

Research Paper

Assessment of the AquaCrop Model under different irrigation scenarios in the weather conditions of Khuzestan province

Seyed Mohammad Saeed Mousavi¹,

Mohammad Albaji^{2*},

Abd Ali Naseri³

Mona Golabi⁴

Mohammad Reza Moradi Telavat⁵

¹ PhD student, Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

² (Corresponding Author) Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

³ Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

⁵ Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Ahvaz, Iran



10.22125/IWE.2023.414032.1743

Received:
August 16, 2023
Accepted:
November 1, 2023
Available online:
May 5, 2024

Keywords:
AquaCrop model, safflower, deficit irrigation, water productivity efficiency, irrigation planning

Abstract

Currently, about 90 percent of the population of developing countries live in arid and semi-arid areas. Therefore, it is necessary and inevitable to identify the key and effective factors on the growth of agricultural products with the approach of increasing water productivity index. In this regard, it is beneficial to use plant growth models that can simulate product performance. The purpose of this research is to evaluate the accuracy and efficiency of the latest version of the AquaCrop model for simulating seed yield, biomass and water productivity efficiency of safflower in the form of a randomized complete block design with one control treatment (Conventional irrigation) and four deficit -irrigation treatments, including (RDI80, RDI60: reduced irrigation adjusted by supplying 80 and 60% of soil moisture deficiency) and (PRD80, PRD60: fixed partial root-zone drying irrigation with supply of 80 and 60% of soil moisture deficiency) and with four repetitions in Khuzestan University of Agriculture and Natural Resources was conducted. In order to evaluate the reliability of the model, some statistical indicator including the average normalized root mean square error (NRMSE), the Coefficient of Residual Moss (CRM), Coefficient of Determination (CD), maximum error percentage (ME), Wilmot index (d) and the modeling efficiency (EF) was used. The statistical index (NRMSE) was obtained for seed yield (4.14), biological yield (10.16) and water productivity efficiency (4.9) and showed that the accuracy of the model in simulation is excellent. The evaluation results of E, EF and d indicators for simulation and validation of the model were close to one. Also, the value of the index (CRM) was negative in both years and showed that the Aquacrop model has a slight tendency to overestimate irrigation treatments. The results of the model validation show the accuracy and efficiency of the model in simulating seed yield, biomass and water productivity efficiency, and therefore, this model can be used to manage safflower irrigation in different states of deficit irrigation.

* **Corresponding Author:** Mohammad Albaji
Address: Department of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Email: m.albaji@ scu.ac.ir
Tel: 09163076978

Seyed Mohammad Saeed Mousavi, Mohammad Albaji, Abd Ali Naseri, Mona Golabi, Mohammad Reza Moradi Telavat.
Assessment of the AquaCrop Model under different irrigation scenarios in the weather conditions of Khuzestan province

1. Introduction

Arid and semi-arid lands, as areas with relatively low rainfall, long dry periods and frequent water shortage conditions, cover about 41% of the earth's surface. Currently, about 90 percent of the population of developing countries live in arid and semi-arid areas. Therefore, it is necessary and inevitable to identify the key and effective factors on the growth of agricultural products with the approach of increasing water productivity index. In this regard, it is beneficial to use plant growth models that can simulate product performance. The AquaCrop model is one of the plant growth models developed by the World Food and Agriculture Organization (FAO), which has attracted the attention of many researchers and users due to its easy user interface, low input data, and high simulation accuracy.

2. Materials and Methods

The purpose of this research is to evaluate the accuracy and efficiency of the latest version of the AquaCrop model for simulating seed yield, biomass and water productivity efficiency of safflower in the form of a randomized complete block design with one control treatment (Conventional irrigation) and four deficit -irrigation treatments, including (RDI80, RDI60: reduced irrigation adjusted by supplying 80 and 60% of soil moisture deficiency) and (PRD80, PRD60: fixed partial root-zone drying irrigation with supply of 80 and 60% of soil moisture deficiency) and with four repetitions in Khuzestan University of Agriculture and Natural Resources was conducted. In order to evaluate the reliability of the model, some statistical indicator including the average normalized root mean square error (NRMSE), the Coefficient of Residual Moss (CRM), Coefficient of Determination (CD), maximum error percentage (ME), Wilmot index (d) and the modeling efficiency (EF) was used.

3. Results

The value of NRMSE of safflower seed yield in both experimental years was less than five percent (in the range of 2.64 to 4.14), which based on this statistic, the simulation of the model in product performance is ideal. The Nash-Sutcliffe index was close to one for all treatments, which indicates the appropriate accuracy of the model in predicting seed yield. The statistical indices E and EF were equal to 0.99, which indicates the very acceptable efficiency of the model in simulating predictable parameters. In the calibration stage, the model simulated the biological yield with acceptable accuracy. The value of NRMSE in the calibration stage was 6.61%, based on these results, the simulation of biological yield is excellent. The Nash-Sutcliffe index (E) for irrigation treatments was close to one. The value of NRMSE in the validation stage for biological yield was about 10% (10.16), which indicates the accuracy of the modeling in suitable conditions. The results showed that the measured and simulated biological yield values are close and in good agreement with each other and have a good dispersion compared to the 1:1 line. The results of the comparison of statistical indicators show that the normalized root mean square error for water productivity index in two crop years is 18.27 and 4.9, respectively, and the efficiency of the model for these traits is 0.84 and 0.98, respectively, which indicates the efficiency and accuracy of the model in simulating water productivity index.

4. Discussion and Conclusion

The results of the model validation show the accuracy and efficiency of the model in simulating seed yield, biomass and water productivity efficiency, and therefore, this model can be used to manage safflower irrigation in different states of deficit irrigation.

5. Six important references

- 1) Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979. Yield response to Water. Irrigation and Drainage. Paper No. 33, Food and Agricultural Organization. Rome. Italy.
- 2) Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- 3) Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Journal of Agronomy*.101:426–437.
- 4) Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A. and Rahnema, A., 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), pp.1-8.

- 5) Anon. The ETo calculator evapotranspiration from a reference surface. Reference Manual. 2009; Version 3.1. FAO. Rome. Italy. *AquaCrop. Agronomy journal*. 101: 499–508.
- 6) Zhang, Zh., Liu, R., Pu, X., Sun, Y., Zhao, X. 2017. Evaluation of the sub-chronic toxicity of a standardized flavonoid extract of safflower in rats. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 85:98-107.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

This article is extracted from the PhD thesis in the Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz. Hereby, the financial support of the Research Vice-Chancellor of Shahid Chamran University of Ahvaz in a research format (GN: SCU. WI98.280). Thanks and appreciation is given.

ارزیابی مدل آکواکراپ تحت سناریوهای مختلف آبیاری در شرایط آب و هوای استان خوزستان

سیدمحمدسعید موسوی^۱، محمد الباجی^۲، عبدعلی ناصری^۳، منا گلابی^۴، محمدرضا مرادی تلاوت^۵

ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰

مقاله پژوهشی

چکیده

در حال حاضر حدود ۹۰ درصد از جمعیت کشورهای در حال توسعه در مناطق خشک و نیمه‌خشک زندگی می‌کنند. لذا شناسایی عوامل کلیدی و مؤثر بر رشد محصولات کشاورزی با رویکرد افزایش بهره‌وری مصرف آب، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا بهره‌مندی از مدل‌های رشد گیاهی که بتوانند عملکرد محصول را شبیه‌سازی کنند، سودمند است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقت و کارایی آخرین نسخه مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب گیاه گلرنگ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با یک تیمار شاهد (آبیاری معمولی) و چهار تیمار کم‌آبیاری شامل (RDI60, RDI80): کم‌آبیاری تنظیم شده با تامین ۸۰ و ۶۰ درصد کمبود رطوبت خاک) و (PRD60, PRD80): کم‌آبیاری به صورت خشکی موضعی ریشه ثابت با تامین ۸۰ و ۶۰ درصد کمبود رطوبت خاک) و با چهار تکرار در دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام شد. به‌منظور ارزیابی قابل اعتماد بودن مدل از برخی شاخص‌های ارزیابی شامل ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)، ضریب توده باقی‌مانده (CRM)، ضریب تبیین (CD)، درصد حداکثر خطا (ME)، شاخص ویل‌موت (d) و ضریب کارایی مدل‌سازی (EF) استفاده شد. شاخص آماری (NRMSE) برای عملکرد دانه (۴/۱۴)، عملکرد بیولوژیکی (۱۰/۱۶) و بهره‌وری مصرف آب گلرنگ (۴/۹) به‌دست آمد و نشان داد، دقت مدل در شبیه‌سازی، عالی است. نتایج ارزیابی شاخص‌های E، EF و d برای شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل نزدیک به یک به‌دست آمد. همچنین مقدار شاخص (CRM) در هر دو سال منفی شد و نشان داد مدل آکواکراپ در تیمارهای آبیاری، کمی تمایل به بیش‌برآوردی دارد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل بیانگر دقت و کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب بوده و لذا می‌توان از این مدل به‌منظور مدیریت آبیاری گلرنگ در حالت‌های مختلف کم‌آبیاری استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: مدل آکواکراپ، گلرنگ، کم‌آبیاری، بهره‌وری مصرف آب، برنامه‌ریزی آبیاری

^۱ دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. ایمیل:

saeedmoosavi61@yahoo.com

^۲ دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. ایمیل: m.albaji@scu.ac.ir

^۳ استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. ایمیل: abdalinaseri@scu.ac.ir

^۴ دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. ایمیل: m.golabi@scu.ac.ir

^۵ دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، اهواز، ایران. ایمیل:

moraditelavat@ramin.ac.ir

روغن آن، به یک محصول برجسته‌ای تبدیل شود (Kose, 2017).

اراضی خشک و نیمه‌خشک به‌عنوان مناطقی با بارش نسبتاً کم، دوره‌های خشکی طولانی و شرایط مکرر کمبود آب، حدود ۴۱ درصد از سطح زمین را پوشش می‌دهند و بیش از ۳۸ درصد از جمعیت جهان را در خود جای داده‌اند (Huang et al., 2016). در حال حاضر حدود ۹۰ درصد از جمعیت کشورهای در حال توسعه در مناطق خشک و نیمه-خشک زندگی می‌کنند. بنابراین شناسایی عوامل کلیدی و مؤثر بر رشد محصولات کشاورزی با رویکرد افزایش بهره‌وری مصرف آب، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. تکنیک‌های نوین آبیاری که امکان کاهش مصرف آب کشاورزی به همراه افزایش بهره‌وری مصرف آب و کاهش اثرات زیست‌محیطی را فراهم کنند (Costa et al., 2007; Geerts and Raes, 2009)، سبب شده‌اند تا سناریوهای مختلف کم آبیاری برای محصولات کشاورزی ارائه شود. کم آبیاری (Deficit Irrigation) به‌عنوان یک راهکار امیدبخش است که معمولاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک (محدودیت منابع آبی) به‌منظور کاهش میزان آبیاری (Siakou et al., 2021) و افزایش بهره‌وری مصرف آب اعمال می‌شود (Costa et al., 2007; Geerts and Raes, 2009; Gonzalez-Dugo et al., 2019; Panigrahi and Srivastava, 2016; Zhou et al., 2017; Kang et al., 2020; Yang et al., 2020). توسعه رویکرد کم آبیاری می‌تواند، راهی به‌سوی تضمین امنیت مواد غذایی باشد (Shammout et al., 2018). ازجمله راهکارهای مختلف معرفی‌شده، استفاده از روش‌های کم آبیاری تنظیم‌شده (Regulated deficit irrigation, RDI) و خشکی موضعی منطقه ریشه (Partial root-zone drying, PRD) است که سبب کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در بخش کشاورزی می‌گردد (Khaleghi et al., 2020; Hamidi Ahmadabad et al., 2021; Elhani et al., 2019).

اگرچه، می‌توان با انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای نحوه پاسخ عملکرد محصول به شیوه‌های مختلف کم آبیاری را بررسی نمود، ولی در اکثر موارد این آزمایش‌ها پر زحمت، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد (Ebrahimipak et al., 2019).

مقدمه

روغن‌های خوراکی ازجمله مهم‌ترین فرآورده‌های غذایی است که تولید آن برای نیازهای داخلی هر کشوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) یکی از گیاهان دانه روغنی آینده‌نگر می‌باشد که از اهمیت زیادی در بخش‌های صنعتی و پزشکی برخوردار است (Asqarpanh and Kazemivash, 2013; Hong et al., 2023) و اغلب برای کاهش عوارض بیماری‌های قلبی-عروقی استفاده می‌شود (Delshad et al., 2018; Zhang et al., 2017). گلرنگ یک محصول یک‌ساله، از خانواده Asteraceae، بومی آسیا و حوزه مدیترانه است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک رشد می‌کند (La Bella et al., 2019). روغن دانه گلرنگ از نظر کیفیت دارای بیشترین تنوع در ترکیب اسیدهای چرب است (Anjani Yadav, 2017). امروزه توجه علمی به این محصول عمدتاً به خاطر وجود روغن خوراکی با کیفیت بالا است و ارزش روغن آن مشابه روغن زیتون می‌باشد (La Bella et al., 2019). گلرنگ در مقایسه با سایر محصولات روغنی مانند کلزا (*Brassica napus* ssp.)، آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) و سویا (*Glycine max* L.) نیاز کمتری به آب دارد و به‌خوبی با شرایط کم‌آبی سازگار است. گلرنگ به دلیل سیستم ریشه‌ای گسترده و ظرفیت قابل‌توجهی که در استخراج رطوبت از لایه‌های عمیق خاک دارد، به‌عنوان یک گیاه مقاوم به خشکی شناخته می‌شود (Bhattarai et al., 2020). با این حال، شایان ذکر است که در مرحله جوانه‌زنی، گلرنگ به تنش خشکی حساس می‌باشد (Ahmad et al., 2019, Cohen et al., 2019, Kim et al., 2021). بنابراین در شرایط آب و هوایی فعلی و روند رو به افزایش گرمایش جهانی، گلرنگ می‌تواند به‌واسطه مقاومت به خشکی و مزایای قابل‌توجه



(Ver.7) برای شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب گیاه گلرنگ تحت شرایط کم آبیاری انجام شد.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل

اهمیت و پیچیدگی واکنش گیاه نسبت به آب مصرفی منجر به ارائه توابع فراوانی در تعیین این عامل شده است. در نشریه آبیاری و زهکشی شماره ۳۳ و ۶۶ فائو، تابع پایه عملکرد گیاه نسبت به کمبود آب به شرح زیر معرفی شده است (Doorenbos and Kassam, 1979; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).

$$\frac{Y_{max}-Y_a}{Y_{max}} = K_y \left(\frac{ET_{max}-ET_a}{ET_{max}} \right) \quad (1)$$

در این رابطه Y_{max} و Y_a به ترتیب عملکرد حداکثر و واقعی محصول، ET_{max} و ET_a به ترتیب تبخیر و تعرق حداکثر و واقعی، K_y ضریب حساسیت محصول (نسبت کاهش عملکرد نسبی در برابر کاهش تبخیر و تعرق نسبی) می‌باشد. درک متقابل روابط آب- خاک- عملکرد از سال ۱۹۷۹ به‌طور محسوسی توسعه یافت و اهمیت ویژه بهره‌وری آب، سازمان خوار و بار کشاورزی ملل متحد فائو را به بازسازی و ارزیابی نشریه ۳۳ ترغیب کرد و این امر منجر به توسعه مدل AquaCrop شد. از نقاط قوت مدل AquaCrop، توانایی تفکیک تبخیر و تعرق (ET) به دو بخش تبخیر از سطح خاک (Es) و تعرق (T_r) می‌باشد. در این حالت مدل (به‌ویژه در مرحله ابتدایی رشد) از آن بخش آب مصرفی غیرتولیدی که از طریق تبخیر از سطح خاک تلف می‌شود، چشم‌پوشی می‌کند.

$$CC = CC_0 * e^{CGC*t} \quad (2)$$

$$T_r = K_s * CC * K_c * ET_o \quad (3)$$

در این روابط، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز)، t زمان (روز)، K_s و K_c به

علاوه بر این، در حوزه کشاورزی که تغییرات آب و هوایی امنیت غذایی را تهدید می‌کند، نیازمند یافتن راه‌حل‌های پایدار در مقیاس جهانی می‌باشد. در این راستا بهره‌مندی از مدل‌های رشد گیاهی که بتوانند عملکرد محصول را شبیه‌سازی کنند، سودمند است. مدل AquaCrop یکی از مدل‌های رشد گیاهی توسعه‌یافته توسط سازمان خواروبار و کشاورزی جهانی (فائو) است که به دلیل محیط کاربری آسان، داده‌های ورودی کم و دقت بالا در شبیه‌سازی، موردتوجه بسیاری از محققان و کاربران قرار گرفته است (Heng et al., 2009; Todorovic et al., 2009; Raes et al., 2012). مدل AquaCrop مبتنی بر آب برای شبیه‌سازی محصول در زمین‌های خشک، جایی که آب کلید اصلی است، مناسب است (Steduto, 2009). گزارشات مختلفی در خصوص دقت شبیه‌سازی مدل AquaCrop برای انواع محصولات کشاورزی از بسیاری مناطق جهان ارائه شده است که برای مثال می‌توان استفاده از این مدل در شبیه‌سازی تاج پوشش گیاه کاهو (Sabzian et al., 2021)، شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد محصول جو در شمال ایتالیایی (Araya et al., 2010)، شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده برنج تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری (Aalae Bazkiaee et al., 2020)، شبیه‌سازی رشد محصول گندم (Ghadirian et al., 2021; Ahmadee et al., 2021) و شبیه‌سازی واکنش کلزا به کم آبیاری (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷) اشاره کرد. از جمله دیگر گیاهان زراعی که با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شده‌اند، می‌توان به زعفران (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸)، سویا (Abedinpour, 2020)، ذرت (Heng et al., 2009; Garcia-Villa et al., 2009; Hsiao et al., 2009)، پنبه (Garcia-Villa et al., 2009; Todorovic et al., 2009)، آفتابگردان (et al., 2009)، کینوا (Geerts et al., 2009) اشاره نمود.

با توجه به ارزش خوراکی روغن دانه گلرنگ و تطابق کشت این گیاه در شرایط مختلف آب و هوایی و نیز محدودیت منابع آب و نظر به اینکه کارایی مدل آکوآکراپ در شبیه‌سازی عملکرد محصول گلرنگ در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری مشخص نشده است، لذا پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقت و کارایی آخرین نسخه مدل AquaCrop

که در آن GY عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) و BY عملکرد بیولوژیکی (کیلوگرم در هکتار) می‌باشد.

داده‌های ورودی

مدل آکواکراپ بر مبنای فرایندهای بیوفیزیکی پیچیده بنا نهاده شده است (Steduto et al., 2009). اما داده‌های ورودی این مدل نسبتاً ساده و قابل دسترس است و شامل داده‌های اقلیمی، داده‌های خاک، داده‌های گیاهی و پارامترهای مدیریتی می‌باشد.

داده‌های اقلیمی

داده‌های بارش، تبخیر و تعرق پایه و حداقل و حداکثر دما، تشعشع (ساعات آفتابی)، باد و رطوبت نسبی، مدل از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه به منظور محاسبه درجه روز رشد (GDD) برای تعیین مراحل رشد و عملکرد و همچنین تعدیل ماده خشک در هنگام سرمازدگی استفاده می‌کند (Raes et al., 2012). شرایط اقلیمی گستره استان خوزستان در سیستم دوماترین به صورت خشک تا نیمه-خشک و بعضاً بیابانی گرم ارزیابی می‌شود (مطالعات آمایش استان خوزستان، ۱۳۹۱). آمار هواشناسی بلندمدت مربوط به سال‌های شمسی ۱۳۶۹ لغایت ۱۳۹۹ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهرستان اهواز نشان می‌دهد، میانگین بارش سالانه ۲۳۰ میلی‌متر (حدود ۸۵ درصد آن در ماه‌های آبان تا اسفند)، میانگین تبخیر و تعرق سالانه بالای ۲۴۰۰ میلی‌متر، میانگین مدت تابش آفتاب سالانه بیش از ۳۰۰۰ ساعت، رطوبت نسبی ۴۷ درصد، درجه حرارت بیشینه ۵۳/۴ درجه سانتی‌گراد مربوط به ماه جولای (تیر) و درجه حرارت کمینه ۱- درجه سانتی‌گراد مربوط به ماه ژانویه (دی) است (اداره کل هواشناسی استان خوزستان، ۱۳۹۹). با استفاده از نرم‌افزار ETo-calculator و به روش فائو-پنمن-مانتیس تبخیر-تعرق گیاه مرجع (Eto) برآورد شد (Anon, 2009). برای غلظت دی‌اکسید کربن از اطلاعات موجود در رصدخانه Manalao در هاوایی استفاده شد.

داده‌های خاک

مؤلفه‌های خاک در مدل آکواکراپ شامل هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، رطوبت اشباع (θ_{sat})، ظرفیت

ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) می‌باشد. مدل تنش آبی گیاه را در چهار بخش: رشد پوشش تاجی، پیری پوشش تاجی گیاه، تعرق از سطح گیاه (T_r) و شاخص برداشت محصول (HI) تفکیک می‌کند. تعرق روزانه (Tr) با استفاده از تبخیر و تعرق روزانه (ET_0) و بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) گونه گیاهی با استفاده از نیاز تبخیری و غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری نرمال شده مطابق رابطه (۴) به زیست‌توده یا قسمت هوایی گیاه تبدیل می‌شود (Steduto et al., 2009).

$$Bi = WP^* \left(\frac{Tri}{ET_{0i}} \right) \quad (4)$$

مقدار بهره‌وری آب نرمال شده wp^* در شرایط اقلیمی مشابه، ثابت و برابر است (Hanks, 1983) و پس از نرمال کردن بهره‌وری آب برای شرایط اقلیمی متفاوت، مقدار آن به یک پارامتر ثابت تبدیل می‌شود (Steduto et al., 2009). بنابراین گام گذاشتن از رابطه (۱) به رابطه (۴) دلالت بر صحت و عمومیت مدل دارد. برتری دیگر رابطه (۴) این است که شبیه‌سازی فرایندهای رشد گیاه در آن با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد، در حالی که در رابطه (۱) شبیه‌سازی به صورت ماهانه یا فصلی انجام می‌شود. میزان ضرایب تنش آبی (K_s) مؤثر بر توسعه و بسط سبزینه‌ای گیاه، هدایت روزنه‌ای تعرق (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت (HI) به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. علاوه بر آن برخی جنبه‌های مدیریتی آبیاری (زمان، میزان و نحوه آبیاری) و میزان محدودیت حاصلخیزی خاک از طریق تأثیر آن‌ها بر توسعه رشد گیاه، بهره‌وری آب و تعدیل محصول به تنش‌ها بیان می‌شوند. در این مدل مشابه مدل CROPWAT تأثیر تنش‌های زنده مانند آفات و بیماری‌ها لحاظ نشده است. در نهایت عملکرد محصول با استفاده از شاخص برداشت تعدیل شده و جرم قسمت هوایی پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده از رابطه (۵)، محاسبه می‌شود (Donald and Hamblin, 1976; Marinov et al., 2005; Raes, 2012).

$$GY = HI * (BY) \quad (5)$$



زراعی (θ_{VFC})، پژمردگی دائم (θ_{Vpwp}) و بافت خاک می‌باشد که در جدول ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات خاک محل مورد مطالعه

عمق خاک (cm)	رس	سیلت	شن	هیدرولیکی اشباع	چگالی ظاهری	رطوبت اشباع	رطوبت ظرفیت زراعی	رطوبت نقطه پژمردگی	هدایت الکتریکی عصاره اشباع
	%	%	%	mm/hr	g/cm ³	% vol	% vol	% vol	ds/m
۰-۳۰	۴۲	۴۱	۱۷	۲/۴۴	۱/۴۶	۴۸/۸	۳۹/۸	۱۹/۲	۲/۶
۳۰-۶۰	۴۴	۴۰	۱۶	۲/۲۴	۱/۴۸	۴۹/۴	۴۰/۵	۱۹/۹	۱/۸
۶۰-۹۰	۴۴	۳۹	۱۷	۲/۱۱	۱/۴۸	۴۹/۲	۴۰/۲	۱۹/۹	۱/۸

داده‌های گیاهی

سیستم اطلاعات گیاهی از دو بخش پارامترهای رشد گیاه بدون تنش‌های شوری، کم‌آبی و کود، میزان تولید گیاهی و بخش دوم معرفی اثر تنش‌های آبی، حاصلخیزی، شوری و دمای هوا بر رشد گیاه می‌باشد. در مدل فایل اطلاعات گیاهی به صورت پیش‌فرض برای گلرنگ وجود ندارد. بنابراین از اطلاعات محصول مشابه یعنی آفتابگردان استفاده و در بخش واسنجی تعدیل و تنظیم شد. (Heng et al., 2009; Raes et al., 2009).

داده‌های مدیریتی

اجزای مدیریت شامل دو بخش مدیریت آبیاری و زراعی است. اطلاعات خاک شامل ویژگی‌های هیدرولیکی و فیزیکی خاک است که برای هر لایه از نیمرخ خاک وارد مدل شد.

آزمایش مزرعه‌ایی

طرح حاضر در دو فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در سایت پژوهشی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان با مشخصات مکانی عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه و ۲۲ متر ارتفاع از سطح دریا، اجرا شد. طرح آزمایشی به صورت بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تیمار آبیاری در قالب چهار تکرار اجرا شد. برای این منظور ابتدا عملیات تهیه و آماده‌سازی بستر

کاشت انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل پنج ردیف جوی و پشته انتها بسته دوزنقه‌ای شکل به طول ۱۰ متر با عرض بالای ۶۰ سانتی‌متر، عرض پایین ۲۰ سانتی‌متر و عمق ۳۰ سانتی‌متر در جهت شرق به غرب (در راستای شیب زمین) احداث شد. در این تحقیق برای دو فصل زراعی از بذر گلرنگ رقم گلدشت که دارای پتانسیل عملکرد بالا، زودرس و مقاوم به تنش آبی است، استفاده شد. کود مورد نیاز گیاه شامل کود پایه ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل که به هنگام عملیات خاک‌ورزی به صورت دستی در سطح مزرعه پخش و به منظور اختلاط کامل با خاک از دیسک استفاده شد و مقدار ۷۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره برای هر کرت در دو نوبت (۵۰ درصد در ابتدای فصل رشد و نیم دیگر در اواسط زمستان در زمان ساقه رفتن گلرنگ) به خاک اضافه گردید. تیمارهای آزمایشی شامل: CI آبیاری معمولی با تأمین ۱۰۰ درصد کمبود رطوبت خاک، RDI80 کم‌آبیاری تنظیم‌شده با تأمین ۸۰ درصد کمبود رطوبت خاک، RDI60 کم‌آبیاری تنظیم‌شده با تأمین ۶۰ درصد کمبود رطوبت خاک، PRD80 کم‌آبیاری به صورت خشکی موضعی ریشه ثابت با تأمین ۸۰ درصد کمبود رطوبت خاک و PRD60 کم‌آبیاری به صورت خشکی موضعی ریشه ثابت با تأمین ۶۰ درصد کمبود رطوبت خاک می‌باشند. مقدار آب آبیاری در نظر گرفته شده برای آبیاری معمولی (CI) و کم-آبیاری تنظیم‌شده (RDI) به مقدار مساوی در بین جوی‌ها تقسیم گردید. اما در روش کم‌آبیاری به صورت خشکی

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (9)$$

$$CD = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \right] \quad (10)$$

$$ME = \text{MAX} |S_i - M_i| \quad (11)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (12)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (13)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (14)$$

در روابط فوق S_i مقادیر پیش‌بینی شده، M_i مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای)، n تعداد نمونه‌ها، \bar{M} مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است. شاخص ریشه دوم خطای میانگین مربعات نرمال (NRMSE)، مقادیر کلی یا میانگین نرمال شده انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل است. شاخص ضریب باقیمانده (CRM) مبین نحوه برآورد است، به این صورت که اگر مقدار این شاخص منفی باشد، نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد است و اگر مقدار این شاخص مثبت باشد، نشانگر تمایل مدل برای برآورد کمتر از حد در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری است. شاخص ویل‌موت (d) یک عامل توصیفی است که مقدار آن از منفی بینهایت تا مثبت یک متغیر می‌کند (Singh et al., 2008). مقدار زیاد این شاخص نشان‌دهنده کارکرد ضعیف مدل است و برعکس هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، به معنی مطابقت بیشتر مقادیر اندازه‌گیری با شبیه‌سازی شده است (Willmott, 1982). شاخص کارایی مدل (EF) میزان کارایی مدل در فرآیند شبیه‌سازی را بیان می‌کند. این شاخص که بر حسب درصد بیان می‌شود، هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل می‌باشد (Nash and Sutcliffe, 1970).

آنالیز حساسیت مدل آکواکراپ

تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی پارامترهای مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده، روند واسنجی مدل را تسریع بخشیده و در دسترسی به راندمان بیشتر مدل‌های گیاهی کمک

موضعی ریشه (PRD) جوی‌ها به صورت یکی در میان و ثابت آبیاری شد. با پایش وضعیت رطوبت خاک نیاز آبی محصول در تیمارهای مختلف تعیین شد. به این ترتیب که ابتدا قبل از هر آبیاری محتوای رطوبت خاک در عمق‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متر با روش نمونه‌گیری وزنی اندازه‌گیری و مقدار آب خالص موردنیاز جهت پر کردن ناحیه ریشه تا حد ظرفیت مزرعه از طریق رابطه (۶) محاسبه شد (Sarker et al., 2019).

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{FC_i - MC_i}{100} \times B_i \times D_i \quad (6)$$

که در آن، I عمق خالص آب آبیاری (mm)؛ B_i چگالی ظاهری خاک (g/cm^3)؛ D_i عمق توسعه ریشه در لایه i خاک (m)؛ FC_i درصد وزنی رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه در هر لایه، MC_i درصد وزنی رطوبت خاک در هر لایه قبل از هر آبیاری و n تعداد لایه‌های پروفیل خاک در ناحیه ریشه می‌باشد.

بهره‌وری مصرف آب

جهت ارزیابی استفاده کارآمد از آب آبیاری در تولید محصول، بهره‌وری مصرف آب برای عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی به‌طور جداگانه‌ای از طریق رابطه (۷) محاسبه شد (Wang et al., 2016; Sarker et al., 2019; Murad et al., 2018) که در این رابطه $WP(Ir+p)y$ بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم در مترمکعب)، Y عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، P و Ir به ترتیب حجم بارندگی و آبیاری (مترمکعب در هکتار) می‌باشد.

$$wp_{(Ir+p)y} = \frac{Y}{Ir+p} \quad (7)$$

پارامترهای آماری برای صحت‌سنجی مدل

به‌منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل با نتایج مشاهده‌ای و همچنین ارزیابی قابل اعتماد بودن مدل، از برخی شاخص‌های ارزیابی شامل ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)، ضریب توده باقی‌مانده (CRM)، ضریب تبیین (CD)، درصد حداکثر خطا (ME)، شاخص ویل‌موت (d) یا شاخص سازگاری (Willmott, 1982) و ضریب کارایی مدل‌سازی (EF) استفاده شد.

$$NRMSE (\%) = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}} \right) * 100 / \bar{M} \quad (8)$$



کاشت تا پیری، زمان از کاشت تا بلوغ، ضریب تعرق گیاهی، بهره‌وری آب نرمال شده و شاخص برداشت که مدل نسبت به آنها حساسیت بالایی نشان داد، تغییر داده شد به گونه‌ایی که خطای نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب حداقل شود. سپس سایر پارامترهای ورودی مدل که در جدول (۲) ارائه شده است، تا رسیدن به بهترین نتایج، واسنجی شد. در این جدول مقدار پوشش گیاهی اولیه (CCo) در مدل از روی فاصله ردیف‌ها و فاصله بذرها روی ردیف‌ها (تراکم کاشت) اندازه‌گیری می‌شود.

خواهد کرد. با استفاده از رابطه‌ی (۱۵) حساسیت پارامترهای مدل آنالیز شد.

$$Sc = \left| \frac{Pm - Pb}{Pb} \right| \times 100 \quad (15)$$

در این رابطه Sc، ضریب حساسیت بدون بعد، مقدار Pm برآورد شده پارامتر مورد نظر بر اساس داده‌های ورودی تعدیل شده و Pb مقدار برآورد پارامتر مورد نظر بر اساس داده ورودی پایه می‌باشد. (Geerts and Raes, 2009).

واسنجی مدل آکواکراپ

در این تحقیق از اطلاعات سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ جهت واسنجی مدل استفاده شد. در ابتدا پارامترهای زمان از

جدول (۲): مقادیر پارامترهای گیاهی مورد استفاده در مدل AquaCrop

توضیح پارامتر	واحد	مقدار	توضیح
مدت زمان از کاشت تا سبز شدن	روز	۱۲	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا حداکثر پوشش سبز	روز	۹۰	اندازه‌گیری
مدت زمان از کاشت تا دوره پیری	روز	۱۳۸	اندازه‌گیری
مدت زمان از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیکی	روز	۱۶۷	اندازه‌گیری
مدت زمان از کاشت تا گلدهی	روز	۱۱۲	اندازه‌گیری
طول دوره گلدهی	روز	۱۶	اندازه‌گیری
عمق مؤثر ریشه	متر	۱	پیش فرض
دمای پایه	درجه سانتی‌گراد	۵	پیش فرض
دمای بالا	درجه سانتی‌گراد	۳۰	پیش فرض
پوشش گیاهی اولیه (CCo)	درصد	۰/۸۳	اندازه‌گیری
نرخ رشد پوشش گیاهی (CGC)	درصد روز	۹/۲	واسنجی
حداکثر پوشش گیاهی (CCx)	درصد	۸۵	واسنجی
نرخ کاهش پوشش گیاهی (CDC)	درصد روز	۱۱/۸	واسنجی
حداکثر ضریب تعرق گیاهی (KcTr.x)	درصد بر روز	۰/۷	واسنجی
بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)	گرم بر مترمربع	۱۵	واسنجی
شاخص برداشت (HIo)	درصد	۳۹	واسنجی
حد بالای ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	-	۱۰	واسنجی
حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	-	۶۰	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای توسعه پوشش تاجی	-	۲/۵	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	-	۲/۵	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	-	۲/۵	واسنجی

متوسط - زیاد	۲۴/۲	۱۰/۳	ضریب گیاهی تعرق (KcTr)
زیاد	۲۶/۷	۲۶/۷	بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)
زیاد	۲۵/۶	۲۳/۹	شاخص برداشت (HI)

نتایج ارزیابی مدل آکواکراپ

عملکرد دانه

با توجه به نتایج جدول (۴) حداقل و حداکثر اختلاف بین عملکرد دانه اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده در مرحله واسنجی برابر ۰/۰۱ و ۸/۰۱ درصد و مرحله اعتبارسنجی برابر ۰/۱۶ و ۱۱/۱۰ درصد بود. این مقادیر به ترتیب در تیمارهای CI و RDI60 مشاهده شد. مقایسه عملکرد دانه اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده گلرنگ در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در شکل (۱) نشان داده شده است. به نظر می‌رسد، کاهش دقت مدل در شرایط تنش کم‌آبی به دلیل ضعف در شبیه‌سازی رطوبت خاک و واکنش گیاه به این شرایط می‌باشد.



شکل (۱): مقایسه عملکرد دانه اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده گلرنگ در مرحله اعتبارسنجی

شکل (۲) نشان می‌دهد مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده عملکرد دانه از پراکندگی مناسبی نسبت به خط همسانی یک‌به‌یک برخوردار بوده و بیانگر همخوانی و کارایی مناسب

نتایج و بحث

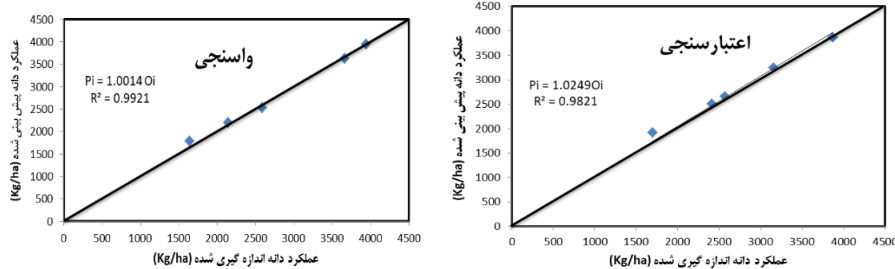
نتایج تحلیل حساسیت مدل

نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که نسبت به تغییرات طول دوره گلدهی حساسیت کم و نسبت به پارامترهای پوشش گیاهی اولیه، نرخ رشد پوشش گیاهی، حداکثر پوشش گیاهی، نرخ کاهش پوشش گیاهی (CDC)، زمان از کاشت تا سبز شدن، زمان کاشت تا حداکثر پوشش و عمق ریشه حساسیت متوسطی داشت (جدول ۳). همچنین این مدل نسبت به زمان از کاشت تا بلوغ، بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) و شاخص برداشت (HI) حساسیت بالایی نشان داد. بهمنش و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه نشان داد، مدل آکواکراپ نسبت به طول دوره گلدهی حساسیت کم و نسبت به بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) و شاخص برداشت (HI) حساسیت بالایی دارد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

جدول (۳): ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی

پارامترهای ورودی	مقدار Sc		درجه حساسیت
	در حالت	در حالت	
پوشش گیاهی اولیه	۳/۲	۳/۱	متوسط
نرخ رشد پوشش گیاهی (CGC)	۸/۹	۱۳/۸	متوسط
حداکثر پوشش گیاهی	۸/۵	۱۳/۳	متوسط
نرخ کاهش پوشش گیاهی (CDC)	۳/۰	۵/۲	متوسط
زمان از کاشت تا سبز شدن	۳/۱	۴/۳	متوسط
زمان کاشت تا حداکثر پوشش	۱۱/۴	۱۰/۸	متوسط
زمان از کاشت تا پیری	۱۱/۴	۳۳/۳	متوسط - زیاد
زمان از کاشت تا بلوغ	۶۳/۱	۲۵/۱	زیاد
زمان از کاشت تا گلدهی	۲/۶	۱/۳	متوسط - کم
طول دوره گلدهی	۰/۶	۰/۱	کم
عمق ریشه	۳/۵	۱۰/۱	متوسط
زمان رسیدن به حداکثر عمق ریشه	۲/۳	۰/۸	متوسط - کم

این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه می‌باشد (ضریب تبیین R^2 برای واسنجی و اعتبارسنجی ۰/۹۹ می‌باشد).



شکل (۲): مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده عملکرد دانه در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

این نتایج با مشاهدات (Mohammadi et al., 2015)، (Heng et al., 2016) (Vatankhah and Ibrahimian, 2016)، (al., 2009) و (Andarzian et al., 2011) مطابقت دارد.

با وجود کارایی و دقت مناسب این مدل در شبیه‌سازی عملکرد گلرنگ، اما نتایج نشان داد که در شرایط تنش شدید، دقت مدل عمدتاً کمتر از شرایط بدون تنش بود که

جدول (۴): مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی و بهره‌وری مصرف آب گلرنگ و درصد

خطای نسبی

تیمارها	پیش‌بینی شده (Kg/ha)	اندازه‌گیری شده (Kg/ha)	درصد خطای نسبی	پیش‌بینی شده (Kg/ha)	اندازه‌گیری شده (Kg/ha)	درصد خطای نسبی
CI	۳۹۴۴	۳۸۶۴	۰/۰۱	۳۸۷۰/۴	۳۸۶۴	۰/۱۶
RDI80	۳۶۲۱	۳۲۴۲	۱/۰۳	۳۱۵۸/۹	۳۲۴۲	۲/۵۶
RDI60	۱۷۸۵	۱۹۱۱	۸/۰۱	۱۷۰۰/۱	۱۹۱۱	۱۱/۱۰
PRD80	۲۵۳۲	۲۶۵۲	۲/۰۸	۲۵۶۸/۷	۲۶۵۲	۳/۱۲
PRD60	۲۱۹۵	۲۴۹۷	۲/۳۶	۲۴۱۷/۳	۲۴۹۷	۳/۱۹
CI	۱۰۲۱۰	۱۰۱۴۵	۰/۰۴	۱۰۳۴۵	۱۰۱۴۵	۱/۹۳
RDI80	۹۵۴۷	۸۹۹۴	۱/۱۲	۹۸۰۵	۸۹۹۴	۸/۲۷
RDI60	۵۷۷۷	۶۵۰۴	۱۵/۸۹	۴۹۳۱	۶۵۰۴	۲۴/۱۸
PRD80	۷۴۵۸	۷۹۷۸	۱/۵۶	۷۶۱۶	۷۹۷۸	۴/۵۳
PRD60	۶۵۹۰	۷۶۰۰	۹/۵۸	۷۴۴۵	۷۶۰۰	۲/۰۳
CI	۰/۷۰	۰/۶۹	۱۷/۱۴	۰/۶۶	۰/۶۹	۴/۳۴
RDI80	۰/۷۲	۰/۶۷	۱۱/۱۱	۰/۶۳	۰/۶۷	۵/۹۷
RDI60	۰/۴۰	۰/۴۴	۱۲/۵	۰/۴۱	۰/۴۴	۶/۸۱
PRD80	۰/۴۸	۰/۵۲	۶/۳۵	۰/۵۲	۰/۵۲	۰
PRD60	۰/۵۹	۰/۶۱	۲۲/۰۳	۰/۵۹	۰/۶۱	۳/۲۷

عملکرد محصول، ایده‌آل است (جدول ۵). شاخص نش-ساتکلیف برای تمام تیمارها نزدیک به یک به دست آمد که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه

مقدار NRMSE عملکرد دانه گلرنگ در هر دو سال آزمایشی کمتر از پنج درصد (در محدوده ۲/۶۴ تا ۴/۱۴) به دست آمد که بر اساس این آماره، شبیه‌سازی مدل در

آبیاری می‌باشد. شاخص‌های آماری E و EF برابر ۰/۹۹ حاصل شد که نشان‌دهنده کارایی بسیار قابل قبول مدل در شبیه‌سازی پارامترهای قابل پیش‌بینی است. شاخص تبیین (CD) برای مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۰۰۷ و ۰/۰۲ می‌باشد. با توجه به این که دامنه تغییرات مقادیر ضریب تبیین بین ۰ و ۱ می‌باشد، این اعداد کوچک هستند و نشان می‌دهند، مقادیر پراکندگی نتایج پیش‌بینی مدل و نتایج میدانی (مزرعه‌ایی) برای مقادیر درصد کاهش عملکرد دانه بسیار اندک است.

می‌باشد. مقدار CRM در هر دو سال منفی شد و نشان داد در تیمارهای آبیاری، مدل آکواراپ کمی تمایل به بیش-برآوردی دارد. نتایج نشان داد مدل در پیش‌بینی، عملکرد دانه گلرنگ را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی می‌کند. مقدار شاخص سازگاری (d) برای مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی نزدیک به یک (۰/۹۹۸) به دست آمد که نشان‌دهنده سازگاری روند کاهش عملکرد محصول با کاهش میزان آب آبیاری در مدل نسبت به روند عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه با میزان آب

جدول (۵): مقدار شاخص‌های آماری برای تعیین قابل اعتماد بودن مدل در شبیه‌سازی

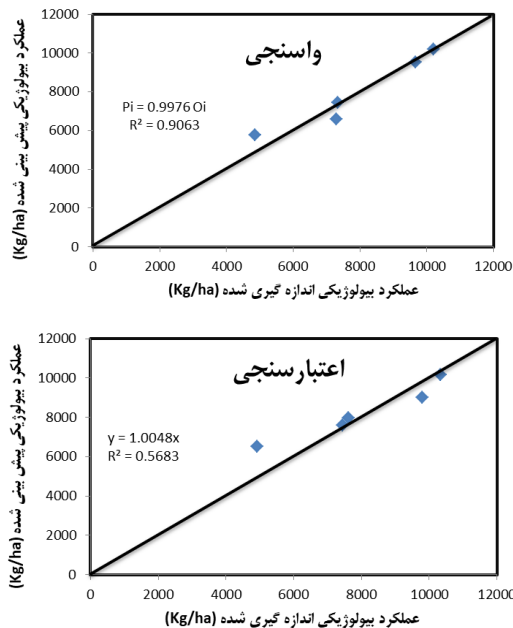
شاخص‌های آماری	NRMSE (%)	CD	EF	E	D	ME	CRM
عملکرد واسنجی	۲/۶۴	۰/۰۰۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۱۴۲/۲۷	-۰/۰۰۷
دانه (کیلوگرم در هکتار) اعتبارسنجی	۴/۱۴	۰/۰۲	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۲۱۰/۹	-۰/۰۰۳
عملکرد واسنجی	۶/۶۱	۰/۰۷	۰/۹۲	۰/۹۸	۰/۹۸	۹۱۸	-۰/۰۰۵
بیولوژیکی (کیلوگرم در هکتار) اعتبارسنجی	۱۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۸۲	۰/۹۶	۰/۹۳	۱۵۷۲/۷	-۰/۰۰۲
بهره‌وری مصرف واسنجی	۱۸/۲۷	۰/۷۸	۰/۲۱	۰/۸۴	۰/۸۶	۰/۱۳	-۰/۱۱۶
آب (کیلوگرم در مترمکعب) اعتبارسنجی	۴/۹	۰/۰۹	۰/۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۰۴	-۰/۰۰۴

همکاران (۱۴۰۰) همخوانی دارد. مقایسه مقادیر عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط مدل AquaCrop در شکل (۳) برای تیمارهای آبیاری گلرنگ در طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل ارائه شده است.

عملکرد بیولوژیکی

حداقل و حداکثر اختلاف بین عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده در مرحله واسنجی برابر ۰/۰۴ و ۱۵/۸۹ درصد و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۱/۹۳ و ۲۴/۱۸ درصد بود (جدول ۴). این مقادیر به ترتیب در تیمارهای CI و RDI60 مشاهده شد. اختلاف بین مقادیر عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده در تیمار RDI80 که ۲۰ درصد آب کمتر دریافت نموده، در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۱۰۹ و ۸۱۱ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. این در حالی است که در شرایط تنش حداکثری (RDI60) این اختلاف در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۹۱۸ و ۱۵۷۳ کیلوگرم در هکتار بود که از نظر کمی مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. این نتایج با مشاهدات آگدرنژاد و همکاران (۱۳۹۷)، ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۸) و بهمنش و

آماري E و EF برای واسنجی به ترتیب برابر ۰/۹۸ و ۰/۹۲ و برای اعتبارسنجی ۰/۹۶ و ۰/۸۲ به دست آمد که نشان‌دهنده کارایی بسیار قابل قبول مدل در شبیه‌سازی پارامترهای قابل پیش‌بینی است. شاخص تبیین (CD) برای مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۰۰۷ و ۰/۰۲ می‌باشد، این اعداد نزدیک به صفر هستند و نشان می‌دهند، مقادیر پراکندگی نتایج پیش‌بینی مدل و نتایج میدانی (مزرعه‌ای) برای مقادیر درصد کاهش عملکرد بیولوژیکی بسیار اندک است (جدول ۵). همان‌گونه که از شکل (۴) ملاحظه می‌شود، مقادیر عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نزدیکی و همخوانی مناسبی با یکدیگر داشته و پراکندگی مناسبی نسبت به خط یک‌به‌یک دارند ضریب تبیین R^2 برای واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۵۷ می‌باشد).



شکل (۴): مقایسه عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط مدل برای تیمارهای آبیاری گلرنگ در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

بهره‌وری مصرف آب

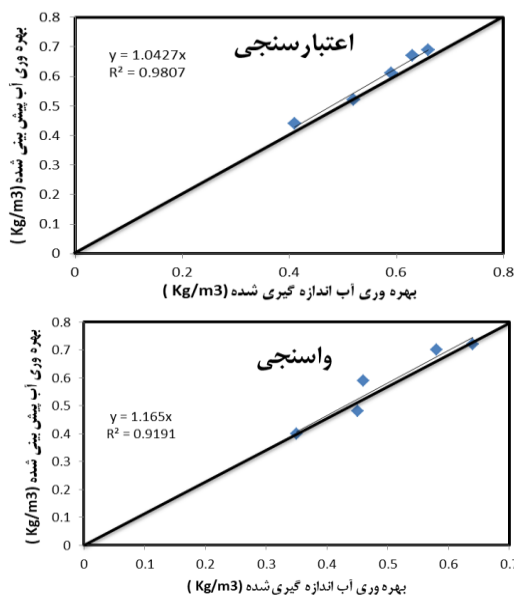
بهره‌وری مصرف آب یکی از مهمترین پارامترهای تعیین سطح آبیاری بهینه در شرایط کم آبیاری می‌باشد. نتایج واسنجی مدل نشان می‌دهد که با افزایش تنش آبی در ابتدا



شکل (۳): مقایسه عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده گلرنگ در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

مدل در مرحله واسنجی عملکرد بیولوژیکی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نمود. مقدار NRMSE در مرحله واسنجی ۶/۶۱ درصد به دست آمد که بر اساس این نتایج، شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیکی عالی است. شاخص نش-ساتکلیف (E) برای تیمارهای آبیاری نزدیک به عدد یک به دست آمد. مقدار آماره CRM، برای هر دو سال آزمایشی منفی به دست آمد و نشان داد مدل کمی تمایل به بیش‌برآورد دارد. از این رو می‌توان دریافت که مدل در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیکی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی می‌کند. به طور کلی خطای نسبی مدل در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیکی تیمارهای آبیاری در محدوده صفر تا ۱۶ درصد به دست آمد. مقدار NRMSE در مرحله اعتبارسنجی برای عملکرد بیولوژیکی حدود ۱۰ درصد (۱۰/۱۶) به دست آمد که نشان‌دهنده دقت مدل‌سازی در شرایط مناسبی است. مقدار شاخص سازگاری (d) برای مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۹۳ و ۰/۹۳ به دست آمد که نشان‌دهنده سازگاری روند کاهش عملکرد بیولوژیکی با کاهش میزان آب آبیاری در مدل نسبت به روند عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه با میزان آب آبیاری می‌باشد. همچنین مقدار شاخص‌های

مناسب مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب می‌باشد (جدول ۵). اندرزیان و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی به منظور بررسی کارایی مدل نتایج نشان دادند، مدل آکوآکراپ با دقت خوبی می‌تواند رطوبت خاک، زیست توده محصول و عملکرد دانه را شبیه‌سازی کند. این محققان ریشه دوم خطای میانگین مربعات نرمال را کمتر از ۱۰ درصد به دست آوردند (Andarzian et al., 2011). از شکل (۶) ملاحظه می‌شود، مقادیر عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نزدیکی و همخوانی مناسبی با یکدیگر داشته و از پراکندگی مناسبی نسبت به خط یک-به‌یک برخوردار است (ضریب تبیین R^2 برای واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۸ می‌باشد).

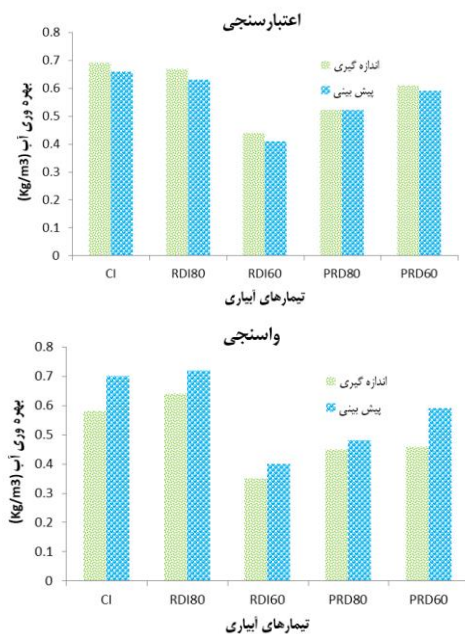


شکل (۶): مقایسه بهره‌وری مصرف آب گلرنگ اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط مدل برای تیمارهای آبیاری گلرنگ در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

نتیجه‌گیری

از آنجا که مدل AquaCrop گزینه‌های مختلف آب، خاک و گیاه را به‌صورت توأم در نظر گرفته و تمرکز آن بر مدیریت آب می‌باشد، بنابراین ارزیابی و اعتبارسنجی مدل با هدف شبیه‌سازی عملکرد (با دقت مناسب) به ویژه برای

بهره‌وری افزایش و سپس کاهش می‌یابد، در حالی که این روند برای مقادیر اعتبارسنجی بصورت کاهشی بوده و با نتایج مدل کاملاً همخوانی دارد (شکل ۵). بیشترین مقدار بهره‌وری مصرف آب از تیمار RD180 حاصل شد که با نتایج مدل مطابقت دارد. همان‌طور که شکل (۵) نشان می‌دهد، مدل AquaCrop در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی بهره‌وری مصرف آب را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کرده است.



شکل (۵): مقایسه بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری و پیش-بینی شده تیمارهای آبیاری گلرنگ در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

مقدار ضریب CRM منفی و نزدیک به صفر می‌باشد که نشان می‌دهد مدل تمایل دارد، بهره‌وری مصرف آب را اندکی بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی نماید. بیشترین خطای (ME) مربوط به مقادیر واسنجی به مقدار ۰/۱۳ درصد حاصل شد. مقدار شاخص سازگاری (d) برای مقادیر واسنجی ۰/۸۶ و برای مقادیر اعتبارسنجی بسیار نزدیک به یک (۰/۹۸) به دست آمد. همچنین نتایج مقایسه شاخص-های آماری نشان می‌دهد، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای بهره‌وری مصرف آب در دوسال زراعی به ترتیب ۱۸/۲۷ و ۴/۹ و کارایی مدل برای این صفات به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۹۸ می‌باشد که نشانگر کارایی و دقت

محصولات استراتژیک ضروری است. تهیه فایل اطلاعات گیاهی توسط کاربر و انطباق آن با شرایط منطقه موجب افزایش دقت مدل در شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین با توجه به تاثیرات اقلیم بر رشد و نمو محصول، ضروری است فایل اطلاعات گیاهی مطابق رقم و شرایط اقلیم منطقه ساخته شود. نتایج شاخص‌های آماری حاصل از واسنجی و صحت-سنجی مدل نشان داد، دقت و کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری مصرف آب گلرنگ قابل قبول است. بنابراین می‌توان از این مدل به منظور ارائه مناسب‌ترین سناریو در مدیریت آبیاری گلرنگ با رویکردهای مختلف کم‌آبیاری استفاده و مناسب‌ترین برنامه‌ریزی آبیاری در راستای ارتقاء بهره‌وری مصرف آب را توصیه نمود.

تشکر و قدردانی

این مقاله از پایان‌نامه دوره دکتری تخصصی در دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز استخراج شده است. بدین وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU. WI98.280) تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- ابراهیمی‌پاک، ن.ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۳-۷۵): ۷۱۵-۷۲۶.
- اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی‌پاک، ن.ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل Aquacrop در دشت قزوین. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۵(۲): ۶۴-۵۳.
- بهمنش، ع.، اگدرنژاد، ا.، سپهری صادقیان، س. ۱۴۰۰. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گیاه گلرنگ تحت مدیریت‌های مختلف آب آبیاری. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲(۹): ۲۴۱۳-۲۳۹۹.
- Aalae Bazkiaee, P., Kamkar, B., Amiri, E., Kazemi, H., Rezaei, M. and Akbarzadeh, S. (2020). Simulation of growth and yield and evaluation of rice production productivity under irrigation management and planting date using Aquacrop model. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 9(2), 17-34.
- Abedinpour, M. 2020. Evaluation of AquaCrop model in soybean cultivation under different planting dates and deficit irrigation treatments, *Iran Agricultural Research*. 39(2): 37-46.
- Ahmad, N., Jianyu, L., Xu, T., Noman, M., Jameel, A., Na, Y., Yuanyuan, D., Nan, W., Xiaowei, L., Fawei, w., Xiuming, L., Haiyan, L., 2019. Overexpression of a Novel Cytochrome P450 Promotes Flavonoid Biosynthesis and Osmotic Stress Tolerance in Transgenic Arabidopsis. *Genes (Basel)*.26;10(10):756. doi: 10.3390/genes10100756.
- Ahmadee, M., Ghanbarpouri, M., Egdernezhad, A. (2021). Determining Applied Irrigation Water of Wheat using Sensitivity Analysis and Evaluation of Aqua Crop. *Water Management in Agriculture*. In press. (in Persian with extended abstract in English).
- Anjani, K., Yadav, P. 2017. High yielding-high oleic non-genetically modified Indian safflower cultivars. *Ind. Crop. Prod.* 104: 7-12.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A. and Rahnema, A., 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), pp.1-8.



Anon. The ETo calculator evapotranspiration from a reference surface. Reference Manual. 2009;Version 3.1. FAO. Rome. Italy. *AquaCrop. Agronomy journal*. 101: 499–508.

Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A., Dejene, T. 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), pp.1838-1846.

Asqarpanh, J. and Kazemivash, N. 2013. Pharmacology and medicinal properties of (*Carthamustinctorius L.*). *Chines. Journal of integrative Medicine*. 19(2): 59-53

Bhattarai, B., Singh, S., Angadi, S. V., Benga, S., Saini, R. and Auld, D. 2020. Spring safflower water use patterns in response to pre-season and in-season irrigation applications. *Agricultural Water Management*, 228, 105876.

Cohen, I., Zandalinas, S., Huck, C., Fritschi, F.B., Mittler, R. 2021. Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiologia Plantarum*. Volume 171, Issue 1. Pages 66-76.

Delshad, E., Yousefi, M., Sasannezhad, P., Rakhshandeh, H., Ayati, Z. 2018. Medical uses of *Carthamus tinctorius L.* (Safflower): a comprehensive review from Traditional Medicine to Modern Medicine. *Electron Physician*. Apr 25;10(4):6672-6681. doi: 10.19082/6672.

Donald, C.M. and Hamblin, J. 1976. The biological yield and harvest index of cereal as Agronomic and plant breeding criteria. *Adv Agronomy*, 28:361-405.

Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979. Yield response to Water. *Irrigation and Drainage*. Paper No. 33, Food and Agricultural Organization. Rome. Italy.

Ebrahimipak, N. A., Egdernezhad, A., Tafteh, A. And Ahmadee, M. 2019. Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to Simulate Rapeseed Yield. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(3), 715-726. (In Farsi).

Elhani, S., Haddadia. M., Csákvárib, E., Zantara, S., Hamima, A., Villányib, V, Douaikc, A., Bánfalvib, Z. 2019. Effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on yield, irrigation water-use efficiency and some potato (*Solanum tuberosum L.*) quality traits under glasshouse conditions. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105745>

Garcia-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F. And Steduto, P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101, 477-487.

Geerts S., and Raes D. 2009. Deficit irrigation as onfarm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96, 1275-1284.

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

Ghadirian, A., Yaghoobzadeh, M., Zamani, G. And Shahidi, A. 2021. Calibration and verification AQUACROP plant model to simulate the performance of three different wheat varieties under drought stress. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(6): 2257-2267.

Gonzalez-Dugo, V., Lopez-Lopez, M., Espadafor, M., Orgaz, F., Testi, L., Zarco-Tejada, P. J., Lorite, I. J., & Fereres, E. 2019. Transpiration from canopy temperature: Implications for the assessment of crop yield in almond orchards. *European Journal of Agronomy*, 105, 78–85.



Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Sohrabi, T., Rasoulzadeh, A., & Ebrahimian, H. 2021. Improving performance of furrow irrigation systems using simulation modelling in the Moghan plain of Iran. *Irrigation and Drainage*, 70(1): 131-149.

Hanks, R.J. 1983. Yield and water-use relationships. In H.M. Taylor, W.R. Jordan, and T.R. Sinclair (ed.) *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p. 393-411.

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

Hong, Y., Lv, Y., Zhang, J., Liu, X., Li, X., Yao, N., Wang, X. 2023. Overexpression of the CtWD40-6 gene enhances soil Pb²⁺ uptake and soil remediation in safflower. *Environmental and Experimental Botany*. Volume 206.

Hsiao, T. C., Heng, L. K., Steduto, P., Raes, D. And Fereres, E. 2009. AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101: 448-459.

Huang, J., Ji, M., Xie, Y., Wang, S., He, Y. & Ran, J. 2016. Global semi-arid climate change over last 60 years. *Climate Dynamics*, 46(3-4): 1131-1150.

Kang, M.H., Wu, H.L., Yang, Q., Huang, L., Hu, Q.J., Ma, T., Li, Z.Y., Liu, J.Q. 2020. A chromosome-scale genome assembly of *Isatis indigotica*, an important medicinal plant used in traditional Chinese medicine: An *isatis* genome. *Hortic. Res.* Vol:7, p: 18.

Khaleghi. M., Hassanpour. F., Karandish. F., Shahnazari. A., 2020. Integrating partial root-zone drying and saline water irrigation to sustain sunflower production in freshwater-scarce regions. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106094>.

Kim, J. H., He, M. T., Kim, M. J., Yang, Ch. Y., Shin, Y. S., Yokozawa, T., Park, Ch. H., and Eun Ju Cho, E. J. 2019. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seed attenuates memory impairment induced by scopolamine in mice via regulation of cholinergic dysfunction and oxidative stress. *Food & Function*. 10: 3650-3659.

Kose, A. 2017. GENE ACTION and COMBINING ABILITY in LINE X TESTER POPULATION of SAFFLOWER (*Carthamus tinctorius* L.). *Turkish Journal Of Field Crops*. 22 (2):197-203

La Bella, S., , Tuttolomondo, T., Luca Lazzeri, L., Matteo, R., Leto, C., Licata, M. 2019. An Agronomic Evaluation of New Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Germplasm for Seed and Oil Yields under Mediterranean Climate Conditions. *Agronomy* 9: 468-478

Marinov D., Querner E., and Roelsma J. 2005. Simulation of water flow and nitrogen transport for a Bulgarian experimental plot using SWAP and ANIMO models. *Journal of Contaminant Hydrology*, 77: 145-164.

Mohammadi, M., Ghahraman, B., Davary, K., Ansari, H. and Shahidi, A. 2015. Validation of AquaCrop Model for Simulation of Winter Wheat Yield and Water Use Efficiency under Simultaneous Salinity and Water Stress. *Journal of Water and Soil*, 29 (1): 67-84.

Murad, K.F.I., Hossain, A., Fakir, O.A., Biswas, S.K., Sarker, K.K., Rannu, R.P., Timsina, J. 2018. Conjunctive use of saline and fresh water increases the productivity of maize in saline coastal region of Bangladesh. *Agric. Water Manag.* 204: 262-270.

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10 (3): 282-290.



- Panigrahi, P. and Srivastava, A.K. 2016. Effective management of irrigation water in citrus orchards under a water scarce hot sub-humid region. *Scientia Horticulturae*. (210):6-13.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101: 438–447.
- Sabzian, M., Rahimikhoob, A., Mashal, M. And Aliniaiefard, S. 2021. in Determination of Performance, Water Use Efficiency and Simulation of Lettuce's Canopy Cover in Hydroponic Cultivation and Soil Cultivation by AquaCrop Model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(6), 2075-2088.
- Sarker, K.K., Hossain, A., Timsina, J., Biswas, S.K., Kundu, B.C., Barman, A., Murad, K.F.I., Akter, F., 2019. Yield and quality of potato tuber and its water productivity are influenced by alternate furrow irrigation in a raised bed system. *Agric. Water Manag.* 224, 105750.
- Shammout, M. W., Qtaishat, T., Rawabdeh, H., Shatanawi, M. (2018): Improving Water Use Efficiency under Deficit Irrigation in the Jordan Valley. *Sustainability*. 10: 4317.
- Siakou, M., Bruggeman, A., Eliades, M., Zoumides, C., Djuma, H., Kyriacou, M.C., Emmanouilidou, M.G., Spyros, A. Manolopoulou, E. Moriana, A. 2021. Effects of deficit irrigation on 'Koroneiki' olive tree growth, physiology and olive oil quality at different harvest dates. *Agricultural Water Management*. 258, 107200: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107200>.
- Singh, A.K., Tripathy, R., Chopra, U.K. 2008. Evaluation of CERESWheat and CropSyst models for water-Nitrogen interactions in wheat crop. *Agric. Water Manage.* 95:776–786.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Journal of Agronomy*.101:426–437.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M., Stocle, C., and Steduto, P. 2009. AssesmentofAquacrop, Cropsyst, and Wofost models in the simulation of sunflower Growth under different water regimes. *Agronomy journal*.101:509-521.
- Vatankhah, I and Ibrahimian, H. 2016. Assessment of AquaCrop model for simulating forage maize yield along the furrow. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 47(3): 495-504
- Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11): 1309-1313.
- Yang, W., Feng, G., Miles, D., Gao, L., Jia, Y., Li, C. 2020. Impact of biochar on greenhouse gas emissions and soil carbon sequestration in corn grown under drip irrigation with mulching. *Sci. Total Environ.* 729, 138752. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138752.
- Zhang, Zh., Liu, R., Pu, X., Sun, Y., Zhao, X. 2017. Evaluation of the sub-chronic toxicity of a standardized flavonoid extract of safflower in rats. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 85:98-107.
- Zhou, L., Feng, H., Zhao, Y., Qi, Zh., Zhang, T., He, J., Dyck, M. 2017. Drip irrigation lateral spacing and mulching affects the wetting pattern, shoot-root regulation, and yield of maize in a sand-layered soil. *Agricultural Water Management*. (184):114-123.