Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

Vol.26, No.101, Winter, 2025, P. 15-30

Research Article

Determining the Amount of Applied Water, Water Productivity, and Yield of Forage Maize under Farmers' Management in Alborz Province Using the FAO-AquaCrop Model

Samad Hosseinzadeh Ajirlou[1]✉, Bijan Nazari[2], Fariborz Abbasi[3], Afshin Khorsand[4]

1. **Corresponding Author:** Researcher, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
2. Associate Professor, Department of Irrigation and Development Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3. Professor, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
4. Researcher, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
5. (✉ **Corresponding Author**: sa_hosseinzadeh@yahoo.com**)**

A R T I C L E. I N F O

Received: 11 August 2025
Revised: 25 September 2025
Accepted: 24 February 2026
Available Online:4 May 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Hosseinzadeh, S., Nazari, B., Abbasi, F., Khorsand, A., (2026). Determining the Amount of Applied Water, Water Productivity, and Yield of Forage Maize under Farmers' Management in Alborz Province Using the FAO-AquaCrop Model. V.26, No.100, P: 15-30
https://doi.org/ 10.22092/idser.2026.370370.1627

Extend Abstract

Intouduction

Water scarcity is one of the biggest challenges facing the agricultural sector in many parts of Iran, especially in arid and semi-arid regions. Increasing agricultural water productivity is not only a solution, but also an absolute necessity. Although solutions such as increasing the area under cultivation and increasing yield per unit area, optimizing agricultural inputs, controlling population and optimizing consumption, and increasing imports have been proposed to address the challenge of food security, each of these cases has its own implementation limits (Nouri *et al*., 2023; Garofalo *et al*., 2025). Crop models are considered a valuable tool for the integrated simulation of processes affecting crop growth and for the evaluation of crop management options (Mabhaudhi *et al*., 2014; Wallach *et al*., 2019). Crop models that can accurately estimate various parameters of crop growth, soil water dynamics, crop water use and expected yield under different irrigation levels can also be a fundamental aid for the successful implementation of irrigation management practises with limited and full irrigation (Sandhu & Irmak, 2019). Therefore, the aim of this study was to calibrate and then evaluate the AquaCrop model to simulate the yield and water productivity of forage maize under furrow and tape irrigation in the arid and semi-arid regions of Iran (Alborz province). In addition, the ability of the model to simulate the yield potential of forage maize under agricultural management in the study fields was evaluated.

Methodology

The data required for this study was collected in 2016 on farms in the province of Alborz. The farms were visited in coordination with the management of the Agricultural Jihad and were examined and selected taking into account the parameters required for the study. Three farms were selected in the city of Karaj, one in the Seifabad district, one in the city of Hashtgerd and one in the village of Haji Abad. The farm in Karaj was divided into three different sections due to its larger area, different cultivation dates and different irrigation schedules. Since understanding the current situation is one of the most fundamental planning steps for evaluating and providing solutions to improve any system, this study was conducted in the form of field experiments and field farms with the aim of investigating and estimating the current status of irrigation water productivity under farmers' management, and the potential for growing forage maize in Alborz province. Water resources, the cultivated area, total irrigated land area, soil texture, soil salinity, and irrigation water

salinity in each farm were investigated and measured. Additionally, some farm characteristics such as area, precise GPS location, irrigation method, irrigation water source, timing of water withdrawal and variations in withdrawal flow rate throughout the year, network type, and operator characteristics were recorded using compiled information recording forms.

Results and discussion

The results for the average yield of fresh forage corn were 49.12 tons per hectare using furrow irrigation method and 60 tons per hectare using tape irrigation method. In furrow irrigation, the highest fresh crop yield was obtained at Karaj farm (2) with 60 tons per hectare and an irrigation water productivity of 6.61 kg/m³. The lowest yield was recorded at Karaj farm (3) with 35 tons per hectare, while the lowest irrigation water productivity was at Karaj farm (1) with 4.24 kg m^{-3}. The highest irrigation water productivity, 13.4 kg m^{-3}, was observed at Hajiabad farm using tape irrigation. Therefore, tape irrigation is recommended for optimal water resource utilization. The study also showed that the RMSE index was 2.44 tons per hectare, and the d-agreement index was 0.947, indicating the AquaCrop model's ability to simulate corn fresh weight accurately in the study area. There was a strong correlation between simulated and measured crop yield values, with a coefficient of determination of approximately 0.95. The relative error (RE) was 3.7%, which is considered acceptable.

Conclusion

The results demonstrated that the AquaCrop model has a strong capability to analyze various management scenarios, predict performance under water-limited conditions, and optimize irrigation patterns. From a management perspective, the findings suggest that agricultural policies should shift focus from the "land productivity" index to the "water productivity" index. Additionally, providing practical training for farmers, promoting modern irrigation technologies, and utilizing simulation models like AquaCrop can play a crucial role in reducing water waste, enhancing crop yield, and ensuring sustainable production. Ultimately, implementing these strategies will not only improve water productivity but also serve as an effective step toward protecting water and soil resources and ensuring long-term food security.

Keywords: Crop yield potential, Furrow irrigation, Tape irrigation, Water productivity, Water use management

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Author contribution

S.H.A.; conceived the idea and wrote the manuscript. B.N. and F.A.; reviewed the collected data, and prepared the equipment and materials. S.H.A. and A.K.; was responsible for editing, original data and text preparation. All authors took responsibility for the integrity of the data that is present in this study.

Acknowledgement

The authors are thankful to the Office of Vice Chancellor for Research and Technology, Imam Khomeini International University. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

© 2026,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

https://doi.org/ 10.22092/idser.2026.370370.1627

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی /دوره ۲۶/شماره ۱۰۱/ زمستان ۱۴۰۵/صفحه ۳۰- ۱۵

نوع مقاله: پژوهشی

تعیین میزان آب کاربردی، بهره‌وری آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای تحت مدیریت کشاورزان استان البرز با استفاده از مدل FAO-AquaCrop

صمد حسین‌زاده اجیرلو[۱]✉، بیژن نظری[۲]، فریبرز عباسی[۳]، افشین خورسند[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴

چکیده

راهبرد اساسی حل بحران آب کشور، صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی از طریق افزایش بهره‌وری است. با توجه به اهمیت اقتصادی تولید ذرت علوفه‌ای در کشور، بررسی راهکارهای افزایش بهره‌وری آب برای تولید این محصول استراتژیک ضرورت دارد. به‌منظور آگاهی از نوع استفاده از سامانه‌های آبیاری، ابعاد مزرعه، منابع آبی مزارع، تاریخ کاشت و برداشت، اندازه‌گیری حجم آب آبیاری، عملکرد محصول تر و بهره‌وری آب در مزارع کشت دوم ذرت علوفه‌ای (کشت تابستانه) رقم سینگل کراس ۷۰۴ در شش مزرعه با سامانه‌های آبیاری جویچه‌ای و نواری تیپ با مدیریت کشاورزان، این مطالعه در سال زراعی ۱۳۹۵ اجرا گردید. نتایج تحقیق نشان داد که متوسط حجم آب آبیاری در آبیاری جویچه‌ای و نواری تیپ به‌ترتیب ۱۰۶۷۰ و ۴۴۸۰ مترمکعب در هکتار و میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای به‌ترتیب ۴۹/۱۲ و ۶۰ تن در هکتار است. در روش آبیاری جویچه‌ای، بیشترین عملکرد محصول در مزرعهٔ کرج (۲) به‌میزان ۶۰ تن در هکتار و با بهره‌وری آب آبیاری ۶/۶۱ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب و کمترین عملکرد محصول برای مزرعهٔ کرج (۳) به‌میزان ۳۵ تن در هکتار و کمترین بهره‌وری آب برای مزرعهٔ کرج (۱) به میزان ۴/۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. بیشترین بهره‌وری آب آبیاری، ۱۳/۴۰ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب، مربوط به مزرعهٔ حاجی آباد با روش آبیاری نواری تیپ است. میانگین بهره‌وری آب مصرفی ذرت علوفه‌ای در آبیاری جویچه‌ای و نواری تیپ به‌ترتیب ۵/۶ و ۱۳/۴ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب تعیین شد. برای برآورد پتانسیل عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای از مدل AquaCrop استفاده شد. این مدل پیش از استفاده واسنجی و صحت‌سنجی گردید و قابل اتکا بودن نتایج آن در منطقهٔ مورد مطالعه تأیید شد. خطای نسبی این مدل ۳/۷ درصد و ریشهٔ میانگین مربعات خطا ۲/۴۴ تن در هکتار به‌دست آمد. این نتایج بیانگر قابلیت مدل در برآورد پتانسیل عملکرد و بهره‌وری آب تحت شرایط واقعی مزرعه است و روش آبیاری نواری تیپ به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای استفادهٔ بهینه از منابع آبی منطقه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری نواری تیپ، آبیاری جویچه‌ای، بهره‌وری آب، پتانسیل عملکرد محصول، مدیریت مصرف آب

مقدمه

کمبود آب یکی از چالش‌های عمدهٔ بخش کشاورزی در بسیاری از مناطق کشور، به‌ویژه مناطق واقع در اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. توجه به بالابردن بهره‌وری آب کشاورزی نه تنها راهکار بلکه ضرورتی است گریزناپذیر. گرچه برای غلبه بر چالش‌های مرتبط با امنیت غذایی راه‌حل‌هایی مانند افزایش سطح زیرکشت و افزایش عملکرد در واحد سطح، بهینه‌سازی نهاده‌های کشاورزی، کنترل جمعیت، بهینه‌کردن مصرف، و افزایش واردات ارائه شده است، اما هر یک از این موارد با محدودیت‌های اجرایی خاص خود مواجه است (Nouri *et al.*, 2023; Garofalo *et al.*, 2025).

[۱] محقق، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
(✉نویسنده مسئول: **Email**: sa_hosseinzadeh@yahoo.com)
[۲] دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
[۳] استاد، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
[۴] محقق، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

بنابراین، برای فائق آمدن بر موضوع افزایش بهره‌وری آب آبیاری باید از هستهٔ مرکزی این موضوع یعنی کشاورزان استفاده کرد که مصرف‌کنندهٔ اصلی نهاده‌های کشاورزی به‌ویژه آب آبیاری هستند. برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه و افزایش بهره‌وری آب می‌توان از مدل‌های گیاهی استفاده کرد (Khorsand *et al.*, 2024a; Garofalo *et al.*, 2025).

ذرت گونه علوفه‌ای مهمی است که برای مصرف کردن آن به‌صورت سیلویی کل گیاه برداشت می‌شود. ذرت به‌دلیل ویژگی‌های خیلی زیاد، مخصوصاً قدرت سازگاری آن به شرایط اقلیمی گوناگون، خیلی زود در تمام دنیا گسترش یافت. گیاه ذرت مواد قندی و نشاستهٔ زیادی دارد و عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای بیش از ۸۰ تن در هکتار است. این گیاه یکی از بهترین گیاهان برای تولید علوفهٔ سبز، سیلو و دانه است. ذرت علوفه‌ای برای دام (گاو و گوسفند) بسیار خوش خوراک است، این گیاه شرایط مکانیزاسیون را به‌خوبی می‌پذیرد. ذرت علوفه‌ای، در مقایسه با موقعی که به‌صورت دانه مصرف می‌شود، مقادیر خیلی زیادی مواد معدنی مخصوصاً نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم دارد. علوفهٔ ذرت غنی از مواد گلوسیدی و انرژی‌زا و فقیر از لحاظ پروتئین است. به همین دلیل این نوع علوفه را باید همراه با علوفه‌ای که غنی از پروتئین هستند، به‌صورت مخلوط در جیرهٔ غذایی دام وارد کرد. گوارش ذرت علوفه‌ای فوق‌العاده آسان است و سیلو کردن آن برای دام‌های پرواری عالی‌ترین غذاست (Khajehpour, 2014).

مدل‌های گیاهی ابزارهایی ارزشمند برای شبیه‌سازی یکپارچه فرآیندهای مؤثر بر رشد محصول و ارزیابی گزینه‌های مدیریت محصول شناخته می‌شوند (Mabhaudhi *et al.*, 2014; Wallach *et al.*, 2019). مدل‌های گیاهی می‌توانند پارامترهای مختلف رشد محصول، پویایی آب خاک، میزان مصرف آب گیاه و عملکرد مورد انتظار را تحت سطوح مختلف آبیاری به‌طور دقیق تخمین بزنند و نیز می‌توانند به اجرای موفقیت‌آمیز شیوه‌های مدیریت آبیاری محدود و کامل نیز کمک اساسی کنند (Sandhu & Irmak, 2019). مدل‌های گیاهی مانند مدل AquaCrop می‌تواند ابزار مفید برای مدیریت کاراتر مصرف آب باشد (Khorsand *et al.*, 2014a; Rezaverdinejad *et al.*, 2014) و همچنین از مدل AquaCrop می‌توان در تعیین کاربرد آب بهینه، تحت شرایطی از مجموعه‌های متفاوت که تمامی جوانب موضوع را در نظر می‌گیرد، استفاده کرد (Steduto *et al.*, 2009). این مدل آب مصرفی گیاه را بر اساس پایش رطوبت خاک در منطقهٔ ریشه برآورد می‌کند (Raja & Parsinejad, 2023). مدل شبیه‌سازی AquaCrop در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی، از جمله پیش‌بینی عملکرد محصولات کشاورزی مانند گندم، جو، ذرت علوفه‌ای، یونجه، گوجه‌فرنگی، کلزا تحت شرایط مختلف کم‌آبیاری، محیطی و مدیریتی (Khorsand *et al.*, 2014b; Amiri *et al.*, 2016; Bahrami *et al.*, 2019; Eskandaripour *et al.*, 2020; Khorsand *et al.*, 2024b)، برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی مصرف آب و کود (Amiri & Khorsand, 2018; Amiri *et al.*, 2018; Fang *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017) و همچنین برای طیف وسیعی از محصولات از جمله علوفه، سبزی‌ها، غلات، میوه‌ها، روغن‌ها و غده‌ها (Raes *et al.*, 2009; Khorsand *et al.*, 2024) به‌کارگرفته شده است.

هسیائو و همکاران (Hsiao *et al.*, 2009) مدل AquaCrop را با استفاده از داده‌های شش‌ساله ذرت در دانشگاه دیویس کالیفرنیا آزمایش و پارامترهای ثابت آن را واسنجی کردند. نتایج مطالعات این محققان نشان داد که AquaCrop می‌تواند پوشش تاجی، رشد وزنی زیست‌تودهٔ بخش هوایی و عملکرد دانه را برای چهار رقم ذرت در شش فصل رشد مختلف با تراکم، تاریخ کاشت و تعرق‌های مختلف با تیمارهای مختلف آبیاری (اعمال تنش تا زمان گل‌دهی، از زمان گل‌دهی به بعد، آبیاری یک در میان و آبیاری کامل) به‌صورت مناسبی شبیه‌سازی کند. برای واسنجی کامل مدل برای این محصول، از داده‌های اقلیمی و شرایط خاک مناطق مختلف جهان استفاده گردید. نتایج مطالعه‌ای در مزرعهٔ پژوهشی دانشگاه تهران با هدف ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای در طول جویچه نشان داد تیمار آبیاری کامل کمترین ضریب تغییرات عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای و شبیه‌سازی شده را دارد. عملکرد بیوماس نیز در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به‌خوبی شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد که می‌توان از مدل

AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد بیوماس ذرت علوفه‌ای در طول جویچه استفاده کرد (Vatankhah & Ebrahimian, 2016).

قربانیان کردآبادی و همکاران (Ghorbanian Kurdabadi *et al.*, 2013) دقت مدل AquaCrop را در برآورد وزن تر بیوماس و تبخیر- تعرق ذرت در شرایط متفاوت بافت و حاصلخیزی خاک ارزیابی کردند و نشان دادند این مدل در برآورد وزن تر بیوماس ذرت علوفه‌ای بسیار کارآمد است. ریشهٔ میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) در برآورد وزن تر بیوماس ذرت در مرحلهٔ واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۶۷ درصد به‌دست آمد. رجا و همکاران (Raja *et al.*, 2019) اثربخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی را در استان فارس با استفاده از این مدل بررسی کردند و نشان دادند این مدل می‌تواند عملکرد محصولات زراعی مورد مطالعه را با کمترین میزان خطای نسبی (RE) ۱/۱۲، ۰/۴۶، ۰/۰۴، ۱/۱۴، ۰/۹۶ و ۰/۵۵ درصد به‌ترتیب برای گیاهان گندم، جو، برنج، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای و چغندرقند برای شبکهٔ مدرن درودزن و ۰/۷۶، ۱/۳۶ و ۰/۸۲ درصد به‌ترتیب برای گندم، جو و ذرت علوفه‌ای برای شبکهٔ کربال در مرحلهٔ واسنجی مدل شبیه‌سازی کند. محققان دیگر با استفاده از داده‌های برداشت شده در سال ۲۰۱۴ به واسنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی ذرت پرداختند و با استفاده از داده‌های برداشت شده منتهی به سال ۲۰۱۸ این مدل گیاهی تحت صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان داد که خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد محصول برابر با ۴/۱۳ درصد است (He *et al.*, 2021). پژوهشگران در تحقیقی در سال ۲۰۲۲ به شبیه‌سازی ذرت در چین با استفاده از مدل AquaCrop تحت شرایط استفاده و عدم استفاده از مالچ پرداختند و برای واسنجی مدل از داده‌های برداشت شده از سال ۲۰۱۶ استفاده کردند. نتایج تحقیقات این پژوهشگران نشان داد که آمارهٔ ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) برای این مدل گیاهی ۲-۰/۹ تن در هکتار متغیر است. افزایش خطای مدل AquaCrop به‌دلیل استفاده از مالچ گزارش شده است (Feng *et al.*, 2022).

عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2024) در تحقیقی به تعیین شاخص‌های مدیریت مصرف گیاهان مختلف در ایران با هدف ارزیابی حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب ۳۵ محصول زراعی و باغی پرداختند. نتایج تحقیقات این محققان نشان داد میانگین حجم آب آبیاری محصولات مختلف از ۳۹۸۴ مترمکعب بر هکتار برای کلزا تا ۳۲۵۰۰ مترمکعب بر هکتار برای نیشکر متغیر است. میانگین وزنی حجم آب آبیاری (نسبت به سطح زیر کشت) ۳۵ محصول مورد مطالعه، ۸۰۳۲ مترمکعب تعیین گردید که این شاخص به تفکیک محصولات باغی، زراعی و سبزی و صیفی به ترتیب ۹۱۶۲، ۷۶۶۹ و ۷۲۴۷ مترمکعب بر هکتار است و میانگین بهره‌وری آب آبیاری و آب محصولات مورد مطالعه ۱/۹ و ۱/۵ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب تعیین گردید.

براساس آمار رسمی وزارت جهاد کشاورزی در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳، سطح برداشت ذرت علوفه‌ای کشور حدود ۲۴۳ هزار هکتار برآورده شده است که ۲/۱۴ درصد از سطح برداشت محصولات زراعی را تشکیل می‌دهد. سطح زیرکشت این محصول در استان البرز ۱۰۰۴۸ هکتار و متوسط عملکرد آن ۵۴۶۸۱/۵ کیلوگرم در هکتار است (Agricultural Statistics, 2015). به‌دلیل کشت تابستانه (کشت دوم) (از منظر زمانی که دمای هوا در بیشینه و بارندگی در حداقل ممکن و بالطبع تبخیر و تعرق بسیار بالاست)، ۱۰۰ درصد سطح زیرکشت این محصول در استان البرز به‌صورت آبی است که تعیین وضع موجود آبیاری در مزارع تحت مدیریت زارعان و حداکثر میزان بهره‌وری آب کشاورزی ذرت علوفه‌ای ضروری به نظر می‌رسد.

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که برای بهبود عملکرد مدل در تخمین عملکرد محصول، مصرف آب، پارامترهای رشد محصول و ارزیابی شیوه‌های آبیاری محدود به منظور توسعه استراتژی‌های مدیریتی مؤثر نیاز خواهد بود AquaCrop برای مناطق خاص به‌شکلی مناسب واسنجی و اعتبارسنجی شود (Sandhu & Irmak, 2019). بنابراین، هدف از این تحقیق واسنجی و سپس ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای (کشت تابستانه)، تحت شرایط آبیاری عرف منطقه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران (استان البرز) است.

همچنین توانایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پتانسیل عملکرد ذرت علوفه‌ای کشت دوم (کشت تابستانه) رقم سینگل کراس ۷۰۴ تحت مدیریت کشاورزان در مزارع مورد مطالعه (کرج، سیف آباد، هشتگرد و حاجی‌آباد) نیز ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت محدودهٔ مطالعه

داده‌های مورد نیاز این تحقیق در سال ۱۳۹۵ از مزارع کشاورزان استان البرز جمع‌آوری شد. مزارع با هماهنگی مدیریت‌های جهاد کشاورزی (مدیریت کشاورزی شهرستان‌های کرج، سیف آباد و هشتگرد) انتخاب گردید. سه مزرعه در شهرستان کرج، یک مزرعه در دهستان سیف آباد و یک مزرعه در شهرستان هشتگرد با روش آبیاری جویچه‌ای و یک مزرعه در روستای حاجی‌آباد به روش آبیاری نواری تیپ انتخاب گردید. مزرعهٔ کرج به‌دلیل سطح وسیع‌تر، تاریخ کشت‌های مختلف و نوبت‌های آبیاری متفاوت، به سه بخش مختلف تفکیک شد (جدول ۱). پارامترهای هواشناسی مورد نیاز برای ارزیابی مدل AquaCrop در جدول (۲) در دورهٔ کشت ارائه شده است. منابع آبی، دبی منبع آبی، سطح زیرکشت هر محصول، سطح کل اراضی تحت آبیاری، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک و شوری آب آبیاری در هر یک از مزارع بررسی و اندازه‌گیری گردید. برخی از مشخصات مزارع مانند مساحت، موقعیت دقیق مکانی (با GPS)، روش آبیاری، منبع آب آبیاری (چاه/ شبکهٔ آبیاری)، زمان برداشت از منبع آبی و تغییرات دبی برداشتی در طول سال، نوع شبکه (مدرن/ سنتی)، مشخصات بهره‌برداران و ... با تدوین فرم‌های ثبت اطلاعات برداشت گردید. برای اندازه‌گیری دبی ورودی به مزارع منتخب از فلوم (WSC) تیپ پنج استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات مزارع منتخب در استان البرز

Table 1- Specifications of selected farms in Alborz province

موقعیت مزارع Location of farms	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	تاریخ کاشت Planting date	تاریخ برداشت Harvesting date	طول دوره رشد (روز) Length of growth period (days)	نوع منبع آب Type of water source	متوسط دبی (لیتر بر ثانیه) Average flow (lit s^{-1})	نوع سامانه آبیاری Type of irrigation system	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)
کرج (۱) Karaj (1)	۵۱°۳۶′	۳۵°۴۸′	۹۵/۴/۱۵	۹۵/۷/۱۰	۸۸	چاه Well	۳۵/۶۸	سطحی Surface	۸
کرج (۲) Karaj (2)	۵۱°۳۶′	۳۵°۴۸′	۹۵/۴/۲۰	۹۵/۷/۲۲	۹۶	چاه Well	۳۵/۶۸	سطحی Surface	۱۶/۵
کرج (۳) Karaj (3)	۵۱°۳۶′	۳۵°۴۸′	۹۵/۴/۲۰	۹۵/۷/۲۲	۹۵	چاه Well	۳۵/۶۸	سطحی Surface	۴/۵
سیف آباد Saifabad	۵۰°۲۳′	۳۵°۴۳′	۹۵/۴/۲۵	۹۵/۷/۳۰	۹۷	چاه Well	۳۲/۲۷	سطحی Surface	۱۵
هشتگرد Hashtgerd	۵۰°۲۵′	۳۵°۴۵′	۹۵/۴/۲۱	۹۵/۷/۲۲	۹۳	شبکه آبیاری کردان Kurdan irrigation	۴۸	سطحی Surface	۴
حاجی آباد Hajiabad	۵۰°۲۶′	۳۵°۴۷′	۹۵/۴/۲۴	۹۵/۷/۳۰	۹۸	چاه Well	۲۸/۸۵	تیپ Tape	۴

جدول ۲- آمار ماهانه هواشناسی ایستگاه مرکزی کرج در دورهٔ رشد محصول

Table 2- Meteorological statistics of Karaj Central Station during the crop growth period

ماه months	دما (سانتی‌گراد) Temperature (°C)			رطوبت نسبی (درصد) Relative Humidity (%)			حداکثر سرعت باد (متر بر ثانیه) Wind speed (ms^{-1})	ساعات آفتابی (ساعت) Sunlight Hours	بارندگی (میلی‌متر) Prceipitation (mm)
	حداکثر Max	حداقل Min	میانگین Average	حداکثر Max	حداقل Min	میانگین Average			
تیر July	۳۶	۱۹	۲۷	۷۸	۹	۳۴	۱۱	۳۳۹	۰
مرداد August	۳۵	۱۹	۲۸	۸۱	۸	۳۴	۱۰	۳۶۰	۰
شهریور September	۳۴	۱۸	۲۷	۶۸	۱۳	۳۰	۷	۳۳۳	۰
مهر October	۲۶	۱۲	۱۸	۸۶	۸	۳۹	۱۰	۲۸۳	۰
آبان Noveber	۱۹	۷	۱۳	۱۰۰	۱۸	۴۶	۱۵	۱۹۴	۴

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ویژگی‌های ثابت خاک که مربوط به وضعیت ذاتی خاک هستند و تحت تأثیر عوامل خارجی قرار نمی‌گیرد؛ مانند بافت خاک، دانه‌بندی خاک و سطح ویژه ذرات خاک و نیز ویژگی‌های متغیر خاک که تحت تأثیر عوامل خارجی است و در زمان‌های مختلف متفاوت است مانند رطوبت خاک، ساختمان خاک، تهویهٔ خاک، و توزیع ذرات اولیهٔ خاک با آزمایش هیدرومتری تعیین گردید و پس از مشخص شدن درصد اجزای تشکیل‌دهندهٔ خاک (شن، رس و سیلت)، در هر لایه بافت خاک مشخص گردید. نتایج به‌دست آمده از آزمایش خاک نشان داد که خاک مورد مطالعه در منطقه کرج دارای بافت لوم، در منطقهٔ سیف آباد دارای بافت لومی رسی، در منطقهٔ هشتگرد دارای بافت لوم و در منطقه حاجی آباد دارای بافت لوم است. ویژگی‌های خاک مورد مطالعه در جدول (۳) آمده است. برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت اشباع از مدل RETC استفاده گردید (Rawls *et al.*, 1982; Khorsand *et al.*, 2019). برای تعیین نقاط مهم پتانسیلی آب در خاک (ظرفیت زراعی و نقطهٔ پژمردگی)، از دستگاه صفحات فشاری استفاده شد (Khorsand *et al.*, 2019).

بهره‌وری آب

بهره‌وری آب عبارت است از مقدار محصول تولید شده به ازای واحد حجم آب (رابطهٔ ۱). ساده‌ترین روشی که در مزارع برای برآورد بهره‌وری فیزیکی آب گیاه می‌توان به‌کار برد، اندازه‌گیری سه عامل عملکرد، مقدار آب آبیاری و مقدار بارش در فصل زراعی است (Molden *et al.*, 1998).

$$WP = \frac{Y}{CW} \qquad (۱)$$

در این رابطه: WP بهره‌وری آب در تولید ذرت علوفه‌ای (کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب آبیاری در فصل رشد)، Y عملکرد ذرت علوفه‌ای در فصل رشد (کیلوگرم در هکتار) و CW حجم آب آبیاری در تولید ذرت علوفه‌ای در فصل رشد (مترمکعب در هکتار) است. در تحقیق حاضر اندازه‌گیری دو شاخص اصلی، حجم آب آبیاری و میزان محصول ذرت علوفه‌ای مدنظر قرار گرفته است. لازم است گفته شود در فصل رشد (فصل تابستان) بارندگی رخ نداده است و به همین دلیل در محاسبات، بارندگی موثر صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع مورد مطالعه

Table 3- Physical and chemical properties of farms soil

محل نمونه‌برداری Sampling location	بافت خاک Soil texture	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Bulk density ($g\ cm^{-3}$)	رطوبت حجمی ظرفیت زراعی (درصد) Volumetric content of field capacity (%)	رطوبت حجمی نقطه پژمردگی (درصد) Volumetric content of wilting point (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر روز) Saturated hydraulic conductivity ($cm\ day^{-1}$)	اسیدیته خاک (-) Potential of Hydrogen (-)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) Electrical conductivity ($dS\ m^{-1}$)
کرج Karaj	لوم Loam	۱/۴	۲۷/۲۲	۱۵/۵۸	۱۸/۱۹	۷/۷۷	۰/۴۳
سیف آباد Saifabad	لومی رسی Clay loam	۱/۳۷	۲۷/۵۱	۱۷/۴۶	۱۴/۹۵	۷/۳۶	۰/۶۳
هشتگرد Hashtgerd	لوم Loam	۱/۴۳	۲۱/۷۱	۱۴/۳۴	۱۰/۵۸	۷/۹۵	۰/۴۷
حاجی آباد Hajiabad	لوم Loam	۱/۴۲	۲۴/۸	۱۵/۶۶	۲۰/۶۷	۷/۸۶	۰/۷۹

مدل AquaCrop

مدل گیاهی AquaCrop یکی از مدل‌های پرکاربرد است که از طریق مشورت با متخصصان سازمان‌های مهم علمی، دانشگاهی و دولتی جهان (Raja *et al.*, 2024) توسط سازمان فائو برای شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی نسبت به مقدار آب آبیاری بسط داده شده است. داده‌های مورد نیاز برای استفاده از مدل AquaCrop به دو دستهٔ ثابت و غیرثابت تقسیم می‌شوند. داده‌های ثابت در این مدل توسط بسط‌دهندگان آن تعیین و پیشنهاد شده که برای شبیه‌سازی تغییر نکنند. داده‌های غیرثابت در هر شبیه‌سازی باید به وسیله واسنجی برآورد شوند (Raes *et al.*, 2012). با این همه، برخی تحقیقات نشان داده است که داده‌های ورودی مدل AquaCrop در شرایط محیطی مختلف ثابت نیستند و برای واسنجی باید تغییر داده شوند. بدین ترتیب، پیش از واسنجی این مدل گیاهی باید اثر تغییرات پارامترهای ورودی آن بر مقادیر خروجی از لحاظ حساسیت واسنجی شود. پارامترهای ورودی این مدل برای شبیه‌سازی شامل داده‌های مربوط به آب و هوای منطقهٔ مورد مطالعه، ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مدیریت زراعی، وضعیت آب زیرزمینی و مدیریت آبیاری است. از ویژگی‌های بارز مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت تنش‌های کم‌آبی، شوری و حاصلخیزی در شرایط متفاوت بافت خاک می‌توان به سناریوهای مدیریتی مزرعه و شرایط آب و هوایی مختلف اشاره کرد (Khorsand *et al.*, 2024).

واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop

هر مدل شبیه‌سازی برای اینکه بتواند نتایج مفید و واقعی‌تری بدهد باید با استفاده از اطلاعات و شرایط منطقه‌ای واسنجی گردد (Andarzian *et al.*, 2011). واسنجی، عملیات تطبیق پارامترهای ورودی مدل برای سازگاری آن در تولید داده‌های خروجی مناسب است. به‌طور کلی، هدف از واسنجی هر مدل کمینه کردن اختلاف بین خروجی‌های مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده است. باید توجه داشت که در فرآیند واسنجی، بعضی از پارامترها نسبت به برخی دیگر حساس‌تر هستند. پارامتر حساس پارامتری است که تاثیر بیشتری بر خروجی‌های مدل دارد (Khorsand *et al.*, 2024; Boulange *et al.*, 2025). به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop و برای رسیدن به نتایج مورد انتظار و اینکه آیا خروجی مدل ریاضی رضایت بخش است یا خیر، ارزیابی دقت آنها ضروری است. بدین ترتیب، پس از واسنجی مدل از پارامترهای ورودی مدل و اجرای آن در شرایط خاص، مدل با پارامترهای واسنجی شده در شرایطی غیر از شرایط واسنجی ارزیابی می‌شود (Terán-Chaves *et al.*, 2022; Garofalo *et al.*, 2025).

شاخص‌های آماری

برای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل با نتایج اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه (Bazaneh *et al.*, 2016) از یک سری شاخص‌های آماری استفاده شد که در زیر توضیح داده شده است.

الف) شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE): که با رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{N}} \quad (۲)$$

این شاخص متوسط پراکندگی اختلاف مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و نیز نشان‌دهندهٔ خطای مدل است که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، آن مدل ایده‌ال‌تر است.

ب) میانگین خطای نسبی (RE): این شاخص نشان‌دهنده میزان خطای نسبی اتفاق افتاده در مقادیر شبیه‌سازی شده است.

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\frac{P_i - O_i}{O_i})}{N} \times 100 \quad (۳)$$

ج) شاخص سازگاری ویلموت (d): این شاخص به شکل وسیعی در بررسی عملکرد مدل‌ها استفاده می‌شود، این شاخص نشان‌دهندهٔ میزان انطباق بین داده‌های مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده است. هر چه مقدار شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد، میزان انطباق بالاتر خواهد بود.

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left[\left|P_i - \overline{O}\right| + \left|O_i - \overline{O}\right|\right]^2} \right) \quad (۴)$$

د) ضریب تبیین (R^2): این ضریب از شاخص‌های آماری رایج در عملکرد مدل‌هاست و نسبت پراکندگی مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در صورت تطابق کامل بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی، مقدار این شاخص برابر یک خواهد بود.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O}) \times (P_i - \overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 \times \sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P})^2}} \right)^2 \quad (۵)$$

در همهٔ این رابطه‌ها: Oi مقادیر اندازه‌گیری شده، Pi مقادیر تخمینی مدل، n تعداد مشاهدات، $\overline{P}$ میانگین مقادیر تخمینی، و $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است.

نتایج و بحث

میزان آب مصرفی

نتایج مطالعات میدانی حجم آب آبیاری در جدول (۴) ارائه شده است. حجم آب آبیاری در آبیاری جویچه‌ای ۱۰۶۷۰ مترمکعب در هکتار نشان داده شده است. در روش آبیاری جویچه‌ای بیشترین مقدار آب آبیاری در مزرعه کرج (۱) است که این موضوع بیشتر مربوط است به بافت خاک مزرعه که خاک سبک است و زارع به همین دلیل دور آبیاری کمتری را انتخاب کرده و در نتیجه میزان آب مصرفی بیشتری داشته است. در مزرعه کرج (۳) کمترین میزان آب آبیاری در بین مزارع در روش آبیاری جویچه‌ای داشته است به‌این دلیل که زارع بعد از برداشت گندم و با رطوبت موجود در خاک به‌صورت مستقیم و بدون خاکورزی اقدام به کشت محصول کرده بود. در مطالعه‌ای که روی محصول ذرت صورت گرفت، در مزرعه با شخم حداقل، عملکرد دانه ذرت ۳/۷۸ درصد کاهش نشان داد ولی کشت در داخل بقایا باعث افزایش عملکرد دانه ذرت به میزان ۶/۶۱ درصد شد. به نظر می‌رسد کشت محصول در مزرعه با شخم حداقل به‌دلیل افزایش رقابت علف‌های هرز و کاهش تهویه، باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود و کشت محصول در داخل بقایا به‌دلیل حفظ بیشتر رطوبت خاک، توانسته باعث افزایش عملکرد دانه گردد (Mahrokh *et al.*, 2021). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که کشت مستقیم می‌تواند راهکاری مدیریتی باشد برای استفاده از رطوبت موجود در خاک در کشت قبلی. سرانجام اینکه حداقل میزان آب آبیاری مربوط به روش آبیاری نواری تیپ است که این از ماهیت این روش آبیاری و مدیریت استفاده از منابع آب است. نتایج تحقیقات امیری و خورسند (Amiri & Khorsand, 2018) و قربانیان کردآبادی و همکاران (Ghorbanian Kurdabadi *et al.*, 2013) با

بررسی اثر آبیاری برای محصول ذرت نشان می‌دهد با مدیریت بهینهٔ آب می‌توان با حفظ عملکرد مطلوب و کاهش مصرف آب آبیاری، کارایی مصرف آب را افزایش داد که نتایج این مطالعه با آن همخوانی دارد.

جدول ٤- حجم آب، عمق آبیاری، مساحت مزرعه و میزان برداشت عملکرد و بهره‌وری ذرت علوفه‌ای در مزارع انتخابی استان البرز
Table 4- The silage maize yield harvest rate in selected agricultural farms of Alborz Province

مزارع انتخابی Selected farms	کرج (۱) Karaj (1)	کرج (۲) Karaj (2)	کرج (۳) Karaj (3)	سیف آباد Saifabad	هشتگرد Hashtgerd	حاجی آباد Hajiabad
حجم آب آبیاری در کل مزرعه (مترمکعب) Volume of applied water used on the entire farm (m^3)	۸۵۳۶۰	۱۴۹۶۵۵	۲۸۳۵۰	۱۴۳۶۵۰	۳۷۰۳۰	۱۷۹۱۲
حجم آب آبیاری در هکتار (مترمکعب) Volume of applied water used per hectare (m^3)	۱۰۶۷۰	۹۰۷۰	۶۳۰۰	۸۹۷۰	۹۲۶۰	۴۴۸۰
عمق آب آبیاری (میلی‌متر) Depth of irrigation water (mm)	۱۰۶۷	۹۰۷	۶۳۰	۸۹۷	۹۲۶	۴۴۸
مساحت مزرعه (هکتار) Farm area (ha)	۸	۱۶/۵	۴/۵	۱۶	۴	۴
کل برداشت (تن) Total harvest (ton)	۳۶۰	۱۰۰۰	۱۵۵	۸۹۰	۲۰۰	۲۴۰
عملکرد (تن در هکتار) Yield (ton ha^{-1})	۴۵	۶۰	۳۵	۵۵/۶	۵۰	۶۰
بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب) Water productivity (kg m^{-3})	۴/۲۴	۶/۶۱	۵/۵۵	۶/۲	۵/۴	۱۳/۴

عملکرد محصول و بهره‌وری آب آبیاری

در جدول (۴) دیده می‌شود میزان متوسط عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای تر در روش آبیاری سطحی ۴۹/۱۲ تن در هکتار و در روش آبیاری نواری تیپ ۶۰ تن در هکتار است. در روش آبیاری جویچه‌ای بیشترین عملکرد محصول مزرعه کرج (۲) با عملکرد ۶۰ تن در هکتار و با بهره‌وری آب آبیاری ۶/۶۱ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب و کمترین عملکرد محصول برای مزرعه کرج (۳) با عملکرد ۳۵ تن در هکتار و کمترین بهره‌وری آب آبیاری برای مزرعه کرج (۱) به میزان ۴/۲۴ کیلوگرم به‌دست آمد. بیشترین بهره‌وری آب آبیاری، ۱۳/۴ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب، در مزرعهٔ حاجی آباد دیده شده است که در آن از روش آبیاری نواری تیپ استفاده می‌شد. بنابراین، روش آبیاری نواری تیپ برای استفادهٔ بهینه از منابع آبی توصیه می‌شود. عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2019) در پژوهشی تفاوت حجم آب مصرفی و بهره‌وری آب را در تولید محصول ذرت علوفه‌ای در پایاب شبکه‌های مدرن و سنتی میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای به‌ترتیب ۵۰/۵۴ و ۵۴/۳۲ تن در هکتار و میانگین حجم آب آبیاری ۶۹۸۳ و ۹۰۸۵ مترمکعب بر هکتار و میانگین بهره‌وری آب به ترتیب ۷/۴۶ و ۶/۲۶ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب آب برآورد کردند. یافتهٔ این پژوهش نشان داد که توسعه شبکه‌های مدرن می‌تواند در بالابردن بهره‌وری آب در عملیاتی کردن برنامه‌های پنج ساله توسعه‌ای کشور و برنامه اقتصاد مقاومتی مفید باشد.

شاخص ارزیابی مدل و برآورد پتانسیل عملکرد محصول

پارامترهای واسنجی شدهٔ مدل برای دستیابی به عملکرد خشک محصول زراعی، شامل پارامترهای گیاهی مانند توسعهٔ گیاه (پوشش تاج اولیه، میزان ضریب کاهش تاج گیاه)، اجزای تولید محصول (شاخص برداشت مرجع و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای CO_2 و ET_o)، عوامل مؤثر بر تنش آبی (عامل شکل منحنی برای ضریب تنش آبی و رشد برگ، آستانه بالایی تخلیه رطوبت خاک، آستانه پایینی

تخلیه رطوبت خاک برای رشد رویشی)، دمای پایه و دمای قطع رشد هستند (Raja *et al.*, 2024). پارامترهای گیاهی پس از واسنجی مدل، در شبیه‌سازی رشد محصول ذرت علوفه‌ای به‌کار گرفته شد. پارامترهای مهم گیاهی به‌دست آمده در مرحلهٔ شبیه‌سازی و واسنجی مدل AquaCrop در مطالعه حاضر در جدول (۵) ارائه شده است. برخی از مقادیر ورودی به‌صورت پیش فرض در نظر گرفته شدند. این مقادیر برای ذرت علوفه‌ای در شرایط اقلیمی و محیطی متفاوت باید یکسان باشد. برخی مقادیر ورودی نیز در شرایط مزرعه تعیین و به صورت پارامترهای اندازه‌گیری شده در مدل تعریف شدند. برای محاسبه و برآورد پتانسیل عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای در استان البرز و مقایسهٔ آن با میزان محصول برداشته شده از مزارع مختلف از این مدل استفاده شد.

جدول ۵- ورودی‌ها و مقادیر پارامترهای گیاهی در واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای

Table 5- Inputs and values of crop parameters in the calibration and evaluation of the AquaCrop model for maize

توضیحات Remarks	واحد Unit	مقدار Amount	پارامتر Parameter
پیش فرض Default	^0C	۱۰	دمای پایه Base temperature
پیش فرض Default	^0C	۳۰	دمای بالا Upper temperature
محاسبه شد Calculated	cm^2	۶/۵	اندازه تاج پوشش هر نهال هنگام جوانه‌زنی Canopy size of each seedling at germination
پیش فرض Default	%	۹۶	بیشینه رشد کانوپی Maximum canopy cover
محاسبه شد Calculated	m	۰/۷	عمق موثر ریشه Effective rooting depth
پیش فرض Default	$gr\ m^{-2}$	۳۳/۷	ضریب بهره‌وری نرمال شده برای (CO_2 و ET_o) Normalized water productivity
واسنجی شد Calibrated	%	۵۲	شاخص برداشت Harvest Index
اندازه‌گیری شد Measured	ton	۶۰	تولید بیوماس Biomass production
اندازه‌گیری شد Measured	$plants\ ha^{-1}$	۱۴۲۸۵۷	تراکم کاشت Plant density
پیش فرض Default	–	۱/۰۵	ضریب تعرق گیاه Crop transpiration (KcTrx)
اندازه‌گیری شد Measured	day	۶	مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی Time from planting to emergence
اندازه‌گیری شد Measured	day	۷۰	مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی Time from planting to max canopy
اندازه‌گیری شد Measured	day	۱۰۰	مدت زمان کاشت تا برداشت محصول Time from planting to maturity
اندازه‌گیری شد Measured Calibrated	day	۱۲۵	مدت زمان کاشت تا دوره پیری Time from planting to maturity
پیش فرض Default	$dS\ m^{-1}$	۲	حد پایین آستانه شوری Lower limit of salinity threshold
پیش فرض Default	$dS\ m^{-1}$	۱۰	حد بالای آستانه شوری Upper limit of salinity threshold
پیش فرض Default	–	۶	عامل ضریب شکل تنش برای بسته شدن روزنه Stress shape factor for stomatal closure
پیش فرض Default	–	۲/۹	عامل شکل برای ضریب تنش آبی Shape factor for water stress coefficient

در این مطالعه، از مزرعه کرج (۲) برای واسنجی و از مزارع کرج (۱)، کرج (۳)، سیف آباد، هشتگرد و حاجی آباد برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. بررسی‌ها نشان می‌دهند شاخص ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۲/۴۴ تن در هکتار و شاخص سازگاری ویلموت (d) برابر با ۰/۹۴۷ است که نشان‌دهنده توانا بودن مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی وزن تر ذرت در منطقهٔ مورد مطالعه است. همبستگی خوبی نیز بین مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ عملکرد محصول وجود دارد (ضریب تبیین تقریباً ۰/۹۵). مقدار خطای نسبی (RE) نیز برابر با ۳/۷ درصد به‌دست آمد که خطای قابل قبولی است. پس از تأیید کارآیی مدل، پتانسیل محصول ذرت در مناطق مورد مطالعه برآورد شد. بیشترین پتانسیل در منطقهٔ کرج دیده می‌شود (جدول ۶). وطن‌خواه و ابراهیمیان (Vatankhah & Ebrahimian, 2016) درتحقیقی در مورد ذرت علوفه‌ای در مزرعه پژوهشی دانشگاه تهران واقع در کرج مقادیر ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشهٔ میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برای شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده را در نقاط مختلف مزرعه به‌ترتیب ۱/۶ تن بر هکتار و ۱۰/۱ درصد در مرحله واسنجی و ۱/۵ تن بر هکتار و ۱۱/۹ درصد در مرحله اعتبارسنجی به‌دست آوردند. مطالعات دیگر محققان (Amiri *et al.*, 2016; Bahrami *et al.*, 2019; Eskandaripour *et al.*, 2020; Khorsand *et al.*, 2024; Raja *et al.*, 2024) نیز نشان می‌دهد مدل AquaCrop در برآورد عملکرد دانه و زیست‌تودهٔ محصولات زراعی و بررسی تأثیرات کمی آب بر عملکرد پذیرفته شده است و به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه تحت گزاره‌های مختلف شناخته شده است.

جدول ٦- مقایسهٔ عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop

Table 6 - Comparison of measured and simulated crop yield with the AquaCrop model

مزارع Farms	عملکرد اندازه‌گیری شده (تن در هکتار) Measured yield (ton ha^{-1})	عملکرد شبیه‌سازی شده (تن در هکتار) Simulated yield (ton ha^{-1})	پتانسیل عملکرد برآورد شده با مدل (تن در هکتار) Model-estimated yield potential (ton ha^{-1})
کرج (۱) Karaj (1)	۶۰	۵۷/۵	۶۵/۴
کرج (۲) Karaj (2)	۴۵	۴۴/۳	۶۵/۴
کرج (۳) Karaj (3)	۳۵	۳۶/۵	۶۵/۴
سیف‌آباد Saifabad	۵۵/۶	۵۵/۹	۵۸
هشتگرد Hashtgerd	۵۰	۵۴/۲	۵۵/۶
حاجی‌آباد Hajiabad	۶۰	۵۸/۷	۶۵/۳
میانگین Average	۵۰/۹	۵۱/۲	۶۵/۳

نتیجه‌گیری

مدل AquaCrop قابلیت شبیه‌سازی و پیش‌بینی مواردی از جمله شبیه‌سازی عملکرد، شبیه‌سازی بهره‌وری آب آبیاری در شرایط مدیریت‌های مختلف آبیاری، شبیه‌سازی عملکرد در شرایط تنش و مدیریت‌های کم‌آبیاری، شبیه‌سازی عملکرد در شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی، خاک و آب در راستای برنامه‌ریزی مناسب به‌منظور مدیریت بهتر آبیاری و ارتقای بهره‌وری آب را داراست. تحقیق حاضر به‌منظور بررسی عملکرد مدل AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای مزرعه‌ای کشت تابستانه تحت مدیریت کشاورزان استان البرز به اجرا در آمد. بیشترین مقدار عملکرد محصول و بهره‌وری آب آبیاری در سامانهٔ آبیاری جویچه‌ای، مزرعه کرج (۲) با عملکرد ۶۰ تن در هکتار و با بهره‌وری آب آبیاری ۶/۶۱ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین عملکرد محصول برای مزرعه کرج (۳) با عملکرد ۳۵ تن در هکتار و کمترین بهره‌وری آب آبیاری برای مزرعه کرج (۱) ۴/۲۴ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دست آمد. در سامانهٔ آبیاری نواری تیپ با عملکرد بهره‌وری آب آبیاری مربوط به مزرعه حاجی آباد ۱۳/۴ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب بود. نتایج این پژوهش نشان داد که بهره‌وری آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای (کشت تابستانه) در استان البرز به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع سامانهٔ آبیاری و مدیریت مزرعه قرار دارد. استفاده از سامانهٔ آبیاری نواری تیپ موجب کاهش چشمگیر مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب نسبت به آبیاری جویچه‌ای شد، به‌طوری‌که بالاترین بهره‌وری آب (۱۳/۴ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب) و عملکرد محصول (۶۰ تن در هکتار) در این روش ثبت گردید. این امر اهمیت انتخاب روش آبیاری کارآمد را در افزایش بازده اقتصادی و حفظ منابع آبی برجسته می‌سازد. مدل AquaCrop پس از واسنجی و صحت‌سنجی با داده‌های میدانی، دقت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد و برآورد پتانسیل محصول نشان داد. به‌طوری‌که میانگین عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل مذکور ۰/۳ تن در هکتار است (میانگین خطای نسبی (RE) برابر ۳/۷ درصد، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۲/۴۴ تن در هکتار و شاخص سازگاری ویلموت (d) برابر ۰/۹۴۷). این نتایج نشان می‌دهد که این مدل قابلیت بالایی در تحلیل سناریوهای مدیریتی مختلف، پیش‌بینی عملکرد تحت شرایط محدودیت آب، و بهینه‌سازی الگوهای آبیاری دارد. توسعهٔ آموزش‌های کاربردی برای کشاورزان، ترویج فناوری‌های نوین آبیاری و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مانند AquaCrop می‌تواند نقش کلیدی در کاهش هدررفت آب، بهبود عملکرد محصول، و پایداری تولید داشته باشد. اجرای این راهبردها نه‌تنها موجب ارتقای بهره‌وری آب می‌شود، بلکه گامی مؤثر در جهت حفاظت از منابع آب و خاک و تضمین امنیت غذایی در بلندمدت خواهد بود.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

ص.ح.ا.؛ ایده‌پردازی کرده و متن را نوشت. ب.ن. و ف.ع.؛ داده‌های جمع‌آوری شده را بررسی کردند و تجهیزات و مواد را آماده کردند. ص.ح.ا. و ا.خ.؛ مسئول ویرایش متن، داده‌های اصلی و آماده‌سازی متن بودند. همه نویسندگان مسئولیت صحت و درستی داده‌های موجود در این مطالعه را بر عهده گرفتند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دفتر معاون تحقیق و فناوری دانشگاه بین‌المللی امام خمینی تشکر می‌کنند. این تحقیق از هیچ کمک مالی مشخصی از نهادهای مالی عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی برخوردار نبوده است.

مراجع

Abbasi, F., Akbari, M., Nasseri, A., Abbassi, N., Baghani, J., Joleini, M., Shahrokhnia, M.A., Nakhjavanimoghaddam, M.M., Sepehri Sadeghian, S., Moayeri, M., Hassanoghli, A., Haghayeghi, A., Ghadami Firouzabadi, A., Mousavifazl, S.H. & Yazdani, M. (2024). A Review of water consumption management indicators of different crops in Iran. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 25(94), 1-16. doi: 10.22092/idser.2024.364605.1569. (In Persian)

Abbassi, F., Nasseri, A., Nakhjavani Moghaddam, M.M., Salamati, N., Joleini, M., Khorramian, M., Dehghanian, S.E., Gomrokchi, A.Y., Eslami, A., Akhavan, K., Farzamnnia, M., Baghani, J. & Akbari, M. (2019). Comparison of irrigation water management indices of silage maize in modern and conventional irrigation networks. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 19(73), 143-156. doi: 10.22092/idser.2018.121427.1313. (In Persian)

Amiri, E., & Khorsand, A. (2018). Evaluation of Aquacrop model to predict maize total biomass and grain yield under different water regimes and fertilizer. Plant Ecophysiology, 10(33), 174-185. (In Persian)

Amiri, E., Bahrani, A., Khorsand, A., & Haghjoo, M. (2016). Evaluating AquaCrop Model Performance to Predict Grain Yield and Wheat Biomass, Under Water Stress. Water and Soil Science, 25(4/2), 217-229. (In Persian)

Amiri, E., Khorsand, A., Daneshian, J., & Yousefi, M. (2018). Predicting biomass and grain yield in canola under different water regimes and fertilizers using AquaCrop model. Irrigation Sciences and Engineering, 41(1), 57-72. (In Persian)

Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., & Rahnama. A., (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. Agriculture Water Management, 100 (1), 1-8.

Bahrami, C., Rezaverdinejad, V., Khorsand, A., Besharat, S., & Majnooni-Heris, A. (2019). Assessment of AquaCrop model for simulating spring canola yield and soil water under water stresses. Journal of Plant Ecophysiology, 36(11), 53-66. (In Persian)

Bazaneh, M., Khorsand, A., Zeinalzadeh, K., & Besharat, S. (2016). Evaluation of HYDRUS 2D software to estimate stored water and wetting pattern of surface drip irrigation. Water and Soil Science, 26(1-2), 287-301. (In Persian)

Boulange, J., Nizamov, S., Nurbekov, A., Ziyatov, M., Kamilov, B., Nizamov, S., ... & Watanabe, H. (2025). Calibration and validation of the AquaCrop model for simulating cotton growth under a semi-arid climate in Uzbekistan. Agricultural Water Management, 310, 109360. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109360

Eskandaripour, R., Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Zeinalzadeh, K., & Norjoo, A. (2020). Investigation of polyethylene mulch on improvement of tomato water use efficiency using AquaCrop model. Journal of Plant Ecophysiology, 11(39), 71-85. (In Persian)

Fang, Q., Ma, L., Ahuja, L.R., Trout, T.J., Malone, R., Zhang, H., & Yu, Q. (2017). Long-term simulation of growth stage-based irrigation scheduling in maize under various water constraints in Colorado, USA. Frontiers of Agricultural Science and Engineering (FASE), 4(2), 172.

Feng, D., Li, G., Wang, D., Wulazibieke, M., Cai, M., Kang, J., Yuan, Z., & Xu, H. (2022). Evaluation of AquaCrop model performance under mulched drip irrigation for maize in Northeast China. Agricultural Water Management, 261, 107372.

Garofalo, P., Riccardi, M., Di Tommasi, P., Tedeschi, A., Rinaldi, M., & De Lorenzi, F. (2025). AquaCrop model to optimize water supply for a sustainable processing tomato cultivation in the Mediterranean area: A multi-objective approach. Agricultural Systems, 223, 104198. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104198

Ghorbanian Kurdabadi, M., Liaghat, A.M, Vatankhah, E., & Noori, H. (2013). Simulation of yield and evapotranpiration of forage maize using AquaCrop model. Journal of Soil and Water Resources Conservation, 4(1), 48-64. (In Persian)

He, Q., Li, S., Hu, D., Wang, Y., & Cong, X. (2021). Performance assessment of the AquaCrop model for film-mulched maize with full drip irrigation in Northwest China. Irrigation Science, 39(2), 277-292.

Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. Agronomy Journal, 101(3), 448-459.

Khajehpour, M.R. (2014). Public Agriculture. Jahad Daneshgahi Publications (Isfahan University of Technology), Third edition. 658 p. (In Persian)

Khorsand, A., Dehghanisanij, H., Heris, A.M., Asgarzadeh, H., & Rezaverdinejad, V. (2024). Calibration and evaluation of the FAO AquaCrop model for canola (Brassica napus) under full and deficit irrigation in a semi-arid region. Applied Water Science, 14(3), 56.

Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A. & Besharat, S. (2019). Irrigation scheduling of maize based on plant and soil indices with surface drip irrigation subjected to different irrigation regimes. Agricultural Water Management, 224(105740), 1-11.

Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Shahidi, A. (2014a). Comparison of Food and Agriculture Organization AquaCrop and SWAP agrohydrological models to simulate water and salt transport during growing season of winter wheat. International Journal of Biosciences (IJB), 4(11), 223-233.

Khorsand, A., Verdinejad, V.R., & Shahidi, A. (2014b). Performance evaluation of AquaCrop model to predict yield production of wheat, soil water and solute transport under water and salinity stresses. Water and Irrigation Management, 4(1), 89-104. (In Persian)

Liu, C., Qi, Z., Gu, Z., Gui, D., & Zeng, F. (2017). Optimizing irrigation rates for cotton production in an extremely arid area using RZWQM2-simulated water stress. Transactions of the ASABE, 60(6), 2041-2052.

Mabhaudhi, T., Modi, A.T., & Beletse, Y.G. (2014). Parameterisation and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (Colocasia esculenta L. Schott) landrace. Agricultural and Forest Meteorology, 192, 132-139.

Mahrokh, A., Golzardi, F., Azizi, F., mofidian, S.M.A., Zamanian, M., Rahjoo, V., Torabi, M. & soltani, E. (2021). Agronomical factors analysis on grain maize yield decreasing in Iran with meta-analysis method. Journal of Crops Improvement, 23(1), 73-86. doi: 10.22059/jci.2020.292889.2299

Molden, D.J., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., & De Fraiture, C. (1998). Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. Research Report No. 20, Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.

Nouri, M., Homaee, M., Pereira, L.S., & Bybordi, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. Agricultural Water Management, 288, 108480. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108480

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Freres, E. (2012). Refrence Manual Aquacrop, FAO, Land and Water Division, Rome Italy.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres. E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agron. J. 101, 438–447.

Raja, O., & Parsinejad, M. (2023). Cost-effective strategies to improve crop water productivity—case study: Bakhtegan and Maharloo, Iran. International Journal of Environmental Science and Technology, 20(1), 883-894.

Raja, O., Parsinejad, M., & Sohrabi, T. (2019). Evaluation of managment strategies to reduce water use in Marvdasht-Kharameh study area, Journal of Soil and Water Resources Conservation, 8(4), 67-86. (In Persian)

Raja, O., Veysi, S. and Barzegar, A. (2024). Evaluation the effectiveness of management strategies to reduce agricultural water use by using the AquaCrop model (case study: Hashtgerd plain). Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 25(96), 26-1. doi: 10.22092/idser.2024.367320.1595

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., & Saxtonn, K.E. (1982). Estimation of soil water properties. Transactions of the ASAE, 25(5), 1316-1320.

Rezaverdinejad, V., Khorsand, A., & Shahidi, A. (2014). Evaluation and comparison of AquaCrop and FAO models for yield prediction of winter wheat under environmental stresses. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES), 4(6), 438-449.

Sandhu, R., & Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. Agricultural Water Management, 223, 105687.

Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy journal, 101(3), 426-437.

Terán-Chaves, C.A., García-Prats, A., & Polo-Murcia, S.M. (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

Vatankhah, I., & Ebrahimian, H. (2016). Assessment of AquaCrop model for simulating forage maize yield along the furrow. Iranian Journal of Soil and Water Research, 47(3), 495-504. (In Persian)

Wallach, D., Makowski D., Jones, J.W., & Brun, F. (2019). Working with Dynamic Crop Models, Chapter 6: Uncertainty and Sensitivity Analysis.