Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 23-42

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Feasibility Assessment of Water Stress Monitoring in Tomato Plants Using Spectral Indices in Greenhouse Conditions

A. Hadighanavat[1], A. Hooshmand[2*], P. Tishehzan[3], N. Alemzadeansari[4] and K. Rangzan[5]

1- Ph.D. student, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (Hooshmand_a@scu.ac.ir)*
3- Associatet Professor, Department of Environmental, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4- Professor, Department of Horticulture and Crop Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
5- Professor of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 29 March 2024
Revised: 21 May 2024
Accepted: 10 June 2024
Available online: 05 May 2026

Keywords:
Plant Water Status, Relative Water Content, Remote sensing, Spectrometry.

TO CITE THIS ARTICLE:

Hadighanavat, A., Hooshmand, A., Tishehzan, P., Alemzadeh ansari, N., Rangzan, K. 2026. 'Feasibility Assessment of Water Stress Monitoring in Tomato Plants Using Spectral Indices in Greenhouse Conditions', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 23-42. doi: 10.22055/jise.2024.46568.2121

Abstract

Early detection of plant water status is crucial for effective water management planning. Remote sensing methods, particularly spectroscopy, offer a practical, reliable, rapid, and non-destructive approach to monitoring plant biochemical parameters, including water status. This study investigated the potential of several spectral water indices – WI1-4, NWI5, RDVI, NDVI, and OSAVI – for monitoring the water status of tomato plants grown in a greenhouse. The experiment involved treatments with silica nanoparticles at concentrations of 0 and 100 mg/L, combined with three irrigation regimes providing 80%, 100%, and 60% of the plants' water requirement. The findings indicated that relative leaf water content in tomato plants decreased with increasing water stress across different months and throughout the study. However, significant differences in relative leaf water content were only observed between the full irrigation treatment (100%) and the 60% irrigation treatment. Furthermore, plants treated with 100 mg/L silica nanoparticles generally exhibited higher relative leaf water content compared to those without nanoparticles. Among the spectral indices evaluated, NWI5 demonstrated the weakest correlation with relative leaf water content, while WI2 and WI1 showed the strongest. Overall, the results suggest that spectral indices can be effectively employed for rapid, non-destructive, and reliable assessment of tomato plant water status in greenhouse environments.

Introduction

Water stress is one of the most important factors reducing the production of agricultural products worldwide. Early detection of plant water status is essential to optimize crop water use, and implement water savings methods (Ballesteros et al. 2016). Remote sensing techniques, such as spectroscopy, are recognized for their practicality, reliability, speed, and non-destructiveness in studying the biochemical characteristics of plants, including the water status of plants (Ihuoma and Madramootoo, 2019). This study aimed to investigate the potential of plant water spectral indices, which include water indices 1–4 (WI1–4), normal water index 5(NWI5), spectral vegetation indices RDVI, NDVI, and OSAVI, to estimate water status in tomato plants.

Methodology

The experiment was performed in the research greenhouse of the Department of Water and Environmental Engineering Science, the Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan Province, Iran (31°18'13"N, 48°39'40"E, Elevation: 22.5 m a.s.l) during the growing season of 2021 from January to June. The experimental treatments involved silica nanoparticles with the concentrations of 0 and 100 mg/L, and three water regimes (100%, 80%, and 60% of crop water requirement). The split-plot was used as the experimental design arranged based on randomized complete design (RCD) with four replications (120 pots in total). Three irrigation regimes were identified as the primary determinants, whereas the two degrees of nanoparticle concentration were considered as the secondary ones. A total of 120 pots were used. RWC was used to describe the water status of Tomato leaves. RWC was determined by the procedure set out by SHlemmer et al. (2005). Concurrent with other measurements, spectral reflectance was measured using a portable spectrometer (ASD FieldSpec 3, Analytical Spectral Devices Inc, USA) operated in the spectral range of 350–2500 nm. The measured values of leaf reflectance were used for calculating the spectral indices (water indices 1–4 (WI1–4), normal water index 5(nwi5), spectral vegetation indices RDVI, NDVI, and OSAVI. The ability of spectral indices to assess such water status-related RWC of tomato leaves under different irrigation regimes was studied. An analysis of variance (ANOVA) was performed on the spectral indices and relative water content (RWC) using the split plot design. The PROC GLM technique of SAS software (version 9.4, SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA) was used for this analysis. Then, the least significant difference (LSD) test was used to compare the means and determine if they were significantly different from each other at $p \leq .05$ level.

Findings

The results showed that the relative water content (RWC) of leaves in tomato plants under deficit irrigation treatments in different months, and throughout the study period decreased by increasing water stress. Nevertheless, the disparity in the magnitude of this index was only notable in the treatment including complete irrigation and meeting 60% of the plant's water needs. Besides, the relative water content of tomato leaves in the nanoparticles with the concentrations of 100 mg/l was higher than 0 mg/l. Spectral indices were closely and significantly associated with RWC Spectral indices had a close and significant relationship with RWC in an average of measurements (0.66 **$< R^2 < 0.78$**). Among all tested spectral indices, NWI5 and WI1, WI2 showed the least and greatest consistent association with relative water content, respectively. Among eight spectral indices, four satisfied most of the criteria used to determine the accuracy of the models to predict RWC The models based on WI2, WI3, WI4, WI1, OSAVI, and RDVI ،provided more accurate estimates of RWC the estimated values of parameters studied were always less than the measured ones over the entire set of measurements. In conclusion, spectral reflectance could be useful for fast, non-destructive, and reliable assessment of water status of tomato plants in greenhouse conditions.

Conclusions

The tomato plant is one of the strategic crops in the agricultural sector. Considering relatively high demand for tomatoes and the lack of water, there is a need for optimal management of water consumption, and irrigation planning for the sustainability of producing agricultural products, including tomato plants. The capability of water spectral indices, including water index 1-4 (WI1-4), normal water index 5 (NWI5), vegetation spectral indices RDVI, NDVI, and OSAVI in studying water stress status of tomato plants under the effect of irrigation regimes, and silica nanoparticles in greenhouse conditions by determining The relationship between spectral indices and relative water content index of plant leaves (RWC) was investigated. The potential for a rapid and non-destructive assessment of changes in the water status of tomato plants in greenhouse conditions has been demonstrated by the substantial correlation between the spectral indices and the relative leaf water content index. It can be a good measure to express the water status of plant. The work presented in this paper assessed the feasibility of using spectral indices to detect water stress in tomato plants. Water scarcity had an adverse effect on water status (RWC), and this parameter

decreased with the reduction of irrigation water. However, applying 100 mg/L of nanoparticles increased the water condition index (RWC). Our study showed that WI1-4, NWI5, OSAVI, RDVI, and NDVI were sensitive indicators for detecting water stress levels in greenhouse tomato plants. Consequently, the use of spectral data in crop monitoring enables the rapid, non-destructive, and dependable estimation of plant water status. The optimization of agricultural water use for increased crop yield can be achieved by analyzing these features in real-time and providing the producers with qualitative and quantitative information. Based on the findings of this study, it was difficult to select a single index for precise estimation of plant water status. Therefore, innovative data management techniques that would integrate various vegetation indices are needed to widen the scientific knowledge on crop stress monitoring and provide irrigators with precise indices for scheduling irrigation. Furthermore, future research efforts should be geared towards the integration of thermal and narrow-band spectral indices to provide more precise information about plant water status.

Conflict of Interest

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

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WI1402.144.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Anahita Hadighanavat, Done research, data analysis, participation in preparing the manuscript.
Second Author: Abdolrahim Hosshmand, supervision on the research , investigation of the results, participation in the preparation of the manuscript.
Third Author: Parvaneh Tishehzan, supervision on the research investigation of the results, and analysis of data, participation in the preparation of the manuscript.
Fourth Author: Naser Alemzadeansari, participation in done research at greenhouse.
Fifth Author: Kazem Rangzan, participation in the remote sensing technique.

Acknowledgmen

The authors would like to express their gratitude to Shahid Chamran University of Ahvaz Research and Technology for their financial support under Contract and Sepahan Royesh Company of Isfahan for providing tomato seeds is gratefully acknowledged to support the Ph.D. thesis in Irrigation and Drainage written at Shahid Chamran University of Ahvaz.

References

1- Ballesteros, R., Ortega, J.F. and Moreno, M.A., 2016. FORETo: new software for reference evapotranspiration forecasting. *Journal of Arid Environments*. *124*(3), pp.128–141. doi:10.1016/j.jaridenv.2015.08.006

2- Ihuoma, S.O. and Madramootoo, C.A., 2019. Sensitivity of spectral vegetation indices for monitoring water stress in tomato plants. *Journal Computers and Electronics in Agriculture. 163*(c), pp. doi.org/10.1016/j.compag.2019.104860

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۴۲-۲۳

امکان سنجی پایش تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از شاخص‌های طیفی در شرایط گلخانه‌ای

آناهیتا هادی قنوات[۱]، عبدالرحیم هوشمند[۲*]، پروانه تیشه زن[۳]، ناصر عالم‌زاده انصاری[۴] و کاظم رنگزن[۵]

۱- دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
Hooshmand_a@scu.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۴- استاد گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۵- استاد گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

تشخیص زودهنگام وضعیت آب گیاه برای برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی مدیریت مصرف آب ضروری است. امروزه روش‌های سنجش از دور مانند طیف‌سنجی، به‌عنوان یک روش کاربردی، مطمئن، سریع و غیرمخرب در بررسی پارامترهای بیوشیمیایی گیاهان از جمله وضعیت آبی گیاه شناخته می‌شود. هدف از این پژوهش بررسی قابلیت شاخص‌های طیفی آب از جمله شاخص آب ۱-٤ (WI1-4)، شاخص نرمال آب ۵ (NWI5)، شاخص‌های طیفی سبزینگی RDVI، NDVI و OSAVI در پایش وضعیت آبی گیاه گوجه‌فرنگی بود. تیمارهای آزمایشی شامل نانو ذرات سیلیکا با غلظت‌های صفر و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و سه رژیم آبیاری (آبیاری برای تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ٦۰ درصد از نیاز آبی گیاه) بود. نتایج نشان داد که مقادیر محتوای نسبی آب برگ در گیاه گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای آبیاری در ماه‌های مختلف و در کل دوره‌ی تحقیق، با افزایش تنش آبی کاهش یافته‌است، با این حال تفاوت مقدار این شاخص تنها در تیمار آبیاری کامل و آبیاری برای تأمین ٦۰ درصد از نیاز آبی گیاه، معنی‌دار بود. علاوه بر این، به‌طور کلی محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی در نانو ذره با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به غلظت صفر میلی‌گرم بر لیتر بیش‌تر بود. در میان تمام شاخص های طیفی آزمایش شده، شاخص طیفی NWI5 کمترین و شاخص‌های WI2 و WI1 بیشترین ضریب تعیین را با شاخص محتوای نسبی آب برگ در طول اندازه‌گیری‌ها نشان داد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان کرد که شاخص‌های طیفی قابلیت استفاده برای ارزیابی سریع، غیرمخرب و مطمئن وضعیت آبی گیاه گوجه فرنگی در شرایط گلخانه‌ای را دارند.

کلید واژه‌ها: سنجش از دور، طیف‌سنجی، محتوای نسبی آب برگ، نانوذره، وضعیت آب گیاه.

مقدمه

تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش آبی از مهمترین عوامل کاهش تولیدات محصولات کشاورزی در سطح جهان هستند. بهره‌وری محصولات کشاورزی با توجه به افزایش جمعیت، تغییرات آب و هوایی، کاهش بارندگی و افزیش دما با کاهش شدید مواجه شده و امنیت غذایی جهانی را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا مورد تهدید قرار داده‌است (Lynch, 2019). در مقیاس جهانی بیشترین بخش آب مصرفی، به کشاورزی با مصرف چیزی حدود ۷۰ درصد از منابع آب شیرین اختصاص دارد. بنابراین مدیریت صحیح منابع آب و استفاده پایدار از آن، به‌ویژه در مناطقی که با بحران کم آبی مواجه هستند، به یک هدف مهم در کشاورزی تبدیل شده است (Ballesteros et al., 2016).

هنگامی که گیاه در شرایط تنش آبی قرار می‌گیرد، این کمبود آب به‌طور مستقیم بر وضعیت آب برگ و در نهایت بر عملکرد گیاه تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین برآورد و پایش دقیق شاخص وضعیت آب گیاه به منظور مدیریت صحیح و کارآمد آبیاری و حفظ عملکرد مطلوب ضروری است (Bohman et al., 2019 ; Elmetwalli et al., 2020).

در سال‌های اخیر با ورود فناوری‌های نوین در حوزه کشاورزی مانند نانوذرات، زمینه ورود به دروازه‌های جدیدی برای ایجاد مدیریت کارآمد و کشاورزی مدرن در این بخش گشوده شده‌است (Hashemi Dehkordi et al., 2017). استفاده از نانو ذرات به‌دلیل قابلیت آن‌ها در کاهش اثرات منفی تنش آبی و تأثیر مثبت بر صفات مورفولوژیکی گیاهان، مورد توجه زیادی قرار گرفته‌است (Tripathi et al., 2015). در این میان استفاده از نانوذرات به شکل SiO_2 به‌دلیل اینکه سیلیکون (Si) نقش اساسی در کاهش تنش‌های غیرزیستی (مانند شوری و خشکی) دارد، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است (Maghsoudi et al., 2015). نانو ذرات SiO_2،

تحمل گیاهان در مقابل تنش خشکی و شوری را از طریق تنظیم فرایندهای مختلف فیزیولوژیک شامل افزایش دفاع آنتی اکسیدانت، تنظیم جذب آب توسط ریشه، ایجاد تعادل در جذب عناصر، تعدیل سرعت تعرق و افزایش فتوسنتز بهبود می‌بخشند (Alsaeedi et al., 2019). در نتیجه از این طریق تنش آبی را کنترل کرده و اثرات سوء ناشی از تنش خشکی را به حداقل می‌رسانند (Mahmoodi et al., 2020). برخی گزارش‌ها، اثر سودمند کاربرد نانو ذرات سیلیکا را در شرایط تنش آبی روی گیاهان گلخانه‌ای نشان می‌دهد (Haghighi et al., 2021 ; Shokri et al., 2021).

روش‌های سنتی مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری که به‌منظور بررسی تنش کم آبی درگیاه مورد استفاده قرار می‌گیرند، عمدتاً بر پایه نمونه برداری از خاک یا گیاه استوار است (Zhang et al., 2012). روش‌های مبتنی بر خاک با وجود اینکه نشان دهنده‌ی مقدار آب در منطقه ریشه هستند اما ممکن است ارتباط مستقیم با وضعیت آبی گیاه نداشته باشند. علاوه بر این برهم زدن خاک، عدم یکنواختی کافی نمونه‌ها در سطح وسیع برای دست‌یابی به وضعیت کلی گیاه و زمان‌بر بودن آزمایش‌ها، به‌عنوان دیگر معایب این روش می‌توان اشاره کرد (Ihuoma and Madramootoo, 2019). همچنین با وجود اینکه روش‌های گیاه مبنا ارتباط مستقیم با وضعیت آبی گیاه دارند ولی نمونه‌برداری مخرب از گیاه، منجر به ایجاد خطا با دخالت در فعالیت برگ هنگام آزمایش می‌شود (Ballester et al., 2013). بنابراین به‌منظور تشخیص به موقع، غیر مخرب و سریع تنش آبی در گیاه، نیازمند استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی نوین آبیاری مانند روش‌های بدون تماس (سنجش از راه دور) که نظارت مستقیم بر وضعیت آب گیاه را دارند، می‌باشیم (Inou et al., 2002).

امروزه در کشاورزی هوشمند با توجه به ضرورت بررسی تنش‌آبی گیاهان به منظور تدوین برنامه زمان‌بندی آبیاری و سپس به کاربردن تکنولوژی‌هایی مانند روش‌های آبیاری دقیق، استفاده از روش طیف‌سنجی به عنوان یکی از روش‌های سنجش بدون تماس و غیرمخرب، با تشخیص به موقع تنش‌های خشکی و با پایش مستمر گیاهان بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک مورد توجه محققان قرار گرفته‌است (Ihuoma and Madramootoo, 2019). .طیف سنجی با ثبت تغییرات طیف گیاه در محدوده ۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر مرتبط با پارامترهای گیاهی (از جمله محتوای نسبی آب برگ)، وضعیت آبی گیاه رو مورد بررسی قرار می‌دهد (Nguy-Robertson et al.,2012). طیف منعکس شده از گیاه در محدوده مادون قرمز نزدیک (۷۰۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر) ارتباط نزدیکی با وضعیت آب گیاه دارد. شکل طیف در این محدوده تحت تأثیر رطوبت موجود در برگ است. زیرا در این محدوده نور رسیده به برگ تا عمق بیشتری در بافت برگ نفوذ کرده و امکان تخمین دقیق‌تر وضعیت آب گیاه را فراهم می‌کند (Romero et al., 2017 ; Elsayed et al., 2015). چگونگی انعکاس در محدوده مادون قرمز کوتاه (۱۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) بیشتر تحت تأثیر ساختار درونی برگ می‌باشد. با این حال طول موج‌های موجود در این محدوده برای نظارت بر تغییراتی که در وضعیت آب گیاه رخ می‌دهد مؤثر هستند (El-Hendawy et al., 2019) بنابراین توسط سنجش از دور می‌توان با ردیابی تغییراتی که در طیف بازتابی از گیاه رخ می‌دهد، مدیریت مؤثر در شرایط تنش آبی و اتخاذ سریع اقدامات آبیاری را اعمال کرد. طیف‌سنجی امکان دستیابی سریع و دقیق را از وضعیت آب گیاه را فراهم می‌کند، چرا که در شرایط تنش آبی، تغییرات مهم و بارزی در طیف منعکس شده از برگ گیاه رخ می‌دهد.

تنش آبی باعث تغییر در ساختار درونی برگ شده و به سبب آن هوای موجود در مزوفیل برگ افزایش یافته و رطوبت کاسته می‌شود. تغییرات ایجاد شده در فضای درون سلولی برگ سبب افزایش انعکاس طیفی می‌شود (Penuelas et al., 1997). بنابراین طیف‌سنجی یکی از اصلی‌ترین راهکارهای مدیریت تنش آبی گیاه و برنامه‌ریزی آبیاری در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد (Elsayed and Darwish, 2017). چندین طول موج طیفی در نواحی مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه قرار دارند، مانند طول موج‌های ۶۷۰، ۷۵۰، ۷۰۵، ۸۰۰، ۹۷۰، ۹۰۰،۹۱۰، ۱۱۰۰، ۱۴۵۰، ۱۶۰۰، ۱۷۳۰، ۱۹۵۰، ۲۱۰۰، ۲۲۵۰ و ۲۵۰۰ که در تخمین پارامترهای مختلف گیاهی از جمله محتوای نسبی آب برگ در گیاهان مختلف مؤثر هستند (El-Hendawy et al., 2019). با این حال، اثربخشی این طول موج‌ها برای تخمین صفات گیاهی به شدت تحت تأثیر عوامل متعددی غیر از محتوای آب گیاه مانند مراحل مختلف رشد ، گونه‌های گیاهی و شرایط آب و هوایی است (Junttila et al., 2017). این محدودیت ها را می‌توان با ایجاد شاخص‌های طیفی مختلف کاهش داد. هر شاخص طیفی شامل دو تا سه طول موج مؤثر از طیف کامل است که این طول موج‌ها برای نظارت بر تغییرات ایجاد شده در صفات گیاهی مرتبط با وضعیت آب گیاه مؤثر هستند.

شاخص‌های طیفی به‌دست آمده از طیف‌سنجی اغلب از ترکیب طول موج‌های بازتاب شده از نواحی مرئی، مادون قرمز نزدیک و کوتاه می‌باشند که قابلیت استفاده به‌منظور نظارت بر وضعیت آبی گیاه را دارند (Gao, 1996). از سوی دیگر شاخص‌های طیفی علاوه بر بیان علت تفاوت طیفی نمونه‌ها، با برقراری رابطه با متغیر هدف، نقش مؤثری در برطرف کردن و کاهش اثر عوامل مزاحم در بازتاب طیفی را دارند. بنابراین می‌توان به‌منظور بهبود تشخیص تنش آبی در گیاه و مدیریت بهینه مصرف آب در کشاورزی از شاخص‌های طیفی بهره‌گرفت (Ihuoma and Madramootoo, 2020). در سال‌های اخیر، برای تشخیص تنش آبی در گیاهان، شاخص‌های طیفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Elsayed et al., 2017; Elsayed et al., 2021; Asgari et al., 2023; Wang et al., 2021; Ihuoma and

DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

Madramootoo, 2019; Kovar et al., 2019; Yasir .(and Zhang, 2022; Zhang et al., 2012).

برخی از شاخص‌های طیفی مانند شاخص آب-۱ (WI1) Penuelas et al. (1993)، شاخص آب-۲ (WI2)، شاخص آب-۳ (WI3) و شاخص آب-۴ (WI-4) Elsayed et al. (2021)، شاخص نرمال آب-۵ (NWI5) Elsayed et al. (2017)، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی(NDVI) Gitelson و Merzlyak (1994)، نسبت شاخص تفاوت پوشش گیاهی (RDVI) Roujean و Breon (1995) و شاخص گیاهی تعدیل شده خاک بهبود یافته (OSAVI) Haboudane .et al (2002) نتایج مطلوب و قابل قبولی در تخمین محتوای آب برگ گیاه از خود نشان دادند. شاخص‌های طیفی زیادی در پایش وضعیت آب گیاهان مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند اما بیشتر این شاخص‌ها برای برنامه‌ریزی آبیاری و بررسی وضعیت آب درختان و غلات در شرایط مزرعه بکاربرده شده‌اند ولی ارزیابی و اعتبار سنجی آن‌ها در شرایط گلخانه‌ای و برای گیاه گوجه‌فرنگی به ندرت صورت گرفته‌است.

گیاه گوجه‌فرنگی با نام علمی Lycopersicon یکی از محصولات ارزشمند به‌شمار می‌آید که منشاء آن قاره آمریکا است (Kasraei and Saedi, 2010). با توجه به وضعیت منابع آب کشور، افزایش جمعیت و به طبع آن تقاضا برای تهیه محصولات کشاورزی و همچنین فصلی بودن تولید این محصول سبب شده که برای تأمین نیاز مردم راه‌کارهایی در نظر گرفته شود تا با مصرف بهینه آب قابل دسترس، میزان تولید محصولات کشاورزی در واحد سطح افزایش و امکان تولید محصول در خارج از فصل فراهم شود. نیاز آبی نسبتاً بالای گوجه‌فرنگی، کمبود آب در سال‌های اخیر و عدم مدیریت مطلوب مصرف آب از جمله دلایلی هستند که پایداری تولید این محصول را تهدید می‌کند. با توجه به اهمیت بالای این گیاه و نیاز مبرم کشور به تولید آن، باید تحقیقات بیشتری برای کاهش آب مصرفی ، بالا بردن عملکرد و کیفیت میوه به‌منظور مدیریت هرچه بهتر منابع آب انجام گردد. بنابراین بررسی تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی برای تعیین اعمال سطوح مشخصی از تنش آبی، در مدیریت هرچه بهتر آبیاری و بهینه سازی مدیریت مصرف آب ضروری خواهدبود. براساس نتایج تحقیق Ihuoma و Madramootoo (2019) شاخص‌های طیفی می‌توانند ابزارهای مناسبی برای پیش‌بینی وضعیت تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای باشند. پژوهش حاضر با هدف بررسی قابلیت چندین شاخص طیفی گیاهی و انتخاب مناسب‌ترین شاخص به‌منظور پایش وضعیت تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

این تحقیق به‌صورت کشت گلدانی در مجتمع گلخانه‌ای دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز با محدوده جغرافیایی ۳۱ درجه، ۱۸ دقیقه و ۱۳ ثانیه شمالی و ۴۸ درجه، ۳۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه‌ی شرقی و ارتفاع ۲۲/۵ متری از سطح دریا انجام شد. نتایج بررسی ویژگی‌های خاک مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

طرح آزمایشی و تیمارهای آبیاری

این پژوهش از دی ماه سال۱۴۰۰ تا خرداد ماه سال ۱۴۰۱ به‌صورت کرت‌های خردشده (اسپیلت پلات) در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار و در مجموع ۱۲۰ عدد گلدان انجام شد. فاکتور اصلی، تیمارهای آبیاری در سه سطح، شامل آبیاری کامل با ۱۰۰درصد نیاز آبی (I_{100}) ، آبیاری با ۸۰ درصد نیاز آبی (I_{80}) و۶۰ درصد نیاز آبی (I_{60}) و فاکتور فرعی، تیمار نانو ذرات سیلیکا در دو سطح شامل نانو ذرات با غلظت‌های صفر میلی‌گرم بر لیتر (F_0) و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (F_{100}) اجرا شد.

در ابتدا بذرهای گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای رقم واسانتا در سینی‌های کشت حاوی بستر کوکوپیت، کشت شدند. سپس نشاهای منتخب (در مرحله ۵-۶ برگی حقیقی) برای کشت از خزانه به گلدان‌هایی که با نسبت مشخص از خاک مزرعه و ماسه رودخانه پر شده بودند، منتقل شدند. از ابتدای کشت گوجه‌فرنگی در سینی کشت برای کل تیمارها تا قبل از مرحله‌ی استقرار گیاه (۵-۶ برگی شدن) آبیاری معمولی انجام گرفت. سپس بعد از مرحله‌ی استقرار گیاه، تیمارهای نانوذرات و کم آبیاری اعمال شد. به‌منظور کنترل دما در محیط گلخانه از سیستم فن و پد و بخاری استفاده شد. در فصل سرما، برای کنترل دمای گلخانه از بخاری گازی استفاده شد.

جدول۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1-Physical and chemical properties

Soil texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	ρb (gr/cm^3)	PH	EC (ds/m)	FC ($\%\Theta_m$)	PWP ($\%\Theta_m$)
Sandy loam	58	26	16	1.47	5.6	3.45	21	9

نیاز آبی و مقدار آب آبیاری مورد نیاز گیاه

به‌منظور محاسبه‌ی نیاز آبی گوجه‌فرنگی از سه عدد میکرولایسیمتر استفاده شد. برای به‌دست آوردن میزان آب آبیاری میکرولایسیمترها از روش وزنی Pelesco و Alagao (2014) استفاده شد:

$$W_U = (W_L + W_2) - (W_1 + W_D) \quad (۱)$$

W_U= آب مصرفی (گرم)
W_1= وزن میکرولایسیمتر پس از آبیاری (گرم)
W_2= وزن آب آبیاری (گرم)
W_L=وزن میکرولایسیمتر قبل از آبیاری (گرم)
W_D = وزن زهاب (گرم)

به‌منظور برآورد نیاز خالص و ناخالص آبیاری در گلدان‌ها از روابط زیر استفاده شد:

$$d = \frac{W_2 - W_D}{A} \quad (۲)$$

d= عمق خالص آبیاری (میلی‌متر)
A= مساحت میکرولایسیمتر (مترمربع)

به‌منظور کاهش تجمع املاح و برای اطمینان از تأمین آب مناسب گیاه، جزء آبشویی ۲۵-۲۰ درصد در نظر گرفته شد.

$$\mathrm{GWR} = \frac{d}{1-D} \quad (۳)$$

GWR= نیاز ناخالص آبیاری (میلی‌متر)
d= نیاز خالص آبیاری (میلی‌متر)
D= جزء آبشویی (۰/۲۵-۰/۲)

محلول غذایی و آب مورد نیاز گیاه از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای به گیاه داده شد. دما و رطوبت نسبی گلخانه، روزانه توسط حسگر دیجیتال اندازه‌گیری و ثبت شد. میانگین اطلاعات هواشناسی (به‌ترتیب ماه‌های دی، بهمن، اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد) در طول دوره‌ی پژوهش در جدول (۲) ارائه شده‌است.

ارزیابی تنش آبی گیاه به روش طیف سنجی

در این تحقیق برای بررسی تغییرات طیفی در برگ گیاه گوجه-فرنگی، نمونه‌گیری‌ها در ماه‌های فوریه، مارچ، آوریل و می (به‌ترتیب مراحل رشد رویشی، گلدهی، تشکیل و رسیدگی میوه) هم‌زمان با سایر اندازه‌گیری‌ها انجام شد. در هر روز از نمونه‌گیری، تعداد ۱۲۰ نمونه از برگ گیاه گوجه‌فرنگی مورد طیف‌سنجی قرار گرفت. به-منظور اندازه‌گیری، ثبت و تهیه منحنی طیفی نمونه‌های گیاهی از دستگاه طیف‌سنج زمینی به نام ASD Fieldspec3 استفاده شد. این دستگاه در دسته‌ی دستگاه‌هایی با دامنه طیفی کامل بوده و قادر است در هر مرحله از اندازه‌گیری، محدوده طول موج‌های۲۵۰۰ - ۳۰۰ نانومتر را ثبت کند. در این پژوهش طیف انعکاسی از پوشش سبز گیاه برای هر تیمار اندازه‌گیری شد، سپس چندین شاخص انعکاس طیفی طبق جدول (۳) محاسبه و بررسی شدند.

جدول ۲-میانگین اطلاعات هواشناسی در طول فصل رشد

Table 2- Averag of Climate Information During the Growing Season

Month	Temperature mean	Relative humidity (%)
January	20.5	63
February	22.7	74
March	22.8	56
April	28.2	32
May	31.6	28
June	34	29

جدول ۳- شاخص‌های طیفی مورد استفاده در پژوهش

Table3- Spectral indices used in research

Index names	Index	Formulation	Reference
Water content indices	NWI-5	$(R_{970} - R_{910})/(R_{970} + R_{910})$	Elsayed et al., 2017
	WI1 (900;970)	R_{900}/R_{970}	Penuelas et al., 1993
	WI2(976;888)	R_{976}/R_{888}	
	WI3(974;904)	R_{974}/R_{904}	Elsayed et al., 2021
	WI4(988;895)	R_{988}/R_{895}	
Greenness indices	RDVI	$(R_{800} - R_{670})/(R_{800} + R_{670})^{1/2}$	Roujean and Breon, 1995
	OSAVI	$(1 + 0.16)(R_{800} - R_{670})/(R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Haboudane et al., 2002
	NDVI	$(R_{750} - R_{705})/(R_{750} + R_{705})$	Gitelson and Merzlyak, 1994

 DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

محتوای نسبی آب برگ

به‌منظور اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ گیاه (RWC) به‌صورت ماهانه، در روزهایی که سایر اندازه‌گیری‌ها انجام شد، برگی از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته از هر تیمار (گلدان)، به‌طور تصادفی انتخاب شد. به‌منظور تازه نگه‌داشتن نمونه‌ها تا زمان انتقال آن‌ها به آزمایشگاه، نمونه‌ها را در پلاستیک در بسته قرار داده و با ظرف حاوی تکه‌های یخ به سرعت به آزمایشگاه، انتقال و وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری شد. برای محاسبه‌ی وزن اشباع، نمونه‌ها به مدت چهار ساعت در دمای اتاق و نور کم در آب مقطر غوطه‌ور شدند. بعد از طی مدت زمان آب‌گیری، برگ‌ها با به آرامی خشک و بلافاصله توزین شدند. سپس برگ‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت خشک شدند و وزن خشک به‌دست آمد. برای اندازه‌گیری وزنی RWC از رابطه Schlemmer et al. (2005) استفاده شد:

$$RWC = \frac{W_f - W_d}{W_s - W_d} \quad (۴)$$

که در آن W_f، وزن تر برگ، W_d، وزن خشک برگ و W_s وزن اشباع برگ است.

تحلیل‌های آماری

به‌منظور اندازه‌گیری طیفی نمونه‌ها و پردازش اولیه منحنی‌های طیفی از نرم‌افزارهای ViewSpecPro و SAMS، تجزیه و تحلیل آماری متغیرها و بررسی مقایسه میانگین‌ها (آزمون LSD) با استفاده از نرم‌افزارSAS9/4 انجام شد. در انتها از رگرسیون خطی ساده جهت بررسی همبستگی بین شاخص‌های طیفی مورد مطالعه با شاخص فیزیولوژیکی گیاه (محتوای نسبی آب برگ) استفاده شد. جهت بررسی معنی‌داری ضریب تعیین (R^2) در سطح پنج و یک درصد از نرم افزار SPSS16 استفاده شد.

به‌منظور ارزیابی مدل‌های، از چند معیار آماری از جمله ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی در ماه‌های مختلف و متوسط کل دوره تحت اثرات جداگانه و توأمان رژیم آبیاری و نانوذرات سیلیکا در جدول (۴) ارائه شده‌است. بر اساس این نتایج، مقادیر محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی در متوسط کل دوره (The whole period) و در تمام ماه‌ها بجز ماه فوریه تحت تأثیر رژیم آبیاری قرار گرفت. در این مطالعه اثر استفاده از نانوذرات بر محتوای نسبی آب برگ در ماه‌های مارچ، آوریل و متوسط کل دوره (The whole period) معنی‌دار یافت شد. علاوه بر این، در هیچ یک از مراحل اندازه‌گیری و همچنین به‌طور متوسط در کل دوره تحقیق تأثیر توأمان رژیم آبیاری و نانوذرات سیلیکا روی این شاخص معنی‌دار یافت نشد.

با توجه به نتایج مقایسه میانگین جدول (۵)، اگر چه مقادیر محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی با افزایش تنش آبی کاهش یافته‌است با این حال مقدار این شاخص در آبیاری کامل و آبیاری برای تأمین ۶۰ درصد نیاز آبی در طول دوره اندازه‌گیری‌ها (ماه‌های مختلف) معنی‌دار یافت شد. علاوه بر این، مقدار این شاخص در ماه‌های مارچ، آوریل و متوسط کل دوره (The whole period) در سطح احتمال پنج درصد، تحت تأثیر معنی‌دار نانو ذره قرار گرفت.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۵)، اگرچه افزایش هرچه بیشتر تنش آبی موجب کاهش بیشتر شاخص محتوای نسبی آب برگ شد، اما در متوسط کل دوره مقدار کاهش این شاخص در بین رژیم‌های مختلف آبیاری معنی‌دار یافت نشد. شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی درتیمار نانو ذره با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به تیمار با غلظت صفر میلی‌گرم بر لیتر بیش‌تر بود. به‌طور کلی استفاده از نانوذرات سیلیکا باعث بهبود و افزایش محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی شد. در پژوهشی Ebrahimi (2020) به بررسی تأثیر اثر نانو سیلیس بر کشت گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش خشکی پرداخته‌اند. آن‌ها بیان کردند محتوای نسبی آب برگ گیاه، با استفاده از نانو ذرات سلیکا افزایش پیدا کرده‌است. در پژوهشی دیگر Shokri et al. (2021) روی گیاه خیار گلخانه‌ای نشان دادند که کاربرد نانو ذرات سلیکا، به‌طور قابل توجهی اثرهای منفی و مخرب تنش آبی را بر محتوای نسبی آب برگ کاهش می‌دهد. اثر متقابل تیمارهای آبیاری و نانوذرات سیلیکا بر روی شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی، معنی‌دار یافت نشد. در بین شش تیمار در متوسط کل دوره (The whole period) ، تیمار $I_{100}F_{100}$ با ۸۵/۲۳ درصد بالاترین و تیمار $I_{60}F_0$ ۸۱/۴۹ درصد پایین‌ترین شاخص محتوای نسبی آب برگ را داشتند.

طیف بازتاب گیاه

جذب امواج طیفی در محدوده ۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر توسط ملکول‌های آب سبب کاهش بازتاب طیفی از سطح برگ می‌شود. زمانی که گیاه دچار تنش آبی می‌شود و محتوای آب برگ کاهش می‌یابد، جذب کاهش یافته و بازتابش از برگ گیاه افزایش می‌یابد. بنابراین، گیاهی که محتوای نسبی آب برگ کمتری دارد، بازتاب طیفی بیشتری از خود نشان می‌دهد. شکل (۱)، میانگین بازتاب طیفی از برگ گیاه گوجه فرنگی را تحت تأثیر تیمارهای تنش آبی و نانوذره در چهار ماه مورد مطالعه نشان می‌دهد. هر شش تیمار روند مشابهی را از خود نشان دادند. بیشترین بازتاب طیفی در تیمار $I_{60}F_0$ و کمترین در تیمار $I_{100}F_{100}$ مشاهده شد. Ihuoma و Madramootoo (2019) در پژوهشی به بررسی اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر طیف بازتاب شده از گیاه گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در دو مرحله از رشد (گلدهی و تشکیل میوه) پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند با افزایش تنش آبی، طیف بازتابی از سطح برگ افزایش می‌یابد.

جدول٤- نتایج تجزیه واریانس اثر رژیم آبیاری، نانوذرات سیلیکا و برهم کنش آن ها بر محتوای نسبی آب برگ

Table 4-The results of variance analysis of the effect of irrigation regime, silica nanoparticles, and their interaction on relative leaf water content

Source of variation	Degree of freedom	Mean square				
		February	March	April	May	The whole period
Irrigation regimes (I)	2	11.41^{ns}	17.68**	15.19**	63.49**	42.58**
Error I	9	7.38	26.98	36.52	28.12	118.4
Nanoparticles(N)	1	4.59^{ns}	17.02**	10.61**	9.67^{ns}	9.98**
I * N	2	0.499^{ns}	2.60^{ns}	2.81^{ns}	0.23^{ns}	1.13^{ns}
Error N	9	18.12	5.08	1.81	23.98	1.53
CV(%)		1.56	1.89	2.01	2.91	1.64

**, *, ns: significant effect at 1%, 5%, and no significant effect, respectively

جدول٥-مقایسه ی میانگین محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی در رژیم‌های متفاوت آبیاری و نانو ذرات سیلیکا

Table 5- Comparison of the mean of the relative water content of tomato plant leaves in different irrigation regimes and silica nanoparticles

Treatments	Percentage of relative water content of tomato plant leaves (RWC)				
	February	March	April	May	The whole period
Irrigation regime					
I_{100}	87.34^{a}	85.98^{a}	83.92^{a}	82.15^{a}	84.85^{a}
I_{80}	86.16^{a}	84.47^{b}	82.49^{ab}	80.58^{b}	83.43^{a}
I_{60}	85.91^{b}	84.04^{b}	81.64^{b}	77.99^{c}	82.39^{a}
Nanoparticles (mg/l)					
F_0	86.03^{a}	83.99^{a}	82.02^{a}	79.59^{a}	82.91^{a}
F_{100}	86.91^{a}	85.67^{b}	83.35^{b}	80.86^{a}	84.20^{b}
I * N					
$I_{100}F_{100}$	87.79^{a}	86.33^{a}	84.22^{a}	82.58^{a}	85.23^{a}
$I_{100}F_0$	87.17^{ab}	85.54^{a}	83.84^{a}	81.46^{a}	84.50^{a}
$I_{80}F_{100}$	86.54^{ab}	85.44^{a}	83.31^{a}	81.35^{a}	84.16^{ab}
$I_{80}F_0$	86.42^{ab}	84.93^{ab}	83.06^{a}	80.21^{ab}	83.28^{bc}
$I_{60}F_{100}$	85.82^{ab}	83.53^{bc}	81.67^{ab}	78.70^{bc}	82.81^{c}
$I_{60}F_0$	85.14^{b}	82.58^{bc}	81.09^{ab}	77.15^{bc}	81.49^{d}

Mean with the same letter in each column and for each Treatment are not significantly different based on the LSD test at the 5% level

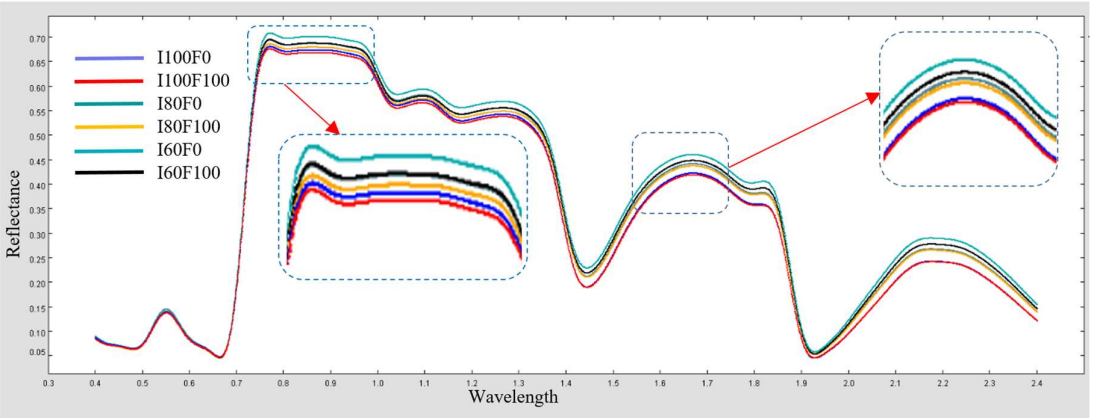


Fig.1- Leaf reflection spectrum of tomato plant in water stress and nanoparticles treatments

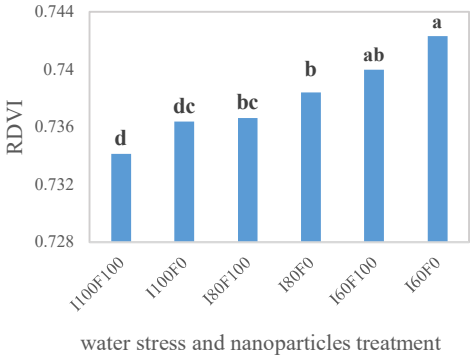
شکل۱- طیف بازتاب برگ گیاه گوجه فرنگی در تیمارهای تنش آبی و نانوذره

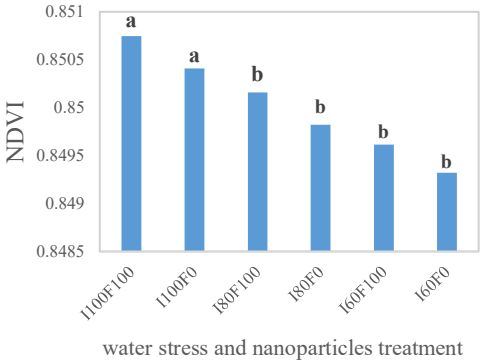
شاخص‌های‌طیفی

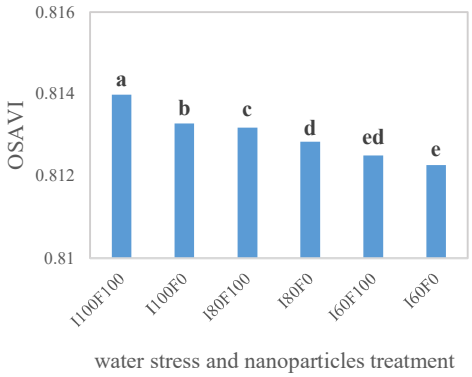
مقادیر اندازه‌گیری شده از بازتاب برگ برای محاسبه شاخص‌های طیفی که در جدول (۳) ارائه شده، استفاده شدند. شکل (۲)، اثر توأمان رژیم‌های آبیاری و نانوذرات را بر تغییرات شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در گیاه گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. شاخص‌های NDVI، WI1 و OSAVI با افزایش تنش

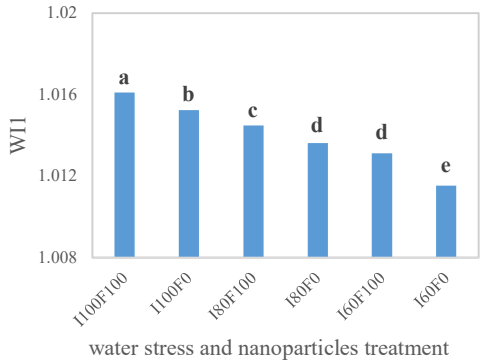
DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

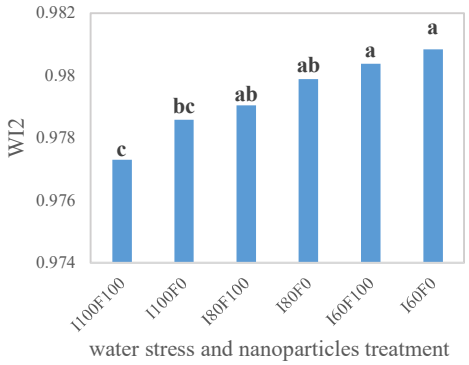
آبی کاهش یافتند. اما شاخص‌های WI2، WI3، WI4، NWI5 و RDVI با افزایش تنش آبی، افزایش یافتند. همچنین در تمام شاخص‌های مورد مطالعه، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای ۶۰ درصد و ۱۰۰ درصد نیاز آبی مشاهده گردید. El-Hendawy et al. (2019) در پژوهشی با بررسی تغییرات شاخص‌های طیفی برگ گیاه گندم در شرایط تنش آبی نشان دادند که با افزایش تنش آبی شاخص طیفی WI1 کاهش، اما شاخص NWI5 افزایش می‌یابد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این شاخص‌ها می‌تواند با موفقیت تنش آبی را در گیاه گندم نشان دهند. Elsayed et al. (2021) نیز بیان کردند که مقدار شاخص‌های طیفی مستخرج از برگ گیاه گندم در دو سال متوالی، با تیمارهای آبیاری مورد مطالعه (۱۰۰ ET_C درصد، ۷۵ ET_C درصد و ۵۰ ET_C درصد) رابطه معنی‌داری دارند. آن‌ها نشان دادند با افزایش تنش آبی شاخص‌های طیفی WI2، WI3 و WI4 افزایش یافته و مقدار شاخص WI1 کاهش می‌یابد.

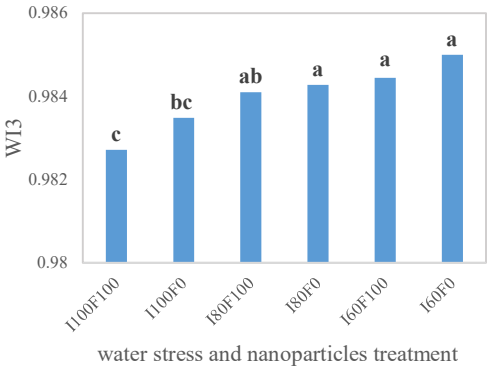












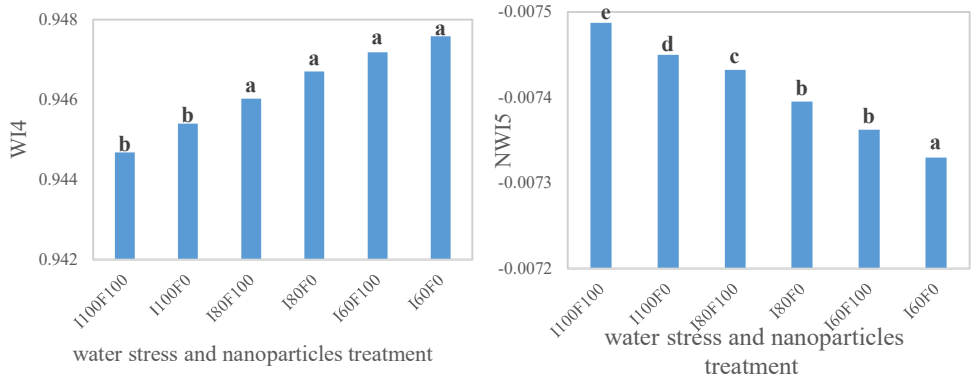


Fig.2- The response of different spectral indices to water stress and silica nanoparticles in tomato plants

***mean values with the same letter are not significantly different based on the LSD test at the 5% level**

شکل۲- تغییرات شاخص‌های طیفی در تیمارهای تنش آبی و نانوذرات

***میانگین‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون LSD در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.**

براساس مقدار متوسط شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در طول دوره تحقیق جدول (۶)، با افزایش تنش آبی مقدار شاخص WI1، NDVI و OSAVI کاهش و مقدار شاخص RDVI، NWI5 ، WI2، WI3 و WI4 افزایش یافت. علاوه بر این، در طول دوره مقدار شاخص WI1، NDVI و OSAVI در گیاه گوجه‌فرنگی در تیمار حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذره بیش‌تر از این مقدار در تیمار بدون نانوذره بود. اما این افزایش تنها در شاخص WI1 معنی‌دار بود. همچنین مقدار شاخص‌های RDVI، NWI5، WI2 ، WI3 و WI4 در تیمار حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذره کمتر تیمار بدون نانوذره مشاهده شد. اما به طور متوسط در میانگین کل دوره (The whole period) این کاهش تنها در شاخص RDVI و WI2 معنی‌دار یافت شد. بر اساس نتایج جدول مقایسه میانگین جدول (۶)، شاخص‌های طیفی RDVI،WI1 و WI2 در هر چهار ماه از اندازه‌گیری‌ها به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر نانوذره قرار گرفت. همچنین مقدار شاخص‌های طیفی RDVI، NWI5، WI1 ، WI2، WI3 و WI4 در طول دوره به طور معنی‌دار تحت تأثیر رژیم آبیاری ۶۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبیاری قرار گرفت. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق Asgari et al. (2023) که نشان دادند مقدار شاخص طیفی WI1 در دو رقم درخت زیتون، با افزایش سطح تنش آبی، کاهش یافت، مطابقت دارد. آن‌ها همچنین بیان کردند با افزایش تنش آبی مقدار شاخص NWI5 افزایش یافته است. در تحقیق دیگری Ihuoma و Madramootoo (2019) به این نتیجه رسیدند که مقدار شاخص WI1، NDVI و OSAVI در گیاه گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در شرایط تنش آبی نسبت به شرایط آبیاری کامل، کاهش قابل توجهی یافته‌است. Elsayed et al. (2021) نشان دادند که مقدار شاخص طیفی WI1 درگیاه گندم بهاره در تیمار آبیاری کامل نسبت به شرایط تنش آبی بیشتر بود. آن‌ها همچنین سه شاخص جدید WI2 ، WI3 و WI4 را معرفی کردند و بیان کردند که مقدار هر سه شاخص با افزایش تنش آبی، افزایش یافته‌است. همچنین تحقیق حاضر با نتایج Penuelas et al. (1993) که نشان داد، شاخص آب WI1 با افزایش شاخص محتوای نسبی آب در گیاه فلفل گلخانه ای در شرایط تنش آبی افزایش یافته است، مطابقت دارد.

جدول (۷)، ضریب تعیین(R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) شاخص‌های طیفی را در برآورد شاخص محتوای نسبی آب برگ در چهار ماه اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که شاخص‌های طیفی مورد مطالعه با شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی در طول دوره ارتباط داشت.

بر اساس نتایج جدول (۷)، رابطه میان شاخص‌های طیفی مورد مطالعه با شاخص‌های محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی در چهار ماه اندازه‌گیری‌ها متغیر بوده و قادرند از ۰/۴۹ تا ۰/۷۸ تغییرات شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی را تحت تأثیر تنش آبی در طول دوره برآورد کنند. براساس نتایج تحقیق حاضر به‌طور کلی شاخص طیفی نرمال آب۵ (NWI5) با داشتن بیشترین NRMSE، RMSE و کمترین ضریب تعیین (R^2) و شاخص‌های WI1 و WI2 با داشتن کمترین مقدار NRMSE، RMSE و بیشترین ضریب تعیین (R^2)، به ترتیب ضعیف ترین و قوی‌ترین عملکرد را در برآورد شاخص محتوای نسبی آب برگ در طول اندازه گیری‌ها نشان دادند. پنج شاخص طیفی آب WI1، WI2، WI3، WI4 و NWI5 مورد استفاده در پژوهش از نسبت انعکاس طول موج‌هایی که در عمق بیشتری از برگ نفوذ کرده به طول موج هایی که خارج از محدوده‌ی جذب آب بوده، می‌باشد. بنابراین این شاخص‌ها توانایی تخمین دقیق‌تری از محتوای آب برگ گیاه را دارا می‌باشند (Romero et al., 2017; Elsayed et al., 2021).

DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

علاوه بر این، ساختار سه شاخص سبزینگی NDVI، OSAVI و RDVI براساس میزان جذب در محدوده طیفی ناحیه مرئی (۷۰۰–nm۴۰۰) و مادون قرمز نزدیک (۷۰۰–nm۱۳۰۰) بوده و شامل اطلاعات مفید از ساختار درونی برگ، سلامت گیاه و کلروفیل می‌باشد (El-Hendawy et al., 2019). بنابراین در پایش وضعیت آب گیاه ناشی از تنش‌های آبی، مفید می‌باشند.

شکل (۳)، مدل رگرسیون خطی میان شاخص‌های طیفی مورد مطالعه و شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی را به‌طور متوسط در دوره‌ی تحقیق نشان می‌دهد. با توجه به ضریب تعیین به‌دست آمده از ارتباط بین شاخص‌های طیفی و شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی در میانگین کل دوره، شاخص‌های WI2، WI1، WI3، WI4، RDVI، OSAVI، NDVI و NWI5 به‌ترتیب رابطه بهتری با شاخص محتوای نسبی آب برگ نشان دادند.

جدول٦-مقایسه ی میانگین شاخص‌های طیفی گیاه گوجه فرنگی در رژیم‌های منفاوت آبیاری و نانو ذرات سیلیکا

Table 6- Mean values of spectral indices of tomato plants in different regimes of irrigation and silica nanoparticles

	Treatments	NDVI	RDVI	OSAVI	WI1	WI2	WI3	WI4	NWI5
February	Irrigation regime(%)								
	I_{100}	0.8519^{a}	0.7311^{a}	0.8143^{a}	1.0163^{a}	0.9757^{a}	0.9803^{a}	0.9421^{a}	-0.00752^{a}
	I_{80}	0.8513^{a}	0.7327^{ab}	0.8135^{a}	1.0150^{b}	0.9762^{b}	0.9812^{b}	0.9434^{a}	-0.00747^{a}
	I_{60}	0.8508^{a}	0.7360^{b}	0.8129^{a}	1.0129^{c}	0.9770^{c}	0.9814^{b}	0.9444^{b}	-0.00740^{b}
	Nanoparticles (mg/l)								
	F_0	0.8511^{a}	0.7341^{a}	0.8133^{a}	1.0141^{a}	0.9765^{a}	0.9812^{a}	0.9436^{a}	-0.00744^{a}
	F_{100}	0.8515^{a}	0.7324^{b}	0.8137^{a}	1.0154^{b}	0.9760^{b}	0.9807^{b}	0.9430^{a}	-0.00748^{a}
March	Irrigation regime(%)								
	I_{100}	0.8515^{a}	0.7327^{a}	0.8139^{a}	1.0163^{a}	0.9767^{a}	0.9818^{a}	0.9438^{a}	-0.00750^{a}
	I_{80}	0.8509^{a}	0.7342^{b}	0.8133^{a}	1.0142^{b}	0.9775^{b}	0.9826^{b}	0.9452^{a}	-0.00744^{a}
	I_{60}	0.8504^{a}	0.7378^{c}	0.8127^{a}	1.0126^{c}	0.9783^{c}	0.9829^{b}	0.9462^{b}	-0.00737^{b}
	Nanoparticles (mg/l)								
	F_0	0.8508^{a}	0.7358^{a}	0.8132^{a}	1.0137^{a}	0.9780^{a}	0.9826^{a}	0.9453^{a}	-0.00742^{a}
	F_{100}	0.8511^{a}	0.7340^{b}	0.8135^{a}	1.0150^{b}	0.9769^{b}	0.9822^{a}	0.9448^{a}	-0.00745^{a}
April	Irrigation regime(%)								
	I_{100}	0.8497^{a}	0.7365^{a}	0.8134^{a}	1.0154^{a}	0.9780^{a}	0.9844^{a}	0.9459^{a}	-0.00745^{a}
	I_{80}	0.8491^{a}	0.7384^{ab}	0.8127^{a}	1.0139^{b}	0.9809^{b}	0.9857^{b}	0.9472^{a}	-0.00739^{a}
	I_{60}	0.8486^{a}	0.7419^{b}	0.8124^{a}	1.0121^{c}	0.9823^{c}	0.9867^{b}	0.9482^{b}	-0.00733^{b}
	Nanoparticles (mg/l)								
	F_0	0.8490^{a}	0.7404^{a}	0.8126^{a}	1.0133^{a}	0.9810^{a}	0.9858^{a}	0.9475^{a}	-0.00737^{a}
	F_{100}	0.8493^{a}	0.7376^{b}	0.8131^{a}	1.0143^{b}	0.9798^{b}	0.9854^{a}	0.9467^{a}	-0.00741^{a}
M	Irrigation regime(%)								

	I_{100}	0.8493[a]	0.7407[a]	0.8130[a]	1.0148[a]	0.9814[a]	0.9860[a]	0.9485[a]	-0.00742[a]
	I_{80}	0.8487[a]	0.7447[ab]	0.8124[a]	1.0132[b]	0.9834[b]	0.9873[b]	0.9496[a]	-0.00737[a]
	I_{60}	0.8481[a]	0.7489[b]	0.8116[a]	1.0117[c]	0.9848[c]	0.9879[b]	0.9508[b]	-0.00730[b]
	Nanoparticles (mg/l)								
	F_0	0.8485[a]	0.7459[a]	0.8121[a]	1.0128[a]	0.9836[a]	0.9873[a]	0.9499[a]	-0.00734[a]
	F_{100}	0.8488[a]	0.7437[b]	0.8126[a]	1.0136[b]	0.9829[b]	0.9867[b]	0.9493[a]	-0.00738[a]
The whole period	Irrigation regime(%)								
	I_{100}	0.8506[a]	0.7353[a]	0.8136[a]	1.0157[a]	0.9779[a]	0.9831[a]	0.9450[a]	-0.00747[a]
	I_{80}	0.8500[a]	0.7375[ab]	0.8130[a]	1.0141[b]	0.9795[b]	0.9842[b]	0.9464[b]	-0.00741[a]
	I_{60}	0.8495[a]	0.7412[b]	0.8124[b]	1.0123[c]	0.9806[c]	0.9847[b]	0.9474[b]	-0.00735[b]
	Nanoparticles (mg/l)								
	F_0	0.8499[a]	0.7390[a]	0.8128[a]	1.0135[a]	0.9798[a]	0.9843[a]	0.9466[a]	-0.00739[a]
	F_{100}	0.8502[a]	0.7369[b]	0.8132[a]	1.0146[b]	0.9789[b]	0.9838[a]	0.9460[a]	-0.00743[ab]

Mean with the same letter in each column and for each Treatment are not significantly different based on the LSD test at the 5% level

جدول۷- مقادیر ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) شاخص‌های طیفی در برآورد شاخص محتوای آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی

Table 7- Values of R^2, RMSE, and NRMSE for each spectral indices to Estimate relative water content (RWC) in tomato plants

Spectral indices	February			March			April			May		
	R^2	RMSE	NRMSE	R^2	RMSE	NRMSE	R^2	RMSE	NRMSE	R^2	RMSE	NRMSE
NDVI	0.59	1.23	0.149	0.68	0.62	0.072	0.62	0.77	0.091	0.58	1.48	0.184
RDVI	0.61	1.21	0.147	0.67	0.59	0.068	0.60	0.76	0.090	0.56	1.50	0.187
OSAVI	0.58	0.95	0.150	0.55	0.58	0.067	0.59	0.83	0.099	0.56	1.51	0.189
WI1	0.69	0.95	0.115	0.74	0.51	0.059	0.69	0.64	0.075	0.64	1.26	0.157
WI2	0.69	1.08	0.130	0.78	0.56	0.064	0.68	0.59	0.071	0.66	1.25	0.155
WI3	0.63	1.11	0.134	0.63	0.60	0.069	0.69	0.72	0.084	0.7	1.40	0.175
WI4	0.64	1.16	0.140	0.62	0.55	0.064	0.65	0.70	0.083	0.69	1.41	0.175
NWI5	0.55	1.24	0.153	0.49	0.66	0.075	0.53	0.89	0.1	0.52	1.87	0..23

DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

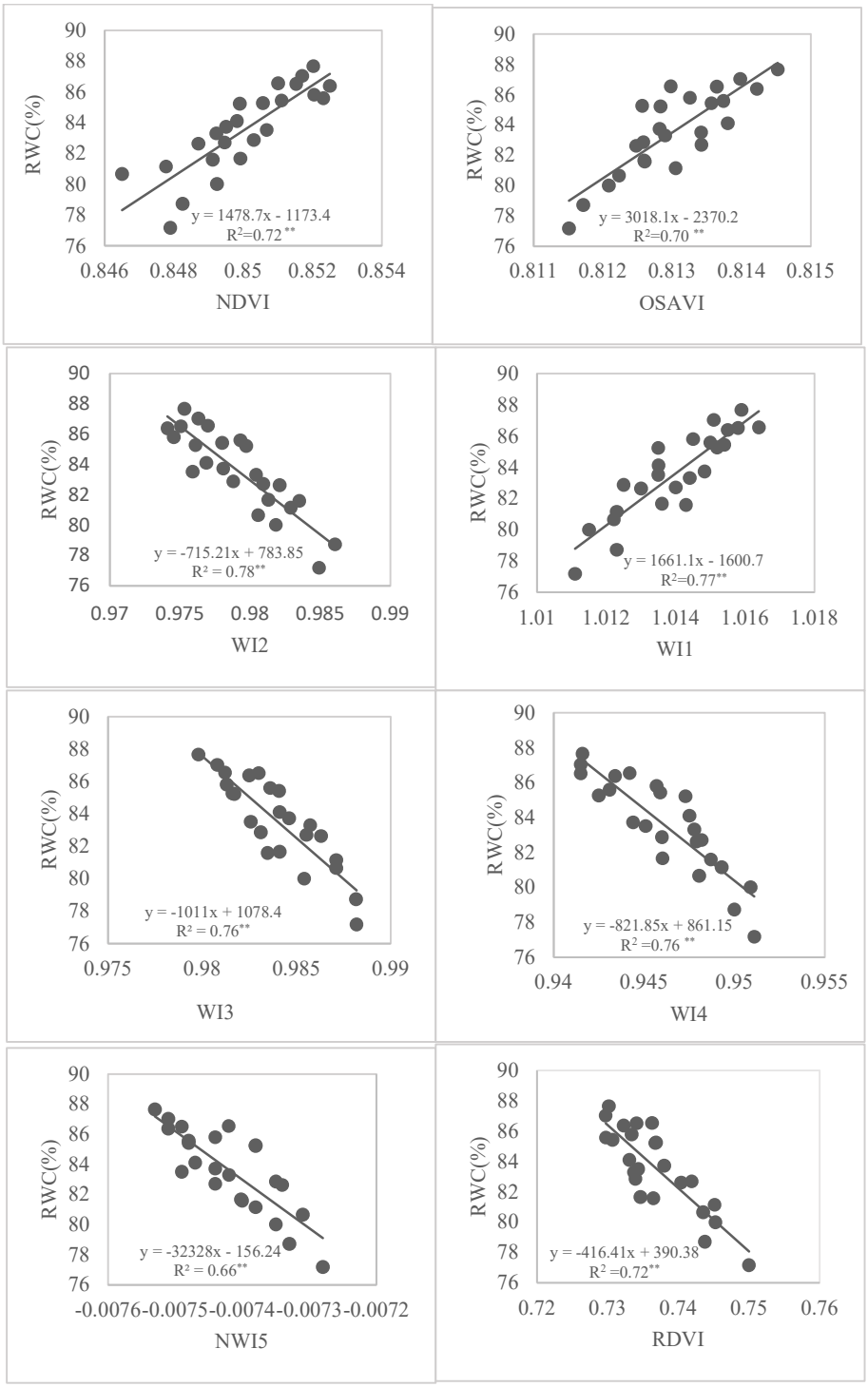


Fig.3- The Linear regression relationship between spectral indices (WI1-4, NWI5, NDVI, RDVI, and OSAVI) and relative water content (RWC) of tomato plants under water stress and silica nanoparticles in the whole research period with linear regressions fitted.

**, *: significant effect at 1% and 5% respectively.

شکل ۳- مدل رگرسیون خطی میان شاخص‌های طیفی و محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی تحت رژیم آبیاری و نانو ذرات سیلیکا در کل دوره تحقیق

**، *: اثر معنی‌دار به ترتیب در سطح ۱درصد و ۵درصد.

براساس نتایج به‌دست آمده شاخص طیفی NWI5 (۰/۶۶) کمترین و شاخص WI2 (۰/۷۸) بیشترین ضریب تعیین را با شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی در متوسط کل دوره نشان داد. رابطه معنی‌دار میان شاخص‌های طیفی مورد مطالعه و محتوای نسبی آب برگ، نشان دهنده مفید و کارآمد بودن این شاخص‌ها در بررسی سریع تغییرات تنش آبی گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از روش طیف‌سنجی می‌باشد که نتایج Ihuoma و Madramootoo (2019) را که نشان دادند شاخص‌های طیفی آب WI و شاخص‌های طیفی سبزینگی RDVI، OSAVI و NDVI با محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای ارتباط نزدیک دارند ($۰/۶۱<R^2<۰/۸۶$) را تأیید می‌کند.

Elsayed et al. (2021) نشان دادند سه شاخص جدید WI2، WI3 و WI4 ارتباط قوی و معنی‌دار با پارامترهای پتانسیل آب برگ و شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گندم در شرایط تنش آبی دارند.

در تحقیقی دیگر Elsayed et al. (2017) با معرفی شاخص NWI5، به بررسی ارتباط میان این شاخص با محتوای نسبی آب برگ در دو رقم گندم بهاره تحت رژیم‌های متفاوت آبیاری پرداخته و نشان دادند شاخص NWI5، ارتباط معنی‌دار ($۰/۵۴<R^2<۰/۸$) با شاخص محتوای نسبی آب برگ داشت. Asgari et al. (2023) در پژوهشی به بررسی شاخص‌های طیفی NWI1، NWI2، NWI3، NWI4، NWI5 و NWI960-940 با شاخص محتوای نسبی آب برگ دو رقم درخت زیتون، در شرایط تنش آبی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند شاخص های طیفی مورد مطالعه ارتباط قوی و معنی داری ($۰/۲۶<R^2<۰/۷۶$) با محتوای نسبی آب برگ درخت زیتون داشتند.

همچنین Wang et al. (2021) بیان کردند شاخص‌های طیفی OSAVI، NDVI و RDVI مستخرج از طیف منعکس شده برگ گیاه ذرت خوشه‌ای از نظر آماری ارتباط خطی و نزدیک با محتوای نسبی آب برگ گیاه ($R^2>۰/۷$) دارند.

علاوه بر این Yasir et al. (2022) در مطالعه‌ای به بررسی محتوای نسبی آب ۱۰ گونه خاص گیاهی با شاخص طیفی آب (WI) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد شاخص طیفی آب (WI)، رابطه معنی‌داری و قوی با محتوای آب برگ گیاهان مورد بررسی داشت.

صحت‌سنجی مدل پیش‌بینی شاخص محتوای نسبی آب برگ با استفاده از شاخص‌های طیفی

ابتدا با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده در سه ماه فوریه، مارچ و آوریل (۷۲ داده) رابطه‌ی خطی میان شاخص‌های طیفی و شاخص محتوای نسبی آب برگ گوجه‌فرنگی (RWC) واسنجی شد. سپس روابط تعیین شده در مرحله‌ی واسنجی، با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده در ماه می (۲۴ داده)، صحت‌سنجی گردید. در شکل (۴) رابطه‌ی خطی میان مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی، ویژگی‌های آماری شیب، عرض از مبدأ، ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در تخمین مقادیر شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی به‌عنوان شاخصی از تنش آبی گیاه، موثر هستند. شاخص دقیق‌تر مقدار R^2 بیشتر، RMSE کمتر و شیب بیشتری دارد. بر اساس این نکته به ترتیب شاخص‌های WI2، WI3، WI4، WI1، OSAVI، RDVI، NDVI، و NWI5 دقت بیشتری در پیش‌بینی محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی داشتند. نتایج Asgari et al. (2023) نیز نشان داد پارامترهای محتوای آب برگ با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی بر اساس شاخص‌های طیفی مانند NWI5 و WI1 با دقت بالایی قابل برآورد هستند.

 DOI: 10.22055/jise.2024.46568.2121

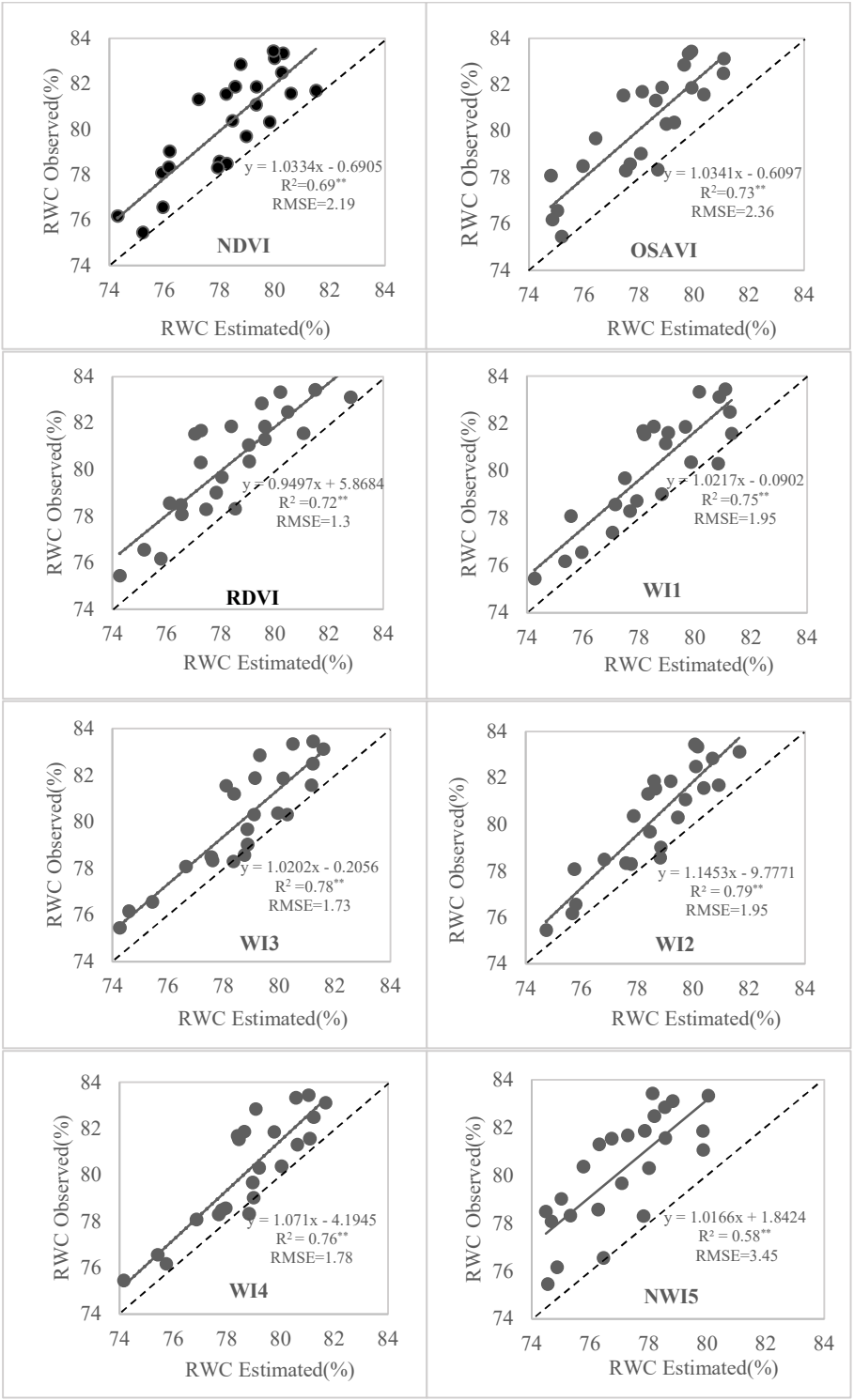


Fig.4- The Linear regression relationship between observed and predicted values of relative water content (RWC) of tomato plants based on the data of eight spectral indices studied.

**, *: significant effect at 1% and 5% respectively.

شکل٤- مدل رگرسیون خطی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیشبینی شده محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه فرنگی بر اساس هشت شاخص طیفی مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

گیاه گوجه‌فرنگی جز محصولات راهبردی در بخش کشاورزی است. با توجه به نیاز بالای گوجه فرنگی و کمبود آب، لزوم مدیریت مطلوب مصرف آب و برنامه‌ریزی آبیاری برای پایداری تولید محصولات کشاورزی وجود دارد. به‌منظور مدیریت بهینه مصرف آب در کشاورزی و تشخیص تنش در گیاه، استفاده از روش‌های نوین و غیر مخرب سنجش از راه دور، مورد نیاز است.

در این پژوهش قابلیت شاخص‌های طیفی آب، از جمله شاخص آب ۱-۴ (WI1-4)، شاخص نرمال آب ۵ (NWI5)، شاخص‌های طیفی سبزینگی RDVI، NDVI و OSAVI در بررسی وضعیت تنش آبی گیاه گوجه فرنگی تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری و نانو ذرات سیلیکا در شرایط گلخانه‌ای از طریق تعیین ارتباط میان شاخص‌های طیفی و شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه (RWC) مورد بررسی قرار گرفت. از بین هشت شاخص طیفی مورد بررسی، شاخص‌های طیفی WI2 و WI1 بالاترین ضریب تعیین را با شاخص محتوای نسبی آب برگ گیاه گوجه‌فرنگی داشتند. ارتباط معنی‌دار میان شاخص‌های طیفی و شاخص محتوای نسبی آب برگ، امکان بررسی سریع و غیر مخرب تغییرات وضعیت آبی گیاه گوجه‌فرنگی را در شرایط گلخانه ای با استفاده از روش طیف سنجی نشان داده و می‌تواند معیار خوبی برای بیان وضعیت آب گیاه باشد.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه SCU.WI1402.144 صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آناهیتا هادی قنوات، انجام پژوهش، تجزیه و تحلیل داده ها ، همکاری در تهیه مقاله.

نویسنده دوم: عبدالرحیم هوشمند، نظارت بر انجام پژوهش، بررسی نتایج ، همکاری در تهیه مقاله

نویسنده سوم: پروانه تیشه زن، نظارت بر انجام پژوهش، بررسی نتایج و تجزیه و تحلیل داده ها، همکاری در تهیه مقاله

نویسنده چهارم: ناصر عالم زاده انصاری، همکاری در انجام پژوهش گلخانه ای

نویسنده پنجم: کاظم رنگزن، همکاری در طیف سنجی

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه و شرکت سپاهان رویش اصفهان به‌منظور تأمین بذر گوجه فرنگی تشکر و قدردانی مینماید.

References

1- Alsaeedi, A., El-Ramady, H., Alshaal, T., El- Garawany, M., Elhawat, N. and Al-Otaibi, A., 2019. Silica nanoparticles boost the growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrient uptake. *Journal Plant Physiology and Biochemistry. 139*(12), pp.1–10. doi:10.1016/j.plaphy.2019.03.008

2- Asgari, A., Hooshmand, A., Broumand-Nasab, S. and Zivdar, S., 2023. Potential application of spectral indices for olive water status assessment in (semi-) arid regions: A case study in Khuzestan Province, Iran. Plant Direct, 7(6), pp.478-494. doi: 10.1002/pld3.494

3- Ballester, C., Miguel, A.J., Juan, R. C. and Diego, S.I., 2013. The usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. *Journal Agricultural and Forest Meteorology. 168*(15), pp. 120-129. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.08.005

4- Ballesteros, R., Ortega, J.F. and Moreno, M.A., 2016. FORETo: new software for reference evapotranspiration forecasting. *Journal of Arid Environments. 124*(3), pp.128–141. doi:10.1016/j.jaridenv.2015.08.006

5- Bohman, B.J., Rosen, C.J. and Mulla, D.J., 2019. Evaluation of variable rate nitrogen and reduced Irrigation management for potato production. *Journal of Agronomy. 111*(4), pp.2005–2017. doi:10.2134/agronj2018.09.0566

6- Ebrahimi, H., 2020. Investigating the performance and efficiency of tomato juice consumption in low irrigation conditions and the use of silica nanoparticles, Thesis, *Shahid Chamran University of Ahvaz*, Iran. 124p. (In Persian).

7- El-Hendawy, S.E., Al-Suhaibani, N., Elsayed, S., Hassan, W.M., Dewir, Y.H., Refay, Y. and Abdella, K.A., 2019. The potential of the existing and novel spectral reflectance indices for estimating the leaf water status and grain yield of spring wheat exposed to different irrigation rates. *Journal Agricultural Water Management. 217*(c), pp.356–373. doi: 10.1016/j.agwat.2019.03.006.

8- Elmetwalli, A.H., El-Hendawy, S.E., Al-Suhaibani, N., Alotaibi, M., Tahir, M.U., Mubushar, M., Hassan, W.M. and El-Sayed, S., 2020. Potential of hyperspectral and thermal proximal sensing for estimating growth performance and yield of soybean exposed to different drip irrigation regimes under arid conditions. *The Specia Issue Sensors in Agriculture. 27*(2), pp.93-105. doi.org/10.3390/s20226569

9- Elsayed, S. and Darwish, W., 2017. Hyperspectral remote sensing to assess the water status, biomass, and yield of maize cultivars under salinity and water stress. *Crop Production and Management*., 76(1), pp.62-72. doi:10.1590/1678-4499.018

10- Elsayed, S., El-Hendawy, S., Dewir, Y., Schmidhalter, U., Ibrahim, H., Ibrahim, M., Elsherbiny, O. and Farouk, M., 2021. Estimating the Leaf Water Status and Grain Yield of Wheat under Different Irrigation Regimes Using Optimized Two- and Three-Band Hyperspectral Indices and Multivariate Regression Models. *Journal Water. 13*(19), pp.1-22. doi:10.3390/w13192666

11- Elsayed, S., Elhoweity, M., Ibrahim, H.H., Dewir, Y., Migdadi, H.M. and Schmidhalter, U., 2017. Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. *Journal Agricultural Water Management.189*, pp.98-110. doi:10.1016/j.agwat.2017.05.001

12- Elsayed, S., Rischbeck, P. and Schmidhalter, U., 2015. Comparing the performance of active and passive reflectance sensors to assess the normalized relative canopy temperature and grain yield of drought-stressed barley cultivars. *Journal Field Crop Research. 177*(13), pp.148–160. doi:10.1016/j.fcr.2015.03.010

13- Gao, B., 1996. NDWI- a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Journal Remote Sensing of Environment. 58*(3), pp.257- 266. doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

14- Gitelson, A.A., Merzlyak, M.M., 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. seaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant physiology. 143*(3), pp. 286–292. http://dx.doi.org/10.3390/w11030443

15- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J. and Dextraze, L., 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Journal Remote Sensing of Environment. 81*(2-3), pp.416-426. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4

16- Haghighi, M., Parniani far., F. and Mozafarian, S., 2021. Investigating the performance and efficiency of tomato juice consumption in low irrigation conditions and the use of silica nanoparticles. In *5th International Congress of Agricultural Development, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran, Tabriz, Iran*.

17- Hashemi Dehkordi, E., Mousavi, M., Moallemi, N. and Ghafariyan moghareb, M.H., 2017. Effect of nanoparticles of titanium dioxide (anatase) on physiological characteristics of strawberry (Fragaria ananassa c.v. Queen Elisa) in hydroponic condition. *Journal Plant Process and Function. 5*(16), pp.1-8. (In Persian).

18- Ihuoma, S.O. and Madramootoo, C.A., 2019. Sensitivity of spectral vegetation indices for monitoring water stress in tomato plants. *Computers and Electronics in Agriculture*, *163*, p.104860. doi.org/10.1016/j.compag.2019.104860

19- Ihuoma, S.O. and Madramootoo, C.A., 2020. Narrow-band reflectance indices for mapping the combined effects of water and nitrogen stress in field-grown tomato crops. *Journal Biosystem Engineering. 192*(1), pp. 133-143. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020.01.017.

20- Inoue, Y., Kurosu, T., Maeno, H., Uratsuka, S., Kozu, T., Dabrowska-Zielinska, K. and Qi, J., 2002. Season-long daily measurements of multifrequency (Ka, Ku, X, C, and L) and full-polarization backscatter signatures over paddy rice field and their relationship with biological variables. *Journal Remote Sensing of Environment. 81* (2–3), pp.194–204. doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00343-1

21- Junttila, S., Vastaranta, M., Liang, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Kaasalainen, S., Holopainen, M., Hyyppä, H. and Hyyppä, J., 2017. Measuring leaf water content with dual-wavelength intensity data from terrestrial laser scanners. *Journal Remote Sensing. 9*(1), pp.1-20. doi.org/10.3390/rs9010008.

22- Kasraei, R. and Saedi, S., 2010. The effect of sewage sludge of Tabriz Petrochemical Complex on tomato plant growth. *Water and Soil Magazine*. *25*(1), pp.10-20. (In Persian). doi: 10.22067/JSW.V0I0.2913

23- Kovar, M., Brestic, M., Sytar, O., Barek, V., Hauptvogel, P. and Zivcak, M., 2019. Evaluation of Hyperspectral Reflectance Parameters to Assess the Leaf Water Content in Soybean. . *Journal Water. 443*(1), pp.1-12. doi: 10.3390/w11030443

24- Lynch, J.P., 2019.Root phenotypes for improved nutrient capture. An underexploited opportunity for global agriculture. *Journal New Phytologist. 223*, pp.548–564. doi:org/10.1111/nph.15738

25- Maghsoudi, K., Emam, Y. and Ashraf, M., 2015. Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat cultivars differing in drought tolerance. *Turkish Journal of Botany. 39*(4), pp.625–634. doi:10.3906/bot-1407-11

26- Mahmoodi, K., Alizadeh, Y., Abdul-Hamid, H. and Naji, H.R., 2020. Effect of nano Sio2 on physiological features of Pistacia atlantica subsp. Mutica under drought stress. *Journal Wood and Forest Science and Technology. 26*(4), pp.85-100. (In Persian). Doi: 10.22069/JWFST.2020.13986.1715

27- Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y.,Vina, A., Arkebauer, T. and Rundquist, D., 2012. Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Journal of Agronomy. 104*(5), pp.1336–1347. doi.org/10.2134/agronj2012.0065

28- Pelesco, VA. and Alagao, FB., 2014. Evapotranspiration Rate of Lettuce (Lactuca sativa L., Asteraceae) in a Non-Circulating Hydroponi cs System. *Journal Society & Technology. 4*(1), pp.1-6. doi: 10.5281/jst.v4i1.18

29- Penuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L. and Save, R., 1993. The reflectance at the 950–970 mm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing. 14*(10), pp.1887-1905. doi:10.1080/01431169308954010

30- Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R. and Filella, I., 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing. 18*(13), pp.69–75. doi:10.1080/014311697217396

31- Romero, A.P., Alarcón, A., Valbuena, R.I. and Galeano, C.H., 2017. Physiological assessment of water stress in potato using spectral information. *Journal Frontiers Plant science. 8*, pp.1608. doi.org/10.3389/fpls.2017.01608

32- Roujean, J.L. and Breon, F.M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements Remote Sensing of Environment. *Journal Remote Sensing of Environment. 51*(3), pp.375-384. doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3

33- Schlemmer, M.R., Francis, D.D., Shanahan, J.F. and J.S., Schepers., 2005. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. *Journal of Agronomy. 97*(1), pp.106-112. doi.org/10.2134/agronj2005.0106

34- Shokri, S., Hooshmand, A., Golabi, M., Alemzadeansari, N. and Struve, D., 2021. Effect of Silica Nanoparticles on Yield of Cucumber (Cucumis sativus L.) in Ahvaz region. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Sciences .22*(1), pp.279-292. (In Persion). doi: 10.22034/SAPS.2021.44312.2624

35- Tripathi, D.K., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K. and Dubey, N.K., 2015. Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in Pisum sativum (L.) seedlings. *Journal Plant Physiology and Biochemistry. 96*(3), pp.189-198. doi: 10.1016/j.plaphy.2015.07.026

36- Wang, J.J., Tian, X., CHen, L. and Wang, H.G., 2021. Grain Estarch Estimation using Hyperspectral Data and its Relationship with Leaf Water Contents for Broomcorn Millet(Panicum Milliaceum L). *Journal Ecology and Environmental Research. 20*(1), pp.431-445. doi:10.15666/aeer/2001_431445.

37- Yasir, QM1. and Zhang, W., 2022. Estimation of Leaf Water Content of Different Leaves from Different Species Using Hyperspectral Reflectance Data. *Annals of Agricultural & Crop Sciences. 7*(2), pp.1111-2022. doi:10.26420/annagriccropsci.2021.1111

38- Zhang, Q., Li, Q. and Zhang, G., 2012. Rapid determination of leaf water content using VIS/NIR spectroscopy analysis with wavelength selection. *Journal of Spectroscopy. 27*(2), pp.93-105