نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۸، مهر - آبان ۱۴۰۳، ص. ۵۲۹-۵۱۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 18, Oct.-Nov. 2024, p. 515-529

مقاله علمی-پژوهشی

تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه پنبه در مدل AquaCrop تحت مدیریت‌های مختلف زراعی

جمشید بنی‌فری[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲*]، علی مختاران[۳]، مهدی اسدی لور[۴]، داود خدادادی دهکردی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸

چکیده

مدل‌سازی گیاهی از جمله روش‌های پرکاربرد برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی تحت مدیریت‌های مختلف مزرعه است. لیکن، توجه به حساسیت این مدل‌ها نسبت به پارامترهای ورودی می‌تواند عملیات واسنجی را بهبود بخشد و خطای شبیه‌سازی را کاهش دهد. در پژوهش حاضر، به تحلیل حساسیت مدل AquaCrop تحت تیمارهای تاریخ کاشت (D1: ۱۵ اسفند و D2: ۲۵ اسفند) کیفیت آب آبیاری (S1: آب کارون با متوسط شوری دو دسی زیمنس بر متر، S2: تلفیق آب کارون و زهاب با متوسط شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و S3: زهاب با متوسط شوری ۶ دسی زیمنس بر متر) و رقم پنبه (C1: خورشید، C2: گلستان، C3: ساجدی و C4: خرداد) برای گیاه پنبه پرداخته شد. برای تحلیل حساسیت، 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) با استفاده از روش باون انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین حساسیت در دو پارامتر شاخص برداشت (۰/۶۹) و بهره‌وری آب نرمال شده (۰/۶) و کمترین حساسیت در دو پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی (۰/۰۲) و ضریب پوشش گیاهی اولیه (۰/۰۳) وجود داشت. افزایش زمان کاشت از D1 به D2 سبب افزایش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به شاخص برداشت (۱۹ درصد) و بهره‌وری آب نرمال شده (۱۵ درصد) و افزایش شوری از S1 به S3 سبب افزایش حساسیت این مدل نسبت به شاخص برداشت (۴۲ درصد) و بهره‌وری آب نرمال شده (۵۰ درصد) گردید. بنابراین در شرایط مدیریت مزرعه مشابه تحقیق حاضر، توجه به دو پارامتر شاخص برداشت و بهره‌وری آب نرمال شده می‌تواند سبب دقت نتایج در مرحله‌ی واسنجی (و صحت‌سنجی) شود.

واژه‌های کلیدی: تنش شوری، روش Beven، شبیه‌سازی، مدل‌سازی گیاهی، مدل AquaCrop

مقدمه

مدل‌های گیاهی از جمله ابزارهای کاربردی برای شبیه‌سازی روابط پارامترهای مؤثر در مزرعه مانند تاریخ کاشت، تنش‌های غیر زیستی و نوع رقم به‌شمار می‌روند. این مدل‌ها می‌توانند بر اساس معادلات حاکم، در شبیه‌سازی عملکرد گیاهان در شرایط مختلف مانند کشاورزی پایدار با رویکرد توجه به محیط‌زیست (Sandhu and Irmak, 2019)، تغییر عملکرد گیاهان تحت تأثیر تغییر اقلیم، مدیریت نهاده‌های کشاورزی (Guo et al., 2019) و مدیریت آب در مزرعه مورداستفاده قرار گیرند. لیکن، نتایج مطالعات نشان داده است که برخی شرایط محیطی و مدیریت مزرعه می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر نتایج شبیه‌سازی این مدل‌ها داشته باشد (Nasrolahi et al., 2024). این موضوع سبب ایجاد عدم قطعیت در نتایج این مدل‌ها می‌گردد. برای رفع این مشکل، لازم است تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی و اثرات آن بر نتایج شبیه‌سازی مدل‌های گیاهی موردتوجه قرار گیرد. در واقع، تحلیل حساسیت به محققان و کاربران کمک می‌کند تا دریابند نتایج یک مدل شبیه‌سازی رشد گیاهی تا چه

۱- دانشجوی دکتری 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- استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۴- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۵- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: a_eigder@ymail.com)
** مقاله مستخرج از رساله دکتری رشته آبیاری و زهکشی

اندازه در مرحله‌ی ارزیابی (واسنجی یا صحت‌سنجی) می‌تواند تحت تأثیر تغییر پارامترهای ورودی قرار گیرد (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹).

مدل AquaCrop یکی از مدل‌های پرکاربرد در شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی است که در سال ۲۰۰۹ توسط فائو بسط داده شد. (Steduto et al., 2009) این مدل گیاهی تا به امروز چندین بار بروزرسانی شده و توسط محققان بسیاری در نقاط مختلف جهان مورداستفاده قرار گرفته است. محیط کاربرپسند، داده‌های در دسترس، سهولت استفاده و نتایج شبیه‌سازی نزدیک به داده‌های برداشت‌شده از مزارع سبب شده تا به‌عنوان یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد معرفی شود. با توجه به اهمیت این مدل گیاهی، اطلاعات پایه برای شبیه-سازی گیاهان مهم زراعی در پایگاه داده آن قرار داده شده و شبیه-سازی عملکرد این گیاهان زراعی به‌صورت متعدد توسط محققان مختلف انجام گردیده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به شبیه-سازی زعفران (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۷)، جو (Araya et al., 2010)، سیب‌زمینی (انصاری و همکاران، ۱۳۹۸)، چغندرقند (سیاحی و همکاران، ۱۳۹۹)، کلزا (غلامی و همکاران، ۱۴۰۲)، گلرنگ (بهمنش و همکاران، ۱۴۰۰) پنبه (Massasi et al., 2020)، گندم (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰) و برنج (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰) اشاره کرد.

پارامترهای ورودی مدل AquaCrop به دو دسته ثابت و غیرثابت (مدیریتی) تقسیم می‌شود. پارامترهای ثابت در مدل AquaCrop توسط توسعه دهندگان این مدل، بر اساس آزمایش‌های متعدد، تعیین و در پایگاه داده این مدل قرار داده شده است. توسعه دهندگان مدل AquaCrop پیشنهاد کرده‌اند که مقادیر این پارامترها برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان تغییر نکند. پارامترهای غیرثابت بر اساس شرایط آزمایش و مدیریت مزرعه در هر شبیه‌سازی می‌بایست تغییر کند. این تغییرات در مرحله ارزیابی (واسنجی و صحت‌سنجی) مدل انجام می‌شوند. لیکن، تحقیقات انجام‌شده توسط برخی محققان نشان داده است که برای دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت و کاهش خطای شبیه‌سازی، بهتر است داده‌های ثابت نیز در مرحله ارزیابی تغییر کنند. این تغییرات می‌بایست بر اساس شرایط مزرعه و با توجه به اثر تغییرات این پارامترها بر عملکرد گیاهان زراعی صورت گیرد. این موضوع، مستلزم در اختیار داشتن نتایج تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای ثابت است.

بررسی منابع نشان می‌دهد که تحلیل حساسیت پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*)، حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx})، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC)، ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0) و شاخص برداشت (HI) نسبت به سایر پارامترها بیشتر موردتوجه محققان می‌باشد. به‌عنوان مثال، رحیمی خوب و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامترها برای گیاه ریحان در کرج پرداختند. نتایج نشان داد که پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) و حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx}) بیشترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترهای ورودی در مدل AquaCrop داشتند. ادبی و همکاران (۱۳۹۸) به تحلیل حساسیت این مدل گیاهی برای دو گیاه گندم و ذرت در دو منطقه دشت قزوین و پارس آباد مغان پرداختند. نتایج این محققان نشان داد که ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) بیشترین حساسیت را در نتایج شبیه‌سازی این مدل ایجاد کرد. علاوه بر آن، این محققان گزارش کردند که تغییرات برخی پارامترهای ورودی اثری بر نتایج شبیه‌سازی نداشت و به همین دلیل پیشنهاد کردند که در مرحله ارزیابی مدل موردتوجه قرار نگیرند. احمدی و همکاران (۱۴۰۰) حساسیت مدل AquaCrop به دو پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) و ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) را برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در بروجرد بیشتر از سایر پارامترها گزارش کردند.. پژوهیده و همکاران (۱۴۰۲) به تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه ذرت در مدل AquaCrop تحت تنش آبی و کود نیتروژن در کرج پرداختند. این محققان گزارش کردند که بیشترین حساسیت نسبت به پارامترهای شاخص برداشت (HI) و بهره‌وری مصرف آب (WP*) وجود داشت و کمترین حساسیت نسبت به تغییرات ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) به دست آمد. بوعذار و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی به تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه سیب‌زمینی در مدل AquaCrop تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری در شهرکرد پرداخته و نشان دادند که مدل AquaCrop نسب به تغییرات پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) بیشترین حساسیت و کمترین حساسیت نیز به دو پارامتر ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0) و ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) اختصاص داشت. نیسی و همکاران (۱۴۰۲) نیز به تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاهی برای ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد سیب‌زمینی تحت مدیریت‌های مختلف کم آبیاری در کرمانشاه پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین حساسیت نسبت به بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) و کمترین حساسیت نسبت به تغییرات پوشش گیاهی اولیه (CC_0) و ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) وجود داشت.

پنبه از جمله گیاهان زراعی مهم در جهان به شمار می‌روند که به‌صورت خوراکی مصرف نمی‌شود. همین موضوع سبب شده است تا کاربرد آب‌های نامتعارف مانند زهاب کشاورزی برای کشت آن موردتوجه قرار گیرد. اهمیت این گیاه به گونه‌ای است که اطلاعات کامل آن در پایگاه داده مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی قرار داده شده است. بر اساس بررسی منابع پیشین، مشخص گردید که تاکنون گزارشی در ارتباط با تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی پنبه منتشر نشده است. لذا، پژوهش حاضر با

هدف انجام این مهم و با در نظر گرفتن تیمارهای تاریخ کاشت، نوع رقم و شوری آب آبیاری انجام شد.

مواد و روش‌ها

مطالعات مزرعه‌ای

این پژوهش با استفاده از داده‌های برداشت‌شده از دو طرح تحقیقاتی انجام‌شده در سال‌های زراعی ۹۷-۹۶ و ۹۸-۹۷ در اراضی مجاور کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان انجام شد (روشنی و همکاران، ۱۳۹۷؛ مختاران و قربانی نصرآباد، ۱۴۰۰). در این پژوهش تیمارهای تاریخ کاشت (D1: ۱۵ اسفند و D2: ۲۵ اسفند)، کیفیت آب آبیاری (S1: آب کارون با متوسط شوری دو دسی زیمنس بر متر، S2: تلفیق آب کارون و زهاب با متوسط شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و S3: زهاب با متوسط شوری ۶ دسی زیمنس بر متر) و رقم پنبه (C1: خورشید، C2: گلستان، C3: ساجدی و C4: خرداد) در نظر گرفته شدند. مزرعه مطالعاتی مورداستفاده با نام L08-20 به مساحت ۲۵ هکتار در جنوب کارخانه صنایع جانبی شرکت قرار داشت. نزدیک بودن این مزرعه به ایستگاه هواشناسی و زهکش میانی مزارع نیشکر میرزا کوچک خان موقعیت مناسبی برای انجام تحقیق با استفاده از زهاب نیشکر را فراهم آورده بود. این مزرعه در سال ۱۳۸۰ به زیر کشت نیشکر رفته و بعد از یک دوره شش‌ساله در سال ۱۳۸۶ آیش شد. مزرعه L08-20 در سال ۱۳۸۷ مجدداً به زیر کشت رفت و در سال ۱۳۹۶ به‌صورت آیش در مزارع کشت نیشکر در آمد. در هر دو طرف مزرعه تحقیقاتی L08-20 ، زهکش جمع کننده لوله‌ای وجود دارد. با توجه به موقعیت زهکش‌های جمع کننده در دو طرف مزرعه، و طول ۱۰۰۰ متری مزارع، زهکش‌های زیرزمینی به طول ۵۰۰ متری قرار گرفته و مستقیماً به زهکش‌های جمع کننده تخلیه می‌شوند. عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی از ۱/۸ متری سطح زمین در ابتدا تا ۲/۲ متری در انتها متغیر است و فاصله زهکش‌های زیرزمینی ۶۰ متر است. قبل از کشت، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری، درصد رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی، شوری و اسیدیته خاک با نمونه‌گیری از دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری تعیین شد (جدول ۱). قطعه زمین موردنظر در پاییز سال قبل از اجرای آزمایش شخم زده شده و اوایل اسفند پس از دیسک زدن، علف‌کش و کود دهی، آماده کشت گردید. عملیات زراعی شامل تنک، واکاری، سم‌پاشی و مبارزه با علف‌های هرز در تمام تیمارها به‌صورت یکسان انجام شد. آبیاری بر اساس جبران کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت زراعی صورت گرفت. قبل از آبیاری، نمونه رطوبت خاک گرفته شده و با پایش میزان رطوبت آن، مقدار آب آبیاری تعیین و عملیات آبیاری تا عمق مؤثر ریشه انجام شد. برای مقابله با خسارت بیماری‌ها، بذرها قبل از کشت ضدعفونی گردیدند. عملیات سم‌پاشی و تیشه زدن پنبه به‌صورت یکسان برای کلیه تیمارها انجام گردید. در پایان فصل رشد، نمونه‌برداری از تیمارها صورت گرفت و مقدار عملکرد برای هر تیمار توسط ترازو تعیین گردید.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش

عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	نقطه پژمردگی (درصد حجمی)
۰-۳۰	لومی رسی	۱/۵۳	۴/۳۳	۴۶	۲۲
۳۰-۶۰	لومی	۱/۶۷	۳/۶۲	۳۸/۵	۱۸/۴

مدل AquaCrop

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

$$B = WP^{*} \sum_{i=1}^{n} \frac{Tr_i}{ETo_i} \qquad (۱)$$

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 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:

$$T_{ri} = K_s \times CC \times K_{CTrx} \times ET_{0i} \qquad (۲)$$

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 با اهمیت است. به همین دلیل در این مدل گیاهی از سه رابطه (رابطه‌های ۳ تا ۵) به شرح زیر برای تعیین این پارامتر استفاده می‌شود (Steduto *et al.*, 2009).

$$CC = CC_0 \times e^{tCGC} \qquad (۳)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{CC_x^{\,2}}{CC_0} \times e^{-tCGC} \qquad (۴)$$

$$CC = CC_x\left[1-0.05\left(e^{\frac{CDC}{CCx}\times t}-1\right)\right] \quad (۵)$$

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 (۳) تا (۵) 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 و در نهایت عملکرد 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) ارائه شده است. میزان نمو هر پارامتر نیز بر اساس ماهیت آن و اثرگذاری مقادیر پارامتر بر نتایج خروجی تعیین شد.

به‌منظور تحلیل حساسیت از رابطه ارائه‌شده توسط Beven (1979) استفاده شد (رابطه ۶).

$$S_{pi} = \lim_{\Delta Pi \to 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta P_i}{P_i}} = \frac{\partial y}{\partial P_i}\times\frac{P_i}{y} \quad (۶)$$

در این رابطه، S_{pi} ضریب حساسیت، P_i پارامتر موردبررسی و y مقدار عملکرد است. مقادیر S_{pi} بر حسب نوع پارامتر می‌تواند مثبت یا منفی باشد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش عملکرد با تغییر پارامتر موردنظر است. مقادیر منفی نیز نشان‌دهنده کاهش عملکرد 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 یک‌درصدی 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 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[1]	WP^*	$g.m^{-2}$	۱۵	۱۳	۱۷	۱
حداکثر ضریب تعرق گیاهی[2]	K_{CTrx}	-	۱/۱	۱/۰	۱/۲	۰/۰۵
پوشش گیاهی اولیه[3]	CC_o	$cm^2.plant^{-1}$	۰/۷۲	۰/۵۲	۰/۹۲	۰/۱
ضریب رشد پوشش گیاهی[4]	CGC	$\%day^{-1}$	۷/۶	۵/۶	۹/۶	۱
ضریب کاهش پوشش گیاهی[5]	CDC	$\%day^{-1}$	۲/۹	۳/۱	۲/۷	۰/۱
شاخص برداشت[6]	HI	%	۳۵	۲۹	۴۱	۳

1. Normalized Water Productivity 2. Maximum Crop Transpiration Coefficient 3. Initial Canopy Cover 4. Canopy Growth Coefficient 5. Canopy Decline Coefficient 6. Harvest Index

جدول ۳- طبقه‌بندی مقادیر ضریب حساسیت

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

نتایج و بحث

برای ارزیابی تغییرات پارامترهای رشد در مدل AquaCrop بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد پنبه، مقادیر هر کدام از این پارامترها بر اساس میزان نمو در جدول (۲) تغییر داده شد. نتایج شبیه‌سازی برای هر تیمار به تفکیک محاسبه‌شده و با استفاده از روش Beven (1979) (رابطه ۶) میزان ضریب حساسیت هر پارامتر تعیین گردید (جدول ۴). با توجه به اینکه هدف این پژوهش تعیین حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی برای مرحله

واسنجی است؛ تفاوتی بین حساسیت مدل AquaCrop نسبت به نوع رقم وجود نداشت. در واقع، ضریب حساسیت هر پارامتر، برای ارقام مختلف یکسان بود. به همین دلیل، نتایج تغییرات حساسیت در شکل‌های (۲) تا (۷) بدون در نظر گرفتن نوع رقم تعیین گردید.

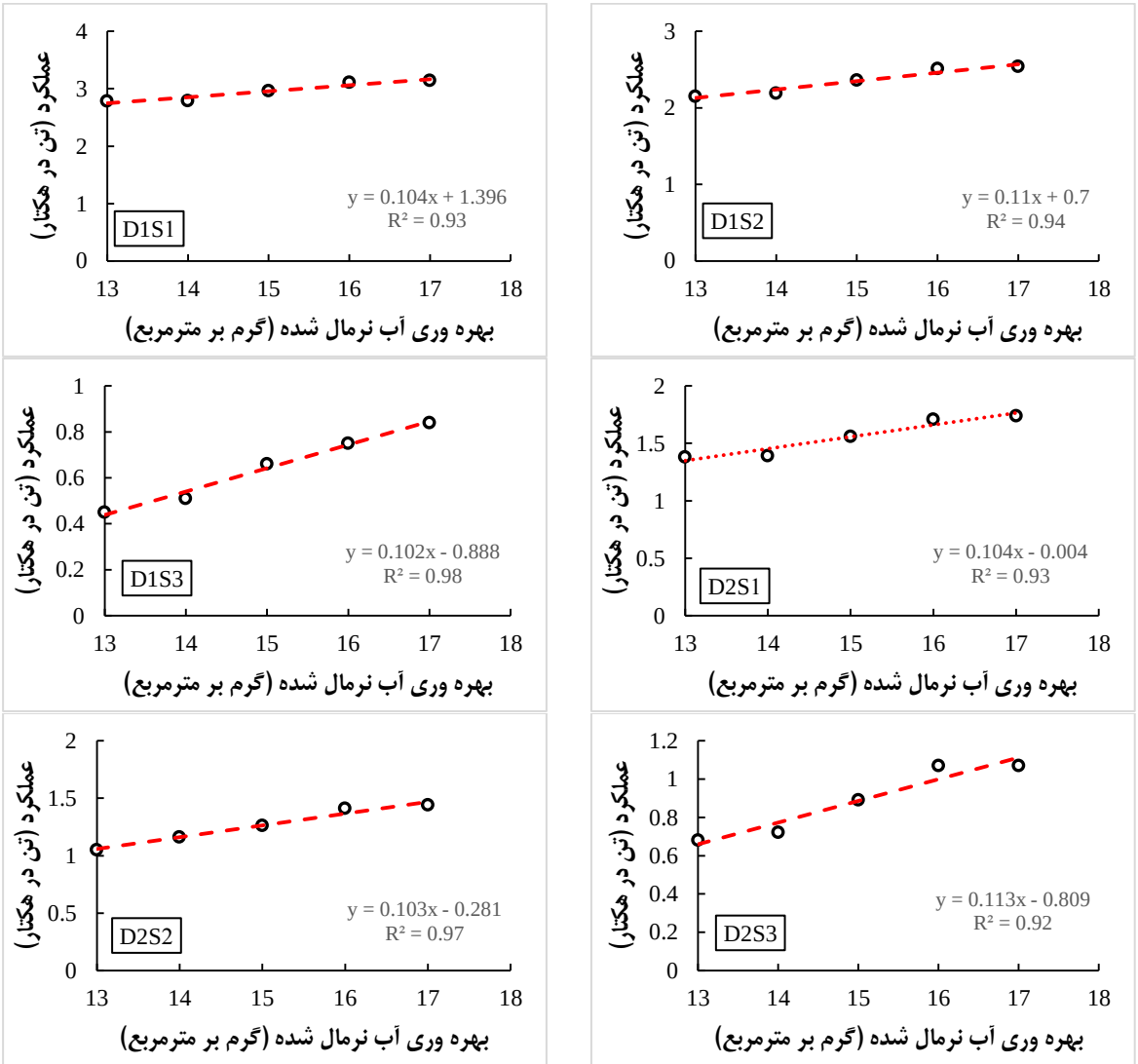
جدول ٤- ضرایب حساسیت پارامترهای رشد گیاه پنبه

تیمار	پارامترهای رشد گیاه					
	WP^* ($g.m^{-2}$)	K_{CTrx} (-)	CC_0 ($cm^2.plant^{-1}$)	CGC (%day^{-1})	CDC (%day^{-1})	HI (%)
D1S1C1	۰/۵۵	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۲۸	−۰/۰۲	۰/۶۵
D1S1C2	۰/۵۵	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۲۸	−۰/۰۲	۰/۶۵
D1S1C3	۰/۵۵	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۲۸	−۰/۰۲	۰/۶۵
D1S1C4	۰/۵۵	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۲۸	−۰/۰۲	۰/۶۵
D1S2C1	۰/۶۰	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۳۲	−۰/۰۲	۰/۷۰
D1S2C2	۰/۶۰	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۳۲	−۰/۰۲	۰/۷۰
D1S2C3	۰/۶۰	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۳۲	−۰/۰۲	۰/۷۰
D1S2C4	۰/۶۰	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۳۲	−۰/۰۲	۰/۷۰
D1S3C1	۰/۸۰	۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۳۸	−۰/۰۴	۰/۹۰
D1S3C2	۰/۸۰	۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۳۸	−۰/۰۴	۰/۹۰
D1S3C3	۰/۸۰	۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۳۸	−۰/۰۴	۰/۹۰
D1S4C4	۰/۸۰	۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۳۸	−۰/۰۴	۰/۹۰
D2S1C1	۰/۴۵	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۲۸	−۰/۰۲	۰/۵۳
D2S1C2	۰/۴۵	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۲۸	−۰/۰۲	۰/۵۳
D2S1C3	۰/۴۵	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۲۸	−۰/۰۲	۰/۵۳
D2S1C4	۰/۴۵	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۲۸	−۰/۰۲	۰/۵۳
D2S2C1	۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۰۵	۰/۳۰	−۰/۰۳	۰/۵۸
D2S2C2	۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۰۵	۰/۳۰	−۰/۰۳	۰/۵۸
D2S2C3	۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۰۵	۰/۳۰	−۰/۰۳	۰/۵۸
D2S2C4	۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۰۵	۰/۳۰	−۰/۰۳	۰/۵۸
D2S3C1	۰/۷۰	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۳۲	−۰/۰۳	۰/۷۸
D2S3C2	۰/۷۰	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۳۲	−۰/۰۳	۰/۷۸
D2S3C3	۰/۷۰	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۳۲	−۰/۰۳	۰/۷۸
D2S4C4	۰/۷۰	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۳۲	−۰/۰۳	۰/۷۸
انحراف معیار	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۱۲

تیمارهای تاریخ کاشت (D1: 15 اسفند و D2: 25 اسفند) – کیفیت آب آبیاری (S1: آب کارون با متوسط شوری دو دسی زیمنس بر متر، S2: تلفیق آب کارون و زهاب با متوسط شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و S3: زهاب با متوسط شوری ۶ دسی زیمنس بر متر) – رقم پنبه (C1: خورشید، C2: گلستان، C3: ساجدی و C4: خرداد)

در شکل (۱)، اثر تغییر پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) بر مقادیر عملکرد پنبه نشان داده شده است. مقدار پیش‌فرض برای WP^* در مدل AquaCrop برابر با ۱۵ گرم بر مترمربع است. بر اساس جدول (۲)، دامنه تغییرات این پارامتر بین ۱۳ تا ۱۷ گرم بر مترمربع در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش این پارامتر، عملکرد پنبه نیز افزایش یافت. از این‌رو، تغییرات پارامتر WP^* با تغییرات عملکرد هم‌جهت است که این موضوع می‌بایست در مرحله واسنجی مدل AquaCrop در نظر گرفته شود. بر اساس رابطه (۶)، ضریب حساسیت این پارامتر برای تیمارهای مختلف بین ۰/۴۵ تا ۰/۸۰ متغیر بود. با توجه به طبقه‌بندی ارائه‌شده در جدول (۳)، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییر WP^* در محدوده زیاد قرار داشت. نتایج اکثر محققان نظیر رحیمی خوب و همکاران (۱۳۹۹)، احمدی و همکاران (۱۴۰۰) و نصرالهی و همکاران (۲۰۲۴) نشان داده است که مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر معمولاً حساسیت زیادی دارد. تفکیک نتایج بر اساس تاریخ کاشت نشان داد که حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات WP^* در تاریخ کاشت D1 (۱۵ اسفند) حدود ۱۵ درصد بیشتر از تاریخ کاشت D2 (۲۵ اسفند) بود. همچنین، ضریب حساسیت در شوری‌های S2 (شوری ۴ دسی زیمنس بر متر) و S3 (شوری ۶ دسی زیمنس بر متر) به ترتیب ۱۰ و ۵۰ درصد بیشتر از S1 (شوری ۲ دسی زیمنس بر متر)

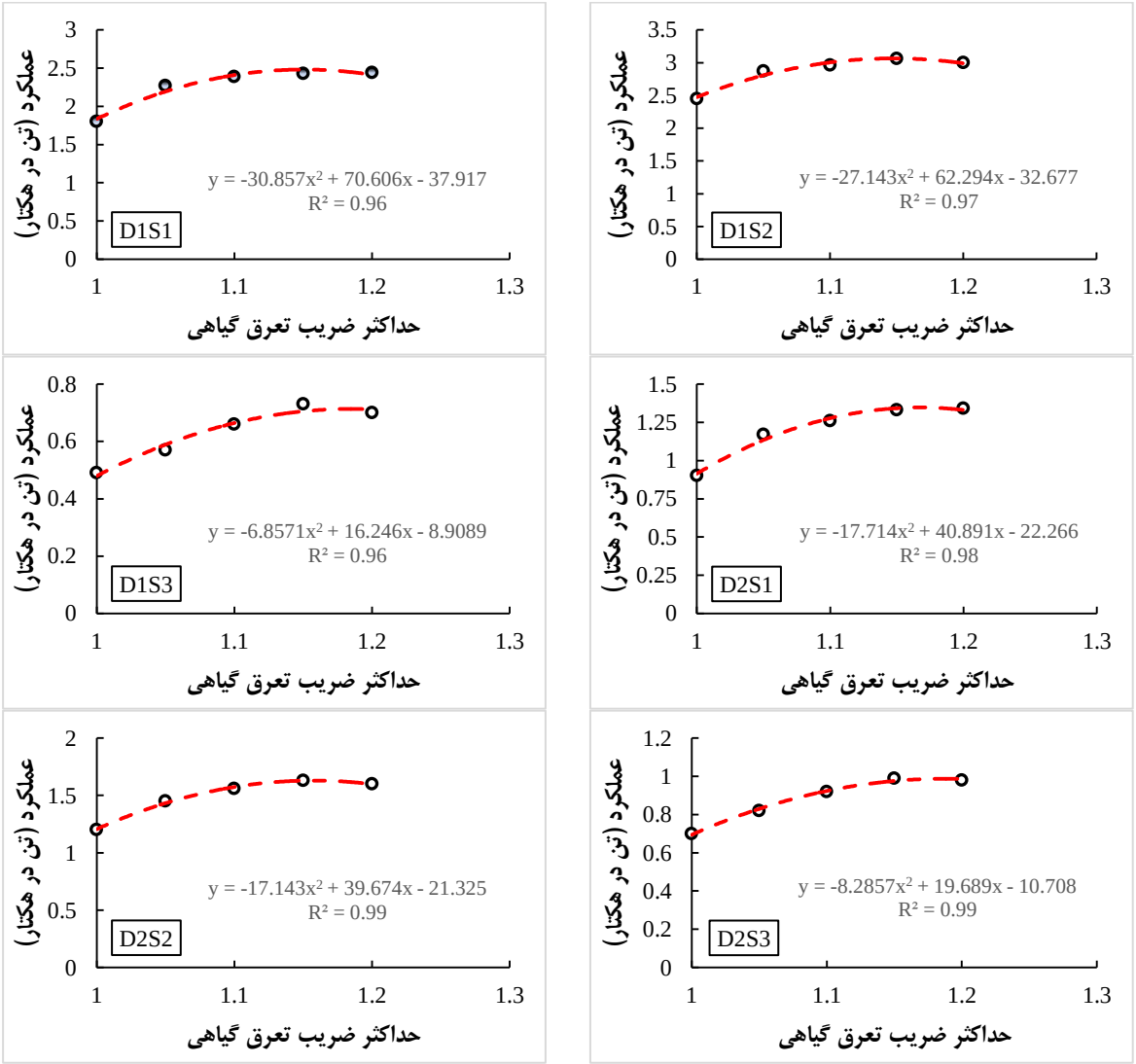
بود. تاکنون گزارشی در خصوص حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تاریخ کاشت و شوری آب آبیاری منتشر نشده است لیکن اکثر مطالعات نشان داده است که حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر *WP به نوع گیاه نیز بستگی دارد (کریمی اورگانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). بنابراین، احتمال دارد در سایر گیاهان زراعی، تغییر تاریخ کاشت و شوری آب آبیاری اثر متفاوت‌تری بر حساسیت این مدل گیاهی داشته باشد. از طرفی، اکثر مطالعات انجام‌شده در خصوص بررسی حساسیت مدل AquaCrop نسبت به مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن بوده است (کریمی اورگانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ حاجی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸؛ احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). این مطالعات نشان داده است که اعمال تنش آبی و کودی سبب حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات *WP شده است. علت آن، احتمالاً کاهش عملکرد شبیه‌سازی‌شده می‌باشد. در پژوهش حاضر نیز، تغییر تاریخ کاشت و افزایش شوری آب آبیاری اثر مشابه بر عملکرد داشتند.



شکل ۱- اثر تغییر پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (*WP) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه پنبه تحت تأثیر تغییر تاریخ کاشت و کیفیت آب آبیاری (D1 و D2 به ترتیب تاریخ کاشت ۱۵ و ۲۵ اسفند و S1، S2 و S3 به ترتیب نشان‌دهنده شوری آب ۲، ٤ و ٦ دسی زیمنس بر متر هستند)

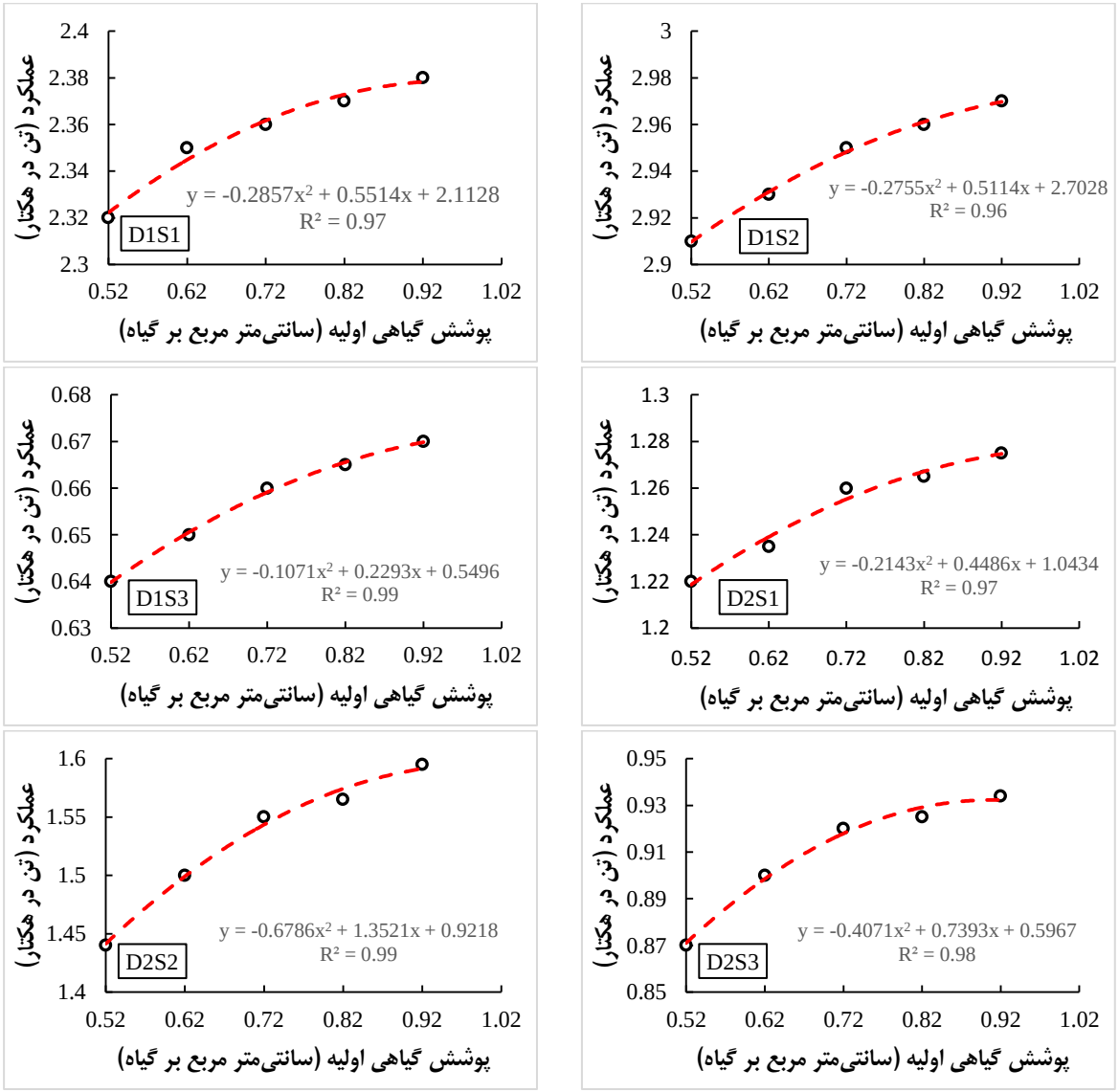
مقدار پارامتر حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx}) برای گیاه پنبه در مدل AquaCrop برابر با ۱/۱ است. دامنه تغییرات این پارامتر بر اساس جدول (۲) بین ۱/۰ تا ۱/۲ در نظر گرفته شد. برای برآورد حساسیت خروجی مدل به تغییرات پارامتر فوق، نتایج به‌دست‌آمده از

تغییرات عملکرد نسبت به مقادیر متفاوت پارامتر K_{CTrx} در شکل (۲) برای تیمارهای مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روند تغییرات حاصل‌شده برای این پارامتر غیر خطی است؛ با افزایش K_{CTrx} از مقدار ۱/۱ ، در ابتدا عملکرد گیاه افزایش یافته، ولی به تدریج و با شیب کمی کاهش نرخ رشد عملکرد رخ می‌دهد. علت حصول این نتیجه را می‌توان به رخ‌دادن تنش‌های محیطی در روند شبیه‌سازی مرتبط دانست. حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر بین ۰/۱۱ تا ۰/۳۰ متغیر بود. این حساسیت طبق جدول (۳) در محدوده متوسط تا زیاد قرار داشت. تفکیک تیمارها نشان داد که مقدار حساسیت برای D1 و D2 به‌ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۲۲ و برای S1، S2 و S3 به‌ترتیب ۰/۱۲، ۰/۲۱ و ۰/۲۷ بود. بنابراین، تغییر تاریخ کاشت (تیمار D2) و شوری آب آبیاری سبب افزایش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر K_{CTrx} شد. مقادیر حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات حداکثر ضریب تعرق گیاهی در مطالعات سایر محققان تا ۰/۶۶ نیز گزارش شده است (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹). بنابراین، می‌توان نوع گیاه را در مقدار ضریب حساسیت این پارامتر مؤثر دانست.



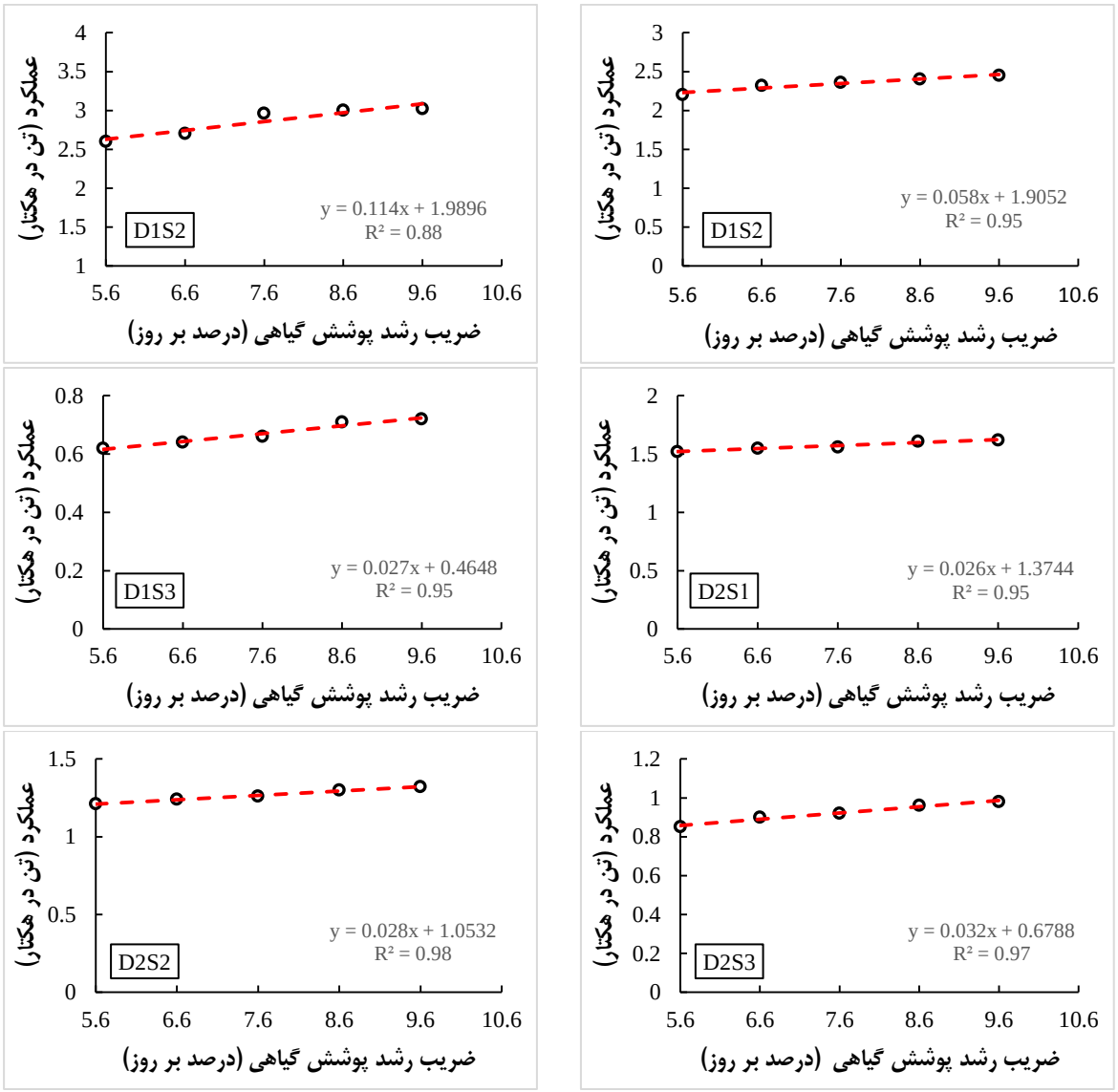
شکل ۲- اثر تغییر پارامتر حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx}) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه پنبه تحت تأثیر تغییر تاریخ کاشت و کیفیت آب آبیاری (D1 و D2 به ترتیب تاریخ کاشت ۱۵ و ۲۵ اسفند و S1، S2 و S3 به ترتیب نشان‌دهنده شوری آب ۲، ٤ و ٦ دسی زیمنس بر متر هستند)

مقدار اولیه پارامتر پوشش گیاهی اولیه (CC_0) در مدل AquaCrop برابر با ۰/۷۲ و دامنه تغییرات آن طبق جدول (۲) بین ۰/۵۲ تا ۰/۹۲ تعیین گردید. متوسط حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر CC_0 برابر با ۰/۰۳ بدست آمد. این حساسیت بر اساس جدول (۳) در محدوده کم قرار داشت. حداقل و حداکثر حساسیت نیز به‌ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۵ تعیین شد. با افزایش مقدار CC_0، عملکرد پنبه نیز افزایش یافت. در نتیجه واکنش عملکرد پنبه نسبت به تغییرات این پارامتر مستقیم بود. ضریب حساسیت برای تیمارهای D1 و D2 به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۰۴ و برای تیمارهای S1، S2 و S3 به ترتیب ۰/۰۲، ۰/۰۴ و ۰/۰۴۵ بود. اگرچه تغییر تاریخ کاشت و شوری آب آبیاری بر حساسیت مدل AquaCrop اثر داشت ولی چون ضرایب حساسیت در محدوده کم واقع گردیده؛ می‌توان این موضوع را نادیده گرفت. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پوشش گیاهی اولیه (CC_0) حساسیت قابل‌قبولی از خود نشان داده است.



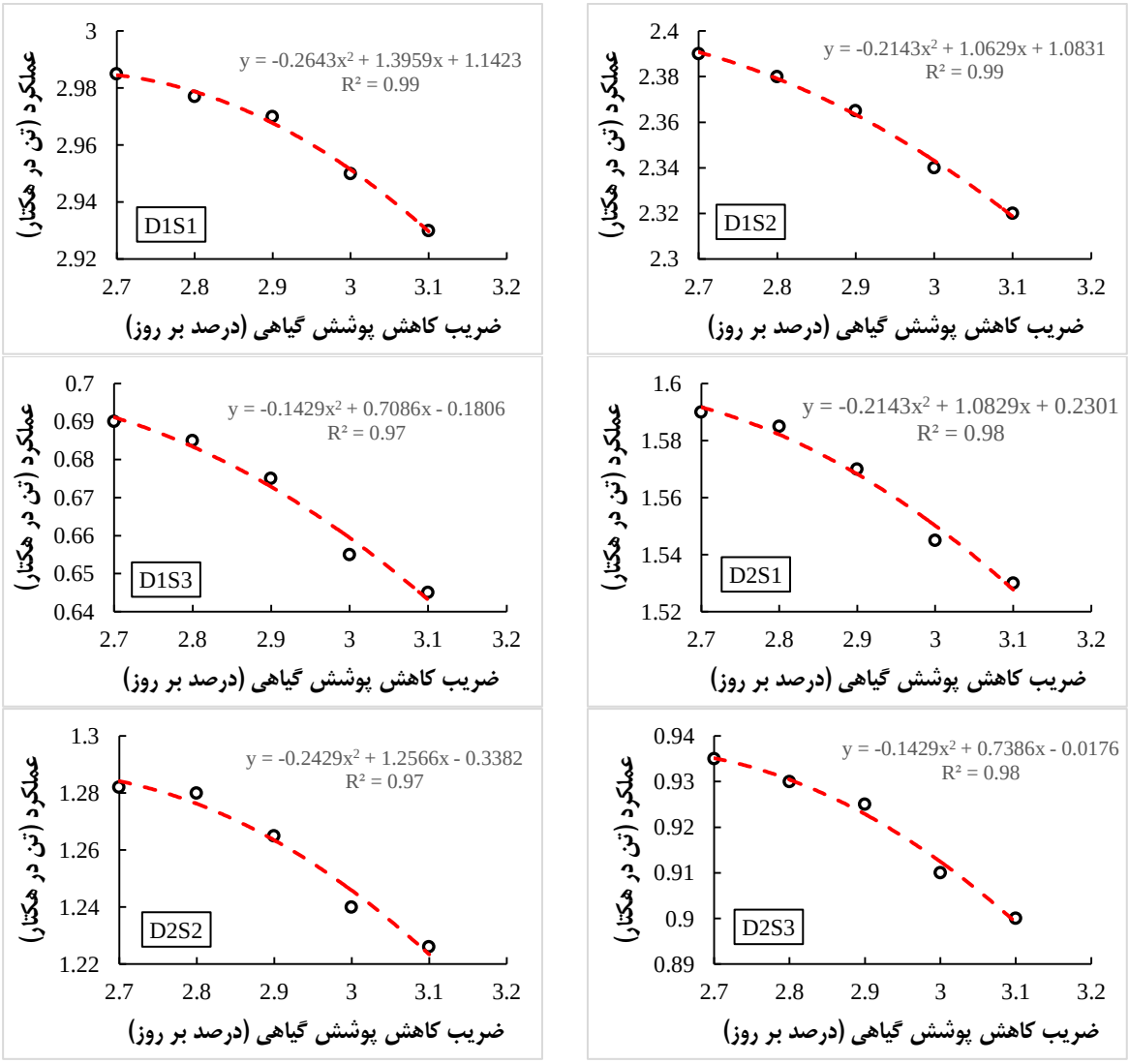
شکل ۳- اثر تغییر پارامتر پوشش گیاهی اولیه (CC_0) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه پنبه تحت تأثیر تغییر تاریخ کاشت و کیفیت آب آبیاری (D1 و D2 به ترتیب تاریخ کاشت ۱۵ و ۲۵ اسفند و S1، S2 و S3 به ترتیب نشان‌دهنده شوری آب ۲، ٤ و ٦ دسی زیمنس بر متر هستند)

مقدار اولیه پارامتر ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) برای گیاه پنبه در مدل برابر با ۷/۶ درصد بر روز و دامنه تغییرات آن بین ۵/۶ تا ۹/۶ درصد بر روز در نظر گرفته شد. روند تغییرات CGC و اثر این پارامتر بر نتایج شبیه‌سازی مدل در شکل (۴) ارائه شده است. ضریب حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات CGC بین ۰/۲۸ تا ۰/۳۸ و متوسط ضریب حساسیت برای این پارامتر برابر با ۰/۳۱ به‌دست آمد. در نتیجه، طبق جدول (۳) حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر در محدوده زیاد می‌باشد. با توجه به شکل (۴)، روند تغییرات CGC با عملکرد پنبه، مستقیم و یکسان می‌باشد. ضریب حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات CGC در تیمارهای D1 و D2 به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۳۰ به دست آمد. در نتیجه تفاوت چندانی در حساسیت مدل به این پارامتر نسبت به تاریخ کاشت وجود نداشت. ضریب حساسیت برای تیمارهای S1 ، S2 و S3 نیز به ترتیب ۰/۲۸، ۰/۳۱ و ۰/۳۵ بود. تفاوتی که در حساسیت مدل به این پارامتر بین دو تیمار S1 و S3 مشاهده شد، می‌بایست در عملیات واسنجی مورد توجه کاربران مدل قرار گیرد.



شکل ٤- اثر تغییر پارامتر ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه پنبه تحت تأثیر تغییر تاریخ کاشت و کیفیت آب آبیاری (D1 و D2 به ترتیب تاریخ کاشت ۱۵ و ۲۵ اسفند و S1، S2 و S3 به ترتیب نشان‌دهنده شوری آب ۲، ٤ و ٦ دسی زیمنس بر متر هستند)

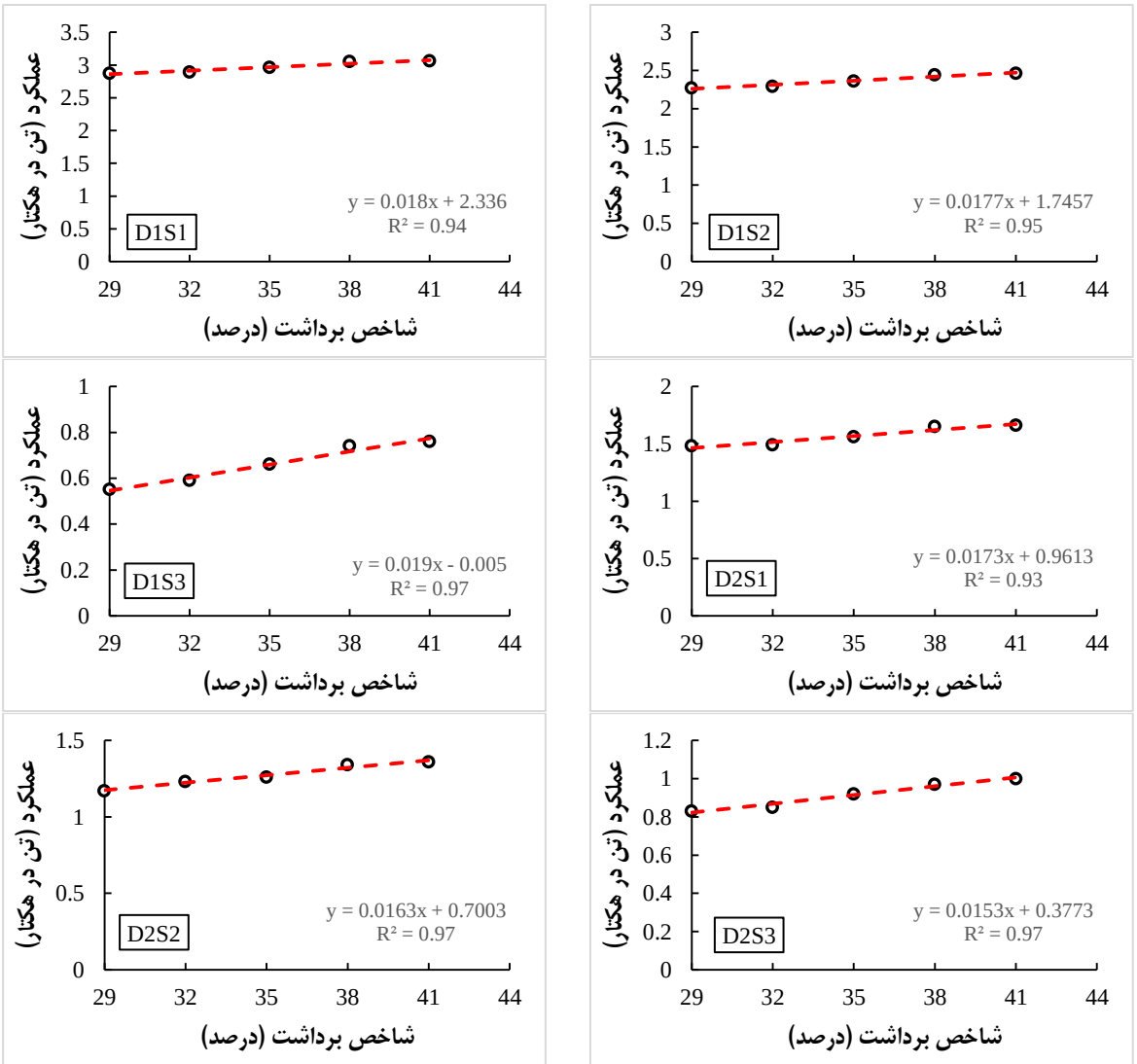
مقدار اولیه پارامتر ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) در مدل AquaCrop برای پنبه برابر با ۲/۹ درصد بر روز و دامنه تغییرات آن نیز بین ۲/۷ تا ۳/۱ درصد بر روز می‌باشد. بر اساس نمودارهای ارائه شده در شکل (۵)، خط برازش داده شده بین مقادیر پارامتر CDC و عملکرد پنبه روند معکوس دارد. در واقع، افزایش مقدار پارامتر CDC سبب کاهش عملکرد پنبه شد. بر این اساس اگر مقدار پارامتر CDC بیش از مقدار واقعی آن به مدل داده شود، عملکرد گیاه کمتر از واقعیت شبیه‌سازی خواهد شد. این مهم می‌بایست در مرحله واسنجی مدل توسط کاربران در نظر گرفته شود. حساسیت مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه پنبه در مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر CDC بر اساس جدول (۳) در محدوده کم برآورد شد. ضریب حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر CDC برای تیمارهای D1 و D2، ۰/۰۲ و ضریب حساسیت برای تیمارهای S1، S2 و S3 نیز به ترتیب ۰/۰۲۰، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۳۵ برآورد شد.



شکل ۵- اثر تغییر پارامتر ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه پنبه تحت تأثیر تغییر تاریخ کاشت و کیفیت آب آبیاری (D1 و D2 به ترتیب تاریخ کاشت ۱۵ و ۲۵ اسفند و S1، S2 و S3 به ترتیب نشان‌دهنده شوری آب ۲، ٤ و ٦ دسی زیمنس بر متر هستند)

مقدار اولیه پارامتر شاخص برداشت (HI) در مدل AquaCrop برای گیاه پنبه، ۳۵ درصد می‌باشد. برای برآورد حساسیت مدل نسبت به این پارامتر، مقادیر مختلف از ۲۹ تا ۴۱ درصد با نمو ۳ در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی عملکرد توسط مدل نسبت به مقادیر مختلف پارامتر HI در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که خط برازش داده شده بین مقادیر HI و عملکرد

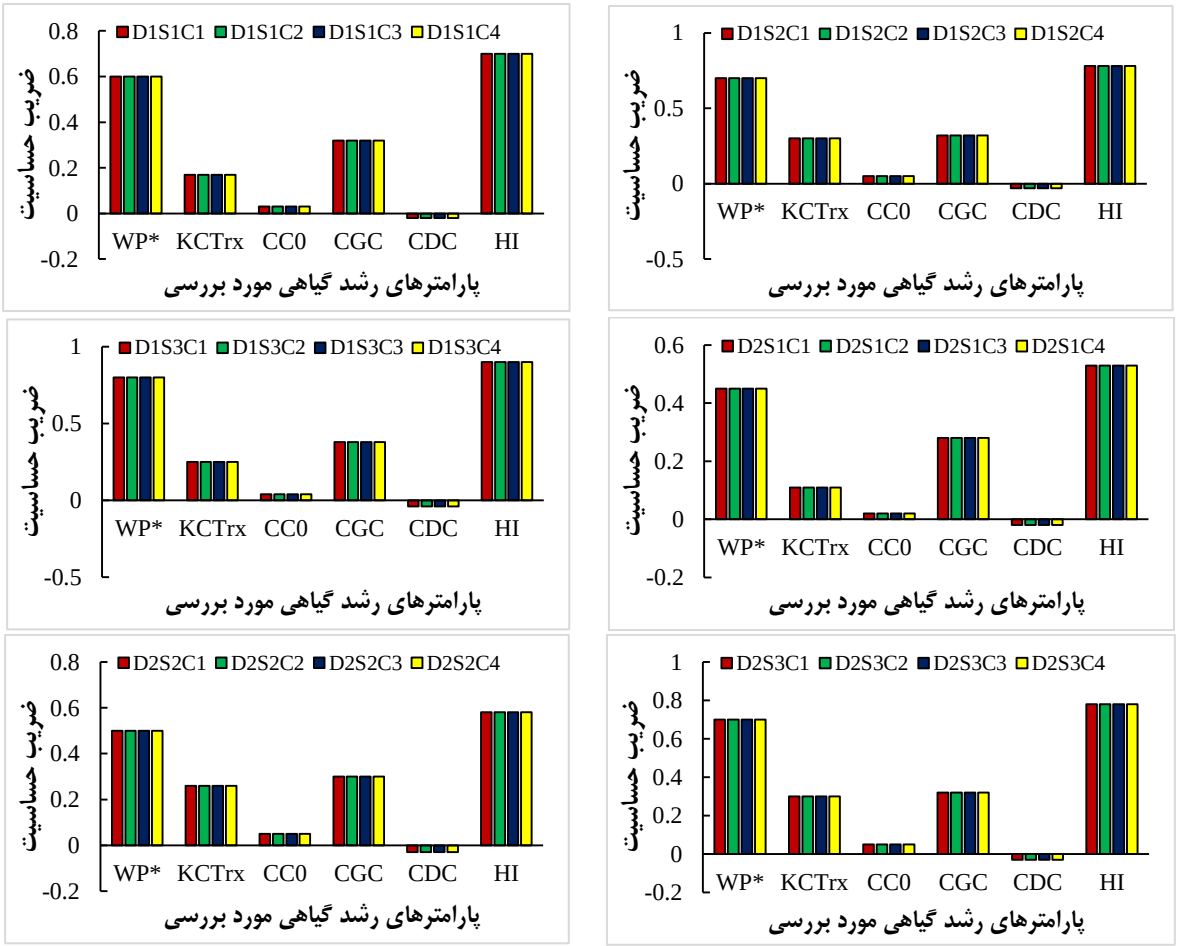
شبیه‌سازی شده مدل روند مستقیم و صعودی دارد. متوسط ضریب حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامتر HI ، ۰/۶۹ و دامنه تغییرات ضریب حساسیت نیز بین ۰/۹۰–۰/۵۳ به دست آمد. در نتیجه، طبق جدول (۳) حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر در محدوده زیاد قرار دارد. پژوهیده و همکاران (۱۴۰۲) نیز چنین نتایجی را برای گیاه ذرت در کرج گزارش نموده‌اند. ضریب حساسیت مدل برای تیمارهای D1 و D2 به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۶۳ و برای تیمارهای S1 ، S2 و S3 نیز به ترتیب ۰/۵۹، ۰/۶۴ و ۰/۸۴ بود. بنابراین، بیشترین حساسیت در بین پارامترهای رشد گیاهی مورد بررسی در این تحقیق مربوط به پارامتر شاخص برداشت (HI) بوده و مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد پنبه تحت شرایط مدیریت زراعی اعمال شده در این پژوهش، حساسیت زیادی نسبت به تغییرات این پارامتر داشت.



شکل ٦- اثر تغییر پارامتر شاخص برداشت (HI) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد گیاه پنبه تحت تأثیر تغییر تاریخ کاشت و کیفیت آب آبیاری (D1 و D2 به ترتیب تاریخ کاشت ۱۵ و ۲۵ اسفند و S1، S2 و S3 به ترتیب نشان‌دهنده شوری آب ۲، ٤ و ٦ دسی زیمنس بر متر هستند)

برای تحلیل بهتر ضرایب حساسیت هر یک از پارامترهای رشد گیاه پنبه تحت تیمارهای مختلف مورد بررسی در این پژوهش، نمودار مقادیر حاصله در شکل (۷) ارائه شده است. از بین پارامترهای گیاهی مورد بررسی در این تحقیق، پارامترهای HI و WP* بیش‌ترین حساسیت و پارامترهای CDC و CC_0 کمترین حساسیت را دارند. مقایسه مقادیر به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش شوری آب آبیاری، میزان حساسیت خروجی مدل به تغییر پارامترهای رشد بیشتر خواهد شد. نتایج مشابه در ارتباط با اثر تنش آبی و کودی بر

حساسیت مدل AquaCrop برای گیاه ذرت (سرکهکی و همکاران، ۱۴۰۱؛ پژوهیده و همکاران، ۱۴۰۲)، جو (کریمی اورگانی و همکارانی، ۱۳۹۵)، گندم (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰)، ریحان (رحیمی‌خوب و همکاران، ۱۳۹۹)، تربچه (حاجی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸)، سیب‌زمینی (بوعذار و همکاران، ۱۴۰۱؛ نیسی و همکاران، ۱۴۰۲) و گلرنگ (بهمنش و همکاران، ۱۴۰۰) نیز منتشر شده است. برای سنجش پراکندگی مقادیر ضرایب حساسیت محاسبه‌شده برای هر کدام از پارامترهای رشد تحت تیمارهای مورد بررسی در این تحقیق از شاخص انحراف معیار استفاده شد. بر اساس جدول (۲)، انحراف معیار پارامترهای HI و *WP نسبت به دیگر پارامترها بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدیریت‌های مختلف زراعی اعمال شده در این پژوهش تأثیر بیشتری بر تغییر ضرایب حساسیت این دو پارامتر می‌گذارد. پارامترهای مؤثر برای محاسبه توسعه پوشش گیاهی شامل CGC و CDC بوده که حساسیت یکسانی در شبیه‌سازی عملکرد گیاه پنبه نشان ندادند زیرا در مدل AquaCrop از پارامتر CGC از ابتدای دوره رشد تا انتهای مرحله توسعه در معادلات محاسبه پوشش گیاهی استفاده می‌شود؛ در حالی که پارامتر CDC تنها در اواخر دوره رشد گیاه کاربرد دارد (رحیمی‌خوب و همکاران، ۱۳۹۹). نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که پارامترهای HI و *WP از مهم‌ترین و اثرگذارترین پارامترهای گیاهی در مدل AquaCrop می‌باشند که می‌بایست مقدار دقیق آن‌ها برای هر گیاه توسط کاربر واسنجی شود. نتایج مشابه در تحلیل حساسیت مدل AquaCrop برای گندم بهاره و زمستانه (Jin et al., 2018) و ریحان (رحیمی‌خوب و همکاران، ۱۳۹۹) گزارش شده است. بر این اساس برای گندم بهاره و تابستانه پارامترهای *WP و CC_0 (Jin et al., 2018) و برای ریحان نیز پارامتر *WP (رحیمی‌خوب و همکاران، ۱۳۹۹) به عنوان پارامترهای حساس مدل گزارش شده‌اند.



شکل ۷- مقایسه ضرایب حساسیت پارامترهای رشدی ارقام مختلف گیاه پنبه تحت تأثیر تغییر تاریخ کاشت و کیفیت آب آبیاری (D1 و D2 به ترتیب تاریخ کاشت ۱۵ و ۲۵ اسفند - S1، S2 و S3 به ترتیب نشان‌دهنده شوری آب ۲، ٤ و ٦ دسی زیمنس بر متر - ارقام مختلف گیاه پنبه شامل C1: خورشید، C2: گلستان، C3: ساجدی و C4: خرداد)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییر پارامترهای رشد ارقام مختلف گیاه پنبه شامل 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)، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین ضریب حساسیت مدل AquaCrop برای دو پارامتر شاخص برداشت (۰/۶۹) و بهره‌وری آب نرمال شده (۰/۶) و کمترین ضریب حساسیت نیز در دو پارامتر ضریب کاهش پوشش گیاهی (۰/۰۲) و پوشش گیاهی اولیه (۰/۰۳) مشاهده شد. بر این اساس وجود خطا در تعیین پارامترهای HI و WP^* تأثیر قابل‌توجهی بر دقت برآورد عملکرد گیاه توسط مدل خواهد داشت. اما وجود خطا در تعیین میزان پارامترهای CDC و CC_0 اثر قابل ملاحظه‌ای بر دقت شبیه‌سازی عملکرد گیاه توسط مدل نخواهد داشت. روند تغییرات عملکرد برآوردی مدل AquaCrop نسبت به تغییرات ضریب کاهش پوشش گیاهی معکوس و برای سایر پارامترها مستقیم بود. تغییر تاریخ کاشت از D1 به D2 (۱۵ اسفند به ۲۵ اسفند) سبب افزایش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به پارامترهای شاخص برداشت (۱۹ درصد) و بهره‌وری آب نرمال شده (۱۵ درصد) و افزایش شوری آب آبیاری نیز منجر به افزایش حساسیت مدل نسبت به پارامترهای شاخص برداشت (۴۲ درصد) و بهره‌وری آب نرمال شده (۵۰ درصد) گردید. بر این اساس تعیین دو پارامتر HI و WP^* با احتیاط بیشتری قابل توصیه می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، حساسیت مدل AquaCrop به تغییر پارامترهای رشد گیاه پنبه تحت تنش‌های آب و کود نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد.

منابع

ابراهیمی پاک، ن، ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم آبیاری و مصرف زئولیت. حفاظت منابع آب و خاک. ۸(۱): ۱۱۷-۱۳۲.

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

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. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۶): ۱۵۶۵-۱۵۷۹.

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. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۳(۲): ۲۸۷-۳۰۴.

بوعذار، ن.، اگدرنژاد، ا. و برومندنسب، س. ۱۴۰۱. تحلیل حساسیت پارامترهای رشد سیب‌زمینی با مدل AquaCrop تحت مدیریت های مختلف آبیاری (مطالعه موردی شهرکرد). مدیریت آب در کشاورزی. ۹(۲): ۴۵-۵۸.

بهمنش، ع.، اگدرنژاد، ا. و سپهری صادقیان، س. ۱۴۰۰. تحلیل حساسیت پارامترهای رشدی گلرنگ در مدل AquaCrop با مدیریت های مختلف آبیاری. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵(۳): ۶۱۱-۶۲۳.

بهمنش، ع.، اگدرنژاد، ا. و سپهری صادقیان، س. ۱۴۰۰. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گیاه گلرنگ تحت مدیریت‌های مختلف آب آبیاری. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲(۹): ۲۳۹۹-۲۴۱۳.

پژوهیده، س، ک.، اگدرنژاد، ا. و عباسی، ف. ۱۴۰۲. تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه ذرت در مدل AquaCrop تحت مقادیر مختلف تنش آبی و کود نیتروژن. مدیریت آب در کشاورزی. ۱۰ (۱): ۱۷۵-۱۹۰.

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

روشنی، ق.، مختاران، ع.، قربانی نصرآباد، ق. ارزیابی کمی و کیفی ارقام تجاری پنبه در شرایط آبیاری با استفاده از زه‌آب کشت نیشکر در جنوب خوزستان، طرح تحقیقاتی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره مصوب: ۹۶۱۷۱۷-۰۲۱-۰۷۱۴-۰۷-۳۴.

سرکهکی، ا.، اگدرنژاد، ا. و مینایی، س. ۱۴۰۱. تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاه ذرت تحت تنش شوری در روش‌های مختلف آبیاری. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۶(۴): ۷۲۷-۷۳۸.

سیاحی، ح.، اگدرنژاد، ا. و ابراهیمی پاک، ن، ع. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل‌های گیاهی AquaCrop و WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد و بهره وری آب چغندرقند تحت دورهای مختلف آبیاری و

تنش کودی. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱(۱۰): ۲۵۹۳-۲۶۰۵.

غلامی، ا.، اگدرنژاد، ا. و ابراهیمی پاک، ن، ع. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی تأثیر مدیریت آب آبیاری بر عملکرد، زیست توده و کارآیی مصرف آب گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) با استفاده از مدل AquaCrop. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۷(۲): ۲۰۵-۲۲۲.

قربانی نصرآباد، ق.، مختاران، ع.، روشنی، ق. ع. و زنگی، م، ر. ۱۴۰۱. تاثیر تاریخ کشت و آبیاری با زهاب نیشکر خوزستان بر خواص کمی و کیفی ارقام پنبه. پژوهش آب ایران. ۱۶(۱): ۳۹-۴۸.

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

مختاران، ع. و قربانی نصرآباد، ق. ۱۳۹۹. استفاده از زه‌آب نیشکر درکشت ارقام مختلف پنبه با سه تاریخ کاشت متفاوت در اراضی جنوب خوزستان، طرح تحقیقاتی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره مصوب : ۹۷۱۳۱۴-۰۷۵-۱۴۰۷-۴۶-۳۴.

موسوی، س، ا، 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. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۵(۲): ۲۱۱-۲۲۸.

نیسی، ح.، اگدرنژاد، ا. و سپهری صادقیان، س. ۱۴۰۲. تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاهی برای ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه سیب‌زمینی در مدیریت‌های مختلف آب آبیاری در کرمانشاه. مدیریت آب در کشاورزی، ۱۰ (۱): ۱۵-۳۲.

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(11):1838–1846.

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

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. 1115-1133.

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.

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.

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.

Nasrolahi, A. H., Ahmadee, M. and Rustum, R. 2024. Sensitivity Analysis of AquaCrop Model for Winter Wheat in Different Water Supply Conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 150(2): 04024002.

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

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.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 18, Oct.-Nov. 2024, p. 515-529

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۸، مهر - آبان ۱۴۰۳، ص. ۵۲۹-۵۱۵

Sensitivity Analysis of Cotton Crop Growth Parameters of in the AquaCrop Model under Different Agricultural Managements

J. Baniferi[1], A. Egdernezhad[2*], A. Mokhtaran[3], M. Asadilour[2], D. Khodadadi Dehkordi[2]
Recived: Apr.26, 2024 Accepted: Jul.29, 2024

Abstract

Crop modeling is one of the widely used methods for simulating the crops yield under different farm management. However, paying attention to the sensitivity of these models to the input parameters can improve the calibration operation and reduce the simulation error. For this reason, in the current research, we analyzed the sensitivity of the AquaCrop model under planting date treatments (D1: March 5 and D2: March 15) and irrigation water salinity (S1: Karon water with an average salinity of 2 $dS.m^{-1}$, S2: combination of Karon water and drains with an average salinity of 4 $dS.m^{-1}$ and S3: drain with an average salinity of 6 $dS.m^{-1}$) and cotton cultivars (C1: Khursheed, C2: Golestan, C3: Sajedi and C4: Khordad). For sensitivity analysis, the normalized water productivity (WP*), maximum crop transpiration coefficient (KC_{Trx}), initial crop coefficient (CCo), crop growth coefficient (CGC), crop decline coefficient (CDC) and harvest index (HI) were used. Sensitivity analysis was done using Beven method. The results showed that the highest sensitivity was in parameters of HI (0.69) and WP* (0.6) and the lowest sensitivity was in parameters CDC (0.02) and CCo (0.3). The increase in planting date from D1 to D2 increases the sensitivity of the AquaCrop model to the HI (19%) and WP* (15%), and the increase in salinity from S1 to S3 increases the sensitivity of AquaCrop to the HI (42%) and WP* (50%). Therefore, in the farm management similar to the current research, paying attention to the two aforementioned parameters can cause the accuracy of the results in the calibration (and validation) stage.

Keywords: AquaCrop Model, Beven Method, Crop Modeling, Salinity Stress, Simulation

1- Ph.D. 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- Assistant Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
4- Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
5- Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
(* Corresponding Author Email**:** a_eigder@ymail.com)