

Analysis of future climate scenarios' impacts on irrigated wheat water productivity in Alborz province using the AquaCrop model

Tahmine Dehghani ¹, Abdolmajid Liaghat ^{2*} and Bizhan Nazari ³

Extended Abstract

Introduction:

Climate change and increasing constraints on water resources have emerged as major challenges for agricultural sustainability worldwide. In arid and semi-arid regions such as Iran, these challenges are particularly acute, necessitating strategic interventions to ensure food security and resource efficiency. Among various approaches, improving water productivity, defined as the ratio of crop yield to water consumed, has become a central objective in national and regional agricultural planning. Wheat, as a strategic crop in Iran, plays a vital role in the country's food security. Irrigated wheat, in particular, is highly sensitive to climatic variations and water availability. Understanding its response to future climate scenarios is therefore essential for developing effective adaptation strategies. Modeling crop yield and water productivity under different climate conditions can provide valuable insights into potential risks and guide decision-making for sustainable agricultural development. This study focuses on Alborz Province, a key agricultural region in Iran and investigates the quantitative responses of irrigated wheat to projected climate conditions in the 2040 horizon. Using the AquaCrop 7.1 model for crop simulation and the LARS-WG 8 model for climate downscaling, the research evaluates wheat yield and water productivity under three Shared Socioeconomic Pathways (SSPs): SSP1-2.6 (low emissions), SSP2-4.5 (intermediate emissions) and SSP5-8.5 (high emissions). The primary objective is to assess the effects of climate change on wheat water productivity across different irrigation levels and to propose practical solutions for optimizing water use and enhancing agricultural resilience.

Materials and Methods:

To simulate future climate conditions, the study employed the LARS-WG 8 model, a stochastic weather generator that downscales daily climate data from global circulation models (GCMs) to local station scales. Specifically, climate projections from the HadGEM3-GC31-LL model were used as input. This model is known for its robust representation of atmospheric processes and provides reliable data for scenario-based climate analysis. Climate data for the year 2040 were generated and validated under three SSP scenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5. These scenarios represent different trajectories of greenhouse gas emissions, socioeconomic development and mitigation efforts. SSP1-2.6 assumes strong mitigation and low emissions, SSP2-4.5 reflects moderate mitigation and intermediate emissions and SSP5-8.5 represents a high-emissions pathway with limited climate policy intervention. Following climate data generation, the AquaCrop 7.1 model was used to simulate wheat yield and water productivity. AquaCrop, developed by the Food and Agriculture Organization (FAO), is designed to simulate crop responses to water availability and is particularly suitable for analyzing water productivity under varying irrigation regimes. The model calibration was conducted in multiple stages to ensure accuracy, including the removal of outliers and adjustment of parameters. Alborz Province was selected as the study area due to its significant role in irrigated wheat production. The region has a cultivated area of 9587 hectares dedicated to irrigated wheat and an annual production of 48260 tons during the 2022–2023 crop year. Simulations were performed under three irrigation levels (100%, 80% and 60% of full irrigation) and two irrigation intervals (14 and 7 days). These treatments allowed for a comprehensive analysis of water stress effects. Water productivity was calculated as the ratio of crop yield (kg) to the volume of water consumed (m³), providing a standardized metric for comparing performance across scenarios. The base year (2023) served as a reference point for evaluating changes in yield and productivity under future climate conditions.

1- PhD Candidate in Irrigation and Drainage, Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran, Karaj, Iran.

3- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

* Corresponding Author: aliaghat@ut.ac.ir

Received: 2025/10/03

Accepted: 2025/10/30

Results and Discussions:

The simulation results revealed substantial impacts of climate change on both wheat yield and water productivity in Alborz Province. Under full irrigation conditions, water productivity declined from 1.85 kg/m³ in the base year to 1.70 kg/m³ in the SSP2-4.5 scenario, indicating a negative effect of intermediate emissions and moderate warming. In contrast, the SSP5-8.5 scenario, characterized by high CO₂ concentrations and more pronounced warming, resulted in an increase in water productivity to 1.93 kg/m³. This improvement is likely due to the fertilization effect of elevated CO₂, which enhances photosynthesis and biomass accumulation under optimal water conditions. However, the SSP2-4.5 scenario led to a significant yield loss of more than 4600 tons, representing approximately 10% of the province's annual wheat production. At reduced irrigation levels (80% and 60%), the results were mixed. In the SSP5-8.5 scenario, crop yield increased by 4% compared with the base year, suggesting that CO₂ enrichment may partially offset water stress. Conversely, in the SSP2-4.5 scenario, yield decreased by 8%, highlighting the compounded effects of warming and reduced water availability. Interestingly, the modeling showed that yield reductions in the SSP2-4.5 scenario were relatively uniform across all irrigation levels. This uniformity implies that climatic factors, especially temperature increases, have a more dominant influence on yield than irrigation rates alone. The findings suggest that beyond a certain threshold, irrigation adjustments may not fully compensate for climate-induced stress. The accuracy of the AquaCrop model was also evaluated under different conditions. The model performed well under full irrigation, with a high correlation between simulated and observed yields. However, its accuracy declined significantly under low irrigation levels and longer irrigation intervals. This limitation points to the need for structural improvements in the model, particularly in simulating crop responses to water stress and variable climate inputs.

Conclusion:

This study demonstrates that future climate scenarios exert differentiated impacts on wheat yield and water productivity in Alborz Province. While the SSP5-8.5 scenario offers potential yield gains due to CO₂ fertilization, the SSP2-4.5 scenario presents a more concerning outlook with notable yield losses and reduced water productivity. These findings have important implications for agricultural planning and water resource management in Iran. To enhance resilience, the current study recommends several adaptation strategies, including: (a) Genetic improvement of wheat varieties to increase tolerance to heat and drought, (b) Optimization of planting dates to align with favorable climate windows, (c) Development of climate-smart policies that integrate crop modeling with water allocation planning, (d) Investment in irrigation technologies that improve efficiency and reduce water loss. Moreover, the study highlights the value of combining climate and crop models for integrated risk analysis. Such tools can support decision-makers in evaluating trade-offs, prioritizing interventions and designing adaptive strategies that safeguard food security under changing climate conditions. Finally, the limitations observed in AquaCrop model's performance under water stress conditions suggest the need for further model refinement. Enhancing the model's sensitivity to drought dynamics and incorporating feedback mechanisms between climate variables and crop physiology could improve its utility in future scenario analysis.

Keywords: Climate Modeling, SSP Scenarios, Water Resources Management, Water Stress.

Citation: Dehghani, T., Liaghat, A.M., and 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(60), pp. 70-100. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15462.2717>

Copyright: © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



تحلیل اثرات سناریوهای اقلیمی بر بهره‌وری آب گندم آبی در استان البرز با استفاده از مدل AquaCrop

تهمینه دهقانی^۱، عبدالمجید لیاقت^{۲*} و بیژن نظری^۳

چکیده

تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع آب، بهره‌وری گندم آبی را به یکی از چالش‌های راهبردی کشاورزی ایران تبدیل کرده‌است. این پژوهش با هدف ارزیابی بهره‌وری آب گندم در استان البرز تحت سناریوهای اقلیمی آینده تا سال ۲۰۴۰ انجام شد. سناریوهای اقلیمی SSP۱-۲/۶، SSP۲-۴/۵ و SSP۵-۸/۵ به ترتیب نمایانگر مسیرهای پایدار، میانه و پرانتشار گازهای گلخانه‌ای هستند که سطوح مختلف غلظت CO₂، تغییرات دما و اثرات اقلیمی را تا پایان قرن ۲۱ شبیه‌سازی می‌کنند. برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های اقلیمی از مدل LARS-۸ WG و برای شبیه‌سازی عملکرد محصول از مدل AquaCrop ۷/۱ استفاده شد. نتایج نشان داد که در شرایط آبیاری کامل، بهره‌وری آب از ۱/۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۲۰۲۳ در سناریوی SSP۲-۴/۵ به ۱/۷۰ کاهش می‌یابد، در حالی که در سناریوی SSP۸-۵/۵ به ۱/۹۳ افزایش می‌یابد. کاهش ۱۵۰ گرمی بهره‌وری در SSP۲-۴/۵ منجر به افت عملکردی معادل بیش از ۴۶۰۰ تن گندم آبی در سال ۲۰۴۰ خواهد شد که حدود ۱۰ درصد تولید سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ را شامل می‌شود. در سناریوی SSP۵-۸/۵، به دلیل غلظت بالای CO₂، عملکرد محصول در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد تا ۴ درصد افزایش یافت، اما در SSP۲-۴/۵ تا ۸ درصد کاهش نشان داد. مدل‌سازی اقلیمی حاکی از آن است که در این سناریو، عملکرد گندم در تمامی سطوح آبیاری به‌طور یکنواخت کاهش خواهد یافت، که نقش غالب تغییرات اقلیمی را نسبت به میزان آبیاری برجسته می‌سازد. همچنین، نتایج نشان داد که مدل AquaCrop در شرایط آبیاری کامل عملکرد مناسبی دارد، اما در آبیاری‌های محدود و دور آبیاری طولانی‌مدت (۱۴ روزه)، دقت آن کاهش می‌یابد و نیازمند اصلاح ساختاری برای شبیه‌سازی دقیق‌تر در شرایط تنش شدید آبی است.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، سناریوهای SSP، مدیریت منابع آب، مدل‌سازی اقلیمی

ارجاع: دهقانی، ت.، لیاقت، ع.م.، و نظری، ب.، ۱۴۰۵. تحلیل اثرات سناریوهای اقلیمی بر بهره‌وری آب گندم آبی در استان البرز با استفاده از مدل AquaCrop. مجله پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۰)، صص. ۷۷-۱۰۰. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15462.2717>

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران؛ عضو هیئت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

* نویسنده مسئول: aliaghat@ut.ac.ir

مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع آب، ارتقای بهره‌وری آب در بخش کشاورزی به یکی از اولویت‌های اساسی در برنامه‌ریزی‌های جهانی و ملی تبدیل شده است (FAO, 2012; WWAP, 2015; IPCC, 2022). بهره‌وری آب در کشاورزی معمولاً به صورت نسبت عملکرد محصول (کیلوگرم یا تن) به حجم آب مصرفی (مترمکعب یا میلی‌متر) بیان می‌شود و معیاری برای سنجش کارایی استفاده از آب در تولیدات کشاورزی است. به عبارت دیگر، بهره‌وری آب نشان می‌دهد که با چه مقدار آب می‌توان چه میزان محصول تولید کرد، از این رو ابزاری کلیدی برای ارزیابی مدیریت منابع آب و ارتقای عملکرد در شرایط محدودیت آبی محسوب می‌شود (Selvam et al., 2023). مدیریت بهره‌وری آب در کشاورزی به مجموعه‌ای از راهکارها و فناوری‌های نوین اطلاق می‌شود که با هدف افزایش تولید محصول به ازای هر واحد آب مصرفی و کاهش اتلاف منابع آبی طراحی شده‌اند. این رویکرد شامل بهره‌گیری از سامانه‌های آبیاری دقیق و هوشمند، پایش مستمر رطوبت خاک و وضعیت گیاه، به کارگیری اینترنت اشیا، حسگرهای پیشرفته، هوش مصنوعی و داده‌های سنجش از دور برای زمان‌بندی و بهینه‌سازی فرآیند آبیاری است (Dehghani et al., 2024). مدیریت بهره‌وری آب در کشاورزی در شرایط تغییر اقلیم مستلزم رویکردی جامع، تلفیقی و مبتنی بر نوآوری و مشارکت است به گونه‌ای که امنیت غذایی و پایداری منابع آب تضمین شود (Kourgialas, 2023).

نتایج مطالعه Tataw et al. (2016) در اتریش نشان داد که الگوهای بارندگی ناشی از تغییر اقلیم به‌ویژه در خاک‌های سبک‌تر باعث کاهش عملکرد گندم، شاخص سطح برگ و ارتفاع گیاه می‌شود. در مطالعه Ozturk et al. (2017) واکنش عملکرد دانه، نیتروژن دانه، مراحل فنولوژیک و تبخیر و تعرق گندم زمستانه به تغییر اقلیم در یک دوره ۸۰ ساله در دانمارک بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با وجود افزایش غلظت CO₂، عملکرد دانه و نیتروژن آن در آینده کاهش می‌یابد. Wang et al. (2024) با استفاده از مدل APSIM عملکرد بالقوه گندم زمستانه را در فلات اُس چین تحت سناریوهای اقلیمی SSP۲-۴/۵ و SSP۵-۸/۵ شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که بارندگی سالانه در دوره رشد گندم روندی کاهشی دارد و عملکرد محصول با میزان بارندگی همبستگی مثبت دارد. مطالعات پیشین با استفاده از مدل شبیه‌سازی DSSAT نشان داده‌اند که در

شرایط آبیاری و دیم، عملکرد گندم در آینده با کاهش چشمگیری مواجه خواهد شد. (Ishaque et al., 2023) در پژوهشی با بهره‌گیری از سناریوهای اقلیمی مختلف، این اثرات را به صورت کمی در کشور پاکستان بررسی و بر ضرورت تدوین راهبردهای سازگاری تأکید کردند. تغییر اقلیم تأثیر قابل توجهی بر عملکرد گندم آبی در ایران دارد. مدل‌سازی‌های مختلف نشان می‌دهد که افزایش دما و کاهش بارندگی منجر به کاهش عملکرد این محصول راهبردی خواهد شد.

گندم آبی به عنوان یکی از محصولات راهبردی در ایران، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی دارد و بررسی پاسخ آن به شرایط اقلیمی آینده، ضرورتی انکارناپذیر است (Ghalibaf et al., 2023). در مطالعه‌ای توسط (Azad et al., 2018)، اثرات تغییرات اقلیمی بر عملکرد گندم زمستانه تحت شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری در منطقه میاندوآب بررسی شد. این پژوهشگران با استفاده از مدل SWAT و داده‌های اقلیمی حاصل از مدل‌های گردش عمومی (GCMs)، عملکرد گندم را در سناریوهای اقلیمی آینده شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که افزایش دما و کاهش بارندگی در آینده می‌تواند منجر به کاهش طول دوره رشد و افت عملکرد محصول شود. مطالعه (Javadi et al., 2023) با بهره‌گیری از مدل تصادفی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو، به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد گندم و برنج در ایران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که نوسانات دما و بارندگی می‌توانند به طور قابل توجهی بر کاهش یا افزایش عملکرد این محصولات اثرگذار باشند. (Farajzadeh et al., 2021) با استفاده از داده‌های ۳۰ ایستگاه هواشناسی و کشاورزی در دوره ۱۳۶۱-۱۳۸۵، اثرات تغییرات دما و بارش را بر عملکرد گندم آبی و دیم در ایران بررسی کردند. مدل‌های رگرسیونی نشان دادند که عملکرد گندم آبی در مناطق شرقی، مرکزی و جنوب‌غربی تا ۳۵ درصد کاهش می‌یابد و در گندم دیم، مناطق شمال‌غرب و جنوب کشور با کاهش عملکرد و مناطق جنوب‌شرق با افزایش عملکرد مواجه خواهند بود.

Zeynali et al. (2021) با استفاده از مدل APSIM- Wheat و داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۵۰، اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم آبی در شش شهرستان خراسان رضوی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش دما و غلظت CO₂ موجب کاهش طول دوره رشد و گلدهی و افزایش دوره پر شدن دانه می‌شود. عملکرد گندم در بیشتر مناطق بین ۱ تا ۱۲/۹ درصد افزایش یافت، در

ریزمقیاس‌نمایی شده و برای شبیه‌سازی رشد گیاه به کار رفت. نتایج نشان داد که عملکرد سیب‌زمینی در برخی سناریوها تا ۲۲ درصد افزایش و در برخی دیگر کاهش می‌یابد. در این راستا، استفاده از مدل LARS-WG در کنار مدل شبیه‌ساز AquaCrop که توسط سازمان فائو توسعه یافته، امکان ارزیابی دقیق عملکرد محصولات تحت سناریوهای مختلف اقلیمی را فراهم می‌سازد (Hussain et al., 2025).

در ادامه این رویکرد، پژوهش حاضر با هدف تحلیل اثرات سناریوهای اقلیمی SSP۱-۲/۶، SSP۲-۴/۵ و SSP۵-۸/۵ بر بهره‌وری آب گندم آبی در استان البرز تحت سطوح مختلف کم‌آبباری، از مدل‌های AquaCrop و LARS-WG بهره گرفته است. تمایز این پژوهش در تمرکز هم‌زمان بر ارزیابی بهره‌وری آب گندم آبی تحت سناریوهای اقلیمی آینده و سطوح مختلف کم‌آبباری است؛ رویکردی که در مطالعات پیشین به صورت ترکیبی و کمی مورد بررسی قرار نگرفته است. چنین تلفیقی از سناریوهای اقلیمی و مدیریت آبیاری، امکان ارائه راهکارهای عملی برای بهینه‌سازی مصرف آب و ارتقای تاب‌آوری کشاورزی را فراهم می‌سازد.

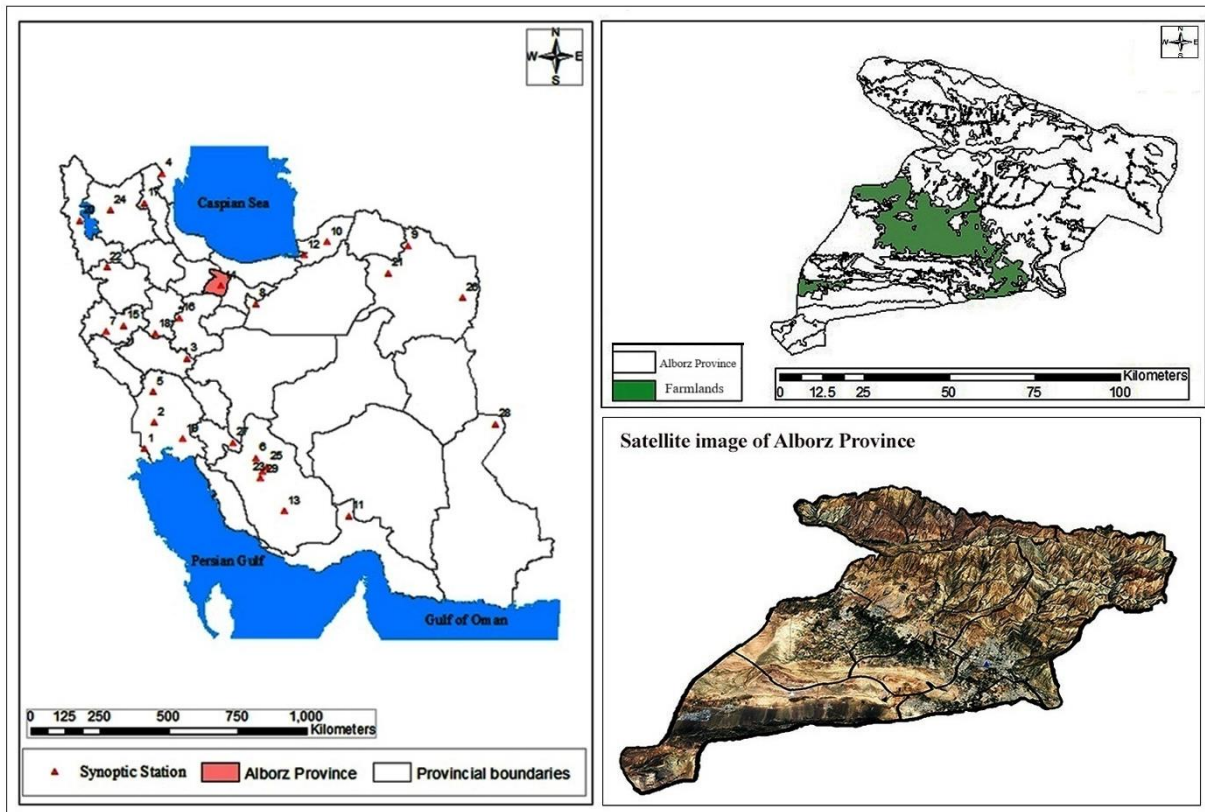
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان البرز با مساحتی بالغ بر ۵۱۲۲ کیلومتر مربع، دارای سطح زیرکشت گندم آبی به میزان ۹۵۸۷ هکتار با تولید ۴۸۲۶۰ تن محصول در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ بوده است (Agricultural Yearbook, 2024) (شکل ۱). این استان، به عنوان کوچک‌ترین استان ایران، در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز واقع شده و از نظر جغرافیایی بین عرض‌های ۴۷' و ۳۵' تا ۰۵' و ۳۶° شمالی و طول‌های ۴۵' و ۵۰° تا ۱۰' و ۵۱° شرقی قرار دارد. مرکز استان، شهر کرج، در ارتفاعی حدود ۱۳۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است (Rahnama et al., 2018).

حالی که در تربت‌حیدریه کاهش عملکرد مشاهده شد. تغییرات دما، الگوهای بارندگی و افزایش غلظت CO₂ از جمله عوامل مؤثر بر رشد، عملکرد و نیاز آبی گیاهان هستند که می‌توانند بهره‌وری آب را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهند (Terán et al., 2024). افزایش دما موجب تسریع در مراحل فنولوژیکی رشد گندم شده و به کاهش طول دوره رشد گیاه منجر می‌شود؛ در نتیجه، زمان لازم برای تشکیل دانه محدود شده و عملکرد نهایی محصول کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش دما و کاهش بارندگی می‌تواند نیاز آبی گیاه را افزایش دهد و در صورت عدم تأمین کافی آب، کاهش عملکرد تشدید می‌شود (Bouras et al., 2019). Kheiri et al. (2022) با استفاده از مدل‌های اقلیمی مانند CCSM۴ و سناریوهای RCP، تغییرات تبخیر و تعرق گندم آبی را در ایران تحلیل کرده‌اند. این مطالعه نشان داد که افزایش دما و تغییر الگوهای بارندگی در آینده منجر به افزایش نیاز آبی محصولات خواهد شد.

Borzou et al. (2023) با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی LARS-WG و DKRZ و مدل شبیه‌سازی گیاهی AquaCrop واکنش گندم پاییزه را در دشت قزوین تحت سناریوهای مختلف اقلیمی تا سال ۲۱۰۰ بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که انتخاب تاریخ کشت مناسب می‌تواند نقش کلیدی در افزایش عملکرد محصول در شرایط اقلیمی آینده ایفا کند. در پژوهش Hajivand et al. (2023)، اثرات تغییر اقلیم بر رشد، زیست‌توده و عملکرد دانه ذرت در مناطق شوشتر و صفی‌آباد استان خوزستان با استفاده از مدل‌های HADCM3 و LARS-WG و مدل گیاهی AquaCrop، برای سال ۲۰۵۰ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که افزایش دمای کمینه و بیشینه همراه با تغییرات بارش موجب کاهش طول دوره رشد و افزایش عملکرد دانه و زیست‌توده در شرایط آبیاری کامل خواهد شد. Izadi et al. (2018) با استفاده از مدل AquaCrop، اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد سیب‌زمینی در منطقه شهرکرد را تحت سناریوهای اقلیمی برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۶ بررسی کردند. داده‌های اقلیمی با مدل LARS-WG



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

در صورت نبود داده‌های تابش خورشیدی، امکان استفاده از ساعات آفتابی فراهم است (Chia and Hutchinson, 1991). این نسخه با بهره‌گیری از خروجی‌های مدل‌های جهانی مانند CMIP۶، امکان تولید سناریوهای اقلیمی روزانه برای آینده را فراهم می‌کند و به‌طور گسترده در بیش از ۷۵ کشور برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در کشاورزی و منابع آب استفاده می‌شود.

سناریوهای SSP^۱ متعلق به گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم (AR۶) IPCC^۲ هستند که در چارچوب پروژه CMIP۶ توسعه یافته‌اند. CMIP۶ چارچوبی بین‌المللی برای شبیه‌سازی و مقایسه سناریوهای اقلیمی آینده با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو و اقیانوس است. در این پروژه، سناریوهای SSP به‌عنوان مسیرهای اجتماعی-اقتصادی جهانی تعریف شده‌اند که با سطوح مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای ترکیب می‌شوند. این سناریوها شامل SSP۱-۲/۶، SSP۲-۴/۵، SSP۳-۷/۰-۸/۵ و SSP۵-۸/۵ هستند که به ترتیب نمایانگر مسیرهای پایدار، میانه، نابرابر و پراشتار در قرن ۲۱ می‌باشند (Bao et al., 2025).

مدل اقلیمی پایه

مدل LARS-WG یک تولیدکننده تصادفی داده‌های هواشناسی است که برای ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های اقلیمی در سطح ایستگاهی طراحی شده است (Semenov and Barrow, 1997). در مدل LARS-WG ۸ وقوع بارش به‌صورت تناوبی از دوره‌های خشک و مرطوب شبیه‌سازی می‌شود، به‌طوری‌که روز مرطوب، روزی با بارش بیش از صفر میلی‌متر تعریف شده است. برای یک روز مرطوب، مقدار بارش بدون وابستگی به طول دوره مرطوب یا مقدار بارش روزهای قبل، از توزیع نیمه‌تجربی بارش همان ماه تولید می‌شود. دمای کمینه و بیشینه روزانه به‌عنوان فرآیندهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند که میانگین و انحراف معیار آن‌ها وابسته به وضعیت خشک یا مرطوب بودن روز است. چرخه‌های فصلی این پارامترها با استفاده از سری فوریه مرتبه سوم مدل‌سازی شده و باقی‌مانده‌ها با توزیع نرمال تقریب زده می‌شوند (Racsko et al., 1991). تابش خورشیدی نیز با استفاده از توزیع‌های نیمه‌تجربی جداگانه برای روزهای خشک و مرطوب مدل‌سازی می‌شود. این متغیر به‌صورت مستقل از دما شبیه‌سازی شده و

³ Coupled Model Intercomparison Project

¹ Shared Socioeconomic Pathway

² Intergovernmental Panel on Climate Change

این چهار گام شامل: ۱- توسعه پوشش سبز گیاه (CC)، ۲- محاسبه تعرق (Tr)، ۳- تولید زیست‌توده (B) و ۴- تبدیل زیست‌توده به عملکرد نهایی محصول (Y) هستند (Raes et al., 2023).

در مرحله اول، ضرایبی مانند ضریب تنش آبی گسترش پوشش گیاهی ($KS_{exp,w}$)، ضریب تنش آبی پیری زود هنگام پوشش گیاهی (KS_{sen})، ضریب حاصل‌خیزی خاک در گسترش برگ ($KS_{exp,f}$) و ضریب حاصل‌خیزی خاک در پوشش گیاهی بیشینه (KS_{CCX}) نقش تعیین‌کننده‌ای در رشد پوشش گیاهی دارند که تحت تأثیر تنش‌های آبی، کودی و شوری قرار می‌گیرند (Li et al., 2024a). در مرحله دوم تعرق گیاه (Tr) با ضرب در ضریب تعرق نسبی گیاه ($K_{C_{Tr,X}}$) و در نظر گرفتن ضرایب تنش آبی (KS) و تنش دمایی (KS_{Tr}) محاسبه می‌شود (Steduto et al., 2009; Vanuytrecht et al., 2014). مدل AquaCrop، مقدار پوشش تاج گیاه (CC) در معادله تعرق گیاه با CC^* جایگزین می‌شود تا اثر ریز-جریان‌های بین‌ردی لحاظ گردد؛ این پدیده زمانی رخ می‌دهد که پوشش گیاهی کامل نیست و تابش خورشید به سطح خاک بین ردیف‌ها نفوذ کرده، موجب گرم شدن آن نواحی می‌شود. انرژی حاصل از این گرم‌شدن از طریق جریان‌های هوای گرم به سمت تاج گیاه منتقل شده و باعث افزایش تعرق می‌گردد (Steduto et al., 2009). بنابراین، CC^* به‌عنوان یک ضریب اصلاح‌شده، سهم این انرژی اضافی را در شبیه‌سازی تعرق گیاه در مراحل ابتدایی رشد یا در کشت‌های کم‌تراکم به‌طور مؤثری در نظر می‌گیرد. این اصلاح باعث می‌شود مدل بتواند تعرق واقعی گیاه را به‌ویژه در شرایطی که پوشش تاج هنوز کامل نشده است، دقیق‌تر تخمین بزند (Vanuytrecht et al., 2014).

در مرحله سوم، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زیست‌توده خشک بخش هوایی گیاه از شاخصی به نام بهره‌وری نرمال شده آب (WP^*) استفاده می‌کند. این شاخص بیانگر مقدار ماده خشک تولیدشده در بخش هوایی گیاه (بر حسب گرم یا کیلوگرم) به ازای هر واحد سطح زمین (متر مربع یا هکتار) و در ازای هر میلی‌متر آب تعرق‌شده است (Hsiao et al., 2009). مطالعات متعدد، از جمله پژوهش Steduto et al. (2007)، نشان داده‌اند که رابطه بین زیست‌توده تولیدشده و آب مصرف‌شده توسط یک گونه خاص، رابطه‌ای خطی و قابل پیش‌بینی دارد. برای افزایش دقت مدل، مقدار بهره‌وری زیست‌توده نسبت به آب ($Biomass/Tr$) در AquaCrop

در نسخه هشتم LARS-WG، مدل HadGEM3-GC31-LL به‌عنوان یکی از مدل‌های اقلیمی مرجع گنجانده شده است. این مدل توسط مرکز هادلی انگلستان توسعه یافته و در گزارش ششم IPCC نیز معرفی شده است. HadGEM3-GC31-LL دارای وضوح افقی $N96$ برای جو و خشکی (تقریباً 250 کیلومتر) و شبکه اقیانوسی ORCA1 با دقت 1 درجه است (UKESM, n.d). مدل HadGEM3-GC31-LL به‌دلیل وضوح مکانی نسبتاً مناسب، قابلیت بالایی در بازنمایی شرایط اقلیمی کلی مناطق کوهستانی ایران دارد (Earth System Grid Federation, 2025). خروجی‌های روزانه HadGEM3 به‌خوبی با روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری مانند LARS-WG هم‌خوانی دارد و امکان انتقال مستقیم سناریوهای SSP به مقیاس ایستگاهی و ورود بی‌واسطه به مدل‌های زراعی مانند AquaCrop را فراهم می‌کند (Abdolalizadeh et al., 2022). دقت مدل LARS-WG در مطالعات متعدد توسط پژوهشگران ارزیابی و اعتبار آن در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی تأیید شده است، هرچند معمولاً دقت شبیه‌سازی دما بیشتر از بارش گزارش شده است (Lotfi et al., 2022; Kavwenje et al., 2022).

مدل AquaCrop

مدل AquaCrop که توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) توسعه یافته، یک مدل گیاهی فرایندگرا است که برای شبیه‌سازی رشد گیاه، بهره‌وری آب و عملکرد محصول تحت شرایط مختلف مدیریتی و اقلیمی طراحی شده است (Du et al., 2024; Wang et al., 2023). در این پژوهش از نسخه $7/1$ مدل استفاده شده است. تئوری این مدل بر پایه شبیه‌سازی فرآیندهای کلیدی مانند رشد پوشش سبز گیاه،^۱ تبخیر-تعرق، تجمع زیست‌توده و تخصیص آن به عملکرد نهایی محصول استوار است (Stričević et al., 2023). اجزای مؤثر در عملکرد مدل AquaCrop و نحوه تعامل آن‌ها، مطابق با توضیحات ارائه‌شده (Raes et al., 2023) در جدول ۱ ارائه شده است. جدول ۱، ساختار عملکردی مدل را به‌صورت منسجم و دسته‌بندی‌شده نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که چگونه پارامترهای ثابت، قابل‌تعدیل و وابسته به محیط در تعامل با یکدیگر، پاسخ گیاه را در شرایط مختلف شبیه‌سازی می‌کنند. طبق این جدول مدل AquaCrop بر اساس چهار گام اصلی طراحی شده است که هر یک از این مراحل با مجموعه‌ای از پارامترهای فیزیولوژیکی، محیطی و مدیریتی تعریف می‌شوند.

² Interrow micro-advection

¹ Canopy Cover

می‌شود که اثرات تنش‌های قبل از گلدهی، ناتوانی در گرده‌افشانی و شرایط محیطی را در نظر می‌گیرد. اثر تنش می‌تواند مثبت یا منفی باشد ($f_{HI} > 1$, $f_{HI} < 1$). مدل، بین تنش‌هایی که قبل از شروع تشکیل عملکرد، در زمان گلدهی (که ممکن است گرده‌افشانی را تحت تأثیر قرار دهد) و در طول مرحله تشکیل عملکرد رخ می‌دهند، تمایز قائل می‌شود (Hsiao et al., 2009). از زمان گلدهی یا آغاز تشکیل غده، شاخص برداشت (HI) به تدریج افزایش می‌یابد تا در مرحله بلوغ فیزیولوژیک به مقدار مرجع خود (HI_0) برسد. اگر مرحله پر شدن دانه یا تشکیل غده بیش از حد کوتاه باشد فرایند فتوسنتز مختل شده و شاخص برداشت مرجع کاهش می‌یابد (Steduto et al., 2009). (Vanuytrecht et al., 2014).

تحت نرمال‌سازی قرار می‌گیرد تا تأثیرات غلظت دی‌اکسید کربن (CO_2) اتمسفری و شرایط اقلیمی حذف شود (Steduto et al., 2009). پس از این نرمال‌سازی، واحد WP^* به صورت جرم ماده خشک تولیدشده در واحد سطح زمین بیان می‌شود. مرحله سوم نشان می‌دهد که مقدار ماده خشک تولیدشده به‌طور مستقیم تابعی از میزان تعرق واقعی گیاه نسبت به توان تبخیر جو (Tr/ET_0) است و بهره‌وری آبی تعدیل‌شده (WP^*) نقش یک ضریب تبدیل را ایفا می‌کند (Dehghani et al., 2018). این روش امکان شبیه‌سازی روزانه تولید بیوماس و به‌ویژه تحلیل عملکرد محصول تحت سناریوهای مختلف آبی و اقلیمی را فراهم می‌سازد (Terán-Chaves., 2023). در مرحله چهارم، عملکرد محصول با استفاده از شاخص برداشت پایه (HI_0) و ضریب اصلاحی (f_{HI}) محاسبه

جدول ۱- اجزای مؤثر در عملکرد مدل AquaCrop و نحوه تعامل آن‌ها

	پارامترهای خاص گیاه (محافظه کارانه) (قابل تعدیل)		
	پارامتر وابسته به شرایط محیطی (طول مراحل فیزیولوژیکی)		
	مدیریت کاشت و توسعه ریشه		
	روز درجه رشد		
$K_{S_{exp,w}}$	ضریب تنش آبی برای گسترش پوشش گیاهی	تنش آبی	توسعه پوشش سبز گیاه (CC)
$K_{S_{sen}}$	ضریب تنش آبی برای پیری زود هنگام پوشش گیاهی		
$K_{S_{exp,f}}$	ضریب حاصل خیزی خاک برای گسترش برگ	تنش کودی	
$K_{S_{CCx}}$	ضریب حاصل خیزی خاک برای پوشش تاج پوش حداکثری	تنش شوری	
$f_{CD_{decline}}$	ضریب افت پوشش گیاهی		
	وجود علف هرز		
	توان تبخیرکنندگی جو	ET_0	
	پارامترهای خاص گیاه (محافظه کارانه) (قابل تعدیل)		
	ضریب تعرق نسبی گیاه	$K_{C_{Tr,x}}$	
	پوشش گیاهی اصلاح به منظور حذف اثرات جریان‌های بین‌ردی	CC^*	$T_r = K_s K_{S_{Tr}} CC^* K_{C_{Tr,x}} ET_0$
$K_{S_{Tr}}$	ضریب تنش دمایی	$K_{S_{Tr}}$	
$K_{S_{sto}}$	ضریب بسته شدن روزنه		
$K_{S_{aer}}$	ضریب تهویه (اثر بی‌هوازی شدن خاک)	K_s	
$K_{S_{sto,salt}}$	ضریب بسته شدن روزنه‌ها در شرایط تنش شوری		
	پارامترهای خاص گیاه (نرمال شده نسبت به CO_2 و اقلیم)		
f_{CO_2}	ضریب اصلاحی غلظت کربن دی‌اکسید جو	WP^*	$B = WP^* \sum Tr/ET_0$
f_{yield}	محصول فتوسنتز		
$K_{S_{wp}}$	ضریب کاهش مربوط به نوع ترکیبات سنتز شده		
	ضریب تنش حاصل خیزی خاک در بهره‌وری آب		
	پارامترهای خاص گیاه (محافظه کارانه) (قابل تعدیل)		
	شاخص برداشت مرجع (HI) در مرحله بلوغ فیزیولوژیک	HI_0	
	تنش آبی قبل از گلدهی		
$K_{S_{pol,w}}$	ضریب تنش آبی	ضریب تعدیل‌کننده اثر	$Y = f_{HI} HI_0 B$
$K_{S_{pol,h}}$	ضریب تنش گرمایی	تنش‌ها بر شاخص	
$K_{S_{pol,w}}$	تنش سرمایی	ناتوانی در گرده‌افشانی	f_{HI}
	تنش سرمایی	برداشت نسبت به مقدار	
	تنش آبی در طول تشکیل عملکرد	مرجع آن	

داده‌ها به‌عنوان ورودی برای مدل‌های شبیه‌ساز AquaCrop استفاده می‌شوند. از آنجا که AquaCrop به تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) نیز نیاز دارد و مدل LARS-WG این پارامتر را مستقیماً تولید نمی‌کند، لازم است ET₀ با استفاده از داده‌های تولیدشده توسط LARS-WG محاسبه شود. روش Hargreaves-Samani یکی از شیوه‌های کاربردی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) در مواقعی است که تنها داده‌های دمایی در دسترس باشند. این مدل با استفاده از دمای بیشینه، کمینه و میانگین روزانه، ET₀ را محاسبه کرده و برای تکمیل فرآیند از تابش خارج جو (R_a) بهره می‌گیرد (Masaliyeva et al., 2024).

داده‌های خاک

برای تعریف ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مدل AquaCrop، پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی اشباع (k_{sat})، رطوبت حجمی در حالت اشباع (θ_{vsat})، رطوبت در ظرفیت زراعی (θ_{vfc})، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (θ_{vpwp})، شوری خاک، بافت خاک و عمق خاک زراعی اهمیت دارند (Raes et al., 2009). داده‌های جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش را برای مدل AquaCrop ارائه می‌کند. هدایت هیدرولیکی اشباع (k_{sat}) برابر با ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت است. مقدار رطوبت حجمی در حالت اشباع (θ_{vsat}) برابر با ۴۶ درصد، ظرفیت نگهداری آب در خاک را در شرایط اشباع مشخص می‌کند. رطوبت در ظرفیت زراعی (θ_{vfc}) برابر با ۳۲/۲ درصد و در نقطه پژمردگی دائم (θ_{vpwp}) برابر با ۱۶/۱ درصد است که نشان‌دهنده دامنه مؤثر رطوبتی قابل استفاده برای گیاه می‌باشد. شوری خاک نیز با مقدار ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر در محدوده نسبتاً بالا قرار دارد (Balasubramaniam et al., 2023). بافت خاک از نوع لومی و حداکثر عمق خاک زراعی نیز ۹۰ سانتی‌متر ثبت شده است.

ورودی‌های اصلی این مدل شامل داده‌های اقلیمی (مانند دما، بارش، تبخیر و تعرق مرجع)، مشخصات گیاه (نوع گیاه، پارامترهای فیزیولوژیکی و رشد گیاه)، خصوصیات خاک (از جمله بافت خاک، عمق ریشه و ظرفیت نگهداری آب) و داده‌های مدیریت مزرعه (نحوه و زمان آبیاری، کوددهی و تاریخ کاشت و برداشت) است (Pourgholam et al., 2020). خروجی‌های مدل AquaCrop شامل شاخص‌های مختلفی از جمله شاخص عملکرد محصول می‌باشد. این مدل به کاربر امکان می‌دهد تا تأثیر تغییرات اقلیمی، روش‌های مختلف آبیاری و مدیریت خاک را بر عملکرد محصول و مصرف آب ارزیابی کند و برنامه‌ریزی بهینه برای مدیریت منابع آب اتخاذ نماید (Sabzian et al., 2021).

داده‌های اقلیمی

در این پژوهش، داده‌های اقلیمی روزانه مربوط به ایستگاه همدید^۱ کرج در بازه زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۴ به‌عنوان داده‌های پایه استفاده شدند. این داده‌ها پس از بررسی کیفیت و پردازش اولیه، در مدل LARS-WG برای تولید داده‌های سناریوهای اقلیمی (SSP۱-۲/۶، SSP۴ و SSP۵-۸/۵) با افق زمانی ۲۰۴۰ به‌کار گرفته شدند. لازم به ذکر است پیش از ورود داده‌ها، باید تمام سلول‌های دارای مقادیر گمشده با عدد ۹۹- پر شوند تا مدل عملکرد صحیحی داشته باشد. این مقدار به‌عنوان کد استاندارد برای داده‌های ناموجود در مدل تعریف شده و باعث می‌شود نرم‌افزار آن‌ها را به‌درستی شناسایی و از پردازش حذف کند (Semenov and Barrow, 1997). برای ساخت فایل هواشناسی مدل AquaCrop به داده‌های دمای کمینه و بیشینه، بارش و تبخیر و تعرق مرجع نیاز است (Busschaert et al., 2022). مدل LARS-WG قادر است داده‌های روزانه اقلیمی شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعات آفتابی را به‌صورت روزانه تولید کند (Sha et al., 2019). این

جدول ۲- ویژگی‌های خاک (Alizadeh et al., 2010)

k _{sat} (mm/hr)	θ _{vsat} (%)	θ _{vfc} (%)	θ _{vpwp} (%)	EC (dS/m)	بافت خاک مزرعه	حداکثر عمق خاک زراعی (cm)
۱۰۰	۴۶	۳۲/۲	۱۶/۱	۳/۵	لومی	۹۰

² Missing data

¹ Synoptic

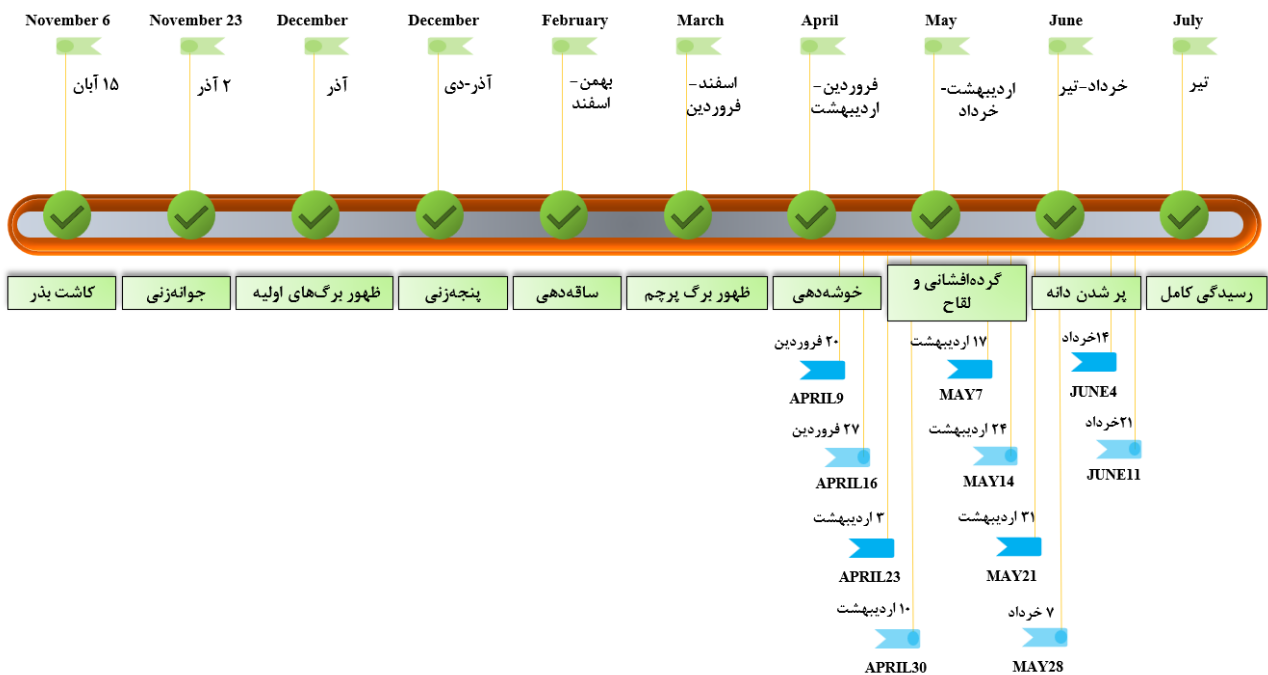
داده‌های مدیریتی

تیمارهای آبیاری گیاه گندم پاییزه رقم قدس برگرفته از مطالعه Alizadeh et al. (2010) طبق جدول ۳ شامل ترکیبی از دو دور آبیاری (I.۷: I.۱۴، ۷ روز، I.۱۴: I.۱۴ روز) و سطح آبیاری از صد درصد (L.۱۰۰) تا تک آبیاری (L.۰.۰S) بودند که در قالب ۱۱ تیمار مختلف در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی کرج اجرا شدند. آبیاری اولیه برای تمامی تیمارها در تاریخ ۲۰ فروردین با مقدار ثابت ۸۳ میلی‌متر انجام شد، اما در تاریخ‌های بعدی، بسته به نوع تیمار، مقادیر آبیاری تغییر کرد. جدول ۳

برنامه‌ریزی آبیاری برای ۱۱ تیمار مختلف گندم را در تاریخ‌های مشخص فصل رشد که ترکیبی از دو فاصله آبیاری (۷ و ۱۴ روز) با پنج سطح کم‌آبیاری (I.۰.۰S، I.۰.۰، I.۰.۰، I.۰.۰، I.۰.۰) است را نشان می‌دهد. مجموع آب مصرفی در طول فصل برای هر تیمار به ترتیب از ۳۲۵ میلی‌متر در تیمار آبیاری کامل با فاصله ۷ روز تا ۸۳ میلی‌متر در تیمار تنش شدید متغیر است. شکل ۲، مراحل رشد گیاه گندم پاییزه و زمان آبیاری‌های انجام شده را در دو دور آبیاری در این مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۳- برنامه‌ریزی آبیاری برای ۱۱ تیمار در تاریخ‌های مشخص (Alizadeh et al., 2010)

زمان آبیاری	L.۱۰۰ I.۰.۷	L.۱۰۰ I.۱۴	L.۰.۸۰ I.۰.۷	L.۰.۸۰ I.۱۴	L.۰.۶۰ I.۰.۷	L.۰.۶۰ I.۱۴	L.۰.۴۰ I.۰.۷	L.۰.۴۰ I.۱۴	L.۰.۲۰ I.۰.۷	L.۰.۲۰ I.۱۴	L.۰.۰S I.۰.۷
۲۰ فروردین	۸۳	۸۳	۸۳	۸۳	۸۳	۸۳	۸۳	۸۳	۸۳	۸۳	۸۳
۲۷ فروردین	-	-	۶	-	۱۱	-	۱۶	-	۲۱	-	۲۶
۳ اردیبهشت	-	۱۱	۶	۲۱	۱۲	۳۲	۱۷	۴۳	۲۳	۵۳	۲۸
۱۰ اردیبهشت	-	-	۷	-	۱۴	-	۲۱	-	۲۸	-	۳۵
۱۷ اردیبهشت	-	۱۳	۷	۲۷	۱۳	۴۰	۱۹	۵۳	۲۶	۶۶	۳۲
۲۴ اردیبهشت	-	-	۶	-	۱۲	-	۱۷	-	۲۳	-	۲۸
۳۱ اردیبهشت	-	۱۱	۵	۲۱	۱۰	۳۲	۱۵	۴۳	۲۰	۵۳	۲۵
۷ خرداد	-	-	۶	-	۱۲	-	۱۸	-	۲۴	-	۳۰
۱۴ خرداد	-	۱۰	۵	۲۰	۹	۳۰	۱۴	۳۹	۱۹	۴۹	۲۳
۲۱ خرداد	-	-	۳	-	۶	-	۹	-	۱۲	-	۱۵
مجموع	۸۳	۱۲۸	۱۳۴	۱۷۲	۱۸۲	۲۱۷	۲۲۹	۲۶۱	۲۷۹	۳۰۴	۳۲۵



شکل ۲- مراحل رشد گندم و تاریخ انجام آبیاری

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت به کاربر کمک می‌کند تا پارامترهای مهم را برای واسنجی دقیق‌تر انتخاب کرده و عدم قطعیت نتایج مدل را بهتر مدیریت کند (Nossent et al., 2011). برای ارزیابی حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی، از رابطه (۱) استفاده شد (Araya et al., 2016). در این روش، هر بار یکی از پارامترهای ورودی مدل به میزان ۲۵ درصد افزایش یا کاهش می‌یابد و سایر پارامترها ثابت نگه داشته می‌شوند تا تأثیر هر پارامتر به‌طور جداگانه بر خروجی مدل سنجیده شود.

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \quad (1)$$

در این رابطه: Sc ضریب حساسیت (بدون بعد)، P_m مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر با داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد همان پارامتر با داده‌های ورودی پایه است. بر اساس این روش، اگر $Sc > 15$ باشد، حساسیت بالا؛ اگر $2 < Sc < 15$ باشد، حساسیت متوسط؛ و اگر $Sc < 2$ باشد، حساسیت پایین در نظر گرفته می‌شود.

واسنجی و صحت سنجی مدل

در فرآیند مدل‌سازی، مرحله‌ای تحت عنوان واسنجی به منظور تنظیم پارامترهای ورودی مدل برای دستیابی به پیش‌بینی‌های دقیق و قابل اعتماد ضروری است. هدف اصلی از واسنجی، تطبیق خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی از طریق تنظیم پارامترهای گیاهی، به‌گونه‌ای است که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به حداقل برسد (Mai., 2023). این فرآیند با تغییر تدریجی مقادیر ورودی در محدوده‌های مجاز تعیین شده توسط راهنمای مدل انجام می‌شود، به‌طوری‌که از بروز بیش‌برازش و کاهش اعتبار مدل در شرایط متفاوت جلوگیری گردد (Villaverde et al., 2022). در این پژوهش، با استفاده از مطالعه Alizadeh et al. (2010) داده‌های ثبت شده در دو سال زراعی متوالی (۱۳۷۲-۱۳۷۳) به‌عنوان مبنای واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop استفاده شدند. پس از اجرای تحلیل حساسیت، مدل به‌گونه‌ای تنظیم و واسنجی شد که دقت شبیه‌سازی عملکرد افزایش و میزان خطای نسبی در پیش‌بینی‌ها کاهش یابد.

ارزیابی مدل

در این پژوهش، به‌منظور بررسی کیفیت خروجی‌های مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه، از مجموعه‌ای از شاخص‌های آماری روابط (۲) تا (۵) بهره گرفته شد:

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

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (3)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (4)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (5)$$

در روابط ارائه شده P_i ، O_i و \bar{O}_i به ترتیب نمایانگر مقادیر اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی شده، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و تعداد کل مشاهدات هستند. شاخص $NRMSE$ (ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده) به‌عنوان معیاری برای ارزیابی دقت مدل شبیه‌سازی به‌کار می‌رود؛ به‌طوری‌که هرچه مقدار آن کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد، تطابق نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی بیشتر خواهد بود (Terán-Chaves., 2022). مقدار CRM (ضریب جرم باقی‌مانده) بیانگر میزان اختلاف نسبی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است. مقادیر مثبت CRM به این معناست که مدل به‌طور متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده را کمتر از مقادیر واقعی (کم‌برآورد) پیش‌بینی کرده است. در مقابل، مقادیر منفی CRM نشان‌دهنده این است که مدل به‌طور متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده را بیشتر از مقادیر واقعی (بیش‌برآورد) پیش‌بینی کرده است (Mamghaderi et al., 2020; Chauhdary et al., 2024). علاوه بر این، مقادیر نزدیک به یک برای شاخص‌های R^2 (ضریب تعیین) و d (شاخص توافق ویلموت) بیانگر هم‌خوانی بالای نتایج شبیه‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده بوده و اعتبار مدل را تأیید می‌کنند (Ahmadpari et al., 2020).

³ Coefficient of Determination

⁴ Willmott's Index of Agreement

¹ Normalized Root Mean Square Error

² Coefficient of Residual Mass

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت

جدول ۴، نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل AquaCrop را در شبیه‌سازی عملکرد گندم ارائه می‌کند و نشان می‌دهد که میزان تأثیر هر پارامتر بر عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل تا چه اندازه قابل توجه است. بر اساس داده‌های ارائه‌شده، برخی پارامترها مانند زمان شروع دوره کاهش پوشش گیاهی، دارای بالاترین درجه حساسیت هستند. تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گندم در مطالعات (Rosa et al. و Nasrolahi et al. (2024) و (2023) نشان می‌دهد که پارامترهای مربوط به رشد و توسعه پوشش گیاهی، بیشترین تأثیر را بر خروجی مدل دارند. در مقابل، پارامترهایی مانند حداکثر عمق مؤثر ریشه، آستانه‌های تنش آبی خاک و حد آستانه بالای دما با مقادیر صفر در هر دو حالت تغییر ۲۵ درصدی، در گروه

کم حساسیت قرار گرفته‌اند و تأثیر ناچیزی بر خروجی مدل دارند. نتایج مطالعات (Rosa et al. و Upreti et al. (2023) نیز نشان داد که نتایج معمولاً حساسیت کمی نسبت به تغییر این پارامترها دارند و تغییر آن‌ها تأثیر ناچیزی بر نتایج شبیه‌سازی دارد. در مقابل، پارامترهایی مانند ضریب تعرق گیاهی، بهره‌وری آب نرمال شده، شاخص برداشت مرجع و دمای پایه رشد در گروه حساسیت متوسط تا زیاد طبقه‌بندی شده‌اند. نتایج مطالعات (Rosa et al. (2023) و (Upreti et al. (2020) نشان دادند که پارامترهایی مانند ضریب تعرق گیاهی و شاخص برداشت مرجع تأثیر قابل توجهی بر عملکرد گندم دارند. نتایج پژوهش‌های (Nasrolahi et al. (2024) و (Xing et al. (2025) نیز تأکید کردند که دمای پایه رشد و ضریب تعرق گیاهی و بهره‌وری آب نرمال شده، از پارامترهای با حساسیت بالا هستند که بر شبیه‌سازی عملکرد گندم اثرگذارند.

جدول ۴- مقادیر ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی در مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی محصول گندم

پارامتر	نماد	مقدار Sc در حالت ۲۵- درصد	مقدار Sc در حالت ۲۵+ درصد	درجه حساسیت
پوشش کانوپی اولیه	CC ₀	۰/۳۱	۰/۶۹	کم
ضریب رشد کانوپی	CGC	۰/۳۲	۲/۳۷	کم-متوسط
ضریب کاهش کانوپی	CDC	۲/۴۲	۱۴/۵۵	متوسط
حداکثر پوشش گیاهی	CC _{max}	۳/۲۶	۴/۱۰	متوسط
زمان شروع جوانه‌زنی	-	۰/۳۴	۷/۸۲	کم-متوسط
زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی	-	۲/۹۲	۱۴/۹۲	متوسط-متوسط
زمان شروع دوره کاهش پوشش گیاهی	-	۳۷/۴۱	۲۹/۸۴	زیاد
طول دوره گلدهی	-	۰/۴۵	۰/۰۸	کم
حداکثر عمق مؤثر ریشه	Zr _{max}	۰/۰۰	۰/۰۰	کم
زمان رسیدن به ماکزیمم عمق ریشه	-	۰/۰۰	۰/۰۰	کم
ضریب تعرق گیاهی	KC _{Tr,X}	۱۰/۹۵	۲۹/۲۴	متوسط-زیاد
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه	KS _{sen}	۰/۰۰	۰/۰۰	کم
آستانه بالای ضریب تخلیه رطوبتی خاک برای کنترل روزه‌ها	KS _{exp,w}	۰/۰۰	۰/۰۰	کم
بهره‌وری آب نرمال شده	WP*	۶/۰۷	۲۵/۲۴	متوسط-زیاد
شاخص برداشت مرجع	HI ₀	۸/۰۷	۲۴/۶۲	متوسط-زیاد
دمای پایه رشد	T _{base}	۳/۷۱	۱۹/۱۸	متوسط-زیاد
حد آستانه بالای دما	T _{upper}	۰/۰۰	۰/۰۰	کم

تیمارها منجر به کاهش دقت پیش‌بینی و افت ضریب تبیین مدل، به‌ویژه در تیمارهای با دور آبیاری ۱۴ روز، می‌شود. نتایج مطالعه (Habib Agahi et al. (2020) نشان داد که در شرایط تنش آبی شدید، یعنی زمانی که سطح آبیاری بین ۲۰ تا ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه باشد، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی پارامترهای عملکرد و ماده خشک از کمترین

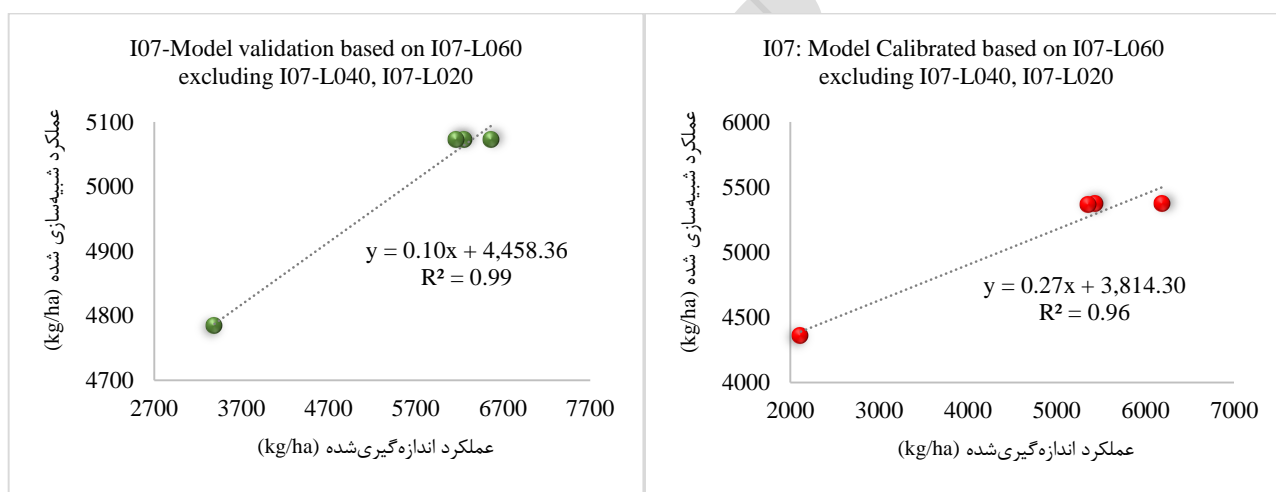
واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop

در این مطالعه، مجموعه‌ای شامل ۱۱ تیمار ترکیبی از دو دور آبیاری (I۰۷-I۱۴) و پنج سطح آبیاری (L۱۰۰، L۸۰، L۶۰، L۴۰، L۲۰) به‌همراه یک تیمار تک‌آبیاری (L۰۰S) بررسی شد. نتایج اولیه نشان داد که استفاده از یک تیمار منفرد برای واسنجی مدل AquaCrop در شرایط تنوع بالای

خطای مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول افزایش می‌یابد. طبق این نتایج هرچه شدت تنش آبی بیشتر شود، دقت مدل کاهش می‌یابد. همچنین مدل بیشترین دقت را در شرایط بدون تنش آبی از خود نشان داده است. طبق نتایج پژوهش (Da Conceição et al. (2024) در شرایط تنش آبی متوسط و شدید، دقت مدل AquaCrop کاهش می‌یابد. به‌ویژه در سطوح آبیاری پایین‌تر، مدل تمایل به بیش‌برآورد عملکرد دارد. به‌منظور ارتقاء کیفیت شبیه‌سازی و افزایش هم‌خوانی بین خروجی‌های مدل و داده‌های مزرعه‌ای، واسنجی نهایی بر اساس تیمارهای با دور آبیاری ۷ روز انجام شد. همچنین، در این گروه، سطوح آبیاری ۴۰ و ۲۰ درصد به دلیل کاهش دقت مدل در بازنمایی عملکرد، از فرآیند واسنجی حذف شدند. این انتخاب هدفمند موجب بهبود پایداری مدل و افزایش قابلیت اعتماد آن در تحلیل‌های بعدی شد (شکل ۳).

میزان دقت برخوردار است. به‌عبارت دیگر، با افزایش شدت تنش آبی، دقت پیش‌بینی‌های مدل AquaCrop به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. (Hellal et al. (2019) با استفاده از مدل AquaCrop، بهره‌وری آب را در سطوح مختلف کم‌آبیری بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که اگرچه مدل AquaCrop در شرایط آبیاری نرمال از دقت و عملکرد مناسبی برخوردار است، اما در شرایط تنش آبی، دقت مدل کاهش یافته و ممکن است منجر به بیش‌برآورد عملکرد محصول شود.

یافته‌های پژوهش (Ahmadi et al. (2015) بر محدودیت‌های مدل AquaCrop در شبیه‌سازی دقیق عملکرد تحت شرایط تنش آبی و بیش‌برآورد مقادیر عملکرد نهایی توسط مدل تأکید دارد. یافته‌های پژوهش (Mohammadi et al. (2025) بیانگر آن است که با افزایش شدت تنش آبی محصول برنج، از شرایط غرقاب دائم تا تنش شدید ناشی از افزایش فاصله بین نوبت‌های آبیاری، میزان



شکل ۳- عملکرد مدل AquaCrop در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

ارزیابی شبیه‌سازی، عملکرد گیاه گندم در حالت مدل‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه و شاخص خطای نسبی به‌عنوان معیار اعتبارسنجی به‌کار گرفته شد. پس از حصول تطابق قابل قبول بین دو حالت، ضرایب نهایی به‌عنوان پارامترهای واسنجی شده مدل ثبت شدند و مبنای تحلیل‌های بعدی قرار گرفتند.

پس از اجرای مدل AquaCrop، فرآیند تنظیم پارامترها با هدف دستیابی به بیشترین هم‌خوانی بین خروجی‌های مدل و داده‌های واقعی مزرعه‌ای آغاز شد. این تنظیمات به‌صورت تدریجی و با توجه به آنالیز حساسیت، از طریق آزمون و خطا انجام شد تا ترکیب بهینه‌ای از پارامترها حاصل شود که ضمن حفظ دقت، پایداری مدل را نیز تضمین کند (جدول ۵). برای

جدول ۵- مشخصه‌های گیاهی به کاررفته در مرحله واسنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گند بر مبنای تیمار I۰۷-L۰۶۰

مقدار	واحد	نماد	محدوده مجاز	گروه	عامل
۵/۴	درجه سانتی‌گراد	T _{base}	-	-	دمای پایه رشد
۳۰	درجه سانتی‌گراد	T _{upper}	-	-	حد آستانه بالای دما
۱/۵۱	متر	Z _{rmin}	-	-	حداکثر عمق ریشه
۰/۳	متر	Z _{rmax}	-	-	حداقل عمق ریشه
۶/۷۵	درصد	CC ₀	۱-۱۲	پوشش کم	پوشش کانوپی اولیه در زمان تکمیل ۹۰ درصد سبز شدن
۳/۵	درجه بر روز	CGC	۲-۴	توسعه بسیار آرام	ضریب رشد پوشش تاجی
۱۱/۶	درجه بر روز	CDC	-	-	ضریب کاهش پوشش تاجی
۹۴	درصد	CC _{max}	۹۰-۹۸	تقریباً به‌طور کامل پوشیده شده	حداکثر پوشش تاجی
۴۹	درصد	HI ₀	تا ۵۸ درصد	نسبتاً مقاوم به تنش آبی	شاخص برداشت مرجع
۱۶/۶	گرم بر مترمربع	WP*	۱۵-۲۰	گیاهان C _۳	بهره‌وری آب نرمال شده
۱/۰۸	-	KC _{Tr,X}	-	-	ضریب تعرق گیاهی
۰/۲۵	-	P _{upper}	تا ۰/۲۵	نسبتاً مقاوم به تنش آبی	آستانه بالای تخلیه رطوبتی خاک برای گسترش کانوپی
۰/۶	-	P _{lower}	تا ۰/۶	نسبتاً مقاوم به تنش آبی	آستانه پایین تخلیه رطوبتی خاک برای گسترش کانوپی
۲	-	Shape factor	-	-	عامل شکل ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی
۰/۵۵	-	P _{upper}	-	-	آستانه بالای ضریب تخلیه رطوبتی خاک برای کنترل روزه‌ها
۱	-	Shape factor	-	-	عامل شکل ضریب تنش آبی خاک برای کنترل روزه‌ها
۰/۶	-	P _{upper}	۰/۶ - ۰/۶۹	نسبتاً مقاوم به تنش آبی	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه
۱/۳	-	Shape factor	-	-	ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه
۱۷	روز	-	-	-	زمان کاشت تا ظهور جوانه
۱۷۵	روز	-	-	-	زمان کاشت تا گلدهی
۲۰۱	روز	-	-	-	زمان کاشت تا رسیدن
۲۳۵	روز	-	-	-	زمان کاشت تا بلوغ

مقادیر بالای شاخص توافق ویلموت (d) برابر با ۰/۹۰ و ۰/۸۵، بیانگر تطابق مناسب بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است. همچنین، مقدار NRMSE در این مطالعه (۱۲ درصد در واسنجی و صحت‌سنجی) در مقایسه با مقادیر گزارش شده توسط Abedinpour (2021) برای گندم (بین ۶ تا ۷/۲ درصد در واسنجی و ۶/۴ درصد در صحت‌سنجی) نشان‌دهنده دقت متوسط مدل است. در مطالعه‌ای که توسط Kanda et al. (2020) انجام شده است، برای عملکرد نهایی محصول لوبیا مقدار R² و NRMSE به ترتیب ۰/۸۵ و ۱۱/۳ درصد در واسنجی و

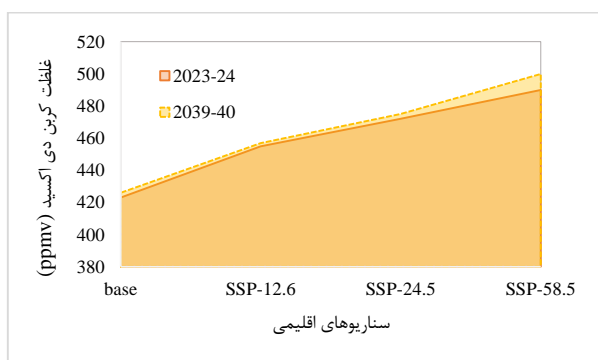
باتوجه به جدول ۶ نتایج حاصل از این پژوهش در شبیه‌سازی عملکرد گندم با استفاده از مدل AquaCrop، با مطالعات پیشین (Dirwai et al., 2021; Kanda et al., 2020) هم‌خوانی دارد. (al., 2020) بررسی پوشش تاجی کلزا، آماره‌های R²، NRMSE و d را در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۹۹، ۶/۴ درصد و ۰/۹۸ و در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۹۷، ۲۲/۵ درصد و ۰/۹۸ گزارش کرده‌اند که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شرایط آبیاری کامل است. در پژوهش حاضر نیز، مقدار R² برابر با ۰/۹۶ در واسنجی و ۰/۹۹ در صحت‌سنجی، همراه با

Alizadeh and Shanono et al. (2023)، (2022) و (2017) Abbasi هم‌راستا بوده و گرایش مدل به کم برآورد و بیش برآورد عملکرد در شرایط وجود تیمار تنش آبی را تأیید می‌کند.

۰/۹۶ و ۸/۸ درصد در صحت‌سنجی گزارش شده است. در پژوهشی متمرکز بر عملکرد محصول سویا، R^2 ، NRMSE، و d به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۰۱، و ۰/۹۷ گزارش شده است (Ramadhani et al., 2023). ضریب CRM منفی و مثبت نیز با یافته‌های پژوهش‌هایی چون Jadhav et al.

جدول ۶- آماره‌های ارزیابی مدل AquaCrop در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بر مبنای تیمار I۰۷-L۰۶۰

آماره	R^2	NRMSE (%)	CRM	d
واسنجی	۰/۹۶	۱۲	-۰/۰۷	۰/۹۰
صحت‌سنجی	۰/۹۹	۱۲	+۰/۱	۰/۸۵



شکل ۴- مقدار CO₂ در سال ۲۰۴۰ تحت سناریوهای مختلف SSP با شرایط سال پایه

تبخیر و تعرق مرجع

در مطالعات جهانی و داخلی، روش FAO Penman-Monteith به عنوان معیار استاندارد برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع شناخته شده است. در مقایسه با این روش، معادله Hargreaves-Samani که داده‌های محدودی نیاز دارد، در برخی مناطق نتایج متفاوتی ارائه می‌دهد (Ahmadpari et al., 2017; 2019). با این حال، در دوره‌های زمانی طولانی، نتایج حاصل از این دو روش معمولاً با اختلافی کمتر از ۱۵ درصد قابل تطابق‌اند، مگر آن‌که شرایط جوی غیرمعمول یا نوسانات شدید روزانه وجود داشته باشد (Allen, 2008). با در نظر گرفتن روش FAO Penman-Monteith به عنوان مبنای ارزیابی، نتایج حاصل از روش Hargreaves-Samani در دوره پایه ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۴ ارزیابی شد. شاخص‌های آماری شامل NRMSE برابر با ۰/۰۱ درصد و ضریب تبیین R^2 برابر با ۰/۸۹، بیانگر دقت مناسب روش Hargreaves-Samani در تخمین تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) در استان البرز هستند. بر این اساس، در این مطالعه از روش Hargreaves-Samani برای محاسبه ET_0 با استفاده از داده‌های تولیدشده توسط مدل LARS-۸ WG استفاده شد.

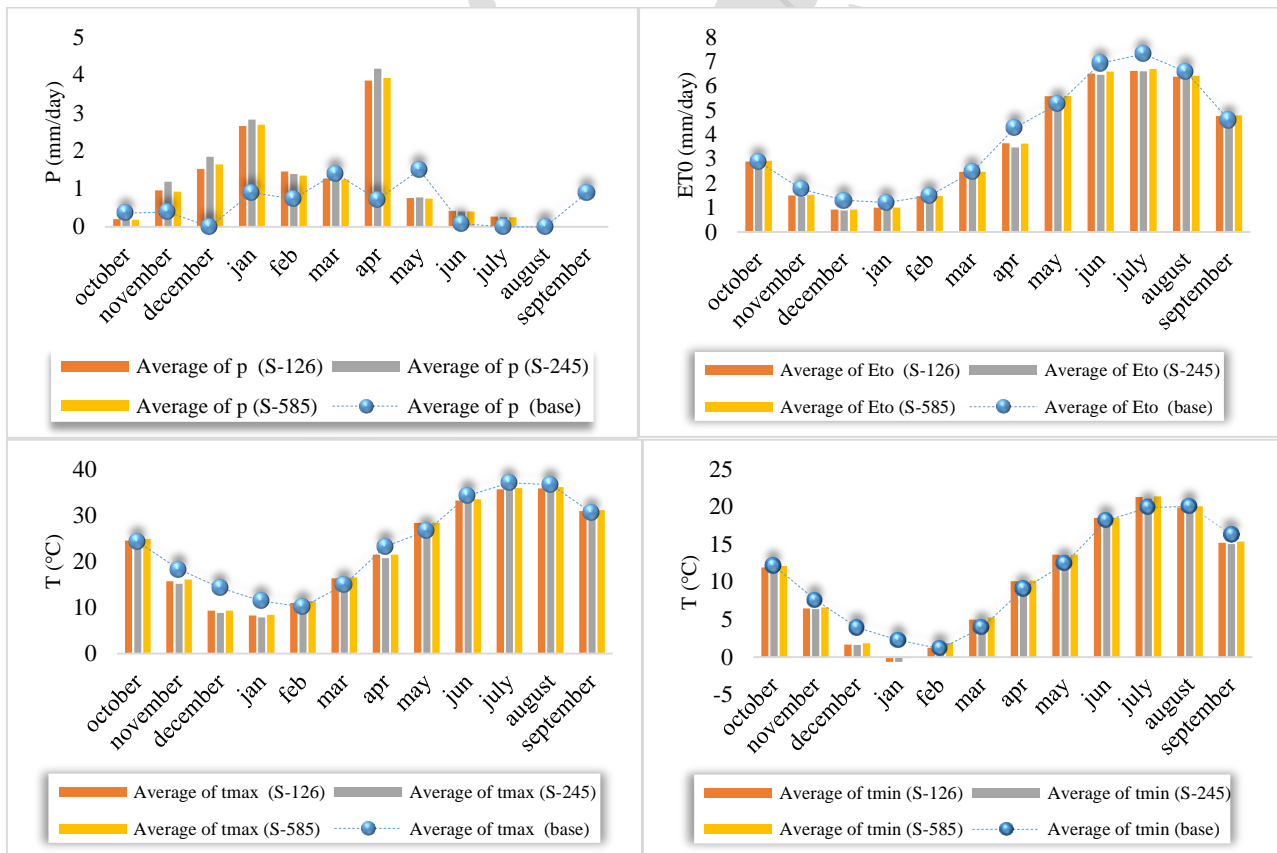
بررسی تغییرات اقلیمی در سال ۲۰۴۰

شکل ۴، تغییرات غلظت CO₂ در سال ۲۰۴۰ را تحت سناریوهای مختلف SSP و سال پایه نشان می‌دهد. در سال پایه غلظت CO₂ حدود ۴۲۳ ppmv بوده و در بدترین سناریو تا سال ۲۰۴۰ به مقدار تقریبی ۵۰۰ ppmv می‌رسد (Cheng et al., 2022).

طبق شکل ۵، در فصل زمستان، به‌ویژه December (آذر-دی) و January (دی-بهمن)، کاهش قابل توجهی در دمای کمینه مشاهده می‌شود، به طوری که در هر سه سناریو دما به زیر صفر می‌رسد. از March (اسفند-فروردین) تا May (اردیبهشت-خرداد)، دمای کمینه در سناریوهای آینده نسبت به سال پایه افزایش یافته است. در ماه‌های گرم‌تر مانند July (تیر-مرداد) و August (مرداد-شهریور)، دمای کمینه در سناریوهای SSP۲-۴/۵ و SSP۵-۸/۵ اندکی بالاتر از سال پایه است. در مقابل، در ماه‌های گرم مانند May (اردیبهشت-خرداد)، June (خرداد-تیر)، July (تیر-مرداد) و August (مرداد-شهریور)، دمای بیشینه در سناریوهای آینده اندکی پایین‌تر از سال پایه است، اما همچنان در محدوده‌های بالا باقی می‌ماند (بیش از ۳۰ درجه)، که نشان‌دهنده تداوم تنش گرمایی تابستانه است. همچنین، در ماه March (اسفند-فروردین) و September (شهریور-مهر)، افزایش جزئی دما نسبت به سال پایه دیده می‌شود، که می‌تواند زمان رسیدگی محصولات را تغییر دهد (Rezaei et al., 2023).

الگوی فصلی تبخیر و تعرق در تمامی سناریوها مشابه بوده و بیشترین مقدار در ماه‌های گرم سال یعنی June (خرداد-تیر) تا August (مرداد-شهریور) و کمترین مقدار در ماه‌های سرد مانند December (آذر-دی) تا February (بهمن-اسفند) مشاهده می‌شود. با این حال، در سناریوهای اقلیمی آینده، به ویژه SSP۵-۸/۵ که نمایانگر شدیدترین تغییرات اقلیمی است، مقادیر ET_0 در ماه‌های گرم افزایش یافته مثلاً در May (اردیبهشت-خرداد) از ۵/۲۴ به ۵/۵۷ میلی‌متر در روز رسیده و در ماه‌های سرد مانند December (آذر-دی) کاهش محسوسی دیده می‌شود (از ۱/۳ به ۰/۹۱ میلی‌متر در روز). این تغییرات نشان دهنده تمرکز بیشتر تبخیر و تعرق در دوره‌های گرم‌تر سال و کاهش آن در دوره‌های سردتر است که می‌تواند بر الگوی مصرف آب کشاورزی، زمان بندی آبیاری و مدیریت منابع آبی در آینده تأثیرگذار باشد (Deveci et al., 2025).

در سال پایه، بارش به طور پراکنده و محدود در ماه‌هایی مانند October (مهر-آبان)، November (آبان-آذر)، January (دی-بهمن) و May (اردیبهشت-خرداد) رخ داده و در ماه‌های تابستانی مانند July (تیر-مرداد)، August (مرداد-شهریور) تقریباً صفر بوده است. در مقابل، سناریوهای آینده به ویژه SSP۲-۴/۵ و SSP۵-۸/۵ نشان‌دهنده افزایش چشمگیر بارش در فصل زمستان و اوایل بهار هستند؛ افزایش بارش در ماه‌های December (آذر-دی)، January (دی-بهمن) و April (فروردین-اردیبهشت) به معنای تأمین بهتر رطوبت خاک در مراحل حساس رشد گندم، مانند جوانه‌زنی، پنجه‌زنی و گل‌دهی است که می‌تواند به افزایش عملکرد محصول منجر شود (Saddique et al et al., 2020). با این حال، تمرکز بارش در بازه‌های کوتاه و احتمال وقوع بارش‌های سنگین، خطر آب‌گرفتگی، شیوع بیماری‌های قارچی و اختلال در عملیات زراعی مانند کوددهی و سم‌پاشی را نیز افزایش می‌دهد (Shoukat et al., 2024; Zhang et al., 2021).



شکل ۵- تغییرات اقلیمی در سال زراعی ۲۰۴۰ تحت سناریوهای مختلف SSP و شرایط سال زراعی پایه

دوره پایه شود (Shoukat et al., 2024). با این حال، افزایش غلظت CO₂ ممکن است بخشی از این کاهش را جبران کرده و حتی در برخی مناطق موجب بهبود عملکرد گردد (Zhang et al., 2022). افزایش دما معمولاً با کوتاه‌تر شدن دوره رشد و تسریع مراحل فنولوژیک همراه است که می‌تواند به کاهش تعداد دانه و عملکرد منجر شود، اما در برخی مناطق سردتر یا در شرایط خاص، افزایش دما می‌تواند با بهبود رشد اولیه و افزایش تعداد سنبله و دانه، عملکرد را افزایش دهد (Zhang et al., 2021). شکل ۶، عملکرد محصول گندم را در حالت پایه و سناریوهای اقلیمی (SSP۱-۲/۶، SSP۲-۴/۵، SSP۵-۸/۵) عملکرد در سطوح آبیاری بالا ابتدا کاهش یافته و سپس در سناریوی پرتنش بهبود یافته است.

بررسی عملکرد و بهره‌وری آب گندم پاییزه در سال ۲۰۴۰ عملکرد گندم در سناریوهای اقلیمی مبتنی بر مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات دما، بارش و غلظت دی‌اکسید کربن قرار دارد (Shoukat et al., 2024; Li et al., 2025). در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، میزان بارندگی یکی از عوامل تعیین‌کننده در عملکرد محصولات کشاورزی به‌شمار می‌رود. در سناریوهایی با افزایش دما، تنش حرارتی به‌عنوان عامل محدودکننده اصلی ظاهر می‌شود و می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رشد و بهره‌وری گیاهان داشته باشد (El-Mahroug et al., 2025). در سناریوهای با سطح بالای انتشار CO₂ مانند SSP۵-۸/۵، افزایش دما و بارش پیش‌بینی می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش طول دوره رشد (۴ تا ۱۷ درصد)، کاهش تعداد دانه (۳ تا ۲۱ درصد) و افت عملکرد محصول (۴ تا ۲۰ درصد) نسبت به



شکل ۶- عملکرد محصول گندم (دانه) در حالت پایه و سناریوهای اقلیمی

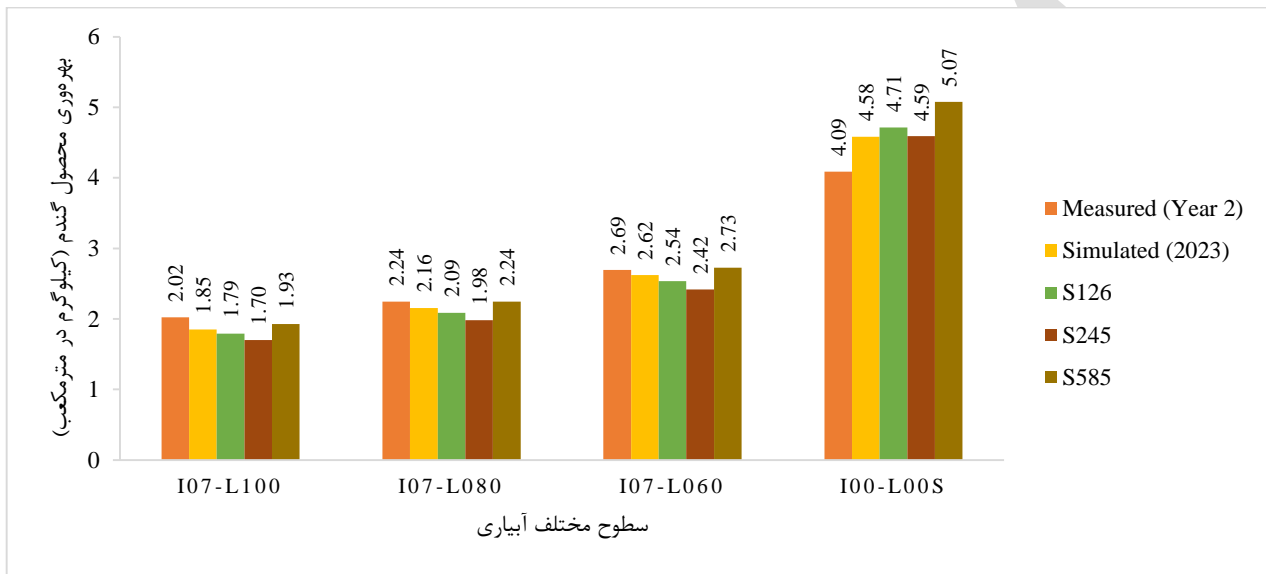
موجب بهبود فرآیند فتوسنتز و کاهش نرخ تعرق گیاه می‌شود، که در نهایت منجر به افزایش بهره‌وری مصرف آب و کاهش افت عملکرد محصول می‌گردد (Shanker et al., 2022). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که افزایش غلظت CO₂ می‌تواند اثرات منفی تنش آبی و گرما را بر عملکرد محصولات، به‌ویژه گیاهان C₃ مانند گندم و جو، تا حدی جبران کند و باعث حفظ یا حتی افزایش عملکرد در سناریوهای با CO₂ بالا شود (Rezaei et al., 2023; Shanker et al., 2022; Kimball and Idso., 1983; Fitzgerald et al., 2016).

آزمایش‌های میدانی در مناطق خشک نشان داده‌اند که افزایش CO₂ می‌تواند عملکرد گندم را تا ۲۴ تا ۵۳ درصد افزایش دهد

در نقاط مختلف جهان، نتایج متنوعی در واکنش به سناریوهای اقلیمی مشاهده شده است. به‌عنوان نمونه، در برخی مناطق چین تحت سناریو SSP۱-۲/۶ (با سطح انتشار پایین)، عملکرد گندم افزایش یافته است؛ در حالی که در سناریو SSP ۵-۸/۵، کاهش عملکرد در برخی نواحی شمالی این کشور گزارش شده است (Wang et al., 2024; Li et al., 2024b). عملکرد در سطح تک آبیاری در تمامی سناریوهای اقلیمی نسبت به سال ۲۰۲۳ و به‌ویژه ثبت بیشترین مقدار در سناریو SSP۵-۸/۵، می‌تواند بیانگر واکنش مثبت گندم دیم به افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در شرایط تنش خشکی باشد (Ulft et al., 2024). در شرایط تنش آبی شدید، افزایش غلظت CO₂

مدنظر قرار گیرد. طبق نتایج پژوهش‌های انجام شده اگرچه افزایش غلظت CO_2 می‌تواند در برخی شرایط باعث بهبود رشد گیاهان شود، اما این اثر به شدت وابسته به نوع و رقم محصول، شرایط خاک و مدیریت زراعی است (Rezaei et al., 2023; Helman and Bonfil, 2022; Fitzgerald et al., 2016). شکل ۷ تغییرات بهره‌وری آب در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد را در پاسخ به سناریوهای اقلیمی آینده نشان می‌دهد.

و اثرات منفی موج‌های گرما و خشکی را تا حدی جبران کند، به‌ویژه زمانی که آبیاری تک‌مرحله‌ای یا محدود انجام می‌شود (Fitzgerald et al., 2016; Cao et al., 2022). با این حال نتایج برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تحت تنش شدید آبی، پارامترهایی مانند فتوسنتز، رشد و عملکرد گیاه به شدت کاهش می‌یابد و بهره‌وری آب نیز کاهش می‌یابد (Zhao et al., 2020; Khorsand et al., 2020). بنابراین احتمال بیش‌برآورد و دقت پایین مدل در بازنمایی شرایط تنش آبی شدید نیز باید



شکل ۷- بهره‌وری فیزیکی آب (دانه) در سطوح مختلف آبیاری در سناریوهای اقلیمی

یافته، در حالی که سناریوی SSP۲-۴/۵ با CO_2 پایین بیشترین افت را نشان داده است. افزایش CO_2 باعث بهبود فتوسنتز، کاهش تعرق و در نتیجه افزایش کارایی مصرف آب شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی اقلیمی، با وجود ثابت بودن میزان آبیاری نسبت به سال پایه، عملکرد گیاه در هر سه سناریو در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد به یک اندازه کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افت بهره‌وری مصرف آب است. این یافته نشان می‌دهد که افت عملکرد بیشتر ناشی از عوامل اقلیمی است تا کمبود آب آبیاری. این پدیده عمدتاً به تغییرات دما و شدت تبخیر و تعرق در آینده مربوط می‌شود که موجب اتلاف بخشی از آب بدون مشارکت مؤثر در تولید محصول می‌گردد.

در سناریوی اقلیمی SSP۲-۴/۵، بهره‌وری آب گندم در استان البرز کاهش یافته و منجر به افت عملکرد حدود ۴۶۷۳ تن در سال ۲۰۴۰ شده است؛ که معادل ۱۰ درصد کل تولید سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ است. این کاهش نشان‌دهنده تأثیر چشم‌گیر تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی و بهره‌وری آب است.

بررسی مقادیر بهره‌وری آب گندم در سطوح مختلف آبیاری نشان می‌دهد که با کاهش حجم آب مصرفی، بهره‌وری به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. نتایج پژوهش‌های اخیر تأیید می‌کند که افزایش غلظت CO_2 ، به‌ویژه در سناریوهای مشابه SSP۵-۸/۵، باعث بهبود فتوسنتز و در نتیجه افزایش بهره‌وری آب می‌شود (Li et al., 2018; Zhang et al., 2024). مطالعات مدل‌سازی نشان می‌دهند که اثر کوددهی CO_2 می‌تواند کاهش عملکرد و بهره‌وری آب ناشی از تغییرات اقلیمی را تا حد زیادی جبران کند و حتی در برخی مناطق موجب صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری شود (Nechifor and Winning, 2017; Nechifor and Winning, 2019; Deryng et al., 2016).

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که غلظت CO_2 نقش مهمی در بهره‌وری آب گندم در استان البرز دارد. در سناریوی SSP۵-۸/۵ با CO_2 بالا، عملکرد و بهره‌وری آب حفظ شده یا افزایش

منابع

1. Abdolalizadeh, F., Khorshidoost, A.M. and Jahanbakhsh Asl, S., 2022. Evaluation of CMIP6 model accuracy in simulating temperature and precipitation over the Lake Urmia watershed. *Journal of Climate Change Research*, 3(11), pp.17–30. [In Persian]. <https://doi.org/10.30488/ccr.2022.361233.1093>
2. Abedinpour, M., 2021. The Comparison of DSSAT-CERES and AquaCrop Models for Wheat Under Water-Nitrogen Interactions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52, pp. 2002-2017. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1908323>
3. Ahmadi, S. H., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A. A. and Sepaskhah, A. R., 2015. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. *Water Resources Management*, 29(8), pp. 2837-2853. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0973-3>
4. Ahmadpari, H., Dehghani, T., Gerdini, M. S., Sofia, S. and Yazdi, A., 2020. Removal of cadmium from aqueous solutions by eggshell as low-cost adsorbent. *Journal of Advanced Pharmacy Education and Research*, 10(4), pp. 1-9.
5. Ahmadpari, H., Hashemi Garmdareh, S.A. and Ghaleh Kohneh, K., 2017. Comparison of different methods for estimating potential evapotranspiration with FAO Penman-Monteith method (Case study: Sepidan region). *Nivar*, 41(98–99), pp.13–22. [In Persian]. <https://doi.org/10.30467/nivar.2017.51886>
6. Ahmadpari, H., Safavi Gordini, M. and Ebrahimi, M., 2019. Selecting an appropriate method for estimating reference evapotranspiration under limited meteorological data conditions (Case study: Khorrambid County, Fars Province). *Land Management*, 7(2), pp.223–230. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/lmj.2019.120559>
7. Alizadeh, H.A. and Abbasi, F., 2017. Investigation of maize grain yield response to different levels of water and fertilizer using the AquaCrop model. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 40(2), pp.119–134. [In Persian]. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.13166>
8. Alizadeh, H.A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramazani E'tedali, H. and Janbaz, H.R., 2010. Evaluation of the AquaCrop model in deficit irrigation management of wheat in Karaj region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4(2), pp.273–283. [In Persian].
9. Allen, R. G., 2008. REF-ET: Reference Evapotranspiration Calculator (Version for

برای مقابله با این چالش، بازنگری در تقویم زراعی با تمرکز بر تعیین تاریخ کاشت بهینه، توسعه پایگاه داده‌های اقلیمی-زراعی و آموزش کشاورزان در مدیریت خطرات اقلیمی، اجرای الگوی آبیاری متناسب با شرایط اقلیمی پیش‌بینی‌شده و حمایت‌های پژوهشی و اجرایی بیش‌ازپیش در راستای تولید، اصلاح ژنتیکی و توسعه ارقام زراعی مقاوم پیشنهاد می‌شود.

همچنین یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد مدل AquaCrop در شرایط آبیاری کامل عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی محصول گندم دارد، اما با افزایش تنش آبی، دقت آن کاهش می‌یابد. این کاهش دقت ناشی از محدودیت‌های ساختاری مدل در بازتاب پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه است. پژوهش حاضر بر لزوم بازنگری و بهبود مدل، به‌ویژه با افزودن پارامترهای مرتبط با توزیع ریشه و جذب آب از خاک، تأکید دارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان هواشناسی به‌دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های هواشناسی، سپاسگزارند. این پژوهش به‌عنوان بخشی از رساله دکتری نویسنده اول و با حمایت دانشگاه تهران انجام شده است.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها و نگارش پژوهش
نویسنده دوم: راهنمایی و بازبینی مقاله و کنترل نتایج
نویسنده سوم: راهنمایی و بازبینی مقاله و کنترل نتایج

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آن‌ها می‌باشد.

- change impacts on future wheat (*Triticum aestivum*) yield, growth periods and irrigation requirements: a SALTMED model simulations analysis. *Agronomy*, 14(7), 1484. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071484>
20. Chia, E. and Hutchinson, M.F., 1991. The beta distribution as a probability model for daily cloud duration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 56(3-4), pp.195-208. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90091-4)
21. Da Conceição, W.N.F., de Faria, R.T., Coelho, A.P., Palaretti, L.F., Dalri, A.B. and de Freitas, E.P., 2024. Calibration, testing and application of the AquaCrop model for bean crop under irrigation regimes. *International Journal of Biometeorology*, 68(9), pp.1703-1716. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02699-1>
22. Dehghani, T., Liaqat, A., Rezaei Rad, H. and Ahmadpari, H., 2024. Estimation of maize grain yield based on Landsat 8 satellite imagery (Case study: Shahid Beheshti Agro-Industrial lands, Dezful). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 18(3), pp.433-447. [In Persian].
23. Dehghani, T., Rahimkhoob, A. and Arab, M., 2018. Investigation of basil planting date effect on normalized water productivity using AquaCrop model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(6), pp.1299-1307. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.252253.667850>
24. Deryng, D., Elliott, J., Folberth, C., Müller, C., Pugh, T.A., Boote, K.J. and Rosenzweig, C., 2016. Regional disparities in the beneficial effects of rising CO₂ concentrations on crop water productivity. *Nature Climate Change*, 6(8), pp.786-790. <https://doi.org/10.1038/nclimate2995>
25. Deveci, H., Önlü, B. and Erdem, T., 2025. Modeling the effects of climate change on the irrigation water requirements of wheat and canola in the TR21 Thrace Region using CROPWAT 8.0. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1563048. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1563048>
26. Dirwai, T., Senzanje, A. and Mabhaudhi, T., 2021. Calibration and Evaluation of the FAO AquaCrop Model for Canola (*Brassica napus*) under Varied Moisture Irrigation Regimes. *Agriculture*, 11.410. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050410>
27. Du, Y., Fu, Q., Ai, P., Yu, Y. and Pan, Y., 2024. Modeling comprehensive deficit irrigation strategies for drip-irrigated cotton using AquaCrop. *Agriculture*, 14(8), Article 1269. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081269>
28. Earth System Grid Federation., 2025. CMIP6.CMIP.MOHC.HadGEM3-GC31-Windows 3.1) [Computer software]. University of Idaho Research and Extension Center.
10. Araya, A., Kisseka, I. and Holman, J., 2016. Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrigation Science*, 34(6), pp. 465-481. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0515-7>
11. Azad, N., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V. and Tayfeh Rezaie, H., 2018. Climate change impacts modeling on winter wheat yield under full and deficit irrigation in Myandoab-Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(5), pp. 731-746. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1373187>
12. Balasubramaniam, T., Shen, G., Esmaeili, N. and Zhang, H. 2023. Plants' response mechanisms to salinity stress. *Plants*, 12(12), 2253. <https://doi.org/10.3390/plants12122253>
13. Bao, Q., Ding, J., Wang, J., Han, L. and Tan, J., 2025. Utilizing CMIP6-SSP scenarios with the VIC model to enhance agricultural and ecological water consumption predictions and deficit assessments in arid regions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 232, 110083. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110083>
14. Borzou, F., Ramazani E'tedali, H. and Kaviani, A., 2023. Effect of planting date changes under climate change conditions on autumn wheat yield. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17(5), pp.1-17. [In Persian].
15. Bouras, E., Jarlan, L., Khabba, S., Er-Raki, S., Dezetter, A., Sghir, F. and Trambly, Y., 2019. Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. *Scientific Reports*, 9, Article 19142. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55251-2>
16. Busschaert, L., De Roos, S., Thiery, W., Raes, D. and De Lannoy, G. J. M., 2022. Net irrigation requirement under different climate scenarios using AquaCrop over Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(14), pp. 3731-3752. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3731-2022>
17. Cao, Q., Li, G. and Liu, F., 2022. Elevated CO₂ enhanced water use efficiency of wheat to progressive drought stress but not on maize. *Frontiers in Plant Science*, 13, 953712. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.953712>
18. Cheng, W., Dan, L., Deng, X., Feng, J., Wang, Y., Peng, and et al., 2022. Global monthly gridded atmospheric carbon dioxide concentrations under the historical and future scenarios. *Scientific Data*, 9(1), 83. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
19. Chauhdary, J. N., Li, H., Ragab, R., Rakibuzzaman, M., Khan, A. I., Zhao, J. and et al., 2024. Climate

- FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), pp. 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
39. Hussain, M., Mahmood, M., Fatima, F., Siddiq, F., Ahmad, S., Rehman, A., Ammara, G. and Nasir, A. 2025. Advanced applications of AquaCrop for field management and climate impact assessment. *Asian Journal of Research in Crop Science*, 10(1), pp. 1–17. <https://doi.org/10.9734/ajrcs/2025/v10i1327>
40. IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*.
41. Ishaque, W., Osman, R., Hafiza, B., Malghani, S., Zhao, B., Xu, M. and et al., 2023. Quantifying the impacts of climate change on wheat phenology, yield and evapotranspiration under irrigated and rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, 278, Article 108017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108017>
42. Izadi, Z., Nasrollahi, A.H. and Haghghati Boroujeni, B., 2018. Simulation of climate change impacts on potato yield using the AquaCrop growth model. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 9(3), pp.143–158. <https://doi.org/10.22125/iwe.2019.88679>
43. Jadhav, R., Awari, S. and Khodke, V., 2022. Assessment of Aquacrop Model for Irrigated Cotton under Deficit Irrigation in Semi-Arid Tropics of Maharashtra. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 22007.
44. Javadi, A., Ghahremanzadeh, M., Sassi, M., Javanbakht, O. and Hayati, B., 2023. Impact of climate variables change on the yield of wheat and rice crops in Iran (Application of stochastic model based on Monte Carlo simulation). *Computational Economics*, 63(3), pp. 983–1000. <https://doi.org/10.1007/s10614-023-10389-0>
45. Kanda, E., Senzanje, A. and Mabhaudhi, T., 2020. Calibration and validation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102941>
46. Kavwenje, S., Zhao, L., Chen, L. and Chaima, E., 2022. Projected temperature and precipitation changes using the LARS-WG statistical downscaling model in the Shire River Basin, Malawi. *International Journal of Climatology*, 42(1), pp. 400–415. <https://doi.org/10.1002/joc.7250>
47. Kheiri, R., Mojarad, F., Farhadi, B. and Masoumpour Samakoosh, J., 2022. Assessment of LL.historical dataset [Data set]. Retrieved from ESGF CMIP6 search portal.
29. El-Mahroug, S., Suleiman, A., Zoubi, M., Al-Omari, S., Abu-Afifeh, Q., Al-Jawaldeh, et al., 2025. Predictive Modeling of Climate-Driven Crop Yield Variability Using DSSAT Towards Sustainable Agriculture. *AgriEngineering*, 7(5), 156. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050156>
30. Farajzadeh, M., Ghavidel Rahimi, Y. and Asadzadeh, B., 2021. Assessment of climate change impacts on wheat yield in Iran. *Journal of Climate Change Research*, 2(6), pp.1–18. [In Persian].
31. Fitzgerald, G.J., Tausz, M., O'Leary, G., Mollah, M.R., Tausz-Posch, S., Seneweera, S. and Norton, R.M., 2016. Elevated atmospheric [CO₂] can dramatically increase wheat yields in semi-arid environments and buffer against heat waves. *Global Change Biology*, 22(6), pp.2269–2284. <https://doi.org/10.1111/gcb.13263>
32. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)., 2012. Coping with water scarcity: An action framework for agriculture and food security. FAO Water Reports No. 38. Rome:
33. Ghalibaf, M. B., Gholami, M. and Ahmadi, S. A., 2023. Climate change, food system and food security in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 25(1), pp. 1–17.
34. Habib Agahi, M., Shabani, A., Mahmoudi, M.R. and Zarei, A., 2020. Evaluation of AquaCrop model efficiency under different drought stress levels in various crops. Proceedings of the First National Conference on Deficit Irrigation and Use of Non-Conventional Water in Agriculture of Arid Regions, Mashhad, Iran. [In Persian].
35. Hajivand Paydari, S., Yazdanpanah, H. and Andarzian, S.B., 2023. Assessment of climate change impacts on growth and yield of maize in northern Khuzestan Province using the AquaCrop model. *Agricultural Meteorology Semiannual Journal*, 11(2), pp.40–50. [In Persian]. <https://doi.org/10.22125/agmj.2023.330985.1132>
36. Hellal, F., Mansour, H., Abdel-Hady, M., El-Sayed, S. and Abdelly, C. 2019. Assessment water productivity of barley varieties under water stress by AquaCrop model. *AIMS Agriculture and Food*, 4(3), 501–517. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2019.3.501>
37. Helman, D. and Bonfil, D. J. 2022. Six decades of warming and drought in the world's top wheat-producing countries offset the benefits of rising CO₂ to yield. *Scientific Reports*, 12(1), 7921.
38. Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop—The

57. Mamghaderi, A., Aminshahidy, B and Bazargan, H. 2020. Error behavior modeling in Capacitance-Resistance Model: A promotion to fast, reliable proxy for reservoir performance prediction. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 77, 103228. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103228>
58. Masaliyeva, Z., Karimov, A. and Adhamov, J., 2024. Estimating reference evapotranspiration using the Hargreaves-Samani formula for end-user applications. Proceedings in *E3S Web of Conferences* (Vol. 563, p. 03081). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456303081>
59. Mohammadi Dehraei, H., Amiri, A., Rezaei, M. and Behzadi, J., 2025. Evaluation of the AquaCrop model in predicting grain yield and biomass of rice under water stress across different years. *Water and Soil Modeling and Management*, 3(5), pp.37–53. [In Persian].
60. Nasrolahi, A. H., Ahmadee, M. and Rustum, R., 2024. Sensitivity Analysis of AquaCrop Model for Winter Wheat in Different Water Supply Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 150(2), 04024002. <https://doi.org/10.1061/JIDEDH.IRENG-10099>
61. Nechifor, V. and Winning, M., 2017. Higher CO2 concentrations impacts over global crop production and irrigation water requirements.
62. Nechifor, V. and Winning, M., 2019. Global crop output and irrigation water requirements under a changing climate. *Heliyon*, 5(3). e01266. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019. e01266>
63. Nossent, J., Elsen, P. and Bauwens, W., 2011. Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model. *Environmental modelling and software*, 26(12), pp. 1515-1525. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.08.010>
64. Ozturk, I., Sharif, B., Baby, S., Jabloun, M. and Olesen, J. E., 2017. The long-term effect of climate change on productivity of winter wheat in Denmark: a scenario analysis using three crop models. *The Journal of Agricultural Science*, 155(5), pp. 733-750.
65. Pourgholam Amiji, M., Liaghat, A. and Khoshrosh, M., 2020. Evaluation of the AquaCrop model in estimating rice yield under alternate irrigation cultivation. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 11(1), pp.305–320. [In Persian]. <https://doi.org/10.22125/iwe.2020.114972>
66. Racsko, P., Szeidl, L. and Semenov, M., 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological modelling*, 57(1-2), pp. 27-41.
67. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E., 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate evapotranspiration changes in irrigated autumn wheat in Iran under climate change conditions. *Journal of Climate Change Research*, 3(1), pp.215–248. [In Persian].
48. Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Heris, A. M., Rahimi, A. and Besharat, S. 2020. Response of maize and black gram yield and water productivity to variations in canopy temperature and crop water stress index. *International Agrophysics*, 34(3), pp. 381-390. <https://doi.org/10.31545/intagr/126439>
49. Kimball, B. A. and Idso, S. B., 1983. Increasing atmospheric CO2: effects on crop yield, water use and climate. *Agricultural water management*, 7(1-3), pp. 55-72. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(83\)90075-6](https://doi.org/10.1016/0378-3774(83)90075-6)
50. Kourgialas, N. N., 2023. How Does Agricultural Water Resources Management Adapt to Climate Change? A Summary Approach. *Water*, 15(22), 3991. <https://doi.org/10.3390/w15223991>
51. Li, C., Camac, J., Robinson, A. and Kompas, T., 2025. Predicting changes in agricultural yields under climate change scenarios and their implications for global food security. *Scientific Reports*, 15(1), 2858. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87047-y>
52. Li, W., Song, R., Awais, M., Ji, L., Li, S., Liu, M. and et al., 2024a. Global sensitivity analysis of crop parameters based on AquaCrop Model. *Water Resources Management*, 38(6), pp. 2039-2058. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03740-z>
53. Li, X., Tan, J., Wang, X., Han, G., Qian, Z., Li, H. and et al., 2024b. Responses of spring wheat yield and growth period to different future climate change models in the yellow river irrigation area based on CMIP6 and WOFOST models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 353, 110071. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110071>
54. Li, X., Kang, S., Zhang, X., Li, F. and Lu, H., 2018. Deficit irrigation provokes more pronounced responses of maize photosynthesis and water productivity to elevated CO2. *Agricultural Water Management*, 195, pp. 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.017>
55. Lotfi, M., Kamali, G. A., Meshkatee, A. H. and Varshavian, V., 2022. Performance analysis of LARS-WG and SDSM downscaling models in simulating temperature and precipitation changes in the West of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), pp. 4649-4659. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01393-8>
56. Mai, J., 2023. Ten strategies towards successful calibration of environmental models. *Journal of Hydrology*, 620, 129414. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129414>

77. Sha, J., Li, X. and Zhong-Liang, W., 2019. Estimation of future climate change in cold weather areas with the LARS-WG model under CMIP5 scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3-4), pp. 3027-3039. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02781-4>
78. Shanker, A. K., Gunnapaneni, D., Bhanu, D., Vanaja, M., Lakshmi, N. J., Yadav, S. K., ... and Singh, V. K. 2022. Elevated CO2 and water stress in combination in plants: brothers in arms or partners in crime?. *Biology*, 11(9), 1330. <https://doi.org/10.3390/biology11091330>
79. Shanono, N., Ahmad, L., Nasidi, N., Jibril, A. and Yahya, M., 2023. Simulation-Optimization Modelling of Yield and Yield Components of Tomato Crop. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, 4(1), pp. 104-124. <https://doi.org/10.46592/turkager.1283793>
80. Shoukat, M., Wang, J., Habib-Ur-Rahman, M., Hui, X., Hoogenboom, G. and Yan, H., 2024. Adaptation strategies for winter wheat production at farmer fields under a changing climate: Employing crop and multiple global climate models. *Agricultural Systems*, 220, 104066. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104066>
81. Statistical Center for Information Technology and Communications., 2024. Agricultural Yearbook 2022–2023: Crop Products. *Planning and Economic Affairs Deputy, Ministry of Agriculture Jahad*. 126p. [In Persian].
82. Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E., 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25(3), pp. 189-207. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>
83. 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. *Agronomy journal*, 101(3), pp. 426-437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
84. Stričević, R., Lipovac, A., Djurović, N., Sotonica, D and Čosić, M., 2023. AquaCrop model performance in yield, biomass and water requirement simulations of common bean grown under different irrigation treatments and sowing periods. *Horticulturae*, 9(4), 507. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040507>
85. Tataw, J. T., Baier, F., Krottenthaler, F., Pachler, B., Schwaiger, E., Wyhlidal, S. and et al., 2016. Climate change induced rainfall patterns affect wheat productivity and agroecosystem functioning dependent on soil types. *Ecological research*, 31(2), pp. 203-212. <https://doi.org/10.1007/s11284-015-1328-5>
- yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), pp. 438-447.
68. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E., 2023. AquaCrop (version 7.1): reference manual. FAO, Rome.
69. Rahnama, M., Shakerami, K. and Abbasi, H., 2018. Identification and analysis of key drivers influencing regional development in Alborz Province using scenario-based planning approach. *Journal of Territorial Spatial Planning*, 10(1), pp.139–166. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jtcp.2018.254262.669854>
70. Ramadhani, F., Bowo, C. and Slameto, S., 2023. The Use of Aquacrop Model for Soybean in Various Water Availability Within a Lysimeter System. *Journal of Applied Agricultural Science and Technology*, 7(4), pp. 399-413. <https://orcid.org/0000-0002-1013-3427>
71. Rezaei, E. E., Webber, H., Asseng, S., Boote, K., Durand, J. L., Ewert, F. and et al., 2023. Climate change impacts on crop yields. *nature reviews earth and environment*, 4(12), pp. 831-846.
72. Rosa, S. L. K., Souza, J. L. M. D., Tsukahara, R. Y. and Kochinski, E. G., 2023. Sensitivity analysis of the AquaCrop model for wheat crop in Campos Gerais region, Paraná. *Revista Ceres*, 70(1), pp. 32-41. <https://doi.org/10.1590/0034737X202370010004>
73. Sabzian, M., Rahimikhoob, A., Mashal, M., Aliniaiefard, S. and Dehghani, T., 2021. Comparison of water productivity and crop performance in hydroponic and soil cultivation using AquaCrop software A case study of lettuce cultivation in Pakdasht, Iran. *Irrigation and Drainage*, 70(5), pp. 1261-1272. <https://doi.org/10.1002/ird.2600>
74. Saddique, Q., Li Liu, D., Wang, B., Feng, P., He, J., Ajaz, A. and et al., 2020. Modelling future climate change impacts on winter wheat yield and water use: A case study in Guanzhong Plain, northwestern China. *European Journal of Agronomy*, 119, 126113. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126113>
75. Selvam, M., Ramachandran, M., Ramu, K. and Sivaji, C., 2023. Agricultural Water Productivity Using Weighted Aggregated Sum Product Assessment Method. *Building Materials and Engineering Structures*, 1(2), pp. 26-36. <http://doi.org/10.46632/bmes/1/2/4>
76. Semenov, M. A. and Barrow, E. M., 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic change*, 35(4), pp. 397-414. <https://doi.org/10.1023/A:1005342632279>

- Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris: UNESCO.
96. Xing, H., Sun, Q., Li, Z., Wang, Z. and Feng, H., 2025. Sensitivity Analysis of AquaCrop Model Parameters for Winter Wheat under Different Meteorological Conditions Based on the EFAST Method. *Polish Journal of Environmental Studies*, 34(1), pp. 329-345
<https://doi.org/10.15244/pjoes/186111>
97. Zeynali Mobarakeh, N., Dehim Ferd, R. and Kambozia, M., 2021. Modeling the impacts of climate change on irrigated wheat yield under water limitation conditions in Khorasan Razavi Province. *Journal of Climate Change Research*, 2(6), pp.155–169. [In Persian].
98. Zhang, L., Wang, F., Song, H., Zhang, T., Wang, D., Xia, H. and et al., 2022. Effects of projected climate change on winter wheat yield in Henan, China. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134734.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134734>
99. Zhang, M., Zhao, W., Liu, C., Xu, C., Wei, G., Cui, B. and et al., 2024. Effect of CO₂ elevation on tomato gas exchange, root morphology and water use efficiency under two N-fertigation levels. *Plants*, 13(17), 2373.
<https://doi.org/10.3390/plants13172373>
100. Zhang, Y., Qiu, X., Yin, T., Liao, Z., Liu, B. and Liu, L., 2021. The Impact of Global Warming on the Winter Wheat Production of China. *Agronomy*, 11(9), 1845.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11091845>
101. Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F. and et al., 2020. Effects of water stress on photosynthesis, yield and water use efficiency in winter wheat. *Water*, 12(8), 2127.
<https://doi.org/10.3390/w12082127>
86. Terán, F., Vives-Peris, V., Gómez-Cadenas, A. and Pérez-Clemente, R. M., 2024. Facing climate change: plant stress mitigation strategies in agriculture. *Physiologia Plantarum*, 176(4), e14484.
<https://doi.org/10.1111/ppl.14484>
87. Terán-Chaves, C. A., Mojica-Rodríguez, J. E., Vega-Amante, A. and Polo-Murcia, S. M., 2023. Simulation of crop productivity for Guinea grass (*Megathyrsus maximus*) using AquaCrop under different water regimes. *Water*, 15(5), 863.
<https://doi.org/10.3390/w15050863>
88. Terán-Chaves, C.A., Garcia-Prats, A. and Mercedes Polo-Murcia, S., 2022. Calibration and Validation of the FAO AquaCrop Water Productivity Model for Perennial Ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Water*, 14(23), 3933.
<https://doi.org/10.3390/w14233933>
89. Ulfat, A., Shokat, S. and Liu, F., 2024. Elevated CO₂ improves the performance of bread wheat under drought stress through better physiological responses and grain yield. *Plant Stress*, 100493.
90. Upreti, D., Pignatti, S., Pascucci, S., Tolomio, M., Li, Z., Huang, W. and et al., 2020. A Comparison of moment-independent and variance-based global sensitivity analysis approaches for wheat yield estimation with the Aquacrop-OS model. *Agronomy*, 10(4), 607.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10040607>
91. Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K. and et al., 2014. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, 62, pp. 351-360.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
92. Villaverde, A. F., Pathirana, D., Fröhlich, F., Hasenauer, J. and Banga, J. R., 2022. A protocol for dynamic model calibration. *Briefings in bioinformatics*, 23(1).
93. Wang, D., Guo, M., Li, J., Wu, S., Cheng, Y., Shi, L. and et al., 2024. Impact of Climate Change on the Winter Wheat Productivity Under Varying Climate Scenarios in the Loess Plateau: An APSIM Analysis (1961–2100). *Agronomy*, 14(11), 2609.
<https://doi.org/10.3390/agronomy14112609>
94. Wang, H., Cheng, M., Liao, Z., Guo, J., Zhang, F., Fan, J. and et al., 2023. Performance evaluation of AquaCrop and DSSAT-SUBSTOR-Potato models in simulating potato growth, yield and water productivity under various drip fertigation regimes. *Agricultural Water Management*, 276, 108076.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108076>
95. WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2015. The United Nations World