



Irrigation Scheduling for Forage Maize Based on Crop Water Stress Index (CWSI) Under Drip Irrigation

Mohammad Mahdi Jafari¹ | Farhad Mirzaei² | Hamed Ebrahimian³ | Abdolmajid Liaghat⁴

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mm.jafari@ut.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: fmirzaei@ut.ac.ir
3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: ebrahimian@ut.ac.ir
4. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: aliaghat@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 26, 2026

Revised: May. 25, 2026

Accepted: July. 12, 2026

Published online: Aug. 2026

Keywords:

*Air temperature,
Canopy temperature,
Infrared thermometer,
Irrigation scheduling.*

ABSTRACT

Iran is facing a serious water crisis due to limited resources, climate change, and excessive extraction of groundwater, which has increased the importance of optimizing water consumption, especially in the agricultural sector. This study, aiming to improve agricultural water management, investigated an irrigation scheduling method based on canopy temperature (T_c) and Crop Water Stress Index (CWSI) for forage maize (SC704) under surface drip irrigation in Karaj. The experiment was conducted with three irrigation levels (60, 80, and 100 percent of water requirement) and three replications in the summer of 2024, and a handheld infrared thermometer was used to monitor corn leaf temperature. Utilizing the empirical IDSO method, baseline upper canopy temperatures for forage corn in July, August, and September were determined to be 4.55, 3.98, and 5.00 °C, respectively. Furthermore, baseline lower canopy temperature relationships for the aforementioned months were established as follows: $(T_c - T_a)_c = -0.0781(\text{AVPD}) + 3.7018$, $(T_c - T_a)_c = -0.0694(\text{AVPD}) + 3.3326$, and $(T_c - T_a)_c = -0.0859(\text{AVPD}) + 4.0814$. The coefficient of determination (R^2) values for these relationships were 0.86, 0.81, and 0.83, respectively, indicating the high accuracy of the regression relationships derived between canopy-air temperature difference ($T_c - T_a$) and atmospheric vapor pressure deficit (AVPD). Finally, the CWSI was extracted for different irrigation treatments. The average CWSI in irrigation treatments of 60, 80, and 100 percent of water requirement was calculated as 0.57, 0.48, and 0.29, respectively. Considering the non-stress treatment (full irrigation treatment), specific equations for determining irrigation timing during three different growth stages were respectively presented as $(T_c - T_a)_c = -0.0679(\text{AVPD}) + 3.8121$, $(T_c - T_a)_c = -0.0341(\text{AVPD}) + 3.6628$, and $(T_c - T_a)_c = -0.0653(\text{AVPD}) + 4.3019$, based on air vapor pressure deficit (AVPD) and the temperature difference ($T_c - T_a$), which enables more precise and climate-adapted irrigation scheduling.

Cite this article: Jafari, M. M., Mirzaei, F., Ebrahimian, H., Liaghat, A., (2026) Irrigation Scheduling for Forage Maize Based on Crop Water Stress Index (CWSI) Under Drip Irrigation, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (6), 1447-1466. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411953.670112>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411953.670112>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Water scarcity in Iran, exacerbated by population growth, drought, and excessive groundwater use, poses serious threats to agricultural sustainability and food security. Given the urgent need to improve water productivity, particularly in agriculture, accurate irrigation management based on real-time plant responses is essential. The Crop Water Stress Index (CWSI), calculated from canopy temperature (T_c), has emerged as a reliable and quantitative indicator for assessing plant water status and has proven effective in irrigation scheduling and enhancing water use efficiency across diverse crops and climates.

This study focuses on forage maize, a strategic crop in Karaj, where water resources are limited. Despite the widespread adoption of CWSI-based irrigation scheduling globally, its application in Iranian agriculture remains limited. This research aims to apply the CWSI approach under surface drip irrigation to optimize irrigation scheduling. Objectives include determining upper and lower baseline equations for CWSI calculation and establishing crop stage-specific irrigation relationships based on T_c and AVPD, with the potential to improve water management in arid regions.

Methods

The study was conducted in 2024 at the Research Farm of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, in Karaj (50°95' E, 35°80' N, 1293 m elevation). Prior to planting, soil samples were taken from three depths across the field, and irrigation water was tested for quality. A randomized complete block design (RCBD) was used with three irrigation treatments (60, 80, and 100 percent of crop water requirement) and three replications, using forage maize (SC704). Each 12 m² plot contained four rows (75 cm row spacing, 20 cm intra-crop). Irrigation was applied via drip tape. Crop water requirements were estimated using reference evapotranspiration (ET_0), calculated with ET_0 Calculator V3.2 software based on meteorological data. Actual crop evapotranspiration was determined by applying crop coefficients (K_c) from FAO-56 guidelines, adjusted for local climate. Water Stress treatments began at the four- to five-leaf stage.

The Crop Water Stress Index (CWSI) was calculated based on the difference between canopy temperature (T_c) and air temperature (T_a), using lower limit (non-stressed) and upper limit (fully stressed) baseline equations. The lower baseline, dependent on AVPD and relative RH, indicates maximum transpiration, while the upper baseline represents zero transpiration. Canopy temperature was measured with a handheld infrared thermometer at multiple plant heights and four cardinal directions, hourly from 8:30 to 14:30. Leaf temperature data from post-irrigation (non-stressed) and pre-irrigation (all treatments) were used to develop baseline equations and calculate CWSI, enabling assessment of plant water status under different irrigation levels.

Results and Discussion

Upper and lower limit baseline equations were established using the Idso method for different maize growth stages. Field data showed that as AVPD increased, the absolute ($T_c - T_a$) difference also rose, with variations influenced by growth stage and irrigation level. Using the developed baselines, CWSI was calculated for the three irrigation treatments, and its relationship with crop evapotranspiration was analyzed. Results revealed that CWSI increased as irrigation decreased, with the highest values observed in August under the severe deficit treatment (60 percent of crop water requirement). To facilitate accurate irrigation scheduling under non-stressed conditions, specific equations were developed to estimate allowable ($T_c - T_a$)_c based on AVPD during three distinct growth periods. These equations enable optimized irrigation timing using real-time temperature and humidity data.

Conclusions

Irrigation scheduling based on canopy temperature (T_c) was evaluated for forage maize in Karaj using an infrared thermometer. Three drip irrigation treatments (60, 80, and 100 percent of water requirement) were applied, yielding CWSI values of 0.57, 0.48, and 0.29, respectively. Using the full irrigation (non-stressed) treatment as reference, equations were developed to determine irrigation timing at three growth stages based on AVPD and the canopy-to-air temperature difference ($T_c - T_a$). One of the limitations of this approach is the need to establish site- and growth-stage-specific baselines using field data, along with challenges in measuring canopy temperature during early growth stages due to sparse foliage. It is recommended that infrared thermometry be used to determine irrigation timing, while water volume be estimated through complementary methods such as soil moisture monitoring or meteorological data.

Funding

The study was funded by the University of Tehran, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Department of Irrigation and Reclamation, Iran, Tehran.

Authorship contribution

Data curation: Mohammad Mahdi Jafari; Investigation: Mohammad Mahdi Jafari; Formal analysis: Mohammad Mahdi Jafari.

All authors contributed equally to the study design and execution, data collection, statistical analysis, interpretation of data and results, preparation of the original draft, validation of results, and revision and finalization of the manuscript.

The authors' specific contributions based on the thesis are as follows:

First Author (Student): Investigation, Data curation, Formal analysis, Writing—original draft preparation.

Second Author (Supervisor): Conceptualization, Methodology, Supervision, Validation, Writing—review and editing.

Third Author (Supervisor): Conceptualization, Supervision, Writing—review and editing.

Fourth Author (Co-supervisor): Conceptualization, Supervision, Writing—review and editing.

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

This declaration does not apply to the use of basic tools for checking grammar, spelling, references, etc..

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

We would like to express our gratitude to the esteemed Vice Chancellor for Research of the University of Tehran / Faculty of Agriculture and Natural Resources for their financial support / moral support / cooperation in conducting the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای براساس شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) تحت آبیاری قطره‌ای

محمد مهدی جعفری^۱ | فرهاد میرزایی^۲ | حامد ابراهیمیان^۳ | عبدالمجید لیاقت^۴

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه:

mm.jafari@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

fmirzaei@ut.ac.ir رایانامه:

۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه:

ebrahimian@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه:

aliaghat@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۳/۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۱

تاریخ انتشار: شهریور ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

برنامه‌ریزی آبیاری،

دمای پوشش سبز گیاه،

دمای هوا،

دماسنج مادون قرمز.

ایران با بحران جدی کم‌آبی به دلیل محدودیت منابع، تغییرات اقلیمی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی مواجه است و این موضوع اهمیت بهینه‌سازی مصرف آب، به‌ویژه در بخش کشاورزی را افزایش داده است. این مطالعه با هدف بهبود مدیریت آب کشاورزی، روش برنامه‌ریزی آبیاری مبتنی بر دمای پوشش سبز گیاه (CWSI) و شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) را برای ذرت علوفه‌ای (SC704) تحت آبیاری قطره‌ای سطحی در کرج مورد بررسی قرار داد. آزمایش با سه سطح آبیاری (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی) و سه تکرار در تابستان ۱۴۰۳ اجرا شد و از دماسنج مادون قرمز دستی برای پایش دمای برگ ذرت استفاده گردید. با بهره‌گیری از روش تجربی ایدسو، بطور کلی مقادیر خط مبنای بالا برای ذرت علوفه‌ای در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به ترتیب ۴/۵۵، ۳/۹۸ و ۵/۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید. همچنین روابط خطوط مبنای پایین برای ماه‌های مذکور به ترتیب برابر $(Tc-Ta)c = -0.0781 (AVPD) + 3.7018$ ، $(Tc-Ta)c = -0.0694 (AVPD) + 3.3326$ و $(Tc-Ta)c = -0.0859 (AVPD) + 4.0814$ استخراج شد. مقادیر ضریب تبیین (R^2) برای این روابط به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۸۱ و ۰/۸۳ به‌دست آمد که نشان دهنده دقت بالای روابط رگرسیونی استخراجی بین اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوا ($Tc-Ta$) و کمبود فشار بخار هوا (AVPD) است. در نهایت، شاخص CWSI برای تیمارهای مختلف آبیاری استخراج شد. میانگین CWSI در تیمارهای آبیاری ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ترتیب ۰/۵۷، ۰/۴۸ و ۰/۲۹ محاسبه گردید. با در نظر گرفتن تیمار بدون تنش (تیمار آبیاری کامل)، روابط اختصاصی برای تعیین زمان آبیاری در سه دوره مختلف رشد محصول به ترتیب به صورت $(Tc-Ta)c = -0.0679 (AVPD) + 3.8121$ ، $(Tc-Ta)c = -0.0341 (AVPD) + 3.6628$ و $(Tc-Ta)c = -0.0653 (AVPD) + 4.3019$ بر اساس فشار بخار نسبی (AVPD) و اختلاف دمای $Tc-Ta$ ارائه شد که امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر و مطابق با شرایط اقلیمی را فراهم می‌کند.

استناد: جعفری؛ محمد مهدی، میرزایی؛ فرهاد، ابراهیمیان؛ حامد، لیاقت؛ عبدالمجید، (۱۴۰۵) برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای براساس شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)

تحت آبیاری قطره‌ای، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۶)، ۱۴۶۶-۱۴۴۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411953.670112>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411953.670112>

مقدمه

افزایش جمعیت در ایران، همراه با پدیده خشکسالی و محدودیت منابع آبی، مشکلات قابل توجهی را در زمینه تامین مواد غذایی ایجاد کرده است (حمدی احمدآباد و همکاران، ۱۳۹۸؛ Gheysari, et.al, 2017). از سوی دیگر، سیاست‌های مربوط به تامین امنیت غذایی و تلاش برای رسیدن به خودکفایی در بخش کشاورزی، در کشوری مانند ایران که در حال توسعه است، فشار مضاعفی را بر منابع محدود آبی وارد آورده تا تولیدات کشاورزی از نظر کمی و کیفی افزایش یابد (سالاری و همکاران، ۱۴۰۱؛ Irmak, et.al, 2012). مدیریت پایدار منابع آب، به ویژه در کشاورزی، راه حل اصلی بحران کم آبی در ایران است. با توجه به وضعیت بحرانی دشت‌ها، افزایش بهره‌وری آب و تولید به ازای واحد آب مصرفی، از طریق مدیریت مصرف، حیاتی است (زمانی و همکاران، ۱۳۹۳؛ قبادی و همکاران، ۱۳۹۵؛ غلامی و همکاران، ۱۳۹۵).

به‌کارگیری روش‌های مؤثر برای پایش دقیق وضعیت تنش آبی گیاه اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این امر به درک بهتر نیازهای آبی گیاه و همچنین مصرف بهینه آب کمک می‌کند (Geerts and Raes, 2009; Han et al., 2018). (Fucs and Tanner(1996). برای اولین بار دمای پوشش سبز گیاه را به عنوان نشانگر تنش آبی در گیاهان معرفی کردند. Hiler and Clark (1971) پیشنهاد دادند که برای بررسی تنش آبی در گیاه، اختلاف دمای بین پوشش سبز و هوای اطراف آن اندازه‌گیری شود. دمای پوشش گیاه (T_c) به‌عنوان معیاری قابل اعتماد برای ارزیابی وضعیت آبی گیاه مورد استفاده قرار گرفته است (Jackson et al., 1981; DeJonge et al., 2015; Han et al., 2018). بر اساس این تکنیک، شاخصی با عنوان شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) توسط Idso et al. (1981) و Jackson et al. (1981) معرفی شد. این شاخص که بر پایه دمای پوشش گیاهی طراحی شده است، ابزاری برای ارزیابی وضعیت آبی گیاه و تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی آبیاری به شمار می‌آید (King et al., 2021). شاخص CWSI در کاربردهای متنوعی از جمله پایش رطوبت گیاه، تعیین زمان آغاز تنش آبی، پیش‌بینی عملکرد محصول و مدیریت آبیاری در انواع مختلف محصولات مورد استفاده قرار گرفته است (Akkuzu et al., 2015; Bellvert et al., 2015; Kumar et al., 2019).

مقدار CWSI در بازه‌ای از صفر تا یک تغییر می‌کند؛ مقدار صفر نشان‌دهنده شرایط بهینه آبیاری و تعرق کامل گیاه بدون وجود تنش آبی است، در حالی که مقدار یک بیانگر بیشینه تنش آبی و توقف کامل فرآیند تعرق می‌باشد. این شاخص به‌صورت کمی، شدت تنش آبی وارد بر گیاه را منعکس می‌کند و به‌عنوان معیاری دقیق برای ارزیابی وضعیت آبی گیاه در مطالعات کشاورزی و مدیریت آبیاری به‌کار می‌رود (Akkuzu et al., 2015; King et al., 2021). شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) به‌عنوان ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی آبیاری درختان و گیاهان زراعی توجه گسترده‌ای از سوی محققان داخلی و خارجی به خود جلب کرده است (وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰؛ سیفی و همکاران، ۱۳۹۳؛ سعیدی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۴؛ قربانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ خورسند و همکاران، ۱۳۹۸؛ موسوی و همکاران، ۱۴۰۳؛ Jones, 1999; Wanjura et al., 2006; Sezen et al., 2014; Seyfi et al., 2017).

Orta et al. (2003) کارایی شاخص تنش آبی گیاهی (CWSI) را در آبیاری قطره‌ای هندوانه بررسی کردند و دریافتند که افزایش CWSI با کاهش خطی عملکرد محصول همراه است. این شاخص برای بهینه‌سازی زمان و مقدار آبیاری هندوانه ابزار مؤثری است. Candogan et al. (2013) در بورسا، ترکیه، حد مجاز شاخص تنش آبی گیاه را برای سویا برابر با ۰/۲۲ تعیین کردند و روابط آماری بین CWSI، عملکرد دانه و تبخیر-تعرق را استخراج نمودند. Sezen et al. (2014) در تارسوس ترکیه، شاخص تنش آبی گیاه را برای فلفل قرمز در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و سطحی تعیین کردند و آستانه‌های CWSI برای حداکثر عملکرد را به ترتیب ۰/۲۶ و ۰/۳۸ یافتند. Taghvaeian et al. (2014) در شمال کلرادو دو شاخص CWSI و Dans مبتنی بر دمای پوشش گیاهی را برای نظارت بر تنش آبی آفتابگردان بررسی کردند و نشان دادند که شاخص ساده Dans، مبتنی بر دمای کانوپی، به طور مؤثری برای برنامه‌ریزی آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد دارد. Colak et al. (2015) شاخص CWSI را برای بادمجان با استفاده از آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در ترکیه بررسی کردند. در این مطالعه چهار تیمار آبیاری شامل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ درصد نیاز آبی و خشک شدن موضعی ریشه (PRD) اعمال شد. مقدار خط مبنای بالا ۴/۰۹ درجه سانتی‌گراد و رابطه خط مبنای پایین به صورت $(T_c - T_a)_{LL} = -1/3521 - 0/4502AVPD$ به‌دست آمد. محدوده CWSI در آبیاری سطحی بین ۰/۲۰ تا ۰/۵۳ و در آبیاری زیرسطحی بین ۰/۱۸ تا ۰/۴۹ بود. Osroosh et al. (2015) الگوریتم برنامه‌ریزی تطبیقی مبتنی بر شاخص CWSI را برای آبیاری خودکار درختان سیب توسعه دادند که از آبیاری بیش از حد در شرایط مرطوب



جلوگیری کرده و با شرایط متغیر درختان سازگار بود؛ این روش برای برنامه‌ریزی خودکار آبیاری با استفاده از سنجش حرارتی امیدوارکننده ارزیابی شد. (Himanshu et al. (2021). در منطقه آبخوان اوگالالا تگزاس، پاسخ گیاه پنبه به تنش آبی در مراحل مختلف رشد را بررسی کردند. نتایج نشان داد که واکنش پنبه به کم‌آبی بسته به مرحله رشد متفاوت است و برنامه‌ریزی آبیاری متناسب با این مراحل می‌تواند بهره‌وری آب، عملکرد محصول و بازده اقتصادی را افزایش داده و عمر آبخوان را حفظ کند. Bhatti et al. (2023) در مزرعه ۵۸ هکتاری ذرت-سویا در نبراسکای شرقی، سه روش برنامه‌ریزی آبیاری شامل شاخص گیاهی، پایش رطوبت خاک و روش معمولی را در فصل رشد ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ مقایسه کردند. هدف کاهش مصرف آب و بهینه‌سازی عملکرد محصول بود. نتایج نشان داد که آبیاری مبتنی بر بازخوردهای گیاهی کم‌ترین میزان مصرف آب را داشت، در حالی که روش معمولی بیش‌ترین عمق آبیاری فصلی را به خود اختصاص داد. احمدی و همکاران (۱۳۹۶) مقادیر متوسط شاخص CWSI را برای سویا در چهار تیمار آبیاری (۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی) در منطقه خرم‌آباد لرستان به ترتیب ۰/۱۸، ۰/۳۷، ۰/۶۱ و ۰/۸۴ گزارش کردند. حد آستانه CWSI برای زمان‌بندی آبیاری برابر با ۰/۱۸ تعیین شد. همچنین رابطه‌ای بین اختلاف دمای تاج پوشش و هوا ($T_c - T_a$) و کمبود فشار بخار آب (AVPD) برای تعیین زمان آبیاری در کل دوره رشد سویا ارائه گردید.

ذرت (*Zea mays* L.)، گیاهی یک‌ساله و تک‌لپه از خانواده‌ی Poaceae است که به عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی گرمسیری و نیمه‌گرمسیری در جهان شناخته می‌شود. ذرت با قرار گرفتن در رتبه‌ی سوم محصولات زراعی پس از گندم و برنج، نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی جهانی ایفا می‌کند (موحدی و صالحی، ۱۳۸۹). به منظور دستیابی به عملکرد مطلوب در کشت ذرت، طراحی یک برنامه‌ی آبیاری کارآمد و متناسب با نیازهای فیزیولوژیکی آن، امری ضروری است (سعیدی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۴). خورسند و همکاران (۱۳۹۸) پژوهشی به منظور برنامه‌ریزی آبیاری ذرت مبتنی بر شاخص‌های گیاهی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه تحت آبیاری قطره‌ای انجام دادند. پژوهش آن‌ها در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار سطح آبیاری شامل: دو سطح کم‌آبیاری (۵۰٪ و ۷۵٪ نیاز آبی گیاه)، سطح آبیاری کامل (۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه) و سطح آبیاری بیش از حد (۱۲۵٪ نیاز آبی گیاه)، در سه تکرار اجرا شد. نتایج این تحقیق به ارائه روابطی برای تعیین زمان آبیاری با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه در سه مرحله رشد ذرت و تحت شرایط آب‌وهوایی ارومیه منجر شد. با استفاده از روابط رگرسیونی استخراج‌شده میان شاخص‌ها، امکان تعیین وضعیت آب گیاه تنها با اندازه‌گیری دمای پوشش گیاهی فراهم شد. Irmak et al. (2000) نشان دادند که شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) و دمای پوشش سبز گیاه می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های معمول برنامه‌ریزی آبیاری ذرت باشد. همچنین توصیه شد مقدار بحرانی این شاخص برای گیاهان و اقلیم‌های مختلف تعیین شود تا برنامه آبیاری دقیق‌تر تنظیم گردد. Cremona et al. (2004) دریافتند که برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس دمای پوشش گیاهی نسبت به روش رطوبت خاک، راندمان مصرف آب را ۲۵ درصد افزایش می‌دهد. با این حال، به دلیل افزایش تعداد دفعات آبیاری در این روش، محققان استفاده از برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس شاخص گیاهی را در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای مناسب‌تر دانستند. Dejonge et al. (2015) سه شاخص تنش آبی موجود و سه شاخص جدید مبتنی بر دمای تاج پوشش را در کم‌آبیاری ذرت طی دو سال مقایسه کردند و همبستگی خوبی بین دمای تاج پوشش و پتانسیل آب برگ نیمروز یافتند؛ همه شاخص‌ها توانستند تفاوت‌های تیمار آبیاری در مراحل رشد را به درستی نشان دهند. در مطالعه‌ای با استفاده از مدل چندلایه تاج-ریشه-خاک (MLCan) در مزرعه‌ای در اوربانا، ایلینوی، سه روش برنامه‌ریزی آبیاری برای بهبود عملکرد ذرت بررسی شد: تعادل آب، شاخص تنش آبی مبتنی بر دمای تاج پوشش و پتانسیل آب برگ. کاهش ۳۰ درصدی بارش باعث کاهش ۱۰ درصدی بازده ذرت شد. روش تعادل آب ناکارآمد بود و نیاز به آبیاری بیش‌تر داشت، در حالی که روش پتانسیل آب برگ مؤثرترین و کارآمدترین روش برای بهبود عملکرد در شرایط تغییر اقلیم بود (Nandan, et.al, 2021). Zhang et al. (2023) دقت روش‌های تجربی (CWSI_E) و نظری (CWSI_T) محاسبه شاخص تنش آبی گیاه را در مزرعه ذرت کلرادو بررسی کردند. هر دو روش توانستند تنش آبی ذرت، عملکرد دانه و بهره‌وری آب را با دقت مناسبی برآورد کنند.

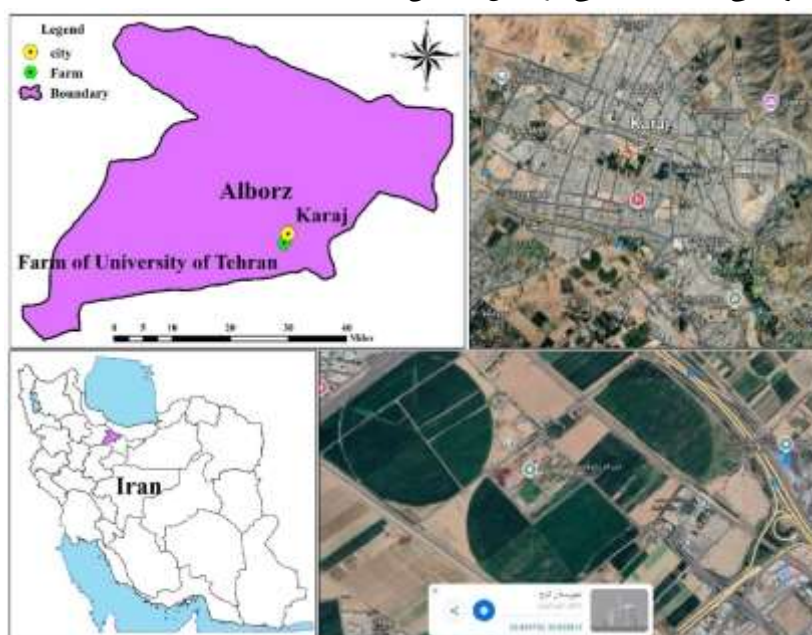
با وجود کارایی بالای شاخص تنش آبی گیاه به عنوان ابزاری دقیق و قابل اعتماد در برنامه‌ریزی آبیاری و استقبال گسترده از آن در سطح بین‌المللی، در داخل کشور توجه کافی به کاربرد این روش در مدیریت آبیاری صورت نگرفته است. از این رو، ضرورت دارد که استفاده از شاخص CWSI به طور گسترده‌تر در برنامه‌ریزی آبیاری محصولات مختلف و در مناطق جغرافیایی متنوع مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش، با تمرکز بر ذرت علوفه‌ای به عنوان محصولی استراتژیک در منطقه کرج و بهره‌گیری از سیستم آبیاری قطره‌ای نواری، از دمای تاج پوشش گیاهی (T_c) و شاخص CWSI برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری استفاده شد. اهداف اصلی این تحقیق شامل تعیین معادلات خطوط مبنای بالا و پایین به منظور محاسبه و ارزیابی شاخص CWSI و همچنین ارائه روابط کاربردی برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای

در مراحل مختلف رشد بر پایه شاخص CWSI می‌باشد. این رویکرد می‌تواند به بهبود مدیریت مصرف آب و افزایش بهره‌وری در کشاورزی منطقه کمک شایانی نماید.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مطالعاتی

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در استان البرز و در شهرستان کرج انجام گرفت. این مزرعه از نظر موقعیت جغرافیایی دارای طول جغرافیایی $50^{\circ} 95'$ شرقی، عرض جغرافیایی $35^{\circ} 80'$ شمالی و ارتفاع ۱۲۹۳ متر از سطح دریا است. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مزرعه

جمع‌آوری اطلاعات و داده‌ها

ویژگی‌های خاک، آب و چیدمان طرح آزمایشی

مزرعه انتخابی، ابتدا در پاییز سال ۱۴۰۲ و مجدداً در بهار سال ۱۴۰۳ شخم زده شد. در بهار سال ۱۴۰۳، عملیات دیسک‌زنی به منظور خردکردن کلوخه‌ها و آماده‌سازی بستر کشت، دو بار انجام گرفت و پس از آن، عملیات کرت‌بندی صورت پذیرفت. قبل از انجام عملیات کاشت، نمونه‌های خاک از عمق‌ها و موقعیت‌های مختلف مزرعه به صورت تصادفی جمع‌آوری شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک بر اساس مثلث بافت خاک USDA، مقدار ماده آلی به روش والکلی-بلک، وزن مخصوص ظاهری با استفاده از نمونه‌های خاک دست‌نخورده، شوری و اسیدیته عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه AZ، غلظت سدیم به وسیله فلیم‌فتومتر و مجموع کلسیم منیزیم به روش تیتراسیون، در سه عمق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده و نتایج آن‌ها در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مزرعه مورد مطالعه

عمق نمونه برداری	بافت	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	جرم مخصوص ظاهری	درصد رطوبت حجمی نقطه ظرفیت زراعی	درصد رطوبت حجمی نقطه پژمردگی دائم
cm	---	%	%	%	g/cm ³	Fe (%)	PWP (%)
۰-۲۰	لوم رسی	۳۲/۹۱	۳۵/۰۰	۳۲/۰۹	۱/۲۶	۲۹/۴۳	۱۴/۲۳
۲۰-۴۰	لوم رسی	۳۵/۸۳	۳۴/۵۸	۲۹/۵۹	۱/۲۴	۳۰/۰۴	۱۳/۹۵
۴۰-۶۰	لوم رسی	۲۵/۸۳	۴۷/۰۸	۲۷/۰۹	۱/۲۵	۳۰/۲۱	۱۴/۳۳

1. Walkley-Black

2. 86502 AZ Water Quality Professional Benchtop Meter (pH/ORP/mV)



جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه

عمق نمونه برداری	SAR	Ca+Mg	Na	درصد کربن آلی	درصد ماده آلی	EC	pH
cm	---	meq/lit	meq/lit	%	%	dS/m	---
۲۰-۰	۱/۰۳	۱۵/۰۰	۲/۸۱	۰/۵۹	۱/۰۱	۱/۵۶	۷/۹۱
۴۰-۲۰	۱/۰۳	۱۷/۹۰	۳/۰۸	۰/۶۸	۱/۱۸	۲/۱۴	۷/۴۵
۶۰-۴۰	۰/۸۲	۲۳/۱۰	۲/۷۸	۰/۳۵	۰/۶۱	۲/۶۵	۷/۳۰

آب مورد نیاز مزرعه از طریق چاه عمیق تامین شد که کیفیت آب در طول فصل کشت ثابت و پایدار است. نمونه برداری آب آبیاری مستقیماً در محل مورد مطالعه انجام شده و نتایج آنالیزهای شیمیایی آب در جدول ۳ گزارش شده است. با توجه به اینکه پژوهش حاضر در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار آبیاری و در سه تکرار طراحی شد، در مجموع ۹ کرت برای کشت ذرت علوفه‌ای آماده گردید. ابعاد کرت‌ها ۳ در ۴ متر (۱۲ متر مربع) و فاصله بین کرت‌ها ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. داخل هر کرت، چهار ردیف با فاصله ۷۵ سانتی‌متر ایجاد شد و بذرها با فواصل ۲۰ سانتی‌متر روی هر ردیف کاشته شدند. برای کاهش اثرات حاشیه‌ای، اندازه‌گیری‌ها تنها از ردیف‌های میانی هر کرت انجام شد. رقم ذرت مورد استفاده در این تحقیق، سینگل کراس ۷۰۴ است که مطابق با فواصل خروجی‌های نوار تیپ، در فواصل ۲۰ سانتی‌متری به صورت ترکاری کاشته شدند. برای تضمین جوانه‌زنی کامل، در هر فاصله ۲۰ سانتی‌متری دو دانه در عمق ۵ سانتی‌متری قرار داده شد. پس از سبز شدن و رسیدن گیاهان به مرحله ۳ تا ۵ برگ، عملیات تنک کردن انجام شد تا تنها یک گیاه در هر محل باقی بماند.

جدول ۳. مشخصات شیمیایی آب آبیاری

SAR	Ca+Mg	Na	EC	pH
---	meq/lit	meq/lit	dS/m	---
۰/۶	۷/۱	۱/۱۳	۰/۷۴	۷/۷۹

اطلاعات هواشناسی

پارامترهای هواشناسی منطقه مورد مطالعه که در محاسبه نیاز آبی ذرت علوفه‌ای این پژوهش به کار رفته‌اند، در جدول ۴ ارائه شده است. برای به‌دست آوردن داده‌های دمای هوا و رطوبت نسبی در بازه‌های زمانی ساعتی (از ساعت ۸:۳۰ تا ۱۴:۳۰، همزمان با اندازه‌گیری دمای برگ ذرت)، از اطلاعات ایستگاه هواشناسی سینوپتیک واقع در مزرعه تحقیقاتی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران استفاده شد. این ایستگاه در مجاورت مزرعه تحقیقاتی قرار دارد.

جدول ۴. پارامترهای هواشناسی طی دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای تابستانه در سال ۱۴۰۳ در منطقه کرج

شهریور	مرداد	تیر	ماه پارامتر
۲۵/۹	۲۸/۶	۳۷/۷	متوسط دمای هوا (°C)
۳۳/۳	۳۷/۳	۳۶/۱	متوسط حداکثر دمای هوا (°C)
۱۸/۴	۱۹/۹	۱۹/۲	متوسط حداقل دمای هوا (°C)
۳۷/۱	۴۵/۳	۳۹/۶	متوسط رطوبت نسبی (%)
۵۷/۰	۷۰/۹	۶۱/۹	متوسط حداکثر رطوبت نسبی (%)
۱۷/۲	۱۹/۶	۱۷/۲	متوسط حداقل رطوبت نسبی (%)
۲/۲	۳/۴	۳/۲	متوسط سرعت باد (m/sec)
.	.	.	مجموع بارش (mm)
۳۲۸/۴	۳۴۵/۷	۳۳۷/۰	مجموع ساعات آفتابی (hours/month)

تعیین نیاز آبی و زمان آبیاری

برای تعیین نیاز آبی ذرت علوفه‌ای، ابتدا داده‌های هواشناسی روزانه از ایستگاه سینوپتیک مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تهران جمع‌آوری شد. سپس تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از نرم‌افزار ET₀ Calculator V3.2 محاسبه گردید. با اعمال ضریب گیاهی (K_c) مربوط به ذرت علوفه‌ای و اصلاح آن بر اساس شرایط اقلیمی منطقه طبق نشریه شماره ۵۶ فائو، تبخیر و تعرق گیاه تعیین شد و راندمان آبیاری قطره‌ای در این مطالعه ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. زمان آبیاری هر سه روز یک‌بار و میزان آب مصرفی برابر با مجموع تبخیر/تعرق سه روز در نظر گرفته شد تا مدیریت بهینه آبیاری انجام شود.

برنامه آبیاری

با توجه به اجرای طرح در قالب بلوک‌های کامل تصادفی شامل سه تیمار آبیاری با مقادیر ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی ذرت علوفه‌ای، برای هر تیمار به صورت جداگانه انشعابی از لوله اصلی آب‌گیری شد. به منظور کنترل دقیق میزان آب مصرفی در هر تیمار، کنتور حجمی و فشارسنج نصب گردید تا مدیریت بهینه آبیاری فراهم شود. همچنین، با توجه به آرایش پشته‌های کشت، نوارهای آبیاری قطره‌ای پلاک‌دار با فاصله ۲۰ سانتی‌متر بین پلاک‌ها و دبی ۲/۱ لیتر بر ساعت در هر تیمار اجرا شد.

اولین آبیاری نیز بلافاصله پس از کاشت انجام گرفت تا شرایط مناسب برای رشد اولیه فراهم شود. اطلاعات مربوط به مقادیر عمق آبیاری و تاریخ هر آبیاری برای تیمار آبیاری کامل در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق جدول ملاحظه می‌گردد که دور آبیاری عمدتاً ۳ روز یکبار لحاظ گردیده است. بلافاصله پس از کاشت دانه ذرت، آبیاری آغاز گردید و در مراحل اولیه رشد و جوانه‌زنی، گاهی دور آبیاری به ۲ روز کاهش یافت. با توجه به اینکه برای اعمال تیمارهای کم‌آبیاری یا به عبارت دیگر، ایجاد تنش آبی، گیاه باید به مرحله استقرار کامل برسد، در مورد گیاه ذرت در مطالعات گذشته ذکر شده است که گیاه باید حداقل ۴ تا ۵ برگ شود، که این مرحله تقریباً ۲۵ روز پس از کاشت اتفاق می‌افتد. در پژوهش حاضر نیز، پس از استقرار مطلوب گیاه ذرت، اعمال تنش آبی از ۲۰ تیرماه (آبیاری هشتم) به بعد آغاز شد.

جدول ۵. برنامه آبیاری ذرت علوفه‌ای برای تیمار شاهد (تیمار شماره ۳ = آبیاری کامل) طی دوره رشد محصول

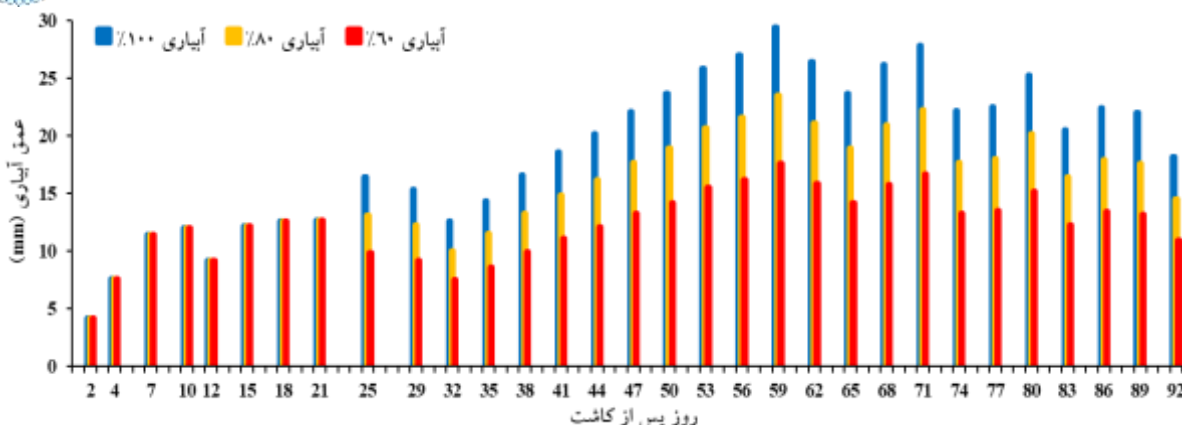
نوبت آبیاری	تاریخ آبیاری	عمق آبیاری (mm)	نوبت آبیاری	تاریخ آبیاری	عمق آبیاری (mm)
۱	۰۱/۰۴/۱۴۰۳	۴/۲	۱۷	۱۸/۰۵/۱۴۰۳	۲۳/۷
۲	۰۳/۰۴/۱۴۰۳	۷/۶	۱۸	۲۱/۰۵/۱۴۰۳	۲۵/۸
۳	۰۶/۰۴/۱۴۰۳	۱۱/۵	۱۹	۲۴/۰۵/۱۴۰۳	۲۷/۰
۴	۰۹/۰۴/۱۴۰۳	۱۲/۱	۲۰	۲۷/۰۵/۱۴۰۳	۲۹/۴
۵	۱۱/۰۴/۱۴۰۳	۹/۲	۲۱	۳۰/۰۵/۱۴۰۳	۲۶/۴
۶	۱۴/۰۴/۱۴۰۳	۱۲/۲	۲۲	۰۲/۰۶/۱۴۰۳	۲۳/۶
۷	۱۷/۰۴/۱۴۰۳	۱۲/۶	۲۳	۰۵/۰۶/۱۴۰۳	۲۶/۲
۸	۲۰/۰۴/۱۴۰۳	۱۲/۷	۲۴	۰۸/۰۶/۱۴۰۳	۲۷/۸
۹	۲۴/۰۴/۱۴۰۳	۱۶/۴	۲۵	۱۱/۰۶/۱۴۰۳	۲۲/۱
۱۰	۲۸/۰۴/۱۴۰۳	۱۵/۴	۲۶	۱۴/۰۶/۱۴۰۳	۲۲/۵
۱۱	۳۱/۰۴/۱۴۰۳	۱۲/۶	۲۷	۱۷/۰۶/۱۴۰۳	۲۵/۳
۱۲	۰۳/۰۵/۱۴۰۳	۱۴/۴	۲۸	۲۰/۰۶/۱۴۰۳	۲۰/۵
۱۳	۰۶/۰۵/۱۴۰۳	۱۶/۶	۲۹	۲۳/۰۶/۱۴۰۳	۲۲/۴
۱۴	۰۹/۰۵/۱۴۰۳	۱۸/۶	۳۰	۲۶/۰۶/۱۴۰۳	۲۲/۰
۱۵	۱۲/۰۵/۱۴۰۳	۲۰/۲	۳۱	۲۹/۰۶/۱۴۰۳	۱۸/۲
۱۶	۱۵/۰۵/۱۴۰۳	۲۲/۱	----	----	----

مجموع مقادیر آبیاری برای هر تیمار و تبخیرتغرق مرجع (ET_0) طی دوره رشد ذرت علوفه‌ای در جدول ۶ ارائه شده است. مقدار نیاز آبی ذرت علوفه‌ای (ET_c) در این مطالعه ۵۵۶/۹ میلی‌متر محاسبه گردید که با آمار گزارش شده در سامانه نیاز آبی گیاهان کشور تحت نظر موسسه تحقیقات خاک و آب، برای نیاز آبی ذرت علوفه‌ای تابستانه در منطقه کرج در دوره طولانی مدت (۱۳۸۵-۱۴۰۲) برابر با ۵۵۲/۵۴ میلی‌متر، همخوانی دارد.

جدول ۶. مقادیر آبیاری، تبخیرتغرق مرجع و گیاه ذرت علوفه‌ای (mm) طی دوره رشد محصول

تیمار	کم‌آبیاری			ET _c	ET ₀
	شماره ۱ (% ۶۰)	شماره ۲ (% ۸۰)	شماره ۳ (% ۱۰۰)		
مجموع (mm)	۳۴۸/۷	۴۶۴/۹	۵۸۱/۲	۵۵۶/۹	۶۴۲/۵

در شکل ۳، عمق آبیاری تیمارهای آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه)، تیمار آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه در هر نوبت آبیاری نمایش داده شده است.



شکل ۳. عمق آبیاری تیمارهای ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه ذرت علوفه‌ای در طول فصل کشت

شاخص تنش آبی گیاه

شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)، از اختلاف بین دمای پوشش سبز گیاه (T_c) و دمای هوا (T_a) محاسبه می‌شود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶) که این شاخص نیز، برای اولین بار در سال ۱۹۸۱ معرفی گردید (Idso et al., 1981). شاخص CWSI یکی از معیارهایی است که وضعیت آب در گیاه را بر اساس تفاوت دما بین پوشش سبز گیاه و دمای هوا ($T_c - T_a$) نشان می‌دهد. به منظور بررسی و تشریح شاخص CWSI، رابطه‌ای بر اساس دو پارامتر ($T_c - T_a$) و فشار بخار نسبی هوا (AVPD) ارائه شده است (رابطه ۱) که خط حاصل از این رابطه به عنوان خط مبنای پایین (L.L.) شناخته می‌شود (Idso et al., 1981; Taghvaeian et al., 2013).

$$(T_c - T_a)_{L.L} = a - b(AVPD) = a - b \left\{ 10 \times e^{\left[\frac{16.78T_a - 116.9}{T_a + 237.3} \right]} \times \left(1 - \frac{RH}{100} \right) \right\} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه ۱، T_c دمای پوشش سبز گیاه و T_a دمای هوا (بر حسب درجه سلسیوس) است. همچنین، AVPD نشان‌دهنده کمبود فشار بخار هوا با واحد میلی‌بار (mbar) و RH رطوبت نسبی (بر حسب درصد) می‌باشد. ضرایب a و b نیز ثابت هستند و مقدار آن‌ها برای گیاهان زراعی با درختان میوه متفاوت است. خط مبنای پایینی یک ویژگی خاص برای هر گیاه به شمار می‌رود و نشان‌دهنده شرایطی است که در آن گیاه از نظر تأمین آب از ناحیه ریشه با هیچ محدودیتی مواجه نیست و میزان تبخیرپذیری هوا نیز در محدوده حداکثر خود قرار دارد (Idso et al., 1981). به عبارت دیگر، خط مبنای پایین مشخص کننده مکان هندسی نقاطی است که در آن‌ها میزان تبخیرتورق حداکثر می‌باشد (تبخیرتورق پتانسیل) و به عنوان خط مبنای بدون تنش نیز شناخته می‌شود. از سوی دیگر، خط مبنای بالا (U.L.) یا خط تنش کامل، معرف حداکثر مقداری است که می‌توان برای اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا ($T_c - T_a$) توقع داشت. این خط بیان کننده توقف کامل عمل تعرق گیاه و مستقل از AVPD است. موقعیت خط مبنای بالا با استفاده از رابطه ۲ بدست می‌آید (Idso et al., 1981).

$$(T_c - T_a)_{U.L} = a + b(AVPG) = a + b\{e_s(T_a + a) - e_s(T_a)\} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$e_s(T_a) = \left(0.6108 \times e^{\left(\frac{17.34 \times T_a}{237.3 + T_a} \right)} \right) \times \left(\frac{1000}{101} \right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن AVPG به شیب فشار بخار هوا (mbar) اشاره دارد، در حالی که e_s فشار بخار اشباع است که از رابطه ۳ و ضرایب a و b از خط مبنای پایین بدست می‌آیند. با توجه به رابطه ۳، زمانی که هوا از بخار آب اشباع باشد، میزان تعرق کاهش می‌یابد، اما متوقف نمی‌شود. به دلیل وجود شیب فشار بخار بین پوشش گیاهی و هوا، عمل تعرق همچنان ادامه خواهد داشت. لذا زمانی که مقدار ($T_c - T_a$) بیش‌تر از مقدار عرض از مبدا (a) خط مبنای پایین (رابطه ۲) گردد، در این صورت تعرق به‌طور کامل متوقف می‌شود (Idso et al., 1981). شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) در یک مقدار مشخص از کمبود فشار بخار آب، نسبت بین تفاوت دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوای اندازه‌گیری شده از خط مبنای پایین به کل تفاوت ممکن برای همان مقدار کمبود فشار بخار آب است (Idso et al., 1981). این نسبت از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$CWSI = \frac{dT_m - dT_{L.L}}{dT_{U.L} - dT_{L.L}} = \frac{(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{L.L}}{(T_c - T_a)_{U.L} - (T_c - T_a)_{L.L}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه ۴، $(T_c - T_a)_m$ اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا (قبل از آبیاری) در زمان اندازه‌گیری، $(T_c - T_a)_{L.L}$ اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا در شرایط حداکثر تعرق واقع بر خط مبنای پایین (بعد از آبیاری) و $(T_c - T_a)_{U.L}$ عددی ثابت در شرایط حداقل تعرق واقع بر

خط مبنای بالا (بعد از آبیاری) برحسب درجه سلسیوس ($^{\circ}\text{C}$) است.

بر اساس مقادیر CWSI محاسبه‌شده از رابطه ۴ و با استفاده از رابطه ۵، روابط مورد نیاز برای برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای در دوره‌های مختلف رشد قابل استخراج است. در استخراج روابط نیز، این فرض در نظر گرفته شده است که گیاه تنها تحت تأثیر تنش آبی قرار دارد و سایر تنش‌های محیطی تأثیری بر آن نداشته‌اند.

$$\text{CWSI}_i = \frac{(T_c - T_a)_c - [a - b(\text{AVPD})]}{(T_c - T_a)_{\text{U.L.}} - [a - b(\text{AVPD})]} \quad (\text{رابطه } ۵)$$

اندازه‌گیری دمای پوشش سبز گیاه

در این تحقیق، دمای پوشش سبز گیاه ذرت (T_c) با دستگاه مادون قرمز دستی که مشخصات فنی آن در جدول ۷ ارائه شده است، اندازه‌گیری شد. میدان دید دستگاه تعیین‌کننده وسعت ناحیه اندازه‌گیری است و با افزایش فاصله دستگاه تا برگ، گسترده‌تر می‌شود. به دلیل تأثیر جهت تابش خورشید و تفاوت دمای برگ‌ها، اندازه‌گیری‌ها در روزهای آفتابی از چهار جهت جغرافیایی و سه ارتفاع گیاه انجام و میانگین ۱۲ قرائت برای هر تیمار محاسبه شد. اندازه‌گیری‌ها بین ساعت ۸:۳۰ تا ۱۴:۳۰ و به فاصله یک ساعت تکرار شدند و در مجموع روزانه برای هر تیمار ۲۵۲ قرائت ثبت گردید. به دلیل تراکم کم‌تر پوشش گیاهی در بازه زمانی ۱ تا ۲۰ تیر و تأثیر دمای سطح خاک، در این بازه اندازه‌گیری T_c انجام نشد. برای استخراج معادلات خطوط مبنای دمای برگ در روزهای پس از آبیاری تیمار بدون تنش (تیمار ۳) به‌صورت ساعتی ثبت شد. همچنین، دمای برگ در روزهای قبل از آبیاری برای تمام تیمارها جهت محاسبه شاخص CWSI اندازه‌گیری گردید.

جدول ۷. مشخصات دستگاه دماسنج مادون قرمز

مدل دستگاه	Infrared Thermometers UT300S
دامنه اندازه‌گیری	-32 to 400 $^{\circ}\text{C}$ (-25.6 to 752 $^{\circ}\text{F}$)
دقت اندازه‌گیری	$\pm 2\%$ ($^{\circ}\text{C}$) in each measurement or $\pm 2\%$ ($^{\circ}\text{F}$)
طول موج μm	8-14 Spectral Response
میدان دید	Distance (D) to Spot Size (S) $\rightarrow$ D:S = 12:1

یافته‌های پژوهشی و بحث

استخراج معادلات خطوط مبنای پایین و بالا

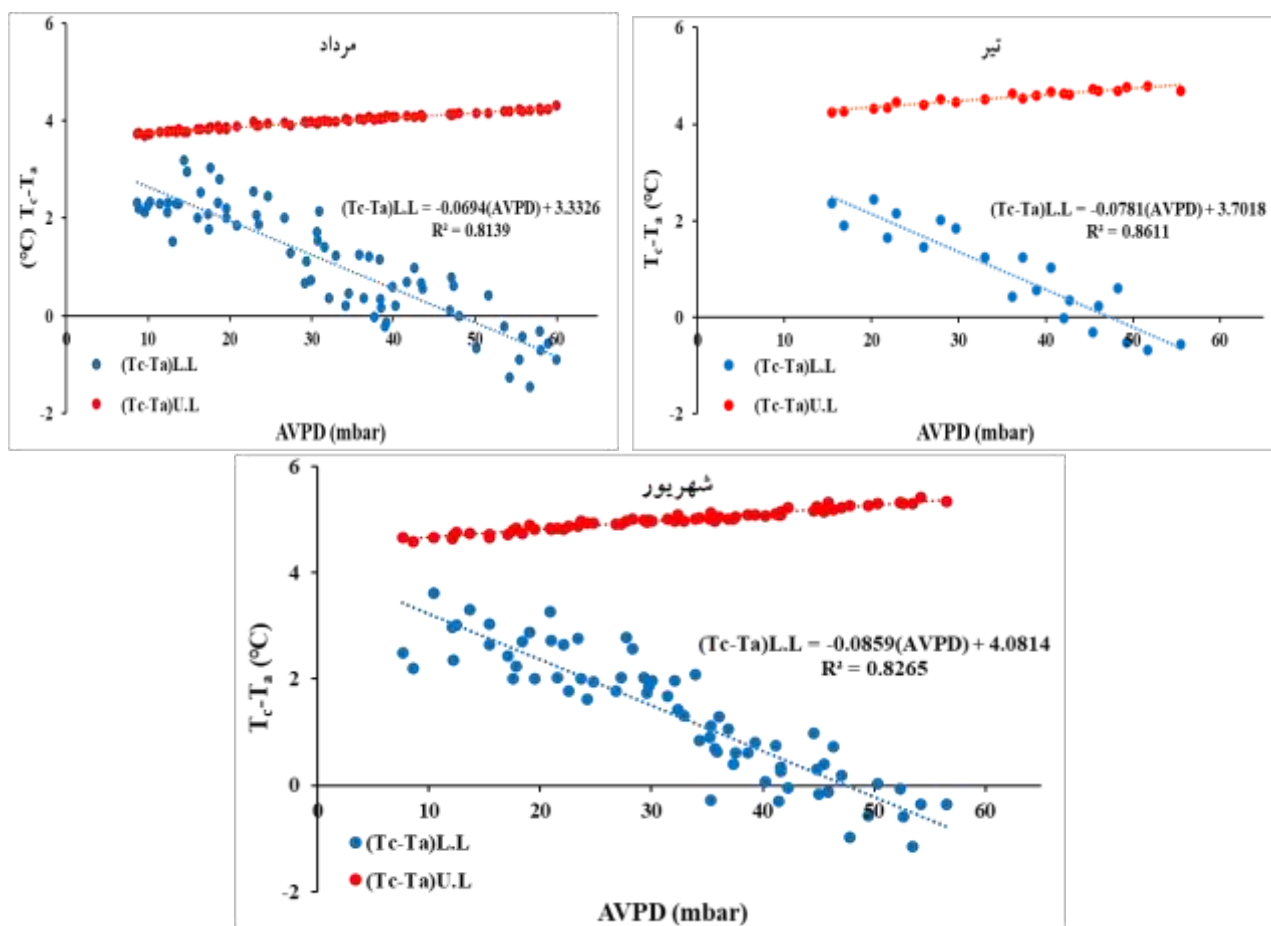
با استفاده از روش ایدسو به منظور استخراج رابطه خط مبنای پایین در روزهای مختلف (ماه‌های تیر، مرداد و شهریور) بعد از آبیاری، مقادیر اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوا ($T_c - T_a$) در مقابل کمبود فشار بخار هوا (AVPD) ترسیم شد (شکل ۴). سپس روابط رگرسیونی برای ماه‌های تیر، مرداد و شهریور استخراج گردید (جدول ۸). با توجه به این شکل، محدوده کمبود فشار بخار هوا و اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوا در طول مراحل رشد ذرت علوفه‌ای به ترتیب، ۷/۶۷ الی ۵۹/۸۹ میلی‌بار و ۳/۶۳ الی ۱/۴۶- درجه سانتی‌گراد است. معادلات خطوط مبنای پایین که در مراحل مختلف رشد گیاه برازش داده شده‌اند، می‌توانند در مکان‌های مختلف برای ذرت علوفه‌ای استفاده شوند، مشروط بر اینکه محدوده AVPD گسترده باشد. اگر این بازه محدودتر باشد، چنین امکانی برای استفاده از این معادلات فراهم نخواهد بود (Gardner et al., 1981). با افزایش AVPD، ($T_c - T_a$) (از نظر قدر مطلق) هم افزایش می‌یابد. میزان این افزایش با گذشت زمان کاهش می‌یابد و به تیمار آبیاری هم وابسته است (Taghvaeian et al., 2013). این افزایش همراه با افزایش تبخیر-تعرق است و اگر نیاز آبی محصول تأمین شود، گیاه خنک نگه داشته می‌شود (سعیدی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۵). بررسی این روابط رگرسیونی نشان می‌دهد که برای هر سه ماه، ضرایب a (عرض از مبدأ) و b (ضریب زاویه) دارای مقادیر متفاوتی هستند و شیب خط برای هر سه ماه منفی به‌دست آمد. مقادیر متفاوت این ضرایب نشان‌دهنده تفاوت در پتانسیل جذب آب و مقدار تعرق در طول مراحل رشد محصول است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶). خط مبنای پایین یا خط بدون تنش، شرایطی را نشان می‌دهد که در آن محصول از نظر تأمین آب با هیچ محدودیتی مواجه نیست (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵). همچنین با استفاده از روش ایدسو، مقادیر خط مبنای بالا برای ذرت علوفه‌ای در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به ترتیب ۴/۵۵، ۳/۹۸ و ۵/۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. این مقادیر نشان‌دهنده تفاوت در مقدار خط مبنای بالا برای مراحل مختلف رشد ذرت علوفه‌ای است و وضعیت اشباع هوا از بخار آب، توقف کامل تعرق در هر مرحله رشد و در نتیجه بیش‌ترین تنش وارد شده بر آن را منعکس می‌کند (جدول ۸). در تحقیقی برای ذرت بهاره در شمال خوزستان، مقادیر خط مبنای بالا برای دو ماه اردیبهشت



و خرداد به ترتیب ۲ و ۴/۵ درجه سانتی گراد به دست آمد (طاهری قناد، ۱۳۸۷). در تحقیقات دیگر، خط مبنای بالا برای ذرت در منطقه کرج ۳/۲ درجه سانتی گراد و در شرایط آب و هوایی اهواز برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد به ترتیب ۴/۳۴، ۶/۱۰ و ۴/۶۴ درجه سانتی گراد گزارش شده است (وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۵). بر اساس نتایج تحقیقات پیشین در زمینه برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس شاخص CWSI، مشخص می‌شود که موقعیت خطوط مبنای بالا (تنش کامل) به نوع گیاه و شرایط آب و هوایی هر منطقه بستگی دارد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

جدول ۸. معادلات مربوط به خطوط مبنای پایین و بالا به روش ایدسو

ماه	مراحل رشدی	خط مبنای پایین	خط مبنای بالا	R ²	P-value
تیر	دوره رویشی - گل‌آغازی	$3/7018(AVPD) + 0/0781(T_c - T_a)_{LL} = -$	$4/55(T_c - T_a)_{UL} =$	۰/۸۶	۰/۰۰۱ <
مرداد	گلدهی - تلقیح	$3/3326(AVPD) + 0/0694(T_c - T_a)_{LL} = -$	$3/98(T_c - T_a)_{UL} =$	۰/۸۱	۰/۰۰۱ <
شهریور	دانه بستن - پرشدن دانه	$4/0814(AVPD) + 0/0859(T_c - T_a)_{LL} = -$	$5/00(T_c - T_a)_{UL} =$	۰/۸۳	۰/۰۰۱ <



شکل ۴. نمودار خطوط مبنای پایین و بالا برای ماه‌های مختلف در طول فصل کشت ذرت علوفه‌ای با روش آبیاری قطره‌ای

در یک پژوهش اشاره شده است که خطوط مبنای پایین و بالا باید به صورت جداگانه برای ماه‌های مختلف در طول دوره رشد محصول ارائه شوند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۵). اختصاصی بودن این خطوط برای هر محصول نشان می‌دهد که در هنگام تعرق حداکثر، هر یک از محصولات به میزان معینی در برابر تغییرات محیطی (تنش‌ها و پارامترهای هواشناسی) واکنش نشان می‌دهند، که مقادیر تعرق در محصولات مختلف متفاوت است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶). بنابراین، لازم است موقعیت این خطوط برای محصولات مختلف در طول دوره رشد گیاه، بر اساس نوع سیستم آبیاری و شرایط مدیریتی مشخص شود تا برنامه‌ریزی آبیاری دقیق‌تری امکان‌پذیر گردد. به دلیل حجم بالای داده‌های جمع‌آوری شده در مزرعه، نمونه محاسبات خطوط مبنای پایین و بالا برای بخشی از داده‌های دمای

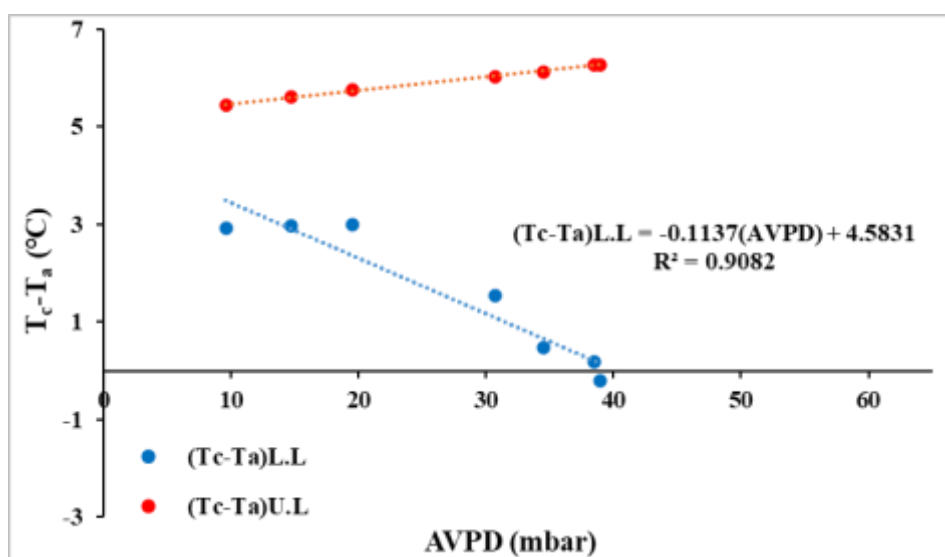
پوشش سبز گیاه ذرت علوفه‌ای در تاریخ ۱۴۰۳/۰۵/۲۸ (بعد از آبیاری) برای تیمار شاهد در جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. همچنین، رابطه رگرسیونی بین اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوا ($T_c - T_a$) در مقابل کمبود فشار بخار هوا (AVPD) برای تعیین خطوط مبنای پایین و بالا در تاریخ مذکور رسم شده است که نمودار آن در شکل ۵ قابل مشاهده است. با توجه به این شکل، با افزایش کمبود فشاربخار هوا، قدر مطلق اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا نیز افزایش می‌یابد. افزایش کمبود فشاربخار هوا همراه با افزایش تبخیر-تعرق است و اگر نیاز آبی محصول تأمین گردد گیاه خنک نگه‌داشته می‌شود (سعیدی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۵). مقادیر a ، b و مقدار خط مبنای بالا در این شکل به ترتیب ۴/۵۸۳۱، ۰/۱۱۳۷ و ۵/۹۳ به‌دست آمد.

جدول ۹. محاسبات مربوط به اندازه‌گیری خط مبنای پایین (L.L.) برای تیمار شاهد در تاریخ ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

ساعات اندازه‌گیری	۳۰:۸	۳۰:۹	۳۰:۱۰	۳۰:۱۱	۳۰:۱۲	۳۰:۱۳	۳۰:۱۴
T_c (°C)	۲۳/۳۳	۲۶/۷۶	۲۹/۳۰	۳۲/۱۵	۳۲/۳۶	۳۳/۷۸	۳۳/۵۹
T_a (°C)	۲۰/۴۰	۲۳/۸۰	۲۶/۳۰	۳۰/۶۰	۳۱/۹۰	۳۳/۶۰	۳۳/۸۰
$T_c - T_a$ (°C)	۲/۹۳	۲/۹۶	۳/۰۰	۱/۵۵	۰/۴۶	۰/۱۸	۰/۲۱
RH (%)	۶۰/۰۰	۵۰/۰۰	۴۳/۰۰	۳۰/۰۰	۲۷/۰۰	۲۶/۰۰	۲۶/۰۰
AVPD (mbar)	۹/۵۹	۱۴/۷۵	۱۹/۵۱	۳۰/۷۶	۳۴/۵۴	۳۸/۵۲	۳۸/۹۵

جدول ۱۰. محاسبات مربوط به اندازه‌گیری خط مبنای بالا (U.L.) برای تیمار شاهد در تاریخ ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

ساعات اندازه‌گیری	۳۰:۸	۳۰:۹	۳۰:۱۰	۳۰:۱۱	۳۰:۱۲	۳۰:۱۳	۳۰:۱۴
T_a (°C)	۲۰/۴۰	۲۳/۸۰	۲۶/۳۰	۳۰/۶۰	۳۱/۹۰	۳۳/۶۰	۳۳/۸۰
$T_a + a$ (°C)	۲۴/۹۸	۲۸/۳۸	۳۰/۸۸	۳۵/۱۸	۳۶/۴۸	۳۸/۱۸	۳۸/۳۸
$e_s(T_a)$ (mbar)	۲۳/۷۳	۲۹/۱۹	۳۳/۸۸	۴۳/۴۸	۴۶/۸۱	۵۱/۵۰	۵۲/۰۸
$e_s(T_a + a)$ (mbar)	۳۱/۳۳	۳۸/۲۷	۴۴/۱۹	۵۶/۲۴	۶۰/۴۰	۶۶/۲۴	۶۶/۹۶
AVPG (mbar)	۷/۶۰	۹/۰۸	۱۰/۳۱	۱۲/۷۶	۱۳/۵۹	۱۴/۷۴	۱۴/۸۸
$(T_c - T_a)_{U.L.}$ (°C)	۵/۴۵	۵/۶۲	۵/۷۶	۶/۰۳	۶/۱۳	۶/۲۶	۶/۲۷



شکل ۵. نمودار خطوط مبنای پایین و بالا برای تیمار شاهد در تاریخ ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

ارتباط شاخص تنش آبی گیاه با تبخیر-تعرق و عمق کل آبیاری

شاخص CWSI نشان‌دهنده رابطه بین تعرق و تأمین آب در پوشش گیاهی است (Chen et al., 2010). برای محاسبه CWSI، ابتدا باید خطوط مبنای پایین و بالا برای هر گیاه توسعه داده شوند (Taghvaeian et al., 2013). پس از مشخص شدن معادلات خطوط مبنای پایین و بالا برای سه ماه تیر، مرداد و شهریور و محاسبه میانگین اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا در روزهای قبل از آبیاری، مقادیر CWSI با استفاده از رابطه ۴ برای هر سه تیمار محاسبه شد (جدول ۱۱).



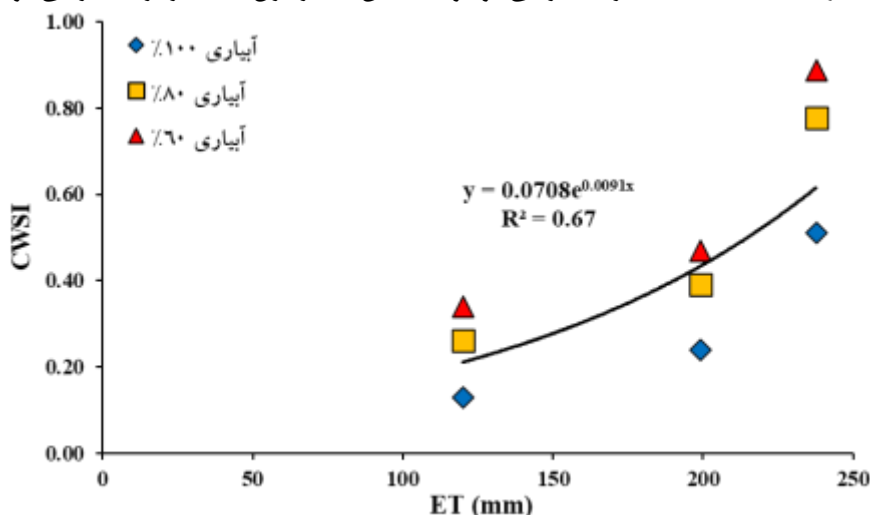
جدول ۱۱. مقادیر شاخص CWSI و تبخیر تعرق بدون احتساب راندمان در طول فصل رشد ذرت علوفه‌ای

ماه	مراحل رشدی	تیمار ۶۰٪	تیمار ۸۰٪	تیمار ۱۰۰٪	ET (mm)
تیر	دوره رویشی - گل‌آغازی	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۱۳	۱۲۰/۰
مرداد	گلدهی - تلقیح	۰/۸۹	۰/۷۸	۰/۵۱	۲۳۷/۷
شهریور	دانه‌بستن - پرشدن دانه	۰/۴۷	۰/۳۹	۰/۲۴	۱۹۹/۲
	متوسط	۰/۵۷	۰/۴۸	۰/۲۹	----

با توجه به جدول ۱۱، مقادیر شاخص تنش آبی گیاه برای تیمار شاهد در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به ترتیب برابر ۰/۱۳، ۰/۵۱ و ۰/۲۴ محاسبه شد. همچنین، مقادیر متوسط CWSI برای سه تیمار با نیاز آبی ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب ۰/۵۷، ۰/۴۸ و ۰/۲۹ به دست آمد. طبق تحقیقات ایدسو (Idso et al., 1981)، دامنه تغییرات CWSI بین صفر و یک است، اما برخی تحقیقات نشان داده‌اند که مقادیر CWSI می‌تواند از این بازه فراتر روند (Taghvaeian et al., 2013). در شرایط خاص رطوبتی خاک، اتمسفر و گیاه، ممکن است که مقادیر $(T_c - T_a)_m$ بزرگ‌تر از $(T_c - T_a)_{U.L.}$ باشد، که در این صورت CWSI می‌تواند کمی بزرگ‌تر از یک نیز باشد (DeJonge et al., 2015). حداکثر شاخص تنش آبی گیاه برای هر سه تیمار در مرداد ماه رخ داد و بیش‌ترین مقدار شاخص تنش آبی مربوط به تیمار کم‌آبیاری شدید بود. در شرایط آبیاری کم‌تر، گیاه به‌منظور مقابله با کم‌آبی، روزنه‌های خود را می‌بندد (Taghvaeian et al., 2013)، که منجر به افزایش دمای پوشش گیاهی می‌شود و در نتیجه، شاخص تنش آبی گیاه نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه شرایط اقلیمی برای همه تیمارها یکسان بود، تنها عامل افزایش بیش‌تر CWSI در تیمار ۶۰ درصد، افزایش T_c بود. به‌طور کلی، مقادیر CWSI با افزایش تنش آبی افزایش می‌یابد (Ahi et al., 2015).

شاخص تنش آبی گیاه به‌طور گسترده در تحقیقات داخلی و خارجی به منظور مدیریت آبیاری گیاهان به کار گرفته شده است. برای مثال، در یک مطالعه روی ذرت در شرایط نیمه‌خشک مدیریتانه‌ای ترکیه، مشخص شد که برای جلوگیری از کاهش عملکرد محصول، مقدار میانگین فصلی CWSI باید زیر ۰/۲۲ باشد (Irmak et al., 2000). در تحقیقات پیشین، مقادیر شاخص CWSI برای ذرت تحت شرایط بدون تنش در مناطق مختلف آمریکا، شمال خوزستان، کرج، اهواز و ارومیه به ترتیب ۰/۲۳، ۰/۲۱، ۰/۴۶، ۰/۲۵ و ۰/۲۸ گزارش شده است (Idso et al., 1981؛ طاهری‌قناد، ۱۳۸۷؛ وردی‌نژاد و همکاران ۱۳۹۰؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۵؛ خورسند و همکاران، ۱۳۹۸). که علت تفاوت در مقادیر این شاخص را می‌توان ناشی از تغییرات آب و هوایی دانست. در یک تحقیق دیگر که در اهواز انجام شد، مقدار متوسط شاخص تنش آبی گیاه برای ذرت تحت آبیاری سطحی (جویچه‌ای) و بارانی (کلاسیک ثابت با آبیاری متحرک) به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۱۶ محاسبه شد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۵). این مطالعه نشان داد که نوع سیستم آبیاری نیز بر مقدار این شاخص تأثیر می‌گذارد. در تحقیق حاضر، متوسط این شاخص برای تیمار شاهد تحت آبیاری قطره‌ای سطحی ۰/۲۹ به دست آمد.

با توجه به جدول ۱۱، حداکثر و حداقل تبخیر تعرق به ترتیب در مرداد و تیرماه اتفاق افتاده و به تبع آن حداکثر و حداقل مقدار شاخص تنش آبی گیاه برای هر سه تیمار نیز در این ماه‌ها به دست آمد. به‌طور کلی، رابطه بین CWSI و تبخیر تعرق مستقیم است؛ یعنی با افزایش تبخیر تعرق، مقدار CWSI به عدد یک نزدیک‌تر می‌شود و با کاهش تبخیر تعرق، به صفر نزدیک‌تر می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶. رابطه بین CWSI با تبخیر تعرق هر ماه

برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه

با توجه به اینکه کم‌ترین مقدار CWSI ($0/39$) در تیمار شاهد (بدون تنش) به دست آمد، این تیمار به عنوان مبنای برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای در منطقه کرج با استفاده از روش ایدسو در نظر گرفته شد. مقادیر CWSI با استفاده از رابطه ۴ در جدول ۱۱ ارائه شده است. بر اساس مقادیر این شاخص و رابطه ۵، روابط مورد نیاز برای برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای برای ماه‌های تیر، مرداد و شهریور استخراج شد (جدول ۱۲).

برای تشخیص زمان مناسب آبیاری (قبل از اینکه تنش به گیاه وارد شود)، باید مقادیر کمبود فشار بخار اشباع هوا را در ساعات $11:30$ تا $14:30$ اندازه‌گیری کرد و با استفاده از روابط استخراج شده برای هر ماه (جدول ۱۲)، مقدار $(T_c - T_a)_c$ مجاز را محاسبه کرد. سپس، مقدار $(T_c - T_a)_m$ در شرایط حداکثر تنش (ساعات $11:30$ تا $14:30$) با استفاده از مادون قرمز دستی قابل اندازه‌گیری و محاسبه است. با مقایسه $(T_c - T_a)_m$ (اندازه‌گیری شده) و $(T_c - T_a)_c$ (مجاز محاسبه شده)، می‌توان زمان آبیاری را تعیین نمود. اگر متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده از مقدار مجاز محاسبه شده کمتر باشد، هنوز زمان آبیاری فرا نرسیده است، اما اگر از مقدار مجاز محاسبه شده بزرگ‌تر باشد، یعنی زمان آبیاری گذشته است. همچنین، مقدار برابر بین $(T_c - T_a)_m$ و $(T_c - T_a)_c$ نشان‌دهنده انجام آبیاری در آن زمان است (طاهری‌قناد، ۱۳۸۷؛ وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۶).

جدول ۱۲. روابط مورد استفاده برای برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای در منطقه کرج

ماه	مراحل رشدی	روابط برنامه‌ریزی آبیاری
تیر	دوره رویشی - گل آغازی	$3/8121(AVPD) + 0/0679(T_c - T_a)_c = -$
مرداد	گلدهی - تلقیح	$3/6628(AVPD) + 0/0341(T_c - T_a)_c = -$
شهریور	مرحله خمیری	$4/3019(AVPD) + 0/0653(T_c - T_a)_c = -$

نتایج مطالعه حاضر قابل مقایسه با نتایج پژوهشی است که در منطقه کرج روی ذرت علوفه‌ای در سال ۱۳۸۴ انجام شده است. در آن تحقیق، برای برنامه‌ریزی آبیاری، معادلاتی برای سه دوره مختلف رشد محصول (ظهور کاکل‌ها، کامل شدن تاج گل و مرحله خمیری) به صورت $(T_c - T_a)_c = -0.0619(AVPD) + 2.68$ ، $(T_c - T_a)_c = -0.1093(AVPD) + 2.17$ و $(T_c - T_a)_c = -0.0949(AVPD) + 2.31$ گزارش شده است (وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). در مورد اختلاف اندک بین روابط مطالعه حاضر با مطالعه مشابه، گرچه ظاهراً قابل توجیه با تغییرات اقلیمی نزدیک به ۲۰ سال است، اما بررسی پارامترهای اقلیمی اختلاف معناداری نشان نداد. بنابراین علت اصلی تفاوت، ناشی از روش‌شناسی است. در مطالعه مذکور، روابط خط مبنا برای کل فصل و مبتنی بر فرضیات استخراج شده، اما در پژوهش حاضر روابط به صورت مرحله‌ای و مستقیم از داده‌های میدانی محاسبه گردیده است که خطای تعمیم را کاهش می‌دهد. تحقیق دیگری نیز، در شرایط اقلیمی اهواز روی ذرت نشان داد که برنامه‌ریزی آبیاری برای تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد به ترتیب با روابط $(T_c - T_a)_c = -0.14(AVPD) + 3.47$ ، $(T_c - T_a)_c = -0.12(AVPD) + 4.88$ و $(T_c - T_a)_c = -0.08(AVPD) + 3.77$ محاسبه شده است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵). علاوه بر این، روابط $(T_c - T_a)_c = -0.1553(AVPD) + 3.4617$ ، $(T_c - T_a)_c = -0.0556(AVPD) + 2.5536$ و $(T_c - T_a)_c = -0.1572(AVPD) + 7.2806$ نیز به ترتیب برای ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به منظور برنامه‌ریزی آبیاری ذرت دانه‌ای در منطقه ارومیه گزارش شده‌اند (خوړسند و همکاران، ۱۳۹۸).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف پژوهش حاضر، بهبود مدیریت آب کشاورزی از طریق برنامه‌ریزی آبیاری مبتنی بر دمای پوشش سبز گیاه (T_c) و شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) برای ذرت علوفه‌ای (SC704) تحت آبیاری قطره‌ای سطحی در کرج بود. با توجه به بحران کم‌آبی ناشی از محدودیت منابع، تغییرات اقلیمی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی ضرورت یافته است. با وجود کارایی بالای شاخص CWSI در سطح بین‌المللی، این روش در داخل کشور کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ از این رو، توسعه استفاده از این شاخص برای محصولات مختلف در مناطق گوناگون ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، سه تیمار آبیاری (80 ، 100 و 120 درصد نیاز آبی) در قالب سه تکرار با روش آبیاری قطره‌ای ارزیابی و دمای برگ ذرت با دماسنج مادون قرمز دستی پایش شد.

با بهره‌گیری از روش تجربی ایدسو، خطوط مبنای بالا و پایین و شاخص CWSI برای هر تیمار استخراج شد. میانگین CWSI تیمارهای آبیاری 80 ، 100 و 120 درصد نیاز آبی به ترتیب $0/57$ ، $0/48$ و $0/29$ محاسبه گردید که بیانگر افزایش تنش آبی با کاهش آب



مصرفی است. با مبنا قرار دادن تیمار آبیاری کامل (بدون تنش)، روابط اختصاصی برای تعیین زمان آبیاری در مراحل مختلف رشد محصول به ترتیب به صورت $(T_c - T_a)_c = -0.0679(AVPD) + 3.8121$ ، $(T_c - T_a)_c = -0.0341(AVPD) + 3.6628$ و $(T_c - T_a)_c = -0.0679(AVPD) + 3.8121$ بر اساس فشار بخار نسبی (AVPD) و اختلاف دمای گیاه و هوا ($T_c - T_a$) ارائه شد. این روابط امکان برنامه‌ریزی دقیق و متناسب با شرایط اقلیمی را تنها با اندازه‌گیری دمای هوا، رطوبت نسبی و دمای سطح برگ فراهم می‌کند. برخلاف روش‌های متداول مبتنی بر پارامترهای هواشناسی و رطوبت خاک، استفاده از دمای پوشش سبز گیاه (T_c) به دلیل ارتباط مستقیم با تعرق گیاه و تبخیر اتمسفر، دقت بالاتری در شناسایی زمان واقعی نیاز آبی گیاه داشته و از بروز تنش آبی و اتلاف منابع آب جلوگیری می‌نماید. سهولت اندازه‌گیری پارامترهای یادشده از طریق داده‌های هواشناسی و دماسنج مادون قرمز دستی، کاربرد گسترده این روش در مزارع را توجیه می‌کند.

از محدودیت‌های روش مادون قرمز، نیاز به تعیین خطوط مبنای بالا و پایین اختصاصی برای هر محصول و دشواری اندازه‌گیری دمای پوشش سبز گیاه در مراحل اولیه رشد به دلیل تراکم کم آن است. اگرچه مطالعات پیشین در ایران (از جمله در کرج) روابطی فصلی شاخص CWSI را برای ذرت ارائه داده‌اند، اما به منظور افزایش دقت، محاسبه این روابط به طور جداگانه برای هر دوره رشدی ضروری به نظر می‌رسد. از آنجا که برنامه‌ریزی آبیاری نیازمند تعیین همزمان زمان و عمق آبیاری است، توصیه می‌شود از دماسنج مادون قرمز برای تشخیص زمان شروع آبیاری استفاده شود و برای تعیین مقدار آب مصرفی، این روش با رویکردهای تکمیلی مانند اندازه‌گیری رطوبت خاک یا داده‌های هواشناسی ترکیب گردد. همچنین با توجه به کاربردی‌پذیری بالای شاخص CWSI، ارزیابی دقت آن نه تنها با روش تجربی ایدسو، بلکه با روش تئوری جکسون (بیلان انرژی) و فناوری‌های سنجش از دور توصیه می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران انجام شد. حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه تهران، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه آبیاری و آبادانی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: محمد مهدی جعفری؛ تهیه گزارش پژوهش: محمد مهدی جعفری؛ تحلیل داده‌ها: محمد مهدی جعفری
نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.
مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:
نویسنده اول: دانشجو؛ تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله
نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد راهنما پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله
نویسنده چهارم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش
از هیچ گونه فناوری مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش مقاله استفاده نشده است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران / دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی به خاطر حمایت مالی / حمایت معنوی / همکاری در اجرای

پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- احمدی، حامد؛ نصرالهی، علی‌حیدر؛ شریفی‌پور، مجید و عیسوند، حمیدرضا (۱۳۹۶). برنامه‌ریزی آبیاری سویا با استفاده از اختلاف دمای هوا و پوشش گیاهی. *مدیریت آب و آبیاری*، ۷ (۱)، ۱۲۱-۱۳۴.
- حمدی احمدآباد، یاسر؛ لیاقت، عبدالمجید؛ رسول‌زاده، علی و قادرپور، رسول (۱۳۹۸). بررسی روند سرانه مصرف آب در ایران براساس رژیم غذایی دو دهه گذشته. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰ (۱)، ۷۷-۸۷.
- خوهرسند، افشین؛ وردی‌نژاد، وحیدرضا؛ عسگرزاده، حسین؛ مجنون‌هریس، ابوالفضل؛ رحیمی، امیر؛ بشارت، سینا و صدرالدینی، علی‌اشرف (۱۳۹۸). تعیین شاخص تنش آبی (CWSI) جهت تشخیص زمان تنش آبی محصول ذرت در منطقه ارومیه. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰ (۴)، ۸۷۳-۸۸۴.
- زمانی، امید؛ مرتضوی، سید ابوالقاسم و بلالی، حمید (۱۳۹۳). بررسی بهره‌وری اقتصادی آب در محصولات مختلف زراعی در دشت بهار. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۲۸ (۱)، ۵۱-۶۲.
- سالاری، سمیرا؛ کاراندیش، فاطمه؛ حقیقت‌جو، پرویز و آلدایا، مایت (۱۴۰۱). استفاده کارآمد و پایدار از منابع آبی خوزستان با تدوین پنج مارک‌های ردپای آب. *فصلنامه حفاظت منابع آب و خاک*، ۱۲ (۱)، ۳۵-۴۹.
- سعیدی نیا، مهری؛ هوشمند، عبدالرحیم؛ برومند نسب، سعید؛ سلطانی محمدی، امیر و اندرزیان، بهرام (۱۳۹۴). بررسی تأثیر شوری آب آبیاری بر کارایی شاخص CWSI در شرایط اقلیمی اهواز. *مجله علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۹ (۴)، ۱-۱۲.
- سعیدی نیا، مهری؛ برومند نسب، سعید؛ هوشمند، عبدالرحیم؛ سلطانی محمدی، امیر و اندرزیان، بهرام (۱۳۹۵). قابلیت کاربرد شاخص CWSI برای برنامه‌ریزی آبیاری ذرت با آب شور در اهواز. *دانش آب و خاک*، ۲۶ (۱)، ۱۷۳-۱۸۵.
- سیفی، اکرم؛ میرلطیفی، سید مجید؛ دهقانی سانج، حسین و ترابی، منوچهر (۱۳۹۳). تعیین شاخص تنش آب برای درختان پسته تحت روش آبیاری قطره ای زیرسطحی با استفاده از اختلاف دمای تاج گیاه و هوا. *مدیریت آب و آبیاری*، ۴ (۱)، ۱۲۳-۱۳۶.
- طاهری‌قناد، سعید (۱۳۸۷). برنامه‌ریزی آبیاری مزارع با استفاده از یک روش مستقیم، دومین سمینار راهکارهای بهبود و اصلاح سامانه‌های آبیاری سطحی، ۲ خرداد ماه ۱۳۸۷، کرج، ایران، ۱-۸.
- غلامی، زینب؛ ابراهیمیان، حامد و نوری، حمیده (۱۳۹۵). بررسی بهره‌وری آب آبیاری در سیستم‌های آبیاری بارانی و سطحی (مطالعه موردی: دشت قزوین). *علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۹ (۳)، ۱۳۵-۱۴۶.
- قبادی، محبوبه؛ ابراهیمیان، حامد و عباسی، فریبرز (۱۳۹۵). بررسی تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری بر کارایی مصرف آب محصول ذرت با استفاده از مدل شبیه‌سازی فصلی آبیاری جویچه‌ای. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۰ (۳)، ۳۱۶-۳۲۶.
- قربانی، مریم؛ برومند نسب، سعید و سلطانی محمدی، امیر (۱۳۹۵). بررسی اثر شوری آب در آبیاری بارانی بر میزان شاخص CWSI برای برنامه‌ریزی آبیاری ذرت تابستانه. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۹ (۳)، ۶۳-۷۱.
- محمدی، هادی؛ برومند نسب، سعید؛ نصرالهی، علی‌حیدر و ایزدپناه، زهرا (۱۳۹۵). بررسی تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری قطره‌ای ذرت روی شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)، دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۲-۴ شهریور ۱۳۹۵، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱-۱۰.
- موحدی، محمدرضا و صالحی، بهروز (۱۳۸۹). بررسی اثر فاصله ردیف و تراکم کاشت بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت دانه‌ای سینگل کراس ۷۱۱ در منطقه میانه. *بوم‌شناسی گیاهان زراعی*، ۶ (۱۸)، ۹۷-۱۰۴.
- موسوی، سیدمحمدسعید؛ الباجی، محمد؛ ناصری، عبدعلی؛ گلابی، منا و مرادی تلاوت، محمدرضا (۱۴۰۳). کاربرد شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) برای برنامه‌ریزی آبیاری گلرنگ در شرایط اقلیمی خوزستان. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۱۱ (۱)، ۱۸۳-۲۰۰.
- وردی‌نژاد، وحیدرضا؛ بشارت، سینا؛ عبقری، هیراد و احمدی، حجت (۱۳۹۰). برآورد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی ذرت علوفه ای در مراحل مختلف رشد با استفاده از اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۵ (۶)، ۱۳۴۴-۱۳۵۲.

REFERENCES

Ahi, Y., Orta, H., Gündüz, A., & Gültaş, H. T. (2015). The canopy temperature response to vapor pressure



- deficit of grapevine cv, Semillon and Razaki. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 399-407.
- Ahmadi, H., nasrolahi, A., sharifipur, M., & isvand, H. R. (2017). Soybean irrigation scheduling by using the temperature difference of the air and canopy cover. *Journal of Water and Irrigation Management*, 7 (1), 121-134. (In Persian).
- Akkuzu, E., Kaya, U., Camoglu, G., Pamuk, G., & Asik, S. (2015). Determination of Crop Water Stress Index and Irrigation Timing on Olive Trees Using a Handheld Infrared Thermometer. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141 (10), 1-12.
- Bellvert, J., Marsal, J., Girona, J., & Zarco-Tejada, P. J. (2015). Seasonal evolution of crop water stress index in grapevine varieties determined with high-resolution remote sensing thermal imagery. *Irrigation Science*, 33 (2), 81-93.
- Bhatti, S., Heeren, D. M., O'Shaughnessy, S. A., Neale, C. M. U., LaRue, J., Melvin, S., Wilkening, E., & Bai, G. (2023). Toward automated irrigation management with integrated crop water stress index and spatial soil water balance. *Precision Agriculture*, 24, 2223-2247.
- Candogan, B. N., Shncik, M., Buyukcangaz, H., Demirtas, C., Goksoy, A. T., & Yazgan, S. (2013). Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in sub-humid climatic conditions. *Journal of Agricultural Water Management*, 118, 113-121.
- Chen, Jiazhou, Lin, Lirong, & Lü, Guoan, (2010), An index of soil drought intensity and degree: An application on corn and a comparison with CWSI. *Journal of Agricultural Water Management*, 97 (6), 865-871.
- Colak, Y. B., Yazar, A., Çolak, İ., Akça, H., & Duraktekin, G. (2015). Evaluation of crop water stress index (CWSI) for eggplant under varying irrigation regimes using surface and subsurface drip systems. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 372-382.
- Cremona, M. V., Stutzler, H., & Kage, H. (2004). Irrigation scheduling of Kohlrabi (*Brassica oleracea* var. gongylodes) using crop water stress index. *Hort Science*, 39 (2), 276-279.
- DeJonge, K. C., Taghvaeian, S., Trout, T. J., & Comas, L. H. (2015). Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management*, 156, 51-62.
- Fucs, M., & Tanner, C. B. (1966). Infrared thermometry of vegetation. *Agronomy journal*, 58 (6), 597-601.
- Gardner, B. R., Blad, B. L., & Watts, D. G. (1981). Plant and air temperatures in differentially-irrigated corn. *Agricultural Meteorology*, 25, 207-217.
- Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96 (9), 1275-1284.
- Gheysari, M., Sadeghi, S. H., Loescher, H. W., Amiri, S., Zareian, M. J., Majidi, M. M., Asgarinia, P., & Payero, J. O. (2017). Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize. *Agricultural Water Management*, 182, 126-138.
- Ghobadi, M., Ebrahimian, H., & Abbasi, F. (2016). Effect of irrigation scheduling on water use efficiency of Maize using a furrow seasonal simulation model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 10 (3), 316-326. (In Persian).
- Gholami, Z., Ebrahimian, H., & Noory, H. (2016). Investigation of irrigation water productivity in sprinkler and surface irrigation systems (case study: Qazvin plain). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 39 (3), 135-146. (In Persian).
- Ghorbani, M., Broomand nasab, S., & Soltani Mohammdi, A. (2016). Effect of water salinity in sprinkler irrigation on the CWSI index for irrigation scheduling of summer maize. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 39 (3), 63-71. (In Persian).
- Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Rasoulzadeh, A., & ghaderpour, R. (2019). Investigation of in the capita water consumption variation in Iran based on the past two-deca diet. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(1), 77-87. (In Persian).
- Han, M., Zhang, H., Dejonge, K. C., Comas, L. H., & Gleason, S. (2018). Comparison of three crop water stress index models with sap flow measurements in maize. *Agricultural Water Management*, 203, 366-375.
- Hiler, E. A., & Clark, R. N. (1971). Stress day index to characterize effects of water stress on crop yield. *American Society of Agricultural Engineers*, 14 (4), 757-761.
- Himanshu, S. K., Fan, Y., Ale, S., & Bordovsky, J. (2021). Simulated efficient growth-stage-based deficit irrigation strategies for maximizing cotton yield, crop water productivity and net returns. *Journal of Agricultural Water Management*, 250, 106840.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter Jr, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stressdegreeday parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55.
- Irmak, S., Burgert, M. J., Yang, H. S., Cassman, K. G., Walters, D. T., Rathje, W. R., Payero, J. O., Grassini,

- P., Kuzila, M. S., Brunkhorst, K. J., Eisenhauer, D. E., Kranz, W. L., VanDeWalle, B., Rees, J. M., Zoubek, G. L., Shapiro, C. A., & Teichmeier, G. J. (2012). Large-scale on-farm implementation of soil moisturebased irrigation management strategies for increasing maize water productivity. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55 (3), 881-894.
- Irmak, S., Haman, D. Z., & Bastug, R. (2000). Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*, 92 (6), 1221-1227.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter Jr, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17 (4), 1133-1138.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter Jr, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17 (4), 1133-1138.
- Jones, H. G. (1999). Use of thermograph for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell and Environment*, 22 (9), 1043-1055.
- Khorsand, A., Verdinejad, V. R., Asgarzadeh, H., Majnooni Heris, A., Rahimi, A., Besharat, S., & Sadraddini, A. A. (2018). Determination of a crop water stress index (CWSI) for detecting water stress time of Maize crop in the Urmia region. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), 873-884. (In Persian).
- King, B. A., Tarkalson, D. D., Sharma, V., & Bjorneberg, D. L. (2021). Thermal crop water stress index base line temperatures for sugarbeet in arid western US. *Agricultural Water Management*, 243, 106459.
- Kumar, N., Poddar, A., Shankar, V., Ojha, C. S. P., & Adeloje, A. J. (2019). Crop water stress index for scheduling irrigation of Indian mustard (*Brassica juncea*) based on water use efficiency considerations. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206 (1), 148– 159.
- Mohammadi, H., Boroumand Nasab, S., nasrolahi, A., & Izadpanah, Z. (2016). Studying the effect of different drip irrigation regimes of corn on the crop water stress index (CWSI), *The 2nd National Congress on Irrigation and Drainage of Iran*, September 2-4, 2016, Isfahan University of Technology, 1-10. (In Persian).
- Mousavi, S. M. S., Albaji, M., Naseri, A. A., Golabi, M., & Moradi Telavat, M. R. (2024). Application of crop water stress index (CWSI) for scheduling safflower irrigation in Khuzestan climate. *Journal of Water Management in Agriculture*, 11 (1), 183-200. (In Persian).
- Movahedi, M. R., & Salehi, B. (2010). Effect of row spacing and plant density on yield and yiel components of maize (SC711) in the Mianeh region. *Agroecology Journal*, 6(18), 97-104. (In Persian).
- Nandan, R., Woo, D. K., Kumar, P., & Adinarayana, J. (2021). Impact of irrigation scheduling methods on corn yield under climate change. *Journal of Agricultural Water Management*, 255, 106990.
- Orta, A.H., Erdem, Y., & Erdem, T. (2003). Crop water stress index for watermelon. *Scientia Horticulturae*, 98 (2), 121-130.
- Osroosh, Y., Peters, R. T., Campbell, C. S., & Zhang, Q. (2015). Automatic irrigation scheduling of apple trees using theoretical crop water stress index with an innovative dynamic threshold. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 193-203.
- Saeedinia, M., Boroomand Nasab, S., Hooshmand, A., Soltani Mohamadi, A., & Andarzian, B. (2015). Applicability of CWSI index for irrigation scheduling of Maize using saline water in Ahvaz. *Journal of Water and Soil Science*, 26 (1), 173-185. (In Persian).
- Saeedinia, M., Hooshmand, A., Boroomand Nasab, S., Soltani Mohamadi, A., & Andarzian, B. (2015). Investigation of the effect of water irrigation salinity on the performance of CWSI index under the climatic conditions of Ahvaz. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 39 (4), 1-12. (In Persian).
- Salari, S., Karandish, F., Haghighatjou, P., & Aldaya, M. (2022). Efficient and sustainable use of water resources in Khuzestan through water footprint benchmarking. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 12 (1), 35-49. (In Persian).
- Seyfi, A., Mirlatifi, S. M., Dehghani Sanij, H., & Torabi, M. (2014). Determination of crop water stress index for pistachio trees under subsurface drip irrigation using canopy-air temperature differenc. *Journal of Water and Irrigation Management*, 4 (1), 123-136. (In Persian).
- Sezen, S. M., Yazar, A., Daşgan, Y., Yucel, S., Akyıldız, A., Tekin, S., & Akhoundnejad, Y. (2014). Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes. *Journal of Agricultural Water Management*, 143, 59-70.
- Taghvaeian, S., Chávez, J. L., Bausch, W. C., DeJonge, K. C., & Trout, T. J. (2013). Minimizing instrumentation requirement for estimating crop water stress index and transpiration of maize. *Irrigation Science*, 32 (1), 53-65..
- Taghvaeian, S., Comas, L., DeJonge, K. C., & Trout, T. J. (2014). Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower. *Journal of Agricultural Water Management*, 144,



69-80.

- Taheri Ghanad, S. (2008). Irrigation scheduling of farmlands using a direct method, *The 2nd Seminar on Strategies for Improvement and Optimization of Surface Irrigation Systems*, May 22, 2008, Karaj, Iran, 1-8. (In Persian).
- Verdinejad, V. R., Besharat, S., Abghari, H., & Ahmadi, H. (2012). Estimation of maximum allowable deficit in different growth stages of fodder mays using canopy-air temperature difference. *Journal of Water and Soil*, 25 (6), 1344-1352. (In Persian).
- Wanjura, D. F., Upchurch, D. R., & Mahan, J. R. (2006). Behavior of temperature-based water stress indicators in BIOTIC-controlled irrigation. *Irrigation Science*, 24 (4), 223-232.
- Zamani, O., Mortazavi, S. A., & Balali, H. (2014). Economical water productivity of agricultural products in Bahar plain, Hamadan. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28 (1), 51-62. (In Persian).
- Zhang, L., Zhang, H., Zhu, Q., & Niu, Y. (2023). Further investigating the performance of crop water stress index for maize from baseline fluctuation, effects of environmental factors, and variation of critical value. *Journal of Agricultural Water Management*, 285, 108349.