Archive of SID.ir

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Evaluation of AquaCrop model for simulation of Wheat plant (Triticum) yield under different scenarios of agricultural management in Qazvin

Mohammad Hadi Jorenush[1*], Aslan Egdernezhad[2], Mohammad Ali Shahrokhnia[3], Niaz Ali Ebrahimi Pak[4]

[1] Ph.D., Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Shiraz, Iran
[2] Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
[3] Associated Professor, Department of Agricultural Engineering Research, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Shiraz, Iran
[4] Professor, Irrigation and Soil Physics Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research and Education Organization, Karaj, Iran

Abstract

Introduction

The agriculture sector, as the biggest consumer of water to produce more food, has faced the challenge of water shortage. One of the problems ahead in the agricultural industry is the sustainable use of available resources such as land, water, and labor to increase agricultural production and development, which requires proper planning and management policies. Plant models can be used to investigate the long-term effects of quantitative and qualitative changes in irrigation water on crops, soil salinity, evaporation and transpiration, deep infiltration, and surface runoff. One of the widely used plant models is the AquaCrop model, which was presented and developed by the World Food and Agriculture Organization. The Aquacrop model is one of the crop yield estimation models that can be used for a wide range of crops including fodder crops, vegetables, grains, fruits, oil crops, and tubers. In this model, the state of various stresses including water and soil salinity, simulation of lack of irrigation, and crop yield are considered. Various studies have been conducted regarding the calibration and validation of crop forecasting models in our country, and much research has been conducted on wheat at the global level. In this research, the AquaCrop model was used to predict the biomass and grain yield of wheat in Qazvin. This model can be a good substitute for field measurements and can be used in areas where there is a lack of ground information.

Materials and Methods

In the present research, the data of water wheat cultivation in a lysimeter in Ismailabad, Qazvin were used. The input information of the AquaCrop model includes information on climate, soil, management, and plant characteristics. To calibrate and verify the model, some farm information was needed to be compared with the output of the AquaCrop model. The biomass of the wheat plant was determined by taking random samples of the 0.5×0.5 m^2 with two replications per sampling hectare. To measure grain yield in the fields, four samples were taken at the end of the growing season at the end stage. The validated AquaCrop model was used to estimate the effect of three planting dates and three low irrigation conditions on wheat grain yield. In this step, the average regional information around the farms was used so that the implementation of the model is not unique to the conditions of a particular farm.

Results and Discussion

In terms of the investigated meteorological factors, the model has moderate sensitivity to maximum and minimum temperature and low sensitivity to rainfall. The change in the maximum temperature in this region increases the error of the simulation on average. Regarding the soil parameters, the sensitivity of the model to the crop capacity moisture, wilting point, saturated moisture, and saturated hydraulic conductivity, especially in saturated conditions, is low to medium. The most sensitive of the AquaCrop model was the change in the reference harvest index. The model simulated biomass values with higher accuracy than yield. In the calibration stage, the values CRM, NRMSE, and d for biomass were -0.15, 0.17, and 92% respectively. These values were obtained in the validation stage for biomass -0.1, 0.24, and 92 % respectively, and for yield -0.03, 0.06, and 80 % respectively. By running the model in different

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

climatic scenarios, it was determined that the maximum delay in the planting date is on November 15. A 25% reduction in irrigation water reduced grain yield in wet, normal, and dry years by 15%, 20%, and 28 %, respectively, and a 50 % reduction in irrigation water reduced its amount by 20, 25, and 45 %, respectively.

Conclusion

Evaluation of the AquaCrop model for common plants in a region plays an important role in comparing crop performance in different conditions. In this research, the ability of AquaCrop 6 model to estimate the yield and biomass of wheat in Ismailabad Qazvin was investigated. The results showed that the model is capable of simulating these factors with high accuracy. The accuracy of the model in biomass simulation was higher than the grain yield. By implementing the calibrated model in different climatic scenarios, planting dates, and irrigation deficits in two regions, it was determined that to achieve optimal performance, the wheat planting date should not exceed 15 November. It was the use of calibration coefficients by spending a long time in the AquaCrop model so that a calibrated model can be used in many areas with proper accuracy. More accuracy in the simulated results can be achieved by using more calibration factors, but it is clear that the use of more calibration factors requires spending more time and money. Finding a general recalibrated model that can be used in large areas is a good solution in crop management at the farm-to-regional scale. Comparing the statistical parameters obtained in this study with previous studies on wheat yield modeling by the AquaCrop model shows that the results of this study are within an acceptable range.

Keywords: Biomass, Calibration, Irrigation, Productivity

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We thank two anonymous reviewers and the Editor-in-Cheif of this journal for their helpful comments and suggestions.

Conflicts of interest

The authors of this article declare that there is no conflict regarding the writing and publication of the contents and results of this research.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mohammad Hadi Jorenush: Conceptualization, software, writing-original draft preparation; **Aslan Egdernezhad**: Supervision, manuscript editing, formal analysis and investigation; **Mohammad Ali Shahrokhnia**: Conceptualization, manuscript editing; **Niaz Ali Ebrahimi Pak**: Conceptualization, manuscript editing

*Corresponding Author, E-mail: jorenoosh@yahoo.com

Citation: Jorenush, M.H., Egdernezhad, A., Shahrokhnia, M.A., & Ebrahimi Pak, N.A. (2024). Evaluation of AquaCrop model for simulation of Wheat plant (Triticum) yield under different scenarios of agricultural management in Qazvin. *Water and Soil Management and Modeling*, *4*(1), 1-16.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12533.1248

Received: 14 March 2023, Received in revised form: 27 March 2023, Accepted: 27 March 2023, Published online: 27 March 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 1-16

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

CC BY NC

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۲۵٤٦

ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم تحت سناریوهای مختلف مدیریت زراعی در قزوین

محمدهادی جرعه‌نوش*[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲]، محمدعلی شاهرخ نیا[۳]، نیازعلی ابراهیمی‌پاک[۴]

[۱] دکتری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، شیراز، ایران
[۲] استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
[۳] دانشیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، شیراز، ایران
[۴] استاد، بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسهٔ تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده

مدل‌های گیاهی برای بهینه‌سازی عوامل مدیریتی در محیط‌های متغیر استفاده می‌شود. در این مطالعه، مدل AquaCrop 6 در پیش‌بینی زیست‌توده و عملکرد محصول گندم پاییزه در سه سال زراعی در نیمهٔ شمالی ایران و در منطقهٔ قزوین به‌کار گرفته شد. داده‌های سال زراعی اول (۱۳۹۵-۱۳۹۴) برای واسنجی و داده‌های سال‌های دوم و سوم زراعی (۱۳۹۶-۱۳۹۵ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶) برای صحت‌سنجی مدل به‌کاربرده شد. مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ زیست‌توده و عملکرد دانه، جهت تعیین پارامترهای واسنجی در سال اول به‌کار رفت. مدل واسنجی شده دقت بالایی در شبیه‌سازی زیست‌توده، عملکرد دانه و بهره وری آب را نشان داد. مدل مقادیر زیست‌توده را با دقت بالاتری نسبت به عملکرد شبیه‌سازی نمود. در مرحلهٔ واسنجی، مقادیر ضریب باقی‌مانده (CRM)، میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، شاخص سازگاری (d) برای زیست‌توده به‌ترتیب ۰/۱۵-، ۰/۱۷، ۹۲ درصد بود. این مقادیر در مرحلهٔ صحت‌سنجی برای زیست‌توده به‌ترتیب ۰/۱-، ۰/۲۴ و ۹۲ درصد و برای عملکرد به‌ترتیب ۰/۰۳-، ۰/۰۶ و ۸۰ درصد به‌دست آمد. با اجرای مدل در سناریوهای مختلف اقلیمی، تاریخ کشت و کم‌آبیاری مشخص شد حداکثر تأخیر در تاریخ کشت ۱۵ آبان است. کاهش ۲۵ درصدی آب آبیاری، عملکرد دانه در سال‌های مرطوب، نرمال و خشک را به‌ترتیب تا ۱۵، ۲۰ و ۲۸ درصد و کاهش ۵۰ درصدی آب آبیاری، مقدار آن را به‌ترتیب تا ۲۰، ۲۵ و ۴۵ درصد کاهش داد. استفاده از مدل آکواکراپ، به‌عنوان روشی کم‌هزینه و با صرف زمان کم، گذر از اندازه‌گیری‌های سخت و زمان‌بر مزرعه‌ای را ممکن می‌سازد و به‌عنوان روشی مناسب در تخمین عملکرد گندم در منطقهٔ مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، بهره‌وری، زیست‌توده، واسنجی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: jorenoosh@yahoo.com

استناد: جرعه‌نوش، محمدهادی، اگدرنژاد، اصلان، شاهرخ نیا، محمدعلی، و ابراهیمی‌پاک، نیازعلی (۱۴۰۳). ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم تحت سناریوهای مختلف مدیریت زراعی در قزوین. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۱-۱۶.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12533.1248

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۱ تا ۱۶
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

١- مقدمه

بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب جهت تولید غذای بیش‌تر، با چالش کمبود آب مواجه شده و در چنین شرایطی نیاز به افزایش بهره‌وری آب است. یکی از مشکلات پیش‌رو در بخش کشاورزی استفادهٔ پایدار از منابع موجود مانند زمین، آب و نیروی کارگری برای افزایش تولید و توسعهٔ کشاورزی بوده که نیازمند برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری مناسب مدیریتی است (Amiri et al., 2016). در میان انواع مختلف غلات، گندم بیش‌ترین تولید در سطح کشور را دارد و در ٥٠ درصد اراضی قابل کشت، کاشته می‌شود. منبع اصلی غذای مردم ایران، گندم و فرآورده‌های آن است و هر اقدامی جهت بالابردن عملکرد محصول گندم با توجه به منابع محدود آب و خاک ضروری است (Ahmadi et al., 2017). محصول گندم تحت تأثیر شرایط محیطی است و به‌علت تغییرات شرایط اقلیمی و محیطی در طول زمان و مکان، تخمین مناسب عملکرد گندم در شرایط مختلف مزرعه‌ای می‌تواند راهنمای مناسبی برای کشاورزان باشد.

مدل‌های گیاهی جهت بهینه‌سازی عوامل مدیریتی در محیط های متغیر استفاده می‌شود که کاربرد آن در برون‌یابی نتایج حاصل مفید هست. مدل‌ها اجازهٔ مرور دوبارهٔ اطلاعات گذشته، شبیه‌سازی حال و پیش‌بینی آینده را می‌دهند و قابلیت تغییر در تمام موقعیت‌ها را داشته و با اعمال مدیریت مناسب می‌توانند مشکلات موجود در تولید محصول را به کمینه برسانند. مدل‌ها قابلیت کارکرد سناریوهای مختلف را با قابلیت پیش‌بینی مناسب دارند. از مدل‌های گیاهی می‌توان برای بررسی آثار درازمدت تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری بر محصول، شوری خاک، تبخیر-تعرق، نفوذ عمقی و رواناب سطحی استفاده کرد. اگرچه مدل‌ها نمی‌توانند جایگزین آزمایش‌های مزرعه‌ای شوند، ولی مزیت عمده‌ای که دارند صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان است. هم چنین، سادگی، نیاز به کمینهٔ دادهٔ ورودی و دقت قابل‌قبول مدل از مزایای استفاده از مدل‌هاست (Talbot, 2014). در سال‌های اخیر، مجموعه‌ای از مدل‌ها برای پیش‌بینی آثار طولانی‌مدت آب زیرزمینی، شاخص شوری منطقهٔ ریشه، شوری‌زدایی پروفیل خاک با زهکشی، کیفیت آب زیرزمینی و زهکشی، انتقال مؤثر املاح، نیاز آبی محصول و مدل‌های واکنش محصول به‌منظور شبیه سازی محصول تولیدی توسعه یافته است. SWAP، Budget، CROPWAT، CERES، CropSyst، WOFOST و CRPSM از جملهٔ این مدل‌هاست که هر کدام ممکن است به جهاتی مزیت‌هایی بر دیگر مدل‌ها داشته باشد. استفاده از مدل‌های گیاهی، مستلزم مهارت زیاد کاربر در واسنجی است، که ممکن است نیاز به اطلاعات ورودی زیادی نیز داشته باشد که اندازه‌گیری اغلب آن‌ها سخت است (Krishna, 2014).

یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد، مدل آکواکراپ است (http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html) که سازمان خواربار و کشاورزی جهانی (FAO) آن را ارائه و توسعه داده است. مدل آکواکراپ یکی از مدل‌های تخمین عملکرد محصول است که برای محدودهٔ وسیعی از محصولات زراعی شامل محصولات علوفه‌ای، سبزیجات، غلات، میوه‌ها و محصولات روغنی و غده‌ای می‌تواند به‌کار گرفته شود. در این مدل، وضعیت تنش‌های مختلف از جمله شوری منابع آب و خاک و شبیه‌سازی کم‌آبیاری و عملکرد محصول در نظر گرفته شده است (Vanuytrecht, 2014). پژوهش‌های زیادی در مورد کاربرد مدل آکواکراپ برای تخمین عملکرد گیاهان مختلف از جمله؛ گیاه ذرت (Paredes et al., 2014; Hasanli et al., 2015; Ebrahimipak et al., 2018; Neisi et al., 2023)، جو (Abrha et al., 2012; Abi-Saab et al., 2014; Tavakkoli et al., 2015; Pereira et al., 2015)، سورگوم دانه‌ای (Araya et al., 2016)، نیشکر (Golabi and Naseri, 2016)، پنبه (Garcia-Vila et al., 2009; Farahani et al., 2009)، سویا (Paredes et al., 2015) صورت گرفته است.

مدل آکواکراپ در موارد مختلف در پیش‌بینی محصول گندم به‌کار رفته است. در پژوهش انجام شده توسط Salemi et al. (2011)، مدل آکواکراپ در شرایط کم‌آبیاری گندم در منطقهٔ باتلاق گاوخونی اصفهان به‌کار رفت. مدل با دقت بالایی پوشش تاجی و عملکرد را شبیه‌سازی نمود. البته مدل در هر دو مورد دارای بیش برآوردی بود. نتایج مطالعهٔ Kumar et al. (2014) در دهلی هندوستان نشان داد که مدل آکواکراپ، دقت قابل‌قبولی در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در ارقام مقاوم و غیرمقاوم به شوری گندم دارد. در این پژوهش مشخص شد که توانایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد بیش از دو پارامتر دیگر است. در پژوهش دیگری، Khorsand et al. (2014) مدل آکواکراپ در پیش‌بینی عملکرد محصول گندم زمستانه، رطوبت و شوری نیمرخ خاک، تحت تنش‌های شوری و آبی ارزیابی شد. نتایج مطالعه نشان داد که مدل، در پیش‌بینی شوری عصارهٔ اشباع خاک در مقایسه با رطوبت خاک و عملکرد دانه خطای بیش‌تری دارد. در خراسان شمالی، Khalili et al. (2014) با شبیه‌سازی عملکرد گندم با استفاده از مدل آکواکراپ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی سیساب نشان دادند که مدل با دقت بالایی قابلیت پیش‌بینی عملکرد محصول در شرایط دیم را دارد. هم‌چنین، Amiri et al. (2015) در ارزیابی مدل آکواکراپ در پیش بینی عملکرد دانه و زیست‌تودهٔ گندم زمستانه تحت تنش آبی در لپویی خوزستان نشان دادند که مدل، در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده، دارای دقت قابل‌قبولی است. نتایج مطالعهٔ Alizadeh

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

et al. (2020) در شبیه‌سازی عوامل گیاهی گندم با مدل آکواکراپ در منطقهٔ کرج، نشان داد که با افزایش دور آبیاری از هفت به ۱۴ روز دقت مدل در تخمین عملکرد و کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد. کاربرد مدل آکواکراپ توسط Mohammadi et al. (2015) برای گندم بهاره در مشهد، مقادیر عملکرد محصول، زیست‌توده، کارآیی مصرف آب با دقت بالا و مقادیر شاخص برداشت، رطوبت و شوری نیمرخ خاک، با دقت کم‌تر شبیه‌سازی شد. هم‌چنین، مشخص شد که دقت پیش‌بینی مدل با افزایش تنش‌های شوری و خشکی کاهش می‌یابد.

در پژوهش دیگری، مدل آکوکراپ با ترکیبی از داده‌های زمینی و سنجش از دور ارزیابی شد. مدل، عملکرد قابل‌قبولی در پیش‌بینی عملکرد گندم در مناطق جنوبی ایران، با کاربرد شاخص‌های گیاهی سنجش از دور نشان داد. داده‌های سنجش از دور توانایی خود را در صحت‌سنجی مدل آکواکراپ بدون داشتن اندازه‌گیری‌های زمینی نشان داد (Jorenush et al., 2019). در نهایت، Kim and Kaluarachchi (2015) در آمریکا، با مطالعهٔ گندم صحت مدل آکواکراپ را با استفاده از تصاویر ماهوارهٔ لندست و اطلاعات محلی گیاه بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از تصاویر سنجش از دور روشی مناسب و کم‌هزینه در برآورد مقادیر آب، خاک و عملکرد گیاه توسط مدل آکواکراپ بدون نیاز به اندازه‌گیری‌های زمینی در مزرعه است. در این مطالعه با استفاده از اطلاعات منطقه‌ای و شاخص NDVI مقادیر پوشش تاجی و زیست‌توده برآورد شد و این دو عامل به‌عنوان دو عامل در صحت‌سنجی مدل آکواکراپ به‌کار رفت. این روش، ارائه‌دهندهٔ نتایج قابل‌قبولی در صحت‌سنجی مدل آکواکراپ با استفاده از داده‌های سنجش از دور بود.

در خصوص واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های پیش‌بینی محصول در کشور ما مطالعات مختلفی انجام شده و در سطح جهانی نیز در مورد گندم پژوهش‌های زیادی انجام شده است. در پژوهش حاضر، مدل آکواکراپ جهت پیش‌بینی زیست‌توده و عملکرد دانهٔ محصول گیاه زراعی گندم در قزوین به‌کار رفت. کاربرد مدل در سناریوهای مختلف اقلیمی، تاریخ کاشت و کم آبیاری نیز بررسی و مشخص شد که این مدل می‌تواند جایگزین مناسبی برای اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای باشد و در مناطقی که کمبود اطلاعات زمینی وجود دارد به‌کار رود.

۲- مواد و روش

در پژوهش حاضر از داده‌های کشت گندم آبی در یک لایسیمتر در اسماعیل‌آباد قزوین در نیمهٔ شمالی ایران استفاده شد. منطقهٔ مورد مطالعه در عرض جغرافیائی ″۱۵ ′۱۵ °۳۶ شمالی و طول جغرافیایی ″۲۶ ′۵۴ °۴۹ شرقی به ارتفاع ۱۲۸۵ متر از سطح دریا بود. جهت این بررسی، یک لایسیمتر زهکش‌دار به ابعاد ۲/۴× ۱/۲ مترمربع و عمق ۱/۵ متر از سطح زمین در وسط یک قطعه زمینی به مساحت ۱۶۰۰ مترمربع به‌کار رفت. مطالعه در سه سال زراعی و هر سال در چهار تکرار انجام گرفت. اطلاعات ماهانهٔ هواشناسی از ایستگاه اسماعیل‌آباد قزوین گرفته شد. خاک ناحیهٔ آزمایش از نظر فیزیکی در شش عمق پروفیل خاک به شرح جدول ۱ مورد تحلیل قرار گرفته است که نتایج حاصل شامل ظرفیت زراعی، نقطهٔ پژمردگی و وزن مخصوص ظاهری می‌باشد و از نظر شیمیایی در دو عمق پروفیل خاک به شرح جدول ۲ مورد تحلیل قرار گرفته و ارائه شده است.

به‌منظور اندازه‌گیری آب زهکش لایسیمتر چاهک مشاهده‌ای در کنار لایسیمتر احداث شد و لایسیمتر طبق دستورالعمل فنی موجود احداث شد. عملیات زراعی، آبیاری و تراکم بوته در داخل و خارج از لایسیمتر به‌طور یکسان و هم‌زمان صورت گرفت. بعد از انتخاب محل مناسب جهت احداث لایسیمتر ابتدا محل احداث حفر شد و خاک حفاری شده لایه لایه در مکان‌های جداگانه ریخته شد تا پس از نصب دوباره به‌ترتیبی که حفر شده بود در داخل لایسیمتر برگردانده شود. در پاییز هر سه سال زراعی قبل از کاشت گیاه، خاک درون لایسیمتر به اندازه‌ای که آب از لوله خروجی خارج شد (اشباع کامل) آبیاری شد و دو روز بعد از آبیاری زمانی که مزرعه به حد ظرفیت زراعی رسید کشت گندم با تراکم ۵۰۰ داده بذر در واحد سطح انجام شد. فاصلهٔ ردیف‌های بوته در داخل لایسیمتر با مزرعهٔ اطراف لایسیمتر یکسان بود. عملیات مبارزه با علف‌های هرز از تاریخ کاشت تا برداشت دو بار انجام شد. آبیاری بر اساس ۵۵ تا ۶۵ درصد تخلیهٔ آب قابل استفاده گیاه انجام گرفت. روش کار بدین‌صورت بود که با اندازه‌گیری منظم رطوبت خاک در زمان قبل از آبیاری، میزان رطوبت خاک پای ریشهٔ گیاه (این عمق بین ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متر خاک از سطح زمین فرض شد) محاسبه می‌شد. هنگامی‌که رطوبت خاک به ۵۵ تا ۶۵ درصد آب قابل استفاده گیاه می‌رسید، آبیاری انجام می‌گرفت.

اطلاعات ورودی مدل آکواکراپ، شامل اطلاعات اقلیم، خاک، مدیریت و خصوصیات گیاه است. شبیه‌سازی در مدل آکواکراپ در چهار گام انجام می‌شود. گام اول شبیه‌سازی توسعهٔ گیاه، گام دوم شبیه‌سازی تعرق گیاه، گام سوم شبیه‌سازی زیست تودهٔ (بیوماس) بالای سطح زمین و گام چهارم شبیه‌سازی عملکرد محصول (Steduto et al., 2009). جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل نیاز به برخی اطلاعات مزرعه‌ای بود که با خروجی مدل آکواکراپ مقایسه شود. این اطلاعات شامل مقادیر تبخیر–تعرق، زیست‌توده و عملکرد دانه بود. زیست‌تودهٔ گیاه گندم با برداشت نمونه‌های تصادفی ۰/۵×۰/۵ مترمربعی با دو تکرار در هر هکتار نمونه‌گیری تعیین شد. بدین‌ترتیب که نمونه‌ها از بالای

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

سطح خاک گرفته شد و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد در آون نگهداری شد و وزن آن‌ها پس از گذشت ۴۸ ساعت ثبت شد. برای اندازه‌گیری عملکرد دانه در مزارع چهار نمونه در پایان فصل رشد در زمان رسیدن دانه گرفته شد. نمونه‌ها جهت تعیین عملکرد دانه در کادر ۰/۵×۰/۵ مترمربعی گرفته شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی لایه‌های مختلف خاک محل اجرای طرح

Table 1- Physical properties of different soil layers in the study site

عمق (سانتی‌متر)	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ظرفیت نگه‌داری آب خاک (برحسب درصد وزنی)	ضریب نقطهٔ پژمردگی (برحسب درصد وزنی)	بافت خاک	دانه‌بندی خاک (بر حسب درصد)		
					شن	سیلت	رس
0-25	1.76	17.8	9.3	لومی	18	35	47
25-50	1.64	20.9	11.8	لومی	15	50	35
50-75	1.71	20.5	11.2	لومی	15	38	47
75-100	1.86	26.0	15.5	سیلتی لومی	7	54	39

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی خاک محل اجرای طرح

Table 2- Chemical soil properties in the study site

Depth (cm)	PH	SP	Ec($\times10^3$)	N	O.C	K	P	SAR	Ma^{++}	Ca^{++} Mg
سانتی‌متر				درصد		پی پی ام		–	میلی‌گرم بر لیتر	
0-30	8	41.5	0.86	0.05	0.5	225	8	3.8	6	5.2

۲-۲- مدل آکواکراپ

مدل آکواکراپ به‌عنوان یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد، براساس رطوبت موجود در خاک به خوبی اثر تنش آبی بر مادهٔ خشک و عملکرد دانهٔ تولیدی گیاه را در سراسر دورهٔ رشد به‌صورت دقیق مد نظر قرار می‌دهد. علاوه‌بر این، مدل آکواکراپ دارای یک تابع برای شاخص برداشت است. این مدل به کاربر اجازه می دهد که از هر یک از روابط موجود برای تخمین تبخیر–تعرق در یک منطقهٔ خاص با لحاظ تغییرات مربوط به واسنجی این معادلات در آن منطقه استفاده کند. تفکیک تبخیر–تعرق به دو بخش تبخیر از خاک و تعرق از گیاه و کاربرد پوشش تاجی به‌جای شاخص سطح برگ، دو تفاوت عمدهٔ این مدل با سایر مدل‌ها است. شبیه‌سازی در مدل آکواکراپ و روابط مورد استفاده در چهار گام به‌صورت زیر است (Steduto et al., 2009):

گام اول شبیه‌سازی توسعهٔ گیاه: در شبیه‌سازی توسعهٔ گیاه، گسترش پوشش تاجی گیاه از توسعهٔ منطقهٔ ریشه مجزا می‌شود. این تفکیک از طریق تفکیک تنش رطوبتی بین این دو بخش از گیاه انجام می‌پذیرد. پوشش تاجی از صفر تا یک مقدار حداکثر تغییر می‌کند. توسعهٔ پوشش تاجی در شرایط بدون تنش به سه عامل بستگی دارد: پوشش تاجی اولیه بلافاصله پس از جوانه‌زنی، پوشش تاجی حداکثر و ضریب رشد پوشش تاجی. در این گام، ضریب کاهش پوشش گیاهی و ضریب تنش توسعهٔ پوشش تاجی (K_{sexp}) نیز وارد می‌شود.

گام دوم شبیه‌سازی تعرق گیاه: تعرق گیاه از ضرب کردن تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه مرجع (به روش پنمن–مانتیث) در ضریب گیاهی از طریق رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$T_r = K_s(K_{CTR,x}CC^*)ET_O \quad (۱)$$

در رابطهٔ فوق، K_s ضریب تنش توسعهٔ پوشش تاجی، $K_{CTR,x}$ ضریب گیاهی تعرق، CC^* پوشش تاجی تعدیل شده و ET_o تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه مرجع است.

گام سوم، شبیه‌سازی زیست‌تودهٔ بالای سطح زمین: از مقدار تجمعی تعرق گیاه از طریق رابطهٔ زیر حاصل می‌شود:

$$B = K_{sb}WP^* \sum \frac{T_r}{ET_o} \quad (۲)$$

در این رابطه، B عملکرد روزانهٔ زیست‌توده، K_{sb} ضریب تنش کاهش دما که کاهش زیست‌توده را سبب می‌شود، WP^* مقدار نرمال شدهٔ بهره‌وری آب زیست‌توده، T_r تعرق روزانه و ET_o تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه مرجع است. مقدار WP^* به تبخیرپذیری اتمسفر در قالب ET_o و غلظت CO_2 هوا بستگی دارد. این دو عامل تأثیر مهمی بر بهره‌وری آب دارند که در قالب بیوماس تولیدی به تعرق بیان می‌شود. نرمال نمودن WP انحرافات مکانی و زمانی (فصلی) را از بین می‌برد. نرمال‌کردن نیاز تبخیری نیز با تقسیم تعرق روزانه بر ET_o روزانه حاصل می‌شود.

گام چهارم شبیه‌سازی عملکرد محصول: پس از شبیه‌سازی مقدار زیست‌تودهٔ تولید شدهٔ بالای سطح زمین، مقدار محصول با استفاده از شاخص برداشت به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$Y = f_{HI} HI_o B \quad (۳)$$

در رابطهٔ فوق، Y عملکرد، f_{HI} ضریب تنظیم اثر تنش آب یا دما، HI_o شاخص برداشت مرجع در شرایط بدون تنش و B مقدار زیست‌توده است.

سیستم اطلاعات گیاه از چهار بخش فنولوژی گیاه، تعرق گیاه، بیوماس، عملکرد قابل برداشت و تنش‌ها تشکیل شده است. تنش‌های مدل شامل تنش آبی، تنش حاصل‌خیزی، تنش دمایی و تنش شوری می‌باشند. داده‌های گیاهی مورد نیاز مدل، شامل پارامترهای ثابت و ویژهٔ کاربر است. مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کند و برای گیاهان زراعی مهم به منزلهٔ پیش فرض در مدل وجود دارد. علاوه بر پارامترهای ثابت، برخی دیگر اطلاعات مورد نیاز برای اجرای شبیه‌سازی، به گونه و محصول زراعی بستگی دارد یا طبق شرایط مدیریتی و محیطی مختلف، مقادیر متفاوتی را داراست که پارامترهای مخصوص کاربر نامیده می‌شود. از جملهٔ این پارامترها می‌توان تاریخ و تراکم کشت، زمان رسیدن مراحل فنولوژیکی گیاه و حداکثر عمق ریشه را نام برد که برای هر ناحیه و محصول با توجه به شرایط آن، متغیر است و توسط کاربر تعیین می‌شود (Steduto et al., 2009).

۲-۳- تحلیل حساسیت

برای تحلیل حساسیت از رابطهٔ زیر استفاده شد (Araya et al., 2016):

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

در این رابطه، S_c ضریب حساسیت (بدون بعد)، P_m مقدار برآورد شدهٔ پارامتر مورد نظر بر اساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد آن پارامتر بر اساس داده‌های ورودی پایه است. به این ترتیب که در هر مرحله یکی از عوامل ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد کاهش و افزایش داده شد و بقیهٔ پارامترها ثابت گرفته می‌شد تا حساسیت مدل نسبت به آن پارامتر تعیین شود. بر اساس این روش، $S_c>۱۵$ نشان‌گر حساسیت بالا، $۱۵>S_c>۲$ حساسیت متوسط و $S_c<۲$ حساسیت پایین است.

۲-٤- واسنجی و صحت‌سنجی مدل

در هر مدل، عملیاتی بنام واسنجی جهت تنظیم عوامل به‌کار رفته در مدل برای رسیدن به حد مطلوب پیش‌بینی ضروری است. هدف از واسنجی مدل، تنظیم ورودی‌های گیاهی مدل است که باید مقادیر حاصل از پیش‌بینی مدل با مقادیر مشاهده‌ای، کم‌ترین اختلاف را با هم داشته باشند. این عمل با تغییر مقادیر ورودی مدل و مقایسهٔ نتایج حاصله از این مقادیر با مقادیر اندازه‌گیری شده انجام می‌شود. تغییر مقادیر مدل بایستی در محدودهٔ مجاز بر اساس دستورالعمل راهنمای مدل بوده و نباید آن‌قدر زیاد باشد که صحت نتایج مدل فقط در آن شرایط صدق کند و با تغییر شرایط، نتایج نامناسبی از مدل حاصل نشود.

در این پژوهش، اطلاعات سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ به‌عنوان مبنای واسنجی مدل و اطلاعات سال‌های زراعی دوم (۱۳۹۶-۱۳۹۵) و سوم (۱۳۹۷-۱۳۹۶) به‌عنوان مبنای صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد. در ابتدا، مدل با تغییر حداکثر پوشش تاجی، بهره‌وری آب نرمال شده، شاخص برداشت مرجع، حداکثر ضریب تعرق و حداکثر عمق ریشه واسنجی شد. به طوری‌که خطای نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شدهٔ پوشش تاجی، زیست‌توده و عملکرد، حداقل شود. سپس تغییر ضرایب تنش آبی برای توسعهٔ پوشش تاجی، بسته شدن روزنه‌ها و پیری برای واسنجی به‌کار رفت. در مرحلهٔ بعد، پس از تحلیل حساسیت، مدل نسبت به پارامترهای ورودی خاک، آب و اقلیم جهت شبیه‌سازی تبخیر-تعرق واسنجی شد، به طوری‌که خطای نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، حداقل شود. هم‌زمان بایستی خطای نسبی بین زیست‌توده و عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، نیز حداقل می‌شد.

۲-۵- کاربرد مدل صحت‌سنجی شده در سناریوهای مختلف

مدل آکواکراپ صحت‌سنجی شده، برای برآورد تأثیر سه تاریخ کشت و سه حالت کم‌آبیاری بر عملکرد دانهٔ محصول گندم به‌کار رفت. در این مرحله، متوسط اطلاعات منطقه‌ای اطراف مزارع به‌کار رفت تا اجرای مدل منحصر به شرایط یک مزرعه خاص نباشد. بر اساس سوالات مطرح شده از متخصصین مجرب کشاورزی در مراکز تحقیقاتی کشاورزی و کشاورزان پیش‌رو در مناطق مورد مطالعه، دو عامل اولیهٔ مهم برای دست‌یابی به تولید بهینه در شرایط فعلی کشور مطرح شد؛ یکی تاریخ کاشت و دیگری مقدار آبیاری بر اساس اطلاعات محلی در مورد تاریخ کاشت، سه تاریخ کشت T1، T2، T3 به‌ترتیب مقارن با ۱۵ آبان ماه، ۱۵ آذر ماه و ۱۵ دی ماه، به‌ترتیب به‌عنوان تاریخ کشت زودهنگام، متوسط و دیرهنگام انتخاب شد. هم‌چنین، سه مقدار آبیاری d1، d2، d3 به‌ترتیب به میزان ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی، به‌عنوان مقادیر مختلف حالت کم‌آبیاری در مناطق مورد مطالعه در نظر گرفته شد. مقدار آب آبیاری ۵۵۰۰ مترمکعب در هکتار به‌عنوان مقدار کل آب لازم و مقادیر بلندمدت عوامل هواشناسی در منطقه به‌کار گرفته شد. خصوصیات خاک لومی نیز به‌ترتیب به‌عنوان خاک غالب، در مدل به‌کار رفت. سال‌های مختلف از نظر بارش در هر منطقه بر اساس بارندگی همان منطقه، به سه گروه طبقه‌بندی شد. بدین‌ترتیب که بر اساس روش چارک‌بندی، سال‌هایی با مقدار بارندگی بیش از چارک سوم

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

به‌عنوان سال مرطوب، بین چارک دوم و سوم به‌عنوان سال معمولی و کم‌تر از چارک دوم به‌عنوان سال خشک در نظر گرفته شد.

۲-٦- شبیه‌سازی آب مجازی

در این مطالعه، آب مجازی یا کل مقدار آب مصرفی در زنجیرهٔ تولید برای پدیدآوری نهایی یک محصول بررسی شد. آب مجازی را بر حسب نوع آب به‌صورت مختلفی بیان می‌کنند. از آن جمله می‌توان به مقدار آب مجازی آبی و سبز که بیش‌تر در کشاورزی اهمیت دارند اشاره کرد (Ababaei et al., 2017).

$$VW_{Green/Blue} = \frac{CWU_{Green/Blue}}{Y} \quad (۵)$$

در آن، $VW_{Green/Blue}$ مقدار آب مجازی سبز یا آبی (مترمکعب بر کیلوگرم)، CWU آب مصرفی (مترمکعب) و Y مقدار محصول دانه (یا زیست‌توده) (کیلوگرم) است. آب مصرفی در تعیین آب مجازی آبی فاریاب برابر مقدار آبیاری و در تعیین آب مجازی سبز فاریاب و دیم برابر باران مؤثر است. باران مؤثر با استفاده از روش USDA و از رابطهٔ (۶) تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} R_e &= R(125 - 0.2R)/125 \,, R \le 250 \\ R_e &= 125 + 0.1R \qquad\quad , R > 250 \end{aligned} \quad (۶)$$

در آن، R باران ماهانه و R_e باران مؤثر ماهانه بر حسب میلی‌متر هستند.

۲-۷- ارزیابی مدل

برای ارزیابی نتایج حاصل از مدل آکوکراپ، در شبیه‌سازی تبخیر–تعرق، زیست‌توده، عملکرد دانه و بهره‌وری آب در این پژوهش از آماره‌های زیر استفاده شد:

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{n}} \quad (۷)$$

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

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i \sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} O} \quad (۹)$$

$$d = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|O_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (۱۰)$$

در روابط بالا به‌طوری‌که O_i و P_i به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد مشاهدات است. هرچه مقدار NRMSE (مقدار نرمال شدهٔ میانگین مربعات خطا) کوچک‌تر و به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهندهٔ نزدیکی مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده است. مقادیر CRM (خطای نسبی) نشان‌گر اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است که هرچه کوچک‌تر باشد این اختلاف کم‌تر است. مقادیر نزدیک به یک R^2 (ضریب تعیین) و d (شاخص توافق) نیز، نشان‌گر نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده است.

۳-نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل حساسیت

در جدول ۳ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی گندم آمده است. از حیث عوامل هواشناسی بررسی شده، مدل نسبت به دمای حداکثر و حداقل، حساسیت متوسط و نسبت به بارندگی حساسیت کمی دارد. تغییر دمای حداکثر در این منطقه در حد متوسط خطای حاصل از شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد. در خصوص پارامترهای خاک، حساسیت مدل نسبت به رطوبت ظرفیت زراعی، نقطهٔ پژمردگی، رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع خصوصا در شرایط اشباع در حد کم تا متوسط است. بیش‌ترین حساسیت مدل آکواکراپ، نسبت به تغییر شاخص برداشت مرجع بود. مدل، نسبت به کاهش این پارامتر حساسیت بالایی دارد و باید در واسنجی آن دقت نمود. پس از آن، بهره‌وری آب نرمال شده و ضریب گیاهی تعرق دارای حساسیت بالایی است و خطا در اندازه‌گیری این پارامترها باعث بروز خطا در شبیه‌سازی می‌شود. این مدل دارای حساسیت کم نسبت به ضریب رشد پوشش، حد بالای آستانهٔ دما و زمان کاشت تا جوانه‌زنی است. با توجه به مقایسهٔ نتایج تحلیل حساسیت در این پژوهش و مطالعات انجام شدهٔ قبلی (Salemi et al., 2011; Mohammadi et al., 2015; Ebrahimipak et al., 2018) مشخص می‌شود که مدل آکوکراپ، حساسیت بالایی نسبت به پارامترهای ضریب گیاهی تعرق، بهره‌وری آب نرمال شده و شاخص برداشت مرجع دارد.

۳-۲- واسنجی مدل آکواکراپ

با توجه به اطلاعات محلی رشد گندم در این مطالعه و اندازه‌گیری‌های برخی از عوامل در محدوده، مقادیر عوامل واسنجی مدل آکواکراپ تعیین شد که در جدول ۴ آمده است. این مقادیر، در محدودهٔ مقادیر مطالعات قبلی و مقادیر مرجع مدل آکواکراپ در مورد گیاه گندم است (Steduto et al., 2009; Andarzian et al., 2011).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۳ – ضریب حساسیت برخی از عوامل ورودی مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی گندم

Table 3- Sensitivity coefficients of some input variables of AquaCrop in wheat simulation

پارامتر ورودی	مقدار Sc در 25- درصد	مقدار Sc در 25- درصد	درجهٔ حساسیت
دمای حداقل	1.9	1.6	کم
دمای حداکثر	0.8	3.1	کم–متوسط
بارندگی	0.5	0.6	کم
رطوبت ظرفیت زراعی	14.2	1.9	متوسط–کم
رطوبت نقطهٔ پژمردگی	1.8	1.5	کم
رطوبت اشباع	0.3	0.5	کم
هدایت هیدرولیکی اشباع	0.1	0.2	کم
ضریب گیاهی تعرق (KcTrx)	12.4	18.3	متوسط–بالا
عمق مؤثر ریشه	2.5	0.8	متوسط–کم
حداکثر پوشش تاجی	6.9	5.3	متوسط
ضریب رشد پوشش (CGC)	1.5	0.7	کم
بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*)	19.3	14.9	بالا–متوسط
شاخص برداشت مرجع (HI_o)	21.2	18.9	بالا
زمان کاشت تا جوانه‌زنی	1.1	0.8	کم
زمان کاشت تا حداکثر پوشش	5.3	4.2	متوسط
زمان کاشت تا گلدهی	2.8	2.9	متوسط
زمان کاشت تا پیری	1.8	5.2	کم–متوسط
طول دورهٔ گلدهی	5.9	7.1	متوسط
حدآستانهٔ بالای دما	0.4	0.1	کم

جدول ٤- عوامل گیاهی به‌کار رفته در مدل آکواکراپ برای گندم در مرحلهٔ واسنجی

Table 4- Plant parameters of wheat used in AquaCrop in the calibration stage

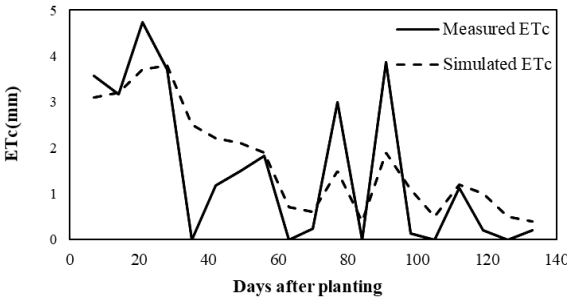
عامل	واحد	مقدار
دمای پایه (T_{base})	درجهٔ سانتی‌گراد	0
دمای بالا (T_{upper})	درجهٔ سانتی‌گراد	26
حداکثر عمق ریشه	متر	1
حداقل عمق ریشه	متر	0.3
پوشش کانوپی اولیه در زمان تکمیل ۹۰ درصد سبز شدن CC_0	درصد	1.5
ضریب رشد پوشش تاجی CGC	درجه بر روز	0.8
ضریب کاهش پوشش تاجی CDC	روز	6
حداکثر پوشش تاجی	درصد	90
شاخص برداشت مرجع	درصد	45
بهره‌وری آب نرمال شده	گرم بر مترمربع	15
ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل $K_{C\ Tr,X}$	–	1.1
آستانهٔ بالای تخلیهٔ رطوبتی خاک برای گسترش کانوپی P_{upper}	–	0.2
آستانهٔ پایین تخلیهٔ رطوبتی خاک برای گسترش کانوپی P_{lower}	–	0.65
عامل شکل ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی	–	5
آستانهٔ بالای ضریب تخلیهٔ رطوبتی خاک برای کنترل روزنه‌ها	–	0.65
عامل شکل ضریب تنش آبی خاک برای کنترل روزنه‌ها	–	2.5
آستانهٔ بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه	–	0.7
ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه	–	2.5
زمان کاشت تا ظهور جوانه	روز	12
زمان کاشت تا گلدهی	روز	95
زمان کاشت تا رسیدن	روز	110
زمان کاشت تا بلوغ	روز	145

در شکل ۱ نتایج مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شدهٔ تبخیر–تعرق با مدل آکواکراپ آمده است. آکواکراپ روند تغییرات تبخیر–تعرق را به خوبی پیش‌بینی نموده است. در جدول ۵ آماره‌های مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شدهٔ تبخیر–تعرق، زیست‌توده و عملکرد در مرحلهٔ واسنجی ارائه شده است. با توجه به مقادیر جدول ۵، مدل با دقت بالایی این دو عامل را شبیه‌سازی نموده است. در پژوهشی، Mohammadi et al. (2015) نشان دادند که مدل آکواکراپ دارای دقت بالایی در تخمین مقادیر عملکرد کشت گندم در مشهد دارد. مقادیر NRMSE و d مربوط به شبیه‌سازی در آن پژوهش به‌ترتیب ۰/۱۲ و ۹۳ درصد بود. هم‌چنین، Andarzian et al. (2011) با کاربرد مدل آکواکراپ، رطوبت ناحیهٔ ریشهٔ گندم در اهواز را با

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

دقت بالایی شبیه‌سازی کردند. مقادیر NRMSE گزارش شده در آن پژوهش کم‌تر از ۱۰ درصد بود. مقدار CRM گزارش شده در مراکش توسط Toumi et al. (2016)، در برآورد آب خاک با مدل آکواکراپ ۰/۱۷ بود. در شبیه‌سازی عملکرد با مدل آکواکراپ نیز Mohammadi et al. (2015) مقادیر R^2 را نزدیک مقادیر مطالعهٔ حاضر گزارش نمودند. در مطالعهٔ Mkhabela and Bullock (2012) با شبیه‌سازی عملکرد گندم در کشور کانادا مقادیر d برابر ۰/۹۹ و R^2 برابر ۰/۹۰ به‌دست آمد که دقت بالاتری از پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. البته مقادیر d در پژوهش Anjum Iqbal et al. (2014) در شبیه‌سازی مقادیر با مدل آکواکراپ بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۰ به‌دست آمد که به مقادیر حاصله از این پژوهش نزدیک است.



شکل ۱- مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل آکواکراپ در مرحلهٔ واسنجی در سال زراعی اول

Figure 1- Measured and AquaCrop simulated evapotranspiration in the calibration stage in the 1999-2000 growing season

جدول ٥- آماره‌های مقایسهٔ بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شدهٔ گندم با مدل آکواکراپ در مرحلهٔ واسنجی

Table 5- Statistical comparison between measured and simulated biomass and yield of wheat in the calibration stage

آماره‌ها	واحد	زیست‌توده	عملکرد دانه	تبخیر-تعرق
CRM	درصد	-0.15	0.02	0.09
NRMSE	-	0.17	0.15	0.11
d	درصد	92	90	91

۳-۳- صحت‌سنجی مدل

مدل آکواکراپ با در نظر گرفتن عوامل واسنجی جدول ۴ و ورود اطلاعات هواشناسی، خاک، آب و گیاه منطقه در سال‌های دوم و سوم زراعی صحت‌سنجی شد. در جدول ۶ عوامل آماری مقایسهٔ بین مقادیر زیست‌توده، عملکرد و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده با مدل آکواکراپ، در مرحلهٔ صحت سنجی آمده است.

جدول ٦- آماره‌های مقایسهٔ بین مقادیر زیست‌توده، عملکرد دانه و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شدهٔ گندم در مرحلهٔ صحت‌سنجی

Table 6- Statistical comparison between measured and simulated biomass, grain yield, and water productivity of wheat in the validation stage

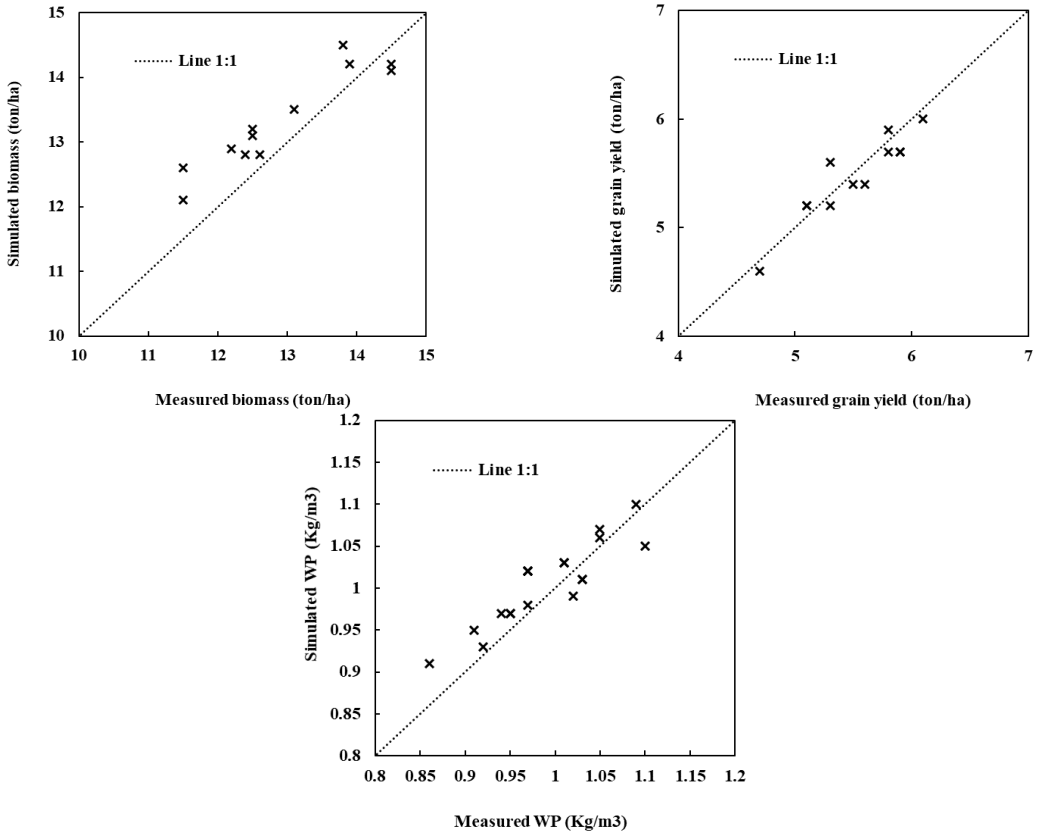
آماره‌ها	واحد	زیست‌توده	عملکرد دانه	بهره‌وری آب
CRM	درصد	-0.10	-0.03	-0.05
NRMSE	-	0.24	0.06	0.11
d	درصد	92	80	81

با توجه به مقادیر جدول ۶، مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده دقت بالاتری از عملکرد دانه و بهره‌وری آب داشته است. مدل، دارای مقادیر ناچیز بیش برآوردی و کم برآوردی بوده است که بیش‌ترین مقدار در حالت بیش برآوردی مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده بوده است (CRM=۰/۱۰-). مقدار ضریب باقی‌مانده در شبیه‌سازی عملکرد گندم در کانادا ۰/۰۳ گزارش شده بود (Mkhabela and Bullock, 2012). شاخص سازگاری d در بیش‌تر حالات مقدار بالایی را نشان داده است و کم‌ترین مقدار آن ۷۱ درصد در شبیه‌سازی عملکرد دانه بوده است برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده Hussein et al. (2011) مقادیر d را، ۰/۹۸ گزارش نمودند. مقدار d در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌تودهٔ گندم در مشهد نیز بین ۹۸-۹۰ درصد گزارش شده است (Mohammadi et al., 2015). هم‌چنین، Alizadeh et al. (2020) در شبیه‌سازی عملکرد گندم با مدل آکواکراپ در کرج، مقادیر NRMSE را کم‌تر از ۰/۱۹ و مقدار d را ۰/۹۶ گزارش نمودند. در اهواز نیز Andarzian et al. (2011) در شبیه‌سازی با مدل آکواکراپ مقادیر NRMSE را کم‌تر از ۱۰ درصد بیان نمودند. در مطالهٔ دیگر، Khalili et al. (2014) مقادیر NRMSE و d را در شبیه‌سازی عملکرد گندم با کاربرد داده‌های پنج سال زراعی در سیساب خراسان به‌ترتیب ۰/۰۵ و ۸۷ درصد ارائه نمودند. مقادیر NRMSE در پژوهش حاضر در همهٔ موارد کم‌تر از ۰/۳ بوده که دقت تخمین در این محدوده قابل‌قبول است. مقادیر کم‌تر از ۰/۲ این آماره نیز دقت بالای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. نتایج مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شدهٔ زیست‌توده، عملکرد و بهره‌وری آب نیز در شکل ۲ آمده است. نزدیکی مقدار R^2 به یک و پراکندگی نقاط حول خط یک به یک، نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها، دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه کم‌تر از زیست‌توده بوده است. در این راستا، Mohammadi et al. (2015) در شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد گندم، مقادیر ۰/۶۹ تا ۰/۹۴ را برای R^2 گزارش نمودند در حالی‌که مقدار این آماره در شبیه‌سازی عملکرد گندم در کانادا توسط Mkhabela and Bullock (2012) برابر با ۰/۶۹ به‌دست آمد. مقادیر زیست‌توده، عملکرد دانه و بهره‌وری آب اندازه‌گیری و

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

شبیه‌سازی شده، نزدیک خط یک به یک پراکندگی دارند و در هر سه پارامتر ضریب تعیین نمودار نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مقایسهٔ مقادیر زیست‌توده و عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شدهٔ گندم

Figure 2- Comparison of measured and simulated biomass and yield of wheat

۳-٤- کاربرد مدل در سناریوهای مختلف

مقادیر زیست‌توده، عملکرد دانه و بهره‌وری آب حاصل از اجرای مدل، در سه تاریخ کشت ۱۵ آبان‌ماه ، ۱۵ آذرماه و ۱۵ دی‌ماه و سه حالت آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی در شکل ۳ آمده است. مطابق شکل ۳، در تمام حالات آبیاری، با نزدیک شدن تاریخ کشت از ۱۵ آبان به ۱۵ دی، عملکرد دانه کاهش یافته است. تاریخ کاشت تا ۱۵ آبان عملکرد بالاتری را دربردارد و تأخیر بیش از این تاریخ در کاشت گندم، کاهش عملکرد را دربردارد. بر اساس اطلاعات محلی مدیریت جهاد کشاورزی، زارعین از ۲۵ مهر تا ۳۰ آبان اقدام به کشت گندم می‌نمایند. با توجه به نتایج حاصله از مدل و اطلاعات محلی کارشناسان جهاد کشاورزی، تاریخ کشت از ۲۵ مهر تا ۱۵ آبان توصیه می‌شود.

در بررسی یک دورهٔ آماری ۲۰ ساله (۱۳۹۵-۱۳۷۵)، در سال‌های مرطوب، کاهش ۲۵ درصدی آب آبیاری، عملکرد دانه را ۱۵-۱۰ درصد کاهش داد، در حالی‌که با ۵۰ درصد کاهش آبیاری، عملکرد دانه ۲۰-۱۵ درصد کاهش یافت. در سال‌های نرمال کاهش ۲۵ درصدی آب آبیاری، عملکرد دانه را ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش داد در حالی‌که با ۵۰ درصد کاهش آبیاری، عملکرد دانه ۲۰ تا ۲۵ کاهش یافت. در سال‌های خشک نیز، با کاهش ۲۵ درصدی آب آبیاری، عملکرد دانه ۲۵ تا ۲۸ درصد کاهش نشان داد و با کاهش ۵۰ درصدی آب آبیاری، عملکرد دانه ۴۵-۳۵ درصد کاهش یافت. در پژوهشی، Mohammadi et al. (2015) و Andarzian et al. (2011) نیز در ارزیابی مدل آکواکراپ در گیاه گندم، کاهش عملکرد در شرایط تنش آبی را گزارش کرده بودند. هم‌چنین، Alizadeh et al. (2010) در شبیه‌سازی عملکرد گندم گزارش نمودند که با افزایش تنش آبی مقدار عملکرد و دقت مدل کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۳، درصد کاهش زیست‌توده، عملکرد و بهره‌وری آب با افزایش کم‌آبیاری، از سال مرطوب به سال خشک بیش‌تر است. از طرف دیگر، تغییر تاریخ کشت در سال‌های خشک اثرات مخرب‌تری در اجزای محصول نسبت به سال‌های مرطوب دارد. در همهٔ حالات نیز تأثیرات

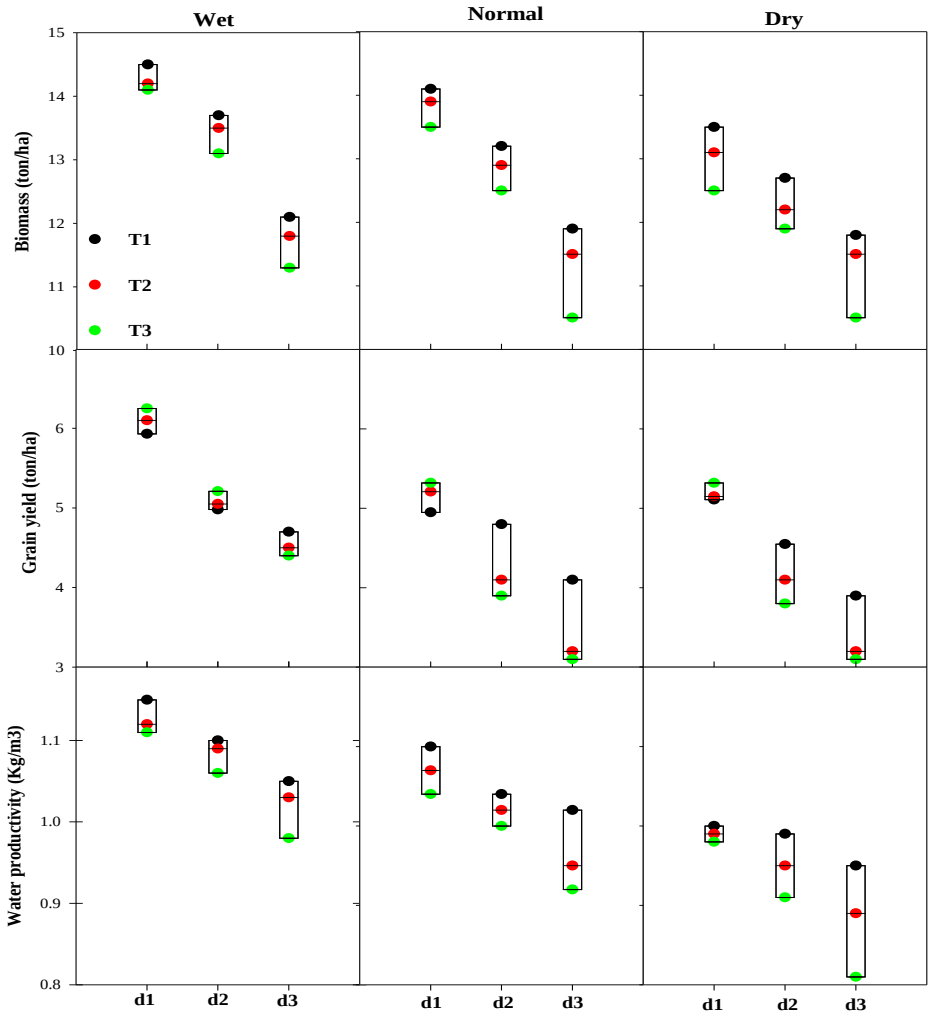
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

کم‌آبیاری بالا در اختلاف عملکرد در تاریخ‌های مختلف کشت مشهود است.

۳-۵- تعیین مقدار آب مجازی

با توجه به مقدار کل بارندگی ۲۷۳ (سال اول)، ۲۷۸ (سال دوم) و ۲۸۹ (سال سوم) میلی‌متر، در سه سال زراعی مورد بررسی، مقدار باران مؤثر با روش USDA در کل دورهٔ رشد به میزان ۱۵۳۰، ۱۵۹۰ و ۱۶۲۰ مترمکعب در هکتار برآورد شد. مقادیر آب مجازی آبی و سبز اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل آکواکراپ در جدول ۷ آمده است. مقادیر این جدول با مقادیر به‌دست آمدهٔ آب مجازی آبی و سبز توسط Ababaei et al. (2017) هم‌خوانی دارد. با توجه به مقادیر خطاهای نسبی در این جدول، مقادیر آب مجازی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در سال اول مطالعه، به هم نزدیک‌ترند. حداکثر آب مجازی آبی لازم جهت تولید محصول، در سال سوم مطالعه حاصل شده است. حداکثر آب مجازی سبز جهت تولید محصول که مقدار کاربرد آب باران را نشان می‌دهد نیز در سال سوم مطالعه بوده است. مدل در سال اول و دوم مطالعه دارای کم برآوردی و در سال سوم مطالعه دارای بیش برآوردی بوده است.



شکل ۳- مقادیر زیست‌توده، عملکرد دانه و بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده با مدل آکواکراپ در تاریخ‌های مختلف کشت گندم (T1، T2 و T3 به‌ترتیب ۱۵ آبان، ۱۵ آذر و ۱۵ دی) و کاربرد مقادیر مختلف آب آبیاری (d1، d2، d3 به‌ترتیب به میزان ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی) در سال‌های مرطوب، نرمال و خشک

Figure 3- AquaCrop biomass, grain yield, and water productivity simulation in different planting dates of wheat(T1, T2, and T3 are 5 November, 5 December, and 5 January, respectively) and using different values (d1, d2, and d3 are the 100, 75 and 50 percent of irrigation requirement) in wet, normal and dry years

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۷- مقادیر آب مجازی محاسبه شده و برآورد شده توسط مدل آکواکراپ

Table 7- Measured and AquaCrop estimation of virtual water

آزمایش		مقدار آب مجازی آبی (مترمکعب بر کیلوگرم)	خطای نسبی (CRM)	مقدار آب مجازی سبز (مترمکعب بر کیلوگرم)	خطای نسبی (CRM)
سال زراعی اول	اندازه‌گیری	0.78	0.10	0.33	0.12
	شبیه‌سازی	0.71		0.29	
سال زراعی دوم	اندازه‌گیری	0.43	0.26	0.61	0.25
	شبیه‌سازی	0.32		0.46	
سال زراعی سوم	اندازه‌گیری	0.87	-0.79	1.02	-0.83
	شبیه‌سازی	1.56		1.87	

٤- نتیجه‌گیری

ارزیابی مدل آکواکراپ برای گیاهان رایج در یک منطقه نقش مهمی در مقایسهٔ عملکرد محصول در شرایط مختلف دارد. در این پژوهش توانایی مدل آکواکراپ در برآورد عملکرد و زیست‌تودهٔ گندم در اسماعیل‌آباد قزوین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی این عوامل است. دقت مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده بیش‌تر از عملکرد بود. با اجرای مدل واسنجی شده در سناریوهای مختلف اقلیمی، تاریخ کشت و کم‌آبیاری در دو منطقه، مشخص شد جهت دست‌یابی به عملکرد بهینه، تاریخ کشت گندم نباید از ۱۵ آبان تجاوز کند. هم چنین مشخص شد کاهش ۲۵ درصدی آب آبیاری اجزای عملکرد در سال‌های مرطوب، نرمال و خشک را به‌ترتیب ۱۵، ۲۰ و ۲۸ درصد و کاهش ۵۰ درصدی آب آبیاری، مقدار آن را به‌ترتیب تا ۲۰، ۲۵ و ۴۵ درصد کاهش می‌دهد.

مدل آکواکراپ مدلی فراگیر و قابل استفاده در گیاهان مختلف است و با وجود سادگی و نیاز به اطلاعات ورودی کم، دارای دقت بالایی در شبیه‌سازی است و می‌توان از آن برای مدیریت آبی و زراعی مزارع گندم در سناریوهای مختلف آب، خاک، اقلیم و گیاه استفاده نمود.

هدف از این بررسی، رسیدن به یک دقت مناسب، همراه با عدم نیاز به کاربرد ضرایب واسنجی با صرف زمان طولانی در مدل آکواکراپ بود تا بتوان یک مدل واسنجی شده را در بسیاری از مناطق با دقت مناسبی به‌کار برد. مقایسهٔ پارامترهای آماری به دست آمدهٔ این مطالعه با مطالعات قبلی روی مدل‌سازی عملکرد گندم توسط مدل آکواکراپ نشان می‌دهد که نتایج این مطالعه در محدوده‌ای قابل‌قبول، هم‌سو با مطالعات پیشین است. این مطلب کاربرد مدل واسنجی شده در این منطقه را حمایت می‌کند. از محدودیت‌های این مدل آن است که جهت حصول دقت بیش‌تر در نتایج شبیه‌سازی شده، کاربرد عوامل واسنجی بیش‌تری مورد نیاز است، اما مشخص است که کاربرد عوامل واسنجی بیش‌تر، نیاز به صرف زمان و هزینهٔ بیش‌تری دارد. پیشنهاد می‌شود یک مدل واسنجی شدهٔ عمومی قابل کاربرد در مناطق بزرگ واسنجی شده و به‌عنوان راه‌کار مناسبی در مدیریت محصول در مقیاس مزرعه‌ای تا منطقه‌ای به‌کار رود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از داوران گرامی و سردبیر محترم نشریه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

امکان دسترسی به داده‌ها از طریق مکاتبه با نویسندهٔ مسئول مقاله میسر است.

مشارکت نویسندگان

محمدهادی جرعه‌نوش: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله؛ **اصلان اگدرنژاد:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **محمدعلی شاهرخ نیا:** مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله؛ **نیازعلی ابراهیمی‌پاک:** مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله.

منابع

ابراهیمی‌پاک، نیازعلی، اگدرنژاد، اصلان، و خدادادی دهکردی، داود (۱۳۹۷). ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت تیمارهای کم‌آبیاری و کاربرد سطوح مختلف سوپرجاذب. *مهندسی آبیاری و آب*، ۸(۳۱)، ۱۶۶-۱۸۴.

احمدی، کریم، قلی‌زاده، حشمت اله، عبادزاده، حمیدرضا، کاظمیان، آرزو، حسین‌پور، ربابه، رفیعی، مریم، و عبدشاه، هلدا (۱۳۹۶). آمارنامه کشاورزی (محصولات زراعی). *وزارت جهاد کشاورزی*. www.maj.ir.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جرعه نوش، محمدهادی، برومندنسب، سعید، ناصری، عبدعلی، پاک پرور، مجتبی، و تقوائیان، صالح (۱۳۹۸). ارزیابی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم و تعیین تاریخ کشت در استان فارس. *مدیریت آب و آبیاری*، ۹(۱)، ۹۵-۱۰۷. doi:10.22059/jwim.2019.287266.701

حسن‌لی، محمد، افراسیاب، پیمان، و ابراهیمیان، حامد (۱۳۹۴). ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۶(۳)، ۴۸۷-۴۹۸. doi:10.22059/ijswr.2015.56738

خلیلی، نجمه، داوری، کامران، علیزاده، امین، کافی، محمد، و انصاری، حسین (۱۳۹۳) شبیه‌سازی عملکرد گندم با استفاده از مدل گیاهی آکواکراپ، مطالعه موردی ایستگاه تحقیقات کشاورزی سیساب، خراسان شمالی. *آب و خاک*، ۲۸(۵)، ۹۳۰-۹۳۹. doi:10.22067/jsw.v0i0.34927

خرسند، افشین، وردی نژاد، وحیدرضا، و شهیدی، علی (۱۳۹۳) ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم، رطوبت و شوری نیمرخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم آبی. *مدیریت آب و آبیاری*. ۴(۱)، ۸۹-۱۰۴. doi:10.22059/jwim.2014.51640

گلابی، منا، و ناصری، عبدعلی (۱۳۹۳). ارزیابی مدل آکواکراپ در پیش‌بینی عملکرد نیشکر و شوری پروفیل خاک تحت تنش شوری. *تحقیقات خاک و آب ایران*، ۴۶(۴)، ۶۸۵-۶۹۴. doi:10.22059/ijswr.2015.56792

علیزاده، حمزه علی، نظری، بیژن، پارسی‌نژاد، مسعود، رمضانی اعتدالی، هادی، و جانباز، حمیدرضا (۱۳۸۹) ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج. *آبیاری و زهکشی ایران*، (۴)، ۲۷۳-۲۸۳.

محمدی، مسعود، داوری، کامران، قهرمان، بیژن، انصاری، حسین، و حق‌وردی، امیر (۱۳۹۴). واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش همزمان شوری و خشکی. *پژوهش آب در کشاورزی*. ۲۹(۳)، ۲۷۷-۲۹۵. doi:10.22092/jwra.2015.103054

نیسی، کریم، اگدرنژاد، اصلان، عباسی، فریبرز (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)، ۲۶-۴۱. doi:10.22098/mmws.2022.10969.1093

References

Ababaei B., Abraha B., & Ramzani-Etedali H. (2017). Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agricultural Water Management*, *179*(30), 401-411. doi:10.1016/j.agwat.2016.07.016

Alizadeh, H.A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramzani Etedali, H., & Janbaz, H. (2010). AquaCrop evaluation in deficit irrigation in Karaj. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *4*, 273-283. [In Persian]

Abi-Saab, M.T., Todorovic, M., & Albrizio, R. (2014). Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models?. *Agriultural Water Management*, *147*, 21-33. doi:10.1016/j.agwat.2014.08.001

Abrha, B., Delbecque, N., Raes, D., Tsegay, A., Todorovic, M., Heng, L., Vanutrecht, E., Geerts, S., Garcia-Vila, M., & Deckers, S. (2012). Sowing strategies for barley (Hordeum Vulgare) based on modelled yield response to water with AquaCrop. *Experimental Agriculture*, *48*(2), 252-271. doi;10.1017/S0014479712000166

Ahmadi, K., Gholizadeh, H., Ebadzadeh, H., Kazemian, A., Hoseinpur, R., Rafiee, M., & Abdeshah, H. (2017). Iran agricultural statistics. Ministry of agriculture, IT center, from http://www. amar.maj.ir. [In Persian]

Amiri, E., Bahrani, A., Khorsand, A., & Haghjoo, M. (2016). Evaluating AquaCrop model performance to predict grain yield and wheat biomass, under water stress. *Water and Soil Knowledge*, *25*(4/2), 217-229. [In Persian]

Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100, 1-8. doi:10.1016/j.agwat.2011.08.023

Anjum Iqbal, M., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., Penas, A., & Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*, *135*, 61-72. doi:10.1016/j.agwat.2013.12.012

Araya, A., Kisseka, I., & Holman, J. (2016). Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrigation Science*, *34*(6), 465-481. doi:10.1007/s00271-016-0515-7

Ebrahimipak, N.A., Egdernezhad, A., & Khodadadi Dehkordi, D. (2018). Evaluation of AquaCrop Model to Simulate Corn Yield under Water

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

deficit and Superabsorbent application. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, *8*(31), 166-184. [In Persian]

Farahani H.J., Izzi, G., & Oweis, T.Y. (2009). Parameterization and evaluation of FAO AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, *101*(3), 469-476. doi:10.2134. doi:10.2134/agronj2008.0182s

Garcia-Vila, M., Fereres, M., Mateos, E., & L. Orgaz. (2009). Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agricultural Journal*, *101*(3), 477-487. doi:10.2134/agronj2008.0179s

Golabi, M., & Naseri A.A. (2016). Evaluating AquaCrop model performance to predict sugarcane yield and soil salinity, under water stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *46*(4), 685-694. doi:10.22059/ijswr.2015.56792. [In Persian]

Hassanli, M., Afrasiab, P., & Ebrahimian, H. (2015). Evaluation of AquaCrop vs SALTMED Models to Estimate Crop Yield and Soil Salinity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *46*(3), 487-498. doi:10.22059/ijswr.2015.56738

Hussein, F., Janat, M., & Yakoub, A. (2011). Simulating cotton yield response to defcit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *9*(4), 1319-1330. doi:10.5424/sjar/20110904-358-10

Jorenush, M.H., Broomand Nasab, S., Naseri, A.A., Pakparvar, M., & Taghvaeian, S. (2019). AquaCrop evaluation to simulate wheat production and plantig date in Fars province. *Journal of Water and Irrigation Management*, *9*(1), 95-107. doi:10.22059/jwim.2019.287266.701. [In Persian]

Khalili, N., Davari, K., Alizadeh, A., Kafi, M., & Ansari, H. (2014). Simulation of rainfed wheat yield using AquaCrop model, Case Study: Sisab Rainfed Researches Station, Northern Khorasan. *Journal of Water And Soil*, *28*(5), 930-939. doi:10.22067/jsw.v0i0.34927 [In Persian]

Khorsand, A., Verdinejad, V.R., & Shahidi, A. (2014). Evaluating AquaCrop model performance to predict wheat grain yield, moisture and soil salinity, under salinity and water stress. *Journal of Water and Irrigation Management*, *4*(1), 89-104. doi:10.22059/jwim.2014.51640 [in Persian]

Kim, D., & Kaluarachchi, J. (2015). Validating FAO AquaCrop using landsat images and regional crop information. *Agricultural Water Management*, *149*, 143-155. doi:10.1016/j.agwat.2014.10.013

Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D.K., & Parihar S.S. (2014). Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and productivity under irrigated saline regimes. *Irrigation and Drainage*, *63*, 474–487. doi:10.1002/ird.1841

Mkhabela, M.S., & Bullock, P.R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, *110*, 16–24. doi:10.1016/j.agwat.2012.03.009

Mohammadi, M., Ghahraman, B., Davari, K., Ansari, H., & Shahidi, A. (2015). Validation of AquaCrop model performance to simulate winter wheat grain yield and water use efficiency, under water and salinity stress. *Journal of Water Research in Agriculture*, *29*(1), 67-84. doi:10.22092/jwra.2015.103054. [In Persian]

Neysi, K., Egdernezhad, A., & Abbasi, F. (2023). Optimizing the consumption and distribution of nitrogen fertilizer for corn plants using response surface modeling. *Water and Soil Management Modelling*, *3*(4), 60-76. doi:10.22098/mmws.2022.10969.1093. [In Persian]

Paredes, P., Alves, I., & Pereira, L.S. (2014). Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yield and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*, *144*, 81-97. doi:10.1016/j.agwat.2014.06.002

Paredes, P., Wei, Z., Liu, Y., Xu, D., Xin, Y., Zhang, B., & Pereira, L.S. (2015). Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybean in north china plain. *Agricultural Water Management*, *152*, 57-71. doi:10.1016/j.agwat.2014.12.007

Pereira, L.S., Paula, P., Rodrigues, G.C., & Neves, M. (2015). Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. *Agriculture Water Management*, *159*, 239-254. doi:10.1016/j.agwat.2015.06.006

Salemi, H., Mohd Soom, M.A., Lee, T.S., Mousavi, S.F., Ganji, A., & KamilYusoff, M. (2011). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. *Agricuitural Water Management*, *161*, 136-146. doi:10.1016/j.agwat.2015.07.020

Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L., & Chehbouni, A. (2016). Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, *163*, 219-236. doi:10.1016/j.agwat.2015.09.007

region. *African Journal of Agricultural Research*, *610*, 2204-2215. doi:10.5897/AJAR10.1009

Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop- The FAO crop model to simulate yield response to water. *Agronomy Journal*, *101*, 426-437. doi:10.2134/agronj2008.0139s

Talbot, G. (2014). Relative yield composition: A method for understanding behavior of complex crop models. *Environmental Modelling and Software*, *51*,136-148. doi:10.1016/j.envsoft.2013.09.017

Tavakkoli, A.A., Mahdavi, M., & Sepaskhah, A.R. (2015). Evaluation of the AquaCrop model for

Archive of SID.ir