

Estimation yield and water use efficiency of tomato using spectroscopy under deficit irrigation regimes and Silica nanoparticle in greenhouse conditions

A. Hadighanavat¹, A. Hooshmand^{2*}, P. Tishehzan³, N. Alemzadeansari⁴ and K. Rangzan⁵

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.
3. Assistant Professor, Department of Environmental, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4. Associate 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.

Received: 15 January 2024

accepted: 19 June 2024

*Corresponding Author: Hooshmand_a@scu.ac.ir

Abstract

Introduction: Nowadays, the management of water resources has become one of the major challenges in the world due to recent droughts and water shortages. Therefore, timely and non-destructive monitoring of Water use efficiency (WUE) and yield of plants to screen cultivars with high water use performance and efficiency and rational allocation of water has become one of the important goals in agriculture. Compared with traditional crop Yield and WUE monitoring and diagnostic tools, hyperspectral remote sensing technology has made it possible to obtain water use efficiency and Yield by taking advantage of large amounts of continuous data on a large scale. Therefore, this study aimed to create a model capable of estimating the WUE and Yield of tomato plants based on hyperspectral remote sensing data by establishing a relationship between common spectral indices and WUE and Yield in greenhouse conditions.

Materials and Methods: The research was carried out during the growing season of 2021 from January to June at the research greenhouse of the Department of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Khuzestan Province, The main factor was irrigation treatments in three levels including full irrigation, 20%, and 40% deficit irrigation, and the sub-main factor was silica nanoparticles with concentrations of 0 and 100 mg/lit. The pot experiment plot was laid out in a split plot in a randomized complete design (RCD) with four replications (120 pots in total). Then Tomato yield and WUE under the various treatments were calculated. Canopy hyperspectral reflectance was measured using a portable spectrometer (ASD FieldSpec 3) operated in the spectral range of 350-2500 nm. The spectral data acquisition was conducted in four stages of plant growth during the growing season and the data were used to calculate spectral indices NWI5, WI3, WI4, NDVI, NDVI, and OSAVI. Then the ability of spectral indices to evaluate the water use efficiency and yield of tomato plants in different irrigation regimes and nanoparticles was investigated. Analysis of variance (ANOVA) was performed on spectral indices and WUE and yield of tomato plants using a split plot design. The PROC GLM method of SAS software (version 9.4, SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA) was used for this analysis. Then, in order to compare the averages and whether they



have a significant difference with each other at the 0.01 and 0.05 levels, the least significant difference (LSD) test was used.

Results and Discussion: The results showed that the Water use efficiency (WUE) under deficit irrigation treatments is increased with increasing water stress but the yield of tomato decreases with increase of water stress. In addition, the WUE and yield of tomato increases with increasing the concentration of silica nanoparticles (from 0 to 100 mg/liter). The value of NDVI and OSAVI indices decreased with the increase of water stress, while the value of RDVI, WI3, WI4 and NWI5 indices increased. The amount of NDVI and OSAVI spectral indices in the treatment containing 100 mg/liter nanoparticles was higher than the treatment without nanoparticles. Also, the amount of spectral indices RDVI, WI3, WI4 and NWI5 in nanoparticles with a concentration of 100 mg/liter was lower than the control treatment (zero concentration). The results also showed that the coefficient of determination between different spectral indices and the WUE and Yield index was $0.55^{**} < R^2 < 0.74^{**}$, and $0.64^{**} < R^2 < 0.77^{**}$, respectively. Among the spectral indices, RDVI and NWI5 showed the least and greatest correlation association with water use efficiency and yield of tomato, respectively.

Furthermore, among the six spectral indices, three spectral indices (NWI5, WI3, and WI4) jointly met most of the criteria used to determine the accuracy of the models for predicting yield and WUE

Conclusion: Maintaining existing water resources through improving irrigation management and increasing water use efficiency and Yield of plants is the main goal for the sustainable development of water agriculture. As a result, rapid and non-destructive monitoring of water use efficiency and Yield is of great importance in improving irrigation management of crops and saving water consumption. In conclusion, Spectral indices studied in this research could be useful and non-destructive measures of the water use efficiency and yield of tomato in greenhouse conditions.

Keywords: *Deficit Irrigation, Spectral indices, Spectroscopy, Tomato Plant, Water use efficiency.*

تخمین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گوجه‌فرنگی با استفاده از روش طیف‌سنجی تحت رژیم‌های کم آبیاری و نانوذرات سیلیکا در شرایط گلخانه‌ای

آناهیتا هادی قنوت^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

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

۴- دانشیار 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

چکیده	تاریخچه مقاله
<p>امروزه مدیریت منابع آب به دلیل بروز خشکسالی و کمبود آب به یکی از چالش‌های عمده در سطح جهان تبدیل شده‌است. بنابراین نظارت و پایش به موقع و غیر مخرب بر بهره‌وری مصرف آب (WUE) و عملکرد گیاه به منظور غربالگری ارقام با عملکرد و بهره‌وری مصرف آب بالا و تخصیص منطقی آب به یکی از اهداف مهم در کشاورزی تبدیل شده‌است. امروزه فناوری طیف‌سنجی در مقایسه با ابزارهای پایش و تشخیصی سنتی، امکان تخمین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب را با بهره‌گیری از مقادیر زیاد داده‌های پیوسته در مقیاس بزرگ فراهم کرده‌است. بنابراین، هدف از این مطالعه بررسی امکان‌سنجی قابلیت تخمین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب (WUE) گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از شاخص‌های طیفی NDVI، RDVI، NWI5، WI4، WI3 و OSAVI بر اساس داده‌های طیفی در شرایط گلخانه‌ای بود. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل دو سطح نانو ذرات سیلیکا با غلظت‌های صفر و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به صورت تغذیه ریشه‌ای و سه رژیم آبیاری (۸۰، ۱۰۰ و ۶۰ درصد از نیاز آبی گیاه) بود. نتایج نشان داد که مقادیر بهره‌وری مصرف آب در گیاه گوجه‌فرنگی در تیمارهای کم آبیاری به طور متوسط نسبت به تیمار شاهد افزایش یافته‌است. همچنین به طور کلی بهره‌وری مصرف آب در نانو ذره با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به غلظت صفر میلی‌گرم بر لیتر بیشتر بود. علاوه بر این نتایج نشان داد مقادیر عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای آبیاری با افزایش تنش آبی و کاهش غلظت نانوذرات سیلیکا کاهش یافته‌است. همچنین نتایج نشان داد که شاخص‌های طیفی مورد مطالعه، قادرند ۶۴</p>	<p>دریافت: پذیرش نهایی: کلمات کلیدی: بهره‌وری مصرف آب، شاخص طیفی، طیف‌سنجی، کم آبیاری، گیاه گوجه‌فرنگی</p> <p>* عهده دار مکاتبات Email: Hooshmand_a@scu.ac.ir</p>

تا ۷۷ درصد از تغییرات عملکرد گیاه و ۵۵ تا ۷۴ درصد تغییرات بهره‌وری مصرف آب در گیاه گوجه‌فرنگی تحت تأثیر تنش آبی و نانو ذرات سیلیکا را پیش‌بینی کنند. در میان تمام شاخص‌های طیفی آزمایش شده، شاخص طیفی NWI5 بیشترین و شاخص RDVI کمترین ضریب تعیین را با شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب و عملکرد در گیاه گوجه‌فرنگی نشان دادند. با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده از شاخص‌های طیفی به عنوان ابزاری سریع، غیر مخرب و قابل قبول در برآورد بهره‌وری مصرف آب و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای توصیه می‌شود.

مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به تغییرات ناگهانی آب و هوا، گرم شدن زمین و افزایش جمعیت، تولید محصولات کشاورزی با محدودیت مواجه شده و سبب شده امنیت غذایی در سرتاسر جهان به خطر بیفتد. کاهش میزان بارندگی و بروز خشکسالی‌های پی در پی از مهم‌ترین عوامل کمبود آب در ایران به شمار می‌آیند. بنابراین باید در تمام اصول استفاده از منابع آب در کشور بازنگری صورت گیرد. در مناطقی که منابع آب محدودی دارند، بهره‌وری مصرف آب آبیاری (WUE¹) و عملکرد را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف زراعی، بهبود بخشید. کم آبیاری یکی از روش‌هایی است که به منظور بهینه سازی مصرف آب و تولید محصول در شرایطی که با محدودیت منابع آب مواجه هستیم، پیشنهاد می‌شود. گزارش شده است که بهره‌وری مصرف آب را می‌توان به طور قابل توجهی در حدود ۱۰-۴۲ درصد با استفاده از تیمارهای کم آبیاری در مقایسه با تیمارهای آبیاری کامل افزایش داد (۳۵،۱۲). صالحی و همکاران^۲ (۵۰) در پژوهشی به بررسی تأثیر کم آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در گیاه گوجه فرنگی پرداختند. آن‌ها یافتند کم آبیاری باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب گردید. کاهش نیاز آبی از ۱۰۰ درصد به ۷۵ درصد نیاز آبی باعث

افزایش بهره‌وری مصرف آب شد بدون آن که تأثیر قابل توجهی بر عملکرد داشته باشد. از طرف دیگر با بهره‌گیری از فناوری نانو در ساخت نانوکودها، فرصت‌های جدیدی به منظور افزایش بهره‌وری مصرف آب و کاهش اثرات منفی تنش آبی پیش روی انسان گشوده شده است (۳۸). تنش آبی سبب مختل شدن تعادل تغذیه‌ای در گیاه شده و فراهمی مواد غذایی را به دلیل کاهش رشد ریشه محدود می‌کند. نانو ذرات از طریق افزایش جذب، حفظ و نگهداری عناصر غذایی می‌تواند سبب بهبود وضعیت رشد گیاه شوند. نانوذرات سیلیکا، به دلیل داشتن خاصیت واکنش‌پذیری سطح به حجم زیاد، می‌توانند از طریق ریشه‌ها، روزنه‌ها و یا کرک‌های سطح برگ، وارد گیاه شوند و به کمک جریان شیره‌ی سلولی به اندام‌های مختلف انتقال یابند و علاوه بر استحکام فیزیکی، سبب بهبود فرایندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی، تبادلات گازی و تقویت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه در شرایط تنش می‌شوند. (۲۱،۳۸). نانو ذرات سیلیکا آثار منفی ناشی از محدودیت آبی را با تعدیل مواد جذب شده‌ی فتوسنتز و تولید املاح سازگار، بهبود می‌بخشد و با بهبود شاخص کلروفیل و نرخ فتوسنتز، محتوای نسبی برگ و کاهش نشت الکترولیت برگ، باعث افزایش عملکرد گیاه می‌شود (۲۵). نانوذرات سبب می‌شود زمان و سرعت رهاسازی عناصر با نیاز غذایی گیاه هماهنگ شود. بنابراین گیاه قادر به جذب بیشتر مواد غذایی شده و از این‌رو

1- Water Use Efficiency

2- Salehi et al.

بیشتر محصول، انتخاب ارقام با بازده بالا و مدیریت بهتر منابع آب موجود شود (۴۴۸). در طی مراحل رشد گیاه، تغییرات مهم و بارزی در طیف بازتابی گیاه به خصوص در ناحیه مادون قرمز نزدیک اتفاق می افتد به طوری که با کامل شدن رویش برگ و نزدیک شدن به فصل خزان، هوای موجود در مزوفیل برگ افزایش می یابد و از میزان رطوبت آن کاسته می شود. تغییرات صورت گرفته در فضای درون سلولی برگ منجر به افزایش انعکاس طیفی می شود. زمانی که گیاه دچار تنش آبی می شود نیز گیاه مواجه با چنین پاسخ های طیفی شده و طیف بازتابی از برگ افزایش می یابد (۳۰، ۳۱).

تعیین رابطه بین پارامترهای مختلف زراعی و بازتابی طیفی آن ها مهم است. فناوری سنجش از دور زمینی (طیف سنجی)، طول موج های حساس بدست آمده از ویژگی های طیفی گیاه را به منظور بدست آوردن شاخص های گیاهی که برای ایجاد مدل های تخمینی مناسب می باشد، استفاده می کند (۲۶، ۳۳، ۳۶).

شاخص های طیفی بدست آمده از داده های طیفی برای ارزیابی کمی و کیفی صفات بیوفیزیکی گیاه مانند عملکرد، شاخص برداشت، شاخص بهره وری مصرف آب و صفات بیوشیمیایی گیاه کاربرد دارد (۵، ۷، ۳۳). این شاخص ها با ترکیب چندین طول موج و به حداقل رساندن اثرات پس زمینه خاک و زاویه خورشیدی امکان مطالعه دقیق پارامترهای مختلف گیاهی را تحت شرایط و شیوه های مختلف زراعی فراهم می کند. مطالعات قبلی طول موج ها و شاخص های کاربردی را برای تخمین پارامترهای گیاهان در شرایط مختلف زراعی معرفی کرده اند. در پژوهشی محققان به بررسی قابلیت استفاده از شاخص های طیفی بدست آمده از طیف سنج زمینی و همچنین داده های ماهواره ای در تخمین عملکرد، اجزای عملکرد و بهره وری مصرف آب در درخت زیتون پرداختند نتایج آن ها نشان داد که شاخص طیفی NDVI^۲ به خوبی بهره وری

کمبود مواد غذایی و نیازشان تأمین می گردد (۲۸). نتایج پژوهشی نشان داد که استفاده از نانوذرات روی به صورت تغذیه ریشه ای باعث افزایش عملکرد پیاز گردید (۴۶). همچنین ابراهیمی و همکاران^۱ (۹) در پژوهشی به بررسی اثر نانو ذرات سیلیکا در شرایط تنش کم آبی بر روی گیاه گوجه فرنگی گلخانه ای پرداختند. آن ها گزارش کردند، کاربرد نانوذره با غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر سبب افزایش عملکرد و بهره وری مصرف آب می شود.

با توجه به اینکه در کشور با محدودیت منابع آب مواجه هستیم باید به اتخاذ شیوه های بهینه مدیریت مصرف آب، به منظور بهبود عملکرد و بهره وری مصرف آب در کشاورزی توجه ویژه ای داشت. بنابراین، ارزیابی سریع و غیرمخرب عملکرد گیاه و بهره وری مصرف آب برای یافتن بهینه ترین حجم آب آبیاری مورد نیاز در مناطقی که با محدودیت آب مواجه هستند از اهمیت بالایی برخوردار است. با توسعه سریع روش های سنجش از دور می توان در زمان واقعی یک ارزیابی غیرمستقیم از پارامترهای زراعی متعدد را به شیوه ای سریع، کارآمد و غیر مخرب انجام داد (۱۳، ۵۲).

امروزه، توسعه سریع فناوری سنجش از دور ابزار مؤثر به منظور تجزیه و تحلیل میزان آب مورد استفاده گیاهان در کشاورزی بخصوص در مقیاس بزرگ می باشد. این فناوری در مقایسه با ابزارهای سنتی با بهره گیری از حجم گسترده ای از اطلاعات ناشی از طیف منعکس شده از برگ، پایش و اندازه گیری عملکرد و بهره وری مصرف آب در گیاه را به صورت کارآمدتر و سریع تری انجام می دهد. در سال های اخیر، استفاده از داده های سنجش از دور به طرز چشم گیری گسترش یافته و یکی از مزایای اصلی این داده ها، قابلیت تکرار زمانی و مکانی مناسب آن ها می باشد (۳). بنابراین وضعیت رشد گیاه را می توان به طور مداوم با استفاده از تکنیک های سنجش غیرمخرب (طیف سنجی) کنترل کرد، که می تواند منجر به عملکرد

باشند در تخمین عملکرد گیاه موثر هستند (۱۸). بنابراین می‌توان به منظور بهبود تشخیص تنش آبی در گیاه و مدیریت بهینه مصرف آب در کشاورزی از شاخص‌های طیفی بهره گرفت (۴). تحقیقات اخیر که به منظور ارزیابی سیستم سنجش از دور برای ارزیابی پارامتر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در گیاهان مختلف صورت گرفته است، نشان دهنده دقت بالای این روش‌ها در تخمین این پارامتر مهم مدیریتی آب است (۵۵،۴۹). بنابراین سنجش از دور در حال تبدیل شدن به یک امر ضروری است و یکی از اصلی‌ترین راهکارهای کنترل برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط خشک و نیمه خشک می‌باشد (۲۰).

در مطالعات قبلی قابلیت چندین شاخص طیفی به منظور بررسی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، اما اعتبارسنجی این شاخص‌ها برای گیاه گوجه‌فرنگی و در شرایط گلخانه‌ای به ندرت مورد بررسی قرار گرفته‌است. به همین جهت هدف این مطالعه بررسی قابلیت شاخص‌های مختلف طیفی و انتخاب مناسب‌ترین شاخص بدست آمده به منظور تخمین بهره‌وری مصرف آب و عملکرد کل در گیاه گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای کم آبیاری و نانو ذرات سیلیکا در شرایط گلخانه‌ای می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت کشت گلدانی، در مجتمع گلخانه‌ای دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز از دی ماه سال ۱۴۰۰ تا خرداد ماه سال ۱۴۰۱ انجام شد. نتایج آزمایش‌های تعیین برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور بررسی قابلیت استفاده از فناوری سنجش از دور زمینی (طیف سنجی) در برآورد عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه گوجه‌فرنگی، آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده^۴ بر پایه کاملاً تصادفی در

مصرف آب و عملکرد را توصیف می‌کند (۱۱). علاوه بر این در پژوهشی مشاهده شد که تراکم گیاه و حجم آب آبیاری به شکل مستقیم بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه گندم تأثیر دارد و همچنین باعث اثرات قابل توجهی بر بازتاب طیفی از برگ گیاه گندم زمستانه در محدوده‌ی مرئی (۷۰۰-۷۰۰ nm) و محدوده‌ی مادون قرمز نزدیک (۱۳۰۰-۷۰۰ nm) می‌شود (۳۳). در پژوهشی دیگر الهنداوی و همکاران^۱ (۱۳) به بررسی قابلیت چندین شاخص طیفی در تخمین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه گندم در شرایط تنش آبی پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد که شاخص‌های طیفی همچون NDVI و شاخص‌های مبتنی بر محتوای آب گیاه مانند 2WI و 1NWI پارامترهای ذکر شده را با دقت بالایی توصیف می‌کنند.

در پژوهشی دیگر روی طیف بازتابی از گیاه گزارش کردند، شاخص‌های طیفی بدست آمده حاصل از ترکیب محدوده‌ی طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه و همچنین مادون قرمز موج کوتاه و مادون قرمز موج کوتاه نسبت به شاخص‌های طیفی که تنها طول موج‌های در محدوده‌ی طیف مرئی را با یکدیگر ترکیب می‌نمایند، در پیش‌بینی وضعیت آب و عملکرد گیاه تحت تأثیر تنش آبی مؤثرتر هستند (۱۴). شاخص‌های طیفی که برای تخمین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب بکار می‌روند غالباً بر مبنای دو طول موج در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک هستند. پاسخ طیفی در ناحیه مرئی بیشتر تحت تأثیر غلظت کلروفیل و در ناحیه مادون قرمز، از طریق ساختار درونی برگ کنترل می‌شود. ترکیب این دو طول موج موجب تفکیک آن‌ها از سایر پدیده‌ها مانند پس زمینه خاک و اتمسفر می‌شود و از آنجا که بر مبنای فعل و انفعالات فتوشیمیایی گیاه می‌

1- El-Hendawy *et al.*

2- Normalized Water Index 5

3- Water Index

مشخصات نانو ذرات (شرکت NANOSHEL، هند) مورد استفاده، در جدول ۲ ارائه شده است. استفاده از نانو ذرات در سه مرحله از رشد (مرحله رشد رویشی، گلدهی و تشکیل میوه) و به صورت تغذیه ریشه‌ای صورت گرفت. برای تهیه محلول‌های نانو ذره در هر مرحله، ابتدا بر اساس غلظت نانو ذره برای هر تیمار، مقدار نانو ذرات سیلیکا وزن و در حجم مشخص آب مقطر ریخته و به مدت نیم ساعت بر روی دستگاه شیکر (۲۰۰ دور بر دقیقه) قرار داده شد. و سپس مورد استفاده گیاه قرار گرفت.

چهار تکرار (هر تکرار شامل پنج واحد آزمایشی (گلدان) و در مجموع ۱۲۰ عدد گلدان) انجام شد. آزمایش شامل سه سطح آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه (به ترتیب I_{60} ، I_{80} ، I_{100}) به عنوان عامل اصلی و دو سطح نانو ذره سیلیکا ۱۰۰ و صفر میلی گرم بر لیتر (به ترتیب F_{100} و F_0) به عنوان عامل فرعی بود. به منظور تهیه محلول نانو ذرات سیلیکا، غلظت استفاده از نانو ذره و مراحل مختلف استفاده از نانو ذرات سیلیکا مورد توجه قرار گرفت.

جدول (۱) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table (1) physical and chemical properties of the soil

value مقدار	Unit واحد	properties ویژگی
58	%	Sand شن
26	%	Silt سیلت
16	%	Clay رس
Sandy loam لوم شنی	-	Soil texture class کلاس بافت خاک
3.45	dS. m ⁻¹	ECe هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک
7.1	-	pH اسیدیته
21	%(vol.)	Field capacity moisture رطوبت ظرفیت زراعی
9	%(vol.)	Permanent wilting point moisture رطوبت نقطه پژمردگی دائم
1.47	g.cm ⁻³	bulk density جرم مخصوص ظاهری

جدول (۲) مشخصات نانو مواد سیلیکا

Table (2) Characteristics of silica nano particles

نانو ذرات سیلیکا	
99.9%	درجه خلوص (degree of purity)
15-20 nm	اندازه ذرات (particle size)
SiO ₂	فرمول (formulation)
60.08 g/mol	وزن ملکولی (molecular weight)
سفید	رنگ (Color)
2.4 g/cm ³	چگالی (bulk density)
1610 °C	نقطه ذوب (boiling point)
2230 °C	نقطه جوش (melting point)

شد. بازتاب مطلق نمونه‌ها در دامنه ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر ثبت شدند که در مجموع ۲۱۵۱ نقطه در هر منحنی طیف بدست آمد.

پس از اندازه‌گیری طیف انعکاسی از برگ گیاه به منظور بررسی قابلیت شاخص‌های طیفی در برآورد شاخص بهره‌وری آب و عملکرد کل گیاه گوجه‌فرنگی، از چندین شاخص انعکاس طیفی که در مطالعات گذشته پیشنهاد شده بودند، طبق جدول ۳ استفاده شد.

شاخص بهره‌وری آب (WP)

یکی از شاخص‌های مورد استفاده در مباحث عملکرد گیاه و آب مصرفی، بهره‌وری مصرف آب است. بهره‌وری مصرف آب یک محصول عبارت است از نسبت عملکرد محصول به مقدار آب مصرف شده برای تولید آن محصول که از رابطه‌ی ۴ محاسبه شد (۲۷، ۲۱):

$$WP = \frac{Y}{I} \quad (4)$$

در رابطه ۴ WP، Y و I به ترتیب بهره‌وری آب آبیاری (گرم بر لیتر)، عملکرد محصول (گرم) و میزان آب آبیاری (لیتر) می‌باشد.

عملکرد گیاه

به منظور محاسبه عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی، میوه‌های رسیده برداشت و توسط ترازو با دقت یک گرم اندازه‌گیری شدند. وزن تمام میوه‌های برداشت شده، به عنوان عملکرد میوه در آن بوته ثبت گردید.

محاسبات، تجزیه و تحلیل‌های آماری

به منظور اندازه‌گیری طیف برگ‌ها و پردازش اولیه منحنی‌های طیفی از نرم‌افزارهای ViewSpecPro و SAMS استفاده شد. تجزیه و تحلیل واریانس بر اساس طرح کرت-های خرد شده، با استفاده از روش PROC GLM توسط نرم افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها نیز از آزمون LSD استفاده شد. رگرسیون خطی ساده برای بررسی همبستگی بین شاخص‌های طیفی مورد مطالعه با شاخص بهره‌وری مصرف آب و عملکرد کل گیاه استفاده شد. سپس

برنامه‌ریزی آبیاری

برای محاسبه نیاز آبی از ۳ عدد لایسیمتر و روش وزنی پلاسکو و آلانگو^۱ (۴۳) استفاده و میزان آب در هر نوبت آبیاری بر اساس رابطه شماره ۱ محاسبه شد:

$$W_U = (W_L + W_2) - (W_1 + W_D) \quad (1)$$

در رابطه (۱) W_D و W_1 ، W_2 ، W_L ، W_U به ترتیب نیاز آبی گیاه (تبخیر و تعرق)، وزن میکرو لایسیمتر قبل از آبیاری، وزن آب آبیاری، وزن میکرو لایسیمتر در انتهای دوره آبیاری (قبل از آبیاری بعدی) و وزن زهاب می‌باشند. تمامی پارامترهای ذکر شده بر حسب گرم می‌باشد. به منظور برآورد نیاز خالص و ناخالص آبیاری در گلدان‌ها به ترتیب از رابطه‌های ۲ و ۳ استفاده شد:

$$d = \frac{W_u}{A} \quad (2)$$

d = عمق خالص آبیاری (میلی‌متر)

A = مساحت میکرو لایسیمتر (مترمربع)

$$GWR = \frac{d}{1-D} \quad (3)$$

GWR = نیاز ناخالص آبیاری (میلی‌متر)

d = نیاز خالص آبیاری (میلی‌متر)

D = درصد زهکشی ۲۵-۲۰٪

به منظور کاهش تجمع املاح و برای اطمینان از تأمین آب بهینه گیاه، نیاز آبی ۲۵-۲۰٪ در نظر گرفته شد. سپس با در نظر گرفتن ضرایب کم آبیاری، نیاز آبی برای تیمارهای ۶۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی نیز محاسبه گردید.

ارزیابی عملکرد و شاخص بهره‌وری مصرف آب

گیاه به روش طیف‌سنجی

در این مطالعه به منظور بررسی تغییرات طیفی در برگ گیاه گوجه‌فرنگی در چهار مرحله از دوره‌ی رشد گیاه (مراحل رشد رویشی، گلدهی، شروع تشکیل و رسیدگی میوه) از دستگاه Fieldspec3 شرکت ASD آمریکا استفاده

¹ Pelesco and Alagao

روی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر توأمان رژیم آبیاری و استفاده از نانوذره بر روی بهره‌وری مصرف آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، اما بر روی عملکرد در سطح پنج درصد معنی‌دار به دست آمد.

به منظور بررسی معنی‌داری ضریب تعیین (R^2) در سطح پنج و یک درصد از نرم افزار SPSS نسخه ۱۶ استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه گوجه‌فرنگی تحت اثر جداگانه و متقابل رژیم آبیاری و نانو ذرات سیلیکا در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، رژیم آبیاری و استفاده از نانو ذرات سیلیکا بر

جدول (۳) شاخص‌های طیفی مورد استفاده در پژوهش

Table(3) Spectral indices used in research

مرجع Reference	معادله Equation	اختصارات Abbreviation	نام شاخص Index names
الساید و همکاران (۱۷)	$(R_{970}-R_{910})/(R_{970}+R_{910})$	NWI5	شاخص‌های محتوای آب
الساید و همکاران (۱۸)	R_{974}/R_{904} R_{988}/R_{895}	WI3 WI4	Water content indices
روژان و بریون (۴۷)	$(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670})^{1/2}$	RDVI	شاخص‌های سبزی‌نگی
هابودان و همکاران (۲۵)	$(1+0.16)(R_{800}-R_{670})/$ $(R_{800}+R_{670}+0.16)$	OSAVI	Greenness indices
گیٹلسون و مرزلیاک (۲۴)	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$	NDVI	

جدول (۴) نتایج تجزیه واریانس اثر رژیم آبیاری، نانوذرات سیلیکا و برهم کنش آن‌ها بر عملکرد گوجه و بهره‌وری مصرف آب

Table(4) Analysis of variance of irrigation regime, silica nanoparticles, and their interaction on Yield and Water Use Efficiency

میانگین مربعات mean square	عملکرد گیاه Yield	درجه آزادی Df	منابع تغییرات Source of variation
33.45**	633530.09**	2	رژیم آبیاری Irrigation regimes
4.72	253543.9	9	خطای عامل اصلی Main Error
1.53**	113617.1**	1	نانو ذرات Nanoparticles
0.24**	11957.19*	2	رژیم آبیاری* نانو ذرات Nanoparticles*Irrigation regimes
0.005	273.3	9	خطای عامل فرعی Sub Error
14.63	7.89		ضریب تغییرات CV%

ns, * و ** به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

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

بهره‌وری مصرف آب

بنابر نتایج ارائه شده در جدول جدول ۵، بهره‌وری مصرف آب گوجه‌فرنگی در شرایط آبیاری کامل ۷/۴۱ گرم بر لیتر است. اما با اعمال ضریب ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی به ترتیب به ۸/۶۷ و ۱۰/۴۱ گرم محصول به ازای هر لیتر آب مصرفی رسید که نشان دهنده تأثیر معنی‌دار کم آبی بر روی بهره‌وری مصرف آب در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد. بنابراین بهره‌وری مصرف آب تحت تأثیر کم آبیاری افزایش پیدا کرد. پاتانیا و همکاران (۴۲) در تحقیقی بهره‌وری مصرف آب در گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش آبی را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند با افزایش تنش آبی، بهره‌وری مصرف آب افزایش می‌یابد. آنان بیان کردند این افزایش تا سطح مشخصی از تنش کم آبی اتفاق می‌افتد و بعد از آن بهره‌وری مصرف آب کاهش می‌یابد. علاوه بر این در پژوهشی دیگر بر روی گیاه گوجه‌فرنگی تأثیر کم آبیاری با سطوح ۲۰ و ۴۰ درصد بر روی بهره‌وری مصرف آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش تنش آبی مقدار بهره‌وری مصرف آب به شکل معنی‌داری افزایش می‌یابد (۵۴). بر اساس نتایج مقایسه میانگین استفاده از نانو ذره سبب افزایش معنی‌دار بهره‌وری مصرف آب شد (جدول ۵). در تمام تیمارهای کم آبیاری استفاده از نانوذرات، سبب افزایش بهره‌وری مصرف آب گردید. ابراهیمی و همکاران (۹) در پژوهش خود به

بررسی اثر سه سطح نانوذره سیلیکا صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بر روی عملکرد و اجزای عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای پرداختند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذره سیلیکا، بهره‌وری مصرف آب را ۱۵/۷۶ درصد نسبت به تیمار شاهد (غلظت صفر) افزایش می‌دهد و غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر را به عنوان مؤثرترین تیمار نانوذره در افزایش بهره‌وری مصرف آب در گیاه گوجه‌فرنگی معرفی کردند. علت افزایش بهره‌وری مصرف آب در اثر استفاده از نانوذرات سیلیکا در شرایط تنش آبی را می‌توان به نقش نانوذرات سیلیس در فعالیت آنزیم‌ها و فرآیندهای بیوشیمیایی در بافت‌های گیاهی نسبت داد (۴۱). این موضوع بیانگر آن است که استفاده از نانوذرات سبب افزایش مقاومت گیاه به تنش کم آبی می‌باشد.

نتایج برخی تحقیقات نشان می‌دهد که نانوذرات با شرکت در فرآیند تنظیم اسمزی، سبب بهبود پتانسیل آب برگ و محتوای نسبی آب برگ گیاه می‌شود؛ از این رو به عنوان عامل بهبود دهنده برای کاهش اثرات نامطلوب تنش آبی بر رشد، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب استفاده می‌گردد (۶،۲۷)

جدول (۵) مقایسه میانگین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گوجه‌فرنگی در رژیم‌های متفاوت آبیاری و نانوذرات سیلیکا
Table(5) Comparison of the mean of the Yield and Water Use Efficiency of Tomato in different irrigation regimes and silica nanoparticles

بهره‌وری (گرم بر لیتر) Water Use Efficiency (gr/l)	عملکرد (گرم بر بوته) Yield (gr/ per plant)	تیمار Treatments
Irrigation regimes		
7.41 ^a	2706 ^a	I ₁₀₀
8.67 ^b	2531 ^b	I ₈₀
10.41 ^c	2279 ^c	I ₆₀
نانوذرات (میلی‌گرم بر لیتر) Nanoparticles (mg/l)		
8.58 ^a	2436 ^a	0
9.08 ^b	2574 ^b	100

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون و هر عامل آزمایشی، بر اساس آزمون LSD، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد هستند.

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

شاخص‌های طیفی گیاه

جمع‌آوری داده‌های طیفی در چهار مرحله رشد گیاه (مراحل رشد رویشی، گلدهی، شروع میوه‌دهی و رسیدگی میوه) انجام شد و از داده‌ها برای محاسبه شاخص‌های طیفی ارائه شده (OSAVI، NDVI، RDVI، NWI5، WI4، WI3) در جدول ۳ استفاده شد. سپس بررسی توانایی شاخص‌های طیفی در برآورد شاخص بهره‌وری مصرف آب و عملکرد کل گیاه گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری و نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج جدول ۶، میزان همبستگی تمامی شاخص‌ها در مرحله‌ی رشد رویشی کم است. با افزایش رشد گیاه و رسیدن به مرحله‌ی گلدهی، توانایی شاخص‌های طیفی برای توصیف عملکرد در گیاه گوجه‌فرنگی افزایش یافت. بیشترین همبستگی شاخص‌های طیفی، در دومین مرحله طیف-سنجی (مرحله گلدهی)، بدست آمد. و داده‌های طیفی توانستند با دقت خوب، میزان عملکرد را پیش‌بینی کنند. پاسخ طیفی به عملکرد در مراحل گلدهی مشهودتر بود، زیرا گیاهان به تنش آبی در این مرحله حساس‌تر هستند. چندین مطالعه روی رشد، عملکرد و بهره‌وری آب گوجه‌فرنگی تحت تأثیر تنش آبی نشان داده‌اند که مراحل گلدهی و میوه‌دهی گوجه‌فرنگی به تنش آبی حساس‌تر است (۴۶، ۳۹).

بنابراین، محاسبه شاخص‌های طیفی در مرحله گلدهی برای دستیابی به بهره‌وری مصرف آب و عملکرد کل در شرایط تنش آبی در این پژوهش استفاده شد. در تحقیقی طیف منعکس شده از برگ گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش آبی در مراحل مختلف رشد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در مرحله گلدهی طیف انعکاسی از برگ در شرایط تنش آبی واضح‌تر نسبت به سایر دوره‌های رشد است، به همین دلیل دوره گلدهی به عنوان دوره منتخب برای تخمین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در نظر گرفتند (۳۱).

عاشورلو و همکاران (۲)، به بررسی قابلیت تخمین عملکرد گیاه کلزا توسط شاخص‌های طیفی در مراحل مختلف رشد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که شاخص‌های طیفی بیشترین همبستگی با عملکرد را در دوره گلدهی کلزا داشتند. آنان علت

عملکرد

بر اساس نتایج مقایسه میانگین عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی در رژیم‌های متفاوت آبیاری و نانو ذرات سیلیکا (جدول ۵)، اعمال تنش کم آبی سبب کاهش معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر روی عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی شد. در تیمارهای آبیاری کامل، میانگین عملکرد کل ۲۷۰۶ گرم بر بوته محاسبه شد در حالی که در تیمارهایی که با سطح ۸۰ درصد نیاز آبی، آبیاری شدند عملکرد به ۲۵۳۱ و آبیاری در سطح ۶۰ درصد نیاز آبی با ۱۵ درصد کاهش به ۲۲۷۹ گرم بر بوته رسید.

در شرایط تنش آبی، گیاهان معمولاً تعرق بیشتری نسبت به میزان جذب آب دارند، که این مسئله باعث عدم تعادل آبی در گیاه و در نتیجه کاهش محتوای نسبی آب در برگ‌ها می‌گردد. به منظور مقابله با این شرایط، گیاهان اقدام به بستن روزنه‌های برگ می‌کنند. این اقدام به عنوان یک استراتژی دفاعی، سبب کاهش هدایت روزنه‌ای و همچنین کاهش ورودی دی‌اکسید کربن به درون گیاه می‌شود، که منجر به کاهش راندمان فتوسنتزی، رشد گیاه و در نهایت کاهش عملکرد خواهد شد (۵۱).

مزارعی (۳۴) در تحقیق خود گزارش کرد که تنش کم آبی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد در گیاه گوجه‌فرنگی شد. در پژوهش حاضر استفاده از نانوذرات سیلیکا باعث افزایش معنی‌دار عملکرد در گیاه گوجه‌فرنگی شد. علت افزایش عملکرد در اثر استفاده از نانوذرات سیلیکا به دلیل تأثیر آن‌ها بر بهبود محتوای نسبی آب برگ، افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و میزان کلروفیل سطح برگ گیاه می‌باشد (۴۸).

شکری و همکاران^۱ (۵۳)، در پژوهشی به بررسی تأثیر نانوذرات سیلیکا در شرایط تنش آبی بر روی گیاه خیار گلخانه‌ای پرداختند. آن‌ها نشان دادند استفاده از نانو ذرات سیلیکا به صورت تغذیه ریشه‌ای باعث افزایش عملکرد می‌شود. با افزایش غلظت نانوذرات سیلیکا، میزان تولید اتیلن، کلروپالست و اسید آبسزیک در گیاه افزایش یافته و جذب بیشتر مواد مغذی توسط گیاه، سبب افزایش عملکرد می‌شود (۱).

هادی قنوت و همکاران: تخمین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب...

را داشتن بیشترین سبزیگی و ویژگی‌های طیفی خاص در این مرحله دانستند. بر اساس نتایج جدول مقایسه میانگین شاخص‌های طیفی در کل دوره (جدول ۷)، مقدار شاخص‌های طیفی NDVI و OSAVI در تیمار حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذره بیش‌تر از تیمار بدون نانو ذره بود. همچنین مقدار شاخص‌های طیفی RDVI، WI3، WI4 و NWI5 در نانو ذره با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کمتر از تیمار شاهد (غلظت صفر) بدست آمد. اما این کاهش تنها در شاخص RDVI معنی‌دار یافت شد. با افزایش شدت تنش، مقدار شاخص NDVI و OSAVI کاهش و شاخص طیفی RDVI افزایش یافت (۳۰).

شاخص NDVI و OSAVI کاهش و مقدار شاخص شاخص NDVI، WI3، WI4 و NWI5 افزایش یافته‌است. نتایج پژوهش بر روی طیف منعکس شده از گیاه گندم در شرایط تنش آبی نشان داد که مقادیر دو شاخص NDVI، WI4 و NWI5 با افزایش تنش آبی، افزایش یافته‌است (۱۸). در تحقیقی دیگر اثر تنش آبی بر شاخص‌های طیفی RDVI، NDVI و OSAVI در گیاه فلفل دلمه‌ای گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد شد که با افزایش تنش، شاخص‌های طیفی NDVI و OSAVI کاهش و شاخص طیفی RDVI افزایش یافت (۳۰).

جدول (۶) میزان همبستگی شاخص‌های طیفی با میزان عملکرد گوجه‌فرنگی در دوره‌های رشد مختلف
Table (6) correlation of spectral indices with tomato yield in different growth periods

شاخص‌های طیفی Spectral indices	دوره رویشی vegetative period	دوره گلدهی Flowering period	دوره شروع میوه دهی first fruit-setting period	دوره رسیدگی میوه Fruit ripening period
NDVI	0.49	0.70	0.60	0.50
RDVI	0.45	0.73	0.51	0.47
OSAVI	0.42	0.68	0.55	0.44
WI3	0.51	0.71	0.66	0.49
WI4	0.54	0.77	0.61	0.49
NWI5	0.54	0.78	0.65	0.50

جدول (۷) مقایسه میانگین شاخص‌های طیفی گیاه گوجه فرنگی در رژیم‌های متفاوت کم آبیاری و نانو ذرات سیلیکا در کل دوره

Table (7) Mean values of spectral indices of tomato plants in different regimes of irrigation and silica nanoparticles in the whole research

NWI5	WI4	WI3	OSAVI	RDVI	NDVI	تیمارها Treatments
						رژیم آبیاری Irrigation regime
-0.00747 ^a	0.9450 ^a	0.9831 ^a	0.8136 ^a	0.7353 ^a	0.8506 ^a	I ₁₀₀
-0.00741 ^a	0.9464 ^b	0.9842 ^b	0.8130 ^a	0.7375 ^{ab}	0.8500 ^a	I ₈₀
-0.00735 ^b	0.9474 ^b	0.9847 ^b	0.8124 ^b	0.7412 ^b	0.8495 ^a	I ₆₀
						نانو ذرات (میلی‌گرم بر لیتر) Nanoparticles (mg/l)
-0.00739 ^a	0.9466 ^a	0.9843 ^a	0.8128 ^a	0.7390 ^a	0.8499 ^a	0
-0.00743 ^{ab}	0.9460 ^a	0.9838 ^a	0.8132 ^a	0.7369 ^b	0.8502 ^a	100

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون و برای هر عامل آزمایشی، بر اساس آزمون LSD، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد هستند.

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

است که طول موج‌های محدوده‌ی مرئی، که برای محاسبه شاخص‌های سبزیگی استفاده می‌شوند، به شاخص سطح برگ بالا (LAI^۱) حساس هستند و تنها در شرایطی که شاخص سطح برگ کم باشد یا اختلاف مقادیر کلروفیل در تیمارها قابل توجه باشد، کاربرد دارند. در مقابل، شاخص‌های طیفی آب که از طول موج‌های محدوده مادون قرمز نزدیک به دست می‌آیند، می‌توانند به عمق بیشتری در برگ نفوذ کرده و تغییرات در ساختار سلولی و آناتومی برگ، که با وضعیت آبی گیاه مرتبط است را شناسایی کنند (۱۰، ۱۶، ۱۹، ۴۱).

الساید و همکاران^۲ (۱۸) نشان دادند دو شاخص جدید WI3 و WI4 ارتباط قوی و معنی‌دار با شاخص عملکرد گیاه گندم در شرایط تنش آبی دارند. همچنین در تحقیقی دیگر با معرفی شاخص NWI5، به بررسی ارتباط میان این شاخص با شاخص عملکرد در دو رقم گندم بهاره تحت رژیم‌های متفاوت آبیاری پرداخته شد. نتایج نشان داد این شاخص، ارتباط معنی‌دار با شاخص عملکرد گیاه داشت (۱۷). الهنداوی و همکاران (۱۴) بیان کردند که اساس شاخص‌های طیفی آب، از ترکیب طول موج‌هایی که به محتوای آب برگ گیاه حساس هستند و جذب نور توسط آب در این طول موج‌ها در برگ بسیار بالاست با طول موج‌هایی که جذب نور بسیار پایین و یا اصلاً رخ نمی‌دهد می‌باشند. از این رو برای پیش‌بینی عملکرد و محتوای آب برگ مناسب هستند.

در پژوهشی مقدار بهره‌وری مصرف آب در درخت زیتون توسط شاخص‌های طیفی با استفاده از رگرسیون خطی برآورد شد. در بین شاخص‌های طیفی مورد مطالعه، شاخص NDVI بالاترین ضریب همبستگی ($R^2=0.75$) را با بهره‌وری مصرف آب از خود نشان داد (۱۱). در تحقیق دیگر توانایی شاخص‌های طیفی آب در برآورد عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در گیاه گندم در شرایط تنش آبی

شکل ۱، مدل رگرسیون خطی میان شاخص‌های طیفی مورد مطالعه و بهره‌وری مصرف آب را نشان می‌دهد. بطور کلی نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های طیفی مورد مطالعه قادرند ۵۵ تا ۷۴ درصد از تغییرات بهره‌وری مصرف آب در گیاه گوجه‌فرنگی را تحت تأثیر تنش آبی و نانوذرات سیلیکا پیش‌بینی کنند. این در حالیست که می‌توانند ۶۴ تا ۷۷ درصد از تغییرات عملکرد را تحت شرایط تنش آبی و نانوذرات سیلیکا در مرحله‌ی گلدهی پیش‌بینی کنند (شکل ۲). ارتباط معنی‌دار میان شاخص‌های طیفی مورد مطالعه و عملکرد و بهره‌وری مصرف آب، امکان بررسی سریع و غیرمخرب تخمین این دو شاخص در شرایط تنش آبی با استفاده از فناوری سنجش از دور (طیف‌سنجی) را نشان می‌دهد. براساس نتایج تحقیق حاضر شاخص NWI5 بیشترین ضریب تعیین را با بهره‌وری مصرف آب (۲۵-۲) درصد بیشتر از سایر شاخص‌های مورد مطالعه و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی (۱۶-۳) درصد بیشتر از سایر شاخص‌های مورد مطالعه) نشان داد. با توجه به ضریب تعیین بدست آمده از ارتباط بین شاخص‌های طیفی و شاخص بهره‌وری نسبی آب گیاه گوجه‌فرنگی، به ترتیب شاخص‌های WI4، WI3، NWI5، OSAVI، NDVI و RDVI همبستگی بالاتری با شاخص بهره‌وری نسبی آب از خود نشان دادند. همچنین بر اساس ارتباط بین مقدار متوسط شاخص‌های طیفی و عملکرد، به ترتیب شاخص‌های NWI5، WI4، WI3، OSAVI، NDVI و RDVI رابطه‌ی بهتری با عملکرد در گیاه گوجه‌فرنگی نشان دادند. با این حال مقادیر ضرایب تعیین رابطه میان سه شاخص NWI5، WI3 و WI4 با شاخص‌های عملکرد و بهره‌وری مصرف آب تقریباً مشابه بود.

شاخص‌های طیفی آب، به خوبی با صفات گیاهی مرتبط با وضعیت آبی و عملکرد گیاه صرفنظر از شرایط رشد همبستگی دارند، در حالی که شاخص‌های طیفی سبزیگی برای شناسایی صفات مرتبط با شرایط رشد و ژنوتیپ بهتر عمل می‌کنند. دلیل اصلی این موضوع این

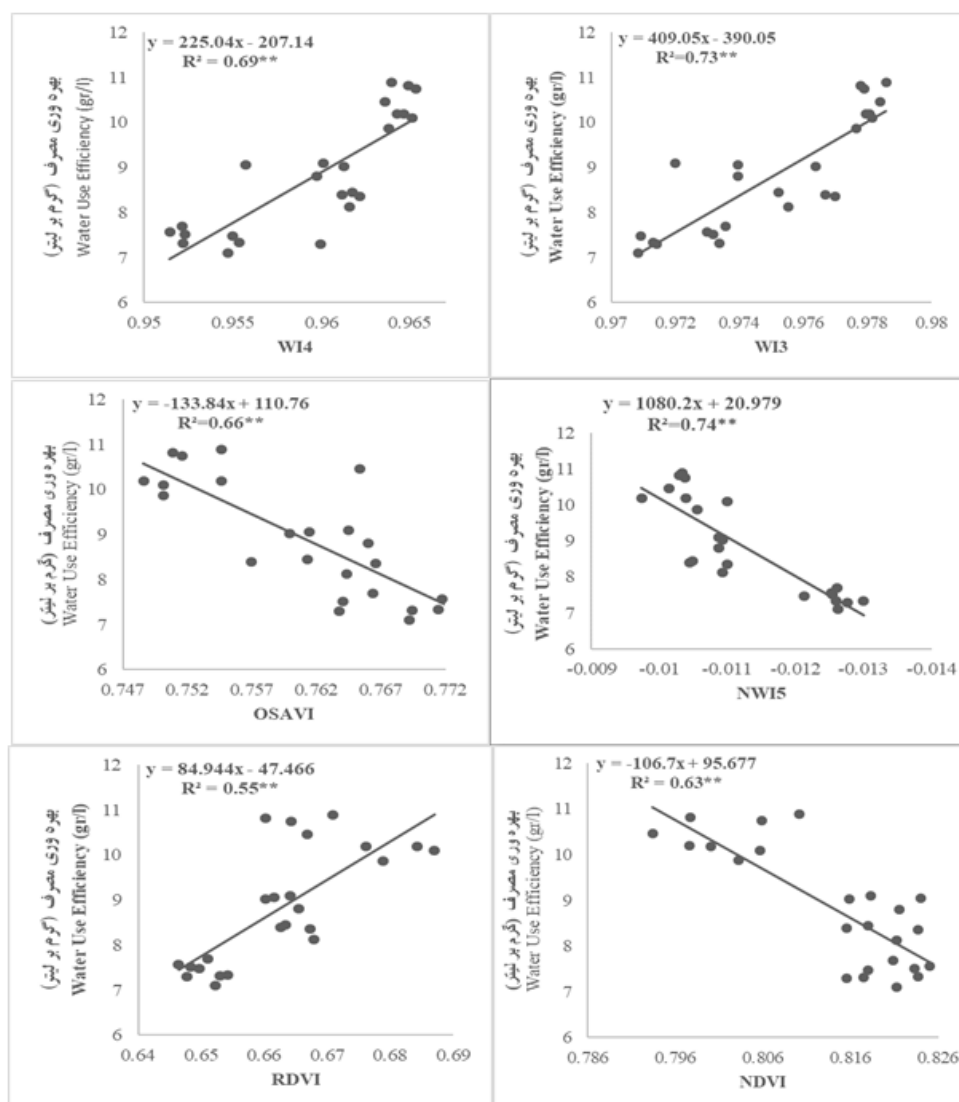
1- Leaf area index

2- Elsayed *et al.*

هادی قنوت و همکاران: تخمین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب...

OSAVI قابل پیش‌بینی است. همچنین در پژوهشی بر روی گیاه گوجه‌فرنگی به بررسی قابلیت شاخص‌های طیفی در پیش‌بینی عملکرد پرداخته شد. نتایج نشان داد به ترتیب سه شاخص طیفی NWI، NDVI و OSAVI به خوبی قابلیت تخمین عملکرد در شرایط تنش کم آبی را دارند (۳۱).

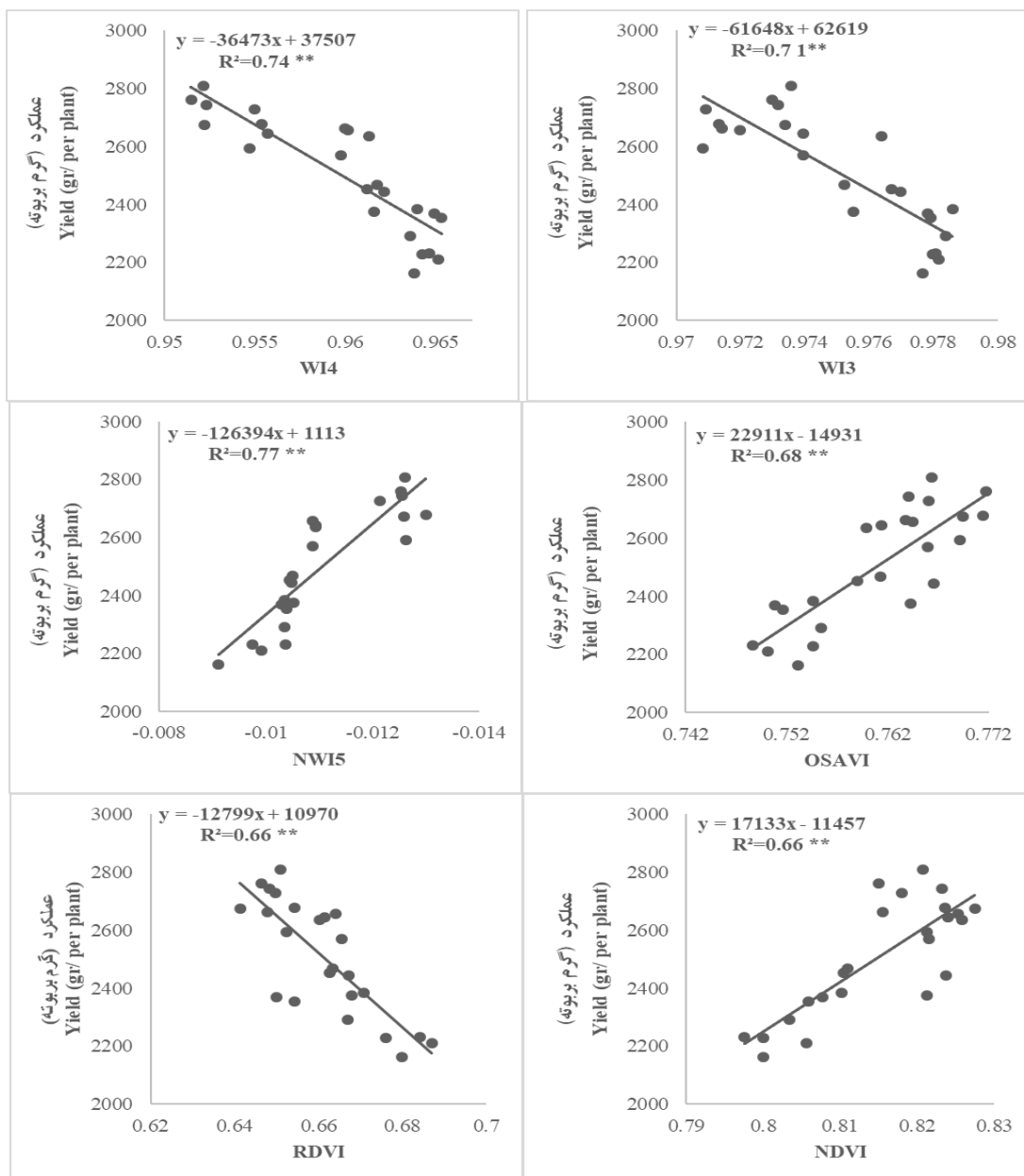
مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج نشان دهنده دقت بالای شاخص‌های طیفی آب در تخمین بهره‌وری مصرف آب بود (۱۵). علاوه بر این عاشورلو و همکاران (۲)، پس از بررسی تخمین عملکرد توسط شاخص‌های طیفی مختلف در دوره‌های مختلف رشد در گیاه کلزا، گزارش کردند که عملکرد گیاه کلزا در دوره‌ی رشد گلدهی با دقت خوب توسط شاخص‌های طیفی گیاهی از جمله NDVI و



شکل (۱) مدل رگرسیون خطی میان شاخص‌های طیفی و بهره‌وری مصرف آب گیاه گوجه‌فرنگی در رژیم کم آبیاری و نانو ذرات ** به ترتیب بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار ضریب تعیین R^2 در سطح احتمال ۱ درصد است

Figure (1) The Linear regression relationship between spectral indices (WI3, WI4, NWI5, NDVI, RDVI, and OSAVI) and Water Use Efficiency (WUE) of tomato plants under water stress and silica nanoparticles

** : significant effect at 1%.



شکل (۲) مدل رگرسیون خطی میان شاخص‌های طیفی و عملکرد گیاه گوجه فرنگی در رژیم کم آبیاری و نانو ذرات

** به ترتیب بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار ضریب تعیین R^2 در سطح احتمال ۱ درصد است

Figure (2) The Linear regression relationship between spectral indices (WI3, WI4, NWI5, NDVI, RDVI, and OSAVI) and Yield of tomato plants under water stress and silica nanoparticles

** : significant effect at 1%.

مصرف آب و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی واسنجی شد. سپس روابط تعیین شده در مرحله‌ی واسنجی، با ۲۰ درصد از داده‌های باقی‌مانده (۲۴ داده) در مرحله گلدھی-صحت-سنجی گردید. در شکل (۳) و شکل (۴) به ترتیب رابطه‌ی خطی میان مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده شاخص

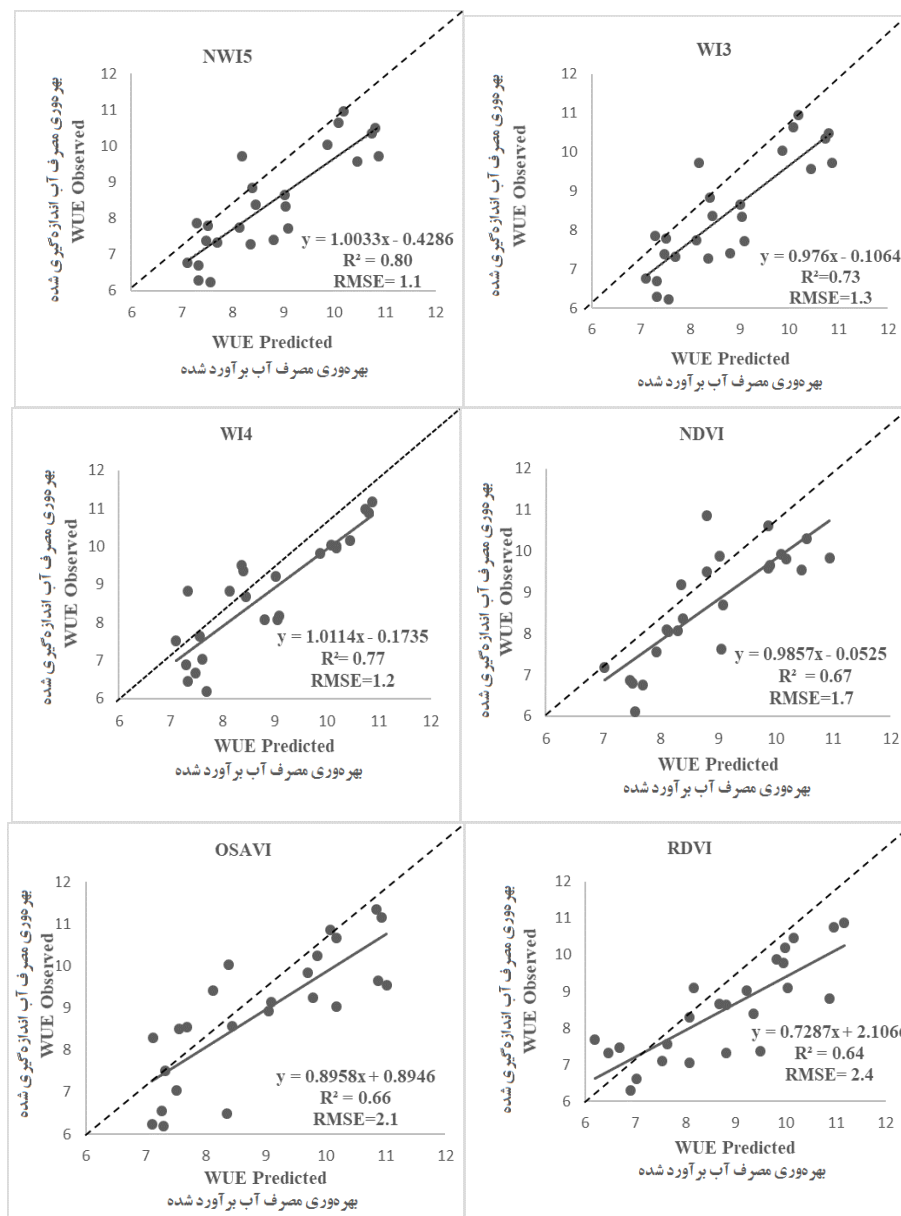
صحت‌سنجی مدل پیش‌بینی شاخص‌های عملکرد و بهره‌وری مصرف آب با استفاده از شاخص‌های طیفی

از ۱۲۰ داده جمع‌آوری شده در مرحله‌ی گلدھی، ابتدا با استفاده از ۸۰ درصد داده‌ها (۹۶ داده)، رابطه‌ی خطی میان شاخص‌های طیفی و شاخص‌های بهره‌وری

هادی قنوت و همکاران: تخمین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب...

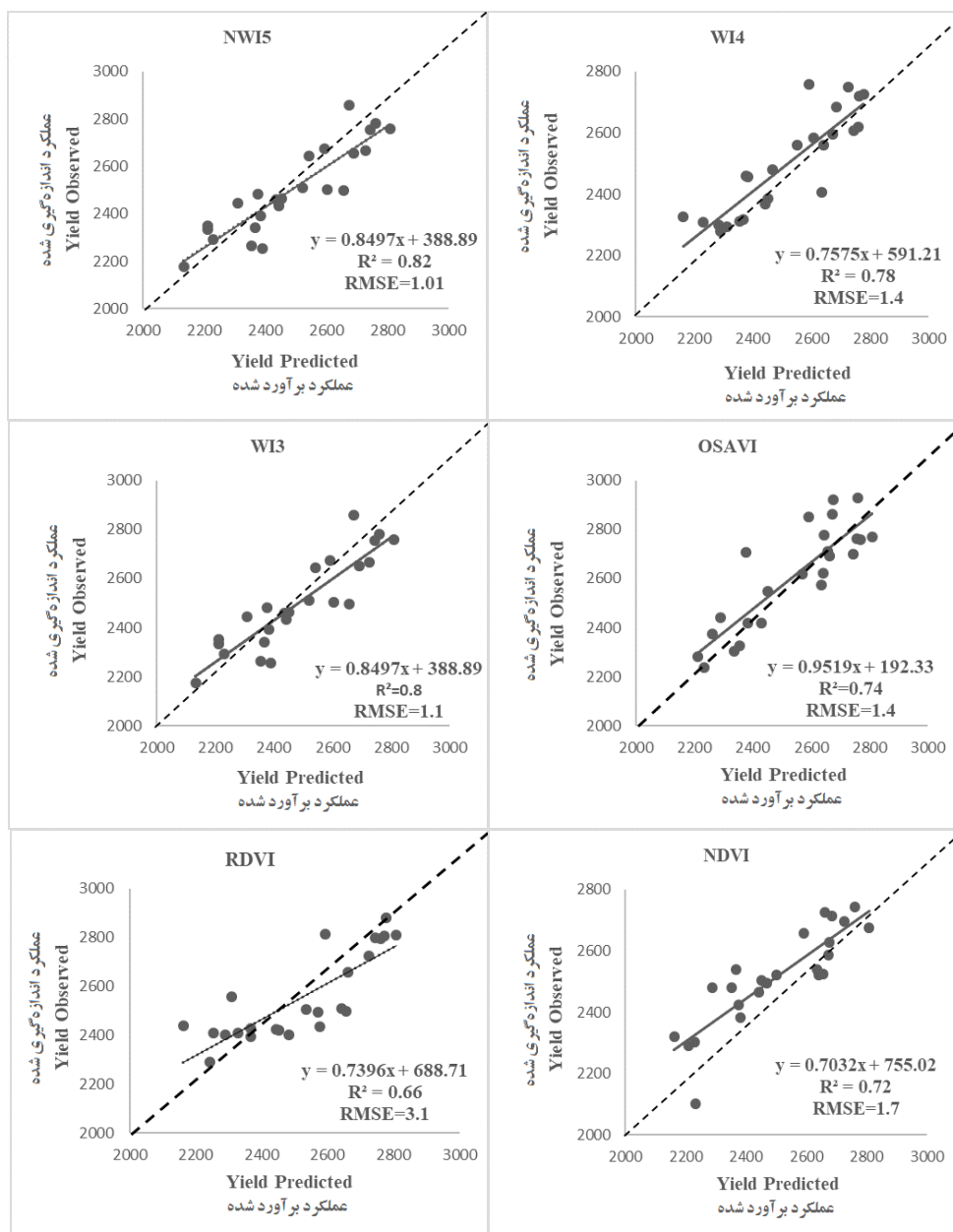
بیشتری در پیش‌بینی بهره‌وری مصرف آب و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی داشتند.

های بهره‌وری مصرف آب و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی بر اساس شش شاخص طیفی مورد مطالعه، ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان داده شده‌است. نتایج نشان داد که شاخص‌های طیفی آب مورد مطالعه در پیش‌بینی مقادیر شاخص بهره‌وری مصرف آب و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی دقت قابل قبولی در شرایط تنش آبی دارند. بر اساس نتایج به ترتیب شاخص‌های NDVI، OSAVI، WI3، WI4، NWI5 و RDVI دقت



شکل (۳) مدل رگرسیون خطی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بهره‌وری مصرف آب گیاه گوجه‌فرنگی بر اساس شش شاخص طیفی مورد مطالعه

Figure (3) The Linear regression relationship between observed and predicted values of Water Use Efficiency (WUE) of tomato plants based on the data of six spectral indices studied.



شکل (۴) مدل رگرسیون خطی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده عملکرد گیاه گوجه فرنگی بر اساس شاخص شاخص طیفی مورد مطالعه

Figure (4) The Linear regression relationship between observed and predicted values of Yield of tomato plants based on the data of six spectral indices studied

شاخص‌های طیفی سبزیگی RDVI، NDVI و OSAVI بدست آمده از طیف‌سنجی در پیش‌بینی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نشان داد که شاخص‌های طیفی دارای ارتباط معنی‌دار با عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌ها نشان داد که بکارگیری نانو ذرات سیلیکا سبب بهبود اثرات منفی تنش بر عملکرد و افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌شود. بررسی شاخص‌های طیفی آب ۳ و ۴ (WI3,4)، شاخص نرمال آب ۵ (NWI5) و

های بیشتر، استفاده همزمان از داده‌های هواشناسی و خاکشناسی همراه با داده‌های طیفی بازتابی از گیاه توصیه می‌شود. در مجموع، این پژوهش گامی مهم در جهت نظارت غیر مخرب و سریع بر گیاه، به منظور افزایش بهره‌وری مصرف آب و بهبود عملکرد در شرایط محدودیت منابع آبی و کمک به اتخاذ تصمیم صحیح در شرایط ضروری است و می‌تواند زمینه‌ساز تحقیقات بیشتر در این حوزه باشد.

سپاس‌گزاری

بدین وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.WI1402.144) و شرکت سپاهان رویش اصفهان به منظور تأمین بذر گوجه‌فرنگی تشکر و قدردانی می‌نماید.

شرایط تنش آبی می‌باشند. از بین شش شاخص طیفی مورد مطالعه، شاخص‌های طیفی آب (WI3، WI4، WI5) توانستند با دقت خوب شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای را پیش‌بینی کنند. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که بهره‌وری مصرف آب و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای، می‌تواند با دقت خوب و قابل قبولی با استفاده از شاخص‌های طیفی توصیف شود. حفظ منابع آب موجود از طریق بهبود مدیریت آبیاری و افزایش بهره‌وری مصرف آب، اصلی‌ترین لازمه‌ی توسعه‌ی تولید پایدار کشاورزی در شرایط کم آبی است. استفاده از یافته‌های این تحقیق در شرایط مشابه، از جمله محیط کنترل شده‌ی کشت گلخانه‌ای و شرایط دمایی مشابه با آب و هوای خوزستان، توصیه می‌شود. همچنین، برای تعمیم این نتایج و کاربرد این روش در سطح وسیع، نیاز به انجام آزمایش-

References

1. Abdul Qados, A. M. S., and Moftah, A. E. 2015. Influence of silicon and nano-silicon on germination, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) under salt stress conditions. *American Journal of Experimental Agriculture*, 5(6): 509- 524. <https://doi.org/10.9734/AJEA/2015/14109>
2. Ashourloo, D., Salehi Shahrabi, H and Nematollahi, H. 2021. Estimating Yield of Canola Based on Time Series of Remote Sensing Data. *Journal of Iranian Remote Sensing and GIS*, 13(3): 59-72. (In Persian with English abstract)
3. Azizi, K., Nabiollahi, K., and Davari, M. 2018. Evaluation of the capability of spectroscopic methods in estimating some properties of salt-affected soil. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*. 41(3). (In Persian)
4. Ban, H. Y., Kim, K.S., Park, N. W., and Lee, B. W. 2016. Using MODIS Data to Predict Regional Corn Yields. *Journal of Remote Sensing*, 9: 1-16. <https://doi.org/10.3390/rs9010016>
5. Campos, J., Llop, J., Gallart, M., García-Ruiz, F., Gras, A., Salcedo, R., and Gil, E. 2019. Development of canopy vigor maps using UAV for site-specific management during the vineyard spraying process. *Precis, Agric, Precision Agric*, 20 (6):1136-1156. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09643-z>
6. Chen, F., Li, Y., Irshad, M.A., Hussain, A., Nawaz, R., Qayyum, M.F., Ma, J., Zia-ur-Rehman, M., Rizwan, M. and Ali, S. 2023. Effect of titanium dioxide nanoparticles and co-composted biochar on growth and Cd uptake by wheat plants: A field study, *Environmental Research*, 231(19):116057. doi: 10.1016/j.envres.2023.116057.
7. da Silva, V.S., Salami, G., da Silva, M.I.O., Silva, E.A., Monteiro Junior, J.J., and Alba, E. 2020. Methodological evaluation of vegetation indexes in land use and land cover (LULC) classification. *Geol. Journal of Geology, Ecology, and Landscape*, 4 (2): 159–169.
8. Dong, B., Shi, L., Shi, C. H., Qiao, Y. Z., Liu, M. Y., and Zhang, Z. B. 2011. Grain yield and water use efficiency of two winter wheat cultivars under different water regimes. *Journal of Agricultural and Water Management*, 99: 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.07.013>
9. Ebrahimi, H. 2020. Evaluation yield and water productivity of tomato in deficit irrigation conditions and application of silicon nanoparticle, Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. 124p. (In Persian with English abstract).
10. Elazab, A., Bort, J., Zhou, B., Serret, M.D., Nieto-Taladriz, M.T., and Araus, J.L. 2015. The combined use of vegetation indices and stable isotopes to predict durum wheat grain yield under contrasting water conditions. *Agric, Water Management*, 158: 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.003>
11. Elfarkh, J., Johansen, K., El Hajj, M.M., Almashharawi, S.K., and McCabe, M. 2023. Evapotranspiration, gross primary productivity, and water use efficiency over a high-density olive orchard using ground and satellite-based data. *Journal of Agricultural Water Management*, 287: 108423. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108423>
12. El-Hendawy, SE., Abd El-Lattief, E.A., Ahmed, AS., and Schmidhalter, U. 2008. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. *Journal of Agricultural and Water Management*, 95(7):836–844. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.02.008>
13. El-Hendawy, SE., Al-Suhaibani, N., Hassan, W., Dewir, YH., El-Sayed, S., and Al-Ashkar, I. 2019. Evaluation of wavelengths and spectral reflectance indices for high throughput assessment of growth, water relations, and ion contents of wheat irrigated with saline water. *Journal of Agricultural Water Management*, 212: 358–377. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.009>
14. El-Hendawy, S. E., Al-Suhaibania, N. A., Elsayed, S, Hassand, W. E., Dewira Y. H., Refaya, Y. and Abdella, K. A. 2019. 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. *Agricultural Water Management*, 217: 356-373. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.006>
15. El-Hendawy, S., Al-Suhaibani, N., Elsayed, S., Refay, Y., Alotaibi, M., Hassan, Y., Hassan I.W., and Schmidhalter, U. 2019. Combining biophysical parameters, spectral indices, and multivariate hyperspectral models for estimating yield and water productivity of spring wheat across different agronomic practices. *Plos One Journal*, 14(11): 1-26. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212294>
 16. El-Hendawy, S.E., Alotaibi, M., Al-Suhaibani, N., Al-Gaadi, K., Hassan, W., Dewir, Y.H., Emam, M.A.E.-G., Elsayed, S., Schmidhalter, U. 2019. Comparative performance of spectral reflectance indices and multivariate modeling for assessing agronomic parameters in advanced spring wheat lines under two contrasting irrigation regimes. *Front, Journal of Plant Sci*, 10: 1537.
 17. Elsayed, S., and Darwish, W.B. 2017. Hyperspectral remote sensing to assess the water status, biomass, and yield of maize cultivars under salinity and water stress. *Journal of crop production and management*, 76(1): 62-72. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.018>
 18. 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 of Water*, 13(19): 1-22. <https://doi.org/10.3390/w13192666>
 19. Elsayed, S., El-Hendawy, S., Khadr, M., Elsherbiny, O., Al-Suhaibani, N., Dewir, Y.H., Tahir, M.U. Mubushar, M., and Darwish, W. (2021). Integration of spectral reflectance indices and adaptive neuro-fuzzy inference system for assessing the growth performance and yield of potato under different drip irrigation regimes. *Chemosensors*, 9(3): 55.
 20. Elsayed, S., Mistele, B., and Schmidhalter, U. 2011. Can changes in leaf water potential be assessed spectrally *Funct. Journal of Functional Plant Biology*, 38(6): 523–533 <https://doi.org/10.1071/FP11021>
 21. Etesami, H., and Jeong, B.R. 2018. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147:881-896. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>.
 22. Ghazali, S., Mirzaei, A., and Soltani, Gh.R. (2014). Investigating the physical and economic productivity of agricultural water, Case study of Fars province. *International Journal of Analytical Resources for Water Development Quarterly*, 2(3):125-134. (In Persian with English abstract)
 23. Gitelson, A., and Merzlyak, M. N. 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143: 286-292. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81633-0](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81633-0).
 24. 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): 416-426. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4)
 25. Haghghi, M., and Pessarakli, M. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherrytomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*, 161(1): 111–117. (In Persian with English abstract)
 26. Hatfield, J. L., Gitelson, A. A., Schepers, J. S., and Walthall, C. L. 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Journal of Agronomy*, 100: 117-131. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0370c>
 27. Kaya, C., Tuna, L., and Higgs, D. 2006. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29: 1469-1480

<https://doi.org/10.1080/01904160600837238>

28. Kiafar, H., Mousavi, M., Ebadi, A., Moallemi, N., and Fattahi Moghadam, M.R. 2020. The effect of Ca nanoparticles on peach cultivars (Valad Abadi and Elberta). *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 43(1): 1-14. (In Persian with English abstract)
29. Kiani, A. 2015. Guidelines for water productivity in farms. Technical and Engineering Research Division, Golestan Agricultural and Natural Resources Research Center, Agricultural Research, Training and Promotion Organization. pp. 1-16. (In Persian with English abstract)
30. Ihuoma, S.O., and Madramootoo, C. A. 2019. Crop reflectance indices for mapping water stress in greenhouse-grown bell pepper. *Journal of Agricultural Water Management*, 219: 49-58.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.001>
31. 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): 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.017>
32. Li, H. 2010. Spectral response of winter wheat to crop development and various agronomic limitations. International Conference on Multimedia Technology, Oct. Ningbo, China, 29–31.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11119-022-09976-2>
33. Lima, M.C.F., Krus, A., Valero, C., Barrientos, A., Del Cerro, J., and Roldan-Gómez, J.J. 2020. Monitoring plant status and fertilization strategy through multispectral images. *MDPI Journal*, 20(2): 435. <https://doi.org/10.3390/s20020435>
34. Mazraee, M.A. 2020. The effect of different irrigation treatments on water use efficiency and crop yield Tomatoes in Kavar plain. *Journal of water science and engineering, Islamic Azad University, Ahvaz. Branch*, 8(22): 21-28. (In Persian with English abstract)
35. M'hamed, HC., Rezig, M., and Mbarek, BN. 2015. Water use efficiency of durum wheat (*Triticum durum Desf*) under deficit irrigation. *Journal of Agricultural Science*, 7(8): 238-249.
<https://doi.org/10.5539/jas.v7n8p238>
36. Mistele, B., and Schmidhalter, U. 2008. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. *Journal of Agronomy*, 29: 184-190.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.05.007>
37. Naderi, M., and Abedi, A. 2012. Application of nanotechnology in agriculture and purification of environmental pollutants. *Journal of Nanotechnology*, 1: 19-26. (In Persian with English abstract)
38. Nair, S. H., Varghese, B. G., Nair, T., Maekawa, Y., Yoshida, D., and Kumar, S. 2010. Nano particulate material delivery to plants. *Journal of Plant Science*, 179: 154-163.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.04.012>
39. Nangare, DD., Singh, Y., Kumar, PS., and Minhas, PS. 2016. Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) As affected by deficit irrigation regulated on phenological basis. *Journal of Agricultural Water Management*, 171:73–79. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.016>
40. Prasad, A.M., Iverson, L.R., and Liaw, A. 2006. Newer classification and regression tree techniques: Bagging and random forests for ecological prediction. *Journal of Ecosystems*, 9: 181–199.
41. Parveen, N., and Ashraf, M. 2010. Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea mays* L.) cultivars grown hydroponically. *Pakistan. Journal of Botany*, 42(3): 1675-1684.

42. Patanèa, P., Tringali, S., and Sortino, O. 2011. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Journal of Scientia Horticulturae*, 129 (4): 590–596. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.030>
43. Pelesco, VA., and Alagao, FB. 2014. Evapotranspiration Rate of Lettuce (*Lactuca sativa* L., Asteraceae) in a Non-Circulating Hydroponics System. *Journal of Society and Technology*, 4(1):1-6. <https://doi.org/10.5281/jst.v4i1.18>
44. Peñuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., and Filella, I. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *Journal of Remote Sensing*, 18: 2869- 2875. <https://doi.org/10.1080/014311697217396>
45. Raskar, S.V., and Laware, S.L. 2014. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Science*, 3(2): 467-473.
46. Ripoll, J., Urban L, Brunel B., and Bertin, N. 2016. Water deficit effects on tomato quality depend on fruit developmental stage and genotype. *Journal of Plant Physical*, 190: 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.10.006>
47. 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): 375-384. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3)
48. Sadak, M. S. 2019. Impact of silver nanoparticles on plant growth, some biochemical aspects, and yield of fenugreek plant (*Trigonella foenumgraecum*). *Journal of the National Research center*, 38-43. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0077-y>
49. Safi, C., Pareeth, S., Yalew, S., Zaag, P., and Mul, W. 2024. Estimating agricultural water productivity using remote sensing derived data. *Journal of Modeling Earth Systems and Environment*, 10(1):11–13. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01841-z>
50. Salehi, S., Goldani, M., and Nabati, J. 2020. Effect of Partial Root-Zone Drying on Yield, Yield Components and Water Use Efficiency of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under Conditions Deficit Irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(2): 426-435. (In Persian with English abstract)
51. Saydi, Z., Abbasi, N., Zarea, M. J., and Zarei, B. 2022. Effects of nitroxin biofertilizer on morpho-physiological characteristics of blackseed (*Nigella sativa* L.) ecotypes under drought stress. *Journal of Agroecology*, 14(3): 485-507 (In Persian with English abstract)
52. Sharabian, VR., Noguchi, N., and Ishi, K. 2014. Significant wavelengths for prediction of winter wheat growth status and grain yield using multivariate analysis. *Journal of Engineering Agriculture Environment Food*, 7: 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2013.12.003>
53. 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): 279-292. (In Persian with English abstract)
54. Ullah, I., Mao, H., Rasool, GH., Gao, H., Javed, Q., Abid Sarwar, A., and Muhammad Imran Khan, M. 2021. Effect of Deficit Irrigation and Reduced N Fertilization on Plant Growth, Root Morphology and Water Use Efficiency of Tomato Grown in Soilless Culture. *Journal of Agronomy*, 11:228. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020228>
55. Zhang, H. Z., Liu, M. R., Feng, Z. H., Song, L., Li, X., Liu, W. D., Wang, CH. Y., and Feng, W. 2021. Estimation of Water Use Efficiency in Winter Wheat Based on Multi-Angle Remote Sensing. *Journal of Remote Sensing*, 12:614417. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.614417>