



Evaluation of Water Stress Indicators in Spinach Plants under Greenhouse Conditions

Mohammad Kargar¹ | Mojtaba Delshad² | Hadisseh RahimiKhoob³

1. Department of Horticultural Sciences, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: mohammad.kargar@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Horticultural Sciences, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: delshad@ut.ac.ir

3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: h.rahimikhoob@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 3, 2025

Revised: July. 13, 2025

Accepted: July. 26, 2025

Published online: Oct. 2025

Keywords:

*Crop Water Stress Index,
Irrigation management,
Leaf temperature,
Relative Water Content*

ABSTRACT

Water scarcity is one of the most significant challenges facing agricultural production. Accurate monitoring of plant water status is essential for optimizing irrigation management. This study was conducted to evaluate two physiological indicators—Relative Water Content (RWC) and Crop Water Stress Index (CWSI)—during the growth period of spinach to simulate relative dry biomass under greenhouse conditions and various irrigation treatments. The experiment was arranged in a completely randomized design with four irrigation levels (40%, 60%, 80%, and 100% of field capacity) and three replications, conducted over two cropping seasons (autumn and winter 2023) in the research greenhouse of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran. The upper and lower baselines required for calculating CWSI were determined based on the method proposed by Idso, using leaf temperature data and climatic parameters inside the greenhouse. The results indicated that both indices were effective tools for assessing drought stress in spinach under greenhouse conditions. A direct relationship was observed between irrigation level and the RWC index, while an inverse relationship was found with CWSI. Moreover, both indices were significantly correlated with relative dry biomass. As RWC increased and CWSI decreased, relative biomass also increased. Although RWC showed higher accuracy in predicting relative yield, its destructive and time-consuming measurement process limits its practical application. In contrast, CWSI, as a non-destructive method, offers a more practical approach for facilitating irrigation management.

Cite this article: Kargar, M., Delshad, M., & Rahimikhoob, H. (2025). Evaluation of Water Stress Indicators in Spinach Plants under Greenhouse Conditions., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (8), 2163-2177.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.396628.669956>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.396628.669956>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The water resource crisis is one of the major challenges to sustainable development, and the agricultural sector, as the largest consumer of water, requires strategies to improve water use efficiency. Greenhouse cultivation, due to its ability to control climatic conditions, is considered an effective method for conserving water and enhancing economic productivity, particularly for water-intensive crops such as spinach. Spinach is highly sensitive to water deficiency and requires precise irrigation management during its growth period. Among the key indicators for monitoring plant water status are the Relative Water Content (RWC) of the leaves and the Crop Water Stress Index (CWSI). The Crop Water Stress Index, by comparing plant and ambient temperatures, provides a more accurate assessment of the plant's water status.

Objective(s)

This study was conducted to evaluate two key indicators—Relative Water Content (RWC) and the Crop Water Stress Index (CWSI)—throughout the growth period of spinach under greenhouse conditions with varying irrigation treatments.

Material and Methods

This study was conducted using a completely randomized design, incorporating four irrigation treatments (40%, 60%, 80%, and 100% of field capacity) and three replications over two successive cultivation periods. The Relative Water Content (RWC) of the leaves and the Crop Water Stress Index (CWSI) were measured throughout the growth cycle. At the end of each cultivation period, the dry biomass of the plants was recorded. To assess the predictive accuracy of the evaluated methods, statistical indicators including coefficient of determination (R^2), index of agreement (d), relative root mean square error (RRMSE), and mean bias error (MBE) were applied.

Results

In this study, the upper and lower baseline curves of the Crop Water Stress Index (CWSI) for baby spinach (cv. Ragoon) were determined over two cultivation periods. According to the results, as the vapor pressure deficit increased, the temperature difference between the plant canopy and the ambient air also increased. With higher irrigation levels, the Relative Water Content (RWC) of the leaves increased, while the CWSI decreased. Additionally, the relationships between RWC and CWSI with relative dry biomass were analyzed. Ultimately, the RWC index demonstrated higher accuracy in predicting relative dry biomass, although it is a destructive and time-consuming measurement process. In contrast, the CWSI, as a non-destructive indicator, provided reasonably acceptable accuracy.

Conclusions

Generally, increasing the irrigation level led to a higher Relative Water Content (RWC) and a lower Crop Water Stress Index (CWSI). Both indices showed significant correlations with the plant's relative dry biomass. Although the RWC index exhibited greater accuracy in predicting relative yield, its destructive and time-consuming measurement process limits its widespread use in practical applications. In contrast, the CWSI, as a non-destructive method, provides reasonably acceptable accuracy and can serve as a practical and efficient tool for improved irrigation management under greenhouse conditions.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the corresponding author.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی شاخص‌های تنش آبی گیاه اسفناج در شرایط گلخانه

محمد کارگر^۱ | مجتبی دلشاد^۲ | حدیثه رحیمی خوب^۳^۱. گروه علوم باغبانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mohammad.kargar@ut.ac.ir^۲. نویسنده مسئول، گروه علوم باغبانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: delshad@ut.ac.ir^۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: h.rahimikhoob@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	کمبود منابع آب، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی تولید محصولات کشاورزی است. پایش دقیق وضعیت آب در گیاهان، برای مدیریت بهینه آبیاری، امری ضروری محسوب می‌شود. این تحقیق با هدف ارزیابی دو شاخص محتوای آب نسبی برگ (RWC) و شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) در طول دوره رشد گیاه اسفناج در شبیه‌سازی زیست‌توده نسبی خشکی در شرایط گلخانه تحت تیمارهای مختلف آبیاری انجام شد. آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تیمار آبیاری (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) در سه تکرار، طی دو دوره کشت در پاییز و زمستان سال ۱۴۰۲ و در گلخانه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران اجرا شدند. خطوط مبنای بالا و پایین مورد نیاز برای محاسبه شاخص CWSI بر اساس روش پیشنهادی ایدسو (Idso) و با استفاده از داده‌های دمای برگ و پارامترهای اقلیمی گلخانه تعیین شدند. نتایج نشان داد که هر دو شاخص، ابزارهایی مؤثر برای ارزیابی وضعیت تنش آبی در گیاه اسفناج در شرایط گلخانه‌ای هستند. بین مقدار آبیاری و شاخص RWC رابطه مستقیم، و با شاخص CWSI رابطه معکوس مشاهده شد. همچنین رابطه معنی‌داری بین این شاخص‌ها و زیست‌توده خشک نسبی گیاه، برقرار بود. با افزایش شاخص RWC و کاهش شاخص CWSI، زیست‌توده خشک نسبی افزایش یافت. در پیش‌بینی عملکرد نسبی، شاخص RWC از دقت بیشتری برخوردار بود، اما به دلیل ماهیت مخرب و زمان‌بر فرآیند اندازه‌گیری آن، کاربرد عملی آن با محدودیت‌هایی همراه است. در مقابل، استفاده از شاخص CWSI به‌عنوان روشی غیرمخرب، امکان مدیریت آسان‌تر آبیاری را فراهم می‌آورد.
واژه‌های کلیدی: دمای برگ، شاخص تنش آبی گیاه، شاخص محتوای آب نسبی برگ، مدیریت آبیاری.	

استناد: کارگر، محمد؛ دلشاد، مجتبی؛ و رحیمی خوب، حدیثه (۱۴۰۴). ارزیابی شاخص‌های تنش آبی گیاه اسفناج در شرایط گلخانه، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶

(۸)، ۲۱۷۷-۲۱۶۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.396628.669956>

© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.396628.669956>

مقدمه

بحران و کمبود منابع آب از مهم‌ترین چالش‌ها و مسائل پیش‌روی جوامع امروزی است که به عنوان یکی از عوامل محدود کننده توسعه پایدار شناخته می‌شود. بخش کشاورزی، اصلی‌ترین مصرف‌کننده منابع آبی در سراسر جهان هستند (Pedro-Monzonis et al., 2015)، چرا که تقریباً ۸۰ درصد منابع آبی را مصرف می‌کنند. البته این مقدار بسته به توسعه اقتصادی و شرایط اقلیمی مناطق مختلف، متفاوت است (Hedley et al., 2014). در کشورهای توسعه یافته، مصرف آب برای آبیاری حدود ۶۰ درصد از منابع آبی در دسترس را شامل می‌شود. در حالی که این میزان در کشورهای در حال توسعه می‌تواند به ۹۰ درصد برسد (Adeyemi et al., 2017). امروزه با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان و کاهش منابع آب در دسترس، بهره‌گیری از تکنولوژی کشت در محیط کنترل شده گلخانه، در حال گسترش است. در کشت‌های گلخانه‌ای، کنترل عوامل و پارامترهای مهم اقلیمی شامل دما، رطوبت و تهویه، نه تنها عملکرد گیاه و بهره‌وری آب را افزایش می‌دهد، بلکه با ایجاد امکان کشت در خارج از فصل زراعی و در شرایط نامطلوب اقلیمی، بازده اقتصادی قابل توجهی برای کشاورزان فراهم می‌کند. از این جهت، انتقال محصولات آب‌بر مانند سبزی و صیفی به گلخانه‌ها، راه‌کار مطمئنی است که در بسیاری از کشورهای پیشرفته انجام می‌شود (Rahimikhoob et al., 2020).

گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea L.*) محصول نواحی نسبتاً سرد است و در آب و هوای خنک بهتر رشد می‌کند. کشت این گیاه در گلخانه، به دلیل امکان کنترل شرایط محیطی، به ویژه دما و رطوبت، راهکاری مؤثر برای جلوگیری از سرمازدگی و گلدهی زودرس است. گیاه اسفناج در برابر کم‌آبی بسیار آسیب‌پذیر است و مقاومت کمی در برابر تنش خشکی دارد. حداکثر تخلیه مجاز رطوبت^۱ (MAD) برای گیاه اسفناج کمتر از بسیاری از محصولات کشاورزی بوده و معادل ۲۰ درصد از کل آب قابل استفاده^۲ (TAW) است (Gawronski & Skapski, 1976). بنابراین، مدیریت دقیق آبیاری در طول دوره رشد این گیاه، برای جلوگیری از هرگونه تنش خشکی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

برای توسعه راهبردها و تصمیم‌گیری در مورد مدیریت آبیاری در شرایط کم‌آبی، پیش‌بینی میزان تاثیر تنش آبی بر عملکرد محصول توسط کشاورزان، مشاوران و محققان بسیار مهم است (Erdem et al., 2006). برنامه‌ریزی آبیاری به طور متداول با اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک یا پارامترهای هواشناسی و سپس استفاده از این متغیرها برای مدل‌سازی یا محاسبه تبخیر و تعرق انجام می‌شود (Davis & Dukes, 2010). اما، با توجه به اینکه گیاهان به طور مستقیم به شرایط خاک و محیط اطراف خود، به ویژه میزان تبخیر، واکنش نشان می‌دهند، برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس وضعیت آب در گیاه، رویکردی کارآمدتر به نظر می‌رسد (Simbeye et al., 2023). در این راستا، روش‌های متعددی از جمله محاسبه شاخص رشد گیاه، شاخص پتانسیل آب برگ، شاخص مقاومت روزنه‌ای، تعیین درصد آب نسبت به وزن تر، اندازه‌گیری آب نسبی برگ‌ها^۳ (RWC) و سنجش دمای پوشش گیاهی برای برنامه‌ریزی آبیاری مبتنی معرفی شده‌اند (Bwambale et al., 2022).

محتوای آب نسبی برگ‌ها (RWC) یکی از شاخص‌های پرکاربرد برای ارزیابی وضعیت آبی گیاه است. این شاخص، میزان آب موجود در بافت برگ را نسبت به حداکثر ظرفیت نگهداری آب (در حالت آماس کامل) نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، RWC مشخص می‌کند که چه مقدار از آب قابل نگهداری در برگ‌ها، در حال حاضر در دسترس گیاه است. RWC به عنوان یک شاخص حساس به تنش آبی، تغییرات جزئی در محتوای آب برگ را منعکس می‌کند و از این رو، امکان تشخیص زود هنگام تنش آبی و اتخاذ تدابیر مناسب را فراهم می‌سازد. همچنین، اندازه‌گیری این شاخص به تجهیزات پیچیده نیاز ندارد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است (Lugojan & Ciulca, 2011). یکی دیگر از شاخص‌های مرتبط با گیاه، دمای پوشش سبز گیاه^۴ (T_s) می‌باشد که نشان‌دهنده شدت تعرق و تنش آبی در گیاه است. دمای پوشش گیاهی تحت تاثیر رطوبت خاک و مقاومت روزنه‌ای است (خورسند و همکاران، ۱۳۹۸). برای اولین بار در سال ۱۹۶۳، دمای پوشش سبز گیاه به عنوان شاخصی برای تخمین تنش آبی گیاه معرفی شد، که مقادیر آن توسط دماسنج مادون قرمز قابل اندازه‌گیری است (Tanner, 1963). باید توجه داشت که برای ارزیابی وضعیت آبی گیاه استفاده صرف از دمای گیاه، به دلیل تأثیرپذیری قابل توجه از دمای محیط، با محدودیت‌هایی مواجه است. دمای هوا می‌تواند به دلایل مختلفی نظیر تابش خورشید، جریان باد، و سایر عوامل مستقل از وضعیت

1. Management allowed deficit
2. Total available water
3. Relative water content
4. Crop temperature

آبی گیاه، نوسانات چشمگیری داشته باشد. در نتیجه، سنجش صرف دمای گیاه، بدون در نظر گرفتن این نوسانات، ممکن است منجر به تفسیر نادرست وضعیت آبی گیاه شود. به منظور رفع محدودیت‌های مذکور و دستیابی به ارزیابی دقیق‌تر وضعیت آبی گیاه، استفاده از اختلاف دمای پوشش گیاه و دمای هوا ($T_c - T_a$) توصیه شده است (Idso et al., 1981). این رویکرد، با حذف تأثیر نوسانات دمای محیط، امکان سنجش دقیق‌تر کاهش دمای گیاه ناشی از تعرق را فراهم می‌آورد. یکی از شاخص‌های پرکاربرد در این زمینه، شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) است. این شاخص که توسط دو گروه تحقیقاتی در سال ۱۹۸۱ معرفی شد، با مقایسه دمای اندازه‌گیری شده تاج پوشش گیاه با دو دمای پایه (که یکی مربوط به گیاه بدون تنش آبی و دیگری مربوط به گیاه با حداکثر تنش آبی است)، میزان تنش آبی گیاه را نشان می‌دهد (Idso et al., 1981).

پیشینه پژوهش

مطالعه‌ای به منظور بررسی امکان استفاده از شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) برای زمان‌بندی آبیاری کلم بروکلی که با آبیاری قطره‌ای در دوره‌های کشت بهاره و پاییزه سال ۲۰۰۷ کشت شده بود، انجام شد. در این تحقیق اثر پنج سطح آبیاری که بر اساس تبخیر از تشتک کلاس A با فاصله زمانی هفت روز اعمال شده بودند، بر عملکرد و مقادیر حاصل از CWSI بررسی شد. میانگین مقدار آستانه CWSI در حدود ۰/۵۱ پیش از آبیاری منجر به حداکثر عملکرد شد. عملکرد گیاه با میانگین مقادیر CWSI همبستگی مستقیم داشت. مقدار رطوبت خاک، پتانسیل ماتریک خاک، زیست‌توده و شاخص سطح برگ^۲ (LAI) نیز همبستگی خوبی با شاخص تنش آبی گیاه نشان دادند و این شاخص به عنوان یک تابع کلیدی برای مدل‌سازی رشد در نظر گرفته شد (Erdem et al., 2010).

پژوهشی دیگر به منظور بررسی پتانسیل استفاده از شاخص تنش آبی در برنامه‌ریزی آبیاری برای گیاه کدو تحت آبیاری قطره‌ای انجام شد. معادله خط مبنای پایین به طور متوسط به صورت $T_c - T_a = -2.3728VPD + 4.4254$ به دست آمد. مقادیر CWSI بین ۰/۲۴ تا یک در سال ۲۰۱۵ و ۰/۰۸ تا ۰/۹۳ در سال ۲۰۱۶ به دست آمد. شاخص تنش آبی گیاه با عملکرد دانه، شاخص سطح برگ، پتانسیل آب برگ^۳ (LWP) و محتوای روغن و پروتئین، همبستگی مثبتی داشت (Krinak et al., 2019).

در یک آزمایش میدانی دو ساله (سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷)، واکنش فیزیولوژیکی و عملکرد گیاه کینوا نسبت به راهبردهای مختلف تنش آبی با استفاده از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در شرایط اقلیمی مدیترانه‌ای بررسی شد. با افزایش تنش آبی، شاخص سطح برگ و پتانسیل آب برگ کاهش یافت و شاخص CWSI افزایش پیدا کرد. با افزایش شاخص تنش آبی گیاه، عملکرد دانه، زیست‌توده خشک، شاخص سطح برگ و میانگین رطوبت خاک کاهش یافت (Bozkurt Colak et al., 2021).

در تحقیقی با هدف بررسی کارایی سه مدل شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) برای پایش تنش آبی در شرایط اقلیمی مرطوب در شمال آلمان انجام شد. آزمایش در تابستان سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ با سه تیمار آبیاری (آبیاری بهینه، آبیاری کاهش یافته و بدون آبیاری) انجام شد. سه نوع شاخص تنش آبی (تجربی، نظری و ترکیبی) محاسبه شدند. در نهایت، شاخص‌های مختلف CWSI به ویژه مدل ترکیبی، در مناطق مرطوب عملکرد خوبی دارند و می‌توانند در مدیریت آبیاری دقیق و پیش‌بینی وضعیت رطوبت خاک مؤثر باشند (Ekinzog et al., 2022).

در آزمایشی، تأثیر سطوح مختلف آبیاری (۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد تبخیر-تعرق) بر عملکرد و شاخص تنش آبی گیاه در گوجه فرنگی گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاهش آبیاری موجب کاهش عملکرد و دیگر خصوصیات مورفولوژیکی شد. مقادیر CWSI به‌طور معنی‌داری با عملکرد گیاه رابطه داشتند و معادله خطی برای پیش‌بینی عملکرد بر اساس CWSI به صورت $Y = 2398.9CWSI + 1240.4$ ارائه شد (Boyaci et al., 2024).

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد شاخص تنش آبی محصول (CWSI) برای محصولات متنوع، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای به منظور ارزیابی کارایی این شاخص برای برنامه‌ریزی آبیاری اسفناج گلخانه‌ای، به ویژه در شرایط اقلیمی ایران، صورت نگرفته است. با توجه به اهمیت اسفناج در سبذ غذایی ایرانیان و همچنین حساسیت بالای این گیاه به تنش آبی، انجام تحقیقاتی در این زمینه از ضرورت بالایی برخوردار است. این تحقیق با هدف ارزیابی دو شاخص RWC و CWSI در طول دوره رشد گیاه اسفناج در شرایط گلخانه تحت تیمارهای مختلف آبیاری انجام شد.

1 Crop water stress index

2 Leaf area index

3 Leaf water potential



روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی در پاییز و زمستان سال ۱۴۰۲ در گلخانه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۰ و ۵۷ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر از سطح دریا انجام شد. این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تیمار و در ۳ تکرار، به صورت کشت گلدانی و در دو دوره کشت انجام شد. برای انجام این آزمایش از گیاه بیبی اسفناج رقم Racoona استفاده شد. گلخانه مجهز به سیستم فن و حرارت مرکزی بود. میانگین دمای گلخانه در طول دو دوره کشت بین ۲۱ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد و میانگین رطوبت نسبی نیز ۴۸ درصد بود. در این پژوهش از گلدان‌هایی یکسان با قطر دهانه ۱۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر نیز استفاده شد. تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش شامل ۴ سطح آبیاری شامل ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (به ترتیب IR1، IR2، IR3 و IR4) بود. ابتدا لایه‌ای از سنگ‌ریزه به عنوان زهکش در کف گلدان‌ها قرار داده شد. سپس به مقدار یکسانی خاک مزرعه درون گلدان‌ها ریخته شد تا وزن گلدان‌ها برابر شود. یک سانتی‌متر بالایی گلدان‌ها به منظور اعمال آبیاری، خالی در نظر گرفته شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمون خاک، کودهای اوره و سولفات پتاسیم جهت رفع کمبود نیتروژن و پتاسیم به صورت محلول در طول دوره کشت مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

بافت خاک	شن	سیلت	رس	pH	هدایت الکتریکی dSm ⁻¹	نیتروژن کل %	فسفر mgkg ⁻¹	پتاسیم mgkg ⁻¹
لوم رسی	۲۶	۴۶	۲۸	۸/۲	۲/۰۵	۰/۱۳	۵۸/۵	۱۳۴

تعیین تبخیر- تعرق گیاه اسفناج

پس از انتقال نشاءها، جهت استقرار آن‌ها، به مدت یک هفته به صورت روزانه آبیاری صورت گرفت و پس از آن به صورت یک روز در میان تیمارهای آبیاری اعمال شدند. برای تعیین میزان آب آبیاری در هر نوبت، از میزان تبخیر-تعرق گیاه اسفناج و معادله بیلان آب استفاده شد. برای تعیین میزان تبخیر-تعرق نیز از پنج میکرولاسیسمتر مشابه با سایر گلدان‌ها استفاده شد. معادله بیلان آب به صورت زیر می‌باشد:

$$ET_c = I - D - (S_2 - S_1)$$

(رابطه ۱)

در رابطه فوق، ET_c تبخیر-تعرق گیاه، I مقدار آب آبیاری، D مقدار آب زهکش شده، S_1 وزن میکرولاسیسمتر قبل از آبیاری و S_2 وزن میکرولاسیسمتر بعد از آبیاری می‌باشد.

محاسبه شاخص محتوای آب نسبی برگ

جهت محاسبه محتوای نسبی آب برگ از روش ویدرلی (Weatherly, 1950) استفاده شد. بدین منظور در پایان دوره کشت، از هر واحد آزمایشی یک برگ بالغ و کاملاً توسعه یافته انتخاب گردید و برای به دست آوردن وزن تر، توزین گردید. برای به دست آوردن وزن آماس، برگ‌ها به مدت ۵ ساعت در آب مقطر قرار داده شدند و سپس توزین شدند. وزن خشک برگ‌ها نیز با قرار دادن نمونه‌ها در آون به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سپس توزین آن‌ها توسط ترازویی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم، به دست آمد. در نهایت با استفاده از فرمول زیر محتوای آب نسبی برگ محاسبه گردید.

$$RWC = \frac{F_w - D_w}{T_w - D_w} \times 100$$

(رابطه ۲)

در این فرمول، FW وزن تر، TW وزن آماس و DW وزن خشک بر حسب گرم می‌باشند.

محاسبه شاخص تنش آبی گیاه

به منظور تعیین شاخص تنش آبی، از روش ایدسو و همکاران استفاده شد (Idso et al., 1982). به منظور تعیین خط مبنای پایینی (خط بدون تنش) از شاخص تنش آبی گیاه، دمای پوشش سبز گیاه در روزهای بعد از آبیاری از ساعت ۸:۳۰ الی ۱۴:۳۰، هر یک ساعت یک‌بار اندازه‌گیری شد. برای به دست آوردن خط مبنای بالایی (خط با حداکثر تنش)، دمای پوشش سبز گیاه، دو روز پس از آبیاری از ساعت ۹:۳۰ الی ۱۲:۳۰، هر یک ساعت یک‌بار اندازه‌گیری شد. دمای برگ از سه جهت اندازه‌گیری شد و میانگین آن در نظر گرفته شد. همچنین جهت کاهش خطای اندازه‌گیری، دماسنج مادون قرمز نسبت به سطح برگ با زاویه ۴۵ درجه و فاصله ۱۲ سانتی‌متر نگاه داشته شد.

خط مبنای پایینی تنش یکی از ویژگی‌های خاص هر گیاه به شمار می‌رود و نشان‌دهنده شرایطی است که در آن، گیاه با هیچ محدودیتی از نظر دسترسی به آب از طریق ریشه مواجه نبوده و تخییرپذیری هوا نیز در بالاترین حد خود قرار دارد. در چنین وضعیتی، نرخ تعرق گیاه با تعرق پتانسیل برابر است. ایدسو خط مبنای پایینی تنش را به صورت رابطه زیر معرفی کرد (Idso et al., 1982):

$$(T_c - T_a)_{l,l} = a - b \text{ (VPD)} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه، $(T_c - T_a)_{l,l}$ اختلاف درجه حرارت پوشش سبز گیاه و هوا در شرایط خط مبنای پایینی (درجه سانتی‌گراد)، a و b ضرایب رابطه خطی و VPD کمبود فشار بخار هوا^۱ (کیلوپاسکال) است که به منظور محاسبه آن از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\text{VPD} = 10 \times \exp \left[\frac{16.78 T - 116.9}{T + 237.3} \right] \left(1 - \frac{\text{RH}}{100} \right) \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه، T میانگین دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) و RH رطوبت نسبی است.

خط مبنای بالایی یا خط تنش کامل، نشان‌دهنده بیشترین مقدار ممکن برای اختلاف دمای بین پوشش سبز گیاه و هوای اطراف آن است؛ به طوری که با رسیدن این اختلاف دما به این حد، فرآیند تعرق به طور کامل متوقف می‌شود. همچنین طبق نظر ایدسو برای توقف کامل تعرق، لازم است فشار بخار محیط به اندازه شیب فشار بخار افزایش یابد تا بتواند با گرادیان فشار بخار مقابله کند. بنابراین برای محاسبه خط مبنای بالایی تنش از رابطه ۵ استفاده شد.

$$(T_c - T_a)_{u,l} = a + b \text{ [VPG]} \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه فوق، $(T_c - T_a)_{u,l}$ اختلاف درجه حرارت پوشش سبز گیاه و هوا در شرایط خط مبنای بالایی (درجه سانتی‌گراد) و VPG شیب فشار بخار اشباع^۲ (کیلو پاسکال) می‌باشد.

به ازای مقدار معینی از کمبود فشار بخار آب، شاخص تنش آبی گیاه عبارت‌است از نسبت بین تفاوت اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا اندازه‌گیری شده از خط مبنای پایینی، به کل تفاوت ممکن به ازای همان مقدار کمبود فشار بخار هوا. شاخص تنش آبی توسط رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

$$\text{CWSI} = \frac{(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{l,l}}{(T_c - T_a)_{u,l} - (T_c - T_a)_{l,l}} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در این رابطه، $(T_c - T_a)_m$ اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوای اندازه‌گیری شده بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

ارزیابی و تحلیل آماری نتایج

برای سنجش دقت روش‌های مورد بحث در این آزمایش، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطای اریب (MBE)، ریشه میانگین مربعات خطا نسبی (RRMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) که به صورت روابط زیر می‌باشند، استفاده شد.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\text{RRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{N}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\dot{O}_i| + |\dot{P}_i|)^2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در معادلات فوق، n بیانگر تعداد داده‌ها، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، O_i مقادیر واقعی، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده شده، $\dot{O}_i = O_i - \bar{O}$ و $\dot{P}_i = P_i - \bar{P}$ است. شاخص MBE نشان‌دهنده بیش برآورد یا کم‌برآورد مدل شبیه‌سازی شده می‌باشد. مقدار منفی این شاخص نشان دهنده کم‌برآورد بودن مدل شبیه‌سازی شده و مقدار مثبت آن، نشان‌دهنده بیش‌برآورد مدل شبیه‌سازی است. مقادیر RRMSE کمتر از ۱۰ درصد نشان دهنده عملکرد عالی مدل، بین ۱۰ الی ۲۰ درصد نشان دهنده عملکرد خوب، بین ۲۰ الی ۳۰ درصد نشان دهنده عملکرد متوسط و بالای ۳۰ درصد نشان دهنده عملکرد ضعیف مدل می‌باشد (Jamieson et al., 1991). مقادیر شاخص R^2 و d اگر بزرگ‌تر از ۰/۹۵ و به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده کارایی مناسب مدل و دقیق‌تر بودن پیش‌بینی مدل می‌باشد (Willmott, 1982).

1 Vapor pressure deficit

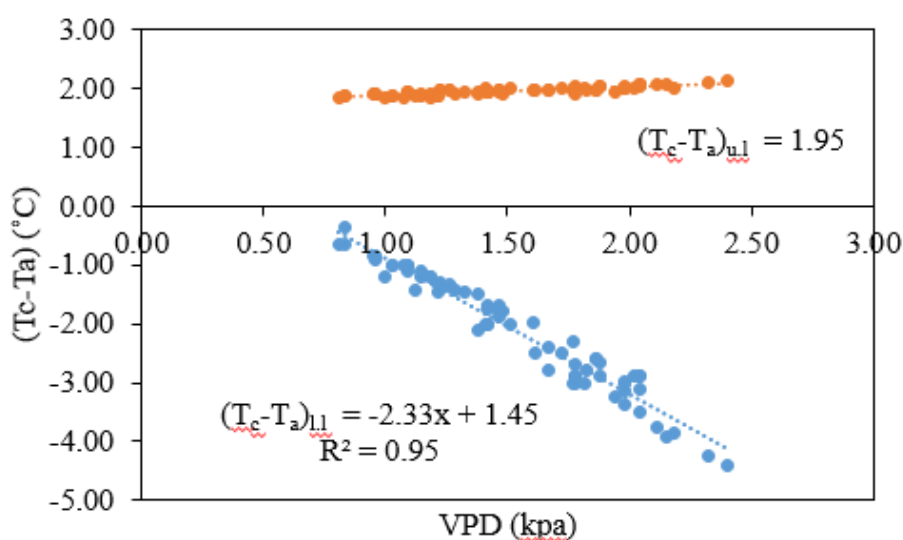
2 Vapor pressure gradient

یافته‌های پژوهشی و بحث

تعیین خطوط مبنای شاخص تنش آبی گیاه

با استفاده از روش تجربی ایدسو و همکاران (۱۹۸۲)، معادلات خط مبنای پایینی و بالایی محاسبه گردید. در شکل ۱ و ۲ موقعیت خط مبنای پایینی و بالایی در هر دو دوره کشت نشان داده شده است. طبق این شکل، شیب خط مبنای پایینی در هر دو دوره رشد گیاه، منفی بوده است. به عبارتی، با افزایش میزان کمبود فشار بخار هوا (در محدوده ۰/۸۱ تا ۲/۴۰ کیلوپاسکال در کشت اول و ۰/۷۸ تا ۲/۴۰ کیلوپاسکال در کشت دوم)، رطوبت نسبی هوا کاهش یافته و با افزایش گرادیان بخار بین سطح برگ و هوا و کاهش تبخیر-تعرق و افزایش دمای پوشش سبز، قدر مطلق اختلاف دمای پوشش سبز و هوا افزایش یافته است. Gardner & Shock (۱۹۸۸) بیان کردند که محدوده VPD بین یک تا شش کیلوپاسکال می‌تواند برای تعریف یک خط پایه مناسب جهت محاسبه CWSI در مناطق مختلف مفید باشد که در مطالعه ما، دامنه VPD مشاهده شده در همین محدوده بوده است.

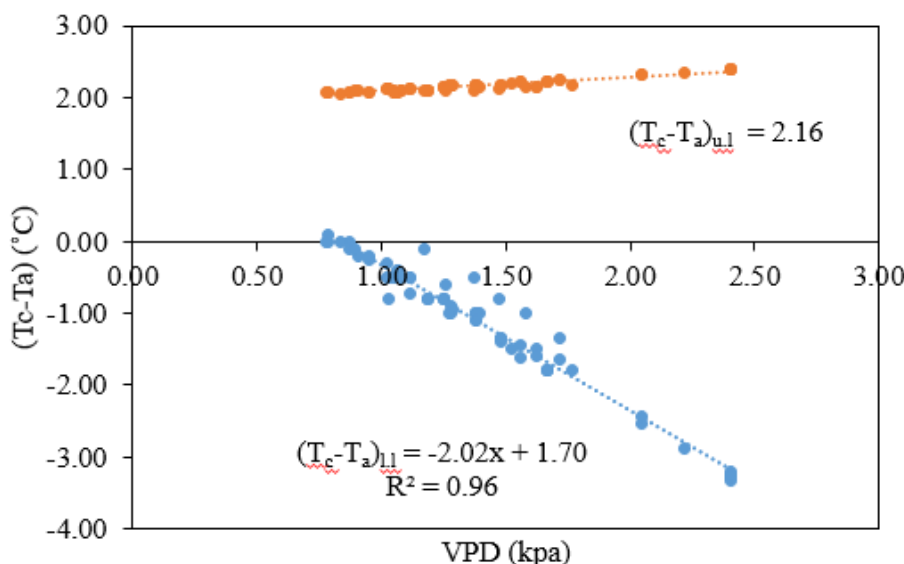
به منظور ترسیم خطوط مبنای پایینی و بالایی تنش در هر دو دوره کشت، نمودار اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا در مقابل کمبود فشار بخار هوا رسم گردید (شکل‌های ۱ و ۲). پس از ترسیم خطوط مبنای مذکور، معادلات رگرسیونی استخراج شد. معادلات به دست آمده برای خطوط مبنای پایینی در هر دو دوره کشت به ترتیب به صورت $(T_c - T_a)_{l,l} = -2.33x + 1.45$ و $(T_c - T_a)_{l,l} = -2.02x + 1.70$ و با ضریب تبیین ۰/۹۵ و ۰/۹۶ به دست آمدند. مقادیر بالای ضریب تبیین نشان دهنده دقت قابل قبول روابط استخراجی است. طبق معادله خط مبنای پایینی، مقدار ضرایب a و b در کشت اول به ترتیب برابر ۲/۳۳- و ۱/۴۵ و در کشت دوم به ترتیب برابر ۲/۰۲- و ۱/۷۰ می‌باشند. خطوط مبنای بالایی در هر دو کشت به ترتیب به صورت $(T_c - T_a)_{u,l} = 1.95$ و $(T_c - T_a)_{u,l} = 2.16$ به دست آمدند و به دلیل تغییرات شیب و عرض از مبدأ خط مبنای پایینی در دو کشت، تغییراتی در برآورد خطوط مبنای بالایی به وجود آمد. مقدار بیشتر خط مبنای بالایی و عرض از مبدأ معادله خط مبنای پایینی در کشت دوم می‌تواند به دلیل کمتر بودن مقدار VPD در کشت دوم و به دنبال آن کاهش تبخیر-تعرق، افزایش دمای گیاه و در نهایت افزایش اختلاف دمای پوشش سبز و دمای محیط باشد.



شکل ۱. نمودار خطوط مبنای پایینی و بالایی برای کل کشت اول گیاه بیبی اسفناج رقم Racoon

در پژوهشی که توسط Ekinzog و همکاران (۲۰۲۲) با هدف تعیین مناسب بودن شاخص تنش آبی گیاه به عنوان معرف تنش آبی در مناطق مرطوب بر روی سیب‌زمینی انجام شد، تفاوت شرایط اقلیمی در دو سال متوالی منجر به تغییر در شیب و عرض از مبدأ معادله خط مبنای پایینی، و همچنین تغییر در مقدار خط مبنای بالایی گردید. در تحقیق صورت گرفته توسط Kapari و همکاران، معادله خط مبنای پایینی در مرحله رویشی و زایشی ذرت به دست آمد که مقدار شیب و عرض از مبدأ در دو معادله متفاوت بود (Kapari et al., 2025). بر اساس نتایج حاصل از آزمایش (Erdem et al., 2010) و (Krinalak et al., 2019) خط مبنای پایینی تنش می‌تواند در فصل‌ها و در سال‌های مختلف، متفاوت باشد. دلیل تفاوت خطوط مبنای پایینی و بالایی این پژوهش با سایر پژوهش‌ها می‌تواند مربوط به اختصاصی بودن این

خطوط برای گیاهان مختلف، متفاوت بودن اقلیم، نوع خاک، نوع گیاه، نوع رقم و روش آبیاری باشد (خیری شلمزاری و همکاران، ۱۳۹۸; Erdem و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که عوامل گوناگونی از جمله خطا در اندازه‌گیری رطوبت نسبی، کالیبراسیون سنسور مادون قرمز، زاویه دید و هدف‌گیری سنسور و همچنین شرایط خرداقلیمی مانند وجود ابر می‌توانند بر رابطه خط مبنای پایینی و بالایی تأثیرگذار باشند. همچنین، از آن‌جا که هر گیاه در برابر تغییرات محیطی با سازوکارهای فیزیولوژیکی خاص خود واکنش نشان می‌دهد و میزان تعرق آن متفاوت است، انتظار می‌رود مقادیر خطوط مبنای نیز برای گیاهان مختلف متفاوت باشد.

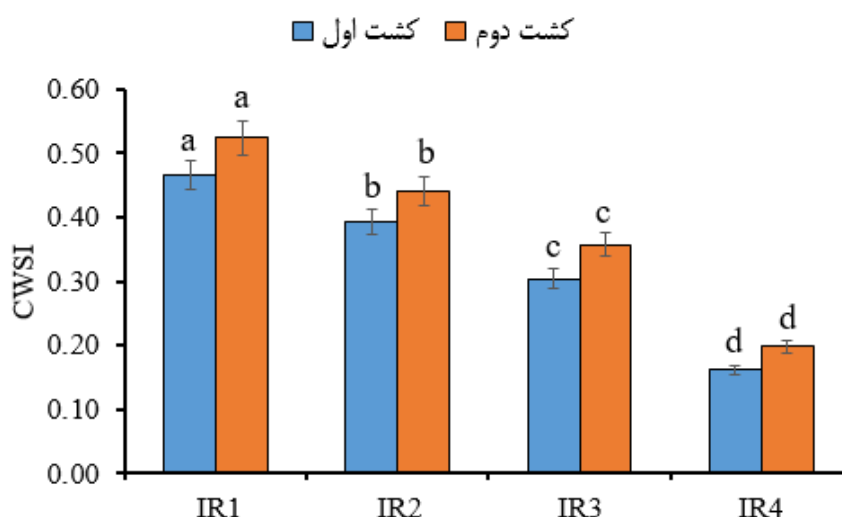


شکل ۲. نمودار خطوط مبنای پایینی و بالایی برای کل کشت دوم گیاه بیبی اسفناج رقم Racoon

تغییرات شاخص‌های تنش آبی گیاه در تیمارهای مختلف آبیاری

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بین تیمارها با سطوح مختلف آبیاری اختلاف معنی داری مشاهده می‌شود؛ به طوری که بیشترین و کمترین مقدار CWSI به ترتیب در تیمارهای ۴۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمده است. میانگین مقادیر شاخص تنش آبی گیاه در کشت اول و در تیمارهای ۴۰ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب ۰/۵۲، ۰/۴۴، ۰/۳۶ و ۰/۲۰ به دست آمد (شکل ۳). همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار آب آبیاری و کاهش مقدار تنش وارد شده بر گیاه، مقدار شاخص تنش آبی گیاه کاهش یافته است؛ به طوری که کمترین مقدار این شاخص در هر دو دوره کشت در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردیده است. دلیل کمتر بودن شاخص تنش آبی گیاه در این تیمار به دلیل مقدار بیشتر تبخیر-تعرق و در نتیجه کاهش دمای گیاه بوده است که در تحقیق انجام شده توسط کریناک و همکاران، چنین نتیجه مشابهی نیز مشاهده گردید (Krinak et al., 2019). همچنین طبق شکل ۳، مقادیر شاخص تنش آبی گیاه در کشت دوم بیشتر از کشت اول بوده است که به دلیل کمتر بودن مقدار کمبود فشار بخار هوا و دمای هوا در کشت دوم (بهمن و اسفند ماه) نسبت به کشت اول (آذر ماه) و در نتیجه کاهش تبخیر-تعرق و به دنبال آن افزایش دمای گیاه و شاخص تنش آبی گیاه می‌باشد.

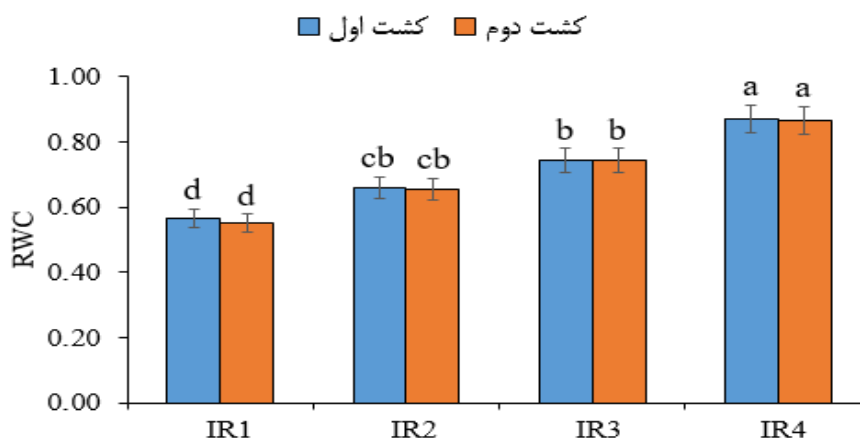
در آزمایش صورت گرفته توسط کپری و همکاران نشان داده شده که مقدار شاخص CWSI می‌تواند در مراحل مختلف رویشی و زایشی متفاوت باشد و همچنین مشاهده شد که مقدار این شاخص در مرحله رشد زایشی گیاه ذرت، روند کاهشی داشته است (Kapari et al., 2025). در تحقیق صورت گرفته بر روی گیاه کینوا و در شرایط گلخانه، مقادیر متوسط شاخص تنش آبی گیاه در تیمارهای مختلف آبیاری ۲۵، ۵۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی به صورت ۰/۰۵، ۰/۱۹، ۰/۴۸ و ۰/۷۲ به دست آمد (جمالی و انصاری، ۱۴۰۰).



شکل ۳. تغییرات شاخص تنش آبی گیاه در در گیاه بیبی اسفناج رقم Racoon

به‌طور کلی با توجه به شکل ۴، سطوح مختلف آبیاری تأثیر معنی‌داری بر مقدار شاخص RWC داشته است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کمترین و بیشترین مقدار این شاخص به ترتیب در تیمارهای ۴۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمده است. همچنین با توجه به شکل ۴، بین تیمارهای ۶۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی در هر دو کشت اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. میانگین مقادیر شاخص محتوای آب نسبی برگ در کشت اول و در تیمارهای ۴۰ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب ۰/۵۷، ۰/۶۶، ۰/۷۴ و ۰/۸۷ و در کشت دوم و در تیمارهای ۴۰ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب ۰/۵۵، ۰/۶۵، ۰/۷۴ و ۰/۸۶ محاسبه گردید (شکل ۴). همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار آب آبیاری میزان محتوای آب نسبی برگ، روند افزایشی داشته است؛ و بیشترین مقدار این شاخص در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمده است. همچنین، با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، افزایش میزان آب آبیاری و به‌تبع آن، افزایش آب در دسترس گیاه، موجب کاهش شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) و افزایش شاخص محتوای آب نسبی برگ (RWC) شده است.

اولین تأثیر تنش خشکی، کاهش محتوای نسبی آب برگ و کاهش تورژسانس در بافت‌های گیاهی است که به‌طور طبیعی رشد سلول و اندازه نهایی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (El-Kheir et al., 1994). به دلیل کاهش رطوبت خاک و افزایش شدت تنش خشکی، پتانسیل آب برگ و در نهایت محتوای نسبی آب برگ کاهش می‌یابد (حیدری و همکاران، ۱۳۹۳). در زمان تنش خشکی، گیاه از طریق افزایش مواد اسمزی در درون بافت‌ها، میزان آب در پیکره خود را کاهش می‌دهد که در نهایت باعث کاهش میزان آب نسبی می‌گردد (خورشیدی و همکاران، ۱۳۸۱). کاهش محتوای نسبی آب برگ در اثر تنش خشکی، در پژوهش‌های انجام شده بر روی گیاهان مختلف از جمله فلفل (عبادی و همکاران، ۱۳۷۹)، سیب زمینی (خورشیدی و همکاران، ۱۳۸۱)، نخود زراعی (منصوری‌فر و همکاران، ۱۳۹۱)، آفتابگردان (نورکی و اخوان، ۱۳۹۵) و لوبیا چشم بلبلی (Kardile et al., 2018) گزارش شده است.

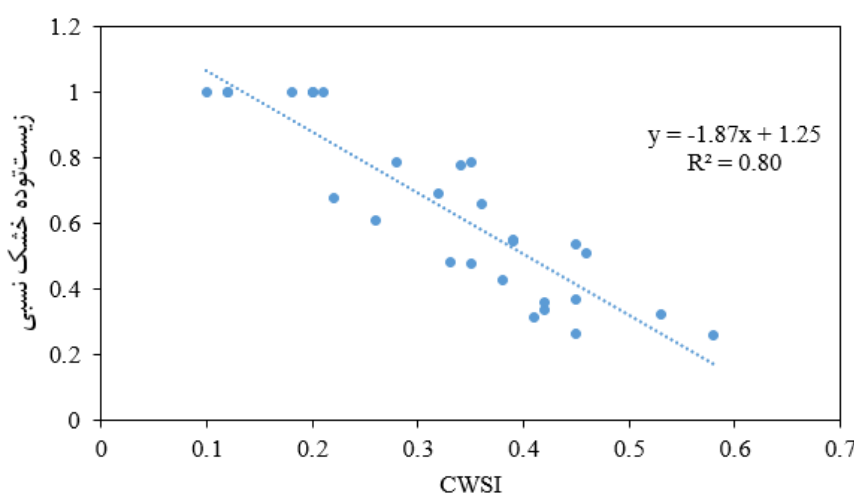


شکل ۴. تغییرات شاخص محتوای آب نسبی برگ در در گیاه بیبی اسفناج رقم Racoon

تعیین رابطه شاخص‌های تنش آبی با زیست‌توده خشک نسبی

به‌منظور بررسی رابطه شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) با زیست‌توده خشک نسبی، ابتدا در هر تاریخ نمونه‌برداری، زیست‌توده خشک هر تیمار بر حداکثر زیست‌توده خشک حاصل‌شده (مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) تقسیم گردید و مقادیر زیست‌توده خشک نسبی محاسبه شد. سپس، بین شاخص‌های تنش آبی گیاه و زیست‌توده خشک نسبی حاصل از کشت اول، رابطه‌ای رگرسیونی برقرار گردید که در شکل ۵ نشان داده شده است. در ادامه، مقادیر شاخص تنش آبی گیاه در کشت دوم در معادله به‌دست‌آمده جای‌گذاری شد تا مقادیر پیش‌بینی‌شده زیست‌توده خشک نسبی برآورد گردد. در نهایت، مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی زیست‌توده خشک نسبی در کشت دوم مقایسه گردید که نتایج آن در بخش تحلیل آماری ارائه و مورد بحث قرار گرفته است.

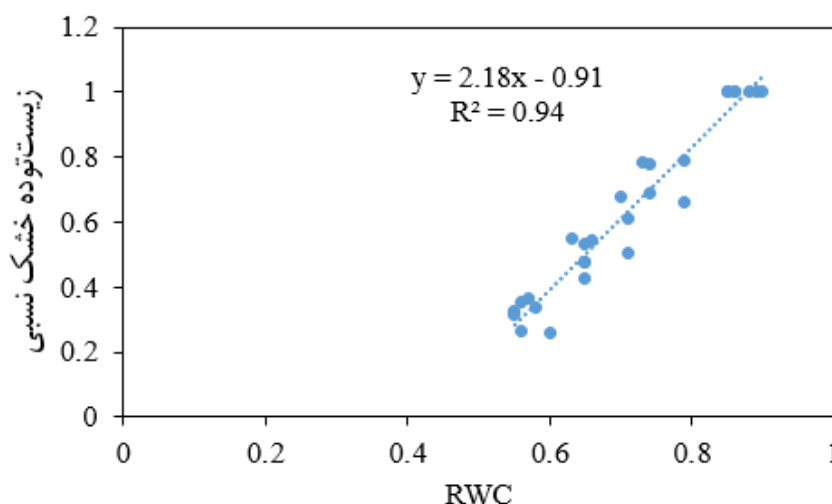
با توجه به شکل ۵، با افزایش شاخص تنش آبی گیاه، گیاهان جهت سازگاری با شرایط کم آبی، روزنه‌ها را بسته تا از تبخیر بیش از حد جلوگیری جلوگیری شود. این پدیده موجب کاهش هدایت روزنه‌ای و ورود کربن دی اکسید و در نتیجه کاهش نرخ فتوسنتز خالص می‌گردد که در نهایت باعث کاهش زیست‌توده می‌شود (Pipatsitee et al., 2018). از دیگر عوامل مؤثر در کاهش زیست‌توده خشک نسبی تحت تنش آبی می‌توان به کاهش رشد و تقسیم سلولی، افزایش تولید ترکیبات سمی و گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، تخریب ساختارهای سلولی از جمله غشای سلولی و کلروفیل، اختلال در جذب عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاه و سنتز زیست‌توده، و همچنین کاهش کارایی استفاده از نور به‌علت تخریب پروتئین‌های درگیر در فتوسنتز اشاره کرد. بروز این اختلالات عمدتاً ناشی از تأثیرات منفی تنش آبی بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه می‌باشد (Pamungkas & Farid, 2022; Seleiman et al., 2021; Cruz de Carvalho, 2008). در سایر تحقیقات انجام شده نیز با افزایش شاخص CWSI، عملکرد کاهش یافته است و نتایج مشابهی با تحقیق حاضر به‌دست آمد (Gokkus et al., 2025; Boyaci et al., 2024; Krinak et al., 2019; Sezen et al., 2014).



شکل ۵. رابطه بین شاخص تنش آبی گیاه و زیست‌توده خشک نسبی در کشت اول بیبی اسفناج

به‌منظور بررسی رابطه شاخص محتوای نسبی آب برگ (RWC) با زیست‌توده خشک نسبی، مشابه با روشی که پیش‌تر برای شاخص CWSI شرح داده شد، اقدام گردید. رابطه بین شاخص RWC و زیست‌توده خشک نسبی در کشت اول به‌دست آمد و در شکل ۶ ارائه شده است. برای تخمین زیست‌توده خشک نسبی، مقادیر شاخص RWC مربوط به کشت دوم در معادله حاصل از کشت اول جای‌گذاری شدند و مقادیر پیش‌بینی‌شده محاسبه گردیدند. در نهایت، نتایج حاصل از تحلیل آماری مربوط به مقایسه مقادیر واقعی و تخمین‌زده‌شده، در بخش بعدی مورد بررسی و بحث قرار گرفته است.

برخلاف اثر شاخص تنش آبی گیاه بر روی فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه، شاخص محتوای نسبی آب برگ با حفظ فرآیندهای فتوسنتزی، تعادل اسمزی، یکپارچگی غشاء سلولی و حفظ فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه (Linh et al., 2020) باعث افزایش زیست‌توده گیاه می‌گردد. در تحقیق صورت گرفته بر روی گیاه ذرت، مقادیر بالاتر RWC در تیمارها با افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و در نهایت با افزایش زیست‌توده همراه بود (Ahmad et al., 2021).



شکل ۶. رابطه بین شاخص محتوای نسبی آب برگ و زیت توده خشک نسبی در کشت اول بیبی اسفناج

نتایج آنالیز آماری

بر اساس نتایج تحلیل آماری، رابطه بین شاخص CWSI و زیت توده خشک نسبی دارای مقدار R^2 بیشتری بود که نشان دهنده همبستگی خطی قوی تر بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر واقعی است. با این حال، مقدار RRMSE برای این شاخص بیشتر و مقدار شاخص تطابق مدل (d) کمتر از مقادیر متناظر آن‌ها برای شاخص RWC بود (جدول ۲).

هر دو شاخص CWSI و RWC می‌توانند به طور نسبی برای پیش بینی زیت توده خشک گیاه مورد استفاده قرار گیرند؛ با این حال، شاخص RWC دقت بالاتر و خطای شبیه سازی کمتری را در برآورد زیت توده خشک گیاه بیبی اسفناج نشان داد. این امر احتمالاً به دلیل ماهیت مستقیم و فیزیولوژیکی این شاخص در اندازه گیری وضعیت واقعی آب در برگ‌ها است که ارتباط نزدیکی با رشد و عملکرد گیاه دارد. به طور کلی، انتخاب شاخص مناسب به هدف کاربردی پژوهشگر یا کشاورز بستگی دارد. در صورت دسترسی به دماسنج مادون قرمز، استفاده از شاخص CWSI به عنوان روشی غیرمخرب و با دقت نسبتاً قابل قبول، گزینه‌ای مناسب برای مدیریت آبیاری خواهد بود. با وجود دقت بیشتر شاخص RWC، این روش به دلیل ماهیت مخرب و نیاز به صرف زمان بیشتر، ممکن است در کاربردهای عملی محدودیت داشته باشد.

جدول ۲- شاخص‌های آماری محاسبه شده جهت سنجش دقت روش صحت سنجی رابطه بین شاخص‌های تنش آبی گیاه و شاخص محتوای نسبی آب برگ با زیت توده خشک نسبی

شاخص آماری	واحد	مقدار محاسبه شده
R^2		۰/۹۳
شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)		
MBE	گرم بر مترمربع	-۰/۱۷
RRMSE	درصد	۲۵/۵۲
d	گرم بر مترمربع	۰/۸۶
R^2		۰/۹۰
شاخص محتوای نسبی آب برگ (RWC)		
MBE	گرم بر مترمربع	-۰/۰۹
RRMSE	درصد	۱۷/۷۷
d	گرم بر مترمربع	۰/۹۳

نتیجه گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که هر دو شاخص شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) و شاخص محتوای نسبی آب برگ (RWC) ابزارهایی مؤثر برای ارزیابی تنش آبی در گیاه بیبی اسفناج تحت شرایط گلخانه‌ای بودند. با افزایش میزان آب آبیاری، مقدار شاخص CWSI کاهش و مقدار RWC افزایش یافت، که این روند مؤید عملکرد صحیح این شاخص‌ها در بازتاب وضعیت آبی گیاه است.

علاوه بر این، بین هر دو شاخص با زیست‌توده خشک نسبی گیاه، رابطه‌ای معنادار مشاهده شد. شاخص RWC از دقت بیشتری در پیش‌بینی عملکرد نسبی برخوردار بود، اما به دلیل ماهیت مخرب و زمان‌بر آن، کاربرد عملی این شاخص محدود است. در مقابل، شاخص CWSI به عنوان روشی غیرمخرب و نسبتاً دقیق، امکان مدیریت آسان‌تر آبیاری را فراهم می‌آورد.

در مجموع، با توجه به حساسیت زیاد گیاه اسفناج به تنش خشکی، استفاده از این شاخص‌ها، به‌ویژه در شرایط کنترل‌شده گلخانه، می‌تواند راهبردی کارآمد برای بهینه‌سازی مدیریت آبیاری و کاهش مصرف آب بدون کاهش عملکرد محصول باشد.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، از این دو شاخص برای مدیریت آبیاری و برآورد عملکرد در سایر گونه‌های سبزی و صیفی، به‌ویژه در محیط‌های گلخانه‌ای، استفاده شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

منابع

جمالی، صابر و انصاری، حسین (۱۴۰۰). برنامه‌ریزی آبیاری گیاه کینوا تحت سطوح مختلف آبیاری با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه. نشریه آبیاری و زهکشی/ایران، ۱۵ (۶)، ۱۲۶۳-۱۲۷۴.

حیدری، نرگس، پوریوسف، مجید و توکلی، افشین. (۱۳۹۲). تأثیر خشکی بر فتوسنتز، پارامترهای وابسته به آن و محتوای نسبی آب گیاه آنیسون (*Pimpinella anisum* L.). مجله زیست‌شناسی/ایران، ۲۷ (۵)، ۸۲۹-۸۳۹.

خوردند، افشین، رضواندی نژاد، وحید، عسگرزاده، حسین، مجنونی هریس، ابوالفضل، رحیمی، امیر و بشارت، سینا. (۱۳۹۸). برنامه‌ریزی آبیاری ماش سیاه براساس شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) تحت روش آبیاری قطره‌ای. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی/ایران)، ۵۰ (۹)، ۸۰۰-۸۰۹.

خورشیدی بنام، محمدباقر، رحیم‌زاده خویی، فرخ، میرهادی، سیدمحمدجواد و نورمحمدی، قربان. (۱۳۸۱). بررسی اثرات خشکی در مراحل رشد ارقام مختلف سیب زمینی. مجله علوم زراعی/ایران، ۴ (۱)، ۴۸-۵۸.

خیری شلمزاری، کبری، سلطانی محمدی، امیر، برومندنسب، سعید و حقیقتی بروجنی، بیژن. (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص تنش آبی گیاه برای سیب زمینی تحت رژیم‌های متفاوت آبیاری در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی. مدیریت آب و آبیاری، ۱۹ (۱)، ۲۹-۴۲.

عبادی، علی، حیدری شریف آبادی، حسین، طهماسبی سروستانی، زین‌العابدین و هاشمی دزفولی، سیدابوالحسن. (۱۳۷۹). تأثیر تنش کمبود آب در انباشت متابولیت‌های سازگاری در ارقام مختلف یونجه. پژوهش و سازندگی، ۳ (۳)، ۶۴-۶۷.

منصوری فر، سیروس، شعبان، مراد، قبادی، مختار و اشرفی پارچین، رضا. (۱۳۹۰). اثر تنش خشکی و کود نیتروژنه آغازگر بر خصوصیات ریشه و عملکرد چهار ژنوتیپ نخود (*Cicer arietinum* L.). مجله به زراعی نهال و بذر (نهال و بذر)، ۲۷ (۴)، ۲-۴.

نورکی، عاطفه و اخوان، سمیرا. (۱۳۹۵). بررسی اثرات تنش آبی بر عملکرد دانه، کارایی مصرف آب و محتوای نسبی آب برگ آفتابگردان. کنگره ملی آبیاری و زهکشی/ایران.

REFERENCES

- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., & Norton, T. (2017). Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation. *Sustainability*, 9(3), 353.
- Ahmad, S., Muhammad, I., Wang, G. Y., Zeeshan, M., Yang, L., Ali, I., & Zhou, X. B. (2021). Ameliorative effect of melatonin improves drought tolerance by regulating growth, photosynthetic traits and leaf ultrastructure of maize seedlings. *BMC Plant Biology*, 21(1), 368.
- Boyaci, S., Kocięcka, J., Atilgan, A., Liberacki, D., Rolbiecki, R., Saltuk, B., & Stachowski, P. (2024). Evaluation of crop water stress index (CWSI) for high tunnel greenhouse tomatoes under different irrigation levels. *Atmosphere*, 15(2), 1-15.
- Bozkurt Çolak, Y., Yazar, A., Alghory, A., & Tekin, S. (2021). Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for differentially irrigated quinoa with surface and subsurface drip systems. *Irrigation Science*, 39, 81-100.
- Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324.
- Cruz de Carvalho, M. H. (2008). Drought stress and reactive oxygen species: production, scavenging and signaling. *Plant signaling & behavior*, 3(3), 156-165.
- Davis, S. L., & Dukes, M. D. (2010). Irrigation scheduling performance by evapotranspiration-based controllers. *Agricultural water management*, 98(1), 19-28.
- Ebadi, A., Heydarie Sharifabad, H., Hashemie dezfuli, A., & Tahmasebi, Z. (2000). Effect of water



- deficit on accumulation of accord metabolites in different varieties of alfalfa. *J. Rea & Bui*, 48, 64-67. (In Persian).
- Ekinzog, E. K., Schlerf, M., Kraft, M., Werner, F., Riedel, A., Rock, G., & Mallick, K. (2022). Revisiting crop water stress index based on potato field experiments in Northern Germany. *Agricultural Water Management*, 269, 107664.
- Erdem, Y., Arin, L., Erdem, T., Polat, S., Devenci, M., Okursoy, H., & Gültaş, H. T. (2010). Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). *Agricultural Water Management*, 98(1), 148-156.
- Erdem, Y., Şehirali, S., Erdem, T., & Kenar, D. (2006). Determination of crop water stress index for irrigation scheduling of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 30(3), 195-202.
- El-Kheir, M. S. A. A., Kandil, S. A., & Mekki, B. B. (1994). Physiological response of two soybean cultivars grown under water stress conditions as affected by CCC treatment.
- Gawronski, S., & Skapski, H. (1976). The optimum spacing for spinach grown in weed-free conditions.
- Gardner, B. R., & Shock, C. C. (1988). Interpreting the crop water stress index (Paper No. 89-2642). *American Society of Agricultural Engineers*.
- Gokkus, M. K., Tanriverdi, C., & Degirmenci, H. (2025). Water Stress Indices as Indicators of Silage Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] Productivity Under Drought Conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 211(1), e70025.
- Hedley, C. B., Knox, J. W., Raine, S. R., & Smith, R. (2014). Water: Advanced irrigation technologies.
- Heidari, N. (2015). Effects of drought stress on photosynthesis, its parameters and relative water content of anise (*Pimpinella anisum* L.). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 27(5), 829-839. (In Persian).
- Heinrich, A., Smith, R., & Cahn, M. (2013). Nutrient and Water Use of Fresh Market Spinach. *HortTechnology*, 23(3), 325-333.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter Jr, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural meteorology*, 24, 45-55.
- Idso, S. B., Reginato, R. J., & Radin, J. W. (1982). Leaf diffusion resistance and photosynthesis in cotton as related to a foliage temperature based plant water stress index. *Agricultural meteorology*, 27(1-2), 27-34.
- Jamali, S., & Ansari, H. (2022). Scheduling Quinoa Irrigation by Crop Water Stress Index. *IRANIAN JOURNAL OF IRRIGATION AND DRAINAGE*, 15(6), 1263-1274. (In Persian).
- Jamieson, P. D., Porter, J. R., & Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*, 27(4), 337-350.
- Kapari, M., Sibanda, M., Magidi, J., Mabhaudhi, T., Mpandeli, S., & Nhamo, L. (2025). Assessment of the Maize Crop Water Stress Index (CWSI) Using Drone-Acquired Data Across Different Phenological Stages. *Drones*, 9(3), 192.
- Kardile, P. B., Dahatonde, K. N., Rakshe, M. V., & Burondkar, M. M. (2018). Effect of moisture stress on leaf Relative Water Content (RWC) of Four Cowpea (*Vigna unguiculata* L. walp.) genotypes at different stages of growth. *Int J Curr Microbiol App Sci*, 7, 2645-9.
- Kheiri Shalamzari, Kobra, Soltani Mohammadi, AMIR, Boroomand Nasab, Saied, & Haghighati Boroujeni, Bijan. (2019). Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for potato under different irrigation regimes in surface and subsurface drip irrigation systems. *JOURNAL OF WATER AND IRRIGATION MANAGEMENT*, 9(1), 29-42. (In Persian).
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A., & Besharat, S. (2019). Irrigation scheduling of Black Gram based on Crop Water Stress Index (CWSI) under drip irrigation. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 50(9), 2125-2138. (In Persian).
- Khourshidi, B. M., Rahimizadeh, K. F., Mirhadi, S. M. J., & Nourmohammadi, G. (2002). Study of drought stress effects in different growth stages on potato cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 4 (1). (In Persian).
- Kirnak, H. A. L. İ. L., Irik, H. A., & Unlukara, A. (2019). Potential use of crop water stress index (CWSI) in irrigation scheduling of drip-irrigated seed pumpkin plants with different irrigation levels. *Scientia Horticulturae*, 256, 108608.
- Lugojan, C., & Ciulca, S. (2011). Evaluation of relative water content in winter wheat. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 15(2), 173-177.
- Mansorifar, S., Shaban, M., Ghobadi, M., & Sabaghpour, H. (2012). Physiological characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress and nitrogen fertilizer as starter. *Iranian Journal of Pulses Research*. 3(1), 53-66. (In Persian).

- Nourki, A., & Akhavan, S. (2016, September).** Investigation of the Effects of Water Stress on Grain Yield, Water Use Efficiency, and Relative Leaf Water Content of Sunflower. *National Congress on Irrigation and Drainage of Iran*, Isfahan, Iran. (In Persian).
- Nouraki, A., Akhavan, S. & Rezaei, Y. (2017). Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for sunflower under different Irrigation Regims. *Researcher*, 59-63.
- Pamungkas, S. S. T., & Farid, N. (2022). Drought stress: responses and mechanism in plants. *Reviews in Agricultural Science*, 10, 168-185.
- Pedro-Monzonis, M., Solera, A., Ferrer, J., Estrela, T., & Paredes-Arquiola, J. (2015). A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology*, 527, 482-493.
- Pipatsitee, P., Eiumnoh, A., Praseartkul, P., Taota, K., Kongpugdee, S., Sakulleerungroj, K., & Cha-um, S. (2018). Application of infrared thermography to assess cassava physiology under water deficit condition. *Plant Production Science*, 21(4), 398-406.
- Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2020). Assessment of reference evapotranspiration estimation methods in controlled greenhouse conditions. *Irrigation Science*, 38, 389-400.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021). Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants*, 10(2), 259.
- 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. *Agricultural water management*, 143, 59-70.
- Simbeye, D. S., Mkiramweni, M. E., Karaman, B., & Taskin, S. (2023). Plant water stress monitoring and control system. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100066.
- Tanner, C. B. (1963). Plant temperatures.
- Weatherley, P.E. (1950) Studies in the Water Relations of the Cotton Plant I. The Field Measurements of Water Deficit in Leaves. *New Phytologist*, 49, 81-97.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.