نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۶، مهر - آبان ۱۴۰۱، ص. ۷۳۸-۷۲۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 16, Oct.-Nov. 2022, p. 727-738

مقاله علمی-پژوهشی

تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاه ذرت تحت تنش شوری در روش‌های مختلف آبیاری

افشین سرکهکی[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲*]، سهراب مینایی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶

چکیده

تحلیل حساسیت مهم‌ترین مرحله قبل از واسنجی هر مدل گیاهی است. این عمل به محققان کمک می‌کند تا اطلاعات کافی در خصوص اثرگذاری هر پارامتر و میزان تغییرات آن در مرحله واسنجی داشته باشند. این موضوع با توجه به روند رو به افزایش کاربرد مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی از اهمیت بیشتری برخوردار است. به همین دلیل در تحقیق حاضر میزان حساسیت این مدل گیاهی نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاهی بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*)، حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx})، ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0)، ضریب رشد پوشش (CGC)، ضریب کاهش پوشش (CDC) و شاخص برداشت (HI) با استفاده از روش Beven (1979) ارزیابی شد. بدین منظور از داده‌های برداشت‌شده از یک مزرعه تحقیقاتی در شهرستان اهواز استفاده شد. تیمارهای موردمطالعه شامل روش آبیاری (D: آبیاری بارانی با آب شور و F: آبیاری بارانی با کاربرد آب شور همراه با پس آبیاری با آب غیر شور برای شستشوی برگ‌ها و S: آبیاری جویچه‌ای) با پنج کیفیت آب آبیاری (S1: ۲/۵، S2: ۳/۲، S3: ۳/۹، S4: ۴/۶ و S5: ۵/۱ دسی زیمنس بر متر) بود. نتایج نشان داد که بیشترین حساسیت نسبت به تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده ($0.95\leq S_{pi}\leq 1.04$) و ضریب گیاهی برای تعرق ($0.95\leq S_{pi}\leq 0.67$) بود. پس از آن، حساسیت شاخص برداشت ($0.51\leq S_{pi}\leq 0.56$) در دسته متوسط قرار داشت. میزان تغییرات عملکرد در مقادیر مختلف بهره‌وری آب نرمال شده، ضریب گیاهی برای تعرق، شاخص برداشت و ضریب کاهش پوشش به ترتیب ۳/۳-۱/۷، ۱/۶-۱/۸، ۱/۱۶-۰/۶ و ۰/۶۴-۰/۳۲ تن در هکتار بود. ضرایب حساسیت برای همه پارامترها به‌جز CDC مثبت بود؛ بنابراین با افزایش مقدار CDC مدل AquaCrop دچار خطای کم‌برآوردی (بین ۱۷ تا ۳۳ درصد) و با افزایش مقدار سایر پارامترها این مدل دچار خطای بیش برآوردی (بین ۵ تا ۷۰ درصد) می‌شود؛ بنابراین، در شرایطی که اختلاف عملکرد واقعی و شبیه‌سازی‌شده زیاد است، بهتر است پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده و ضریب گیاهی برای تعرق موردتوجه قرار گیرند. در غیر این صورت، پارمترهای شاخص برداشت و ضریب کاهش پوشش مدنظر قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب نرمال شده، روش Beven، شبیه‌سازی، مدل گیاهی

مقدمه

مدل‌های گیاهی ابزارهای مفیدی برای شبیه‌سازی روابط بین اقلیم، گیاه، آب و خاک هستند (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹) که دارای قابلیت‌هایی است که از آن‌ها برای شرایط خاص مانند پیش‌بینی شرایط گیاه و خاک بر اثر تغییرات اقلیم (یعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۶)، بهینه‌سازی مصرف نهاده‌های کشاورزی و آب (Guo et al., 2019) و واکنش گیاهان زراعی نسبت به مقادیر مختلف نهاده‌ها (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰؛ ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸) استفاده می‌شود. مدل AquaCrop از جمله مدل‌های گیاهی است که توسط سازمان خوار و بار کشاورزی (فائو) برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی تحت شرایط مختلف بسط داده شده است (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷). این مدل گیاهی به دلیل سادگی، داده‌های ورودی کم، کاربرپسند بودن، دقت بالا و نزدیکی قابل‌قبول شرایط مدل‌سازی با مدیریت مزرعه در شرایط واقعی (Todorovic et al., 2009) موردتوجه بسیاری از محققان از جمله ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۷)، آرایا و همکاران (Araya et al., 2010)، اگدرنژاد و همکاران (۱۳۹۷) و احمدی و همکاران (۱۴۰۰) قرار گرفته است.

ماهیت مدل AquaCrop به صورتی است که هر کدام از

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۳- دکتری آبیاری و زهکشی، سازمان آب و برق استان خوزستان، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: ایمیل: a_eigder@ymail.com)
** مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.4.3.6

پارامترهای ورودی بر نتایج شبیه‌سازی اثر می‌گذارد. به همین دلیل این عوامل سبب ایجاد عدم قطعیت در نتایج این مدل گیاهی می‌شود (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). در مدل ابتدایی AquaCrop، داده‌های ورودی به دو دسته ثابت و غیرثابت تقسیم شده بود. بر اساس نظر بسط دهندگان، پیشنهاد شده بود که داده‌های ثابت در این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی تغییر نکنند درحالی‌که داده‌های غیرثابت در هر شبیه‌سازی باید با استفاده از واسنجی تعیین شوند (Raes et al., 2012). با این وجود، برخی تحقیقات نشان داده است که همه‌ی داده‌های ورودی بهتر است مورد واسنجی قرار گیرند (رحیمی‌خوب و همکاران، ۱۳۹۹؛ احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). لیکن اثر همه‌ی پارامترها بر نتایج خروجی یکسان نیست. بنابراین انجام واسنجی برای همه‌ی پارامترها سبب سردرگمی محققان و کاربران می‌شود. برای رفع این مشکل روش‌های مختلف تحلیل حساسیت پیشنهاد شده است. نتایج تحلیل حساسیت مشخص می‌کند که هرکدام از پارامترهای ورودی تا چه میزان بر فرایند شبیه‌سازی و نتایج خروجی اثرگذار هستند. نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده است که تغییرات تقریباً نیمی از پارامترهای ورودی مدل AquaCrop بر نتایج خروجی این مدل گیاهی اثر چندانی ندارد و بهتر است در مرحله واسنجی توجه زیادی به تغییرات آن‌ها برای افزایش دقت خروجی مدل گیاهی نشود (ادبی و همکاران، ۱۳۹۸)؛ بنابراین با استفاده از تحلیل حساسیت، کاربر به‌راحتی می‌تواند توجه خود را به عوامل مؤثرتر در مرحله واسنجی معطوف کند (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰).

این مهم باعث شده است تا تحقیقات متعددی روی تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل AquaCrop انجام شود. رحیمی‌خوب و همکاران (۱۳۹۹) با بررسی پنج پارامتر ورودی در این مدل گیاهی نشان دادند که بهره‌وری آب نرمال شده[1] (WP^*) و حداکثر ضریب تعرق گیاهی[2] (K_{CTrx}) حساسیت بیشتری بر تغییرات نتایج شبیه‌سازی‌شده داشتند. همچنین این محققان بیان کردند که ضریب زوال پوشش گیاهی[3] (CDC) حساسیت کمتری نسبت به سایر پارامترهای مورد بررسی داشت. احمدی و همکاران (۱۴۰۰) و رحیمی‌خوب و همکاران (۱۳۹۹) گزارش کردند که اثر پارامتر CDC نسبت به سایر پارامترهای گیاهی در مدل AquaCrop معکوس است. بدین ترتیب با افزایش آن عملکرد گیاهان کاهش و با کاهش آن عملکرد گیاهان افزایش می‌یابد؛ بنابراین توجه به این موضوع را در مرحله واسنجی به محققان پیشنهاد کردند. در تحقیق دیگری که باهدف آنالیز حساسیت موضعی مدل AquaCrop برای دو گیاه گندم و ذرت انجام شد، مشاهده گردید که پارامترهای رشدی گیاه مؤثر روی ضریب افزایش پوشش گیاهی[4] (CGC)، بیشترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترها داشتند (ادبی و همکاران، ۱۳۹۸). ژائو و همکاران (Guo et al., 2019) حساسیت نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop را به تغییرات پارامترهای K_{CTrx}، CGC، CDC و ضریب حداکثر پوشش گیاهی[5] (CC_X) بیشتر از سایر پارامترها گزارش کردند. جین و همکاران تغییرات ضریب پوشش گیاهی اولیه[6] (CC_0)، WP^* و CC_X را پارامترهایی حساس برای شبیه‌سازی گندم زمستانه در چین و گندم بهاره در کانادا با استفاده از مدل AquaCrop بیان کردند (Jin et al., 2019). مطالعات ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۸)، احمدی و همکاران (۱۴۰۰)، سالمی و همکاران (Salemi et al., 2011) و ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۷) نیز به ترتیب حساسیت مدل AquaCrop را به تغییرات پارامترهای K_{CTrx}، CGC، CDC و WP^* تأیید کرده‌اند.

وجود بیش از ۱۸۰ میلیون هکتار زمین کشاورزی در جهان برای کشت ذرت (FAO, 2014) سبب شده است تا اهمیت این گیاه زراعی برای محققان دوچندان شود. ذرت سازگاری خوبی با مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد (De Juan Valero et al., 2005). با توجه به اهمیت ذرت، شبیه‌سازی عملکرد آن با استفاده از مدل AquaCrop از نظر محققان پنهان نبوده و تحقیقات متعددی در این خصوص انجام شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعات کاترجی و همکاران، ماسانگانیس و همکاران، هسیائو و همکاران و هنگ و همکاران اشاره کرد (Heng et al., 2009; Hsiao et al., 2009; Masanganise et al., 2013; Katerji et al., 2013). لیکن هیچکدام از این تحقیقات در شرایط کیفیت‌های مختلف آب و روش‌های متفاوت آبیاری، به‌عنوان دو عامل مهم در تغییرات عملکرد ذرت (Cheong et al., 2003) انجام نشده است. همچنین تحلیل حساسیت مدل AquaCrop به‌عنوان مهم‌ترین گام برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی موردتوجه قرار نگرفته است. بر این اساس، تحقیق حاضر با هدف تحلیل حساسیت مدل گیاهی AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای WP^*، K_{CTrx}، CC_0، CGC و CDC ذرت در کرج انجام شد. با توجه به این موضوع، در این پژوهش به بررسی حساسیت تغییرات پارامترهای WP^*، K_{CTrx}، CC_0، CGC، CDC و HI بر عملکرد ذرت در مدل AquaCrop پرداخته شد.

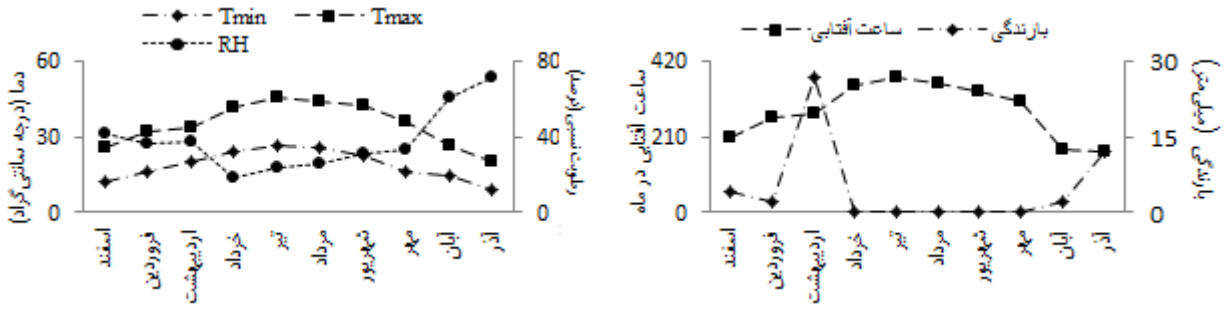
مواد و روش‌ها

مطالعات مزرعه‌ای

داده‌های مورداستفاده در این پژوهش برگرفته از طرح تحقیقاتی

1- Normalized Water Productivity
2- Maximum Crop Transpiration Coefficient
3- Canopy Decline Coefficient
4- Canopy Growth Coefficient
5- Maximum Canopy Cover
6- Canopy Cover

انجام‌شده طی دو فصل کشت بهاره (۹۲-۱۳۹۱) و تابستانه (۱۳۹۲) در یک مزرعه تحقیقاتی با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه و ۴۱ ثانیه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۸ دقیقه و ۱۱ ثانیه عرض شمالی در ارتفاع ۲۰ متر از سطح دریا واقع در شهرستان اهواز می‌باشد (مینایی، ۱۳۹۳). مشخصات هواشناسی منطقه موردمطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- مشخصات هواشناسی در منطقه موردمطالعه

تیمارهای آزمایش شامل روش آبیاری (D: آبیاری بارانی با آب شور و F: آبیاری بارانی با آب شور همراه با پس آبیاری با آب غیر شور برای شستشوی برگ‌ها و S: آبیاری جویچه‌ای) با پنج کیفیت آب آبیاری (S1: ۲/۵، S2: ۳/۲، S3: ۳/۹، S4: ۴/۶ و S5: ۵/۱ دسی زیمنس بر متر) بود. برای تعیین میزان شوری، تیمار S1 بر اساس شوری آب رودخانه کارون که منبع آبیاری بود، در نظر گرفته شد. تیمار S5 نیز بر اساس کاهش ۵۰ درصدی عملکرد ذرت مطابق با رابطه پیش‌بینی کاهش عملکرد برای روش آبیاری سطحی در نظر گرفته شد.

تیمارهای S2، S3 و S4 نیز حد واسط این دو تیمار قرار گرفتند. برای کلیه تیمارها کشت ذرت به‌صورت جوی و پشته‌ای (فاصله جوی و پشته‌ها از یکدیگر ۷۵ سانتی‌متر و طول جویچه‌ها ۴ متر) انجام شد. بذرها به عمق ۴ تا ۷ سانتی‌متر و با تراکم ۷۶۰۰۰ بذر در هکتار (با فاصله ۱۸ سانتی‌متر از هم) کشت گردید. به منظور کاهش اثر شوری بر جوانه‌زنی بذور، از کشت بذرها در روی پشته‌ها اجتناب گردید، بر این اساس بذرها بر روی شیب جانبی پشته و به فاصله یک سوم از بالای آن کشت شد.

برای تعیین مقدار آب آبیاری، پایش رطوبتی خاک مدنظر قرار گرفت و میزان رطوبت خاک با نمونه‌برداری از اعماق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متری انجام می‌شد. مشخصات خاک موردنظر در جدول (۱) نشان داده شده است.

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

عمق خاک	رطوبت در FC	رطوبت در PWP	جرم مخصوص ظاهری	بافت خاک	نیتروژن	pH	EC
(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)		(گرم بر سانتی‌متر مکعب)	-	درصد	-	دسی زیمنس بر متر
۰-۳۰	۲۸/۳	۱۳/۱	۱/۵۹	لوم	۰/۰۸	۸/۰	۷/۸
۳۰-۶۰	۲۸/۳	۱۴/۶	۱/۶۲	لوم	۰/۰۷	۷/۹	۳/۰
۶۰-۹۰	۲۹/۴	۱۴/۵	۱/۵۰	لوم	۰/۰۵	۷/۸	۳/۵

عمق خالص آب آبیاری از رابطه (۱) تعیین گردید:

$$d_N = (FC - PWP) \times D \times 10 \quad (۱)$$

در این رابطه d_N عمق آب آبیاری حسب میلی‌متر، FC رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی بر حسب درصد حجمی، PWP مقدار رطوبت خاک قبل از آبیاری حسب درصد حجمی و D عمق ریشه بر حسب متر است. در کشت بهاره اولین آبیاری در اسفند شروع شد و برای همه تیمارها در ابتدای خرداد ماه تمام شد. در آبیاری تابستانه، آبیاری از انتهای تیر ماه شروع شد و تا ابتدای آبان ادامه یافت.

عمق ناخالص آبیاری با در نظر گرفتن ۱۰ درصد تلفات برای تبخیر و باد بردگی در روش آبیاری بارانی و غیریکنواختی توزیع آب در روش آبیاری سطحی و ۲۵ درصد تلفات برای تأمین نیاز آبشویی عمق ناخالص آب آبیاری برای هر دو روش آبیاری به دست آمد (رابطه ۲):

$$d_g = d_N \times 1.35 \quad (۲)$$

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

$$V_g = d_g \times A \quad (۳)$$

در این رابطه Vg حجم ناخالص آب آبیاری و A مساحت تیمار آبیاری است. آبیاری یک روز بعد از کاشت انجام شد. بعد از رسیدگی کامل و فیزیولوژیکی گیاه، برداشت محصول انجام شد.

تشریح مدل AquaCrop

مدل AquaCrop برای تعیین عملکرد محصول از تبخیر-تعرق به‌صورت زیر استفاده می‌کند (Steduto et al., 2009):

$$B = WP^* \sum_{i=1}^{n} \frac{Tr_i}{ETo_i} \quad (۴)$$

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

$$T_{ri} = K_s \times CC \times K_{CTrx} \times ET_{0i} \quad (۵)$$

در این رابطه، K_s ضریب تنش آبی، K_{CTrx} حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق و CC ضریب پوشش گیاهی است. در مدل AquaCrop تعیین میزان پوشش گیاهی بسیار بااهمیت است. به همین دلیل در این مدل گیاهی از سه رابطه (رابطه‌های ۶ تا ۸) به شرح زیر برای تعیین این پارامتر استفاده می‌شود (Steduto et al., 2009).

$$CC = CC_0 \times e^{tCGC} \quad (۶)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{CC_x^{\,2}}{CC_0} \times e^{-tCGC} \quad (۷)$$

$$CC = CC_x \left[1 - 0.05 \left(e^{\frac{CDC}{CCx} \times t} - 1 \right) \right] \quad (۸)$$

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

تحلیل حساسیت مدل

با توجه به روابط حاکم بر مدل AquaCrop، پارامترهای WP^*، K_{CTrx}، CC_0، CGC، CDC و HI در شبیه‌سازی زیست‌توده از اهمیت بسیاری برخوردار هستند؛ بنابراین در پژوهش حاضر حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامترها بررسی شد. مقادیر اولیه و دامنه تغییرات این پارامترها در جدول (۲) نشان داده شده است. میزان نمو هر پارامتر نیز بر اساس ماهیت آن و اثرگذاری مقادیر پارامتر بر نتایج خروجی تعیین شد.

جدول ۲- مقادیر اولیه و دامنه تغییرات پارامترهای موردمطالعه با استفاده از مدل AquaCrop

پارامتر	علامت	واحد	مقدار اولیه	حد پایین	حد بالا	نمو تغییرات
بهره‌وری آب نرمال شده	WP^*	$g.m^{-2}$	۳۳/۷	۳۱/۷	۳۵/۷	۱
حداکثر ضریب تعرق گیاهی	K_{CTrx}	-	۱/۰۵	۰/۹۵	۱/۱۵	۰/۰۵
پوشش گیاهی اولیه	CC_o	$cm^2.plant^{-1}$	۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۶۹	۰/۱
ضریب رشد پوشش گیاهی	CGC	$\%day^{-1}$	۱۶/۳	۱۴/۳	۱۸/۳	۱
ضریب کاهش پوشش گیاهی	CDC	$\%day^{-1}$	۱۱/۷	۹/۷	۱۳/۷	۱
شاخص برداشت	HI	%	۴۸	۵۴	۴۱	۳

به‌منظور تحلیل حساسیت از رابطه ارائه شده توسط Beven (1979) استفاده شد (رابطه ۹).

$$S_{pi} = \lim_{\Delta Pi \to 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta P_i}{P_i}} = \frac{\partial y}{\partial P_i} \times \frac{P_i}{y} \quad (۹)$$

در این رابطه، S_{pi} ضریب حساسیت، P_i پارامتر موردبررسی و y مقدار زیست‌توده است. مقادیر S_{pi} بر حسب نوع پارامتر می‌تواند مثبت یا منفی باشد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش زیست‌توده با تغییر پارامتر موردنظر است. مقادیر منفی نیز نشان‌دهنده کاهش زیست‌توده با تغییرات پارامتر موردنظر است. این روش ابتدا برای تحلیل حساسیت پارامترهای معادله پنمن مانتیث مورداستفاده قرار گرفت. سپس به دلیل دقت و جامعیت آن، برای ارزیابی و تحلیل حساسیت سایر معادلات نیز به کار گرفته شد. در یک نگاه کلی، رابطه دیفرانسیل در این رابطه، حساسیت نسبت به هر پارامتر را مشخص می‌کند. این حساسیت به بزرگی مقادیر پارامترهای P_i و y نیز وابسته

است. به‌عنوان مثال، اگر S_{pi} برابر با ۰/۱ باشد، تغییرات ۱۰ درصدی P_i موجب افزایش یک درصدی پارامتر y می‌شود. مقدار ضریب حساسیت با توجه به جدول (۳) در چهار دسته کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار می‌گیرند (Lenhart et al., 2002).

جدول ۳- طبقه‌بندی ضریب حساسیت

گروه	دامنه تغییرات ضریب حساسیت	توضیحات
۱	$0 \le \|Sp\| < 0.05$	کم
۲	$0.05 \le \|Sp\| < 0.2$	متوسط
۳	$0.2 \le \|Sp\| < 1$	زیاد
۴	$1 \le \|Sp\|$	بسیار زیاد

نتایج و بحث

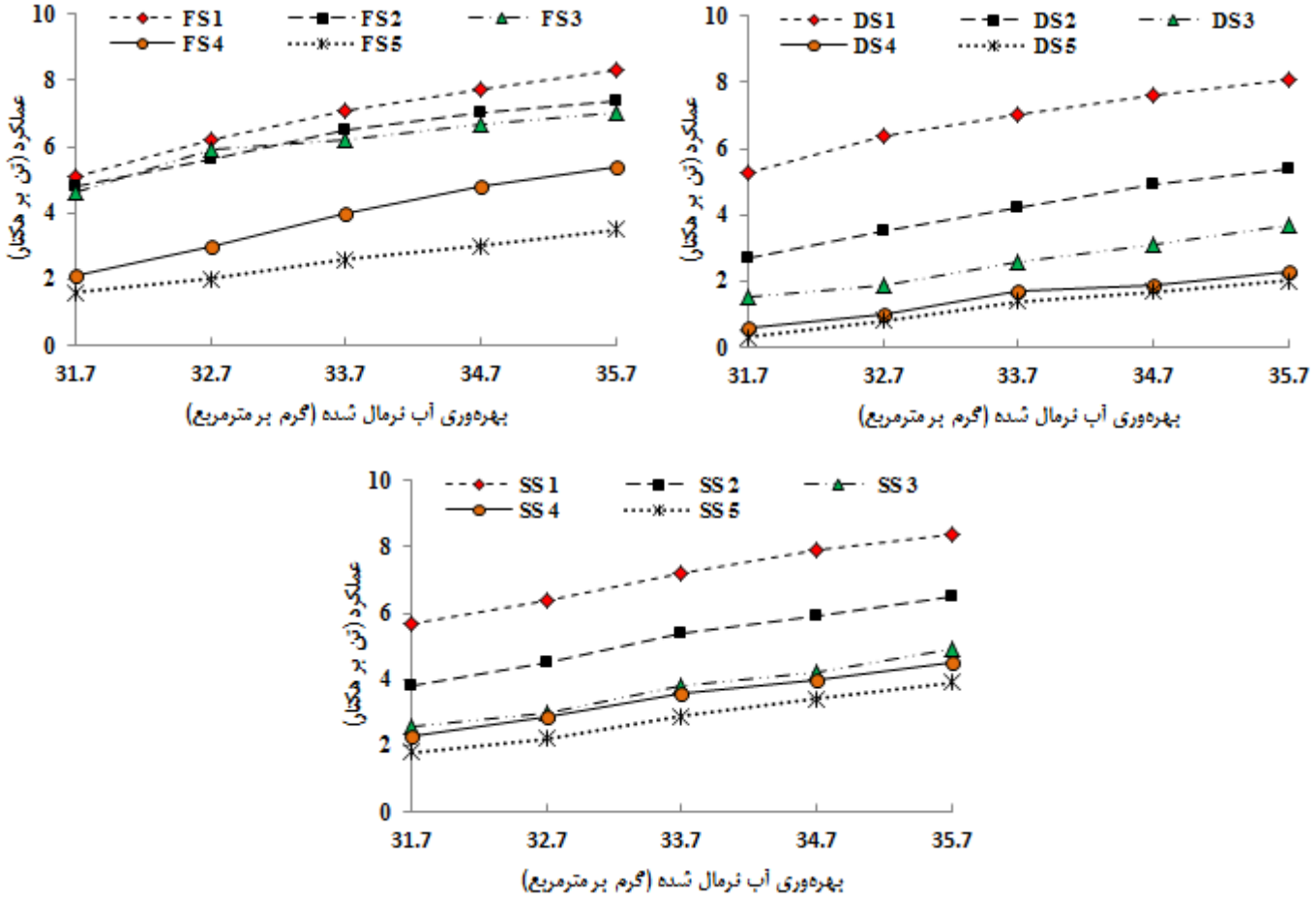
جدول (۴) ضرایب حساسیت پارامترهای رشد گیاه ذرت دانه‌ای را نشان می‌دهد. به‌طور متوسط، پارامتر *WP نسبت به سایر پارامترها از حساسیت بیشتری برخوردار بود. پس از این پارامتر، K_{CT}، HI، CDC، CGC و CC_0 قرار داشتند. این نتایج با گزارش‌های برخی محققان مطابقت دارد. رحیمی‌خوب و همکاران (۱۳۹۹) و جین و همکاران (Jin et al., 2019) پارامتر *WP و احمدی و همکاران (۱۴۰۰)، ژائو و همکاران (Guo et al., 2019)، ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۷ و ۱۳۹۸) نیز پارامتر K_{CT} را به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر مدل AquaCrop گزارش کردند.

جدول ٤- ضرایب حساسیت پارامترهای رشد گیاه ذرت دانه‌ای

تیمار	پارامترهای رشد گیاه					
	WP^* (g.m^{-2})	K_{CTrx} (-)	CC_0 (cm^2.plant^{-1})	CGC (%day^{-1})	CDC (%day^{-1})	HI (%)
DS1	۱/۰۴	۰/۶۷	۰/۰۲	۰/۰۳۰	−۰/۱۵	۰/۵۶
DS2	۱	۰/۶۵	۰/۰۲	۰/۰۲۹	−۰/۱۳	۰/۵۵
DS3	۱	۰/۶۵	۰/۰۲	۰/۰۲۵	−۰/۱۲	۰/۵۵
DS4	۰/۹۵	۰/۶۳	۰/۰۲	۰/۰۲۳	−۰/۱۱	۰/۵۴
DS5	۰/۹۴	۰/۶۲	۰/۰۲	۰/۰۲۳	−۰/۱۱	۰/۵۴
FS1	۱/۰۳	۰/۶۷	۰/۰۲	۰/۰۲۸	−۰/۱۵	۰/۵۶
FS2	۱/۰۲	۰/۶۶	۰/۰۲	۰/۰۲۸	−۰/۱۵	۰/۵۶
FS3	۱/۰۱	۰/۶۵	۰/۰۲	۰/۰۲۶	−۰/۱۳	۰/۵۶
FS4	۱/۰۱	۰/۶۴	۰/۰۲	۰/۰۲۴	−۰/۱۳	۰/۵۵
FS5	۱/۰۱	۰/۶۴	۰/۰۲	۰/۰۲۳	−۰/۱۲	۰/۵۵
SS1	۰/۹۸	۰/۶۲	۰/۰۲	۰/۰۲۴	−۰/۱۲	۰/۵۳
SS2	۰/۹۸	۰/۶۲	۰/۰۲	۰/۰۲۴	−۰/۱۲	۰/۵۳
SS3	۰/۹۶	۰/۶۰	۰/۰۲	۰/۰۲۳	−۰/۱۱	۰/۵۲
SS4	۰/۹۶	۰/۶۰	۰/۰۲	۰/۰۲۲	−۰/۱۰	۰/۵۱
SS5	۰/۹۵	۰/۵۹	۰/۰۲	۰/۰۲۲	−۰/۱۰	۰/۵۱
انحراف معیار	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۷

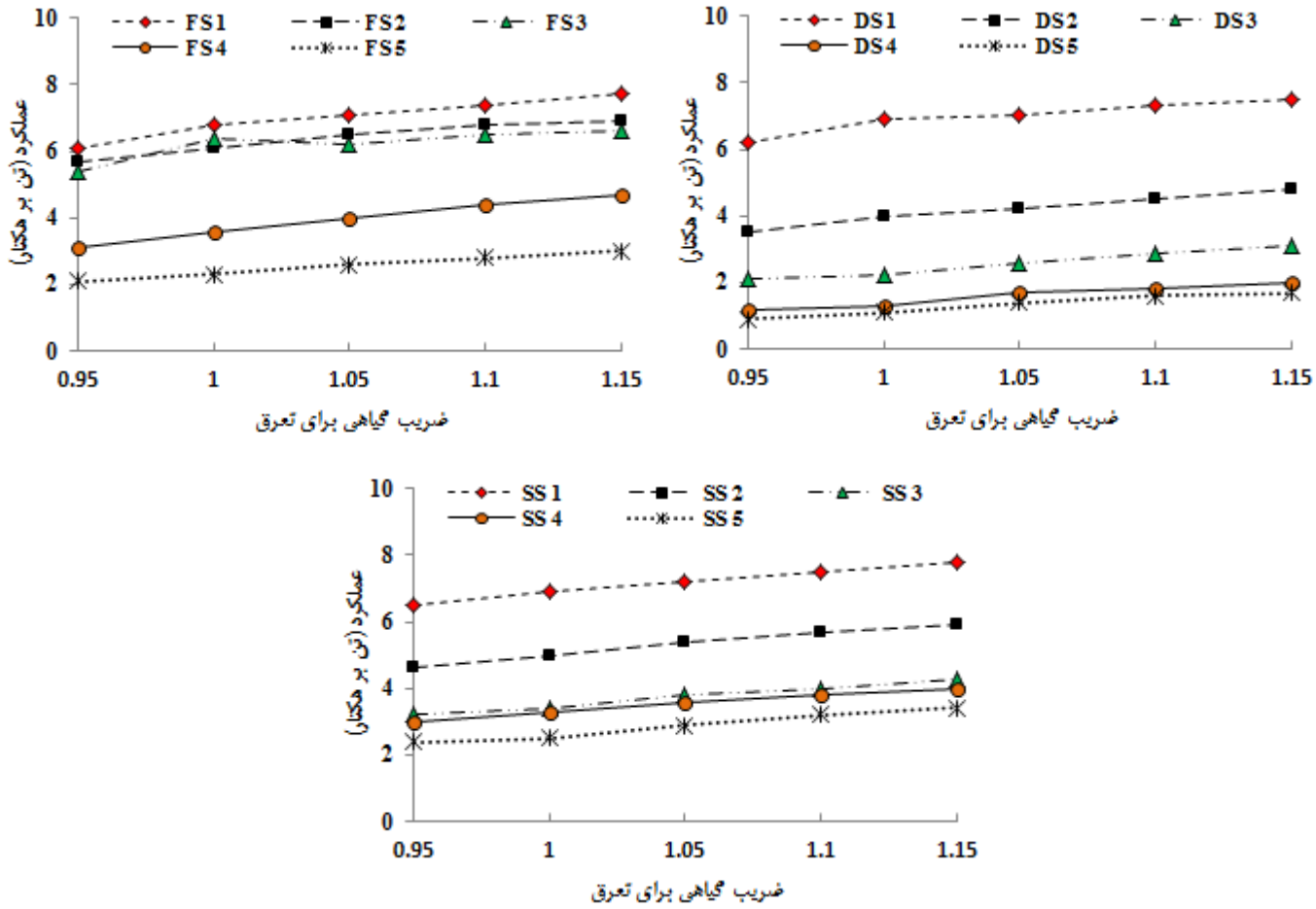
تغییرات عملکرد نسبت به مقادیر مختلف پارامتر *WP برای تیمارهای مختلف آبیاری در شکل (۲) نشان داده شده است. در آبیاری بارانی با آب شور (D)، با افزایش *WP، عملکرد نیز افزایش یافت. در شوری ۲/۵ دسی زیمنس بر متر (S1)، اختلاف بین بیشترین و کمترین عملکرد برابر با ۲/۸ تن بر هکتار بود. این اختلاف برای تیمارهای S2 الی S5 به ترتیب ۲/۷، ۲/۲، ۱/۷ و ۱/۷ تن بر هکتار بود. با افزایش شوری آب آبیاری، حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات پارامتر *WP اندکی کاهش یافت. این نتایج با مراجعه به جدول (۴) نیز قابل استنباط است به‌طوری‌که ضریب حساسیت برای تیمارهای S1 تا S5 در آبیاری بارانی با آب شور (D) به ترتیب برابر با ۱/۰۴، ۱، ۱، ۰/۹۵ و ۰/۹۴ بود؛ بنابراین حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات پارامتر *WP در شوری‌های S1 الی S3 در دسته بسیار زیاد و در سایر تیمارهای شوری در دسته زیاد قرار داشت. حساسیت مدل AquaCrop با کاربرد آب شور همراه با پس آبیاری با آب غیر شور برای شستشوی برگ‌ها در تیمار آبیاری F بیشتر شد. به‌طوری‌که در تیمارهای شوری مشابه (S1 تا S5)، عملکرد شبیه‌سازی‌شده ذرت در شرایط آبیاری F بیشتر از آبیاری D بود. به‌خصوص در مقادیر *WP کمتر از ۳۳/۷ گرم بر مترمربع، عملکرد دو تیمار شوری S2 و S3 به تیمار S1 نزدیک‌تر بود و با افزایش مقادیر پارامتر *WP اختلاف بین آن‌ها افزایش یافت. به دلیل استفاده

از آب شور همراه با پس آبیاری با آب غیر شور برای شستشوی برگ-ها، اثرات تنش شوری در مقادیر پایین‌ترِ *WP، بر عملکرد دانه ذرت اثر کمتری داشته است. این شرایط برای تیمارهای شوری S4 و S5 (در تیمار آبیاری F) نیز مشاهده می‌شود. روند تغییرات در تیمار آبیاری جویچه‌ای (S) مشابه تیمار آبیاری D بود. با این تفاوت که اختلاف بین عملکرد در مقادیر مختلف *WP در سه تیمار شوری S3، S4 و S5 مشابه بود؛ بنابراین تغییرات *WP با افزایش میزان شوری در روش‌های مختلف آبیاری بر حساسیت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد مؤثر بود.

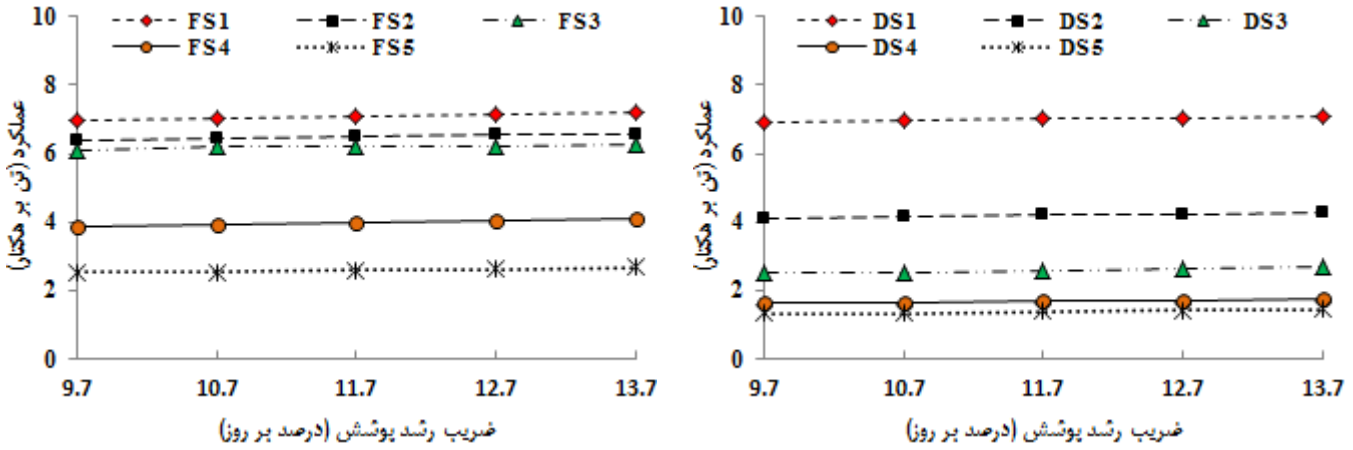


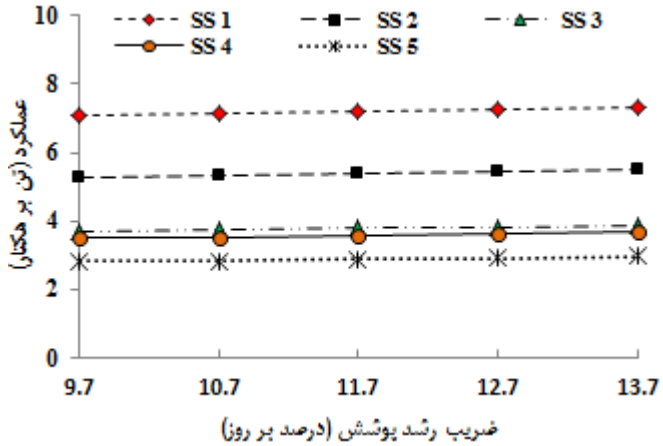
شکل ۲- تغییرات عملکرد ذرت در مقادیر مختلف بهره‌وری آب نرمال شده (*WP)

تغییرات عملکرد برای مقادیر مختلف پارامتر K_{CT} در شکل (۳) نشان داده شده است. افزایش K_{CT} سبب افزایش عملکرد در همه‌ی تیمارها شد. لیکن این تغییرات برای همه تیمارهای شوری یکسان نبود. بیشترین و کمترین اختلاف بین عملکرد به ترتیب در تیمارهای FS4 (۳/۳ تن بر هکتار) و DS5 (۱/۷ تن بر هکتار) مشاهده شد. در واقع در تیمار FS4، عملکرد در مقادیر K_{CT} برای ۰/۹۵ و ۱/۱۵ به ترتیب برابر با ۲/۱ و ۵/۴ تن بر هکتار بود. این مقادیر در تیمار DS5 به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۲ تن بر هکتار به دست آمد؛ بنابراین حتی در این تیمار نیز تعیین اشتباه K_{CT} سبب بروز اختلاف شدیدی در عملکرد شبیه‌سازی‌شده می‌شود. در شرایط مدیریت آبیاری (F)، اختلاف بین تیمارهای شوری S1 تا S3 در مقادیر پایین K_{CT} کمتر بود. مشابه این نتایج برای پارامتر *WP مشاهده شد؛ بنابراین تغییرات شوری آب آبیاری بر K_{CT} در مقدار عملکرد شبیه‌سازی‌شده مؤثر بود. حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات پارامتر CGC در همه تیمارها در دسته کم قرار داشت؛ بنابراین تغییرات این پارامتر اثر چندانی بر مقادیر عملکرد نداشت (شکل ۴). گرچه با افزایش مقدار این پارامتر، عملکرد ذرت افزایش یافت. بیشترین و کمترین اختلاف عملکرد در مقادیر مختلف پارامتر CGC به ترتیب برابر با ۰/۲۴ و ۰/۱۲ تن در هکتار بود؛ بنابراین واسنجی این پارامتر اثر چندانی بر تغییرات عملکرد شبیه‌سازی‌شده ندارد. به همین دلیل در شرایطی که اختلاف بین مقادیر عملکرد واقعی و شبیه‌سازی‌شده زیاد است، تغییر این پارامتر در اولویت قرار نمی‌گیرد و بهتر است به پارامترهای *WP و K_{CT} رجوع کرد.



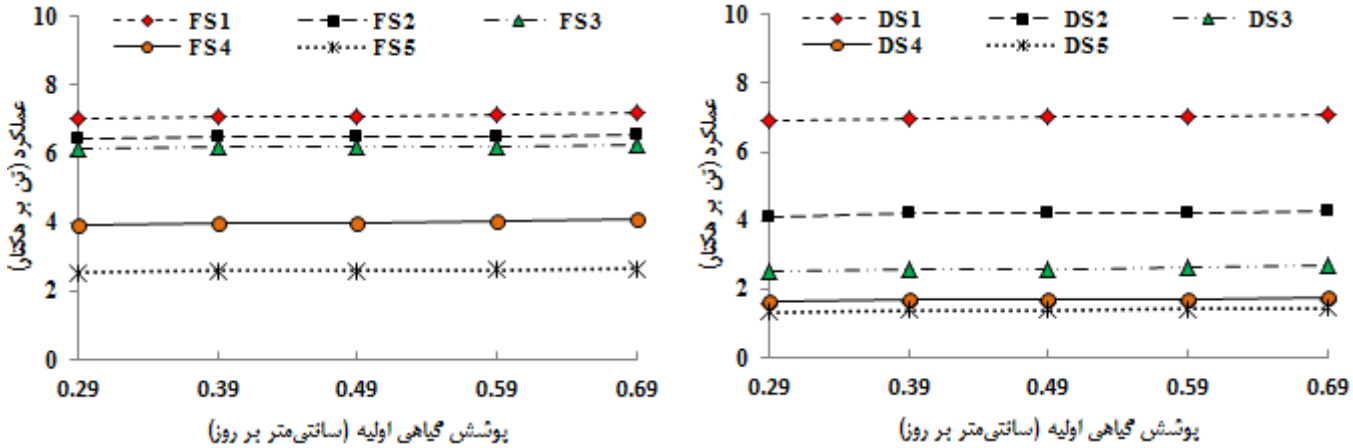
شکل ۳- تغییرات عملکرد ذرت در مقادیر مختلف ضریب گیاهی برای تعرق (K_{CTrx})

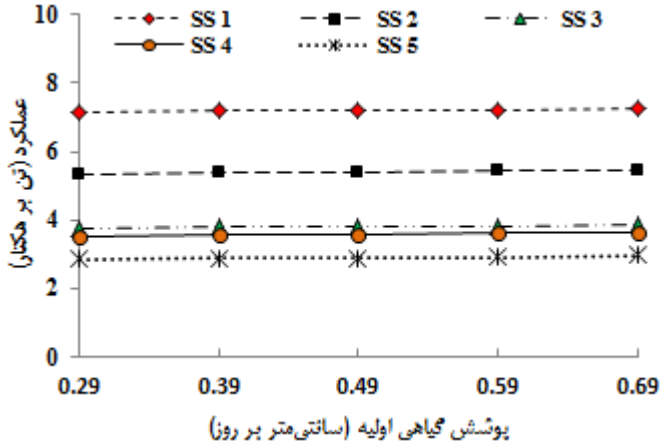




شکل ٤- تغییرات عملکرد ذرت در مقادیر مختلف ضریب رشد پوشش (CGC)

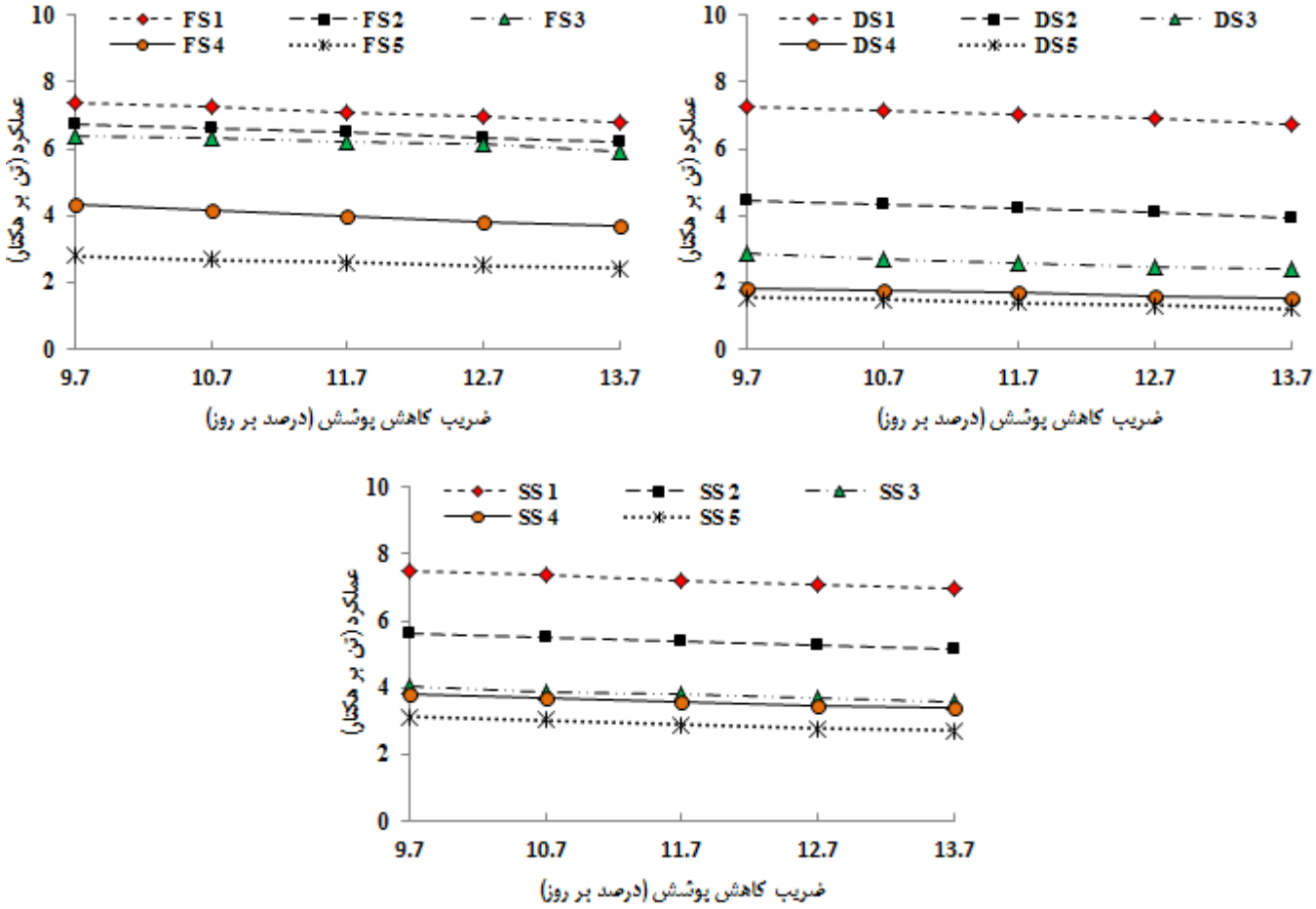
پارامتر CC_0 حساسیتی بر مقادیر عملکرد در هیچ‌کدام از تیمارهای آبیاری و شوری نداشت؛ بنابراین نتایج به‌دست‌آمده در بازه در نظر گرفته‌شده برای این پارامتر برای هر تیمار یکسان بود (شکل ۵). بر اساس رابطه (۴)، حساسیت CC_0 بر مقدار عملکرد تا حدودی به میزان حساسیت CGC وابسته است؛ بنابراین در شرایطی که CGC اثر چندانی بر تغییرات عملکرد شبیه‌سازی‌شده نداشته باشد، عملاً اثرگذاری CC_0 نیز منتفی است. این نتایج نیز توسط برخی محققان مانند احمدی و همکاران (۱۴۰۰) گزارش شده است.





شکل ۵- تغییرات عملکرد ذرت در مقادیر مختلف پوشش گیاهی اولیه (CC_0)

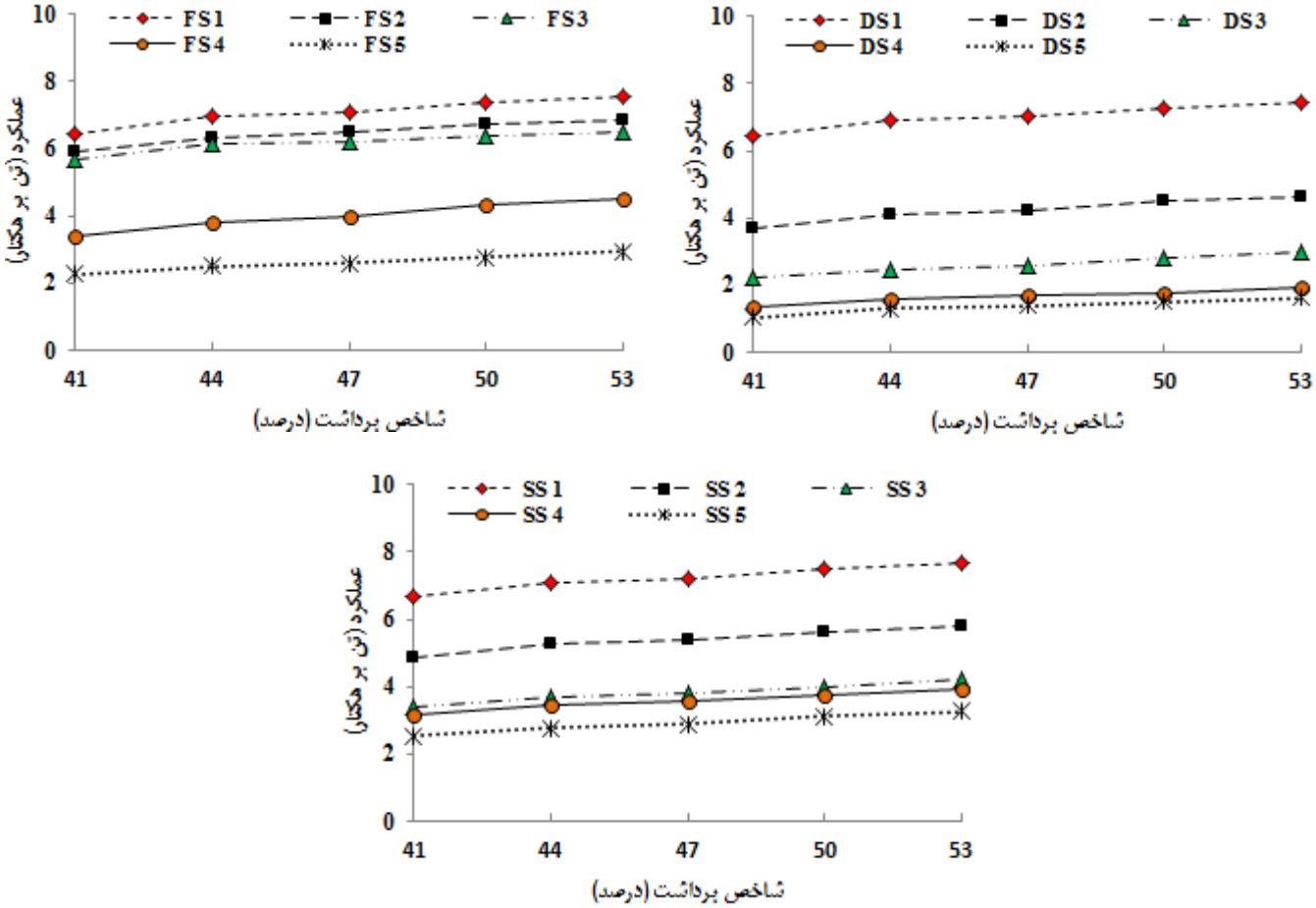
افزایش مقادیر پارامتر CDC، سبب کاهش عملکرد ذرت دانه‌ای شد (شکل ۶). این نتایج توسط احمدی و همکاران (۱۴۰۰) و رحیمی‌خوب و همکاران (۱۳۹۹) گزارش شده است. بدین ترتیب با افزایش این پارامتر عملکرد گیاهان کاهش و با کاهش آن عملکرد گیاهان افزایش می‌یابد؛ بنابراین توجه به این موضوع در مرحله واسنجی لازم است. تغییرات عملکرد نشان داد که حساسیت مدل AquaCrop نسبت به این پارامتر بیشتر از CGC بود. در جدول (۴)، حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات این پارامتر در دسته متوسط قرار داشت. نتایج نشان داد که تغییرات عملکرد برای تیمارهای مختلف بین دو مقدار ۰/۶۴–۰/۳۲ تن بر هکتار متغیر است؛ بنابراین در شرایطی که تغییرات K_{CT} سبب ایجاد اختلاف بیشتر در مرحله واسنجی می‌شود، بهتر است از تغییر CDC استفاده کرد. با افزایش شوری آب آبیاری، حساسیت مدل AquaCrop به تغییر این پارامتر اندکی کاهش یافت به‌طوری‌که حداکثر اختلاف عملکرد بین تیمارهای شوری S1 الی S5 در آبیاری‌های D، F و S به ترتیب برابر با ۰/۲۱، ۰/۲۳ و ۰/۱۴ تن در هکتار بود. البته روش آبیاری نیز بر حساسیت مدل AquaCrop مؤثر بود.



شکل ٦- تغییرات عملکرد ذرت در مقادیر مختلف ضریب کاهش پوشش (CDC)

حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات پارامتر HI در دسته زیاد قرار داشت ولی نسبت به دو پارامتر WP* و K_{CT} به نوع سیستم آبیاری و شوری آب آبیاری حساسیت کمتری داشت (شکل ۷). بیشترین و کمترین اختلاف عملکرد به ترتیب برابر با ۱/۱۶ و ۰/۶ تن در هکتار بود؛ بنابراین در شرایطی که لازم است اختلاف عملکرد در این دامنه (۱/۱۶–۰/۶ تن در هکتار) بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده در مرحله واسنجی اصلاح شود، بهتر است از تغییرات HI استفاده شود. با افزایش شوری آب آبیاری، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات HI کاهش یافت به‌طوری‌که در تیمار آبیاری بارانی با آب شور (D)، اختلاف عملکرد بین شاخص برداشت ۴۱ الی ۵۳ درصد برای شوری‌های S1 الی S5 به ترتیب برابر با ۰/۹۸، ۰/۹۵، ۰/۷۸، ۰/۶ و ۰/۶ تن در هکتار بود. این مقادیر برای

تیمار آبیاری F به ترتیب برابر با ۱/۱۲، ۰/۹۱، ۰/۸۳، ۱/۱۶ و ۰/۶۷ تن در هکتار و برای تیمار آبیاری S به ترتیب برابر با ۰/۹۵، ۰/۹۴، ۰/۸۱، ۰/۷۷ و ۰/۷۵ تن در هکتار بود. مقایسه روش‌های آبیاری نشان داد که در مقادیر مختلف HI، مدل AquaCrop حساسیت چندانی به تغییر روش آبیاری نداشت.



شکل ۷- تغییرات عملکرد ذرت در مقادیر مختلف شاخص برداشت (HI)

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزایش شوری آب آبیاری از میزان حساسیت پارامترها کاست. از طرفی، روش آبیاری اثر چندانی بر حساسیت مدل AquaCrop نداشت. همچنین حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات CC_0 و CGC بسیار کم و نسبت به WP* و K_{CT} زیاد بود. حساسیت این مدل گیاهی نسبت به سایر پارامترها کم تا متوسط بود. از طرفی، افزایش پارامترها، به‌جز CDC، سبب افزایش عملکرد ذرت دانه‌ای شد؛ بنابراین اگر در مرحله واسنجی تغییرات عملکرد واقعی و شبیه‌سازی‌شده بیشتر از یک تن در هکتار بود بهتر است دو پارامتر WP* و K_{CT} تغییر داده شوند. در شرایطی که اختلاف عملکرد واقعی و شبیه‌سازی‌شده کمتر از این مقدار است، تغییر پارامترهای HI و CDC مناسب‌تر است. برای کاهش خطای واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop در تحقیقات آتی، لازم است پارامترها در شرایط شوری کمتر مورد واسنجی قرار گیرند. همچنین می‌توان با داشتن اطلاعات یک روش آبیاری، برای سایر شیوه‌های آبیاری نیز واسنجی یا صحت‌سنجی را انجام داد.

منابع

ابراهیمی‌پاک، ن، ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۸(۱): ۱۱۷-۱۳۲.

ابراهیمی‌پاک، ن، ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst در

شبیه سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۳): ۷۱۵-۷۲۶.

احمدی، م.، قنبرپوری، م. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۰. مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدلAquaCrop. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۸(۱): ۳۰-۱۵.

ادبی، و.، عزیزیان، ا.، رمضانی اعتدالی، ه.، کاویانی، ع. و آبابایی، ب. ۱۳۹۸. آنالیز حساسیت موضعی مدل AquaCrop برای دو محصول گندم و ذرت در دو منطقه دشت قزوین و پارس آباد مغان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۶): ۱۵۶۵-۱۵۷۹.

اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۵(۲-۱۰): ۶۴-۵۳.

رحیمی خوب، ح.، سهرابی، ت. و دلشاد، م. ۱۳۹۹. تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه ریحان در مدل AquaCrop تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱(۶): ۱۳۴۱-۱۳۵۱.

مینایی س (۱۳۹۳) بررسی تأثیر مدیریت آبیاری بارانی با آب شور بر عملکرد و جذب یون‌ها برای ذرت در اقلیم اهواز. پایان نامه دکتری رشته آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۱۵ صفحه.

یعقوب زاده، م.، احمدی، م.، سیدکابلی، ح.، زمانی، غ، ر. و امیرآبادی زاده، م. ۱۳۹۶. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص‌های ETDI و SPI. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۴): ۴۳-۶۱.

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.

Beven, K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. Journal of Hydrology, 44(3-4), 169-190.

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. 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. Spanish Journal of Agricultural Research. 3(1): 134-144.

FAO. 2014. Statistical Database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO, Rome.

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. Archives of Agronomy and Soil Science. 1-19.

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 Journal. 101(3): 488-498.

Hsiao, T. C., Heng, L K., Steduto, P., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop Model parameterization and testing for maize. Agronomy Journal. 101: 448-459.

Jin, X., Li, Z., Nie, C., Xu, X., Feng, H., Guo, W. and Wang, J. 2018. Parameter sensitivity analysis of the AquaCrop model based on extended Fourier amplitude sensitivity under different agro-meteorological conditions and application. Field Crops Research. 226: 1-15.

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.

Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N. and Frede, H. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 27(9-10), 645-654.

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.

Raes, D., Steduto P., Hsiao, T. C. and Freres, E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.

Salemi, H. R., Mohd Soom, M. A., Lee, T. S., Mousavi, S. F., Ganji, A. and Yusoff, M. K. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. African Journal of Agricultural Research. 610(10): 2204-2215.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal. 101(3): 426-437.

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 Journal. 101(3): 509-521.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 16, Oct.-Nov. 2022, p. 727-738

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۶، مهر - آبان ۱۴۰۱، ص. ۷۳۸-۷۲۷

Sensitivity Analysis of AquaCrop Model to Changes in Growth Parameters of Corn under Salinity Stress in Different Irrigation Method

A. Sarkohaki[1], A. Egdernezhad[2*], S. Minaei[3]
Recived: Jan.19, 2022 Accepted: Apr.26, 2022

Abstract

Sensitivity analysis is an essential step before calibrating crop models. It helps researchers to have enough information about the effectiveness of each parameter and changes them during the calibration stage. This issue is more critical due to the increasing use of the AquaCrop model for crop simulation. Therefore, in the study, the sensitivity of AquaCrop to change some crop growth parameters; normalized water productivity (WP*), maximum transpiration coefficient (K_{CTrx}), initial canopy cover (CC_0), canopy growth coefficient (CGC), canopy decline coefficient (CDC) and harvest index (HI) were assessed using Beven (1979) method. For this purpose, the data collected in a research farm in Ahvaz were used. The studied treatments include irrigation methods (D: sprinkler irrigation using saline water, F: Sprinkler irrigation using saline water with post-irrigation with non-saline water to wash the leaves, and S: furrow irrigation using saline water) with five irrigation water qualities (S1: 2.5, S2: 2.3, S3: 3.9, S4: 4.6 and S5: 1.5 dS m-1). The results showed that the highest sensitivity was to changes in normalized water productivity ($0.95 \leq Spi \leq 1.04$) and maximum transpiration coefficient ($0.95 \leq Spi \leq 0.67$). After that, the sensitivity of the harvest index ($0.51 \leq Spi \leq 0.56$) was in the middle category. The range of yield changes in different values of normalized water productivity, maximum transpiration coefficient, harvest index, and canopy decline coefficient was 1.3-3.3, 0.8-1.6, 0.6-1.16, and 0.32-0.64 ton ha-1, respectively. Sensitivity coefficients were positive for all parameters except CDC. Therefore, by increasing the CDC, AquaCrop suffers from underestimation error (between 17-33%), and by increasing the value of other parameters; the model suffers from overestimation error (between 5-70%). Therefore, in situations where the difference between observed and simulated yield is significant, it is better to consider the parameters of normalized water productivity and maximum transpiration coefficient. Otherwise, the parameters of the harvest index and canopy decline coefficient should be considered.

Keywords: Beven Method, Crop Model, Normalized Water Productivity, Simulation

1- M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
2- Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
3- PhD of Irrigation and Drainage, Khuzestan Water and Power Organization, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: a_eigder@ymail.com)