

Evaluation of AquaCrop model for corn simulation under different management of nitrogen fertilizer in Karaj

Karim Neysi¹ , Aslan Egdernezhad^{2*} , Fariborz Abbasi³ 

¹ M.Sc. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

² Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

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

Abstract

Introduction

The use of plant models is one of the methods that help researchers to understand the response of plants to different agricultural managements without conducting numerous experiments that require spending a lot of time and money. The use of plant models for simulating the reaction of plants to water deficit has a relatively long history and has gone through four stages: infancy, adolescence, youth and maturity. These models were introduced to researchers about fifty years ago by developing computer programs and taking into account the biochemical and biophysical mechanisms of solar energy available for the production of chemical energy and plant biomass. Then, from the late 60s and with the advent of computers, the adolescent stage of plant modeling began. In the youth period of plant modeling, some beliefs of the previous years were lost and detailing and validation of models were considered. Among the first measures taken to provide an acceptable model can be the results of research (1998) by Gerik et al. Cited. The results of these researchers' studies led to the presentation of a model called SORKAM, which was able to simulate the dynamic growth of sorghum (*Sorghum bicolor*). The maturation period of plant modeling started in the 90s and has continued until now. During this period, more comprehensive software for the simulation of crop plants was developed by research centers around the world, including WOFOST, SWAP and MARS and modeling the plant was widely used in different countries.

The AquaCrop plant model, which was developed by the Food and Agriculture Organization since 2009, is one of the user-friendly, flexible and widely used models that is widely used by researchers due to the closeness of the simulation results to real conditions. The AquaCrop model is used to simulate crops under various stresses, including fertilizer stress. In the developed version of the model, a semi-quantitative method is used to simulate nitrogen fertilizer stress. However, this model has not been evaluated to simulate the effect of different amounts of nitrogen fertilizer under different application methods. For this reason, this issue is addressed in the present study.

Materials and Methods

To achieve the research objective, the data was collected from the research project carried out in the 500-hectare research farm of the Seed and Plant Breeding Research Institute, located at 50.58° East longitude and 35.56° N latitude and 1312 m altitude. In this study, nitrogen fertilizer at three levels (N1: 100, N2: 80, and N3: 60) and application time in two methods (T1: three equal usage including 4-6 leaf stage, 10 leaf stage and reproduction stage, and T2: Four equal usage including 4-6 leaf stage, 10 leaf stage, reproduction stage, and inoculation stage) were considered. Then, all treatments were compared with the control, which included traditional fertilization applications in the region. The input data of the AquaCrop model includes four groups of climatic, plant, soil and farm management data. Climatic data includes maximum and minimum daily temperature, rainfall, reference plant evapotranspiration (ET₀) and annual average CO₂ concentration. Soil data includes saturated hydraulic conductivity, soil texture and volumetric soil moisture at the points of crop capacity and permanent wilting. Farm management data also includes farm management and fertility and irrigation. To evaluate the plant model, calibration was done first. For this purpose, the AquaCrop model was evaluated based on the conditions without

fertilizer stress and using the data collected from the farm in the first year. Then, in order to calibrate this model under fertilizer stress conditions, it was necessary to determine the reduction coefficients of coverage development, maximum coverage, average reduction and normalized water productivity reduction percentage.

Results and Discussion

The difference between the simulated and observational yield for the control was about 5.7%. The AquaCrop model had an overestimation error to simulate control yield. The mean difference between the simulated and observed yield for T1 was about 4.4%. The highest and lowest yield differences were observed for N3T1 (5.9%) and N1T1 (1.8%) treatments, respectively. The average difference between the simulated and observed yield in T2 was about 5.7%, which is equal to T1. The highest and lowest yield differences in T2 treatment were obtained in N3T2 (4%) and N1T2 (1%), respectively. Therefore, with increasing fertilizer stress, the difference between simulated and observational yield increased. The results showed that the AquaCrop model had an overestimation error (MBE <0) to simulate corn grain yield and an underestimation error (0 < MBE) to simulate water productivity. The error of the AquaCrop model for yield simulation was about 0.36 t ha⁻¹ in the T1 method and about 0.24 t ha⁻¹ in the T2 method. According to NRMSE statistics values, the accuracy of this model for simulating yield in both fertilization methods was in the excellent category (NRMSE <0.1). The error of the AquaCrop model for simulating water productivity in the T1 method was about 0.29 kg.m⁻³ and in the T2 method was about 0.30 kg.m⁻³. However, the accuracy of this crop model to simulate water productivity in both fertilization methods was in the middle category (NRMSE <0.3). According to all the results, the accuracy of this crop model to simulate the yield was better than water productivity and its use for similar conditions is recommended.

Conclusion

The results showed that the accuracy and efficiency of the AquaCrop model for simulating corn yield were acceptable in both calibration and validation stages. No difference was observed in the accuracy of the AquaCrop model for simulating corn yield under both fertilization methods. The error of this plant model to simulate water productivity increased slightly but its efficiency was acceptable. As the fertilizer stress increased, the accuracy of the AquaCrop model decreased. The reason was the increase in the error of this plant model to simulate the development of vegetation under fertilizer stress conditions. Based on all the results, since the fertilizer division methods have not been simulated with this plant model so far, it is possible to rely on the accuracy of the output of this plant model in the mentioned conditions, and its use for similar conditions is recommended.

Keywords: Crop Modeling, Nitrogen Fertilizer Splitting, Nitrogen Management, Semi-quantitative Method

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: a_eigder@ymail.com

Citation: 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.

DOI: 10.22098/mmws.2022.10969.1093

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.1.3

Received: 12 June 2022, Received in revised form: 04 August 2022, Accepted: 04 August 2022, Published online: 04 August 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 1, pp. 26-41

Publisher: University of Mohaghegh Ardabil

© Author(s)





ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت و بهره‌وری آب تحت مدیریت مختلف کاربرد کود نیتروژن در کرج

کریم نیسی^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*}، فریبرز عباسی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
^۲ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
^۳ استاد پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده

مدل AquaCrop از جمله مدل‌های گیاهی است که برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی تحت تنش‌های مختلف از جمله کود نیتروژن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی اثر مدیریت‌های مختلف کاربرد کود نیتروژن بر عملکرد گیاه ذرت از داده‌های برداشت شده در مزرعه ۵۰۰ هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (کرج) استفاده شد. در این طرح کود نیتروژن در سه سطح (N1: ۱۰۰ درصد، N2: ۸۰ درصد و N3: ۶۰ درصد توصیه کودی) و زمان تقسیط آن به دو روش (T1: سه تقسیط مساوی شامل مراحل ۴-۶ برگ، ۱۰ برگ و تاسل‌دهی و T2: چهار تقسیط مساوی شامل مراحل ۴-۶ برگ، ۱۰ برگ، تاسل‌دهی و تلقیح) در نظر گرفته شد. سپس همه تیمارها با تیمار شاهد که شامل کوددهی به صورت عرف در منطقه و به روش سنتی بود، مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت دچار خطای بیش‌برآوردی ($MBE > 0$) و برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب دچار خطای کم‌برآوردی ($MBE < 0$) شد. خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد در روش T1 حدود ۰/۳۶ تن در هکتار و در روش T2 حدود ۰/۲۴ تن در هکتار بود. بر اساس آماره $NRMSE$ ، دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد در هر دو روش کوددهی در دسته عالی ($NRMSE < 0/1$) قرار داشت. خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب در روش T1 حدود ۰/۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب و در روش T2 حدود ۰/۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود. دقت مدل گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب در هر دو روش کوددهی در دسته متوسط ($NRMSE < 0/3$) قرار گرفت. با توجه به یافته‌های این پژوهش، دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد بهتر از بهره‌وری آب بود و برای شرایط مشابه استفاده از آن پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تقسیط نیتروژن، روش نیمه کمی، مدل سازی گیاهی، مدیریت کوددهی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a_eigder@ymail.com

استناد: نیسی، ک.، اگدرنژاد، ا.، و عباسی، ف. (۱۴۰۲). ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت و بهره‌وری آب تحت مدیریت مختلف کاربرد کود نیتروژن در کرج. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۲۶-۴۱.

DOI: 10.22098/mmws.2022.10969.1093

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.1.3

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۵/۱۳

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۱، شماره صفحه ۲۶ تا ۴۱

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

استفاده از مدل‌های گیاهی یکی از روش‌هایی است که به پژوهش‌گران کمک می‌کند تا بدون انجام آزمایش‌های متعدد که نیازمند صرف وقت و هزینه بسیار است، بتوانند درک درستی از واکنش گیاهان به مدیریت‌های مختلف کشاورزی داشته باشند (Ahmaded et al., 2021). کاربرد مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی واکنش گیاهان به کم‌آبی سابقه نسبتاً طولانی دارد و تاکنون چهار مرحله نوزادی، نوجوانی، جوانی و بلوغ را طی کرده است. این مدل‌ها از حدود پنجاه سال پیش با بسط برنامه‌های رایانه‌ای و با در نظر گرفتن مکانیسم‌های بیوشیمیایی و بیوفیزیک انرژی خورشید در دسترس برای پرورده‌سازی انرژی شیمیایی و زیست‌توده گیاه به محققان معرفی شدند (Sinclair and Seligman, 1996; Alishiri et al., 2014). سپس از اواخر دهه ۶۰ میلادی و با ظهور رایانه، مرحله نوجوانی مدل‌سازی گیاهی شروع شد. در دوره جوانی مدل‌سازی گیاهی، برخی باورهای سال‌های قبل از بین رفت و جزئی‌نگری و اعتباربخشی به مدل‌ها مدنظر قرار گرفت (Sinclair and Seligman, 1996). از جمله نخستین اقدامات انجام شده برای ارائه یک مدل قابل قبول می‌توان به نتایج پژوهش‌های Gerik et al. (1998) اشاره کرد. نتایج مطالعات این محققان سبب ارائه مدلی به نام SORKAM شد که توانایی شبیه‌سازی دینامیکی رشد محصول سورگوم (*Sorghum bicolor*) داشت. دوره بلوغ مدل‌سازی گیاهی از دهه ۹۰ میلادی شروع شد و تاکنون ادامه یافته است. در این دوره، نرم‌افزارهای جامع‌تری برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی توسط مراکز پژوهشی در سراسر جهان بسط داده شد که از این جمله می‌توان به WOFOST، SWAP و MARS اشاره کرد (Van Dam et al., 1997; Boogaard et al., 1998) و مدل‌سازی گیاهی در کشورهای مختلف به صورت وسیع مورد استفاده قرار گرفت.

مدل گیاهی AquaCrop که از سال ۲۰۰۹ توسط سازمان خوار و بار کشاورزی بسط داده شد، یکی از مدل‌های کاربرپسند، منعطف و پرکاربرد است که به دلیل نزدیکی نتایج شبیه‌سازی با شرایط واقعی به صورت گسترده توسط محققان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Egdernezhad et al., 2019; Ebrahimipak et al., 2019b). این مدل گیاهی در ابتدا قادر به شبیه‌سازی واکنش گیاهان به مقدار آب مصرفی بود، ولی در نسخه‌های بعدی قابلیت‌های دیگری از جمله شبیه‌سازی شرایط تنش شوری نیز به آن اضافه شد (Ebrahimipak et al., 2019b). در نسخه‌ای که در سال ۲۰۱۴ معرفی شد، قابلیت شبیه‌سازی کود نیتروژن نیز به آن اضافه شد. گرچه این مدل قادر به تشخیص نوع کود نیست، لیکن با استفاده از یک ماژول

خودکار می‌تواند اثر کاربرد کود بر عملکرد گیاهان زراعی را واسنجی و سپس مورد استفاده قرار دهد (Van Gaelen et al., 2014). نسخه اصلاح شده این مدل توسط Van Gaelen et al. (2014) برای شبیه‌سازی مقدار کود بر عملکرد گیاهان ذرت (*Zea mays*)، گندم (*Triticum aestivum*)، تف (*Eragrostis tef*) و کینوا (*Chenopodium quinoa*) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. این محققان نشان دادند که مدل AquaCrop دقت مطلوبی برای شبیه‌سازی اثرات تنش کودی بر گیاهان مورد مطالعه داشت. سایر پژوهش‌گران از جمله Akugama et al. (2017) و Ranjbar et al. (2017) برای کشت ذرت تحت شرایط مختلف کودی از مدل AquaCrop استفاده کرده و دقت این مدل را قابل قبول گزارش نمودند.

ذرت یکی از غلات مهم در جهان است که بعد از گندم بیش‌ترین سطح زیر کشت در دنیا را دارد (Abbasi et al., 2015). این گیاه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، مانند ایران به خوبی رشد می‌کند؛ به همین دلیل زمین‌های زراعی زیادی در استان‌های مختلف کشور تحت کشت این محصول قرار دارد. به دلیل اهمیت این گیاه زراعی، اطلاعات مربوط به آن در پایگاه داده مدل AquaCrop قرار داده شده و محققان بسیاری برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت از این مدل گیاهی استفاده نموده‌اند. در پژوهشی که توسط Hsiao et al. (2009) انجام شد، دقت مدل AquaCrop در شرایط گوناگون تراکم بوته، تاریخ کاشت متفاوت و مقادیر مختلف نیاز آبی گیاه ذرت مورد ارزیابی قرار گرفت. این پژوهش‌گران نشان دادند که دقت و کارایی این مدل گیاهی قابل قبول بود. Heng et al. (2009) برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت از مدل گیاهی AquaCrop استفاده نمودند. این محققان نشان دادند که دقت مدل AquaCrop برای شرایط تنش ملایم مطلوب بود ولی در شرایط تنش شدید اندکی از دقت آن کاسته شد. Katerji et al. (2013) با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف کم‌آبایی بر ذرت گزارش کردند که دقت مدل AquaCrop برای این هدف قابل قبول است. Masanganise et al. (2013) با استفاده از مدل AquaCrop به شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط زراعی کشور زیمبابوه پرداختند. این پژوهش‌گران نشان دادند که این مدل گیاهی دقت بالایی برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت داشت. Saeidi et al. (2021) از این مدل گیاهی برای برآورد روند عملکرد ذرت تحت تنش‌های شوری و کودی استفاده نمودند. نتایج این محققان نشان داد که آماره RMSE برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت برابر با ۰/۳۴ تن در هکتار بود که قابل قبول است.

بر اساس مرور منابع، پژوهش‌های متعددی روی عوامل مختلف مدیریت زراعی گیاه ذرت با استفاده از مدل AquaCrop

برای تعیین نیاز آبی از داده‌های ایستگاه هواشناسی البرز در فاصله دو کیلومتری از مزرعه تحقیقات استفاده شد. مقدار آب آبیاری بر اساس نیاز آبی کامل گیاه، به صورت آبیاری جویچه‌ای و بر اساس تبخیر از سطح تشتت کلاس A و اعمال ضرایب تشتت و گیاهی تعیین شد. ضریب تشتت بر اساس توصیه ایستگاه هواشناسی برابر با ۰/۶۵ و ضریب گیاهی نیز بر اساس مقادیر ارائه شده در نشریه فائو ۵۶ در نظر گرفته شد. پنج جویچه برای هر تیمار اختصاص داده شد. سه جویچه میانی برای برداشت محصول و دو جویچه کناری برای اثر حاشیه‌ای منظور شدند. اعمال آبیاری ۵ روز پس از کاشت انجام شد. دبی ورودی و خروجی هر جویچه به ترتیب با استفاده از کنتور و فلوم WSC تیپ سه اندازه‌گیری شد. مقادیر آب آبیاری در شکل ۱ نشان داده شده است. کود نیتروژن مورد استفاده در آب حل و از طریق ظروف ۲۰ لیتری به ابتدای جویچه‌ها در محل فلوم اندازه‌گیری جریان آب تزریق شد. این کار برای ثابت نگه داشتن دبی تزریق کود انجام شد. به دلیل این که تزریق کود در اواخر آبیاری یکنواختی توزیع بیش‌تری به همراه دارد، تزریق کود در ۲۰-۳۰ دقیقه انتهایی هر آبیاری انجام شد.

کود سوپرفسفات تربیل به مقدار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، بر اساس توصیه کودی بر اساس آزمون خاک، پیش از کاشت در تمام تیمارها به صورت یکسان در سطح خاک پخش شد. مبارزه با علف‌های هرز با استفاده از علف‌کش پیش‌کاشتی و همچنین وجین دستی طی فصل رشد انجام گرفت. پس از استقرار کامل بوته‌ها و برای حصول تراکم مناسب، اقدام به تنک کردن بوته‌های اضافی در مرحله ۱۰ برگی شد. روند توسعه پوشش گیاهی نیز با فواصل ۳۰ روزه در طول آزمایش اندازه‌گیری شد. در پایان فصل رشد و پس از رسیدن فیزیولوژیک، عملیات برداشت محصول از سه جویچه وسط به طول حدود ۵ متر از هر تکرار به صورت تصادفی اجرا شد. عملکرد دانه در رطوبت ۱۴ درصد تعیین شد. برای محاسبه بهره‌وری آب نیز از رابطه زیر استفاده شد:

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

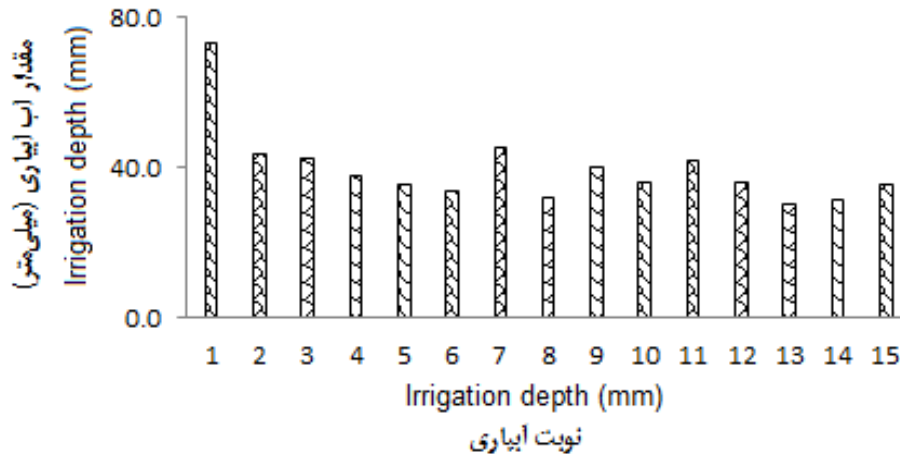
که در این رابطه، WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y عملکرد (کیلوگرم) و W مقدار آب آبیاری (مترمکعب) است.

انجام شده است؛ اما توجه به شبیه‌سازی اثر مدیریت‌های مختلف کاربرد کود نیتروژن با استفاده از مدل AquaCrop کم‌تر مورد توجه محققان بوده است. این موضوع از این رو مهم است که بر اساس تجربیات قبلی نویسندگان، عملکرد ذرت به شدت به میزان و زمان تقسیم کود نیتروژن وابسته است و در صورت عدم رعایت شرایط مناسب کوددهی عملکرد به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین، پژوهش حاضر به بررسی این مهم می‌پردازد که دقت و کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی تنش کودی ذرت در دو زمان تقسیم متفاوت کوددهی تا چه میزان می‌تواند با نتایج به دست آمده در مزرعه مطابقت داشته باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش آزمایش

این پژوهش با استفاده از داده‌های برداشت شده از طرح تحقیقاتی اجرا شده در دو سال زراعی در مزرعه ۵۰۰ هکتاری موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در طول جغرافیایی ۵۰/۵۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۶ درجه شمالی و ارتفاع ۱۳۱۲ متری از سطح دریا انجام شد (Abbasi et al., 2015). این منطقه از نظر آب و هوایی بر اساس طبقه‌بندی کوپن جزء مناطق نیمه‌خشک با زمستان سرد است. متوسط بارندگی در این منطقه ۲۴۵ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. در این آزمایش، رقم سینگل کراس ۲۶۰ (با تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار) کشت شد. عملیات کاشت در اواخر اردیبهشت انجام شد. دو عامل سطوح کودی و زمان تقسیم بر اساس تجربیات قبلی پژوهش‌گران در این زمینه مد نظر قرار گرفت. بدین ترتیب که کود نیتروژن در سه سطح (N1: ۱۰۰ درصد، N2: ۸۰ درصد و N3: ۶۰ درصد توصیه کودی) و زمان تقسیم آن به دو روش (T1: سه تقسیم مساوی شامل مرحله ۴-۶ برگی، مرحله ۱۰ برگی و مرحله تاسل‌دهی و T2: چهار تقسیم مساوی شامل مرحله ۴-۶ برگی، مرحله ۱۰ برگی، مرحله تاسل‌دهی و مرحله تلقیح) در نظر گرفته شد. همه تیمارها با شاهد که شامل کوددهی به صورت عرف در منطقه بود مقایسه شدند. کوددهی عرف منطقه شامل ۵۰ درصد توصیه کودی بر اساس آزمون خاک قبل از کاشت و ۵۰ درصد در مرحله ۴-۶ برگی و به روش پخش سطحی است.



شکل ۱- متوسط آب آبیاری مورد استفاده در این پژوهش
Figure 1- Average irrigation water used in this study

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (5)$$

که در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد وزن دانه (Y) نیز با استفاده از ماده خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه ۶ محاسبه می‌شود (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009):

$$Y = B \times HI \quad (6)$$

شدت تنش آبی (K_s) مؤثر بر توسعه پوشش تاج (CC)، هدایت روزنه‌ای (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در واقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش یافته و به تبع آن میزان تعرق گیاه کاهش می‌یابد. این عمل سبب کاهش ماده خشک تولیدی و عملکرد دانه می‌شود. این مدل 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 عمل با فرض پارامتر بیشینه‌نسبی مقدار زی‌توده خشک (B_{rel}) بر حسب درصد با توجه به رابطه ۷ انجام می‌شود (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009):

$$B_{rel} = \frac{B_{stress}}{B_{ref}} \times 100 \quad (7)$$

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

۲-۲- مدل AquaCrop

در این مدل برای تعیین عملکرد محصول بر اساس تبخیر-تعرق از رابطه ۲ استفاده می‌شود (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009):

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (2)$$

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

این مدل با تفکیک تبخیر-تعرق (ET) به دو جزء تبخیر از سطح خاک (E) و تعرق از سطح گیاه (Tr)، از مصرف غیرتولیدی آب از طریق تبخیر جلوگیری می‌کند. این مهم با شبیه‌سازی پوشش تاج گیاه به جای شاخص سطح برگ (LAI) انجام می‌شود. بدین ترتیب که توسعه پوشش تاج گیاه از زمان جوانه‌زنی تا مقدار بیشینه پوشش تاج از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009):

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (3)$$

که در این رابطه، CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد)، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) است. میزان تعرق گیاه بر اساس پوشش تاج از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009):

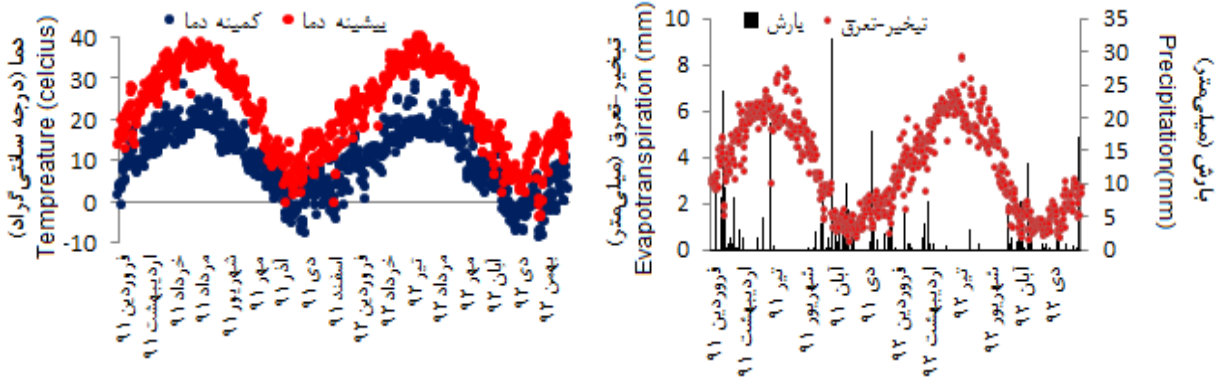
$$Tr = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (4)$$

که در آن، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی هستند. بیوماس خشک نیز طبق رابطه ۵ برآورد می‌شود (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009):

۳-۲- ورود داده‌ها به مدل AquaCrop

داده‌های ورودی مدل AquaCrop شامل چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه است. داده‌های اقلیمی شامل بیشینه و کمینه دمای روزانه، بارندگی، تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) و میانگین غلظت CO_2 سالیانه است. برای تعیین تبخیر-تعرق از معادله فائوپنمن-مونتیت و توسط نرم‌افزار ET-calculator استفاده شد و خروجی آن به مدل AquaCrop معرفی شد. غلظت CO_2 نیز بر اساس مقدار پیش‌فرض، که در رصدخانه مائونالوای هاوایی اندازه‌گیری شده (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009)، برای این مدل تعیین شد. مقادیر این داده‌ها در شکل ۲ ارائه شده است.

داده‌های خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع، بافت خاک و رطوبت حجمی خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم است. نتایج آزمون خاک در جدول ۱ آورده شده است و از نتایج



شکل ۲- مقادیر داده‌های هواشناسی ورودی به مدل AquaCrop
Figure 2-AquaCrop model input weather data values

جدول ۱- برخی ویژگی‌های خاک آزمایش در محل مطالعه

Table 1 - Soil characteristics in the study area

pH	EC (دسی‌سزمینس بر متر)	رطوبت حجمی اشباع	رطوبت حجمی در FC	رطوبت حجمی در PWP	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	بافت خاک	عمق خاک (سانتی‌متر)
7.77	1.16	45.00	29.00	15.00	1.34	لوم	0-20
7.67	0.82	44.00	29.00	15.00	1.46	لوم	20-40
7.85	0.80	44.00	28.00	16.00	1.47	لوم	40-60
7.69	0.87	43.00	28.00	16.00	1.50	لوم	60-80

مقدار برآورد پارامتر مورد نظر بر اساس داده ورودی پایه است. برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از پارامترهای ورودی مدل را به مقدار ۲۵ درصد تغییر و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته می‌شدند. در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > 15$ حساسیت بالا، $2 < Sc < 15$ حساسیت متوسط، $Sc < 2$ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (Geerts and Raes, 2009).

۴-۲- تحلیل حساسیت

برای تحلیل حساسیت مدل از رابطه ۸ استفاده شد (Geerts and Raes, 2009):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (8)$$

که در این رابطه، Sc ضریب حساسیت، P_m مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر بر اساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (11)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (13)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها است. تجزیه و تحلیل داده‌ها، محاسبه آماره‌ها و رسم نمودارها در محیط Microsoft Excel انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تحلیل حساسیت

نتایج تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس رابطه ۶ این مدل نسبت به تغییرات پارامترهای عمق مؤثر ریشه در هر دو حالت افزایشی و کاهش، مدت زمان کاشت تا برداشت محصول در حالت افزایشی و ضریب رشد پوشش در حالت کاهش حساسیت کم داشت. این نتایج با مشاهدات Ahmadee et al. (2021) و Ebrahimpak et al. (2018) مطابقت داشت. حساسیت مدل AquaCrop نسبت به سایر پارامترهای ورودی این مدل متوسط بود. علت آن وابسته بودن شبیه‌سازی عملکرد به مقادیر پارامترهای گیاهی از جمله بهره‌وری آب نرمال شده و حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق است. این نتایج با مشاهدات Egdernezhad et al. (2019) مطابقت داشت. پس از تحلیل حساسیت، واسنجی مدل انجام شد و مقادیر پارامترهای ورودی مدل AquaCrop برای هر دو زمان تقسیم T1 و T2 به دست آمد (جدول ۳).

۲-۵- ارزیابی مدل AquaCrop

برای ارزیابی این مدل گیاهی، ابتدا واسنجی انجام شد. بدین منظور مدل AquaCrop بر اساس شرایط بدون تنش کودی و با استفاده از داده‌های برداشت شده از مزرعه در سال اول مورد بررسی قرار گرفت. سپس به منظور واسنجی این مدل تحت شرایط تنش کودی، نیاز بود تا ضرایب کاهش توسعه پوشش، حداکثر پوشش، متوسط کاهش و درصد کاهش بهره‌وری آب نرمال شده تعیین شوند. در این راستا بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط Van Gaelen et al. (2014) از مقادیر تنش کودی در شرایط حداکثر (شاهد) به صورت جداگانه برای هر دو سطح کودی استفاده شد. در ادامه برای تحکیم نتایج در مرحله واسنجی، مدل AquaCrop در شرایط تأمین نیاز کودی ۶۰ و ۸۰ درصد نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس صحت‌سنجی این مدل با استفاده از همه تیمارهای مورد بررسی در این آزمایش، در سال دوم انجام شد.

برای ارزیابی مدل AquaCrop در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در رابطه‌های ۹ تا ۱۴ نشان داده شده‌اند. آماره‌های RMSE و NEMSE به ترتیب برای تعیین خطا و دقت مدل است. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کم‌تر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان دهنده دقت عالی مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیش‌تر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. آماره MBE برای سنجش بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی این مدل است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مقدار شبیه‌سازی شده بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد شده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل AquaCrop در برآورد عملکرد و بهره‌وری آب ذرت عدد کوچک‌تری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده کارایی مدل AquaCrop است. این دو آماره هر چه به یک نزدیک‌تر باشند بهتر است. آماره R^2 نشان‌دهنده قدرت مدل برای شبیه‌سازی تغییرات به وجود آمده در مقدار واقعی است. این آماره از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (9)$$

جدول ۲- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی AquaCrop
Table 2 - Sensitivity coefficient of some input parameters of AquaCrop model

عامل	مقدار Sc در حالت +25%	مقدار Sc در حالت -25%	درجه حساسیت
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	1.20	2.00	متوسط
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی	2.40	1.20	متوسط
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	2.50	2.90	متوسط
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	1.70	3.80	کم-متوسط
عمق مؤثر ریشه	1.00	1.30	کم
بهره‌وری آب نرمال شده	10.4	8.60	متوسط
بیشینه رشد کانوبی	4.50	2.90	متوسط
ضریب رشد پوشش	3.40	1.80	متوسط-کم
ضریب کاهش پوشش	7.60	4.20	متوسط
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	12.3	10.1	متوسط

جدول ۳- مقادیر پارامترهای ورودی به مدل AquaCrop
Table 3- Values of input parameters for AquaCrop model

توضیح عامل	سطوح کوددهی		واحد	توضیح
	T2	T1		
دمای پایه	8.00	8.00	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	30.0	30.0	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
تراکم کشت	80000	80000	گیاه در هکتار	اندازه‌گیری
ضریب رشد کانوبی	17.6	17.6	درصد روز	واسنجی
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	0.52	0.52	سانتی‌متر مربع	واسنجی
ظرفیت زراعی خاک	29.0	29.0	درصد حجمی	اندازه‌گیری
نقطه پژمردگی دائم خاک	15.0	15.0	درصد حجمی	اندازه‌گیری
رطوبت اشباع خاک	46.0	46.0	درصد	پیش‌فرض
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	4.00	4.00	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی	48.0	48.0	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	91.0	91.0	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	100	100	روز	واسنجی
بهره‌وری آب نرمال شده	34.7	32.7	گرم بر متر مربع	واسنجی
بیشینه رشد کانوبی	96.0	96.0	درصد	پیش‌فرض
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	0.14	0.14	-	پیش‌فرض
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	0.72	0.72	-	پیش‌فرض
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	1.05	1.05	درصد بر روز	پیش‌فرض
ضریب کاهش توسعه پوشش*	11.0	11.0	درصد	واسنجی
ضریب حداکثر پوشش*	2.00	3.00	درصد	واسنجی
ضریب متوسط کاهش*	0.10	0.20	درصد بر روز	واسنجی
ضریب درصد کاهش بهره‌وری آب نرمال شده*	18.0	23.0	درصد	واسنجی

* این پارامترها برای شرایط تنش کودی واسنجی شده‌اند (*These parameters isecalibrated for fertilizer stress conditions).

۳-۲- نتایج واسنجی مدل AquaCrop

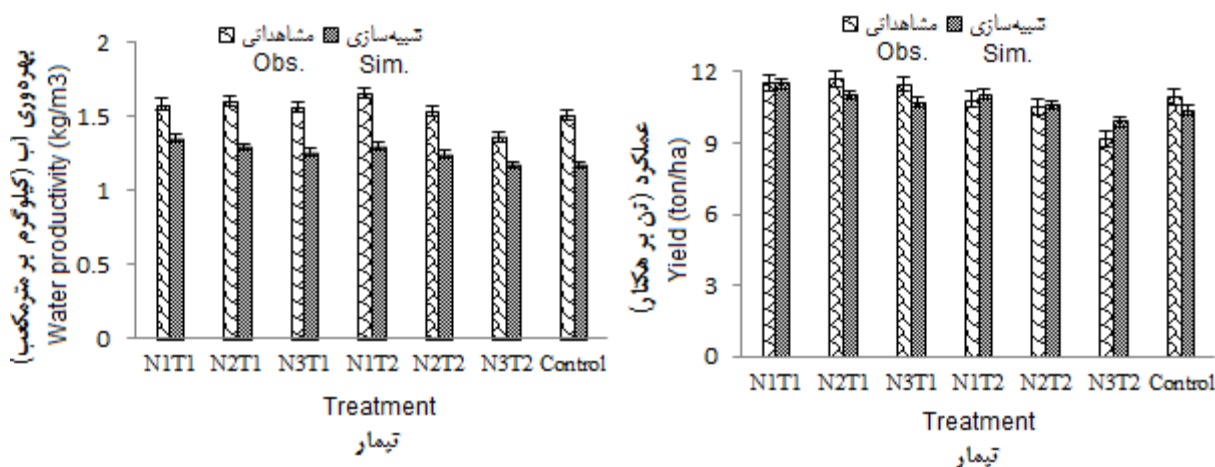
مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی در شکل ۳ نشان داده شده است. اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در شاهد حدود ۵ درصد بود. برای تیمارهای تقسیط کود در سه مرحله (T3)، متوسط اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ۴ درصد به‌دست آمد. کم‌ترین و بیش‌ترین اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده به‌ترتیب در تیمارهای N3T1 و N1T1 مشاهده شد. مقادیر اختلاف برای تیمارهای

اشاره شده به‌ترتیب ۱ و ۶ درصد بود. برای تیمارهای تقسیط کود در چهار مرحله (T4)، بیش‌ترین اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در تیمار N3T2 با ۷ درصد خطا به‌دست آمد ولی کم‌ترین اختلاف در تیمار N2T2 با ۱ درصد خطا مشاهده شد. خطای شبیه‌سازی عملکرد در تیمار N1T2 به میزان ۲ درصد بود که تفاوت چندانی با N2T2 نداشت. احتمالاً این نتایج به‌دلیل نزدیکی نحوه کوددهی شاهد به تیمار T1 در مرحله واسنجی است. به‌همین دلیل روند منطقی کاهش خطا با افزایش تنش کودی در تیمار T1 مشاهده شد، لیکن روند منظمی برای تیمار

چهار مرحله‌ای (T2)، بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده به ترتیب در تیمارهای N1T2 (۲۱ درصد) و N3T2 (۱۳ درصد) مشاهده شد. افزایش کود مصرفی در این تیمار سبب کاهش خطا شد که بر خلاف نتایج به دست آمده توسط سایر پژوهش‌گران است (Van Gaelen et al., 2014; Akugama et al., 2017). متوسط اختلاف بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در تیمار T1 به میزان ۱۷ درصد بود، در حالی که این نتایج در تیمار T2 حدود ۱۸ درصد بود. بنابراین، نحوه تقسیم کوددهی اثری بر دقت مدل AquaCrop نداشت.

T2 مشاهده نشد. در حالت کلی، با افزایش تنش کودی، خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد در هر دو تیمار T1 و T2 افزایش یافت. این نتایج در بررسی‌های انجام شده توسط اکثر پژوهش‌گران از جمله Van Gaelen et al. (2014) و Akugama et al. (2017) گزارش شده است.

اختلاف بهره‌وری آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای شاهد ۲۲ درصد بود. مدل AquaCrop بهره‌وری آب شاهد را بیش‌تر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرد. در بین تیمارهای تقسیم سه مرحله‌ای (T1)، بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده به ترتیب در تیمارهای N3T1 (۱۹ درصد) و N1T1 (۱۴ درصد) برآورد شد. در بین تیمارهای تقسیم



شکل ۳- مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

(سطوح کودی: N1: ۱۰۰ درصد، N2: ۸۰ درصد و N3: ۶۰ درصد توصیه کودی - زمان‌های تقسیم کود: T1: سه تقسیم مساوی شامل مرحله ۴-۶ برگ، مرحله ۱۰ برگی و مرحله تاسل‌دهی و T2: چهار تقسیم مساوی شامل مرحله ۴-۶ برگ، مرحله ۱۰ برگی، مرحله تاسل‌دهی و مرحله تلقیح)

Figure 3 - Comparison of measured and simulated yield and water productivity with AquaCrop model in the calibration stage (Fertilizer levels: N1: 100%, N2: 80%, and N3: 60% of fertilizer recommendation - fertilizer distribution times: T1: three equal distributions including the 4-6-leaf stage, 10-leaf stage, and tasseling stage and T2: four equal distributions including the 4-6 leaves, 10-leaf stage, tasseling stage, and inoculation stage)

در هر دو تیمار T1 و T2 مطلوب بود. نتایج آماره R^2 نشان داد که همبستگی بین عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در تیمار T2 بهتر از T1 بود (شکل ۴). بنابراین، مدل AquaCrop برای تیمار T2 از توانایی بهتری برای پیروی از تغییرات عملکرد مشاهده شده در مزرعه داشت.

نتایج آماره MBE برای بهره‌وری آب ذرت نشان داد که مدل AquaCrop در هر دو تیمار T1 و T2 دچار خطای کم‌برآوردی شد. بر اساس آماره RMSE، خطای هر دو مدل نزدیک به هم و قابل قبول بود. دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب، بر اساس آماره NRMSE، در دسته خوب قرار داشت. بر اساس آماره‌های EF، d و R^2 ، کارایی و همبستگی نتایج بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده نیز برای هر دو تیمار مطلوب بود.

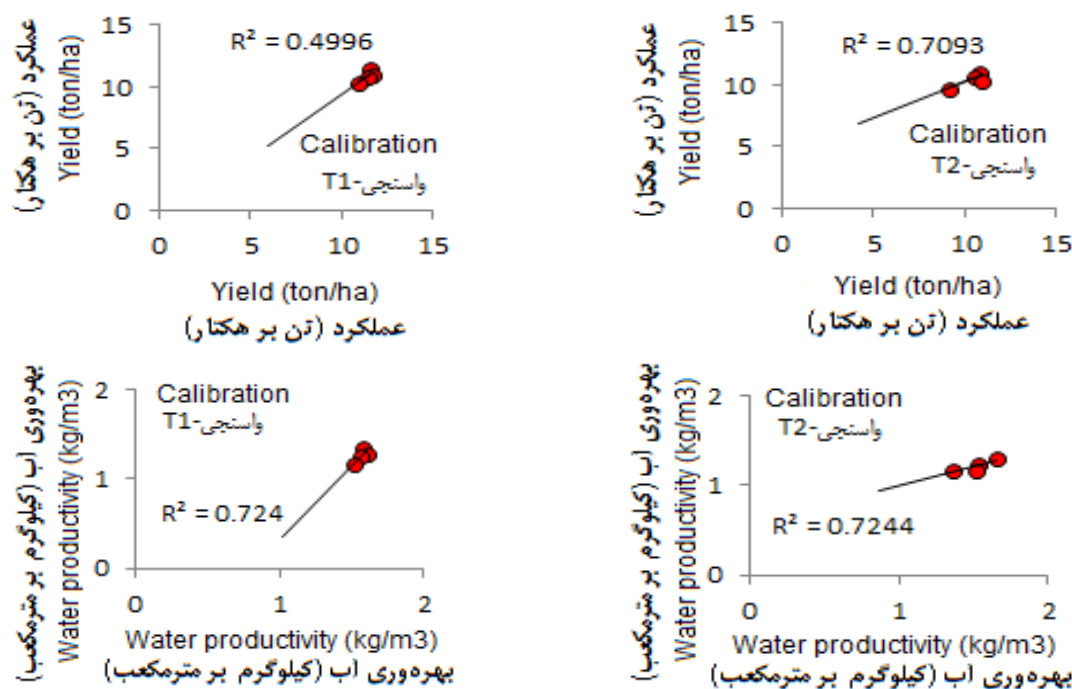
مقایسه آماری نتایج عملکرد و بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در مرحله واسنجی در جدول ۴ نشان داده شده است. در این مرحله، مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های برداشت شده از سال اول در مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس آماره MBE، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد تیمار T1 دچار خطای کم‌برآوردی و برای شبیه‌سازی عملکرد تیمار T2 دچار خطای بیش‌برآوردی شد. این نتایج با مراجعه به شکل ۳ نیز قابل مشاهده شد. بر اساس آماره RMSE، خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد در هر دو تیمار قابل قبول بود لیکن خطای به دست آمده برای تیمار T2 کم‌تر از T1 بود. مقدار آماره NRMSE نشان داد که دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد در دسته عالی قرار داشت. کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد بر اساس دو آماره EF و d

جدول ۴- مقایسه آماری نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ذرت با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

Table 4- Statistical comparison of measured and simulated results of corn with AquaCrop model in calibration stage

R ²	D	EF	NRMSE	RMSE	MBE	زمان تقسیم	پارامتر
0.50	0.99	0.80	0.05	0.58	-0.50	T1	عملکرد دانه
0.70	0.99	0.90	0.04	0.47	0.11	T2	(تن در هکتار)
0.72	0.98	0.70	0.19	0.29	-0.29	T1	بهره‌وری آب
0.72	0.98	0.70	0.19	0.30	-0.29	T2	(کیلوگرم بر مترمکعب)

جزر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جزر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R²)



شکل ۴- همبستگی عملکرد و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده (محور X) و شبیه‌سازی شده (محور Y) با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی

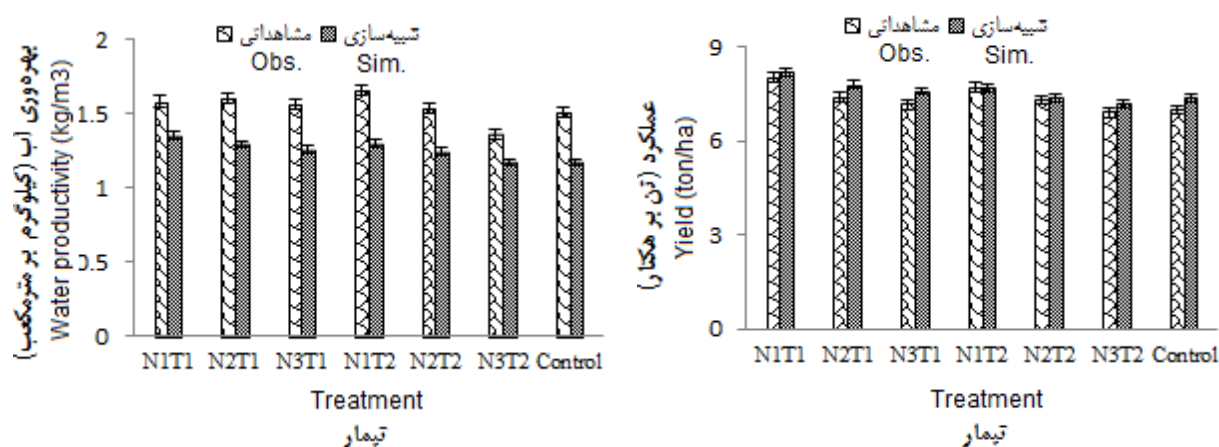
Figure 4- Correlation of measured (x-axis) and simulated (y-axis) yield and water productivity in the calibration stage

بیش‌تر شد که با نتایج Van Gaelen et al. (2014) و Akugama et al. (2017) مطابقت داشت. این مهم یکی از نقطه ضعف‌های مدل AquaCrop است که در سایر تنش‌ها نیز مشاهده شده است (Ebrahimipak et al., 2018; Ahmadee et al., 2021). به همین دلیل محققان پیشنهاد نموده‌اند 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 (Egdernezhad et al., 2019). البته در تحقیق حاضر با توجه به این که مقدار تنش کودی زیاد نبود (حداکثر ۴۰ درصد در تیمار N3)، حداکثر اختلاف عملکرد مقادیر شبیه‌سازی شده با مشاهده شده نیز کم (حداکثر ۵/۹ درصد) بود. مقایسه بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای تیمار شاهد حدود ۲۲ درصد بود. متوسط، حداکثر و حداقل اختلاف بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در تیمار T1 به ترتیب ۱۷، ۱۹ (N1T3) و ۱۴ (N1T1) درصد بود. این مقادیر

۳-۳- نتایج صحت‌سنجی مدل AquaCrop

مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در مرحله صحت‌سنجی در شکل ۵ نشان داده شده است. در این مرحله، مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های برداشت شده از مزرعه در سال دوم مورد ارزیابی قرار گرفت. اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای شاهد حدود ۵/۷ درصد بود. مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد شاهد دچار خطای بیش‌برآوردی شد. متوسط اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای تیمار T1 حدود ۴/۴ درصد بود. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف عملکرد به ترتیب برای تیمارهای N3T1 (۵/۹ درصد) و N1T1 (۱/۸ درصد) مشاهده شد. متوسط اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در تیمار T2 حدود ۵/۷ درصد بود که با تیمار T1 برابر است. بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف عملکرد در تیمار T2 به ترتیب در N3T2 (۴ درصد) و N1T2 (۱ درصد) به دست آمد (شکل ۵). بنابراین، با افزایش تنش کودی، اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده

برای تیمار T2 به ترتیب ۱۸، ۲۱ (N1T2) و ۱۳ (N1T3) درصد بود (شکل ۵).



شکل ۵- مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی

Figure 5 - Comparison of measured and simulated yield and water productivity with AquaCrop model in validation stage

توانایی لازم برای تطابق عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده را داشت (شکل ۶). این نتایج با مشاهدات Van Gaelen et al. (2014)، Rnajbar et al. (2017) و Akugama et al. (2017) مطابقت دارد. مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب در مرحله صحت‌سنجی دچار خطای کم‌برآوردی شد (MBE < ۰). بر اساس مقادیر دو آماره RMSE و NRMSE، خطای مدل AquaCrop قابل قبول بود، ولی دقت آن در دسته متوسط قرار داشت. کارایی این مدل گیاهی، بر اساس دو آماره EF و d، قابل قبول بود. بر اساس مقدار R²، مدل AquaCrop توانایی شبیه‌سازی بهره‌وری آب برای هر دو تیمار T1 و T2 را داشت.

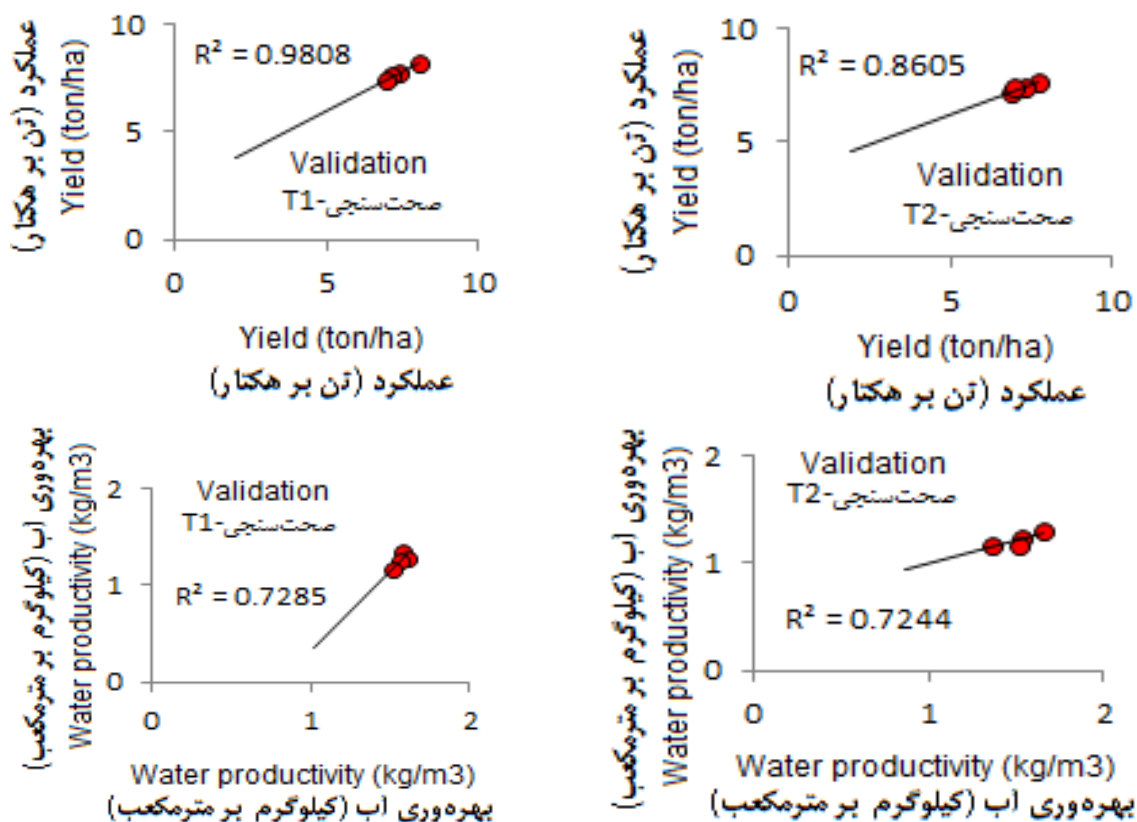
مقایسه آماری نتایج عملکرد و بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در مرحله صحت‌سنجی در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج آماره MBE برای عملکرد نشان داد که مدل AquaCrop دچار خطای بیش‌برآوردی شده است. این نتایج در شکل ۵ نیز قابل مشاهده است؛ زیرا عملکرد شبیه‌سازی شده برای همه تیمارها از عملکرد مشاهده شده بیش‌تر است. مقادیر آماره RMSE در تیمار T1 بیش‌تر از T2 محاسبه شد. در نتیجه خطای شبیه‌سازی عملکرد در تیمار T1 از T2 بیش‌تر بود. با این وجود، نتایج آماره NRMSE نشان داد که مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی هر دو تیمار دارای دقت عالی بود. بر اساس دو آماره EF و d، کارایی این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد مطلوب بود. نتایج آماره R² نیز نشان داد که مدل AquaCrop

جدول ۵- مقایسه آماری نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ذرت با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی

Table 5- Statistical comparison of measured and simulated results of corn with AquaCrop model in the validation stage

R ²	D	EF	NRMSE	RMSE	MBE	زمان تقسیم	پارامتر
0.98	0.99	0.16	0.04	0.36	0.34	T1	عملکرد دانه
0.86	0.99	0.38	0.03	0.24	0.18	T2	(تن در هکتار)
0.73	0.98	0.28	0.19	0.29	-0.29	T1	بهره‌وری مصرف آب
0.72	0.98	0.29	0.19	0.30	-0.29	T2	(کیلوگرم بر مترمکعب)

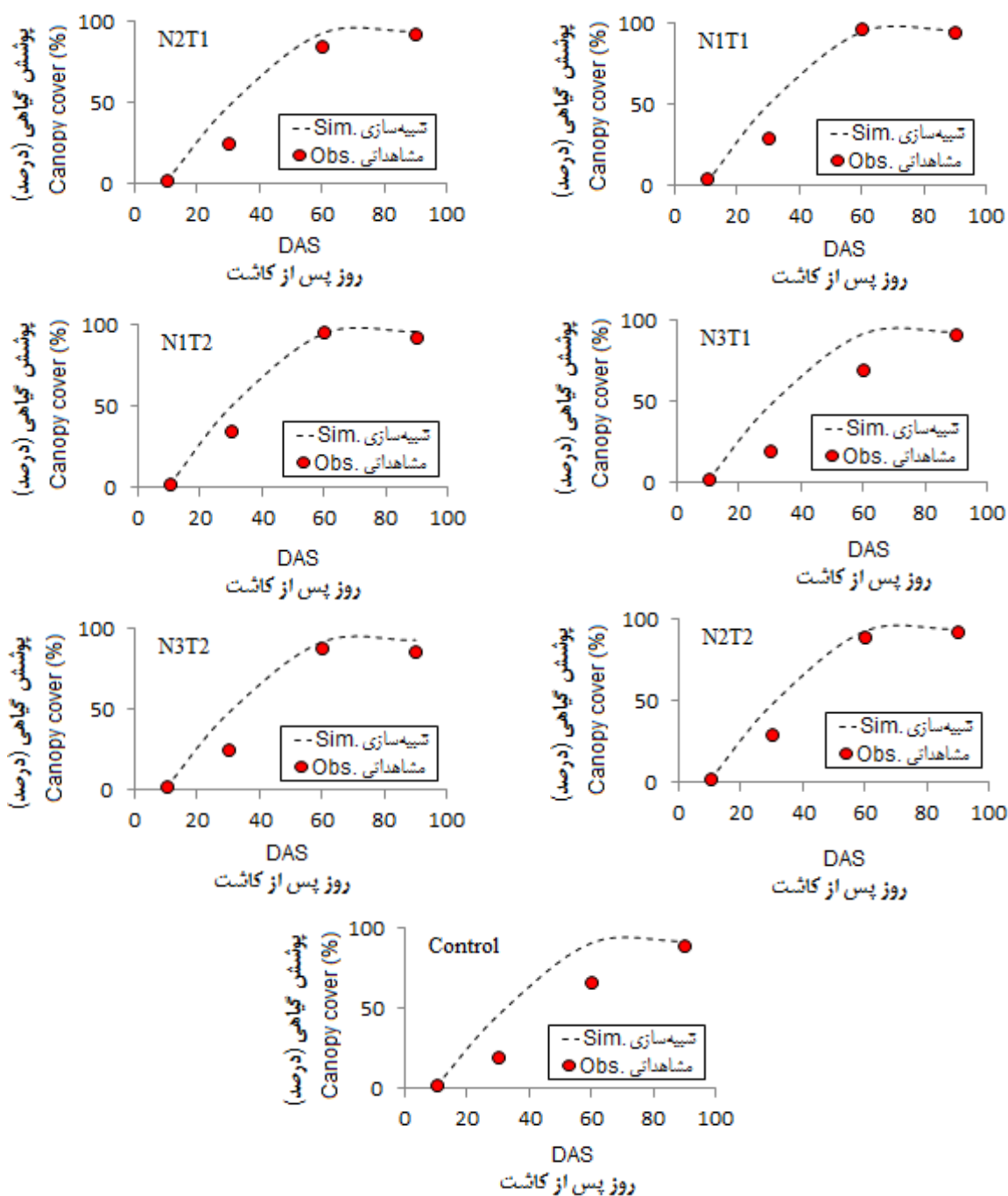
جزر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جزر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R²)



شکل ۶- همبستگی عملکرد و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده (محور X) و شبیه‌سازی شده (محور Y) با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی
Figure 6- Correlation of measured (x-axis) and simulated (y axis) yield and crop productivity in the validation stage

بروز خطا در این پارامترها، سبب افزایش سطح پوشش گیاهی در طول دوره رشد شد. مقایسه توسعه پوشش گیاهی در تیمارهای N1T1، N2T1 و N3T1 نشان داد که اختلاف مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای تیمار N1T1 کمتر از دو تیمار دیگر بود (جدول ۶). بنابراین، می‌توان حداقل بودن اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در این تیمار را توجیه نمود. نتایج مشابه برای تیمارهای N1T2، N2T2 و N3T2 مشاهده شد. مراجعه به مقدار آماره RMSE در جدول ۶، که میزان خطای مدل AquaCrop برای برآورد پوشش گیاهی را تعیین می‌کند، این نتایج را تأیید می‌نماید. بر اساس آماره R^2 ، تطابق خوبی بین پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در همه تیمارها مشاهده شد. لیکن کارایی این مدل گیاهی برای تیمارهای N3T1 و شاهد کمتر از سایر تیمارها بود. مقایسه خطای به‌دست آمده برای عملکرد مطابق شکل ۴ نیز نشان داد که خطای مدل AquaCrop در این دو تیمار بیش‌تر از سایر تیمارها تعیین شد.

روند توسعه پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای مرحله صحت‌سنجی در شکل ۷ نشان داده شده است. مقدار پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده تیمار شاهد بیش‌تر از مقدار واقعی در طول فصل رشد بود. با توجه به این که توسعه پوشش رابطه مستقیم با عملکرد ذرت در این مدل گیاهی دارد، بیش‌برآوردی پوشش گیاهی سبب ایجاد خطای بیش‌برآوردی در شبیه‌سازی عملکرد می‌شود. به‌همین دلیل مطابق شکل ۵ عملکرد شبیه‌سازی شده تیمار شاهد بیش‌تر از عملکرد واقعی به‌دست آمد. این نتایج برای سایر تیمارها نیز مشاهده شد که با نتایج آماره MBE در جدول ۵ مطابقت داشت. علت بیش‌برآوردی مدل AquaCrop احتمالاً وجود خطا در تعیین پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده، مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی، مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی و مدت زمان کاشت تا برداشت محصول است. با توجه به حساسیت متوسط مدل AquaCrop به این پارامترها، شبیه‌سازی عملکرد با خطا مواجه شده است. هم‌چنین



شکل ۷- مقایسه تغییرات پوشش سطح اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی
Figure 7- Comparison of measured and simulated crop canopy with AquaCrop model in the validation stage

جدول ۶- نتایج آماری توسعه پوشش گیاهی ذرت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop
Table 6- Statistical comparison of measured and simulated crop canopy with AquaCrop Model

d	EF	RMSE	R ²	تیمار
0.98	0.93	10.4	0.94	N1T1
0.97	0.89	12.6	0.94	N2T1
0.94	0.74	18.3	0.88	N3T1
0.99	0.96	7.90	0.98	N1T2
0.98	0.94	9.50	0.96	N2T2
0.97	0.89	12.5	0.94	N3T2
0.94	0.73	18.3	0.88	شاهد

کد تیمارها در شکل ۳ ارائه شده است. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R²)

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در دو زمان تقسیط کوددهی و مقادیر مختلف کود نیتروژن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دقت و کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی قابل قبول بود. تفاوتی در دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت هر دو روش کوددهی مشاهده نشد. خطای این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب اندکی افزایش یافت، ولی کارایی آن قابل قبول بود. هر چه میزان تنش کودی افزایش یافت، از دقت مدل AquaCrop کاسته شد. علت آن افزایش خطای این مدل

منابع

- ابراهیمی‌پاک، ن.ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا.، و خاشعی سیوکی، ع. (۱۳۹۷). ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۸(۱)، ۱۱۷-۱۳۲.
- ابراهیمی‌پاک، ن.ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ.، و احمدی، م. (۱۳۹۸). ارزیابی مدل‌های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۳)، ۷۱۵-۷۲۶.
- احمدی، م.، قنبرپوری، م.، و اگدرنژاد، ا. (۱۴۰۰). مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۸(۱)، ۱۵-۳۰.
- اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی‌پاک، ن.ع.، تافته، آ.، و احمدی، م. (۱۳۹۷). برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۵(۲)، ۵۳-۶۴.

گیاهی برای شبیه‌سازی توسعه پوشش گیاهی در شرایط تنش کودی بود. بر اساس نتایج این پژوهش، با توجه به این‌که تاکنون روش‌های تقسیط کوددهی با این مدل گیاهی شبیه‌سازی نشده بود، می‌توان به‌دقت خروجی این مدل گیاهی در شرایط مذکور تکیه نمود و استفاده از آن برای شرایط مشابه پیشنهاد می‌شود. این موضوع به بهره‌برداران و محققان کمک می‌کند تا قبل از کاشت بتوانند سناریوهای مختلف کوددهی را در مزارع ذرت بررسی کرده و بهترین گزینه را برای شرایط مورد نظر انتخاب و اجرا نمایند.

- رنجبر، آ.، رحیمی‌خوب، ع.، و ابراهیمیان. ح. (۱۳۹۶). ارزیابی روش نیمه‌کمی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پاسخ ذرت به کود نیتروژن. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۱(۲)، ۲۸۶-۲۹۸.
- سعیدی، ر.، رضانی اعتدالی، ه.، ستوده‌نیا، ع.، نظری، ب.، کاویانی، ع. (۱۴۰۰). ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد روند تغییرات رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت، تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۴(۱)، ۱۹۵-۲۱۰.
- عباسی، ف.، چوگان، ر.، و غیبی، م.ن. (۱۳۹۴). بررسی امکان کاهش تلفات نیتروژن در کودآبیاری جوپچه‌ای ذرت دانه‌ای. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

References

- Abbasi, F., Chogan, R., & Gheibi, M. (2015). Investigating the possibility of reducing nitrogen losses in corn under furrow fertigation. Final Report of the Research Project, Agricultural Engineering and Technical Research Institute (in Persian).
- Ahmadee, M., Ghanbarpouri, M., & Egdernezhad, A. (2021). Applied irrigation water of wheat using sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop. *Water Management in Agriculture*, 8(1), 15-30 (in Persian).
- 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.
- Alishiri, R., Paknejad, F., & Aghayari, F. (2014). Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by AquaCrop. *Bioscience*, 4(4), 1-9.
- Boogaard, H.L., Van Diepen, C.A., Rotter, R.P., Cabrera, J.M.C.A., & Van Laar, H.H. (1998). WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 (No. 52). SC-DLO, Technical document, SC-DLO.
- Ebrahimipak, N.A., Ahmadee, M., Egdernezhad, A., & KhasheiSiuki, A. (2018). Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (*crocus sativus* L.) yield under different water management scenarios and zeolite amount. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(1), 117-132 (in Persian).
- 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).

- Egdernezhad, A., Ebrahimipak, N.A., Tafteh, A., & Ahmadee, M. (2019). Canola irrigation scheduling using AquaCrop model in Qazvin Plain. *Journal of Water Management in Agriculture*, 5(2), 53-64 (in Persian).
- 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.
- Gerik, T.J., Rosenthal, W.D., & Duncan, R. (1988). Simulating grain yield and plant development of ratoon grain sorghum over diverse environments. *Field Crop Research*, 19(1), 63-74.
- 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.
- Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101, 448-459.
- Katerji, N., Campi, P., & Mastrorilli, M. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14-26.
- Masanganise, J., Basira, K., Chipindu, B., Mashonjowa, E., & Mhizha, T. (2013). Testing the utility of a crop growth simulation model in predicting maize yield in a changing climate in Zimbabwe. *International Journal of Agricultural and Food Science*, 3(4), 157-163.
- Ranjbar, A., Rahimikhoob, A., & Ebrahimian, H. (2017). Evaluating semi-quantitative approach of the AquaCrop model for simulating maize response to nitrogen fertilizer. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 11(2), 286-298 (in Persian).
- 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.
- Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodehnia, A., Nazari, B., & Kaviani, A. (2021). Evaluation of AquaCrop model for estimating of changes process of soil moisture, evapotranspiration and yield of maize under salinity and fertility stresses. *The Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(1), 195-210 (in Persian).
- Sinclair, T.R., & Seligman, N.A.G. (1996). Crop modeling: from infancy to maturity. *Agronomy Journal*, 88, 698-704.
- 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, 426-437.
- Van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., Van Walsum, P.E. V., Groenendijk, P., & Van Diepen, C.A. (1997). Theory of SWAP Version 2.0. Report #71, Wageningen Agricultural University, 167 pages.
- Van Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecq, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abrha, B., Diels, J., & Raes, D. (2014). Asemi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the Aqua crop procedure. *Journal of Agricultural Science*, 153(7), 1218-1233.