Research Paper

Sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop model in simulating barley yield and biomass and determining appropriate planting date in Sistan region

Masoud Shahraki[1], Halimeh Piri[2*], Hadi Galavi[3], Zohre Hashemi[4]

[1] Phd student, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
[2] Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
[3] Asistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
4 Phd,, Sistan Agricultural and Natural Resources Research Center, Zabol, Iran.

10.22125/iwe.2026.559853.1909

Received:
November 14, 2025
Accepted:
December 30, 2025
Available online:
June 25, 2026

Keywords:
Normalized Water Productivity (WP*), Maximum Crop Transpiration Coefficient, Canopy Cover Coefficient, Crop Modeling

Abstract

This study evaluates the AquaCrop model for simulating grain yield and biomass of barley in the Sistan region, considering water resource limitations and varying climatic conditions. Data from four farms in the Zahak and Hirmand counties (Research Center, Khwaja Ahmad, Zurabad, and Deh-Laghari) were used over two cropping seasons (2023–2024 and 2024–2025). Three planting date scenarios—early (November 6), mid-season (December 6), and late (January 5)—and three irrigation levels (full irrigation, 25% deficit irrigation, and 50% deficit irrigation) were considered. Simulation results showed that the AquaCrop model can predict grain yield and biomass with high accuracy. During calibration, the R^2 values for grain yield and biomass ranged from 0.96 to 0.97, and during validation, R^2 ranged from 0.94 to 0.98 for grain yield and from 0.90 to 0.92 for biomass. The high coefficients of determination and low error statistics indicated that the model successfully simulated grain yield and biomass with strong accuracy. The sensitivity analysis indicated that canopy transpiration coefficient (Kc), normalized water productivity (WP*), and reference harvest index (HIo) were the most influential parameters in the model. Furthermore, the irrigation and planting date scenarios showed that in wet years, a 25% reduction in irrigation decreased yield by 5–7%. In normal years, reducing irrigation by 25% and 50% led to a 13–20% reduction in yield, and in dry years, a 25–50% reduction in irrigation caused a 45–48% decrease in grain yield.

* **Corresponding Author:** Halimeh Piri
Address: Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
Email: h_piri2880@uoz.ac.ir
Tel: 05431251266

1. Introduction

The use of agricultural simulation models for predicting crop performance and optimizing water resource management has become essential. One such model is AquaCrop, developed by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). In recent years, AquaCrop has been widely used as an effective tool for simulating crop performance under deficit irrigation and climatic stress conditions in arid and semi-arid regions. Given the extensive research conducted on the AquaCrop model in various regions, the model must be calibrated for each specific area to achieve reliable results. In Iran, barley is considered one of the strategic crops and occupies a significant cultivated area. Barley is one of the four major cereals in the world, alongside wheat, rice, and maize (Tuttolomondo and Labell, 2008). Since the people of Sistan rely heavily on agriculture and livestock production, barley cultivation holds particular importance in this region. Therefore, in this study, the AquaCrop model was used to simulate barley yield and biomass in the Sistan region, with the aim of evaluating the model's accuracy in predicting agricultural parameters such as canopy cover, biomass, and grain yield under deficit irrigation and climatic variability.

2. Materials and Methods

For conducting this study, four farms located across different parts of the Sistan plain, each with distinct soil and water characteristics, were selected. These farms were situated at four locations: the Research Center and Khwaja Ahmad village in the Zahak region, and Zurabad village and Deh Laghari in the Hirmand region. Data from these four farms were used over two cropping seasons, 2023–2024 and 2024–2025.

The AquaCrop model (version 6.1), as a validated crop simulation model, simulates grain yield and biomass using soil moisture data throughout the plant's growth period. During the simulation process, the effects of water stress on dry matter production and grain yield are accurately adjusted based on specific soil, crop, and irrigation parameters. In particular, in this study, parameters related to the crop transpiration coefficient (Kc) and normalized water productivity (WP*) were carefully calibrated and refined to minimize simulation errors. Simulation in the AquaCrop model is performed in four steps. In the first step, canopy cover development is separated from root zone expansion. The second step involves simulating crop transpiration. The third step models biomass production based on the following equation (Jorenoush et al., 2019):

$$B = K_{sb} \times WP^{*} \times \sum \frac{T_r}{ET_o} \quad (1)$$

In this equation, B is the daily biomass production, K_{sb} is the temperature stress coefficient, WP^{*} is the normalized water productivity, Tr is daily transpiration, and ETo is the reference evapotranspiration.

In the fourth step, grain yield is simulated using Equation (2):

$$Y = f_{HI} \times HI_0 \times B \quad (2)$$

In this equation, Y is grain yield, f_{HI} is the adjustment factor for water or temperature stress, HI_0 is the reference harvest index under non-stress conditions, and B is the biomass.

The field measurements in this study included soil moisture, grain yield, biomass, and canopy cover. Soil moisture was measured in two soil layers (0–15 cm and 15–50 cm) during the 2023–2024 and 2024–2025 growing seasons using the gravimetric sampling method, with measurements taken five times throughout the growing season. Canopy cover and biomass were also measured five times during the growing season, while grain yield was recorded at the end of the season.

For the model sensitivity analysis, Equation (3) was used:

$$SC = \left|\frac{P_m - P_b}{P_B}\right| \quad (3)$$

In this equation, SC represents the sensitivity coefficient (dimensionless), P_m is the estimated value of the parameter based on the adjusted input data, and P_b is the base value of the same parameter based on the original input data. The procedure was as follows: in each step, one of the model input parameters was increased and decreased by 20%, while all other factors were kept constant to determine the model's sensitivity to that parameter (Torajzadeh et al., 2024).

3. Results

The results showed that the AquaCrop model was most sensitive to changes in the reference harvest index (HI_o) across all farms. The model is particularly sensitive to reductions in this parameter, making accurate calibration of HIo highly important. Following this, the normalized water productivity (WP^*) and crop transpiration coefficient (Kc) were identified as the next most sensitive parameters, where errors in their estimation could lead to significant inaccuracies in simulation outputs. In contrast, the model exhibited low sensitivity to parameters such as canopy growth coefficient (CGC), upper temperature threshold, and the duration from sowing to emergence. This sensitivity pattern is consistent with findings reported in other studies across different climatic regions (Salemei et al., 2011). Gharibvand et al. (2025) examined the sensitivity of the AquaCrop model under salinity and water stress in drip irrigation for quinoa. The results showed that the model was most sensitive to changes in the normalized water productivity parameter, with an average sensitivity coefficient of 0.82. This was followed by the maximum crop transpiration coefficient, harvest index, and canopy growth coefficient, with average sensitivity coefficients of 0.72, 0.68, and 0.38, respectively.

The statistical analysis results for both grain yield and biomass in the calibration and validation stages demonstrated the model's high accuracy. During the calibration stage, the AquaCrop model showed high precision in simulating grain yield, with an R^2 value of 0.97 for the Research Center farm, indicating excellent agreement between the measured and simulated data. This value for the other farms—Khaje Ahmad, Zurabad, and Deh Laghari—was 0.96, 0.97, and 0.96, respectively, reflecting good agreement between simulations and actual measurements in these areas. Similar results were observed for biomass. The R^2 values for biomass were 0.96 for the Research Center, 0.96 for Khaje Ahmad, 0.97 for Zurabad, and 0.96 for Deh Laghari, indicating high simulation accuracy across all farms. These values demonstrate that the AquaCrop model was able to simulate plant biomass accurately in different locations. The results of this study were consistent with those of other similar studies, such as Khoshsirat et al. (2022) and Hellal et al. (2019).

The evaluation results showed that under all irrigation levels and climatic scenarios, as the planting date shifted from November 6 (early) to December 6 (mid-season), grain yield decreased in the Research Center and Khaje Ahmad farms, while it increased in the Zurabad and Deh Laghari farms. Delaying sowing beyond this date (January 5, late planting) led to a reduction in grain yield in all four farms.

4. Discussion and Conclusion

This study demonstrated that the choice of planting date, as an important factor affecting grain yield—particularly under deficit irrigation and dry years—can significantly influence crop productivity. For dry and normal years, it is recommended that farmers in the Sistan region select November 6 for sowing in the Research Center and Khaje Ahmad farms, and December 6 in the Zurabad and Deh Laghari farms, to achieve better yield under limited irrigation conditions. Ultimately, this study showed that the AquaCrop model, using accurate meteorological, soil, and irrigation data, can effectively simulate crop

performance under deficit irrigation. It can serve as a useful tool for agricultural planning and water resource management in arid and semi-arid regions, particularly in the Sistan area.

5. Six important references

1) Gharibvand Notorki, J., Piri, H., Haghighatjoo, P., and A., Naserin. 2025. Sensitivity analysis of the AquaCrop model under salinity and water stress in typical drip irrigation for quinoa. Soil and Water Conservation Research, 32(2), 99–120.
2) Hellal, F., Mansour, H., Abdel-Hady, M., El-Sayed, S., and C., Abdelly.2019. Assessment water productivity of barley varieties under water stress by AquaCrop model. AIMS Agriculture & Food, 4(3): (pages not provided).
3) Jorjanoush, M., Aghdarnajad, A., Aslan, A., Shahrokhnia, M., and N. A. Ebrahimi-Pak. 2024. Evaluation of the AquaCrop model for simulating wheat performance under different crop management scenarios in Qazvin. Modeling and Management of Soil and Water, 4(2), 1–16.
4) Khoshsirat, A. M., Najarchi, M., Jafarinia, R., and S., Mokhtari, 2022. Sensitivity analysis and determination of the optimal level of water use efficiency for winter wheat and barley under different irrigation scenarios using the AquaCrop model in arid and semiarid climatic conditions (Case Study: Dehloran Plain, Iran). Water, 14(21): 3455.
5) Salemi, H., Mohd Soom, M. A., Lee, T. S., Mousavi, S. F., Ganji, A., and M., Kamil Yusoff. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. African Journal of Agricultural Research, 6(10): 2204–2215.
6) Tuttolomondo, T., and S.L, abell, 2008. Simulation of the effects of climate change on barley yield in rural Italy. FAO Website. www.fao.org

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

This research was carried out with the cooperation and financial support of the university of zabol (IR-UOZ-GR-1837). We hereby express our gratitude and appreciation for the support and cooperation of these dignitaries.

تحلیل حساسیت و ارزیابی مدلAquaCrop در شبیه سازی عملکرد و زیست‌توده گیاه جو و تعیین تاریخ کشت مناسب در منطقه سیستان

مسعود شهرکی[۱]، حلیمه پیری*[۲]، هادی گلوی[۳]، زهره هاشمی[۴]

تاریخ ارسال:۱۴۰۴/۰۸/۲۴
تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۱۰/۰۹

مقاله پژوهشی

چکیده

این تحقیق به ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده گیاه جو در منطقه سیستان، با توجه به محدودیت‌های منابع آبی و شرایط اقلیمی مختلف می‌پردازد. برای انجام کار از داده‌های چهار مزرعه در شهرستان‌های زهک و هیرمند (مرکز تحقیقات، خواجه احمد، زورآباد و ده‌لاغری) طی دو سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و ۱۴۰۴-۱۴۰۳ استفاده شد و سه سناریو تاریخ کاشت (زودهنگام (۱۵ آبان)، میانه‌فصل (۱۵ آذر) و دیرهنگام (۱۵ دی)) و سه حالت آبیاری (آبیاری کامل، ۲۵٪ کم‌آبیاری و ۵۰٪ کم‌آبیاری) در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مدل AquaCrop قادر است عملکرد دانه و زیست‌توده را با دقت بالایی پیش‌بینی کند. در مرحله واسنجی، مقادیر R^2 برای عملکرد دانه و زیست‌توده بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۷ و در مرحله صحت‌سنجی، برای عملکرد بین ۰/۹۴ تا ۰/۹۸ و برای زیست‌توده بین ۰/۹ تا ۰/۹۲ متغیر بود. مقادیر بالای ضریب تبیین و مقادیر پایین آماره‌های خطا نشان داد مدل توانسته است با دقت بالا عملکرد دانه و زیست‌توده را شبیه‌سازی کند. تحلیل حساسیت مدل نشان داد که پارامترهای ضریب گیاهی تعرق (Kc)، بهره‌وری نرمال‌شده آب (WP*) و شاخص برداشت مرجع (HIo) بیشترین حساسیت را در مدل دارند. همچنین، نتایج سناریوهای آبیاری و تاریخ کاشت نشان داد که در سال‌های مرطوب، کاهش ۲۵ درصدی آبیاری، باعث کاهش ۵ تا ۷ درصد، در سال‌های نرمال، کاهش آبیاری به ۲۵٪ و ۵۰٪ منجر به کاهش ۱۳ تا ۲۰ ÷ عملکرد و در سال‌های خشک، کاهش ۲۵٪ تا ۵۰٪ آبیاری باعث کاهش ۴۵ تا ۴۸ درصدی عملکرد دانه شد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب نرمال شده، حداکثر ضریب تعرق گیاهی، ضریب پوشش گیاهی، مدل‌سازی گیاهی.

[۱] . دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. E-mail: masood_shahraki@yahoo.com
[۲] . دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. (* نویسنده مسئول) E-mail:h_piri2880@uoz.ac.ir
[۳] . استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.Email: hadigalavi@uoz.ac.ir
[۴] . کارشناس ارشد، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، زابل، ایران.

مقدمه

کشاورزی به‌عنوان یکی از ارکان اساسی اقتصاد ایران، نقش عمده‌ای در تأمین امنیت غذایی، ایجاد اشتغال و ارتقای پایداری اقتصادی ایفا می‌کند. با این حال، محدودیت‌های منابع آبی و تغییرات اقلیمی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تهدیدات عمده‌ای برای بهره‌وری کشاورزی به شمار می‌روند. یکی از مشکلات پیشرو در بخش کشاورزی، استفادهٔ پایدار از منابع موجود مانند زمین، آب و نیروی کارگری برای افزایش تولید و توسعهٔ کشاورزی بوده که نیازمند برنامه‌ریزی و سیاست-گذاری مناسب مدیریتی است (Amiri et al., 2016). تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که کشاورزی بیش‌ترین آسیب‌پذیری را در برابر تنش‌های آبی دارد، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که به شدت به منابع زیست-محیطی خود متکی هستند (شرفی و همکاران، ۱۴۰۳). در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کشاورزی برای پیش‌بینی عملکرد محصولات و مدیریت بهینه منابع آبی، امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از این مدل‌ها، مدل AquaCrop است که توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) توسعه یافته است. در سال‌های اخیر، مدل AquaCrop به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان تحت شرایط کم‌آبیاری و بحران‌های اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شده است. بر خلاف سایر مدل‌های مشابه که نیاز به داده‌های زیاد و پیچیده دارند، مدل AquaCrop قابلیت کاربرد بالا و ساده‌ای در شرایط مختلف اقلیمی و آبی دارد. این ویژگی‌ها، AquaCrop را به یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی رشد گیاهان در مناطق با محدودیت منابع آبی تبدیل کرده است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌های مشابه، دقت بالاتری در شبیه‌سازی تغییرات عملکرد گیاه تحت تنش آبی دارد (Zhang et al., 2022). Duncan and Nobert (۲۰۱۵) در کشور اوگاندا با استفاده از مدل AquaCrop بر روی گیاه ذرت تحقیقاتی را انجام دادند. آن‌ها با استفاده از این مدل به شبیه‌سازی روند تولید محصول ذرت تا سال 2050پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که تا سال 2050در کشور اوگاندا برای مناطقی با سرعت گرمایش بالا و بارندگی کم، میزان تولید محصول ذرت با کاهش۴/۷ درصدی روبرو خواهد شد و برای مناطقی با سرعت گرمایش کم و بارندگی زیاد، میزان تولید محصول ذرت به مقدار ۳/۵ درصد افزایش خواهد یافت. (Wu et al.2022,) مدل AquaCropبرای شبیه‌سازی عملکرد، سطح سایه انداز و نیاز آبی گیاه ذرت در شرایط مختلف مدیریت آبیاری و کود استفاده نمودند و دریافتند که مدل در شرایط بدون تنش شبیه‌سازی دقیق‌تری دارد.

در ایران، محصول جو جزء محصولات استراتژیک قلمداد شده و از سطح زیرکشت قابل توجهی نیز برخوردار است. جو یکی از چهار غله مهم در دنیا بوده و در کنار گندم، برنج و ذرت قرار می‌گیرد (Tuttolomondo and Labell, 2008). جو با تولید سالیانه ۱۵۷ میلیون تن در سال و با سطح زیرکشت ۵۶ میلیون هکتار جزء یکی از مهمترین غلات دنیا است. طبق آمار فائو ایران با تولید سالیانه ۳ میلیون تن و سطح زیرکشت ۱/۷ میلیون هکتار در رده چهاردهم طبقه‌بندی کشورهای تولید کننده‌ی این محصول قرار می‌گیرد. جو گیاهی است که دامنه انتشار و سازش اقلیمی وسیعی داشته و اغلب برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک سازگار است. کاه جو در تغذیه دام از ارزش علوفه بالاتری نسبت به کاه گندم برخوردار است به‌طوری که قابل مقایسه با گندم مقاومت بیشتری نسبت به خشکی و بیماری نشان می‌دهد و در شرایط نامساعد عملکرد آن بیش از گندم است (نورمحمدی و همکاران، ۱۳۸۳). مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور مانند دشت سیستان، که با بحران کم‌آبی مواجه هستند، تأثیرات شدیدی از کاهش بارش‌های فصلی و تغییرات اقلیمی در تولید محصولات کشاورزی تجربه می‌کنند. سیستان با دماهای بالا، بارش‌های کم و پراکنده، به‌ویژه در فصل‌های گرم سال، شرایطی را فراهم می‌آورد که بر بهره‌وری و رشد محصولات کشاورزی تأثیر منفی دارد ((Qian et al.,2021. در منطقه سیستان کمبود آب، یک مسئله جدی و دارای اهمیت است. تنها منبع آب منطقه، رودخانه هیرمند است که از کوه‌های بابا یغمای افغانستان سرچشمه می‌گیرد و بحران آب منطقه، ناشی از کمبود آب

در این رودخانه است به گونه‌ای که عدم تأمین آب هیرمند منجر به نابودی کشاورزی منطقه گردیده است. در این منطقه اراضی زیادی وجود دارد که قابل کشت می‌باشد اما به خاطر کمبود منابع آب به صورت بایر رها شده‌اند. بنابراین باید دنبال راه‌کاری بود که با حفظ شرایط پایدار در منابع آب و خاک منطقه از لحاظ اقتصادی موجب توسعه کشاورزی شود. تدوین برنامه آبیاری و اعمال مدیریت صحیح آبیاری در این منطقه می‌تواند از زیان‌های ناشی از کمبود منابع آب در منطقه بکاهد (پیری و همکاران، ۱۳۹۶). علاوه بر این استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی محصولات کشاورزی راه‌کاری ساده و مناسب برای صرفه-جویی در زمان، مکان و هزینه می‌باشد. همچنین این مدل-ها با ارائه‌ی روش‌های مدیریتی مناسب علاوه بر بهبود محصول تولیدی، به سهولت کشاورزی نیز کمک می‌کنند. شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های ارائه شده قدرت تصمیم-گیری کشاورز را افزایش داده و به اتخاذ تصمیمات صحیح کمک می‌کند.

با توجه به گستردگی تحقیقات ذکرشده روی مدل AquaCrop در مناطق مختلف، این مدل باید برای هر منطقه، با شرایط خاص آن منطقه واسنجی شود تا نتایج قابل قبولی حاصل شود. با توجه به این‌که مردم سیستان به کشاورزی و دامپروی مشغول هستند، کشت جو در این منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا در این تحقیق از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده گیاه جو در منطقه سیستان با هدف بررسی دقت این مدل در پیش‌بینی پارامترهای کشاورزی مانند پوشش تاجی، زیست‌توده و عملکرد دانه در شرایط کم‌آبیاری و تغییرات اقلیمی استفاده شد. استفاده از این مدل می‌تواند به کشاورزان منطقه کمک کند تا با توجه به شرایط اقلیمی خاص، استراتژی‌های مناسب‌تری برای کاشت و آبیاری گیاه جو انتخاب کنند و بهره‌وری آبی را در مزارع خود افزایش دهند. همچنین با کاربرد مدل AquaCrop واسنجی شده در سناریوهای مختلف اقلیمی، تاریخ بهینه کشت جو در منطقه نیز موردبررسی قرار گرفت.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، دشت سیستان است که در بخش سفلای حوضه آبریز هیرمند در جنوب شرقی ایران و شمال استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. این دشت با مساحت ۲۰۳ هزار هکتار قابل کشت، از اهمیت ویژه‌ای در کشاورزی منطقه برخوردار است. حوضه آبریز هیرمند با مساحت ۱۵۰۰۰۰ کیلومترمربع، شامل بخش‌هایی در ایران و افغانستان است که رودخانه هیرمند به طول ۱۰۵۰ کیلومتر به عنوان مهم‌ترین منبع آبی آن شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر، با خشکسالی‌ها و ساخت سدهای مختلف، آورد آب رودخانه هیرمند کاهش چشمگیری داشته که این موضوع تأثیر زیادی بر وضعیت منابع آبی منطقه گذاشته است. کاربری اراضی در این منطقه شامل کاربری‌های کشاورزی (زراعت آبی) و بایر جنگلی (تپه‌های شنی همراه با مالچ پاشی و جنگل کاری شده) می‌باشد (هاشمی و همکاران، ۲۰۲۲).

برای انجام تحقیق چهار مزرعه در نقاط مختلف دشت سیستان با ویژگی‌های متفاوت آب و خاک انتخاب شدند. این مزارع در چهار نقطه مرکز تحقیقات و روستای خواجه احمد در منطقه زهک، روستای زورآباد و ده لاغری در منطقه هیرمند واقع شده‌اند. برخی از پارامترهای هواشناسی این چهار مزرعه در دوره بلند مدت ۱۴۰۴-۱۳۷۴ و میانگین دو سال مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. برای انجام کار از داده‌های مربوط به این چهار مزرعه در دو سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و ۱۴۰۴-۱۴۰۳ استفاده شد.

جدول (۱): خلاصه آمار هواشناسی در دوره‌های مختلف زراعی

منطقه	دوره زمانی	رطوبت نسبی متوسط (٪)	بارندگی (میلی‌متر)	دمای حداقل (°C)	دمای حداکثر (°C)
زهک	بلندمدت (۱۴۰۴-۱۳۷۴)	۳۲	۶۲/۳	۱۴/۷	۳۳/۸
هیرمند	بلندمدت (۱۴۰۴-۱۳۷۴)	۳۰	۵۸/۶	۱۳/۹	۳۴/۲
زهک	سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳	۲۷	۳۷/۲	۱۶	۳۵/۴
هیرمند	سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳	۲۶	۳۳/۶	۱۵/۴	۳۵/۹

رقم جو مورد استفاده در منطقه زهک، رقم "زهک" و در منطقه هیرمند، رقم "نیمروز" بود که به‌طور خاص برای شرایط اقلیمی و خاکی منطقه سیستان مناسب است. این ارقام دارای ویژگی‌هایی مانند ارتفاع متوسط بوته ۸۵ تا ۹۰ سانتی‌متر و سنبله‌های شش ردیفه است که عملکرد قابل توجهی را در شرایط کم‌آبی و خاک‌های شور به همراه دارد.

زمان کاشت این ارقام در دوره‌های مختلف معمولاً در اواخر آبان تا اوایل دی‌ماه انجام می‌شود و زمان برداشت آن در اواخر خرداد تا اوایل تیرماه است. زمان‌های دقیق کاشت و برداشت در دو سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و ۱۴۰۴-۱۴۰۳ در مزارع مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۲): تاریخ کاشت و برداشت جو طی دو سال زراعی در مزارع مورد مطالعه

شهرستان	مزرعه	سال زراعی	زمان کاشت	زمان برداشت
زهک	مرکز تحقیقات	۱۴۰۲-۱۴۰۳	۱۴۰۲/۰۸/۲۵	۱۴۰۳/۰۳/۰۴
		۱۴۰۳-۱۴۰۴	۱۴۰۳/۰۸/۲۲	۱۴۰۴/۰۳/۰۱
	خواجه احمد	۱۴۰۲-۱۴۰۳	۱۴۰۲/۰۸/۲۷	۱۴۰۳/۰۳/۰۸
		۱۴۰۳-۱۴۰۴	۱۴۰۳/۰۸/۲۳	۱۴۰۴/۰۳/۰۵
هیرمند	زورآباد	۱۴۰۲-۱۴۰۳	۱۴۰۲/۰۸/۲۵	۱۴۰۳/۰۳/۰۵
		۱۴۰۳-۱۴۰۴	۱۴۰۳/۰۸/۲۳	۱۴۰۴/۰۳/۰۸
	ده‌لاغری	۱۴۰۲-۱۴۰۳	۱۴۰۲/۰۸/۲۵	۱۴۰۳/۰۳/۰۴
		۱۴۰۳-۱۴۰۴	۱۴۰۳/۰۸/۲۴	۱۴۰۳/۰۳/۰۱

مدل AquaCrop

مدل AquaCrop (نسخه ۶.۱)، به‌عنوان یک مدل شبیه‌سازی گیاهی معتبر، عملکرد دانه و زیست‌توده را با استفاده از داده‌های رطوبت خاک در طول دوره رشد گیاه شبیه‌سازی می‌کند و در فرآیند شبیه‌سازی، اثرات تنش آبی بر تولید ماده خشک و عملکرد دانه به‌طور دقیق با توجه به پارامترهای خاص خاک، گیاه و شرایط آبیاری تنظیم شده است. به‌ویژه در این تحقیق، پارامترهای مرتبط با ضریب گیاهی تعرق (Kc) و بهره‌وری نرمال‌شده آب (WP^*) برای کاهش خطاهای شبیه‌سازی، به‌دقت تنظیم و اصلاح شدند. شبیه‌سازی در مدل AquaCrop در چهار گام انجام می‌گیرد. در گام اول، توسعه پوشش تاجی گیاه از توسعه منطقه ریشه مجزا می‌شود. گام دوم، شبیه‌سازی تعرق گیاهی بوده و گام سوم، شبیه‌سازی زیست‌توده از رابطه زیر است (جرعه‌نوش و همکاران، ۱۳۹۸):

$$B = K_{sb} \times WP^* \times \sum \frac{T_r}{ET_o} \qquad (۱)$$

در این رابطه، B عملکرد روزانه زیست‌توده، K_{sb} ضریب تنش کاهش دما، WP^* مقدار نرمال‌شده بهره‌وری آب، Tr تعرق روزانه و ETo تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه مرجع می‌باشد.

در گام چهارم نیز، عملکرد دانه از رابطه ۲ شبیه‌سازی شد:

$$Y = f_{HI} \times HI_0 \times B \quad (۲)$$

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

مقادیر اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای در این تحقیق، رطوبت خاک، عملکرد دانه، زیست‌توده و پوشش تاجی بود. رطوبت خاک در دو لایه‌ی ۱۵-۰ و ۵۰-۱۵ سانتیمتری و در دو سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و ۱۴۰۴-۱۴۰۳، با روش نمونه‌برداری وزنی و در ۵ نوبت در طول فصل رشد اندازه‌گیری شد. پوشش تاجی و زیست‌توده نیز در ۵ نوبت در طول فصل رشد و عملکرد دانه در انتهای فصل رشد اندازه‌گیری شد.

جدول ۳ مقادیر مربوط به خصوصیات خاک از مزارع مورد مطالعه در شهرستان‌های زهک و هیرمند را نشان می-دهد.

جدول (۳): خصوصیات خاک مزارع در مناطق مورد مطالعه در لایه های مختلف

	زهک		هیرمند	
عامل / مزرعه	مرکز تحقیقات	خواجه احمد	زورآباد	ده‌لاغری
بافت خاک	سیلتی–رسی لومی	سیلتی–رسی لومی	سیلتی لومی	سیلتی لومی
رطوبت اشباع (٪)				
۱۵-۰ سانتی‌متر	۴۵	۴۶	۴۸	۴۷
۵۰-۱۵ سانتی‌متر	۴۲	۴۳	۴۸	۴۴
ظرفیت زراعی (FC) (٪)				
۱۵-۰ سانتی‌متر	۳۰	۳۱	۳۲	۳۱
۵۰-۱۵ سانتی‌متر	۲۸	۲۹	۳۰	۲۹
نقطه پژمردگی (PWP) (٪)				
۱۵-۰ سانتی‌متر	۲۰	۲۱	۱۸	۱۹
۵۰-۱۵ سانتی‌متر	۲۲	۲۲	۲۰	۲۰
هدایت هیدرولیکی (m/day)				
۱۵-۰ سانتی‌متر	۱۱/۳۸	۱۱/۷۲	۱۳/۷	۱۲/۶
۵۰-۱۵ سانتی‌متر	۸/۹۶	۹/۲۹	۱۰/۰۲	۷/۳۶
pH خاک				
۱۵-۰ سانتی‌متر	۸/۱	۸/۱	۸/۴	۸/۳۵
۵۰-۱۵ سانتی‌متر	۸/۱	۸/۱	۸/۴	۸/۳۵

زیست‌توده گیاه جو با برداشت نمونه‌های تصادفی نیم در نیم مترمربعی با دو تکرار در هر هکتار و ۳ تا ۵ بار در هر نمونه‌گیری تعیین شد. به این ترتیب که نمونه‌ها از بالای سطح خاک گرفته شد و به آزمایشگاه منتقل گردید. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون نگهداری شد و وزن آن‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت ثبت گردید. برای تعیین عملکرد دانه در هر مزرعه، ۱۰ نمونه در کادر یک در یک مترمربعی در پایان دوره رشد در

زمان رسیدن دانه گرفته شد. در تعیین پوشش تاجی، از دوربین دیجیتال در فاصله عمودی ۱/۵ متری از سطح مزرعه استفاده شد. به این منظور در هر نمونه‌برداری تصویری، سه تکرار صورت گرفت و تصاویر در نرم‌افزار ENVI 5تحلیل گردید. یکی از قابلیت‌های این نرم‌افزار این است که درصد رنگ سبز تصاویر را با طبقه‌بندی نظارت شده از سوی کاربر با تفکیک رنگ سبز از سایر رنگ‌ها تعیین می‌کند که درصد پوشش تاجی در هر تصویر است.

تحلیل حساسیت

برای تحلیل حساسیت مدل از رابطه ۳ استفاده شد:

$$SC = \left|\frac{P_m - P_b}{P_B}\right| \qquad (۳)$$

در این رابطه، SC نشان‌دهنده ضریب حساسیت (بی‌بعد)، P_m مقدار تخمین‌زده‌شده پارامتر مورد نظر بر مبنای داده‌های ورودی تعدیل‌شده و P_b مقدار پایه همان پارامتر بر اساس داده‌های ورودی اولیه می‌باشد. روش کار به این صورت بود که در هر مرحله، یکی از پارامترهای ورودی مدل به میزان ۲۰ درصد کاهش و افزایش یافت و سایر عوامل ثابت نگه داشته شدند تا میزان حساسیت مدل به آن پارامتر مشخص گردد. سپس، میزان حساسیت بر مبنای معیارهای ارائه‌شده در جدول (۳) تفسیر شد (توراج-زاده و همکاران، ۱۴۰۳).

جدول (۴): معیار تعیین حساسیت براساس پارامتر Sc

دامنه تغییرات شدت حساسیت	۲≥Sc حساسیت کم	۲ < Sc < ۱۰ حساسیت متوسط	۱۰≤Sc حساسیت زیاد

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

در این مطالعه، داده‌های سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ برای واسنجی مدل و داده‌های سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. فرآیند واسنجی به این صورت انجام شد: در مرحله اول، مدل با تعدیل پارامترهای کلیدی شامل حداکثر پوشش تاجی، بهره‌وری نرمال‌شده آب، شاخص برداشت اولیه، حداکثر ضریب تعرق و حداکثر عمق توسعه ریشه تنظیم گردید، به گونه‌ای که خطای نسبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده برای پوشش تاجی، زیست‌توده و عملکرد به حداقل ممکن برسد.

در ادامه، ضرایب تنش آبی مرتبط با توسعه پوشش تاجی، هدایت روزنه‌ای و پیری گیاه برای تکمیل فرآیند واسنجی تعدیل شدند. سپس و پس از تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای خاک، پارامترهای رطوبتی شامل رطوبت در ظرفیت مزرعه‌ای، نقطه پژمردگی، رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده رطوبت خاک بهینه‌سازی شدند. هدف از این مرحله، دستیابی به حداقل خطای نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده رطوبت خاک بود. در عین حال، این اطمینان حاصل شد که خطای نسبی مربوط به پوشش تاجی، زیست‌توده و عملکرد نیز در حداقل مقدار خود حفظ شود.

کاربرد مدل صحت‌سنجی شده در سناریوهای مختلف تاریخ کاشت و کم‌آبیاری

از مدل AquaCrop صحت‌سنجی شده، برای برآورد تأثیر سه تاریخ کاشت و سه رژیم آبیاری بر عملکرد دانه جو استفاده شد. بر اساس الگوی کشت رایج در منطقه و توصیه‌های کارشناسی، سه تاریخ کاشت به عنوان سناریو در نظر گرفته شد: تاریخ زودهنگام (T1) در ۱۵ آبان، تاریخ میانه‌فصل (T2) در ۱۵ آذر و تاریخ دیرهنگام (T3) در ۱۵ دی. همچنین، سه حالت آبیاری شامل آبیاری کامل(d1) ، کم‌آبیاری ۲۵ درصد (d2) و کم‌آبیاری ۵۰ درصد (d3) نسبت به نیاز آبی گیاه تعریف شد.

داده‌های بلندمدت هواشناسی (دوره ۳۰ ساله ۱۴۰۴-۱۳۷۴) و همچنین داده‌های مربوط به سال‌های اجرای آزمایش (۱۴۰۴-۱۴۰۳) برای شهرستان‌های زهک و هیرمند به عنوان ورودی‌های هواشناسی مدل استفاده شد. خصوصیات هیدرولیکی خاک (شامل رطوبت در نقطه اشباع، ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی و هدایت هیدرولیکی اشباع) که برای چهار مزرعه مورد مطالعه (مرکز

تحقیقات، خواجه احمد، زورآباد و ده‌لاغری) در دو عمق ۰-۱۵ و ۱۵-۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده بود، در مدل اعمال گردید. سال‌های مختلف از نظر بارش نیز بر اساس روش چارک‌بندی و بر مبنای داده‌های بارندگی هر منطقه، به سه گروه سال‌های مرطوب، معمولی و خشک طبقه‌بندی شدند تا تأثیر تغییرات اقلیمی نیز در شبیه‌سازی‌ها لحاظ گردد.

ارزیابی دقت مدل

برای ارزیابی دقت مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد جو، از روش اعتبارسنجی متقابل و شاخص‌های آماری زیر استفاده شد:

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[z^*(x_i) - z(x_i)]^2} \quad (۴)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|Z^*(x_i) - Z(x_i)|}{n} \quad (۵)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Z^*(x_i) - Z(x_i))}{n} \quad (۶)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum(z(x_i)-\bar{z})(z^*(x_i)-\bar{z}^*)}{\sqrt{\sum(z(x_i)-\bar{z})^2 \times \sum(z^*(x_i)-\bar{z}^*)^2}}\right)^2 \quad (۷)$$

این شاخص‌ها با استفاده از روابط استاندارد و بر اساس مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده Z*(xi) با مقادیر اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای Z(xi) محاسبه گردید. مقادیر کمتر برای RMSE، MAE و MBE نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است، در حالی که مقدار R^2 نزدیک به ۱ بیانگر برازش بهتر مدل با داده‌های واقعی می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل حساسیت

نتایج تحلیل حساسیت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد جو در مزارع مختلف (مرکز تحقیقات، خواجه احمد، زورآباد و ده‌لاغری) در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. در مقایسه با تحقیقات مشابه؛ مثلاً مطالعه Khoshsirat و همکاران (۲۰۲۲) که در منطقه دِهلوران ایران مدل AquaCrop را برای جو و گندم با روش تحلیل حساسیت به‌کار بردند و مقادیر R^2 بالای ۰/۹ و RMSE پایین گزارش کردند، نتایج ما نیز نشان دادند که مدل AquaCrop دقت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده دارد. همچنین، مطالعه Hellal و همکاران (۲۰۱۹) در بارلی مدیترانه‌ای تحت تنش آبی نشان داد که مدل اختلاف‌های کمتر از ۵٪ در مقدار محصول نسبت به داده‌های میدانی دارد. این نشان‌دهنده توانمندی بالای مدل در مناطق خشک و نیمه‌خشک است، به‌ویژه در مقایسه با مدل‌هایی چون CropSyst که در مطالعات مقایسه‌ای برای جو و گندم کار شده‌اند (Abi Saab et al., 2015). در ارتباط با پارامترهای هواشناسی، مدل نسبت به دمای حداکثر و حداقل در منطقه حساسیت متوسطی نشان داد، در حالی که حساسیت آن به متغیر بارندگی کم بود. این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین در مدل AquaCrop که حساسیت کم به بارندگی و دمای حداقل و حساسیت متوسط به دمای حداکثر را گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد (جرعه‌نوش و همکاران، ۱۳۹۸).

در مورد پارامترهای خاک، مدل حساسیتی در محدوده کم تا متوسط نسبت به رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه‌ای (FC)، نقطه پژمردگی(PWP)، رطوبت اشباع (SAT) و هدایت هیدرولیکی اشباع (Ksat) از خود نشان داد که با نتایج پژوهش‌های قبلی هم‌خوانی دارد (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷).

بیشترین حساسیت مدل در تمامی مزارع، به تغییرات در شاخص برداشت مرجع (HI_o) مربوط بود. مدل به ویژه نسبت به کاهش این پارامتر بسیار حساس است و دقت در واسنجی آن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. پس از آن، پارامترهای بهره‌وری نرمال‌شده آب (WP*) و ضریب گیاهی تعرق (Kc) در رده بعدی پارامترهای بسیار حساس قرار گرفتند و خطا در برآورد آنها می‌تواند منجر به بروز خطای قابل توجهی در خروجی‌های شبیه‌سازی شود. در

مقابل، مدل حساسیت کمی نسبت به پارامترهایی مانند ضریب رشد پوشش سبز(CGC) ، حد آستانه بالای دما و طول دوره کاشت تا جوانه‌زنی نشان داد. این الگوی حساسیت با یافته‌های گزارش‌شده در سایر تحقیقات در مناطق مختلف اقلیمی همسو است (Salemei et al., 2011). غریبوند و همکاران (۱۴۰۴) حساسیت مدل AquaCrop را تحت تنش‌های شوری و آبی در آبیاری قطره‌ای تیپ برای گیاه کینوا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات پارامتر بهره‌وری آب نرمال‌شده (با متوسط ضریب حساسیت ۰/۸۲) داشت. پس از آن، بیشترین حساسیت نسبت به پارامترهای حداکثر ضریب تعرق گیاهی، شاخص برداشت و ضریب رشد پوشش گیاهی به ترتیب با متوسط ضرایب حساسیت ۰/۷۲، ۰/۶۸ و ۰/۳۸ به‌دست آمد.

اگرچه درجه حساسیت پارامترهای مختلف در بین مزارع چهارگانه مورد مطالعه نزدیک به هم بود، اما وجود تفاوت‌های جزئی نشان می‌دهد که رفتار و حساسیت مدل می‌تواند تحت تأثیر شرایط خاص محلی هر منطقه قرار گیرد. مقایسه کلی نتایج این تحلیل حساسیت با مطالعات انجام‌شده در دیگر اقلیم‌ها تأیید می‌کند که مدل AquaCrop به طور معمول بیشترین حساسیت را به سه پارامتر کلیدی ضریب گیاهی تعرق (Kc)، بهره‌وری نرمال‌شده آب (WP^*) و شاخص برداشت مرجع (HI_o) دارد (توراج‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳).

در این جداول، ضرایب حساسیت مدل به برخی پارامترهای ورودی مانند دمای حداقل، ضریب گیاهی تعرق (Kc)و عمق موثر ریشه آورده شده است که برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده گیاه جو در این تحقیق به کار رفته‌اند.

جدول (۵): ضرایب حساسیت برخی از عوامل ورودی مدل AquaCrop برای شبیه سازی جو در مزارع مورد مطالعه شهرستان زهک

	مرکز تحقیقات			خواجه احمد		
پارامتر ورودی	مقدار − Sc ٪۲۵	مقدار + Sc ٪۲۵	درجه حساسیت	مقدار Sc − ٪۲۵	مقدار Sc + ٪۲۵	درجه حساسیت
دمای حداقل	۱/۵	۱/۳	متوسط-متوسط	۱/۶	۱/۴	کم-کم
دمای حداکثر	۷/۷	۸/۹	متوسط-متوسط	۷/۸	۸/۸	متوسط-متوسط
بارندگی	۰/۵	۸	کم-متوسط	۰/۶	۸/۱	کم-متوسط
رطوبت حجمی ظرفیت زراعی (FC)	۱/۵	۱۷/۷	کم-متوسط	۱/۶	۱۷/۵	کم-متوسط
رطوبت حجمی نقطه پژمردگی (PWP)	۱/۶	۱/۶	کم-کم	۱/۶	۱/۷	کم-کم
رطوبت حجمی اشباع	۸/۴	۸/۲	متوسط-متوسط	۸/۵	۸/۳	متوسط-متوسط
هدایت هیدرولیکی اشباع	۰/۳	۸/۲	کم-متوسط	۰/۴	۸/۱	کم-متوسط
ضریب گیاهی تعرق (KcTrx)	۱۶/۲	۱۷/۹	بالا–بالا	۱۶/۳	۱۸	بالا–بالا
عمق موثر ریشه	۸/۹	۲/۶	متوسط-متوسط	۸/۸	۲/۷	متوسط-متوسط
حداکثر پوشش تاجی (ccx)	۰/۹۲	۰/۶	کم-کم	۰/۹	۰/۶۲	کم-کم
ضریب رشد پوشش (CGC / g)	۸/۳	۰/۵	متوسط-کم	۸/۴	۰/۶	متوسط-کم
بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP*)	۱۷/۳	۱۳//۷	بالا–متوسط	۱۷/۴	۱۳/۸	بالا–متوسط

شاخص برداشت مرجع (HI_0)	۱۳	۲۲/۷	متوسط-بالا	۱۳/۲	۲۲/۵	متوسط-بالا
زمان کاشت تا جوانه‌زنی (flo)	۸/۳	۱/۲	متوسط-کم	۸/۴	۱/۳	متوسط-کم
زمان کاشت تا حدکثر پوشش	۵/۷	۹/۹	متوسط-متوسط	۵/۸	۱۰	متوسط-متوسط
زمان کاشت تا گلدهی	۴/۱	۷/۶	متوسط-متوسط	۴/۲	۷/۷	متوسط-متوسط
زمان کاشت تا پیری (mat)	۹/۴	۱/۳	متوسط–کم	۹/۵	۱/۴	متوسط–کم
طول دوره گلدهی (flolen)	۰/۲	۹/۱	کم-متوسط	۰/۳	۹/۲	کم-متوسط
حدآستانه بالای دما	۸/۵	۸/۹	متوسط-متوسط	۸/۶	۸/۸	متوسط-متوسط

جدول (۶): ضرایب حساسیت برخی از عوامل ورودی مدل AquaCrop برای شبیه سازی جو در مزارع مورد مطالعه شهرستان هیرمند

	زورآباد			ده لاغری		
پارامتر ورودی	مقدار - Sc ٪۲۵	مقدار + Sc ٪۲۵	درجه حساسیت	مقدار Sc − ٪۲۵	مقدار Sc + ٪۲۵	درجه حساسیت
دمای حداقل	۱/۵	۱/۳	کم-کم	۱/۵	۱/۳	کم-کم
دمای حداکثر	۷/۹	۹	متوسط–متوسط	۷/۷	۸/۹	متوسط–متوسط
بارندگی	۰/۷	۸/۲	کم-متوسط	۰/۵	۸	کم-متوسط
رطوبت حجمی ظرفیت زراعی (FC)	۱/۸	۱۸	کم–متوسط	۱/۷	۱۷/۸	کم–بالا
رطوبت حجمی نقطه پژمردگی (PWP)	۱/۷	۱/۸	کم-کم	۱/۶	۱/۷	کم-کم
رطوبت حجمی اشباع	۸/۶	۸/۵	متوسط–متوسط	۸/۵	۸/۴	متوسط–متوسط
هدایت هیدرولیکی اشباع	۱	۱۰/۵	کم-متوسط	۰/۹	۷/۴	متوسط–متوسط
ضریب گیاهی تعرق (K_{CTrx})	۱۶/۵	۱۸/۲	بالا–بالا	۱۶/۴	۱۸/۱	بالا–بالا
عمق موثر ریشه	۸/۷	۲/۸	متوسط–متوسط	۸/۸	۲/۷	متوسط–متوسط
حداکثر پوشش تاجی (ccx)	۰/۹۱	۰/۶۴	کم-کم	۰/۹۲	۰/۶۳	کم-کم
ضریب رشد پوشش (CGC)	۸/۵	۰/۶	متوسط-کم	۸/۴	۰/۶	متوسط-کم
بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP^*)	۱۷/۵	۱۴	بالا–متوسط	۱۷/۴	۱۳/۹	بالا–متوسط
شاخص برداشت مرجع (HI_0)	۱۳/۵	۲۲/۸	متوسط-بالا	۱۳/۳	۲۲/۶	متوسط-بالا
زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۸/۵	۱/۳	متوسط-کم	۸/۴	۱/۳	متوسط-کم
زمان کاشت تا حدکثر پوشش	۵/۹	۱۰/۱	متوسط–متوسط	۸/۵	۱۰	متوسط–متوسط

زمان کاشت تا گلدهی	۴/۳	۷/۸	متوسط–متوسط	۴/۲	۷/۷	متوسط
زمان کاشت تا پیری	۹/۶	۱/۴	متوسط–کم	۹/۵	۱/۴	کم–متوسط
طول دوره گلدهی	۰/۴	۹/۳	کم-متوسط	۰/۳	۹/۲	کم-متوسط
حدآستانه بالای دما	۸/۶	۸/۹	متوسط-متوسط	۸/۵	۸/۹	متوسط–متوسط

واسنجی مدل AquaCrop

دقت و کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی دینامیک رطوبت حجمی خاک در ناحیه توسعه ریشه گیاه جو در چهار مزرعه مورد مطالعه با استفاده از شاخص‌های آماری جامع مورد ارزیابی قرار گرفت. این شاخص‌ها شامل ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین انحراف خطا (MBE) می‌باشد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول (۷): شاخص‌های آماری ارزیابی دقت شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک با مدل AquaCrop

	هیرمند		زهک	
شاخص آماری	ده‌لاغری	زورآباد	خواجه‌احمد	مرکز تحقیقات
R^2	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۲
RMSE	۱/۹	۱/۶	۲/۵۵	۲/۷۱
MAE	۱/۳۱	۱/۲۱	۱/۷۳	۱/۸۲
MBE	۱/۱۳	۰/۷۶	-۰/۹۱	۱/۲۸

نتایج حاصل از ارزیابی مدل نشان می‌دهد که مدل AquaCrop از قابلیت اطمینان بالایی در شبیه‌سازی تغییرات مکانی-زمانی رطوبت خاک برخوردار است. مقادیر قابل توجه ضریب تبیین در محدوده ۰/۹۲ تا ۰/۹۸ حاکی از همبستگی بسیار قوی بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه‌سازی‌شده می‌باشد. این سطح از دقت نشان می‌دهد که مدل توانسته است بیش از ۹۲ درصد از تغییرپذیری داده‌های مشاهداتی را تبیین نماید.

تحلیل تغییرپذیری مکانی دقت مدل نشان داد که بالاترین سطح دقت مربوط به مزارع واقع در منطقه هیرمند (زورآباد و ده‌لاغری) می‌باشد. در این مزارع مقادیر RMSE به ترتیب ۱/۶ و ۱/۹ واحد و مقادیر MAE به ترتیب ۱/۲۱ و ۱/۳۱ واحد به دست آمد که بیانگر دقت بالای مدل در این مزارع است. این سطح از دقت می‌تواند ناشی از همخوانی بهتر پارامترهای هیدرولیکی خاک و شرایط اقلیمی در این مزارع با ساختار مدل باشد. دقت بالای مدل نشان‌دهنده قابلیت استفاده آن در مدیریت بهینه منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. این سطح از دقت، مدل AquaCrop را به عنوان یک ابزار قابل اعتماد برای پایش و پیش‌بینی رطوبت خاک در مدیریت بهینه آبیاری مزارع جو در منطقه سیستان معرفی می‌نماید.

مقادیر MBE مثبت در سه مزرعه (مرکز تحقیقات، زورآباد و ده‌لاغری) در محدوده ۰/۷۶ تا ۱/۲۸ واحد، نشان از تمایل مدل به بیش‌برآوردی جزئی در شبیه‌سازی رطوبت خاک دارد. در مقابل، مقدار MBE منفی ۰/۹۱- در مزرعه خواجه‌احمد حاکی از کم‌برآوردی مدل در این مزرعه است. این انحرافات جزئی می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری عوامل محلی از جمله تغییرات مکانی خصوصیات هیدرولیکی

خاک، تغییرپذیری مکانی بارش و دقت در اندازه‌گیری‌های میدانی باشد. نتایج تحقیق با نتایج سایر مطالعات مشابه، مانند تحقیقات Khoshsirat et al (۲۰۲۲) و Hellal et al (۲۰۱۹)، همخوانی داشت.

مقادیر گیاهی واسنجی شده جهت کاربرد در مدل AquaCrop در دو منطقه زهک و هیرمند، در جدول ۸ آمده است. این مقادیر، در محدوده مقادیر مطالعات قبلی و هم چنین مقادیر مرجع مدل AquaCrop در مورد گیاه جو می‌باشد. پارامترهای دمای پایه، حداقل عمق ریشه، ضریب گیاهی برای تعرق، ضرایب تخلیه رطوبتی پوشش تاجی، فاکتور ضریب شکل پوشش تاجی و زمان ظهور جوانه همان مقدار پیش فرض مدل به دست آمد و سایر پارامترها در واسنجی مدل با مقداری تغییرات تعیین گردید.

مدل AquaCrop با درنظرگرفتن عوامل واسنجی جدول ۸ و ورود اطلاعات هواشناسی، خاک، آب و گیاه در هر منطقه در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ واسنجی و سپس در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ صحت سنجی شد. در جدول ۹ عوامل آماری مقایسه بین مقادیر پوشش تاجی، زیست توده و عملکرد اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با مدل AquaCrop در مزارع، در مراحل واسنجی و صحت سنجی آمده است.

جدول (۸): مقادیر گیاهی استفاده شده در مدل AquaCrop برای جو در مرحله واسنجی

عامل	واحد	مقدار مرجع	مرکز تحقیقات	خواجه احمد	ده لاغری	زورآباد
دمای پایه حداقل	°C	۱/۷۵	۲	۲	۱/۸	۱/۵
دمای پایه حداکثر	°C	۳۴	۳۵	۳۴	۳۵	۳
عمق حداکثر ریشه	m	۱/۲	۱/۳	۱/۲	۱/۳	۱/۱
پوشش اولیه گیاهی (CCo)	cm^2	۳/۴	۳/۵	۳/۴	۳/۶	۳/۲
ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)	day^{-1}	۹/۳	۹/۵	۹/۲	۹/۷	۸/۸
ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC)	day^{-1}	۰/۸	۰/۷	۰/۸	۰/۸	۰/۹
ضریب انتقال گیاه (KcTr,x)	-	۱/۱۲	۱/۱۵	۱/۱۲	۱/۱۴	۱/۱
شاخص برداشت (HI)	%	۳۷	۳۸	۳۷	۳۸	۳۶
بهره‌وری آب (WP)	g/m^2	۱/۰۵	۱/۱	۱/۰۵	۱/۰۸	۱
حداقل عمق ریشه (m)	m	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۷
حداکثر پوشش تاجی (٪)	%	۶۳	۶۵	۶۲	۶۶	۶۰
آستانه بالای تخلیه رطوبتی برای توسعه پوشش	-	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۶۶	۰/۶
آستانه پایین تخلیه رطوبتی برای توسعه پوشش	-	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۳
فاکتور شکل ضریب تنش آبی برای توسعه پوشش	-	۱	۱	۱/۱	۱	۰/۹
آستانه بالای ضریب تخلیه رطوبتی خاک برای کنترل روزنه ها	-	۰/۶۹	۰/۷	۰/۶۸	۰/۷۲	۰/۶۵
فاکتور شکل ضریب تنش آبی خاک برای کنترل روزنه ها	-	۰/۹۷۵	۱	۱/۰۵	۱	۰/۹۵
آستانه بالای ضریب تنش آبی برای پیری	-	۰/۶	۰/۶	۰/۵۸	۰//۶۲	۰/۵۵
ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری	-	۱/۲	۱/۲	۱/۱۵	۱/۲۵	۱/۱
تعداد روز از کاشت تا جوانه‌زنی	روز	۷	۷	۶	۸	۷
تعداد روز از کاشت تا گلدهی	روز	۴۷	۴۸	۴۶	۴۹	۴۷
تعداد روز از گلدهی تا رسیدگی	روز	۶۴	۶۵	۶۶	۶۴	۶۳
طول فصل رشد کل	روز	۱۱۹	۱۲۰	۱۱۸	۱۲۱	۱۱۷

جدول (۹): شاخص‌های آماری ارزیابی مقادیر زیست توده و عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده جو

		واسنجی				صحت سنجی			
	شاخص آماری	ده‌لاغری	زورآباد	خواجه‌احمد	مرکز تحقیقات	ده‌لاغری	زورآباد	خواجه‌احمد	مرکز تحقیقات
زیست توده (تن در هکتار)	R^2	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹	۰/۹۱
	RMSE	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۲
	MAE	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۲
	MBE	-۰/۱۲	-۰/۰۹	-۰/۰۸	-۰/۱۱	-۰/۱۴	-۰/۱۲	-۰/۰۹	-۰/۱۳
عملکرد (تن در هکتار)	R^2	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۸
	RMSE	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۱۶
	MAE	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۱۲
	MBE	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۵

نتایج تحلیل آماری برای هر دو پارامتر عملکرد دانه و زیست‌توده در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به‌طور چشمگیری دقت مدل را نشان دادند. در مرحله واسنجی، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه دقت بالایی داشت، به‌طوری‌که مقدار R^2 برای مزرعه مرکز تحقیقات برابر با ۰/۹۷ بود که نشان‌دهنده تطابق عالی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است. این مقدار برای سایر مزارع، مانند خواجه احمد، زورآباد و ده‌لاغری نیز به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۹۷ و ۰/۹۶ به‌دست آمد که نشان‌دهنده تطابق خوب شبیه‌سازی‌ها با داده‌های واقعی در این مناطق است.

برای زیست‌توده نیز نتایج مشابهی مشاهده شد. مقدار R^2برای زیست‌توده در مزرعه مرکز تحقیقات ۰/۹۶، برای خواجه احمد ۰/۹۶، زورآباد ۰/۹۷ و ده‌لاغری ۰/۹۶ به‌دست آمد که دقت بالای شبیه‌سازی‌ها در این مزارع را نشان می‌دهد. این مقادیر نشان می‌دهند که مدل AquaCrop توانسته است به‌طور دقیق زیست‌توده گیاه را در مناطق مختلف شبیه‌سازی کند.

در خصوص خطاهای مدل، آماره RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) و MAE (میانگین خطای مطلق)، به‌طور کلی نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی‌ها هستند. در مرحله واسنجی، برای عملکرد دانه، RMSE در مزرعه مرکز تحقیقات برابر با ۰/۱۷، خواجه احمد برابر با ۰/۱۲، زورآباد ۰/۱۱ و ده‌لاغری ۰/۱۵ به‌دست آمد که نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در این مزارع خطای نسبی کمی داشته است. همچنین، MAE برای مرکز تحقیقات برابر با ۰/۱۴، خواجه احمد برابر با ۰/۱، زورآباد ۰/۱۶ و ده‌لاغری ۰/۱۷ بود که به‌طور مشابه بیانگر دقت بالای مدل در پیش‌بینی‌های خود است. برای زیست‌توده نیز، مقادیر RMSE و MAE در هر چهار مزرعه پایین بودند، که همچنان دقت قابل قبولی را در شبیه‌سازی این پارامتر نشان می‌دهد.

در مرحله صحت‌سنجی، مدل AquaCrop همچنان دقت بالایی را نشان داد. RMSE برای عملکرد دانه در مزرعه مرکز تحقیقات برابر با ۰/۱۶، خواجه احمد برابر با ۰/۱۲، زورآباد ۰/۱۳ و ده‌لاغری ۰/۱۲ بود، که نشان‌دهنده‌ی دقت بسیار بالای شبیه‌سازی‌ها در این مزارع است. MAE نیز در این مرحله برای عملکرد دانه در مرکز تحقیقات ۰/۱۲، خواجه احمد ۰/۱۳ زورآباد ۰/۱۷ و ده‌لاغری ۰/۱۵ بدست آمد، که تطابق دقیق شبیه‌سازی‌ها با داده‌های واقعی را تأیید می‌کند. مقدار MBE (میانگین خطای پیش‌بینی) در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی برای بیشتر مزارع نزدیک به صفر بود، که نشان‌دهنده این است که مدل AquaCrop توانسته است خطاهای پیش‌بینی را به حداقل برساند.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که مدل AquaCrop در شرایط خاص اقلیمی و با توجه به محدودیت منابع آبی می‌تواند به‌طور دقیق عملکرد گیاهان را پیش‌بینی کند (عسکری‌دهنو و همکاران، ۱۴۰۴). جرعه‌نوش و همکاران (۱۴۰۳) در تحقیقی مشابه نشان دادند که مدل توانسته است تأثیرات آبیاری و تنش‌های آبی را بر عملکرد گندم با

دقت بالا شبیه‌سازی کند. همچنین، بهمنش و همکاران (۱۴۰۲) در استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی مصرف آب در گیاهان دیم مانند گلرنگ، نشان دادند که بهره‌وری آب با استفاده از این مدل به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است.

کاربرد مدل در سناریوهای مختلف تاریخ کشت، اقلیم و آبیاری

با توجه به شرایط خاص اقلیمی و زراعی منطقه سیستان، در ادامه‌ی مطالعه به بررسی تأثیر تاریخ‌های مختلف کشت و رژیم‌های آبیاری بر عملکرد دانه گیاه گندم در چهار مزرعه منتخب (مرکز تحقیقات، خواجه احمد، زورآباد و ده لاغری) پرداخته شد. در این تحقیق، سه تاریخ کاشت مختلف (زودهنگام (۱۵ آبان)، میانه‌فصل (۱۵ آذر) و دیرهنگام (۱۵ دی)) و سه حالت آبیاری شامل آبیاری کامل، ۲۵٪ کم‌آبیاری و ۵۰٪ کم‌آبیاری با مدل AquaCropصحت سنجی شده، مورد بررسی قرار گرفتند تا تأثیر این عوامل بر عملکرد محصول تحت شرایط مختلف اقلیمی ارزیابی شود. نتایج ارزیابی نشان داد در همه حالات آبیاری و سناریوهای اقلیمی، با

نزدیک شدن تاریخ کشت از ۱۵ آبان ماه به ۱۵ آذرماه، عملکرد دانه در مزارع مرکز تحقیقات و خواجه‌احمد کاهش و در مزارع زورآباد و ده‌لاغری افزایش یافت. تأخیر بیش از این تاریخ در کاشت جو (تاریخ ۱۵ دی)، باعث کاهش عملکرد دانه در هر چهار مزرعه شد. اطلاعات محلی به‌دست آمده نشان می‌دهد کشاورزان منطقه در اواخر آبان اقدام به کشت جو می‌نمایند. با توجه به نتایج به-دست آمده از می‌توان توصیه کرد مزارع شهرستان زهک (مرکز تحقیقات و خواجه‌احمد) کشت را از نیمه آبان شروع نمایند و مزارع شهرستان هیرمند (زورآباد و ده‌لاغری) هر چه کشت را به نیمه‌آذر نزدیک‌تر کشت نمایند، عملکرد بهتری به‌دست خواهد آمد.

نتایج حاصل از تأثیر کاربرد سناریوهای مختلف کم آبیاری بر عملکرد دانه جو در جدول (۱۰) آورده شده است. این جدول نتایج مربوط به کاهش عملکرد دانه شبیه سازی شده با مدلAquaCrop در شرایط کم آبیاری است که در هر مزرعه در حالات مختلف اقلیمی و کم آبیاری برای سه تاریخ کشت انجام شده است. نتایج نشان داد که در سال‌های مرطوب، کاهش ۲۵ درصدی آبیاری، تأثیر اندکی بر عملکرد دانه داشت و عملکرد محصول تنها ۵ تا ۷ درصد کاهش یافت. در این شرایط، گیاه قادر است به‌راحتی از منابع آبی موجود استفاده کند و کاهش آبیاری تأثیر منفی محسوسی بر عملکرد نخواهد داشت. در حالی که در سال‌های نرمال، کاهش آبیاری به ۲۵٪ و ۵۰٪ منجر به کاهش ۱۳ تا ۲۰ درصدی عملکرد دانه شد، که نشان‌دهنده اهمیت مدیریت دقیق منابع آبی در این شرایط است. در سال‌های خشک، کاهش آبیاری تأثیرات شدیدی بر عملکرد دانه داشت. در این سال‌ها، کاهش ۲۵٪ تا ۵۰٪ آبیاری باعث کاهش ۴۵ تا ۴۸ درصدی عملکرد دانه شد که نشان می‌دهد در این شرایط، کاهش میزان آبیاری منجر به کاهش قابل توجهی در تولید محصول می‌شود. با توجه به نتایج تحقیق و مطالعات گذشته، می‌توان بیان کرد که مدل AquaCrop می‌تواند در شبیه‌سازی تأثیرات مختلف تاریخ کاشت و حالت‌های آبیاری بر عملکرد محصول به‌ویژه در شرایط کم‌آبی مؤثر باشد. تحقیقات بهمنش و همکاران (۱۴۰۲) به‌ویژه در مناطق کم‌آب نشان داده‌اند که انتخاب تاریخ کاشت مناسب و مدیریت بهینه آبیاری می‌تواند عملکرد محصول را در شرایط تنش آبی به‌شدت افزایش دهد.

نتایج این تحقیق تأکید بر اهمیت استراتژی‌های کشت بهینه و مدیریت دقیق منابع آبی در شرایط تنش آبی دارد. توصیه می‌شود که کشاورزان با استفاده از مدل AquaCrop، تاریخ‌های کاشت را بر اساس پیش‌بینی‌های دقیق‌تری تنظیم کنند و با بهینه‌سازی مصرف آب، از کاهش عملکرد محصول در شرایط کم‌آبی جلوگیری کنند.

جدول (۱۰): درصد کاهش عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop ، در سناریوهای مختلف آبیاری (بر حسب درصد)

منطقه	حالت آبیاری	سال خشک	سال نرمال	سال مرطوب
مرکز تحقیقات	٪۲۵ کم‌آبیاری	٪۲۱–۲۵	٪۱۳–۱۷	٪۵–۷
	٪۵۰ کم‌آبیاری	٪۵۵–۶۲	٪۲۰–۲۴	٪۱۰–۱۴
خواجه‌احمد	٪۲۵ کم‌آبیاری	٪۲۲–۲۶	٪۱۴–۱۷	٪۵–۸
	٪۵۰ کم‌آبیاری	٪۵۶–۶۱	٪۲۱–۲۵	٪۱۱–۱۵
ده لاغری	٪۲۵ کم‌آبیاری	٪۲۷–۳۱	٪۱۷–۲۰	٪۷–۱۰
	٪۵۰ کم‌آبیاری	٪۶۳–۶۸	٪۲۴–۲۸	٪۱۴–۱۷
زورآباد	٪۲۵ کم‌آبیاری	٪۲۶–۳۰	٪۱۸–۲۱	٪۸–۱۱
	٪۵۰ کم‌آبیاری	٪۶۲–۶۷	٪۲۴–۲۹	٪۱۴–۱۸

نتیجه گیری

این تحقیق با هدف ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده گیاه جو در شرایط کم‌آبیاری و تغییرات اقلیمی در دشت سیستان انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل AquaCrop توانایی بالایی در شبیه‌سازی تغییرات مکانی-زمانی رطوبت خاک و پیش‌بینی دقیق عملکرد دانه و زیست‌توده گیاه جو در شرایط مختلف آبیاری دارد. مدل AquaCrop قادر است تا ۹۲ درصد از تغییرات داده‌های مشاهداتی را تبیین کند که نشان‌دهنده دقت بالای آن در شبیه‌سازی فرآیندهای رشد و تولید گیاه جو در این منطقه خشک و نیمه‌خشک است. مقادیر آماری مانند ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین انحراف خطا (MBE) در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل، همگی دقت بالای شبیه‌سازی‌ها را تایید می‌کنند. در فرآیند واسنجی مدل AquaCrop ، پارامترهای کلیدی نظیر ضریب گیاهی تعرق (Kc)، بهره‌وری نرمال‌شده آب (WP^*) و شاخص برداشت مرجع (HI_o) با استفاده از داده‌های میدانی اصلاح شده و بهینه‌سازی شدند. این تنظیمات باعث بهبود دقت شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده در مزارع مختلف شد و مدل توانست تطابق مطلوبی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و داده‌های واقعی نشان دهد. به‌ویژه در مزرعه مرکز تحقیقات، مقدار R^2 برای عملکرد دانه برابر با ۰/۹۷ و برای زیست‌توده برابر با ۰/۹۶ به‌دست آمد که نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده است. در مرحله صحت‌سنجی نیز، مدل توانست دقت بالای خود را حفظ کرده و عملکرد دانه و زیست‌توده را با مقادیر RMSE و MAE بسیار کم شبیه‌سازی کند.

نتایج تحلیل حساسیت مدل نیز نشان داد که مدل آکواکراپ بیشترین حساسیت را به سه پارامتر کلیدی، یعنی ضریب گیاهی تعرق (Kc)، بهره‌وری نرمال‌شده آب (WP^*) و شاخص برداشت مرجع (HI_o) دارد. این پارامترها نقش حیاتی در دقت شبیه‌سازی‌های مدل ایفا می‌کنند و برای به حداقل رساندن خطاهای شبیه‌سازی، لازم است که در تنظیم مدل دقت ویژه‌ای به این پارامترها اختصاص یابد. در خصوص کاربرد عملی، نتایج مدل آکواکراپ در سناریوهای مختلف تاریخ کشت و آبیاری در شرایط مختلف اقلیمی نشان داد که در سال‌های مرطوب، تغییرات عملکرد دانه در اثر کاهش آبیاری اندک بود، اما در سال‌های خشک و نرمال، اثرات کم‌آبیاری به‌ویژه در حالت ٪۵۰ کم‌آبیاری بسیار محسوس بود. این یافته‌ها اهمیت مدیریت بهینه آبیاری در شرایط تنش آبی را تأکید می‌کند، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند سیستان که بارش‌ها محدود است. این مطالعه همچنین نشان داد که انتخاب تاریخ کاشت به‌عنوان عامل مهمی در عملکرد دانه، به‌ویژه در شرایط کم‌آبیاری و سال‌های خشک، می‌تواند تأثیر زیادی بر بهره‌وری محصول داشته باشد. برای سال‌های خشک و نرمال، توصیه می‌شود که کشاورزان در مزارع منطقه سیستان تاریخ‌های کاشت ۱۵ آبان را در مزرعه‌های مرکز تحقیقات و خواجه احمد و

۱۵ آذر را در مزارع زورآباد و ده‌لاغری انتخاب کنند تا در شرایط آبیاری محدود، عملکرد بهتری داشته باشند. در نهایت، این تحقیق نشان داد که مدل AquaCrop، با استفاده از داده‌های دقیق هواشناسی، خاک و آبیاری، می‌تواند به‌طور مؤثر عملکرد محصولات کشاورزی را در شرایط کم‌آبیاری شبیه‌سازی کند و به‌عنوان ابزاری مفید در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و مدیریت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در منطقه سیستان، به کار گرفته شود.

منابع

هاشمی، ز.، سودائی زاده، م.، و ح.، مختاری. ۲۰۲۲. بررسی رابطهٔ دمای سطح زمین با پوشش گیاهی و رطوبت سطحی در کاربری‌های اراضی منطقهٔ زهک دشت سیستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست. نشریه سنجش از دور و GIS ایران, ۱۴(۱): ۴۲-۲۱.

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

شرفی، م.، بهمنش، ج.، رضاوردی‌نژاد، د.، و س.، صمدیان‌فرد. ۱۴۰۳. ارزیابی و مقایسه مدل AquaCrop و مدل‌های هوشمند جهت پیش‌بینی عملکرد گندم (مطالعه موردی: شهرستان‌های میاندوآب و مهاباد). دانش آب و خاک، ۳۴(۱):۱۸-۱.

نورمحمدی، ق.، سیادت، آ. و ع.، کاشانی. ۱۳۸۴. کاشت گیاهان. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۴۴۶ صفحه.

غریبوند نوترکی، ج.، پیری، ح.، حقیقت‌جو، پ.، و ا.، ناصرین. ۱۴۰۴. تحلیل حساسیت مدل اکوکراپ تحت تنش‌های شوری و آبی درآبیاری قطره‌ای تیپ در گیاه کینوا. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۲(۲): ۱۲۰-۹۹.

پیری، ح.، انصاری، ح.، و م.، پارسا. ۱۳۹۶. اثر شوری و مقدار آب آبیاری بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای در دشت سیستان. پژوهش آب در کشاورزی, ۳۱(۱): ۱۳-۲۸.

توراج زاده، ا.، پیری، ح.،و م.، براتی. ۱۴۰۳. تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل اکوکراپ در شبیه سازی بهره‌وری مصرف آب و عملکرد کینوا تحت مدیریت‌های مختلف مقدار و شوری آب آبیاری و کاربرد بیوچار و نانوبیوچار. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱(۱):۲۵-۱.

بهمنش، ا.، اگدرنژاد، ا.، اصلان، ا.، سپهری، س.، و س.، سالومه. ۱۴۰۰. تحلیل حساسیت پارامترهای رشدی گلرنگ در مدل AquaCropبا مدیریت‌های مختلف آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵(3): ۶۱۱-۶۲۳.

جرعه‌نوش، م.، اگدرنژاد، ا.، اصلان، ا.، شاهرخ‌نیا، م.، و ن. ع.، ابراهیمی‌پاک. ۱۴۰۳. ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم تحت سناریوهای مختلف مدیریت زراعی در قزوین. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(2): ۱۶- ۱.

عسکری‌دهنو، ص.، پیری، ح.، و ف.، حسن‌پور. ۱۴۰۴. ارزیابی کارایی و تحلیل حساسیت مدل آکواکراپ در شبیه سازی عملکرد و بهره‌وری
مصرف آب فلفل دلمه تحت تنش شوری و کم‌آبیاری. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۵۹(۱۵):۷۱-۳۹.

Abi Saab, M. T., Todorovic, M., and R., Albrizio. 2015. Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes: Does calibration year influence the performance of crop growth models? Agricultural Water Management, 147: 21–33. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.001

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

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 & Food, 4(3.

Duncan, K., and Nobert, J. 2015. Assessment of the impact of climate change and adaptation strategies on maize production in Uganda. Physics and Chemistry of the Earth, 93: 1–9. http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.09.005

Wu, H., Yue, Q., Guo, P., Xu, X., and Huang, X. 2022. Improving the AquaCrop model to achieve direct simulation of evapotranspiration under nitrogen stress and joint simulation–optimization of irrigation and fertilizer schedules. Agricultural Water Management, 266: 107599. https://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.030

Tuttolomondo, T., and Labell, S. 2008. Simulation of the effects of climate change on barley yield in rural Italy. FAO Website. www.fao.org

Salemi, H., Mohd Soom, M. A., Lee, T. S., Mousavi, S. F., Ganji, A., and Kamil Yusoff, M. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. African Journal of Agricultural Research, 6(10): 2204–2215.

Khoshsirat, A. M., Najarchi, M., Jafarinia, R., and Mokhtari, S. 2022. Sensitivity analysis and determination of the optimal level of water use efficiency for winter wheat and barley under different irrigation scenarios using the AquaCrop model in arid and semiarid climatic conditions (Case Study: Dehloran Plain, Iran). Water, 14(21): 3455.

Qian, Y., Zhu, Y., Ye, M., Huang, J., and Wu, J. 2021. Experiment and numerical simulation for designing layout parameters of subsurface drainage pipes in arid agricultural areas. Agricultural Water Management, 243: 106455.

Zhang, C., Xie, Z., Wang, Q., Tang, M., Feng, S., and Cai, H. 2022. AquaCrop modeling to explore optimal irrigation of winter wheat for improving grain yield and water productivity. Agricultural Water Management, 266: 107580.