

مقاله علمی - پژوهشی

تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه ذرت در مدل AquaCrop تحت مقادیر مختلف تنش آبی و کود نیتروژن

سید کیومرث پژوهیده^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*} و فریبرز عباسی^۳

چکیده

تحلیل حساسیت مدل‌های گیاهی به محققان کمک می‌کند تا قبل از واسنجی و کاربرد آن، اطلاعات لازم در خصوص واکنش مدل گیاهی به تغییرات پارامترهای ورودی آن را داشته باشند. این موضوع سبب می‌شود تا با آگاهی بیشتری بتوان داده‌های ورودی را به مدل معرفی نموده و دقت مدل را در مرحله واسنجی افزایش داد. نظر به توسعه استفاده از مدل‌های گیاهی در سال‌های اخیر، در این پژوهش به بررسی حساسیت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت دانه‌ای 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 گیاهی (CGC)، ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) و شاخص برداشت (HI) با استفاده از روش (Beven, 1979) پرداخته شد. بدین منظور، از داده‌های دو ساله برداشت شده از مزرعه تحقیقاتی ۴۰۰ هکتاری موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر استفاده شد. فاکتورهای مورد استفاده در این پژوهش شامل سطوح مختلف آب آبیاری (W_1, W_2, W_3, W_4) به ترتیب نشان دهنده تأمین ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و کود نیتروژن (N_1, N_2, N_3, N_4) به ترتیب نشان دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و صفر درصد نیاز کودی بود. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop به تغییرات شاخص برداشت ($0.65 \leq Spi \leq 1.3$) و بهره‌وری آب نرمال شده ($0.55 \leq Spi \leq 1.2$) بیشترین حساسیت و کمترین حساسیت نیز نسبت به تغییرات ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) مشاهده شد ($0.02 \leq Spi \leq 0.07$). ضرایب حساسیت برای همه پارامترها به جز CDC مثبت بود. بنابراین با افزایش مقدار CDC مدل AquaCrop دچار خطای کم‌برآوردی می‌شود. ضریب حساسیت برای تیمارهای N_1 تا N_4 به‌طور متوسط برابر با ۰/۳۲، ۰/۴۱، ۰/۴۶ و ۰/۵۱ بود. این نتایج برای تیمارهای آبیاری W_1 تا W_4 نیز به‌طور متوسط برابر با ۰/۳۶، ۰/۳۹، ۰/۴۴ و ۰/۵۰ بود. از این رو، با افزایش تنش آبی و کودی حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییر همه پارامترها افزایش یافت و بیشترین حساسیت در تیمار W_4N_4 مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای رشدی گیاه، تحلیل حساسیت، روش Beven، شبیه‌سازی، مدل AquaCrop

مقدمه

شمار می‌روند (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹). این مدل‌ها با توجه به قابلیت‌های بالایی که دارند در شبیه‌سازی فرایند رشد گیاهان در شرایط تغییر اقلیم، زیست‌محیطی (Sandhu and Irmak, 2019)، بهینه‌سازی مصرف نهاده‌های کشاورزی و آب (Guo et al., 2019) و بررسی واکنش گیاهان زراعی به میزان مصرف آب (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۸) مورد استفاده قرار می‌گیرند. ماهیت مدل‌های گیاهی به صورتی است که عوامل مختلف محیطی و مدیریتی بر نتایج آن‌ها اثر می‌گذارد. به همین دلیل سبب ایجاد عدم قطعیت در نتایج آن‌ها می‌گردد (Guo et al., 2019). از این رو، با تحلیل حساسیت مدل‌های گیاهی نسبت

مدل‌های گیاهی به‌عنوان ابزارهای مفیدی برای بیان روابط عوامل مختلف اقلیمی، گیاهی، خاک و آب در روند رشد گیاه به

^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 (* نویسنده مسئول: a_eigder@ymail.com)

^۳ استاد پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

بهره‌وری آب نرمال شده^۱ (WP*) و حداکثر ضریب تعرق گیاهی (KCTrx) بیشترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترهای ورودی در مدل AquaCrop داشتند (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹).

همچنین در این پژوهش مشاهده شد که پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) حساسیت کمتری نسبت به سایر پارامترهای رشد داشت و از سوی دیگر اثرگذاری آن بر رشد گیاه ریحان معکوس بود. در واقع با افزایش پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC)، میزان رشد گیاه ریحان کاهش یافت. 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 (CGC)، بیشترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترها داشتند (ادبی و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج این پژوهش نشان داد 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 نداشت. نتایج تحقیق انجام‌شده روی گیاه گندم نیز نشان داد که پارامتر حداکثر ضریب تعرق گیاهی (KCTrx) بیشترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترهای ورودی در مدل AquaCrop داشت (Salemi et al., 2011).

احمدی و همکاران (۱۴۰۰) حساسیت مدل AquaCrop به دو پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده و ضریب رشد گیاهی را برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بیشتر از سایر پارامترها گزارش کردند. در تحقیق دیگری برای گیاه ذرت گزارش گردید که پارامترهای حداکثر ضریب تعرق گیاهی (KCTrx)، ضریب افزایش پوشش گیاهی (CGC)، ضریب زوال پوشش گیاهی^۲ (CDC) و ضریب حداکثر پوشش گیاهی (CCx) بیشترین اثر را بر دقت نتایج خروجی مدل AquaCrop برای این گیاه تحت مدیریت مختلف آب و کود مصرفی داشتند (Guo et al., 2019). همچنین نتایج

به مقادیر پارامترهای ورودی، این مشکل تا حدودی رفع می‌گردد. نتایج تحلیل حساسیت مشخص می‌کند که هرکدام از پارامترهای ورودی تا چه میزان بر فرایند شبیه‌سازی و نتایج خروجی اثرگذار هستند. با استفاده از این نتایج، کاربر به راحتی می‌تواند در مرحله واسنجی توجه خود را به عوامل مؤثرتر معطوف کند (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹).

مدل گیاهی AquaCrop که توسط سازمان خواربار کشاورزی ملل متحد برای مناطق خشک و نیمه‌خشک بسط داده شده است، در بین محققان به‌عنوان یکی از ابزارهای مفید در شبیه‌سازی گیاهان زراعی شناخته شده است. این موضوع سبب شده است تا توجه بسیاری از محققان برای شبیه‌سازی گیاهانی نظیر زعفران (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۷)، جو (Araya et al., 2010)، سیب‌زمینی (انصاری و همکاران، ۱۳۹۸)، چغندر قند (سیاحی و همکاران، ۱۳۹۹)، کلزا (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷)، پنبه (Massasi et al., 2020)، گندم (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰) و برنج (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰) به آن معطوف شود. الگوریتم این مدل بر اساس میزان آب مصرف‌شده توسط گیاه (تعرق) توسعه داده شده است (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹).

داده‌های موردنیاز برای استفاده از مدل AquaCrop به دو دسته ثابت و غیرثابت تقسیم می‌شوند. داده‌های ثابت در این مدل توسط بسط دهندگان آن تعیین و پیشنهاد شده که برای شبیه‌سازی تغییر نکنند. داده‌های غیرثابت در هر شبیه‌سازی باید به‌وسیله واسنجی برآورد شوند (Raes et al., 2012). با این وجود تحقیقات اخیر نشان داده است که کلیه داده‌ها در این مدل برای شرایط محیطی مختلف ثابت نیستند (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹). بدین ترتیب، قبل از استفاده از این مدل گیاهی می‌بایست اثر تغییرات پارامترهای ورودی بر مقدار خروجی مورد تحلیل حساسیت قرار گیرد.

با توجه به این موضوع، در سال‌های اخیر محققان به تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف ورودی این مدل گیاهی پرداخته‌اند. تحقیقات انجام‌شده روی گیاه ریحان نشان می‌دهد که پارامتر

^۱ پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده یکی از ورودی‌های مدل AquaCrop است که بر اساس آن عملکرد زیست‌توده هر گیاه در مقیاس روزانه شبیه‌سازی می‌شود. مقدار این پارامتر برای هر گیاه یکتا است.

^۲ ضریبی برای تعیین میزان کاهش پوشش گیاهی در انتهای دوره رشد است که برحسب درصد بر روز محاسبه می‌شود.

این تحقیق با استفاده از داده‌های برداشت‌شده در دو سال زراعی در مزرعه ۴۰۰ هکتاری موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در کرج انجام شد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۱؛ عزیزاده و عباسی، ۱۳۹۶). در این پژوهش، تیمارهای مقدار آب آبیاری (W1، W2، W3 و W4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی) و مقدار کود نیتروژن (N1، N2، N3 و N4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و صفر درصد نیاز کودی) ذرت دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش خاک در جدول (۱) نشان داده شده است. آب مورد نیاز برای آبیاری بر اساس تبخیر از تشت کلاس A و با اعمال ضرایب تشت تبخیر و گیاهی اعمال شد. بذر مصرفی ذرت هیبرید دابل کراس ۳۷۰ با تراکم ۸۵ هزار بوته در هکتار در اواخر خرداد کاشته شد. مبارزه با علف‌های هرز نیز از طریق سم‌پاشی قبل از کاشت و وجین دستی انجام شد.

آبیاری به صورت جویچه‌ای انجام شد. پنج جویچه برای هر تیمار در نظر گرفته شد. سه جویچه میانی به منظور برداشت محصول و دو جویچه کناری به منظور اثر حاشیه‌ای منظور شدند. شیب جویچه‌ها ۰/۰۰۶ متر بر متر، فاصله جویچه‌ها از هم ۷۵ سانتی‌متر و طول جویچه‌ها ۱۶۵ متر در نظر گرفته شد. تیمارهای آبیاری ۲۵ روز پس از کاشت اعمال شدند. برای اعمال تیمارهای آبیاری، ابتدا نیاز آبی هر تیمار با استفاده از داده‌های برداشت‌شده از ایستگاه هواشناسی واقع در دو کیلومتری مزرعه آزمایشی تعیین می‌شد. سپس با استفاده از پایش دبی ورودی و خروجی مقدار آب مورد نیاز اعمال می‌گردید. تعیین دبی ورودی با استفاده از کنتور و سنجش دبی خروجی با استفاده از فلوم‌های WSC تیپ ۳ انجام می‌شد. برای تزریق کود به جویچه‌ها از بشکه‌های بزرگ ۲۲۰ لیتری استفاده گردید. محلول کود از طریق بشکه بزرگ وارد بشکه کوچک‌تری (۲۰ لیتری) می‌شد. در بشکه کوچک، شناوری^۱ جهت ثابت نگه‌داشتن دبی تزریق کود نصب گردید. به دلیل اینکه تزریق کود در اواخر آبیاری یکنواختی توزیع بیشتری به همراه دارد، تزریق کود در ۲۰-۳۰ دقیقه انتهایی آبیاری انجام می‌شد.

پژوهش دیگری نشان می‌دهد که ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC0)، بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) و ضریب حداکثر پوشش گیاهی (CCx) مؤثرترین پارامترهای ورودی مدل AquaCrop برای گندم زمستانه در چین و گندم بهاره در کانادا است (Jin et al., 2019).

نتایج تحلیل حساسیت گیاه کلزا نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی مدل AquaCrop نشان داد که این مدل نسبت به تغییرات حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx}) بیشترین حساسیت را داشته و ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زعفران نیز نشان داد که تغییرات ضریب افزایش پوشش گیاهی (CGC) اثر زیادی بر حساسیت نتایج خروجی این مدل گیاهی داشت (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۸).

ذرت یکی از گیاهان زراعی مهم است که در بیش از ۱۸۰ میلیون هکتار از اراضی دنیا کشت می‌شود (FAO, 2014). تقاضا برای تولید این گیاه زراعی هرساله رو به افزایش است. این در حالی است که در مواجهه با تنش‌های آبی و کودی، گیاه ذرت در بسیاری از نقاط جهان دچار کاهش عملکرد می‌شود. با توجه به اهمیت این گیاه زراعی، تاکنون محققان بسیاری از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در استفاده نموده‌اند (Heng et al., 2009; Hsiao et al., 2009; Masanganise et al., 2013; Katerji et al., 2013). لیکن تاکنون توجه کمتری به تحلیل حساسیت مدل گیاهی AquaCrop پیش از واسنجی آن شده است. بر این اساس، تحقیق حاضر با هدف تحلیل حساسیت مدل گیاهی AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)، ضریب حداکثر تعرق گیاهی (K_{CTrx})، ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC0)، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) و شاخص برداشت (HI) ذرت در کرج انجام شد.

مواد و روش‌ها

مطالعات مزرعه‌ای

¹ Float valve

شرح زیر برای تعیین این پارامتر استفاده می‌شود (Steduto et al., 2009).

$$CC = CC_0 \times e^{-CGC} \quad (4)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{CC_x^2}{CC_0} \times e^{-CGC} \quad (5)$$

$$CC = CC_x \left[1 - 0.05 \left(e^{\frac{CDC}{CC_x}} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

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 (۴) تا (۶) 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 بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*)، حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx})، پوشش گیاهی اولیه (CC_0)، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) و شاخص برداشت (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.

در انتهای فصل رشد، عملکرد دانه با برداشت سه جوچه میانی و در رطوبت ۱۴ درصد تعیین شد. برای تعیین کارایی مصرف آب از رابطه (۱) استفاده گردید.

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

که در این معادله، WP : بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y : عملکرد ذرت (کیلوگرم) و W : حجم آب آبیاری (مترمکعب) است.

تشریح مدل AquaCrop

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

$$B = WP^* \sum_{i=1}^n \frac{Tr_i}{ET_{oi}} \quad (2)$$

در این معادله، B : عملکرد زیست‌توده تجمعی (گرم بر مترمربع)، WP^* : بهره‌وری آب نرمال شده (گرم بر مترمربع)، Tr_i : تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز) و ET_{oi} : 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.

$$Tr_i = K_s \times CC \times K_{CTrx} \times ET_{oi} \quad (3)$$

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 (۴ تا ۶) به

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش

عمق خاک سانتی متر	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری خاک گرم بر سانتی متر مکعب	هدایت الکتریکی دسی زیمنس بر متر	ظرفیت زراعی درصد حجمی	نقطه پژمردگی درصد حجمی	رطوبت اشباع درصد حجمی
۰-۲۰	لوم	۱/۳۴	۱/۱۶	۲۹	۱۵	۴۵
۲۰-۴۰	لوم	۱/۴۶	۰/۸۲	۲۹	۱۵	۴۴
۴۰-۶۰	لوم	۱/۴۷	۰/۸۰	۲۸	۱۶	۴۴
۶۰-۸۰	لوم	۱/۵	۰/۸۷	۲۸	۱۶	۴۳

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

پارامتر	علامت	واحد	مقدار اولیه	حد پایین	حد بالا	نمو تغییرات
بهره‌وری آب نرمال شده	WP*	گرم بر مترمربع	۳۳	۳۱	۳۵	۱
حداکثر ضریب تعرق گیاهی	K _{CTrx}	-	۱/۰۵	۰/۹۵	۱/۱۵	۰/۰۵
پوشش گیاهی اولیه	CC _o	سانتی متر مربع	۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۶۹	۰/۱
ضریب رشد پوشش گیاهی	CGC	درصد بر روز	۱۵/۶	۱۳/۶	۱۷/۶	۱
ضریب کاهش پوشش گیاهی	CDC	درصد بر روز	۱۱/۶	۹/۶	۱۳/۶	۱
شاخص برداشت	HI	درصد	۴۸	۵۴	۴۲	۳

به بزرگی مقادیر پارامترهای P_i و y نیز وابسته است. به عنوان مثال، اگر Sp_i 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 گروه کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار می‌گیرند (Lenhart et al., 2002).

جدول ۳- طبقه‌بندی ضریب حساسیت

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

نتایج و بحث

به منظور بررسی اثر تغییرات پارامترهای رشد بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت دانه‌ای، مقادیر هر پارامتر براساس

به منظور تحلیل حساسیت از رابطه ارائه شده توسط (Beven, 1979) استفاده شد (رابطه ۷).

$$S_{P_i} = \lim_{\Delta P_i \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta P_i}{P_i}} = \frac{\partial y}{\partial P_i} \times \frac{P_i}{y} \quad (7)$$

در این رابطه، Sp_i : ضریب حساسیت، P_i : پارامتر مورد بررسی و y : مقدار زیست‌توده است. مقادیر Sp_i : برحسب 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 مانیتیت مورد استفاده 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

نمو ذکر شده در جدول (۲) تغییر داده شد. این مقادیر در مدل گیاه ذرت برای تیمارهای مورد بررسی با استفاده از روش AquaCrop وارد شده و با استفاده از این مدل گیاهی عملکرد ذرت دانه‌ای شبیه‌سازی شد. ضریب حساسیت پارامترهای رشد

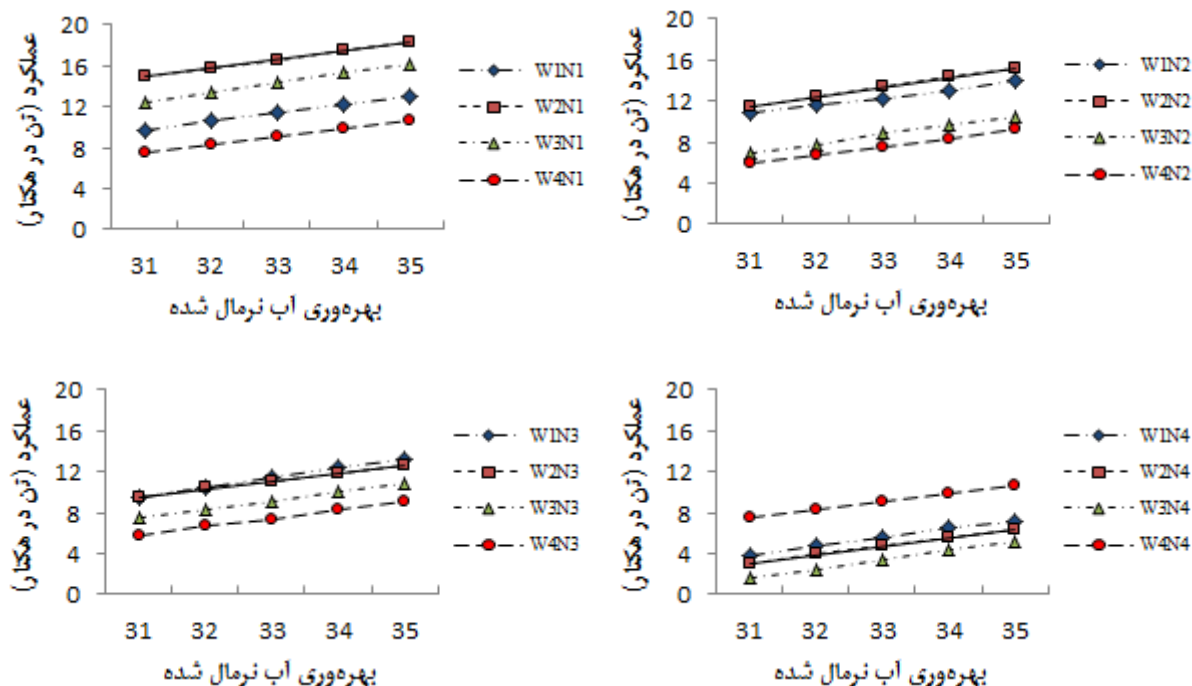
گیاه ذرت برای تیمارهای مورد بررسی با استفاده از روش Beven (1979) (رابطه ۷) تعیین و در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- ضرایب حساسیت پارامترهای رشد گیاه ذرت دانه‌ای

پارامترهای رشد گیاه						تیمار
HI (درصد)	CDC (درصد بر روز)	CGC (درصد بر روز)	CC ₀ (سانتی‌مترمربع)	K _{CTRX} -	WP* (گرم بر مترمربع)	
۰/۶۵	-۰/۰۲	۰/۲۸	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۵۵	W1N1
۰/۷	-۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۰۳	۰/۱۷	۰/۶	W2N1
۰/۷	-۰/۰۳	۰/۳۵	۰/۰۳	۰/۲	۰/۷	W3N1
۰/۹	-۰/۰۴	۰/۳۸	۰/۰۴	۰/۲۵	۰/۸	W4N1
۰/۷	-۰/۰۳	۰/۳	۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۷۵	W1N2
۰/۸	-۰/۰۳	۰/۳۴	۰/۰۶	۰/۳	۰/۸	W2N2
۱/۱	-۰/۰۴	۰/۳۷	۰/۰۶	۰/۳۳	۰/۹	W3N2
۱/۲	-۰/۰۵	۰/۴	۰/۰۷	۰/۳۸	۱	W4N2
۰/۹۴	-۰/۰۳	۰/۳۲	۰/۰۵	۰/۳	۰/۸	W1N3
۱/۰۵	-۰/۰۳	۰/۳۶	۰/۰۶	۰/۳۴	۰/۸۵	W2N3
۱/۱۵	-۰/۰۴	۰/۳۹	۰/۰۶	۰/۳۷	۰/۹۵	W3N3
۱/۲۵	-۰/۰۵	۰/۴۲	۰/۰۷	۰/۴۲	۱/۰۵	W4N3
۱	-۰/۰۵	۰/۴۱	۰/۰۶	۰/۳۸	۰/۹۵	W1N4
۱	-۰/۰۵	۰/۴۵	۰/۰۷	۰/۴۲	۱	W2N4
۱/۲	-۰/۰۶	۰/۴۸	۰/۰۷	۰/۴۵	۱/۱	W3N4
۱/۳	-۰/۰۷	۰/۵۱	۰/۰۸	۰/۵	۱/۲	W4N4
۰/۲۱	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۱۸	انحراف معیار

برای تیمارهای مختلف بین ۰/۵۵ تا ۱/۲ قرار داشت. با توجه به جدول (۳)، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییر پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) در محدوده زیاد و بسیار زیاد قرار داشت. این نتایج با مشاهدات احمدی و همکاران (۱۴۰۰) روی گیاه گندم مطابقت داشت. این محققان حساسیت این پارامتر در شرایط بدون تنش آبی را در بازه زیاد گزارش کردند. نتایج به‌دست‌آمده برای حساسیت بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) در شرایط تغییر کود نیتروژن بر روی گیاه ریحان بین ۱ تا ۱/۰۳ گزارش شده است (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹).

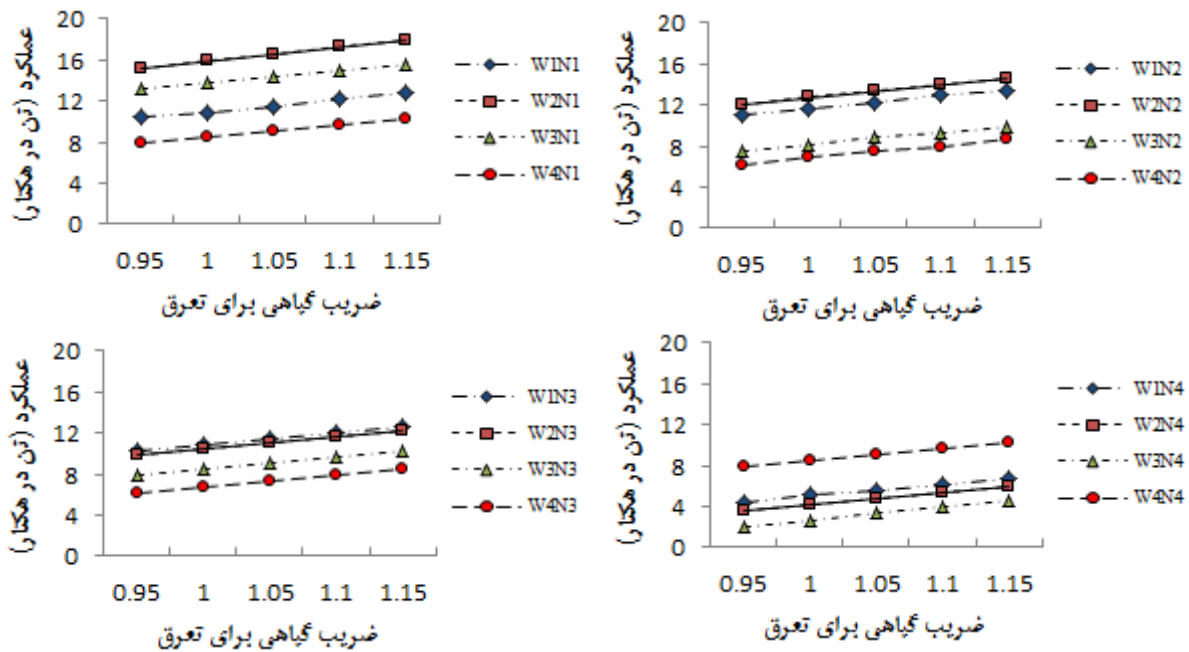
شکل (۱) اثر تغییرات پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) بر مقادیر عملکرد ذرت دانه‌ای را نشان می‌دهد. مقدار اصلی این پارامتر برای گیاه ذرت دانه‌ای در مدل AquaCrop برابر با ۳۳ گرم بر مترمربع است. بازه تغییرات این پارامتر براساس بررسی منابع و تحقیقات انجام‌شده بین ۳۱ تا ۳۵ گرم بر مترمربع در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، روند تغییرات این پارامتر و عملکرد ذرت برای همه تیمارهای مورد بررسی هم‌جهت است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش این پارامتر، عملکرد ذرت دانه‌ای نیز افزایش خواهد یافت. با استفاده از رابطه (۷)، ضریب حساسیت



شکل ۱- اثر تغییر پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت تحت تنش‌های آبی و کودی (W1، W2، W3 و W4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و N1، N2، N3 و N4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز کودی هستند)

مقدار ضریب حداکثر تعرق گیاهی (KCTrx) در مدل AquaCrop برای گیاه ذرت دانه‌ای معادل با ۱/۰۵ تعیین شده است. برای سنجش میزان حساسیت خروجی مدل AquaCrop به تغییرات این پارامتر، دامنه ۰/۹۵ تا ۱/۱۵ برای آن در نظر گرفته شد. مقادیر عملکرد برای این مقادیر در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، رابطه مستقیمی بین افزایش ضریب حداکثر تعرق گیاهی (KCTrx) و عملکرد ذرت دانه‌ای وجود داشت. حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات این پارامتر بین ۰/۱۳ تا ۰/۵ بود. بر اساس جدول (۳)، مدل AquaCrop به تغییرات این پارامتر حساسیت متوسط تا زیاد داشت. با تفکیک تیمارها مشخص شد که حساسیت مدل AquaCrop برای تیمارهای کودی N1 تا N4 به ترتیب برابر با ۰/۱۸، ۰/۳۱، ۰/۳۵ و ۰/۴۳ بود. میزان حساسیت این مدل برای تیمارهای آبی W1 تا W4 به ترتیب برابر با ۰/۲۶، ۰/۳۰، ۰/۳۳ و ۰/۳۸ به دست آمد.

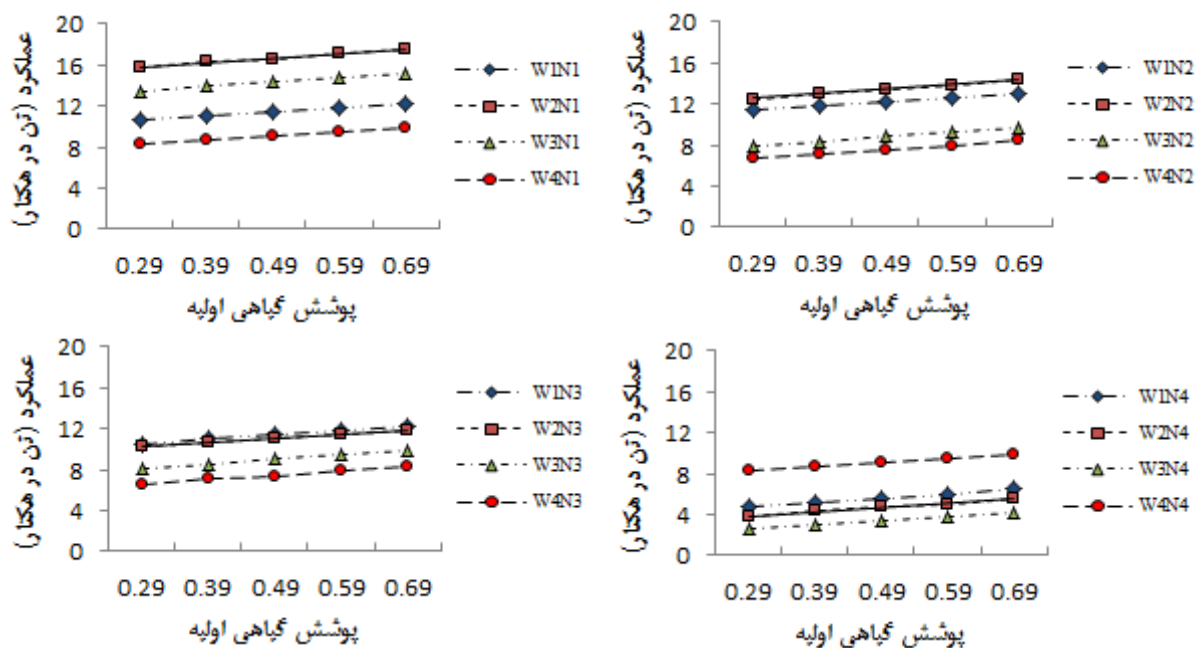
با تفکیک نتایج به دست آمده در جدول (۴)، مشاهده شد که ضریب حساسیت برای تیمارهای N1 تا N4 بر اساس جدول (۳) به‌طور متوسط برابر با ۰/۹، ۰/۸، ۰/۶ و ۰/۹ بود. این نتایج برای تیمارهای آبیاری W1 تا W4 نیز به‌طور متوسط برابر با ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱ بود. بر اساس این نتایج حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) چندان به نوع تیمار (آب یا کود) حساس نبود، بلکه در هر دو تیمار حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) زیاد و خیلی زیاد بود. این نتایج با مشاهدات به دست آمده برای گیاهان جو و تریچه نیز مشابه بود. محققان مقادیر ضریب حساسیت برای این دو گیاه را به ترتیب برابر با ۰/۹۶ و ۰/۸۸ گزارش کردند (کریمی اورگانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ حاجی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸). از سوی دیگر، مقایسه نتایج به دست آمده با تحقیقات سایر محققان نشان داد که حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) به نوع گیاه بستگی دارد.



شکل ۲- اثر تغییر پارامتر حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTRx}) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت تحت تنش‌های آبی و کودی W4 و W3، W2، W1 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و N4، N3، N2، N1 و N4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و صفر درصد نیاز کودی هستند.

بر عملکرد گیاه ذرت دانه‌ای، مقدار این پارامتر بین ۰/۲۹ تا ۰/۶۹ مترمربع تغییر داده شد و در مدل AquaCrop وارد شد. نتایج به‌دست‌آمده برای تیمارهای مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. ضریب حساسیت برای این پارامتر بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۸ متغیر بود. بنابراین حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0) در دسته کم تا متوسط قرار داشت. با تفکیک تیمارها به دو گروه تنش کودی (N1 تا N4) و آبی (W1 تا W4)، مشاهده شد که این مدل گیاهی به نوع تنش حساس نبود. متوسط حساسیت مدل AquaCrop برای تیمارهای تنش کودی بین ۰/۱۸ تا ۰/۴۳ و برای تنش آبی بین ۰/۲۶ تا ۰/۳۸ مشاهده شد. با این وجود، با افزایش مقدار ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0)، عملکرد ذرت دانه‌ای در همه تیمارها روند صعودی داشت.

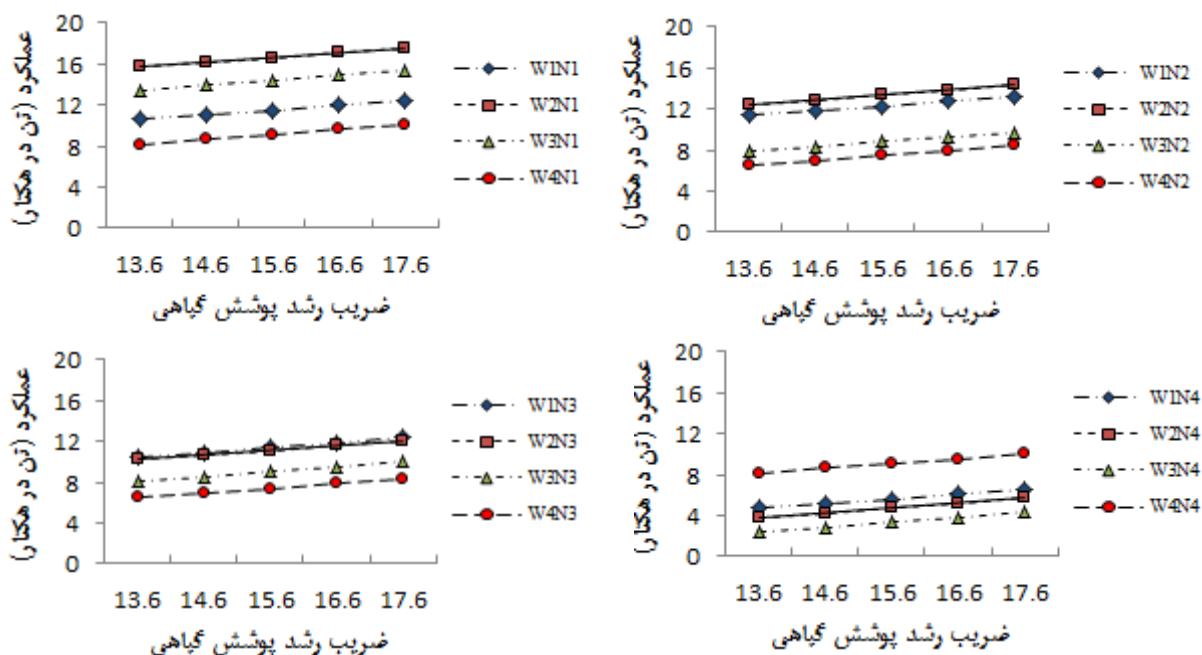
همانند پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*)، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر حداکثر تعرق گیاهی (K_{CTRx}) با افزایش تنش کودی و آبی افزایش یافت. در نتیجه اگر این مدل در شرایط تنش واسنجی می‌شود، لازم است دقت بیشتری به تغییرات این دو پارامتر نمود. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات ضریب حداکثر تعرق گیاهی (K_{CTRx}) برای گیاه ریحان بین ۰/۵۸ تا ۰/۶۶ گزارش شده است (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹) که در مقایسه با نتایج این تحقیق بیشتر است. بنابراین می‌توان حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات این پارامتر را به نوع گیاه وابسته دانست. مقدار در نظر گرفته‌شده در مدل AquaCrop برای ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0) ذرت دانه‌ای برابر با ۰/۴۹ سانتی‌متر مربع بر گیاه است. برای بررسی اثر تغییرات آن



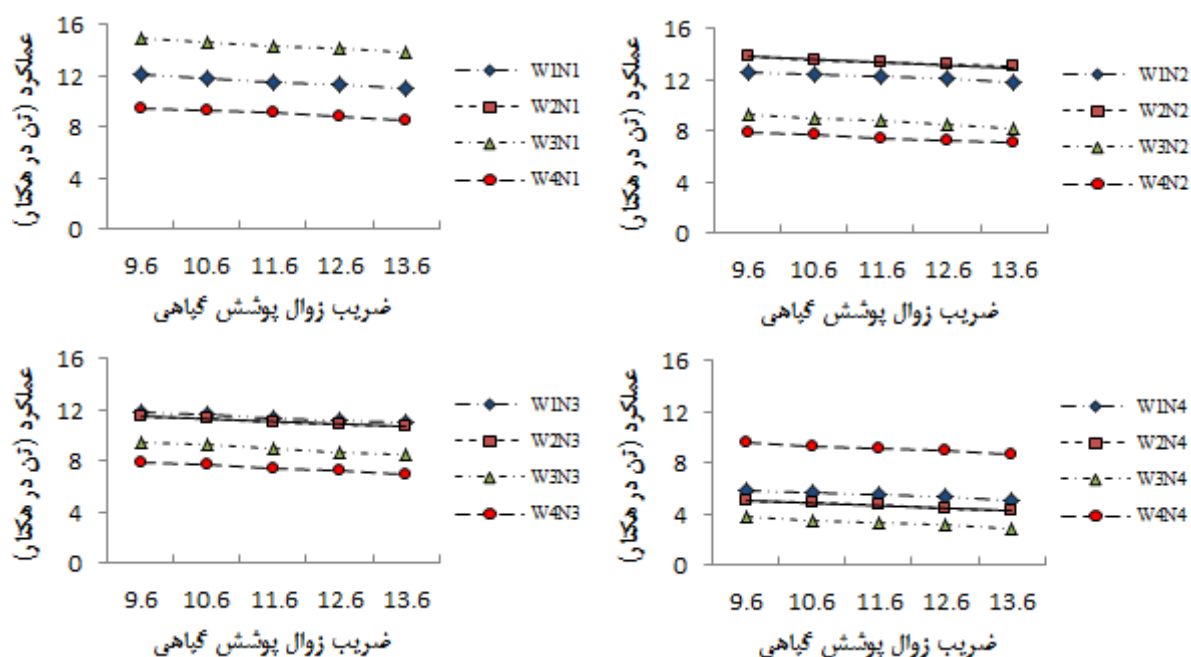
شکل ۳- اثر تغییر پارامتر ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت تحت تنش‌های آبی و کودی (W_1, W_2, W_3 و W_4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و N_1, N_2, N_3 و N_4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و صفر درصد نیاز کودی هستند)

مقدار اولیه پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) برای ذرت دانه‌ای برابر با ۱۱/۶ درصد بر روز است. برای برآورد ضریب حساسیت این پارامتر، مقادیر مختلف از ۹/۶ تا ۱۳/۶ درصد بر روز با نمو ۱ در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود تغییرات عملکرد ذرت دانه‌ای نسبت به این پارامتر معکوس است. در واقع با افزایش این پارامتر مقدار عملکرد ذرت دانه‌ای در همه تیمارها کاهش یافت. بنابراین اگر مقدار پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) در مدل AquaCrop بیشتر از مقدار واقعی در نظر گرفته شود سبب کم‌برآوردی این مدل خواهد شد. ضریب حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر بین ۰/۰۷- تا ۰/۰۲- بود که در دامنه حساسیت کم قرار داشت. تفکیک تیمارها به دو نوع تنش آبی و کودی نشان داد که دامنه ضریب حساسیت برای این دو تنش یکسان است.

مدل AquaCrop با مقادیر مختلف پارامتر ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) از ۱۳/۶ تا ۱۷/۶ درصد بر روز برای تیمارهای مختلف اجرا شد. مقدار اولیه برای این پارامتر برابر با ۱۵/۶ درصد بر روز است و نتایج تغییرات آن در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، با افزایش ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، مقدار عملکرد ذرت دانه‌ای نیز در همه تیمارها افزایش یافت. ضریب حساسیت به دست‌آمده برای این پارامتر بین ۰/۲۸ تا ۰/۵۱ متغیر بود. بر اساس جدول (۳)، مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) حساسیت زیاد داشت. تفکیک تیمارها به دو تنش آبی و کودی نیز نشان داد که دامنه حساسیت برای تنش آبی بین ۰/۳۲ تا ۰/۴۲ و برای تنش کودی بین ۰/۳۳ تا ۰/۴۶ بود که به نظر می‌رسد مدل در شرایط تنش آبی و کودی توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی داشته است.



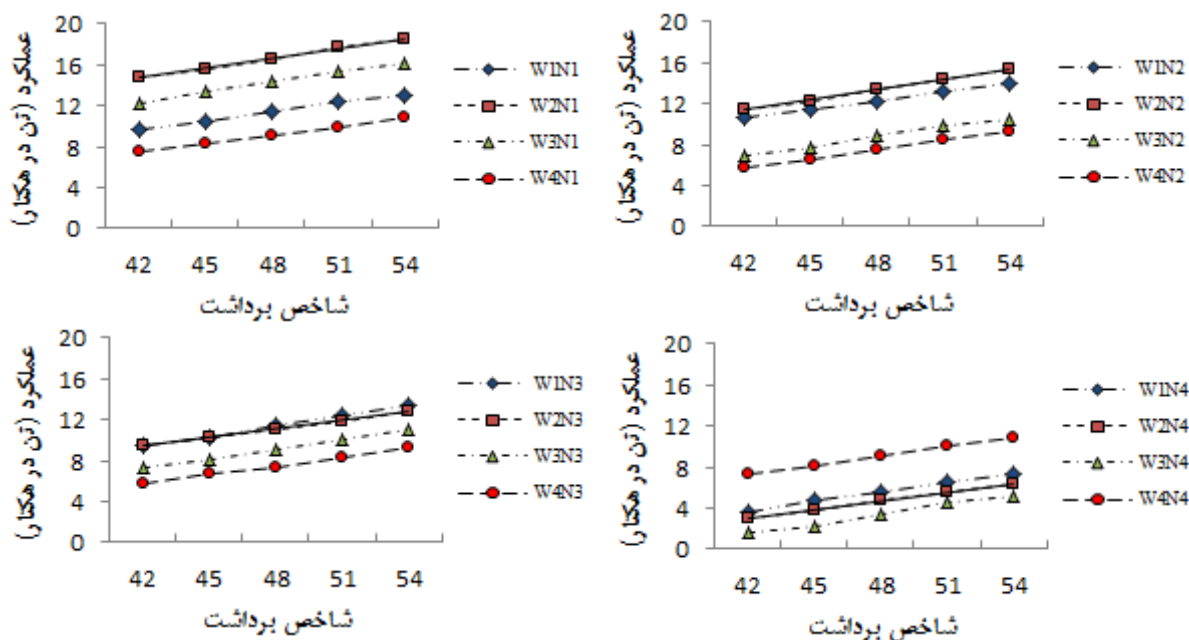
شکل ۴- اثر تغییر پارامتر ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت تحت تنش‌های آبی و کودی (W1، W2، W3، W4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و N1، N2، N3 و N4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و صفر درصد نیاز کودی هستند).



شکل ۵- اثر تغییر پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت تحت تنش‌های آبی و کودی (W1، W2، W3 و W4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و N1، N2، N3 و N4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و صفر درصد نیاز کودی هستند).

عملکرد در هر دو شرایط تنش آبی و کودی نشان داد که مدل AquaCrop برابر با ۴۸ درصد تعیین شده است. در این پژوهش نمو ۳ درصدی در هر مرحله برای این پارامتر در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است. همانند اکثر پارامترها، عملکرد ذرت دانه‌ای با افزایش شاخص برداشت روند صعودی و با کاهش آن روند نزولی داشت. مقایسه تغییرات

مقدار پیش فرض شاخص برداشت برای ذرت در مدل AquaCrop برابر با ۴۸ درصد تعیین شده است. در این پژوهش نمو ۳ درصدی در هر مرحله برای این پارامتر در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است. همانند اکثر پارامترها، عملکرد ذرت دانه‌ای با افزایش شاخص برداشت روند صعودی و با کاهش آن روند نزولی داشت. مقایسه تغییرات



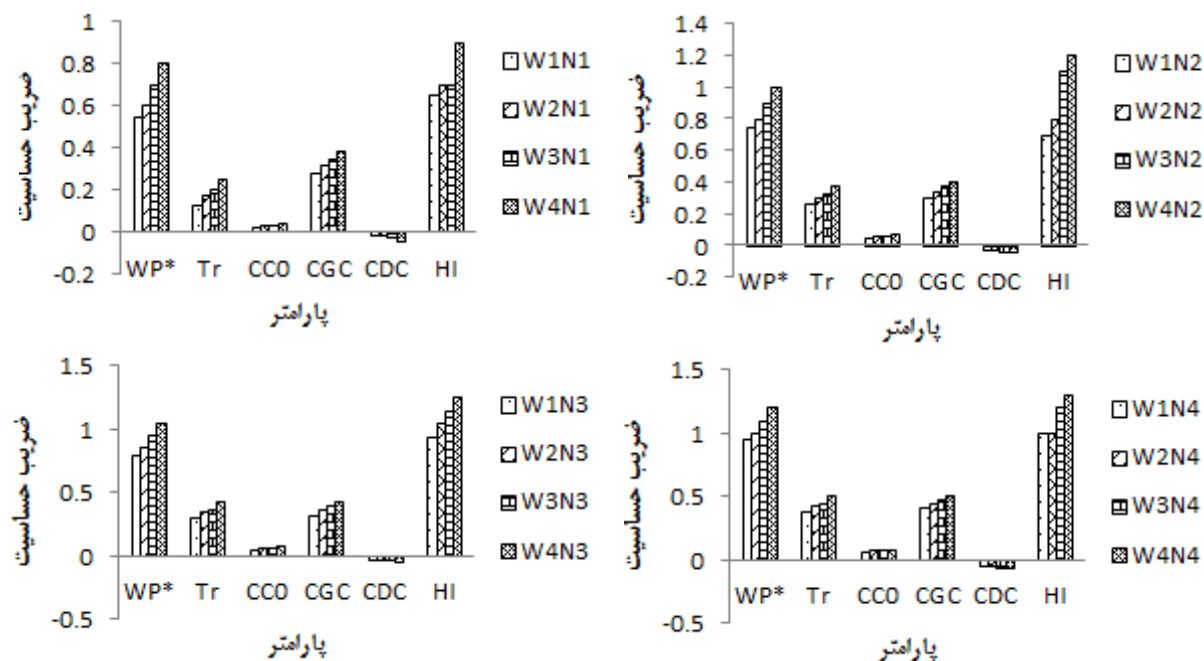
شکل ۶- اثر تغییر پارامتر شاخص برداشت (HI) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت تحت تنش‌های آبی و کودی (W1، W2، W3، W4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و صفر درصد نیاز کودی هستند)

حساسیت برای همه پارامترها افزایش یافت. انحراف معیار تغییرات ضرایب حساسیت نیز در جدول (۴) ارائه شده است و مقادیر آن در محدوده قابل قبول بود. مقادیر آن برای پارامترهای شاخص برداشت (۰/۲۲)، بهره‌وری آب نرمال شده (۰/۱۸) و ضریب گیاهی برای تعرق (۰/۱۰) از سایر پارامترها بیشتر بود. این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات تنش آبی و کودی اثر بیشتری بر تغییرات این پارامترها داشت. نتایج به دست آمده از این تحقیق با مشاهدات سایر محققان در خصوص گیاهان ذرت (Guo et al., 2019)، جو (کریمی اورگانی و همکارانی، ۱۳۹۵)، تربچه (حاجی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸) و ریحان (رحیمی خوب و

به‌منظور مقایسه ضرایب حساسیت پارامترهای رشد گیاه ذرت دانه‌ای تحت تیمارهای مختلف مورد بررسی در این پژوهش، مقادیر آن‌ها در نموداری مطابق شکل (۷) ارائه شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، شاخص برداشت (HI) و پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) در همه تیمارها بیشترین مقدار ضریب حساسیت را داشتند. پس از آن، پارامترهای ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) و حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx}) بود. ضریب حساسیت برای هر دو پارامتر ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0) و ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) بین ۰/۰۸ - ۰/۰۲ برآورد گردید. با افزایش تنش کودی مقدار ضریب

منتشر شده از کریمی اورگانی و همکاران (۱۳۹۵) و رحیمی خوب و همکاران (۱۳۹۹) تغییرات ضریب حساسیت در شرایط تنش کمتر از دو برابر بود و به نتایج تحقیق حاضر نزدیک تر بود.

همکاران، (۱۳۹۹) مطابقت داشت. در مشاهدات حاجی زاده و همکاران (۱۳۹۸) با افزایش کم آبیاری تا ۶۰ درصد، حساسیت برخی پارامترها بیش از ۱۰ برابر افزایش می یابد. لیکن در نتایج



شکل ۷- مقایسه ضرایب حساسیت پارامترهای رشد گیاه ذرت دانه ای تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبی و کود نیتروژن (W2، W1، W3 و W4 به ترتیب نشان دهنده تأمین ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و N1، N2، N3 و N4 به ترتیب نشان دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و صفر درصد نیاز کودی هستند)

کم برآوردی خواهد شد. درحالی که این روند برای سایر پارامترها سبب خطای بیش برآوردی برای مدل AquaCrop می شود. با افزایش تنش آبی و کودی حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییر همه پارامترها افزایش یافت و بیشترین حساسیت در تیمار W4N4 (تأمین ۶۰ درصد نیاز آبی و صفر درصد نیاز کودی) مشاهده شد. با توجه به اینکه تحقیقات انجام شده در این خصوص اندک است، پیشنهاد می شود این روش برای سایر گیاهان موجود در پایگاه داده مدل AquaCrop از جمله کلزا، چغندر قند، سیب زمینی و ... نیز انجام شود.

منابع

ابراهیمی پاک، ن، ع، احمدی، م، اگدرنژاد، ا. و خاشعی سیوکی،

نتیجه گیری و پیشنهادها

در این پژوهش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاه ذرت دانه ای بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین حساسیت نسبت به تغییرات شاخص برداشت (HI) و پارامتر بهره وری آب نرمال شده (WP*) و کمترین حساسیت نسبت به تغییرات پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) وجود داشت. بنابراین دقت تعیین پارامترهای شاخص برداشت (HI) و بهره وری آب نرمال شده (WP*) باید به مراتب بیشتر از ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) باشد. ضرایب حساسیت برای همه پارامترها به جز ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) مثبت بود. درواقع با افزایش مقدار ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC)، مدل AquaCrop دچار خطای

سیاحی، ح.، اگدرنژاد، ا. و ابراهیمی پاک، ن. ع. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل‌های گیاهی AquaCrop و WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقد تحت دوره‌های مختلف آبیاری و تنش کودی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱۰): ۲۵۹۳-۲۶۰۵.

عباسی، ف.، چوکان، ر.، علیزاده، ح. ع. و لیاقت، ع. ۱۳۹۱. بررسی اثر کودآبیاری جویچه‌ای بر کارایی مصرف کود و آب عملکرد و برخی صفات ذرت دانه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۳(۴): ۳۷۵-۳۸۵.

علیزاده، ح. ع. و عباسی، ف. ۱۳۹۶. بررسی واکنش عملکرد ذرت دانه‌ای به سطوح مختلف آب و کود مصرفی با استفاده از مدل AquaCrop. مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۴۰(۲): ۱۱۹-۱۳۴.

کریمی اورگانی، ح.، رحیمی خوب، ع. و نظری فر، م. ه. ۱۳۹۵. واسنجی و صحت‌سنجی مدل آکوآکراپ برای جو در منطقه پاکدشت. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۷(۳): ۵۳۹-۵۴۹.

موسوی، س.، ح.، اگدرنژاد، ا. و گیلانی، ع. ع. ۱۴۰۰. شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ارقام مختلف برنج تحت شرایط مختلف کاشت با کاربرد مدل‌های AquaCrop، CropSyst و WOFOST. نشریه اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، ۱۵(۲): ۲۲۱-۲۲۸.

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.

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

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. *Agronomy*, 101(3): 488-498.

ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف ژئولیت. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۸(۱): ۱۱۷-۱۳۲.

ابراهیمی پاک، ن. ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst در شبیه‌سازی 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 مدل AquaCrop. نشریه مدیریت آب در کشاورزی، ۸(۱): ۳۰-۱۵.

ادبی، و.، عزیزیان، ا.، رضانی 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 پارس‌آباد مغان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۶): ۱۵۶۵-۱۵۷۹.

اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی پاک، 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.

انصاری، م. ع.، اگدرنژاد، ا. و ابراهیمی پاک، ن. ع. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) تحت شرایط آبیاری با استفاده از دو مدل AquaCrop و CropSyst. نشریه اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، ۱۳(۲): ۲۸۷-۳۰۴.

حاجی‌زاده، م.، رحیمی خوب، ع.، علی نیایی فرد، س. و وراوی پور، م. ۱۳۹۸. تعیین بهره‌وری آب نرمال شده و بررسی حساسیت مدل آکوآکراپ برای گیاه تربچه. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۵): ۱۵۲۷-۱۵۳۷.

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.

- predicting maize yield in a changing climate in Zimbabwe. *International Journal of Agricultural and Food Science*, 3(4): 157-163.
- Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P. H., Marek, G. and Boman, R. 2020. Validation and application of AquaCrop for irrigated cotton in the Sothern Great Plains of US. *Irrigation Science*, 38: 593-607.
- 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.
- Sandhu, R. and Irmak, S. 2019. Performance of AquaCrop Model in Simulating Maize Growth, Yield, and Evapotranspiration under Rainfed, Limited and Full Irrigation. *Agricultural Water Management*. 223(105687).
- 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.
- Hsiao, T. C., Heng, L K., Steduto, P., Raes, D. and E. Fereres. 2009. AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy*. 101: 448-459.
- 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.
- 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

Sensitivity Analysis of Corn Crop Growth Parameters in AquaCrop Model under Interaction of Water Stress and Nitrogen Fertilizer

S.K. Pazhoohideh¹, A. Egdernezhad^{*2} and F. Abbasi³

Abstract

Sensitivity analysis of crop models helps researchers to have the necessary information about the reaction of crop models to changes in input parameters before calibration and application. This makes it possible to introduce the input data to the model with more awareness and increase the accuracy of the model in the calibration stage. Due to using the AquaCrop model in recent years, in this study, the sensitivity of normalized water productivity (w_p^*), crop transpiration, initial canopy cover (CCo), canopy growth coefficient (CGC), canopy decline coefficient (CDC) and harvest index (HI) was analyzed using a new method. For this purpose, corn yield data collected from Research Institute of Seed and Plant Breeding during 2008-2010 were used. Data consisted of four irrigation levels (W1, W2, W3 and W4 indicate supply of 120, 100, 80 and 60% of water requirement, respectively) and four nitrogen fertilizer amount (N1, N2, N3 and N4 indicate supply of 100, 80, 60 and 0% of fertilizer requirements, respectively). The results showed that the AquaCrop was most sensitive to changes in harvest index ($0.65 \leq Spi \leq 1.3$) and normalized water productivity ($0.55 \leq Spi \leq 1.2$). The lowest sensitivity ($0.02 \leq Spi \leq 0.07$) was observed to changes in crop canopy decrease coefficient (CDC). Sensitivity coefficients were positive for all parameters except CDC. Therefore, by increasing the CDC value, the AquaCrop suffers from underestimated error. The sensitivity coefficients for treatments N1 to N4 were equal to 0.32, 0.41, 0.46 and 0.51, respectively. These results for irrigation treatments W1 to W4 were equal to 0.36, 0.39, 0.44 and 0.5, respectively. So, with increasing water stress and fertilizer, the sensitivity of the AquaCrop model to all parameters increased. The highest sensitivity was observed in W4N4 treatment.

Keywords: AquaCrop Model, Beven Method, Crop Growth Model, Sensitivity Analysis, 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 (*Corresponding Author, Email: a_eigder@gmail.com)

³ Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering, Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 10 Sept 2021

Accepted: 13 Dec 2021