

Evaluation of AquaCrop Model in Simulating Wheat Yield in Four Consecutive Years in Special Sites of Khuzestan Province, Iran

Adel Bavi

Assistant Professor, Department of Engineering, Shohadaye Hoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Dashte Azadegan, Iran

Email: a.bavi@scu.ac.ir

<https://orcid.org/0000-0003-1794-6997>

Introduction

Although numerous studies have employed the AquaCrop model to simulate wheat growth, the evaluation of this model over multiple years and on farmers' fields has received limited attention from researchers. Given Iran's agricultural policies aimed at increasing wheat yields, it is crucial to assess the model's performance under real-field conditions over several years.

Materials and Methods

To reach the goals, data were collected from wheat farms in the cities of Shusha, Ahvaz, Hoveyze, and Khorramshahr during 2020 to 2023, in line with the national policy objectives. During these years, field management was undertaken to improve wheat yield, including weed management at the seedling stage, reducing soil salinity, and increasing farmers' experience in agricultural operations. All parameters such as irrigation, tillage, and weed control were the same in these farms each year, and farmers applied these operations at each site. Given that the method and accuracy of their implementation of farm operations were not the same, five sites with an area of at least 20 hectares were considered in each city. As a result, the total area of the farms under study was more than 4,000 hectares. These cities were close to each other and had almost similar climates. To simulate the yield, the AquaCrop model was used. The model's performance was evaluated using metrics such as Mean Bias Error (MBE), Root Mean Square Error (RMSE), Normalized RMSE (NRMSE), Agreement Index (d), Model Efficiency (EF), and Coefficient of Determination (R^2).

Results and Discussion

The average wheat yield in the sites increased by about 42 percent from 2020 to 2023. The average increase in wheat yield in these sites in 2021 and 2022 compared to 2020 was 16 and 43 percent, respectively. In fact, the largest increase in wheat yield occurred in 2022, while the difference between 2020 and 2021 was small. The average difference between the observed and simulated yields ranged from 0.27 to 0.35 ton.ha⁻¹, which is an acceptable range for the AquaCrop model. Results indicated that AquaCrop performed with excellent accuracy across all locations, with NRMSE values below 0.1. Over the study period, model accuracy improved, with NRMSE decreasing from 0.09 in 2020 to 0.05 in 2023. The accuracy of the AquaCrop model was also examined based on the location, and the results showed that this crop model was less accurate only in Hoveyze, and the results were close in other cities. The efficiency of this crop model was acceptable based on the year and location. In all studied cities, the model tended to underestimate yields, as reflected by negative MBE values, a trend consistent throughout the years. Overall, the findings suggest that geographical location had little impact on the model's accuracy. Instead, improvements over time, likely due to enhanced wheat yields on farms, contributed to increased model precision.

Conclusion

The results showed that during the years 2020 to 2023, the accuracy of the AquaCrop model (based on the NRMSE statistic) increased from 0.08 to 0.05. Although in all these years, the accuracy of this plant model was in the excellent category, with the increase in wheat yield during the years under study, the accuracy of the AquaCrop model also increased. Also, the accuracy of this crop model was observed in the excellent category in all the cities under study, and there was no significant difference between the cities. Considering all the results,

if multi-year wheat-based plans are implemented in the farms, the accuracy of this crop model can be evaluated as desirable in different temporal and spatial conditions, and an increase in accuracy is expected over time in these farms.

Keywords: Crop Modeling, Yield Trend, Wheat Yield, Wheat-based Farms.

ارزیابی مدل آب-محور AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گندم در چهار سال متوالی در

استان خوزستان

عادل باوی

استادیار، گروه مکانیک، پردیس صنعتی شهدای هویزه، دانشگاه شهید چمران اهواز، دشت آزادگان، ایران

ایمیل: a.bavi@scu.ac.ir

<https://orcid.org/0000-0003-1794-6997>

چکیده

گرچه مطالعات مختلفی با استفاده از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی گندم انجام شده است؛ لیکن ارزیابی این مدل گیاهی در طول چند سال و در سطح مزرعه کمتر مورد توجه محققان بوده است. با توجه به وجود طرح‌های کلان ملی، مانند مزارع گندم بنیان در کشور، لازم است قابلیت مدل AquaCrop در شرایط واقعی و در طول بازه زمانی طولانی بررسی گردد. بدین منظور، از داده‌های برداشت شده از مزارع گندم بنیان استان خوزستان در طی سال‌های ۱۳۹۹ الی ۱۴۰۲ در شهرهای شوش، اهواز، هویزه و خرمشهر و با مجموع مساحت ۴۰۰۰ هکتار استفاده گردید. به منظور ارزیابی مدل AquaCrop، از آماره‌های میانگین خطای اریب (MBE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، شاخص توافق (d)، کارایی مدل (EF) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. نتایج نشان داد که دقت مدل AquaCrop در کلیه شهرستان‌ها در دسته عالی قرار داشت ($NRMSE < 0.1$). با گذشت زمان، در طول دوره تحت مطالعه، دقت مدل AquaCrop افزایش یافت به طوری که NRMSE از ۰/۰۹ در سال ۱۳۹۹ به ۰/۰۵ در سال ۱۴۰۲ رسید. در کلیه شهرهای تحت مطالعه مدل AquaCrop دچار خطای کم‌برآوردی گردید ($MBE < 0$). این وضعیت برای عامل سال نیز مشاهده شد. براساس کلیه نتایج، تغییر مکانی اثری بر دقت این مدل گیاهی نداشت ولی گذشت زمان و بهبود عملکرد گندم در سایت‌های الگویی گندم‌بنیان سبب افزایش دقت آن شد.

کلیدواژه‌ها: تغییرات عملکرد، عملکرد گندم، مزارع گندم‌بنیان، مدل‌سازی گیاهی.

مقدمه

گندم به عنوان مهم‌ترین غله در جهان و کشور ایران محسوب می‌شود به طوری که حدود ۵۰ درصد سطح زیر کشت در کشور به آن اختصاص دارد (Agricultural Statistics, 2024; Haghighati, 2025). به همین دلیل، هر اقدامی برای افزایش عملکرد آن در واحد سطح می‌تواند به امنیت غذایی کشور کمک شایانی کند (Aghajanlo and Nikbakht, 2023). در راستای این هدف، پروژه افزایش عملکرد گندم در نظام‌های گندم بنیان کشور در سال ۱۳۹۹ به مرحله اجرا درآمد. بخش اعظمی از این طرح ملی، در استان خوزستان و در سایت‌های الگویی مورد نظارت سازمان جهاد کشاورزی انجام گردید. در این مزارع سعی شد با مدیریت زراعی، عملکرد گندم در راستای برنامه‌های بالادستی کشاورزی افزایش یابد. گندم تحت تأثیر شرایط مکان و زمان دارای عملکرد متفاوتی است و به همین دلیل توسعه نتایج به دست آمده در این مزارع به سایر نقاط کشور نیازمند به کارگیری مدل‌سازی است (Yesilkoy and Saylan, 2020; Parviz et al., 2024). مدل‌های گیاهی به منظور شبیه‌سازی اثر عوامل محیطی و مدیریت در مزرعه بر عملکرد گیاهان زراعی مورد استفاده قرار می‌گیرند و نتایج آن‌ها می‌تواند به تسریع تصمیم‌گیری و کاهش هزینه‌های اجرای پایلوت‌ها منجر شود (Jorenush et al., 2024).

مدل AquaCrop یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد برای شبیه‌سازی غلات از جمله گندم است که توسط محققان بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است (Safari et al., 2026). این مدل گیاهی دارای رابط گرافیکی است و به همین دلیل کار با آن برای محققان آسان است (Aghajanlo and Nikbakht, 2023). این مدل گیاهی به داده‌های کمتری، نسبت به سایر مدل‌های موجود، برای شبیه‌سازی نیاز دارد. از این رو می‌توان از این مدل با حداقل داده‌ها موجود در مزارع استفاده کرد (Jorenush et al., 2024).

پژوهش‌های انجام شده با مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی گندم از سال ۲۰۱۱ و با مطالعات Salemi et al., (2011) آغاز شد. این محققان به بررسی تغییرات عملکرد گندم تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که دقت و کارایی مدل AquaCrop در شرایط مورد مطالعه قابل قبول بود. مطالعه‌ی کومار و همکاران (Kumar et al., 2014) در هندوستان برای ارقام مقاوم به شوری گندم انجام شد. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop دقت خوبی برای شبیه‌سازی عملکرد گندم داشت.

کیم و کالواراچی (Kim and Kaluarachchi, 2015) با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای، به شبیه‌سازی عملکرد گندم با استفاده از مدل AquaCrop پرداختند و گزارش کردند که به‌منظور کاهش هزینه‌های برداشت داده در مزرعه، می‌توان از این روش استفاده کرد و دقت مدل AquaCrop نیز مشابه زمان برداشت داده از مزرعه می‌باشد. Jalil et al. (2020) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی سناریوهای آبیاری گندم در کشور افغانستان استفاده کردند. این محققان با اعتماد بر دقت و کارایی این مدل گیاهی، سناریوی مدیریتی آبیاری برحسب تعیین میزان تخلیه رطوبت از خاک ارائه کردند تا براساس آن بتوان عملکرد گندم را افزایش داد. در پژوهشی دیگر، Yesilkoy and Saylan (2020) با واسنجی مدل AquaCrop در کشور ترکیه، از این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد گندم تحت شرایط تغییر اقلیم استفاده کردند. آقاجانلو و نیکبخت (Aghajanlo and Nikbakht, 2023) به ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم زمستانه در منطقه زنجان پرداختند. این محققان گزارش کردند که بیشترین اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی عملکرد حدود ۶/۹ درصد بود. همچنین مقدار آماره R^2 در این مطالعه حدود ۰/۹۶ به دست آمد که نشان‌دهنده قابلیت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی بیش از ۹۶ درصد تغییرات عملکرد گندم در مزرعه بود.

خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2022) در بررسی اثرات تاریخ کاشت بر عملکرد گندم آبی در خرم‌آباد گزارش کردند که در صورت کاشت گندم زودتر از ۱۵ مهر و دیر از ۳۰ آبان سبب حادث شدن مراحل رشد با شرایط اقلیمی نامناسب می‌شود.

به همین دلیل عملکرد گندم کاهش می‌یابد. Jorenush et al (2024) به ارزیابی مدل AquaCrop تحت مقادیر مختلف آب آبیاری و تغییر تاریخ کاشت در استان قزوین پرداختند. این محققان گزارش کردند که مقادیر NRMSE در مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۲۴ بود در حالی که مقدار آماره‌ی d در این دو مرحله به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۸۰ به دست آمد. در نتیجه این محققان دقت و کارایی مطلوب مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی گندم در این منطقه گزارش دادند. Dehghani et al (2026) با استفاده از مدل AquaCrop به تحلیل اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر بهره‌وری آب گندم در استان البرز پرداختند. این محققان گزارش کردند که مدل AquaCrop در شرایط آبیاری کامل عملکرد مناسبی داشت ولی در آبیاری‌های محدود و دور آبیاری طولانی (۱۴ روزه) از دقت آن کاسته شد. لیکن، با توجه به نتایج قابل قبول این مدل، عملکرد گندم تا سال ۲۰۴۰ تحت سناریوهای پایدار، میانه و پرانتشار گازهای گلخانه‌ای شبیه‌سازی گردید.

در پژوهشی Radmanesh et al (2026) به بررسی عدم قطعیت پایگاه‌های داده اقلیمی در شبیه‌سازی مدل AquaCrop پرداختند. این محققان بیان کردند که عدم قطعیت داده‌ها اثر زیادی بر نتایج این مدل گیاهی می‌گذارد. به همین دلیل از دو روش GLUE و Bootstrap برای برآورد عدم قطعیت استفاده کردند. نتایج نشان داد که روش GLUE برای تحلیل‌های جامع‌تر مناسب‌تر است در حالی که روش Bootstrap به دلیل سادگی و ارائه باندهای باریک‌تر، گزینه بهتری برای مطالعات در شرایط داده‌های محدود است. Bagheri Khaneghahi et al (2025) با استفاده از مدل AquaCrop به بررسی اثر تغییر کاشت بر عملکرد گندم دیم در چند اقلیم کشور ایران پرداختند. این محققان نشان دادند که عملکرد این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی گندم قابل قبول بود و با استناد به این نتایج، به شبیه‌سازی عملکرد گندم در تاریخ‌های ۳۰ مهر تا ۲۰ آذر پرداختند. نتایج نشان داد که در صورت کاشت در تاریخ‌های مهر و اوایل آبان، عملکرد بیشتری به دست می‌آید. Akbari and Farzamia (2025) به بررسی بیلان آب و املاح بر عملکرد گندم در سطح مزرعه تحت دو روش آبیاری سطحی و قطره‌ای پرداختند این محققان برای شبیه‌سازی از مدل AquaCrop استفاده کردند. نتایج نشان داد که در آبیاری سطحی حدود ۰/۵ تن و در آبیاری قطره‌ای دو تن نمک در هر هکتار تجمع یافت.

مروار مطالعات انجام شده در زمینه ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم نشان داد که خلاء بررسی تغییرات مکانی و زمانی در ارزیابی این مدل گیاهی وجود دارد. در واقع، تاکنون به این سؤال پاسخ داده نشده است که دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی یک گیاه زراعی یکسان در شرایط مختلف زمانی و مکانی و در پایلوت‌های با مقیاس مزرعه چه تغییری می‌کند. به همین دلیل، این پژوهش با هدف دستیابی به پاسخ سؤال مطرح شده انجام گردید.

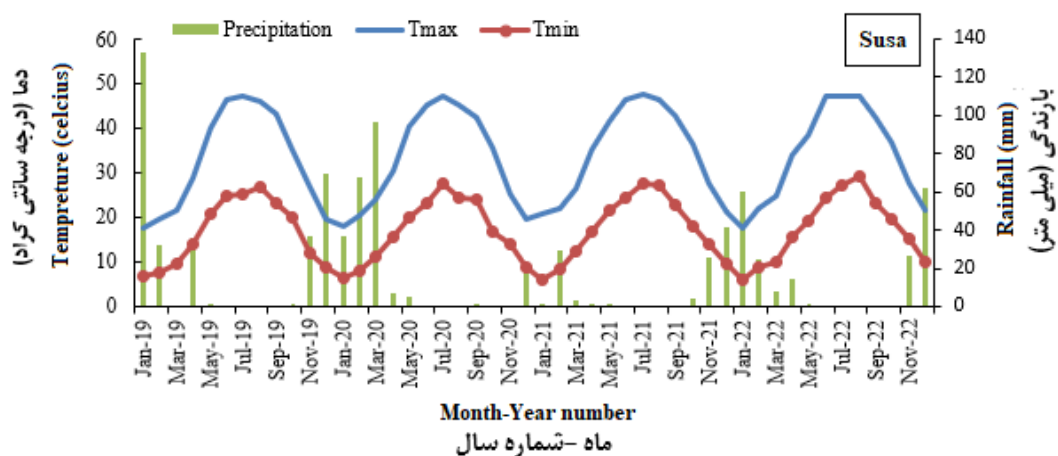
مواد و روش‌ها

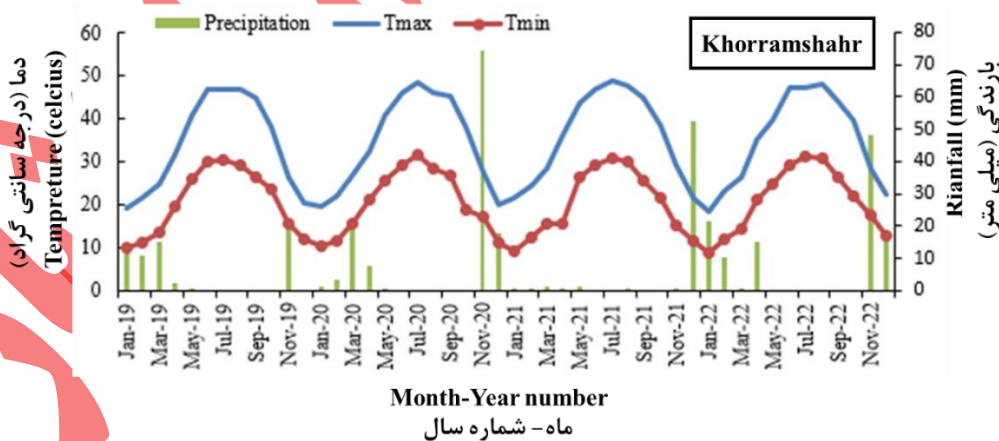
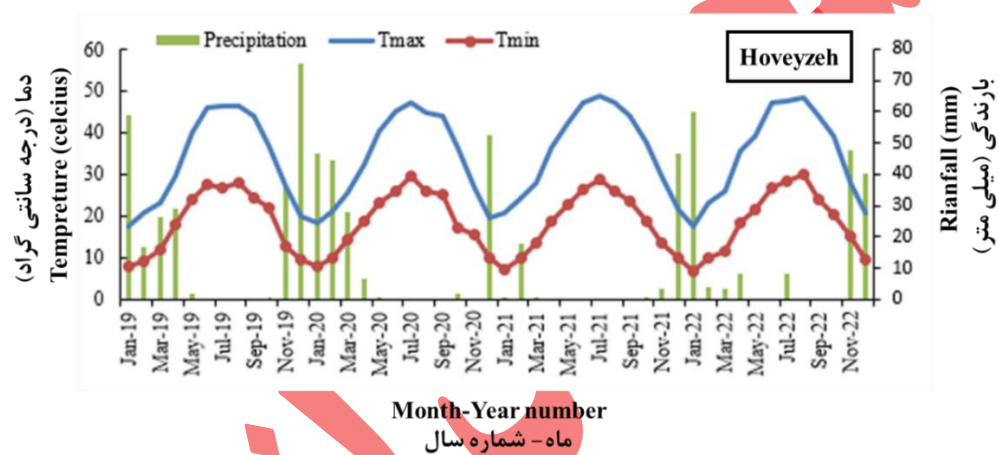
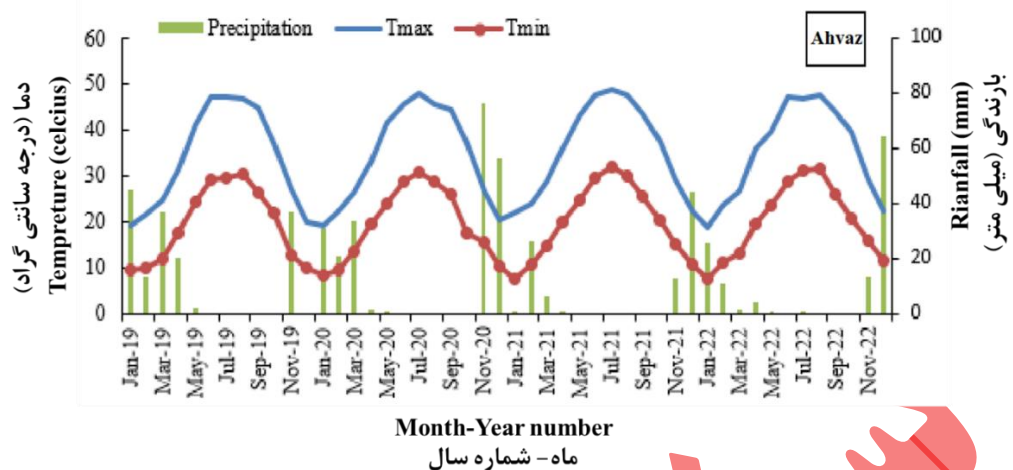
منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در مزارع گندم دانش‌بنیان در استان خوزستان طی سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۹ انجام گردید. این مزارع از سال ۱۳۹۹ و در چندین پایلوت در شهرستان‌های شوش، اهواز، هویزه و خرمشهر اجرا گردید و در خلال این سال‌ها سعی شد با بهبود مدیریت در مزرعه، شامل مواردی از قبیل مدیریت علف‌های هرز در مرحله داشت، کاهش شوری خاک و افزایش تجربه کشاورزان در انجام عملیات زراعی، عملکرد گندم افزایش یابد. کلیه پارامترها مانند آبیاری، خاک‌ورزی و مبارزه با علف‌های هرز در این مزارع در هر سال یکسان بود و کشاورزان در هر پایلوت به اعمال این عملیات می‌پرداختند. با توجه به اینکه نحوه انجام و دقت آن‌ها در اجرای عملیات مزرعه‌ای یکسان نبود؛ بنابراین در هر شهرستان ۵ پایلوت با مساحت حداقل ۲۰ هکتار در نظر گرفته شد. در نتیجه، مجموع مساحت مزارع تحت مطالعه بیش از ۴۰۰۰ هکتار بود. این شهرستان‌ها نزدیک به هم و دارای اقلیم تقریباً مشابه هم بودند ولی میزان بارندگی ثبت شده در این چهار سال برای هر شهرستان متفاوت بود. متوسط دمای

کمینه و بیشینه هوا در شهرستان شوش در طی سال‌های مورد مطالعه به ترتیب ۱۸ و ۳۴ درجه سانتی‌گراد بود. متوسط دمای کمینه هوا برای شهرستان‌های اهواز، خرمشهر و هویزه به ترتیب ۱۹، ۱۸ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد و متوسط دمای بیشینه هوا برای این شهرستان‌ها برابر با ۳۴ درجه سانتی‌گراد بود. مجموع بارندگی در شهرستان شوش در طی ۱۴۰۲-۱۳۹۹ به ترتیب ۳۰۷، ۲۳۵، ۱۰۴ و ۱۹۶ به دست آمد. مجموع بارندگی در شهرستان اهواز در طی این چهار سال به ترتیب ۱۵۵، ۲۲۰، ۹۰ و ۱۱۹، در شهرستان هویزه به ترتیب ۲۴۶، ۱۸۱، ۶۹ و ۱۷۱ و در شهرستان خرمشهر به ترتیب ۶۴، ۱۲۷، ۵۶ و ۱۱۳ میلی‌متر بود. (شکل ۱) مقدار کود نیتروژن، فسفر و پتاس برای کلیه مزارع براساس توصیه عمومی ارائه شده در استان خوزستان به ترتیب ۳۵۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد (Jafarnejadi et al., 2024). کود نیتروژن به صورت سرک در سه مرحله آب دوم، پنجه‌زنی و ساقه‌روی به مزارع داده شد. این روش مصرف براساس شرایط محلی حاکم بر مزارع انجام گردید. سایر کودها به صورت پایه و در ابتدای کاشت مصرف شدند. زمان آبیاری براساس عرف منطقه پنج مرتبه در طول فصل رشد است. البته به دلیل تغییرات مقدار و زمان بارندگی بین شهرستان‌ها، زمان آبیاری تا حداکثر یک هفته بین شهرستان‌ها متفاوت بود.

به دلیل وسعت زیاد مزارع تحت مطالعه (مجموعاً ۴۰۰ هکتار)، زمان آبیاری براساس پایش کلی مزارع و تشخیص رطوبت مزرعه به صورت لمسی تعیین شد. مقدار آب آبیاری برای کلیه مزارع برابر با ۴۵۰۰ مترمکعب (۴۵۰ میلی‌متر) در طول فصل رشد در نظر گرفته شد (جدول ۱). پس از بارندگی، آبیاری بین ده الی چهارده روز انجام نمی‌شد. زمان آبیاری براساس دبی پمپاژ در هر مرحله از آبیاری محاسبه می‌گردید. روش آبیاری در کل مزارع به صورت ثقلی بود. گندم در کلیه این مزارع در تاریخ یکسان و در ابتدای آبان کشت شد. برداشت گندم نیز در انتهای اردیبهشت هر سال انجام گردید. عملکرد گندم با برداشت مکانیزه توسط کمباین اندازه‌گیری گردید.





شکل ۱. تغییرات پارامترهای هواشناسی در پایلوت‌های مورد مطالعه (ارقام ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ در محور افقی نشان دهنده سال‌های ۲۰۱۹، ۲۰۲۰، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ هستند)

Fig 1. Changes in meteorological parameter values in the pilots (numbers 19, 20, 2021 and 22 represents 2019, 2020, 2021 and 2022, respectively)

جدول ۱. متوسط مقادیر بارندگی، آب آبیاری و عملکرد در شهرستان‌های مورد مطالعه

Table 1. Average of rainfall, irrigation and yield in all the studied cities

پارامتر	شوش	اهواز	هویزه	خرمشهر
Parameter	Susa	Ahvaz	Hoveyzeh	Khorramshahr
متوسط بارندگی (میلی‌متر)	210	146	167	90
Average rainfall (mm)				
متوسط آبیاری (میلی‌متر)	240	304	283	360
Average irrigation (mm)				
متوسط عملکرد (تن در هکتار)	2.9	3.4	4.2	4.1
Average yield (tons per hectare)				

مدل AquaCrop

از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در این پژوهش استفاده شد. این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی از رابطه ۱ استفاده می‌کند (Raes et al., 2009):

$$Y = B \times HI \quad (1)$$

در این رابطه، Y عملکرد، HI شاخص برداشت و B بیوماس خشک است که از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد (Raes et al., 2009):

$$B = WP^* \left[\frac{Tr}{ET_o, i} \right] \quad (2)$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب و ET_o تبخیر-تعرق گیاه مرجع است که در این مدل گیاهی مطابق رابطه ۳ به دو جز تبخیر (E) و تعرق (Tr) سبب می‌شود تا مصرف غیر تولیدی آب از معادلات حذف شود (Raes et al., 2009):

$$Tr = K_s \times CC \times K_e \times ET_o \quad (3)$$

در این رابطه K_s و K_e به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) که توسط رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Raes et al., 2009):

$$CC = CC_o \times e^{CGCi} \quad (4)$$

ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی مدل AquaCrop، داده‌های برداشت شده به دو دسته تقسیم شدند. در دسته نخست، داده‌های چهار مزرعه در هر شهرستان قرار داده و این داده‌ها برای مرحله واسنجی در نظر گرفته شدند. در دسته دوم، داده‌های یک پایلوت از هر شهرستان در نظر گرفته شد و این داده‌ها به منظور صحت‌سنجی مدل AquaCrop مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین، واسنجی و صحت‌سنجی در هر چهار سال انجام شد. پارامتر عملکرد گندم در کلیه مزارع به عنوان عامل مورد ارزیابی در نظر گرفته شد. در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، از آماره‌های میانگین خطای اریب (MBE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، شاخص توافق (d)، کارایی مدل (EF) و ضریب تبیین (R^2) برای ارزیابی مدل AquaCrop استفاده شد. این آماره‌ها در روابط (۵) تا (۱۰) نشان داده شده‌اند. برخی از عوامل مورد واسنجی، اندازه‌گیری شده و پیش‌فرض در مدل AquaCrop در جدول (۲) نشان داده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{n}} \quad (5)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{n}}}{\bar{Oi}} \quad (6)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)}{n} \quad (7)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Pi| - |Oi|)^2} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{\sum (Pi - \bar{P}) \sum (Oi - \bar{O})^2}{\sum (Pi - \bar{P})^2 \sum (Oi - \bar{O})^2} \quad (10)$$

جدول ۲. مقادیر عوامل واسنجی شده در مدل AquaCrop

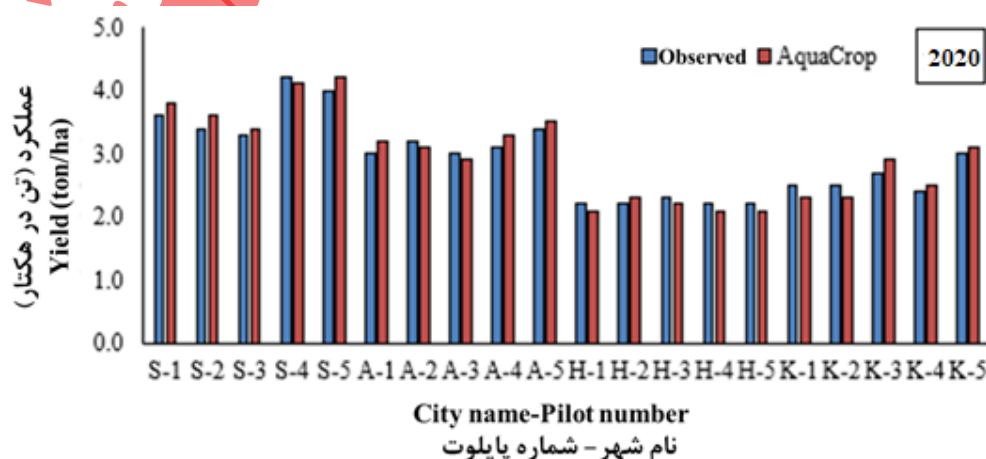
Table 2. Calibrated input values in AquaCrop

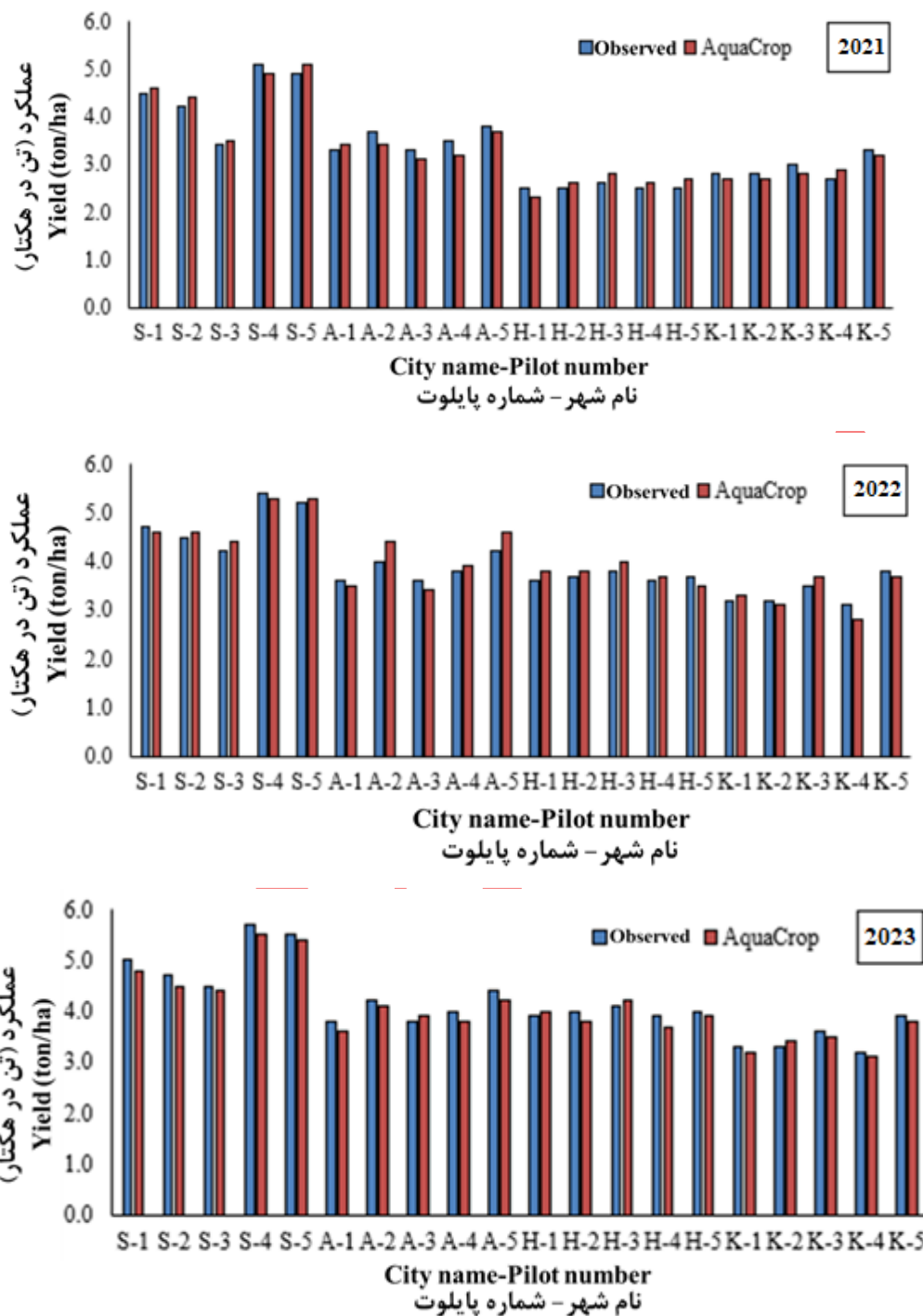
توضیح	واحد	مقدار عامل در سال های مختلف				توضیح عامل
Description	Unit	Parameters value in different years				Parameters description
		چهارم	سوم	دوم	اول	
		Fourth	Third	Second	First	
پیش فرض	درجه سانتی گراد	0	0	0	0	دمای پایه
Default	(°C)					Base temperature
پیش فرض	درجه سانتی گراد	26	26	26	26	دمای بالا
Default	(°C)					Upper temperature
واسنجی	درصد روز	4.9	4.9	4.4	3.9	ضریب رشد کانوپی
Calibrated	(%/day)					Canopy growth coefficient
پیش فرض	سانتی متر مربع	1.5	1.5	1.5	1.5	پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه زنی
Default	(cm ²)					Canopy cover of each seedling at germination
واسنجی	متر	0.40	0.40	0.30	0.30	عمق مؤثر ریشه
Calibrated	(m)					Effective root depth
اندازه گیری	روز	10	12	9	11	مدت زمان کاشت تا جوانه زنی
Measured	(day)					Time from planting to germination
پیش فرض	روز	105	105	105	105	مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی
Default	(day)					Time from cultivation to maximum canopy cover growth
پیش فرض	روز	140	140	140	140	مدت زمان کاشت تا دوره پیری
Default	(day)					Time from cultivation to senescence
اندازه گیری	روز	150	150	150	150	مدت زمان کاشت تا برداشت محصول
Measured	(day)					Time from cultivation to harvest
واسنجی	گرم بر متر مربع	15	15	14	13	بهره‌وری آب نرمال شده
Calibrated	(g/m ²)					Normalized water productivity
واسنجی	درصد	95	95	90	90	بیشینه رشد کانوپی
Calibrated	(%)					Maximum canopy cover growth
واسنجی	-	0.23	0.23	0.23	0.23	حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه
Calibrated	-					Upper limit of soil water drainage coefficient for crop development
واسنجی	-	0.65	0.65	0.65	0.65	حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه
Calibrated	-					

Lower limit of water drainage coefficient for crop development						ضریب رشد پوشش
واسنجی	درصد روز	6.6	5.7	5.3	4.5	Canopy crop growth coefficient
Calibrated	(%/day)					
ضریب کاهش پوشش						Canopy crop reduction coefficient
واسنجی	درصد روز	8.2	9.0	9.8	10.1	
Calibrated	(%/day)					
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق						Maximum crop coefficient for transpiration
واسنجی	درصد بر روز	1.05	1.00	1.00	0.85	
Calibrated	(%/day)					

نتایج و بحث

نتایج مرحله واسنجی برای سال‌های تحت مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به اینکه عملیات داشت مانند مدیریت علف هرز و بهبود وضعیت شوری خاک و تجربه کشاورزان برای مدیریت مزرعه در هر سال بهبود می‌یافت، عملکرد گندم نیز تغییر می‌کرد. براساس مطالعات محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2026)، افزایش دما و کاهش بارش در سال‌های آتی، سبب می‌شود تا خوزستان مستعد خشکسالی‌های خیلی شدید گردد. به همین دلیل، این محققان پیش‌بینی کردند که به احتمال زیاد، در صورت عدم بهبود عملکرد گندم در مزارع کشاورزی، حرکت مناطق کشاورزی به سمت بیابان‌زایی رخ خواهد داد. در نتیجه، مزارع گندم بنیان سبب تغییر رویکرد کشاورزی در استان خوزستان می‌گردد زیرا عملکرد در این مزارع هر سال در حال بهبود است. به همین دلیل، برای هر چهار سال تحت مطالعه به صورت مجزا واسنجی انجام گردید. متوسط عملکرد گندم در پایلوت‌های مورد نظر از سال ۱۳۹۹ الی ۱۴۰۲ حدود ۴۲ درصد افزایش یافته است. افزایش متوسط عملکرد گندم در این پایلوت‌ها در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ نسبت به سال ۱۳۹۹ به ترتیب ۱۶ و ۴۳ درصد بود. در واقع، بیشترین افزایش عملکرد گندم در سال ۱۴۰۱ رخ داد در حالی که اختلاف بین دو سال ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ اندک بود. علت آن، تجربه کمتر کشاورزان نسبت به عملیات داشت بود که این موضوع در دو سال ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ بهبود یافت. متوسط اختلاف بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در سال ۱۳۹۹ حدود ۴/۸ درصد به دست آمد و این مقدار برای سال‌های ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۲ به ترتیب ۴/۹، ۴/۳ و ۳/۴ درصد بود. حداکثر اختلاف بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای سال‌های ۱۳۹۹ الی ۱۴۰۲ به ترتیب برابر با ۶/۸، ۹/۰، ۱۰/۲ و ۴/۸ و حداقل اختلاف بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای این سال‌ها به ترتیب برابر با ۳/۴، ۳/۰، ۲/۶ و ۲/۴ تعیین گردید. با توجه به این نتایج، تغییر در عملیات داشت و بهبود عملکرد گندم اثری در متوسط اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نداشت.





شکل ۲. مقایسه‌ی عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی (حروف S، A، H و K به ترتیب نشان دهنده‌ی شهرهای شوش، اهواز، هویزه و خرمشهر هستند)

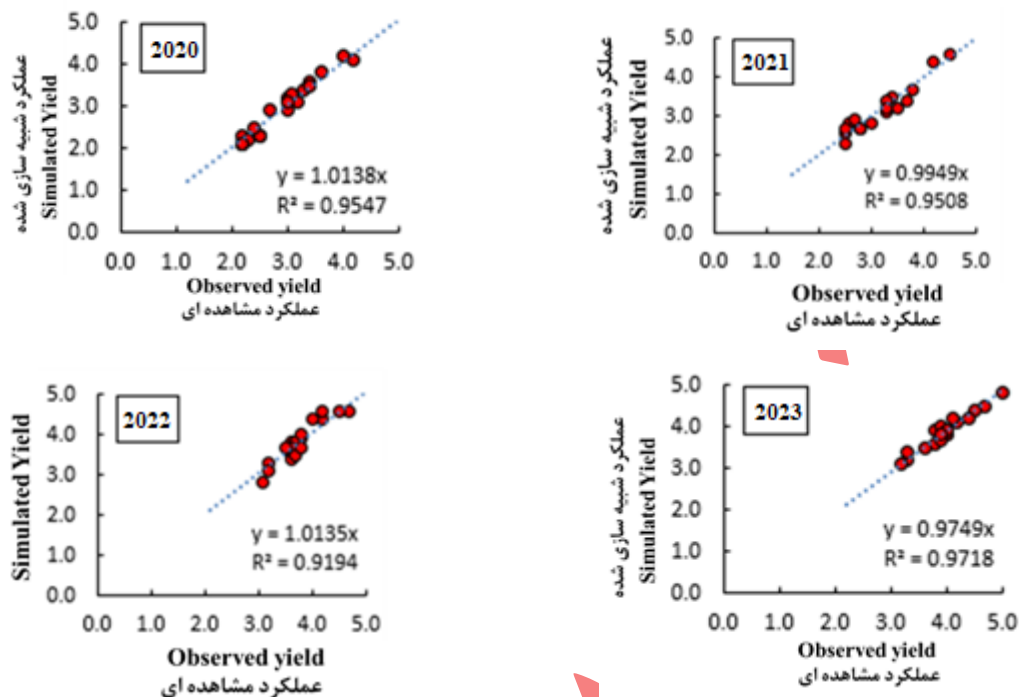
Fig 2. Comparison of observed and simulated yield in the calibration phase (letters S, A, H and K represent Shusha, Ahvaz, Hoveyze, and Khorramshahr, respectively)

نتایج واسنجی مدل AquaCrop بر اساس آماره‌های معرفی شده در روابط (۵) الی (۱۰) در جدول (۳) نشان داده شده است. این مدل گیاهی در سال ۱۳۹۹ دچار خطای بیش‌برآوردی شد ولی در سال‌های بعدی خطای کم‌برآوردی در نتایج این مدل مشاهده گردید. مقادیر آماره‌ی RMSE نشان داد که مدل AquaCrop در سال ۱۳۹۹ به طور متوسط خطایی برابر با ۰/۱۴ و تن در هکتار داشت که این مقدار مشابه سال ۱۴۰۲ بود. خطای این مدل در دو سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ به ترتیب به ۰/۱۷ و

۰/۱۹ تن در هکتار افزایش یافت. با این وجود، نتایج نشان داد که این مدل در طول هر چهار سال مورد مطالعه دارای دقت عالی ($NRMSE < 0.1$) بود. همچنین کارایی مدل AquaCrop براساس دو آماره‌ی EF و d بسیار بالا به دست آمد. مقایسه بین پایلوت‌های اجرا شده در چهار شهرستان استان خوزستان نشان داد که بیشترین خطا در شهرستان اهواز ($RMSE = 0.2$ $ton.ha^{-1}$) و کمترین خطا در دو شهرستان شوش و خرمشهر ($RMSE = 0.15$ $ton.ha^{-1}$) وجود داشت. با توجه به اینکه دقت مدل AquaCrop برای هر چهار شهرستان در دسته عالی ($NRMSE < 0.1$) قرار داشت و اختلاف خطای بین شهرستان‌ها حداکثر ۰/۰۵ تن در هکتار بود؛ بنابراین این خطا قابل چشم‌پوشی است و به محل اجرای پایلوت‌ها بستگی نداشت. همبستگی بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده براساس سال آزمایش و محل پایلوت به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. مقادیر R^2 برای کلیه سال‌های آزمایش بیشتر از ۹۱ درصد است به همین دلیل مدل AquaCrop توانایی پیش‌بینی حداقل ۹۱ درصد از تغییرات عملکرد ناشی از شرایط موجود در مزارع را داشت. مقادیر R^2 در شهرستان‌های اهواز و خرمشهر به ترتیب ۷۷ و ۸۸ درصد بود. در واقع، توانایی مدل AquaCrop برای پیش‌بینی تغییرات عملکرد در مزرعه در این دو شهرستان کمتر از شوش و هویزه است. متوسط عملکرد گندم در شهرستان‌های اهواز و خرمشهر به ترتیب ۳/۵ و ۳/۶ تن در هکتار بود در حالی که این مقادیر برای دو شهرستان شوش و هویزه به ترتیب ۴/۶ و ۲/۹ تن در هکتار به دست آمد. بنابراین نمی‌توان عملکرد گندم را عامل کاهش توانایی مدل AquaCrop در نظر گرفت. افزایش عملکرد از سال ۱۳۹۹ الی ۱۴۰۲ در پایلوت‌های اهواز، خرمشهر، شوش و هویزه به ترتیب ۰/۹، ۱/۰، ۱/۴ و ۱/۷ تن در هکتار بود. از این رو، شاید بتوان مدیریت در مزرعه، که عامل تغییر عملکرد در طی سال‌های مورد مطالعه بود، را عامل اساسی در دقت مدل AquaCrop در نظر گرفت. نقش مدیریت مزرعه در شبیه‌سازی مدل AquaCrop احتمالاً برای سال‌های آتی پررنگ‌تر خواهد بود. زیرا براساس مطالعات انجام شده در استان خوزستان، به دلیل تغییر اقلیم دوره رشد گیاه گندم کاهش خواهد یافت (Deihimfard et al., 2017). در نتیجه، این موضوع عامل اساسی برای شبیه‌سازی مزارع گندم‌بنیان در سال‌های آینده خواهد بود.

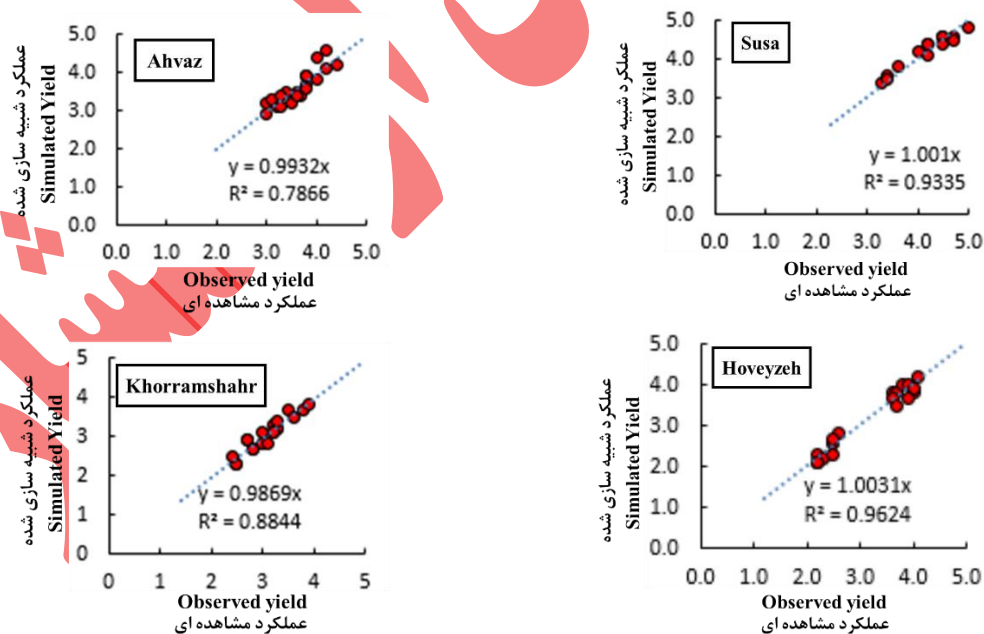
جدول ۳. نتایج واسنجی مدل AquaCrop براساس سال و محل پایلوت
Table 3. AquaCrop calibration results based on the year and location

d	EF	NRMSE	RMSE	MBE	Parameter
سال Year					
0.99	0.90	0.05	0.14	0.03	۱۳۹۹
					2020
0.99	0.99	0.05	0.17	-0.01	۱۴۰۰
					2021
0.99	0.90	0.04	0.19	0.05	۱۴۰۱
					2022
0.99	0.90	0.03	0.14	-0.1	۱۴۰۲
					2023
شهر city					
0.99	0.90	0.03	0.15	0.02	شوش Susa
0.99	0.70	0.05	0.20	-0.02	اهواز Ahvaz
0.99	0.99	0.04	0.14	0.01	هویزه Hoveyzeh
0.99	0.90	0.04	0.15	-0.04	خرمشهر Khorramshar



شکل ۳. همبستگی بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در سال‌های تحت مطالعه برای کلیه پایلوت‌های استان خوزستان در مرحله واسنجی

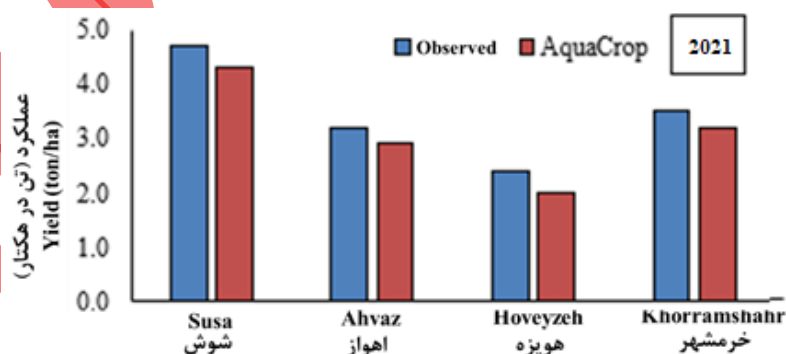
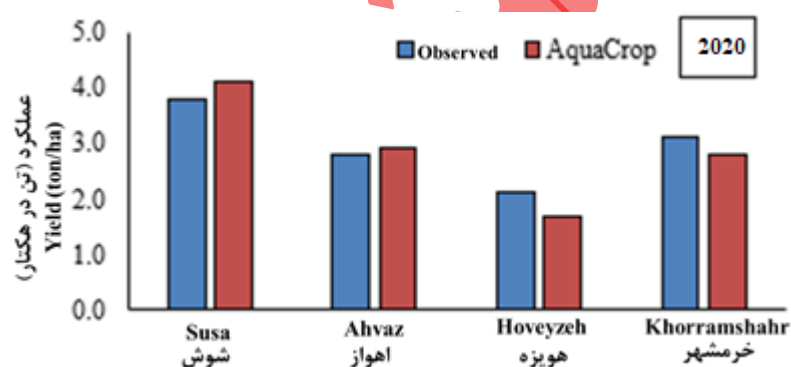
Fig 3. Correlation between observed and simulated yield for all the studied pilots in the calibration phase

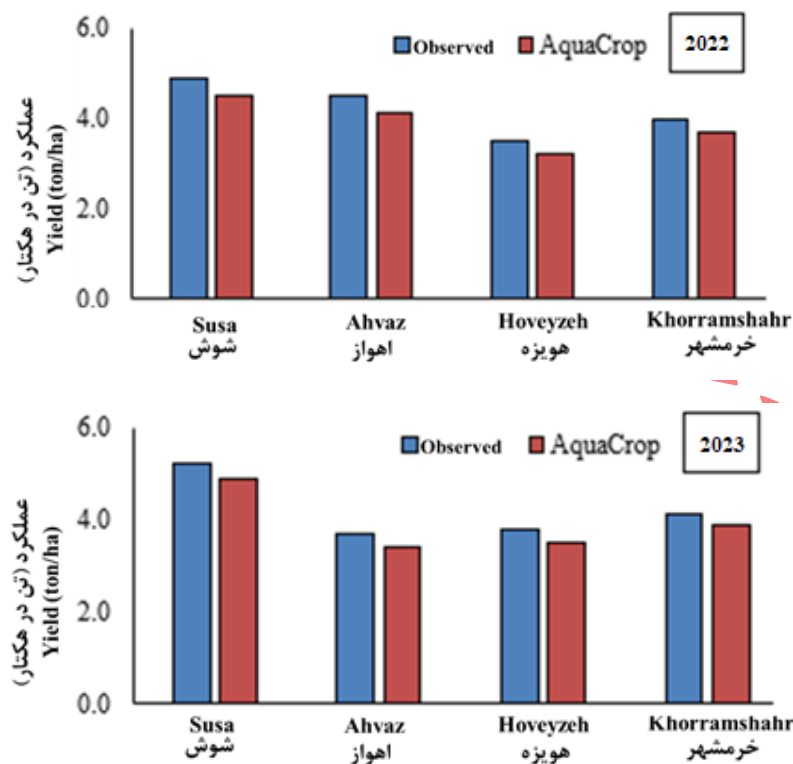


شکل ۴. همبستگی بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در پایلوت‌های تحت مطالعه در سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۹ در مرحله واسنجی

Fig 4. Correlation between observed and simulated yield in the pilots under study during 2020-2023 in the calibration phase

نتایج مرحله صحت‌سنجی در شکل (۵) نشان داده شده است. روند منظمی بین تغییرات عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop مشاهده نشد. متوسط اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بین ۰/۲۷-۰/۳۵ تن در هکتار متغیر بود که این دامنه نشان دهنده‌ی خطای قابل قبول مدل AquaCrop است. نتایج آماری براساس سال و محل پایلوت نیز در جدول (۴) نشان داده شده است. مدل AquaCrop در هر چهار سال دچار خطای کم‌برآوردی گردید ولی دقت آن در دسته‌ی عالی ($NRMSE < 0.1$) قرار داشت. این نتایج با مطالعات سایر محققان مطابقت داشت (Ge et al., 2023; Sharafi et al., 2023). با توجه به اینکه دوره رشد گندم بر اثر خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم در استان خوزستان حداقل ۱۵ روز کاهش خواهد یافت (Amiri et al., 2021)، لذا عملکرد مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم نیز متأثر از این موضوع خواهد شد. در واقع، کم‌برآوردی عملکرد توسط مدل AquaCrop، به دلیل کوتاه‌تر بودن دوره رشد این گیاه زراعی در استان خوزستان نسبت به داده‌های پایه مدل است. بنابراین، احتمال می‌رود که در سال‌های منتهی به ۱۴۱۰، مقدار خطای مدل AquaCrop اندکی افزایش یابد. دقت مدل AquaCrop براساس محل پایلوت نیز بررسی گردید و نتایج نشان داد که این مدل گیاهی تنها در شهرستان هویزه دقت کمتری داشت و در سایر شهرستان‌ها نتایج نزدیک به هم بود. کارایی این مدل گیاهی براساس سال و محل پایلوت قابل قبول بود. مقدار R^2 در شکل‌های (۶) و (۷) نیز نشان داد که مدل AquaCrop توانایی مطلوبی برای بررسی تغییرات عملکرد داشت. گرچه مقدار R^2 برای شهرستان شوش کمتر از سایر شهرستان‌ها بود، ولی براساس نتایج جدول (۴) و شکل (۵) می‌توان دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی گندم در این شهرستان را قابل قبول دانست.

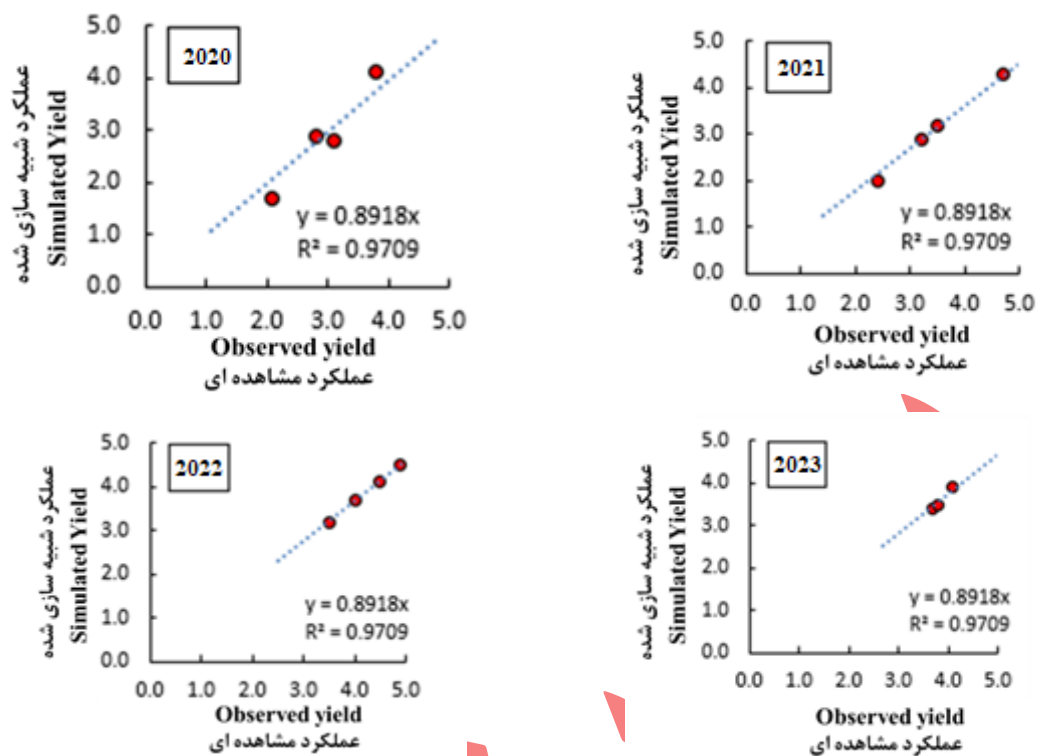




شکل ۵. مقایسه عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی
Fig 5. Comparison of observed and simulated yield in the validation phase

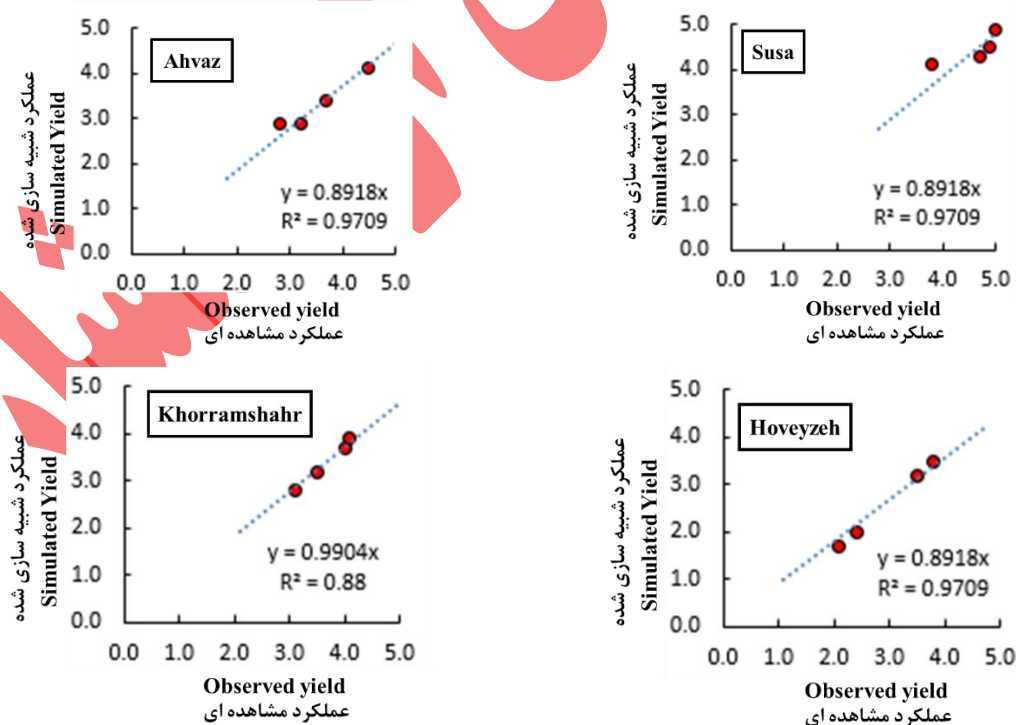
جدول ۴. نتایج صحت‌سنجی مدل AquaCrop براساس سال و محل پابلوت
Table 4. AquaCrop validation results based on the year and location

d	EF	NRMSE	RMSE	MBE	Parameter
سال Year					
0.99	0.76	0.08	0.26	-0.07	۱۳۹۹
					2020
0.99	0.81	0.09	0.31	-0.35	۱۴۰۰
					2021
0.99	0.54	0.07	0.32	-0.35	۱۴۰۱
					2022
0.99	0.78	0.05	0.24	-0.27	۱۴۰۲
					2023
شهر City					
0.99	0.99	0.06	0.31	-0.20	شوش Susa
0.99	0.99	0.07	0.26	-0.22	اهواز Ahvaz
0.99	0.98	0.10	0.31	-0.35	هویزه Hoveyze
0.99	0.99	0.06	0.24	-0.27	خرمشهر Khorramshahr



شکل ۶. همبستگی بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در سال‌های تحت مطالعه برای کلیه پایلوت‌های استان خوزستان در مرحله صحت‌سنجی

Fig 6. Correlation between observed and simulated yield for all the studied pilots in the validation phase



شکل ۷. همبستگی بین عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در پایلوت‌های تحت مطالعه در سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۹ در مرحله صحت‌سنجی

Fig 7. Correlation between observed and simulated yield in the pilots under study during 2020-2023 in the validation phase

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل AquaCrop در مقیاس مزرعه و در چند پایلوت در سطح استان خوزستان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در طی سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲، دقت مدل AquaCrop (براساس آماره‌ی NRMSE) از ۰/۰۸ به ۰/۰۵ افزایش یابد. گرچه در کلیه این سال‌ها، دقت این مدل گیاهی در دسته‌ی عالی قرار داشت ولی با افزایش عملکرد گندم در طی سال‌های مورد مطالعه، دقت مدل AquaCrop نیز افزایش یافت. همچنین، دقت این مدل گیاهی در کلیه شهرهای مورد مطالعه در دسته‌ی عالی مشاهده گردید و تفاوت محسوسی بین سایت‌های الگویی وجود نداشت. با توجه به کلیه نتایج، در صورت اجرای طرح‌های چند ساله گندم بنیان در مزارع کشور، می‌توان دقت این مدل گیاهی را در شرایط زمانی و مکانی مختلف مطلوب ارزیابی کرد و انتظار افزایش دقت با گذشت زمان در این مزارع داشت.

سپاسگزاری

نویسنده از سازمان هواشناسی کشور و استان خوزستان بابت تأمین داده‌های هواشناسی و همچنین از سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان بابت در اختیار گذاشتن داده‌های کشاورزی کمال تشکر و قدردانی را دارد.

References

- Akbari, M., & Farzamnia, M. (2025). Water and salt balance in surface and drip irrigation of winter wheat fields under water and soil salinity conditions. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 19(1), 63-74. [In Persian]
- Amiri, F., Ghorbanian, G., & Morshedi, J. (2022). Impact of climate change on the wheat crop calendar under the RCP2.6.6 scenario (Case study: South of Khuzestan Province). *Journal of Agricultural Meteorology*, 10(1), 28-45. <https://doi.org/10.22125/agmj.2022.242504.1100>. [In Persian]
- Aghajanloo, Z., & Nikbakht, J. (2023). Simulation and Assessment of AquaCrop Model in deficit irrigation management of Winter Wheat in Zanjan Region. *Water and Soil Science*, 33(2), 23-34. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/ws.2021.43612.2413>.
- Agricultural Statistics (Crop Products). National Statistics Site of Iran, 2024 [In Persian]
- Bagheri Khaneghahi, M., Hazarjaribi, A., Zamani, F. (2025). Evaluating the accuracy of AquaCrop 7.1 crop model and investigating the effect of changing the planting date on the performance of rainfed wheat in different climates of Iran. *Journal of new approaches in water engineering and environment*. 4(1), 129-144. <https://doi.org/10.22034/nawee.2025.493925.1122>. [In Persian]
- Dehghani, T., Liaghat, A., Nazari, B. (2026). Analysis of Future Climate Scenarios' Impacts on Irrigated Wheat Water Productivity in Alborz Province Using the AquaCrop Model. *Iranian Water Research Journal*, 20(1), 77-100. <https://doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15462.2717>. [In Persian]
- Deihimfard, R., Eyni-Nargesch, H., Farshadi, Sh. (2017). Modeling the Effects of Climate Change on Irrigation Requirement and Water Use Efficiency of Wheat Fields of Khuzestan Province. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 31(4), 1015-1030. [In Persian]
- Ge, J., Yu, Z., Gong, X., Ping, Y., Luo, J., Li, Y. (2023). Evaluation of Irrigation Modes for Greenhouse Drip Irrigation Tomatoes Based on AquaCrop and DSSAT Models. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12(22), 3863. <https://doi.org/10.3390/plants12223863>.
- Haghighati, B. (2025). Evaluation of Tolerance to Drought at the End of the Growing Season in Wheat Cultivars and Identification of High-Yielding Genotypes. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 3(3), 81-96. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.3198>. [In Persian]
- Jorenush, M., Egdernezhad, A., Shahrokhnia, M., Ebrahimi Pak, N. (2024). Evaluation of AquaCrop model for simulation of Wheat plant (Triticum) yield under different scenarios of agricultural management in Qazvin. *Journal of Modeling and Managing Water and Soil*. 4(1), 1-16. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12533.1248>. [In Persian]
- Jafarnejadi, M., Meskini Vishkaee, F., Azadi, A., Rezaei, H. (2024). Practical Principles of Balanced Nutrition for Field Crops and Palm Groves in Khuzestan Province. Andishe Goya Publications. [In Persian]

- Jalil, A., Akhtar, F., Awan, U. Kh. (2020). Evaluation of the AquaCrop model for winter wheat under different irrigation optimization strategies at the downstream Kabul River Basin of Afghanistan, *Agricultural Water Management*, 240, 106321. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106321>.
- Khosravi, H., Akbari, N., Daneshvar, M., Akbarpour, O., Rahimi Moghadam, S. (2022). Investigation of the effects of planting date and cultivar on physiological traits and grain yield of irrigated wheat (*Triticum aestivum* L.) in Khorramabad climate. *Journal of Crop Plant Physiology*, 14(55), 39-56. [In Persian]
- Kim, D., & Kaluarachchi, J. (2015). Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. *Agricultural Water Management*, 149, 143-155. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1002/ird.1841>.
- Mohammadi, N., Hejazizadeh, Z., Zeaiean Firouzabadi, P., Karbalaee Doree, A., Galehban, E., and Alavi Panah, K. (2026). Assessment of the impacts of climate change on land surface temperature and drought risk in agricultural land use in Khuzestan province. *Water and Soil Management and Modeling*. 6(1), 164-191. <https://doi.org/10.22098/mmws.2025.18202.1658>. [In Persian]
- Parviz, L., Kazemi, B., Hatef, M. (2024). Utilization of the Climate Indices and the Multi-Criteria Decision Making Approach in crop yield forecasting in line with policy making in agriculture. *Journal of Drought and Climate Change Research*. 2(3), 49-66. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7942.1072>. [In Persian]
- Radmanesh, Y., Sarai Tabrizi, M., Ramezani Etedali, H., Azizian, A., Babazadeh, H. (2026). Comparative Analysis of Bootstrap and GLUE Methods for Uncertainty Assessment of Climatic Datasets in AquaCrop Model Simulations. *Water Management in Agriculture*. 12(2), 183-198. [In Persian]
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 101, 438-447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>.
- Safari, F., Ramezani Etedali, H., Kaviani, A., Khosravi, L. (2026). Modeling the effect of temperature increase on Maize yield components. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCCR)*, 3 (Spatial Issue), 78-94. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9396.1143>. [In Persian]
- 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 an arid region. *African Journal of Agricultural Research*, 610, 2204-2215. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.1009>
- Sharafi, M., Behmanesh, J., Rezavardinejad, V., Samadianfard, S. (2023). Evaluation of AquaCrop and intelligent models in predicting yield and biomass values of wheat. *International journal of biometeorology*. 67(4), 621-632. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02440-4>.
- Yesilkoy, S., Saylan, L. 2020. Assessment and modelling of crop yield and water footprint of winter wheat by Aquacrop, *Italian Journal of Agrometeorology*, (1), 3-14. <https://doi.org/10.13128/ijam-859>.