Crop Science Research in Arid Regions

homepage: https://cropscience.uoz.ac.ir/

Research Article
Volume 7, Issue 1, 2025, P. 157-178

The effect of nanosilicon and zinc nanooxide on the quantitative, qualitative, and water and zinc use efficiency of soybeans (*Glycine max* L.) under irrigation regimes

Heshmatollah Azizi [a], Abbas Maleki [*b], Mohammad Mirzaei Heydari [c], Farzad Babaei [b], Ali Hatami [b]

[a] Ph.D Student, Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Islamic Azad University of Ilam Branch, Ilam, Iran
[b] Department of Agronomy and Plant Breeding, IL.C, Islamic Azad University, Ilam, Iran
[c] Department of Agronomy and Plant Breeding, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

[*]Corresponding Author: maleki97@yahoo.com

Received: 10 December 2023 Accepted: 14 January 2024 **DOI: 10.22034/CSRAR.2024.429770.1383**

How to cite this article:
Azizi, H., Maleki, A., Mirzaei Heydari, M., Babaei, F. and Hatami, A., 2025. The effect of nanosilicon and zinc nanooxide on the quantitative, qualitative and water and zinc use efficiency of soybeans (*Glycine max* L) under irrigation regimes. *Crop Science Research in Arid Regions*, *7*(1), 157-178. https://doi.org/10.22034/csrar.2024.429770.1383

Abstract

Introduction: Soybean (*Glycine max* L.) is rich in nutrients and has vegetable proteins, dietary fiber, and minerals such as calcium, and its saturated fat content is also low. Soybean oil is one of the most important vegetable of the area arable land under cultivation in the world, among oil plants, soybean is in the first place. Recently, the use of nano-fertilizers in agriculture has expanded a lot in the world. On the other hand, it seems that the use of zinc nanosulfate or nanosilicon in arid and semi-arid climates like Iran can reduce the harmful effects of drought stress on plants.
Materials and Methods: Therefore, an experiment was carried out during two crop years in the form of a split-factorial design in the form of a basic randomized complete block design with 4 replications in Malekshahi city located in Ilam province (Iran) in crop years 2019-2020 and 2020-2021. The main factor included irrigation regimes in three levels without stress (control), irrigation based on 50% of the agricultural capacity of the field and irrigation based on 75% of the agricultural capacity of the field. The combination of nano zinc oxide treatments at three levels (zero (control), 0.75 and 1.5 $g.L^{-1}$) and nanosilicon at three levels (zero (control), 0.8 and 1.6 $g.L^{-1}$) in factorial form were placed in the secondary cards. Processing and classification of the extracted information was done using Excel software and data analysis was done using SAS version 9 software. Making comparisons with the Least Significant Difference (LSD) method at the 5% level. In this study, composite analysis method was used for analysis. To ensure the uniformity of the variances in order to integrate the data, Bartlett's test was performed, and the results indicated the absence of data and the necessary provision for integration.
Results and Discussion: The results regarding the mutual effect of drought stress and zinc sulfate showed that the highest seed yield was obtained in the treatment of no drought stress (100% crop capacity) and the consumption of 1.5 $g.L^{-1}$ nano zinc sulfate in the amount of 3452.2 $kg.ha^{-1}$. At

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

drought stress levels of 75 and 50% of the agricultural capacity, the consumption of zinc sulfate increased this index. With the use of 1.6 $g.L^{-1}$ of nanosilicon, the grain yield was 3253.9 $kg.ha^{-1}$, which was 28% higher than the non-use treatment. Seed oil was used to treat the lack of drought stress, and consumption of 1.6 grams per liter of nano silicon was obtained in the amount of 58.6%. In the drought stress of 50% of the agricultural capacity, the use of nitrogen fertilizer and, especially 0.8 grams per liter of nano silicon increased this index. The results regarding the mutual effect of drought stress and zinc sulfate showed that the highest water use efficiency was achieved in the treatment of severe drought stress and the consumption of 1.5 $g.L^{-1}$ nano zinc sulfate in the amount of 1.78 $kg.m^{-3}$. The lowest amount was obtained in the treatment of normal irrigation and no use of zinc sulfate. In the drought stress levels of 75 and 50% of the agricultural capacity, the consumption of zinc sulfate increased this index. The results regarding the mutual effect of nano silicon fertilizer and zinc sulfate showed that highest efficiency of irrigation water consumption was in the treatment of using 1.6 $g.L^{-1}$ of nano silicon fertilizer. The lowest value was obtained in the treatment of not using nano silicon and zinc sulfate. With the increase in the use of nano silicon fertilizer, the response to zinc sulfate also increased.

Conclusion: In general, the results showed that by using nanosilicon and nanozinc oxide in soybeans, it is possible to effectively increase the grain yield and increase the amount of oil and protein. Probably, nanosilicon and zinc nanooxide increase the activity of enzymes effective in oil and protein synthesis in soybean plant. These nanomaterials activate hormonal regulators of plant growth and improve factors such as better absorption of nutrients and reduced water evaporation, all of which help increase seed yield and increase the amount of oil and protein in the soybean plant. In summary, the use of nanosilicon and zinc nanosulfate in soybeans brings a significant improvement in seed yield and increases the amount of oil and protein of this plant. These results can be used to improve the production and quality of soybean-based products.

Keywords: Dehydration, Nanotechnology, Protein, Seed oil, Seed yield

تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک/ جلد هفتم، شماره اول، بهار ۱۴۰۴، ص ۱۷۸-۱۵۷

مقاله پژوهشی

تأثیر مصرف نانوسیلیکون و نانواکسید روی بر عملکرد کمی، کیفی و کارایی مصرف آب و روی در سویا (*Glycine max* L.) تحت رژیم‌های آبیاری

حشمت اله عزیزی[۱]، عباس ملکی[۲*]، محمد میرزائی حیدری[۳]، فرزاد بابایی[۲]، علی حاتمی[۲]

۱- دانشجوی دکتری آگروتکنولوژی، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلام، ایلام، ایران
۲- گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران
۳- گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
* مسئول مکاتبه: maleki97@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴ **DOI: 10.22034/CSRAR.2024.429770.1383**

چکیده

به‌نظر می‌رسد بهره‌گیری از نانوکودها در اقلیم‌های خشک مانند ایران بتواند اثر مضر تنش خشکی بر گیاهان را کاهش دهد. لذا آزمایشی طی دو سال زراعی به صورت اسپلیت پلات- فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار در شهرستان ملکشاهی در استان ایلام در سال‌های زراعی ۹۹-۱۳۹۸ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اجرا شد. عامل اصلی شامل رژیم‌های آبیاری در سه سطح بدون تنش (شاهد)، آبیاری بر اساس ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی مزرعه بود. ترکیب تیمارهای نانواکسید روی در سه سطح (صفر (شاهد)، ۰/۷۵ و ۱/۵ گرم بر لیتر) و نانوسیلیکون نیز در سه سطح (صفر (شاهد)، ۰/۸ و ۱/۶ گرم بر لیتر) بصورت فاکتوریل به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد که به صورت محلول‌پاشی مصرف شدند. نتایج نشان داد که در سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، مصرف نانواکسید روی موجب افزایش این عملکرد دانه به ترتیب به مقدار ۲۸ و ۲۲ درصدی نسبت به تیمار عدم مصرف شد. در خصوص اثر اصلی نانوسیلیکون؛ با مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانوسیلیکون، عملکرد دانه به مقدار ۳۲۵۳ کیلوگرم در هکتار حاصل شد که نسبت به تیمار عدم مصرف معادل ۲۸ درصد افزایش داشت. بطور کلی نتایج نشان داد که با استفاده از ۱/۶ گرم در لیتر نانوسیلیکون یا مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانواکسید روی در گیاه سویا، می‌توان به‌طور مؤثری عملکرد دانه را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. استفاده از نانوسیلیکون و نانواکسید روی در گیاه سویا، همچنین افزایش مقدار روغن و پروتئین این گیاه را حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: پروتئین، روغن دانه، عملکرد دانه، فناوری نانو، کم آبی

مقدمه

سویا (*Glycine max* L.) سرشار از مواد مغذی و دارای پروتئین‌های گیاهی، الیگوساکاریدها، فیبر خوراکی، ایزوفلاوون‌ها و مواد معدنی نظیر کلسیم می‌باشد و میزان چربی اشباع شده آن نیز پایین است. روغن سویا از مهم‌ترین روغن‌های نباتی خوراکی می‌باشد (Ji *et al.*, 2023). از نظر سطح اراضی زراعی زیر کشت در دنیا، در بین گیاهان روغنی، سویا در مقام اول قرار دارد. به دلیل افزایش مصرف سویا در غذاهای صنعتی به‌ویژه در کشورهای توسعه یافته و مصرف شیر سویا به جای شیر مادر در تغذیه نوزادان، و همچنین به خاطر اهمیت آن در تغذیه دام، کشت این گیاه در بین سایر لگوم‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Shi *et al.*, 2023). با توجه به واقع شدن ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان و کمبود آب در این مناطق، احتمال وقوع تنش خشکی در تمامی مراحل رشدی گیاهان وجود دارد. تنش کم آبیاری علاوه بر اثر منفی بر عملکرد، باعث بروز یا تشدید سایر تنش‌ها مخصوصاً تنش کمبود عناصر غذایی در گیاه می‌شود (Maleki *et al.*, 2020; Bahamin *et al.*, 2021; Bahamin *et al.*, 2019).

به‌کارگیری روش‌های مختلف در افزایش تحمل به تنش کم‌آبی در امر تولید و افزایش عملکرد کیفی و کمی محصولات حائز اهمیت است. برخی عوامل همچون عناصر غذایی و کوددهی بر تغییر وضعیت گیاه در حالت تنش خشکی موثر هستند که ریزمغذی ها از آن قبیل هستند (Coblentz *et al.*, 2017). وسعت زیادی از خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به‌دلیل آهکی بودن (Dimkpa *et al.*, 2019; Bahamin *et al.*, 2019) دارای کمبود عناصر ریزمغذی، به‌ویژه روی می‌باشند (Candan *et al.*, 2018). در صورتی‌که میزان روی خاک کمتر از ۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد یا غلظت آن در

گیاه سویا از ۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم کمتر باشد، گیاه دچار کمبود روی می‌شود (Azarfam *et al.*, 2020). سیلیکون نیز دومین عنصر فراوان در خاک است اما در بسیاری از گیاهان به عنوان یک عنصر ضروری مطرح نیست. به تازگی مطالعات زیادی نشان داده است که افزودن سیلیکون به گیاهان تیمار شده می‌تواند به طور چشمگیری تنش‌های زیستی و غیر زیستی نظیر: تنش فلزات سنگین، نمک، خشکی، سرما و یخزدگی را کاهش دهد و آثار مفیدی بر رشد و تولید گیاهان داشته باشد (Ashkiani *et al.*, 2020; Candan *et al.*, 2018). سیلیکون با افزایش فعالیت فتوسنتزی، بهبود وضعیت آب، تحریک سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش جذب سدیم یا افزایش وابسته به ATPase-+H پتاسیم در اندام هوایی، تحمل به تنش شوری را افزایش می‌دهد (Banerjee *et al.*, 2021; Behera *et al.*, 2015). همچنین نشان داده شده است که سیلیکون احتمالاً سوپر اکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز را فعال اما غلظت مالون‌دی‌آلدئید را در گیاهان جو، گوجه‌فرنگی و ذرت کاهش داده است (Ahmed *et al.*, 2021; Cao *et al.*, 2020; Basu *et al.*, 2021).

امروزه استفاده از نانوذرات توسط بسیاری از پژوهشگران کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است، هرچند سازوکار عملکرد آنها به درستی شناخته نشده است (Banerjee *et al.*, 2021; Behera *et al.*, 2015). نشان داده شده است که استفاده از نانواکسید روی به عنوان یک ماده کاتالیزور در سویا، می‌تواند به طور موثر اثرات مضر تنش خشکی را کاهش دهد. با تأمین نیازهای روزانه آبی گیاه، نانواکسید روی می‌تواند بهبود در مصرف آب و افزایش تحمل به خشکی در سویا را تسهیل کند (Cao *et al.*, 2020). در تحقیقی تأثیر نانواکسید روی بر عوامل مهمی مانند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تولید فتوسنتز و جذب عناصر غذایی در سویا مثبت ارزیابی شده است (Ji *et al.*, 2023). نانواکسید روی می‌تواند بهبود عملکرد سویا در شرایط تنش خشکی را تسهیل کرده و باعث افزایش محتوای کلروفیل و تولید انرژی در گیاه می‌شود (Fathi *et al.*, 2022; Cao *et al.*, 2020). گزارش شده است که نانوذرات سیلیکون نیز سبب افزایش فعالیت نیترات ردوکتاز در سویا می‌شود (Cao *et al.*, 2020; Basu *et al.*, 2021).

تحقیقات نشان داده است که استفاده از نانوسیلیکون می‌تواند در کاهش اثر تنش خشکی در گیاهان نقش مؤثری ایفا کند. نانوسیلیکون، به عنوان یک فرم خاص از سیلیسیم، قادر است بهبود تحمل گیاهان در مواجهه با شرایط خشکی را تسهیل کند (Cao *et al.*, 2020; Basu *et al.*, 2021). نانوسیلیکون می‌تواند به عنوان یک جاذب رطوبت عمل کند و توانایی ذخیره آب در ساقه، برگ و ریشه گیاهان را افزایش دهد. این امر منجر به کاهش تبخیر آب از سطح برگ‌ها و در نتیجه حفظ رطوبت در گیاه می‌شود. علاوه بر این، نانوسیلیکون می‌تواند تأثیرات آب و عناصر معدنی در گیاهان را تعدیل کند و فعالیت آنزیم‌های مؤثر در فرایندهای فیزیولوژیکی را تحریک کند (Ashkiani *et al.*, 2020). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نانوسیلیکون می‌تواند روند رشد گیاهان را تسریع کرده و عملکرد آن‌ها را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشد (Dimkpa *et al.*, 2019). این نانوماده می‌تواند بهبود جذب و استفاده از عناصر غذایی در گیاهان را تسهیل کند و میزان فتوسنتز و تولید انرژی را افزایش دهد. همچنین، نانوسیلیکون می‌تواند روند فعال‌سازی ژن‌ها مرتبط با تحمل به تنش خشکی را تقویت کند و محتوای آنتی‌اکسیدان‌ها را در گیاهان افزایش دهد (Azarfam *et al.*, 2020). از آن‌جا که روی و سیلیکون وظایف مهمی در ساز و کار گیاهان دارند، بنابراین این تحقیق جهت تعیین اثرات این دو ماده بر عملکرد کمی، کیفی و کارایی مصرف آب در سویا تحت رژیم‌های آبیاری انجام گرفت. در تحقیق حاضر از این راهکار در جهت تولید مطلوب گیاه سویا به عنوان یک محصول روغنی و پروتئینی تحت شرایط تنش کم آبی استفاده می‌گردد که با توجه به وضعیت خشکی کشور ایران، این تحقیق می‌تواند گامی جدید در کشاورزی در مناطق خشک تلقی گردد.

مواد و روش‌ها

محل اجرای طرح

این آزمایش طی دو سال زراعی در شهرستان ملکشاهی واقع در استان ایلام (ایران) در سال‌های زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ اجرا شد. این شهرستان بین ۳۲ درجه و ۳۳ دقیقه و ۵۸ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۱۲ دقیقه و ۰۸ ثانیه عرض

شـــمالی و ۴۷ درجه و ۰۷ دقیقه و ۱۶ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۰۴ دقیقه و ۰۹ ثانیه طول شـرقی و ارتفاع ۱۶۹۰ متر از سـطح دریا قرار دارد. شـهرسـتان ملکشـاهی دارای آب و هوای گرم و نیمه خشک و با میانگین بارندگی ۳۵۰ میلی‌متر است.

طرح آماری

آزمایش به صـورت اسـپلیت پلات- فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصـادفی با ۴ تکرار اجرا شـد. عامل اصـلی شامل رژیم‌های آبیاری در سه سطح بدون تنش (شاهد)، آبیاری بر اسـاس ۵۰ درصـد ظرفیت زراعی مزرعه و آبیاری بر اسـاس ۷۵ درصـــد ظرفیت زراعی مزرعه انجام شـــد. ترکیب تیمارهای نانو اکسـید روی در سـه سـطح (صـفر (شـاهد)، ۰/۷۵ و ۱/۵ گرم بر لیتر) و نانو سـیلیکون در سـه سـطح (صـفر (شـاهد)، ۰/۸ و ۱/۶ گرم بر لیتر) بصـــورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار گرفتند که به صـورت محلول‌پاشـی در مرحله گلدهی مورد مصـرف قرار گرفتند. بین تیمارهای محلول‌پاشـی نانو سـیلیکون و نانو اکسـید روی دو روز فاصله در نظر گرفته شد.

عملیات زراعی

زمین محل آزمایش در بهار شخم و سپس دیسک زده شد. فاصـله بین کرت‌های فرعی نیم متر و برای کرت‌های اصـلی یک متر در نظر گرفته شـــد. پیش از انجام آزمایش، آزمون خاک بر روی نمونه خاکی که از عمق صـــفر تا ۳۰ ســـانتی‌متری مزرعه برداشـت شـد صـورت گرفت. پس از تجزیه نمونه خاک مزرعه، کود سـوپرفسـفات تریپل با غلظت ۴۱ درصـد فسـفر خالص و مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار بصـورت پیش از کاشـت اسـتفاده شـــد. زمین مورد نظر جهت حفظ بهتر رطوبت خاک با گاوآهن قلمی شخم زده شد، سپس برای تسطیح و خرد شدن کلوخه‌ها و نیز اختلاط کود با خاک، از دیسـک اسـتفاده شـد. کشـت بذور در تاریخ ۱۵ اردیبهشت انجام شد. اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشـت بذرها در تمام تیمارهای آبیاری اعمال شـد. فاصـله بذور روی هر خط ۵ سـانتی‌متر و فاصـله بین خطوط ۵۰ سـانتی‌متر بود. هر کرت فرعی با ابعاد ۲/۵ × ۴ متر و شـامل ۵ خط کاشـت و تراکم بوته ۴۰ هزار بوته در هکتار بود. فاصـله بلوک‌ها از هم ۲ متر و فاصـله‌کرت‌های اصـلی به میزان ۱ متر در نظر گرفته شـد. بین کرت‌های فرعی یک خط نکاشت در نظر گرفته شد. آبیاری به صـورت جوی و پشـته‌ای (نشـتی) انجام شـد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت بذور، انجام گرفت. گیاهان تا مرحله شش برگی به طور منظم و یکنواخت آبیاری شدند.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش (سال ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹)

Table 1- Physical and chemical characteristics of the soil where the experiment was carried out (years 2019 and 2020)

خصوصیات specifications	پتاسیم قابل جذب Available K (ppm)	فسفر قابل جذب Available P (ppm)	نیتروژن کل N (%)	کربن آلی Organic C (%)	هدایت الکتریکی EC ($ds.m^{-2}$)	اسیدیته pH	بافت Texture	عمق Depth (cm)
سال اول Year 1	144	8	0.045	0.85	0.9	7	لومی loam	0-30
سال دوم Year2	146	9	0.046	0.88	0.96	7.1	لومی loam	0-30

برای به‌دست آوردن ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم از طریق به‌دست آوردن پتانسـیل ماتریک توسـط تانسـیومتر فلزی اسـتفاده شـد. در این تحقیق برای ظرفیت زراعی از روش کمبود رطوبت خاک (روش وزنی) نسـبت به FC (θ -Fc) برای تعیین حجم آب مورد نیاز گیاه در هر دور آبیاری اسـتفاده شـد. با در نظر گرفتن ضـریب گیاهی (Kc)، میزان تبخیر و تعرق بالقوه مشخص و بر اسـاس تخلیه رطوبتی و طبق تیمارهای مذکور تا رسـیدن رطوبت خاک به حد FC، میزان آب مورد نیاز محاسـبه و حجم آب مورد نیاز هر کرت توسـط کنتور حجمی اندازه‌گیری شـد. عمق موثر ریشـه سـویا ۳۰ سـانتی‌متر در نظر گرفته شـد. چگالی ظاهری خاک ۱/۳ گرم بر ســـانتی‌متر مکعب بود. در ابتدای کار وزن گل اشـــباع پس از خروج آب اضـــافی از گلدان دارای منفذ محاسبه شد. سپس وزن خاک خشک شده در آون محاســـبه شـــد و از تفاضـــل آن‌ها میزان ظرفیت زراعی خاک محاسبه شد. در نهایت مقدار آن به مزرعه تعمیم داده شد و بر اسـاس آن تیمار عدم تنش کم آبیاری، ۷۵ و ۵۰ درصـد کمبود

رطوبتی خاک محاسبه شد. عمق آب در هر آبیاری (I) بر حسب سانتی‌متر بر اساس رابطه‌ی ۱ محاسبه شد (Yaniv *et al.*, 1999):

$$dn = RAW = (\theta_{fc} - \theta_{PWP})^* \rho_b^* Z^* MAD \quad (۱)$$

RAW= کل آب قابل تخلیه (میلی‌متر)

Z= عمق موثر ریشه (متر)

θ = رطوبت خاک قبل از آبیاری

ρ_b = وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه (واحد گرم بر سانتی‌متر مکعب)

θ_{fc}= رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه

θ_{PWP}= رطوبت وزنی قبل از آبیاری کرت‌ها

MAD= تخلیه مجاز رطوبتی که در این تحقیق ۵۰ در صد در نظر گرفته می‌گردد.

به‌وسیله رابطه‌ی ۲ حجم آب آبیاری مورد نیاز هر کرت برآورد گردید:

$$V = I \times A \times 100 \quad (۲)$$

V=حجم آب آبیاری استفاده شده در هر کرت (لیتر)

A= مساحت هر کرت (متر مربع)

I=ارتفاع آب آبیاری (میلی‌متر)

در دفعات بعدی آبیاری و پس از جوانه‌زنی و استقرار بوته‌ها، عمق خالص برای آبیاری بر حسب رطوبت از کاهش یافته‌ی خاک در محیط ریشه گیاه که توسط دستگاه رطوبت سنج T.D.R اندازه‌گیری شد. در زمان اعمال تیمارها با اندازه‌گیری کمبود رطوبتی خاک در منطقه ریشه، ارتفاع خالص آب مورد نیاز تعیین و با توجه به مساحت هر کرت برای تیمارهای ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی منظور شد.

نمونه‌برداری

در مرحله‌ی رسیدگی، نمونه‌برداری از هر کرت بعد از حذف اثرات حاشیه‌ای انجام شد و صفات مورد نظر اندازه‌گیری شدند. سطحی معادل ۲ مترمربع از نیمه میانی کرت برداشت شده و پس از خشک شدن دانه‌ها، میزان عملکرد دانه هر کرت محاسبه شد. جهت تعیین عملکرد بیولوژیک (کل ماده خشک اندام‌های بالای سطح خاک) در مرحله رسیدگی، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل گردید و در آون تهویه دار با درجه حرارت ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. بعد از خشک شدن وزن آنها محاسبه شد.

برای محاسبه درصد پروتئین دانه با قراردادن نمونه‌ها در دستگاه کجلدال و افزودن سود (NaoH)، اسید بوریک (H3Bo3) و آب مقطر مطابق پروتکل اندازه‌گیری نیتروژن و پروتئین انجام شد. محلول حاصل از تقطیر توسط اسید کلریدریک ۰/۱، تیتراسیون شد؛ تا رنگ محلول درون ارلن، به رنگ ارغوانی تغییر یاقت. سپس عدد تتراسیون در فرمول قرار گرفت و درصد پروتئین محاسبه شد (Bradford, 1976). درصد روغن دانه به کمک دستگاه سوکسله و با استفاده از حلال هگزان انجام شد (Nelson and Sommers, 1983). به منظور تعیین میزان روی و فسفر، در پایان رشد، از هر کرت ۳ نمونه گیاهی برداشت و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد. میزان فسفر نمونه‌ها به روش جذب اتمی (طیف سنج جذب اتمی AAS مدل GeminAA ساخت آلمان) اندازه‌گیری شد.

کارایی مصرف آب (*WUE*[1]) (کیلوگرم بر متر مکعب) بر اساس نسبت عملکرد تولید شده دانه (*Y*) (کیلوگرم در هکتار) و کل آب مصرفی (*CW*) (متر مکعب در هکتار) محاسبه شد. از آنجا که در بررسی حاضر هدف محاسبه کارایی مصرف آب آبیاری بود لذا میزان بارندگی در محاسبات لحاظ نشد. راندمان مصرف روی (ZUE[2]) بر حسب عملکرد دانه (*SY*) (کیلوگرم) به مقدار ورودی کود به اضافه مقدار موجود در خاک (کیلوگرم) بر حسب واحد کیلوگرم بر کیلوگرم محاسبه شد (Bradford, 1976). قبل از این محاسبه ابتدا مصرف نانواکسید روی به کیلوگرم در هکتار محاسبه و تعمیم داده شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با روش حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح ۵ درصد انجام شد. در این بررسی از روش تجزیه

[1] Water use *efficiency*

[2] Zinc use *efficiency*

مرکب برای آنالیز استفاده شد. برای اطمینان از یکنواختی واریانس‌ها به‌منظور ادغام داده‌ها، آزمون بارتلت انجام شد که نتایج حاکی از عدم معنی‌داری داده‌هاو فراهمی لازم برای ادغام بودند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که علاوه بر اثرات اصلی، اثر متقابل تنش در نانواکسید روی، تنش در نانوسیلیکون، نانوسیلیکون در نانو اکسید روی و اثر متقابل سه گانه تنش خشکی، کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی بر غلظت روی همگی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. اثرات اصلی تیمارها، اثر متقابل تنش در نانو اکسید روی، نانو اکسید روی در نانوسیلیکون و اثر متقابل سه گانه و چهارگانه بر غلظت نیتروژن همگی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود.

نتایج نشان داد که علاوه بر اثر اصلی نانوسیلیکون، نانواکسید روی و تنش خشکی؛ اثر متقابل تنش خشکی و نانو اکسید روی بر عملکرد دانه همگی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. علاوه بر اثرات اصلی، اثرات متقابل دوگانه تنش در نانوسیلیکون، نانوسیلیکون و نانواکسید روی (در سطح ۱ درصد) و تنش در نانواکسید روی (در سطح ۵ درصد) بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود (جدول ۲).

نتایج نشان داد که اثرات اصلی تیمارها، اثر متقابل تنش در نانوسیلیکون و اثر نانو اکسید روی در نانوسیلیکون در سطح ۱ درصد و اثر متقابل سه گانه تنش خشکی، کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی در سطح ۵ درصد بر پروتئین معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که علاوه بر معنی‌داری اثرات اصلی تنش، نانواکسید روی و نانوسیلیکون؛ اثر متقابل تنش و نانوسیلیکون نیز بر درصد روغن دانه در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. علاوه بر معنی‌دار شدن اثرات اصلی تنش، اثر متقابل نانو سیلیکون و نانواکسید روی؛ اثر متقابل نانو سیلیکون و روی (در سطح ۱ درصد) و اثر متقابل تنش و نانواکسید روی (در سطح ۵ درصد) بر کارایی مصرف آب آبیاری در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

غلظت روی

بیشترین غلظت روی در تیمار عدم تنش خشکی و مصرف ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۰/۰۸۲ درصد حاصل شد ولی بین این تیمار با تیمار عدم تنش خشکی و مصرف ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی اختلاف معناداری وجود نداشت. کمترین مقدار نیز در تیمار تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی به دست آمد. با افزایش شدت تنش به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی موجب افزایش این شاخص شد.

عدم اعمال تنش بترتیب موجب افزایش ۳۶ و ۲۱ درصدی این شاخص نسبت به تیمار ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی شد (جدول ۳).

اثر متقابل نانوسیلیکون و نانو اکسید روی بر افزایش جذب عنصر روی در گیاهان به عنوان یک ترکیب نانوذرات ممکن است بهبود عملکرد جذب روی را تسهیل کند. ترکیب این دو نانوذره می‌تواند به عنوان یک روش نوین برای افزایش اثربخشی جذب عنصر روی از خاک و افزایش میزان روی در گیاهان عمل کند. نانوسیلیکون به عنوان یک ماده اصلاح‌کننده خاک و نانوذره فعال می‌تواند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشیده و باعث افزایش موجودی روی قابل دسترس در خاک شود و در نتیجه، جذب روی توسط گیاهان بهبود یابد. همچنین، نانوسیلیکون می‌تواند توانایی گیاهان در جذب روی از خاک را افزایش داده و عملکرد جذب روی را ارتقاء دهد (Ghorbanpour *et al.*, 2020; Bijanzadeh *et al.*, 2022). با استفاده از نانو روی می‌توان میزان روی در محیط خاک را افزایش داد و تجمع روی در محیط ریشه‌های گیاهی را بهبود بخشیده و این ویژگی‌ها باعث می‌شود که گیاهان قادر به جذب بیشتر روی از خاک باشند و بتوانند بهبودی قابل توجه در عملکرد و توسعه خود نشان دهند (Tondey *et al.*, 2021; Ahmed *et al.*, 2021; Alamri *et al.*, 2020).

با ترکیب نانوسیلیکون و نانوروی، می‌توان عملکرد جذب روی را بهبود بخشید و به افزایش عملکرد و عملکرد دانه‌ها در گیاهان کمک کرد.

غلظت نیتروژن

در سال اول بیشترین غلظت نیتروژن در تیمار عدم تنش خشکی، مصرف ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۰/۷۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۱/۲۱ درصد حاصل شد ولی بین این تیمار با تیمار عدم تنش خشکی و مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۰/۷۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. کمترین مقدار نیز در تیمار تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی به‌دست آمد. با افزایش شدت تنش به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی موجب افزایش این شاخص شد (جدول ۳).

جدول ۲- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس اثر عوامل آزمایشی بر صفات جذب عناصر و عملکرد

Table 2- The mean square obtained from the analysis of variance of the effect of experimental factors on the characteristics of absorption of elements and yield

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی df	غلظت روی Zinc concentration	غلظت نیتروژن Nitrogen concentration	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد بیولوژیک Biologic yield
سال Year (Y)	1	0.00004^{ns}	0.005^{ns}	5465.4^{ns}	2719224.1^{ns}
سال × تکرار Y×Rep	6	0.000064	0.006	103546.3	2086921.9
تنش Stress (A)	2	0.0011**	0.096**	12125365**	234216404.9**
سال× تنش Y×A	2	0.00001^{ns}	0.005^{ns}	125245.5 ^{ns}	6104906.0**
خطای کرت اصلی Residual a	12	0.000031	0.005	89256.5	133616.7
نانو سیلیکون Nano-silicon (B)	2	0.00062**	1.287**	95149354 **	118149755.8**
نانو اکسید روی Nano Zinc (C)	2	0.0014**	0.326**	9992502.5**	32892608.0**
سال× نانو سیلیکون Y×B	2	0.000004^{ns}	0.008^{ns}	237961.3^{ns}	2717963.0**
سال × نانواکسید روی Y×C	2	0.0000001^{ns}	0.026*	880341.3*	1690331.1*
تنش × نانو سیلیکون A×B	4	0.00013**	0.015^{ns}	1019584.2**	3009533.9**
تنش × نانو اکسید روی A×C	4	0.00004^{ns}	0.102**	1166656 **	1286326.3*
سال × تنش× نانو سیلیکون Y×A×B	4	0.000004^{ns}	0.005^{ns}	76283.4 ^{ns}	695289.8^{ns}
سال× تنش×روی Y×A×C	4	0.0000001^{ns}	0.027**	185082.4 ^{ns}	592089.6^{ns}
نانو سیلیکون × نانو اکسید روی B×C	4	0.00024**	0.007^{ns}	219522.2 ^{ns}	2349568.0**
سال× نانو سیلیکون× نانو اکسید روی Y×B×C	4	0.0000001^{ns}	0.024**	5421.3 ^{ns}	46501.3^{ns}
تنش× نانو سیلیکون× نانو اکسید روی A×B×C	8	0.000101**	0.042**	88142.4^{ns}	206152.0^{ns}
سال×تنش×نانو سیلیکون× نانو اکسید روی Y×A×B×C	8	0.0000001^{ns}	0.023**	95426.3^{ns}	648406.0^{ns}
خطا ی آزمایش Residual	144	0.00002	0.006	96474.2	388484.4
ضریب تغییرات (%) CV	-	6.9	7.3	7.3	6.3

*،** و ns: معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد، ۱ درصد و عدم تفاوت معنادار

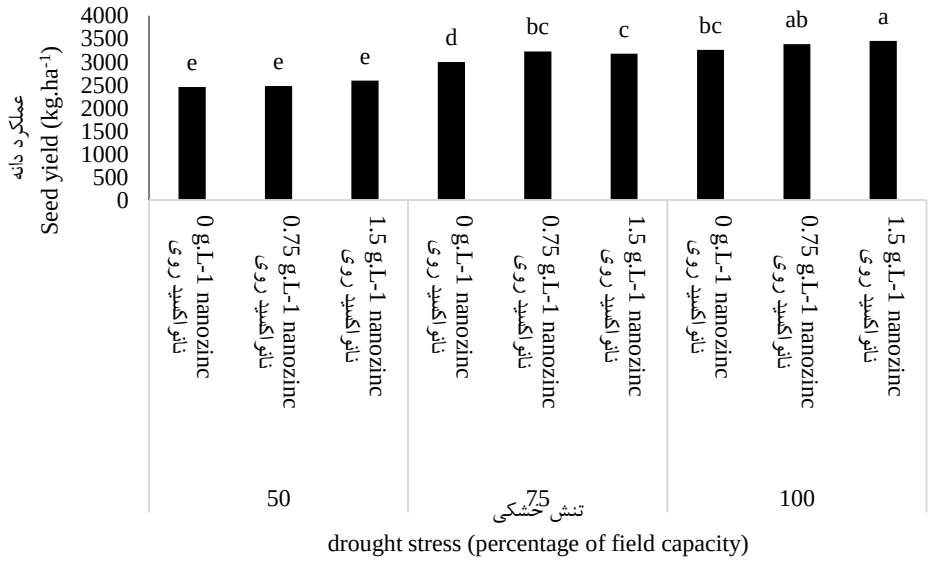
*,** and ^{ns}: significance at the probability level of 5%, 1% and no significant difference

دلیل تأثیر نانوسیلیکون بر افزایش جذب نیتروژن در دانه به دلیل ویژگی‌های خاص این نانوذره است. نانوسیلیکون باعث افزایش سطح مخازن آب و مواد مغذی در خاک می‌شود، همچنین می‌تواند فرایندهای فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که گیاهان بتوانند نیتروژن موجود در خاک را به طور بهتری جذب کنند و از آن استفاده کنند. به علاوه، نانوسیلیکون می‌تواند تأثیرات مثبتی بر روی رشد ریشه‌ها داشته باشد که این مسئله نیز می‌تواند به افزایش جذب نیتروژن توسط گیاه کمک کند (Kareem *et al.*, 2023; Raeisi Sadati *et al.*, 2022). ریشه‌های بهتر و پوشش دهی شده با نانوسیلیکون می‌توانند نیتروژن موجود در عمق‌های بیشتر خاک را بهتر به دست آورده و به گیاهان مهیا کنند (Abdelaal *et al.*, 2020; Banerjee *et al.*, 2021; Tondey *et al.*, 2021).

دلیل تأثیر مثبت نانواکسید روی بر افزایش جذب نیتروژن در گیاهان ممکن است به دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌ها، تنظیم هورمون‌ها و اصلاح خصوصیات خاک باشد. نانواکسید روی می‌تواند فعالیت آنزیم‌های مرتبط با جذب نیتروژن در گیاه را افزایش دهد، که بهبود فرایند هضم و جذب نیتروژن توسط گیاه را تسهیل می‌کند. نانواکسید روی می‌تواند به عنوان یک سیگنال‌دهنده هورمونی عمل کند و فرایندهای جذب نیتروژن را بهبود بخشد. نانواکسید روی می‌تواند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود داده و میزان نیتروژن در دسترس را افزایش دهد (Banerjee *et al.*, 2021; Tondey *et al.*, 2021). در این رابطه محقان (Raeisi Sadati *et al.*, 2020) نیز گزارش نمود که کمبود شدید آب در خاک موجب محدود شدن توانایی گیاه جهت جذب نیتروژن از خاک می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در شرایط کمبود آب در خاک که جذب عناصر غذایی به‌خصوص نیتروژن تحت تأثیر قرار می‌گیرد، لزوم برقراری تناسب میان نیتروژن مصرفی و فراهمی رطوبت در خاک ضروریست.

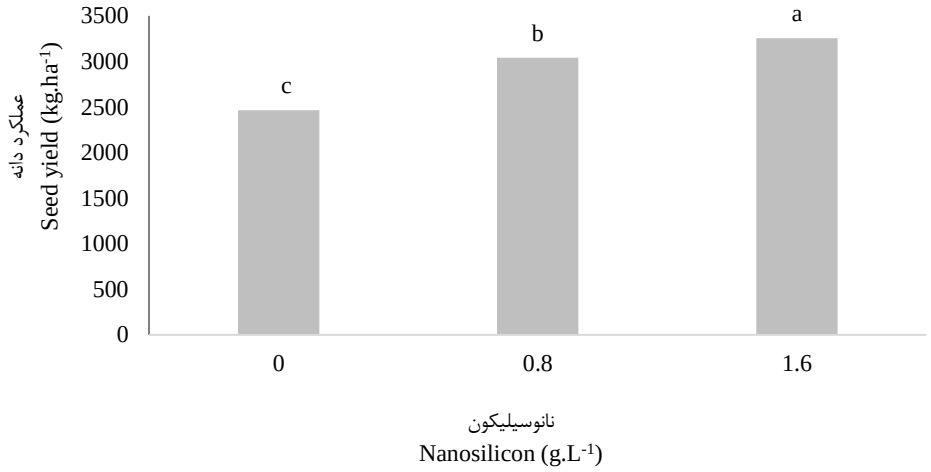
عملکرد دانه

نتایج در خصوص اثر متقابل تنش خشکی و نانو اکسید روی نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در تیمار عدم تنش خشکی (۱۰۰درصد ظرفیت زراعی) و مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۳۴۵۲ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری بر اساس تخلیه ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف نانو اکسید روی به دست آمد. در سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، مصرف نانو اکسید روی موجب افزایش این شاخص شد (شکل ۱). با مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانوسیلیکون، عملکرد دانه به مقدار ۳۲۵۳ کیلوگرم در هکتار حاصل شد که نسبت به تیمار عدم مصرف معادل ۲۸ درصد افزایش داشت (شکل ۲).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانواکسید روی بر عملکرد دانه

Figure 1- Comparison of the average interaction effect of drought stress and nanozinc oxide on seed yield



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر اصلی نانوسیلیکون بر عملکرد دانه

Figure 2- Comparison of the average main effect of nanosilicon on seed yield

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه تنش خشکی، نانوسیلیکون و نانوروی بر جذب برخی عناصر در سویا

Table 3- Comparison of the average triple interaction effect of drought stress, nanosilicon and nanozinc on the absorption of some elements in soybeans

تنش خشکی	نانوسیلیکون	نانواکسید روی	نیتروژن جذب شده در سال اول	نیتروژن جذب شده در سال دوم	روی جذب شده
Drought stress (percentage of field capacity)	Nanosilicon ($g.L^{-1}$)	Nano zinc oxide ($g.L^{-1}$)	Nitrogen absorbed in first year (%)	Nitrogen absorbed in second year (%)	Adsorbed zinc (%)
50	0	0	0.78 ^{k}	0.78 ^{k}	0.054 ^{k}
		0.75	0.83 ^{ijk}	0.83 ^{ijk}	0.068 $^{c-j}$
		1.5	0.92 $^{f-j}$	0.92 $^{f-j}$	0.066 $^{e-j}$
	0.8	0	0.98 $^{c-g}$	0.98 $^{c-g}$	0.060 ^{jk}
		0.75	0.92 $^{f-j}$	0.92 $^{f-j}$	0.065 $^{f-j}$
		1.5	1.13 ^{ab}	1.13 ^{ab}	0.067 $^{d-j}$
	1.6	0	0.93 $^{e-i}$	0.93 $^{e-i}$	0.060 ^{jk}
		0.75	1.02 $^{b-f}$	1.02 $^{b-f}$	0.063 $^{h-k}$
		1.5	1.11 ^{ab}	1.11 ^{ab}	0.072 $^{b-h}$
75	0	0	0.79 ^{jk}	0.79 ^{jk}	0.061 ^{ijk}
		0.75	0.84 $^{h-k}$	0.84 $^{h-k}$	0.070 $^{b-i}$
		1.5	0.92 $^{f-j}$	0.92 $^{f-j}$	0.069 $^{bc-j}$
	0.8	0	0.96 $^{c-h}$	0.96 $^{c-h}$	0.060 ^{jk}
		0.75	1.00 $^{b-f}$	1.00 $^{b-f}$	0.068 $^{c-j}$
		1.5	1.12 ^{ab}	1.12 ^{ab}	0.077 ^{abc}
	1.6	0	1.06 $^{b-e}$	1.06 $^{b-e}$	0.074 $^{a-f}$
		0.75	0.98 $^{c-g}$	0.98 $^{c-g}$	0.065 $^{f-j}$
		1.5	1.20 ^{a}	1.20 ^{a}	0.077 $^{a-d}$
100	0	0	0.77 ^{k}	0.77 ^{k}	0.061 ^{ijk}
		0.75	0.86 $^{g-k}$	0.86 $^{g-k}$	0.064 $^{g-j}$
		1.5	0.95 $^{d-i}$	0.95 $^{d-i}$	0.071 $^{b-h}$
	0.8	0	1.05 $^{b-f}$	1.05 $^{b-f}$	0.066 $^{e-j}$
		0.75	1.21 ^{a}	1.21 ^{a}	0.072 $^{b-g}$
		1.5	1.02 $^{b-f}$	1.02 $^{b-f}$	0.082 ^{a}
	1.6	0	1.06 ^{bcd}	1.06 ^{bcd}	0.078 ^{ab}
		0.75	1.20 ^{a}	1.20 ^{a}	0.075 $^{a-e}$
		1.5	1.09 ^{abc}	1.09 ^{abc}	0.078 ^{ab}

ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف آماری معناداری توسط آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند

Columns with common letters do not have a statistically significant difference by LSD test at the level of 5٪

نانوسیلیکون می‌تواند در کاهش تبخیر آب از برگ‌ها و افزایش تجمع آب در گیاهان کمک کند، که در نتیجه می‌تولند تأثیر مثبتی بر عملکرد دانه در شرایط خشکی داشته باشد. یکی از مکانیسم‌های اثرگذار نانواکسید روی بر افزایش وزن صد دانه، افزایش جذب آب و عناصر غذایی در گیاهان است(Candan *et al.*, 2017). نانواکسید روی با افزایش هدایت روزنه‌ای در منطقه ریشه، موجب افزایش قدرت جذب و انتقال آب و عناصر غذایی به بخش‌های مختلف گیاه می‌شود. این بهبود در جذب و تأمین منابع غذایی، به طور مستقیم منجر به افزایش وزن دانه می‌شود (Aqaei *et al.*, 2020). علاوه بر این، نانواکسید روی توانایی تنظیم فعالیت آنزیم‌ها و مسیرهای متابولیکی در گیاه را داراست. این تنظیمات متابولیکی بهبود عملکرد فیزیولوژیکی گیاه را تحت تنش خشکی ارتقا می‌دهد و در نتیجه منجر به افزایش وزن دانه می‌گردد (Chattha *et al.*, 2017).

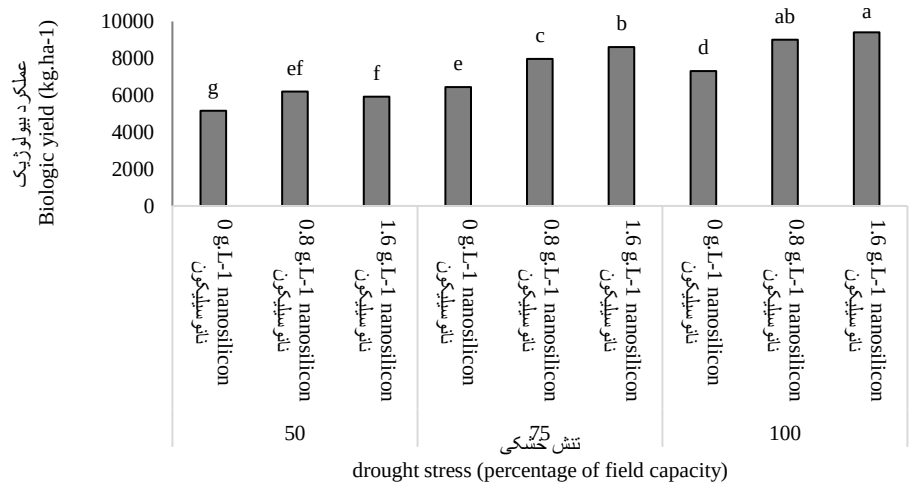
تنش خشکی می‌تواند به عملکرد دانه‌ها در سویا تأثیرات منفی بگذارد. در زیر سه دلیل کاهش عملکرد دانه در اثر تنش خشکی برای گیاهان سویا آورده شده است. تنش خشکی باعث کاهش قابل توجه در فتوسنتز گیاه می‌شود (Fathi *et al.*, 2022; Ghadirnezhad Shiade *et al.*, 2023; Arif *et al.*, 2021). در شرایط خشکی، گیاهان کمترین توانایی در جذب دی اکسید کربن (CO_2) دارند و عملکرد کلروفیل در سلول‌های برگ کاهش می‌یابد. این کاهش فتوسنتز منجر به کمبود انرژی و مواد غذایی برای ساخت دانه‌ها می‌شود (Taheri *et al.*, 2022).

تنش خشکی باعث اختلال در فرآیندهای رشد و توسعه دانه‌ها می‌شود. کاهش آب در خاک و استوماهای بسته، باعث کاهش انتقال عناصر غذایی و مواد مغذی به دانه‌ها می‌شود. این امر موجب کاهش اندازه و وزن دانه‌ها و در نهایت کاهش عملکرد دانه می‌شود (Bhardwaj *et al.*, 2021). تنش خشکی باعث تغییرات فیزیولوژیکی در گیاهان سویا می‌شود. این تغییرات شامل افزایش تولید مواد متابولیکی محافظ مانند پروتئین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها می‌شود. این مواد متابولیکی علاوه بر حفاظت در برابر تنش خشکی، منجر به تخلیص انرژی و مواد غذایی از بخش‌های دیگر گیاه می‌شوند که به کاهش عملکرد دانه تأثیر می‌گذارد (Cao *et al.*, 2020; Bhardwaj *et al.*, 2021).

عملکرد بیولوژیک

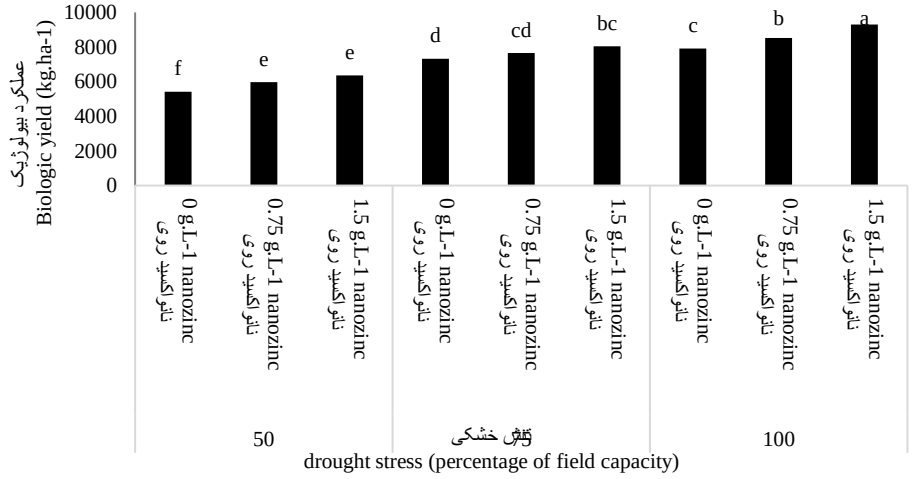
نتایج در خصوص اثر متقابل تنش خشکی و کود نانو سیلیکون نشان داد که بیشترین عملکرد بیولوژیک در تیمار عدم تنش خشکی (۱۰۰درصد ظرفیت زراعی) و مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانو سیلیکون به مقدار ۹۴۰۰ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری بر اساس تخلیه ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف کود نانو سیلیکون به دست آمد. در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف کود نیتروژن و به خصوص ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون موجب افزایش این شاخص شد (شکل ۳). نتایج در خصوص اثر متقابل تنش خشکی و نانو اکسید روی نشان داد که بیشترین عملکرد بیولوژیک در تیمار عدم تنش خشکی (۱۰۰درصد ظرفیت زراعی) و مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۱۱۹۸۷ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری بر اساس تخلیه ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف نانو اکسید روی به دست آمد. در سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف نانو اکسید روی و موجب افزایش این شاخص شد (شکل ۴). نتایج در خصوص اثر متقابل کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی نشان داد که بیشترین عملکرد بیولوژیک در تیمار مصرف ۱/۶ گرم در لیتر کود نانو سیلیکون و ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۹۲۹۳ کیلوگرم در هکتار حاصل شد. با افزایش مصرف کود نانو سیلیکون پاسخ به نانو اکسید روی نیز افزایش یافت (شکل ۵).

علت افزایش عملکرد را می‌توان به افزایش بیوسنتز اکسین در حضور عنصر روی دانست. روی به عنوان جزء ساختمانی بعضی از آنزیم‌ها بوده و در فعالیت‌های آنزیمی گوناگون شرکت دارد و با کاهش واکنش اسیدی خاک قابلیت جذب بیشتری پیدا می‌کند (Umair Hassan *et al.*, 2020). نانوسیلیکون، به عنوان یک نانوماده، تولنایی افزایش عملکرد بیولوژیک گیاهان را به دلایل گوناگون دارد. استفاده از نانوسیلیکون یا نانو اکسید روی باعث افزایش جذب و استفاده بهینه از عناصر غذایی در گیاهان می‌شود که منتج به افزایش عملکرد می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که نانوسیلیکون باعث افزایش جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سایر عناصر مورد نیاز گیاهان می‌شود، که در نتیجه منجر به افزایش عملکرد بیولوژیک گیاهان می‌شود (Benslima *et al.*, 2021).



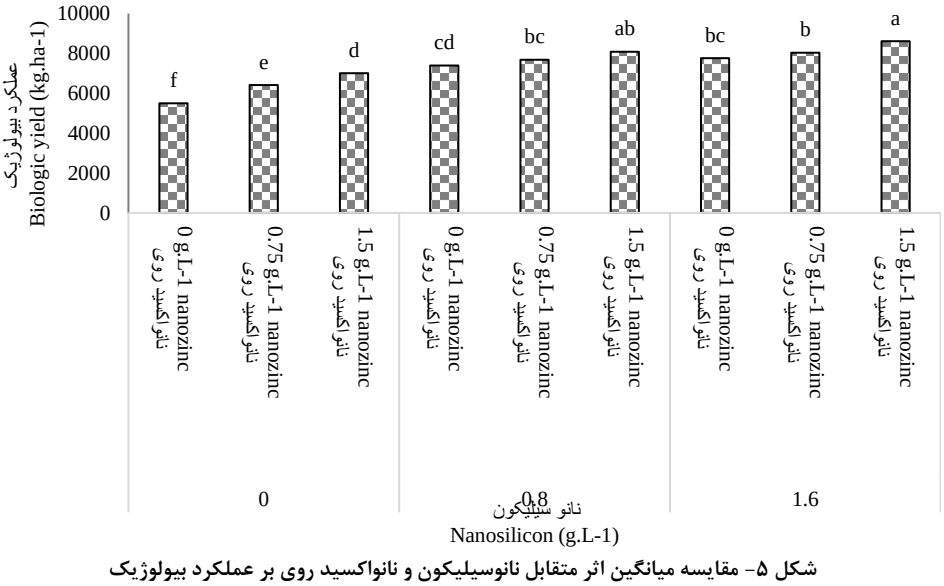
شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانوسیلیکون بر عملکرد بیولوژیک

Figure 3- Comparison of the average interaction effect of drought stress and nanosilicon on biologic yield



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانواکسید روی بر عملکرد بیولوژیک

Figure 4- Comparison of the average interaction effect of drought stress and nanozinc oxide on biologic yield



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوسیلیکون و نانواکسید روی بر عملکرد بیولوژیک

Figure 5- Comparison of the average interaction effect of nanosilicon and nanozinc oxide on biologic yield

جدول ۴- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس اثر عوامل آزمایشی بر صفات کیفی و کارایی مصرف آب و روی

Table 4- The mean square obtained from the analysis of variance of the effect of experimental factors on the quality traits and efficiency of water and zinc consumption

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی df	درصد پروتئین دانه Seed protein	درصد روغن دانه Seed oil	کارایی مصرف آب WUE	کارایی مصرف روی ZUE
سال Year (Y)	1	21.5**	0.00066*	2.68**	2719224.1^{ns}
سال × تکرار Y×Rep	6	0.193	0.00011	0.11	2086921.9
تنش Stress (A)	2	52.62**	0.0105**	159.2**	234216404.9**
سال× تنش Y×A	2	4.979^{ns}	0.00084**	34.20**	6104906.0**
خطای کرت اصلی Residual a	12	1.921	0.00007	0.05	133616.7
نانو سیلیکون Nano-silicon (B)	2	7.928**	0.0112**	4.02**	118149755.8**
نانو اکسید روی Nano Zinc (C)	2	8.532**	0.0018**	1.04**	32892608.0**
سال× نانو سیلیکون Y×B	2	3.695**	0.00025*	0.27^{ns}	2717963.0**
سال × نانواکسید روی Y×C	2	0.002^{ns}	0.0007**	0.21^{ns}	1690331.1*
تنش × نانو سیلیکون A×B	4	0.939**	0.00043**	1.99**	3009533.9**
تنش × نانو اکسید روی A×C	4	0.343^{ns}	0.00151**	11.00**	1286326.3*
سال × تنش× نانو سیلیکون Y×A×B	4	0.448^{ns}	0.00017^{ns}	0.32*	695289.^{8ns}
سال× تنش×روی Y×A×C	4	0.000^{ns}	0.00004^{ns}	0.62**	592089.6^{ns}
نانو سیلیکون × نانو اکسید روی B×C	4	3.037**	0.00008^{ns}	7.70**	2349568.0**
سال× نانو سیلیکون× نانو اکسید روی Y×B×C	4	0.010^{ns}	0.00007^{ns}	0.26^{ns}	46501.3^{ns}
تنش× نانو سیلیکون× نانو اکسید روی A×B×C	8	0.056*	0.00006^{ns}	0.035^{ns}	206152.0^{ns}
سال×تنش×نانو سیلیکون× نانو اکسید روی Y×A×B×C	8	0.015^{ns}	0.00005^{ns}	0.08^{ns}	648406.0^{ns}
خطا ی آزمایش Residual	144	0.221	0.00007	0.124	388484.4
ضریب تغییرات CV (%)	-	9.2	8.1	7.7	6.3

*,** و ns: معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد، ۱ درصد و عدم تفاوت معنادار

*,** and ^{ns}: significance at the probability level of 5%, 1% and no significant difference

نانوسیلیکون یا نانو اکسید روی می‌توانند تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی، مانند تنش خشکی، شوری، سرما و گرما را بهبود بخشد. این نانوماده باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان می‌شود و به آنها کمک می‌کند تا با تنش‌های محیطی سخت‌تر مواجه شوند(Sultana *et al.*, 2016). استفاده از نانوسیلیکون یا نانو اکسید روی منجر به تنظیم فعالیت فیزیولوژیکی گیاهان می‌شوند که می‌تواند مقاومت به تنش خشکی را افزایش دهد. این نانو ماده باعث افزایش سیستم‌های

آنتی‌استرس در گیاهان می‌شود و فعالیت آنزیم‌ها را بهبود می‌بخشد. این تغییرات فیزیولوژیکی بهبود عملکرد بیولوژیک گیاهان را تحت شرایط استرس بهبود می‌دهد (Zabet *et al.*, 2015; Sultana *et al.*, 2016). با توجه به مطالب فوق، نانوسیلیکون می‌تواند بهبودهای قابل توجهی در عملکرد بیولوژیک گیاهان داشته باشد و در تحقق اهداف کشاورزی و افزایش عملکرد محصولات گیاهی مؤثر باشد. استفاده از نانواکسید روی باعث افزایش رشد و توسعه گیاهان می‌شود. این نانوماده موجب افزایش فعالیت هورمون‌های رشد و تنظیم کننده‌های جهش ژنتیکی در گیاهان می‌شود، که در نتیجه باعث افزایش عملکرد بیولوژیک آنها می‌شود (Ma *et al.*, 2017; Dimkpa *et al.*, 2019).

درصد پروتئین

بیشترین درصد پروتئین دانه در تیمار عدم تنش خشکی و مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۰/۷۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۸/۲ درصد حاصل شد ولی بین این تیمار با تیمار عدم تنش خشکی و مصرف ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی اختلاف معناداری وجود نداشت. کمترین مقدار نیز در تیمار تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی به دست آمد. با افزایش شدت تنش به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی موجب افزایش این شاخص شد (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه تنش خشکی، نانوسیلیکون و نانوروی بر پروتئین دانه و کارایی مصرف روی در سویا

Table 5- Comparison of the average triple interaction effect of drought stress, nanosilicon and nanozinc on seed protein and ZUE in soybeans

تنش خشکی Drought stress (percentage of field capacity)	نانوسیلیکون Nanosilicon ($g.L^{-1}$)	نانواکسید روی Nano zinc oxide ($g.L^{-1}$)	پروتئین دانه Protein (%)	کارایی مصرف روی ZUE ($kg.kg^{-1}$)
50	0	0	7.03 ^{e}	492.8 ^{e}
		0.75	8.63 $^{a-d}$	168.6 $^{i-m}$
		1.5	7.73 ^{cde}	105.8 ^{m}
	0.8	0	7.71 ^{cde}	646.4 ^{d}
		0.75	8.07 $^{a-e}$	196.6 $^{h-k}$
		1.5	8.24 $^{a-e}$	121.8 ^{lm}
	1.6	0	7.71 ^{cde}	667.7 ^{cd}
		0.75	8.06 $^{a-e}$	203.1 $^{g-j}$
		1.5	8.24 $^{a-e}$	125.7 ^{lm}
75	0	0	7.57 ^{cde}	626.6 ^{d}
		0.75	8.50 $^{a-d}$	210.6 $^{g-j}$
		1.5	7.63 ^{cde}	131.1 ^{klm}
	0.8	0	8.27 $^{a-e}$	870.9 ^{b}
		0.75	8.06 $^{a-e}$	251.8 ^{fgh}
		1.5	8.72 $^{a-d}$	150.2 $^{j-m}$
	1.6	0	8.28 $^{a-e}$	943.7 ^{a}
		0.75	8.07 $^{a-e}$	266.6 ^{fg}
		1.5	8.72 $^{a-d}$	165.7 $^{i-m}$
100	0	0	7.45 ^{de}	713.5 ^{c}
		0.75	7.67 ^{cde}	231.8 $^{f-i}$
		1.5	7.85 ^{cde}	152.1 $^{j-m}$
	0.8	0	8.02 $^{b-e}$	948.7 ^{a}
		0.75	8.65 $^{a-d}$	283.2 ^{f}
		1.5	9.36 ^{ab}	177.3 ^{ijkl}
	1.6	0	9.44 ^{cde}	976.2 ^{a}
		0.75	8.94 ^{abc}	296.1 ^{f}
		1.5	8.42 $^{a-e}$	186.8 $^{h-l}$

ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف آماری معناداری توسط آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند

Columns with common letters do not have a statistically significant difference by LSD test at the level of 5٪

سنتز پروتئین یک فرایند متابولیکی اساسی است که موجب بهبود تحمل و سازگاری فیزیولوژیکی به خشکی در گیاه می‌شود (Ashkiani *et al.*, 2020; Ahanger *et al.*, 2020). میزان پروتئین کل که بسیاری از آنزیم‌های دفاعی را شامل می‌شود در هنگام وقوع تنش افزایش می‌یابد که نشانگر فعال شدن مکانیسم‌های تحمل است (Candan *et al.*, 2018; Alam *et al.*, 2020). تغییر در میزان غلظت پروتئین‌های کل گیاه در اثر تخریب و یا سنتز برخی از پروتئین‌های مخصوص مقابله با تنش و متابولیسم‌های دیگر انجام می‌شود (Raeisi Sadati *et al.*, 2022). افزایش غلظت پروتئین‌های کل، تغییرات بیان ژن‌ها و تغییر در ساختار بافت‌های گیاهی را نشان می‌دهد (Al Murad *et al.*, 2020). در مطالعات انجام شده افزایش محتوای پروتئین کل در پنبه تحت تنش شوری گزارش شد (Candan *et al.*, 2018; Alam *et al.*, 2020). می‌توان گفت افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان تحت تنش کمبود آب، احتمالا مانع از تجزیه پروتئین‌های گیاهی در تنش خشکی شده است (Al Murad *et al.*, 2020).

استفاده از نانوسیلیکون و نانواکسید روی می‌تواند باعث افزایش جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه شود. این نانومواد‌ها می‌توانند عناصر مغذی را در دسترس گیاه قرار دهند و ترکیباتی را فراهم کنند که باعث بهبود جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سایر عناصر غذایی توسط گیاه می‌شوند. این عناصر غذایی در ترکیبات پروتئینی نقش مهمی دارند و افزایش جذب آنها منجر به افزایش مقدار پروتئین در دانه‌ها می‌شود (Dimkpa *et al.*, 2020; Ahmed *et al.*, 2021).

نانواکسید روی و نانوسیلیکون می‌توانند فعالیت هورمون‌های رشد گیاه را تنظیم کنند. این نانومواد‌ها می‌توانند فعالیت هورمون‌های رشد را افزایش داده و تنظیم کننده‌های جهش ژنتیکی را فعال کنند. هورمون‌های رشد و تنظیم کننده‌های جهش ژنتیکی نقش مهمی در فرآیندهای بیولوژیکی گیاهان ایفا می‌کنند، از جمله تولید و سنتز پروتئین‌ها. بنابراین، با افزایش فعالیت هورمون‌های رشد و تنظیم کننده‌های جهش ژنتیکی، تولید پروتئین در گیاهان افزایش می‌یابد (Raeisi Sadati *et al.*, 2022). نانواکسید روی و نانوسیلیکون می‌توانند منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های ترکیب‌کننده و تنظیم کننده تولید مواد مؤثر در گیاهان شود. آنزیم‌ها نقش مهمی در فرآیند ساخت و ترکیب پروتئین‌ها در گیاه دارند. با افزایش فعالیت آنزیم‌ها، تولید پروتئین در گیاهان افزایش می‌یابد و مقدار پروتئین دانه نیز افزایش می‌یابد (Seyed Sharifi *et al.*, 2020; Kareem *et al.*, 2023).

درصد روغن

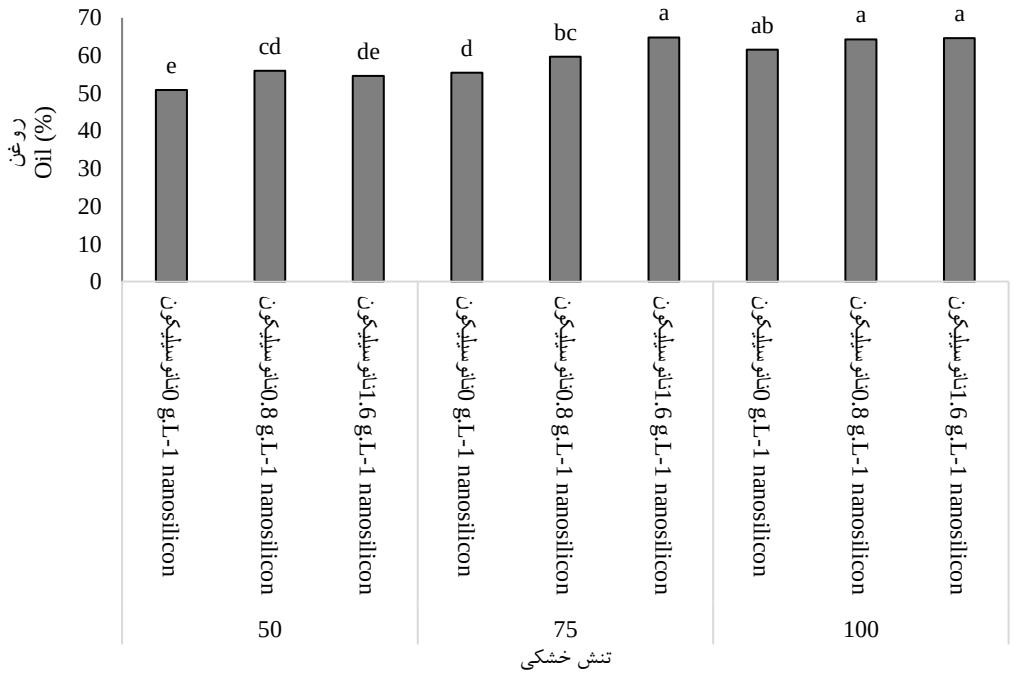
نتایج در خصوص اثر متقابل تنش خشکی و کود نانو سیلیکون نشان داد که بیشترین درصد روغن دانه در تیمار عدم تنش خشکی (۱۰۰درصد ظرفیت زراعی) و مصرف ۱/۶ گرم در لیتر نانو سیلیکون به مقدار ۵۸/۶ درصد حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری بر اساس تخلیه ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و عدم مصرف کود نانو سیلیکون به دست آمد. در تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف کود نیتروژن و به خصوص ۰/۸ گرم در لیتر نانو سیلیکون موجب افزایش این شاخص شد (شکل ۶). نتایج نشان داد که با مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانواکسید روی، روغن دانه به مقدار ۵۹/۷ درصد حاصل شد که ۱۸ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف بود (شکل ۷).

نانوسیلیکون می‌تولند تنظیم کننده‌های هورمونی رشد گیاهان را فعال کند و فعالیت آنها را افزایش دهد. هورمون‌های رشد گیاهان نقش مهمی در تنظیم فرآیندهای بیولوژیکی از جمله تولید و ذخیره روغن در دانه‌ها دارند. با افزایش فعالیت هورمون‌های رشد، تولید روغن در دانه‌ها افزایش می‌یابد (Dimkpa *et al.*, 2020; Ahmed *et al.*, 2021). نانوسیلیکون می‌تواند فعالیت آنزیم‌های مؤثر در سنتز روغن در گیاهان را افزایش دهد. این آنزیم‌ها نقش اساسی در تولید و ذخیره روغن دانه‌ها دارند. با افزایش فعالیت آنزیم‌ها، سنتز روغن در دانه‌ها افزایش می‌یابد و مقدار روغن در دانه‌ها افزایش می‌یابد (Seyed Sharifi *et al.*, 2020; Kareem *et al.*, 2023).

. نانوسیلیکون می‌تواند باعث بهبود جذب عناصر غذایی، از جمله عناصر مورد نیاز برای سنتز روغن در گیاهان شود. این نانوماده می‌تواند عناصر غذایی را در دسترس گیاه قرار دهد و فرآیندهای متابولیکی مرتبط با سنتز روغن را تسهیل کند. با افزایش جذب عناصر غذایی، مقدار مواد مورد نیاز برای تولید روغن در گیاهان افزایش می‌یابد.(Tondey *et al.*, 2021)

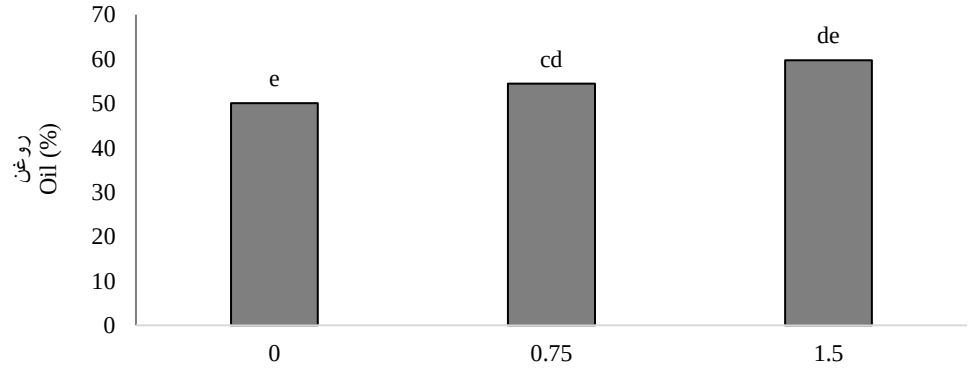
کارایی مصرف آب آبیاری

نتایج در خصوص اثر متقابل تنش خشکی و نانو اکسید روی نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری در تیمار تنش خشکی شدید و مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۱/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار آبیاری نرمال و عدم مصرف نانو اکسید روی به دست آمد. در سطوح تنش خشکی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مصرف نانو اکسید روی و موجب افزایش این شاخص شد (شکل ۸). نتایج در خصوص اثر متقابل کود نانو سیلیکون و نانو اکسید روی نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری در تیمار مصرف ۱/۶ گرم در لیتر کود نانو سیلیکون و ۱/۵ گرم بر لیتر نانو اکسید روی به مقدار ۱/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب حاصل شد. کمترین مقدار نیز در تیمار عدم مصرف نانو سیلیکون و نانو اکسید روی به دست آمد. با افزایش مصرف کود نانو سیلیکون پاسخ به نانو اکسید روی نیز افزایش یافت (شکل ۹).



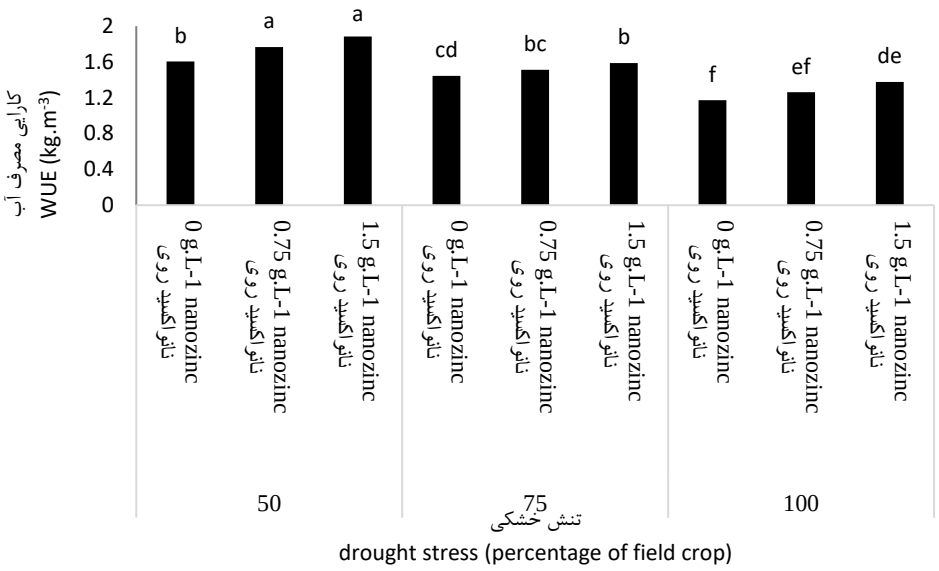
شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانوسیلیکون بر روغن

Figure 6- Comparison of the average interaction effect of nanosilicon and nanosilicon on oil



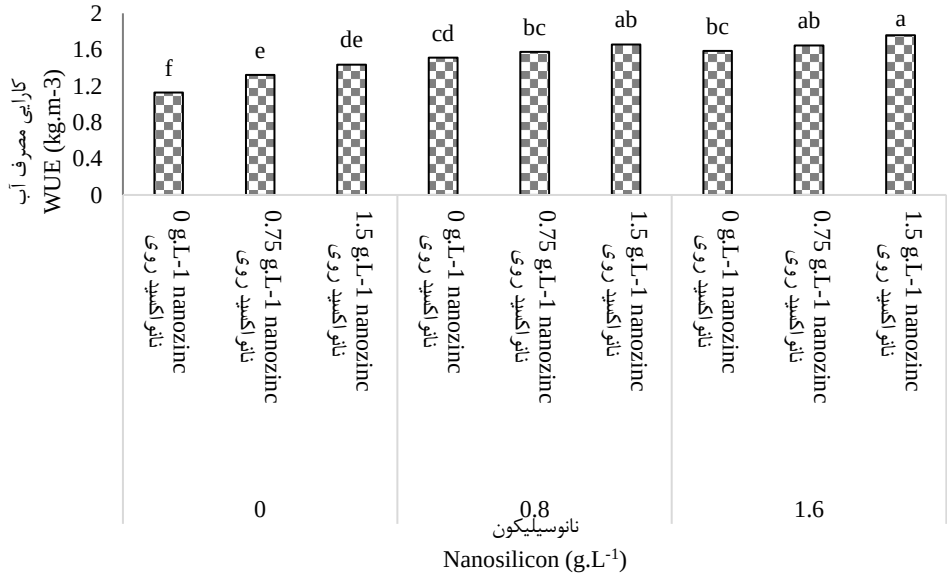
شکل ۷- مقایسه میانگین اثر اصلی نانواکسید روی بر عملکرد روغن

Figure 7- Comparison of the average main effect of nano zinc oxide on oil



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانواکسید روی بر کارایی مصرف آب

Figure 8- Comparison of the average interaction effect of drought stress and nanozinc oxide on WUE



شکل ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوسیلیکون و نانواکسید روی بر کارایی مصرف آب

Figure 9- Comparison of the average interaction effect of nanosilicon and nanozinc oxide on WUE

نانوسیلیکون باعث افزایش ترمیم سریع میزان ضریب تبخیر و تعرق گیاهان در شرایط خشکی شدید می‌شود، که در نتیجه به کاهش مصرف آب توسط گیاهان منجر می‌شود (Seroka *et al.*, 2022). استفاده از نانوسیلیکون در گیاهان ذرت توانست تأثیر مثبتی بر رشد و توسعه گیاهان تحت تنش خشکی داشته باشد. نانوسیلیکون باعث افزایش محتوای آبی در گیاهان، بهبود حفظ رطوبت خاک و کاهش تبخیر آب از سطح برگ‌ها می‌شود که باعث افزایش کارایی مصرف آب در گیاهان می‌شود (Azarfam *et al.*, 2021; Umair Hassan *et al.*, 2020; Seroka *et al.*, 2022). استفاده از نانوسیلیکون در گیاهان عدس می‌تواند بهبود قابل توجهی در کارایی مصرف آب داشت. نانوسیلیکون باعث افزایش محتوای رطوبتی خاک و مقاومت گیاه در برابر تبخیر آب می‌شود، همچنین تنظیم کننده‌های هورمونی رشد گیاهان را فعال کرده و باعث افزایش استفاده بهینه از آب توسط گیاه می‌شود.(Benslima *et al.*, 2021) .

یک مطالعه نشان داد که استفاده از نانواکسید روی در

گیاهان گندم می‌تواند بهبود قابل توجهی در کارایی مصرف آب داشته باشد. نانواکسید روی باعث افزایش ترمیم سریع میزان ضریب تبخیر و تعرق گیاهان در شرایط خشکی می‌شود، که منجر به کاهش مصرف آب توسط گیاهان می‌شود و بهبود در مقاومت گیاهان به تنش خشکی را فراهم می‌کند (Tondey *et al.*, 2021; Hassan *et al.*, 2020). نانواکسید روی باعث افزایش محتوای رطوبتی خاک و مقاومت گیاه در برابر تبخیر آب می‌شود، که باعث افزایش کارایی مصرف آب در گیاهان تحت تنش خشکی می‌شود (Noohpisheh *et al.*, 2021). نانواکسید روی باعث افزایش ترمیم سریع میزان ضریب تبخیر و تعرق گیاهان در شرایط خشکی می‌شود، که به کاهش مصرف آب توسط گیاهان و افزایش مقاومت آنها در مقابل تنش خشکی منجر می‌شود (Tondey *et al.*, 2021; Hassan *et al.*, 2020).

نتیجه‌گیری کلی

بطور کلی نتایج نشان داد که با استفاده از ۱/۶ گرم در لیتر نانوسیلیکون یا مصرف ۱/۵ گرم بر لیتر نانواکسید روی در گیاه سویا، می‌توان به طور مؤثری عملکرد دانه را تحت شرایط تنش خشکی افزایش داد و مقادیر روغن و پروتئین را نیز افزایش داد. احتمالا نانوسیلیکون و نانواکسید روی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های مؤثر در سنتز روغن و پروتئین در گیاه سویا می‌شوند. این نانومواد تنظیم کننده‌های هورمونی رشد گیاه را فعال می‌کنند و عواملی مانند جذب بهتر عناصر غذایی و کاهش تبخیر آب را بهبود می‌بخشند، که همگی به افزایش عملکرد دانه و افزایش مقدار روغن و پروتئین در گیاه سویا کمک می‌کنند. به طور خلاصه، استفاده از نانوسیلیکون و نانواکسید روی در گیاه سویا بهبود قابل توجهی در عملکرد دانه و افزایش مقادیر روغن و پروتئین این گیاه به ارمغان می‌آورد. این نتایج می‌توانند در بهبود تولید و کیفیت محصولات مبتنی بر گیاه سویا مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از سایر مقادیر نانوسیلیکون یا نانواکسید روی استفاده گردد تا بهترین مقدار را شناسایی کرد، همچنین از سایر نانومواد نیز استفاده شود تا اثر آن‌ها با نانوسیلیکون یا نانواکسید روی مقایسه گردد.

References

Abdelaal, K.A., Mazrou, Y.S. and Hafez, Y.M., 2020. Silicon foliar application mitigates salt stress in sweet pepper plants by enhancing water status, photosynthesis, antioxidant enzyme activity and fruit yield. *Plants*, *9*(6), 733. https://doi.org/10.3390/plants9060733

Ahanger, M.A., Bhat, J.A., Siddiqui, M.H., Rinklebe, J. and Ahmad, P., 2020. Integration of silicon and secondary metabolites in plants: a significant association in stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*, *71*, pp.6758–6774. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa291

Ahmed, T., Noman, M., Manzoor, N., Shahid, M., Abdullah, M. and Ali, L., 2021. Nanoparticle-based amelioration of drought stress and cadmium toxicity in rice via triggering the stress responsive genetic mechanisms and nutrient acquisition. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *209*, 111829. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111829

Al Murad, M., Khan, A.L. and Muneer, S., 2020. Silicon in horticultural crops: cross-talk, signaling, and tolerance mechanism under salinity stress. *Plants*, *9*(4), 460. https://doi.org/10.3390/plants9040460

Alam, A., Hariyanto, B., Ullah, H., Salin, K.R. and Datta, A., 2021. Effects of silicon on growth, yield and fruit quality of cantaloupe under drought stress. *Silicon*, *13*, pp.3153–3162. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00673-1

Alamri, S., Hu, Y., Mukherjee, S., Aftab, T., Fahad, S. and Raza, A., 2020. Silicon-induced postponement of leaf senescence is accompanied by modulation of antioxidative defense and ion homeostasis in mustard (*Brassica*

juncea) seedlings exposed to salinity and drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry, 157*, pp.47–59. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.038

Aqaei, P., Weisany, W., Diyanat, M., Razmi, J. and Struik, P.C., 2020. Response of maize (*Zea mays* L.) to potassium nano-silica application under drought stress. *Journal of Plant Nutrition, 43*(8), pp.1205–1216. https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1727508

Arif, Y., Singh, P., Bajguz, A., Alam, P. and Hayat, S., 2021. Silicon mediated abiotic stress tolerance in plants using physio-biochemical, omic approach and cross-talk with phytohormones. *Plant Physiology and Biochemistry, 166*, pp.278–289. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.002

Ashkiani, A., Sayfzadeh, S., Shirani Rad, A.H., Valadabadi, A. and Hadidi Masouleh, E., 2020. Effects of foliar zinc application on yield and oil quality of rapeseed genotypes under drought stress. *Journal of Plant Nutrition, 43*(11), pp.1594–1603. https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1739299

Azarfam, S., Nadian, H., Moezzi, A. and Gholami, A., 2020. Effect of silicon on phytochemical and medicinal properties of aloe vera under cold stress. *Applied Ecology and Environmental Research, 18*(1), pp.561–575. https://doi.org/10.15666/aeer/1801_561575

Bahamin, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M. and Behashti, S., 2021. Effect of nitrogen and phosphorus fertilizers on yield and nutrient efficiency indices in maize under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences, 14*(3), pp.675–690. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2020.3095.1793

Bahamin, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M. and Beheshti, S., 2019. Effect of biological and chemical fertilizers of nitrogen and phosphorus on quantitative and qualitative productivity of maize under drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences, 12*(1), pp.123–139. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2018.1152.1235

Banerjee, A., Singh, A., Sudarshan, M. and Roychoudhury, A., 2021. Silicon nanoparticle-pulsing mitigates fluoride stress in rice by fine-tuning the ionomic and metabolomic balance and refining agronomic traits. *Chemosphere, 262*, 127826. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127826

Basu, S. and Kumar, G., 2021. Exploring the significant contribution of silicon in regulation of cellular redox homeostasis for conferring stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry, 166*, pp.393–404. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.005

Behera, S.K., Shukla, A.K., Singh, M.V., Wanjari, R.H. and Singh, P., 2015. Yield and zinc, copper, manganese and iron concentration in maize (*Zea mays* L.) grown on vertisol as influenced by zinc application from various zinc fertilizers. *Journal of Plant Nutrition, 38*(10), pp.1544–1557. https://doi.org/10.1080/01904167.2014.992537

Benslima, W., Zorrig, W., Bagues, M., Abdelly, C. and Hafsi, C., 2021. Silicon mitigates potassium deficiency in Hordeum vulgare by improving growth and photosynthetic activity but not through polyphenol accumulation and the related antioxidant potential. *Soil and Plant Analysis, 52*(7), pp.689–706. https://doi.org/10.1007/s11104-021-05188-1

Bhardwaj, S. and Kapoor, D., 2021. Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. *Plant Physiology and Biochemistry, 166*, pp.1044–1053. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.027

Bijanzadeh, E., Barati, V. and Egan, T. P., 2022. Foliar application of sodium silicate mitigates drought stressed leaf structure in corn (*Zea mays* L.). *South African Journal of Botany, 147*, pp.8–17. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.032

Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, *72*(1-2), pp.248–254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3

Candan, N., Cakmak, I. and Ozturk, L., 2018. Zinc-biofortified seeds improved seedling growth under zinc deficiency and drought stress in durum wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 181*(3), pp.388–395. https://doi.org/10.1002/jpln.201800014

Cao, B.L., Ma, Q. and Xu, K., 2020. Silicon restrains drought-induced ROS accumulation by promoting energy dissipation in leaves of tomato. *Protoplasma, 257*, pp.537–547. https://doi.org/10.1007/s00709-019-01449-0

Chattha, M.U., Hassan, M.U., Khan, I., Chattha, M.B., Mahmood, A., Nawaz, M., Subhani, M.N., Kharal, M. and Khan, S., 2017. Biofortification of wheat cultivars to combat zinc deficiency. *Frontiers in Plant Science, 8*, 281. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00281

Coblentz, W., Akins, M., Cavadini, J. and Jokela, W., 2017. Net effects of nitrogen fertilization on the nutritive value and digestibility of oat forages. *Journal of Dairy Science, 100*(3), pp.1739–1750. https://doi.org/10.3168/jds.2016-12027

Dimkpa, C.O., Andrews, J., Fugice, J., Singh, U., Bindraban, P.S. and Elmer, W.H., 2020. Facile coating of urea with low-dose ZnO nanoparticles promotes wheat performance and enhances Zn uptake under drought stress. *Frontiers in Plant Science, 11*, 168. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00168

Dimkpa, C.O., Singh, U., Bindraban, P.S., Elmer, W.H., Gardea-Torresdey, J.L. and White, J.C., 2019. Zinc oxide nanoparticles alleviate drought-induced alterations in sorghum performance, nutrient acquisition, and grain fortification. *Science of the Total Environment, 688*, pp.926–934. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.392

Fathi, A., Maleki, A. and Naseri, R., 2022. A review of the effects of drought stress on plants and some effective strategies in crop management. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, pp.1–29. [In Persian]. https://doi.org/10.30495/iper.2022.1944163.1744

Ghadirnezhad Shiade, S.R., Fathi, A., Taghavi Ghasemkheili, F., Amiri, E. and Pessarakli, M., 2023. Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches—A review. *Journal of Plant Nutrition, 46*(9), pp.2198–2230. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2105720

Ghorbanpour, M., Mohammadi, H. and Kariman, K., 2020. Nanosilicon-based recovery of barley (*Hordeum vulgare*) plants subjected to drought stress. *Environmental Science: Nano, 7*(2), pp.443–461. https://doi.org/10.1039/C9EN00973F

Hassan, A.Z., Mahmoud, A.W.M., Turky, G.M. and Safwat, G., 2020. Rice husk derived biochar as smart material loading nano nutrients and microorganisms. *Bulgarian Journal of Agricultural Science, 26*, pp.309–322. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163968

Ji, Y., Yue, L., Cao, X., Chen, F., Li, J., Zhang, J. and Xing, B., 2023. Carbon dots promoted soybean photosynthesis and amino acid biosynthesis under drought stress: Reactive oxygen species scavenging and nitrogen metabolism. *Science of The Total Environment, 856*, 159125. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159125

Kareem, H.A., Adeel, M., Azeem, M., Ahmad, M.A., Shakoor, N., Hassan, M.U. and Wang, Q., 2023. Antagonistic impact on cadmium stress in alfalfa supplemented with nano-zinc oxide and biochar via upregulating metal detoxification. *Journal of Hazardous Materials, 443*, 130309. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159125

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., Huang, X., Xie, Y. and Guo, T., 2017. Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. *Frontiers in Plant Science, 8*, 860. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00860

Maleki, A., Fathi, A. and Bahamin, S., 2020. The effect of gibberellin hormone on yield, growth indices, and biochemical traits of corn (*Zea mays* L.) under drought stress. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research, 15*(59), pp.1–16. [In Persian]. https://doi.org/10.1001.1.76712423.1399.15.59.1.8

Nelson, D. and Sommers, L.E., 1983. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties* (Vol. 9, pp.539–579). https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29

Noohpisheh, Z., Amiri, H., Mohammadi, A. and Farhadi, S., 2021. Effect of the foliar application of zinc oxide nanoparticles on some biochemical and physiological parameters of *Trigonella foenum-graecum* under salinity stress. *Plant Biosystems, 155*, pp.267–280. https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1739160

Raeisi Sadati, S.Y., Jahanbakhsh Godehkahriz, S., Ebadi, A. and Sedghi, M., 2022. Zinc oxide nanoparticles enhance drought tolerance in wheat via physio-biochemical changes and stress genes expression. *Iranian Journal of Biotechnology, 20*(1), 3027. [In Persian]. https://doi.org/10.30498/ijb.2021.280711.3027

Seroka, N.S., Taziwa, R.T. and Khotseng, L., 2022. Extraction and synthesis of silicon nanoparticles (SiNPs) from sugarcane bagasse ash: A mini-review. *Applied Sciences, 12*(5), 2310. https://doi.org/10.3390/app12052310

Seyed Sharifi, R., Khalilzadeh, R., Pirzad, A. and Anwar, S., 2020. Effects of biofertilizers and nano zinc-iron oxide on yield and physicochemical properties of wheat under water deficit conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 51*(19), pp.2511–2524. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1845350

Shi, S., Xu, X., Feng, J., Ren, Y., Bai, X. and Xia, X., 2023. Preparation of NH3- and H2S-sensitive intelligent pH indicator film from sodium alginate/black soybean seed coat anthocyanins and its use in monitoring meat freshness. *Food Packaging and Shelf Life, 35*, 100994. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100994

Sultana, S., Naser, H.Á., Shil, N., Akhter, S. and Begum, R., 2016. Effect of foliar application of zinc on yield of wheat grown by avoiding irrigation at different growth stages. *Bangladesh Journal of Agricultural Research, 41*(2), pp.323–334. https://doi.org/10.3329/bjar.v41i2.28234

Taheri, F., Maleki, A. and Fathi, A., 2021. Study of different levels of nitrogen fertilizer and irrigation on quantitative and qualitative characteristics of quinoa grain yield. *Crop Physiology Journal, 13*(50), pp.135–149. [In Persian]. https://doi.org/10.22034/CSRAR.2023.353966.1261

Tondey, M., Kalia, A., Singh, A., Dheri, G.S., Taggar, M.S., Nepovimova, E. and Kuca, K., 2021. Seed priming and coating by nano-scale zinc oxide particles improved vegetative growth, yield and quality of fodder maize (*Zea mays*). *Agronomy, 11*(4), 729. https://doi.org/10.3390/agronomy11040729

Umair Hassan, M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., Nawaz, M., Rasheed, A., Afzal, A. and Liu, Y., 2020. The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture, 10*(9), 396. https://doi.org/10.3390/antiox12040854

Yaniv, Z., Shabelsky, E. and Schafferman, D., 1999. Colocynth: potential arid land oilseed from an ancient cucurbit. In *Perspectives on New Crops and New Uses* (pp.257–261). ASHS Press. https://doi.org/10.3390/agronomy11040729

Zabet, M., Bahamin, S., Ghoreishi, S., Sadeghi, H. and Moosavi, S., 2015. Effect of deficit irrigation and nitrogen fertilizer on quantitative yield of aboveground part of forage pear millet (*Pennisetum glaucum*) in Birjand. *Environmental Stresses in Crop Sciences, 7*(2), pp.187–194. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/ESCS.2015.175