Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

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

Sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop model in simulating water productivity and quinoa yield under different irrigation water amount and salinity management and Biochar and NanoBiochar application

Omolbanin Tourajzadeh[1], Halimeh Piri[*2], Masood Barati[3]

1. Ph.D. Graduate, Dept. of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: b.tourajzadeh@yahoo.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. Ph.D. Student, Amrita Vishwa Vidyapeetham, India. E-mail: masood.barati@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 10.17.2023
Revised: 12.21.2023
Accepted: 12.24.2023

Keywords:
Cover growth factor, Cover reduction factor, Maximum canopy growth, Normalized water productivity

ABSTRACT

Background and Objectives: Plant models are a suitable tool for simulating important agricultural parameters. Due to the existence of environmental stresses in each region, plant models should be evaluated and approved in each region. Also, considering that the investigation of environmental and management factors such as the amount and salinity of irrigation water and amendment on the yield and water productivity of agricultural plants requires expensive and time-consuming field experiments. The effect of various factors on plant yield can be simulated using plant models. In recent years, many models have been used to investigate the relationship between water, soil and plants. One of these models is AquaCrop model. The mentioned model should be measured and evaluated for each product and in each specific region. The basis of this model is the reaction of the yield to water productivity, and it simulates the yield by using climate, plant, soil and management variables. The parameters used in the model change under the influence of different environmental and management conditions. Sensitivity analysis helps researchers to have enough information about the effect of each parameter and the amount of its changes in the calibration stage.

Materials and Methods: This research was carried out in the form of completely randomized factorial design in the second half of November 2021 and 2022 in the greenhouse with three replications. The treatments include three irrigation water treatments (60, 80, and %100 of irrigation water, I1, I2, and I3, respectively), three salinity levels (1, 4, and 7 dS/m, S1, S2, and S3, respectively). There were two types of amendment materials (Biochar (B) and NanoBiochar (NB)) and three levels of Biochar and NanoBiochar (0, 2 and 4% by weight of pot soil). In total, seeds were planted in 243 pots with a diameter and height of 20 cm. At the end of the harvest season, the yield of the product was measured and the water productivity was calculated. Crop data of the one year were used for model calibration and crop data of the second year were used for model validation. The root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE), determination coefficient (R^2) and relative error percentage (RE) were used to test the accuracy and effectiveness of the model. Also, in the research, the sensitivity of the model to the humidity parameters in crop capacity, wilting and in saturated state, plant coefficient for transpiration, effective

root depth, upper and lower limit of soil water discharge coefficient for plant development, maximum canopy growth, growth coefficient and reduction of cover and Normalized water productivity was investigated.

Results: According to the comparison of the measured and predicted values of the yield and water productivity of quinoa and the calculation of statistical evaluation indices in both calibration and validation stages, it can be stated that the AquaCrop model has been able to simulate the yield and water productivity in the conditions of using water with different amounts and qualities and Biochar and NanoBiochar modifiers. Relative error percentage (RE), root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE) and coefficient of determination (R^2) for the yield in the verification stage with biochar correction material are 0.66, 33.38, 24.12 and 0.98 respectively and in the test stage -0.67, 38.49, -25.12 and 0.96 respectively and for water productivity in the verification stage -0.29, 0.33, 0.11 and 0.96 respectively and in the test stage 0.16, 0.37, 0.06 and 0.94 were obtained respectively. Relative error percentage (RE), root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE) and coefficient of determination (R^2) for the yield in validation stage with NanoBiochar amendment material are 0.12, 22.08, 5.61 and 0.98 respectively and in the test stage, -0.01, 28.79, -1.1 and 0.96 respectively and for water productivity at validation stage, 0.17, 0.29, 0.05 and 0.96 and in the test stage, -0.4, 0.38, -0.1 and 0.94 were calculated respectively. Considering the lower values of the error statistics in the conditions of using the NanoBiochar amendment, it can be said that the model has been able to simulate the yield and water productivity better in these conditions. The results of the sensitivity analysis show the average sensitivity of the model to the parameters of humidity in field capacity, plant coefficient for transpiration, effective root depth, the upper and lower limits of the soil water discharge coefficient for plant development, the maximum shade growth and the cover growth coefficient and the low sensitivity of the model to the parameters Moisture at wilting point and moisture at saturation state, coverage reduction factor and water productivity were normalized.

Conclusion: According to the obtained results, it can be stated that the AquaCrop model is an acceptable reliable level using the simulation of the yield and water productivity of quinoa plant under different quantitative and qualitative treatments of irrigation water and soil amendment are used and help farmers, designers, experts and agricultural managers as a powerful and efficient tool to choose optimal irrigation management. Also, the observed values of yield and water productivity showed that with a mixture of 2% by weight of biochar and NanoBiochar to the soil, the amount of irrigation water can be reduced by 75%, and in the conditions of using salt water, water with a salinity of 4 dS/m^{-1} was used. It is not recommended to use more biochar and NanoBiochar in the conditions of salt water application and water stress.

Cite this article: Tourajzadeh, Omolbanin, Piri, Halimeh, Barati, Masood. 2024. Sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop model in simulating water productivity and quinoa yield under different irrigation water amount and salinity management and Biochar and NanoBiochar application. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (1), 1-25.

© The Author(s). DOI: 10.22069/jwsc.2024.21828.3690
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹۴

تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل اکوکراپ در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب و عملکرد کینوا تحت مدیریت‌های مختلف مقدار و شوری آب آبیاری و کاربرد بیوچار و نانوبیوچار

ام‌البنین توراج‌زاده[۱]، حلیمه پیری*[۲]، مسعود براتی[۳]

۱. دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: b.tourajzadeh@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: h_piri2880@uoz.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری دانشگاه آمریتا، هندوستان. رایانامه: masood.barati@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۲/۰۷/۲۵
تاریخ ویرایش: ۰۲/۰۹/۳۰
تاریخ پذیرش: ۰۲/۱۰/۰۳

واژه‌های کلیدی:
بهره‌وری آب نرمال‌شده،
بیشینه رشد سایه‌انداز،
ضریب رشد پوشش،
ضریب کاهش پوشش

چکیده

سابقه و هدف: مدل‌های گیاهی ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی پارامترهای مهم کشاورزی می‌باشند. با توجه به وجود تنش‌های محیطی در هر منطقه، مدل‌های گیاهی باید در هر منطقه ارزیابی شده و مورد تأیید قرار بگیرند. هم‌چنین با توجه به این‌که بررسی عوامل محیطی و مدیریتی مانند مقدار و شوری آب آبیاری و اصلاح‌کننده‌ها بر روی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاهان زراعی نیازمند آزمایش‌های مزرعه‌ای هزینه‌بر و زمان‌بر است، می‌توان اثر عوامل مختلف بر عملکرد گیاهان را با استفاده از مدل‌های گیاهی شبیه‌سازی کرد. در سال‌های اخیر مدل‌های زیادی برای بررسی روابط آب‌وخاک و گیاه مورداستفاده قرار گرفته است. یکی از این مدل‌ها، مدل اکوکراپ است. مدل مذکور باید برای هر محصول و در هر منطقه خاص واسنجی و ارزیابی شود. اساس این مدل عکس‌العمل عملکرد محصول نسبت به آب مصرفی است و با استفاده از متغیرهای اقلیمی، گیاه، خاک و مدیریتی، عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند. پارامترهای به‌کاررفته در مدل تحت‌تأثیر شرایط مختلف محیطی و مدیریتی تغییر می‌کند. تحلیل حساسیت متغیرها به پژوهش‌گران کمک می‌کند تا اطلاعات کافی در خصوص تأثیر هر پارامتر و مقدار تغییرات آن در مرحله واسنجی داشته باشند.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی در نیمه دوم آبان ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در گلخانه و با سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل سه تیمار آب آبیاری (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد مقدار آب آبیاری به ترتیب، I_1، I_2 و I_3)، سه سطح شوری (۱، ۴ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب S_1، S_2 و S_3)، دو نوع ماده اصلاحی (بیوچار (B) و نانوبیوچار (NB)) و سه سطح بیوچار و نانوبیوچار (۰، ۲ و ۴ درصد وزنی خاک گلدان) بود. درمجموع کاشت بذور در ۱۶۲ گلدان با قطر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر انجام شد. در پایان فصل برداشت عملکرد محصول اندازه‌گیری و بهره‌وری مصرف آب محاسبه شد. از داده‌های زراعی سال اول برای واسنجی مدل و از داده‌های زراعی سال دوم برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. برای آزمون دقت و بررسی کارایی مدل از آماره‌های خطای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب تبیین (R^2) و

درصد خطای نسبی (RE) استفاده شد. هم‌چنین در این پژوهش تحلیل حساسیت مدل به پارامترهای رطوبت در ظرفیت زراعی، رطوبت در حالت پژمردگی و رطوبت در حالت اشباع، ضریب گیاهی برای تعرق، عمق مؤثر ریشه، حد بالا و پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه، بیشینه رشد سایه‌انداز، ضریب رشد و کاهش پوشش و بهره‌وری آب نرمال‌شده موردبررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: با توجه به مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا و محاسبه شاخص‌های ارزیابی آماری در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی می‌توان بیان داشت که مدل اکوکراپ به‌خوبی توانسته است عملکرد و بهره‌وری مصرف آب را در شرایط استفاده از آب با مقادیر و کیفیت‌های مختلف و اصلاح‌کننده‌های بیوچار و نانوبیچار شبیه‌سازی کند. مقادیر درصد خطای نسبی (RE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE) و ضریب تبیین (R^2) برای عملکرد در مرحله صحت‌سنجی با ماده اصلاحی بیوچار به ترتیب ۰/۶۶، ۳۳/۳۸، ۲۴/۱۲ و ۰/۹۸ و در مرحله آزمون به‌ترتیب ۰/۶۷-، ۳۸/۴۹، ۲۵/۱۲- و ۰/۹۶ و برای بهره‌وری مصرف آب در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب ۰/۲۹، ۰/۳۳، ۰/۱۱ و ۰/۹۶ و در مرحله آزمون به ترتیب ۰/۱۶، ۰/۳۷، ۰/۰۶ و ۰/۹۴ به‌دست آمد. مقادیر درصد خطای نسبی (RE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE) و ضریب تبیین (R^2) برای عملکرد در مرحله صحت‌سنجی با ماده اصلاحی نانوبیوچار به‌ترتیب ۰/۱۲، ۲۲/۰۸، ۵/۶۱ و ۰/۹۸ و در مرحله آزمون به‌ترتیب ۰/۰۱-، ۲۸/۷۹، ۱/۱- و ۰/۹۶ و برای بهره‌وری مصرف آب در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۲۹، ۰/۰۵ و ۰/۹۶ و در مرحله آزمون به‌ترتیب ۰/۴-، ۰/۳۸، ۰/۱- و ۰/۹۴ محاسبه شد. با توجه به مقادیر کم‌تر آماره‌های خطا در شرایط استفاده از ماده اصلاحی نانوبیوچار، می‌توان گفت مدل در این شرایط بهتر توانسته است عملکرد و بهره‌وری مصرف آب را شبیه‌سازی کند. نتایج تحلیل حساسیت بیانگر حساسیت متوسط مدل به پارامترهای رطوبت در ظرفیت زراعی، ضریب گیاهی برای تعرق، عمق مؤثر ریشه، حد بالا و پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه، بیشینه رشد سایه‌انداز و ضریب رشد پوشش و حساسیت کم مدل به پارامترهای رطوبت در نقطه پژمردگی و رطوبت در حالت اشباع، ضریب کاهش پوشش و بهره‌وری آب نرمال شده بود.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بیان داشت که مدل اکوکراپ با یک سطح اطمینان قابل‌قبول می‌تواند در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه کینوا تحت تیمارهای مختلف کمی و کیفی آب آبیاری و اصلاح‌کننده‌های خاک مورداستفاده قرار گیرد و به‌عنوان یک ابزار توانمند و کارآمد در جهت انتخاب مدیریت بهینه آبیاری به کشاورزان، طراحان، متخصصان و مدیران کشاورزی کمک نماید. هم‌چنین مقادیر مشاهده‌شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نشان داد با مخلوط ۲ درصد وزنی بیوچار و نانوبیوچار به خاک می‌توان مقدار آب آبیاری را تا ۷۵ درصد کاهش داد و در شرایط کاربرد آب‌شور از آب با شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر استفاده کرد. استفاده بیش‌تر از بیوچار و نانوبیوچار در شرایط کاربرد آب‌شور و تنش آبی توصیه نمی‌شود.

استناد: توراج‌زاده، ام‌البنین، پیری، حلیمه، براتی، مسعود (۱۴۰۳). تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل اکوکراپ در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب و عملکرد کینوا تحت مدیریت‌های مختلف مقدار و شوری آب آبیاری و کاربرد بیوچار و نانوبیوچار. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۱ (۱)، ۲۵-۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.21828.3690

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

از اقدامات مؤثر برای افزایش بهره‌وری مصرف آب آبیاری و بهبود بهره‌برداری از منابع محدود آب کشور، اعمال مدیریت صحیح آبیاری و کاشت گیاهان مقاوم به خشکی است. کینوا یکی از گیاهان نسبتاً مقاوم به شوری و کم‌آبی می‌باشد. کینوا با نام علمی (*Chenopodium quinoa* Willd.) یک گیاه دولپه‌ای است که از کوه‌های آند کرانه غربی آمریکای لاتین (جنوبی) منشأ گرفته و در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌خوبی رشد می‌کند (۱ و ۲). این گیاه دارویی و بدون گلوتن است و ازنظر تغذیه‌ای ارزشمند است (۳). کینوا در برابر طیف وسیعی از تنش‌های غیرزیستی مانند سرما، شوری و خشکی مقاوم است (۱). پژوهش‌ها نشان داده است می‌توان با مدیریت بهینه آب آبیاری، کم‌آبیاری و کاربرد آب‌های نامتعارف باکیفیت قابل‌قبول، بهره‌وری مصرف آب کینوا را افزایش داد (۲ و ۳). این امر مستلزم تعیین مقدار دقیق نیاز آبی گیاه و سطوح شوری قابل‌تحمل گیاه در مقادیر مختلف آب آبیاری است. بررسی این شرایط در مزرعه نیازمند صرف وقت و هزینه فراوان است. به همین دلیل در سال‌های اخیر مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی عملکرد و رشد گیاهان در شرایط مختلف ارائه شده‌اند (۴). ارزیابی توانمندی مدل‌ها کمک زیادی به برنامه‌ریزان بخش کشاورزی در تخمین پارامترهای موردنظر می‌کند. یکی از پرکاربردترین مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد و رشد گیاه، مدل اکوکراپ است. مدل اکوکراپ اثر میزان آب آبیاری و شوری را روی عملکرد گیاه، با استفاده از پارامترهای گیاهی، خاک و داده‌های ورودی تخمین می‌زند. الگوریتم این مدل براساس مقدار آب مصرف‌شده توسط گیاه توسعه داده شده است (۴). مدل اکوکراپ به‌دلیل کارایی بالا، سهولت کاربرد و نیاز کم‌تر به داده‌ها و اطلاعات ورودی نسبت به سایر مدل‌ها و دقت بالا در شبیه‌سازی گیاهان زراعی به‌عنوان ابزاری مطلوب جهت پیش‌بینی عملکرد و رشد گیاهان زراعی موردتوجه قرار گرفته است (۵). مطالعات زیادی در رابطه به شبیه‌سازی عملکرد گیاهان با اکوکراپ انجام شده است. پژوهش‌گران بیان داشتند مدل اکوکراپ در شرایط تنش آبی ملایم تا متوسط قادر است عملکرد دانه، پوشش گیاهی و زیست‌توده ذرت را به‌خوبی پیش‌بینی کند اما این مدل در شرایط تنش شدید آبی قادر به پیش‌بینی قابل‌قبول نیست (۵). از مدل اکوکراپ برای پیش‌بینی عملکرد گندم زمستانه در شمال چین استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد، عملکرد محصول و زیست‌توده در شرایط مختلف کم‌آبیاری با دقت قابل‌قبولی توسط مدل برآورد می‌شود (۶). در شبیه‌سازی عوامل گیاهی گندم با مدل آکواکراپ در منطقه کرج، مشخص گردید که با افزایش دور آبیاری از ۷ به ۱۴ روز دقت مدل در تخمین عملکرد و کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد (۷).

مدل اکوکراپ در ابتدا توانایی شبیه‌سازی عکس‌العمل گیاه به مقدار آب مصرفی را دارا بود اما در نسخه‌های بعدی شرایط بررسی واکنش گیاه به شرایط شوری نیز به آن اضافه شد (۸). در سال ۲۰۱۴، نسخه جدیدی از این مدل معرفی شد که قابلیت شبیه‌سازی پارامترهای رشدی و عملکرد گیاه در شرایط مدیریت‌های مختلف کود نیتروژن نیز به آن اضافه شد. البته قابل‌ذکر است که مدل قادر به شناسایی نوع کود نیست (۹). از این نسخه برای شبیه‌سازی عملکرد اثرات تنش کودی بر گیاه ذرت و گندم استفاده شد و دقت مدل را برای شبیه‌سازی قابل‌قبول دانسته شد (۱۰ و ۸). عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ذرت دانه‌ای در تراکم‌های مختلف کاشت و مقادیر مختلف آب آبیاری توسط مدل اکوکراپ

شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب دارد (۱۱). پژوهشی در خصوص شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری انجام شد. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل بیانگر دقت و کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب گیاه کینوا بود. و بیان شد که از مدل می‌توان برای ارائه مناسب‌ترین سناریو و مدیریت آبیاری در حالت‌های مختلف تنش و کم‌آبیاری استفاده نمود (۱۲). پژوهش‌های دیگری نیز در خصوص شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف آبیاری با مدل اکوکراپ انجام شده است که نشان‌دهنده توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی می‌باشد (۱۳ و ۱۴).

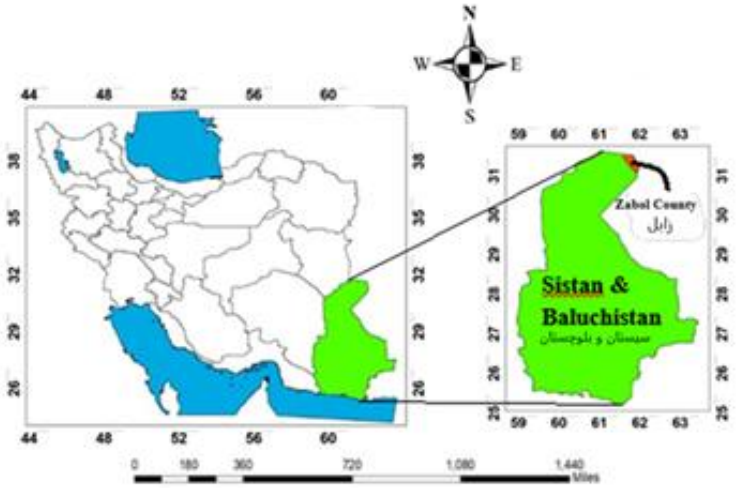
نتایج پژوهش‌ها نشان داده است مدل‌های گیاهی شامل پارامترهایی می‌باشند که تحت‌تأثیر عوامل محیطی و مدیریتی مختلف قرار دارند. این عوامل باعث عدم قطعیت در خروجی مدل‌ها می‌شود (۱۵). به‌منظور تحلیل عدم قطعیت مدل‌های شبیه‌سازی، اثر عوامل و فاکتورهای غیرقطعی بر خروجی مدل با تعیین ضریب حساسیت بررسی قرار می‌گیرد (۱۶). نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت برای کاربر این امکان را فراهم می‌کند تا پارامترهای مهم و تأثیرگذار در شبیه‌سازی عملکرد گیاه را شناسایی کرده و در مرحله واسنجی به آن‌ها بیش‌تر توجه کند (۱۷). حساسیت پارامترهای رشد گیاه ریحان تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن با استفاده از مدل اکوکراپ بررسی شد. نتایج پژوهش نشان داد بیش‌ترین حساسیت مدل نسبت به پارامتر بهره‌وری آب نرمال‌شده است و لازم است برای افزایش دقت و عملکرد مدل، این پارامتر برای شرایط محیطی و نوع محصول واسنجی شود. هم‌چنین نتایج نشان داد با افزایش درجه شدت تنش کود نیتروژن، حساسیت مدل نیز افزایش یافته است (۱۸). در پژوهشی حساسیت خروجی مدل اکوکراپ به پارامترهای ورودی گندم زمستانه در چین و گندم بهاره در کانادا موردبررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد مدل به پارامترهای پوشش گیاهی، بهره‌وری آب نرمال‌شده و حداکثر پوشش گیاهی بیش‌ترین ضریب حساسیت را داشت و نیاز به واسنجی دارند (۱۹). در پژوهشی دیگر حساسیت مدل اکوکراپ به چهار پارامتر تبخیروتعرق مرجع، پوشش گیاهی، بهره‌وری آب نرمال‌شده، پوشش گیاهی اولیه و حداکثر پوشش گیاه جو موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد بیش‌ترین حساسیت مدل به تبخیروتعرق مرجع است و هرچه شدت کم‌آبیاری بیش‌تر شود حساسیت مدل بیش‌تر می‌شود (۱۹).

نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داد تاکنون پژوهشی در خصوص شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا در شرایط مختلف کم‌آبیاری و شوری و با مصرف اصلاح‌کننده خاک انجام‌نشده است. بنابراین هدف از این پژوهش شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا در شرایط مختلف آب آبیاری و شوری و با مصرف اصلاح‌کننده‌های بیوچار و نانوبیوچار است. هم‌چنین با توجه به نتایج پژوهش‌های گذشته لازم است قبل از استفاده از مدل حساسیت آن نسبت به پارامترهای ورودی بررسی شود بنابراین در این پژوهش قبل از شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا با استفاده از مدل اکوکراپ، ابتدا پارامترهای حساس مدل تعیین و واسنجی شدند و پس‌ازآن اثر هر یک از سناریوهای مدیریتی بر تولید محصول موردسنجش و ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه شهرستان زابل با موقعیت طول جغرافیایی ۶۱ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی و عرض

جغرافیایی ۳۱ درجه و یک دقیقه شمالی است. زابل با ارتفاع ۴۸۷ متر از سطح دریای آزاد، بارندگی سالیانه کم‌تر از ۵۵ میلی‌متر و اقلیم گرم و خشک در شمال استان سیستان و بلوچستان قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱- منطقه موردمطالعه.

Figure 1. The study area.

تیمارها و اجرای مراحل زراعی پژوهش در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی در نیمه دوم آبان ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در گلخانه اجرا شد. تیمارها شامل سه تیمار آب آبیاری (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد مقدار آب آبیاری به‌ترتیب، I_1، I_2 و I_3)، سه سطح شوری (۱، ۴ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب S_1، S_2 و S_3)، دو نوع ماده اصلاحی (بیوچار (B) و نانوبیوچار (NB)) و سه مقدار بیوچار و نانوبیوچار (۰، ۲ و ۴ درصد وزنی خاک گلدان) بود. تیمارهای مواد اصلاحی (بیوچار و نانوبیوچار) و تیمارهای مقدار آب آبیاری براساس بررسی مطالعات انجام شده توسط سایر پژوهش‌گران در نظر گرفته شده است و تیمارهای سه سطح شوری آب آبیاری بر اساس وجود چاهک‌های سطحی با سطوح شوری مذکور در منطقه می‌باشد. گلدان‌های مورداستفاده در پژوهش با قطر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بود. بیوچار و نانوبیوچار مورداستفاده از درختان جنگلی شمال است. برای تهیه بیوچار در این پژوهش از شاخ و برگ خشک‌شده درختان جنگلی استان مازندران استفاده شد. ابتدا شاخ و برگ‌های خشک‌شده بسته‌بندی شده و سپس در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس و در شرایط بدون اکسیژن حرارت داده شد. این ماده از شرکت کربن اکتیو بشل واقع در قائم‌شهر مازندران خریداری شد. خاک و بیوچار و نانوبیوچار پس از عبور از الک ۲ میلی‌متر در سطوح تعیین‌شده با یکدیگر مخلوط شدند و سپس گلدان‌ها با مخلوط خاک، بیوچار و نانوبیوچار پر شد. نتایج تجزیه آب، خاک، بیوچار و نانوبیوچار مورداستفاده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، آب، بیوچار و نانوبیوچار.

Table 1. Some physical and chemical characteristics of soil, water, biochar and NanoBiochar.

بیوچار Biochar	نانوبیوچار NanoBiochar	آب Water			خاک soil	ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده Measured characteristics
		S3	S2	S1		
7.3	9.6	7.12	7.42	7.81	8.3	pH
6.1	5.4	7	4	1	0.58	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS/m)
57.5	44.5	--	--	--	1.36	کربن آلی (درصد) Organic carbon (%)
398.65	478.27	0.39	0.34	0.26	10.45	فسفر (میلی‌گرم در کیلوگرم) Phosphorus (mg/kg)
2375.48	1864.59	0.74	0.65	0.41	110.63	پتاسیم (میلی‌گرم در کیلوگرم) potassium (mg/kg)
17.5	15.6	14.64	8.25	2.05	0.42	کلسیم (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Calcium (meq/L)
11.6	13.5	10.16	5.74	2.95	0.75	منیزیم (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Magnesium (meq/L)
3.7	4.1	18.95	9.87	4.2	0.63	سدیم (میلی‌اکی‌والان در لیتر) sodium (meq/L)
29.5	25.4	--	--	--	0.02	نیتروژن (درصد) Nitrogen (%)

پس از اختلاط خاک، بیوچار و نانوبیوچار و اضافه نمودن آن به گلدان‌ها، گلدان‌ها به‌صورت کامل اشباع شد. سپس روی گلدان‌ها جهت جلوگیری از تبخیر آب پوشانده شد. خروج آب ثقلی از انتهای گلدان در بازه‌های زمانی مشخص تا زمانی که خروج آب ثقلی متوقف شود، اندازه‌گیری شد. در هر گلدان تعداد هشت عدد بذر کینوا رقم Titicaca در عمق ۲ سانتی‌متری از سطح خاک کاشته شد. بوته‌های اضافی پس از استقرار گیاه در مرحله چهاربرگی به سه گیاه در گلدان تقلیل یافت. براساس عرف منطقه کود نیتروژن از منبع اوره به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت سرک در سه مرحله یک‌سوم هم‌زمان با کاشت، یک‌سوم مرحله رویشی(شاخه‌دهی) و یک‌سوم زمان گلدهی (۵۰ درصد گلدهی گیاه)، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم از نوع سولفات پتاسیم و کود فسفر از نوع سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار هم‌زمان با کاشت به خاک اضافه شد. از زمان کاشت تا زمان استقرار گیاهچه، تمام گلدان‌ها به‌صورت کامل و با آب شیرین و تا حد ظرفیت زراعی آبیاری شدند. سپس گلدان‌ها به‌صورت یک روز در میان توزین شده و در هر سطح بیوچار و نانوبیوچار، کمبود آب تا حد رطوبت زراعی برای سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (براساس تغییرات وزن گلدان‌ها و مقدار آب زهکش شده) محاسبه شد و سپس براساس سطح تیمار آبیاری، آبیاری هر گلدان انجام شد. شکل ۲ مراحل مختلف رشد گیاه را نشان می‌دهد.

شکل ۲- مراحل مختلف رشد گیاه.

Figure 2. Different stages of plant growth.

بهره‌وری مصرف آب WP[1] عبارت است از: نسبت محصول تولیدشده به آب آبیاری. از رابطه ۱ به‌دست آمد (۲۰).

$$WP = \frac{Y}{IR} \qquad (۱)$$

در این رابطه، WP بهره‌وری مصرف آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب) Y مقدار محصول برداشت‌شده (کیلوگرم در هکتار) IR مقدار آب آبیاری (مترمکعب).

مدل اکوکراپ[2] توانایی تخمین میزان عملکرد محصول را در شرایط کم آبیاری و تنش شوری دارد. این مدل برای محاسبه مقدار عملکرد محصول از رابطه ۲ که بر اساس تبخیر- تعرق نسبی و هم‌چنین براساس معادله بیلان آب است، استفاده می‌کند:

$$(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}) = K_y(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}) \qquad (۲)$$

در این رابطه، Y_x و Y_a به‌ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ETx و ET_a به‌ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر- تعرق گیاه، و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به میزان کاهش تبخیر- تعرق است.

مدل اکوکراپ با تفکیک تبخیر و تعرق (ET) به دو جزء تبخیر از سطح خاک (E) و تعرق از گیاه (Tr) از مصرف غیرتولیدی آب از طریق تبخیر جلوگیری می‌کند. این امر با شبیه‌سازی پوشش تاج گیاه به‌جای شاخص سطح برگ (LAI) انجام می‌شود. پوشش تاج گیاه از زمان جوانه‌زنی تا مقدار بیشینه پوشش تاج گیاه از رابطه ۳ به‌دست می‌آید (۲۱):

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \qquad (۳)$$

که در این رابطه، CC پوشش تاج گیاه در مرحله توسعه (درصد)، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) است. میزان تعرق گیاه براساس پوشش تاج از رابطه ۴ محاسبه شد (۲۱):

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \qquad (۴)$$

1- Water Productivity
2- AquaCrop

که در این رابطه، Ks و Kc به‌ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی می‌باشند. بیوماس خشک در مدل اکوکراپ از رابطه ۵ به‌دست آمد (۲۱):

$$B = WP^* \left[\frac{T_{r_i}}{ET_{0,i}}\right] \quad (۵)$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، wp بهره‌وری مصرف آب، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع و B بیوماس خشک گیاه است.

مقادیر عملکرد دانه (Y) با استفاده از ماده خشک تولیدی و شاخص برداشت (HI) از رابطه ۶ محاسبه شد (۲۱):

$$Y = B \times HI \quad (۶)$$

شدت تنش آبی (Ks) مؤثر بر توسعه پوشش تاج (CC)، هدایت روزنه‌ای (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به‌وسیله کسر تحلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در شرایط تنش آبی مقدار تاج پوشش گیاهی کاهش یافته و میزان تبخیر و تعرق کاهش پیدا می‌کند. بنابراین ماده خشک تولیدی و عملکرد کاهش می‌یابد. مدل اکوکراپ به‌جای استفاده از بیلان کودی در خاک، اثر مقدار تنش حاصلخیزی بر عملکرد را با استفاده از کمبود مواد غذایی در خاک شبیه‌سازی می‌کند. این امر با فرض پارامتر بیشینه نسبی مقدار زی‌توده خشک (B_{rel}) بر حسب درصد با استفاده از رابطه ۷ حاصل می‌شود (۲۱):

$$B_{rel} = \frac{B_{stress}}{B_{ref}} \times 100 \quad (۷)$$

در این رابطه، B_{ref} کل زیست‌توده خشک در شرایط بدون تنش و B_{stress} مقدار زیست‌توده به‌دست آمده پس از اعمال تنش است.

داده‌های ورودی به مدل برای شبیه‌سازی با مدل اکوکراپ داده‌های ورودی در چهار گروه به مدل معرفی می‌شوند. داده‌های اقلیمی شامل میزان تبخیر–تعرق گیاه مرجع روزانه، دمای حداقل و حداکثر روزانه، مقادیر بارندگی روزانه و میانگین سالیانه غلظت CO_2 می‌باشد. غلظت CO_2 براساس مقدار پیش‌فرض، که در رصدخانه مائونالوای هاوایی اندازه‌گیری شده است، به مدل معرفی می‌شود. داده‌های خاک شامل بافت و رطوبت حجمی خاک در نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بر اساس آزمایش خاک تعیین و به مدل معرفی شدند (جدول ۲). داده‌های مدیریت مزرعه شامل الف) مدیریت مزرعه و حاصلخیزی که شامل سطوح مختلف اصلاح‌کننده بود ب) مدیریت آبیاری که شامل داده‌های مدیریت مزرعه بدون محدودیت آبیاری و با درنظر گرفتن سطوح کم‌آبیاری به مدل معرفی شد (۲۱).

بعضی از داده‌های گیاهی با توجه به داده‌های برداشت شده از آزمایش به مدل وارد شد. با توجه به این‌که تعداد داده‌های گیاهی ورودی به مدل اکوکراپ زیاد است و اکثراً هم قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد، بسط‌دهندگان مدل پیشنهاد کرده‌اند این داده‌ها توسط تحلیل حساسیت و واسنجی مشخص گردند (۲۱).

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های خاک.

Table 2. Some characteristics of soil.

ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده Measured characteristics	بافت خاک Soil texture	pH	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC(dS/m)	رطوبت حجمی اشباع (درصد) Saturated volumetric humidity (%)	رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی (درصد) FC (%)	رطوبت حجمی در پژمردگی دائم (درصد) PWP (%)
سال اول First year	لوم شنی Sandy loam	8.3	0.58	43	27	12
سال دوم Second year	لوم شنی Sandy loam	8.4	0.56	44	28	13

برای تعیین درصد حساسیت مدل به تغییرات پارامترهای ورودی و نیز تعیین داده‌های مورد نیاز برای واسنجی، از تحلیل حساسیت استفاده شد. برای این منظور از رابطه ۸ استفاده شد:

$$Sc = \left|\frac{P_m - P_b}{P_b}\right| \times 100 \qquad (۸)$$

که در آن، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد عملکرد دانه براساس داده ورودی تعدیل شده (کیلوگرم در هکتار) و P_b مقدار براورد عملکرد دانه براساس داده ورودی پایه (کیلوگرم در هکتار) می‌باشد.

برای تعیین تحلیل حساسیت مدل، در هر نوبت یکی از داده‌های ورودی مدل به مقدار ۲۵± تغییر داده شد و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شدند و مدل با استفاده از شرایط جدید اجرا گردید. سپس مقادیر ضریب حساسیت به‌دست آمده در کلاس Sc>۱۵ حساسیت بالا، ۱۵>Sc>۲ حساسیت متوسط و ۲>Sc حساسیت پایین طبقه‌بندی شدند (۲۲).

پس از تحلیل حساسیت، واسنجی مدل با استفاده از داده‌های سال اول انجام شد. در مرحله واسنجی، داده‌های با حساسیت متوسط و بالا آن‌قدر تغییر داده شدند تا نتایج شبیه‌سازی شده به نتایج مشاهده شده سال اول نزدیک شود. بعد از اتمام مرحله واسنجی، مقادیر همه داده‌های ورودی یادداشت شد و در مرحله صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. برای آزمون دقت و بررسی کارایی مدل اکوکراپ از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب تبیین (R^2) و درصد خطای نسبی (RE) استفاده شدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2} \qquad (۹)$$

$$MBE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}|P_i - O_i| \qquad (۱۰)$$

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^{n}\frac{(P_i - O_i)}{(P_i - \bar{P})^2} \qquad (۱۱)$$

$$RE = \frac{(P_i - O_i)\times 100}{O_i} \qquad (۱۲)$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی‌شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری‌شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و N تعداد نمونه می‌باشد. حداقل مقدار RE و RMSE صفر می‌باشد. چنان‌چه تمامی مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده با هم برابر شوند، مقدار عددی شاخص‌های RE و RMSE برابر با صفرخواهد بود. ضریب تعیین نشان‌دهنده نسبت پراکندگی میان مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی می‌باشد.

نتایج و بحث

مقادیر ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی به مدل در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به محدوده پیشنهادشده توسط پژوهش‌گران (۲۲)، نتایج بیانگر حساسیت کم تا متوسط مدل نسبت به تغییر پارامترها است. براساس نتایج مشاهده می‌شود که مدل اکوکراپ نسبت به تغییر پارامترهای رطوبت در ظرفیت زراعی، ضریب گیاهی برای تعرق، عمق مؤثر ریشه، حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه، حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه، بیشینه رشد کانوپی و ضریب رشد پوشش حساسیت متوسط، برای پارامترهای ظرفیت در نقطه پژمردگی و رطوبت در حالت اشباع حساسیت کم و برای پارامتر ضریب کاهش پوشش حساسیت متوسط و کم و برای پارامتر بهره‌وری آب نرمال‌شده حساسیت کم و متوسط داشت. بنابراین لازم است که در اندازه‌گیری پارامترهایی که ضریب حساسیت متوسط است دقت بیش‌تری به عمل آورد، زیرا باعث خطای قابل‌توجهی در خروجی مدل می‌شود. خطای ناشی از اندازه‌گیری در پارامترهایی که مدل نسبت به تغییر آن‌ها حساسیت کمی داشت، قابل‌اغماض است. علت حساسیت متوسط وابسته بودن شبیه‌سازی عملکرد به مقادیر پارامترهای گیاهی ازجمله بهره‌وری آب نرمال‌شده و ضریب گیاهی برای تعرق است. نتایج پژوهش با نتایج سایر پژوهش‌گران مطابقت داشت (۲۳ و ۲۴).

جدول ۳- ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل اکوکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد کینوا.

Table 3. The sensitivity coefficient of some input parameters of the AquaCrop model for the simulation of quinoa yield.

پارامترهای ورودی مدل Model input parameters	مقدار SC در حالت ۰/۲۵+ Sc at +0.25%	مقدار SC در حالت ۰/۲۵- Sc at -0.25%	درجه حساسیت Sensitivity rate
رطوبت در ظرفیت زراعی Moisture in field capacity	2.5	3.2	متوسط Average
رطوبت در نقطه پژمردگی Moisture at wilting point	1.8	1.48	کم Low
رطوبت در حالت اشباع Moisture in saturation	0.25	1.26	کم Low
ضریب گیاهی برای تعرق Crop transpiration coefficient	8.5	8.7	متوسط Average
عمق مؤثر ریشه Effective rooting depth	4.6	6.2	متوسط Average
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه Soil water depletion threshold for canopy expansion-upper	6.9	3.8	متوسط Average
حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه Soil water depletion threshold for canopy expansion-lower	3.7	5.6	متوسط Average
بیشینه رشد سایه‌انداز Maximum canopy cover	8.3	7.1	متوسط Average
ضریب رشد پوشش Canopy growth coefficient	6.4	7.8	متوسط Average
ضریب کاهش پوشش Canopy decrease coefficient	2.5	1.5	متوسط- کم Average-Low
بهره‌وری آب نرمال‌شده Normalized water productivity	1.3	2.7	کم- متوسط Low-Average

واسنجی مدل اکوکراپ با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، انجام شد. از داده‌های سال اول برای واسنجی مدل استفاده شد. نتایج واسنجی در جدول ۴ نشان داده شده است. برخی پارامترهای ورودی به مدل واسنجی، برخی اندازه‌گیری و برخی از پیش‌فرض مدل استفاده شد.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای ورودی مدل اکوکراپ.

Table 4. Values of AquaCrop model input parameters.

توضیح Description	واحد Unit	مقدار Value	پارامتر Parameter
واسنجی Calibrated	سانتی‌متر cm	35	عمق مؤثر ریشه Effective rooting depth
واسنجی Calibrated	روز day	45	مدت‌زمان رسیدن به بیشینه رشد ریشه Time to reach maximum root
اندازه‌گیری Measured	روز day	7	مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی Time from planting to germination
اندازه‌گیری Measured	روز day	52	مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد سایه‌انداز Time from cultivation to maximum crop canopy
واسنجی Calibrated	روز day	90	مدت‌زمان کاشت تا برداشت محصول Time from planting to harvest
پیش‌فرض Default	درجه سانتی‌گراد ˚C	2	دمای پایه Base temperature
پیش‌فرض Default	درجه سانتی‌گراد ˚C	30	دمای بالا Upper temperature
اندازه‌گیری Measured	گیاه در هکتار $plant.ha^{-1}$	1076923	تراکم کشت Cultivation density
اندازه‌گیری Measured	سانتی‌مترمربع cm^2	0.5	پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی Canopy cover of each seedling during germination
واسنجی Calibrated	درصد %	7	پوشش گیاهی اولیه (CC0) Initial canopy cover
واسنجی Calibrated	درصد %	52	بیشینه رشد سایه‌انداز (CCx) Maximum canopy cover
واسنجی Calibrated	–	0.5	حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه Soil water depletion threshold for canopy expansion-upper
واسنجی Calibrated	–	0.8	حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه Soil water depletion threshold for canopy expansion-lower
واسنجی Calibrated	درصد روز $\%.day^{-1}$	9.5	ضریب رشد پوشش (CGC) Canopy growth coefficient
واسنجی Calibrated	درصد روز $\%.day^{-1}$	10	ضریب کاهش پوشش (CDC) Canopy decrease coefficient
پیش‌فرض Default	درصد روز $\%.day^{-1}$	1.05	حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق Maximum crop transpiration coefficient
واسنجی Calibrated	گرم بر مترمربع $gr.m^{-2}$	10.5	بهره‌وری آب نرمال‌شده Normalized water productivity
واسنجی Calibrated	گرم بر مترمربع $gr.m^{-2}$	90	ضریب کاهش بهره‌وری نرمال‌شده Normalized water productivity decrease coefficient
اندازه‌گیری Measured	درصد %	۲۷	رطوبت در ظرفیت زراعی Moisture in field capacity
اندازه‌گیری Measured	درصد %	۱۲	رطوبت در پژمردگی دائم Moisture at wilting point
اندازه‌گیری Measured	درصد %	۴۳	رطوبت در حالت اشباع Moisture in saturation

با توجه به پارامترهای ورودی واسنجی‌شده، با داده‌های سال دوم صحت‌سنجی مدل انجام شد و شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب بررسی شد. جدول ۵ مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه‌شده براساس مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده را در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در شرایط استفاده از بیوچار و نانوبیوچار نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر خطای مدل براساس آماره‌های RE، RMSE، MBE و R^2 می‌توان گفت مدل توانسته است با دقت خوبی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب را شبیه‌سازی کند. بالا بودن ضریب تبیین (R^2) و پایین بودن RMSE در مرحله صحت‌سنجی، می‌توان گفت شبیه‌سازی عملکرد در مرحله صحت‌سنجی بهتر از مرحله واسنجی مدل بوده است.

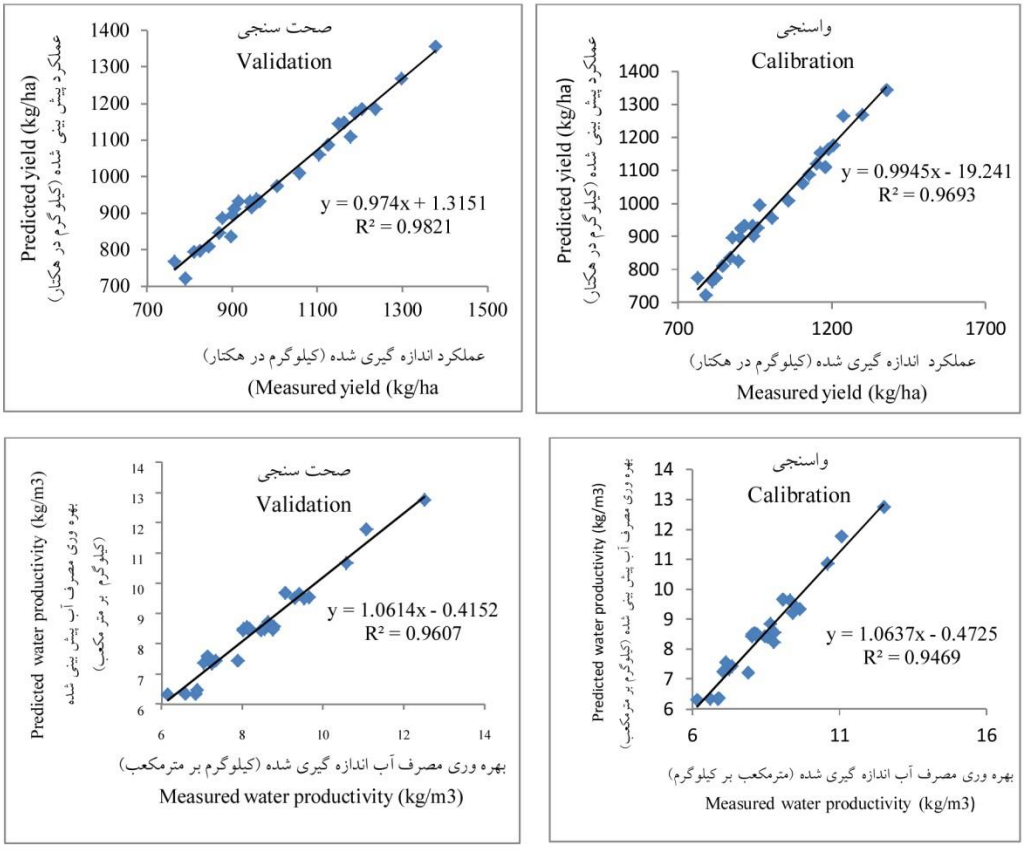
با توجه به مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده بهره‌وری مصرف آب کینوا و محاسبه شاخص‌های ارزیابی آماری در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی (جدول ۵) می‌توان بیان داشت که مدل اکوکراپ به‌خوبی توانسته است بهره‌وری مصرف آب را شبیه‌سازی کند. سایر پژوهش‌گران نیز در پژوهش‌های خود بیان داشتند مدل اکوکراپ قابلیت خوبی در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب دارد (۲۵، ۲۶ و ۸).

شکل‌های ۳ و ۴ همبستگی مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود بالا بودن مقادیر R^2 (۰/۹۴، ۰/۹۶، ۰/۹۸ و ۰/۹۶) نشان‌دهنده نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پراکندگی ناچیز آن‌ها حول یک خط و برازش خوب مدل است. برخی پژوهش‌ها ضرایب تبیین کم‌تر و برخی بیش‌تری را برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب با مدل اکوکراپ گزارش کرده‌اند که این تفاوت احتمالاً می‌تواند به‌دلیل تفاوت در نوع گیاه موردبررسی، شرایط اقلیمی و مدیریت آبیاری باشد (۱۵ و ۲۷). در پژوهشی ضریب تبیین به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عملکرد کینوا با مدل اکوکراپ ۰/۷۷ به‌دست آمد که علت تفاوت آن با رقم به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر شرایط اقلیمی و نوع تیمارهای به‌کاررفته شده است (۱۲). با مدل اکوکراپ عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گندم تحت شرایط مختلف موردبررسی قرار گرفت و نتیجه نشان داد مدل با ضریب تبیین ۰/۹۹ به‌خوبی توانسته است عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گندم را شبیه‌سازی کند (۲۸). از مدل اکوکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه سویا در استان گلستان تحت شوری آب دریای خزر و سطوح مختلف آبیاری استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد مدل پس از واسنجی دقت خوبی در شبیه‌سازی عملکرد سویا در شرایط تنش شوری و آبی دارا بود (۲۹). با توجه به مقادیر عرض از مبدأ معادلات رگرسیون در شرایط استفاده از بیوچار (شکل ۳)، می‌توان گفت مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب در هر دو مرحله صحت‌سنجی و واسنجی دچار کم‌برآوردی شده است اما برای شبیه‌سازی عملکرد در مرحله صحت‌سنجی دچار بیش‌برآوردی و در مرحله واسنجی دچار کم‌برآوردی شده است. با توجه به شکل ۴ نیز می‌توان گفت مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب در هر دو مرحله صحت‌سنجی و واسنجی دچار کم‌برآوردی شده است و برای شبیه‌سازی عملکرد در هر دو مرحله صحت‌سنجی و واسنجی دچار بیش‌برآوردی شده است.

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های آماری برای پیش‌بینی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی.

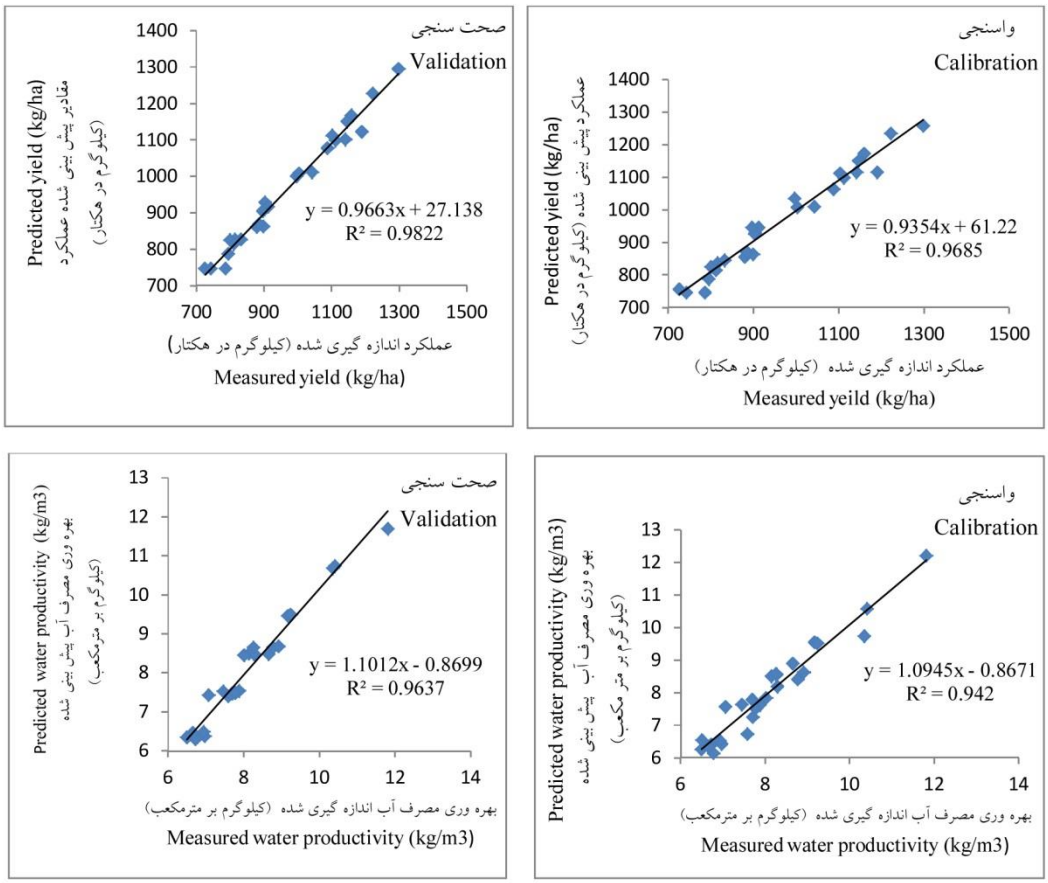
Table 5. Values of statistical indicators for predicting the yield and water productivity of quinoa in the calibration and validation stages.

R^2	MBE	RMSE	RE	پارامتر Parameter	مرحله Stage	ماده اصلاح‌کننده Amendment material
0.96	-25.12	38.49	-0.67	عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield ($kg.ha^{-1}$)	واسنجی Calibration	بیوچار Biochar
0.94	0.06	0.37	0.16	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم در مترمکعب) Water productivity ($kg.m^{-3}$)		
0.98	-24.12	33.38	-0.66	عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield ($kg.ha^{-1}$)	صحت‌سنجی Validation	
0.96	0.11	0.33	0.29	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم در مترمکعب) Water productivity ($kg.m^{-3}$)		
0.96	-1.1	28.79	-0.01	عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield ($kg.ha^{-1}$)	واسنجی Calibration	نانوبیوچار NanoBiochar
0.94	-0.1	0.38	-0.4	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم در مترمکعب) Water productivity ($kg.m^{-3}$)		
0.98	5.61	22.08	0.12	عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield ($kg.ha^{-1}$)	صحت‌سنجی Validation	
0.96	0.05	0.29	0.17	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم در مترمکعب) Water productivity ($kg.m^{-3}$)		



شکل ۳- مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا تحت شرایط تنش شوری، خشکی و بیوچار.

Figure 3. Measured and predicted values of yield and water productivity of quinoa under salinity, drought and Biochar conditions.

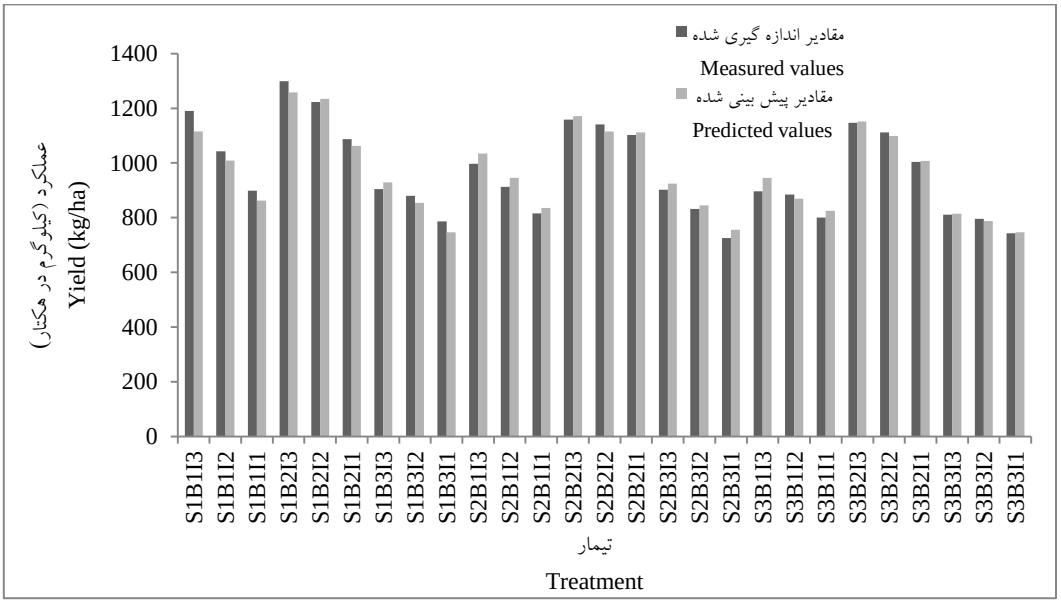


شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا تحت شرایط تنش شوری، خشکی و نانوبیوچار.

Figure 4. Measured and predicted values of yield and water productivity of quinoa under salinity, drought and Nano Biochar conditions.

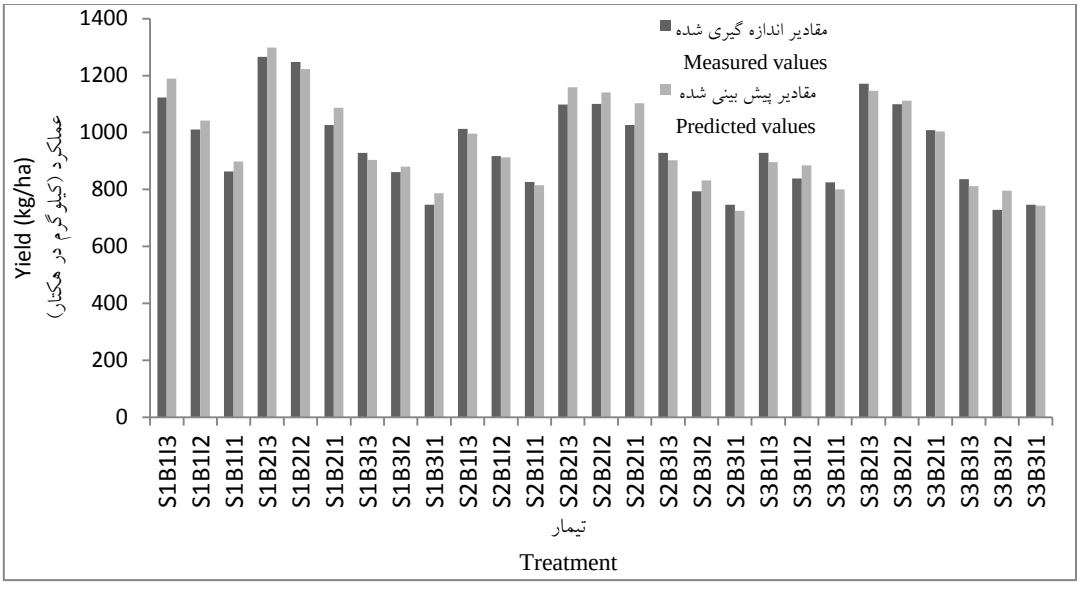
شکل ۵ شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مرحله واسنجی با استفاده از مدل اکوکراپ در شرایط استفاده از ماده اصلاحی بیوچار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در بسیاری از تیمارها مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک است. براساس نتایج به‌دست‌آمده بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده عملکرد ۶/۲۸ و ۰/۳۷ درصد بود. میانگین اختلاف بین این مقادیر نیز ۲/۸ به‌دست آمد. اختلاف مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در بیش‌تر تیمارها کم‌تر از ۳ درصد بود.

در شکل ۶ عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده کینوا با مدل اکوکراپ در مرحله صحت‌سنجی با ماده اصلاحی بیوچار نشان داده شده است. با مقایسه این نتایج با داده‌های واقعی اندازه‌گیری‌شده مشاهده می‌شود که مدل در تعدادی از تیمارها دچار کم‌برآوردی و در تعدادی دچار بیش‌برآوردی‌شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده ۹/۲۸ و ۰/۴۲ درصد به‌دست آمد. از مدل اکوکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد کینوا در شرایط کودی استفاده شد. نتیجه نشان داد مدل به‌خوبی توانسته است عملکرد کینوا را شبیه‌سازی کند (۱۲).



شکل ۵- مقایسه عملکرد اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده با مدل اکوکراپ در مرحله واسنجی با ماده اصلاحی بیوچار.

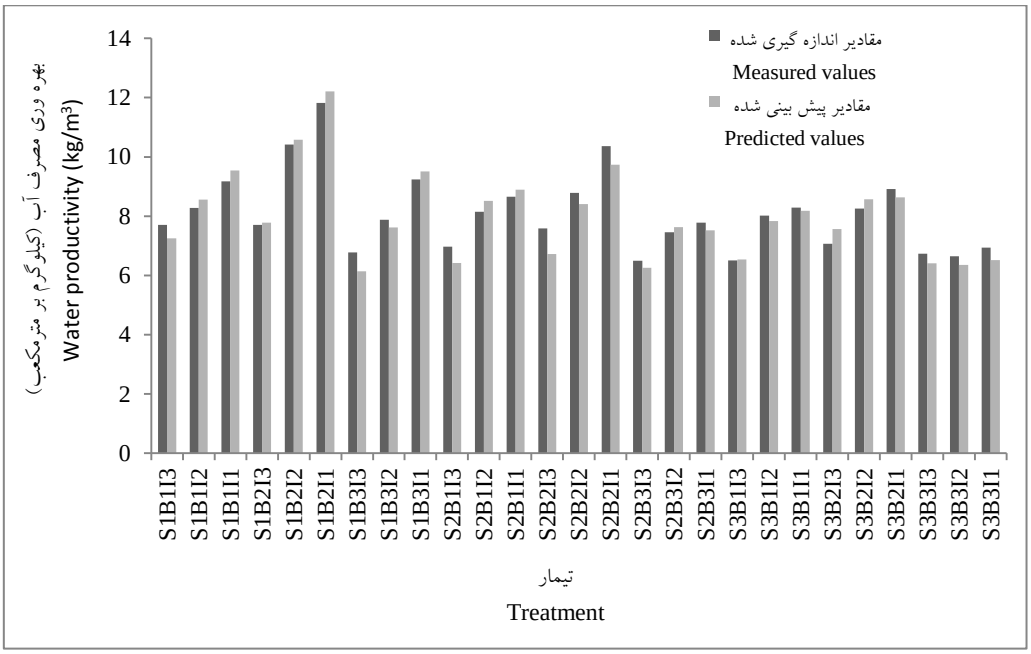
Figure 5. Comparison of the yield measured and predicted by the AquaCrop model in the calibration stage with the Biochar amendment.



شکل ۶- مقایسه عملکرد اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده کینوا با مدل اکوکراپ در مرحله صحت‌سنجی با ماده اصلاحی بیوچار.

Figure 6. Comparison of the yield measured and predicted by the AquaCrop model in the calibration stage with the Biochar amendment.

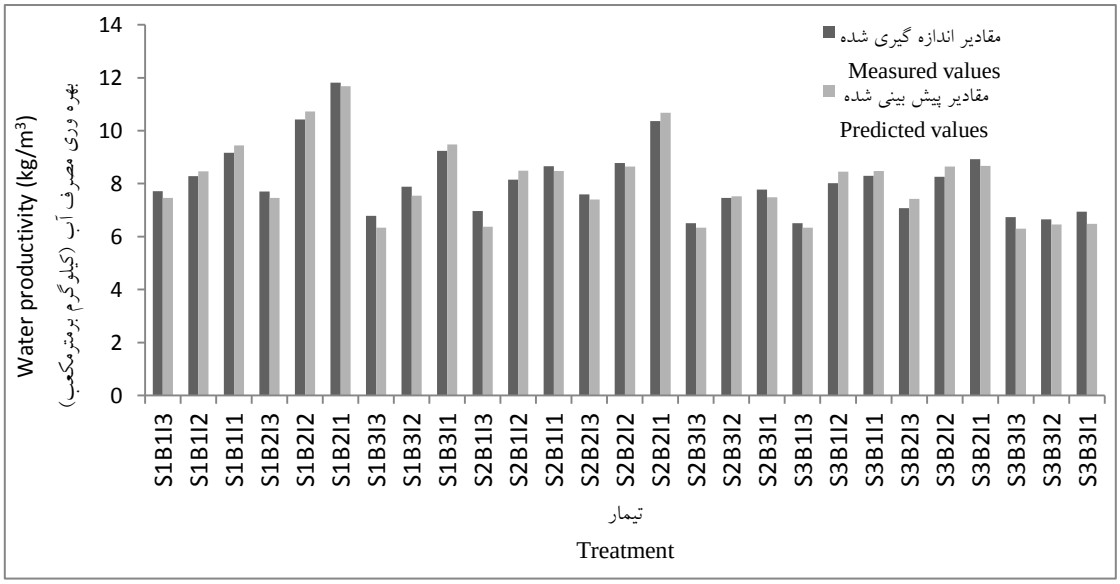
شکل ۷ شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب کینوا در مرحله واسنجی با استفاده از مدل اکوکراپ در شرایط استفاده از ماده اصلاحی بیوچار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در بسیاری از تیمارها مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری‌شده بسیار نزدیک است. براساس نتایج به‌دست‌آمده بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده بهره‌وری مصرف آب ۱۱/۴۶ و ۰/۴۶ درصد بود. میانگین اختلاف بین این مقادیر نیز ۲/۸ به‌دست آمد. اختلاف مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در بیش‌تر تیمارها کم‌تر از ۴ درصد بود.



شکل ۷- مقایسه بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده با مدل اکوکراپ در مرحله واسنجی با ماده اصلاحی بیوچار.

Figure 7. Comparison of the water productivity measured and predicted by the AquaCrop model in the calibration stage with the Biochar amendment.

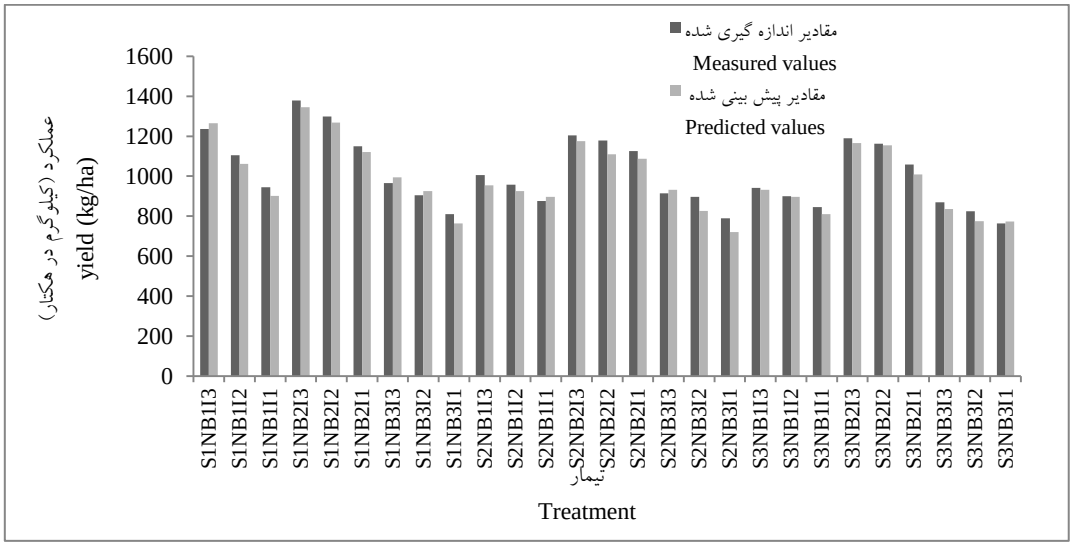
در شکل ۸ بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده کینوا با مدل اکوکراپ در مرحله صحت‌سنجی با ماده اصلاحی بیوچار نشان داده‌شده است. با مقایسه این نتایج با داده‌های واقعی اندازه‌گیری‌شده مشاهده می‌شود که مدل در تعدادی از تیمارها دچار کم‌برآوردی و در تعدادی دچار بیش‌برآوردی شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده ۸/۶ و ۰/۸ درصد به‌دست آمد.



شکل ۸- مقایسه بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده کینوا با مدل اکوکراپ در مرحله صحت‌سنجی با ماده اصلاحی بیوچار.

Figure 8. Comparison of the water productivity measured and predicted by the AquaCrop model in the calibration stage with the Biochar amendment.

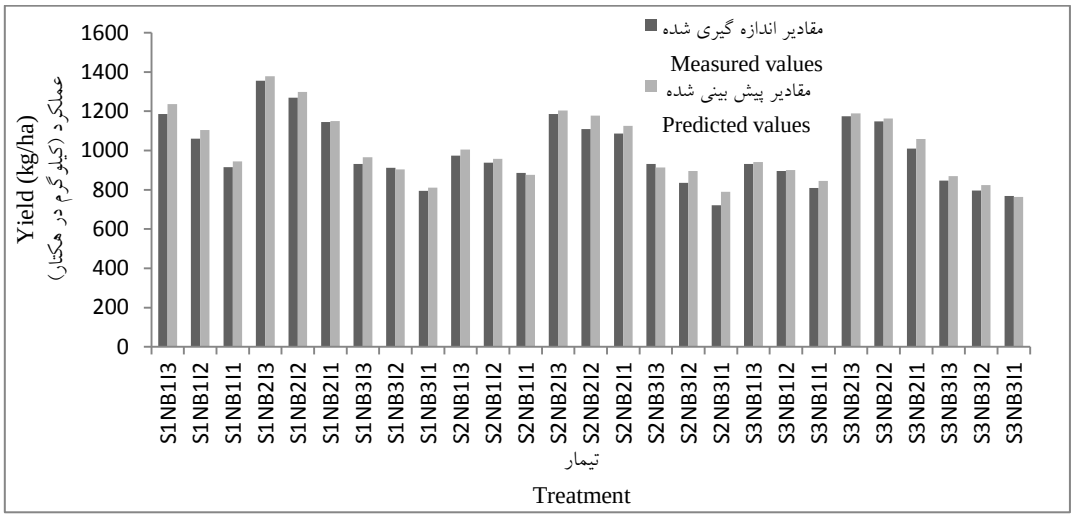
شکل ۹ عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده با مدل اکوکراپ در مرحله واسنجی با ماده اصلاحی نانوبیوچار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در شرایط استفاده از ماده اصلاحی نانوبیوچار نیز مدل به‌خوبی توانسته است عملکرد کینوا را شبیه‌سازی کند. کم‌ترین و بیش‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده ۰/۵۱ و ۸/۶۴ درصد بود.



شکل ۹- مقایسه عملکرد اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده با مدل اکوکراپ در مرحله واسنجی با ماده اصلاحی نانوبیوچار.

Figure 9. Comparison of the yield measured and predicted by the AquaCrop model in the calibration stage with the Nano Biochar amendment.

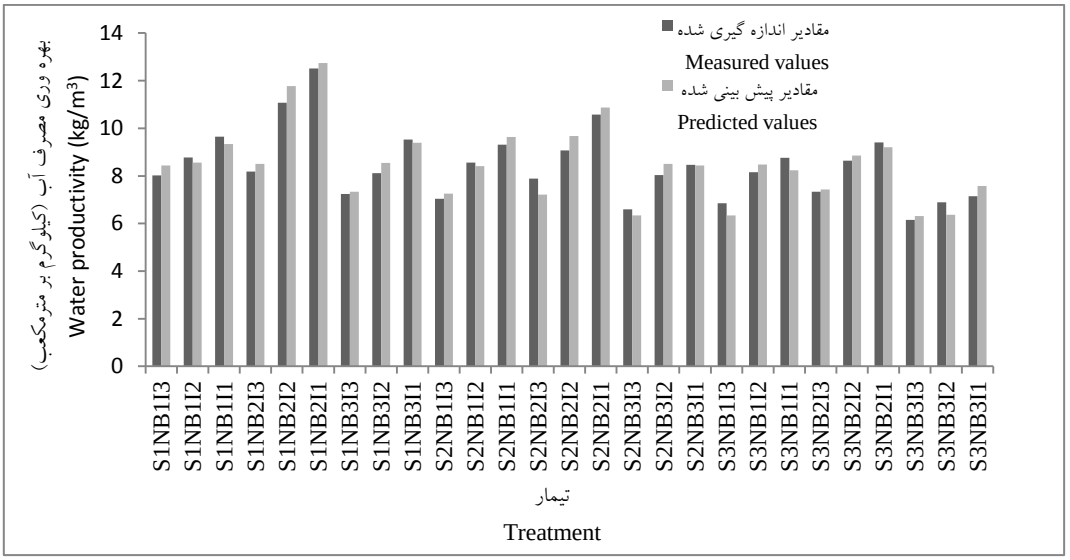
شکل ۱۰ عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده کینوا با مدل اکوکراپ در مرحله صحت‌سنجی با ماده اصلاحی نانوبیوچار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل در تعدادی از تیمارها دچار کم‌برآوردی و در تعدادی دچار بیش‌برآوردی‌شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده ۹/۴۶ و ۰/۴۸ درصد به‌دست آمد.



شکل ۱۰- مقایسه عملکرد اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده کینوا با مدل اکوکراپ در مرحله صحت‌سنجی با ماده اصلاحی نانوبیوچار.

Figure 10. Comparison of the yield measured and predicted by the AquaCrop model in the validation stage with the Nano Biochar amendment.

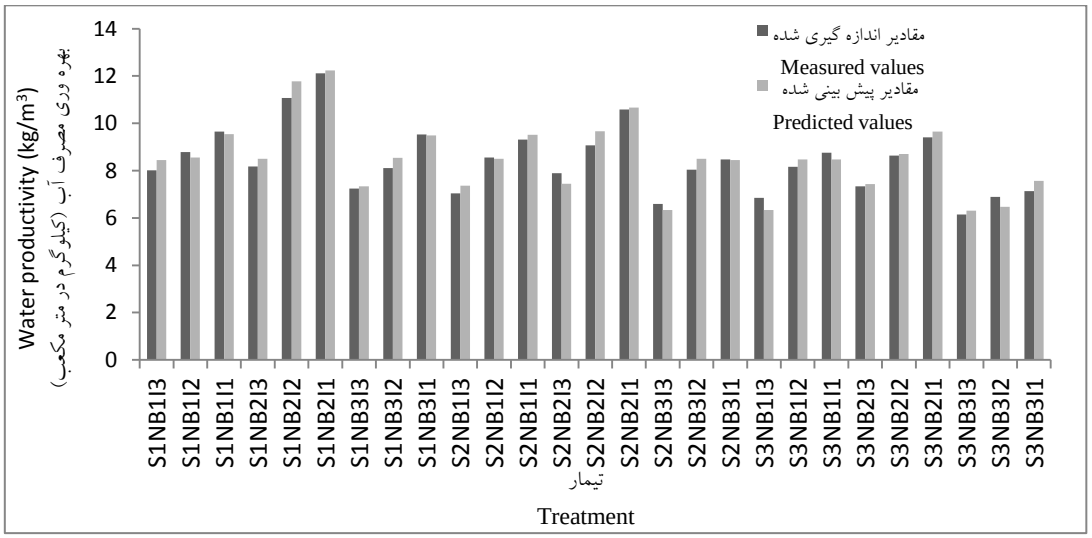
شکل ۱۱ بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده با مدل اکوکراپ در مرحله واسنجی با ماده اصلاحی نانوبیوچار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در شرایط استفاده از ماده اصلاحی نانوبیوچار نیز مدل به‌خوبی توانسته است بهره‌وری مصرف آب کینوا را شبیه‌سازی کند. کم‌ترین و بیش‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده ۰/۳۵ و ۸/۶۱ درصد بود.



شکل ۱۱- مقایسه بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده با مدل اکوکراپ در مرحله واسنجی با ماده اصلاحی نانوبیوچار.

Figure 11. Comparison of the water productivity measured and predicted by the AquaCrop model in the calibration stage with the Nano Biochar amendment.

شکل ۱۲ بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده کینوا با مدل اکوکراپ در مرحله صحت‌سنجی با ماده اصلاحی نانوبیوچار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل در تعدادی از تیمارها دچار کم‌برآوردی و در تعدادی دچار بیش‌برآوردی شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده ۸/۵۶ و ۰/۴۱ درصد به‌دست آمد.



شکل ۱۲- مقایسه بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده کینوا با مدل اکوکراپ در مرحله صحت‌سنجی با ماده اصلاحی نانوبیوچار.

Figure 12. Comparison of the water productivity measured and predicted by the AquaCrop model in the validation stage with the Nano Biochar amendment.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در این پژوهش و سایر پژوهش‌های انجام‌شده می‌توان گفت در همه مدل‌های گیاهی انتظار رسیدن به مقادیر اندازه‌گیری شده غیرمنطقی است. علت آن نیز می‌تواند به دلیل ساده‌سازی‌هایی باشد که برای شرایط کشت انجام می‌شود. این فرضیات در شرایط تنش بیش‌تر تغییر می‌کند و باعث می‌شود که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده بیش‌تر شود. سایر پژوهش‌گران نیز اختلاف مشاهده‌شده بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده با مدل اکوکراپ را ناشی از شیوه به‌کار برده شده توسط مدل برای شبیه‌سازی بیان می‌کنند (۳۰). هم‌چنین تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده را می‌توان به تفاوت در روش تعیین نیاز آبی مدل (روش پنمن مونتیث) و در گلخانه (روش رطوبت وزنی) نسبت داد. هرچه تخمین رطوبت ناحیه ریشه دقیق‌تر اندازه‌گیری شود، باعث تخمین دقیق‌تر عملکرد توسط مدل اکوکراپ می‌شود (۳۱). نتایج پژوهش نشان داد خطای مدل اکوکراپ تقریباً در تیمارهایی که دچار تنش شوری و آبی بودند بیش‌تر بود. به همین دلیل پژوهش‌گران پیشنهاد می‌کنند که تنش‌های شدید با این مدل گیاهی شبیه‌سازی نشود یا ضریب اطمینان برای تصحیح نتایج آن، با استفاده از تیمارهای بدون تنش یا تنش کم، برآورد گردد (۲۳). سایر پژوهش‌گران نیز به نتایج مشابهی دست یافتند (۳۲، ۳۳، ۳۴ و ۸). در ۲۹ درصد تیمارها در مرحله صحت‌سنجی، اختلاف زیاد بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده عملکرد مربوط به تیمارهایی بود که ماده اصلاحی استفاده نشده بود. علت آن را شاید بتوان به تأثیر ماده اصلاحی بر کیفیت خاک در شرایط تنش آبی و شوری نسبت داد. پژوهش‌ها نشان داده است استفاده از مقدار مناسب بیوچار سبب کاهش اثرات منفی تنش رطوبتی می‌شود (۳۵). در پژوهشی نشان داده شد که بیوچار موجب بهبود ساختمان خاک، ظرفیت نگهداری آب در خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و تهویه خاک می‌شود (۳۶). در پژوهشی دیگر بیان شد خطای مدل اکوکراپ در شرایط تأمین آب کم‌تر است (۳۷). هم‌چنان نتیجه دیگری که از شبیه‌سازی مدل می‌توان گرفت، روند کاهش عملکرد تحت‌تأثیر تنش آبی و شوری بود که به‌خوبی توسط مدل شبیه‌سازی‌شده است. در تیمارهای تحت تنش شوری مقادیر بهره‌وری آب کم‌تری هم در مقادیر اندازه‌گیری‌شده و هم در مقادیر شبیه‌سازی‌شده به‌دست آمد. این امر به‌دلیل عملکرد دانه کم‌تر در اثر تنش‌های وارده به گیاه و کاهش رشد گیاه و توان تولیدی در تیمارهای تحت تنش نسبت به دیگر تیمارها است که مدل به خوبی آن را نشان داده است.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش کارایی مدل اکوکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا در شرایط کاربرد سطوح مختلف مقادیر و شوری آب آبیاری و اصلاح‌کننده‌های بیوچار و نانوبیچار موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد کارایی و دقت مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کینوا در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی خوب است. هم‌چنین با توجه به ضرایب تبیین به‌دست‌آمده، نتایج نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد نسبت به بهره‌وری مصرف آب بود. با افزایش شدت تنش شوری و کم‌آبی دقت پیش‌بینی مدل کاهش یافت. حساسیت

مدل به پارامترهای رطوبت در ظرفیت زراعی، پژمردگی و در حالت اشباع، ضریب گیاهی برای تعرق، عمق مؤثر ریشه، حد بالا و پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه، بیشینه رشد کانوپی، ضریب رشد و کاهش پوشش و بهره‌وری آب نرمال‌شده موردبررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد مدل نسبت به تغییر پارامترهای رطوبت در ظرفیت زراعی، ضریب گیاهی برای تعرق، عمق مؤثر ریشه، حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه، حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه، بیشینه رشد کانوپی و ضریب رشد پوشش در هر دو حالت افزایشی و کاهشی حساسیت متوسط، برای پارامترهای ظرفیت در نقطه پژمردگی و رطوبت در حالت اشباع در هر دو حالت افزایشی و کاهشی حساسیت کم و برای پارامتر ضریب کاهش پوشش در حالت افزایشی حساسیت متوسط و در حالت کاهشی حساسیت کم و برای پارامتر بهره‌وری آب نرمال‌شده در حالت افزایشی حساسیت کم و برای حالت کاهشی حساسیت متوسط داشت. بنابراین لازم است که در اندازه‌گیری پارامترهایی که ضریب حساسیت زیاد و متوسط است دقت بیش‌تری به عمل آورد. درنهایت، می‌توان بیان داشت که مدل اکوکراپ با یک سطح اطمینان قابل‌قبول می‌تواند در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه کینوا تحت تیمارهای مختلف کمی و کیفی آب آبیاری و اصلاح‌کننده‌های خاک مورداستفاده قرار گیرد و به‌عنوان یک ابزار توانمند و کارآمد در جهت انتخاب مدیریت بهینه آبیاری به کشاورزان، طراحان، متخصصان و مدیران کشاورزی کمک نماید.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه زابل (گروه مهندسی آب) و مسئولین آزمایشگاه‌های گروه مهندسی آب و گروه علوم خاک، 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 ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در آزمایشگاه‌های آب‌وخاک دانشکده آب‌وخاک دانشگاه زابل 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 شبیه‌سازی با نرم‌افزار اکوکراپ.

اصول اخلاقی

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

حمایت مالی

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

منابع

1.Jacobsen, S. E., Liu, F., & Jensen, C. R. (2009). Does rootsourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa*). 5, 45-52.

2.Bahrami, M., Talebnejad, R., Sepaskhah, A. R., & Bazile, D. (2022). Irrigation regimes and nitrogen rates as the contributing factors in quinoa yield to increase water and nitrogen efficiencies. *Plants*, 11 (15), 2048.

3.Bonales-Alatorre, E., Pottosin, I., Shabala, L., Chen, Z. H., Zeng, F., Jacobsen, S. E., & Shabala, S. (2013). Differential activity of plasma and vacuolar membrane transporters contributes to genotypic differences in salinity tolerance in a halophyte species, chenopodium quinoa. *International Journal of Molecular Sciences*, 14 (5), 9267-9285.

4.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.

5.Heng, L. K., Hsiao, T. C., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize, *Agronomy Journal*. 101 (3), 488-498.

6.Iqbal, M. A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., & Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*. 135, 61-72.

7.Alizadeh, H., Nazari, B., Parsi-Nejad, M., Ramezani-Etdali, H., & Janbaz, H. (2018). Evaluation of AquaCrop model in wheat irrigation management in Karaj region. *Iran Irrigation and Drainage*, 4, 273-283. [In Persian]

8.Ebrahimipak, N. A., Egdernezhad, A., Tafteh, A., & Ahmadee, M. (2019). Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to simulate rapeseed yield. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13 (3), 715-726. [In Persian]

9.Van Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abrha, B., Diels, J., & Raes, D. (2014). Asemiquantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the Aqua crop procedure. *Journal of Agricultural Science*, 153 (7), 1218-1233.

10.Akumaga, U., Tarhule, A., & Yusuf, A. A. (2017). Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 225-234.

11.Karimi, S., Egdernezhad, A., & Nakhjavanimoghaddam, M. (2021). Assessing Aquacrop Model Accuracy for Simulation of Corn Yield and Water Use Efficiency in Different Plant Densities and Water Amount. *Environment and water engineering*, 7 (1), 59-72.

12.Emdad, M. R., Tafteh, A., & Ebrahimipak, N. (2022). Efficiency of Aquacrop Model in Simulating Yield of Quinoa in Different Deficit Irrigation Managements. *Journal of Water and Soil*, 36 (3), 319-331. [In Persian]

13.Geerts, S., Raes, D., Garcia,M., Miranda, R., Cusicanqui, J., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., & Steduto, P. (2009). Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101 (3), 499-508.

14.Alvar-Beltrán, J., Gobin, A., Orlandini, S., & Dalla, A. (2021). AquaCrop parametrisation for quinoa in arid environments. *Italian Journal of Agronomy*, 16, 1749.

15.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.

16.Vanuytrecht, E., Raes, D., & Willems, P. (2014). Global sensitivity analysis of

yield output from the water productivity model. *Environmental Modelling & Software*, 51, 323-332.

17. 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 agrometeorological conditions and application. *Field Crops Research*, 226, 1-15.
18. Rahimi Khoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2019). Sensitivity analysis of basil plant growth parameters in AquaCrop model under different nitrogen fertilizer stresses. *Iran Water and Soil Research*, 51 (6), 1341-1351. [In Persian]
19. Karimi Avargani, H., Rahimikhoob, A., & Nazari Fard, M. (2019). Sensitivity Analysis of Aquacrop Model for Barley in Pakdasht Region. *Journal of Water and Soil Science*. 23 (3), 53-63. [In Persian]
20. Payero, J. O., Melvin, S. R., Irmak, S., & Tarkalson, D. (2009). Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agric. Water Manage.* 84, 101-112.
21. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101, 438-447.
22. Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96, 1275-1284.
23. Eghderanjad, A., Ebrahimi Pak, N. A., Tafte, A., & Ahmadi, M. (2017). Rapeseed irrigation planning using AquaCrop model in Qazvin Plain. *Water Management in Agriculture*, 5 (2), 63-54. [In Persian]
24. Neysi, K., Egdernezhad, A., & Abbasi, F. (2023). Evaluation of AquaCrop model for corn simulation under different management of nitrogen fertilizer in karaj. Water and *Soil Management and Modeling*, 3 (1), 26-41. [In Persian]
25. Kheir, A. M. S., & Hassan, M. A. A. (2016). Performance Assessment of the FAO Aquacrop Model for Maize Yield, Biomass and Water Productivity along the River Nile, *Egypt. J. Soil Sci. Agric. Eng. Mansoura Univ*. 7 (10), 721-728.
26. Khoshravesh, M., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., & Kiani, A. R. (2013). AquaCrop model simulation under different irrigation water and nitrogen strategies. *Water Science and Technology*, 67 (1), 232-238.
27. Mohammadi, M., Hero, B., Judgement, K., Ansari, H., & Shahidi, A. (2014). Validation of AquaCrop model in order to simulate the performance and efficiency of water consumption of winter wheat under simultaneous conditions of salinity and drought stress. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 29 (1), 67-84. [In Persian]
28. Abedi, M., Eghderanjad, A., & Ebrahimipak, N. A. (2018). Evaluation of AquaCrop model in simulating grain yield and wheat water consumption efficiency under different irrigation conditions in the field. *Iran Scientific Journal of Agriculture and Plant Breeding*, 15 (1), 1-14.
29. Shabani, A., Zakarinia, M., & Hossam, M. (2018). Evaluation of the effectiveness of the AquaCrop model in simulating the yield of Williams cultivar soybeans in Golestan province under salinity stress caused by Caspian Sea water and different irrigation levels. *Irrigation Science and Engineering*, 42 (1), 62-49. [In Persian]
30. Kale, S. (2016). Assessment of aquacrop model in the simulation of wheat growth under different water regimes. Scientific Papers. Series A. *Agronomy*, Vol. LIX.
31. Ahmadi, S. H., Mosallaeepour, E., Kamgar Haghighi, A. K., & Sepaskhah, A. R. (2015). Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. *Water Resources Management*. 29, 2837-2853. [In Persian]
32. Andarziana, B., Bannayanb, M., Stedutoc, P., Mazraeha, H., Barati,

M. E., Barati, M. A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100, 1-8.

33. Ebrahimi-Pak, N. A., Ahmadi, M., Eghderanjad, A., & Khashai-Siyuki, A. (2017). Evaluation of AquaCrop model in simulating saffron performance under different scenarios of low irrigation and zeolite consumption. *Water and Soil Resources*, 8 (1), 129-118. [In Persian]
34. Hosseini, S. I., Khosh Ravesh, M., Ziyatbar Ahmadi, M. Kh., & Gadami Firouzabadi, A. (2015). Soybean performance evaluation with AquaCrop model under the influence of salinity and low irrigation management. *Journal of Water Research in Agriculture*, 30 (3), 372-361. [In Persian]
35. Mir, A., Piri, H., & Naserin, A. (2021). The effect of different levels of wheat biochar and water stress on the quantitative and qualitative characteristics of Carla (bitter melon) in pots. *Journal of Water Research in Agriculture*, 35 (2), 184-170. [In Persian]
36. Gao Lu, S., Fang, S. F., & Tong, Z. Y. (2014). Effect of rice husk biochar and charcoal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*. 114, 37-44.
37. Salemi, H., Mohd Soom, M. A., Lee, T. S., Mousavi, S. F., Ganji, A., & Kamil Yusoff, M. (2011). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, 610, 2204-2215.