Research Paper

Evaluation of the WOFOST Model for Simulation of Corn Yield and Water Productivity under different Fertilizer and Irrigation Management

Karim Neysi [1], Aslan Egdernezhad [2*], Fariborz Abbasi [3]

[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

10.22125/IWE.2023.396538.1718

Received:
June 19, 2023
Accepted:
September 3, 2023
Available online:
May 5, 2024

Keywords:
Deficit Irrigation,
Fertilizer Stress,
Carbon-driven Model,
Crop Modeling.

Abstract

This research was conducted with the aim of evaluating the WOFOST for simulating the corn yield and water productivity in two different conditions of water amounts and nitrogen fertilizer supply. For this purpose, the data collected from two separate research projects in two crop years (2012-2013). In the first research project, the factors of irrigation water amount in four levels (W1: 120, W2: 100, WI3: 80 and W4: 60% of water requirement) and nitrogen fertilizer in four amounts (N1: 100, N2: 80, N3: 60 and N4: zero percent of fertilizer requirement) and in the second project, fertilizer in four levels (N1: 100, N2: 80, N3: 60 percent of fertilizer requirement and N4: control) and fertilizer splitting (T1: three and T2: four equal splitting) were considered. In order to assessment of the results, some statistical criteria such as normalized root mean square error (NRMSE) and The Nash-Sutcliffe efficiency (EF) were used. The results showed that in the first projct, the accuracy of the WOFOST model for simulating water yield and water productivity was in the excellent (NRMSE<0.1) and medium (0.2≤NRMSE<0.3) categories, respectively, while the accuracy of this model in the second project was determined in the excellent category (NRMSE<0.1) for both aforementioned parameters. The efficiency of the WOFOST model for simulating yield in both project and water productivity in the second one was acceptable (EF>0.5), but for simulating water productivity in the first project was in poor conditions (0.0<EF<0.05). In the first project, changing the nitrogen fertilizer consumption from N1 to N4 caused an increase in the difference between yield in observation and simulation conditions (from 8% to 10%). The amount of irrigation water had no effect on changing the WOFOST accuracy and error. In the second project, increasing the distribution of nitrogen fertilizer from T1 to T2 caused the error of this model to decrease from 6.5 to 3.6 percent. Based on the results, it is necessary to conduct more studies to use the WOFOST model to simulate corn in different amounts of irrigation water, but this model can be used to simulate corn in different amounts and splitting of nitrogen fertilizer.

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

[*] **Corresponding Author:** Aslan Egdernezhad
Address: Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
Email: a_eigder@ymail.com
Tel: 09163111269

1. Introduction

Maize (Zea mays) is considered one of the most important crops in the world, and according to the latest statistics published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations, with a cultivated area of 188 million hectares and a production of 1600 million tons, it is the third most important grain in the world. is considered the world. Due to the importance of this crop in the food and agriculture industries, its cultivation is carried out in most of the provinces of Iran, and with the cultivated area of 130 thousand hectares and the production of more than one million tons, it is considered as one of the strategic products of Iran. Be anonymous (Anonymous, 1401). Although corn is well adapted to arid and semi-arid regions, various researches have shown that the full supply of irrigation water has an important effect on its yield and yield components. Some researchers have also shown that providing nitrogen fertilizer and even its distribution is effective on the growth of corn and increasing its yield. Carrying out different research projects for all regions of the country requires spending a lot of money for the implementation of research projects, which is not possible in the current situation. On the other hand, it takes a lot of time to determine the results, which limits the implementation of these plans. To solve these problems, various plant models have been developed by research centers worldwide. This research was conducted with the aim of evaluating the WOFOST for simulating the corn yield and water productivity in two different conditions of water amounts and nitrogen fertilizer supply.

2. Materials and Methods

For this purpose, the data collected from two separate research projects in two crop years (2012-2013). In the first research project, the factors of irrigation water amount in four levels (W1: 120, W2: 100, WI3: 80 and W4: 60% of water requirement) and nitrogen fertilizer in four amounts (N1: 100, N2: 80, N3: 60 and N4: zero percent of fertilizer requirement) and in the second project, fertilizer in four levels (N1: 100, N2: 80, N3: 60 percent of fertilizer requirement and N4: control) and fertilizer splitting (T1: three and T2: four equal splitting) were considered. In order to assessment of the results, some statistical criteria such as normalized root mean square error (NRMSE) and The Nash-Sutcliffe efficiency (EF) were used.

3. Results

The comparison of observed and simulated performance showed that the difference in results was in the range of 0.10-1.9 tons per hectare (1-39 percent) and on average 0.77 tons per hectare (9.7 percent) was (Figure 6). The performance difference in three treatments W2N4, W1N3 and W4N2 was 39, 18 and 18% respectively. These treatments had more errors in the calibration phase than other treatments. Changing the nitrogen fertilizer consumption from N1 to N4 increased the difference between performance in observation and simulation conditions (from 8% to 10%). The results showed that in the first project, the accuracy of the WOFOST model for simulating water yield and water productivity was in the excellent (NRMSE<0.1) and medium (0.2≤NRMSE<0.3) categories, respectively, while the accuracy of this model in the second project was determined in the excellent category (NRMSE<0.1) for both aforementioned parameters. The efficiency of the WOFOST model for simulating yield in both project and water productivity in the second one was acceptable (EF>0.5), but for simulating water productivity in the first project was in poor conditions (0.0<EF<0.05). In the first project, changing the nitrogen fertilizer consumption from N1 to N4 caused an increase in the difference between yield in observation and simulation conditions (from 8% to 10%). The amount of irrigation water had no effect on changing the WOFOST accuracy and error. In the second project, increasing the distribution of nitrogen fertilizer from T1 to T2 caused the error of this model to decrease from 6.5 to 3.6 percent.

4. Discussion and Conclusion

Based on the results, it is necessary to conduct more studies to use the WOFOST model to simulate corn in different amounts of irrigation water, but this model can be used to simulate corn in different amounts and splitting of nitrogen fertilizer.

5. Six important references

1) Ahmadee, M., Ghanbarpouri, M., Egdernezhad, A. 2021. Applied Irrigation Water of Wheat using Sensitivity Analysis and Evaluation of Aqua Crop. Water Management in Agriculture. 8(1): 15-30.
2) Cheng, Zh., Meng, J., and Wang, Y. 2016. Improving spring maize yield estimation at field scale by assimilation time-series HJ-1 CCD data into the WOFOST model using a new method with fast algorithms. Remote Sensing. 8(4): 1-22.
3) Ebrahimipak, N., Ahmadee, M., Egdernezhad, A., Khashei Siuki, 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.
4) Ebrahimipak, N., Egdernezhad, A., Tafteh, A., and Ahmadee, M. 2019a. Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to Simulate Rapeseed Yield. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 13(3-75): 715-726.
5) Egdernezhad, A., Ebrahimipak, N., Tafteh, A., Ahmadee, M. 2019. Canola Irrigation Scheduling using AquaCrop Model in Qazvin Plain, Water Management in Agriculture, 5(2): 53-64.
6) Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z. and M. Dubrovsk. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. Ecol. Model. 171: 223-246.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال چهاردهم. شماره پنجاه و پنج . بهار۱۴۰۳

ارزیابی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای تحت مدیریت‌های مختلف تأمین آب آبیاری و کود نیتروژن

کریم نیسی[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲]، فریبرز عباسی[۳]

ارسال مقاله:۱۴۰۲/۰۳/۲۹
پذیرش مقاله:۱۴۰۲/۰۶/۱۲

مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در دو شرایط مختلف تأمین آب و کود نیتروژن انجام شد. بدین منظور از داده‌های برداشت شده از دو طرح تحقیقاتی مجزا و در مجاورت یکدیگر در بخشی از مزرعه ۵۰۰ هکتاری موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در دو سال زراعی استفاده شد. در طرح تحقیقاتی اول، عوامل مقدار آب آبیاری در چهار سطح (W1: 120، W2: 100، W3: 80 و W4: 60 درصد نیاز آبی) و کود نیتروژن در چهار مقدار (N1: 100، N2: 80، N3:60 و N4: صفر درصد نیاز کودی) و در طرح دوم عوامل سطوح کودی در چهار سطح (N1: 100، N2: 80، N3:60 درصد نیاز کودی و N4: شاهد) و زمان تقسیط کود تحت دو روش (T1: سه تقسیط و T2: چهار تقسیط مساوی) در نظر گرفته شدند. برای ارزیابی از برخی شاخص‌های آماری مانند میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و کارایی مدل (EF) استفاده شد. نتایج نشان داد که در طرح نخست دقت مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب به‌ترتیب در دسته‌های عالی (NRMSE<0.1) و متوسط (0.2≤NRMSE<0.3) و در طرح دوم در دسته عالی (NRMSE<0.1) تعیین شد. کارایی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد در هر دو طرح و بهره‌وری آب در طرح دوم بر اساس شاخص EF قابل قبول (EF>0.5) ولی برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب در طرح نخست در شرایط ضعیف (0.0<EF<0.05) به دست آمد. در طرح نخست، تغییر مصرف کود نیتروژن از N1 به N4 سبب افزایش اختلاف بین عملکرد در شرایط مشاهده‌ای و شبیه‌سازی (از ۸ درصد به ۱۰ درصد) شد. مقادیر آب آبیاری اثری بر تغییر دقت و خطای این مدل گیاهی نداشت. در طرح دوم، افزایش تقسیط کود نیتروژن از T1 به T2 سبب کاهش خطای این مدل از ۶/۵ به ۳/۶ درصد شد. براساس کلیه نتایج، استفاده از مدل WOFOST برای شبیه‌سازی ذرت در مقادیر مختلف آب آبیاری نیاز به بررسی بیشتر دارد ولی می‌توان از این مدل به منظور شبیه‌سازی ذرت در مقادیر و تقسیط مختلف کود نیتروژن استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، تنش خشکی، بهره وری آب، مدل‌سازی گیاهی.

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. پست الکترونیک: karimnisie@gmail.com، تلفن تماس: ۰۹۱۶۹۱۵۲۶۵۸

[۲]استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. پست الکترونیک: a_eigder@ymail.com، تلفن تماس: ۰۹۱۶۳۱۱۱۲۶۹ **(مسئول مکاتبات)**

[۳]استاد پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. پست الکترونیک: fariborzabbasi@ymail.com ، تلفن تماس: ۰۹۱۲۵۶۰۳۴۳۸

مقدمه

ذرت (Zea mays) یکی از گیاهان زراعی مهم در سطح جهان بوده که براساس آخرین آمار منتشر شده از سازمان خوار و بار کشاورزی ملل متحد، با سطح زیر کشت ۱۸۸ میلیون هکتار و تولید ۱۶۰۰ میلیون تن در جهان، سومین غله مهم جهان محسوب می‌شود (FAO, 2022). به علت اهمیت این گیاه زراعی در صنایع غذایی و کشاورزی، کشت آن در بیشتر استان‌های کشور ایران انجام می‌شود و با سطح زیر کشت آبی حدود ۹۰ هزار هکتار و تولید حدود ۶۷۰ هزار تن به عنوان یکی از محصولات مهم غلات ایران محسوب می‌شود (بی‌نام، ۱۴۰۱). گرچه ذرت سازگاری خوبی با مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد ولی تحقیقات مختلف نشان داده است که تأمین کامل آب آبیاری اثر مهمی بر عملکرد و اجزای عملکرد آن دارد (عباسی و همکاران، ۱۴۰۱؛ اسمعیلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷). برخی تحقیقات نیز نشان داده است که تأمین کود نیتروژن و حتی تقسیط آن نیز بر رشد ذرت و افزایش عملکرد آن موثر است (نیسی و همکاران، ۱۴۰۱). از طرف دیگر، با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و امکان کاهش منابع آب در دسترس در آینده نزدیک، مفهوم بهره‌وری آب با هدف افزایش تولید هر کیلوگرم محصول کشاورزی به ازای مصرف هر مترمکعب ضروری است در نظر گرفته شود. این مهم اهمیت تأمین هم‌زمان کود نیتروژن و آب آبیاری را بر تولید ذرت نشان می‌دهد و به همین دلیل محققان مختلف سعی کرده‌اند مقادیر مناسب این پارامترها را برای هر منطقه ارائه نمایند (Namihira et al., 2011; Sadeghi et al., 2018; Banger et al., 2020). لیکن انجام طرح‌های تحقیقاتی مختلف برای همه مناطق کشور مستلزم صرف هزینه زیاد برای اجرای مزرعه ای تحقیقاتی است که در شرایط فعلی امکان‌پذیر نیست. از طرف دیگر زمان زیادی برای تعیین نتایج لازم است که انجام این طرح‌ها را با محدودیت دچار می‌کند. برای رفع این مشکلات، مدل‌های گیاهی مختلف توسط مراکز تحقیقاتی در سطح جهان بسط داده‌شده است (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛ احمدی و همکاران، ۱۴۰۰).

مدل WOFOST یکی از مدل‌های گیاهی است (Boogaard et al., 1998) که توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته است. WOFOST از جمله مدل‌های کربن-محور است که توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی با همکاری دانشگاه واگنینگن هلند و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک توسعه داده شد. این مدل طی مطالعات جهانی امنیت غذا و پتانسیل جهانی تولید غذا تولید شد (Bouman et al., 1996). مدل مذکور پایه بسیاری از مدل‌های گیاهی محسوب می‌شود و به منظور شبیه‌سازی واکنش گیاهان مختلف زراعی مختلف بسط داده شده است (Bouman et al., 1996). مدل WOFOST توانایی شبیه‌سازی گیاهان زراعی تحت شرایط مختلف آبیاری و تنش کودی را دارد. به همین دلیل بسیاری از محققان از این مدل برای تحقیقات خود استفاده نموده‌اند. به عنوان مثال می‌توان به مطالعات انجام شده روی گیاهان گندم، جو، ذرت و برنج اشاره کرد (Eitzinger et al., 2004; Song et al., 2008). امیری و همکاران (۱۳۹۰) به ارزیابی مدل WOFOST در شرایط مختلف مدیریت آبیاری پرداختند. این محققان نشان دادند که آماره RMSE برای زیست‌توده کل و پانیکول به‌ترتیب ۵۵-۳۸۹ و ۴۲۰-۱۳۹ کیلوگرم بر هکتار و آماره NRMSE برای این دو پارامتر به ترتیب ۱۰-۱۴ و ۱۶-۷ درصد بود. از این رو، دقت مدل WOFOST برای شبیه‌سازی گیاه برنج مطلوب گزارش شد. سعادتی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی به ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم برنج تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در منطقه رشت پرداختند. به‌طور کلی یافته‌های این پژوهش کارایی مطلوب مدل WOFOST در شبیه‌سازی فرآیند رشد و تاثیر آب بر عملکرد و بهره‌وری آب برنج در مناطق مرطوبی نظیر رشت را تایید نمود. در تحقیقی دیگر، از مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد کلزا استفاده و گزارش شد که این مدل دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد این گیاه زراعی داشت (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸). از این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی گندم زمستانه در کشور چین استفاده شد و نتایج دو آماره R^2 و

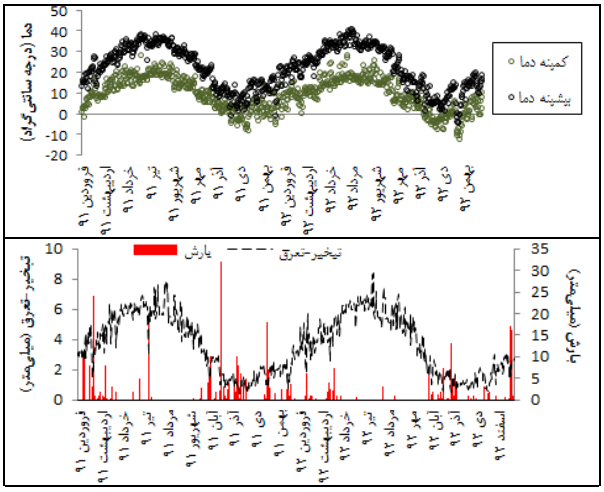
RMSE به ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۸ تن در هکتار به دست آمد (Wu et al., 2021). با توجه به قابلیت‌های مدل WOFOST، استفاده از آن برای شبیه‌سازی ذرت نیز مورد توجه محققان بوده است (Yang et al., 2004; Chen et al., 2016). افضلی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به ارزیابی کارایی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی رشد و نمو ذرت برای الگوی کشت تابستانه در شرایط اقلیمی نیمه گرمسیری جنوب کرمان پرداختند. ضریب کارایی مدل برای عملکرد دانه، زیست‌توده و شاخص برداشت به‌ترتیب ۰/۹۹، ۰/۸۷ و ۰/۸۲ گزارش گردید. نتایج ارزیابی مدل WOFOST در این تحقیق بیانگر آن بود که این مدل کارایی بالایی در شرایط آب و هوایی نیمه گرمسیری منطقه جیرفت داشته است. بافکار و همکاران (۱۳۹۰) به ارزیابی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی ذرت در کرمانشاه پرداختند و نشان داد که این مدل توانایی مطلوبی برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط مختلف مدیریت آب در مزرعه داشت. اگدرنژاد و همکاران (۱۳۹۷) از مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت شرایط کم‌آبیاری استفاده کردند. نتایج این محققان نشان داد که بیشترین و کمترین اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای ذرت به‌ترتیب ۲/۰۳ و ۱/۱ تن در هکتار و نتایج آماره RMSE برابر با ۰/۹۲ تن در هکتار بود. در تحقیقی دیگر از مدل WOFOST برای شبیه‌سازی ذرت استفاده کردند. این محققان نتایج آماره‌های EF و RMSE را برای این مدل به‌ترتیب ۰/۹۶ و ۶ درصد گزارش کردند. این نتایج نشان داد که مدل WOFOST کارایی بالا و خطای قابل قبول داشت (Eweys et al., 2017).

جمع‌بندی مرور منابع نشان داد که مدل WOFOST قابلیت لازم برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت را دارد. لیکن بررسی همزمان دو پارامتر آب آبیاری و نیتروژن در تحقیقات محدودی مورد توجه قرار گرفته است. نظر به اینکه مقدار آب آبیاری و مقدار و روش تقسیط کود نیتروژن بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت بسیار موثر است؛ در این تحقیق به ارزیابی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی گیاه ذرت دانه‌ای تحت مدیریت‌های مختلف تأمین آب آبیاری و کود نیتروژن در کرج پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

عملیات مزرعه‌ای

در این پژوهش داده‌های برداشت شده از دو طرح تحقیقاتی مجزا در مزارع تحقیقاتی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در دو سال زراعی مورد استفاده قرار گرفت (عباسی و همکاران، ۱۳۹۱؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۴). محل آزمایش در طول جغرافیایی ۵۰/۵۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۶ شمالی و ارتفاع ۱۳۱۲ متری از سطح دریا قرار دارد. اقلیم منطقه آزمایش بر اساس طبقه‌بندی کوپن جز مناطق نیمه‌خشک با زمستان سرد است. میانگین بارش در این منطقه ۲۴۵ میلی‌متر و میانگین درجه هوا ۱۵ سانتی‌گراد است. پارامترهای هواشناسی منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده‌شده است.



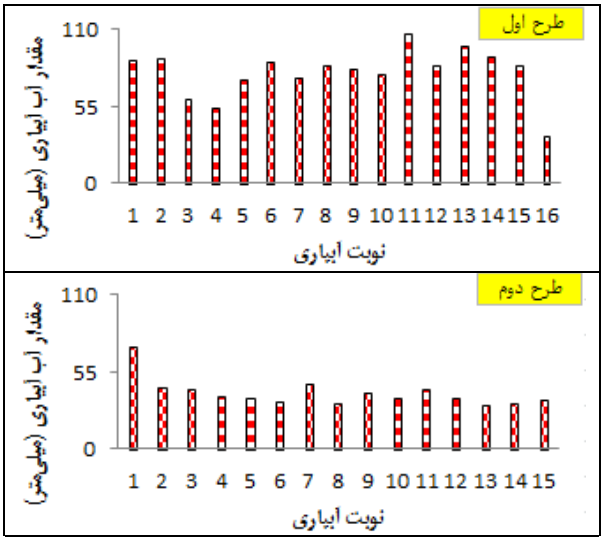
شکل(۱): داده‌های هواشناسی در محل آزمایش

در طرح تحقیقاتی اول، عوامل مقدار آب آبیاری در چهار سطح (W1: 120، W2: 100، W3: 80 و W4: 60 درصد نیاز آبی) و کود نیتروژن در چهار مقدار (N1: 100، N2: 80، N3: 60 و N4: 0 درصد نیاز کودی) روی رقم ذرت دانه‌ای دبل کراس ۳۷۰ در دو سال مورد بررسی قرار گرفتند. کود مورد نیاز از منبع اوره و در چهار مرحله قبل از کاشت، مرحله هفت برگی، مرحله ساقه‌رفتن و مرحله

سنبل‌زدن اعمال شد. تیمارهای آبیاری براساس تبخیر از سطح تشت کلاس A، اعمال ضرایب تشتک و گیاهی اعمال شدند. برای تعیین نیاز آبی از داده‌های ایستگاه هواشناسی در فاصله دو کیلومتری از مزرعه تحقیقات استفاده شد. ضریب تشتک براساس توصیه ایستگاه هواشناسی برابر با ۰/۶۵ در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی نیز براساس مقادیر ارائه شده در نشریه فائو ۵۶ در نظر گرفته شد. کشت در اوایل تیر ماه و با تراکم ۸۵ هزار بوته در هکتار تحت انجام شد .

در طرح دوم، عوامل سطوح کودی در چهار سطح (N1: ۱۰۰، N2: ۸۰، N3: ۶۰ درصد نیاز کودی و N4: شاهد) و زمان تقسیط کود تحت دو روش (T1: سه تقسیط مساوی شامل مرحله ۶-۴ برگی، مرحله ۱۰ برگی و مرحله تاسل‌دهی و T2: چهار تقسیط مساوی شامل مرحله ۶-۴ برگی، مرحله ۱۰ برگی، مرحله تاسل‌دهی و مرحله تلقیح) روی ذرت دانه‌ای هیبرید سینگل کراس ۲۶۰ اعمال شد. کود مورد استفاده از منبع اوره و تیمار شاهد شامل روش معمول پخش این کود (۵۰ درصد توصیه کودی قبل از کاشت و ۵۰ درصد در مرحله ۶-۴ برگی به روش پخش سطحی) در منطقه بود. مقدار آبیاری در این طرح براساس نیاز کامل آبی گیاه ذرت بود. عملیات کاشت در اردیبهشت و با تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار انجام شد.

برای آبیاری، از جویچه‌هایی با شیب ۰/۰۰۶ متر بر متر، عرض ۰/۷۵ متر و طول ۱۶۵ متر استفاده شد. برای هر تیمار پنج جویچه در نظر گرفته شد. سه جویچه میانی برای برداشت محصول و دو جویچه کناری برای اثر حاشیه‌ای در نظر گرفته شدند. دبی ورودی و خروجی هر جویچه به ترتیب با استفاده از فلوم WSC تیپ سه اندازه‌گیری شد. مقادیر آب آبیاری برای هر دو طرح در شکل (۲) نشان داده شده است. کود به صورت کودآبیاری اعمال شد. بدین صورت که کود مورد استفاده ابتدا در آب حل و سپس از طریق ظروف ۲۰ لیتری با آب آبیاری تزریق شد. به دلیل اینکه تزریق کود در اواخر آبیاری یکنواختی توزیع بیشتری به همراه دارد، تزریق کود در ۳۰-۲۰ دقیقه انتهای آبیاری انجام می‌شد. مشخصات خاک مزرعه نیز در جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۲): مقدار آب آبیاری برای دو آزمایش مورد استفاده در شرایط آبیاری کامل

کود سوپرفسفات تریپل به مقدار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، براساس توصیه کودی براساس آزمون خاک، پیش از کاشت در تمام تیمارها به صورت یکسان در سطح خاک پخش گردید. مبارزه با علف‌های هرز با استفاده از علف‌کش پیش‌کاشتی ترفلان 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 گردید. در پایان فصل رشد و بعد از رسیدن فیزیولوژیکی، 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 گردید. برای محاسبه بهره‌وری فیزیکی آب نیز از رابطه زیر استفاده شد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۴):

$$WP = \frac{Y}{W} \qquad (۱)$$

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

جدول (۱): برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

عمق خاک Cm	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری $g.cm^{-3}$	رطوبت حجمی در PWP $cm^3.cm^{-3}$	رطوبت حجمی در FC $cm^3.cm^{-3}$	رطوبت اشباع %	EC $dS.m^{-1}$	pH
۰-۲۰	لوم	۱/۳۴	۱۵	۲۹	۴۵	۱/۱۶	۷/۷۷
۲۰-۴۰	لوم	۱/۴۶	۱۵	۲۹	۴۴	۰/۸۲	۷/۶۷
۴۰-۶۰	لوم	۱/۴۷	۱۶	۲۸	۴۴	۰/۸۰	۷/۸۵
۶۰-۸۰	لوم	۱/۵۰	۱۶	۲۸	۴۳	۰/۸۷	۷/۶۹

مدل WOFOST

پارامترهای مدل

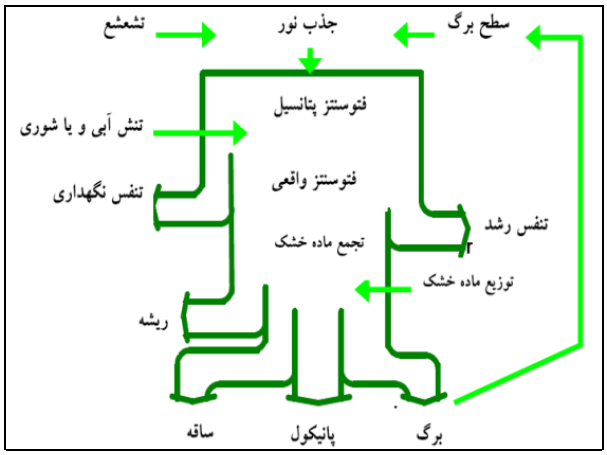
مدل WOFOST یک مدل شبیه‌ساز رشد گیاه بر مبنا چرخه کربن و دارای ساختار پیچیده است. این مدل رشد گیاه را در سه وضعیت عدم وجود عامل محدود کننده، محدودیت آب و محدودیت مواد غذایی شبیه‌سازی می‌نماید. در مدل WOFOST رشد محصولات براساس فرآیندهای اکو-فیزیولوژیکی شبیه‌سازی می‌شود. فرآیندهای اصلی شامل توسعه فنولوژیکی، جذب دی‌اکسید کربن، تعرق، تنفس، تجزیه و توزیع میزان ماده خشک بین اندام‌های مختلف براساس مرحله نمو صورت می‌گیرد. رشد در حالت پتانسیل و محدودیت آبی به صورت دینامیکی با گام زمانی یک روزه شبیه‌سازی می‌شود (Boogaard et al., 1988). مدل WOFOST میزان رشد محصولات را با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آورد:

$$\Delta W = C_e \times (A - R_m) \qquad (۲)$$

در این رابطه، ΔW میزان رشد، A مقدار ناخالص جذب، Rm مقدار تعرق نگهداری و Ce راندمان تبدیل جذب به زیست‌توده است. این مدل از رابطه (۳) برای تعیین مقدار جذب و رشد گیاه در شرایط کم‌آبیاری استفاده می‌کند:

$$A = \frac{T_a}{T_p} \times A_p \qquad (۳)$$

در این رابطه، A جذب واقعی، A_p جذب پتانسیل، T_a تعرق واقعی و T_p تعرق پتانسیل است. مراحل شبیه‌سازی گیاهان در این مدل در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): مراحل رشد و نمو گیاه در مدل WOFOST ((Boogaard et al., 1998

تحلیل حساسیت مدل

برای تحلیل حساسیت مدل از رابطه (۴) استفاده شد (Geerts et al., 2009):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \qquad (۴)$$

که در این رابطه، Sc ضریب حساسیت، P_m مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد پارامتر مورد نظر براساس داده ورودی پایه می‌باشد. 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>۱۵ حساسیت بالا، ۱۵>Sc>۲ حساسیت متوسط، Sc<۲ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (Geerts et al., 2009).

کالیبراسیون و واسنجی مدل

برای ارزیابی مدل گیاهی WOFOST، دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی انجام شد. ابتدا مدل WOFOST با استفاده از داده‌های برداشت شده از هر دو طرح تحقیقاتی در سال اول به صورت جداگانه واسنجی شد. در ادامه صحت‌سنجی این مدل با استفاده از داده‌های برداشت شده در سال دوم انجام گردید. برای تعیین صحت نتایج به دست آمده در هر دو مرحله ارزیابی، 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 روابط ۵ تا ۱۰ 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. هم چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان دهنده 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 WOFOST در برآورد عملکرد و بهره‌وری آب ذرت عدد کوچکتری به دست داده است. مقادیر آماره‌هایEF و d نشان‌دهنده کارایی مدل WOFOST است. این دو آماره هر چه به یک نزدیک‌تر باشند بهتر است. آماره R^2 نشان دهنده 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 می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۵)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}}}{\overline{O_i}} \quad (۶)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i}^{n}(P_i - O_i)}{n} \quad (۷)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۸)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i| + |O_i|)^2} \quad (۹)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum (P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum (P_i - \overline{P})^2 \sum (O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۰)$$

در این روابط، Pi مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. تجزیه و تحلیل داده‌ها، محاسبه‌ی آماره‌ها و رسم نمودارها در محیط Microsoft Excel انجام شد.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت

نتایج تحلیل حساسیت عوامل ورودی مدل گیاهی WOFOST در جدول (۲) آورده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، کلیه عوامل مورد استفاده از حساسیت متوسطی برخوردار هستند و به‌همین دلیل لازم است در ورود مقادیر آن‌ها به مدل WOFOST دقت لازم انجام شود. این داده‌ها به دو صورت پیش‌فرض و واسنجی‌شده در این مدل مورد استفاده قرار گرفتند که نتایج آن در جدول (۳) مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه از داده‌های دو طرح آزمایشی در این پژوهش استفاده شد، داده‌های ورودی برای این مدل گیاهی در هر طرح به صورت مجزا در نظر گرفته شد.

جدول (۲): ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی WOFOST

عامل	مقدار Sc در حالت ۲۵٪+	مقدار Sc در حالت ۲۵٪-	درجه حساسیت
دمای پایین برای جوانه‌زنی	۷/۳	۶/۱	متوسط
دمای بالای رشد	۵/۵	۶/۴	متوسط
سطح ویژه برگ	۶/۹	۴/۰	متوسط
ضریب خاموشی نور جذب شده	۸/۵	۵/۲	متوسط
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۱۱/۰	۱۰/۴	متوسط
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	۲/۹	۳/۵	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌ای	۴.۴	۴/۷	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۳/۰	۲/۶	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۴/۲	۴/۷	متوسط
سرعت جذب دی‌اکسید کربن در برگ	۲/۶	۳/۹	متوسط
فاکتور تصحیح میزان تعرق	۴/۸	۵/۲	متوسط

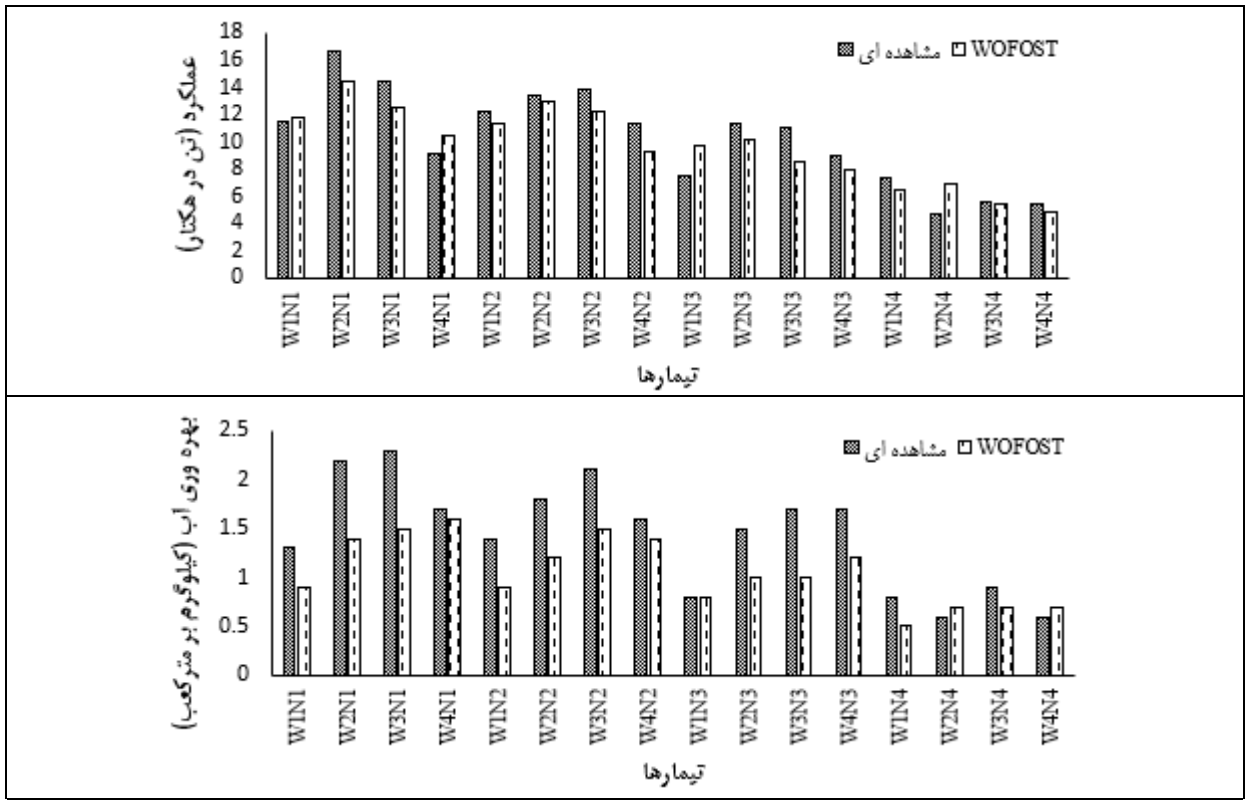
جدول (۳): مقادیر برخی پارامترهای ورودی مدل رشد گیاهی WOFOST

پارامتر	مقدار	حالت	توضیحات	مقدار	حالت	توضیحات
	طرح اول (مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن)			طرح دوم (مقدار و تقسیط کود نیتروژن)		
دمای پایین برای جوانه‌زنی	۴	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض	۴	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالای رشد	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
سطح ویژه برگ	۰/۰۰۲۵، ۰-۰ ۰/۰۰۲۲، ۱-۰ ۰/۰۰۱۲، ۲-۰	هکتار بر کیلوگرم	واسنجی	۰/۰۰۲۵، ۰-۰ ۰/۰۰۲۲، ۱-۰ ۰/۰۰۱۲، ۲-۰	هکتار بر کیلوگرم	واسنجی
ضریب خاموشی نور جذب شده	۰/۶۰، ۰-۰	-	واسنجی	۰/۶۲-۰، ۰-۰	-	واسنجی
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۰/۵۵-۰، ۰-۰	کیلوگرم بر هکتار ساعت ژول مربع	واسنجی	۰/۵۵-۰، ۰-۰	کیلوگرم بر هکتار ساعت ژول مربع	واسنجی
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	۰/۷۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی	۰/۶۸	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌ای	۰/۶۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی	۰/۶۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۰/۶۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی	۰/۶۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۰/۷۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی	۰/۶۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
سرعت جذب دی‌اکسید کربن در برگ	۰/۷۰-۰، ۰-۰	کیلوگرم بر هکتار ساعت	واسنجی	۰/۷۰-۰، ۰-۰	کیلوگرم بر هکتار ساعت	واسنجی
فاکتور تصحیح میزان تعرق	۱/۱	-	واسنجی	۱/۲	-	واسنجی

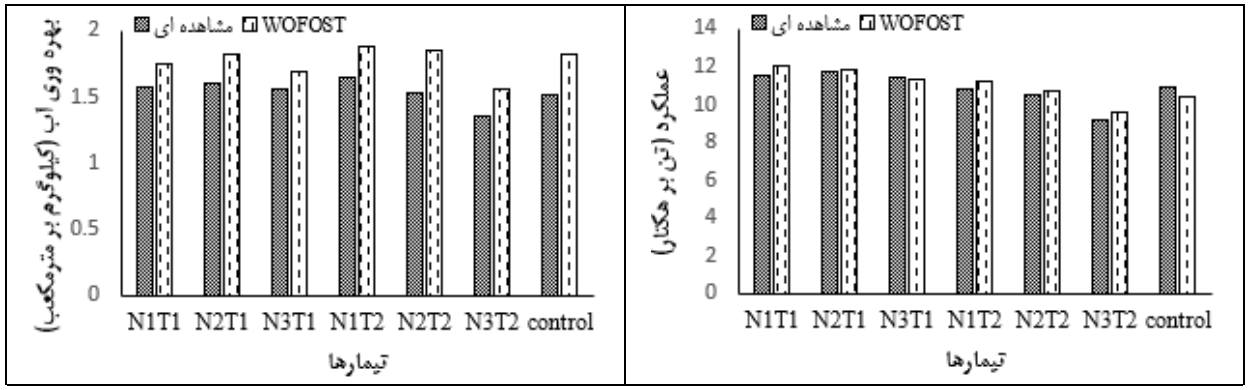
واسنجی مدل WOFOST

مقایسه نتایج عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه-سازی شده در طرح اول برای مرحله واسنجی مدل، که شامل مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن بود، در شکل (۴) ارائه شده است. میانگین، حداقل و حداکثر اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به‌ترتیب ۱/۳۵ (۱۴/۵ درصد)، ۰/۱۰ (۱/۷ درصد) و ۲/۶۰ تن در هکتار (۴۶/۸ درصد) بود. تنها در سه تیمار W2N4، W1N3 و W4N2 اختلاف عملکرد بسیار بالا و به‌ترتیب ۴۶/۸، ۲۹/۳ و ۲۳/۴ درصد مشاهده شد. برای سایر تیمارها اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده کمتر از ۱۸ درصد بود. از نظر مقدار عملکرد، اختلاف در این تیمارها بین ۲/۶-۲/۲ تن در هکتار قرار گرفت که تقریباً دو برابر متوسط اختلاف به‌دست آمد. نظر به اینکه این رویه در سایر تیمارها مشاهده نشد؛ دلیل قاطعی برای رفتار این مدل گیاهی حاصل نگردید. لیکن براساس رفتار مدل WOFOST در تغییر عامل کود نیتروژن، مشاهده شد که با کاهش مصرف کود نیتروژن (از N1 به N4) اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نیز افزایش یافت به‌طوری که اختلاف عملکرد در تیمارهای N1، N2، N3 و N4 به‌ترتیب ۱۱، ۱۰، ۱۸ و ۱۷ درصد بود. این نتایج به-دلیل کاهش دقت مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط تنش کودی است. تغییرات مقدار آب آبیاری اثری بر تغییرات نتایج مدل WOFOST نداشت. به‌طوری که تغییرات عملکرد در محدوده ۱/۵۵-۱/۱۰ تن بر هکتار (۱۸-۱۲ درصد) بود و تغییرات منظمی در تیمارهای آبیاری مشاهده نشد. با توجه به اینکه مدل WOFOST کربن-محور است (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷)، تغییرات مقدار آب آبیاری اثری بر خطای آن نداشت. ولی تغییرات کود نیتروژن که در ساختار این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد دخالت مستقیم دارد (Boogaard et al., 1988)؛ بر خطای این مدل اثر زیادی داشت. میانگین، حداقل و حداکثر اختلاف بهره‌وری آب در طرح اول به‌ترتیب ۰/۴، ۰/۰۱ و ۰/۸ کیلوگرم به‌دست آمد که در محدوده ۴۱-۱ درصد متغیر بود. کمترین اختلاف بهره‌وری آب در تیمار W1N3 به دست آمد. این اختلاف در دو تیمار W2N4 و W4N2 به‌ترتیب ۱۲ و ۱۶ درصد بود. این تیمارها بیشترین خطا را در شبیه‌سازی عملکرد نشان دادند. احتمالاً کاهش خطای بهره‌وری آب، به دلیل فاصله زیاد عملکرد واقعی از شبیه‌سازی شده باشد. زیرا در سایر تیمارها، اختلاف بهره‌وری آب بیشتر از ۲۰ درصد بود. بیشترین اختلاف بین بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دو تیمار N1 (۲۶ درصد) و N2 (۲۷ درصد) مشاهده شد و با افزایش تنش کودی در تیمار N4 به ۲۳ درصد کاهش یافت. رابطه مشخصی نیز بین مقدار آب آبیاری و تغییرات بهره‌وری آب مشاهده نشد.

مقایسه نتایج عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه-سازی شده در طرح دوم برای مرحله واسنجی مدل، که شامل مقدار و تقسیط کود نیتروژن بود، در شکل (۵) آورده شده است. میانگین اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ۰/۳۳ تن در هکتار و حداقل و حداکثر این اختلاف به ترتیب ۰/۱۰ و ۰/۵۵ تن در هکتار به‌دست آمد. افزایش تقسیط کود نیتروژن از سه به چهار قسمت (T1 به T2)، تأثیر چندانی در خطای مدل WOFSOT نداشت. با افزایش مقدار کود نیتروژن (از N1 به N3) اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده تا ۵ درصد افزایش یافت. در شاهد که کود نیتروژن مصرف نشده بود، این اختلاف نسبت به سایر تیمارها بیشتر (به میزان ۵/۱ درصد) به‌دست آمد. اختلاف بهره‌وری آب در این طرح به-طور متوسط ۰/۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۷ درصد) و حداقل و حداکثر این اختلاف به ترتیب ۰/۱۳ (۸/۳ درصد) و ۰/۳۲ (۲۰ درصد) بود و تفاوت چندانی بین اختلاف بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دو تقسیط T1 و T2 به‌دست نیامد. علت آن نزدیکی عملکرد و ثابت بودن حجم آب آبیاری در این دو تیمار است.



شکل (۴): مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در دو حالت مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مقادیر مختلف کود نیتروژن و آب آبیاری در مرحله واسنجی (W1، W2، W3 و W4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و N1، N2، N3 و N4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۰ درصد نیاز کودی)

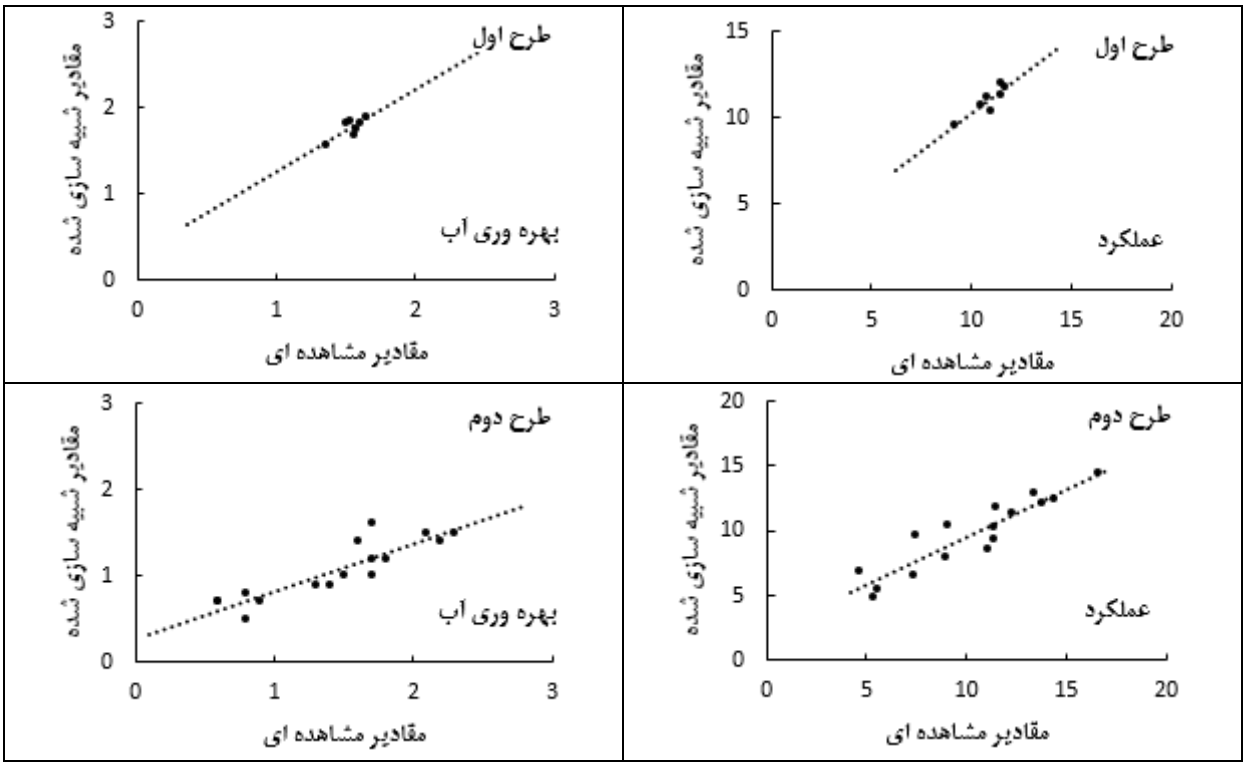


شکل (۵): مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در دو حالت مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مقادیر و تقسیط مختلف کود نیتروژن در مرحله واسنجی (N1، N2، N3 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ درصد نیاز کودی و N4: عرف رایج در منطقه، T1: تقسیط یکسان سه مرحله‌ای تأمین کود شامل مرحله ۶-۴ برگی، مرحله ۱۰ برگی و مرحله تاسل‌دهی و T2: تقسیط یکسان چهار مرحله‌ای تأمین کود شامل مرحله ۶-۴ برگی، مرحله ۱۰ برگی، مرحله تاسل‌دهی و مرحله تلقیح)

نتایج آماری (جدول شماره ۴)در مرحله واسنجی نشان داد که در طرح اول، که مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن مورد بررسی قرار گرفت، مدل WOFOST دچار خطای کم‌برآوردی شد. لیکن خطای این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد ۰/۹۱ تن در هکتار بود که نسبت به متوسط عملکرد مشاهده‌ای (۱۰/۲۸ تن) قابل‌قبول است. براساس آماره NRMSE، دقت مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد در دسته عالی قرار داشت. کارایی این مدل نیز مطلوب بود. با این وجود، بهره‌وری آب به‌دست آمده خطای زیادی داشت (RMSE=0.34 kg.m-3) و براساس آماره NRMSE دقت آن در دسته متوسط قرار گرفت. گرچه کارایی مدل WOFOST در تعیین بهره‌وری آب ضعیف‌تر از عملکرد ذرت بود، ولی مقدار به‌دست آمده بر اساس اماره های EF=0.22 و d=0.96 قابل‌قبول است. در طرح دوم، مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای بیش‌برآوردی گردید. براساس آماره NRMSE، دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در دسته عالی (NRMSE<0.1) قرار داشت. کارایی مدل WOFOST نیز برای هر دو پارامتر قابل‌قبول بود. نتایج آماره R^2 برای عملکرد ذرت در طرح اول ۰/۹۲ و در طرح دوم ۰/۸۵ به دست آمد. بنابراین مدل WOFOST در شرایط حاکم بر طرح اول قادر به پیش‌بینی ۹۲ درصد تغییرات است در حالی که توانایی آن در شرایط طرح دوم به ۸۵ درصد کاهش یافت. این نتایج برای بهره‌وری به ترتیب ۸۷ و ۸۰ درصد بود. علت این است که مدل WOFOST توانایی شبیه‌سازی تقسیط کود را ندارد و برای مدل‌سازی این شرایط سعی شد خطای بیشتری در این مرحله مورد پذیرش باشد. در واقع، پارامترهای واسنجی شامل ضرایب کارایی تبدیل ماده خشک به برگ و ارگان ذخیره‌ای (در جدول ۳)، برای طرح دوم بیشتر در نظر گرفته شد تا نتایج شبیه‌سازی به شرایط تقسیط کود نیتروژن در واقعیت نزدیک شود. این موضوع سبب شد تا آماره‌های RMSE و NRMSE بهبود یابد ولی نتایج از شرایط واقعی دور شود. به همین دلیل آماره R^2 که نشان دهنده تطابق نتایج شبیه‌سازی با واقعی است؛ در طرح دوم مقدار ضعیف‌تری نسبت به طرح نخست داشت. نمودارهای همبستگی مقادیر در هر دو طرح در شکل (۶) نشان داده شده است.

جدول (۴): نتایج آماره‌های مختلف برای مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در شرایط مختلف آزمایش در مرحله واسنجی

نوع طرح	نام پارامتر	MBE	RMSE	NRSME	EF	D	R^2
طرح اول (مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن)	عملکرد (تن بر هکتار)	-۰/۱۹	۰/۹۱	۰/۰۸	۰/۷۹	۰/۹۹	۰/۹۲
	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	-۰/۱۷	۰/۳۴	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۹۶	۰/۸۷
طرح دوم (مقدار و تقسیط کود نیتروژن)	عملکرد (تن بر هکتار)	۰/۱۱	۰/۲۴	۰/۰۲	۰/۷۹	۰/۹۹	۰/۸۵
	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۶۳	۰/۹۹	۰/۸۰



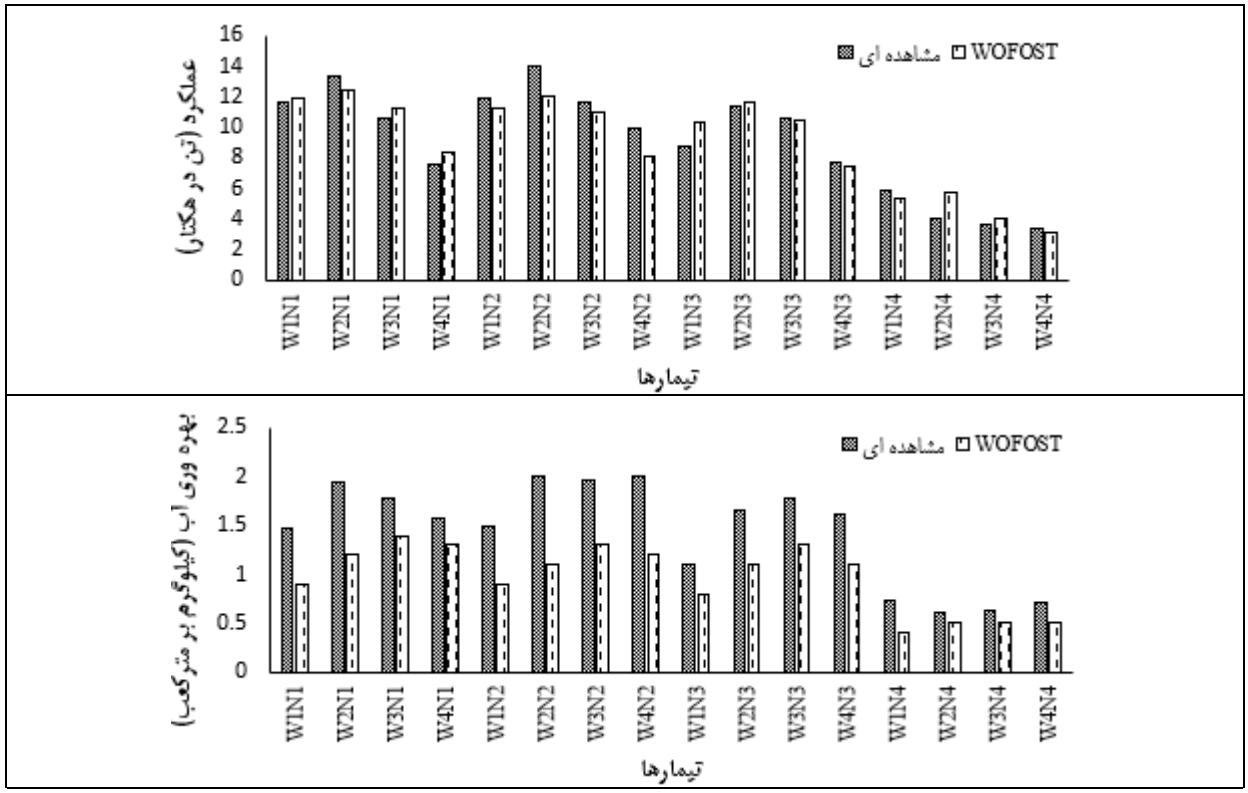
شکل (۶): همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده عملکرد (تن بر هکتار) و بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) در مدیریت‌های مختلف تأمین آب آبیاری و کود نیتروژن در مرحله واسنجی

صحت‌سنجی مدل WOFOST

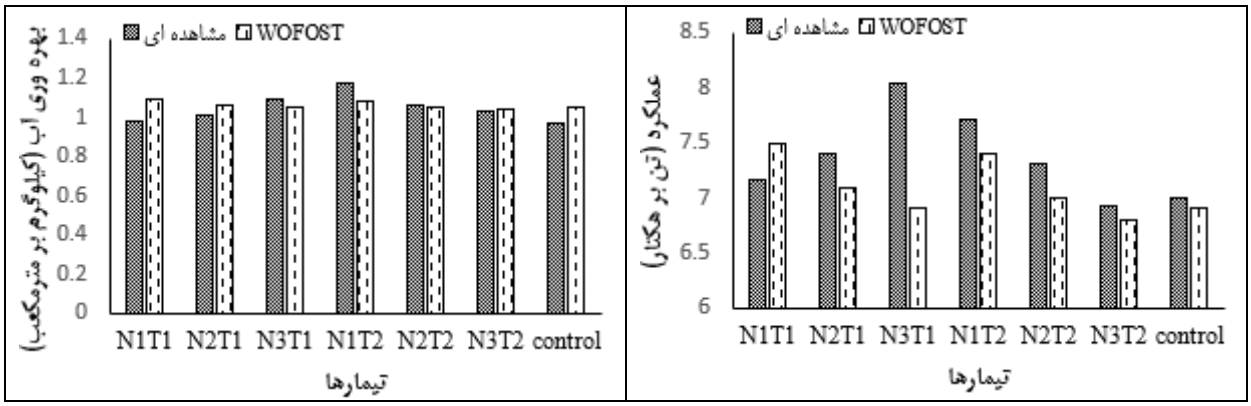
مقایسه عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی نشان داد که اختلاف نتایج در محدوده ۱/۹-۰/۱۰ تن در هکتار (۳۹-۱ درصد) و به‌طور متوسط ۰/۷۷ تن در هکتار (۹/۷ درصد) بود (شکل ۷). اختلاف عملکرد در سه تیمار W2N4، W1N3 و W4N2 به‌ترتیب ۳۹، ۱۸ و ۱۸ درصد بود. این تیمارها در مرحله واسنجی نیز خطای بیشتری نسبت به سایر تیمارها داشتند. کاهش مصرف کود نیتروژن از N1 به N4 سبب افزایش اختلاف بین عملکرد در شرایط مشاهده‌ای و شبیه‌سازی (از ۸ درصد به ۱۰ درصد) شد. همانطور که در بخش واسنجی بررسی شد، این نتایج به دلیل کربن-محور بودن مدل WOFOST است. در واقع این مدل چون با تولید زیست‌توده به شبیه‌سازی عملکرد می‌پردازد؛ تغییرات پارامترهایی که بر این عامل موثر باشند بر دقت مدل اثر دارند. در شرایط مختلف تأمین آب تغییری در اختلاف نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مشاهده نشد که با مرحله واسنجی مطابقت داشت. محدوده تغییرات بهره‌وری آب بین ۰/۹۰-۰/۱۱ کیلوگرم بر هکتار (۴۵-۱۷ درصد) و متوسط اختلاف بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ۰/۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب (۳۱ درصد) به دست آمد. این نتایج نشان داد که خطای این مدل برای پارامتر بهره‌وری آب بسیار زیاد است. افزایش تنش کودی سبب کاهش این اختلاف از ۳۸ به ۲۹ درصد شد که با نتایج مرحله واسنجی مطابقت داشت. علت آن افزایش اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است. با توجه به رابطه (۱)، این اختلاف سبب ایجاد خطای زیادی در بهره‌وری آب می‌شود.

در طرح دوم که مقدار و تقسیط کود نیتروژن بررسی شد، اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی در محدوده ۱/۱۵-۰/۱۰ تن بر هکتار (۲-۱۴ درصد) به‌دست آمد (شکل ۸). متوسط اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ۰/۳۷ تن در هکتار (۵ درصد) بود. مقایسه نتایج این طرح با طرح اول نشان

داد که دقت مدل WOFOST در شرایط عدم استفاده از تیمارهای آبیاری (شرایط بدون تنش) بیشتر است. مقایسه تقسیط کود نیتروژن در دو تیمار T1 و T2 حاکی از این بود که تقسیط نیتروژن به افزایش دقت این مدل گیاهی کمک کرد به‌طوری که اختلاف نتایج در دو تیمار اشاره شده به ترتیب ۷ و ۳ درصد بود. متوسط، حداقل و حداکثر بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به ترتیب ۰/۰۵ (۵ درصد)، ۰/۰۱ (یک درصد) و ۰/۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب (۱۰ درصد) به‌دست آمد. این اختلاف برای دو تیمار T1 و T2 به ترتیب ۶/۵ و ۳/۶ درصد بود. علت آن افزایش خطای شبیه‌سازی عملکرد بود. براساس این نتایج، در شرایطی که تیمار آبیاری وجود ندارد، اختلاف بهره‌وری آب در تیمارهای کودی با خطا عملکرد رابطه مستقیم دارد. علت آن تقسیط مقدار آب یکسان برای کلیه تیمارها است که در تعیین بهره‌وری آب بین تیمارهای مختلف نیز اثری ندارد. لیکن در شرایط استفاده از تیمارهای آبیاری، دور شدن عملکرد شبیه‌سازی شده از مشاهده‌ای سبب کاهش خطای شبیه‌سازی بهره‌وری آب می‌گردد.



شکل (۷):مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در دو حالت مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مقادیر مختلف کود نیتروژن و آب آبیاری در مرحله صحت‌سنجی (W1، W2، W3 و W4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و N1، N2، N3 و N4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۰ درصد نیاز کودی)

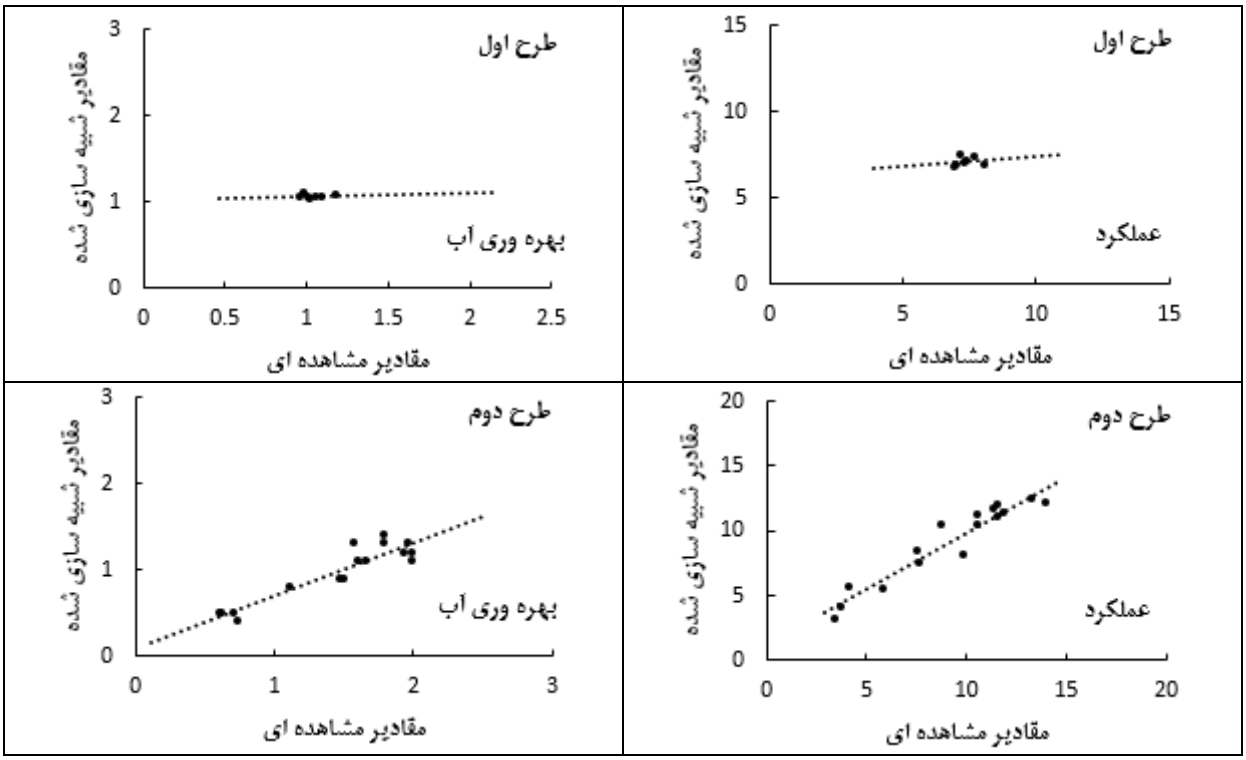


شکل (۸): مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در دو حالت مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مقادیر و تقسیط مختلف کود نیتروژن در مرحله صحت‌سنجی (N1، N2، N3 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ درصد نیاز کودی و N4: عرف رایج در منطقه، T1: تقسیط یکسان سه مرحله‌ای تأمین کود شامل مرحله ۶-۴ برگی، مرحله ۱۰ برگی و مرحله تاسل‌دهی و T2: تقسیط یکسان چهار مرحله‌ای تأمین کود شامل مرحله ۶-۴ برگی، مرحله ۱۰ برگی، مرحله تاسل‌دهی و مرحله تلقیح)

نتایج آنالیز آماری در مرحله صحت‌سنجی (جدول ۵) نشان داد که مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در طرح اول دچار خطا بیش‌برآوردی شد. خطا این مدل براساس آماره RMSE برابر با ۰/۳۸ تن در هکتار بود با مقایسه این عدد با متوسط عملکرد مشاهده‌ای (۹/۱۲ تن در هکتار) نشان دهنده خطا قابل‌قبولی برای این مدل گیاهی است. دقت این مدل براساس آماره NRMSE در دسته عالی و کارایی آن براساس دو آماره EF و d مطلوب بود. در طرح اول، دقت مدل WOFOST برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب متوسط ($0.2 \leq NRMSE < 0.3$) بود. این مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب دچار خطا کم‌برآوردی شد و مقدار خطا زیادی ($RSME=0.3\ kg.3m^{-3}$) نیز داشت. کارایی این مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب نسبت به عملکرد کاهش یافت. این نتایج در آماره R2 نیز قابل مشاهده است به طوری که مدل WOFOST توانایی پیش‌بینی ۸۹ درصد تغییرات عملکرد و ۸۵ درصد تغییرات بهره‌وری آب را داشت. در طرح دوم که شامل مقدار و تقسیط کود نیتروژن بود، مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب دچار خطا کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی گردید. نمودارهای همبستگی در شکل (۹) نشان داده شده است. براساس آماره RMSE، خطای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب ۰/۴۸ تن بر هکتار و ۰/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود که نسبت به متوسط مقادیر مشاهده‌ای این دو پارامتر (به ترتیب ۷/۳ تن در هکتار و ۱/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب) قابل‌قبول بود. مقادیر دو آماره EF و d برای پارامترهای عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب بیشتر از صفر و ۰/۹۹ بود که براساس نتایج گزارش شده توسط ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۸) و اگدرنژاد و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت داشت. اویس و همکاران (۲۰۱۷) محدوده RMSE را ۶ درصد گزارش نمودند که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت ولی این محققان آماره EF را برای عملکرد ذرت حدود ۰/۹۰ تعیین کردند که بیشتر از نتایج به دست آمده در این تحقیق است. مقایسه بهره‌وری آب در دو طرح اول و دوم نشان داد که مدل WOFOST در شرایط وجود تیمار آبیاری دقت خوبی برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب نداشت. با توجه به اینکه دقت مدل WOFOST در مرحله واسنجی در این طرح کمتر از طرح دوم بود؛ این نتایج قابل قبول است.

جدول (۵): نتایج آماره‌های مختلف برای مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در شرایط مختلف آزمایش در مرحله صحت‌سنجی

نوع طرح	نام پارامتر	MBE	RMSE	NRSME	EF	D	R^2
طرح اول (مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن)	عملکرد (تن بر هکتار)	۰/۰۷	۰/۳۸	۰/۰۴	۰/۹۱	۰/۹۹	۰/۸۹
	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	-۰/۱۶	۰/۳۰	۰/۲۰	۰/۱۲	۰/۹۵	۰/۸۵
طرح دوم (مقدار و تقسیط کود نیتروژن)	عملکرد (تن بر هکتار)	-۰/۲۰	۰/۴۸	۰/۰۶	۰/۸۰	۰/۹۹	۰/۸۸
	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۷۵



شکل (۹): همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده عملکرد (تن بر هکتار) و بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) در مدیریت‌های مختلف تأمین آب آبیاری و کود نیتروژن در مرحله صحت‌سنجی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی دقت و کارایی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب در دو طرح مختلف (طرح اول شامل مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن و طرح دوم شامل تیمارهای مقدار کود نیتروژن و تقسیط کود) پرداخته شد. نتایج نشان داد که خطای شبیه‌سازی عملکرد در هر دو طرح به هم نزدیک بود و مدل WOFOST از نظر دقت در دسته عالی (NRMSE<0.1) قرار داشت. لیکن دقت این مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب در شرایط وجود تیمار آبیاری (طرح نخست) به شدت کاهش یافت. به طوری که در دسته متوسط (0.2≤NRMSE<0.3) قرار گرفت. با این وجود دقت مدل WOFOST برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب در طرح دوم که فاقد تیمار آبیاری بود در دسته عالی (NRMSE<0.1) قرار گرفت. دقت مدل WOFOST نسبت به تغییرات آب آبیاری از حساسیت کمی برخوردار بود ولی افزایش تنش کودی سبب کاهش دقت این مدل شد. تقسیط کود نیتروژن به افزایش دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد کمک کرد. بهره‌وری آب در طرح اول با افزایش تنش کودی افزایش یافت ولی در طرح دوم این روند معکوس بود. براساس کلیه نتایج، استفاده از تیمارهای آبیاری برای شبیه‌سازی ذرت با مدل WOFOST نیاز به بررسی بیشتر دارد ولی این مدل می‌تواند شرایط مختلف تأمین کود نیتروژن در تقسیط‌های مختلف را شبیه‌سازی نماید.

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): ۱۳۲-۱۱۷.

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(۳-۷۵): ۷۲۶-۷۱۵.

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

اسمعیلی، م.، داداشی، م.، فیض‌بخش، م. ت.، کابوسی، م.، و شیخ، ف. ۱۴۰۱. ارزیابی اثرات کم‌آبیاری بر عملکرد، اجزاء عملکرد، محتوای پرولین و بهره‌وری آب چهار رقم ذرت دانه‌ای در گرگان، پژوهش آب در کشاورزی، ۳۶ (۳): ۲۸۵-۲۶۹.

افضلی، م.، طایی سمیرمی، ج.، و امیری نژاد، م. ۱۳۹۷. ارزیابی کارایی مدل WOFOST برای شبیه‌سازی رشد و نمو ذرت برای الگوی کشت تابستانه در شرایط اقلیمی نیمه گرمسیری جنوب کرمان. ۴۹(۱): ۶۴-۵۷.

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(۲-۱۰): ۶۴-۵۳.

اگدرنژاد، ا.، مسجدی، ع.، شکوه‌فر، ع.، و علوی فاضل، م. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل گیاهی AquaCrop و WOFOST در شبیه-سازی عملکرد ذرت تحت شرایط کم‌آبیاری، به‌زراعی گیاهی، ۸ (۱): ۸۱-۶۹.

امیری، ا.، رضایی، م.، معتمد، م. ک.، و امامی، س. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل رشد گیاهی WOFOST در شرایط مدیریت آبیاری. پژوهش‌های کاربردی زراعی، ۹۰: ۱۷-۹.

بافکار، ع.، برومندنسب، س.، بهزاد، م.، و فرهادی بانسوله، ب. ۱۳۹۰. پیش‌بینی تولید ذرت دانه‌ای رقم 704SC در منطقه ماهیدشت کرماشاه با استفاده از مدل شبیه‌سازی محصول WOFOST. علوم گیاهان زراعی. ۴۲ (۴): ۸۰۸-۷۹۹.

بی‌نام، ۱۴۰۱. آمارنامه کشاورزی:محصولات زراعی. وزارت جهاد کشاورزی. مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران. ۹۳ صفحه.

سعادتی، ز.، پیرمرادیان، ن.، امیری، ا.، و رضایی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم برنج تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۶(۳): ۳۲۳-۳۳۷.

عباسی، ف.، غیبی، م، و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۱. بررسی تلفات نیتروژن، عملکرد و اجزای عملکرد ذرت تحت سطوح مختلف کود نیتروژن و مدیریت کود-آبیاری در آبیاری جویچه‌ای. روابط خاک و گیاه. ۱۳(۴): ۱۱۷-۱۰۵.

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

عباسی، ف.، چوگان، ر.، و غیبی، م. ۱۳۹۴. بررسی امکان کاهش تلفات نیتروژن در کودآبیاری جویچه‌ای ذرت دانه‌ای. گزارش پژوهشی. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۵۵ صفحه.

عباسی، ف.، ناصری، ا.، سهراب، ف.، باغانی، ج.، عباسی، ن. و اکبری، م. ۱۳۹۴. ارتقای بهره‌وری مصرف آب. گزارش پژوهشی. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۶۸ صفحه

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. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک. ۳(۱): ۴۱-۲۶.

Banger, K., Wagner-Riddle, C., Grant, B. B., Smith, W. N., Drury, C., and Yang, J. 2020. Modifying fertilizer rate and application method reduces environmental nitrogen losses and increases corn yield in Ontario, Science of The Total Environment, 722: 137851.

Boogaard, H. L., Van Diepen C. A., Rotter R. P., Cabrera J. M. C. A. and 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.

Bouman, B. A. M., Van Keulen, H., Van Laar, H. H. and R. Rabbinge. 1996. The "School of de Wit", crop growth simulation models: pedigree and historical overview. Agric. Sys. 52: 171-198.

Cheng, Zh., Meng, J., and Wang, Y. 2016. Improving spring maize yield estimation at field scale by assimilation time-series HJ-1 CCD data into the WOFOST model using a new method with fast algorithms. Remote Sensing. 8(4): 1-22.

Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z. and M. Dubrovsk. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. Ecol. Model. 171: 223-246.

Eweys, O. A., Elwan, A. A., and Borhan, T. I. 2017. Integrating WOFOST and Noah LSM for modeling maize production and soil moisture with sensitivity analysis, in the east of The Netherlands, Field Crop Research, 210: 147-161.

FAO, 2022. FAO stat. available at https://www.fao.org/statistics/en/.

Geerts S., Raes D., Garcia, M., Miranda, R. and Cusicanqui, J. A. 2009. Simulating yield response to water of quinoa (Chenopodium quinoaWilld.) with FAO-AquaCrop. Agronomy. 101: 499-508.

Namihira, T, Shinzato, N., Akamine, H, Nakamura, I, Maekawa, H, Kawamoto, Y. and Matsui, T. 2011. The effect of nitrogen fertilization to the sward on guineagrass (Panicum maximum Jacq cv. Gatton) silage fermentation. Asian-Aust . J. Anim. Sci. 24: 358-363.

Sadeghi, S. M., Noorhosseini, S. A., and Damalas, Ch, A. 2018. Environmental sustainability of corn (Zea mays L.) production on the basis of nitrogen fertilizer application: The case of Lahijan, Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 95: 48-55.

Song, Y. I., Chen, D. L. and W. J. Dong. 2006. Influence of climate on winter wheat productivity in different climate regions of China, 1961–2000. Clim. Res. 32: 219–227.

Wu, Sh., Yang, P., Ren, J., Chen, Zh., and Li, H. 2021. Regional winter wheat yield estimation based on the WOFOST model and a novel VW-4DEnSRF assimilation algorithm, Remote Sensing of Environment. 255: 112276.

Yang, H. S., Dobermann, A., Lindquist, J. L., Wolters, D. T., Arkebauer, T. J. and K. G. Cassman. 2004. Hybrid-maize—A maize simulation model that combines two crop modeling approaches. Field Crops Res. 87: 131–154.