University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

*Vol. 16, No. 3, pp. 711-726 (Fall 2023)*

https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.4931.2090

*Original article*

# Effects of bio-fertilizers and nano-silicon on phosphorus uptake, grain yield and some physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under withholding irrigation conditions

**F. Ahmadi Nouraldinvand[1*], R. Seyed Sharifi[2], S.A. Siadat[3], R. Khalilzadeh[4]**

*1. Ph.D student of Crop Physiology, University of Mohaghegh Ardabili, Iran*
*2. Professor, Department of Plant Production and Genetic Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Iran*
*3. Professor, Department of Plant Production and Genetic Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran*
*4. Ph.D Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetic Engineering, University of Urmia, Iran*

Received 10 December 2021; Accepted 21 February 2022

## *Extended abstract*

### Introduction

Drought is assumed as one of the most severe abiotic stress factors limiting plant growth and crop production. Since in arid and semi-arid regions, some part of growth period of wheat is confronted with water limitation condition which can affect biochemical and physiological responses such as changes in photosynthetic efficiency of PSII, chlorophyll content, and stomatal conductance. Application of bio fertilizers and silicon is one of the most important strategies for alleviation of drought stress effects. Bio fertilizers (plant growth promoting rhizobacteria or PGPR and mycorrhiza) can improve plant performance under non-stress and stress conditions. Thererfore, it seems that application of nano silicon and bio-fertilizer can improve wheat yield under water limitation conditions.

### Materials and methods

In order to study the effects of biofertilizers and nanosilicon on phosphorus uptake, grain yield, and some physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under withholding irrigation conditions, a factorial experiment was carried out at the research farm faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, with three replications during 2018-2019. The area is 38° 15′ N latitude, 48° 15′ E longitude, and 1350 m above mean sea level. Climatically, the area is situated in the semi-arid temperate zone with a cold winter and moderate summer. Factors were included irrigation in three levels (full irrigation as control; moderate water limitation or withholding irrigation at 50% of the heading stage; severe water limitation or withholding irrigation at 50% of the booting stage) based on codes 55 and 43 of the BBCH scale; foliar application of nano silicon (foliar application with water as control, 30 and 60 $mg.L^{-1}$) and bio-fertilizer (no application as control, mycorrhiza application, both application of flavobacterium and pseudomonas, both application of flavobacterium and pseudomonas with mycorrhiza). Mycorrhiza fungi (mosseae) was purchased from the Zist Fanavar Turan Corporation and soils were treated based on method of Gianinazzi et al. (2001). Psedomunas and flovobacterium were isolated from the rhizospheres of wheat by Research Institute of Soil and Water, Tehran, Iran. For inoculation, seeds were coated with gum Arabic as an adhesive and rolled into the suspension of bacteria until uniformly coated. The strains and cell densities of microorganisms used as PGPR in this

* Corresponding author: Farnaz Ahmadi Nouraldinvand; E-Mail: Farnaz_ahmadi@rocketmail.com

© 2023, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

experiment were 1×108 colony forming units (CFU). In this study, electrical conductivity, stomatal conductance, leaf fluorescence parameters, phosphorus of root and grain, relative water content, electrolyte leakage, anthocyanins and grain yield of wheat were investigated. Analysis of variance and mean comparisons were performed using SAS ver 9.1 computer software packages. The main effects and interactions were tested using the least significant difference (LSD) test at the 0.05 probability level.

**Results and discussion**

The results showed that application of both flavobacterium and pseudomonas with mycorrhiza and foliar application of 60 mg.$L^{-1}$ nano silicon under severe water limitation increased 84.32%, 49% and 49.52% of electrolyte leakage, electrical conductivity and minimum fluorescence ($F_0$) respectively, and decreased root and grain phosphorus by 30.67 and 36.05% compared to full irrigation. The highest RWC (92.26%), stomatal conductance (58.86 mmol.$m^{-2}$.s), anthocyanin (0.0274 μmol.$g^{-1}$FW), Fm (860), and Fv/Fm (0.909) were obtained at foliar application of 60 mg.L-1 nano silicon, both applications of flavobacterium and pseudomonas with mycorrhiza under normal irrigation. Also, the highest grain yield was obtained with both flavobacterium and pseudomonas with mycorrhiza and foliar application of 30 mg.$l^{-1}$ nano silicon under normal irrigation. According to the results of this study both the application of biofertilizers and nanosilicon can improve wheat grain yield under water limitation conditions by improving the physiological traits and also the uptake of phosphorus from the soil.

**Conclusion**

Generally, it seems that application of bio fertilizers and nano silicon can be recommended as the proper method for increasing the physiological trait grain yield of wheat under water limitation conditions.

***Keywords*:** Environmental stresses, Nanotechnology, Plant growth promoting rhizobacteria, Quantum efficiency of the photosystem II

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد شانزدهم، شماره سوم، پائیز ۱۴۰۲

https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.4931.2090

*مقاله پژوهشی*

# تأثیر کودهای زیستی و نانوسیلیکون بر جذب فسفر، عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیکی گندم (*Triticum aestivum* L.) در شرایط قطع آبیاری

**فرناز احمدی نورالدین‌وند[1*]، رئوف سیدشریفی[2]، سیدعطاءاله سیادت[3]، راضیه خلیل‌زاده[4]**

۱. دانشجوی دکترای فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی
۲. استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی
۳. استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
۴. دکترای فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه ارومیه

**مشخصات مقاله**

*واژه‌های کلیدی:*
باکتری‌های محرک رشد
تنش‌های محیطی
کارایی کوانتومی فتوسیستم II
نانوتکنولوژی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۰/۱۱/۲

تاریخ انتشار:
پائیز ۱۴۰۲

۱۶(۳): ۷۱۱-۷۲۶

**چکیده**

**به‌منظور بررسی اثر کودهای زیستی و نانوسیلیکون بر جذب فسفر، عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیکی گندم در شرایط قطع آبیاری، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک کامل تصادفی در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی شامل آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، محدودیت ملایم آبی یا قطع آبیاری در ۵۰٪ مرحله سنبله‌دهی و محدودیت شدید آبی یا قطع آبیاری در ۵۰٪ مرحله آبستنی)، محلول‌پاشی با نانوسیلیکون در سه سطح (شاهد، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر) و کودهای زیستی در چهار سطح (عدم کاربرد، کاربرد قارچ مایکوریزا، کاربرد فلاوباکتریوم و سودوموناس، کاربرد توأم مایکوریزا با باکتری‌ها) بودند. نتایج نشان داد کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط محدودیت شدید آبی، میزان نشت الکترولیت، هدایت الکتریکی، فلورسانس حداقل (به ترتیب ۸۴/۳۲، ۴۹ و ۴۹/۵۲ درصد) افزایش و میزان فسفر ریشه و دانه (به ترتیب ۳۰/۶۷ و ۳۶/۰۵ درصد) نسبت به آبیاری کامل کاهش داد. بیشترین محتوای نسبی آب (۹۲/۲۶٪)، هدایت روزنه‌ای (۵۸/۸۶ میلی‌مول بر مترمربع در ثانیه)، آنتوسیانین (۰/۰۲۷۴ میکرومول برگرم وزن تر برگ)، فلورسانس حداکثر (۸۶۰) و عملکرد کوانتومی (۰/۹۰۹) در کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل به دست آمد. همچنین بیشترین عملکرد دانه (۴۵۹۳ کیلوگرم در هکتار) از کاربرد توأم کودهای زیستی و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل به دست آمد. بر اساس نتایج این بررسی، کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون می‌تواند عملکرد دانه گندم در شرایط محدودیت آبی را به‌واسطه بهبود صفات فیزیولوژیکی و جذب فسفر از خاک افزایش دهد.**

## مقدمه

گندم نان (*Triticum aestivum* L.) یکی از اصلی‌ترین منابع کربوهیدرات، پروتئین، چربی، ویتامین‌ها، مواد معدنی و سایر مواد مغذی برای مصرف انسان است که با بیشترین سطح زیر کشت در مناطق خشک، از مهم‌ترین گیاهان زراعی محسوب می‌شود (Marwa et al., 2020). برای مثال در سال ۲۰۱۹، سطح کشت آن در دنیا ۲۱۴/۷ میلیون هکتار بوده است (FAO, 2020). محدودیت آبی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی در کاهش عملکرد گندم بوده و با کاهش آب در دسترس گیاه بر روابط آبی، فتوسنتز، تغذیه، متابولیسم و کاهش عملکرد تأثیر بسزایی دارد (Kamal et al., 2019). کاربرد کودهای زیستی و برخی از عناصر ریزمغذی در شرایط محدودیت آبی، می‌توانند به‌عنوان یک استراتژی مناسب، برای

* نگارنده پاسخگو: فرناز احمدی نورالدین‌وند. پست الکترونیک: Farnaz_ahmadi@rocketmail.com

جلوگیری از اثرات مخرب تنش عمل کرده و زمینه بهبود مقاومت گیاه را در این شرایط، فراهم سازند (Hadi et al., 2016).

سیلیکون (Si) به‌عنوان یک عنصر، ۲۹ درصد پوسته زمین را شامل شده و پس از اکسیژن دومین عنصر فراوان محسوب می‌شود (Karimian et al., 2020). این عنصر توسط گیاهان به شکل اورتوسیلیک ($H_4SiO_4$) و اسید مونو سیلیسیک [$Si(OH)_4$]جذب‌شده، سپس به‌واسطه ژن‌های مختلف ناقل سیلیکون یعنی LSi1، LSi2 و LSi6 به شاخه منتقل می‌شوند. پس‌ازآن، ترکیب شده و فیتولیت‌های بی‌شکل و بی‌نظم شبیه به نانوذرات سیلیکون (Si-NPs) را تشکیل می‌دهند (Rao and Susmitha, 2017). کاربرد سیلیکون در گیاهان به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای بهبود مقاومت و کاهش اثر منفی تنش‌های محیطی از قبیل تنش خشکی و شوری در گیاهان به کار گرفته می‌شود (Zhang et al., 2018). در این راستا گزارش شده است که کاربرد سیلیکون در گندم تحت شرایط تنش‌های خشکی، شوری و فلزات سنگین اثر منفی تنش‌های محیطی را کاهش و موجب افزایش معنی‌دار صفات فیزیولوژیکی شد (Alzahrani et al., 2018). برخی محققان گزارش کردند کاربرد سیلیکون در شرایط کم‌آبی به دلیل بهبود سرعت فتوسنتزی، افزایش وضعیت آب و کاهش تعرق موجب افزایش رشد و عملکرد ذرت شد (Amin et al., 2016). بررسی‌ها نشان داده است محلول‌پاشی نانوسیلیکون در شرایط تنش خشکی موجب بهبود محتوای نسبی آب، عملکرد کوانتومی و میزان نشت الکترولیتی و کاهش اثر منفی تنش خشکی در عملکرد دانه نسبت به عدم کاربرد سیلیکون در کلزا شد (Sajed-Gollojeh et al., 2020). یکی دیگر از اثرات شرایط تنش‌زا، پراکسیداسیون چربی‌هاست که با اکسیداسیون اسیدهای چرب اشباع‌نشده همراه بوده و موجب تخریب غشاء و نشت الکترولیت‌ها می‌شود، ولی در گیاهان تیمار شده با نانوسیلیکون، کاهش پراکسیداسیون چربی‌ها نشان‌دهنده تقویت مکانیسم‌های مقاومتی در گیاه تحت شرایط تنش است (Ali et al., 2019).

کودهای زیستی حاوی یک یا چند گونه میکروارگانیسم خاص بوده که از طریق تأمین بخشی از یک عنصر موردنیاز گیاه و یا تولید مواد محرک، به رشد بهتر گیاه کمک می‌کنند (Keshavarz, 2020). بررسی‌ها نشان داده‌اند علاوه بر مکانیسم تطبیقی در برابر تنش‌های محیطی، ارتباط همزیستی تعدادی از میکروارگانیسم‌های خاک با گیاهان می‌تواند موجب کاهش تنش خشکی شود (Tyagi et al., 2017). باکتری‌های محرک رشد و قارچ‌های مایکوریزا و همچنین رابطه مفید بین آن‌ها به‌عنوان رایج‌ترین رابطه همزیستی در طبیعت، به‌طور مثبت باعث افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی مانند شوری، خشکی و گرما می‌شود (Evelin et al., 2019). در این راستا بررسی‌ها نشان داده است کاربرد هم‌زمان مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد به‌طور معنی‌داری موجب افزایش فتوسنتز، عملکرد کوانتومی و کاهش نشت الکترولیت در شرایط خشکی می‌شود (Begum et al., 2021). از طرفی استفاده از میکروارگانیسم‌هایی همانند قارچ‌های مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد که توانایی انحلال فسفات‌ها و تبدیل آن به فسفر محلول را دارند، یکی از راه‌های مؤثر برای افزایش قابلیت جذب فسفر در خاک، کمک به بهبود جذب عناصر غذایی و آب و تحمل بهتر گیاه به تنش‌های محیطی است (Itelima et al., 2018).

با توجه به اهمیت گندم به‌عنوان یکی از محصولات استراتژیک کشور و تأثیری که محدودیت آبی در بیشتر مناطق تحت کشت به‌خصوص در دوران پس از گلدهی در کاهش عملکرد دارد و از طرفی به دلیل نقشی که کودهای زیستی و نانوسیلیکون در کاهش یا تعدیل اثر محدودیت آبی دارند، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تأثیر این عوامل (کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون) بر عملکرد دانه، میزان جذب فسفر و برخی صفات فیزیولوژیکی گندم تحت شرایط محدودیت آبی انجام شد.

## مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا، در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد. شرایط اقلیمی در طول دوره رشدی گندم و نتایج آزمون خاک به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

**جدول ۱. پارامترهای جوی ثبت‌شده در طول دوره رشدی گندم (مأخذ: اداره کل هواشناسی استان اردبیل)**

**Table 1. Atmospheric parameters recorded during the period of wheat growth (Source: General Meteorological Department of Ardabil Province)**

| Months | ماه‌ها | بارندگی Rainfall | میانگین دما Temperature mean | جمع ساعات آفتابی Total hours of sunshine | میانگین رطوبت نسبی Relative humidity mean |
|---|---|---|---|---|---|
| | | mm | °C | | % |
| October | مهر | 43.6 | 11.80 | 201.3 | 72 |
| November | آبان | 9.7 | 11.70 | 166.5 | 64 |
| December | آذر | 6.5 | 3.00 | 177.3 | 70 |
| January | دی | 16.5 | 4.60 | 165.4 | 67 |
| February | بهمن | 54.8 | 0.06 | 128.7 | 77 |
| March | اسفند | 26.5 | 7.00 | 157.5 | 73 |
| April | فروردین | 9.3 | 9.00 | 170.9 | 66 |
| May | اردیبهشت | 60.3 | 12.30 | 196.3 | 71 |
| June | خرداد | 28.2 | 16.80 | 148.6 | 71 |
| July | تیر | 3.9 | 21.50 | 344.2 | 60 |
| August | مرداد | 0.9 | 25.30 | 255.6 | 69 |

**جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه**

**Table 2. Farm soil physicochemical properties**

| عصاره اشباع Saturated extract | pH | بافت خاک Soil texture | آهک $CaCO_3$ | رس Clay | سیلت Silt | شن Sand | کربن آلی Organic carbon | نیتروژن N | فسفر P | پتاسیم K | روی Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | | | ---------- % ---------- | | | | | ---------- $mg.kg^{-1}$ ---------- | | | |
| 49 | 7.80 | Loamy | 14.40 | 23 | 42 | 35 | 0.62 | 0.06 | 8.29 | 202 | 1.80 |

فاکتورهای آزمایشی شامل قطع آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، محدودیت ملایم آبی یا قطع آبیاری در ۵۰٪ مراحل سنبله‌دهی و محدودیت شدید آبی یا قطع آبیاری در ۵۰٪ آبستنی بر اساس کد ۵۵ و ۴۳ مقیاس BBCH)، محلول‌پاشی با نانوسیلیکون در سه سطح (شاهد، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر) و کودهای زیستی در چهار سطح (عدم کاربرد، کاربرد قارچ مایکوریزا، کاربرد فلاوباکتریوم و سودوموناس، کاربرد توأم مایکوریزا با باکتری‌ها) بودند. محلول پاشی نانوسیلیکون در دو مرحله ساقه‌دهی و مرحله قبل از آبستنی (به ترتیب معادل با کد ۳۰ و ۴۳ مقیاس BBCH) انجام شد. نانوسیلیکون ($Nano\text{-}SiO_2$) با اندازه ذرات ۲۰ تا ۳۰ نانومتر محصول شرکت آمریکایی US Research Nanomaterial بوده که از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه گردید. قارچ مورداستفاده *Glomus mosseae* بود که از شرکت زیست فناوران توران تهیه و به میزان ۲۰ گرم در هر مترمربع خاک (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) مورداستفاده قرار گرفت (Gianinazzi et al., 2002). مایه تلقیح باکتری‌های *Flavobacterium* و *Psedumonas putida* strain 186 از موسسه تحقیقات خاک و آب تهیه شد. برای تلقیح بذرها از مایه تلقیحی که هر گرم آن دارای ۱۰۸ عدد باکتری زنده و فعال بود استفاده شد. همچنین از محلول صمغ عربی برای چسبندگی بهتر مایه تلقیح به بذرها استفاده شد و مخلوط به مدت دو ساعت در محل خشک و تاریک قرار داده شد. بذر مورداستفاده در این بررسی رقم میهن بود. این رقم دارای تیپ رشد زمستانه، نیمه متحمل به بیماری‌های زنگ قهوه‌ای، سیاه و متحمل به زنگ زرد است. بذر مورداستفاده از مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی اردبیل تهیه گردید. هر واحد آزمایشی دارای پنج ردیف کاشت با فواصل بین ردیفی ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع بود. کاشت در ۱۲ آبان ماه انجام شد. اولین آبیاری بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی بسته به شرایط محیطی، نیاز گیاه زراعی و به استناد سطوح آبیاری (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در

۵۰٪ مراحل سنبله‌دهی و آبستنی) انجام شد. به‌منظور اطمینان از عدم تداخل آب آبیاری به کرت‌های مجاور، فاصله ی بین کرت‌ها ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. محتوای نسبی آب برگ پرچم با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$RWC=\frac{FW-DW}{TW-DW}\times 100 \quad [۱]$$

در این رابطه RWC محتوای نسبی آب برگ، FW وزن تر، DW وزن خشک و TW وزن اشباع برگ است.

میزان نشت الکترولیت برگ پرچم با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Sairam and Srivastava, 2001).

$$EL=\frac{EC1}{EC2}\times 100 \quad [۲]$$

در این رابطه EL نشت الکترولیتی، EC1 و EC2 هدایت الکتریکی قبل و بعد از حمام آب جوش است.

برای اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای برگ پرچم در مزرعه، از دستگاه پرومتر استفاده شد. بدین‌صورت که از هر تیمار به‌طور تصادفی پنج برگ انتخاب و اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل برگ پرچم نیز، از هر تیمار به‌طور تصادفی پنج برگ انتخاب و بعد از ۱۵ دقیقه تاریکی به‌وسیله کلیپس‌های مخصوص، شاخص‌های F0، Fm و Fv/ Fm توسط دستگاه فلورسانس کلروفیل (OS-30p) در فاصله زمانی ۸ تا ۱۰ صبح، اندازه‌گیری شد. همچنین به‌منظور سنجش میزان آنتوسیانین، ۰/۱ گرم از بافت تازه برگ پرچم را در هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر متانول اسیدی (متانول خالص و اسیدکلریدریک به نسبت حجمی ۳۳ به ۱) به‌طور کامل ساییده و به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Wagner, 1979). میزان آنتوسیانین با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد

$$A=\varepsilon bc \quad [۳]$$

در این رابطه ضریب خاموشی 33000 (ε) سانتی‌متر بر مول، A جذب، b عرض کوت، c غلظت محلول است. محتوای آنتوسیانین برحسب میکرومول بر گرم وزن تر ارائه شد.

فسفر دانه و ریشه از روش خاکستر خشک و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۶۶۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Ahmadi et al., 2019). عملکرد دانه از دو خط اصلی هر کرت با رعایت اثر حاشیه‌ای از سطحی معادل ۰/۲ مترمربع برآورد شد. تجزیه داده‌ها با نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

### *محتوای نسبی آب برگ*

تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح آبیاری، کودهای زیستی، نانوسیلیکون و اثر ترکیب تیماری این عوامل بر محتوای نسبی آب برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بیشترین و کمترین محتوای نسبی آب برگ با مقادیر ۹۲/۲۶ و ۵۲/۶۰ درصد، به ترتیب از کاربرد توأم کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل و عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط محدودیت آبی شدید به دست آمد (جدول ۴). اگرچه تنش خشکی می‌تواند منجر به کاهش قابل‌توجهی در محتوای نسبی آب برگ می‌شود، اما به نظر می‌رسد حضور سیلیکون از طریق افزایش غلظت یون‌های پتاسیم و سیلیکون داخل سلول، باعث افزایش محتوای نسبی آب می‌شود. گزارش شده است که سیلیکون در شرایط تنش-های محیطی، با حفظ ساختار سلولی منجر به کاهش نشت مواد و درنتیجه افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شود (Ghorbanpour et al., 2019). همچنین به نظر می‌رسد سیلیکون از طریق رسوب در اپیدرم سلول‌ها و همچنین در بخش بالایی کوتیکول برگ، سبب کاهش خروج آب از برگ‌ها شده و درنتیجه منجر به افزایش محتوای نسبی آب برگ‌ها و تحمل گیاه به شرایط تنش می‌شود (Avestan et al., 2019). کاربرد کودهای زیستی به‌صورت منفرد و توأم می‌توانند رشد گیاه میزبان را به دلیل پتانسیل بالای سازگاری با طیف متنوعی از محیط‌های تحت تنش، بهبود بخشند. درواقع کاربرد کودهای زیستی با ایجاد سیستم ریشه‌ای توسعه‌یافته منجر به افزایش توانایی جذب آب و افزایش محتوای نسبی آب می‌شود (Asghari et al., 2020).

### *هدایت الکتریکی برگ*

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح آبیاری، کودهای زیستی، نانوسیلیکون و اثر ترکیب تیماری این عوامل بر هدایت الکتریکی برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). بیشترین هدایت الکتریکی (۱۸۸/۰۴ میکرو-زیمنس بر سانتی‌متر) در ترکیب تیماری عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی و کمترین آن (۱۰۸/۸۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) با کاربرد توأم کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل به دست آمد (جدول

۴). کاربرد کودهای زیستی و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل موجب کاهش ۴۲/۱۳ درصدی هدایت الکتریکی نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط محدودیت آبی شدید شد. به نظر می‌رسد دلیل افزایش هدایت الکتریکی در شرایط تنش خشکی، می‌تواند تولید گونه‌های فعال اکسیژن و القای تنش اکسیداتیو باشد که با افزایش محدودیت آبی در گیاه، سلول‌ها به‌شدت آسیب‌دیده و منجر به کاهش توانایی سلول در کنترل ورود و خروج مواد از غشای سلولی می‌شود. در این شرایط به دلیل آسیب غشاء سلول‌ها و خارج شدن الکترولیت‌های سلول، هدایت الکتریکی افزایش خواهد یافت (Wang et al., 2021). ولی کاربرد کودهای زیستی به دلیل افزایش جذب مواد غذایی، توسعه سیستم ریشه‌ای و بهبود وضعیت آبی گیاهان (جدول ۴) موجب ثبات غشای سلولی گیاه می‌شود (Azizi et al., 2021).

**جدول ۳. تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیکی گندم متأثر از کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری**

**Table 3. Analysis of variance of physiological traits as affected by bio-fertilizer and nano silicon under withholding irrigation condition**

| S.O.V | منابع تغییر | درجه آزادی df | محتوای نسبی آب RWC | هدایت الکتریکی EC | نشت الکترولیتی EL | هدایت روزنه‌ای Gs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Replication | تکرار | 2 | 1.90 | 3.41 | 0.42 | 7.75 |
| Irrigation (I) | آبیاری | 2 | 1235.01** | 41696.28** | 3121.91** | 1540.47** |
| Biofertilizer (B) | کود زیستی | 3 | 559.86** | 654.50** | 301.74** | 602.46** |
| Nano-Si (N-Si) | نانوسیلیکون | 2 | 41.63** | 8.30ns | 117.74** | 43.79** |
| B×I | کود زیستی × آبیاری | 6 | 633.86** | 50.38** | 94.49** | 19.81** |
| N-Si×I | نانوسیلیکون× آبیاری | 4 | 26.88** | 18.05ns | 13.83** | 1.24* |
| N-Si×B | نانوسیلیکون× کود زیستی | 6 | 449.42** | 20.01* | 3.89** | 2.84** |
| N-Si× B×I | نانوسیلیکون× کود زیستی×آبیاری | 12 | 116.09* | 16.03* | 1.32* | 0.782* |
| Error | اشتباه آزمایشی | 70 | 1.29 | 8.75 | 0.622 | 0.418 |
| C.V (%) | ضریب تغییرات | - | *1.60* | *1.90* | *2.46* | *1.34* |

**Table 3. Continued**

**جدول ۳. ادامه**

| S.O.V | منابع تغییر | درجه آزادی df | عملکرد کوانتومی $F_v/F_m$ | فلورسانس حداقل $F_0$ | فلورسانس حداکثر $F_m$ | آنتوسیانین Anthocyanin |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Replication | تکرار | 2 | 0.0012 | 293.89 | 231.45 | 0.0000011 |
| Irrigation (I) | آبیاری | 2 | 2.659** | 62454.39** | 665834.23** | 0.00021* |
| Biofertilizer (B) | کود زیستی | 3 | 0.121** | 12275.87** | 75076.25* | 0.000071** |
| Nano-Si (N-Si) | نانوسیلیکون | 2 | 0.0052* | 594.34* | 6587.23** | 0.0000070** |
| B×I | کود زیستی × آبیاری | 6 | 0.0010* | 348.42** | 14070.30* | 0.000013** |
| N-Si×I | نانوسیلیکون× آبیاری | 4 | 0.000033ns | 221.27* | 2011.88** | 0.000029** |
| N-Si×B | نانوسیلیکون× کود زیستی | 6 | 0.00053** | 128.95ns | 495.26* | 0.000020* |
| N-Si× B×I | نانوسیلیکون× کود زیستی×آبیاری | 12 | 116.09* | 0.00052** | 106.74* | 611.55* |
| Error | اشتباه آزمایشی | 70 | 0.00016 | 65.00 | 42.38 | 0.00000006 |
| C.V (%) | ضریب تغییرات | - | *2.53* | *4.30* | *3.21* | *1.46* |

ns، * و ** به ترتیب بیانگر غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱٪

ns, * and ** indicate not significant, significant at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

### *نشت الکترولیتی*

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح آبیاری، کودهای زیستی، نانوسیلیکون و اثر ترکیب تیماری این عوامل بر نشت الکترولیت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد کاربرد توأم کودهای زیستی و ۶۰ میلی‌گرم نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل سبب کاهش میزان نشت الکترولیت می‌شود و با افزایش محدودیت آبی، درصد نشت الکترولیتی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. درواقع تنش خشکی با میزان نشت الکترولیت رابطه مستقیم دارد. به‌نحوی‌که در حالت عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون، قطع آبیاری در ۵۰٪ مراحل سنبله‌دهی و آبستنی از افزایش به ترتیب ۵۴/۷۱ و ۹۷/۸۷ درصدی نشت الکترولیت نسبت به شرایط آبیاری کامل با کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون برخوردار بود (جدول ۴). کمترین میزان نشت الکترولیت (۱۴/۱۹ درصد) از کاربرد توأم کودهای زیستی به همراه محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل و بیشترین آن (۵۳/۹۸ درصد) از عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط محدودیت شدید آبی حاصل شد (جدول ۴). به نظر می‌رسد خشکی از طریق آسیب به غشاء سلولی و تخریب

**جدول ۴. مقایسه میانگین صفات فیزیولوژیکی گندم متأثر از کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری**

**Table 4. Means comparison of physiological traits as affected by bio-fertilizer and nano silicon under withholding irrigation condition**

| سطوح آبیاری Irrigation levels | تیمارها Treatments | محتوای نسبی آب RWC | نشت الکترولیتی EL | هدایت الکتریکی EC | هدایت روزنه‌ای Gs |
|---|---|---|---|---|---|
| | | % | ---------- $\mu sm^{-2}$ ---------- | | $mmol.m^{-2}.s^{-1}$ |
| $I_1$ | $B_0S_0$ | $77.36^{g}$ | $27.28^{n}$ | $122.53^{l}$ | $50.92^{gh}$ |
| | $B_1S_0$ | $78.49^{efg}$ | $27.13^{n}$ | $116.77^{mnop}$ | $54.10^{e}$ |
| | $B_2S_0$ | $81.05^{cd}$ | $26.05^{no}$ | $115.88^{nop}$ | $56.97^{cd}$ |
| | $B_3S_0$ | $90.73^{ab}$ | $19.04^{s}$ | $113.28^{opq}$ | $57.78^{b}$ |
| | $B_0S_1$ | $78.21^{fg}$ | $26.34^{n}$ | $121.06^{lm}$ | $51.42^{fg}$ |
| | $B_1S_1$ | $79.31^{def}$ | $24.90^{op}$ | $116.50^{mnop}$ | $56.52^{d}$ |
| | $B_2S_1$ | $82.48^{c}$ | $23.76^{pq}$ | $117.45^{mno}$ | $57.32^{bc}$ |
| | $B_3S_1$ | $91.10^{ab}$ | $16.66^{t}$ | $112.14^{pq}$ | $57.94^{ab}$ |
| | $B_0S_2$ | $78.21^{fg}$ | $21.31^{r}$ | $128.92^{k}$ | $51.82^{f}$ |
| | $B_1S_2$ | $80.29^{de}$ | $22.79^{q}$ | $118.11^{lmn}$ | $56.52^{d}$ |
| | $B_2S_2$ | $90.06^{b}$ | $20.26^{rs}$ | $117.76^{lmno}$ | $57.70^{bc}$ |
| | $B_3S_2$ | $92.26^{a}$ | $14.19^{u}$ | $108.81^{q}$ | $58.86^{a}$ |
| $I_2$ | $B_0S_0$ | $66.81^{k}$ | $34.93^{gh}$ | $172.63^{fg}$ | $45.72^{lm}$ |
| | $B_1S_0$ | $69.18^{j}$ | $33.29^{ij}$ | $172.63^{fg}$ | $47.96^{k}$ |
| | $B_2S_0$ | $69.80^{ij}$ | $33.24^{ij}$ | $170.04^{gh}$ | $49.91^{ij}$ |
| | $B_3S_0$ | $71.17^{h}$ | $30.84^{lm}$ | $163.84^{i}$ | $50.30^{hi}$ |
| | $B_0S_1$ | $66.81^{k}$ | $33.78^{hi}$ | $175.72^{ef}$ | $45.82^{lm}$ |
| | $B_1S_1$ | $69.69^{ij}$ | $32.89^{ijk}$ | $175.96^{ef}$ | $48.16^{k}$ |
| | $B_2S_1$ | $76.84^{g}$ | $32.36^{jk}$ | $172.46^{fg}$ | $50.04^{ij}$ |
| | $B_3S_1$ | $72.60^{h}$ | $30.26^{m}$ | $156.69^{j}$ | $50.38^{hi}$ |
| | $B_0S_2$ | $69.13^{j}$ | $33.46^{ij}$ | $172.69^{fg}$ | $46.31^{l}$ |
| | $B_1S_2$ | $70.19^{ij}$ | $32.55^{ijk}$ | $172.58^{fg}$ | $49.41^{j}$ |
| | $B_2S_2$ | $71.17^{h}$ | $31.63^{kl}$ | $164.01^{i}$ | $50.03^{ij}$ |
| | $B_3S_2$ | $77.34^{g}$ | $29.69^{m}$ | $158.05^{j}$ | $50.66^{ghi}$ |
| $I_3$ | $B_0S_0$ | $52.60^{q}$ | $53.98^{a}$ | $188.04^{a}$ | $31.99^{u}$ |
| | $B_1S_0$ | $60.02^{o}$ | $41.57^{d}$ | $172.38^{bcd}$ | $40.49^{q}$ |
| | $B_2S_0$ | $59.05^{o}$ | $39.09^{d}$ | $172.63^{bcd}$ | $38.41^{q}$ |
| | $B_3S_0$ | $62.96^{lm}$ | $38.23^{e}$ | $178.28^{cde}$ | $43.82^{o}$ |
| | $B_0S_1$ | $53.21^{q}$ | $48.55^{b}$ | $185.14^{ab}$ | $35.50^{t}$ |
| | $B_1S_1$ | $60.43^{no}$ | $41.09^{d}$ | $182.10^{bcd}$ | $41.13^{q}$ |
| | $B_2S_1$ | $60.03^{o}$ | $38.50^{e}$ | $183.10^{bc}$ | $42.28^{p}$ |
| | $B_3S_1$ | $64.29^{l}$ | $36.59^{f}$ | $178.22^{de}$ | $44.83^{n}$ |
| | $B_0S_2$ | $57.60^{p}$ | $46.85^{c}$ | $184.18^{ab}$ | $36.87^{s}$ |
| | $B_1S_2$ | $62.32^{m}$ | $38.53^{e}$ | $184.09^{ab}$ | $41.93^{p}$ |
| | $B_2S_2$ | $62.19^{mn}$ | $35.17^{g}$ | $178.73^{cde}$ | $42.39^{p}$ |
| | $B_3S_2$ | $66.79^{k}$ | $34.89^{gh}$ | $176.85^{ef}$ | $45.34^{mn}$ |

**Table 4. Continued**

**جدول ۴. ادامه**

| سطوح آبیاری Irrigation levels | تیمارها Treatments | عملکرد کوانتومی Fv/Fm | فلورسانس حداقل $F_0$ | فلورسانس حداکثر $F_m$ | آنتوسیانین Anthocyanin |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | µmol.g$^{-1}$ FW |
| | $B_0S_0$ | 0.720$^{g}$ | 175.00$^{klm}$ | 583.66$^{ijk}$ | 0.0142$^{pq}$ |
| | $B_1S_0$ | 0.744$^{ef}$ | 172.66$^{lm}$ | 593.66$^{i}$ | 0.0135$^{s}$ |
| | $B_2S_0$ | 0.796$^{cd}$ | 139.00$^{n}$ | 672.00$^{f}$ | 0.0127$^{t}$ |
| | $B_3S_0$ | 0.863$^{b}$ | 128.00$^{p}$ | 744.66$^{c}$ | 0.0109$^{v}$ |
| | $B_0S_1$ | 0.723$^{fg}$ | 176.00$^{klm}$ | 590.33$^{ij}$ | 0.0140$^{qr}$ |
| | $B_1S_1$ | 0.749$^{e}$ | 148.00$^{n}$ | 609.33$^{h}$ | 0.0136$^{s}$ |
| | $B_2S_1$ | 0.780$^{cd}$ | 136.00$^{no}$ | 678.00$^{e}$ | 0.0125$^{t}$ |
| $I_1$ | $B_3S_1$ | 0.899$^{a}$ | 126.98$^{s}$ | 778.66$^{b}$ | 0.0104$^{x}$ |
| | $B_0S_2$ | 0.734e$^{fg}$ | 171.33$^{m}$ | 592.13$^{ij}$ | 0.0137$^{rs}$ |
| | $B_1S_2$ | 0.776$^{d}$ | 144.00$^{n}$ | 649.33$^{g}$ | 0.0136$^{s}$ |
| | $B_2S_2$ | 0.801$^{c}$ | 130.00$^{op}$ | 698.33$^{d}$ | 0.0115$^{u}$ |
| | $B_3S_2$ | 0.909$^{a}$ | 125.33$^{s}$ | 860.00$^{a}$ | 0.0103$^{xy}$ |
| | $B_0S_0$ | 0.422$^{o}$ | 202.00$^{gh}$ | 495.66$^{q}$ | 0.0145$^{op}$ |
| | $B_1S_0$ | 0.476$^{lm}$ | 193.33$^{hij}$ | 536.66$^{o}$ | 0.0160$^{lm}$ |
| | $B_2S_0$ | 0.484$^{kl}$ | 177.66$^{klm}$ | 550.33$^{mn}$ | 0.0164$^{kl}$ |
| | $B_3S_0$ | 0.579$^{i}$ | 171.00$^{m}$ | 566.00$^{lm}$ | 0.0169$^{ij}$ |
| | $B_0S_1$ | 0.437$^{no}$ | 202.00$^{gh}$ | 506.33$^{p}$ | 0.0153$^{n}$ |
| | $B_1S_1$ | 0.455$^{mn}$ | 187.33$^{ijk}$ | 538.00$^{o}$ | 0.0159$^{m}$ |
| | $B_2S_1$ | 0.501$^{k}$ | 182.33$^{jklm}$ | 560.67$^{mn}$ | 0.0166$^{jk}$ |
| $I_2$ | $B_3S_1$ | 0.598$^{hi}$ | 175.66$^{klm}$ | 582.33$^{jk}$ | 0.0169$^{ij}$ |
| | $B_0S_2$ | 0.435$^{no}$ | 198.33$^{ghi}$ | 511.66$^{p}$ | 0.0147$^{o}$ |
| | $B_1S_2$ | 0.476$^{lm}$ | 194.66$^{hij}$ | 538.33$^{o}$ | 0.0163$^{kl}$ |
| | $B_2S_2$ | 0.540$^{j}$ | 184.66$^{ijk}$ | 573.33$^{kl}$ | 0.0166$^{jk}$ |
| | $B_3S_2$ | 0.602$^{h}$ | 176.00$^{klm}$ | 582.66$^{jk}$ | 0.0172$^{hi}$ |
| | $B_0S_0$ | 0.176$^{v}$ | 261.66$^{a}$ | 365.33$^{y}$ | 0.0174$^{gh}$ |
| | $B_1S_0$ | 0.196$^{uv}$ | 241.66$^{b}$ | 374.33$^{wxy}$ | 0.0177$^{fg}$ |
| | $B_2S_0$ | 0.244$^{s}$ | 222.66$^{de}$ | 388.66$^{uv}$ | 0.0189$^{d}$ |
| | $B_3S_0$ | 0.312$^{pq}$ | 211.33$^{efg}$ | 423.00$^{s}$ | 0.01963$^{b}$ |
| | $B_0S_1$ | 0.188$^{v}$ | 260.33$^{a}$ | 377.00$^{wx}$ | 0.0176$^{gh}$ |
| | $B_1S_1$ | 0.214$^{tu}$ | 240.33$^{bc}$ | 381.66$^{vw}$ | 0.0180$^{e}$ |
| | $B_2S_1$ | 0.280$^{r}$ | 218.00$^{def}$ | 397.33$^{u}$ | 0.0192$^{cd}$ |
| $I_3$ | $B_3S_1$ | 0.320$^{p}$ | 211.00$^{efg}$ | 430.66$^{rs}$ | 0.0266$^{ab}$ |
| | $B_0S_2$ | 0.191$^{v}$ | 243.33$^{b}$ | 371.00$^{xy}$ | 0.0175$^{gh}$ |
| | $B_1S_2$ | 0.230$^{st}$ | 227.66$^{cd}$ | 394.00$^{u}$ | 0.0178$^{fg}$ |
| | $B_2S_2$ | 0.296$^{qr}$ | 215.66$^{def}$ | 411.33$^{t}$ | 0.0196$^{bc}$ |
| | $B_3S_2$ | 0.322$^{p}$ | 205.00$^{fgh}$ | 436.66$^{rs}$ | 0.0274$^{a}$ |

$I_1$، $I_2$ و $I_3$: به ترتیب آبیاری کامل، محدودیت ملایم و شدید آبی؛ $B_0$، $B_1$، $B_2$ و $B_3$: به ترتیب بدون کودهای زیستی، کاربرد میکوریز، باکتری و اربرد توام قارچ و باکتری؛ $S_0$، $S_1$ و $S_2$: به ترتیب شاهد، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون

$I_1$, $I_2$ and $I_3$ are ull irrigation, moderate and severe water limitation, respectively; $B_0$, $B_1$, $B_2$ and $B_3$ are without bio fertilizers, application of *Mycorrhiza*, PGPR and both applications of *Mycorrhiza* and PGPR; $S_0$, $S_1$ and $S_2$ are no salinity (control), 30 and 60 mg L$^{-1}$

ساختار آن و نشت بیشتر مواد داخل سلولی، موجب بالا رفتن هدایت الکتریکی به بیرون سلول شده است. در این راستا گزارش شده است که رادیکال‌های واکنشی تولیدشده به دلیل تنش خشکی می‌توانند واکنش پراکسیداسیون را افزایش داده و نشت الکترولیت را در شرایط تنش خشکی افزایش دهند (Bagherifard et al., 2020).

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانوسیلیکون و کاربرد توأم کودهای زیستی، از درصد نشت الکترولیت کاسته شد. یافته‌ها حاکی از آن است که در شرایط خشکی شدید و کاربرد کودهای زیستی و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون، از میزان نشت الکترولیتی حدود ۳۲/۸۵ درصد نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط خشکی شدید کاسته شد (جدول ۴). برخی محققان دلیل این امر را به رسوب سیلیکون در غشاء سلولی، سخت شدن و افزایش معنی‌دار پایداری آن نسبت داده‌اند (Ali et al., 2019). برخی دیگر معتقدند کاربرد کودهای زیستی به‌صورت منفرد و توأم بر ثبات غشاء و بهبود نفوذپذیری انتخابی غشای

پلاسمایی سلول مؤثر است (ALKahtani et al., 2020) که این نتایج با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد.

### هدایت روزنه‌ای

اثر سطوح آبیاری، کودهای زیستی، نانوسیلیکون و اثر ترکیب تیماری این عوامل بر هدایت روزنه‌ای برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بیشترین هدایت روزنه‌ای (۵۸/۸۶ میلی‌مول بر مترمربع در ثانیه) از کاربرد توأم کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل به دست آمد که با کاربرد ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون اختلاف معنی‌داری را نشان نداد. کمترین هدایت روزنه‌ای (۳۱/۹۹ میلی‌مول بر مترمربع در ثانیه) از عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط محدودیت شدید آبی حاصل شد (جدول ۴). کاربرد توأم کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل از افزایش به ترتیب ۲۸/۱۵ و ۸۴ درصدی هدایت روزنه‌ای نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط محدودیت ملایم و شدید آبی برخوردار بود. به نظر می‌رسد محدودیت آبی موجب می‌شود تا گیاه با بسته شدن روزنه‌ها از تلفات بیشتر آب جلوگیری کرده و با کم شدن هدایت روزنه‌ای، تبادلات گازی و سایر فعالیت‌های فیزیولوژیکی را کنترل و تنظیم کرده تا نیاز خود به آب را، کاهش دهد (Wang et al., 2021) و همین امر منجر به افزایش مقاومت روزنه‌ای و کاهش هدایت روزنه‌ای می‌شود. در این راستا محققان معتقدند بسته شدن روزنه‌ها و کاهش هدایت روزنه‌ای اولین خط دفاعی گیاهان در برابر محدودیت آبی محسوب می‌شود (Zahid et al, 2021). ولی در زمان تنش آبی کاربرد کودهای زیستی به‌صورت منفرد و توأم موجب افزایش هدایت روزنه‌ای شد. به نظر می‌رسد کاربرد توأم کودهای زیستی با افزایش جذب عناصر غذایی ازجمله فسفر (جدول ۵) موجب گسترش ریشه و دسترسی بهتر به منابع آبی شده و از این طریق موجب کاهش آبسیزیک اسید و افزایش هدایت روزنه‌ای می‌شود (Ortiza et al, 2015). سیلیکون نیز از طریق جذب بیشتر آب نقش مؤثری در حفظ تعادل آب در بافت‌های گیاهی ایفا کرده (Maghsoudi et al., 2019) و موجب افزایش هدایت روزنه‌ای شد.

### پارامترهای فلورسانس کلروفیل برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح آبیاری، کودهای زیستی، نانوسیلیکون و اثر ترکیب تیماری این عوامل بر فلورسانس حداکثر (Fm)، حداقل (F0) و کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) در سطح احتمال یک درصد معنی دار است (جدول ۳). محدودیت آبی موجب کاهش عملکرد کوانتومی، فلورسانس حداکثر و افزایش فلورسانس حداقل شد. درصورتی‌که کاربرد توأم کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون به بهبود پارامترهای فلورسانس در شرایط تنش خشکی منجر شد. به‌طوری‌که، بیشترین میزان فلورسانس حداکثر (۸۶۰) و کارایی کوانتومی فتوسیستم (۰/۹۰۹)، همچنین کمترین میزان فلورسانس حداقل (۱۲۵/۳۳) از کاربرد توأم کودهای زیستی و محلول پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل حاصل شد. درواقع کاربرد کودهای زیستی و ۶۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل موجب افزایش ۲۶/۲۵ و ۴۷ درصدی کارایی کوانتومی فتوسیستم II و فلورسانس حداکثر و کاهش ۲۸/۳۸ درصدی فلورسانس حداقل نسبت عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل شد (جدول ۴). همچنین کاربرد کودهای زیستی با ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در حالت محدودیت شدید آبی از افزایش به ترتیب ۸۸ و ۱۹/۴۳ درصدی عملکرد کوانتومی و فلورسانس حداکثر و کاهش ۲۱/۶۵ درصدی فلورسانس حداقل نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در این شرایط برخوردار بود. به نظر می‌رسد کاربرد توأم کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی منجر به بهبودی فعالیت های فتوسنتزی گیاه شده است. فتوسیستم II به تنش‌های محیطی بسیار حساس بوده و تنش خشکی باعث آسیب به این مرکز می‌شود. به عبارتی میزان فلورسانس، سالم بودن غشای تیلاکوئید و کارایی نسبی انتقال الکترون از فتوسیستم II به فتوسیستم I را نشان می‌دهد (Larouk et al., 2021). با توجه به اینکه حداکثر فلورسانس کلروفیل میزان بیشینه توانایی سیستم در دریافت الکترون‌های آزادشده توسط کوئین A ظرفیت بالقوه زنجیره هیل را در انتقال الکترونی نشان می دهد (Maxwell and Johnson, 2000)، بنابراین افزایش کارایی کوانتومی فتوسیستم II و کاهش فلورسانس حداقل بر اساس نتایج به‌دست‌آمده دور از انتظار نبود. همچنین کودهای زیستی نقش مهمی را در پارامترهای فلورسانس کلروفیل برگ به‌واسطه بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه، از بین بردن

میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، حل فسفات نامحلول و تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی ایفا می‌کنند. ازاین‌رو در مطالعه حاضر، افزایش کارایی کوانتومی فتوسیستم II و فلورسانس حداکثر، همچنین کاهش فلورسانس حداقل در کاربرد کودهای زیستی نشان‌دهنده نقش مثبت و تأثیرگذار این میکروارگانیسم‌ها در بهبود سیستم حفاظتی گیاه و افزایش مقاومت به خشکی است.

### *آنتوسیانین*

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح آبیاری، کودهای زیستی، نانوسیلیکون و اثر ترکیب تیماری این عوامل بر آنتوسیانین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). کمترین و بیشترین محتوای آنتوسیانین (به ترتیب ۰/۰۱۰۴ و ۰/۰۲۷۴ میکرومول برگرم وزن تر برگ) از عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل و کاربرد توأم کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط محدودیت شدید آبی به دست آمد (جدول ۴). آنتوسیانین‌ها جزئی از ترکیبات فنولی بوده و گروه بزرگی از متابولیت‌های ثانویه را تشکیل می‌دهند، بنابراین ضمن برخورداری از خاصیت آنتی‌اکسیدانی، به‌عنوان گیرنده رادیکال‌های آزاد عمل نموده و گیاهان را در برابر تنش های اکسیداتیو محافظت می‌کنند (Ling-Wang et al., 2010). با توجه به اینکه بیشترین مقدار آنتوسیانین در شرایط محدودیت شدید آبی به دست آمد، بنابراین علت این افزایش را می‌توان به نقش حفاظت نوری آنتوسیانین از طریق حذف گونه‌های فعال اکسیژن در طول تنش اکسیداتیو نسبت داد. بررسی‌ها نشان می‌دهد سنتز آنتوسیانین‌ها در شرایط تنش‌های محیطی، ازجمله تنش‌های خشکی و شوری افزایش یافته و گیاه را در برابر رادیکال‌های آزاد محافظت کرده و موجب افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی ازجمله خشکی می‌شود (Sun et al., 2021). در این پژوهش مشاهده شد که کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط محدودیت شدید آبی موجب افزایش ۵۷/۴۷ درصدی آنتوسیانین نسبت به عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در همان شرایط ذکرشده گردید. همسو با پژوهش حاضر، پژوهش‌های دیگری نیز افزایش میزان آنتوسیانین را با کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط محدودیت آبی گزارش کرده‌اند که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد (Aghaei et al., 2021; Traversari et al., 2021).

**جدول ۵. تجزیه واریانس صفات فسفر ریشه، فسفر دانه و عملکرد دانه گندم متأثر از کاربرد کود زیستی، نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری**

**Table 5. Analysis of variance of grain phosphorus, root phosphorus and grain yield as affected of bio-fertilizer, nano silicon under irrigation withholding condition**

| S.O.V | منابع تغییر | درجه آزادی df | فسفر دانه Grain phosphorus | فسفر ریشه Root phosphorus | عملکرد دانه Grain yield |
|---|---|---|---|---|---|
| **Replication** | **تکرار** | 2 | 0.106 | 0.0010 | 919674.88 |
| **Irrigation (I)** | **آبیاری** | 2 | 859.92** | 860.70** | 10748405.21** |
| **Biofertilizer (B)** | **کود زیستی** | 3 | 137.58** | 138.93** | 7176908.25** |
| **Nano-Si (N-Si)** | **نانوسیلیکون** | 2 | 10.788** | 7.58* | 5809863.99** |
| **B×I** | **کود زیستی × آبیاری** | 6 | 9.181** | 6.44* | 480148.99** |
| **N-Si×I** | **نانوسیلیکون× آبیاری** | 4 | 1.576ns | 0.426** | 76486.35ns |
| **N-Si×B** | **نانوسیلیکون× کود زیستی** | 6 | 1.500* | 1.079** | 424995.53** |
| **N-Si× B×I** | **نانوسیلیکون× کود زیستی×آبیاری** | 12 | 116.09* | 3.196** | 1.534** |
| **Error** | **اشتباه آزمایشی** | 70 | 0.675 | 0.00020 | 58836.63 |
| **C.V (%)** | **ضریب تغییرات** | - | *4.07* | *6.05* | *8.74* |

ns، * و ** به ترتیب بیانگر غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱٪

ns, * and ** indicate not significant, significant at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

**جدول ۶. مقایسه میانگین صفات فیزیولوژیکی گندم متأثر از کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری**

**Table 6. Means comparison of physiological traits as affected by bio-fertilizer and nano silicon under withholding irrigation condition**

| سطوح آبیاری Irrigation levels | تیمارها Treatments | فسفر دانه Grain phosphorus | فسفر ریشه Root phosphorus | عملکرد دانه Grain yield |
|---|---|---|---|---|
| | | ---------- mg.kg$^{-1}$ ---------- | | kg.ha$^{-1}$ |
| $I_1$ | $B_0S_0$ | 21.57$^{ghij}$ | 25.75$^{gh}$ | 3171.4$^{efg}$ |
| | $B_1S_0$ | 23.80$^{efg}$ | 28.09$^{def}$ | 3556d$^{e}$ |
| | $B_2S_0$ | 25.72$^{cde}$ | 28.23$^{def}$ | 3356$^{de}$ |
| | $B_3S_0$ | 28.27$^{abc}$ | 31.07$^{b}$ | 3911.6$^{b}$ |
| | $B_0S_1$ | 22.59$^{fghi}$ | 26.98$^{fg}$ | 3335$^{ef}$ |
| | $B_1S_1$ | 23.31$^{efgh}$ | 29.46$^{cd}$ | 3305$^{cde}$ |
| | $B_2S_1$ | 25.75$^{cde}$ | 28.52$^{de}$ | 3744$^{bcd}$ |
| | $B_3S_1$ | 29.23$^{ab}$ | 35.51$^{a}$ | 4593$^{a}$ |
| | $B_0S_2$ | 23.22$^{efgh}$ | 26.77$^{fg}$ | 3278.8$^{ef}$ |
| | $B_1S_2$ | 24.63$^{def}$ | 27.71$^{ef}$ | 3500.5$^{cde}$ |
| | $B_2S_2$ | 27.28$^{bcd}$ | 30.75$^{bc}$ | 3887$^{bc}$ |
| | $B_3S_2$ | 30.01$^{a}$ | 35.74$^{a}$ | 4109$^{b}$ |
| $I_2$ | $B_0S_0$ | 17.76$^{klmno}$ | 21.63$^{nop}$ | 2598.5$^{ijklmn}$ |
| | $B_1S_0$ | 19.24$^{jklm}$ | 22.32$^{mno}$ | 2698.5$^{ijklm}$ |
| | $B_2S_0$ | 20.17$^{ijk}$ | 22.92$^{jklmn}$ | 2785.5$^{ghijk}$ |
| | $B_3S_0$ | 20.75$^{hij}$ | 24.38$^{hij}$ | 2865.5$^{ghij}$ |
| | $B_0S_1$ | 18.94$^{jklmn}$ | 21.74$^{mno}$ | 2604.5$^{ijklmn}$ |
| | $B_1S_1$ | 19.39$^{jklm}$ | 22.42$^{lmno}$ | 2755$^{jhijkl}$ |
| | $B_2S_1$ | 20.34$^{ijk}$ | 23.87$^{ijkl}$ | 2455.5$^{klmno}$ |
| | $B_3S_1$ | 21.04$^{hij}$ | 24.09$^{ijk}$ | 2958.9$^{fghi}$ |
| | $B_0S_2$ | 19.14$^{jklmn}$ | 22.1$^{1mno}$ | 2637$^{ijklm}$ |
| | $B_1S_2$ | 19.81$^{jkl}$ | 22.80$^{klmn}$ | 2755.3$^{ghijkl}$ |
| | $B_2S_2$ | 20.77$^{hij}$ | 23.16$^{jklm}$ | 2809$^{ghijk}$ |
| | $B_3S_2$ | 21.41$^{ghij}$ | 24.86$^{hi}$ | 3112.8$^{efgh}$ |
| $I_3$ | $B_0S_0$ | 13.79$^{q}$ | 17.85$^{t}$ | 1257$^{s}$ |
| | $B_1S_0$ | 16.92$^{mnop}$ | 18.63$^{rst}$ | 1991.5$^{pq}$ |
| | $B_2S_0$ | 15.21$^{opq}$ | 19.08$^{qrst}$ | 2018.5$^{pq}$ |
| | $B_3S_0$ | 17.281$^{mnop}$ | 20.22$^{pq}$ | 2376$^{lmnop}$ |
| | $B_0S_1$ | 14.67$^{pq}$ | 18.00$^{t}$ | 1536.5$^{rs}$ |
| | $B_1S_1$ | 16.55$^{nop}$ | 18.83$^{qrst}$ | 2045.5$^{opq}$ |
| | $B_2S_1$ | 17.01$^{mn}$ | 19.80$^{qr}$ | 2349$^{mnop}$ |
| | $B_3S_1$ | 17.35$^{lmnop}$ | 21.28$^{op}$ | 2824$^{ghijk}$ |
| | $B_0S_2$ | 15.18$^{opq}$ | 18.32$^{t}$ | 1810.7$^{qr}$ |
| | $B_1S_2$ | 17.26$^{lmnop}$ | 19.00$^{qrst}$ | 2120.9$^{opq}$ |
| | $B_2S_2$ | 16.72$^{mnop}$ | 19.67$^{qrs}$ | 2241.5$^{nop}$ |
| | $B_3S_2$ | 17.39$^{lmno}$ | 21.31$^{op}$ | 2530$^{jklmn}$ |

$I_1$، $I_2$ و $I_3$: به ترتیب آبیاری کامل، محدودیت ملایم و شدید آبی؛ $B_0$، $B_1$، $B_2$ و $B_3$: به ترتیب بدون کودهای زیستی، کاربرد میکوریز، باکتری و اربرد توام قارچ و باکتری؛ $S_0$، $S_1$ و $S_2$: به ترتیب شاهد، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون

$I_1$, $I_2$ and $I_3$ are full irrigation, moderate and severe water limitation, respectively; $B_0$, $B_1$, $B_2$ and $B_3$ are without bio fertilizers, application of *Mycorrhiza*, PGPR and both application of *Mycorrhiza* and PGPR; $S_0$, $S_1$ and $S_2$ are no salinity (control), 30 and 60 mg L$^{-1}$

***فسفر دانه***

نتایج نشان داد که اثر ترکیب تیماری هر سه عامل (آبیاری در کودهای زیستی و نانو سیلیکون) بر فسفر دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۵). بیشترین فسفر دانه (۳۰/۰۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) از کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل و کمترین آن (۱۳/۷۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) از عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط محدودیت آبی شدید حاصل شد (جدول ۶).

کمبود جذب فسفر در شرایط تنش‌های محیطی می‌تواند منجر به اختلال در سنتز قندهای فسفاتی و نوکلئوتیدهای موجود در ساختمان مولکول‌های RNA و DNA شود. ازاین‌رو در شرایط محدودیت رطوبتی خاک، جذب فسفر کاهش پیدا می‌کند، ولی کاربرد کودهای زیستی به‌صورت توأم و منفرد و همچنین کاربرد نانوسیلیکون در هر دو غلظت،

سبب افزایش فسفر دانه در شرایط تنش خشکی نسبت به تیمار شاهد شد. در رابطه با افزایش غلظت فسفر در کاربرد کودهای زیستی دلایل مختلفی ازجمله تولید اسیدهای معدنی (اسیدکربنیک و اسیدسولفوریک)، اسیدهای آلی (اگزالیک اسید، سیتریک و لاکتیک) و تولید آنزیم‌های فسفاتاز و درنتیجه انحلال فسفات‌های آلی و معدنی بیان‌شده است (Tilak et al., 2005). همچنین مطالعات نشان داده اند که سیلیکون با افزایش میزان فسفر برنج و کارایی کود فسفات، استفاده از فسفر گیاهی را افزایش می‌دهد (Agostinho et al., 2017).

### *فسفر ریشه*

اثر سطوح آبیاری، کودهای زیستی، نانوسیلیکون و اثر ترکیب تیماری این عوامل بر فسفر ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۵). با افزایش محدودیت آبی از میزان فسفر ریشه کاسته شد. بیشترین میزان فسفر ریشه (۳۵/۷۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) از کاربرد توأم کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل به دست آمد که با سطح ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون اختلاف آماری معنی‌داری نداشت. کمترین فسفر ریشه (۱۷/۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) از عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط محدودیت شدید آبی به دست آمد (جدول ۶). درواقع تجمع فسفر ریشه در کاربرد توأم قارچ مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد به‌مراتب بیشتر از کاربرد منفرد آن‌ها بود. همچنین در سطح ثابت از عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون، محدودیت ملایم و شدید آبی به ترتیب از کاهش ۱۶ و ۳۰/۶۷ درصدی فسفر ریشه نسبت به آبیاری کامل برخوردار بود. کاربرد توأم کودهای زیستی و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون از افزایش ۱۴/۹۳ و ۱۹/۳۸ درصدی فسفر ریشه به ترتیب در شرایط محدودیت ملایم و شدید آبی، برخوردار بود (جدول ۶). به نظر می‌رسد تحرک کم عنصر فسفر به‌خصوص در شرایط محدودیت شدید آبی از علل اصلی کاهش جذب فسفر باشد. ولی کاربرد قارچ مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد باعث افزایش جذب مواد غذایی به‌خصوص فسفر در گیاه می‌شود (Kour et al., 2019). از طرفی چون سیلیکون باقدرت بیشتری نسبت به فسفات، جذب سطحی می‌شود بنابراین موجب آزادسازی فسفات شده و بدین ترتیب تحرک و قابلیت استفاده از آن برای گیاهان افزایش می‌یابد (Epstein, 2009). محققان دیگری نیز گزارش کردند که محلول‌پاشی سیلیکون موجب افزایش فسفر در گیاه شد (Hajipour et al., 2019).

### *عملکرد دانه*

اثر ترکیب تیماری هر سه عامل آبیاری در کودهای زیستی و نانوسیلیکون بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). محدودیت شدید آبی و عدم کاربرد نانوسیلیکون و کودهای زیستی، موجب کاهش ۵۵ درصدی عملکرد دانه نسبت به کاربرد ۳۰ میلی‌گرم در لیتر محلول پاشی نانوسیلیکون و تلقیح توأم کودهای زیستی در این شرایط گردید (جدول ۶). به نظر می‌رسد افزایش محتوای نسبی آب برگ، افزایش تجمع آنتوسیانین (جدول ۴)، افزایش هدایت روزنه‌ای برگ و عملکرد کوانتومی (جدول ۴)، بهبود جذب فسفر (جدول ۶) و کاهش هدایت الکتریکی و میزان نشت الکترولیت (جدول ۴) ازجمله دلایل افزایش عملکرد دانه در گیاهان تیمار شده با کودهای زیستی در شرایط محدودیت آبی باشد. همسو با پژوهش حاضر، پژوهش‌های دیگری نیز بهبود عملکرد دانه را با کاربرد نانوسیلیکون و کودهای زیستی در شرایط محدودیت آبی را گزارش کرده‌اند که با مطالعه حاضر مطابقت دارد (Sattar et al., 2020; Khan et al., 2019).

## نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش محدودیت آبی موجب افزایش هدایت الکتریکی، فلورسانس حداقل، نشت الکترولیت و آنتوسیانین شد، ولی کاربرد کودهای زیستی به‌صورت توأم و منفرد موجب تعدیل تنش و کاهش صفات نامبرده شد. بهبود رشد گیاهان در شرایط تنش‌زای محیطی با کاربرد نانوسیلیکون و کودهای زیستی به‌صورت هم‌زمان و یا منفرد ممکن است با افزایش محتوای نسبی آب برگ، جذب فسفر دانه و ریشه، هدایت روزنه‌ای، عملکرد کوانتومی و فلورسانس حداکثر مرتبط باشد. بر اساس نتایج این پژوهش، به نظر می‌رسد برای کاهش اثر محدودیت آبی و بهبود عملکرد دانه‌ی گندم استفاده ۳۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکون با کاربرد توأم کودهای زیستی (باکتری‌های محرک رشد و مایکوریزا) روشی مناسب باشد.

## منابع


Aghaei, F., Seyed Sharifi, R., Narimani, H., 2021. Effects of uniconazole and biofertilizers application on yield and some biochemical charactewristics of wheat under soil salinity stress. Environmental Stresses in Crop Sciences. 14, 487-499. [In Persian with English Summary].

Agostinho, F.B., Tubana, B.S., Martins, M.S., Datnoff, L.E., 2017. Effect of different silicon sources on yield and silicon uptake of rice grown under varying phosphorus rates. Plants. 6(35), 1-17.

Ahmadi, F., Moradi Telavat, M.R., Siadat, S.A., Moshattati, A., 2019. Effect of different concentrations of humic acid on guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) yield and nutrients uptake in different sowing densities. Journal of Crop Production and Processing. 9, 33-49. [In Persian with English Summary].

Ahmed, K., Shabbir, G., Ahmed, M., Shah, K.N., 2020. Phenotyping for drought resistance in bread wheat using physiological and biochemical traits. Science of the Total Environment. 729, 139082.

Ali, S., Rizwan, M., Hussain, A., ur Rehman, M.Z., Ali, B., Yousaf, B., Wijaya, L., Alyemeni, M.N., Ahmad, P., 2019. Silicon nanoparticles enhanced the growth and reduced the cadmium accumulation in grains of wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Physiology and Biochemistry. 140, 1-8.

ALKahtani, M.D., Attia, K.A., Hafez, Y.M., Khan, N., Eid, A.M., Ali, M.A., Abdelaal, K.A., 2020. Chlorophyll fluorescence parameters and antioxidant defense system can display salt tolerance of salt acclimated sweet pepper plants treated with chitosan and plant growth promoting rhizobacteria. Agronomy. 10, 1180.

Alzahrani, Y., Kuşvuran, A., Alharby, H.F., Kuşvuran, S., Rady, M.M., 2018. The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cadmium. Ecotoxicology and Environmental Safety. 154, 187-196.

Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Aslam, M., Lee, D.J., 2016. Silicon fertilization improves the maize (*Zea mays* L.) performance under limited moisture supply. Cereal Research Communications. 44, 172-185.

Asghari, B., Khademian, R., Sedaghati, B., 2020. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) confer drought resistance and stimulate biosynthesis of secondary metabolites in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) under water shortage condition. Scientia Horticulturae. 263, 109132.

Avestan, S., Ghasemnezhad, M., Esfahani, M., Byrt, C.S., 2019. Application of nano-silicon dioxide improves salt stress tolerance in strawberry plants. Agronomy. 9 (5), 246

Azizi, S., Kouchaksaraei, M.T., Hadian, J., Abad, A.R.F.N., Sanavi, S.A.M.M., Ammer, C., Bader, M.K.F., 2021. Dual inoculations of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria boost drought resistance and essential oil yield of common myrtle. Forest Ecology and Management. 497, 119478.

Bagherifard, A., Hamidoghli, Y., Biglouei, M.H., Ghaedi, M., 2020. Effects of drought stress and superabsorbent polymer on morpho-physiological and biochemical traits of Caper (*Capparis spinosa* L.). Australian Journal of Crop Science. 14, 13-20.

Begum, N., Wang, L., Ahmad, H., Akhtar, K., Roy, R., Khan, M.I., Zhao, T., 2021. Co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and the plant growth-promoting rhizobacteria improve growth and photosynthesis in tobacco under drought stress by up-regulating antioxidant and mineral nutrition metabolism. Microbial Ecology. 83, 971–988

Epstein, E. 2009. Silicon. Its manifold roles in plants. Annals of Applied Biology. 155(2), 155-160.

Evelin, H., Devi, T.S., Gupta, S., Kapoor, R., 2019. Mitigation of salinity stress in plants by arbuscular mycorrhizal symbiosis: current understanding and new challenges. Frontiers in Plant Science. 10, 470.

FAOSTAT. 2020. World Agriculture Data, http:\\apps.fao.org\faostat

Ghonaim, M.M., Mohamed, H.I., Omran, A.A., 2021. Evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) salt stress tolerance using physiological parameters and retrotransposon-based markers. Genetic Resources and Crop Evolution, 68, 227-242.

Ghorbanpour, M., Mohammadi, H., Kariman, K., 2020. Nanosilicon-based recovery of barley

(*Hordeum vulgare*) plants subjected to drought stress. Environmental Science: Nano. 7, 443-461.

Gianinazzi, S., Schuepp, H., Barea, J.M., Haselwandter, K. 2002. Mycorrhizal Technology in Agriculture, from Genes to Bioproducts. Birkhauser, Basel.

Hadi, H., Seyed Sharifi, R., Namvar, A., 2016. Phytoprotectants and Abiotic Stresses. Urmia University press. 342p. [In Persian].

Hajipour, H., Jabbarzadeh, Z., Rasouli Sadaghiani, M.H., 2019. Effect of foliar application of silica on some growth, biochemical and reproductive characteristics and leaf elements of *Chrysanthemum* (Dendranthema× Grandiflorum cv. Fellbacher Wein). Journal of Soil and Plant Interactions. 10, 29-46. [In Persian with English Summary].

Itelima, J.U., Bang, W.J., Onyimba, I.A., Sila, M.D., Egbere, O.J., 2018. Bio-fertilizers as key player in enhancing soil fertility and crop productivity: A review. Direct Research Journal of Agriculture and Food Science. 6(3), 73-83.

Kamal, M.H., Dadkhodaie, A., Dorostkar, S., Heidari, B., 2019. Differential activity of antioxidant enzymes and physiological changes in wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. Notulae Scientia Biologicae. 11, 266-276.

Karimian, N., Nazari, F., Samadi, S., 2021. Morphological and biochemical properties, leaf nutrient content, and vase life of tuberose (*Polianthes tuberosa* L.) affected by root or foliar applications of silicon (Si) and silicon nanoparticles (Si-NPs). Plant Growth Regulation. 40, 2221-2235.

Keshavarz, H., 2020. Study of water deficit conditions and beneficial microbes on the oil quality and agronomic traits of canola (*Brassica napus* L.). Grasas Y Aceites. 71, 373.

Khan, Z.S., Rizwan, M., Hafeez, M., Ali, S., Adrees, M., Qayyum, M.F., Khalid, S., ur Rehman, M.Z., Sarwar, M.A., 2020. Effects of silicon nanoparticles on growth and physiology of wheat in cadmium contaminated soil under different soil moisture levels. Environmental Science and Pollution Research. 27, 4958-4968.

Kour, D., Rana, K.L., Sheikh, I., Kumar, V., Yadav, A.N., Dhaliwal, H.S.,Saxena, A.K., 2020. Alleviation of drought stress and plant growth promotion by Pseudomonas libanensis EU-LWNA-33, a drought-adaptive phosphorus-solubilizing bacterium. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences. 90, 785-795.

Larouk, C., Gabon, F., Kehel, Z., Djekoun, A., Nachit, M., Amri, A. 2021. Chlorophyll Fluorescence and Drought Tolerance in a Mapping Population of Durum Wheat. Contemporary Agriculture. 70, 123-134.

Lin-Wang, K., Bolitho, K., Grafton, K., Kortstee, A., Karunairetnam, S., McGhie, T.K., Espley, R.V., Hellens, R.P., Allan, A.C., 2010. An R2R3 MYB transcription factor associated with regulation of the anthocyanin biosynthetic pathway in Rosaceae. BMC Plant Bology. 10, 1-17.

Maghsoudi, K., Emam, Y., Ashraf, M., Arvin, M.J., 2019. Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination. Crop and Pasture Science. 70, 36-43. [In Persian with English Summary].

Maxwell, K., Johnson, G.N., 2000. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. Journal of Experimental Botany. 51, 659-668.

Miri-Hesar, K., Dadkhodae, A., Dorostkar, S., Heidari, B. 2019. Differential activity of antioxidant enzymes and physiological changes in wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. Notulae Scientia Biologicae. 11, 266-276.

Ortiz, N., Armada, E., Duque, E., Roldán, A., Azcón, R., 2015. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi and/or bacteria to enhancing plant drought tolerance under natural soil conditions: effectiveness of autochthonous or allochthonous strains. Journal of Plant Physiology. 174, 87-9.

Petridis, A., Therios, I., Samouris, G., Koundouras, S., Giannakoula, A., 2012. Effect of water deficit on leaf phenolic composition, gas exchange, oxidative damage and antioxidant activity of four Greek olive (*Olea europaea* L.) cultivars. Plant Physiology and Biochemistry. 60, 1-11.

Rao, G.B., Susmitha, P., 2017. Silicon uptake, transportation and accumulation in Rice. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 6, 290-293.

Sairam, R.K., Srivastava, G.C., 2001. Water stress tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.): variations in hydrogen peroxide

accumulation and antioxidant activity in tolerant and susceptible genotypes. Journal of Agronomy and Crop Science. 186, 63-70.

Sajed Gollojeh, K., Khomari, S., Shekhzadeh, P., Sabaghnia, N., Mohebodini, M., 2020. The effect of foliar spray of nano silicone and salicylic acid on physiological traits and seed yield of spring rapeseed at water limitation conditions. Journal of Crop Production. 12, 137-156. [In Persian with English Summary].

Sattar, A., Sher, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Rizwan, M.S., Hussain, M., Jabran, K., Cheema, M.A., 2020. Terminal drought and heat stress alter physiological and biochemical attributes in flag leaf of bread wheat. PLoS One. 15, e0232974.

Sun, X., Zhang, Q., Zhou, H., 2021. Anthocyanins: from biosynthesis regulation to crop improvement. Botany Letters. 168 (4), 546-557.

Tilak, K.V.B.R., Ranganayaki, N., Pal, K.K., De, R., Saxena, A.K., Nautiyal, C.S., Mittal, S., Tripathi, A.K., Johri, B.N., 2005. Diversity of plant growth and soil health supporting bacteria. Current Science. 136-150.

Tiwari, S., Lata, C., Chauhan, P.S., Nautiyal, C.S., 2016. Pseudomonas putida attunes morphophysiological, biochemical and molecular responses in *Cicer arietinum* L. during drought stress and recovery. Plant Physiology and Biochemistry. 99, 108-117.

Traversari, S., Pistelli, L., Del Ministro, B., Cacini, S., Costamagna, G., Ginepro, M., Marchioni, I., Orlandini, A., Massa, D., 2021. Combined effect of silicon and non-thermal plasma treatments on yield, mineral content, and nutraceutical proprieties of edible flowers of Begonia cucullata. Plant Physiology and Biochemistry. 166, 1014-1021.

Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K., Dubey, N.K., 2016. Silicon nanoparticles more efficiently alleviate arsenate toxicity than silicon in maize cultiver and hybrid differing in arsenate tolerance. Frontiers in Environmental Science. 4, 46.

Tyagi, J., Varma, A., Pudake, R.N., 2017. Evaluation of comparative effects of arbuscular mycorrhiza (*Rhizophagus intraradices*) and endophyte (*Piriformospora indica*) association with finger millet (*Eleusine coracana*) under drought stress. European Journal of Soil Biology. 81, 1-10.

Wagner, G.J., 1979. Content and vacuole/extra vacuole distribuyion of neutral sugars free amino acids, and anthocyanins in protoplast. Plant Physiology. 64, 88-93.

Wang, N., Chen, H., Wang, L., 2021. Physiological acclimation of Dicranostigma henanensis to soil drought stress and rewatering. Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 90.

Zahid, Z., Khan, M.K.R., Hameed, A., Akhtar, M., Ditta, A., Hassan, H.M., Farid, G., 2021. Dissection of Drought Tolerance in Upland Cotton through Morpho-Physiological and Biochemical Traits at Seedling Stage. Frontiers in Plant Science. 12, 260.

Zhang, W., Yu, X., Li, M., Lang, D., Zhang, X., Xie, Z., 2018. Silicon promotes growth and root yield of Glycyrrhiza uralensis under salt and drought stresses through enhancing osmotic adjustment and regulating antioxidant metabolism. Crop Protection. 107, 1-11.