Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

(OPEN ACCESS)

Sensitivity analysis of the AquaCrop model under salinity and water stress in tape drip irrigation in quinoa plant

Jalal Gharibvandnotorki[1], Halimeh Piri[*2], Parviz Haghighatjoo[3], Amir Naserin[4]

1. Ph.D. Student of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: jalalgharibvand@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: h_piri2880@uoz.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: phjou40@gmail.com
4. Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Ahvaz, Iran. E-mail: a.naserin@asnrukh.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 09.28.2024
Revised: 10.18.2024
Accepted: 11.17.2024

Keywords:
Beven Method,
Crop Modeling,
Normalized Water Productivity

ABSTRACT

Background and Objectives: The AquaCrop model is one of the plant models presented by the Agricultural Food Organization to simulate the performance of crops under different environmental conditions. Sensitivity analysis is considered as the basic step before evaluating the AquaCrop model, which has a great effect on improving the speed and accuracy of the calibration and validation stages. Therefore, it is very important to find sensitive and non-sensitive parameters at this stage for the crops available in the AquaCrop database.

Materials and Methods: The present study was conducted with the aim of analyzing the sensitivity of this plant model in a research farm located in Baghmalek city, in the east of Khuzestan province, in the crop year of 1402-1401. In this research, the quinoa plant was grown under drip irrigation and pulsed. In this research, the quinoa plant was grown under drip irrigation and pulsed.The researched treatments included the amount of irrigation water (I1: 60, I2: 80 and I3: 100 percent of field capacity) and water salinity (F: 0.5 and S: 6 $dS.m^{-1}$). Next, the sensitivity of this plant model to changes in plant growth parameters including normalized water productivity (WP*), maximum plant transpiration coefficient (KCTrx), primary vegetation cover (CC0), vegetation growth coefficient (CGC), vegetation reduction coefficient (CDC) and harvest index (HI) were evaluated by Beven (1979) method.

Results: The results showed that the AquaCrop was the most sensitive to changes in the WP* (with an average sensitivity coefficient of 0.82). Then, the highest sensitivity to K_{CTrx}, HI and CGC was obtained with average sensitivity coefficients of 0.72, 0.68 and 0.38, respectively. The lowest sensitivity was determined with average sensitivity coefficients of 0.02 and 0.05, respectively, with respect to CCo and CDC parameters. Changes in quinoa biomass were inverse to the CDC values and direct to the values of other crop parameters. The increase in salinity and water

stress increased the sensitivity of the AquaCrop results to changes in WP*, K_{CTrx}, HI and CGC.

Conclusion: The increase in salinity and water stress increased the sensitivity of the AquaCrop model simulation results to changes in normalized water productivity, plant transpiration coefficient, harvest index and vegetation growth coefficient.

Cite this article: Gharibvandnotorki, Jalal, Piri, Halimeh, Haghighatjoo, Parviz, Naserin, Amir. 2025. Sensitivity analysis of the AquaCrop model under salinity and water stress in tape drip irrigation in quinoa plant. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (2), 99-120.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2025.22826.3760
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹٤

تحلیل حساسیت مدل اکوکراپ تحت تنش‌های شوری و آبی در آبیاری قطره‌ای تیپ در گیاه کینوا

جلال غریبوند نوترکی[۱]، حلیمه پیری*[۲]، پرویز حقیقت‌جو[۳]، امیر ناصرین[٤]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: jalalgharibvand@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: h_piri2880@uoz.ac.ir
۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: phjou40@gmail.com
٤. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، اهواز، ایران. رایانامه: a.naserin@asnrukh.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۳/۰۷/۰۷
تاریخ ویرایش: ۰۳/۰۷/۲۷
تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۸/۲۷

واژه‌های کلیدی:
بهره‌وری آب نرمال‌شده،
روش Beven،
مدل‌سازی گیاهی

چکیده

سابقه و هدف: مدل اکوکراپ یکی از مدل‌های گیاهی است که توسط سازمان خواروبار کشاورزی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی تحت شرایط مختلف محیطی ارائه شده است. تحلیل حساسیت به‌عنوان مرحله اساسی پیش از ارزیابی مدل AquaCrop به شمار می‌رود که اثر زیادی در بهبود سرعت و دقت مراحل واسنجی و صحت‌سنجی دارد. بنابراین، یافتن پارامترهای حساس و غیرحساس در این مرحله برای گیاهان زراعی موجود در دیتابیس AquaCrop از اهمیت زیادی برخوردار است.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر با هدف تحلیل حساسیت این مدل گیاهی در یک مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان باغملک، در شرق استان خوزستان، در سال زراعی ۱٤۰۲-۱٤۰۱ انجام شد. در این پژوهش، گیاه کینوا تحت آبیاری قطره‌ای و به‌صورت پالسی کشت گردید. تیمارهای موردپژوهش شامل مقدار آب آبیاری (I1: ٦۰، I2: ۸۰ و I3: ۱۰۰ درصد نیاز آبی) و شوری آب (F: ۰/۵ و S: ٦ دسی‌زیمنس بر متر) بود. در ادامه میزان حساسیت این مدل گیاهی نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاهی شامل بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP*)، حداکثر ضریب تعرق گیاهی (KCTrx)، پوشش گیاهی اولیه (CC0)، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) و شاخص برداشت (HI) به روش Beven (1979) ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل AquaCrop بیش‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات پارامتر بهره‌وری آب نرمال‌شده (با متوسط ضریب حساسیت ۰/۸۲) داشت. پس‌ازآن، بیش‌ترین حساسیت نسبت به پارامترهای حداکثر ضریب تعرق گیاهی، شاخص برداشت و ضریب رشد

پوشش گیاهی به ترتیب با متوسط ضرایب حساسیت ۰/۷۲، ۰/۶۸ و ۰/۳۸ به‌دست آمد. کم‌ترین حساسیت نیز نسبت به دو پارامتر پوشش گیاهی اولیه و ضریب کاهش پوشش گیاهی به ترتیب با متوسط ضریب حساسیت ۰/۰۲ و ۰/۰۵ تعیین شد. تغییرات زیست‌توده کینوا نسبت به مقادیر ضریب کاهش پوشش گیاهی معکوس و نسبت به مقادیر سایر پارامترهای گیاهی مستقیم بود.

نتیجه‌گیری: افزایش تنش شوری و آبی سبب افزایش حساسیت نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop نسبت به تغییرات بهره‌وری آب نرمال‌شده، ضریب تعرق گیاهی، شاخص برداشت و ضریب رشد پوشش گیاهی گردید.

استناد: غریبوند نوترکی، جلال، پیری، حلیمه، حقیقت‌جو، پرویز، ناصرین، امیر (۱۴۰۴). تحلیل حساسیت مدل اکوکراپ تحت تنش‌های شوری و آبی درآبیاری قطره‌ای تیپ در گیاه کینوا. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۲ (۲)، ۱۲۰-۹۹.
DOI: 10.22069/jwsc.2025.22826.3760

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

مدل‌سازی گیاهی به‌عنوان روشی برای کاهش هزینه‌ها و زمان اجرای طرح‌های آزمایشی در مزرعه به شمار می‌رود (۱). به‌منظور انجام مدل‌سازی، مدل‌های گیاهی مختلفی توسط سازمان‌ها و مراکز علمی معتبر در جهان توسعه داده شده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به AquaCrop اشاره کرد که توسط سازمان فائو در سال ۲۰۰۹ برای کشورهایی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک توسعه داده شد (۲). این مدل برای شبیه‌سازی اثر تنش‌های آبی و شوری بر عملکرد گیاهان زراعی توسط پژوهش‌گران داخلی (۳، ٤ و ٥) و خارجی (٦ و ۷) قرار گرفته است. برای نزدیک کردن نتایج شبیه‌سازی در مدل AquaCrop به داده‌های مزرعه، این مدل در ابتدا باید طی دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ارزیابی شود. در این مراحل، پژوهش‌گران سعی می‌کنند با تغییر مقادیر پارامترهای ورودی مدل AquaCrop، دقت آن را در زمان شبیه‌سازی افزایش دهند (۱).

پارامترهای ورودی مدل AquaCrop به دو دسته ثابت و غیرثابت تقسیم می‌شوند. در سال‌های گذشته، پژوهش‌گران برای ارزیابی مدل AquaCrop، فقط پارامترهای غیرثابت را تغییر می‌دادند. اما، پژوهش‌های اخیر نشان داده است که نقش پارامترهای ثابت در مرحله واسنجی می‌تواند مؤثرتر از پارامترهای غیرثابت باشد و به‌شدت به‌دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان کمک کند (۸). به‌منظور تعیین اثر پارامترهای ورودی مدل AquaCrop، پژوهش‌گران یک مرحله پیش از ارزیابی مدل در نظر گرفتند تا در این مرحله، پارامترهای رشد گیاهان مورد تحلیل حساسیت قرار گیرد (۱). درواقع، تحلیل حساسیت به کاربران کمک می‌کند تا میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی بر نتایج مدل گیاهی AquaCrop را بررسی کنند (۸). براساس نتایج این مرحله، ارزیابی مدل AquaCrop با سهولت و سرعت بیش‌تری انجام می‌شود و نتایج شبیه‌سازی با دقت بیش‌تری تعیین گردد.

با توجه به اهمیت تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاهی در مدل AquaCrop، پژوهش‌گران مختلفی به مطالعه این موضوع در شرایط مختلف مدیریت مزرعه پرداخته‌اند. در پژوهش‌های انجام‌شده روی گیاه گندم، مشاهده شد که پارامتر حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx}) بیش‌ترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترهای ورودی در مدل AquaCrop داشت (۹). نتایج پژوهش‌ها بر تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نشان داد که این مدل بیش‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات پارامترهای حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx})، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) و ضریب حداکثر پوشش گیاهی (CC_X) داشت (۱۰). مطالعات نشان داد که این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی گندم زمستانه در چین و گندم بهاره در کانادا، به تغییرات پارامترهای ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0)، بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP^*) و ضریب حداکثر پوشش گیاهی (CC_X) بیش‌ترین حساسیت را نشان داد (۱۱).

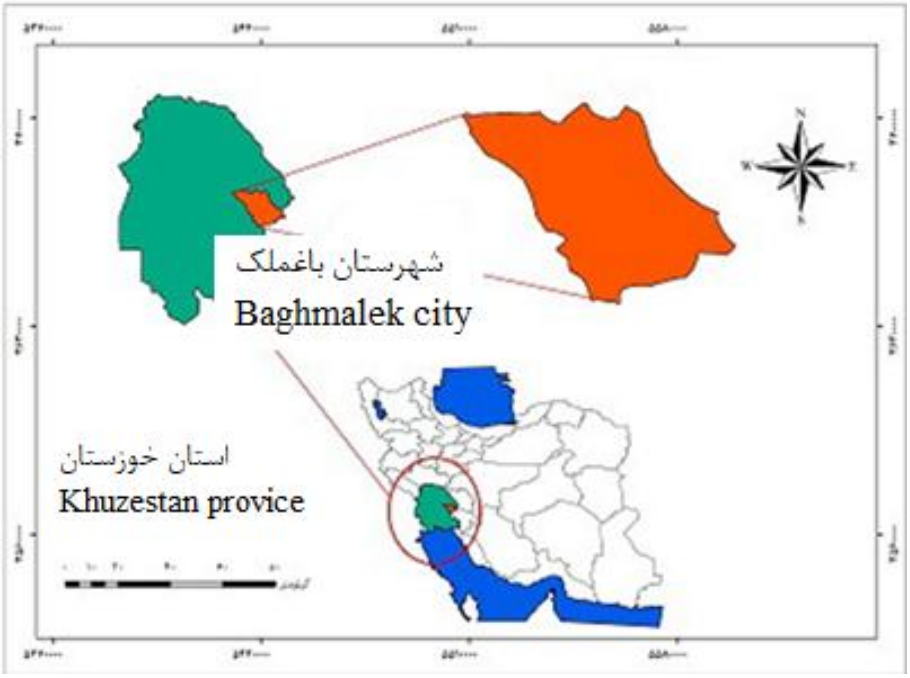
پژوهش‌گران داخلی نیز در سال‌های اخیر به تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در شرایط مختلف پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، ابراهیمی‌پاک و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی این مدل گیاهی در شبیه‌سازی زعفران، گزارش کردند که بیش‌ترین حساسیت نسبت به تغییرات ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) وجود داشت (۱۲). نتایج مشابه روی گیاه کلزا نشان

داد که این مدل بیش‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx}) داشت (۵). در پژوهش ادبی و همکاران (۲۰۱۸) بیش‌ترین حساسیت نسبت به ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) در شبیه‌سازی گندم و ذرت وجود داشت. هم‌چنین، این پژوهش‌گران گزارش کردند که برخی پارامترهای رشد گیاهان اثری در مرحله واسنجی ندارد و به همین دلیل بهتر است تغییراتی در مقادیر پیش‌فرض آن‌ها ایجاد نشود (۱۳). احمدی و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی گندم در بروجرد به این نتیجه رسیدند که این مدل گیاهی بیش‌ترین حساسیت را نسبت به پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) و ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) داشت (۳). پژوهیده و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به پارامترهای رشد گیاه ذرت نشان دادند که این مدل به پارامترهای شاخص برداشت (HI) و بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP^*) بیش‌ترین حساسیت و نسبت به پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) کم‌ترین حساسیت را داشت (۱٤).

کینوا یکی از گیاهان زراعی است که بومی ایران نبوده و در سال‌های اخیر کشت آن در استان‌های مختلف رو به رشد است (۱۵). کینوا به‌عنوان یکی از گیاهان جایگزین برنج به شمار می‌رود و به دلیل مقاومت نسبت به شوری و کم‌آبی، در آینده جایگاه قابل‌توجهی در بخش کشاورزی ایران خواهد داشت (۱٦). این گیاه در پایگاه داده مدل AquaCrop وجود دارد و می‌توان با این مدل گیاهی به شبیه‌سازی عملکرد آن پرداخت. به همین دلیل، بررسی تحلیل حساسیت پارامترهای رشد این گیاه تحت مدیریت‌های مختلف زراعی اهمیت ویژه‌ای دارد. نتایج بررسی منابع نشان داد که تحلیل حساسیت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد کینوا کم‌تر موردتوجه پژوهش‌گران بوده است. هم‌چنین با توجه به نتایج پژوهش‌های گذشته لازم است قبل از استفاده از مدل اکوکراپ، حساسیت آن نسبت به پارامترهای ورودی بررسی شود بنابراین در این پژوهش پارامترهای حساس مدل نسبت به مقادیر کمیت و کیفیت آب آبیاری واسنجی شدند.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه: پژوهش حاضر در یک مزرعه تحقیقاتی واقع در شهرستان باغملک، در شرق استان خوزستان، در طول جغرافیایی ٤۹ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ٤۱ دقیقه شمالی در سال زراعی ۱٤۰۲-۱٤۰۱ انجام شد. این منطقه، در ارتفاع ۸۵۵ متری از سطح دریا قرار دارد. بیش‌ترین درجه حرارت این منطقه در تابستان‌ها به ٤۲ درجه و کم‌ترین درجه حرارت در زمستان‌ها به صفر درجه سانتی‌گراد می‌رسد. میزان بارش سالیانه در این منطقه طی دوره آماری ۲۰ ساله (۱٤۰۲-۱۳۸۲) به‌طور متوسط ۵۰۰ میلی‌متر است. شکل ۱ موقعیت منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه موردمطالعه.

Figure 1. Location of the study area.

تیمارهای موردپژوهش شامل مقدار آب آبیاری (I1: ٦٠، I2: ٨٠ و I3: ١٠٠ درصد ظرفیت زراعی) و کیفیت آب (F (شیرین): ٠/٥ و S (شور): ٦ دسی‌زیمنس بر متر) بود. در ابتدای بهمن، زمین شخم و دیسک زده شد. سپس با استفاده از دستگاه خطی‌کار، بذر کینوای علوفه‌ای در عمق ٥ سانتی‌متری خاک کاشته شد. هر کرت آزمایشی به مساحت ١٢ مترمربع (٤ متر × ٣ متر) در نظر گرفته شد. در هر کرت پنج ردیف کینوا کشت گردید و دو کرت کناری به‌عنوان حاشیه در طول آزمایش در نظر گرفته شد. در انتهای فصل کشت، برداشت نمونه از ردیف‌های میانی صورت گرفت. شکل ٢ کرت‌های آزمایشی را نشان می‌دهد.

آبیاری گیاه در طول آزمایش با اجرای سیستم آبیاری قطره‌ای انجام شد. براساس عرف منطقه، دور آبیاری به‌صورت دو روز در میان و با هدف تأمین کمبود رطوبت خاک تا عمق ٣٠ سانتی‌متری در تیمار آبیاری کامل و رساندن به حد ظرفیت زراعی خاک در نظر گرفته شد. سایر تیمارهای آبیاری بر اساس ٨٠ و ٦٠ درصد، مقدار آب آبیاری کامل صورت گرفت. اندازه‌گیری رطوبت خاک در محدوده موردنظر برای تعیین نیاز آبی گیاه، با استفاده از دستگاه TDR انجام شد. سپس مقدار عمق آب آبیاری با استفاده از رابطه ١ محاسبه گردید.

$$d = (\theta_{fc} - \theta_i) \times \Delta z \qquad (1)$$

در رابطه فوق، d عمق آبیاری (متر)، θ_{fci} و θ_i به‌ترتیب رطوبت حجمی خاک ($m^3.m^{-3}$) در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری در است. هم‌چنین Δz ضخامت لایه خاک برحسب متر (٠/٣ متر) است. با توجه به این‌که اندازه‌گیری رطوبت برای همه تیمارها در یک زمان و در طول دوره آزمایش دشوار بود؛ زمان آبیاری برای هر کرت با روش TDR اندازه‌گیری شد. درواقع، با استفاده از دستگاه TDR، زمان لازم برای آبیاری هر تیمار به‌دست آمد. بر این اساس، در زمان اعمال آبیاری در مزرعه، زمان آبیاری برای

تیمارهای موردنظر در نظر گرفته می‌شد تا تیمارهای آبیاری اعمال گردند. با توجه به آزمایش‌ها، زمان آبیاری برای تیمارهای آبیاری I1 تا I3 به ترتیب ۵۰ تا ۹۰ دقیقه بود. خصوصیات منابع آب‌وخاک مورداستفاده به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. سیستم آبیاری مورداستفاده شامل لوله‌های آبیاری قطره‌ای تیپ شرکت اصفهان پلاست با فواصل قطره‌چکان ۲۰ سانتی‌متر بود که با طول ٤ متر در هر کرت استفاده گردید. برای آبیاری، آب در مخزن‌هایی در کنار مزرعه ذخیره شد. سپس با استفاده از پمپ، آب از درون مخازن به لوله‌های اصلی و پس‌ازآن به نوارهای تیپ منتقل می‌گردید. مقدار آب آبیاری تمامی تیمارها تا زمان سبز شدن کامل مزرعه (مرحله شش‌برگی) یکسان بود. هم‌چنین تیمار شوری تا این مرحله اعمال نگردید. آب شیرین (S1) از آب چاه موجود در مزرعه و آب‌شور (S2) از چاه‌های شهرستان مجاور تأمین شد. برای تأمین مداوم آب‌شور، به‌صورت مکرر آب از شهرستان مجاور با تانکر به مزرعه منتقل و در مخازن مجزا ذخیره می‌گردید. در انتهای فصل کشت، برداشت انجام شد و عملکرد علوفه با استفاده از ترازو اندازه‌گیری شد. حجم آب مورداستفاده در جدول ۳ آورده شده است.

شکل ۲- مزرعه تحقیقاتی و بررسی کرت‌ها در طول آزمایش.

Figure 2. Research field and inspection of the plots during the experiment.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی آب مورداستفاده.

Table 1. Chemical characteristics of the used water.

SAR	سدیم Sodium	منیزیم Magnesium	کلسیم Calcium	کلر Cl^{-1}	پتاسیم Potassium	بی‌کربنات Hco_3^{-1}	pH	EC (dS/m)	نمونه Sample
	meq/lit								
3.63	6.5	2.3	4.1	6.3	0.32	3.2	7.31	0.5	F
17.69	36.7	4.2	4.5	31.4	0.61	4.8	7.12	6	S

جدول ۲- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه.

Table 2. Physicochemical properties of farm soil.

SAR	سدیم Sodium	منیزیم Magnesium	کلسیم Calcium	کلر Cl^{-1}	بی‌کربنات Hco_3^{-1}	کربنات Co_3^{-2}	pH	EC (dS/m)	بافت خاک Soil texture	عمق خاک Soil depth (cm)
	meq/lit									
1.5	3.8	3.2	8.2	4.5	3.0	0	8.19	0.76	سیلتی لوم Loam Silt	0-30

جدول ۳- حجم آب مورد استفاده در تیمارهای آبیاری.

Table 3. Volume of water used in irrigation treatments.

I3	I2	I1	تیمار Treatment
5670	4536	3402	حجم آب (مترمکعب در هکتار) Volume water (m^3/ha)

مدل AquaCrop: پارامترهای ورودی به مدل AquaCrop به دو دسته ثابت و غیرثابت تقسیم می‌شوند. پارامترهای ثابت شامل پارامترهایی است که به نوع گیاه مرتبط است و براساس پژوهش‌های توسعه‌دهندگان این مدل تعیین شده‌اند. این پارامترها به شرایط آزمایش و مدیریت مزرعه وابسته نیستند و به همین دلیل قبلاً در طول شبیه‌سازی تغییر نمی‌کردند. از جمله این پارامترها می‌توان به بهره‌وری آب نرمال شده، شاخص برداشت و ضریب گیاهی برای تعرق اشاره کرد. تعداد این پارامترها محدود است و تعیین مقادیر آن‌ها در پژوهش‌ها نیز مشکل می‌باشد. سایر پارامترهای گیاهی که در مدل AquaCrop وجود دارد براساس شرایط محل آزمایش و مدیریت مزرعه قابل تغییر هستند. اگر اندازه‌گیری این پارامترها در پژوهش‌ها به سهولت انجام شود؛ به عنوان پارامترهای اندازه‌گیری‌شده به این مدل وارد می‌شوند. از جمله این پارامترها می‌توان به زمان کاشت، طول دوره رشد، عمق ریشه و تراکم کاشت اشاره کرد. در برخی موارد، پارامترهای غیرثابت در پژوهش‌ها اندازه‌گیری نمی‌شوند و مقادیر آن‌ها باید با ارزیابی مدل تعیین گردد. از جمله این پارامترها می‌توان به ضریب رشد پوشش گیاهی، ضریب کاهش پوشش گیاهی و پوشش گیاهی اولیه اشاره کرد. مدل AquaCrop برای تعیین عملکرد محصول از تبخیر- تعرق به‌صورت زیر استفاده می‌کند (۲):

$$B = WP^{*}\sum_{i=1}^{n}\frac{Tr_i}{ETo_i} \qquad (۲)$$

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. زمانی که تنش شوری برای این مدل در نظر گرفته شود؛ حدود بالا و پایین اثر تنش شوری در این مدل به صورت پیش‌فرض تعیین می‌شود. در مقادیر بیش‌تر از حدود بالا (۱۸ دسی‌زیمنس بر متر)، تنش شوری اثر معنی‌داری بر کاهش زیست‌توده نخواهد داشت. در مقادیر پایین‌تر از حدود پایین (۵ دسی‌زیمنس بر متر) نیز اثر تنش شوری برابر با صفر خواهد بود. در مقادیر بین حدود بالا و پایین، تنش شوری به‌صورت خطی بر کاهش زیست‌توده اثر می‌گذارد. تعرق روزانه در مدل AquaCrop با استفاده از رابطه ۳ به‌دست می‌آید:

$$T_{ri} = K_s \times CC \times K_{CTrx} \times ET_{0i} \qquad (۳)$$

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 ٤ تا ٦) به‌شرح زیر برای تعیین این پارامتر استفاده می‌شود (۲).

$$CC = CC_0 \times e^{tCGC} \qquad (٤)$$

$$CC = CC_x - 0.25\frac{CC_x^{\,2}}{CC_0}\times e^{-tCGC} \qquad (٥)$$

$$CC = CC_x\left[1-0.05\left(e^{\frac{CDC}{CCx}\times t}-1\right)\right] \qquad (٦)$$

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 ٤ تا ٦ 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: روش‌هایی که برای تحلیل حساسیت مدل AquaCrop استفاده می‌شود به سه دسته کلی تقسیم می‌شود. در دسته نخست، با افزایش و کاهش پارامترهای ورودی به میزان ثابت، تغییر زیست‌توده تعیین می‌گردد. در روش دوم، با تغییر متعدد هر پارامتر ورودی، یک معادله خطی برای تعیین رابطه زیست‌توده و پارامتر ورودی محاسبه می‌شود. در انتها، با مقایسه شیب خط و عرض از مبدأ همه خطوط، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به پارامترهای ورودی تعیین می‌گردد. دو روش نخست از سرعت کم برخوردار هستند و نمی‌توانند نحوه تغییر حساسیت را برای هر واحد افزایش یا کاهش پارامتر ورودی تشریح کنند. به همین دلیل، روش دیگری برای تحلیل حساسیت مدل AquaCrop معرفی شده است که ضعف دو روش قبلی را پوشش دهد (۱). در این روش، پارامترهای رشد گیاهی 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 استفاده قرار گرفتند. این پارامترها به دلیل روابط حاکم بر مدل AquaCrop و توصیه سایر پژوهش‌گران مانند رحیمی‌خوب و همکاران (۲۰۱۹)، احمدی و همکاران (۲۰۲۱) و نصراللهی و همکاران (۲۰۲٤) انتخاب شدند (۱، ۸ و ۳). در جدول ٤، مقادیر اولیه و

دامنه تغییرات این پارامترها در دیتابیس مدل AquaCrop نشان داده شده است. میزان نمو این پارامترها نیز براساس تغییرات مجاز آن‌ها در مدل AquaCrop در نظر گرفته شد.

جدول ٤- مقادیر اولیه و دامنه تغییرات پارامترهای گیاه کینوا با استفاده از مدل اکوکراپ.

Table 4. Initial values and range of parameter in AquaCrop.

نمو تغییرات Increment	حد بالا Upper bound	حد پایین Lower bound	مقدار اولیه Initial Value	واحد Unit	علامت Symbol	پارامتر Parameter
1	12.5	8.5	10.5	$g.m^{-2}$	WP^*	بهره‌وری آب نرمال شده Normalized water productivity
0.05	1.2	1.0	1.1	-	K_{CTrx}	حداکثر ضریب تعرق گیاهی Maximum crop coefficient for transpiration
0.1	1.5	1.1	1.3	%	CC_o	پوشش گیاهی اولیه Initial Crop canopy
1	12	8.0	10.0	$\%day^{-1}$	CGC	ضریب رشد پوشش گیاهی Crop canopy growth coefficient
0.1	10.2	9.8	10.0	$\%day^{-1}$	CDC	ضریب کاهش پوشش گیاهی Crop canopy decline coefficient
3	56	44	50	%	HI	شاخص برداشت Harvest index

به منظور تحلیل حساسیت از رابطه ۷ ارائه شده توسط Beven (1979) استفاده شد (۱۷).

$$S_{pi} = \lim_{\Delta Pi \to 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta P_i}{P_i}} = \frac{\partial y}{\partial P_i} \times \frac{P_i}{y} \qquad (۷)$$

در این رابطه، S_{pi} ضریب حساسیت (بی‌بعد)، P_i پارامتر مورد بررسی و y مقدار زیست‌توده (کیلوگرم در هکتار) 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. در یک نگاه کلی، رابطه دیفرانسیل در این رابطه، حساسیت نسبت به هر پارامتر را مشخص می‌کند. این حساسیت به بزرگی مقادیر پارامترهای Pi و y نیز وابسته است. به‌عنوان مثال، اگر S_{pi} برابر با ۰/۱ باشد، تغییرات ۱۰ درصدی Pi موجب افزایش یک درصدی پارامتر y می‌شود (۱). مقدار ضریب حساسیت با توجه به جدول ۵ در چهار گروه کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار می‌گیرند (۱۸).

جدول ۵- طبقه‌بندی ضریب حساسیت.

Table 5. Classification of sensitivity coefficient.

گروه Group	دامنه تغییرات ضریب حساسیت Range	توضیحات Description
1	$0 \le \|Sp\| < 0.05$	کم Low
2	$0.05 \le \|Sp\| < 0.2$	متوسط Medium
3	$0.2 \le \|Sp\| < 1$	زیاد High
4	$1 \le \|Sp\|$	بسیار زیاد Very high

نتایج و بحث

پارامترهای رشد گیاهی در مدل AquaCrop براساس نمو تعیین شده در جدول ٤ تغییر داده شد و براساس رابطه ۷ ضریب حساسیت هر پارامتر تعیین گردید (جدول ٦). با توجه به نتایج به دست آمده، بیش‌ترین ضریب حساسیت به پارامتر WP* اختصاص داشت. پس‌ازآن، پارامترهای K_{CTrx} و HI بیش‌ترین ضریب حساسیت را داشتند. کم‌ترین ضریب حساسیت در پارامتر CCo دیده شد. ضریب حساسیت پارامتر CDC منفی بود. بنابراین، تغییرات این ضریب رابطه معکوس با نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop دارد. بدین‌منظور که اگر مقدار CDC افزایش یابد؛ زیست‌توده شبیه‌سازی شده توسط مدل کاهش می‌یابد و برعکس. متوسط ضریب حساسیت برای تیمارهای آبیاری I1، I2 و I3 در WP* به‌ترتیب برابر با ۰/۷٦، ۰/۸٤ و ۰/۸۹ به دست آمد. این نتایج نشان داد که با افزایش تنش آبی، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر افزایش یافت. این نتایج برای سایر پارامترها نیز دیده شد به‌طوری‌که تغییر مقدار آب آبیاری از I1 به I3 سبب افزایش میانگین ضریب حساسیت پارامتر K_{CTrx} از مقدار ۰/۷۹ به ۰/٦٦ گردید. این نتایج برای HI از ۰/۷٤ به ۰/٦۳ و برای CGC از ۰/٤٤ به ۰/۳۳ بود. درحالی‌که میانگین تغییرات ضریب حساسیت برای دو پارامتر CCo و CDC به ترتیب در بازه ۰/۰۳-۰/۰۲ و ۰/۰٦-۰/۰۵ محاسبه گردید. در نتیجه، تنش آبی اثری بر حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات دو پارامتر CCo و CDC نداشت. افزایش شوری آب آبیاری نیز سبب افزایش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای WP*، K_{CTrx}، HI و CGC به ترتیب به میزان ۱۱، ۱۰، ۸ و ۱۰ درصد گردید. با تغییر تنش شوری از F به S، دامنه تغییرات ضریب حساسیت برای پارامترهای CCo و CDC به ترتیب در بازه ۰/۰۳-۰/۰۲ و ۰/۰٦-۰/۰۵ به دست آمد؛ بنابراین، تنش شوری سبب افزایش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای WP*، K_{CTrx}، HI و CGC گردید ولی اثری بر حساسیت این مدل نسبت به سایر پارامترها نداشت. البته برخی پژوهش‌گران بیان کرده‌اند که حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاهی می‌تواند به نوع گیاه نیز وابسته باشد (۱۹) ولی به‌دلیل کاهش زیست‌توده و رشد گیاهان زراعی در تنش‌های آبی و شوری، حساسیت مدل AquaCrop نیز نسبت به تغییرات پارامترهای رشد افزایش می‌یابد (۳ و ۲۰).

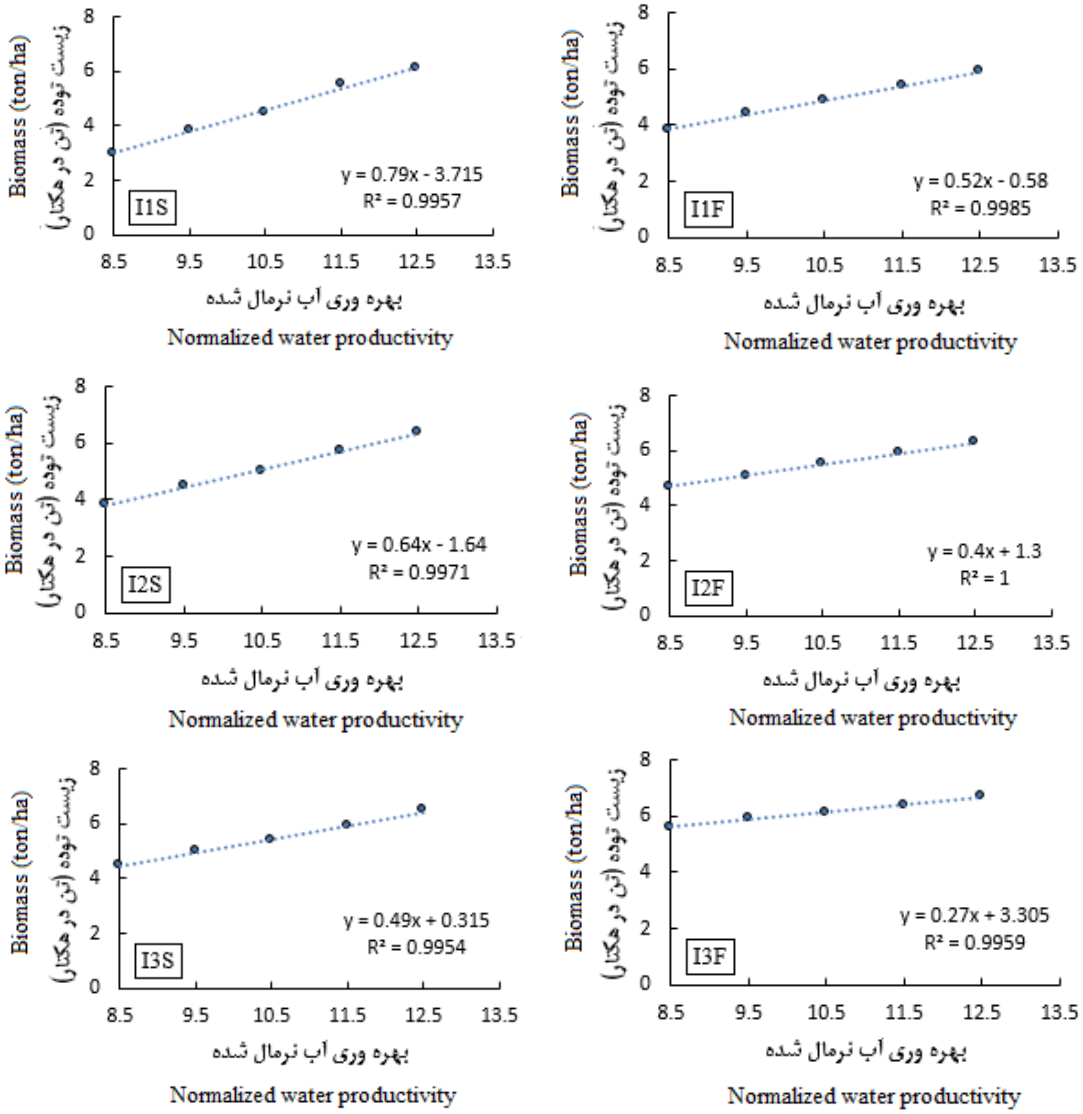
جدول ٦- ضرایب حساسیت پارامترهای رشد گیاه کینوا.

Table 6. Sensitivity coefficients of quinoa growth parameters.

پارامترهای رشد گیاه Crop growth parameter						تیمار Treatment
HI (%)	CDC (%day^{-1})	CGC (%day^{-1})	CC_0 (cm^2.plant^{-1})	K_{CTrx} (-)	WP* (g.m^{-2})	
0.71	-0.05	0.41	0.03	0.75	0.85	I1F
0.77	-0.06	0.46	0.03	0.82	0.93	I1S
0.66	-0.05	0.38	0.02	0.70	0.79	I2F
0.71	-0.06	0.40	0.03	0.76	0.88	I2S
0.60	-0.04	0.31	0.02	0.62	0.71	I3F
0.65	-0.05	0.35	0.02	0.70	0.80	I3S
0.15	0.01	0.07	0.00	0.09	0.17	Standard deviation

در شکل ۳، تغییرات زیست‌توده کینوا نسبت به مقادیر مختلف پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) نشان داده شده است. مقدار پیش‌فرض برای پارامتر WP* در مدل AquaCrop برابر با ۱۰/۵ گرم بر مترمربع است که با درنظر گرفتن دامنه تغییرات در جدول ۱، مقادیر ۸/۵ و ۱۲/۵ به‌عنوان حدود بالا و پایین تغییرات تعیین شدند. همان‌طورکه در شکل ۳ نشان داده شده است؛ افزایش مقدار WP* سبب افزایش زیست‌توده کینوا گردید. با توجه به این‌که ضریب حساسیت WP* بین ۷۱/۹۳-۰/۰ متغیر بود (جدول ٦)؛ بنابراین مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر حساسیت زیاد داشت (شکل ۳).

این نتایج با مطالعات سایر پژوهش‌گران از جمله رحیمی‌خوب و همکاران (۲۰۲۱)، احمدی و همکاران (۲۰۲۳) و نصرالهی و همکاران (۲۰۲٤) مطابقت داشت (۸، ۳ و ۱). این پژوهش‌گران نیز بیان کردند که بیش‌ترین حساسیت در بین پارامترهای رشد گیاهی، به پارامتر WP* اختصاص داشت و ضریب حساسیت این پارامتر در دسته زیاد قرار گرفت. افزایش تنش آبی و شوری، سبب افزایش شیب خط در شکل ۳ گردیدند که این موضوع به دلیل افزایش حساسیت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده کینوا است. این نتایج با مشاهدات به دست آمده در جدول ٦ مطابقت داشت.

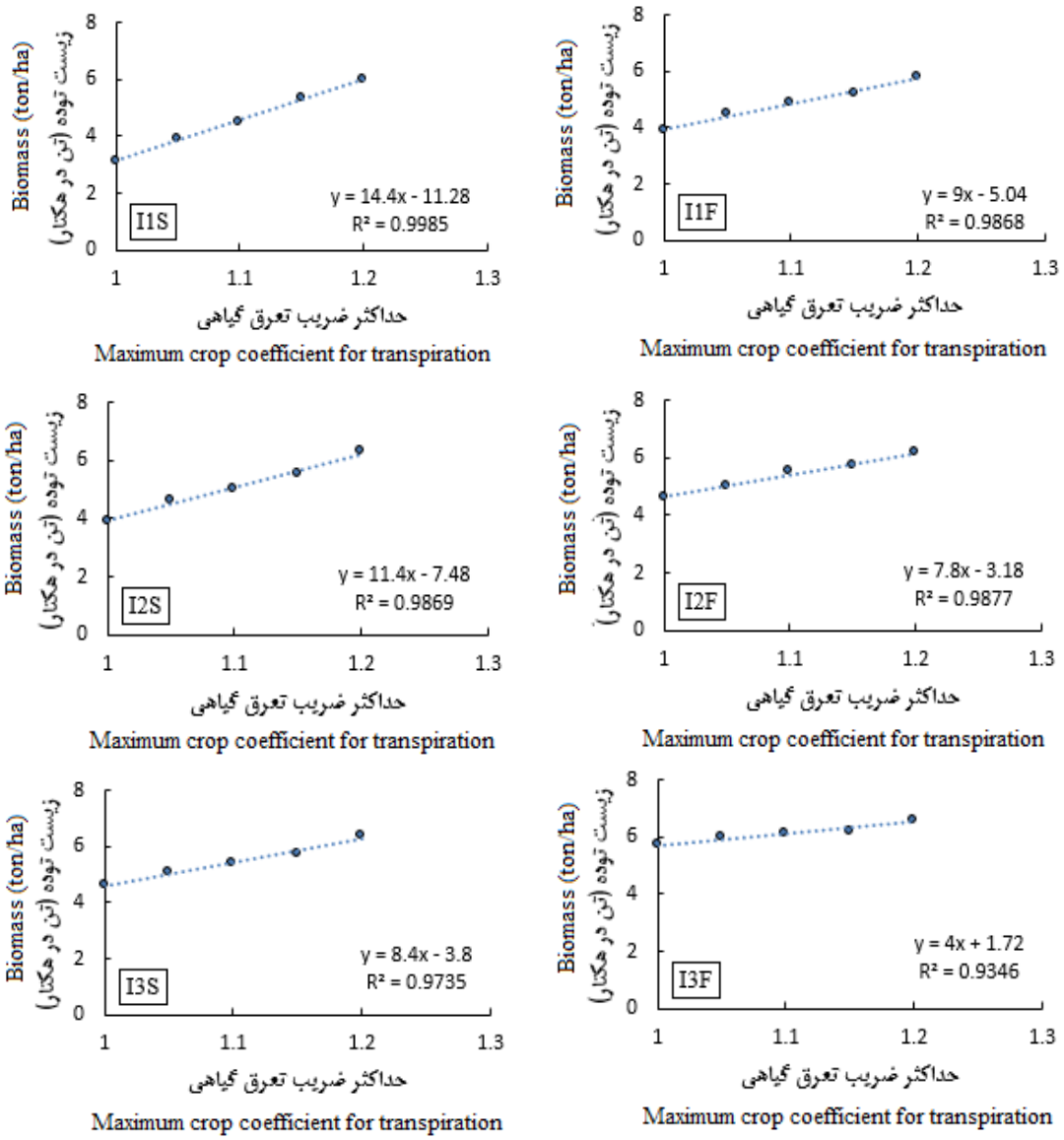


شکل ۳- اثر تغییر پارامتر بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP^*) بر نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده گیاه کینوا تحت‌تأثیر شش تیمار آبیاری.

Figure 3. The effect of changing the normalized water productivity parameter (WP*) on the simulation results of quinoa plant biomass under the influence of six irrigation treatments (I1, I2 and I3, respectively, to meet the water demand of 60, 80 and 100 The percentage and F and S of the quality of irrigation water are 0.5 and 6 dS.m^{-1}, respectively).

تغییرات زیست‌توده کینوا نسبت به مقادیر مختلف حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق (K_{CTrx}) در شکل ٤ نشان داده شده است. مقدار پیش‌فرض و دامنه تغییرات برای این پارامتر به ترتیب ۱/۱ و ۱/۲–۱/۰ بود. مقادیر حداقل و حداکثر ضریب حساسیت K_{CTrx} به ترتیب ۰/٦۲ و ۰/۸۲ بود که براساس طبقه‌بندی جدول ۵، در دسته زیاد قرار داشت. افزایش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر در تنش‌های آبی و شوری در جدول ٦ نیز قابل مشاهده است. با در نظر گرفتن تیمارهای متناظر آبیاری، افزایش شوری از F به S سبب افزایش شیب‌خط و در نتیجه افزایش حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات K_{CTrx} گردید. افزایش تنش آبی از I1 به I3 نیز سبب افزایش شیب‌خط گردید که این نتایج سبب افزایش حساسیت مدل AquaCrop گردید. متوسط ضریب حساسیت K_{CTrx} برابر با ۰/۸۲ بود. این مقدار

به نتایج سایر پژوهش‌گران از جمله رحیمی‌خوب و همکاران (۲۰۲۱) نزدیک بود (۸). در نتیجه، می‌توان پارامتر K_{CTrx} را یکی از مهم‌ترین ورودی‌های مدل AquaCrop برای واسنجی در نظر گرفت.

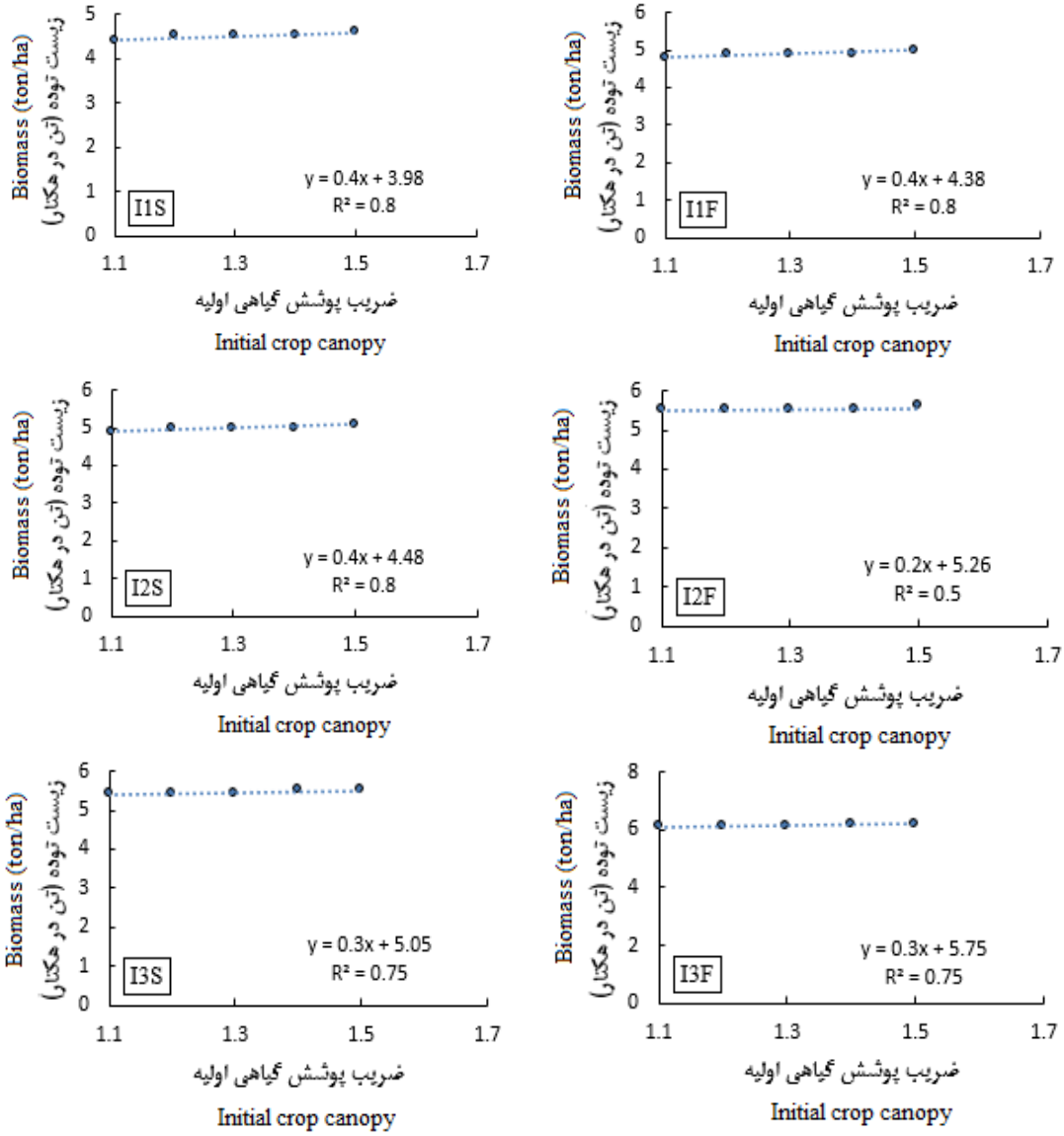


شکل ٤- اثر تغییر پارامتر حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx}) بر نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده گیاه کینوا در شش تیمار مختلف.

Figure 4. The effect of changing the maximum crop coefficient for transpiration (K_{CTrx}) on the simulation results of quinoa plant biomass under the influence of six irrigation treatments (I1, I2 and I3, respectively, to meet the water demand of 60, 80 and 100 The percentage and F and S of the quality of irrigation water are 0.5 and 6 dS.m^{-1}, respectively).

تغییرات زیست‌توده کینوا نسبت به تغییرات ضریب پوشش گیاهی اولیه (CCo) در مدل AquaCrop در شکل ۵ نشان داده شده است. این تغییرات به‌صورت مستقیم بود و به همین دلیل با افزایش مقدار CCo، زیست‌توده کینوا نیز اندکی (کم‌تر از دو درصد) افزایش یافت. البته با توجه به این‌که ضریب حساسیت CCo در محدوده ۰/۰۳-۰/۰۲ قرار داشت؛ بر اساس جدول ۵ حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر در دسته کم قرار داشت. پایین بودن مقادیر شیب‌خط در

شکل ۵ نیز به همین دلیل است. این نتایج در سایر مطالعات پژوهش‌گران از جمله نصرالهی و همکاران (۲۰۲٤) برای گیاه گندم زمستانه نیز گزارش شده است. در پژوهش ایشان، شیب خط برای پارامتر CCo کم‌تر از ۰/۰۷ بود. به همین دلیل، این پژوهش‌گران پیشنهاد کردند برای واسنجی مدل AquaCrop، توجهی به این پارامتر نشود (۱).

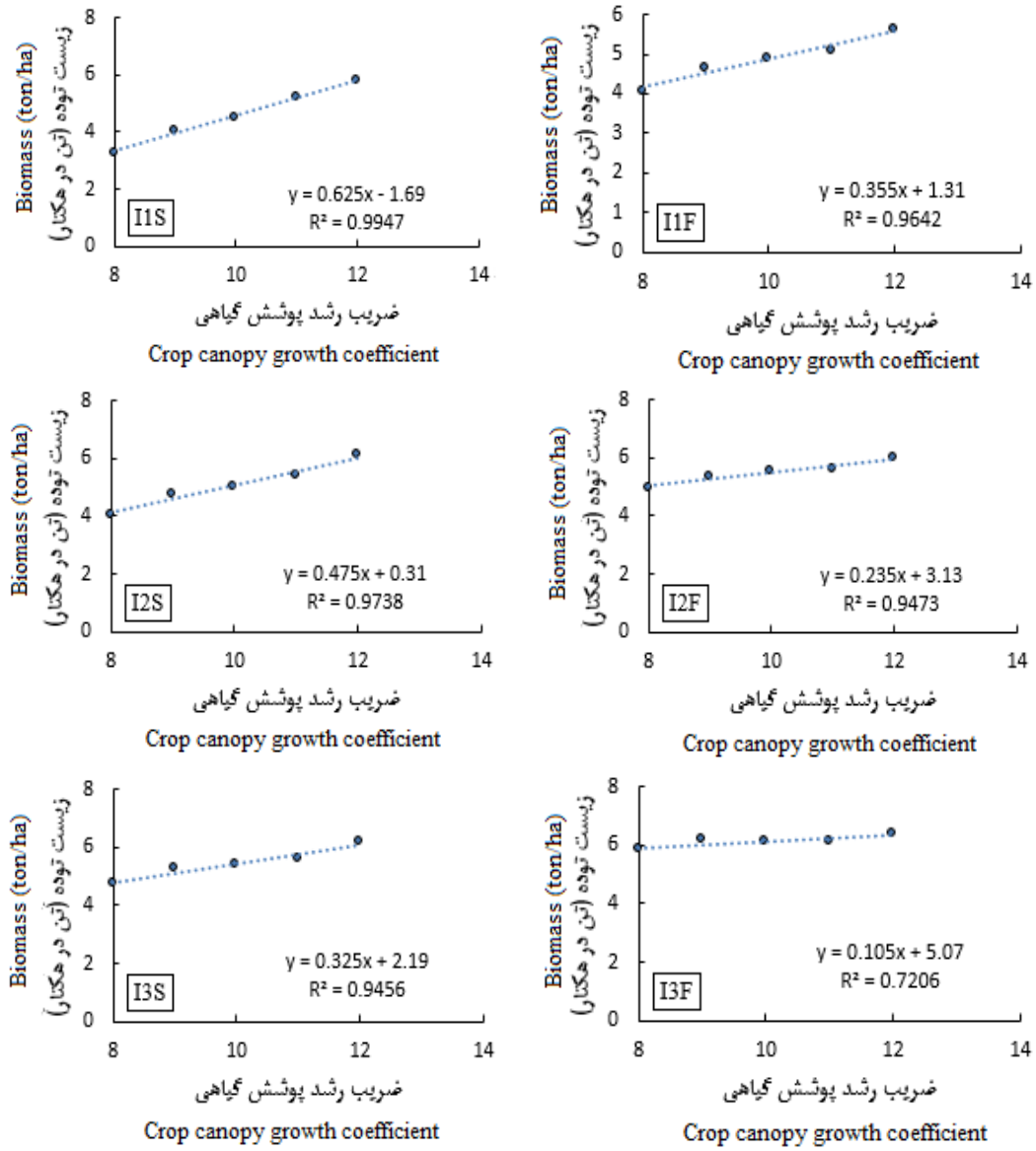


شکل ۵- اثر تغییر پارامتر ضریب پوشش گیاهی اولیه (CC_0) بر نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده گیاه کینوا در شش تیمار مختلف.

Figure 5. The effect of changing the initial crop canopy (CCo) on the simulation results of quinoa plant biomass under the influence of six irrigation treatments (I1, I2 and I3, respectively, to meet the water demand of 60, 80 and 100 The percentage and F and S of the quality of irrigation water are 0.5 and 6 dS.m^{-1}, respectively).

در شکل ٦، تغییرات زیست‌توده کینوا نسبت به مقادیر مختلف ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) نشان داده شده است. بر اساس جدول ٦، ضریب حساسیت برای این پارامتر در محدوده ۰/٤٦-۰/۳۱ بود. بنابراین، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر در دسته زیاد قرار داشت. گرچه

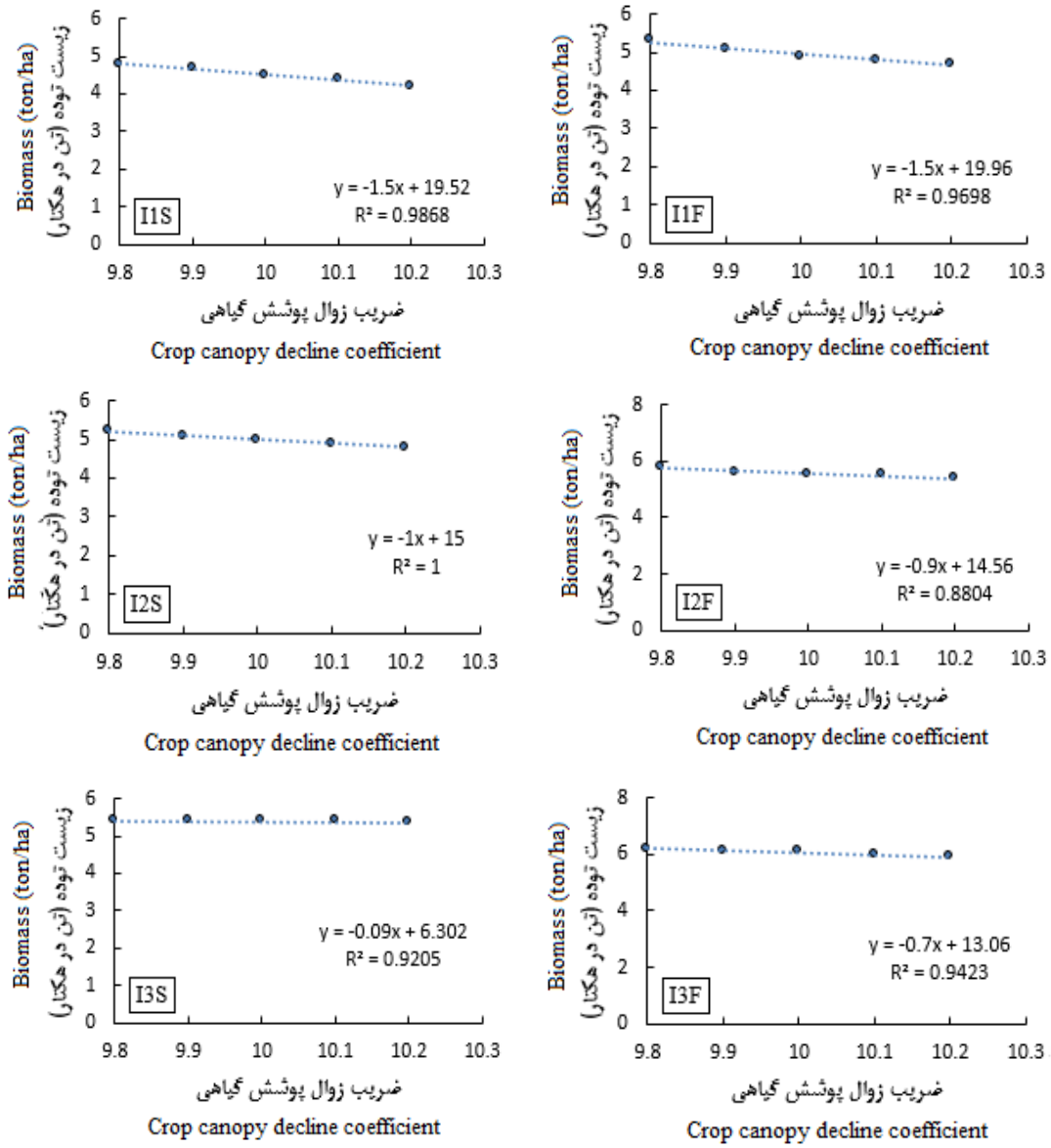
میزان حساسیت نسبت به این پارامتر کم‌تر از دو پارامتر *WP و K_{CTrx} بود. شیب‌خط در تیمار I1S برابر با ۰/۶۲ و در تیمار I1F برابر با ۰/۳۵ بود. بنابراین، افزایش شوری آب آبیاری از تیمار شوری آب ۰/۵ به ٦ دسی‌زیمنس بر متر سبب دو برابر شدن شیب‌خط در شبیه‌سازی زیست‌توده کینوا گردید. تغییرات مشابه بین دو تیمار I2F و I2S و تیمارهای I3F و I3S نیز مشاهده گردید. مقایسه شیب‌خط در تیمارهای آبیاری I1، I2 و I3 نیز نشان داد که با افزایش تنش آبی، شیب‌خط حدود دو برابر افزایش یافت؛ بنابراین، اگر برای واسنجی مدل AquaCrop از تیمارهای با تنش آبی و شوری استفاده می‌شود؛ نسبت به تغییرات شدید زیست‌توده با تغییر هر واحد CGC باید توجه کرد. از طرف دیگر، در شرایط بدون تنش، تغییرات زیست‌توده با تغییرات ملایم‌تری نسبت به تغییرات CGC انجام می‌گردد.



شکل ٦- اثر تغییر پارامتر ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) بر نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده گیاه کینوا تحت‌تأثیر تنش‌های شوری و آبی.

Figure 6. The effect of changing the crop canopy growth coefficient (CGC) on the simulation results of quinoa plant biomass Under the influence of salinity and water stress (I1, I2 and I3, respectively, to meet the water demand of 60, 80 and 100 The percentage and F and S of the quality of irrigation water are 0.5 and 6 $dS.m^{-1}$, respectively).

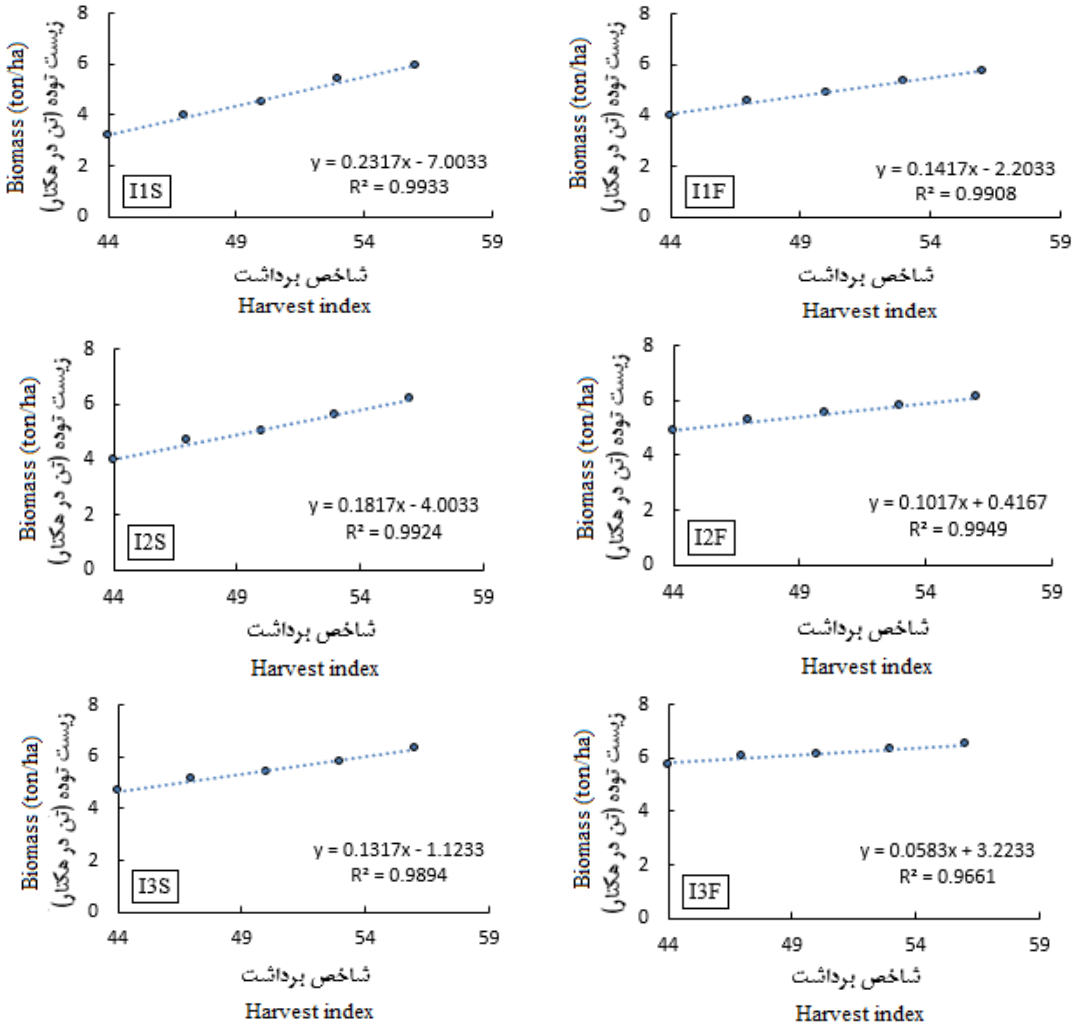
مقدار اولیه ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) در مدل AquaCrop برابر با ۱۰ و حدود بالا و پایین آن به ترتیب ۹/۸ و ۱۰/۲ بود. تغییرات زیست‌توده نسبت به افزایش مقدار CDC معکوس بود (شکل ۷). در واقع، با افزایش مقدار CDC، زیست‌توده کینوا کاهش یافت. این روند در سایر پارامترهای رشد مشاهده نشد. به همین دلیل، توجه به روند تغییرات CDC در مرحله واسنجی اهمیت دارد. دامنه ضریب حساسیت این پارامتر بین ۰/۰۶-۰/۰۴ به‌دست آمد که براساس جدول ۵ در دسته کم تا متوسط قرار داشت. مقادیر شیب‌خط برای این پارامتر نیز نشان داد که تنها در شرایط تنش آبی I1، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات CDC محسوس بود. این نتایج در مطالعات پژوهش‌گران دیگر نیز گزارش شده است (۸ و ۳).



شکل ۷- اثر تغییر پارامتر ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) بر نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده گیاه کینوا تحت‌تأثیر تنش‌های شوری و آبی.

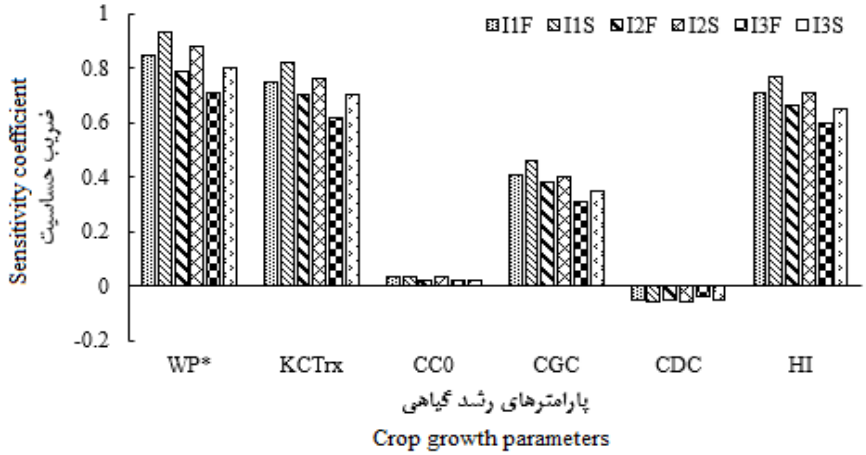
Figure 7. The effect of changing the crop canopy decline coefficient (CDC) on the simulation results of quinoa plant biomass Under the influence of salinity and water stress (I1, I2 and I3, respectively, to meet the water demand of 60, 80 and 100 The percentage and F and S of the quality of irrigation water are 0.5 and 6 dS.m^{-1}, respectively).

تغییرات زیست‌توده کینوا نسبت به مقادیر مختلف شاخص برداشت (HI) در شکل ۸ نشان داده شده است. تغییرات زیست‌توده نسبت به افزایش HI مستقیم بود. بنابراین افزایش مقدار HI سبب افزایش زیست‌توده کینوا شد. ضریب حساسیت پارامتر HI در محدوده ۰/۷۷–۰/۶۰ قرار داشت. بر اساس جدول ۵، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به HI زیاد بود. تغییر حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تنش‌های آبی و شوری در شکل ۸ نیز قابل مشاهده است به‌طوری‌که شیب‌خط بین تیمارهای آبیاری I1، I2 و I3 و تیمارهای شوری S و F حدود دو برابر بود. با افزایش تنش آبی، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تنش شوری کاهش یافت ولی در شرایط آبیاری کامل، حساسیت نسبت به تنش شوری بالا بود. علت این است که مقدار زیست‌توده شبیه‌سازی شده تحت تنش‌های آبی و شوری کم‌تر از زمانی است که فقط تنش شوری در نظر گرفته می‌شود. در واقع، به دلیل کاهش اختلاف زیست‌توده در شرایط تنش آبیاری بین دو تیمارهای S و F، حساسیت مدل AquaCrop نیز کاهش یافت. این نتایج برای پارامترهای WP* و K_{CTrx} نیز مشاهده گردید. علت آن، حساسیت زیاد مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامترها بود (شکل ۹). این نتایج با مطالعات اکثر پژوهش‌گران مطابقت داشت (۱۹، ۸، ۳، ۱، ۱۰ و ۲۰).



شکل ۸- اثر تغییر پارامتر شاخص برداشت (HI) بر نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده گیاه کینوا تحت‌تأثیر تنش‌های شوری و آبی.

Figure 8. The effect of changing the Harvest index (HI) on the simulation results of quinoa plant biomass Under the influence of salinity and water stress (I1, I2 and I3, respectively, to meet the water demand of 60, 80 and 100 The percentage and F and S of the quality of irrigation water are 0.5 and 6 dS.m^{-1}, respectively).



شکل ۹- مقایسه ضرایب حساسیت پارامترهای رشدی گیاه کینوا در شش تیمار.

Figure 9. Comparison of sensitivity coefficients of quinoa growth parameters under the effect of salinity and water stress (I1, I2 and I3, respectively, to meet the water demand of 60, 80 and 100 The percentage and F and S of the quality of irrigation water are 0.5 and 6 dS.m^{-1}, respectively).

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف بررسی حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاه کینوا تحت تنش‌های آبی و شوری انجام شد. نتایج نشان داد که متوسط حساسیت این مدل نسبت به تغییر پارامترهای WP*، K_{CTrx} ، HI و CGC به‌ترتیب ۰/۸۲، ۰/۷۲، ۰/٦۸ و ۰/۳۸ بود. درنتیجه حساسیت این مدل گیاهی نسبت به تغییرات این پارامترها زیاد بود. ولی، مقادیر متوسط حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات دو پارامتر CCo و CDC به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۵ به دست آمد؛ بنابراین، این مدل نسبت به تغییرات این دو پارامتر حساسیت کمی داشت. با افزایش تنش شوری و آبی، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای WP*، K_{CTrx}، HI و CGC افزایش یافت ولی تغییر در حساسیت نسبت به دو پارامتر CCo و CDC به وجود نیامد. براساس همه نتایج، در مرحله واسنجی، نیازی به تغییر دو پارامتر CCo و CDC نیست ولی سایر پارامترها باید تغییر داده شوند. هم‌چنین باید توجه کرد که اگر از تیمارهای بدون تنش آبی و شوری برای واسنجی استفاده شود؛ تغییرات نتایج شبیه‌سازی کم‌تر از زمانی است که از تیمارهای تحت تنش آبی و شوری برای واسنجی استفاده می‌شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه زابل (گروه مهندسی آب) و مسئولان آزمایشگاه‌های گروه مهندسی آب دانشگاه شهید چمران اهواز، جهت همکاری‌های کارساز و راهگشا در طی انجام این پژوهش کمال سپاسگزاری را دارند.

داده‌ها و اطلاعات

این پژوهش با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی رساله دکتری نویسنده اول نگارش شده است. آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها در سال‌های ۱٤۰۱ و ۱٤۰۲ در آزمایشگاه‌های آب‌وخاک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آماده‌سازی و اندازه‌گیری داده‌ها، انجام محاسبات.

نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، نظارت تحقیق، تهیه و اصلاح نهایی مقاله و بازبینی مقاله.

نویسنده سوم: مشارکت در آنالیزها و نویسنده چهارم: نظارت بر کشت و کار و انجام طرح.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر، رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت‌مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل کد پژوهانه IR-UOZ-GR-1837 انجام شده است.

منابع

1. Nasrolahi, Al. H., Ahmadee, M., & Rustum, R. (2024). Sensitivity Analysis of AquaCrop Model for Winter Wheat in Different Water Supply Conditions, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 150 (2), **doi: https://doi.org/10.1061/JIDEDH.IRENG-10099.**
2. Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & 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.
3. Ahmadi, M., Ghanbarpouri, M., & Eghderanjad, A. (2021). The amount of water used in wheat using sensitivity analysis and evaluating the AquaCrop model. *Water management in agriculture*. 8(1), 15-30. [In Persian]
4. Ansari, M. A., Eghderanjad, A., & Ebrahimi Pak, N. A. (2018). Simulation of potato yield (*Solanum tuberosum* L.) under irrigation conditions using two models, AquaCrop and Cropsyst. *Journal of Crop Ecophysiology*, 13(2), 287-304. [In Persian]
5. Ebrahimipak, N. A., Eghderanjad, A., Tafte, A., & Ahmadi, M. (2018). Evaluation of AquaCrop, WOFOST and CropSyst models in the simulation of rapeseed yield in Qazvin region. *Iran Irrigation and Drainage Journal*, 13(3), 715-726. [In Persian]
6. Li, F., Yu, D., & Zhao, Y. (2019). Irrigation scheduling optimization for cotton based on the AquaCrop model. *Water Resource Management*, 33 (1), 39-55.
7. Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P. H., Marek, G., & Boman, R. (2020). Validation and application of AquaCrop for irrigated cotton in the Sothern Great Plains of US. *Irrigation Science*, 38, 593-607.
8. Rahimi Khob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2019). Sensitivity analysis of basil plant growth parameters in AquaCrop model under different nitrogen fertilizer stresses. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 51(6), 1341-1351. [In Persian]
9. Salemi, H. R., Mohd Soom, M. A., Lee, T. S., Mousavi, S. F., Ganji, A., & 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.
10. Guo, D., Zhao, R., Xing, X., & 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.
11. Jin, X., Li, Z., Nie, C., Xu, X., Feng, H., Guo, W., & 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.

12. Ebrahimi Pak, N. A., Ahmadi, M., Eghderanjad, A., & Khashai Seyuki, A. (2017). Evaluation of AquaCrop model in simulating saffron performance under different scenarios of low irrigation and zeolite consumption. *Journal of Water and Soil Resources Protection*, 8(1), 117-132. [In Persian]
13. Adabi, V., Azizian, A., Ramezani, A., Kaviani, A., & Ababai, B. (2018). Local sensitivity analysis of AquaCrop model for two crops wheat and corn in Qazvin Plain and Parsabad, Moghan. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(6), 1579-1565. [In Persian]
14. Pajohideh, S. K., Eghderanjad, A., & Abbasi, F. (2023). Sensitivity analysis of corn plant growth parameters in the AquaCrop model under the interaction of water stress and nitrogen fertilizer. *Water Management in Agriculture*, 10(1), 190-175. [In Persian]
15. Jamali, S., & Ansari, H. (2021). Irrigation planning of quinoa plant under different irrigation levels using plant water stress index. *Irrigation and drainage of Iran*. 15 (6), 1274-1263. [In Persian]
16. Tafteh, A., & Emdad, M. R. (2021). Determining the sensitivity coefficients of crop yield to water (Ky) in low-irrigation managements at different stages of quinoa plant growth. *Water management in agriculture*. 8 (2), 116-101. [In Persian]
17. Beven, K. (1979). A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, 44(3-4), 169-190.
18. Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., & 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.
19. Karimi Organi, H., Rahimi Khob, A., & Nazarifar, M. H. (2016). Validation and verification of aquacrop model for atmosphere in Pakdasht region. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 47(3), 539-549. [In Persian]
20. Hajizadeh, M., Rahimi Khoob, A., Ali Niyaifard, S., & Delshad, M. (2018). Determining the normalized water productivity and investigating the sensitivity of the EcoCrop model for radish. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(5), 1527-1537. [In Persian]