

بررسی واکنش عملکرد ذرت دانه‌ای به سطوح مختلف آب و کود مصرفی با استفاده از مدل AquaCrop

حمزه‌علی علیزاده^{۱*} و فریبرز عباسی^۲

^{۱*} - نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه ایلام. hamzehalizadeh@ut.ac.ir

^۲ - عضو هیات علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج.

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۲۲

چکیده

آب و کود مهمترین نهاده‌های تولید محصولات کشاورزی می‌باشند. مدل‌های شبیه‌سازی که اثر این نهاده‌ها را بر عملکرد محصول به صورت کمی ارائه می‌نمایند، ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت آب و کود در سطح مزرعه و بهینه‌سازی کارایی مصرف آب می‌باشند. مدل آکوکرپ که اخیراً توسط فائو توسعه داده شده است، عملکرد محصول را بر اساس کمیت و کیفیت آب آبیاری و همچنین کود مصرفی شبیه‌سازی می‌کند. در این تحقیق به منظور ارزیابی کارایی مدل آکوکرپ از داده‌های ذرت دانه‌ای یک پروژه تحقیقاتی در مقیاس بزرگ طی دو سال زراعی ۱۳۸۷ و ۱۳۸۹ در منطقه کرج استفاده شده است. آزمایش‌های مزرعه‌ای در چهار سطح آبیاری: ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی و چهار سطح کودی ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۰ درصد توصیه کودی در چهار تکرار اجرا گردید. تحلیل حساسیت مدل نشان داد که مدل نسبت رطوبت اولیه خاک، زمان شروع پیری، ضریب گیاهی مربوط به تعرق، بهره‌وری آب نرمال شد، شاخص برداشت حساس‌تر از سایر پارامترها است. نتایج نشان داد در هر دو سال زراعی (واسنجی و صحت‌سنجی) مدل قادر است عملکرد دانه را در شرایط تنش همزمان آبی و کود از ته به خوبی شبیه‌سازی نماید. حداکثر خطای نرمال شده، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده و ضریب تعیین در سال صحت‌سنجی مدل به ترتیب ۲۴/۷۷، ۹/۳۷ و ۰/۹۲ درصد محاسبه شد. مدل آکوکرپ عملکرد دانه و تبخیر و تعرق گیاهی را در سطوح آبیاری کامل (حداکثر خطای نرمال شده، ضریب تعیین و ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده به ترتیب ۹/۹۲، ۰/۹۷ و ۶/۲۱) و سطوح کودی کامل (حداکثر خطا، ضریب تعیین و ریشه دوم میانگین مربعات خطا به ترتیب ۱۵/۹، ۰/۹۰ و ۱۱/۲ درصد) به خوبی شبیه‌سازی نمود. لیکن در تنش‌های آبی و کودی شدید مدل نتایج رضایت‌بخشی ارائه نمی‌نماید. بیشترین انحراف از داده‌های مشاهده‌ای در تیمارهای کم آبی شدید (حداکثر خطا، ضریب تعیین و ریشه دوم میانگین مربعات خطا به ترتیب ۲۴/۷۷، ۰/۶۶ و ۱۶/۶۱ درصد) اتفاق افتاد.

کلید واژه‌ها: کم‌آبیاری، تنش آبی، تنش کودی، ذرت دانه‌ای.

Assessment of AquaCrop Model for Simulating Yield Response of Corn to Water and Fertility Stresses

H. A. Alizadeh^{1*} and F. Abbasi²

^{1*} - Corresponding Author, Assistant Professor of Water Engineering Department, Ilam University, Iran.

² - Member of Academic staff of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Karaj, Iran.

Received: 13 December 2015

Accepted: 5 March 2016

Abstract

Water and fertilizer are the most important inputs for producing agricultural crops. Simulation models that quantify effects of water and fertility on yield at the farm scale are valuable tools in water and irrigation management. The AquaCrop model, which has recently been developed by FAO, predicts crop productivity and water requirement under water and fertility stress conditions. In this research, capability of AquaCrop model in simulation of Corn yield response to different levels of water and fertility was studied in Karaj. A field experiment was carried out in 2008 and 2010 years. A factorial design based on randomized complete block design accomplished with four levels (60, 80, 100, and 120%) of the irrigation water requirement and four levels (0, 60, 80 and 100%) of the recommended fertilizer value. Sensitivity analysis showed that the model was sensitive to initial moisture content, time from sowing to start senescence, Reference harvest index (HI₀), normalized water productivity (WP*) and maximum coefficient for transpiration (K_{C_T}) more than other parameters. Results showed that the AquaCrop model was able to simulate the grain yield under water and fertility stress, in both years. The normalized maximum error (ME), normalized root mean square error (nRMSE) and coefficient of determination (R²) were calculated 24.77, 9.27 and 0.92 respectively, in validation year. The model was able to simulate the grain yield and crop evapotranspiration (ET_C) in non-water stresses (ME, nRMSE and R² were 9.9, 6.21 and 0.97, respectively) and non-fertility stresses (ME, nRMSE and R² were 9.9, 6.21 and 0.97, respectively) satisfactory, but it was not satisfactory in simulating severe irrigation and fertility stress. Most deviations from observed data in severe water treatments (ME, nRMSE and R² were 24.72, 16.61 and 0.66, respectively) occurred.

Keywords: Deficit irrigation, Water stress, Fertility stress, Corn.

پروت^۳، ۱۹۸۳). توابع تولید به طور گسترده در تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی پاسخ عملکرد محصول به آب، مورد استفاده قرار گرفته و تلاش‌های زیادی برای بهینه کردن تخصیص منابع آب در سطوح منطقه‌ای صورت گرفته است. از میان روش‌های مبتنی بر این دیدگاه، واکنش عملکرد به آب در نشریه ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو (دورنباس و کسام^۴، ۱۹۷۹) قابل ملاحظه است. تا دهه‌ها سال این نشریه به طور گسترده پذیرفته شده و برای شبیه‌سازی واکنش عملکرد به آب در محصولات زیادی به ویژه به وسیله طراحان و مهندسان مورد استفاده قرار گرفته است. مدل زمان‌بندی آبیاری کراپ وات^۵ (اسمیت^۶، ۱۹۹۲) نیز یکی دیگر از نرم افزارهای توسعه یافته به وسیله فائو است که کمبود آب را به همین روش (روش دورنباس و کسام، ۱۹۷۹) شبیه‌سازی می‌کند.

مدل‌های زراعی برای اهداف مختلفی از جمله افزایش دانش و آگاهی از طریق تفسیر نتایج آزمایشی، پیش‌ارزیابی ارزان و سریع سناریوهای زراعی در مقایسه با آزمایش‌های مزرعه‌ای (ویسلر و همکاران^۷، ۱۹۸۶)، به عنوان ابزار پشتیبانی برای مدیریت، تعیین

مقدمه

ذرت یکی از محصولات استراتژیک کشور می‌باشد. سالانه بیش از ۱/۸۵۲ میلیون تن ذرت از حدود ۲۹۰ هزار هکتار اراضی زیر کشت این محصول در کشور تولید می‌شود. ذرت یکی از محصولات تابستانه با نیاز آبی زیاد است. ذرت در کرج معمولاً بعد از برداشت جو یا گندم، هنگامی که آب کمی در دسترس است، کاشت می‌شود. از این رو رقابت شدید برای تأمین آب قابل دسترس به منظور تولید بیشتر امری بدیهی است. با توجه به محدود بودن منابع آب، تغییرات اقلیمی و کاهش سهم بخش کشاورزی از مصرف آب به علت رشد صنعت و جمعیت شهری، بهبود کارایی مصرف آب مبتنی بر تولید بیشتر به ازای هر قطره آب بسیار با اهمیت است. برای نیل به این هدف، آگاهی دقیق از رابطه بین مصرف آب و عملکرد محصول ضروری است. نظر به اینکه اثر کمبود آب در شدت، مدت و زمان اعمال متفاوت است، مدل‌سازی واکنش محصول به کمبود آب بسیار سخت و پیچیده است (شائو و همکاران^۱، ۱۹۷۶؛ برادفورد و شائو^۲، ۱۹۸۲). تلاش‌های اولیه برای درک این روابط منجر به یافتن روابطی تجربی بین آب و عملکرد موسوم به تابع تولید آب شد (واکس و

3- Vaux and Pruitt
4- Doorenbos and Kassam
5- CropWat
6- Smith
7- Whisler et al.

1- Hsiao et al.
2- Bradford and Hsiao

آکواکراپ یک مدل فراگیر به این معنی که برای محدوده وسیعی از محصولات زراعی شامل علوفه‌های، سبزیجات، غلات و محصولات میوه‌ای، روغنی و غده‌ای به کار می‌رود. وقتی که مدل به خوبی برای یک محصول واسنجی شود، به عنوان یک ابزار موثر حتی به کاربران مبتدی در استراتژی‌های مدیریت آب برای بهبود عملکرد و افزایش کارایی مصرف آب کمک می‌کند. در واقع آکواکراپ با فراهم کردن متغیرهای ثابت در مدل امکان استفاده برای کاربران مبتدی (آبیاران) را فراهم می‌کند. مدل مذکور برای ذرت در اسپانیا، تگزاس و فلوریدا توسط هنگ و همکاران^{۱۷} (۲۰۰۹) واسنجی شده است. شائو و همکاران (۲۰۰۹) مدل آکواکراپ را با استفاده از داده‌های ۶ ساله ذرت در دانشگاه دیویس کالیفرنیا آزمایش و متغیرهای ثابت آن را واسنجی کردند. نتایج آن مطالعه نشان داد که آکواکراپ قادر است پوشش تاجی، رشد وزنی زیست توده بخش هوایی^{۱۸} و عملکرد دانه را برای چهار رقم ذرت در شش فصل رشد مختلف با تراکم، تاریخ کاشت و تعرق‌های مختلف با تیمارهای مختلف آبیاری (اعمال تنش تا زمان سنبله دهی، از زمان سنبله دهی به بعد، آبیاری یک در میان و آبیاری کامل) به صورت مناسبی شبیه‌سازی کند. متغیرهای ثابت مدل تاکنون فقط برای ذرت آن هم به طور ناقص واسنجی شده‌اند. بنابراین مدل به واسنجی دقیق و گسترده برای همه گونه‌های گیاهی در سراسر دنیا نیاز دارد.

علی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) کارایی مدل آکواکراپ را در منطقه کرچ در کشت گندم برای تیمارهای مختلف آبیاری تک آبیاری و ۱۰۰، ۸۰، ۶۰، ۴۰ و ۲۰ درصد نیاز آبی گیاه در دو دور ۷ و ۱۴ روز ارزیابی نمودند. نتایج آنها نشان داد که مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه، تبخیر و تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب در دور آبیاری هفتروز قابلیت خوبی داشته است لیکن دقت پیش‌بینی این عوامل در دور آبیاری ۱۴ روز کمتر بود. محمدی و همکاران (۱۳۹۴) کارایی مدل آکواکراپ را در بیرجند برای تنش‌های همزمان شوری و کم‌آبی در دو رقم گندم ارزیابی نمودند. نتایج آنها نشان داد که مدل دارای قادر است عملکرد گندم را در شرایط تنش آبی و شوری به خوبی پیش‌بینی نماید. توکلی و همکاران^{۱۹} (۲۰۱۶) کارایی مدل آکواکراپ را در پیش‌بینی عملکرد جو تحت شرایط تک آبیاری و کشت دیم مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها بیانگر دقت بالای مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول، رطوبت خاک و وزن اندام گیاهی در شرایط تنش آبیاری و کشت دیم بود. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی و واسنجی مدل آکواکراپ انجام شده است. اغلب مطالعات انجام شده نشان دهند توانایی مدل در پیش‌بینی

ارزیابی روش‌های مدیریت بهینه راهبردی از قبیل تاریخ کاشت، انتخاب گونه گیاهی، کوددهی، کاربرد آب و آفت‌کش‌ها (بوت و همکاران^۱، ۱۹۹۶) و در برنامه‌ریزی و تجزیه و تحلیل خط مشی‌ها مفید هستند.

مدل‌سازی زراعی از اواخر دهه ۱۹۶۰ شروع شد (براور و دی ویت^۲، ۱۹۶۹). تلاش‌های بعدی منجر به توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر که بعضی از آنها متمایل به مقیاس تک-گیاه مانند مدل سریز^۳ (جونز و کینیری^۴، ۱۹۸۶) و بعضی دیگر به مقیاس سطح تاج پوشش گیاهان مانند مدل ایپیک^۵ (ویلیامز و همکاران^۶، ۱۹۸۹)، آلمانس^۷ (کینیری و همکاران^۸، ۱۹۹۲)، کراپ‌سیس^۹ (استوکل و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۳)، مدل‌های واخنینگن^{۱۱} (وان ایت‌راسم و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۳) و مدل آپسیم^{۱۳} (کیتینگ و همکاران^{۱۴}، ۲۰۰۳) گردید. استفاده از بیشتر این مدل‌ها مستلزم مهارت زیاد کاربر در واسنجی، نیاز به متغیرهای ورودی زیاد که بعضاً اندازه‌گیری آنها دشوار و یا برای دامنه وسیعی از گونه‌های زراعی و مکان‌های مختلف دنیا غیر قابل دسترسی است، می‌باشد.

درک روابط آب- خاک- عملکرد از سال ۱۹۷۹ به طور محسوسی توسعه یافته است. این مسئله و تقاضای شدید برای افزایش بهره‌وری آب به عنوان ابزار کنترل کم‌آبی، سازمان خوار و بار و کشاورزی ملل متحد (فائو) را بر آن داشت تا به بازسازی و ارزیابی مجدد نشریه ۳۳ بپردازد. این کار از طریق مشورت با متخصصان سازمان‌های مهم علمی، دانشگاهی و دولتی جهان انجام شد. این مشورت منجر به توسعه مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی واکنش محصولات زراعی به مقدار آب مصرفی شد. مدل آکواکراپ با حفظ قابلیت‌های نشریه ۳۳، یک توازن منطقی بین سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده برقرار می‌کند. اصول اساسی مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی فرآیندها توسط استدیوتو و همکاران^{۱۵} (۲۰۰۹) و الگوریتم مورد استفاده در نرم‌افزار مدل و توصیف عملیات توسط راس و همکاران^{۱۶} (۲۰۰۹) ارائه شده است.

- 1- Boote *et al.*
- 2- Brouwer and de Wit
- 3- CERES
- 4- Jones and Kiniry
- 5- EPIC
- 6- Williams *et al.*
- 7- ALMANAC
- 8- Kiniry *et al.*
- 9- CropSyst
- 10- Stockle *et al.*
- 11- Wageningen
- 12- Van Ittersum *et al.*
- 13- APSIM
- 14- Keating *et al.*
- 15- Steduto *et al.*
- 16- Raes *et al.*

17- Heng *et al.*

4- Aboveground biomass

19- Tavakoli *et al.*

استفاده از نیاز تبخیری و غلظت دی اکسید کربن اتمسفری نرمال شده (میلی گرم بر لیتر) به وزن قسمت هوایی گیاه تبدیل (Bi) می‌شود (رابطه ۲).

$$B_i = WP^* \left(\frac{T_{ri}}{ET_{o,i}} \right) \quad (2)$$

WP: بهره‌وری آب (زیست توده هر واحد تعرق تجمعی) بوده که مقدار آن در شرایط اقلیمی مشابه و ثابت است (هنکس^۱، ۱۹۸۳؛ تانر و سینکلایر^{۱۱}، ۱۹۸۳). با نرمال کردن مناسب بهره‌وری برای شرایط اقلیمی متفاوت مقدار آن به یک پارامتر ثابت تبدیل خواهد شد (استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین گام گذاشتن از معادله (۱) به معادله (۲) دلالت بر صحت و عمومیت مدل دارد. برتری دیگر معادله مورد استفاده در مدل آکواکراپ (معادله (۲)) نسبت به معادله (۱) این است که شبیه‌سازی فرآیندهای رشد گیاه در آن با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد، در حالی که در معادله (۱) شبیه‌سازی به صورت ماهانه یا فصلی انجام می‌شود. در تمام دوره رشد گیاه، مقدار آب ذخیره شده در ناحیه ریشه از طریق بیلان جریان آب ورودی (آبیاری و بارندگی) و خروجی (رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق) در ناحیه ریشه شبیه‌سازی می‌شود. مقدار ضرایب تنش آبی (K_s) موثر بر توسعه پوشش تاجی (CC)، هدایت روزنه‌ای تعرق (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. عملکرد نهایی بر اساس مقدار آب آبیاری، سطوح حاصلخیزی خاک (از طریق تأثیر آنها بر سرعت رشد و توسعه گیاه)، بهره‌وری آب و اثر تنش‌ها بر عملکرد محصول بیان می‌شود.

در پایان عملکرد با استفاده از جرم قسمت هوایی گیاه شبیه‌سازی و شاخص برداشت تعدیل شده محاسبه می‌گردد.

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

Y: عملکرد اقتصادی و B: مقدار زیست توده می‌باشد که از رابطه (۲) بدست می‌آید.

فرآیندهای شبیه‌سازی عملکرد محصول با مدل آکواکراپ در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این شکل CC* پوشش تاجی تعدیل شده، CC_{pot}: پوشش تاجی پتانسیل، Kctr: ضریب گیاهی می‌باشد.

رطوبت خاک در شرایط تنش آبی (تومی و همکاران^۱، ۲۰۱۶؛ دلخدا و همکاران^۲، ۲۰۱۶؛ پردس و همکاران^۳، ۲۰۱۵). عملکرد محصولات زراعی در شرایط تنش آبی (فراهانی و همکاران^۴، ۲۰۰۹؛ مونتویا و همکاران^۵، ۲۰۱۶؛ قربانیان کردآبادی و همکاران، ۱۳۹۳)، اثر برنامه‌ریزی آبیاری بر عملکرد محصول (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹؛ سالمی و همکاران^۶، ۲۰۱۱ و لینکر و همکاران^۷، ۲۰۱۶) و اثر تنش همزمان شوری و کم‌آبی بر عملکرد محصولات زراعی (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴) می‌باشد. لیکن در زمینه ارزیابی مدل آکواکراپ در شرایط تنش همزمان آبی و کودی مطالعات بسیار کمی صورت گرفته است (ساب و همکاران^۸، ۲۰۱۵).

هدف از این مطالعه ارزیابی و واسنجی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی واکنش عملکرد و تبخیر و تعرق ذرت دانه‌ای تحت شرایط تنش همزمان آبی و کود ازته در کرج می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تئوری مدل

مدل آکواکراپ از معادله دورنوس و کسام (۱۹۷۹) (معادله (۱)) که در آن تبخیر و تعرق نسبی اساس محاسبه عملکرد می‌باشد، استنتاج شده است.

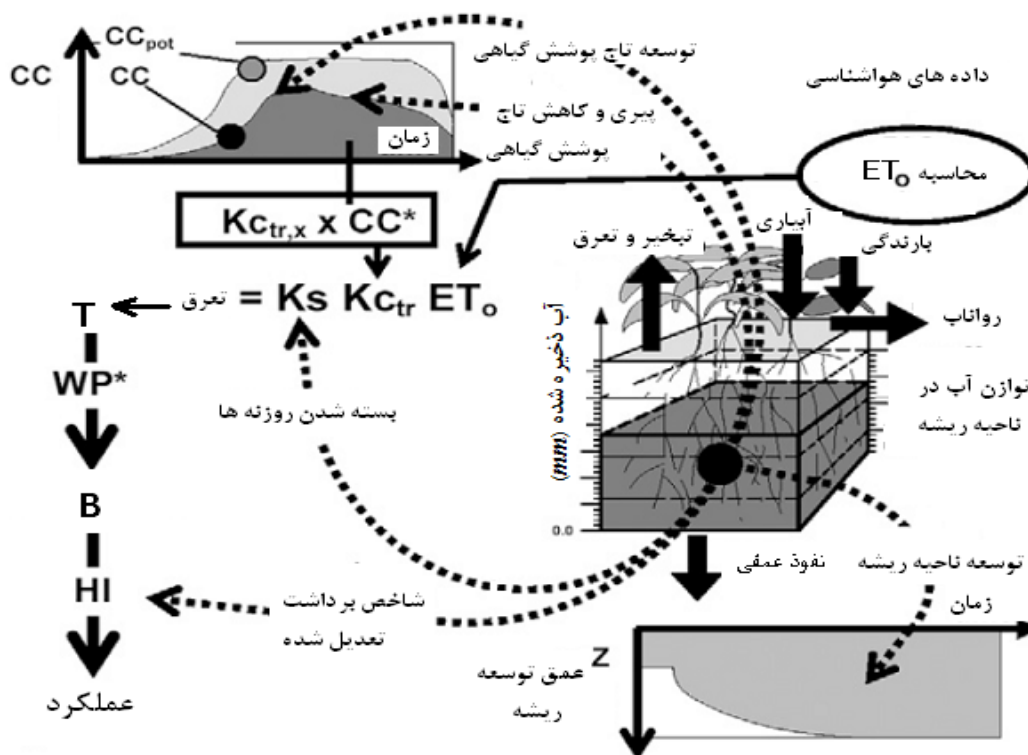
$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (1)$$

که در آن، Y_x عملکرد بیشینه، Y_a عملکرد واقعی، ET_x تبخیر و تعرق بیشینه، ET_a تبخیر و تعرق واقعی و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی تبخیر و تعرق می‌باشد. در مدل آکواکراپ تبخیر و تعرق به دو جزء تعرق از سطح محصول (T_r) و تبخیر از سطح خاک (E) تفکیک شده و عملکرد نهایی (Y) محصول به عنوان تابعی از زیست توده نهایی (B) و شاخص برداشت (HI) شبیه‌سازی شده است. در مدل آکواکراپ اثر تنش آبی به وسیله کاهش رشد تاج پوشش گیاهی، پیری تاج پوشش گیاه، کاهش تعرق و شاخص برداشت شبیه‌سازی شده است (استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۹). تعرق روزانه (T_{ri}) با استفاده از تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه و بهره‌وری آب^۹ گونه گیاهی (گرم بر مترمربع) که با

- 1- Toumi *et al.*
- 2- Delgoda
- 3- Paredes *et al.*
- 4- Farahani *et al.*
- 5- Montoya *et al.*
- 6- Salemi *et al.*
- 7- Linker *et al.*
- 8- Saab *et al.*
- 3-Water Productivity (WP)

4-Hanks

5- Tanner and Sinclair



شکل ۱- نمایش فرآیندهای محاسبه عملکرد با مدل آکواکراپ

و مرحله سنبله زدن) مورد استفاده قرار گرفت. برای جلوگیری از تلفات بیشتر کود و افزایش یکنواختی توزیع کود، تزریق کود در زمان‌های انتهایی آبیاری انجام می‌شد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۱). پنج جویچه برای هر بلوک (سه جویچه اصلی برای برداشت و دو جویچه کناری به عنوان حاشیه)، دو جویچه برای تفکیک هر بلوک از بلوک مجاور و دو جویچه برای اثر حاشیه دو بلوک کناری در نظر گرفته شد. شیب عمومی مزرعه ۰/۰۰۶ متر بر متر، فاصله جویچه‌ها از هم ۷۵ سانتی‌متر و طول جویچه‌ها طول قطعه زراعی (۱۶۵ متر) در نظر گرفته شد. برای اعمال حجم آب مورد نظر و اندازه‌گیری راندمان آبیاری در هر آبیاری، حجم آب ورودی و خروجی با استفاده از فلوم‌های W.S.C اندازه‌گیری می‌شد. معادله‌های نفوذ با استفاده از زمان پیشروی و پسروی استخراج می‌شد. عمق آب نفوذ یافته در هر نقطه، متوسط عمق آب نفوذ یافته و تلفات نفوذ عمقی با استفاده از معادله‌های نفوذ و زمان آبیاری محاسبه می‌شد. بذری مصرفی ذرت از نوع هیبرید دابل کراس ۳۷۰ بود که با تراکم ۸۵ هزار بوته در هکتار به وسیله ماشین خطی کار در هر دو سال اواخر خرداد کاشته شد. مبارزه با علف‌های هرز از طریق سم‌پاشی قبل از کاشت و وجین دستی انجام شد. سطوح آبیاری ۲۵ روز بعد از کاشت اعمال گردید. برنامه‌ریزی آبیاری و مقدار آب کاربردی هر تیمار در جدول (۱) ارائه شده است.

مدیریت مزرعه‌ای و پارامترهای ورودی مدل

آزمایش‌های مزرعه‌ای طی دو سال زراعی ۱۳۸۷ و ۱۳۸۹ در مزرعه ۴۰۰ هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (کرج) با طول جغرافیایی ۵۰/۵۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۶ شمالی و ارتفاع ۱۳۱۲ متر از سطح دریا انجام شد. آزمایش‌ها به روش فاکتوریل دو عاملی با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در ۴ تکرار روی جویچه‌های انتها باز اجرا گردید. فاکتور اول شامل چهار سطح آبیاری: ۱۲۰ (W1)، ۱۰۰ (W2)، ۸۰ (W3)، و ۶۰ (W4) درصد نیاز آبی و فاکتور دوم شامل چهار سطح کود: ۱۰۰ (N1)، ۸۰ (N2) و ۶۰ (N3) درصد توصیه کودی به همراه تیمار شاهد بدون کود (N4) بود. توصیه کودی طبق آزمون تجزیه خاک، و آب مورد نیاز برای آبیاری کامل گیاه در سال اول بر اساس تبخیر از سطح تشتت کلاس A موجود در یک کیلومتری مزرعه، اعمال ضرایب تشتت تبخیر (۰/۶۷) و گیاهی (KC) تعیین گردید. نیاز آبی و تبخیر و تعرق گیاهی در سال دوم با استفاده از رطوبت سنج تراپم واستنجی شده با شرایط خاک مزرعه اندازه‌گیری شد. کودهای پتاسیم و سوپر فسفات تریپل با توجه به نیاز خاک پیش از کاشت در تمام تیمارها به صورت یکسان در سطح خاک پخش گردید. نیتروژن مورد نیاز گیاه از طریق کود اوره تأمین و همراه آب آبیاری طی دوره رشد در چهار تقسیط مساوی (قبل از کاشت، مرحله هفت برگی، مرحله ساقه رفتن

علیزاده و عباسی: بررسی واکنش عملکرد ذرت دانه‌ای به سطوح مختلف...

جدول ۱- برنامه‌ریزی آبیاری تیمارهای مختلف در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۹

مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)									زمان آبیاری
سال ۱۳۸۹				سال ۱۳۸۷				K _C	
W4	W3	W2	W1	W4	W3	W2	W1		
۷۸	۸۹	۸۸	۹۴	۷۹	۷۹	۸۴	۸۹	خاک	اتیر
۵۹	۶۷	۶۶	۷۱	۷۳	۷۹	۸۴	۸۹	آب	۶ تیر
۵۲	۵۹	۵۸	۶۳	۶۰	۵۹	۴۹	۵۰	۰/۴۵	۱۲ تیر
۴۶	۵۲	۵۱	۵۵	۲۹	۵۴	۳۸	۴۹	۰/۵۵	۱۸ تیر
۳۹	۴۴	۴۴	۴۷	۶۹	۴۵	۴۷	۷۴	۰/۶۵	۲۳ تیر
۳۷	۵۲	۶۶	۷۹	۴۱	۴۷	۵۶	۸۶	۰/۷۰	۳۱ تیر
۳۳	۵۲	۵۵	۷۴	۳۶	۵۰	۵۶	۷۵	۰/۸۰	۷ مرداد
۳۳	۵۳	۵۴	۷۱	۳۷	۴۹	۵۶	۸۴	۰/۹۵	۱۳ مرداد
۳۳	۵۹	۷۳	۷۹	۳۸	۶۱	۸۱	۷۴	۱/۰۵	۱۹ مرداد
۳۹	۶۴	۷۶	۸۶	۴۰	۵۴	۷۸	۷۷	۱/۲	۲۵ مرداد
۳۳	۵۹	۹۲	۱۱۰	۲۶	۴۹	۹۹	۱۰۷	۱/۲۵	۲ شهریور
۳۳	۴۹	۵۸	۸۶	۴۱	۴۶	۶۵	۸۴	۱/۲۵	۹ شهریور
۳۳	۵۲	۶۳	۱۱۰	۴۱	۵۳	۶۶	۹۸	۱/۲۵	۱۶ شهریور
۳۳	۵۲	۶۷	۹۱	۴۱	۵۷	۷۵	۹۰	۱/۲۵	۲۴ شهریور
۳۳	۵۳	۶۰	۸۳	۴۱	۴۷	۶۴	۸۴	۱/۱۵	۲ مهر
۱۳	۲۲	۳۹	۳۹	۱۳	۱۸	۲۵	۳۳	۰/۸۵	۱۵ مهر
۶۲۵	۸۷۷	۱۰۰۰	۱۲۳۸	۶۶۶	۸۴۶	۱۰۲۳	۱۲۴۳	مجموع ناخالص آبیاری (میلی‌متر)	

جدول ۲- برخی ویژگی‌های خاک مورد آزمایش

اشباع	رطوبت (درصد حجمی)		pH	EC (دسی‌زیمنس بر متر)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	بافت خاک	عمق خاک (سانتی‌متر)
	PWP	FC					
۴۵	۱۵	۲۹	۷/۷۷	۱/۱۶	۱/۳۴	لوم	۰-۲۰
۴۴	۱۵	۲۹	۷/۶۷	۰/۸۲	۱/۴۶	لوم	۲۰-۴۰
۴۴	۱۶	۲۸	۷/۸۵	۰/۸۰	۱/۴۷	لوم	۲۰-۶۰
۴۳	۱۶	۲۸	۷/۶۹	۰/۸۷	۱/۵	لوم	۶۰-۸۰

داده‌های اقلیمی مورد نیاز فوق از ایستگاه هواشناسی کشاورزی کرج واقع در ۲ کیلومتری مزرعه مذکور استخراج گردید. داده‌های مورد نیاز خاک عبارتند از هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، رطوبت اشباع (θ_{sat})، رطوبت نقطه ظرفیت زراعی (θ_{FC})، رطوبت نقطه پژمردگی (θ_{PWP})، بافت خاک مزرعه لومی، عمق خاک زراعی مزرعه مورد مطالعه بین ۶۵ تا ۸۰ سانتی‌متر بود. برخی ویژگی‌های خاک مورد آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است. داده‌های گیاهی ورودی مدل شامل متغیرهای ثابت و داده‌های ویژه کاربر می‌باشند. برای جلوگیری از تکرار همه پارامترهای گیاهی مورد استفاده در بخش واسنجی مدل ارائه شده است.

اگرچه مدل آکواکراپ بر مبنای فرآیندهای بیوفیزیکی پیچیده بنا نهاده شده است (استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۹)، تعداد نسبتاً کمی از متغیرهای ساده و قابل دسترس به عنوان متغیرهای ورودی مدل استفاده می‌شوند. ورودی‌های مدل شامل چهار گروه از اطلاعات شامل داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه‌ای می‌باشند. مهم‌ترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز مدل عبارت از داده‌های روزانه بیشینه و کمینه هوا، تبخیر و تعرق گیاه مرجع و بارندگی می‌باشند. آکواکراپ از داده‌های بیشینه و کمینه دمای روزانه برای محاسبه درجه روز رشد به منظور تعدیل عملکرد زیست توده بر اثر خسارات ناشی از سرما و گرما استفاده می‌کند (راس و همکاران، ۲۰۰۹).

مطلق مدل می‌باشد. هرچه ریشه دوم میانگین مربعات خطا به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. ضریب ضریب کارایی بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین می‌باشد. مقدار ضریب کارایی بین $-\infty$ تا $+1$ تغییر می‌کند هر چه مقدار آن به یک نزدیکتر باشد مدل کارا تر است. شاخص سازگاری یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن از $-\infty$ تا $+1$ تغییر می‌کند (ایتزینگر و همکاران^۶، ۲۰۰۴؛ سینگ و همکاران^۷، ۲۰۰۸). مقدار زیاد حداکثر خطا نشانگر بدترین حالت کارکرد مدل است. شاخص ضریب باقیمانده نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. چنانچه تمامی مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی شاخص‌های ریشه دوم میانگین مربعات خطا، حداکثر خطا، ضریب باقیمانده برابر با صفر و مقدار شاخص سازگاری و کارایی مدل برابر با ۱ خواهد بود.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت و واسنجی مدل

مقادیر ضریب حساسیت محاسبه شده برای تعدادی از پارامترهای ورودی مدل آکواکراپ در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد مدل نسبت به پارامترهای زمان سبز شدن بذرها، طول زمان گلدهی، تقویم کاشت تا بیشینه رشد ریشه، تراکم بوته و تقویم کاشت تا شروع گلدهی حساسیت کمی ($SC < 0.3$) دارد. بنابراین خطای حاصل از اندازه‌گیری آن داده‌ها در مزرعه قابل چشم‌پوشی است. همچنین حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب گیاهی^۸، رشد پوشش تاجی^۹، بهره‌وری آب نرمال شده^T شاخص برداشت، زمان شروع پیری و رطوبت اولیه (در تیمارهای کم‌آبیاری) بیشتر از سایر پارامترهاست. بنابراین بایستی آن داده‌ها با دقت بیشتری اندازه‌گیری شوند. در غیر این صورت خطای فاحشی در پیش‌بینی عملکرد مدل به وجود می‌آید. حساسیت مدل نسبت به عمق آب آبیاری در تیمارهای آبیاری مختلف متفاوت بود. با کاهش عمق آب آبیاری حساسیت مدل نسبت به تغییرات عمق آب آبیاری بیشتر شد. به دلیل اینکه با افزایش عمق آب آبیاری کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد، در یک عمق آبیاری معین حساسیت مدل نسبت به تغییر ۲۵- درصدی بیشتر از تغییر ۲۵+ درصدی است.

تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل

برای تعیین میزان حساسیت خروجی‌های مدل نسبت به داده‌های ورودی ابتدا پارامترهای اندازه‌گیری شده (مثلاً عملکرد) به عنوان خروجی پایه در نظر گرفته شده و با هر بار اجرای مدل، یکی از داده‌های ورودی $\pm 25\%$ درصد تغییر داده شد و بقیه ثابت نگه داشته شدند. سپس با استفاده از رابطه (۴) ضریب حساسیت پارامترها حساب شد.

$$S_c = \frac{\frac{\Delta W}{\bar{W}}}{\frac{\Delta P}{\bar{P}}} \quad (4)$$

که در آن، SC : ضریب حساسیت، ΔW : اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، \bar{W} : متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، ΔP : اختلاف مقادیر ورودی پارامتر ورودی و \bar{P} : متوسط مقادیر ورودی یک پارامتر به مدل می‌باشند. بر اساس پیشنهاد لیو و همکاران (۲۰۰۷) چنانچه $SC=0$ باشد مدل نسبت به پارامتر مورد آزمون بدون حساسیت، چنانچه $0.3 < SC < 0.7$ باشد حساسیت مدل کم، اگر $0.3 < SC < 0.7$ باشد حساسیت مدل متوسط و چنانچه $SC > 0.7$ باشد حساسیت مدل زیاد می‌باشد.

برای واسنجی مدل از داده‌های مزرعه‌ای سال ۱۳۸۷ استفاده شد. واسنجی مدل از فرآیند تکرار مراحل فنولوژیکی، ضرایب رشد گیاه، و پارامترهای تخمین زده شده به وسیله سایر محققان (شائو و همکاران، ۲۰۰۹؛ هنگ و همکاران، ۲۰۰۹) انجام شد. سپس مقادیری از پارامترهای ورودی که به ازای آن کمینه ریشه دوم میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب تبیین و شاخص سازگاری مدل حاصل شد انتخاب می‌شد (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹). برای واسنجی مدل به تنش کودی، پارامترهای زیرمدل تنش کودی برای چهار سطح کودی سال ۱۳۸۷ واسنجی شد.

در نهایت مدل آکواکراپ با استفاده از تقویم کاشت اجرا شد. کارایی مدل با استفاده از متغیرهای آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا^۱، ضریب کارایی^۲، شاخص سازگاری^۳، حداکثر خطا^۴ و ضریب باقیمانده^۵ ارزیابی شد (علیزاده و همکاران ۱۳۸۹). ریشه دوم میانگین مربعات خطا نشان دهنده میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد که نمایش دهنده عدم اطمینان

6 - Eitzinger *et al.*7- Singh *et al.*

8- KCb

9-CGC

1 - Root Mean Square Error (RMSE)

2 - Coefficient of efficiency (E)

3- Index of agreement (d)

4 - Maximum Error (ME)

5 - Coefficient of Residual Mass (CRM)

علیزاده و عباسی: بررسی واکنش عملکرد ذرت دانه‌ای به سطوح مختلف...

جدول ۳- ضریب حساسیت پارامترهای ورودی مدل آکواکراپ

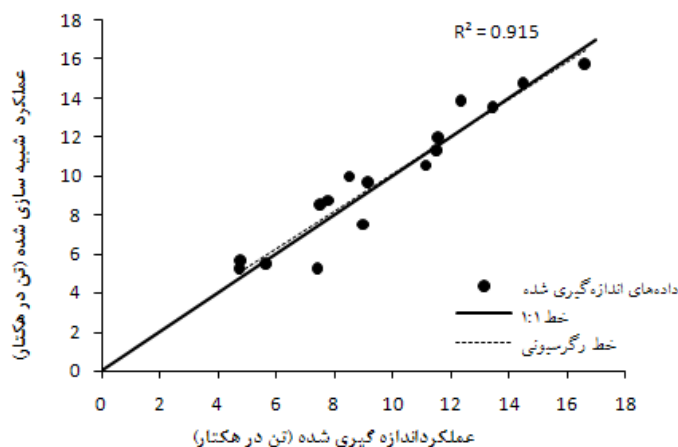
درجه حساسیت	مقدار حساسیت در حالت		پارامترهای ورودی	
	کاهش ۲۵ درصد ورودی	افزایش ۲۵ درصد ورودی		
متوسط	۱/۰۴	۰/۹۹	ضریب گیاهی Kcb تراکم کاشت رشد پوشش تاجی (CGC) بهره‌وری آب نرمال شده (WP) شاخص برداشت (HI ₀) زمان سبز شدن بذرها زمان شروع پیری طول زمان گل‌دهی تعداد روز از کاشت تا ماکزیمم عمق ریشه زمان از کاشت تا گلدهی	پارامترهای زراعی
کم	۰/۱۰	۰/۰۸		
متوسط	۰/۵۱	۰/۲۷		
متوسط	۰/۴۹	۱/۰۹		
متوسط	۱/۱۱	-		
ندارد	۰/۰۰	۰/۰۰		
متوسط- زیاد	۱/۴۴	۰/۴۵		
ندارد	۰/۰۰	۰/۰۰		
کم	۰/۰۱	۰/۰۳		
کم	۰/۰۹	۰/۱۷		
ندارد	۰/۰۰	۰/۰۰	در تیمارهای W ₁ ، W ₂	رطوبت اولیه خاک
کم	۰/۲۲	۰/۰۰	در تیمار W ₃	
زیاد	۱/۶	۰/۰۱	در تیمار W ₄	
کم	۰/۰۵	۰/۰۰	هدایت هیدرولیکی خاک	شرایط اولیه خاک
ندارد- کم	۰/۰۷	۰/۰۰	W1	آبیاری
کم	۰/۰۹	۰/۰۱	W2	
کم- متوسط	۰/۳۵	۰/۰۵	W3	
متوسط- زیاد	۱/۴۶	۰/۲۷	W4	

مقدار شاخص‌های آماری ارزیابی مدل برای ۱۶ تیمار کودی و آبی مختلف در سال ۱۳۸۷ (داده‌های استفاده شده برای واسنجی) ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده شبیه‌سازی نسبتاً مناسب مدل در سال واسنجی می‌باشد. مقدار ضریب باقیمانده نزدیک صفر، مقدار شاخص سازگاری، ضریب کارایی و شاخص همبستگی نزدیک یک و ریشه دوم میانگین مربعات خطا حدود ۱۰ درصد همگی بیانگر دقت مدل بعد از واسنجی پارامترهای مدیریتی در تنش‌های مختلف آبی و کودی می‌باشد. این نتایج با نتایج ساب و همکاران (۲۰۱۵) که نشان دادند در صورت واسنجی صحیح مدل، آکواکراپ قادر است عملکرد محصول در تنش‌های آبی و کودی مختلف را با دقت مناسب شبیه‌سازی نماید، مشابهت دارد.

در جدول (۴) مهمترین پارامترهای ورودی مدل بعد از واسنجی ارائه شده است. لازم به ذکر است پارامترهای ورودی مدل شامل دو دسته پارامترهای ثابت (محافظه کارانه) و پارامترهای متغیر می‌باشد. در این تحقیق برای واسنجی ابتدا برای پارامترهای ثابت مقادیر پارامترهای ۲۱ گانه ارائه شده توسط شائو و همکاران (۲۰۰۹) و (راس و همکاران، ۲۰۰۹) به عنوان پیش فرض لحاظ شده و پارامترهای مدیریتی (متغیر) مورد واسنجی قرار گرفت. سپس پارامترهای محافظه کارانه^۱ مورد واسنجی قرار گرفت. نتایج واسنجی نشان داد که اکثر پارامترهای ثابت دارای مقادیری مشابه ارقام ارائه شده توسط شائو و همکاران (۲۰۰۹) برای ذرت دانه‌ای می‌باشند. در شکل (۲) مقادیر پیش‌بینی شده عملکرد ذرت توسط مدل آکواکراپ در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده و همچنین در جدول (۵)

جدول ۴- مهمترین پارامترهای ورودی مدل بعد از واسنجی

گروه	پارامتر مورد واسنجی	مقدار واسنجی	گروه	پارامتر مورد واسنجی	مقدار واسنجی
پایه ریشه گیاه	تراکم کشت (بوته در هکتار)	۸۵۰۰	پهنای ریشه گیاه	ضریب گیاهی تعرق در حداکثر پوشش (Kcb)	۱/۰۳
	تاریخ سبز شدن (روز پس از کاشت)	۵		اثر تاج پوشش گیاهی بر کاهش تبخیر پایان رشد	۵۰ درصد
	تاریخ گلدهی (روز پس از کاشت)	۵۷		درصد کاهش KC با سن	۰/۳ درصد
	طول دوره گلدهی (روز)	۲۱		مینیمم عمق توسعه ریشه موثر (Zn)	۰/۳
	شروع پیری گیاه (روز از کاشت)	۱۱۰		ماکزیمم عمق توسعه ریشه موثر (Zx)	۲/۸
بهره‌وری آب	رسیدگی فیزیولوژیکی (روز از کاشت)	۱۳۰	توسعه گیاه	فاکتور شکل ریشه	۱/۳
	بهره‌وری آب نرمال شده	۳۳/۷		ضریب کاهش تاج پوشش گیاهی با سن (CDC)	۱۱/۳ درصد
	بهره‌وری تعدیل شده با ساختار تولید	۱۰۰ درصد		ضریب رشد تاج پوشش گیاهی (CGC)	۲۲/۱ درصد
	شاخص برداشت اولیه	۵۲ درصد		درصد پوشش تاجی حین جوانه‌زنی (CC0)	۵۸ درصد
پارامترهای تنش آبی	حداکثر درصد مجاز شاخص برداشت	۵۲	تنش دمایی	حداکثر پوشش گیاهی ممکن	۱۰۰ درصد
	آستانه پایین رشد برگ (p—lower)	۰/۱۴		دمای پایه رشد (Tbase)	۸
	آستانه بالای رشد برگ (p—upper)	۰/۷۲		دمای فوقانی رشد (Tupper)	۳۰
	فاکتور شکل رشد تاج پوشش گیاهی	۲/۹		مینیمم درجه‌ای انجام گرده‌افشانی	۱۰
	ضریب تنش روزنه‌ها (p—upper)	۰/۶۹		ماکزیمم درجه‌ای انجام گرده‌افشانی	۴۰
	فاکتور شکل کنترل استوماتی	۶/۰		درصد کاهش ضریب رشد تاج گیاهی	۱۵ درصد
	ضریب تنش پیری (p—upper)	۰/۶۹		درصد کاهش حداکثر پوشش گیاهی	۱۵ درصد
	فاکتور شکل پیری تاج پوشش گیاهی	۲/۷		درصد کاهش بهره‌وری آب (WP)	۱۵ درصد
	حداکثر تخلیه رطوبتی توقف گرده‌افشانی	۰/۸		متوسط کاهش تاج پوشش گیاهی	۲۰ درصد
	۴۰ درصد تنش کودی	درصد کاهش ضریب رشد تاج گیاهی		۲۵ درصد	تیمار بدون کود
درصد کاهش حداکثر پوشش گیاهی		۲۵ درصد	درصد کاهش حداکثر پوشش گیاهی	۵۰ درصد	
درصد کاهش بهره‌وری آب		۲۵ درصد	درصد کاهش بهره‌وری آب	۵۰ درصد	
متوسط کاهش تاج پوشش گیاهی		۳۷ درصد	متوسط کاهش تاج پوشش گیاهی	۱۰۰ درصد	



شکل ۲- مقایسه عملکرد پیش‌بینی شده (توسط مدل) و مشاهده‌ای برای ۱۶ تیمار کودی و آبی در حالت واسنجی

جدول ۵- مقدار شاخص‌های آماری در سال واسنجی مدل

تیمارها	ضریب کارایی	ضریب باقیمانده	ضریب تعیین	شاخص سازگاری	حداکثر خطا	ریشه دوم میانگین مربعات خطا نرمال شده (درصد)
مجموع ۱۶ تیمار	۰/۹۱	-۰/۰۱	۰/۸۶	۱/۰	۲۳/۱	۱۰/۲۸

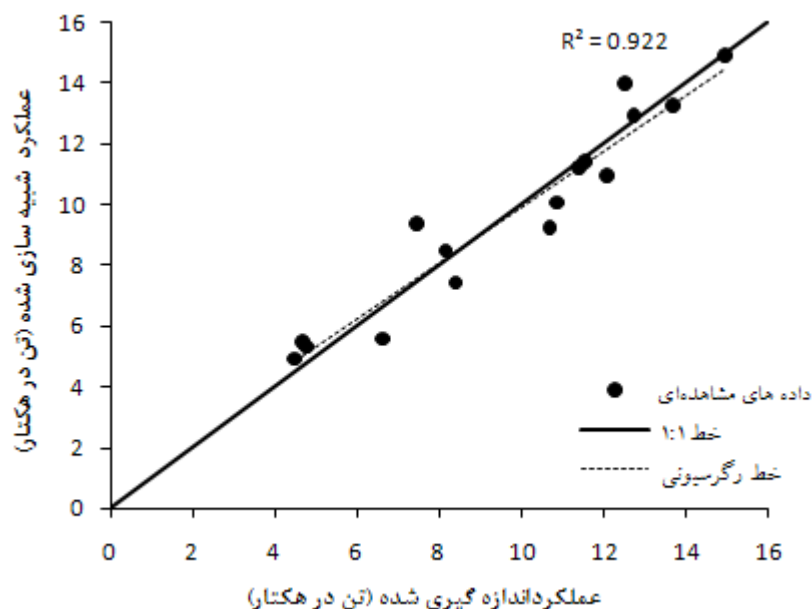
به صفر، شاخص سازگاری، کارایی مدل و ضریب تعیین نزدیک به یک و ریشه دوم میانگین مربعات خطا کمتر از ۱۰ درصد است که همگی نشان دهنده توانایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد محصول ذرت تحت تنش‌های کودی و آبی مختلف می‌باشد. لیکن مقدار حداکثر خطا در هر دو سال زراعی زیاد می‌باشد. به طوریکه در سال ۱۳۸۹ حداکثر خطای برآورد عملکرد مدل قابل ملاحظه و حدود ۲۵ درصد می‌باشد. بررسی اولیه نشان می‌دهد که حداکثر خطا در W4N1 (۶۰ درصد نیاز آبی و ۱۰۰ درصد نیاز کودی) اتفاق افتاده است. بررسی جدول (۶) نشان می‌دهد که درصد خطا در همه تیمارهای تنش آبی شدید W4 (برای همه سطوح کودی) نسبت به سایر تیمارهای آبی بیشتر است. به عبارت دیگر مدل در شبیه‌سازی تنش‌های آبی شدید ناتوان بوده است. از این حیث نتایج این تحقیق با نتایج هنگ و همکاران (۲۰۰۹) که نشان دادند مدل آکواکراپ در شرایط آبیاری کامل و تنش آبی متوسط مقدار عملکرد را به خوبی پیش‌بینی می‌کند ولی در تنش‌های آبی شدیدتر عملکرد مدل رضایت بخش نیست هماهنگی دارد. در تحقیقی مشابه شائو و همکاران (۲۰۰۹) بیشترین انحراف مقادیر پیش‌بینی شده عملکرد به وسیله مدل آکواکراپ از مقادیر واقعی را که در تیمارهای تنش آبی شدید اتفاق افتاده بود ۲۳/۸ درصد محاسبه نمودند. به طور کلی نتایج سه تحقیق بیانگر عدم دقت مدل در تنش‌های آبی شدید می‌باشد.

صحت‌سنجی مدل با داده‌های مزرعه‌ای سال ۱۳۸۹

مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده، عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل و درصد انحراف مدل از مقادیر واقعی در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار آب آبیاری تا تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، عملکرد ذرت افزایش و پس از آن عملکرد کاهش یافت. یکی از دلایل کاهش عملکرد در تیمار ۱۲۰ درصد نیاز آبی کم بودن عمق خاک زراعی (عمق خاک زراعی در مزرعه ۶۵ تا ۷۰ سانتیمتر اندازه‌گیری شده) بود. این مسئله باعث افزایش تلفات نفوذ عمقی آب و کود شد. تلفات نفوذ عمقی کود در تیمار ۱۲۰ درصد بیشتر از تیمارهای دیگر اندازه‌گیری شد و از این رو در تیمار ۱۲۰ درصد نیاز آبی، تلفات کود در مدل به عنوان تنش کودی در هر دو سال زراعی لحاظ شد (واسنجی این شرایط با داده‌های سال اول و صحت‌سنجی با سال دوم). از طرف دیگر نتایج بیلان آب در خاک و اجرای مدل نشان داد که تلفات نفوذ عمقی آب در تیمارهای ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی به ترتیب ۲۵۰، ۱۵۰، ۱۴۰ و ۱۲۴ میلی‌متر بوده است همه این عوامل باعث شده است که تیمار ۱۲۰ درصد نیاز آبی در هر دو سال زراعی عملکردی کمتر از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی داشته باشد. همچنین شکل ۳ و جدول (۷) به ترتیب مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده و شاخص‌های آماری تعیین درجه اعتماد مدل در سال ۱۳۸۹ ارائه شده است. آنالیز شاخص‌های آماری بیانگر ضریب باقیمانده نزدیک

جدول ۶- مقایسه مقادیر عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف

درصد انحراف	عملکرد (تن بر هکتار)		تیمار
	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	
۱/۹۹	۱۱/۳۵	۱۱/۵۸	N1W1
۰/۸۰	۱۴/۸۵	۱۴/۹۷	N1W2
-۱۱/۳۳	۱۳/۹۵	۱۲/۵۳	N1W3
-۲۴/۷۷	۹/۳۲	۷/۴۷	N1W4
۹/۹۲	۱۰/۹۰	۱۲/۱۰	N2W1
۳/۷۹	۱۳/۲۰	۱۳/۷۲	N2W2
-۱/۴۹	۱۲/۹۰	۱۲/۷۱	N2W3
۱۳/۷۸	۹/۲۰	۱۰/۶۷	N2W4
-۴/۴۲	۸/۵۰	۸/۱۴	N3W1
۱/۹۳	۱۱/۱۹	۱۱/۴۱	N3W2
۷/۳۵	۱۰/۰۸	۱۰/۸۸	N3W3
۱۰/۹۹	۷/۴۵	۸/۳۷	N3W4
۱۵/۷۹	۵/۶۰	۶/۶۵	N4W1
-۱۱/۴۶	۵/۳۵	۴/۸۰	N4W2
-۱۵/۵۳	۵/۴۳	۴/۷۰	N4W3
-۱۰/۰۰	۴/۹۵	۴/۵۰	N4W4



شکل ۳- مقایسه مقادیر عملکرد اندازه گیری و شبیه سازی شده در تیمارهای مختلف سال ۱۳۸۹

جدول ۷- مقدار شاخص های آماری صحت سنجی مدل در سال ۱۳۸۹ برای کلیه سطوح آبی و کودی

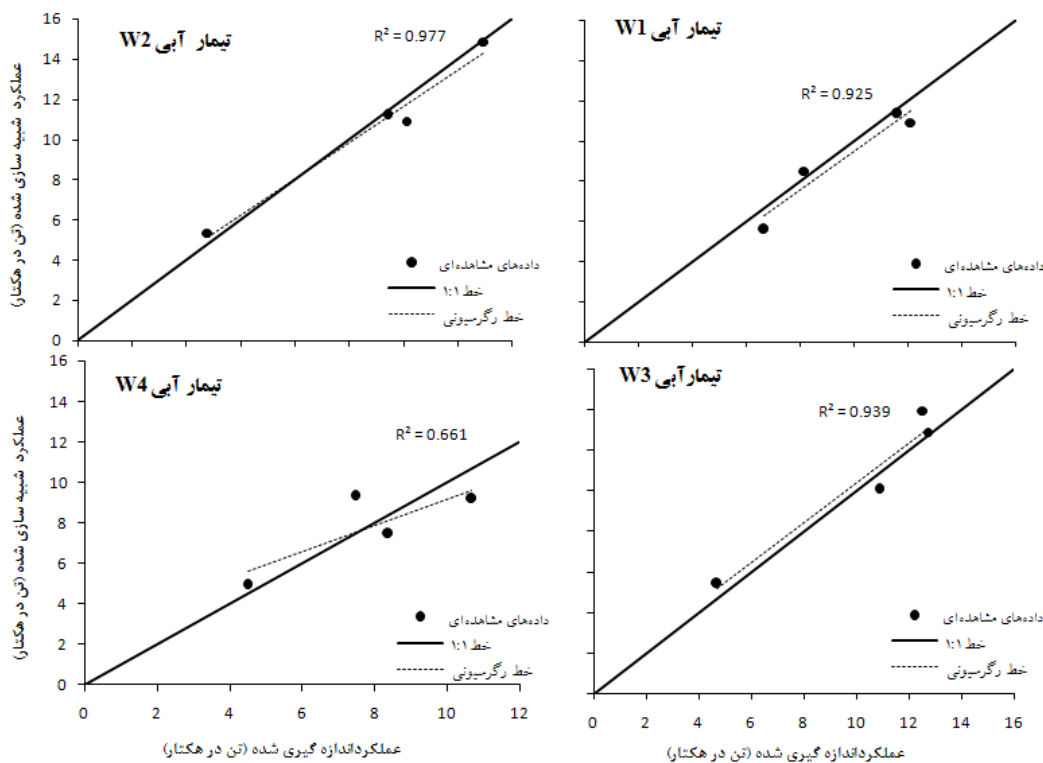
ضریب کارایی	ضریب باقیمانده	ضریب تعیین	شاخص سازگاری	حداکثر خطا (درصد)	ریشه دوم میانگین مربعات خطا نرمال شده (درصد)
۰/۹۲	۰/۰۱	۰/۹۲	۱/۰	۲۴/۷۷	۹/۳۷

و جدول ۸). به عبارت بهتر نتایج نشان می دهد که مدل آکواکراپ قادر است عملکرد را در تیمارهای آبیاری کامل و تنش آبی ملایم با دقت مناسب برآورد نماید، لیکن نتایج در تنش های آبی شدید رضایت بخش نمی باشد. از این حیث نتایج با نتایج شافو و همکاران (۲۰۰۹) و هنگ و همکاران (۲۰۰۹) در مورد شبیه سازی عملکرد ذرت در واکنش به آب مصرفی مشابه می باشد.

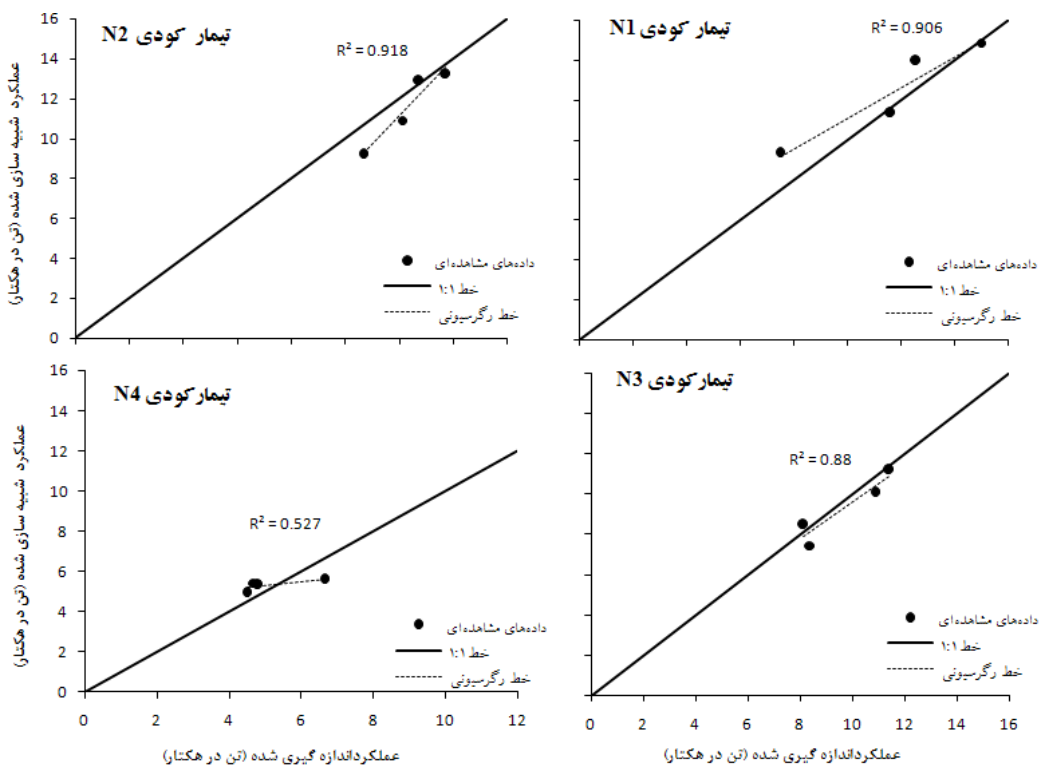
همچنین نتایج ارزیابی تیمارهای کودی (شکل ۵) و جدول (۸) نشان می دهد که بین تیمارهای کودی کمترین دقت مدل در تیمار کودی بدون کود (تنش کودی شدید) اتفاق افتاده و مدل در سایر سطوح کودی تقریباً نتایج رضایت بخشی ارائه داده است. بیشترین مقدار خطا و ریشه دوم میانگین مربعات خطا و کمترین مقدار ضریب تعیین و ضریب کارایی در تیمار کودی N4 اتفاق افتاده است (شکل ۵ و جدول ۸). بنابراین می توان به طور کلی بیان نمود که مدل آکواکراپ به جز در تیمارهای تنش آبی و کودی شدید در سایر موارد قابلیت مناسبی در شبیه سازی عملکرد ذرت دانه ای دارد.

نتایج نشان داد که عملکرد مدل در برخی از تیمارها مانند تیمارهای کم آبیاری شدید رضایت بخش نمی باشد. برای بررسی قابلیت شبیه سازی مدل تحت شرایط مختلف تنش های کودی و آبی نتایج ارزیابی مدل به تفکیک این تیمارها بررسی می شود. برای این منظور، در شکل (۴) عملکرد شبیه سازی شده مدل در مقابل عملکرد اندازه گیری شده در سطوح مختلف آب آبیاری (هر سطح آبیاری دارای ۴ سطح کودی)، در شکل (۵) عملکرد شبیه سازی شده مدل در مقابل عملکرد اندازه گیری شده در سطوح مختلف کودی (هر سطح کودی دارای ۴ سطح آبی) و در جدول (۸) شاخص های آماری ارزیابی مدل در این تیمارها ارائه شده است. نتایج نشان می دهد در بین تیمارهای آبی بیشترین دقت مدل در تیمار آبی ۱۰۰ درصد نیاز آبی و کمترین دقت مدل در تیمار آبی ۶۰ درصد نیاز آبی اتفاق افتاده است. به عبارت دیگر کمترین و بیشترین مقدار خطا و ریشه دوم میانگین مربعات خطا و بیشترین و کمترین مقدار ضریب تعیین و ضریب کارایی به ترتیب در تیمارهای آبی W2 و W4 اتفاق می افتد (شکل ۴

علیزاده و عباسی: بررسی واکنش عملکرد ذرت دانه‌ای به سطوح مختلف...



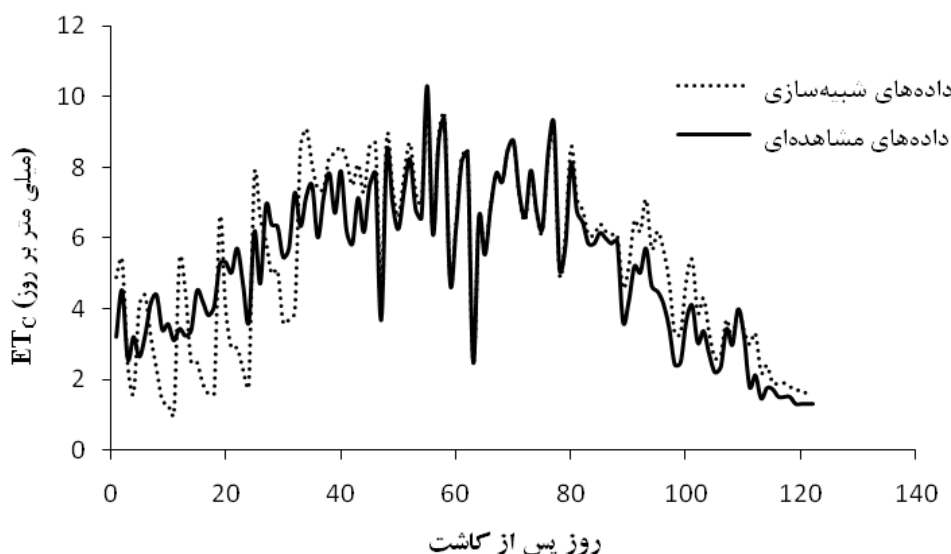
شکل ۴- مقایسه مقادیر عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در سطوح مختلف آبی



شکل ۵- مقایسه مقادیر عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در سطوح مختلف کودی

جدول ۸- مقدار شاخص‌های آماری بعد از واسنجی مدل (صحت سنجی مدل)

تیمارها	ضریب کارایی	ضریب باقیمانده	ضریب تعیین	شاخص سازگاری	حداکثر خطا (درصد)	ریشه دوم میانگین مربعات خطا نرمال شده (درصد)
W1	۰/۸۷	۰/۰۶	۰/۹۲	۰/۹۹	۹/۹۲	۸/۵۸
W2	۰/۹۷	۰/۰۲	۰/۹۷	۱/۰	۹/۹۲	۶/۲۱
W3	۰/۹۲	-۰/۰۴	۰/۹۴	۱/۰	۱۱/۳۳	۸/۸۰
W4	۰/۶۶	۰/۰۰	۰/۶۶	۱/۰	۲۴/۷۷	۱۶/۶۱
N1	۰/۸۱	-۰/۰۶	۰/۹۰	۰/۹۸	۱۵/۹	۱۱/۲
N2	۰/۲۰	۰/۰۶	۰/۹۲	۰/۹۶	۱۱/۹	۸/۰۴
N3	۰/۸۰	۰/۰۴	۰/۸۸	۰/۹۹	۹/۴۸	۶/۶۵
N4	۰/۲۸	-۰/۰۳	۰/۵۳	۰/۸۷	۲۰/۳۴	۱۴/۱۷
مجموع ۱۶ تیمار	۰/۹۲	۰/۰۱	۰/۹۲	۱/۰	۲۴/۷۷	۹/۳۷



شکل ۶- مقایسه مقادیر روزانه تبخیر و تعرق شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده

نتیجه‌گیری

هدف فائو از توسعه مدل آکوآکراپ، فراهم کردن ابزاری مناسب برای کمک به طراحان، کشاورزان و مدیران کشت و صنعت‌ها برای مدیریت بهینه آب در مزرعه است. بنابراین واسنجی و اعتبار سنجی مدل به ویژه برای هر محصول ضروری است. در این تحقیق برای واسنجی و ارزیابی مدل آکوآکراپ تحت تنش‌های آبی و کودی مختلف از داده‌های مزرعه‌ای دو ساله ذرت دانه‌ای استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد که در شرایطی که گیاه تحت تنش‌های همزمان آبی و کودی قرار دارد، مدل آکوآکراپ قادر است عملکرد دانه و تبخیر و تعرق گیاهی را در تیمارهای آبیاری کامل و تنش‌های

در این تحقیق همچنین توانایی مدل برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق تجمعی گیاه مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۶) مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده تبخیر و تعرق تجمعی گیاه ارائه شده است. نتایج نشان داد که مدل قادر است مقدار تبخیر و تعرق تجمعی گیاه را جز در مراحل ابتدایی رشد با دقت بسیار مناسب شبیه‌سازی نماید (ضریب تعیین برابر ۰/۹۸ و حداکثر خطای کمتر از هفت درصد). نتایج هنگ و همکاران (۲۰۰۹) هم بیانگر دقت بسیار بالای مدل آکوآکراپ در شبیه‌سازی میزان تبخیر و تعرق مطابقت دارد.

آکواکراپ برای شبیه‌سازی واکنش عملکرد اغلب محصولات زراعی به تنش‌های آبی و کودی نسبت به سایر مدل‌های شبیه‌سازی به پارامترها و داده‌های ورودی کمتر و قابل وصول‌تری نیاز دارد و این سادگی باعث کاهش دقت و توانمندی مدل نشده است، در مدیریت آب و کود در مزرعه می‌توان بدون نگرانی از این مدل استفاده نمود. لیکن برای استخراج تابع تولید که نیاز به بررسی واکنش گیاه در تنش‌های آبی و کودی شدید می‌باشد باید با محافظه‌کاری از این مدل استفاده نمود.

آبی ملایم به خوبی شبیه‌سازی کند. همچنین مدل قادر است عملکرد دانه و تبخیر و تعرق گیاهی را در سطوح کودی کامل و تنش‌های کودی ملایم به خوبی شبیه‌سازی نماید. لیکن در تنش‌های آبی و کودی شدید مدل نتایج رضایت‌بخش ارائه نمی‌نماید. بیشترین انحراف از داده‌های مشاهده‌ای در تیمارهای آبی شدید (حداکثر خطای ۲۴/۷۷ درصد) و سپس در تیمارهای آبی کودی شدید (حداکثر خطای برابر ۲۰/۲۴ درصد) اتفاق افتاده است. از آنجایی که تنش‌های آبی و کودی اقتصادی معمولاً ملایم هستند و از طرفی مدل

منابع

- ۱- عباسی، ف.، چوگان، ر.، علیزاده، ح. و ع. لیاقت. ۱۳۹۱. بررسی اثر کودآبیاری جویچه‌ای بر کارایی مصرف آب و کود، عملکرد و برخی صفات ذرت دانه‌ای. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۳ (۴): ۳۸۵-۳۷۵.
- ۲- علیزاده، ح.، نظری، ب.، پارسى نژاد، م.، رمضانى اعتدالی، ه. و ح. جانباز. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۲ (۴): ۲۸۳-۲۷۳.
- ۳- محمدی، م.، قهرمان، ب.، داوری، ک.، انصاری، ح. و ع. شهیدی. 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، ۲۹ (۱): ۸۴-۶۷.
- ۴- قربانیان کردآبادی، م. لیاقت، ع. م. وطن خواه، ا. و ح نوری. ۱۳۹۳. شبیه سازی عملکرد و تبخیر و تعرق ذرت علوفه ای با استفاده از مدل AquaCrop. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۴ (۲): ۶۴-۴۷.
- 5- Boote, K.J., Jones, J.W and N.B. Pickering. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, 88(5): 704-716.
- 6- Bradford, K.J and T.C. Hsiao. 1982. Physiological responses to moderate water stress. p. 263-324. In O.L. Lange et al. (ed.) *Physiological plant ecology. II. Water relations and carbon assimilation. Encyclopaedia of Plant Physiology, New Series. Vol. 12B. Springer -Verlag, New York.*
- 7- Brouwer, R and C.T. de Wit. 1969. A simulation model of plant growth with special attention to root growth and its consequences, 224-244.
- 8- Delgoda, D., Saleem, S.K., Malano, H. and M.N. Halgamuge. 2016. Root zone soil moisture prediction models based on system identification: Formulation of the theory and validation using field and AQUACROP data. *Agricultural Water Management*, 163: 344-353.
- 9- Doorenbos, J. and A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. *Irrigation and drainage paper*, No 33.
- 10-Eitzinger, J., Trnka, M., Hösch, J., Zalud, Z. and M. Dubrovský. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecological Modelling*, 171 (3): 223-246.
- 11-Farahani, H.J., Izzi, G., Steduto, P. and T.Y. Oweis. 2009. Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 101: 469-476.
- 12-Hanks, R. J. 1983. Yield and water-use relationships: An overview. Limitations to efficient water use in crop production limitationstoef. 393-411.

- 13-Heng, L.K., Evett, S.R., Howell, T.A. and T.C. Hsiao. 2009. Calibration and testing of FAO AquaCrop model for maize in several locations. *Agronomy Journal*, 101(3): 448-459.
- 14-Hsiao, T.C., E. Fereres, E. Acevedo, and D.W. Henderson. 1976. Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. *Water and plant life*. Springer Berlin Heidelberg, 281-305.
- 15-Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Raes, D. and E. Fereres. 2009. AquaCrop Model parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101:448-459.
- 16-Jones, J.W. and J.R. Kiniry. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.
- 17-Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M. and C.J. Smith. 2003. An overview of APSIM: A model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18: 267-288.
- 18-Kiniry, J.R., Williams, J.R., Gassman, P.W. and P. Debaeke. 1992. A general, process-oriented model for two competing plant species. *Transactions of ASAE*, 35:801-810.
- 19-Linker, R., Ioslovich, I., Sylaios, G., Plauborg, F. and A. Battilani. 2016. Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. *Agricultural Water Management*. 163: 236-243.
- 20-Montoya, F., Camargo, D., Ortega, J.F., Córcoles, J.I. and A. Domínguez. 2016. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 164: 267-280.
- 21-Paredes, P., Wei, Z., Liu, Y., Xu, D., Xin, Y., Zhang, B. and L.S. Pereira. 2015. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 152:57-71.
- 22-Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and soft ware description. *Agronomy Journal*, 101:438-447.
- 23-Saab, M.T.A., Todorovic, M. and R. Albrizio. 2015. Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models?. *Agricultural Water Management*, 147:21-33.
- 24-Salemi, H.R., Soom, M.A.M., Lee, T.S., Mousavi, S.F., Ganji, A. and M.K. Yusoff. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, 610:2204-2215.
- 25-Singh, A.K., Tripathy, R. and U.K. Chopra. 2008. Evaluation of CERESWheat and CropSyst models for water—Nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95:776-786.
- 26-Smith, M. 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 46. FAO, Rome.
- 27-Steduto, P., Hsiao, T.C. and E. Fereres. 2007. on the conservative behaviour of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25:189-207.
- 28-Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and E. Fereres. 2009. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101:426-437.

- 29-Stockle, C.O., Donatelli, M. and R. Nelson. 2003. CropSyst: a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18:289–307.
- 30-Tanner, C.B. and T.R. Sinclair. 1983. Efficient water use in crop production: Research or re-search? p. 1–27. In H.M. Taylor, W.R. Jordan, and T.R. Sinclair (ed.) *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- 31-Tavakoli, A.R., Moghadam, M.M. and Sepaskhah, A.R., 2015. Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. *Agricultural Water Management*, 161:136-146.
- 32-Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L. and A.Chehbouni. 2016. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*. 163:219-235.
- 33-Van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., Van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L. and J. Goudriaan. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18(3): 201-234.
- 34-Vaux, H. J. and W, O. Pruitt. 1983. Crop-water production functions. *Advances in Irrigation*, 2(1): 61-95.
- 35-Whisler, F.D., Acock, B., Baker, D.N., Fye, R.E., Hodges, H.F., Lambert, J.R., Lemmon, H.E., McKinion, J. M. and V. R. Reddy. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*, 40:141-208.
- 36-Williams, J.R., Jones, C.A. and P.T. Dyke. 1989. EPIC—Erosion/productivity impact calculator. 1. The EPIC model. USDA-ARS, Temple, TX.