



## Determination of the Critical Saturated Water Accumulation Curve for Spinach (*Spinacia oleracea* L.) under Greenhouse Conditions

Mohammad Kargar<sup>1</sup> | Mojtaba Delshad<sup>2</sup> | Hadisseh RahimiKhoob<sup>3</sup>

1. Department of Horticultural Sciences, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [mohammad.kargar@ut.ac.ir](mailto: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](mailto: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](mailto:h.rahimikhoob@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Oct. 29, 2025

**Revised:** Jan. 8, 2026

**Accepted:** Apr. 7, 2026

**Published online:** April. 2026

**Keywords:**

Irrigation management,  
Irrigation Optimization,  
Greenhouse cultivation,  
Water crisis,  
Water Deficit Index

Considering the global water crisis and agriculture's crucial role in water use, optimizing irrigation in controlled environments, such as greenhouses, is becoming increasingly important. Spinach (*Spinacia oleracea* L.) a leafy vegetable is sensitive to water deficit and requires precise irrigation management for optimal yield. This study specifically aims to determine the Critical Saturated Water Accumulation (CSWA) curve and the Water Deficit Index (WDI) for spinach throughout its growth period under greenhouse conditions, guiding irrigation strategies. This experiment was conducted in the research greenhouse of the University of Tehran during two cropping cycles in 2023, using a completely randomized design with seven irrigation treatments and three replications. Based on dry matter weight data, the CSWA curve was derived as  $CSWA = 11.74 DM^{0.91}$ . The developed model was subsequently validated using data from the second cropping cycle. The statistical indicators  $R^2$ , RRMSE, MBE, and  $d$  were 0.97, 8.16, 0.06, and 0.99, respectively, confirming the high accuracy of the model. The WDI values ranged from 0.71 to 1.13 in the first cropping cycle and from 0.65 to 1.19 in the second cycle. The WDI reliably reflected variations in plant water status among different irrigation treatments, as indicated by its strong correlation with dry biomass yield ( $R^2 = 0.97$ ). These findings suggest that the CSWA and WDI models can be effectively applied to schedule irrigation with precision in greenhouse spinach production, laying the groundwork for intelligent irrigation system development.

Cite this article: Kargar, M., Delshad, M., & Rahimikhoob, H. (2026). Determination of the Critical Saturated Water Accumulation Curve for Spinach (*Spinacia oleracea* L.) under Greenhouse Condition, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (2), 431-448. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404735.670037>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404735.670037>





## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Given the global water crisis and the substantial share of agriculture in water consumption, optimizing irrigation in controlled environments such as greenhouses has become increasingly critical. Spinach (*Spinacia oleracea L.*), as a drought-sensitive leafy vegetable, requires precise water management throughout its growth cycle. This study aims to enhance irrigation efficiency by determining the Critical Saturated Water Accumulation curve (CSWA) and validating the Water Deficit Index (WDI) for greenhouse-grown spinach, thereby enabling accurate scheduling and the development of intelligent irrigation systems.

### Objective(s)

This study was conducted to determine the Critical Saturated Water Accumulation curve (CSWA) and the Water Deficit Index (WDI) throughout the growth period of spinach under greenhouse conditions and various irrigation treatments.

### Material and Methods

The experiment was conducted in the research greenhouse of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, located in Karaj. During the cultivation period, the average greenhouse temperature was maintained at 23 °C, while the mean relative humidity was recorded at 48%. Furthermore, the average light intensity measured throughout the cultivation period was  $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . To regulate the ambient temperature, the greenhouse was equipped with a fan system and central heating. A completely randomized design was employed, consisting of seven irrigation treatments and three replications. The treatments corresponded to irrigation levels of 40%, 60%, 80%, 100%, 120%, 140%, and 160% of field capacity, respectively. The study was conducted over two successive cultivation periods using baby spinach (*Spinacia oleracea L.*, cv. Ragoon). During the first cultivation cycle, data were collected to establish the Critical Saturated Water Accumulation curve (CSWA). In the second cycle, the accuracy of the proposed methods was evaluated using statistical indicators including the coefficient of determination ( $R^2$ ), mean bias error (MBE), relative RMSE (RRMSE), and Willmott's index of agreement (d). The Water Deficit Index (WDI) was calculated by dividing the actual Saturated Water Accumulation (SWA) of the plant by its Critical SWA, based on the corresponding dry matter content.

### Results

Irrigation treatments had a significant effect on the dry biomass production of spinach. Increasing irrigation levels up to 100% of field capacity led to higher dry matter accumulation, while no statistically significant differences were observed at higher levels (120–160% of field capacity). The relationship between dry matter and critical saturated water accumulation (CSWA) was modeled with high accuracy using a power function:  $\text{CSWA} = 11.736 \times \text{DM}^{0.914}$ , with a coefficient of determination of  $R^2 = 0.99$ . This curve indicated that as dry matter increased, the critical water accumulation also rose. Dry matter and saturated water accumulation data from the second cultivation were used to validate the CSWA model. The high  $R^2$  value and RRMSE below 10% confirmed the model's precision and reliability. The Water Deficit Index (WDI) ranged from 0.71 to 1.13 in the first cultivation and from 0.65 to 1.19 in the second. This index effectively reflected the plant's water status and showed a significant correlation with dry biomass yield.

### Conclusions

The results of this study demonstrated that the Critical Saturated Water Accumulation curve (CSWA) and the Water Deficit Index (WDI) are effective tools for assessing the water status of spinach under greenhouse conditions. The strong correlation between dry biomass and critical water accumulation indicates that improved water availability enhances photosynthesis, nutrient uptake, and ultimately biomass production. Model validation during the second cultivation confirmed the high accuracy of the derived CSWA equation. Moreover, the WDI index successfully distinguished water status across different irrigation treatments and showed a significant association with dry matter yield. Therefore, the application of these indices offers a precise and practical approach for irrigation planning and water resource management in greenhouse spinach cultivation.

### Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

### Authorship contribution

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

During the preparation of this work the authors used the artificial intelligence tool ChatGPT in order to review and check the grammar.

### Data availability statement

Data available on request from the authors.

### Acknowledgements

The authors would like to thank Horticultural Science Department of University of Tehran for providing equipments and Facilities in 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.

## تعیین منحنی تجمع آب اشباع بحرانی گیاه اسفناج در شرایط گلخانه

محمد کارگر<sup>۱</sup> | مجتبی دلشاد<sup>۲</sup> | حدیثه رحیمی خوب<sup>۳</sup>

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

[mohammad.kargar@ut.ac.ir](mailto: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](mailto: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](mailto:h.rahimikhoob@ut.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

با توجه به بحرانی جهانی آب و نقش حیاتی بخش کشاورزی در مصرف منابع آبی، بهینه‌سازی آبیاری در محیط‌های کنترل شده مانند گلخانه‌ها اهمیت ویژه‌ای یافته است. اسفناج (*Spinacia oleracea*) (لبنه‌عنوان سبزی برگ‌گی حساس به کم‌آبی، نیازمند مدیریت دقیق آبیاری برای حفظ عملکرد مطلوب است. هدف این پژوهش، تعیین منحنی تجمع آب اشباع بحرانی (CSWA) و شاخص وضعیت آب گیاه (WDI) در طول دوره رشد اسفناج در شرایط گلخانه‌ای بود. این مطالعه در گلخانه پژوهشی دانشگاه تهران طی دو دوره کشت در سال ۱۴۰۲ و در قالب طرح کاملاً تصادفی با هفت تیمار آبیاری و سه تکرار انجام شد. با استفاده از داده‌های وزن ماده خشک، منحنی تجمع آب اشباع بحرانی به صورت  $CSWA = 11.74DM^{0.91}$  استخراج گردید. سپس مدل به دست آمده با استفاده از داده‌های کشت دوم صحت‌سنجی شد. شاخص‌های آماری  $R^2$ ،  $RRMSE$ ،  $MBE$  و  $d$  به ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۰/۱۶، ۰/۰۶ و ۰/۹۹ به دست آمدند؛ که نتایج، دقت بالای مدل را تأیید کرد. مقدار به‌دست آمده برای شاخص WDI در کشت اول بین ۰/۷۱ تا ۱/۱۳ و در کشت دوم بین ۰/۶۵ تا ۱/۱۹ به دست آمد. شاخص WDI نیز توانست همبستگی زیاد وضعیت آبی گیاه را در تیمارهای مختلف با عملکرد زیست‌توده خشک ( $R^2 = 0.97$ ) به خوبی نشان دهد. یافته‌های نشان می‌دهند که استفاده از مدل WDI و CSWA می‌تواند ابزار مؤثری برای برنامه‌ریزی آبیاری دقیق در کشت گلخانه‌ای اسفناج باشد و زمینه‌ساز توسعه سامانه‌های هوشمند آبیاری گردد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۱۱/۱۸

تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

بحران آب،

بهینه‌سازی آبیاری،

شاخص تشخیص آب گیاه،

کشت گلخانه‌ای،

مدیریت آبیاری

استناد: کارگر، محمد؛ دلشاد، مجتبی؛ و رحیمی خوب، حدیثه (۱۴۰۵). تعیین منحنی تجمع آب اشباع بحرانی گیاه اسفناج در شرایط گلخانه. مجله

تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۲)، ۴۴۸-۴۳۱. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404735.670037>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404735.670037>

## مقدمه

از مهم‌ترین چالش‌ها و مسائل موجود در جوامع امروزی، بحران و کمبود آب می‌باشد که یکی از عوامل محدود کننده توسعه پایدار شناخته می‌شود (Hogeboom, 2020; Tzanakakis et al., 2020). بخش کشاورزی، بزرگ‌ترین مصرف کننده منابع آب در جهان به شمار می‌آید و حدود ۸۰ درصد از کل منابع آبی را به خود اختصاص می‌دهد (Tzanakakis et al., 2020). با این حال، میزان مصرف آب در کشاورزی تحت تأثیر شرایط اقلیمی و سطح توسعه اقتصادی هر منطقه متفاوت است (Nikolaou et al., 2020). در کشورهای توسعه یافته، بخش کشاورزی حدود ۶۰ درصد از منابع آب در دسترس را مصرف می‌کند، در حالی که این سهم در کشورهای در حال توسعه می‌تواند تا ۹۰ درصد نیز افزایش یابد (Adom et al., 2022; Hogeboom et al., 2020). با توجه به افزایش جمعیت جهان و کاهش منابع آب در دسترس، کشت در محیط‌های کنترل شده، مانند گلخانه، در حال توسعه است (Bua et al., 2024; Fussy & Papenbrock, 2022; Wang, 2022; Nikolaou et al., 2020). در کشت‌های گلخانه‌ای، توانایی کنترل پارامترهای اقلیمی مانند دما، رطوبت و تهویه وجود دارد که با ایجاد شرایط مناسب، امکان کشت در خارج از فصل زراعی را فراهم می‌کند (Bua et al., 2024; Yan et al., 2023). بنابراین، انتقال محصولات با نیاز آبی بالا مانند سبزی و صیفی به گلخانه‌ها، راهکار مطمئنی است که در بسیاری از کشورهای پیشرفته انجام می‌شود (Bua et al., 2024; Fussy & Papenbrock, 2022; Nikolaou et al., 2020; Rahimikhoob et al., 2020).

اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) از جمله سبزی‌های برگ‌ی مناطق نسبتاً سرد به‌شمار می‌آید و در شرایط آب و هوایی خنک بهترین رشد را دارد (Chaudhary et al., 2022; Anjos Neto et al., 2020). کشت این گیاه در گلخانه به دلیل امکان تنظیم عوامل محیطی، به‌ویژه دما و رطوبت، روشی مؤثر برای جلوگیری از بروز سرمازدگی و گلدهی زودرس محسوب می‌شود (Batziakas et al., 2020; Nikolaou et al., 2020). اسفناج حساسیت بالایی نسبت به کم‌آبی داشته و مقاومت کمی در برابر تنش خشکی دارد (Naseem et al., 2025; Abbas et al., 2023; Parkash & Singh, 2020). حداکثر تخلیه مجاز رطوبت<sup>۱</sup> (MAD) در این گیاه کمتر از بسیاری از محصولات زراعی بوده و حدود ۲۰ درصد از کل آب قابل استفاده<sup>۲</sup> (TAW) برآورد شده است (Preite et al., 2023; Nikolaou et al., 2020; Parkash & Singh, 2020). از این رو، مدیریت دقیق و به موقع آبیاری در طول دوره رشد اسفناج نقشی اساسی در جلوگیری از بروز تنش خشکی و حفظ عملکرد مطلوب دارد (Naseem et al., 2025; Nikolaou et al., 2020; Parkash & Singh, 2020).

یکی از استراتژی‌ها برای استفاده بهینه از آب در کشاورزی، برنامه‌ریزی دقیق آبیاری محصولات است (Zhao et al., 2024; Ahmed et al., 2020; Taghvaeian et al., 2023). برنامه‌ریزی آبیاری به معنای تعیین زمان و مقدار دقیق آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری در طول دوره رشد محصول است (Masseroni et al., 2024; Lee et al., 2023; Fontanet et al., 2022). مقدار آب آبیاری یکی از عوامل تأثیرگذار بر مدیریت آبیاری به‌شمار می‌آید؛ به عبارت دیگر، یک سیستم آبیاری با مدیریت مناسب، سیستمی است که آب بهینه را برای رشد محصول و افزایش عملکرد فراهم می‌کند (Mehmood et al., 2023; Wabela et al., 2022; Liang et al., 2021). یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای سنجش وضعیت آب در گیاه، توصیف تنش رطوبتی بر اساس محتوای آب گیاه و ارتباط آن با وزن خشک گیاه است (Zhao et al., 2022). در این روش، وضعیت آب در گیاه با تعیین درصد آب نسبت به وزن تر مشخص می‌شود؛ اما به دلیل تغییر وزن تر گیاه در طول زمان این روش چندان مناسب نیست. به همین دلیل، دو نظریه منحنی تجمع آب اشباع بحرانی<sup>۳</sup> (CSWA) و شاخص وضعیت آب در گیاه<sup>۴</sup> (WDI) ارائه شده‌اند تا بتوان تنش آبی را با در نظر گرفتن محتوای آب در گیاه و تغییرات وزن خشک در طول دوره رشد، برآورد کرد (Zhao et al., 2022). تجمع آب اشباع بحرانی، حداقل میزان آب تجمع یافته در اندام هوایی گیاه است که منجر به تولید حداکثر زیست‌توده خواهد شد (Zhao et al., 2022). شاخص وضعیت آب نیز نشان دهنده کمبود یا کفایت آب برای یک موقعیت معین و در هر دوره زمانی از فصل رشد گیاهان می‌باشد. این شاخص به صورت نسبت بین محتوای واقعی آب تجمع یافته به محتوای آب اشباع جمعی بحرانی در گیاه برای یک مقدار معین از ماده خشک می‌باشد (Zhuang et al., 2024). اگرچه این روش وضعیت آب در گیاه را با دقت بسیار بالایی مشخص می‌کند، اما روشی مخرب است.

## پیشینه پژوهش

<sup>۱</sup>Management allowed deficit

<sup>۲</sup>Total available water

<sup>۳</sup>Critical saturated water accumulation

<sup>۴</sup>Water diagnosis index

مطالعه‌ای جهت ارزیابی وضعیت آب محصول و همچنین اعتبارسنجی منحنی تجمعی آب اشباع بحرانی (SWA) در طول دوره رشد رویشی گیاه ذرت رقم در سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ در شمال چین صورت گرفت. با افزایش مقدار آب آبیاری، زیست‌توده خشک گیاه (DM) و SWA افزایش یافت. با این حال، زیست‌توده خشک گیاه و SWA تفاوت‌های غیرقابل توجهی در شرایط غیرمحدودکننده آب نشان دادند. یک رابطه بین DM و SWA گیاه جهت توسعه منحنی SWA بحرانی به صورت  $SWA = 8.26DM^{0.89}$  ارائه گردید. سپس یک شاخص تشخیص آب گیاه (WDI) با استفاده از منحنی SWA بحرانی برای ارزیابی کمی وضعیت آب در فصل رشد گیاه ذرت استخراج شد. مقدار شاخص WDI در سال ۲۰۱۸ برای گیاه ذرت رقم Zhengdan بین ۰/۷۲ تا ۱/۲۴ و برای رقم Denghai بین ۰/۸ تا ۱/۲ به دست آمد. مقدار این شاخص نیز بین ۰/۷۳ تا ۰/۹۶ و ۱/۰۳ تا ۱/۲۶ بین سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ متغیر بود. میزان این شاخص در تیمارهای با مقادیر آبیاری بیشتر نسبت به تیمارهای با مقادیر آبیاری کمتر، بیشتر بود (Zhao et al., 2022).

آزمایشی جهت تعیین رابطه بین زیست‌توده خشک و منحنی تجمع آب اشباع بحرانی (SWA) در طول دوره رشد گندم زمستانه، از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ و با استفاده از چهار تیمار آبیاری و دو تیمار نیتروژن انجام شد. در این پژوهش، شاخص وضعیت آب در گیاه (WDI) به عنوان نسبت مقدار SWA مشاهده شده به مقدار SWA بحرانی استخراج شد. رابطه بین زیست‌توده خشک و SWA برای تیمار N1 به صورت  $Critical\ SWA = 5.34DM^{0.77}$  و برای تیمار N2 به صورت  $Critical\ SWA = 7.37DM^{0.83}$  به دست آمد. میانگین مقادیر WDI تیمارهای N1 (۷۵ کیلوگرم در هکتار)، بیشتر از تیمارهای N2 (۲۲۵ کیلوگرم در هکتار) بود. علت آن نیز رشد رویشی و سطح برگ بیشتر در تیمار N2 و به دنبال آن تعرق شدیدتر، مصرف آب بیشتر، کمبود آب شدیدتر و مقدار کمتر شاخص WDI در این تیمار بوده است. مقدار WDI تحت تأثیر سطوح مختلف کود نیتروژن اعمال شده بر گیاه گندم قرار گرفت. مقدار این شاخص در سطوح پایین‌تر نیتروژن، بیشتر از سطوح بالاتر نیتروژن بود. همچنین در دوره‌های مختلف رشد و با پیشرفت دوره رشد گیاه، تفاوت بین تیمارهای مختلف آبیاری، به طور چشمگیر معنی‌دار شد (Zhuang et al, 2024).

پژوهشی به منظور به دست آوردن مدلی برای کمی‌سازی وضعیت آبی گندم زمستانه در مرحله زایشی، از طریق توسعه و اعتبارسنجی منحنی‌های بحرانی آب اشباع تجمعی سنبله (SWAE) و شاخص تشخیص آبیاری (WSI) مبتنی بر سنبله انجام شد و اثر متقابل آب و نیتروژن نیز بر آن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ آزمایش‌های مزرعه‌ای با چهار سطح آبیاری و دو سطح نیتروژن انجام شد تا رابطه بین ماده خشک سنبله (EDM) و SWAE در دوره زایشی گندم زمستانه تعیین گردد. منحنی‌های بحرانی SWAE تحت شرایط محدودیت نیتروژن (N1) و عدم محدودیت نیتروژن (N2) به ترتیب به صورت  $SWAE = 3.53EDM^{0.48}$  و  $SWAE = 4.53EDM^{0.47}$  به دست آمدند. نتایج نشان دادند که کمبود نیتروژن مقدار SWAE را در یک مقدار EDM مشابه کاهش می‌دهد، اما بر نرخ تجمع آن تأثیری ندارد. کمبود غیرمستقیم نیتروژن خاک، کاهش تعداد دانه در هر سنبله و پر شدن زودرس دانه تحت تنش خشکی، سه عامل اصلی کاهش شاخص WDI سنبله بودند (Zhuang et al, 2025).

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه تعیین منحنی تجمع آب اشباع بحرانی (SWA)، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای به منظور بررسی 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 حساسیت بالای این گیاه به تنش آبی، انجام تحقیقاتی در این زمینه از ضرورت بالایی برخوردار است. این تحقیق با هدف تعیین منحنی تجمع آب اشباع بحرانی و شاخص WDI در طول دوره رشد گیاه اسفناج در شرایط گلخانه تحت تیمارهای مختلف آبیاری انجام شد.

## روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش 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 مطالعه به صورت طرح کاملاً تصادفی با ۷ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. در هر واحد آزمایشی نیز ۱۰ گیاه به عنوان مشاهده قرار داده شد. به‌طور کلی ۲۱۰ گیاه مورد آزمایش قرار گرفت. تیمارها شامل IR1، IR2، IR3، IR4، IR5، IR6 و IR7 (به ترتیب آبیاری برابر با ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ درصد رطوبت گنجایش گلدانی) بود. این پژوهش در قالب دو دوره کشت انجام شد. کشت اول در تاریخ ۳ آذر ماه تا ۲ دی ماه ۱۴۰۲ و به منظور تعیین منحنی تجمع آب اشباع بحرانی گیاه صورت گرفت. کشت دوم در تاریخ ۱۳ بهمن ماه تا ۱۲ اسفند ماه ۱۴۰۲ و به منظور سنجش دقت منحنی به دست آمده از کشت اول، انجام شد. برای انجام این پژوهش از بیبی اسفناج رقم Racoon استفاده شد و در هر گلدان با قطر دهانه ۱۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، یک عدد نشاء کشت شدند. 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. رقم Racoon متعلق به شرکت رکزوان هلند، دارای تیپ رشدی عمودی می‌باشد که محصول زودرس تولید می‌کند و مناسب کشت در فصل بهار و پاییز می‌باشد. کشت این رقم در گلخانه‌های کشور رایج شده است. میانگین دمای گلخانه در طول دوره کشت ۲۳ درجه سانتی‌گراد و میانگین رطوبت نسبی نیز ۴۸ درصد بود. جهت کنترل دمای محیط، گلخانه مجهز به سیستم فن و حرارت مرکزی بود. همچنین میانگین مقدار شدت نور اندازه‌گیری شده در طول دوره کشت برابر ۱۰۰ میکرومول در متر مربع در ثانیه بود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است. مقدار نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم به ترتیب بر اساس روش‌های کج‌لدال، اولسن و فلیم‌فتمتر اندازه‌گیری شدند. 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. همچنین خصوصیات آب آبیاری مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج آن در جدول (۲) ارائه گردیده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

پتاسیم mgkg <sup>-1</sup>	فسفر mgkg <sup>-1</sup>	نیتروژن کل %	هدایت الکتریکی dSm <sup>-1</sup>	pH	رس	سیلت	شن	بافت خاک
					%			
۱۲۴	۵۸/۵	۰/۱۳	۲/۰۵	۸/۲	۲۸	۴۶	۲۶	لوم رسی

جدول ۲- خصوصیات آب آبیاری

پتاسیم Meql <sup>-1</sup>	سدیم Meql <sup>-1</sup>	منیزیم Meql <sup>-1</sup>	کلسیم Meql <sup>-1</sup>	سولفات Meql <sup>-1</sup>	کلر Meql <sup>-1</sup>	بی‌کربنات Meql <sup>-1</sup>	SAR (mmol/l) <sup>0.5</sup>	TDS Mgl <sup>-1</sup>	pH	هدایت الکتریکی dS/m
۰/۰۳۹	۰/۹۲	۲/۲۸	۵/۹۱	۳/۶۰	۲/۸۰	۲/۷۵	۰/۴۵	۵۰۵/۶	۷/۷۴	۰/۷۹

## 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. در ابتدا جهت تعیین رطوبت گنجایش گلدانی میکروولایسیمترها از روش وزنی استفاده شد. بدین منظور، ابتدا میکروولایسیمترها به‌طور کامل با آب اشباع شدند و پس از گذشت ۷۲ ساعت، به‌منظور خروج آب زهکشی و تثبیت رطوبت خاک، وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. وزن تثبیت شده در این مرحله به عنوان وزن میکروولایسیمتر در حالت رطوبت گنجایش گلدانی در نظر گرفته شد. در ادامه، 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 میکروولایسیمتر مشابه با سایر گلدان‌ها استفاده شد. در رابطه (۱) معادله بیلان آب آورده شده است.

$$ET_c = I - D - (S_2 - S_1) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق،  $ET_c$  تبخیر-تعرق گیاه،  $I$  مقدار آب آبیاری در مرتبه قبل،  $D$  مقدار زهکش گلدان بین دو مرتبه آبیاری،  $S_1$  وزن میکروولایسیمتر قبل از آبیاری و  $S_2$  وزن میکروولایسیمتر بعد از آبیاری می‌باشد.

جهت آبیاری گلدان‌ها در هفته نخست، میانگین مقدار آب آبیاری میکروولایسیمترها محاسبه شده و به سایر گلدان‌ها داده شد. در زمان اعمال تیمارها از هفته دوم نیز میانگین آب آبیاری میکروولایسیمترها در درصد رطوبت گنجایش گلدانی هر تیمار ضرب گردیده و مقدار به دست آمده به هر تیمار داده شد.

## تعیین منحنی تجمع آب اشباع بحرانی

به منظور تعیین منحنی تجمع آب اشباع بحرانی (CSWA) در مراحل مختلف رشد گیاه از تیمارهایی با سطوح مختلف آبیاری استفاده شد. نمونه‌برداری از گیاهان بعد از اعمال تیمارها در چندین تکرار (۱۳، ۱۷، ۱۹، ۲۳، ۲۵، ۲۷ و ۳۰ روز پس از کاشت) در طی دوره رشد صورت گرفت. در هر نمونه، وزن تازه گیاه<sup>۱</sup> (FM)، وزن آماس گیاه<sup>۲</sup> (SM) و وزن ماده خشک گیاه<sup>۳</sup> (DM) اندازه‌گیری شد. برای

<sup>۱</sup>Plant fresh mass

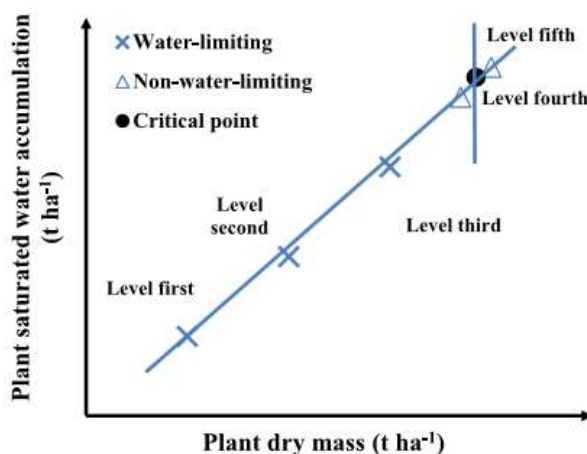
<sup>۲</sup>Plant saturated mass

<sup>۳</sup>Plant dry mass

اندازه‌گیری وزن تر گیاهان، از ترازویی با دقت ۰/۰۱ استفاده گردید. به‌منظور تعیین وزن آماس، نمونه‌های گیاهی به مدت پنج ساعت در آب مقطر قرار داده شدند. پس از این مدت، آب اضافی سطح گیاهان با استفاده از پارچه خشک گردید و سپس گیاهان توزین شدند. جهت اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ثابت ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در نهایت، گیاهان خشک‌شده با ترازویی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین شدند. وزن ماده خشک و وزن آماس تیمارها در مراحل مختلف نمونه‌برداری در کشت اول و دوم، به ترتیب در جداول (۳) و (۴) آورده شده است. محتوای آب در گیاه (WA) و محتوای آب اشباع تجمعی (SWA) به ترتیب از طریق روابط (۲) و (۳) به دست آمدند. در ابتدا بر اساس نتایج آزمون دانکن، تیمارها بر اساس وزن ماده خشک به دو گروه تیمارهای با محدودیت آبیاری و بدون محدودیت آبیاری تقسیم شدند. سپس در هر تاریخ نمونه‌برداری رابطه‌ای بین ماده خشک و آب تجمع یافته در تیمارهای کم‌آبیاری ترسیم شد و معادله حاصل از برازش این رابطه به‌عنوان مبنای تعیین آب اشباع بحرانی (تن بر هکتار یا گرم بر متر مربع) مورد استفاده قرار گرفت. (شکل ۱). سپس میانگین مقدار ماده خشک تیمارهای بیش آبیاری را محاسبه کرده و مقدار به دست آمده را در معادله تجمع آب اشباع بحرانی به دست آمده در آن تاریخ قرار گرفت تا مقدار تجمع آب اشباع بحرانی، به دست آید. این مراحل را برای تمام هفت مرحله نمونه‌برداری انجام شد. در پایان نیز، یک منحنی نمایی به فرم کلی  $ax^b$  از بین نقاط تجمع آب اشباع بحرانی و ماده خشک ترسیم شد و ضرایب ثابت معادله آب اشباع بحرانی (a و b) برای نوع واریته و شرایط اقلیمی و خاص منطقه به دست آمد. در شکل (۱)، منحنی تجمع آب اشباع بحرانی نشان داده شده است.

$$WA = FM - DM \quad \text{رابطه ۲}$$

$$SWA = SM - DM \quad \text{رابطه ۳}$$



شکل ۱. طرح شماتیک محاسبه نقطه تجمع آب اشباع بحرانی گیاه (SWA). علامت (X) و (Δ) به ترتیب میانگین مقادیر ماده خشک گیاه و SWA گیاه برای تیمارهای محدود کننده آب و غیر محدود کننده آب را نشان می‌دهند. همچنین نماد (●) نشان دهنده SWA بحرانی گیاه محاسبه شده است.

جدول ۳- وزن ماده خشک و وزن آماس تیمارهای مختلف آبیاری در کشت اول بیبی اسفناج

روز نمونه‌برداری														تیمار
۳۰		۲۷		۲۵		۲۳		۱۹		۱۷		۱۳		
SWA	DM	SWA	DM	SWA	DM	SWA	DM	SWA	DM	SWA	DM	SWA	DM	
۱/۳۴	۰/۱۱	۱/۲۱	۰/۱۰	۱/۰۱	۰/۰۹	۰/۶۸	۰/۰۶	۰/۴۸	۰/۰۴	۰/۳۸	۰/۰۳	۰/۳۵	۰/۰۳	IR1
۲/۱۶	۰/۱۷	۲/۰۱	۰/۱۶	۱/۵۷	۰/۱۳	۱/۲۵	۰/۱۰	۱/۰۰	۰/۰۸	۰/۶۷	۰/۰۵	۰/۵۱	۰/۰۴	IR2
۳/۵۵	۰/۲۸	۲/۸۶	۰/۲۲	۲/۱۴	۰/۱۶	۱/۹۳	۰/۱۴	۱/۳۹	۰/۱۰	۱/۱۵	۰/۰۹	۰/۷۵	۰/۰۶	IR3
۴/۹۳	۰/۳۶	۳/۹۰	۰/۲۹	۳/۴۵	۰/۲۳	۲/۷۶	۰/۱۸	۲/۳۰	۰/۱۵	۱/۷۹	۰/۱۳	۱/۲۳	۰/۰۹	IR4
۴/۷۲	۰/۳۵	۳/۹۹	۰/۲۹	۳/۳۵	۰/۲۲	۲/۷۴	۰/۱۸	۲/۲۶	۰/۱۵	۱/۷۷	۰/۱۲	۱/۱۹	۰/۰۹	IR5
۴/۵۵	۰/۳۴	۳/۹۸	۰/۲۸	۳/۲۱	۰/۲۱	۲/۷۲	۰/۱۸	۲/۲۴	۰/۱۵	۱/۷۰	۰/۱۲	۱/۱۶	۰/۰۹	IR6
۴/۵۱	۰/۳۴	۳/۹۵	۰/۲۸	۳/۲۰	۰/۲۱	۲/۷۲	۰/۱۸	۲/۱۶	۰/۱۵	۱/۶۳	۰/۱۲	۱/۱۳	۰/۰۹	IR7

DM: وزن ماده خشک گیاه (گرم بر متر مربع)، SWA: وزن آماس گیاه (گرم بر متر مربع)

جدول ۴- وزن ماده خشک و وزن آماس تیمارهای مختلف آبیاری در کشت دوم بیبی اسفناج

تیمار	روز نمونه برداری													
	۳۰		۲۷		۲۵		۲۳		۱۹		۱۷		۱۳	
	SWA	DM	SWA	DM	SWA	DM	SWA	DM	SWA	DM	SWA	DM	SWA	DM
IR1	۲/۳۸	۰/۲۲	۲/۰۵	۰/۱۷	۱/۷۳	۰/۱۶	۱/۳۸	۰/۱۱	۰/۸۵	۰/۰۸	۰/۶۲	۰/۰۶	۰/۴۴	۰/۰۴
IR2	۳/۱۸	۰/۲۶	۲/۵۷	۰/۲۲	۲/۱۱	۰/۱۹	۱/۸۵	۰/۱۴	۱/۲۳	۰/۱۰	۱/۰۳	۰/۰۸	۰/۷۰	۰/۰۷
IR3	۳/۸۵	۰/۳۱	۳/۱۸	۰/۲۶	۲/۶۸	۰/۲۲	۲/۲۷	۰/۱۷	۱/۸۵	۰/۱۳	۱/۶۲	۰/۱۳	۰/۸۵	۰/۰۹
IR4	۵/۵۳	۰/۳۹	۴/۹۵	۰/۳۵	۴/۱۲	۰/۲۶	۳/۳۳	۰/۲۲	۲/۶۱	۰/۱۸	۲/۲۸	۰/۱۸	۱/۳۰	۰/۱۲
IR5	۵/۴۸	۰/۳۹	۴/۸۰	۰/۳۴	۳/۹۵	۰/۲۶	۳/۱۹	۰/۲۱	۲/۳۷	۰/۱۸	۲/۲۲	۰/۱۷	۱/۲۶	۰/۱۲
IR6	۵/۲۱	۰/۳۹	۴/۶۷	۰/۳۴	۳/۶۴	۰/۲۶	۳/۰۶	۰/۲۲	۲/۳۲	۰/۱۷	۲/۱۹	۰/۱۷	۱/۱۹	۰/۱۲
IR7	۵/۱۳	۰/۳۸	۴/۴۶	۰/۳۴	۳/۵۱	۰/۲۵	۲/۹۰	۰/۲۱	۲/۲۶	۰/۱۷	۲/۰۶	۰/۱۶	۱/۱۵	۰/۱۱

DM: وزن ماده خشک گیاه (گرم بر متر مربع)، SWA: وزن آماس گیاه (گرم بر متر مربع)

در نهایت مقدار آب اشباع تجمعی بحرانی از طریق رابطه (۴) محاسبه شد. در این رابطه، SWA آب اشباع بحرانی گیاه بر حسب گرم بر گیاه و DM مقدار ماده خشک گیاه بر حسب گرم بر گیاه می‌باشد. a و b ضرایب معادله هستند که برای نوع وارپته گیاه و شرایط اقلیمی خاص منطقه به روش آماری که در ادامه شرح داده می‌شود، به دست می‌آیند. پارامتر a نشان دهنده مقدار آب اشباع بحرانی گیاه در زمانی است که ماده خشک گیاه، یک گرم بر گیاه باشد. در حالی که پارامتر b نشان دهنده نسبت بین سرعت ماده خشک گیاه و نرخ آب اشباع بحرانی گیاه تحت شرایط غیرمحدود کننده آب است. به کمک رابطه (۴)، سه موقعیت مختلف برای تعیین وضعیت آب اشباع در گیاه مشخص می‌شود. اگر منحنی مربوط به آب اشباع بحرانی در گیاه رسم شود، مقادیر آب اشباع در بالای منحنی بحرانی، نشان دهنده عدم محدودیت آبیاری، در زیر منحنی، محدودیت آبیاری و روی منحنی شرایط بهینه آبیاری است.

$$\text{Critical SWA} = a \times \text{DM}^b$$

رابطه (۴)

شاخص تشخیص آب گیاه در هر مرحله نمونه برداری از تقسیم آب اشباع تجمعی واقعی (SWA) گیاه به آب اشباع تجمعی بحرانی (Critical SWA) آن و بر اساس همان مقدار ماده خشک گیاه و طبق معادله (۵)، محاسبه شد.

$$\text{WDI} = \frac{\text{SWA}}{\text{Critical SWA}}$$

رابطه (۵)

هنگامی که مقدار WDI برابر با یک بوده است، گیاه در شرایط بهینه آبیاری قرار داشته است. درحالی که مقدار WDI بیشتر از یک بود، نشان دهنده که مقدار آب تجمعی گیاه بیش از حد بهینه بوده است. و اگر مقدار WDI کمتر از یک بود، مقدار آب تجمعی گیاه کمتر از حد بهینه بوده است.

### ارزیابی و تحلیل آماری نتایج

جهت 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) استفاده شد. این شاخص از طریق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

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

رابطه (۶)

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

رابطه (۷)

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

رابطه (۸)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i| + |P_i|)^2}$$

رابطه (۹)

در معادلات فوق، n بیانگر تعداد داده‌ها،  $P_i$  مقادیر شبیه‌سازی شده،  $O_i$  مقادیر واقعی،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده شده،  $\bar{O}_i = O_i - \bar{O}$  و  $\bar{P}_i = P_i - \bar{P}$  است. شاخص MBE بیانگر میزان بیش‌برآورد یا کم‌برآورد مدل شبیه‌سازی است؛ به طوری که مقادیر منفی این شاخص نشان دهنده کم‌برآورد بودن و مقادیر مثبت بیانگر بیش‌برآورد بودن مدل می‌باشند. شاخص RRMSE نیز به عنوان معیاری برای ارزیابی

دقت مدل به کار می‌رود؛ به‌گونه‌ای که مقادیر کمتر از ۱۰ درصد بیانگر عملکرد عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد عملکرد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد عملکرد متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشان‌دهنده عملکرد ضعیف مدل هستند (Jamieson et al., 1991). علاوه بر این، هرچه مقادیر شاخص‌های  $R^2$  و  $d$  بیش‌تر از ۰/۹۵ و نزدیک‌تر به عدد یک باشند، نشان‌دهنده کارایی بالاتر و دقت بیشتر در پیش‌بینی مدل خواهد بود (Willmott, 1982).

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌ها به وسیله‌ی نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ و نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد به منظور جداسازی تیمارها به دو گروه (با محدودیت آبیاری و بدون محدودیت آبیاری) انجام شد.

### نتایج و بحث

#### تجزیه واریانس زیست‌توده خشک

با توجه به جدول ۵، تیمارهای آبیاری بر ماده خشک تولید شده در طول دوره کشت اول، تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد داشته‌اند. همچنین با توجه به جدول ۶، تیمارهای ۴۰ تا ۱۰۰ درصد رطوبت گنجایش گلدانی تأثیر معنی‌داری بر تولید ماده خشک داشته‌اند؛ اما، بین مقدار ماده خشک تولید شده در تیمارهای ۱۰۰ تا ۱۶۰ درصد رطوبت گنجایش گلدانی، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشده است. دلیل افزایش ماده خشک گیاه با افزایش مقدار آبیاری در تیمارهای ۴۰ تا ۱۰۰ درصد رطوبت گنجایش گلدانی را می‌توان به بهبود فتوسنتز (Seymen et al., 2024)، رشد ریشه و جذب عناصر غذایی (Uçgun et al., 2020; Bukhari et al., 2021)، کاهش تنش وارد بر گیاه و حفظ رشد (Seymen et al., 2024; Bukhari et al., 2020) و افزایش رشد و توسعه سلولی نسبت داد.

در آزمایش‌های انجام‌شده بر روی گیاه اسفناج مشخص شد که کم‌آبیاری منجر به کاهش زیست‌توده، سطح برگ و ظرفیت فتوسنتزی گیاه می‌شود. این پدیده عمدتاً ناشی از محدودیت در انبساط سلولی، هدایت روزنه‌ای و تثبیت کربن تحت شرایط تنش آبی است. تنش آبی با کاهش فشار آماس و جلوگیری از بزرگ‌شدن سلول‌ها، رشد برگ را محدود کرده و در نهایت سطح برگ را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، در شرایط کم‌آبی روزنه‌ها برای کاهش اتلاف آب بسته می‌شوند که این امر موجب محدودیت در جذب دی‌اکسیدکربن و در پی آن کاهش نرخ فتوسنتز می‌گردد. در نتیجه، تثبیت کربن و تجمع ماده خشک گیاه به طور محسوسی کاهش می‌یابد (Ramezanifar et al., 2022; Schlering et al., 2020).

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آبیاری بر تولید ماده خشک در کشت اول بیبی اسفناج

منبع تغییرات	درجه آزادی	روز نمونه‌برداری					
		۱۳	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵	۲۷
آبیاری	۶	۰/۰۰۳**	۰/۰۰۴**	۰/۰۰۶**	۰/۰۰۷**	۰/۰۰۹**	۰/۰۱۶**
خطا	۱۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات		۲۲/۱۰	۹۷/۹۶	۲۱/۳۵	۲۳/۲۹	۱۸/۸۸	۲۳/۷۹

\* و \*\* به ترتیب نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد و یک درصد می‌باشند. NS بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

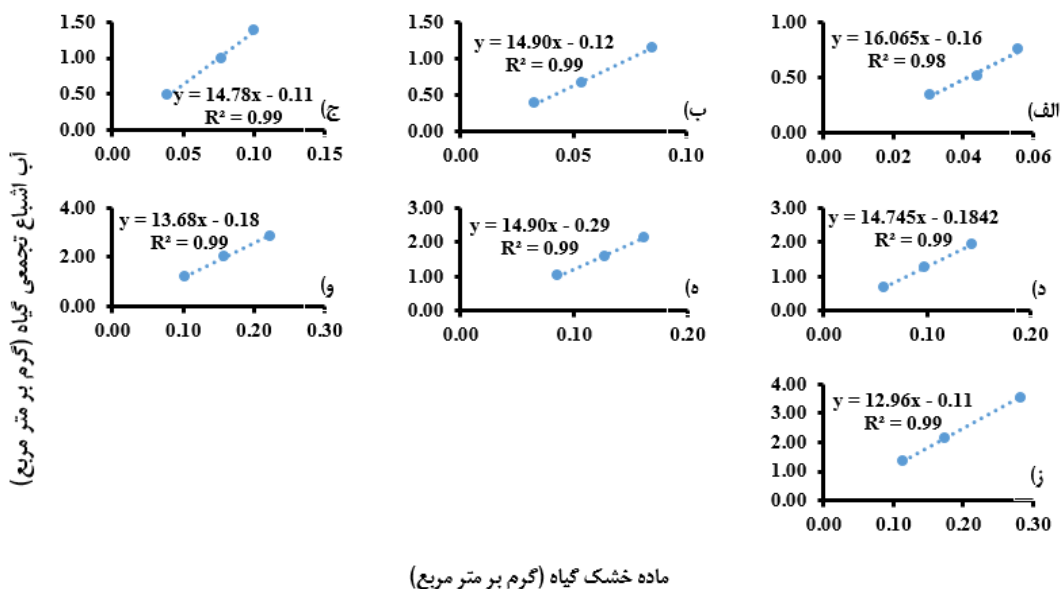
جدول ۶- نتیجه مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر مقدار ماده خشک گیاه در کشت اول بیبی اسفناج

تیمار	روز نمونه‌برداری					
	۱۳	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵	۲۷
IR1	۰/۰۳۰۷ <sup>d</sup>	۰/۰۳۳۰ <sup>c</sup>	۰/۰۳۹۳ <sup>c</sup>	۰/۰۵۸۹ <sup>d</sup>	۰/۰۸۵۷ <sup>d</sup>	۰/۱۰۲۹ <sup>d</sup>
IR2	۰/۰۴۳۹ <sup>c</sup>	۰/۰۵۳۶ <sup>bc</sup>	۰/۰۷۶۹ <sup>bc</sup>	۰/۰۹۷۳ <sup>c</sup>	۰/۱۲۷۳ <sup>c</sup>	۰/۱۵۸۳ <sup>c</sup>
IR3	۰/۰۵۵۹ <sup>b</sup>	۰/۰۸۵۰ <sup>b</sup>	۰/۱۰۰۱ <sup>b</sup>	۰/۱۴۳۳ <sup>b</sup>	۰/۱۶۱۳ <sup>b</sup>	۰/۲۲۳۷ <sup>b</sup>
IR4	۰/۰۹۱۷ <sup>a</sup>	۰/۱۲۵۵ <sup>a</sup>	۰/۱۵۱۴ <sup>a</sup>	۰/۱۸۱۹ <sup>a</sup>	۰/۲۳۳۱ <sup>a</sup>	۰/۲۸۱۷ <sup>a</sup>
IR5	۰/۰۹۰۴ <sup>a</sup>	۰/۱۲۱۷ <sup>a</sup>	۰/۱۵۰۴ <sup>a</sup>	۰/۱۸۱۰ <sup>a</sup>	۰/۲۲۱۶ <sup>a</sup>	۰/۲۸۵۷ <sup>a</sup>

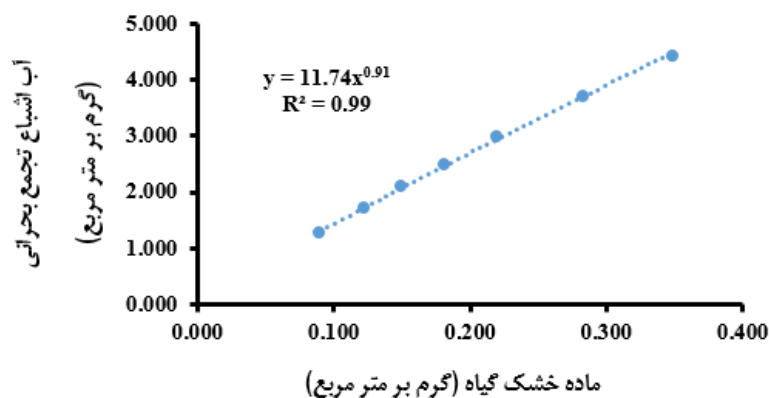
۰/۳۴۱۸ <sup>۵</sup>	۰/۲۸۰۲ <sup>۵</sup>	۰/۲۱۲۹ <sup>۵</sup>	۰/۱۸۰۹ <sup>۵</sup>	۰/۱۴۸۷ <sup>۵</sup>	۰/۱۲۱۴ <sup>۵</sup>	۰/۰۸۹۳ <sup>۵</sup>	IR6
۰/۳۴۱۳ <sup>۵</sup>	۰/۲۷۹۳ <sup>۵</sup>	۰/۲۱۲۰ <sup>۵</sup>	۰/۱۸۰۰ <sup>۵</sup>	۰/۱۴۶۳ <sup>۵</sup>	۰/۱۱۹۳ <sup>۵</sup>	۰/۰۸۸۳ <sup>۵</sup>	IR7

تعیین منحنی تجمع آب اشباع بحرانی (CSWA)

بر اساس تجزیه واریانس و نتایج آزمون مقایسه میانگین جداول (۵) و (۶)، تیمارها بر اساس وزن خشک به دو گروه با محدودیت آبیاری و بدون محدودیت آبیاری تقسیم شدند. سپس نمودار آب اشباع تجمعی برای هر تاریخ نمونه برداری به وسیله‌ی وزن ماده خشک و مقدار آب تجمع یافته تیمارهای کم آبیاری شده در کشت اول، طبق شکل ۲ به دست آمد. همچنین منحنی آب اشباع تجمعی بحرانی به صورت یک رابطه توانی (CSWA= 11.74DM<sup>0.91</sup>) با ضریب تبیین (R<sup>2</sup>)= ۰/۹۹ تعیین شد (شکل ۳). رابطه بین وزن ماده خشک گیاه و مقدار آب تجمعی بحرانی گیاه خیلی معنی دار بود (R<sup>2</sup>= ۰/۹۹). این رابطه به خوبی منحنی آب اشباع تجمعی بحرانی گیاه را نشان داد. همچنین با توجه به این معادله می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ماده خشک گیاه، مقدار SWA بحرانی گیاه، افزایش می‌یابد.



شکل ۲. مراحل استخراج منحنی آب اشباع بحرانی (الف) ۱۲ (ب) ۱۶ (ج) ۱۸ (د) ۲۲ (ه) ۲۴ (و) ۲۶ (ز) روز پس از کاشت (مربوط به تیمارهای با محدودیت آبیاری).



شکل ۳. منحنی آب اشباع تجمعی بحرانی گیاه بیبی اسفناج

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مقدار به دست آمده برای ضرایب a و b در معادله CSWA به ترتیب برابر با ۱۱/۷۴ و ۰/۹۱ است.

صحت‌سنجی منحنی تجمع آب اشباع بحرانی

مقادیر SWA و DM به دست آمده از مرحله دوم کشت، برای صحت سنجی رابطه CSWA استفاده شدند (شکل ۴). بر اساس تجزیه واریانس و آزمون مقایسه میانگین‌ها، تیمارها به دو گروه با محدودیت آبیاری و بدون محدودیت آبیاری (جدول ۷) و (جدول ۸) تفکیک شدند. سپس در هر تاریخ نمونه‌برداری رابطه‌ای بین ماده خشک و آب تجمع یافته در تیمارهای کم آبیاری ترسیم شد و معادله حاصل از برازش این رابطه به‌عنوان مبنای تعیین آب اشباع بحرانی (تن بر هکتار یا گرم بر متر مربع) مورد استفاده قرار گرفت. میانگین مقدار ماده خشک تیمارهای بدون محدودیت آبیاری محاسبه شد و مقدار به دست آمده، در معادله آب اشباع تجمعی قرار داده شد، تا مقادیر مشاهده شده به دست آید. همچنین میانگین مقدار ماده خشک تیمارهای بدون محدودیت آبیاری در معادله آب اشباع تجمعی بحرانی کشت اول قرار داده شد تا مقادیر شبیه‌سازی شده به دست آید. در نهایت، به وسیله مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، منحنی و معادله شبیه‌سازی شده طبق شکل ۴ به دست آمد.

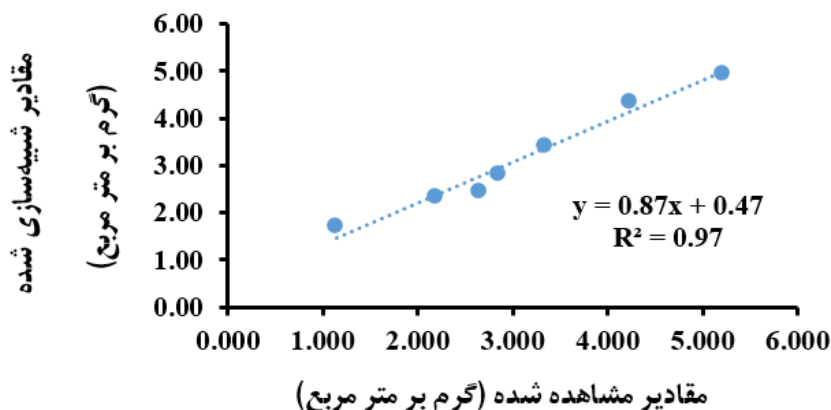
جدول ۷- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آبیاری بر تولید ماده خشک در کشت دوم بیبی اسفناج

روز نمونه‌برداری (روز از ابتدای کاشت)							درجه آزادی	منبع تغییرات
۳۰	۲۷	۲۵	۲۳	۱۹	۱۷	۱۳		
میانگین مربعات								
۰/۰۱۶**	۰/۰۱۶**	۰/۰۰۵**	۰/۰۰۵**	۰/۰۰۵**	۰/۰۰۷**	۰/۰۰۳**	۶	آبیاری
۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۴	خطا
۱۵/۰۳	۲۳/۷۰	۲۳/۰۲	۱۶/۶۶	۱۳/۲۷	۱۶/۹۱	۴۲/۳۱		ضریب تغییرات

\* و \*\* به ترتیب نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد و یک درصد می‌باشند. NS بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۸- نتیجه مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر مقدار ماده خشک گیاه در کشت دوم بیبی اسفناج

روز نمونه‌برداری (روز از ابتدای کاشت)							تیمار
۳۰	۲۷	۲۵	۲۳	۱۹	۱۷	۱۳	
۰/۲۱۵۳ <sup>c</sup>	۰/۱۷۰۰ <sup>c</sup>	۰/۱۵۷۲ <sup>c</sup>	۰/۱۱۳۳ <sup>c</sup>	۰/۰۷۶۷ <sup>c</sup>	۰/۰۵۶۰ <sup>d</sup>	۰/۰۴۴۴ <sup>c</sup>	IR1
۰/۲۶۳۳ <sup>bc</sup>	۰/۲۱۶۷ <sup>bc</sup>	۰/۱۸۸۳ <sup>bc</sup>	۰/۱۴۳۹ <sup>bc</sup>	۰/۰۹۷۳ <sup>c</sup>	۰/۰۸۵۰ <sup>c</sup>	۰/۰۷۲۱ <sup>b</sup>	IR2
۰/۳۰۶۷ <sup>b</sup>	۰/۲۵۶۷ <sup>b</sup>	۰/۲۱۶۹ <sup>b</sup>	۰/۱۷۱۲ <sup>b</sup>	۰/۱۳۴۰ <sup>b</sup>	۰/۱۲۹۳ <sup>b</sup>	۰/۰۸۸۲ <sup>b</sup>	IR3
۰/۳۹۳۳ <sup>a</sup>	۰/۳۵۰۰ <sup>a</sup>	۰/۲۶۳۱ <sup>a</sup>	۰/۲۱۷۶ <sup>a</sup>	۰/۱۷۹۳ <sup>a</sup>	۰/۱۷۶۳ <sup>a</sup>	۰/۱۲۳۱ <sup>a</sup>	IR4
۰/۳۹۰۰ <sup>a</sup>	۰/۳۴۳۳ <sup>a</sup>	۰/۲۶۰۰ <sup>a</sup>	۰/۲۱۱۸ <sup>a</sup>	۰/۱۷۷۳ <sup>a</sup>	۰/۱۷۰۰ <sup>a</sup>	۰/۱۲۲۱ <sup>a</sup>	IR5
۰/۳۸۶۷ <sup>a</sup>	۰/۳۴۰۰ <sup>a</sup>	۰/۲۵۹۰ <sup>a</sup>	۰/۲۱۸۵ <sup>a</sup>	۰/۱۷۵۰ <sup>a</sup>	۰/۱۶۸۷ <sup>a</sup>	۰/۱۱۵۸ <sup>a</sup>	IR6
۰/۳۸۳۳ <sup>a</sup>	۰/۳۳۶۷ <sup>a</sup>	۰/۲۵۰۸ <sup>a</sup>	۰/۲۰۹۵ <sup>a</sup>	۰/۱۷۱۷ <sup>a</sup>	۰/۱۶۱۳ <sup>a</sup>	۰/۱۱۳۲ <sup>a</sup>	IR7



شکل ۴. صحت سنجی منحنی تجمع آب اشباع بحرانی گیاه بیبی اسفناج با استفاده از داده‌های کشت دوم

به منظور سنجش دقت روش صحت‌سنجی، شاخص‌های آماری  $R^2$ ، MBE، RRMSE و d به صورت زیر محاسبه گردید (جدول ۹).

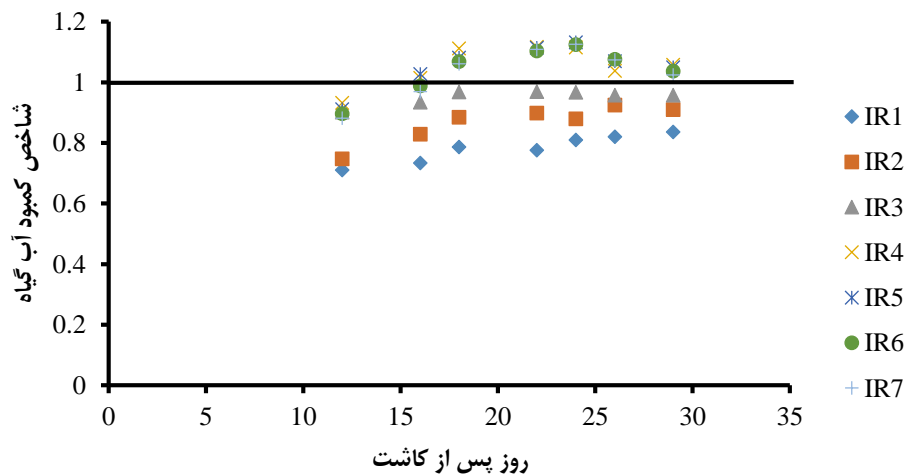
جدول ۹- شاخص‌های آماری محاسبه شده جهت سنجش دقت روش صحت‌سنجی

شاخص آماری	واحد	مقدار محاسبه شده
$R^2$		۰/۹۷
MBE	گرم بر مترمربع	۰/۰۶
RRMSE	درصد	۸/۱۶
d	گرم بر مترمربع	۰/۹۹

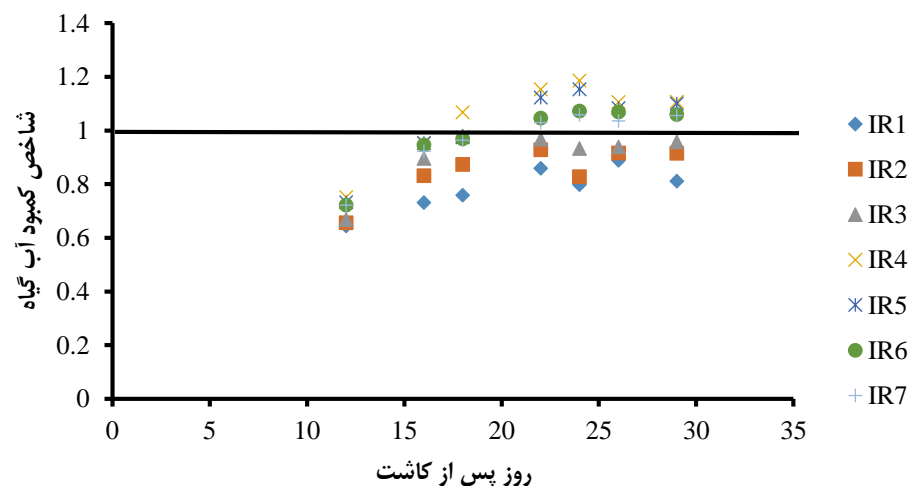
مقدار بالای ضریب تبیین ( $R^2$ ) و مقدار کمتر از ۱۰ درصد شاخص RRMSE، نشان دهنده دقت و صحت بالای مدل شبیه‌سازی شده، می‌باشد.

#### رسم نمودار شاخص کمبود آب (WDI)

جهت رسم نمودار شاخص کمبود آب گیاه بیبی اسفناج، در ابتدا میانگین مقدار آب اشباع تجمعی واقعی و مقدار آب اشباع تجمعی بحرانی هر تیمار را در هر تاریخ نمونه‌برداری محاسبه کرده، سپس مقدار آب اشباع تجمعی واقعی را بر مقدار آب اشباع تجمعی بحرانی تقسیم نموده تا مقدار WDI برای هر تیمار در هر تاریخ نمونه‌برداری به دست آید. نمودار شاخص WDI برای گیاه بیبی اسفناج در هر دو دوره کشت به صورت زیر ترسیم گردید (شکل ۵).



(الف)



(ب)

شکل ۵. نمودار شاخص تشخیص آب گیاه بیبی اسفناج در الف) کشت اول و ب) کشت دوم

همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار WDI با افزایش مقدار آبیاری در تیمارها، افزایش یافته است و بیشترین مقدار این شاخص در تیمار ۱۶۰ درصد رطوبت گنجایش گلدانی به دست آمده است. این نتایج، بیانگر تجمع آب اشباع بیش از حد بحرانی در اندام‌های هوایی گیاه است. این نتیجه‌گیری بر اساس روابط تجربی به دست آمده از دو دوره کشت استوار است، جایی که شاخص WDI در تیمارهای کم‌آبیاری (مانند ۴۰ درصد) به ۰/۶۵ تا ۰/۷۱ رسید و در تیمارهای بیش‌آبیاری به بیش از یک افزایش یافت. بنابراین، شاخص WDI نه تنها کمبود آب را تشخیص می‌دهد، بلکه شرایط بیش‌آبیاری را نیز هشدار می‌دهد، که این امر برای جلوگیری از مصرف بی‌رویه آب در کشت‌های گلخانه‌ای حیاتی است. براساس این یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود که برای اسفناج گلخانه‌ای، آبیاری را بر اساس WDI برابر یک برنامه‌ریزی کرد تا از هدررفت آب جلوگیری شود.

در کشت اول، مقدار شاخص WDI در روز ۱۷ام در تیمارهای ۴ و ۵، در روزهای ۱۹، ۲۳، ۲۵، ۲۷ و ۳۰ام نیز در تیمارهای ۴، ۵، ۶ و ۷، بیشتر از یک بوده است که نشان‌دهنده این است که مقدار آب تجمع یافته در گیاه بیشتر از حد بهینه بوده است. در کشت دوم نیز، مقدار این شاخص در روز ۱۹ام در تیمار ۴، در روز ۲۳، ۲۵، ۲۷ و ۳۰ام در تیمارهای ۴، ۵، ۶ و ۷ نیز بیشتر از حد بهینه بود است که نشان‌دهنده بیشتر بودن میزان آب اشباع تجمعی واقعی نسبت به آب اشباع تجمعی بحرانی می‌باشد. مقدار به دست آمده شاخص WDI در کشت اول، بین ۰/۷۱ تا ۱/۱۳ و در کشت دوم بین ۰/۶۵ تا ۱/۱۹ به دست آمد. این دامنه تغییرات بیانگر حساسیت بالای اسفناج به وضعیت رطوبتی و توان بالای شاخص WDI در تشخیص شرایط کم‌آبی، بهینه و بیش‌آبی در طول دوره رشد است.

مقایسه نتایج این تحقیق با یافته‌های ژائو و همکاران (۲۰۲۲) که شاخص WDI را برای گیاه ذرت در شرایط مزرعه‌ای بررسی کردند، نشان می‌دهد که دامنه تغییرات WDI در هر دو مطالعه از الگوی مشابهی تبعیت می‌کند. ژائو و همکاران گزارش کردند که مقدار WDI برای ذرت در بازه‌ای حدود ۰/۷۲ تا ۱/۲۶ متغیر بوده و افزایش آن به‌طور مستقیم با افزایش مقدار آبیاری مرتبط است. شباهت دامنه تغییرات WDI در این دو مطالعه، علی‌رغم تفاوت در گونه گیاهی (اسفناج در مقابل ذرت) و شرایط کشت (گلخانه‌ای در مقابل مزرعه‌ای)، نشان‌دهنده پایداری و قابلیت تعمیم‌پذیری مفهوم WDI به‌عنوان یک شاخص فیزیولوژیک مبتنی بر رابطه بین تجمع آب اشباع و ماده خشک گیاه است. با این حال، دامنه نسبتاً محدودتر WDI در اسفناج را می‌توان به دوره رشد کوتاه‌تر، سیستم ریشه‌ای کم‌عمق‌تر و حساسیت بالاتر این گیاه به تنش آبی نسبت داد.

از سوی دیگر، نتایج این پژوهش با یافته‌های ژوانگ و همکاران (۲۰۲۴) که اثر متقابل آب و نیتروژن را بر شاخص WDI در گندم زمستانه بررسی کردند نیز همخوانی دارد. ژوانگ و همکاران نشان دادند که مقادیر WDI در تیمارهای با نیتروژن کمتر، بالاتر از تیمارهای با نیتروژن بیشتر است؛ امری که به افزایش سطح برگ، تعرق بیشتر و در نتیجه تشدید کمبود آب در تیمارهای دارای نیتروژن بالا نسبت داده شد. در این پژوهش، اگرچه نیتروژن به‌صورت مستقل بررسی نشد، اما نتایج نشان داد که در تیمارهایی با آبیاری بیشتر، مقدار شاخص کمبود آب (WDI) افزایش یافت و در تیمارهای کم‌آبیاری، این شاخص کاهش پیدا کرد. این موضوع نشان می‌دهد که تعادل بین رشد گیاه و میزان آب در دسترس، نقش مهمی در مقدار نهایی WDI دارد.

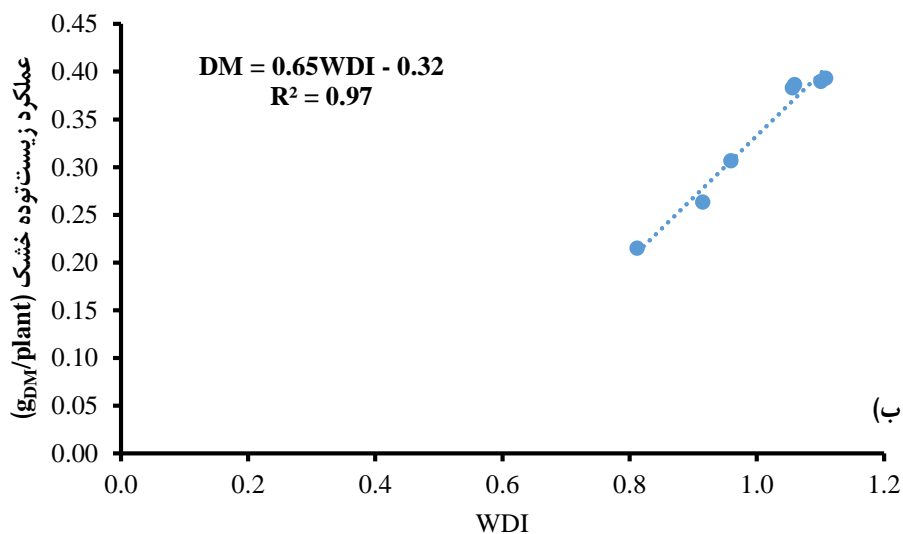
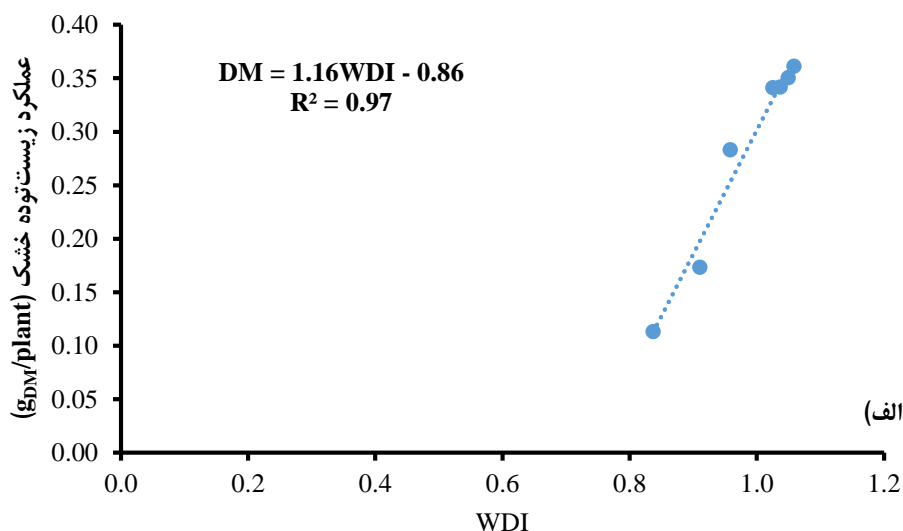
همچنین، مشاهده مقادیر WDI بزرگ‌تر از یک در برخی تیمارهای با آبیاری ۱۲۰ تا ۱۶۰ درصد رطوبت گنجایش گلدانی، مشابه نتایج گزارش شده توسط ژائو و همکاران (۲۰۲۲)، نشان‌دهنده شرایط بیش‌آبی و تجمع آب بیش از حد بحرانی در گیاه است. این موضوع اهمیت استفاده از شاخص WDI را نه تنها برای تشخیص تنش خشکی، بلکه برای جلوگیری از مصرف بی‌رویه آب و بهینه‌سازی مدیریت آبیاری برجسته می‌سازد؛ موضوعی که در کشت‌های گلخانه‌ای به دلیل محدودیت منابع آب و هزینه بالای تولید، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در مجموع، تطابق دامنه و روند تغییرات شاخص WDI در این پژوهش با مطالعات ژائو و ژوانگ نشان می‌دهد که شاخص WDI ابزاری قابل اعتماد و کارآمد برای ارزیابی وضعیت آب گیاه در گونه‌ها و شرایط کشت متفاوت است. نتایج این تحقیق، علاوه بر تأیید یافته‌های پیشین، نشان می‌دهد که WDI می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیزی برای برنامه‌ریزی دقیق آبیاری در کشت گلخانه‌ای اسفناج به کار گرفته شود و مبنایی علمی برای توسعه سامانه‌های هوشمند مدیریت آبیاری فراهم آورد.

در شکل ۶، رابطه بین عملکرد زیست‌توده خشک و شاخص WDI در کشت اول ( $DM = 1.1595WDI - 0.8583$ ) و دوم ( $DM = 0.6512WDI - 0.3182$ ) به دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش شاخص WDI، عملکرد زیست‌توده خشک نیز

افزایش یافته است. همچنین همبستگی معنی‌داری بین عملکرد زیست‌توده خشک و شاخص WDI در هر دو کشت مشاهده شد ( $R^2 = 0.97$ ).

افزایش آب اشباع تجمعی و به دنبال آن افزایش شاخص WDI، روزنه گیاه را باز نگه می‌دارد و جذب دی‌اکسید کربن لازم برای فتوسنتز را تسهیل می‌کند (Lawson & Matthews, 2020) مطالعات نشان می‌دهد که افزایش دسترسی به آب، پارامترهای فتوسنتز، سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای و کارایی تعرق را بهبود می‌بخشد که منجر به افزایش تولید زیست‌توده در ذرت می‌شود (Desoky et al., 2021). همچنین افزایش آب اشباع تجمعی به گیاه کمک می‌کند تا وضعیت آب خود را تحت شرایط محیطی مختلف، حفظ کند (Wahab et al., 2022; Dietz et al., 2021). این امر موجب کاهش اثرات سوء حاصل از تنش خشکی و افزایش زیست‌توده می‌شود (Desoky et al., 2021). گیاهانی که دارای سطح بالاتری از آب اشباع تجمعی هستند، مقاومت بیشتری در برابر تنش خشکی نشان می‌دهند و شرایط مطلوب‌تری برای جذب کربن و کاهش آسیب‌های ناشی از اکسیداسیون فراهم می‌کنند (Mishra et al., 2023; Yang et al., 2021). سازوکارهای مرتبط با مقاومت گیاه در برابر خشکی مانند حفظ ناقل‌های آب و جلوگیری از آسیب‌دیدگی غشاهای سلولی، نقش مؤثری در ارتقای عملکرد فتوسنتز و افزایش زیست‌توده دارند (Abbas et al., 2023; Muhammad et al., 2021; Kovár & Olšovská, 2020).



شکل ۶. رابطه بین عملکرد زیست‌توده خشک و شاخص WDI در الف) کشت اول و ب) کشت دوم

اگرچه این پژوهش توانست با موفقیت منحنی تجمع آب اشباع بحرانی (CSWA) و شاخص کمبود آب (WDI) را برای گیاه اسفناج

در شرایط گلخانه‌ای تعیین و اعتبارسنجی کرد، اما محدودیت‌هایی دارد که باید در تفسیر نتایج و کاربردهای آینده در نظر گرفته شود. یکی از محدودیت‌های اصلی، تمرکز بر رقم Racoon بیبی‌اسفناج است و نمی‌توان نتایج حاصل را به سایر رقم‌ها تعمیم داد. علاوه بر این، مطالعه در شرایط خاص گلخانه پژوهشی دانشگاه تهران در کرج، شرایط متفاوتی با محیط‌های گلخانه‌ای در سایر مناطق جغرافیایی دارد. عواملی مانند شدت نور، بافت خاک و مدیریت تهویه می‌توانند بر منحنی CSWA و مقادیر WDI تأثیرگذار باشند که این امر تعمیم نتایج به مقیاس‌های بزرگ‌تر یا شرایط میدانی را چالش برانگیز می‌کند. محدودیت دیگر، عدم بررسی اثرات آبیاری بر کیفیت شیمیایی اسفناج است. این پژوهش عمدتاً بر پارامترهای رشد مانند زیست‌توده خشک، وزن تازه و وزن اماس متمرکز بود، اما جنبه‌های کیفی مانند محتوای نیترات، ویتامین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها که تحت تأثیر سطوح آبیاری متفاوت قرار می‌گیرند، مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در نهایت، مطالعه فاقد مقایسه مستقیم با روش‌های سنتی آبیاری (مانند تبخیر-تعرق مرجع) است.

با توجه به این محدودیت‌ها، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر گسترش دامنه ارقام، شرایط محیطی متنوع و ارزیابی کیفیت محصول تمرکز کنند تا مدل‌های پیشنهادی به ابزارهای جامع‌تری برای مدیریت آبیاری اسفناج تبدیل شوند.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش بر تعیین منحنی تجمع آب اشباع بحرانی (CSWA) و شاخص وضعیت آب گیاه (WDI) برای گیاه اسفناج در شرایط گلخانه‌ای تمرکز داشت و نشان داد که این مدل‌ها ابزارهای کارآمد و دقیقی برای ارزیابی وضعیت آبی گیاه و بهینه‌سازی مدیریت آبیاری محسوب می‌شوند. یافته‌های نهایی حاکی از آن است که رابطه بین وزن ماده خشک گیاه و تجمع آب اشباع بحرانی ( $CSWA = 11.74DM^{0.91}$ ) با دقت بالا ( $R^2 = 0.99$ ) مدل‌سازی شده و با استفاده از داده‌های کشت دوم، صحت‌سنجی شده است، که این امر بر قابلیت تعمیم‌پذیری مدل در شرایط کنترل‌شده گلخانه‌ای تأکید می‌کند. همچنین، شاخص WDI دامنه تغییرات مناسبی (۰/۶۵ تا ۱/۱۹) را در تیمارهای مختلف آبیاری نشان داد و همبستگی قوی با عملکرد زیست‌توده خشک ( $R^2 = 0.97$ ) برقرار کرد، که بیانگر حساسیت بالای اسفناج به تنش آبی و توانایی WDI در تشخیص شرایط کم‌آبیاری، بهینه و بیش‌آبیاری است. این مدل‌ها نه تنها وضعیت آب گیاه را با دقت فیزیولوژیکی توصیف می‌کنند، بلکه بر اساس روابط تجربی، امکان برنامه‌ریزی آبیاری دقیق را فراهم می‌آورند.

پیشنهاد می‌شود که مدل CSWA و WDI به عنوان پایه‌ای برای توسعه سامانه‌های هوشمند آبیاری در گلخانه‌ها به کار گرفته شود، جایی که آبیاری بر اساس حفظ شاخص WDI برابر یک تنظیم گردد تا از هدررفت آب جلوگیری شود و عملکرد بهینه حاصل آید. برای کاربرد عملی، ادغام حسگرهای غیرمخرب (مانند سنسور محتوای آب بر اساس وزن) با این مدل‌ها می‌تواند پایش مداوم را تسهیل کند و مصرف آب را تا ۲۰-۴۰٪ بدون افت عملکرد، کاهش دهد. پیشنهاد می‌شود این رویکرد به سایر سبزیجات و صیفی‌جات گلخانه‌ای در اقلیم‌های متنوع ایران گسترش یابد، تا روابط آلومتریکی خاص هر گونه استخراج شود. همچنین، ارزیابی اقتصادی سامانه‌های هوشمند مبتنی بر این شاخص‌ها، می‌تواند به پایداری کشاورزی در برابر بحران آب کمک شایانی کند. در نهایت، این یافته‌ها زمینه‌ساز انتقال از مدیریت سنتی به رویکردهای داده‌محور در کشت گلخانه‌ای هستند و به اهداف توسعه پایدار در بخش کشاورزی همسو می‌گردند.

## 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 در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

### مشارکت نویسندگان

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 پیش‌نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

### اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از هوش مصنوعی ChatGPT به منظور بررسی دستور زبان استفاده کردند.

### بیانیه دسترسی به داده‌ها

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

### سپاسگزاری

از گروه علوم باغبانی دانشگاه تهران به خاطر حمایت‌های معنوی 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.

## REFERENCES

- Abbas, K., Li, J., Gong, B., Lu, Y., Wu, X., Lü, G., & Gao, H. (2023). Drought stress tolerance in vegetables: the functional role of structural features, key gene pathways, and exogenous hormones. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(18), 13876.
- Ahmed, Z., Gui, D., Murtaza, G., Yunfei, L., & Ali, S. (2023). An overview of smart irrigation management for improving water productivity under climate change in drylands. *Agronomy*, 13(8), 2113.
- Adom, R. K., Simatele, M. D., & Reid, M. (2022). Addressing the challenges of water-energy-food nexus programme in the context of sustainable development and climate change in South Africa. *Journal of Water and Climate Change*, 13(7), 2761-2779.
- Anjos Neto, A. P. D., Oliveira, G. R. F., Mello, S. D. C., Silva, M. S. D., Gomes-Junior, F. G., Novembre, A. D. D. L. C., & Azevedo, R. A. (2020). Seed priming with seaweed extract mitigate heat stress in spinach: effect on germination, seedling growth and antioxidant capacity. *Bragantia*, 79, 502-511.
- Batziakas, K. G., Stanley, H., Batziakas, A. G., Brecht, J. K., Rivard, C. L., & Pliakoni, E. D. (2020). Reducing postharvest food losses in organic spinach with the implementation of high tunnel production systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6), 42.
- Bua, C., Adami, D., & Giordano, S. (2024). GymHydro: An innovative modular small-scale smart agriculture system for hydroponic greenhouses. *Electronics*, 13(7), 1366.
- Bukhari, S. A. B. H., Lalarukh, I., Amjad, S. F., Mansoor, N., Naz, M., Naeem, M., & Fahad, S. (2021). Drought stress alleviation by potassium-nitrate-containing chitosan/montmorillonite microparticles confers changes in *Spinacia oleracea* L. *Sustainability*, 13(17), 9903.
- Chaudhary, S., Devi, P., HanumanthaRao, B., Jha, U. C., Sharma, K. D., Prasad, P. V., & Nayyar, H. (2022). Physiological and molecular approaches for developing thermotolerance in vegetable crops: a growth, yield and sustenance perspective. *Frontiers in Plant Science*, 13, 878498.
- Desoky, E. S. M., Mansour, E., Ali, M. M., Yasin, M. A., Abdul-Hamid, M. I., Rady, M. M., & Ali, E. F. (2021). Exogenously used 24-epibrassinolide promotes drought tolerance in maize hybrids by improving plant and water productivity in an arid environment. *Plants*, 10(2), 354.
- Dietz, K. J., Zörb, C., & Geilfus, C. M. (2021). Drought and crop yield. *Plant Biology*, 23(6), 881-893.
- Fontanet, M., Fernández-García, D., Rodrigo, G., Ferrer, F., & Villar, J. M. (2022). Combined simulation and optimization framework for irrigation scheduling in agriculture fields. *Irrigation science*, 40(1), 115-130.
- Fussy, A., & Papenbrock, J. (2022). An overview of soil and soilless cultivation techniques—chances, challenges and the neglected question of sustainability. *Plants*, 11(9), 1153.
- Gawronski, S., & Skapski, H. (1976). The optimum spacing for spinach grown in weed-free conditions.
- Hogeboom, R. J. (2020). The water footprint concept and water's grand environmental challenges. *One Earth*, 2(3), 218-222.
- 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.
- Kovár, M., & Olšovská, K. (2020). Mechanisms of drought resistance in common spinach (*Spinacia oleracea* L.) and New Zealand spinach (*Tetragonia tetragonoides* (Pall.) Kuntze) plants under soil dehydration. *Journal of Central European Agriculture*, 21(2), 275-284.
- Lawson, T., & Matthews, J. (2020). Guard cell metabolism and stomatal function. *Annual review of plant biology*, 71(1), 273-302.
- Lee, T., Jang, W. S., Chun, B., Ahmad, M. J., Jung, Y., Kim, J., & Shin, Y. (2023). Development of irrigation schedule and management model for sustaining optimal crop production under agricultural drought. *Paddy and Water Environment*, 21(1), 31-45.
- Liang, Z., Liu, X., Xiao, J., & Liu, C. (2021). Review of conceptual and systematic progress of precision irrigation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(4), 20-31.
- Masseroni, D., Gangi, F., Ghilardelli, F., Gallo, A., Kisekka, I., & Gandolfi, C. (2024). Assessing the water conservation

- potential of optimized surface irrigation management in Northern Italy. *Irrigation Science*, 42(1), 75-97.
- Mehmood, F., Wang, G., Abubakar, S. A., Zain, M., Rahman, S. U., Gao, Y., & Duan, A. (2023). Optimizing irrigation management sustained grain yield, crop water productivity, and mitigated greenhouse gas emissions from the winter wheat field in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 290, 108599.
- Mishra, N., Jiang, C., Chen, L., Paul, A., Chatterjee, A., & Shen, G. (2023). Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1110622.
- Muhammad, I., Shalmani, A., Ali, M., Yang, Q. H., Ahmad, H., & Li, F. B. (2021). Mechanisms regulating the dynamics of photosynthesis under abiotic stresses. *Frontiers in plant science*, 11, 615942.
- Naseem, J., Shah, A. A., Usman, S., Ahmed, S., Gatashah, M. K., Shaffique, S., & Javad, S. (2025). Green synthesized FeNPs ameliorate drought stress in *Spinacia oleracea* L. through improved photosynthetic capacity, redox balance, and antioxidant defense. *Scientific Reports*, 15(1), 1782.
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2020). Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change. *Agronomy*, 10(8), 1120.
- Parkash, V., & Singh, S. (2020). A review on potential plant-based water stress indicators for vegetable crops. *Sustainability*, 12(10), 3945.
- Preite, L., Solari, F., & Vignali, G. (2023). Technologies to optimize the water consumption in agriculture: A systematic review. *Sustainability*, 15(7), 5975.
- Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2020). Assessment of reference evapotranspiration estimation methods in controlled greenhouse conditions. *Irrigation Science*, 38, 389-400.
- Ramezanifar, H., Yazdanpanah, N., Golkar Hamzee Yazd, H., Tavousi, M., & Mahmoodabadi, M. (2022). Synergistic and antagonistic interactions of soil water potential and osmotic potential linked to nitrogen fertilization on spinach traits and water use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 45(3), 389-412.
- Schlering, C., Zinkernagel, J., Dietrich, H., Frisch, M., & Schweiggert, R. (2020). Alterations in the Chemical Composition of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) as Provoked by Season and Moderately Limited Water Supply in Open Field Cultivation. *Horticulturae*, 6(2), 25. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6020025>
- Seymen, M., Yavuz, D., Can, H., Kıymacı, G., Türkmen, Ö., Paksoy, M., ... & Kurtar, E. S. (2024). Molecular and physiological responses to exogenously applied melatonin in spinach under deficit irrigation conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(6), 1858-1874.
- Taghvaeian, S., Andales, A. A., Allen, L. N., Kisekka, I., O'Shaughnessy, S. A., Porter, D. O., & Aguilar, J. (2020). Irrigation scheduling for agriculture in the United States: The progress made and the path forward. *Transactions of the ASABE*, 63(5), 1603-1618.
- Tzanakakis, V. A., Angelakis, A. N., Paranychianakis, N. V., Dialynas, Y. G., & Tchobanoglous, G. (2020). Challenges and opportunities for sustainable management of water resources in the island of Crete, Greece. *Water*, 12(6), 1538.
- Uçgun, K., Ferreira, J. F., Liu, X., da Silva Filho, J. B., Suarez, D. L., Lacerda, C. F. D., & Sandhu, D. (2020). Germination and growth of spinach under potassium deficiency and irrigation with high-salinity water. *Plants*, 9(12), 1739.
- Wabela, K., Hammani, A., Abdelilah, T., Tekleab, S., & El-Ayachi, M. (2022). Optimization of irrigation scheduling for improved irrigation water management in Bilate Watershed, Rift Valley, Ethiopia. *Water*, 14(23), 3960.
- Wahab, A., Abdi, G., Saleem, M. H., Ali, B., Ullah, S., Shah, W., ... & Marc, R. A. (2022). Plants' physio-biochemical and phyto-hormonal responses to alleviate the adverse effects of drought stress: A comprehensive review. *Plants*, 11(13), 1620.
- Wang, X. (2022). Managing land carrying capacity: Key to achieving sustainable production systems for food security. *Land*, 11(4), 484.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.
- Yan, H., Deng, S., Zhang, C., Wang, G., Zhao, S., Li, M., & Zhou, Y. (2023). Determination of energy partition of a cucumber grown Venlo-type greenhouse in southeast China. *Agricultural Water Management*, 276, 108047.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3), 50.
- Zhao, B., Ata-Ul-Karim, S. T., Lemaire, G., Schmidhalter, U., Duan, A., Qin, A., & Liu, Z. (2022). Determining the plant critical saturated water accumulation curve in maize. *Field Crops Research*, 284, 108556.
- Zhao, Y., Li, G., Li, S., Luo, Y., & Bai, Y. (2024). A review on the optimization of irrigation schedules for farmlands based on a simulation-optimization model. *Water*, 16(17), 2545.
- Zhuang, T., Zhao, B., Ata-Ul-Karim, S. T., Lemaire, G., Liu, X., Tian, Y., & Cao, Q. (2024). Can the allometric relationship between saturated water accumulation and dry mass be used to diagnose the water status of winter wheat?. *Field Crops Research*, 315, 109474.
- Zhuang, T., Zhao, B., Ata-Ul-Karim, S. T., Lemaire, G., Liu, X., Tian, Y., & Cao, Q. (2025). Exploring the allometry between ear saturated water accumulation and dry mass for diagnosing winter wheat water status during the reproductive growth. *Agricultural Water Management*, 309, 109364.