

Improving the scheduling of drip irrigation system using field measurements and crop modeling

Mahdi Gholami Sharafkhane¹, Ali Naghi Ziaei^{2*}, Seyed Mohammadreza Naghedifar³, Amir Akbari¹

¹ M.Sc. Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Postdoc Researcher, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

Introduction

Agriculture is the largest consumer of fresh water in the whole world. Almost 11% of the Earth's total land surface is arable, which is expected to reach 13% by 2050. Roughly 17% of these lands are subject to modern forms of irrigation management, which constitutes about 30-40% of the gross agricultural output. Reducing water consumption and increasing water productivity in agriculture, requires a correct understanding of the biological response of crops to water. The ever-increasing growth of the population and the limitation of freshwater resources have led irrigation experts to new and efficient approaches in making decisions to increase water productivity. The lack of scheduling in irrigation or their incompatibility with weather conditions, soil, irrigation systems, agricultural restrictions, and different crop phenological stages has caused severe losses in irrigated fields. Crop modeling and field data measurement can help irrigation experts improve irrigation scheduling in the field and reduce water losses. Coupling in-situ measurement and crop modeling during the growing season is one of the useful solutions to improve irrigation scheduling in different farm conditions. In this paper, AquaCrop was calibrated for maize (*Zea mays* L.) in the research farm of the Ferdowsi University of Mashhad with the comprehensive dataset. Variations of soil water content at different depths and growth indices were monitored during one growing season. The main novelty of this research is the targeted use of AquaCrop software to reduce water consumption by knowing the phenologically sensitive stages.

Materials and Methods

In-situ and in-lab measurements along with crop modeling, have been the two main parts of this research. First, the input files of the AquaCrop were prepared and calibrated for maize during one growing season. The outputs, including variations of moisture, biomass, and final yield were compared with the values measured in the field. Subsequently, by means of crop modeling, the sensitive intervals of the crop to soil water stress as well as the thresholds of yield reduction in different stages of the growing season were determined with the aim of improving irrigation scheduling in maize fields. Biomass reduction, dry yield production, and the changes in water use efficiency during the growing season were investigated according to different amounts of moisture reduction in the root zone, and irrigation scheduling was fulfilled by applying stress to less sensitive stages. For this purpose, different amounts of drought stress were applied to each of the growth stages of the crop, and the other stages were kept constant in non-stressed conditions. Dry yield and biomass reduction as well as water productivity changes were obtained for each stage. According to the threshold values and the amount of yield reduction at each stage, it is possible to fine-tune the time and amount of applying stress to the crop. In this research, in order to increase accuracy in moisture measurement and prevent errors, an equation was developed to convert the mV output of the sensor to volumetric moisture.

Results and Discussion

The Pearson correlation coefficient for measured and simulated moisture by AquaCrop software was 0.84 and the root mean square error was 12 mm. Also, the value of the Pearson correlation coefficient for measured and simulated values of biomass was equal to 0.99, and the mean square root of error was 1.3 ton ha⁻¹. The results

showed that the vegetative stage of the crop was sensitive to drought stress and caused a significant yield reduction at the end of the growing season. Also, the stage of germination and flowering were less sensitive to drought stress, such that the decrease of moisture up to 12.3% compared to the Net Irrigation Requirement mode would not change the final yield of the crop. The improvement made in the field resulted in no change in the amount of biomass and dry yield (0.38% increase in biomass and 0.52% increase in dry yield), at the same time 26.6% decrease in depth of irrigation water. Additionally, the drainable water decreased by about 86%. Also, the adjustments implemented in the field, have led to an enhancement in the ET water productivity, elevating it from a value of 4.66% to 4.67% kg/m³. It is worth noting that before the modification, the farm was managed traditionally, in accordance with local practices.

Conclusion

Further exploration in the domain of irrigation scheduling is essential, particularly in devising detailed guidelines for farmers that cater to a variety of weather scenarios and irrigation methodologies. This should also encompass diverse strategies for water distribution across different farm sections. Additionally, delving into the impact of using saline water for irrigation purposes stands out as a crucial area for future research. These subjects are poised to be pivotal for specialists in this field, aiming to enhance agricultural efficiency and sustainability.

Keywords: AquaCrop, Drought stress, Maize, Soil moisture, Water productivity

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to Department of Water Science and Engineering and research farm of Ferdowsi University of Mashhad (FUM) for the financial and logistical support who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement:

All data generated during the manuscript analysis are included in the article. Further datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mahdi Gholami Sharafkhane: Field data collection, Crop modeling, Manuscript editing; **Ali Naghi Ziaei:** Conceptualization, Supervision, Final editing; **Seyed Mohammadreza Naghedifar:** Conceptualization, Supervision, Final editing; **Amir Akbari:** Field data collection.

*Corresponding Author, E-mail: an-ziaei@um.ac.ir

Citation: Gholami Sharafkhane, M., Ziaei, A.N., Naghedifar, S.M., & Akbari, A. (2024). Improving the scheduling of drip irrigation system using field measurements and crop modeling. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 299-313.

DOI: 10.22098/mmws.2023.12389.1236

DOR:

Received: 22 February 2023, Received in revised form: 08 March 2023, Accepted: 10 March 2023, Published online: 10 March 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 299-313

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بهبود برنامه‌ریزی سیستم آبیاری قطره‌ای با اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی گیاهی

مهدی غلامی شرفخانه^۱، علی نقی ضیائی^{۲*}، سید محمدرضا ناقدی‌فر^۳، امیر اکبری^۱

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ محقق پسادکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

طراحی نامناسب و مدیریت نادرست سیستم‌های آبیاری از اشکالات اساسی در حوزه کشاورزی بوده و سبب ایجاد تلفات شدید در این بخش شده است. داده‌برداری میدانی در طول فصل رشد و استفاده از مدل‌های گیاهی یکی از راه کارهای سودمند در جهت بهبود برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط مختلف مزرعه است. در این پژوهش، در طول فصل رشد با داده‌برداری کامل از تغییرات رطوبت خاک در اعماق مختلف و شاخص‌های مختلف رشد گیاه، نرم‌افزار AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای (*Zea mays L.*) در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۴۰۰، واسنجی شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار، بازه‌های حساس گیاه به تنش خشکی و مقادیر حدی کاهش محصول در مراحل مختلف رشد با هدف بهبود برنامه‌ریزی آبیاری در مزرعه ذرت تعیین شد. کاهش زیست‌توده، ماده خشک تولیدی و تغییرات کارایی مصرف آب-تبخیر-تعرق یافته در طول فصل رشد متناسب با مقادیر مختلف کاهش رطوبت در ناحیه ریشه گیاه بررسی و برنامه‌ریزی آبیاری از طریق اعمال تنش به بازه‌های کم حساسیت‌تر انجام شد. بهسازی برنامه‌ریزی آبیاری انجام شده در مزرعه سبب عدم تغییر در مقدار زیست‌توده و ماده خشک تولیدی (۰/۳۸ درصد افزایش در مقدار زیست‌توده تولید شده و ۰/۵۲ درصد افزایش در مقدار ماده خشک) و در عین حال ۲۶/۶ درصد کاهش عمق آب آبیاری، ۸۵/۶ درصد کاهش زه‌آب و افزایش بهره‌وری آب-تبخیر-تعرق یافته از ۴/۶۶ به ۴/۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب نسبت به وضعیت قبل از بهسازی شد. در وضعیت قبل از بهسازی، مزرعه به‌صورت کاملاً سنتی و متناسب با عرف منطقه راهبری می‌شد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به متخصصان آبیاری در زمینه کاهش مصرف آب، افزایش کارایی، شناسایی بازه‌های حساس به خشکی در طول فصل رشد و میزان حساسیت هر مرحله به تنش و تدقیق برنامه‌ریزی آبیاری کمک شایانی نماید.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تنش خشکی، ذرت، رطوبت خاک، AquaCrop

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: an-ziaei@um.ac.ir

استناد: غلامی شرفخانه، مهدی، ضیائی، علی‌نقی، ناقدی‌فر، سید محمدرضا، و اکبری، امیر (۱۴۰۳). بهبود برنامه‌ریزی سیستم آبیاری قطره‌ای با اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی گیاهی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۲۹۹-۳۱۳.

DOI: 10.22098/mmws.2023.12389.1236

DOR:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۲۹۹ تا ۳۱۳

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در سراسر دنیا بوده و طبق آمارها حدود ۷۰ درصد از کل برداشت آب شیرین برای آبیاری اراضی کشاورزی استفاده می‌شود (Simionesei et al., 2020). رشد روزافزون جمعیت و محدودیت منابع آب شیرین، فعالان حوزه آب را به سمت رویکردهای جدید و کارآمد در تصمیم‌گیری جهت افزایش بهره‌وری در بخش کشاورزی، سوق داده است. در حال حاضر تقریباً ۱۱ درصد از سطح کره زمین را اراضی قابل کشت تشکیل می‌دهد که پیش‌بینی می‌شود این مقدار تا سال ۲۰۵۰ به ۱۳ درصد برسد. تنها ۱۷ درصد از این اراضی، تحت شیوه‌های نوین مدیریت آب، راهبری می‌شوند که همین مقدار اندک حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از تولید ناخالص در بخش کشاورزی را تشکیل می‌دهد (Gu et al., 2020). کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری در تولید محصولات کشاورزی مستلزم شناخت درست از پاسخ بیولوژیکی محصولات زراعی به آب است (Foster et al., 2017). از طرف دیگر، ارائه توصیه و دستورالعمل‌هایی در خصوص کاربرد آب در مزرعه به کشاورزان برای محصولات مختلف، امکان استفاده پایدار از منابع آب در بخش کشاورزی را فراهم می‌آورد (Geerts et al., 2010). همچنین، آزمایش‌های مزرعه‌ای همراه با مدل‌سازی گیاهی یکی از روش‌های کارآمد در ارائه دستورالعمل‌های مدیریتی در راستای افزایش بهره‌وری و بررسی پاسخ گیاه به شرایط مختلف مزرعه است (Chen et al., 2020).

ذرت (*Zea mays L.*) یکی از مهم‌ترین منابع غذایی و منابع انرژی تجدیدپذیر است. این گیاه قابلیت رشد در مناطقی با حداقل بارش سالانه ۲۰۰ میلی‌متر را دارد و کشت آن به تدریج به مناطق خشک و نیمه‌خشک گسترش یافته است (Song et al., 2019). طبق گزارش آمارنامه فائو سطح زیرکشت ذرت در دنیا در سال ۲۰۲۱ حدود ۲۰۵ میلیون هکتار است که این مقدار در ایران معادل ۵۰۲۱۷ هکتار است. میزان برداشت این محصول در ایران از هر هکتار، به‌طور متوسط معادل ۶۳/۷۵۷ تن است که در مقایسه با میانگین جهانی، در وضعیت بهتری قرار دارد. مقایسه سطح زیرکشت این محصول در سال ۲۰۲۱ با پنج سال گذشته، نشان از کاهش سطح زیرکشت این محصول در ایران است (FAO, 2021).

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در شبیه‌سازی گیاهی ذرت با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی انجام شده است. به‌عنوان مثال، Heng et al. (2009) با هدف ارزیابی دقت شبیه‌سازی نرم‌افزار AquaCrop برای گیاه ذرت تحت شرایط کم‌آبایی و آبیاری کامل، شبیه‌سازی را در سه منطقه مختلف انجام دادند. این نرم‌افزار در شرایط بدون تنش عملکرد بسیار خوبی در

پیش‌بینی مقدار زیست‌توده، ماده خشک و سطح سایه‌اندازه داشت، اما در شرایط تنش شدید آبی مخصوصاً در مراحل پیری گیاه، دقت شبیه‌سازی کم‌تر بود. Song et al. (2019) پژوهشی با هدف تعیین مراحل حساس رشد گیاه ذرت انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد کم‌آبایی در مرحله جوانه‌زنی^۱ بیش‌ترین تأثیر را در کاهش مقدار زیست‌توده نهایی و کاهش تعداد ذرت بر روی هر بوته خواهد داشت. آن‌ها در بازه‌های زمانی ۱۰ روزه مقدار رطوبت ناحیه ریشه گیاه را اندازه‌گیری کردند. گرچه چنین فواصل زمانی بین دفعات اندازه‌گیری رطوبت، نمی‌تواند به‌خوبی تغییرات رطوبت را در طول فصل رشد در ناحیه ریشه نشان دهد. از طرفی، مقادیر حدی برای کاهش عملکرد و میزان اُفت مقدار زیست‌توده به ازای هر مقدار کم‌آبایی در این روش قابل پیش‌بینی نخواهد بود. در پژوهش دیگری، Chen et al. (2020) با استفاده از مدل پشتیبانی تصمیم برای انتقال فناوری کشاورزی^۲ و یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی آبیاری درون فصلی گیاه ذرت را با هدف کاهش مصرف آب در مزرعه انجام دادند. آن‌ها برنامه‌ریزی را برای مناطق خشک و نیمه‌خشک شمال غربی چین انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با برنامه‌ریزی آبیاری درون فصلی، کارایی مصرف آب در مزرعه افزایش می‌یابد. Moghbel et al. (2022) با استفاده از نرم‌افزار هایدروس یک‌بعدی و الگوریتم برآورد عدم قطعیت احتمال تصمیم‌یافته^۳، تغییرات شوری خاک ناحیه ریشه گیاه ذرت را تحت آبیاری با آب شور با سیستم آبیاری بارانی شبیه‌سازی کردند. در پژوهش دیگری، Feng et al. (2022) عملکرد AquaCrop در شبیه‌سازی آبیاری قطره‌ای در مزرعه ذرت که سطح آن با مالچ پوشیده شده بود را ارزیابی نمودند. آن‌ها دریافتند بیش‌برآورد تعرق و کم‌برآورد تبخیر توسط این نرم‌افزار، سبب بروز خطا در برآورد تبخیر-تعرق گیاه ذرت شده و نیاز به بهبود نرم‌افزار در شرایط وجود مالچ روی سطح خاک وجود دارد. پژوهشگران زیادی استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی محصول جهت برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس شرایط آب‌وهوایی و بررسی تأثیر آبیاری بر عملکرد گیاه در طول فصل پیشنهاد کرده‌اند. پژوهش‌های مرتبط با شبیه‌سازی گیاهی و برنامه‌ریزی آبیاری، عمدتاً با اندازه‌گیری محدود متغیرهای گیاهی و عدم تکرار اندازه‌گیری‌ها در طول فصل رشد با فواصل زمانی کوتاه همراه هستند که استفاده از نتایج به‌دست آمده را محدود می‌سازد.

مطالعات زیادی در تعیین میزان حساسیت ذرت به تنش خشکی انجام شده است. برای نمونه، Hoshmand et al.

¹ Seedling

² Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT)

³ Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE)

هم‌چنین، اندازه‌گیری متغیرهای گیاهی از قبیل وزن خشک و تر گیاه، توسعه ریشه، سطح سایه‌انداز و تغییرات رطوبت در طول فصل رشد به‌طور مداوم با فواصل زمانی کم، انجام شد. نوآوری اصلی این پژوهش، استفاده از نرم‌افزار AquaCrop به‌صورت هدفمند برای کاهش مصرف آب با شناخت بازه‌های حساس رشد به تنش خشکی و میزان حساسیت هر بازه است.

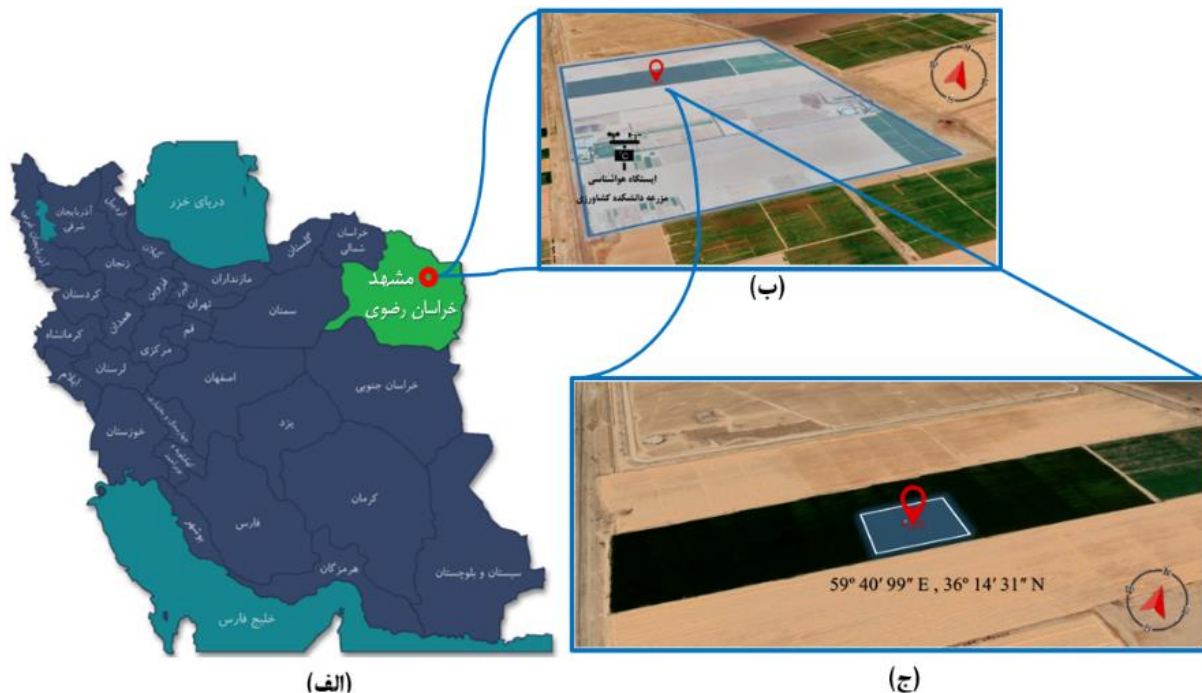
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌برداری میدانی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی

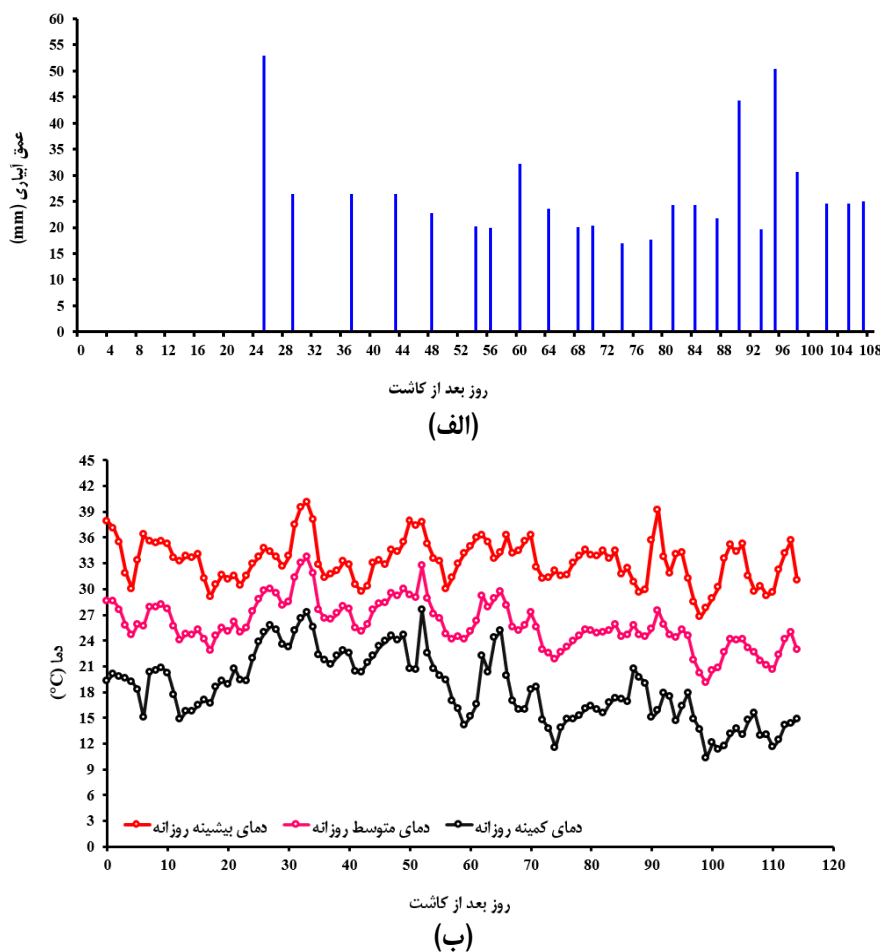
داده‌برداری میدانی در سال ۱۴۰۰ از تاریخ ۱۴ خرداد تا ۱ مهر، در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در انتهای شهرک طرق انجام شد. موقعیت جغرافیایی خاص شهر مشهد در منطقه مرزی بین شمال و جنوب خراسان و نیز تداخل جبهه‌های مختلف آب و هوایی باعث شده است که این شهر دارای آب و هوا و خصوصیات ویژه اقلیمی باشد. آب و هوای منطقه در سیستم دوماتر گسترش یافته و دسته نیمه‌خشک-سرد را شامل می‌شود (Ebrahimpour et al., 2012). هم‌چنین، میانگین تقریبی بارش معادل ۲۵۰ میلی‌متر در سال است (Tehrani et al., 2023). موقعیت جغرافیایی مزرعه ذکر شده به‌صورت ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه و ۳۱ ثانیه شمالی و ۵۹ درجه و ۴۰ دقیقه و ۹۹ ثانیه شرقی و ارتفاع ۹۷۴ متر از سطح دریا می‌باشد (شکل ۱).

(2014) پژوهشی را با هدف بررسی عملکرد و کارایی مصرف آب در یک طرح بلوک کاملاً تصادفی انجام دادند. نتایج نشان داد بیش‌ترین کارایی مصرف آب مربوط به تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی و کم‌ترین کارایی مصرف آب مربوط به تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی است. هم‌چنین، Alinejadian Bidabadi et al. (2016) عملکرد دانه ذرت را با چهار تیمار آبیاری ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی به‌صورت طرح بلوک کامل تصادفی بررسی نمودند. طبق نتایج مشخص شد که تنش خشکی با به تأخیر انداختن گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیکی، سبب کاهش عملکرد ذرت خواهد شد. از طرفی نتایج نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه در هکتار مربوط به تیمار آبیاری ۱۲۰ درصد نیاز آبی و کم‌ترین عملکرد مربوط به تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی بود که به‌ترتیب ۸۱۵۸ و ۴۲۳۸ کیلوگرم در هکتار است. (Saeidinia et al. (2019) در بررسی تأثیر تیمارهای مختلف تنش خشکی بر عملکرد نهایی ذرت، سه تیمار آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی را اعمال کرده و عملکرد نهایی را به‌ترتیب ۲۱/۵، ۱۹/۵ و ۱۲/۵ گزارش نمودند. پژوهش‌های فوق با اعمال تیمارهای مختلف تنش خشکی به کل بازه رشد ذرت بدون در نظر گرفتن مراحل مختلف رشد و بررسی میزان حساسیت هر مرحله، میزان کاهش عملکرد ذرت را بررسی نمودند.

پژوهش حاضر با هدف کاهش مصرف آب و افزایش کارایی در مزرعه، در یک فصل از رشد گیاه ذرت انجام شده است. متغیرهای آب و هوایی به‌صورت روزانه ثبت و وارد نرم‌افزار شد.



شکل ۱- موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه در مزرعه دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
Figure 1- The location of the study area in the farm of Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad



شکل ۲- نمودار آبیاری (الف) و تغییرات دما در طول فصل رشد (ب)

Figure 2- Irrigation diagram (a) and temperature changes during the growing season (b)

در محل‌های مختلف مزرعه و سه مرتبه در هفته انجام شد. هم‌چنین، تصویب‌برداری از زاویه بالا با هدف تعیین سطح سایه‌انداز گیاه^۴ نیز در طول فصل رشد تا رسیدن به مقدار حداکثر ادامه پیدا کرد. برای اندازه‌گیری متغیرهایی نظیر عمق ریشه و وزن خشک و تر هر بوته، هر هفت روز نمونه‌های تخریبی از قسمت‌های مختلف مزرعه تهیه شد (Trout and DeJonge, 2017). داده‌های هواشناسی از قبیل دمای حداقل و حداکثر روزانه (شکل ۲-ب)، بارش، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم و میزان تششع خورشیدی به‌صورت روزانه به‌وسیله ایستگاه هواشناسی مزرعه که در فاصله ۸۰۰ متری از محل مورد مطالعه قرار داشت (شکل ۱)، ثبت شد. در تاریخ شش تیر سال ۱۴۰۰، اولین آبیاری به‌مدت ۱۲ ساعت در مزرعه اعمال شد. آبیاری با سیستم قطره‌ای و با استفاده از نوار تیپ با دبی چهار لیتر بر ساعت به مزرعه اعمال شد. عمق و دور آبیاری به‌صورت سنتی و تجربی متناسب با ظرفیت ایستگاه پمپاژ، در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری مقدار آب ورودی به مزرعه در هر آبیاری نیز،

پژوهش حاضر روی ذرت هیبرید رقم هیدو (HIDO) صورت گرفت. تعداد بوته در هکتار ۵۷۱۴۲ بود که با نمونه‌گیری از پلات‌هایی که در قسمت‌های مختلف مزرعه با ابعاد ۰/۷ در یک متر ایجاد شده بود، محاسبه شد. مقدار بذر استفاده شده، ۴۵ کیلوگرم در هکتار و شوری آب آبیاری، ۰/۹ دسی‌زیمنس بر متر است. بذر ذرت در تاریخ ۱۴ خرداد ۱۴۰۰ توسط بذرکار ردیفی با فاصله ۷۰ سانتی‌متر بین هر ردیف، کاشته شد. داده‌برداری میدانی شامل اندازه‌گیری پیوسته رطوبت در پروفیل خاک تا عمق یک متر با استفاده از حسگر PR2 (PR2/6 Profile) PR2 Probe, Delta-T devices, Cambridge, United Kingdom) در طول مدت رشد گیاه است. حسگر رطوبت‌سنج PR2 دارای شش حسگر در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری و تعدادی لوله دسترسی به طول ۱۱۰ سانتی‌متر است. این حسگر با انتشار یک میدان الکترومغناطیسی در شعاع ۱۰ سانتی‌متری خود، رطوبت حجمی را در اعماق مختلف برآورد می‌نماید. لوله‌های دسترسی این حسگر قبل از شروع داده‌برداری در محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت، نصب شد. اندازه‌گیری‌های رطوبتی در طول فصل رشد و در چهار ایستگاه

⁴ Canopy cover

کتور حجمی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲-الف). در جدول ۱ تاریخ و عمق آبیاری اعمال شده به مزرعه ارائه شده است.

جدول ۱- تاریخ و عمق آبیاری اعمال شده به مزرعه

Table 1- Date and depth of irrigation applied to the field

عمق آبیاری (میلی متر)	روز بعد از کاشت	روز	ماه
52.97	25	6	تیر
26.49	29	11	تیر
26.49	37	19	تیر
26.49	43	25	تیر
22.76	48	30	تیر
20.23	54	5	مرداد
19.96	56	7	مرداد
32.23	60	11	مرداد
23.59	64	15	مرداد
20.03	68	19	مرداد
20.41	70	21	مرداد
16.93	74	25	مرداد
17.70	78	29	مرداد
24.29	81	1	شهریور
24.29	84	4	شهریور
21.71	87	7	شهریور
44.29	90	10	شهریور
19.71	93	13	شهریور
50.43	95	15	شهریور
30.71	98	18	شهریور
24.57	102	22	شهریور
24.61	105	25	شهریور
25	107	27	شهریور

نمونه‌های تخریبی که هر هفت روز از قسمت‌های مختلف مزرعه تهیه شده بود، همراه با توده خاک اطراف ریشه به محل آزمایشگاه مزرعه دانشکده کشاورزی منتقل و با استفاده از یک جت آب به‌طور کامل شست و شو شد. سپس هر بوته و ریشه گیاه به‌طور مجزا وزن شده و برای خشک‌شدن به آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت منتقل شد. نمونه‌های تهیه شده برای اندازه‌گیری عمق ریشه و وزن خشک و تر، مورد استفاده قرار گرفت (Abedinpour et al., 2012). همچنین، از هر چهار ایستگاه اندازه‌گیری رطوبت در مزرعه، نمونه خاک با فواصل ۱۰ سانتی‌متری تا عمق یک متر با سه تکرار تهیه شد. نمونه خاک‌های تهیه شده از اعماق مختلف، برای تعیین بافت خاک، تهیه منحنی مشخصه رطوبتی، وزن مخصوص حقیقی و هدایت هیدرولیکی به آزمایشگاه منتقل شد. برای تعیین بافت خاک از روش هیدرومتری استفاده شد. همچنین، به‌منظور تهیه منحنی مشخصه رطوبتی، دستگاه سانتریفیوژ ساخت شرکت Kokusan (Kokusan Ensinki Co., Tokyo, Japan) و برای تعیین هدایت هیدرولیکی روش بارثابت و بارافتان، مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین وزن مخصوص ظاهری نمونه‌های دست‌نخورده توسط استوانه‌های نمونه‌گیری تهیه و پس از انتقال به آزمایشگاه و خشک کردن، وزن مخصوص ظاهری محاسبه شد. جدول ۲ مشخصات خاک محل مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات خاک محل مورد آزمایش

Table 2- Characteristics of the soil of the test site

درصد رطوبت حجمی			هدایت هیدرولیکی (میلی متر بر روز)	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	بافت	درصد ذرات خاک			عمق خاک (میلی متر)
نقطه پژمردگی	ظرفیت زراعی	اشباع				سیلت	رس	شن	
9	27	44	59.24	1.46	Sandy Clay Loam	26.28	21.88	51.84	0-10
10.2	24	43.9	45.43	1.45	Sandy Loam	25.28	19.88	54.84	10-20
12	24	44.2	19.7	1.56	Sandy Loam	25	18.44	56.56	20-30
9.1	25	45	75.72	1.58	Sandy Loam	26.28	18.52	55.2	30-40
8.9	24	38.2	100.14	1.43	Loamy Sand	6	11.44	82.56	40-100

۲-۲- واسنجی حسگرهای رطوبت

در هر بار قرائت، حسگر PR2 برای هر عمق یک عدد بر حسب میلی‌ولت گزارش می‌کند که با استفاده از رابطه تبدیل دستگاه، به رطوبت حجمی تبدیل می‌شود. این رابطه می‌تواند متناسب با شرایط مزرعه و خاک متغیر باشد. در این پژوهش به‌منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری رطوبت و جلوگیری از بروز خطا، یک رابطه جهت تبدیل خروجی بر حسب میلی‌ولت دستگاه به رطوبت حجمی، توسعه یافت. برای این منظور، شش گلدان یکسان به ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و قطر مقطع ۳۰ سانتی‌متر با خاک مزرعه مورد نظر، پر شد و لوله‌های دسترسی حسگر

به‌صورت افقی در داخل آن‌ها قرار گرفت. خاک داخل این گلدان‌ها کاملاً اشباع شد و برای خشک شدن در معرض هوا قرار گرفت. در طی مدت خشک‌شدن خاک گلدان‌ها، رطوبت آن‌ها به‌طور مداوم با استفاده از حسگر قرائت و به روش وزنی اندازه‌گیری شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از روش ترکیب آلفا^۱ (Sakaki et al., 2011) رابطه^۱، منحنی‌های واسنجی برای دستگاه PR2 برای اعماق مختلف حاصل شد.

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{R^\alpha - R_{min}^\alpha}{R_{max}^\alpha - R_{min}^\alpha} \quad (1)$$

¹Alpha-mixing

$$Tr_x = Kc_{tr} \times ET_0 \quad (۲)$$

چنانچه فرض شود که تنها تنش موجود در ناحیه ریشه تنش خشکی است، با استفاده از یک تابع تنش آستانه‌ای (K_s) مقدار تعرق پتانسیل به تعرق واقعی تبدیل می‌شود.

$$Tr = K_s \times Tr_x \quad (۳)$$

در صورت وجود سایر عوامل تنش‌زا مانند تنش شوری، عدم حاصل‌خیزی و علف‌های هرز این عوامل تنش‌زا نیز در الگوریتم محاسباتی اعمال خواهند شد و بر رشد ریشه و یا مقدار بهره‌وری آب تأثیرگذار خواهند بود. زیست‌توده نهایی (B) به‌وسیله بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP^*) از مقدار تعرق گیاه مشتق می‌شود.

$$B = WP^* \times \sum \left(\frac{Tr}{ET_0} \right) \quad (۴)$$

در این رابطه، آن B مقدار زیست‌توده شبیه‌سازی شده و WP^* بهره‌وری آب نرمال شده است. در پایان دوره رشدی گیاه، مقدار محصول (Y) از حاصل‌ضرب زیست‌توده شبیه‌سازی شده و شاخص برداشت (HI) به‌عنوان درصدی از زیست‌توده که به‌صورت نهایی استفاده می‌شود، مطابق رابطه (۵) به‌دست می‌آید (Raes et al., 2009).

$$Y = HI \times B \quad (۵)$$

۲-۴- داده‌های ورودی به نرم‌افزار

نرم‌افزار AquaCrop برای شبیه‌سازی فرآیند رشد گیاه، نیازمند داده‌های ورودی شامل داده‌های هواشناسی، اطلاعات و داده‌های مربوط به گیاه، مشخصات خاک، داده‌های مربوط به آبیاری و شرایط مدیریتی مزرعه است. داده‌های هواشناسی مورد نیاز این نرم‌افزار شامل مقادیر حداقل و حداکثر دمای روزانه، تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (که می‌تواند به‌صورت مستقیم و یا با وارد نمودن اطلاعات از طریق نرم‌افزار ET_0 Calculator به‌دست آید)، میزان بارش، سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و میانگین غلظت سالانه دی‌اکسیدکربن موجود در جو است. در این نرم‌افزار تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش فائو پنمن-مانتیت محاسبه می‌شود (Allen, 1998; Abedinpour et al., 2012). داده‌های ورودی مربوط به گیاه شامل تاریخ کشت، زمان جوانه‌زنی گیاه، زمان گلدهی و زمان رسیدن به بلوغ و پیری گیاه نیز وارد نرم‌افزار می‌شود. مشخصات مربوط به پروفیل خاک محل مطالعه نظیر ضخامت هر لایه، بافت، مقادیر رطوبت در حالت اشباع، ظرفیت‌زراعی و نقطه پژمردگی و هدایت هیدرولیکی هر لایه نیز، در نرم‌افزار قابل تعریف است. علاوه بر موارد ذکر

در رابطه بالا، θ رطوبت حجمی بر حسب مترمکعب بر مترمکعب، θ_f رطوبت حجمی خاک آون‌خشک بر حسب مترمکعب بر مترمکعب، θ_s رطوبت حجمی خاک اشباع بر حسب مترمکعب بر مترمکعب، R عدد قرائت شده حسگر در هر آزمایش بر حسب میلی‌ولت، R_{min} عدد قرائت شده حسگر در خاک آون‌خشک، R_{max} عدد قرائت شده حسگر در خاک اشباع و α توان رابطه است که با استفاده جعبه ابزار curve fitting نرم افزار MATLAB، تعیین شد.

۲-۳- نرم‌افزار AquaCrop

پیچیدگی ارتباط بین میزان آب موجود در ناحیه ریشه و پاسخ گیاه، سبب شده است که استفاده از مدل‌های گیاهی به‌عنوان اصلی‌ترین جایگزین برای مطالعات عواملی گسترده برای پیش‌بینی عملکرد گیاه مطرح شوند (Steduto et al., 2009). روابط حاکم بر نرم‌افزار AquaCrop، مبتنی بر میزان موجودی آب می‌باشند به‌طوری که ابتدا مقادیر تعرق گیاهی محاسبه شده و با در نظر گرفتن مقدار شاخص کارایی آب، عملکرد گیاه محاسبه می‌شود (Andarzian et al., 2011). به‌طور دقیق‌تر، پایه اصلی الگوریتم محاسباتی نرم‌افزار AquaCrop بر اساس بیلان آب در منطقه رشد ریشه بنا نهاده شده است. در نرم‌افزار AquaCrop، مقدار آب ذخیره شده در ناحیه ریشه گیاه و قابل استفاده برای گیاه بین حد ظرفیت زراعی (FC) و حد پژمردگی دائم (PWP) تعریف شده است. رطوبت‌های بیش‌تر از حد ظرفیت‌زراعی به‌عنوان آب قابل زهکشی تعریف شده و از ناحیه ریشه زهکشی می‌شود. در این نرم‌افزار رشد گیاه در طول فصل با استفاده از سطح سایه‌انداز (CC) تعریف می‌شود. تغییرات این متغیر با توجه به مقدار آب موجود در ناحیه ریشه گیاه حدود آستانه‌ای تعریف شده مانند حد توسعه کانوپی (مقدار آستانه‌ای که در رطوبت‌های کم‌تر از آن رشد کانوپی گیاه از حالت پتانسیل خارج می‌شود)، حد بسته شدن روزنه‌ها (رطوبت آستانه‌ای که در رطوبت‌های کم‌تر از آن توسعه کانوپی متوقف شده و تعرق از حالت پتانسیل خارج می‌شود) و پیری زودرس (رطوبت آستانه‌ای که در رطوبت‌های کم‌تر از آن کانوپی گیاه شروع به کاهش زودتر از موعد می‌نماید) کنترل می‌شود (Hsiao et al., 2009).

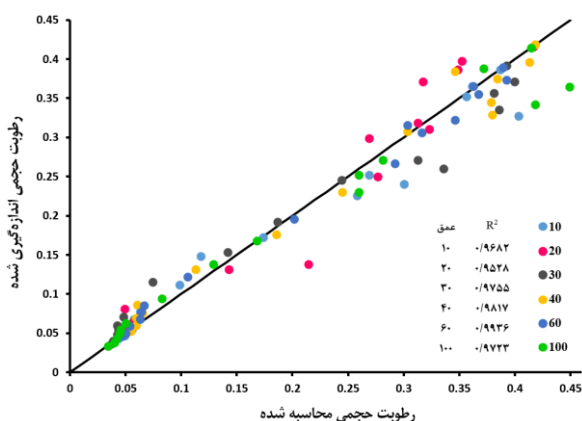
با آگاهی از عمق آب ذخیره شده در ناحیه ریشه گیاه و کانوپی گیاهی، نرم‌افزار AquaCrop تبخیر-تعرق پتانسیل را به اجزای منفرد تبخیر پتانسیل و تعرق پتانسیل تجزیه می‌نماید. برای این منظور تعرق پتانسیل (Tr_x) از ضرب تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) و ضریب گیاهی پایه (Kc_{tr}) که به‌عنوان تابعی از سطح سایه‌انداز ارائه شده است، طبق رابطه (۲) به‌دست می‌آید.

مقدار |R| به یک نزدیک تر باشد، همبستگی بیش تری بین متغیرها وجود دارد (Schober et al., 2018).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت سنجی حسگر رطوبتی

شکل ۳ همبستگی میان رطوبت اندازه گیری شده و محاسبه شده توسط رابطه واسنجی حسگر رطوبتی که در آزمایشگاه توسعه یافته است را نشان می دهد. برای حسگر موجود در هر عمق، ضرایب رابطه واسنجی متفاوت بوده است. با قرار دادن عدد خروجی قرائت شده توسط حسگر (میلی ولت) در رابطه متناظر با همان عمق، رطوبت حجمی محاسبه خواهد شد.



شکل ۳- مقادیر متناظر رطوبت حجمی اندازه گیری شده و محاسبه شده توسط رابطه واسنجی

Figure 3- The corresponding values of volumetric moisture are measured and calculated by the calibration equation

شده، تاریخ و عمق آبیاری و شرایط مدیریتی مزرعه (مانند وجود مالچ)، برای اجرای نرم افزار مورد نیاز است.

۲-۵- تعیین بازه های حساس گیاه به تنش خشکی

نرم افزار AquaCrop، مراحل رشد گیاه را به چهار بخش اصلی شامل مرحله جوانه زنی^۱، مرحله رویشی^۲، مرحله گلدهی^۳ و مرحله تولید محصول^۴ تقسیم بندی می کند (Raes et al., 2009). به منظور تعیین میزان حساسیت گیاه به تنش خشکی در مراحل مختلف رشد، ابتدا این نرم افزار برای گیاه ذرت در شرایط آبیاری در حالت بدون تنش اجرا و مقادیر ماده خشک تولیدی، مقدار آب مصرفی و بهره وری آب^۵، ثبت شد. این امر از طریق تنظیم نرم افزار AquaCrop روی حالت نیاز خالص آبیاری^۶ انجام شد تا میزان عملکرد در شرایط بدون تنش، به دست آید. سپس با توجه به زمان مربوط به شروع و پایان هر مرحله رشد، مقادیر مختلف کاهش رطوبت نسبت به حالت بدون تنش به گیاه اعمال و سایر مراحل در وضعیت پتانسیل، آبیاری شد. کاهش میزان رطوبت در خاک تا ثابت شدن مقادیر ماده خشک تولیدی ادامه یافت.

۲-۶- معیارهای ارزیابی نتایج

در این پژوهش جهت سنجش نتایج شبیه سازی های انجام شده از شاخص های آماری میانگین ریشه مربعات خطا^۷ (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون^۸ (R) استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}} \quad (7)$$

در این روابط، O_i مقادیر اندازه گیری شده، \bar{O}_i میانگین مقادیر اندازه گیری شده، P_i مقادیر برآورد شده، \bar{P}_i میانگین مقادیر برآورد شده، n تعداد داده ها هستند. چنانچه RMSE به صفر نزدیک تر باشد، نرم افزار از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود و هرچه مقدار آن بیش تر از صفر باشد شبیه سازی ضعیف تری وجود داشته است (Ramos et al., 2017). مقادیر R بین یک و منفی یک قرار دارد و همبستگی بین دو متغیر مورد مطالعه را نمایش می دهد. هرچه

¹ Germination or transplant recovery

² Vegetative stage

³ Flowering

⁴ Yield formation and ripening

⁵ ET water productivity

⁶ Net irrigation requirement mode

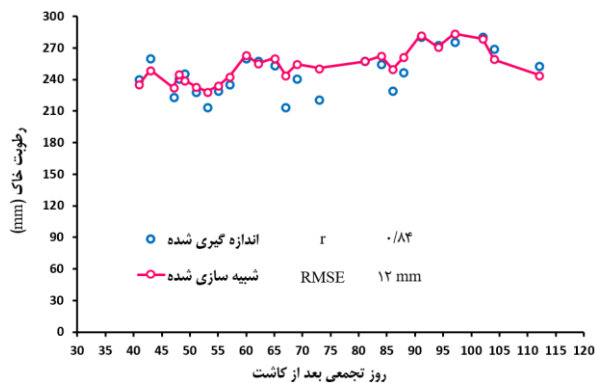
⁷ Root-mean-square error (RMSE)

⁸ Pearson correlation coefficient

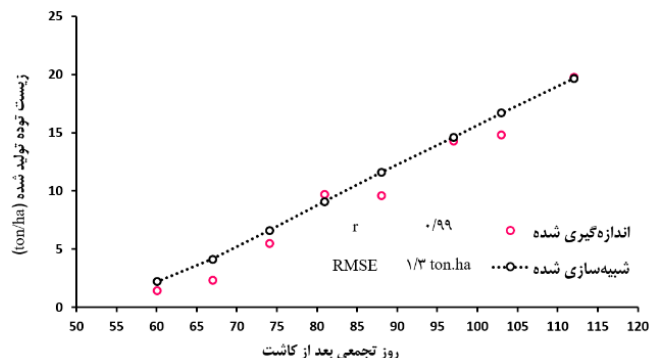
جدول ۳- مقادیر متغیرهای گیاهی مورد استفاده در نرم‌افزار AquaCrop

Table 3- Values of plant parameters used in AquaCrop software

متغیر	مقدار	واحد	نحوه برآورد
حداکثر عمق مؤثر ریشه	35	سانتی‌متر	اندازه‌گیری
مدت زمان رسیدن به حداکثر عمق ریشه	101	روز	اندازه‌گیری
شاخص برداشت مرجع ^۱	100	درصد	پیش‌فرض نرم‌افزار
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	27	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا رسیدن به حداکثر سطح سایه‌انداز	75	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا رسیدن به بلوغ	120	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا رسیدن به دوره پیری	114	روز	اندازه‌گیری
طول مرحله گلدهی	30	روز	اندازه‌گیری
ضریب تخلیه آب خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	0.69	-	پیش‌فرض نرم‌افزار
ضریب تخلیه آب خاک برای مرحله پیری	0.69	-	پیش‌فرض نرم‌افزار
دمای بالا	30	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض نرم‌افزار
پوشش گیاهی هر بوته هنگام جوانه‌زنی	6.5	سانتی‌متر مربع	پیش‌فرض نرم‌افزار
بهره‌وری آب نرمال شده ^۲	33.5	گرم بر مترمربع	واسنجی
پوشش تاج اولیه	0.37	درصد	پیش‌فرض نرم‌افزار
حداکثر سطح سایه‌انداز	100	درصد	اندازه‌گیری
دمای پایه رشد	8	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض نرم‌افزار
ضریب رشد پوشش ^۳	16.9	درصد بر روز	واسنجی
ضریب کاهش پوشش ^۴	13.9	درصد بر روز	واسنجی
جزء تعرق از ضریب گیاهی	1.05		پیش‌فرض نرم‌افزار



شکل ۴- تغییرات رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار در طول فصل رشد
Figure 4- Moisture changes measured by the sensor and simulated by software during the growing season



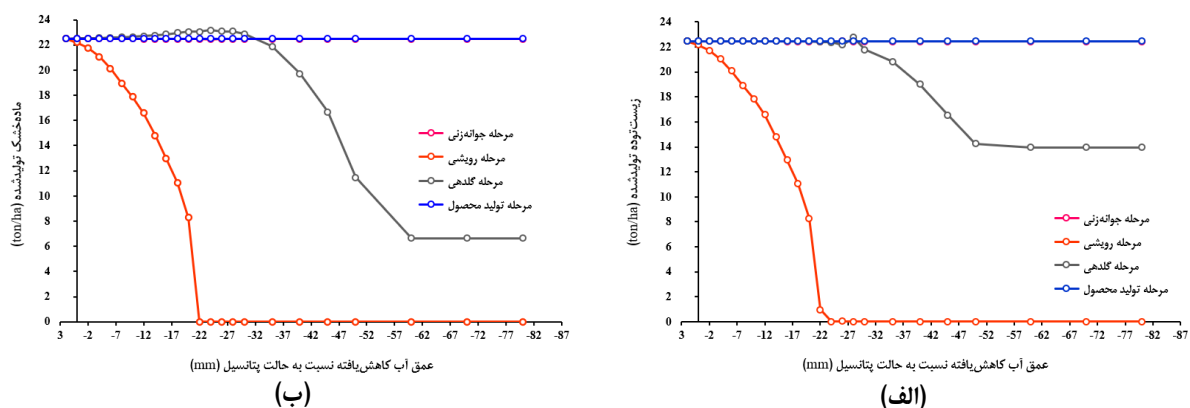
شکل ۵- مقادیر زیست توده تولید شده در مزرعه و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار
Figure 5- Amounts of biomass produced in the farm and simulated by software

¹ Reference harvest index (HI_o)
² Normalized water productivity (WP*)
³ Canopy growth coefficient (CGC)
⁴ Canopy decline coefficient (CDC)

نهایی ذرت را بررسی کرد و به این نتیجه رسیدند که بیشترین حساسیت به تنش خشکی، مربوط به مرحله رشد رویشی است که مطابق نتایج این پژوهش است. همچنین، نتایج Song et al. (2019) پژوهشی نشان داد کم آبیاری در مرحله جوانه زنی بیشترین تأثیر را در کاهش مقدار زیست توده نهایی و کاهش تعداد ذرت روی هر بوته خواهد داشت. با توجه به شکل ۶-الف، می توان گفت کاهش رطوبت ستون خاک ناحیه ریشه تا ۳۰ میلی متر در مرحله گلدهی، هیچ تغییری در مقدار زیست توده خشک نهایی، ایجاد نخواهد کرد. با توجه به این که ذرت کشت شده در مزرعه به صورت علوفه ای بوده، تغییرات ماده خشک تولید شده نیز تقریباً مطابق تغییرات مقادیر زیست توده در هر مرحله است. شکل ۷ نیز تغییرات عمق آبیاری کل و بهره وری آب تبخیر-تعرق یافته در طول فصل رشد را نسبت به کاهش عمق رطوبت در ستون خاک ناحیه ریشه، نشان می دهد. با توجه به میزان حساسیت هر مرحله از رشد به تنش خشکی و در نظر گرفتن سناریوی کاهش عمق آبیاری، برنامه ریزی آبیاری بهبود یافت.

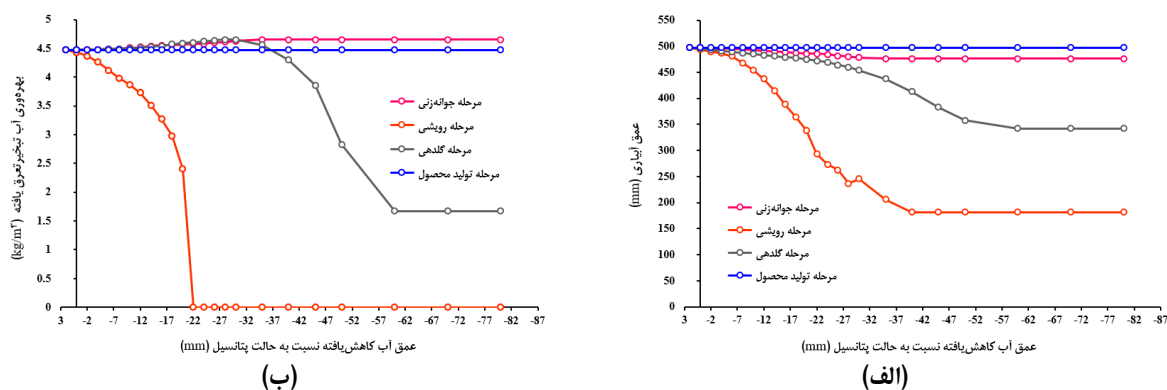
۳-۳- تحلیل بازه های حساس گیاه به تنش خشکی

پس از کسب اطمینان از دقت شبیه سازی نرم افزار، اعمال تنش به بازه های مختلف رشد انجام شد. شکل ۶ تغییرات مقادیر ماده خشک تولید شده، زیست توده تولیدی، بهره وری آب تبخیر-تعرق یافته و عمق آبیاری کل را نسبت به مقادیر مختلف تنش خشکی نشان می دهد که با کاهش عمق آبیاری در هر یک از مراحل چهارگانه رشد گیاه و آبیاری کامل سایر مراحل در نرم افزار، به دست آمد. میزان حساسیت هر مرحله رشد نسبت به کاهش رطوبت، در شکل ۶ قابل مشاهده است. تغییرات مقادیر زیست توده و ماده خشک تولید شده برای مرحله جوانه زنی و مرحله تولید محصول کاملاً بر هم منطبق بوده به طوری که این تغییرات برای مرحله جوانه زنی قابل مشاهده نیست (شکل ۶). همان طور که شکل ۶-الف نشان می دهد، مرحله رشد رویشی به تنش خشکی بسیار حساس بوده، به نحوی که کاهش ۲۵ میلی متر رطوبت از ناحیه ریشه سبب از بین رفتن کامل گیاه خواهد شد. در همین زمینه، در یک آزمایش عاملی (Saeidi 2021) در قالب بلوک کاملاً تصادفی، تأثیر تیمارهای مختلف خشکی در مراحل مختلف رشد گیاه بر عملکرد



شکل ۶- تغییرات مقادیر زیست توده خشک تولید شده نسبت به کاهش میزان رطوبت (الف) و تغییرات مقادیر ماده خشک تولید شده نسبت به کاهش میزان رطوبت (ب)

Figure 6- Changes in the amount of dry biomass produced about the decrease in humidity (a) and changes in the amount of dry matter produced about the decrease in humidity (b)



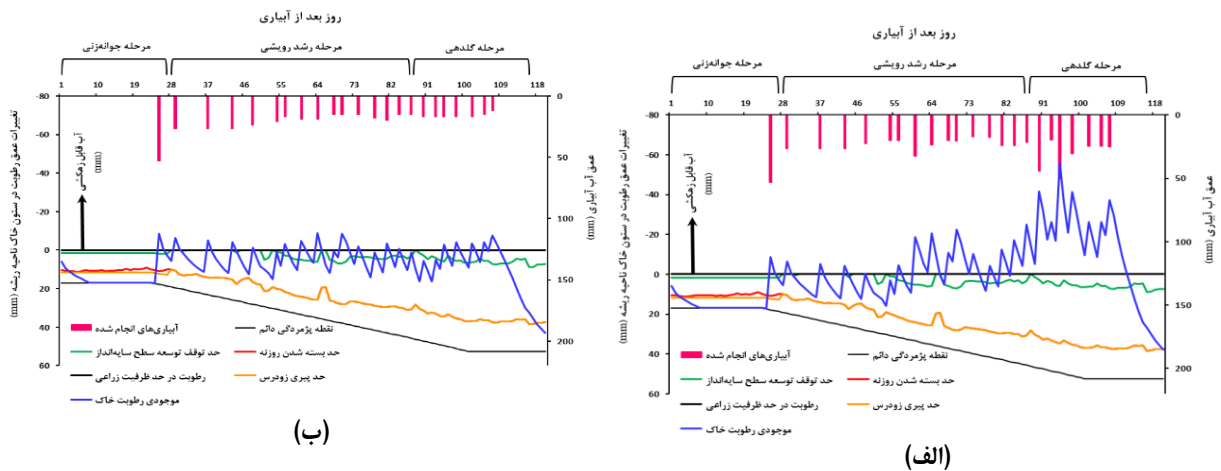
شکل ۷- تغییرات عمق آبیاری نسبت به کاهش میزان رطوبت (الف) و تغییرات بهره وری آب تبخیر-تعرق یافته نسبت به کاهش میزان رطوبت (ب)

Figure 7- Changes in the depth of irrigation about the decrease in humidity (a) and changes in the productivity of evaporation-transpiration water about the decrease in humidity (b)

۳-۴- اصلاح مدیریت آبیاری در مزرعه

شکل ۸-الف، تغییرات رطوبت در ناحیه ریشه گیاه در طول فصل را در شرایط کنونی مزرعه که به صورت سنتی راهبری می‌شد را نشان می‌دهد. این تغییرات نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی کنونی مزرعه باعث بیش آبیاری شده و در انتهای فصل مقدار بیش آبیاری به حداکثر خود می‌رسد. در نتیجه مقداری از آب به صورت زهکشی عمقی از دسترس ریشه گیاه خارج می‌شود. علاوه بر تغییرات رطوبت، حد آستانه توسعه سطح سایه‌انداز، بسته شدن روزنه، پیری زودرس و پژمردگی دائم نیز نشان داده شده است. مطابق شکل ۸-الف، از اواسط مرحله رشد رویشی تا اواخر مرحله گلدهی، میزان قابل توجه زه‌آب در مزرعه وجود دارد که علاوه بر کاهش کارایی مصرف آب می‌تواند به گیاه تنش پرابی وارد نماید. بنابراین، با هدف بهسازی شرایط آبیاری در مزرعه و با در نظر گرفتن حداقل سازی مقدار آب به کار رفته و حداکثر سازی مقدار زیست‌توده تولیدی و کاهش زه‌آب نسبت به شرایط قبل از بهسازی و با در نظر گرفتن بازه‌های حساس گیاه به تنش خشکی که در شکل ۶ نمایش داده شد، اصلاحاتی در عمق آبیاری مزرعه، انجام شد به نحوی که زه‌آب موجود کاملا حذف شده و در مرحله گلدهی، عمق آبیاری نسبت به راهبری سنتی مزرعه کاهش یافت. لازم به ذکر است با توجه به

ظرفیت ایستگاه پمپاژ و مدت زمان لازم برای آبیاری تمام مزرعه، دور آبیاری بدون تغییر نسبت به شرایط قبل از بهسازی در نظر گرفته شد. کاهش عمق آبیاری به نحوی صورت گرفت که در شرایط واقعی مزرعه قابل اجرا باشد. این کاهش در عمق آبیاری، با توجه به حد آستانه کاهش محصول در شکل ۶ در نظر گرفته شد. شکل ۸-ب تغییرات رطوبت در پروفیل خاک و مقادیر آبیاری در طول فصل رشد را با برنامه‌ریزی اصلاح شده نشان می‌دهد. در شرایط اصلاح شده، مقدار زه‌آب به حداقل رسیده و مقادیر زیست‌توده و ماده خشک تولید شده نسبت به شرایط قبل از بهسازی، تقریباً بدون تغییر باقی‌مانده است. با توجه به حساسیت کم‌تر مرحله گلدهی به تنش خشکی، در این مرحله عمق آبیاری به نحوی کاهش یافت که عمق رطوبت در ناحیه ریشه تا ۳۰ میلی‌متر کم‌تر نسبت به حالت پتانسیل حفظ شود. جدول ۴ مقادیر زیست‌توده، ماده خشک تولیدی، آب آبیاری، مقدار زه‌آب و بهره‌وری آب در حالت بهسازی شده نسبت به شرایط قبل از بهسازی را نشان می‌دهد. تمامی شاخص‌های ارائه شده در حالت بهسازی شده، بهبود پیدا کرده‌اند.



شکل ۸- تغییرات مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده در شرایط قبل از بهسازی مزرعه و مقادیر آبیاری (الف) و تغییرات مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده در شرایط بهسازی شده مزرعه و مقادیر آبیاری اصلاح شده (ب)

Figure 8- Changes in simulated moisture in current field condition and irrigation events (a) and Changes in simulated moisture in modified field condition and modified irrigation depths (b)

جدول ۴- مقایسه مقادیر زیست‌توده، ماده خشک، مقدار آب آبیاری، زه‌آب و بهره‌وری در شرایط قبل از بهسازی و شرایط اصلاح شده

Table 3- Comparison of biomass, dry yield, irrigation depth, drainage, and ET water productivity in current condition and modified condition

	مقدار زیست‌توده تولید شده (تن بر هکتار)	مقدار ماده خشک تولید شده (تن بر هکتار)	مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)	مقدار زه‌آب (میلی‌متر)	بهره‌وری آب تخییر-تعرق یافته (کیلوگرم بر مترمکعب)
شرایط قبل از بهسازی مزرعه	21.963	21.963	621	187.6	4.66
شرایط پس از بهسازی برنامه‌ریزی آبیاری	22.046	22.077	456	27	4.67

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد روی گیاه ذرت انجام شد. نرم‌افزار AquaCrop با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی واسنجی و با هدف یافتن بازه‌های حساس گیاهی به تنش خشکی اجرا شد. نتایج نشان داد مرحله رشد رویشی گیاه به تنش خشکی بسیار حساس بوده و سبب کاهش عملکرد چشم‌گیری در انتهای فصل رشد خواهد شد. مرحله جوانه‌زنی و گلدهی از حساسیت کم‌تری برخوردار هستند به نحوی که کاهش رطوبت تا ۱۲/۳ درصد نسبت به حالت پتانسیل، تغییری در عملکرد نهایی گیاه نخواهد داشت. کاهش مقدار نفوذ عمقی در مزرعه مورد مطالعه از ۱۸۷/۶ میلی‌متر به ۲۷ میلی‌متر و کاهش میزان عمق آبیاری در مرحله گلدهی با همان دور آبیاری اجرا شده در مزرعه، سبب کاهش میزان عمق آبیاری از ۶۲۱ میلی‌متر به ۴۵۶ میلی‌متر خواهد شد که معادل ۲۶۰۷۰ مترمکعب صرفه‌جویی در مصرف آب است که نشان‌دهنده افزایش قابل توجه در کارایی مصرف آب است. نتایج پژوهش نشان داد که با تغییرات اندک در مقدار و زمان آبیاری با تکیه بر اندازه‌گیری و مدل‌سازی می‌توان بهره‌وری آب را افزایش و برنامه‌ریزی آبیاری را بهبود داد. پژوهش‌های پیش‌تر در زمینه برنامه‌ریزی آبیاری و ارائه دستورالعمل‌های جامع به کشاورزان در شرایط مختلف آب و هوایی و با سیستم‌های آبیاری گوناگون، با در نظر گرفتن رویکردهای مختلف مدیریتی در تخصیص آب به بخش‌های مختلف مزرعه به‌همراه بررسی تأثیرات آبیاری با آب شور، می‌تواند موضوعاتی برای پژوهش‌های بعدی برای کارشناسان در این زمینه باشد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاری کارکنان مزرعه تحقیقاتی و گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

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

مشارکت نویسندگان

مهدی غلامی شرفخانه: داده‌برداری میدانی، مدل‌سازی گیاهی، ویرایش مقاله؛ علی نقی ضیائی: راهنمایی، مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ سید محمدرضا ناقدی‌فر: راهنمایی، مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ امیر اکبری: داده‌برداری میدانی، ویرایش مقاله.

منابع

- ابراهیم‌پور، میثم، قهرمان، نوذر، و لیاقت، عبدالمجید (۱۳۹۱). استفاده از مدل SIMETAW جهت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: مشهد). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۳(۴)، ۳۵۳-۳۶۰. doi:10.22059/ijswr.2013.35354
- سعیدی، رضا (۱۴۰۰). بررسی حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی، در سطوح مختلف آبیاری. *آب و خاک*، ۳۵(۳)، ۳۳۵-۳۴۸. doi:10.22067/jsw.2021.68147.1011
- سعیدی‌نیا، مهری، نصرالهی، علی حیدر، و شریفی‌پور، مجید (۱۳۹۸). بررسی توانایی شاخص تنش آبی گیاه در برنامه‌ریزی آبیاری و برآورد میزان عملکرد ذرت علوفه‌ای. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰(۳)، ۵۵۵-۵۶۵. doi:10.22059/ijswr.2018.268113.668038
- عالی‌نژادیان بیدآبادی، افسانه، جورونی، الهام، برزگر، عبدالرحمن، و ملکی، عباس (۱۳۹۵). تاثیر سطوح مختلف آبیاری بر کارایی مصرف آب بر اساس دانه ذرت و تغییرات رطوبتی خاک. *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶(۱)، ۴۷-۵۹. doi:10.22059/jwim.2016.60919
- هوشمند، عبدالرحیم، فروتن، مجتبی، و برومندنسب، سعید (۱۳۹۳). ارزیابی کم آبیاری و آرایش کاشت بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت دانه ای هیبرید KSC-704. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۷(۳)، ۴۳-۵۲. doi:10.1001.1.25885952.1393.37.3.5.7.52-43

References

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T.B.S., Singh, M., Pathak, H., & Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55-66. doi:10.1016/j.agwat.2012.04.001
- Alinejadian Bidabadi, A., Jorooni, E., Barzegar, A.R., & Maleki, A. (2016). The effect of different

- irrigation levels on water use efficiency on the basis of maize grain and soil moisture variations. *Journal of Water and Irrigation Management*, 6(1), 47-59. doi:10.22059/JWIM.2016.60919. [In Persian]
- Allen, R.G. (1998). Crop Evapotranspiration-guideline for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage*, 56, 300. doi:10.3178/jjshwr.16.589

- 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. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1–8. doi:10.1016/j.agwat.2011.08.023
- Chen, S., Jiang, T., Ma, H., He, C., Xu, F., Malone, R.W., Feng, H., Yu, Q., Siddique, K.H.M., & He, J. (2020). Dynamic within-season irrigation scheduling for maize production in Northwest China: A method based on weather data fusion and yield prediction by DSSAT. *Agricultural and Forest Meteorology*, 285, 107928. doi:10.1016/j.agrformet.2020.107928
- Ebrahimpour, M., Ghahreman, N., Liaghat, A. (2013). Using the SIMETAW model to simulate climate variables and investigate the effect of climate change on potential evapotranspiration (case study: Mashhad). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 43(4), 353-360. doi:10.22059/IJSWR.2013.35354. [In Persian]
- FAO, (2023) Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- 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. doi:10.1016/j.agwat.2021.107372
- Foster, T., Brozović, N., Butler, A.P., Neale, C.M. U., Raes, D., Steduto, P., Fereres, E., & Hsiao, T.C. (2017). AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181, 18–22. doi:10.1016/j.agwat.2016.11.015
- Geerts, S., Raes, D., & Garcia, M. (2010). Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agricultural Water Management*, 98(1), 213–216. doi:10.1016/j.agwat.2010.07.003
- Gu, Z., Qi, Z., Burghate, R., Yuan, S., Jiao, X., & Xu, J. (2020). Irrigation scheduling approaches and applications: A review. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(6), 4020007. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001464
- Heng, L.K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. doi:10.2134/agronj2008.0029xs
- Hoshmand, A., Forotan, M., & Boromandnasab, S. (2014). Evaluation of deficit irrigation and sown pattern on yield and water use efficiency of maize (KSC-704). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 37(3), 43–52. doi:10.1001.1.25885952.1393.37.3.5.7. [In Persian]
- 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. doi:10.2134/agronj2008.0218s
- Moghbel, F., Mosaedi, A., Aguilar, J., Ghahraman, B., Ansari, H., & Gonçalves, M.C. (2022). Bayesian calibration and uncertainty assessment of HYDRUS-1D model using GLUE algorithm for simulating corn root zone salinity under linear move sprinkle irrigation system. *Water*, 14(24), 4003. doi:10.3390/w14244003
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. doi:10.2134/agronj2008.0140s
- Ramos, T.B., Simionesei, L., Jauch, E., Almeida, C., & Neves, R. (2017). Modelling soil water and maize growth dynamics influenced by shallow groundwater conditions in the Sorraia Valley region, Portugal. *Agricultural Water Management*, 185, 27–42. doi:10.1016/j.agwat.2017.02.007
- Saeidi, R. (2021). Investigation of the intra-seasonal sensitivity of Maize evapotranspiration to water stress, at different irrigation levels. *Soil and Water*, 35(3), 348–335. doi:10.22067/JSW.2021.68147.1011. [In Persian]
- Saeidinia, M., Nasrolahi, A.H., & Sharifipour, M. (2019). Investigating the ability of crop water stress index for irrigation scheduling and estimating corn forage yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(3), 555–565. doi:10.22059/IJSWR.2018.268113.668038. [In Persian]
- Sakaki, T., Limsuwat, A., & Illangasekare, T.H. (2011). A simple method for calibrating dielectric soil moisture sensors: Laboratory validation in sands. *Vadose Zone Journal*, 10(2), 526–531. doi:10.2136/vzj2010.0036
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L.A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768. doi:10.1213/ANE.0000000002864
- Simionesei, L., Ramos, T B., Palma, J., Oliveira, A. R., & Neves, R. (2020). IrrigaSys: A web-based irrigation decision support system based on open source data and technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105822. doi:10.1016/j.compag.2020.105822
- Song, L., Jin, J., & He, J. (2019). Effects of severe water stress on maize growth processes in the

- field. *Sustainability*, 11(18), 5086. doi:10.3390/su11185086
- 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. doi:10.2134/agronj2008.0139s
- Tehrani, A., Ziaei, A.N., & Naghedifar, S.M. (2023). Irrigation scheduling of walnut seedlings using HYDRUS-1D and taguchi optimization approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 149(1), 4022045. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.00017
- Trout, T.J., & DeJonge, K.C. (2017). Water productivity of maize in the US high plains. *Irrigation Science*, 35(3), 251–266. doi:10.1007/s00271-017-0540-1