. M., Farhadi, E., Sadreghaen, S. H., Najafi, E. (2013). Effects of Water and Plant Density on Grain Yield and Morphological Characteristics of New Maize Hybrid (CN. KSC.500) in Karaj Region. *J. Field Crops Research.*, 11(1), 13-22 [In Persian].
- Nakhjavanimoghaddam M. M., Dehghanisani, H., Akbari, M., Sadreghaen, (2011). The Effects of Deficit Irrigation on Water Use Efficiency of New Early Maize Variety (CN. KSC.302) Using Sprinkler System. *J. Water and Soil.*, 24(6), 1236-1245 [In Persian].
- Raes D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water II. Main algorithms and software description. *J. Agronomy.*, 101, 438–447.
- 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. *J. Agricultural Water Management.*, 98, 1615-1621.
- Todorovic M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi, S., Stockle, C. and Steduto, P. (2009). Asswssment of AQUACROP, cropsyst, and wofost models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *J. Agronomy.*, 101, 509-521.
- Xiong L., Schumaker, K. S., and Zhu, J. K. (2002). Cell signaling during cold, drought and salt stress. *J. The plant Cell.*, 14, 165-183.

Research Paper

Study on Aquacrop Model Accuracy for Simulation of Corn Yield and Water Use Efficiency in Different Plant Densities and Water Amount**Shokooh Karimi¹, Aslan Egdernezhad^{2*}, Mohammad Mehdi Nakhjavanmoghaddam³**¹M.Tech. Student, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran²Assist. Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran³Assist. Professor, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Corresponding author: a_eigder@iauahvaz.ac.ir

Received: September 12, 2020**Revised:** November 04, 2020**Accepted:** November 07, 2020**Abstract**

The importance of the corn plant has led to the widespread cultivation of different cultivars of this crop in many parts of Iran. Since the study of environmental and managerial factors such as planting density, irrigation amount and plant cultivar on grain yield, biomass and water use efficiency of crops requires costly and time-consuming field experiments, it seems that the effect of various factors on the crop yield can be stimulated using plant models. The present study was performed to evaluate the AquaCrop plant model for two maize cultivars, mid cultivar SC500 and early cultivar SC302, under 75000, 85000 and 95000 and 80000, 90000 and 100000 plant/ha densities, respectively, with different irrigation values of 75, 100 and 125%. The results showed that the AquaCrop model had good accuracy (RSME = 0.89 ton/ha and NRSME = 0.10) in simulating grain yield and maize water use efficiency (EF and d = 0.99). In simulation of corn biomass, this plant model had acceptable accuracy (RSME = 2.47 ton/ha and NRSME = 0.14) and good performance (EF = 0.98 and d = 0.99). AquaCrop model also had good accuracy (RSME = 0.07 kg/m³ and NRSME = 0.07) and efficiency (EF and d = 0.99) in simulating corn water use efficiency. Based on these results, the AquaCrop model is proposed to simulate corn cultivars under the mentioned conditions.

Keywords: Crop Growth Model; Early Cultivar; Mid Cultivar; Production Function; Water-Driven Model.