

Research Article

Interactive Effects of Deficit Irrigation and Silicon Application on Yield Components, Water Use Efficiency, and Bio-Concentration Factor of Sodium and Boron in Wheat

Jahanshah Saleh¹ , Akbar Soleimanzadeh² , Hasan Haghighatnia³ , Amir Nikakhtar⁴ 

1-Corresponding Author, Department of Soil and Water Research, Hormozgan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Bandar Abbas, Iran. E-mail: jsaleh11@yahoo.com

2-Department of Soil and Water Research, Hormozgan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Bandar Abbas, Iran. E-mail: asoliemanzadeh@yahoo.com

3-Department of Soil and Water Research, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Darab, Iran. E-mail: hasan.haghighatnia@yahoo.com

4-Department of Soil and Water Research, Hormozgan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Bandar Abbas, Iran. E-mail: amirnik1367@gmail.com

Received: August 2, 2026
Accepted: September 22, 2026

Revised: September 20, 2026
Published: September 22, 2026

Extended Abstract

Background and Objective

Drought stress is one of the most important environmental stresses, always have been a serious concern in arid and semi-arid areas. Wheat is the most important cereal, being main food of most people among arid and semi-arid regions. This crop is relatively sensitive to water deficiency in a way that drought stress could result in a significant decrease in yield and yield components. Water stress also may lead to accumulate more sodium and boron in wheat grain. Thus, it would be a great success to achieve the sustainable production and food security, if we could introduce some approaches effective on mitigating undesirable effects of drought on yield and other plant responses in wheat. Some nutrients including potassium, zinc and silicon have been shown to play such a role in plants. Silicon is one of the plant beneficial elements that is essential for some plants including rice, wheat, corn, tomato and strawberry. Numerous studies showed the influence of silicon fertilization on alleviating the adverse effects of deficit irrigation in wheat. Hence, the present study was aimed to evaluate the effects of silicon supplementation on yield components, water use efficiency and repletion of sodium and boron in drought-stressed wheat plants in Hormozgan province.

Materials and Methods

This research was conducted as split plot in the manner of random complete blocks design arranged in a factorial style. There were 12 treatments and three replications on Chamran variety of wheat plants under drought stress in Haji-Abad agricultural research station in Hormozgan province during two years. Experimental plots were 3×3 meters and the soil texture was clay loam. The treatments consisted of drought stress in two levels (60% and 100% of plant water requirement), soil application of potassium silicate in two levels (0 and 20 kg ha⁻¹ during stem elongation), and foliar application of potassium silicate in three levels (0, 2.5 and 5 kg ha⁻¹ during stem elongation, heading and dough development). All other plant nutrients were supplied uniformly for all treatments on the basis of soil and water analysis results and considering the plant phenology. Irrigation in all plots was done through drip-tape system. Fertilization and irrigation operations were accomplished consulting with related experts. Weed control was done both chemically and manually. Pest management operations was

carried out using common pesticides under the supervision of a plant protection specialist. The evaluated plant responses were comprised of grain yield, biological yield, 1000 grain weight, water use efficiency, and translocation factor as well as bio-concentration factor calculated for boron and sodium in wheat grain.

Results

Wheat plants under drought stress (60% water requirement) showed a considerable decline in yield components as a result of the loss of photosynthesis function. In spite of the significant decrease of yield components in deficit irrigated plants, water use efficiency (WUE) increased in these treatments, representing higher grain yield production per unit of water consumption. Furthermore, remarked enhancement of sodium and boron accumulation in grains was observed in plants grown under water stress. It means that water stress resulted in a remarked increase in bio-concentration factor and translocation factor of these two elements in grains. On the other hand, soil application of 20 kg ha⁻¹ potassium silicate caused an observable improve in yield components and WUE, either in drought stressed or control treatments. In addition, silicon foliar spray in both levels (2.5 and 5 kg ha⁻¹ potassium silicate) showed desired effects on yield components and WUE in all treatments, as well. Silicon supplementation also caused a significant drop in bio-concentration factor and translocation factor of sodium and boron in grains. Statistical comparison between silicon nutrition methods revealed that soil application was absolutely more effective than foliar spray.

Conclusions

Overall, silicon nutrition caused a significant recovery in yield components and water use efficiency of wheat plants that were damaged due to drought stress. Grain sodium and boron accumulation in deficit-irrigated plants was also ameliorated in the treatments received potassium silicate either through soil application or foliar spray. In this regard, soil application appeared to be statistically more effective in comparison with foliar spray method. Therefore, based on the intensive influence of silicon on alleviating the adverse consequences of water stress on wheat, soil application of 20 kg potassium silicate per hectare is highly recommended in wheat farms under drought stress, specially via soil application method.

Keywords: Drought stress, Foliar spraying, Plant nutrition, Soil application, Translocation factor.

Author Contributions

Conceptualization, J.S. and H.H.; methodology, J.S. and A.S.; software, J.S. and A.S.; validation, J.S. and H.H.; formal analysis, J.S. and A.S.; investigation, J.S. and A.N.; resources, J.S. and A.N.; data curation, J.S. and A.N.; writing-original draft preparation, J.S. and A.S.; writing-review and editing, J.S. and H.H.; visualization, J.S. and A.N.; supervision, J.S. and H.H.; project administration, J.S. and H.H.; funding acquisition, A.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

This paper is published as a part of a scientific project supported by Hormozgan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Bandar Abbas, Iran. The authors are thankful to the Soil and Water Research Institute of Iran for all supports.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Saleh, J., Soleimanzadeh, A., Haghighatnia, H., & Nikakhtar, A. (2026). Interactive effects of deficit irrigation and silicon application on yield components, water use efficiency, and bio-concentration factor of sodium and boron in wheat. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(3), 75-95.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.73256.1052>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License.



Copyright © 2026 The Authors.

Publisher: The University of
Tabriz

OPEN  ACCESS
JOURNALS



اثر متقابل کم آبیاری و کاربرد سیلیسیم بر اجزای عملکرد، کارایی مصرف آب و تجمع زیستی بور و سدیم در دانه گندم

جهانشاه صالح^۱✉، اکبر سلیمان زاده^۲، حسن حقیقت‌نیا^۳، امیر نیک‌اختر^۴

- ۱- نویسنده مسئول، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی هرمزگان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، ایران. رایانامه: jsaleh11@yahoo.com
- ۲- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی هرمزگان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، ایران. رایانامه: asoliamanzadeh@yahoo.com
- ۳- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، داراب، ایران. رایانامه: hasan.haghighatnia@yahoo.com
- ۴- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی هرمزگان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، ایران. رایانامه: amirnik1367@gmail.com

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

چکیده

خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که می‌تواند بر عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) و کیفیت آن که مهم‌ترین گیاه تیره غلات و غذای غالب مردم است، تأثیرگذار باشد. بنابراین، معرفی راهکارهای کاهش اثرهای منفی خشکی بر عملکرد و کیفیت گندم، گام بزرگی در مسیر تولید پایدار و امنیت غذایی خواهد بود. یکی از راهکارهای تعدیل اثرهای تنش خشکی بر گندم، مصرف عنصرهایی نظیر پتاسیم، روی و سیلیسیم است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر پتاسیم سیلیکات بر اجزای عملکرد، کارایی مصرف آب و تجمع زیستی بور و سدیم در دانه گندم رقم چمران در شرایط تنش خشکی، به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۲ تیمار و ۳ تکرار طی دو سال در ایستگاه تحقیقات کشاورزی حاجی‌آباد هرمزگان اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل آبیاری در دو سطح (۶۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی)، مصرف خاکی پتاسیم سیلیکات در دو سطح (صفر و ۲۰ کیلوگرم بر هکتار) و محلول‌پاشی پتاسیم سیلیکات در سه سطح (صفر، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم بر هکتار) بودند. آبیاری به‌صورت قطره‌ای نواری انجام شد. عنصرهای غذایی مورد نیاز گندم بر اساس تجزیه خاک به صورت یکسان در همه تیمارها مصرف شدند. نتایج نشان داد که اعمال تنش کم‌آبی (۶۰ درصد نیاز آبی) از یک سو باعث کاهش عملکرد دانه، محصول زیست‌توده و وزن هزار دانه گندم و افزایش کارایی مصرف آب و تشدید انتقال سدیم و بور به دانه گندم شد. در هر دو شرایط تنش کم‌آبی و آبیاری مطلوب، مصرف پتاسیم سیلیکات موجب بهبود اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب شد. همچنین، مصرف پتاسیم سیلیکات باعث کاهش فاکتور تجمع زیستی سدیم و بور در دانه گندم شد و اثر مصرف خاکی آن بیشتر از محلول‌پاشی بود. بنابراین، هم در شرایط کم‌آبی و هم در آبیاری نرمال، مصرف خاکی ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات در هکتار برای گیاه گندم توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تغذیه گیاه، تنش خشکی، فاکتور انتقال، محلول‌پاشی، مصرف خاکی.

استناد به این مقاله: صالح، ج.، سلیمان‌زاده، ا.، حقیقت‌نیا، ح. و نیک‌اختر، ا. (۱۴۰۵). اثر متقابل کم‌آبیاری و کاربرد سیلیسیم بر اجزای عملکرد، کارایی مصرف آب و تجمع زیستی بور و سدیم در دانه گندم. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۶(۳)، ۷۵-۹۵.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.73256.1052>

مقدمه

در دهه‌های اخیر، برنامه‌های زیادی برای خودکفایی گندم در کشور تعریف و اجرا شده و سیاست وزارت جهادکشاورزی نیز بر مبنای دستیابی به خودکفایی تولید گندم، ارتقای کیفیت دانه، افزایش تولید در واحد سطح و در عین حال، کاهش تقاضای مصرف آب تعریف شده است (Shahmoradi et al., 2025). در راستای افزایش تولید در واحد سطح و ارتقای کیفیت محصول گندم، در کنار استفاده از ارقام پرمحصول، سایر عملیات به‌زراعی به‌ویژه مدیریت بهینه مصرف کود و آب نیز بایستی به‌طور جدی مد نظر قرار گیرد (Chang et al., 2026).

تنش خشکی را می‌توان یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین تنش‌های غیرزیستی محدود کننده رشد و عملکرد گیاهان دانست. خشکی تنش چند وجهی است و تأثیر خود را در ابعاد مختلف نشان می‌دهد. در بعد گیاه، واکنش به تنش خشکی بسیار پیچیده بوده و برآیند اثرهای تنش، ناشی از کمبود آب قابل‌استفاده ریشه و واکنش‌های فیزیولوژیکی گیاه است (Zhao et al., 2024). از مهم‌ترین تغییرات فیزیولوژی گیاهی بر اثر تنش خشکی می‌توان به القای زیست‌ساخت اتیلن و افزایش غلظت آن در گیاه تا سطح تنش‌زا اشاره کرد. این غلظت از اتیلن موجب کوتاه شدن دوره رشد رویشی و در نهایت، کاهش عملکرد گیاه خواهد شد. با افزایش غلظت اتیلن ناشی از تنش خشکی، عملکرد دانه گندم می‌تواند تا ۳۰ درصد کاهش یابد. ACC (۱-آمینوسیکلوپروپان-۱-کربوکسیلیک اسید) پیش ماده اصلی برای ساخت اتیلن می‌باشد و بررسی‌ها نشان داده است که تنش کم‌آبی در گیاهان منجر به افزایش ساخت ACC و در نتیجه، افزایش ساخت اتیلن می‌شود (Sharma et al., 2020). ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2025) نیز مشاهده کردند که تنش خشکی باعث القای ساخت اتیلن، کاهش فعالیت برخی از آنزیم‌ها نظیر گلوکاتایون رداکتاز و کاهش مقدار نسبی آب برگ‌ها می‌شود.

سیلیسیم با عدد اتمی ۱۴، پس از اکسیژن فراوان‌ترین عنصر لایه خارجی کره زمین است (Sposito, 1989) و غلظت آن در محلول خاک بین ۰/۰۱ تا ۱/۹۹ میلی‌مول در لیتر (معادل ۱/۱۲ تا ۲۲۳/۵۷ میلی گرم سیلیسیم در کیلوگرم خاک) نوسان می‌کند (Karathanasis, 2002). مقدار این عنصر در گیاه نیز از ۰/۲ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در هر گرم ماده خشک گیاه گزارش شده است (Mengel & Kirkby, 2001). میزان برداشت سیلیسیم خاک به‌وسیله گیاه معمولاً زیاد است. مثلاً با کشت گندم، بین ۵۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم سیلیسیم از خاک یک هکتار مزرعه خارج می‌شود (Barker & Pilbeam, 2015). بررسی‌ها نشان داده‌است که سیلیسیم در افزایش عملکرد و بهبود کیفیت بسیاری از گیاهان، به‌ویژه در مواقع تنش‌های زیستی و غیرزیستی، نقش مهمی دارد (Saleh et al., 2018). این عنصر با کاهش مقدار عامل‌های تنش اکسیداتیو نظیر هیدروژن پراکسید، تحمل گیاه به تنش خشکی را افزایش می‌دهد (Haddad & Mokhlesian, 2016; Teixeira et al., 2022). محلول‌پاشی سیلیسیم باعث رسوب این عنصر در دیواره یاخته‌ها شده و با تشکیل کمپلکس‌های آلی، پایداری دیواره یاخته‌ها و انسجام غشاهای زیستی را بهبود می‌بخشد. سیلیسیم ضمن کاهش تعرق و جلوگیری از تحقق مسیرهای فرعی تعرق، می‌تواند با رسوب در برگ‌های گیاه باعث افت قابل‌ملاحظه میزان تعرق شود و با افزایش ضخامت کوتیکول، موجب کاهش خروج آب از کوتیکول و در نتیجه، بهبود وضعیت آبی گیاه و افزایش کارایی مصرف آب شود (Villa e Vila et al., 2024). بررسی‌ها نشان داد که کاربرد سیلیسیم با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان باعث می‌شود تنش اکسیداتیو ناشی از خشکی که سبب وقوع واکنش‌های نامطلوب برگشت ناپذیری در یاخته‌های گیاه می‌شود کاهش یافته و در نتیجه، اثرهای سوء ناشی از تنش خشکی در گیاه به‌طور چشمگیری کمتر شود (Vieria-Filho & Monteiro, 2024).

¹1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid

(2022). علاوه بر این، سیلیسیم می تواند با افزایش میزان برخی آنتی اکسیدان های غیر آنزیمی نظیر آسکوربیک اسید و گلوتاتیون، تعادل سامانه دفاعی گیاه را بهبود بخشد (Mukarram et al., 2026).

برخی گیاهان قادرند مقدار عنصرهای انتقال یافته به اندام های مختلف گیاه را تنظیم کنند (Sharma et al., 2023). این ها گونه هایی هستند که می توانند بخش عمده عنصر جذب شده از خاک را در ریشه نگاه دارند و از انتقال آن به سایر بخش ها نظیر دانه جلوگیری کنند. همچنین، این گیاهان قادرند در هنگام بروز تنش هایی که جذب و انتقال عنصرها را مختل می کنند، قسمت بیشتری از عنصر مورد نظر را به بخش هوایی منتقل کنند تا عوارض ناشی از تنش تعدیل شود. معمولاً برای ارزیابی ظرفیت و توانایی گیاه در زمینه نگهداری و انتقال عنصرهای مختلف، شاخص ها و معیارهای مختلفی از جمله فاکتور انتقال^۲ (TF) و فاکتور تجمع زیستی^۳ (BCF) مورد محاسبه و بررسی قرار می گیرد. این فاکتورها به ترتیب نشان دهنده نسبت غلظت عنصر در اندام مورد نظر به غلظت عنصر در ریشه، و نسبت غلظت عنصر در اندام مورد نظر به غلظت عنصر در خاک هستند. گیاهانی که فاکتور تجمع زیستی در آن ها بیشتر از یک است، مناسب گیاه پالایی^۴ هستند، در حالی که گیاهانی با فاکتور تجمع زیستی کمتر از یک، برای تثبیت گیاهی^۵ مورد استفاده قرار می گیرند (Sharma et al., 2023).

بخش اعظم ایران در اقلیم خشک و نیمه خشک قرار دارد و تنش خشکی همواره به عنوان یکی از چالش های مهم تولید محصولات کشاورزی مطرح است. یکی از روش های تعدیل اثر تنش خشکی بر گیاه، استفاده از عنصرهای غذایی است که در این راستا تا کنون نقش مؤثر برخی عنصرها از جمله پتاسیم و سیلیسیم به اثبات رسیده است. با توجه به این که استفاده از راهکارهای مؤثر مقابله با این تنش می تواند موجب مصرف کمتر آب و تولید بیشتر و با کیفیت تر محصول گندم شود، آزمایشی با هدف مطالعه و بررسی تأثیر تنش خشکی، مصرف خاکی و محلول پاشی پتاسیم سیلیکات و برهمکنش تنش خشکی و پتاسیم سیلیکات بر اجزای عملکرد، کارایی مصرف آب و فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی دو عنصر سدیم و بور در گیاه گندم در شرایط تنش خشکی طی دو سال زراعی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی حاجی آباد استان هرمزگان اجرا شد. علت محاسبه فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی برای دو عنصر سدیم و بور این بود که در شرایط تنش خشکی، معمولاً غلظت این دو عنصر در محلول خاک افزایش یافته و در نتیجه، مقدار بیشتری از آنها جذب گیاه می شود. این می تواند موجب بیش بود یا سمیت این دو عنصر و ایجاد اختلال در رشد و عملکرد گیاه شود. همچنین تجمع مقادیر زیاد سدیم و بور در دانه گندم می تواند باعث بروز برخی ناهنجاری ها و بیماری ها در مصرف کننده نهایی یعنی انسان شود.

مواد و روش ها

این پژوهش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی حاجی آباد استان هرمزگان با عرض جغرافیایی ۲۸° ۱۸' و طول جغرافیایی ۵۵° ۵۵'، میانگین بارندگی سالانه ۱۷۹/۴ میلی متر، میانگین دمای ۲۵/۲ درجه سلسیوس و ارتفاع ۹۳۶ متر از سطح دریا اجرا شد. بافت خاک قطعه اجرای آزمایش، لوم رسی^۶ بود. آزمایش به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با ۱۲ تیمار و ۳ تکرار، در مجموع ۳۶ کرت ۳×۳ مترمربع در شرایط مزرعه با

^۲-Translocation factor

^۳-Bio-concentration factor

^۴-Phytoremediation

^۵-Phytostabilization

^۶-Clay loam

کشت گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم چمران (حساس به کم آبی) طی سال زراعی ۱۳۹۸ اجرا شد. کاشت در تاریخ ۱۹ آذرماه و مقدار بذر استفاده شده در هر هکتار حدود ۱۹۴ کیلوگرم بود. عمق کاشت برابر با ۴ سانتی متر و فاصله ردیف ها ۲۰ سانتی متر و تراکم کشت به صورت ۴۵۰ بوته در متر مربع بود. مربع قبل از شروع آزمایش، ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آب آبیاری و خاک (جدول های ۱ و ۲) به شرح زیر تعیین شدند.

جدول ۱- برخی ویژگی های آب آبیاری مورد استفاده در پژوهش حاضر.

Table 1- Some characteristics of the irrigation water used in the present study.

سیلیسیم (Si)	بور (B)	نسبت جذب سدیم (SAR)	سدیم (Na)	منیزیم (Mg)	کلسیم (Ca)	کلرید (Cl)	بی کربنات (HCO ₃ ⁻)	کربنات (CO ₃ ²⁻)	pH	EC (dS/m)
(mg/L)			(meq/L)							
15.4	0.91	4.1	13.5	15.6	6.0	16.4	4.2	Nil	7.52	3.44

جدول ۲- برخی ویژگی های خاک مزرعه مورد استفاده در پژوهش حاضر.

Table 2- Some characteristics of the soil used in the present study.

Zn	Fe	Mn	Cu	Si	B	K	P	pH	EC (dS/m)	Organic carbon (%)	Sand (%)	Clay (%)
(mg kg ⁻¹)												
0.76	3.66	13.14	0.37	52	1.2	211	6.06	7.43	3.98	0.89	30	30

ویژگی های آب شامل هدایت الکتریکی (EC)، pH، غلظت کربنات، بی کربنات، کلرید، کلسیم، منیزیم، سدیم، بور و سیلیسیم، با استفاده از روش های تأیید شده مؤسسه تحقیقات خاک اندازه گیری شد (Shahbazi et al., 2024). در خاک مزرعه نیز بافت، هدایت الکتریکی (EC)، pH، و غلظت فسفر (عصاره گیری با بی کربنات سدیم)، پتاسیم (عصاره گیری با استات آمونیم)، بور (عصاره گیری با آب)، سیلیسیم (ذوب قلیایی با NaOH)، آهن، منگنز، مس و روی (عصاره گیری با DTPA) تعیین گردید (Shahbazi et al., 2024).

فاکتورهای آزمایش شامل تنش کم آبی در دو سطح (۱۰۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گندم در منطقه)، مصرف خاکی پتاسیم سیلیکات در دو سطح (صفر و ۲۰ کیلوگرم سیلیسیم بر هکتار در مرحله ساقه دهی به صورت محلول پاشی پتاسیم سیلیکات در سه سطح (صفر، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم سیلیسیم بر هکتار در مرحله های ساقه دهی، ظهور سنبله و خمیری شدن) بودند. نیاز آبی گندم در منطقه حاجی آباد با استفاده از سامانه نیاز آبیاری گیاهان زراعی و باغی کشور (نیازآب) به نشانی اینترنتی www.niwr.ir تعیین شد. در مورد حد بحرانی غلظت سیلیسیم نیز مقادیر بسیار متفاوتی گزارش شده است. به عنوان مثال، حد بحرانی سیلیسیم قابل استفاده گیاه از ۱۴ میلی گرم در کیلوگرم خاک برای عصاره گیری با آب مقطر تا ۲۰۷ میلی گرم در کیلوگرم خاک برای عصاره گیری با اسید سولفوریک ۰/۰۰۵ مولار ذکر شده است (Narayanaswamy & Prakash, 2009). پتاسیم سیلیکات استفاده شده در این تحقیق، حاوی ۲۶/۶٪ سیلیسیم به شکل SiO₂ و ۱۳/۳٪ پتاسیم به فرم K₂O بود. این ترکیب با نام تجاری سیلیکوپتاس و محصول شرکت پارس فروغ زاگرس می باشد که به منظور اجرای یکنواخت پروژه، بصورت متمرکز توسط مؤسسه تحقیقات خاک و آب تهیه و تأمین شد. عملیات محلول پاشی پس از غروب آفتاب انجام شد و مقادیر پتاسیم سیلیکات استفاده شده برای تیمارهای ۲/۵ و ۵

کیلوگرم بر هکتار، به ترتیب ۱۸ و ۳۶ میلی لیتر برای هر کرت بود. آبیاری به روش قطره‌ای نواری انجام شد و به منظور اعمال دقیق سطوح آبیاری، از ریزکتورهای حجمی نصب شده در مسیر ورودی کرت‌ها استفاده شد. تغذیه گیاه در مراحل مختلف رشد، بر اساس نتایج تجزیه خاک و آب و استفاده از جداول توصیه کودی موسسه تحقیقات خاک و آب (دستورالعمل مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه گندم)، برای تمام تیمارها به صورت یکسان و یکنواخت انجام شد.

لازم به ذکر است به دلیل حضور عنصر پتاسیم در کود سیلیسیم مورد استفاده (پتاسیم سیلیکات)، مقدار معادل این پتاسیم از میزان توصیه کودی پتاسیم تیمارهای تغذیه شده با پتاسیم سیلیکات کسر شد تا مقدار پتاسیم مصرفی کلیه تیمارها مشابه و یکنواخت باشد و خطایی در تفسیر نتایج ایجاد نشود. عملیات دفع علف‌های هرز هم به صورت دستی و هم از طریق محلول‌پاشی علف‌کش سولفوسولفونون ۷۵٪ WG (آپیروس) به مقدار ۲۵ گرم در هکتار انجام شد. مبارزه با دو آفت سن و شته گندم نیز به ترتیب با محلول‌پاشی سم فنیتروتیون ۵۰٪ EC به میزان یک لیتر در هکتار و سم دیمتوات ۴۰٪ EC به میزان یک و نیم لیتر در هکتار صورت گرفت. پارامترهای اندازه‌گیری شده در این پژوهش شامل عملکرد دانه، محصول زیست‌توده، وزن هزار دانه، کارایی مصرف آب، فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی برای دو عنصر سدیم و بور در دانه بودند. برای برآورد عملکرد دانه، با استفاده از کوادرات یک متر مربعی، دانه‌ها از خوشه جدا شد و وزن دانه گندم تولید شده در هر تیمار اندازه‌گیری شد. همچنین، جهت تعیین محصول زیست‌توده، پس از جدا کردن دانه‌ها، وزن کاه و کلش در هر تیمار اندازه‌گیری و حاصل جمع آن با عملکرد دانه، تحت عنوان محصول زیست‌توده ثبت شد. برای تعیین وزن هزار دانه، از هر تیمار تعداد ۲۰۰ دانه گندم شمارش شد (پنج مرتبه) و وزن آن اندازه‌گیری گردید. سپس با ضرب عدد به دست آمده در ضریب ۵، وزن هزار دانه برای آن تیمار مشخص شد. برای اندازه‌گیری سدیم در ریشه و بخش هوایی، نمونه‌های پودر شده، به روش خشک خاکستر شده و پس از عصاره‌گیری سدیم با اسید نیتریک رقیق، غلظت آن توسط دستگاه فلیم فوتومتر اندازه‌گیری شد (Munns et al., 2010). جهت تعیین بور در ریشه و بخش هوایی گیاه نیز نمونه‌های پودر شده ابتدا به روش خشک خاکستر شدند و سپس عصاره‌گیری با استفاده از ۱۰ میلی لیتر اسید سولفوریک ۰/۳۶ نرمال به مدت یک ساعت انجام شد و غلظت بور توسط دستگاه فلیم اندازه‌گیری شد (Gaines & Mitchell, 1979). برای محاسبه کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف آزمایش، رابطه زیر مورد استفاده قرار گرفت (Hatfield & Dold, 2019):

$$\text{میزان مصرف آب} (\text{m}^3/\text{ha}) / \text{عملکرد در هر تیمار} (\text{kg}/\text{ha}) = \text{کارایی مصرف آب}$$

توضیح اینکه مقدار مصرف آب در تیمارهای بدون تنش خشکی برابر با ۵۰۶۳ متر مکعب بر هکتار و در تیمارهایی که با ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه آبیاری شدند معادل ۳۰۳۸ متر مکعب بر هکتار بود.

محاسبه فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی با استفاده از معادلات زیر انجام شد (Eben et al., 2024; Paladino et al., 2025).

$$(۱) \quad \text{غلظت عنصر در ریشه/غلظت عنصر در اندام مورد نظر} = \text{فاکتور انتقال}$$

$$(۲) \quad \text{غلظت عنصر در خاک/غلظت عنصر در اندام مورد نظر} = \text{فاکتور تجمع زیستی}$$

کلیه محاسبات آماری با نرم‌افزار SAS انجام شد و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنادار (LSD) استفاده شد. برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

نتایج و بحث

به منظور ارزیابی آماری نتایج، ابتدا تجزیه واریانس داده‌ها انجام شد (جدول ۳) و سپس با استفاده از مقایسه میانگین‌ها و نمودارهای مربوطه، تفاوت‌های ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت.

اجزای عملکرد (عملکرد دانه، محصول زیست‌توده، وزن هزار دانه)

نتایج نشان داد که در گندم دچار تنش خشکی، میانگین عملکرد دانه حدود ۱۴٪ کاهش پیدا کرد و به‌طور معنی‌داری کمتر شد (شکل ۱). همچنین میانگین محصول زیست‌توده و وزن هزار دانه نیز به ترتیب ۲۰ و ۱۴ درصد کاهش نشان داد (شکل‌های ۲ و ۳). خشکی در هر مرحله از رشد، تأثیر متفاوتی نشان می‌دهد. مثلاً کم‌آبی در مرحله ساقه‌روی منجر به کاهش تعداد سنبله بارور در واحد سطح می‌شود، اما در مرحله پنجه‌زنی بیشترین اثر منفی در تعداد سنبله بارور گندم در واحد سطح اتفاق می‌افتد. به هر حال، افت عملکرد دانه، محصول زیست‌توده و وزن هزار دانه در گندم تحت تنش کم آبی را می‌توان ناشی از کم شدن آماس نسبی و در نتیجه، کم آب شدن پروتوپلاسم دانست. این شرایط منجر به کاهش فتوسنتز، کاهش تولید مواد فتوسنتزی و اختلال در توسعه و تقسیم سلولی می‌شود (Ahmadian *et al.*, 2021).

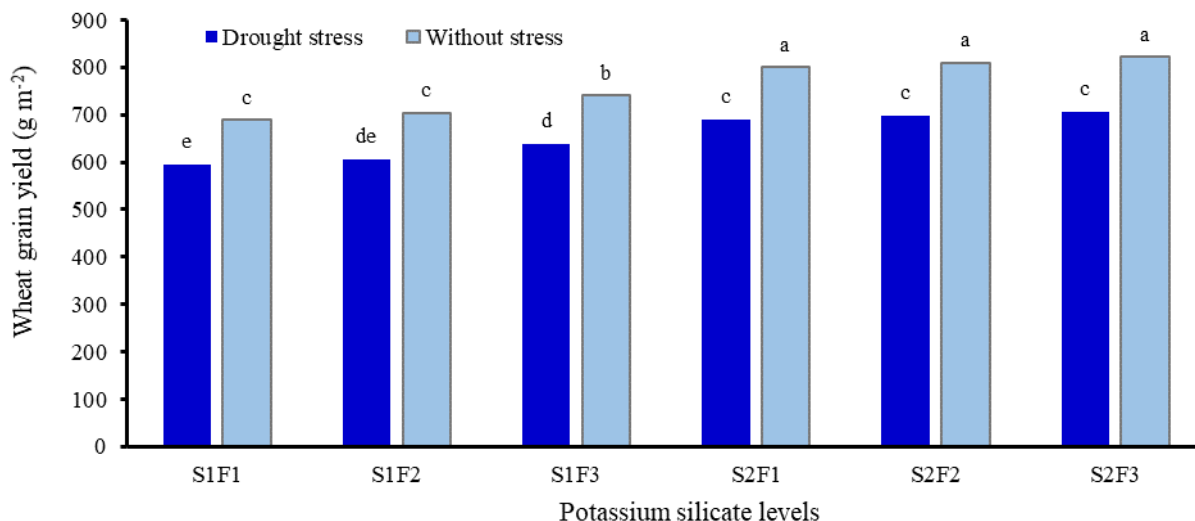
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر فاکتورهای آزمایش بر پاسخ‌های گیاهی مورد مطالعه.

Table 3- Analysis of variance for the effect of experimental factors on the study plant responses.

Source of Variation	df	GY	BY	1000 grain weight	WUE	Na BCF	Na TF	B BCF	B TF
REP	2	0.8091**	5.0371**	4.298**	0.0606**	0.0749**	0.00703**	2.030**	0.0746**
IL	1	9.8912**	659.417**	587.673**	3.8612**	0.5525**	0.09818**	105.028**	1.3689**
Si SA	1	7.6640**	89.326**	53.217**	0.5112**	0.9801**	0.15734**	92.512**	2.9584**
Si FS	2	0.3422**	121.488**	62.195**	0.0227**	0.3452**	0.03466**	51.373**	0.6527**
IL × Si SA	1	0.0524 ^{ns}	0.349 ^{ns}	0.257 ^{ns}	0.0148*	0.0152**	0.00004 ^{ns}	2.544**	0.0064**
IL × Si FS	2	0.0031 ^{ns}	0.517 ^{ns}	0.336 ^{ns}	0.0006 ^{ns}	0.0031 ^{ns}	0.00004 ^{ns}	0.246**	0.0004 ^{ns}
Si SA × Si FS	2	0.0693 ^{ns}	0.745 ^{ns}	0.367 ^{ns}	0.0043 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.00005 ^{ns}	0.045*	0.0008 ^{ns}
IL × Si SA × Si FS	2	0.0005 ^{ns}	0.016 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.0010 ^{ns}	0.00029*	0.362**	0.0009 ^{ns}
Error	22	0.0450	0.029	0.360	0.0030	0.0010	0.00008	0.012	0.0004
CV (%)	-	2.9854	3.755	3.112	3.014	1.304	1.691	0.0614	0.996

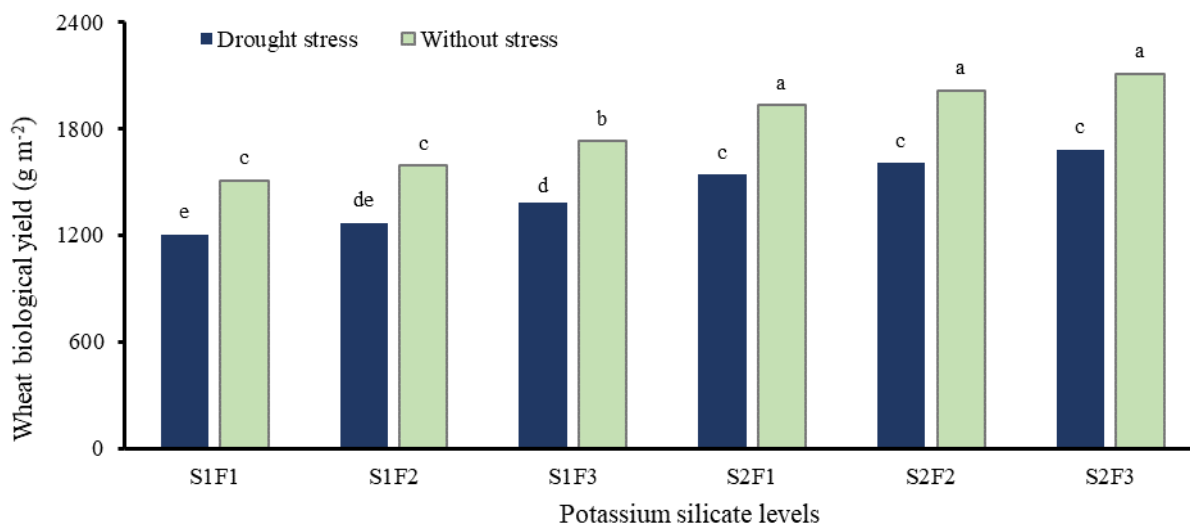
ns: non-significant, *: significant at $p \leq 0.05$ and **: significant at $p \leq 0.01$

df (Degree of freedom) درجه آزادی; GY (Grain yield): عملکرد دانه; BY (Biological yield): محصول زیست‌توده; 1000 grain weight: وزن هزار دانه; WUE (Water use efficiency): کارایی مصرف آب; BCF (Bio-concentration factor): فاکتور تجمع زیستی; Na BCF: فاکتور تجمع زیستی؛ Na TF: فاکتور انتقال؛ B BCF: فاکتور تجمع زیستی؛ B TF: فاکتور انتقال؛ Rep (Replication): تکرار؛ IL (Irrigation level): سطح آبیاری؛ Si SA (Silicon soil application): مصرف خاکی سیلیسیم؛ Si FS (Silicon foliar spray): محلول‌پاشی سیلیسیم؛ Error: خطا؛ %CV (Coefficient of variation): درصد ضریب تغییر.



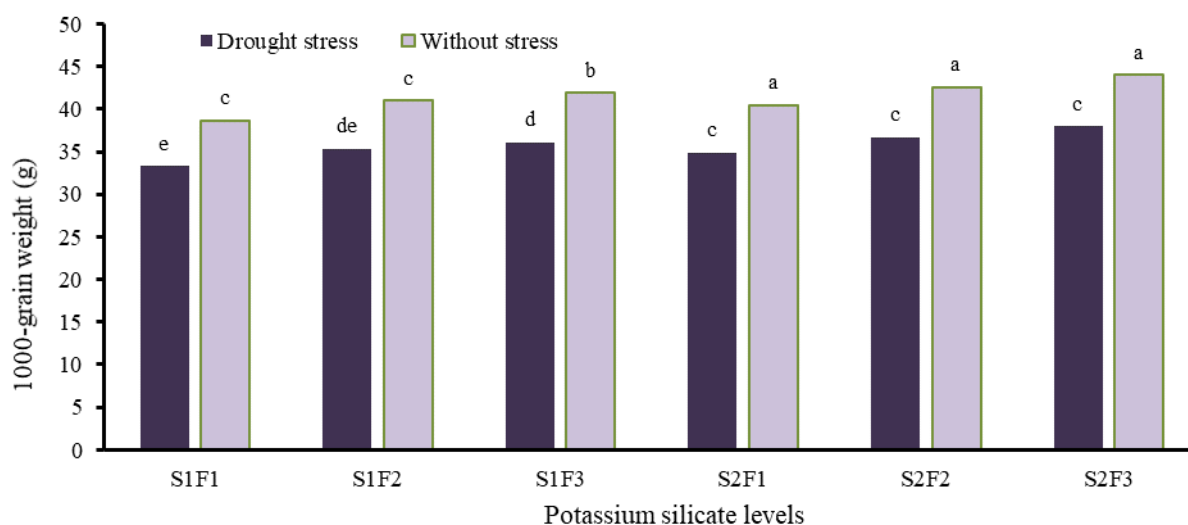
شکل ۱- تأثیر روش و مقدار مصرف پتاسیم سیلیکات بر عملکرد دانه گندم در شرایط کم آبی (تنش خشکی) و آبیاری نرمال. میانگین‌هایی که در یک حرف لاتین مشترک هستند، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنادار ندارند. S1 و S2 (به ترتیب مصرف خاکی صفر و ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار): F1، F2 و F3 (به ترتیب محلول پاشی صفر، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار).

Figure 1- Effect of the method and rate of potassium silicate application on wheat grain yield under water-deficit (drought stress) and normal irrigation conditions. Means with the same Latin letter do not differ significantly at the 5% probability level. S1 and S2 represent soil application rates of 0 and 20 kg/ha of potassium silicate, respectively; F1, F2, and F3 represent foliar application rates of 0, 2.5, and 5 kg/ha of potassium silicate, respectively.



شکل ۲- تأثیر روش و مقدار مصرف پتاسیم سیلیکات بر محصول زیست‌توده گندم در شرایط کم آبی (تنش خشکی) و آبیاری نرمال. میانگین‌هایی که در یک حرف لاتین مشترک هستند، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنادار ندارند. S1 و S2 (به ترتیب مصرف خاکی صفر و ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار): F1، F2 و F3 (به ترتیب محلول پاشی صفر، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار).

Figure 2- Effect of the application method and rate of potassium silicate on the wheat biological yield under water-deficit (drought stress) and normal irrigation conditions. Means with a common Latin letter do not differ significantly at the 5% probability level. S1 and S2 represent soil application rates of 0 and 20 kg/ha of potassium silicate, respectively; F1, F2, and F3 represent foliar application rates of 0, 2.5, and 5 kg/ha of potassium silicate, respectively.



شکل ۳- تأثیر روش و مقدار مصرف پتاسیم سیلیکات بر وزن هزار دانه گندم در شرایط کم‌آبی (تنش خشکی) و آبیاری نرمال. میانگین‌هایی که در یک حرف لاتین مشترک هستند، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنادار ندارند. S1 و S2 (به ترتیب مصرف خاکی صفر و ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار)؛ F1، F2 و F3 (به ترتیب محلول‌پاشی صفر، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار).

Figure 3- Effect of the application method and rate of potassium silicate on the 1000 grain weight of wheat under water-deficit (drought stress) and normal irrigation conditions. Means with the same Latin letter do not differ significantly at the 5% probability level. S1 and S2 represent soil application rates of 0 and 20 kg/ha of potassium silicate, respectively; F1, F2, and F3 represent foliar application rates of 0, 2.5, and 5 kg/ha of potassium silicate, respectively.

وزن دانه گندم در مرحله بلوغ، همبستگی زیادی با تعداد یاخته‌های آندوسپرمی تولید شده در این مرحله دارد که بر اثر تنش خشکی کاهش پیدا می‌کند. رشد دانه گندم به دلیل کاهش همگون‌سازی طی مرحله گرده افشانی، کمتر می‌شود و این مؤید لزوم اهمیت تأمین مواد فتوسنتزی است و به تعبیر دیگر، هرگونه مختل شدن فتوسنتز منجر به کاهش وزن دانه خواهد شد (Xu et al., 2023). سایر پژوهشگران گزارش کردند که تنش خشکی باعث کمبود شدید آب در مراحل مختلف رشد گیاه و به دنبال آن، با کاهش فتوسنتز برگ و در نتیجه کاهش میزان مواد و ترکیبات لازم برای دانه‌های در حال رشد، موجب افت شاخصه‌های رشد گیاه مانند عملکرد و وزن هزار دانه می‌شود (Reza et al., 2023). اشفاق و همکاران (Ishfaq et al., 2024) نیز کاهش قابل ملاحظه عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله و شاخص برداشت گندم را در گیاهان در شرایط تنش خشکی نسبت به گیاهان بدون تنش کم‌آبی مشاهده کردند.

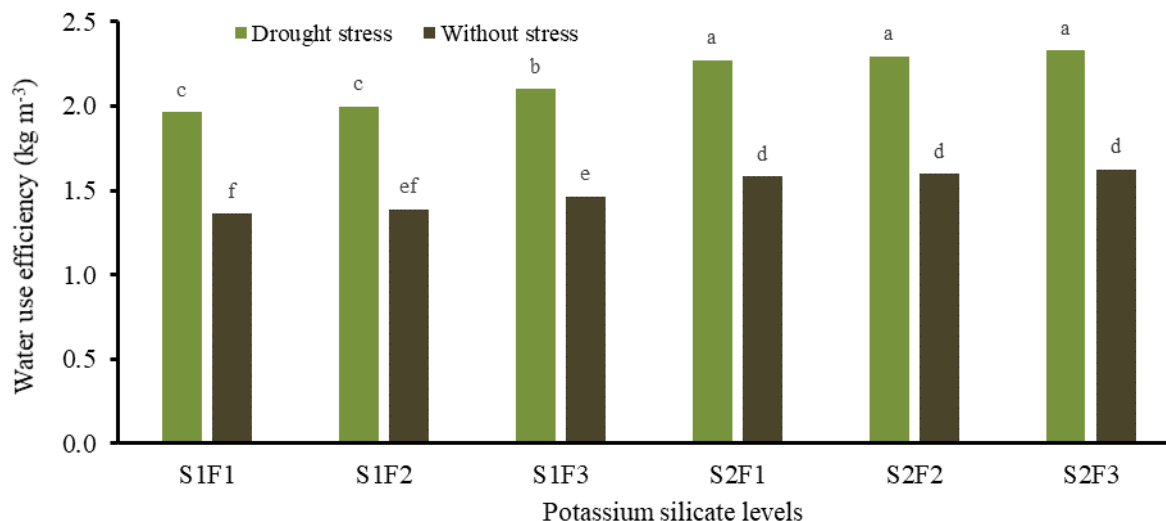
مصرف خاکی پتاسیم سیلیکات باعث شد تأثیر نامطلوب تنش خشکی بر عملکرد دانه، محصول زیست‌توده و وزن هزار دانه گندم به میزان قابل ملاحظه‌ای تعدیل شود، ضمن اینکه محلول‌پاشی ۲/۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار نیز اثر مشابهی نشان داد. همچنین برهمکنش کاربرد خاکی و محلول‌پاشی پتاسیم سیلیکات، اثر معناداری بر اجزای عملکرد گندم داشت. به عنوان مثال، عملکرد دانه که در گندم در شرایط تنش خشکی بدون مصرف سیلیسیم (S1F1) معادل ۵۹۶ گرم در متر مربع بود، با مصرف خاکی ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات در هکتار (S2F1)، با افزایش معنی‌داری به ۶۹۰ متر مربع در هر متر مربع رسید و حدود ۱۶٪ افزایش پیدا کرد (شکل ۱). مطالعات متعددی انجام شده که نشان می‌دهد کوددهی سیلیسیم هم در شرایط تنش شوری و خشکی و هم

در شرایط بدون تنش، موجب افزایش رشد، عملکرد و اجزای عملکرد گیاه می شود (Saleh et al., 2017; Thorne et al., 2020). در شرایط تنش، حضور سیلیسیم در گیاه باعث بهبود وضعیت جذب عناصر ضروری گیاه، تحریک فرآیند فتوسنتز، افزایش فعالیت سیستم خنثی کننده گونه های اکسیژن فعال، نگهداری آب در بافت های مختلف گیاه، کاهش جذب و تجمع سدیم در گیاه، بیشتر شدن میزان ساخت پروتئین، افزایش میزان فعالیت آنزیم $H^+-ATPase$ مسئول جذب پتاسیم، افزایش انتخاب پذیری جذب پتاسیم نسبت به سدیم و افزایش پتانسیل آب برگ به دلیل تشکیل لایه مضاعف سیلیکا-کوتیکول در سطح بافت اپیدرمی برگ شده و در نتیجه تحمل گیاه به تنش شوری و خشکی افزایش می یابد. همچنین ماهیت آب دوستی سیلیسیم باعث افزایش مقاومت گیاه نسبت به خشکی می شود (Aurangzaib et al., 2022). پژوهش های انجام شده روی گندم نشان داد سیلیسیم با کم کردن شدت تنفس، باعث افزایش تحمل گیاه به شرایط کم آبی می شود. سیلیسیم همچنین با تقویت عملکرد کلی گیاه و بیشتر کردن نرخ پر شدن دانه ها باعث افزایش وزن هزار دانه و بهبود عملکرد دانه و محصول زیست توده گندم می شود (Ahmadian et al., 2021). سایر پژوهشگران نیز نشان دادند کاربرد سیلیسیم در گندم منجر به افزایش توسعه ریشه ها و در نتیجه، افزایش عملکرد گیاه می شود (Abdo et al., 2024). این نقش سیلیسیم، تأثیر حیاتی در رشد گیاه دارد زیرا سیستم ریشه نقش بسیار مهمی در جذب آب و یون ها و در نتیجه جذب، ساخت و انتقال طیف گسترده ای از املاح مهم ایفا می کند. جانسون و همکاران (Johnson et al., 2022) نیز معتقدند سیلیسیم به دلیل تأثیری که بر افزایش کارایی مصرف آب دارد، می تواند باعث جبران اثر منفی تنش خشکی بر تولید زیست توده^۷ و اجزای عملکرد گندم شود.

کارایی مصرف آب

مقایسه میانگین ها نشان داد تیمارهایی که در آنها گندم تحت تنش کم آبی قرار گرفت و تنها ۶۰ درصد نیاز آبی خود را دریافت نمود، با کاهش چشمگیر عملکرد دانه مواجه شدند. با این حال، به دلیل کاهش مصرف آب و نقش مقدار آب مصرفی در محاسبه کارایی مصرف آب، مقدار عددی این پارامتر در آنها افزایش یافت. از سوی دیگر، تغذیه سیلیسمی گیاه نیز منجر به افزایش معنادار کارایی مصرف آب گردید و در این میان، شدت اثر مصرف خاکی پتاسیم سیلیکات به طور محسوسی بیش از محلول پاشی آن بود. این تفاوت تغییر به گونه ای بود که با محلول پاشی سیلیسیم در تیمارهایی که تنها ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه تأمین شده بود، کارایی مصرف آب نسبت به گیاه بدون کاربرد سیلیسیم، از ۱/۹۶ به ۲/۱۰ افزایش پیدا کرد (حدود ۷ درصد)، در حالی که مصرف خاکی سیلیسیم باعث شد کارایی مصرف آب از ۱/۹۶ به ۲/۲۷ برسد و حدود ۱۶ درصد ارتقا یابد (شکل ۴). پژوهش های زیادی انجام شده است که نشان می دهد با کاهش مصرف آب و اعمال تنش خشکی، علی رغم کاهش معنادار عملکرد محصول، کارایی مصرف آب یعنی تولید به ازای واحد آب مصرفی افزایش پیدا می کند (Abdi et al., 2022; Liu et al., 2026). هرچند در برخی پژوهش ها نیز تنش خشکی، کاهش کارایی مصرف آب را بدنبال داشته است (Makkari et al., 2020).

⁷ Biomass



شکل ۴- تأثیر مصرف سیلیسیم بر کارایی مصرف آب برای دانه گندم در شرایط تنش خشکی. میانگین‌هایی که در یک حرف لاتین مشترک هستند، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنادار ندارند. S1 و S2 (به ترتیب مصرف خاکی صفر و ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار)؛ F1، F2 و F3 (به ترتیب محلول پاشی صفر، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار).

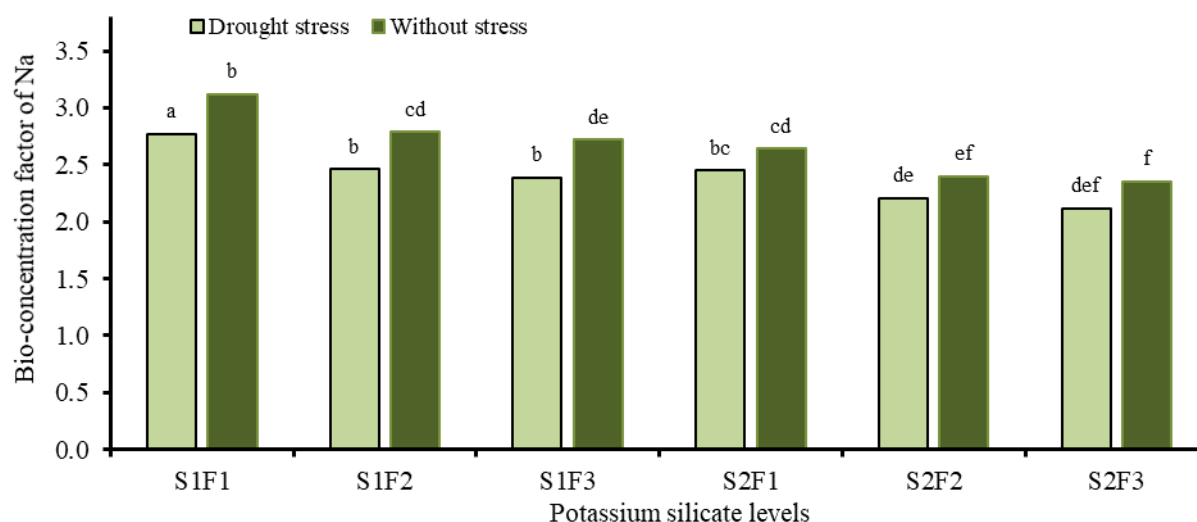
Figure 4 – Effect of silicon application on water use efficiency for wheat grain under drought stress. Means with a common Latin letter do not differ significantly at the 5% probability level. S1 and S2 represent soil application of 0 and 20 kg/ha of potassium silicate, respectively; F1, F2, and F3 represent foliar application of 0, 2.5, and 5 kg/ha of potassium silicate, respectively.

بررسی‌ها همچنین مؤید آن است که با کاربرد سیلیسیم، کارایی مصرف آب بیشتر خواهد شد. نحوه تأثیر مصرف سیلیسیم بر افزایش کارایی مصرف آب بدین صورت است که حضور این عنصر در خاک و گیاه از یک سو باعث بیشتر شدن عملکرد دانه گندم می‌شود (Thorne و همکاران، ۲۰۲۰) و از سوی دیگر، مقدار مصرف آب را کاهش می‌دهد. سازوکار اثر سیلیسیم بر کاهش مصرف آب نیز، تأثیری است که این عنصر بر افزایش جذب پتاسیم به وسیله گیاه و کاهش تبخیر و تعرق دارد. مصرف سیلیسیم در گیاهان در شرایط تنش خشکی موجب تحریک فعالیت $H^+-ATPase$ غشاهای یاخته‌ها و در نتیجه افزایش جذب و تجمع پتاسیم در بخش هوایی گیاه می‌شود (Marschner, 2012). این عنصر همچنین با جلوگیری از جذب سدیم سبب می‌گردد جذب و غلظت پتاسیم در گیاه افزایش یابد. سیلیسیم از طرق مختلفی مانند کاهش نفوذپذیری غشای یاخته‌های برگ و ریشه نسبت به سدیم و افزایش خروج سدیم از یاخته‌ها باعث کاهش جذب سدیم در برنج، گندم، جو و سایر گیاهان می‌شود (Barker & Pilbeam, 2015) و بنابراین، در رقابت بین سدیم و پتاسیم برای جذب به وسیله گیاه، پتاسیم غالب شده و جذب و تجمع آن در گیاه افزایش می‌یابد (da Silva et al., 2025). در مجموع، مصرف عنصر سیلیسیم ضمن کاهش اثر منفی تنش کم‌آبی در گیاه، موجب افزایش کارایی مصرف آب می‌گردد (Khajiat Moghaddam et al., 2022; Pezeshk et al., 2022).

فاکتور تجمع زیستی و فاکتور انتقال سدیم

هم رژیم رطوبتی خاک و هم کاربرد سیلیسیم، موجب ایجاد تغییرات معنادار در فاکتور تجمع زیستی و فاکتور انتقال سدیم دانه گندم شدند. فاکتور تجمع زیستی سدیم (نسبت غلظت سدیم دانه به غلظت سدیم خاک) در

تیمارهای مواجهه با تنش کم آبی (آبیاری شده با ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه)، به طور معناداری بیشتر از تیمارهای بدون تنش (آبیاری شده با ۱۰۰ درصد نیاز آبی) بود. از دیگر سو، کاربرد سیلیسیم چه به صورت محلول پاشی و چه مصرف خاکی، میزان انتقال سدیم از خاک به دانه را کاهش داد. مصرف خاکی ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار، هم در گیاهان در شرایط تنش خشکی و چه در گیاهان بدون تنش، منجر به کاهش قابل ملاحظه غلظت سدیم دانه شد. محلول پاشی سیلیسیم نیز در سطح اول یعنی ۲/۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار توانست فاکتور تجمع زیستی سدیم را کاهش دهد، اما محلول پاشی مقادیر بیشتر سیلیسیم یعنی ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار، تفاوت معناداری با سطح اول نشان نداد. همچنین برهمکنش رژیم رطوبتی و تغذیه سیلیسمی تأثیر معناداری بر کاهش فاکتور تجمع زیستی سدیم نشان داد، به این صورت که در هر سطح رژیم رطوبتی، مصرف خاکی و محلول پاشی سیلیسیم باعث کاهش میزان انتقال سدیم از خاک به دانه شد (شکل ۵).

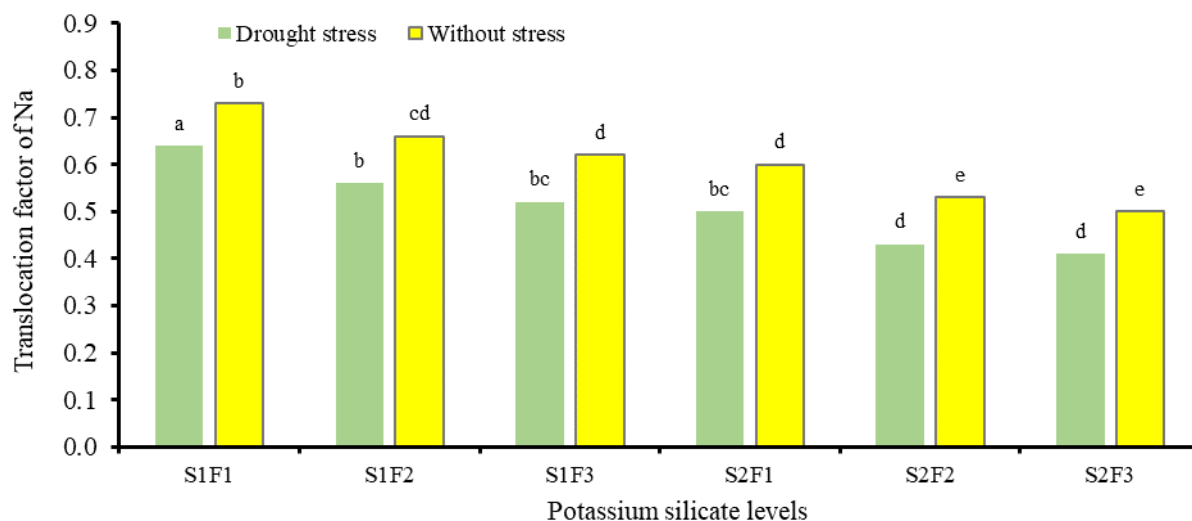


شکل ۵- تأثیر مصرف سیلیسیم بر فاکتور تجمع زیستی عنصر سدیم در دانه گندم در شرایط تنش خشکی. میانگین‌هایی که در یک حرف لاتین مشترک هستند، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنادار ندارند. S2 و S1 (به ترتیب مصرف خاکی صفر و ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار)؛ F1، F2 و F3 (به ترتیب محلول پاشی صفر، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار).

Figure 5 – Effect of silicon application on the bio concentration factor of sodium in wheat grain under drought stress. Means with a common Latin letter do not differ significantly at the 5% probability level. S1 and S2 represent soil application of 0 and 20 kg/ha of potassium silicate, respectively; F1, F2, and F3 represent foliar application of 0, 2.5, and 5 kg/ha of potassium silicate, respectively.

فاکتور انتقال سدیم (نسبت غلظت سدیم دانه به غلظت سدیم ریشه) نیز در تیمارهای تحت تنش آبی، نسبت به تیمارهای بدون تنش، افزایش یافت. با این حال، استفاده از سیلیسیم در هر دو روش خاکی و محلول پاشی، موجب کاهش فاکتور انتقال سدیم شد. اضافه کردن ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات در هر هکتار خاک، کاهش چشمگیر انتقال سدیم از ریشه به دانه را به دنبال داشت. در تیمارهای محلول پاشی شده با سیلیسیم نیز در هر دو سطح (به ترتیب ۲/۵ و ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار)، فاکتور انتقال سدیم نسبت به شاهد کاهش یافت اما سطح اول و دوم اختلاف آماری با یکدیگر نشان ندادند. اثرهای متقابل رژیم رطوبتی و تغذیه سیلیسمی نیز

اختلاف معناداری در مقدار فاکتور انتقال سدیم ایجاد کرد یعنی در سطوح مختلف آبیاری، تغذیه خاکی یا محلول پاشی سیلیسیم موجب کاهش میزان انتقال سدیم از ریشه به دانه گردید (شکل ۶).



شکل ۶- تأثیر مصرف سیلیسیم بر فاکتور انتقال عنصر سدیم در دانه گندم در شرایط تنش خشکی. میانگین‌هایی که در یک حرف لاتین مشترک هستند، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنادار ندارند. S1 و S2 (به ترتیب مصرف خاکی صفر و ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار)؛ F1، F2 و F3 (به ترتیب محلول پاشی صفر، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار).

Figure 6 – Effect of silicon application on the translocation factor of sodium in wheat grains under drought stress. Means with the same Latin letter do not differ significantly at the 5% probability level. S1 and S2 represent soil application of 0 and 20 kg/ha of potassium silicate, respectively; F1, F2, and F3 represent foliar application of 0, 2.5, and 5 kg/ha of potassium silicate, respectively.

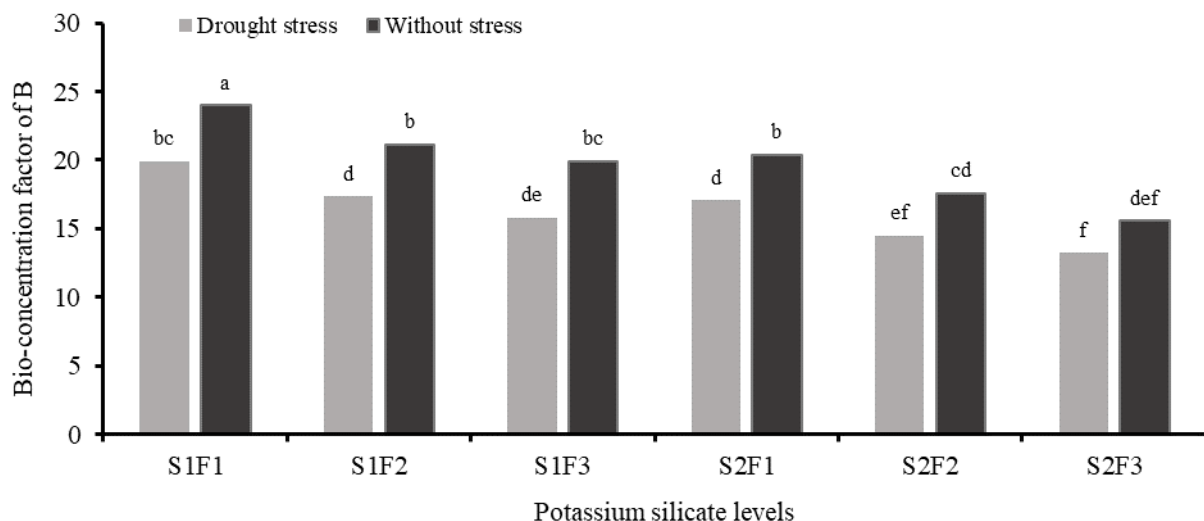
تبادل و توازن عنصرهای در اندام‌های گیاه، رابطه مستقیمی با وضعیت آب در یاخته‌ها دارد. خشکی باعث می‌شود برخی گیاهان در پاسخ به تنش ایجاد شده و برای حفظ تعادل اسمزی، عنصرهایی مانند سدیم و کلر را در یاخته‌های خود انباشته کنند که پیامد آن، سمیت یونی و عدم تعادل عنصرهای غذایی گیاه و در نتیجه، مختل شدن رشد گیاه خواهد بود (Kumar *et al.*, 2018). نتایج مطالعات سایرین نیز با یافته‌های پژوهش حاضر مبنی بر افزایش غلظت سدیم گیاه در تیمارهای در شرایط تنش خشکی مطابقت دارد (Sowdaeizadeh & Mansouri, 2024). آنها نشان دادند تجمع سدیم در بافت گیاه ناشی از جذب بیشتر به وسیله ریشه و بارگیری بیشتر از آوند چوب به برگ است. در واقع گیاه با این سازوکار، تعادل اسمزی را برقرار می‌کند تا مشکل کاهش جذب آب برطرف شود.

کاهش جذب و انتقال عنصر سدیم در تیمارهای تغذیه شده با سیلیسیم نیز می‌تواند ناشی از نقش سیلیسیم در افزایش مقاومت غشای پلاسمایی نسبت به نفوذپذیری و تقویت فعالیت آنزیم H^+ -ATPase غشای پلازما باشد. نتایج سایر مطالعات انجام شده در این زمینه نیز مؤید تأثیر مصرف سیلیسیم بر کاهش غلظت سدیم در بخش هوایی گیاه است. کاهش جذب سدیم در گیاهان تغذیه شده با سیلیسیم می‌تواند ناشی از نقش سیلیسیم در کاهش تعرق برگ باشد (Hassan *et al.*, 2024). از دلایل دیگر در این خصوص می‌توان به کاهش جریان آپوپلاستی و رسوب سیلیس بی‌شکل ($SiO_2.nH_2O$) در دیواره یاخته‌های ریشه و در نتیجه، جلوگیری از انتقال

سدیم و کلرید به بخش هوایی اشاره کرد (Yan et al., 2021)، در حالی که برخی دیگر (Ishaq et al., 2023) معتقدند وجود سیلیسیم نفوذپذیری غشای یاخته ها برگ را کاهش داده و به این وسیله مانع جذب سدیم می شود.

فاکتور تجمع زیستی و فاکتور انتقال بور

هم فاکتور تجمع زیستی و هم فاکتور انتقال بور، تحت تأثیر معنادار رژیم رطوبتی و مصرف سیلیسیم قرار گرفت. فاکتور تجمع زیستی بور (نسبت غلظت بور دانه به غلظت بور خاک) در گیاهان در شرایط تنش خشکی (تأمین ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه)، به طور محسوسی بیشتر از تیمارهای بدون تنش (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی) بود. مصرف خاکی و محلول پاشی سیلیسیم نیز باعث شد انتقال سدیم از خاک به دانه کمتر شود. اضافه کردن پتاسیم سیلیکات به خاک مزرعه، غلظت بور دانه را در کلیه تیمارها (اعم از در شرایط تنش خشکی و بدون تنش) کاهش داد. همچنین محلول پاشی سیلیسیم در سطح اول یعنی ۲/۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار توانست فاکتور تجمع زیستی بور را کاهش دهد، اما محلول پاشی مقادیر بیشتر (۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار)، تفاوت معناداری با سطح اول نشان نداد. تأثیر برهمکنش رژیم رطوبتی و تغذیه سیلیسمی بر کاهش فاکتور تجمع زیستی بور نیز معنادار بود، یعنی مصرف خاکی و محلول پاشی سیلیسیم در هر دو سطح رژیم رطوبتی باعث کاهش میزان انتقال بور از خاک به دانه شد (شکل ۷).

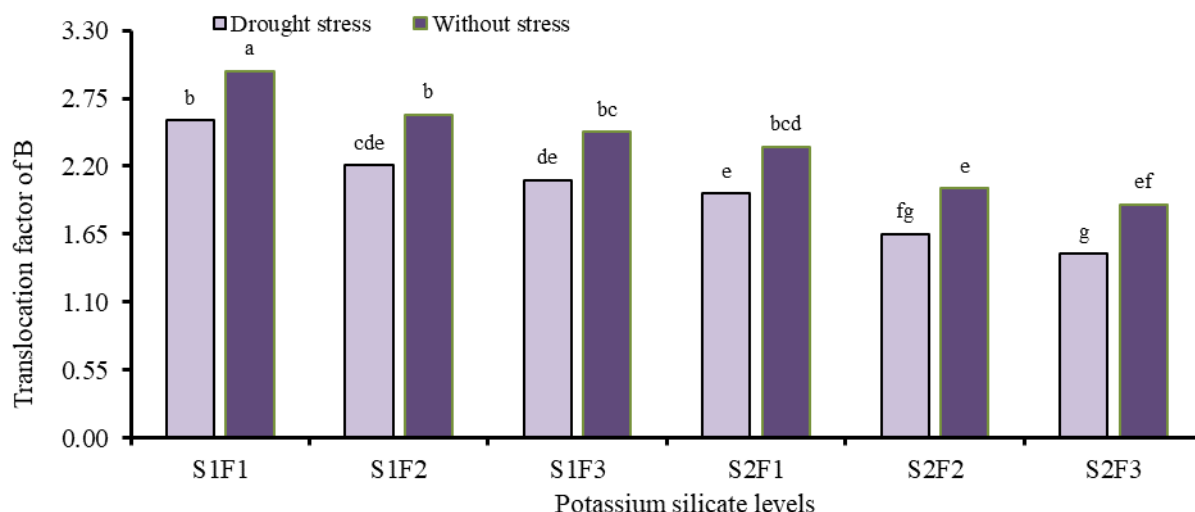


شکل ۷- تأثیر مصرف سیلیسیم بر فاکتور تجمع زیستی عنصر بور در دانه گندم در شرایط تنش خشکی. میانگین هایی که در یک حرف لاتین مشترک هستند، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنادار ندارند. S2 و S1 (به ترتیب مصرف خاکی صفر و ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار)؛ F1، F2 و F3 (به ترتیب محلول پاشی صفر، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار).

Figure 7 – Effect of silicon application on the bio concentration factor of boron in wheat grains under drought stress. Means with the same Latin letter do not differ significantly at the 5% probability level. S1 and S2 represent soil application of 0 and 20 kg/ha of potassium silicate, respectively; F1, F2, and F3 represent foliar application of 0, 2.5, and 5 kg/ha of potassium silicate, respectively

شکل ۸ نشان می دهد که در مورد فاکتور انتقال بور (نسبت غلظت بور دانه به غلظت بور ریشه)، در تیمارهای تحت تنش آبی، مقدار بیشتری بور به دانه انتقال یافت. این در حالی است که کاربرد سیلیسیم (چه خاکی و چه محلول پاشی) موجب شد بخش بیشتری از بور در ریشه باقی بماند، به گونه ای که با مصرف ۲۰ کیلوگرم پتاسیم

سیلیکات در هر هکتار خاک، میزان انتقال بور از ریشه به دانه کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرد. در گیاهان محلول‌پاشی شده با ۲/۵ و ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار نیز فاکتور انتقال بور نسبت به شاهد کاهش نشان داد، با این توضیح که اختلافی بین دو سطح محلول‌پاشی مشاهده نشد. برهکنش رژیم رطوبتی و کاربرد سیلیسیم نیز توانست تغییر معناداری در فاکتور انتقال بور ایجاد کند به این صورت که در هر سطح آبیاری، مصرف خاکی یا محلول‌پاشی سیلیسیم منجر به محدود شدن انتقال بور از ریشه به دانه گردید.



شکل ۸- تأثیر مصرف سیلیسیم بر فاکتور انتقال عنصر بور در دانه گندم در شرایط تنش خشکی. میانگین‌هایی که در یک حرف لاتین مشترک هستند، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنادار ندارند. S1 و S2 (به‌ترتیب مصرف خاکی صفر و ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار)؛ F1، F2 و F3 (به‌ترتیب محلول‌پاشی صفر، ۲/۵ و ۵ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات بر هکتار).

Figure 8 – Effect of silicon application on the translocation factor of boron in wheat grains under drought stress. Means with the same Latin letter do not differ significantly at the 5% probability level. S1 and S2 represent soil application of 0 and 20 kg/ha of potassium silicate, respectively; F1, F2, and F3 represent foliar application of 0, 2.5, and 5 kg/ha of potassium silicate, respectively.

رطوبت خاک یکی از عامل‌هایی است که قابلیت استفاده بور را بیشتر از برخی عنصرهای دیگر تحت تأثیر قرار می‌دهد و بنابراین، در شرایط تنش خشکی، غلظت بور اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. با این که گزارش‌های زیادی مبنی بر کاهش غلظت بور در گیاهان در شرایط تنش خشکی وجود دارد (Canavar *et al.*, 2025)، اما برخی مطالعات نشان می‌دهند در نتیجه خشکی و کمبود آب، غلظت بور در برخی گیاهان افزایش یافته است (Yau & Ryan, 2008; Brdar-Jokanović *et al.*, 2020) نقل و انتقال بور در گیاه عمدتاً از طریق جریان تعرقی اتفاق می‌افتد. وقتی در شرایط خشکی تعرق کاهش پیدا می‌کند، بور می‌تواند در برگ‌ها محبوس شده و حتی در مقادیر طبیعی بور خاک، موجب سمیت موضعی شود (Landi *et al.*, 2015). زیادی بور با اختلال جدی در بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه از جمله کاهش نرخ فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای و کاهش کارایی فتوسیستم II، تأثیر نامطلوبی بر رشد گیاه ایجاد می‌کند. بیش‌بود بور همچنین موجب کاهش تقسیم یاخته‌ها ریشه، کاهش انبساط دیواره یاخته‌ها و جلوگیری از رشد ریشه و بخش هوایی گیاه می‌شود. علاوه بر این، انباشت مقادیر

زیاد عنصر بور در برگ‌ها، با کاهش هدایت روزنه‌ای و در نتیجه کاهش تعرق، روابط آبی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Shah et al., 2017; Macho-Rivero et al., 2018).

از دیگر سو، نتایج مطالعات انجام شده بر روی گیاهان تیمار شده با سیلیسیم حاکی از آن است که در این گیاهان، کاهش جذب و تجمع بور اتفاق می‌افتد (Behtash et al., 2024). این کاهش در غلظت بور می‌تواند ناشی از تشکیل کمپلکس‌های سیلیکات بور در خاک یا در گیاه باشد که منجر به کاهش قابلیت استفاده بور خواهد شد (Akca et al., 2026). همچنین با توجه به تأثیر سیلیسیم بر افزایش عملکرد دانه و کلش، می‌توان کاهش غلظت بور گیاه را به اثر رقت مربوط دانست (Marschner, 2012).

نتیجه‌گیری کلی

برآیند مجموع نتایج این پژوهش نشان داد مصرف سیلیسیم می‌تواند از یک سو باعث افزایش معنادار اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب، و از سوی دیگر موجب جلوگیری از انباشت بیش از حد سدیم و عنصر در بخش هوایی و دانه گندم، به‌ویژه در شرایط تنش کم‌آبی شود. بنابراین، طبق این نتایج و با توجه به این‌که شدت اثرات مثبت مذکور در مصرف خاکی سیلیسیم بیشتر از روش محلول‌پاشی بود، توصیه می‌شود در مزرعه‌های گندم در شرایط تنش خشکی، مصرف خاکی ۲۰ کیلوگرم پتاسیم سیلیکات در هکتار حتماً مد نظر قرار گیرد.

شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن و ویرایش یا ترجمه از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

منابع مورد استفاده

References

- Abdi, M., Sharifan, H., Jafari, H., & Ghorbani, K. (2022). Determination of wheat stress index (CWSI) in Karaj for use in irrigation scheduling. *Journal of Water and Soil Science*, 26(2), 223-233. (In Persian with English abstract).
<http://dx.doi.org/10.47176/jwss.26.2.45031>
- Abdo, R.A., Hazem, M.M., El-Assar, A.E.M., Saady, H.S., & El-Sayed, S.M. (2024). Efficacy of nano-silicon extracted from rice husk to modulate the physio-biochemical constituents of wheat for ameliorating drought tolerance without causing cytotoxicity. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 13(1), 75.
<https://doi.org/10.1186/s43088-024-00529-2>
- Ahmadian, K., Jalilian, J., & Pirzad, A. (2021). Nano-fertilizers improved drought tolerance in wheat under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 244, 106544.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106544>
- Akca, H., Kan, S., Taskin, M.B., Yagcioglu, K.D., Kadioglu, Y.K., & Gunes, A. (2026). Evaluating the Effectiveness of Biogenic Silicon Sources and Na-Silicate as Silicon Fertilizers in Mitigating Boron Toxicity in Maize. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 26, 1139–1148. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02920-z>
- Aurangzaib, M., Ahmad, Z., Jalil, M. I., Nawaz, F., Shaheen, M. R., Ahmad, M., Hussain, A., Ejaz, M. K., & Tabassum, M. A. (2022). Foliar spray of silicon confers drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by enhancing morpho-physiological and

- antioxidant potential. *Silicon*, 14(9), 4793–4807. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01271-5>
- Brdar-Jokanović, M. (2020). Boron Toxicity and Deficiency in Agricultural Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4), 1424. <https://doi.org/10.3390/ijms21041424>
- Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. (2015). *Handbook of plant nutrition*. 2nd Edition. CRC Press. New York, USA. <https://doi.org/10.1201/b18458>
- Behtash, F., Mogheri, F., Aghaee, A., Seyed Hajizadeh, H., & Kaya, O. (2024). Role of silicon in alleviating boron toxicity and enhancing growth and physiological traits in hydroponically cultivated *Zea mays* var. Merit. *BMC Plant Biology*, 14(24), 550. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05275-2>
- Canavar, Ö., Gören, H.K., Tan, U., Yılmaz, O., Kaptan, M.A., & Küçük Kaya, S. (2025). Physiological Responses of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) to Multiple Combined Prolonged Drought Stress, Salinity Stress and Boron Toxicity: Insights from Pre- and Post-Recovery Stages. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 211: e70047. <https://doi.org/10.1111/jac.70047>
- Chang, Y., Zhang, X., Shu, Q., Sun, Z., Yang, M., Liu, X., Guo, J., He, Z., Li, L., Huang, J., Zhi, J., Chen, G. & Wang, T. (2026) Effects of fertilization measures on soil fertility and crop yields in drylands of the North China Plain: a meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 17:1768991. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1768991>
- da Silva, A.C.Z., Pereira, R.F., Ferreira, R.D.S., Alves, S.B., de Sousa, F.S., Rodrigues, S.S., de Brito Neto, J.F., de Melo, A.S., da Silva, R.M., & de Mesquita, E.F. (2025). Silicon and potassium synergistically alleviate salt stress and enhance soil fertility, nutrition, and physiology of passion fruit seedlings. *Frontiers in Plant Science*. 21(16), 1685221. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1685221>
- Eben, P., Mohri, M., Pauleit, S., Duthweiler, S., & Helmreich, B. (2024). Phytoextraction potential of herbaceous plant species and the influence of environmental factors – A meta-analytical approach. *Ecological Engineering*, 199, 107169. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107169>
- Gaines, T. P., & Mitchell, G. A. (1979). Boron determination in plant tissue by the azomethine H method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 10(8), 1099–1108. <https://doi.org/10.1080/00103627909366965>
- Haddad, R., & Mokhlesian, S. (2016). Effect silicon on the peroxidase gene expression and morphological traits of barley under Drought Stress. *Journal of Cell & Tissue*, 6(4), 451-460, (In Persian with English abstract), <https://doi.org/10.52547/JCT.6.4.451>
- Hassan, K.M., Ajaj, R., Abdelhamid, A.N., Ebrahim, M., Hassan, I.F., Hassan, F.A.S., Alam-Eldin, S.M., & Ali, M.A.A. (2024). Silicon: A Powerful Aid for Medicinal and Aromatic Plants against Abiotic and Biotic Stresses for Sustainable Agriculture. *Horticulturae*, 10(8): 806. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080806>
- Hatfield, J.L. & Dold, C. (2019). Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. *Frontiers in Plant Science*, 10: 103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Ishaq, H., Waraich, E., Hussain, S., & Ahmad, M. (2023). Silicon-mediated growth, physiological, biochemical and root alterations to confer drought and nickel stress tolerance in maize (*Zea mays* L.). *Silicon*, 15, 6579–6589. [10.1007/s12633-023-02536-x](https://doi.org/10.1007/s12633-023-02536-x)
- Ishfaq, N., Waraich, E. A., Ahmad, M., Hussain, S., Zulfiqar, U., Din, K. U., Haider, A., Yong, J. W. H., Askari, S. M. H., & Ali, H. M. (2024). Mitigating drought-induced oxidative stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through foliar application of

- sulfhydryl thiourea. *Scientific Reports*, 14(1), 15985. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66506-y>
- Johnson, S.N., Chen, Z.H., Rowe, R.C., & Tissue, D.T. (2022). Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1030620. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030620>
- Karathanasis, A.D. (2002). Mineral Equilibria in Environmental Soil System. Pp. 109-151. In: Dixon, J.B., & Weed, S.B. (Eds). *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. SSSA, Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser7.c4>
- Kumar, A., Sharma, S. K., Lata, C., Devi, R., Kulshrestha, N., Krishnamurthy, S. L., Singh, K., & Yadav, R. K. (2018). Impact of water deficit (salt and drought) stress on physiological, biochemical and yield attributes on wheat (*Triticum aestivum*) varieties. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 88(10), 1624-1632. <https://doi.org/10.56093/ijas.v88i10.84255>
- Landi, M., Tattini, M., & Gould, K.S. (2015). Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions. *Environmental and Experimental Botany*, 119, 4-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.012>
- Liu, X., Lai, Q., Yin, S., & Gao, R. (2026). Assessing the impact of drought on water use efficiency among ecosystems on the Mongolian Plateau. *Energy Nexus*, 21, 100664. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2026.100664>
- Macho-Rivero, M.A., Herrera-Rodríguez, M.B., Brejcha, R., Schäffner, A.R., Tanaka, N., Fujiwara, T., González-Fontes, A.A., & Camacho-Cristóbal, J.J. (2018). Boron Toxicity Reduces Water Transport from Root to Shoot in Arabidopsis Plants. Evidence for a Reduced Transpiration Rate and Expression of Major PIP Aquaporin Genes. *Plant and Cell Physiology*, 59(4), 841-849. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcy026>
- Makkari, M., Abedinpour, M., & Dehghan, H. (2020). Effect of Drought Stress and Planting Date on Grain Yield and Water Use Efficiency of Autumn Wheat in Kashmar Region. *Journal of Water Research in Agriculture*. 34(2), 167-187, (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2020.122256>
- Marschner, H. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Third Edition, Academic Press, London. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Mengel, K., & Kirkby, E.A. (2001). *Principles of plant nutrition*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 849 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2>
- Mukarram, M., Zehra, A., Afzal, S., Sliacka Konôpková, A., Khan, K.A., Alqahtani, A.R., El-Mekkawy, H.I., Kurjak, D., Lux, A., Chen, R., & Li, Q. (2026). Beyond essentiality: silicon as a systems regulator of photosynthesis under stress scenarios. *Frontiers in Plant Scienc*, 16, 1690421. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1690421>
- Munns, R., Wallace, P.A., Teakle, N.L., Colmer, T.D. (2010). Measuring soluble ion concentrations (Na⁺, K⁺, Cl⁻) in salt-treated plants. Pp. 371-382. In: Sunkar, R. (Eds). *Plant Stress Tolerance. Methods in Molecular Biology*. vol 639. Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0_23
- Narayanaswamy, C., & Prakash, N.B. (2009). Calibration and categorization of plant available silicon in rice soils of south India. *Journal of Plant Nutrition*, 32(8), 1237-1254. <https://doi.org/10.1080/01904160903005970>
- Paladino, G.L., Dupaul, G., Jonsson, A., Haller, H., Eivazi, A., & hedenström, E. (2025). Selecting effective plant species for the phytoremediation of persistent organic pollutants and multielement contaminated fibrous sediments. *Environmental Science Europe*, 37, 117. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01168-9>

- Pezeshk, S., Malakouti, M.J., Tehrani, M.M., & Rezakhani, L. (2023). Investigation of the effect of silicon on wheat yield and water use efficiency under water stress conditions. *Journal of Soil Research*, 6(4), 335-347, (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2023.358545.663>
- Saleh, J., Najafi, N., & Oustan, S. (2017). Effects of Silicon Application on wheat growth and some physiological characteristics under different levels and sources of salinity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48, 1114-1122. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1323090>
- Saleh, J., Najafi, N., Oustan, S., Ghasemi-Golezani, K., & Aliasgharzad, N. (2018). Silicon affects rice growth, superoxide dismutase activity and concentrations of chlorophyll and proline under different levels and sources of soil salinity. *Silicon*, 11(6), 2659-2667. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-0057-0>
- Shah, A., Wu, X., Ullah, A., Fahad, S., Muhammad, R., Yan, L., & Uiang, C. (2017). Deficiency and toxicity of boron: Alterations in growth, oxidative damage and uptake by citrange orange plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145, 575-582. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.003>
- Shahbazi, K., Marzi, M., Mohammadi, M. H., Asadi, H., Fathi Gerdelidani, A., Hasheminasab, K., Toloui, R., Beheshti, M., Avizhgan, A., & Cheraghi, M. (2024). *Methods of Soil Analysis: Sampling, Chemical, and Physical Methods*. First Edition. Soil and Water Research Institute. Karaj, Iran. (In Persian). https://www.researchgate.net/publication/381917025_Methods_of_Soil_Analysis_Sampling_Chemical_and_Physical_Methods
- Shahmoradi, M., Varmazyari, H., Doosti, B., Babaei, M., Chalehkaei, M. (2025). *Eighty Years of Agricultural Sector Planning (1948-2028): Implications for Implementing the Seventh Development Program Law*. (e20939). Reports, 33(6), e20939. <https://doi.org/10.22034/report.mrc.2025.1404.33.6.20939>
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., & Zheng, B. (2020). Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: A review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39, 509-531. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-10018-x>
- Sharma, J.K., Kumar, N., Singh, N.P., & Santal, A.R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, 27, 14, 1076876. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
- Sposito, G. 1989. *The Chemistry of Soils*. New York. Oxford University Press.
- Teixeira, G.C.M., de Prado, R.M., Rocha, A.M.S., de Oliveira Filho, A.S.B., de Sousa Junior, G.S., & Grato, P.L. (2022). Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. *Scientific Reports*, 12, 17487. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>
- Thorne, S. L., Hartley, S. E., & Maathuis, F. J. M. (2020). Is silicon a panacea for alleviating drought and salt stress in crops? *Frontiers in Plant Science*, 11, 1221. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01221>
- Villa e Vila, V., Marques, P.A.A., Gomes, T.M., Nunes, A.F., Montenegro, V.G., Wenneck, G.S., & Franco, L.B. (2024). Deficit Irrigation with silicon application as strategy to increase yield, photosynthesis and water productivity in lettuce crops. *Plants*, 13, 1029. <https://doi.org/10.3390/plants13071029>
- Xu, J., Zhao, H., Wang, S., Zheng, Y., Mai, B., & Zhang, X. (2023). Assessment of photosynthesis and yield loss of winter wheat under ground-level ozone exposure. *Environmental Technology & Innovation*, 29, 103013. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103013>

- Yan, G., Fan, X., Tan, L., Yin, C, Li, T., & Liang, Y. (2021). Root silicon deposition and its resultant reduction of sodium bypass flow is modulated by OsLsi1 and OsLsi2 in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 219-227.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.015>
- Yau, S.K., & Ryan, J. (2008), Boron Toxicity Tolerance in crops: A viable alternative to soil amelioration. *Crop Science*, 48, 854-865. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.10.0539>
- Zhang, Z., Chen, Y., Yang, F., Yang, K., Li, W., Zhang, X., Liu, W., & Deng, H. (2025). Ethylene-mediated drought tolerance in the critically endangered *Artocarpus nanchuanensis*: Insights from physiological and transcriptomic analyses. *Plants*, 14(17), 2636. <https://doi.org/10.3390/plants14172636>
- Zhao, B., Wu, F., Cai, G., Xi, P., Guo, Y., & Li, A. (2024). Physiological response mechanism and drought resistance evaluation of *Passiflora edulis* Sims under drought stress. *Journal of Experimental Botany*, 93(6), 1345-1363.
<https://doi.org/10.32604/phyton.2024.050950>