



University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research

Vol. 15, No. 2, Summer 2025 (115-132)

doi: 10.22124/CR.2025.29834.1854

pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

The effect of SiO₂ nanoparticles on quantitative and qualitative yield and yield components of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties under late season water deficit stress conditions

Ali Sepehri^{1*} and Nesa Gharehbaghli²

1. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(* Corresponding author: a_sepehri@basu.ac.ir)

2. Research Assistant Professor, Department of Crop and Horticultural Sciences Research, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Hamedan, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Increasing temperatures and water deficit at the end of spring and early summer are very important challenges at the late-season growing period of winter wheat varieties in temperate and cold regions. Considering the economic importance of wheat, it seems necessary to use appropriate strategies to optimize the wheat production system under terminal drought stress. In this regard, cultivating high-yielding and terminal drought-resistant varieties in combination with growth regulators can be effective. The objective of the present study was to investigate the effect of nanosilicon (SiO₂-NP) on yield and yield components of three winter wheat varieties under late-season water deficit stress conditions.

Materials and methods

The experiment was conducted with three winter wheat varieties based on split-plot in a randomized complete block design with three replications at the research field of Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, in 2021-2022. The main factor was in four levels, including no-water stress with nanosilicon application, no-water stress and no-nanosilicon application, water deficit stress with nanosilicon application, and water deficit stress and no-nanosilicon application, and the subfactor was three winter wheat varieties, including Alvand, Pishgam and Pishtaz. Water deficit stress was applied at the end of the growing season by stopping irrigation at the end of flowering stage (code 69 in BBCH scale). Nanosilicon foliar application at a concentration of 30 mg/L was performed in two stages, before flowering and spike emergence (code 51 in BBCH scale) and flowering initiation (code 61 in BBCH scale). The measured traits in this study included the number of spikes per unit area, number of spikelets per spike, number of grains per spike, 1000-grain weight, grain yield, biological yield, harvest index, leaf greenness index (SPAD), and grain protein content. Statistical analyses was performed using SAS software and graphs were drawn using Excel software.

Research findings

The results of the analysis of variance showed that the effect of water deficit stress and nanosilicon was significant on all measured traits, except for the number of spikes per unit area. The differences between the studied wheat varieties were also significant in terms of the number of spikes per unit area, grain yield, biological yield and harvest index, but was insignificant in term of other measured traits. However, the interaction of stress and nanosilicon × variety was significant only on two traits, 1000-grain weight and grain yield. The results of comparison of means revealed that the number of spikes per unit area in Alvand variety was significantly higher than two varieties, Pishgam and Pishtaz.



Also, the traits that were affected by water deficit stress and nanosilicon, showed a decrease during water stress without nanosilicon application. The results showed that in both non-stress and water deficit stress conditions, the application of nanosilicon increased grain yield and yield components in all three wheat varieties compared to its non-application. However, the effect of nanosilicon was greater in water deficit stress, so that the grain yield of three varieties Alvand, Pishgam and Pishtaz increased by 18.03, 8.05 and 9.22 percent, respectively, with the application of nanosilicon compared to the non-application of nanosilicon under water deficit conditions. The highest grain yield (6275.7 kg.ha⁻¹) was obtained with the application of nanosilicon in Alvand variety under non-water stress conditions, and the lowest grain yield (5185 kg.ha⁻¹) was observed in Pishtaz variety under water deficit stress conditions without the application of nanosilicon.

Conclusion

Water deficit stress at the end of flowering stage and the beginning of grain filling period reduced grain yield of the studied three wheat cultivars, but the yield reduction was greater in Alvand variety than in the two other varieties. The reason for this reduction was mainly related to the reduction in the number of grains per spike and 1000-grain weight under water deficit stress conditions. Nanosilicon foliar application largely compensated for the yield reduction caused by late season water deficit stress in all three studied varieties, especially in Alvand variety.

Keywords: Grain protein, Growth regulator, Leaf greenness, Nanosilicon, Water deficit

Received: February 12, 2025

Accepted: July 22, 2025

Cite this article:

Sepehri, A., & Gharehbaghli, N. (2025). The effect of SiO₂ nanoparticles on quantitative and qualitative yield and yield components of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties under late season water deficit stress conditions. *Cereal Research*, 15(2), 115-132. doi: [10.22124/CR.2025.29834.1854](https://doi.org/10.22124/CR.2025.29834.1854).



تاثیر نانوذرات دی اکسید سیلیسیم ($\text{SiO}_2\text{-NP}$) بر عملکرد کمی و کیفی و اجزای عملکرد رقم های گندم (*Triticum aestivum* L.) پاییزه تحت شرایط تنش کم آبی انتهایی فصل

علی سپهری^{۱*} و نساء قره باغلی^۲

۱- دانشجویار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران (* نویسنده مسئول):

a_sepehri@basu.ac.ir

۲- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران

چکیده جامع

مقدمه: افزایش گرما و کمبود آب در اواخر بهار و اوایل تابستان، چالش بسیار مهمی در پایان فصل رشد رقم های گندم پاییزه در مناطق معتدله و سردسیری است. با توجه به اهمیت اقتصادی گندم، استفاده از راه کارهای مناسب برای بهینه کردن سیستم تولید گندم در شرایط خشکی آخر فصل ضروری به نظر می رسد. در این راستا، کشت رقم های پرمحصول و متحمل به تنش خشکی انتهایی دوره رشد در تلفیق با تنظیم کننده های رشد می تواند موثر واقع شود. هدف از مطالعه حاضر، بررسی تاثیر نانوسیلیسیم بر عملکرد و اجزای عملکرد سه رقم گندم پاییزه تحت شرایط تنش کمبود آب انتهایی فصل رشد بود.

مواد و روش ها: آزمایش با سه رقم گندم پاییزه به صورت کرت های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ انجام شد. عامل اصلی در چهار سطح شامل بدون تنش آب با مصرف نانوسیلیسیم، بدون تنش آب و بدون مصرف نانوسیلیسیم، تنش کم آبی با مصرف نانو سیلیسیم و تنش کم آبی و بدون مصرف نانوسیلیسیم و عامل فرعی شامل سه رقم گندم پاییزه الوند، پیشگام و پیشتاژ در نظر گرفته شد. تنش کمبود آب در انتهایی فصل رشد با قطع آبیاری در پایان مرحله گلدهی (مقیاس ۶۹ در روش BBCH) اعمال شد. محلول پاشی نانو سیلیسیم طی دو مرحله قبل از گلدهی و ظهور سنبله (مقیاس ۵۱ در روش BBCH) و شروع گلدهی (مرحله ۶۱ در مقیاس BBCH) با غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر انجام شد. صفات اندازه گیری شده در این مطالعه، شامل تعداد سنبله در واحد سطح، تعداد سنبلچه در سنبله، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیست توده، شاخص برداشت، شاخص سبزیبگی برگ (SPAD) و محتوای پروتئین دانه بودند. تجزیه های آماری با استفاده از نرم افزار SAS و رسم نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel انجام شد.

یافته های تحقیق: نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که تاثیر تنش کم آبی و نانوسیلیسیم بر تمامی صفات اندازه گیری شده، به جز تعداد سنبله در واحد سطح معنی دار بود، اما تفاوت بین رقم های گندم مورد مطالعه از نظر تعداد سنبله در واحد سطح، عملکرد دانه، عملکرد زیست توده و شاخص برداشت، معنی دار و از نظر سایر صفات اندازه گیری شده، غیر معنی دار بود. برهمکنش تنش و نانوسیلیسیم× رقم نیز فقط بر دو صفت وزن هزار دانه و عملکرد دانه معنی دار شد. نتایج مقایسه میانگین ها نشان داد که تعداد سنبله در واحد سطح در رقم الوند به طور معنی داری بیش تر از دو رقم پیشگام و پیشتاژ بود. همچنین،

صفاتی که تحت تاثیر تنش کمبود آب و نانوسیلیسیم قرار گرفتند، بدون مصرف نانوسیلیسیم در شرایط تنش کاهش یافتند. نتایج نشان داد که در هر دو شرایط عدم تنش و تنش کم‌آبی، کاربرد نانوسیلیسیم نسبت به عدم کاربرد آن، عملکرد دانه و اجزای عملکرد را در هر سه رقم گندم افزایش داد، اما تاثیر نانوسیلیسیم در شرایط تنش کم‌آبی بیش‌تر بود، به‌طوری که عملکرد دانه سه رقم الوند، پیشگام و پیشناز با کاربرد نانوسیلیسیم نسبت به عدم کاربرد نانوسیلیسیم تحت شرایط کم‌آبی به‌ترتیب به‌میزان ۱۸/۰۳، ۸/۰۵ و ۹/۲۲ درصد افزایش یافت. بیش‌ترین عملکرد دانه (۶۲۷۵/۷ کیلوگرم در هکتار) با مصرف نانوسیلیسیم تحت شرایط بدون تنش کم‌آبی در رقم الوند و کم‌ترین عملکرد دانه (۵۱۸۵ کیلوگرم در هکتار) در رقم پیشناز تحت شرایط تنش کم‌آبی بدون مصرف نانوسیلیسیم به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: تنش کم‌آبی در پایان مرحله گلدهی و آغاز مرحله دانه‌بندی، عملکرد دانه هر سه رقم گندم مورد مطالعه را کاهش داد، اما میزان کاهش عملکرد در رقم الوند بیش‌تر از دو رقم دیگر بود. علت کاهش عملکرد عمدتاً مربوط به کاهش تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه تحت شرایط تنش کمبود آب بود. محلول‌پاشی نانوسیلیسیم تا حدود زیادی کاهش عملکرد ناشی از تنش کم‌آبی آخر فصل را در هر سه رقم مورد بررسی به‌ویژه در رقم الوند جبران کرد.

واژه‌های کلیدی: پروتئین دانه، تنظیم کننده رشد، سبزی‌نگی برگ، کمبود آب، نانو سیلیکون

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

نحوه استناد به این مقاله:

سپهری، علی، و قره‌باغلی، نساء. (۱۴۰۴). تاثیر نانوذرات دی اکسید سیلیسیم ($\text{SiO}_2\text{-NP}$) بر عملکرد کمی و کیفی و اجزای عملکرد رقم‌های گندم (*Triticum aestivum* L.) پاییزه تحت شرایط تنش کم‌آبی انتهای فصل. *تحقیقات غلات*، ۱۵(۲)، ۱۱۵-۱۳۲. doi: [10.22124/CR.2025.29834.1854](https://doi.org/10.22124/CR.2025.29834.1854)

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) در بین غلات در سراسر جهان جایگاهی محوری دارد و بخش قابل توجهی از کالری و پروتئین دریافتی روزانه مردم را تامین می‌کند (Kizilgeci *et al.*, 2021)، به‌طوری که بیش از ۴۰ درصد از جمعیت جهان برای تغذیه به گندم وابسته هستند (Zhou *et al.*, 2018). در ایران، با توجه به جایگاه خاص گندم در الگوی تغذیه، به‌نظر می‌رسد این وابستگی بیش‌تر باشد. گندم مهم‌ترین گیاه زراعی ایران است که با بیش از ۶/۵ میلیون هکتار سطح زیر کشت، حدود ۶۰ درصد از اراضی زراعی ایران را به‌خود اختصاص داده است. با این‌حال، پتانسیل عملکرد گندم به‌دلیل تغییرات آب و هوایی، به‌ویژه تنش‌های غیرزیستی نظیر خشکی، گرما و شوری به‌شدت کاهش یافته است (Yadav *et al.*, 2020).

خشکی همواره به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدود کننده عملکرد گندم در سراسر جهان شناخته شده است (Zaynalinezhad *et al.*, 2012). انتظار می‌رود گرمایش انسانی (Anthropogenic warming)، باعث افزایش بیش‌تر خشکی خاک در آینده شود که در پایان فصل رشد گندم در اواخر بهار و تابستان، می‌تواند چالشی جدی برای کشاورزان ایجاد کند (Samaniego *et al.*, 2018). نتایج اغلب پژوهش‌ها بر حساسیت گندم به خشکی آخر فصل زراعی (در دوره ظهور سنبله تا مرحله پر شدن دانه) تأکید دارد و اختلال ناشی از خشکی در این مرحله از رشد، باعث کاهش ۹۲-۳۱ درصدی عملکرد گندم می‌شود (Abid *et al.*, 2018). مهربان و همکاران (Mehraban *et al.*, 2019) گزارش کردند که خشکی در مراحل مختلف رشد گندم موجب کاهش عملکرد و اجزای عملکرد رقم‌های مختلف می‌شود و کم‌ترین عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی از زمان گلدهی تا پایان دوره رشد به‌دست می‌آید. اهمیت اقتصادی گندم ایجاب می‌کند تا راه‌کارهای مختلف برای بهینه کردن سیستم تولید این محصول در شرایط اقلیمی خشک مورد ارزیابی قرار گیرند. به‌نظر می‌رسد کشت رقم‌های پرمحصول و متحمل به خشکی آخر فصل در تلفیق با سایر روش‌های مدیریت کم‌آبی، از مؤثرترین راه‌کارها باشد و تأثیر تنش خشکی را به‌حداقل برساند (Bihamta *et al.*, 2018). به‌عنوان یک راهبرد برای جلوگیری از اثرات مخرب تنش رطوبتی، اثر تنظیمی برخی از عناصر و ترکیبات با غلظت مناسب در گیاه پیشنهاد شده است (Pezeshk *et al.*, 2023). اهمیت

سیلیسیم در رشد، توسعه و کاهش اثرات تنش در گیاهان، اخیراً بیش‌تر شناخته شده و مورد توجه قرار گرفته است (Rajput *et al.*, 2021). سیلیسیم (Si) یک عنصر مفید برای غلات است که زمینه سازگاری گیاه با شرایط تنش رطوبتی را فراهم می‌آورد (Karmollachab *et al.*, 2015). پتانسیل سیلیسیم برای افزایش تحمل تنش‌های محیطی در چندین گونه گیاهی از جمله گندم گزارش شده است (Wang *et al.*, 2021). سیلیسیم می‌تواند رشد گیاه را در شرایط نرمال و تنش افزایش دهد (Irfan *et al.*, 2023). القای مقاومت به گیاه توسط سیلیسیم در برابر تنش را می‌توان به تشکیل فیتولیت‌ها و پلیمریزاسیون سیلیسیم نامحلول در دیواره‌های سلولی و همچنین اطراف شبکه آوندی نسبت داد که از دست دادن آب را کاهش می‌دهد و تعرق را کنترل می‌کند (Xu *et al.*, 2023). استفاده از سیلیسیم باعث افزایش آب و پتانسیل اسمزی در ریشه و برگ و کاهش تنش آبی می‌شود (Ming *et al.*, 2012). گزارش شده است که اثر مثبت سیلیسیم در کنترل تنش خشکی در گیاهان عمدتاً به‌دلیل اثرات تنظیم اسمزی آن است (Mushtaq *et al.*, 2018; Zargar *et al.*, 2019). همچنین، سیلیسیم قادر است مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی را فعال کند و مانع تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) شود و در نتیجه پراکسیداسیون لیپیدی را کاهش دهد (Kim *et al.*, 2017). به‌دلیل نقش حیاتی سیلیسیم در افزایش رشد و عملکرد غلات (Devanna *et al.*, 2021)، به‌نظر می‌رسد کاربرد آن به یک رویکرد پایدار برای کاهش اثرات نامطلوب تنش‌های غیر زنده تبدیل خواهد شد (Etesami & Jeong., 2018). از سوی دیگر، اخیراً روش‌های جدید مشتمل بر رویکردهای مبتنی بر نانوذرات (NPs) به‌منظور بهبود تولید گیاهان زراعی در شرایط نامطلوب تنش مطرح شده است. نانوذرات ترکیباتی با ویژگی‌های فیزیکو‌شیمیایی خاص از جمله اندازه، چگالی و ویژگی‌های سطحی هستند که در سیستم‌های زیستی قابل استفاده می‌باشند. نشان داده شده است که استفاده از سیلیسیم به‌صورت ترکیبات نانو از طریق تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی و سنتز متابولیت‌های خاص، تأثیر مثبتی بر وضعیت گیاهان در شرایط تنش خشکی دارد (Verma *et al.*, 2022).

با توجه به افزایش دمای محیط، کمبود آب و بروز تنش خشکی در کشور و همچنین نیاز به واردات گندم، انجام تحقیقات کاربردی به‌منظور حفظ و بهبود عملکرد کمی و کیفی و افزایش تحمل به خشکی رقم‌های گندم

داخلی ضروری به‌نظر می‌رسد. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر نانوذرات سیلیسیم بر عملکرد و اجزای عملکرد سه رقم گندم تحت شرایط تنش کمبود آب آخر فصل در منطقه همدان انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در شهرستان همدان در مزرعه‌ای با مختصات جغرافیایی $35^{\circ}40'$ عرض شمالی و $48^{\circ}25'$ طول شرقی و با ارتفاع ۱۶۸۰ متر از سطح دریا اجرا شد. منطقه مورد بررسی از نظر اقلیمی بر اساس آمار هواشناسی ۳۰ ساله، جزو مناطق نیمه‌خشک و سرد، با متوسط بارندگی بلندمدت سالیانه 342 میلی‌متر و متوسط درجه حرارت 28 درجه سلسیوس در گرم‌ترین ماه سال است. میزان بارش‌ها در سال آبی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ برابر با 252 میلی‌متر بود که کاهش بارش‌ها را نسبت به متوسط بلندمدت نشان می‌دهد. بیش‌ترین کاهش فصلی بارش‌ها در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ مربوط به سه ماه فصل بهار بود و بنابراین گیاهان در اواخر دوره رشد با کمبود بارندگی مواجه شدند (جدول ۱). برای تعیین وضعیت فیزیکی و شیمیایی خاک، از چندین نقطه مزرعه آزمایشی در عمق صفر تا 30 سانتی‌متری، نمونه مرکب تهیه و برای تعیین بافت و درصد عناصر موجود در خاک به آزمایشگاه تجزیه خاک ارسال شد (جدول ۲).

آماده‌سازی مزرعه، شامل شخم متوسط و دو مرحله دیسک عمود بر هم قبل از کاشت در پاییز انجام شد.

کودهای پایه بر اساس آزمایش خاک و توصیه کودی به‌مقدار 140 کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل و 180 کیلوگرم در هکتار نیتروژن از منبع اوره به زمین داده شد. تمامی کود فسفر و یک سوم کود اوره قبل از کاشت و باقیمانده کود اوره به‌صورت سرک در مرحله پنجه‌زنی و قبل از ساقه رفتن مصرف شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. ترکیب تنش آبی و نانوسیلیسیم در چهار سطح، شامل عدم تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم (به‌عنوان شاهد)، عدم تنش و مصرف نانوسیلیسیم، تنش و مصرف نانوسیلیسیم، تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم به‌عنوان عامل اصلی و سه رقم گندم الوند، پیشگام و پیش‌تاز به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. کشت بذر در تاریخ دهم مهرماه انجام شد. هر کرت شامل هشت خط کاشت به‌طول شش متر و فاصله خطوط کاشت 25 سانتی‌متر بود. آبیاری اول بلافاصله پس از کاشت، آبیاری دوم یک هفته پس از آبیاری اول و آبیاری‌های بعدی در مراحل مختلف رشد با توجه به نیاز آبی گیاه انجام شد. نیاز آبی گیاه بر اساس رابطه (۱) برآورد شد (Alizadeh & Kamali, 2008):

$$WR = \frac{ETc - Pe}{Ei/100} \quad (1)$$

که در آن، WR نیاز آبی گیاه (میلی‌متر)، ETc تبخیر و تعرق گیاه زراعی (میلی‌متر)، Pe بارندگی موثر (میلی‌متر) و Ei راندمان آبیاری (درصد) است.

جدول ۱- متوسط بارش، دما و رطوبت نسبی محل آزمایش طی دوره رشد گیاه در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و مقایسه آن با متوسط ۳۰ ساله
Table 1. Average rainfall, temperature and relative humidity of the experimental site during the plant growth period in 2021-2022 and its comparison with 30-year averages

Months	2021-2022			Thirty-year average		
	Rainfall (mm)	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Rainfall (mm)	Temperature (°C)	Relative humidity (%)
October	15	15	45	20	14	50
November	24	8	55	35	10	60
December	36	2	65	45	2	70
January	42	-2	70	55	0	75
February	41	-1	75	50	0	80
March	32	5	60	40	7	65
April	21	10	50	30	12	55
May	15	15	45	25	15	50
June	10	18	40	15	20	45
July	5	23	35	10	25	40
August	3	28	30	5	27	35
September	8	23	35	12	24	40

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در عمق صفر تا سی سانتی‌متر
Table 2. Physico-chemical properties of the soil of experimental field at 0-30 cm

N (%)	K (mg/kg ⁻¹)	P (mg/kg ⁻¹)	Electrical conductivity (dS/m ⁻¹)	Organic carbon (%)	pH	Soil texture
0.11	355.6	7.5	0.95	0.89	7.7	clay-silty

تجزیه آماری، پس از اطمینان از نرمال بودن باقیمانده داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار SAS (Ver 9.4) و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. نمودارهای مربوطه نیز با نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

تعداد سنبله در واحد سطح

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که اثر رقم بر تعداد سنبله در واحد سطح در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود، اما اثر تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم و برهمکنش تنش - نانوسیلیسیم × رقم بر تعداد سنبله معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین بین رقم‌ها بیانگر اختلاف معنی‌دار بین سه رقم از نظر تعداد سنبله در واحد سطح بود (جدول ۵)، به‌طوری که بیش‌ترین تعداد سنبله در واحد سطح (۵۸۵) مربوط به رقم الوند و کم‌ترین تعداد به رقم پیش‌تاز (۵۴۲) و پیش‌گام (۵۵۲) اختصاص داشت. بیش‌تر بودن تعداد سنبله در واحد سطح در رقم الوند نسبت به دو رقم دیگر، نشان‌دهنده توانایی پنجه‌زنی بیش‌تر این رقم نسبت به دو رقم دیگر بود. شمسی و همکاران (Shamsi *et al.*, 2011) نیز تفاوت بین رقم‌های مختلف گندم نان را از نظر تولید سنبله در واحد سطح گزارش کردند. تعداد متفاوت سنبله در واحد سطح می‌تواند ناشی از تفاوت ذاتی رقم‌ها در توانایی تولید و نگهداری پنجه‌ها باشد (Bulman & Hant, 1988). گزارش شده است که تعداد پنجه بارور تعیین‌کننده تعداد نهایی سنبله در واحد سطح است و پنجه‌زنی تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی تغییر می‌کند (Yousefi *et al.*, 2018). اسلام و همکاران (Islam *et al.*, 2021) نیز مطابق با پژوهش حاضر عدم تأثیر خشکی پایان فصل بر تعداد سنبله در واحد سطح را گزارش کردند. به‌نظر می‌رسد که به‌علت زمان وقوع تنش خشکی در مرحله بعد از گلدهی، تعداد سنبله در واحد سطح در رقم‌های مورد بررسی تحت تأثیر خشکی قرار نگرفته است.

تنش کم آبی در انتهای دوره رشد (پایان دوره گلدهی، کد ۶۹ در مقیاس BBCH) با قطع آبیاری تا زمان برداشت اعمال شد. نانوسیلیسیم مورد استفاده از نانو پودر دی اکسید سیلیسیم (SiO₂-NP) با اندازه ذرات ۱۱-۱۳ نانومتر، سطح ویژه ۲۰۰ متر مربع بر گرم، چگالی توده‌ای ۰/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مربع و خلوص ۹۹/۸ درصد از شرکت نانوثانی تهیه شد. محلول‌پاشی نانوسیلیسیم در دو مرحله، قبل از گلدهی و ظهور سنبله (کد ۵۱ در مقیاس BBCH) و شروع گلدهی (کد ۶۱ در مقیاس BBCH) با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر (معادل ۳۵۰ گرم در هکتار) انجام شد.

برای اندازه‌گیری شاخص سبزی‌نگی برگ (SPAD)، از هر کرت ۳۰ برگ کاملاً توسعه یافته بالایی از بوته‌هایی که در وسط کرت‌ها قرار داشتند، به‌طور تصادفی انتخاب شدند و سپس عدد سبزی‌نگی برگ با استفاده از کلروفیل‌متر دستی (SPAD-502, Minolta) از قسمت وسط و مجاور رگبرگ اصلی، قرائت و میانگین اعداد به‌عنوان شاخص سبزی‌نگی برگ ثبت شد. زمان رسیدگی و برداشت در تیمارهای تنش، با توجه به رقم و مصرف نانوسیلیسیم بین هفت تا ده روز زودتر از تیمارهای بدون تنش انجام شد. برای تعیین اجزای عملکرد، تعداد ۲۵ بوته به‌طور تصادفی از هر کرت در زمان برداشت، انتخاب و صفاتی نظیر تعداد سنبله در واحد سطح، تعداد سنبله در سنبله و تعداد دانه در سنبله اندازه‌گیری شدند. در پایان دوره رشد نیز شش متر مربع از هر کرت برداشت و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن هزار دانه، تعداد هزار بذر تصادفی از هر کرت، شمارش و وزن آن‌ها با ترازوی دیجیتالی ثبت شد. به‌منظور تعیین شاخص برداشت، نسبت عملکرد اقتصادی به عملکرد زیست‌توده بر حسب درصد محاسبه شد (Alavifazel, 2016). برای اندازه‌گیری پروتئین دانه نیز ابتدا درصد نیتروژن دانه به‌روش کج‌لدال تعیین شد و سپس با ضرب کردن درصد نیتروژن به‌دست آمده در عدد ۶/۲، محتوای پروتئین دانه برای هر تیمار بر حسب درصد محاسبه شد.

تعداد سنبلچه در سنبله

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم بر تعداد سنبلچه در سنبله در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، در حالی که این ویژگی تحت تاثیر رقم و برهمکنش تنش - نانوسیلیسیم × رقم قرار نگرفت. مقایسه میانگین اثر تنش - نانوسیلیسیم بر تعداد سنبلچه در سنبله (جدول ۴) نشان داد که تیمار عدم تنش با مصرف نانوسیلیسیم نسبت به سایر تیمارها، بیش‌ترین تعداد سنبلچه در سنبله را به‌خود اختصاص داد و با تیمار عدم تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم اختلاف معنی‌داری داشت. نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط بدون تنش، مصرف نانوسیلیسیم سبب افزایش تعداد سنبلچه در سنبله شد، اما طی تنش کم‌آبی، مصرف و عدم مصرف نانوسیلیسیم تاثیر معنی‌داری بر تعداد سنبلچه در سنبله ایجاد نکرد. قابل ذکر است که تعداد سنبلچه در سنبله در شرایط تنش کم‌آبی، با مصرف و بدون مصرف نانوسیلیسیم نسبت به شرایط بدون تنش کم‌تر بود. امام و همکاران (Emam *et al.*, 2007) نیز نشان دادند که تنش خشکی سبب کاهش تشکیل گل‌ها و همچنین ریزش گل‌های تشکیل شده در گندم شد و تعداد سنبلچه در سنبله را کاهش داد. نواز و همکاران (Nawaz *et al.*, 2012) نیز بیان کردند که تنش خشکی بر کاهش تعداد سنبلچه در سنبله تاثیر دارد. پورابوقداره و همکاران (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2020) گزارش کردند که تعداد سنبلچه در سنبله در گندم دوروم در شرایط خشکی بیش از ۲۵ درصد کاهش یافت. فرانتوا و همکاران (Frantová *et al.*, 2022) نیز مشاهده کردند که تعداد سنبلچه در سنبله در رقم‌هایی که در مرحله گرده‌افشانی و بعد از گرده‌افشانی تحت تنش خشکی قرار گرفتند، به‌طور چشم‌گیری کاهش یافت. از طرف دیگر، حبیبی (Habibi, 2011) طی بررسی رقم‌های گندم گزارش کرد که کاربرد سیلیسیم تعداد سنبلچه در سنبله گندم را افزایش داد. حسن‌الزمان و همکاران (Hasanuzzaman *et al.*, 2018) نیز گزارش کردند که سیلیسیم سبب تشکیل تعداد گلچه بیش‌تر در گیاه کلزا شد و موجب شد که گیاه تحت شرایط تنش خشکی، ریزش گل‌های کم‌تری داشته باشد. اگرچه بر خلاف نتایج این محققین، در آزمایش حاضر مصرف نانوسیلیسیم نتوانست اثر منفی ناشی از تنش کم‌آبی بر تعداد سنبلچه‌ها را جبران کند و تعداد سنبلچه در سنبله تحت تنش رطوبتی با مصرف نانوسیلیسیم نیز همچنان کاهش نشان داد.

تعداد دانه در سنبله

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که اثر تنش و نانوسیلیسیم بر تعداد دانه در سنبله در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد، اما تاثیر رقم و برهمکنش تنش - نانوسیلیسیم × رقم بر تعداد دانه در سنبله معنی‌دار نبود. نتایج مقایسه میانگین اثر تنش - نانوسیلیسیم بر تعداد دانه در سنبله (جدول ۴) نشان داد که اگرچه تیمار عدم تنش با مصرف نانوسیلیسیم نسبت به سایر تیمارها بیش‌ترین تعداد (۲۹) دانه در سنبله را به خود اختصاص داد، اما این تیمار با تیمارهای عدم تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم و تنش با مصرف نانوسیلیسیم در یک گروه آماری قرار گرفتند. تیمار تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم با کم‌ترین تعداد دانه در سنبله (۲۵) در مقایسه با تیمار تنش با مصرف نانوسیلیسیم کاهش معنی‌داری داشت. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان داد که تنش کم‌آبی انتهای فصل، به‌ویژه تحت شرایط بدون مصرف نانوسیلیسیم، تعداد دانه در سنبله رقم‌های مورد مطالعه را کاهش داد.

کافی و همکاران (Kafi *et al.*, 2000) اظهار کردند که از دلایل کاهش تعداد دانه به هنگام تنش کم‌آبی، کاهش تعداد گل‌های تبدیل شده به دانه و همچنین جنین‌های سقط شده است. فرانتوا و همکاران (Frantová *et al.*, 2022) نیز گزارش کردند که وقوع خشکی در مرحله بعد از گلدهی بر تعداد دانه در سنبلچه و تعداد دانه در سنبله تأثیر می‌گذارد. از طرفی، انتقال مواد از آوند آبکش به فتوسنتز و متابولیسم مقصد وابسته است و تنش کم‌آبی، فتوسنتز و تولید مواد فتوسنتزی را کاهش می‌دهد، زیرا انتقال مواد فتوسنتزی از آوند آبکش وابسته به پتانسیل فشاری است. طی تنش کم‌آبی، پتانسیل آب در آوند آبکش کاهش می‌یابد و کاهش در پتانسیل آماس، از انتقال مواد فتوسنتزی و در نهایت از مقدار مواد پرورده ذخیره‌ای می‌کاهد. این امر آسیب‌پذیری تشکیل دانه را در شرایط کم‌آبی افزایش می‌دهد. نتایج آزمایش حسینعلی‌پور و همکاران (Hosseinalipour *et al.*, 2020) نشان داد که بیش‌ترین میزان دانه در شرایطی به‌دست آمد که میزان رطوبت خاک در محدوده مکش ۰/۳ - تا ۲ - بار بود و با افزایش مکش خاک به ۵ - بار در رقم حساس و ۷ - و بالاتر در رقم‌های مقاوم، میزان دانه و دیگر صفات مرفولوژیک موثر بر عملکرد گیاه کاهش یافت. این محققین کاهش میزان دانه در سنبله و صفات مرفولوژیک موثر بر عملکرد را به‌سبب تاثیر رطوبت خاک بر رشد ریشه

گندم دانستند. فلاح و همکاران (Fallah *et al.*, 2004) اظهار کردند که سیلیسیم با کاهش اثرات تنش خشکی، تعداد سنبلچه در سنبله و تعداد دانه در سنبله را افزایش داد. احمد و همکاران (Ahmad *et al.*, 2007) نیز اعلام کردند که تعداد دانه در گندم، تحت تاثیر تنش رطوبتی کاهش یافت، اما کاربرد سیلیسیم تعداد دانه در سنبله را افزایش داد. فیلیپ و همکاران (Philipp *et al.*, 2018) گزارش کردند که تعداد دانه در سنبله همبستگی مثبت و معنی داری با تعداد دانه در سنبلچه و تعداد سنبلچه در سنبله دارد و بنابراین هر عاملی که سبب افزایش تعداد دانه در سنبلچه و تعداد سنبلچه در سنبله شود، تعداد دانه در سنبله را نیز افزایش می دهد. بهداد و همکاران (Behdad *et al.*, 2022) نیز گزارش کردند که تنش خشکی در گندم منجر به کاهش تعداد دانه در سنبله شد. ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2023) نیز نشان دادند که محتوای رطوبتی خاک در زمان کاشت بذر با میزان تنش خشکی ارتباط دارد و می تواند بر تعداد دانه در سنبله رقم های گندم دیم بهاره موثر باشد.

وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم و همچنین برهمکنش تنش - نانوسیلیسیم × رقم بر وزن هزاردانه در سطح احتمال پنج درصد معنی دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین برهمکنش تنش - نانوسیلیسیم × رقم (جدول ۶) نشان داد که در رقم الوند تیمار عدم تنش با مصرف نانوسیلیسیم بیشترین وزن هزار دانه (۴۲/۱ گرم) را به خود اختصاص داد، اما این

مقدار با وزن هزار دانه این رقم در تیمار عدم تنش و بدون مصرف نانوسیلیسیم تفاوت آماری معنی داری نداشت. همچنین، کمترین میزان وزن هزار دانه (۳۲/۹ گرم) در تیمار تنش بدون مصرف نانوسیلیسیم مشاهده شد که اختلاف معنی داری نسبت به تیمار تنش با مصرف نانوسیلیسیم از نظر وزن هزار دانه داشت. در رقم پیشگام نیز روند مشابهی با مقادیر کم تر به دست آمد. در رقم پیشتاز در هر دو شرایط تنش و عدم تنش، مصرف نانوسیلیسیم تفاوت معنی داری در وزن هزار دانه با عدم مصرف نانوسیلیسیم ایجاد کرد. به طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که تحت تنش کمبود رطوبتی، وزن هزار دانه در هر سه رقم گندم مورد مطالعه کاهش یافت. امام و همکاران (Emam *et al.*, 2007) نیز گزارشاتی را مبنی بر وجود رابطه بین محتوای رطوبتی خاک با وزن هزار دانه در گیاه گندم ارائه کردند. آن ها اظهار داشتند که تحت شرایط تنش رطوبتی شدید، آب کافی برای پر شدن دانه ها وجود ندارد و در نتیجه مقصدهای فیزیولوژیک به خوبی پر نمی شوند و در پی آن وزن دانه ها به شدت کاهش می یابد. نتایج مطالعات عبدلی و سعیدی (Abdoli & Saeidi, 2015) نیز نشان داد که تنش خشکی در دوره پر شدن دانه، موجب کاهش وزن هزار دانه و وزن دانه در سنبله در رقم های گندم زمستانه شد. آن ها همچنین گزارش کردند که کاهش وزن هزار دانه رقم های گندم تحت شرایط تنش خشکی انتهاب دوره رشد می تواند به دلیل کوتاه تر شدن طول دوره پر شدن دانه ها و دمای بالای محیط طی روزهای پایانی دوره رشد گیاه باشد.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نانوسیلیسیم و تنش کمبود آب انتهایی فصل بر صفات اندازه گیری شده در سه رقم گندم پاییزه
Table 3. Results of analysis of variance of the effect of nanosilicon and late-season water deficit stress on the measured traits in three winter wheat cultivars

Source of variation	df	No. of spikes per m ²	No. of spikelets per spike	No. of grains per spike	1000-grain weight	Grain yield	Biological yield	Harvest index	Grain protein	SPAD index
Replication	2	8816.1*	3.7**	33.0**	51.5*	1818192.5*	3133187.3*	117.4**	0.69*	40.02*
Stress & Si (A)	3	2739.0 ^{ns}	5.5**	16.1*	66.3*	3119192.1**	7523581.2**	19.9*	18.8*	60.60*
Error a	6	1813.0	0.19	3.21	8.51	240217.5	64817.1	9.37	2.39	23.63
Variety (B)	2	2983.6*	0.14 ^{ns}	0.14 ^{ns}	8.8 ^{ns}	2826050.1**	1855376.0*	56.0**	1.78 ^{ns}	4.03 ^{ns}
A×B	6	755.1 ^{ns}	0.18 ^{ns}	3.81 ^{ns}	11.7*	446813.2*	882462.4 ^{ns}	4.07 ^{ns}	4.15 ^{ns}	0.73 ^{ns}
Error b	16	515.5	0.88	1.27	2.34	106678.5	327366.7	4.44	1.57	10.48
CV (%)	-	13.10	7.70	4.28	4.15	14.44	13.10	13.06	7.23	7.81

^{ns}, * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر نانوسیلیسیم و تنش کم‌آبی بر تعداد سنبلچه در سنبله، تعداد دانه در سنبله، عملکرد زیست‌توده و شاخص برداشت گندم

Table 4. Comparison of means of the effect of nanosilicon and water deficit stress on the number of spikelets per spike, number of grains per spike, biological yield and harvest index of wheat

Treatment	No. of spikelets per spike	No. of grains per spike	Biological yield (kg.ha ⁻¹)	Harvest index (%)
Non-Water stress + Nano silicon	15.1 ^a	29.5 ^a	15395.2 ^a	42.8 ^a
Non-Water stress + Non-nano silicon	14.0 ^b	28.8 ^a	15024.7 ^a	41.5 ^{ab}
Water stress + Nano silicon	13.5 ^c	27.9 ^{ab}	14023.3 ^b	40.1 ^b
Water stress + Non-nano silicon	13.1 ^c	25.5 ^c	12743.3 ^c	38.2 ^c

Means followed by similar letter in each column are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر رقم بر تعداد سنبله در واحد سطح، عملکرد زیست‌توده و شاخص برداشت گندم

Table 5. Comparison of means of the effect of variety on the number of spikes per unit area, biological yield and harvest index of wheat

Treatment	No. of spikes per unit area	Biological yield (kg.ha ⁻¹)	Harvest index (%)
Alvand variety	585.2 ^a	15669.4 ^a	42.8 ^a
Pishgam variety	552.9 ^b	14204.6 ^b	41.1 ^b
Pishtaz variety	541.9 ^{bc}	14094.6 ^{bc}	38.7 ^c

Means followed by similar letter in each column are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر برهمکنش نانوسیلیسیم و تنش کم‌آبی با رقم بر وزن هزار دانه و عملکرد دانه گندم

Table 6. Comparison of means of the effect of nanosilicon and water deficit stress with variety on 1000-grain weight and grain yield of wheat

Treatment	Variety	1000-grain weight (g)	Changes from control (%)	Grain yield (kg.ha ⁻¹)	Changes from control (%)
Non-Water stress + Nano silicon	Alvand	42.1 ^a	+6.05%	7413.2 ^a	+6.18%
Non-Water stress + Non-nano silicon		39.7 ^{ab}	0%	6981.8 ^a	0%
Water stress + Nano silicon		36.6 ^{cd}	-7.81%	6118.7 ^b	-12.36%
Water stress + Non-nano silicon		32.9 ^e	-17.13%	5185.0 ^d	-25.73%
Non-Water stress + Nano silicon	Pishgam	39.5 ^{ab}	+5.33%	6275.7 ^b	+5.31%
Non-Water stress + Non-nano silicon		37.5 ^{bc}	0%	5959.1 ^{bc}	0%
Water stress + Nano silicon		35.2 ^d	-6.13%	5453.2 ^c	-8.49%
Water stress + Non-nano silicon		33.3 ^e	-11.20%	5046.5 ^d	-15.32%
Non-Water stress + Nano silicon	Pishtaz	38.7 ^{ab}	+6.03%	6081.7 ^b	+5.06%
Non-Water stress + Non-nano silicon		36.5 ^{cd}	0%	5789.1 ^{bc}	0%
Water stress + Nano silicon		35.5 ^d	-2.74%	5293.5 ^c	-8.56%
Water stress + Non-nano silicon		32.1 ^e	-12.05%	4846.5 ^d	-16.28%

Means followed by similar letter in each column are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.

به دوران رسیدگی نزدیک می‌شود، مواد حاصل از فتوسنتز را به اندام‌های زایشی منتقل می‌کند. سیلیسیم از طریق تسریع و تقویت این عمل سبب افزایش وزن هزار دانه می‌شود. لیانگ و همکاران (Liang *et al.*, 2007) گزارش کردند که کاربرد سیلیسیم، شاخص سطح برگ را در گیاه افزایش می‌دهد و در نتیجه سبب بهبود جذب نور و فتوسنتز در گیاه می‌شود و به دنبال آن، وزن هزار دانه افزایش می‌یابد. سالم و همکاران (Salem *et al.*, 2022) نیز اظهار کردند که استفاده از کودهای سیلیسی موجب افزایش وزن هزار دانه گندم تحت شرایط کم‌آبی شد.

نتایج پژوهش حاضر در مورد تأثیر نانوسیلیسیم نشان داد که کاربرد نانوسیلیسیم در هر سه رقم تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش رطوبتی، وزن هزار دانه را به‌طور معنی‌داری نسبت به عدم کاربرد نانوسیلیسیم افزایش داد. گانگ و همکاران (Gong *et al.*, 2003) طی بررسی چند رقم گندم گزارش کردند که تحت تنش خشکی، مصرف سیلیسیم سبب کاهش کم‌تر وزن دانه در همه رقم‌ها شد. آن‌ها اظهار کردند که سیلیسیم سبب توسعه ریشه می‌شود و شرایط را برای جذب عناصر غذایی فراهم می‌کند که این به نوبه خود باعث افزایش فتوسنتز می‌شود. زمانی که گیاه

عملکرد زیست توده

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم در سطح احتمال یک درصد و اثر رقم در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد زیست توده معنی دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم نشان داد که تیمار بدون تنش با مصرف نانوسیلیسیم نسبت به سایر تیمارها بیشترین مقدار عملکرد زیست توده (۱۵/۳۹۵ تن در هکتار) را به خود اختصاص داد که با تیمار عدم تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم تفاوت معنی داری نداشت (جدول ۴). در مقابل، کمترین عملکرد زیست توده با ۱۲/۷۴۳ تن در هکتار را تیمار تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم تولید کرد که با تیمار تنش و مصرف نانوسیلیسیم تفاوت معنی داری داشت، به طوری که مصرف نانوسیلیسیم در شرایط تنش توانست افزایش معنی داری در عملکرد زیست توده ایجاد کند. در مجموع نتایج این بررسی نشان داد که عملکرد زیست توده تحت تنش رطوبتی کاهش یافت و مصرف نانوسیلیسیم تا حدودی این کاهش را جبران کرد.

به طور کلی، اندام‌های هوایی بیش‌تر از ریشه‌ها تحت تأثیر تنش آبی قرار می‌گیرند، زیرا در شرایط تنش آبی، دهیدراسیون و کاهش حجم سلولی در ساقه‌ها بیش‌تر از ریشه‌ها به وقوع می‌پیوندد. در شرایط تنش کم آبی، کوچک شدن برگ‌ها و کاهش سطح آن‌ها سبب افزایش مقاومت گیاه به تنش خشکی می‌شود (Yang et al., 2021). این امر می‌تواند دلیلی بر کاهش وزن اندام‌های هوایی گندم در تیمارهای تنش رطوبتی نسبت به تیمارهای عدم تنش باشد. ویلیک و همکاران (Willick et al., 2018) گزارش دادند که تنش خشکی در گندم ماده خشک را به طور معنی داری کاهش داد. به گزارش تباسام و همکاران (Tabassam et al., 2014) تنش کمبود آب از طریق کوتاه کردن دوره رشد و تسریع در رسیدگی، فنولوژی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب کاهش تولید ماده خشک و کاهش گسترش و دوام سطح برگ شده و پیری آن را تسریع می‌کند. همچنین نتایج این بررسی نشان داد که تحت شرایط عدم تنش، کاربرد سیلیسیم نسبت به عدم کاربرد آن موجب بهبود عملکرد زیست توده شد. مصطفی‌زاده فرد و همکاران (Mostafazadeh-Fard et al., 2008) نشان دادند که با کاربرد سیلیسیم در برنج تحت تنش، مقدار کاه آن افزایش یافت. همچنین آن‌ها اظهار کردند که سیلیسیم اثرات منفی تنش را در گیاه

کاهش می‌دهد و باعث افزایش سطح برگ و به تبع آن، افزایش فتوسنتز در گیاه شده و سبب رشد رویشی و اندام‌های هوایی در گیاه می‌شود. اشفاق و همکاران (Ashfaq et al., 2024) نیز طی یک بررسی اظهار کردند که سیلیسیم سبب افزایش معنی دار وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک کل گیاه شد. این نتایج آشکار می‌سازد که مصرف سیلیسیم موجب تخفیف اثرات منفی تنش بر وزن خشک گیاه می‌شود.

مقایسه میانگین اثر رقم بر عملکرد زیست توده نیز نشان داد که بیشترین عملکرد زیست توده (۱۵/۶۶۹ تن در هکتار)، متعلق به رقم الوند بود. کمترین عملکرد زیست توده (۱۴/۰۹۴ تن در هکتار) نیز به رقم پیشتاز اختصاص داشت که با رقم پیشگام تفاوت معنی داری نداشت (جدول ۵). سلیم (Saleem, 2003) طی بررسی چهار رقم گندم دورم و چهار رقم گندم نان، گزارش داد که رقم‌های مختلف گندم، وزن خشک بوته متفاوتی تولید کردند. همچنین، یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2018) گزارش دادند که رقم‌های مختلف گندم، وزن بوته متفاوتی تولید کردند.

عملکرد دانه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم و اثر رقم بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد و برهمکنش تنش - نانوسیلیسیم × رقم بر عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد معنی دار بود (جدول ۳). نتایج حاصل از مقایسه میانگین برهمکنش تنش - نانوسیلیسیم × رقم (جدول ۶)، نشان داد که در هر سه رقم گندم مورد بررسی، تیمار عدم تنش با مصرف نانوسیلیسیم، بیشترین عملکرد دانه را تولید کرد که با تیمار عدم تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم برای دو رقم الوند و پیشگام تفاوت آماری نداشتند. همچنین، تیمار تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم دارای کمترین عملکرد دانه در هر سه رقم مورد بررسی بود. عملکرد دانه رقم الوند به میزان (۷/۴۱۳ تن در هکتار) در تیمار عدم تنش و مصرف نانوسیلیسیم با تیمار عدم تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم تفاوت معنی داری نداشت، اما عملکرد دانه این رقم در تیمار تنش با مصرف نانوسیلیسیم ۶/۱۱۸ تن در هکتار بود که افزایش معنی دار ۱۸ درصدی در مقایسه با تیمار تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم نشان داد. عملکرد دانه رقم پیشگام نیز در تیمار عدم تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم به میزان ۵/۹۵۹ تن در هکتار بود که

شرایط خشکی مشهودتر بود. اپستین و بلوم (Epstein & Bloom, 2004) بیان کردند که کاربرد سیلیسیم در شرایط خشکی از طریق افزایش جذب عناصر، شاخص سطح برگ، دوام سطح برگ و میزان فتوسنتز را افزایش می‌دهد و سبب انتقال مواد فتوسنتزی بیش‌تر به اندام‌های زایشی می‌شود و تعداد سنبله در واحد سطح، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و در نهایت عملکرد دانه را افزایش می‌دهد. بخاری و همکاران (Bukhari et al., 2021) نیز گزارش کردند که سیلیسیم با افزایش میزان کلروفیل و فتوسنتز عملکرد گیاه را تحت تنش خشکی افزایش می‌دهد.

محتوای پروتئین دانه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم بر محتوای پروتئین دانه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد، اما پروتئین دانه تحت تاثیر عامل رقم قرار نگرفت که حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار بین درصد پروتئین دانه سه رقم گندم مورد بررسی در شرایط این آزمایش است (جدول ۳). مقایسه میانگین بین تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم نشان داد که بیش‌ترین میزان پروتئین دانه (۱۳/۷ درصد) را تیمار تنش با مصرف نانوسیلیسیم به‌خود اختصاص داد که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها داشت (شکل ۳). همچنین، تفاوت معنی‌داری بین درصد پروتئین دانه در دو تیمار تنش - بدون مصرف نانوسیلیسیم و بدون تنش - با مصرف نانوسیلیسیم مشاهده نشد. تیمار بدون تنش - بدون مصرف نانوسیلیسیم نیز کم‌ترین مقدار پروتئین دانه (۱۱/۵ درصد) را نسبت به سایر تیمارها به‌خود اختصاص داد، اما با تیمار بدون تنش - با مصرف نانوسیلیسیم تفاوت معنی‌داری نداشت. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که تنش کم‌آبی آخر فصل سبب افزایش پروتئین دانه شد. همچنین، در شرایط بدون تنش، محلول‌پاشی نانوسیلیسیم تاثیر چندانی بر پروتئین دانه نداشت، اما مصرف نانوسیلیسیم تحت شرایط تنش، پروتئین دانه رقم‌های مورد بررسی را افزایش داد.

تنش کمبود آب اصولاً به‌علت بسته شدن نسبی روزنه‌ها، فتوسنتز جاری را در مرحله پرشدن دانه‌ها کاهش می‌دهد و سبب کاهش تولید مواد فتوسنتزی برای انتقال به دانه‌ها می‌شود. در نتیجه انتقال آسمیلات‌ها به دانه‌های در حال نمو کاهش می‌یابد و مقدار نشاسته تجمع یافته در آندوسپرم نسبت به کل حجم دانه کم می‌شود. در

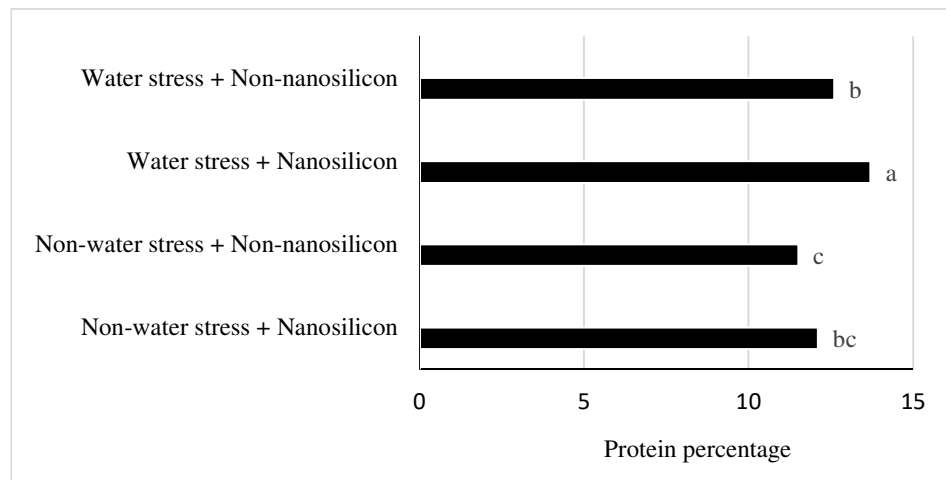
با مصرف نانوسیلیسیم در شرایط تنش به ۶/۲۷۵ تن در هکتار رسید و بنابراین ۵/۳ درصد افزایش یافت، اما این افزایش معنی‌دار نبود. همچنین، دو رقم پیش‌تاز و پیش‌گام در تیمار تنش و عدم مصرف نانوسیلیسیم دارای کم‌ترین عملکرد دانه بودند که تفاوت آن‌ها با تیمار تنش و مصرف نانوسیلیسیم معنی‌دار بود. این نتایج نشان داد که تنش رطوبتی در مرحله دانه‌بندی عملکرد دانه هر سه رقم را کاهش داد و میزان کاهش در رقم الوند بیش‌تر بود. علت این کاهش را می‌توان به کاهش تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه تحت تنش رطوبتی نسبت داد. در مقابل، محلول‌پاشی نانوسیلیسیم توانست در حدود ۱۳/۳۷، ۶/۸۳ و ۷/۷۲ درصد کاهش عملکرد را به‌ترتیب در رقم‌های الوند، پیش‌گام و پیش‌تاز جبران کند.

یافته‌های این پژوهش با نتایج توکلی و همکاران (Tavakoli et al., 2023) که اظهار کردند عملکرد دانه در گندم تحت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری به‌سبب کاهش سرعت فتوسنتز، دوام سطح برگ، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و مدت زمان پرشدن دانه کاهش می‌یابد، مطابقت داشت. احتمالاً شرایط آب و هوایی که با کاهش رطوبت و افزایش دما در زمان پر شدن دانه‌ها همراه است، دوره پر شدن دانه را محدود می‌کند و منجر به کاهش عملکرد دانه از طریق کاهش وزن دانه می‌شود. اسلام و همکاران (Islam et al., 2021) گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی بعد از گرده‌افشانی که معمولاً در مناطقی با اقلیم نیمه‌خشک اتفاق می‌افتد، به‌علت کاهش شدید فتوسنتز جاری گیاه، انباشت مواد حاصل از این فرآیند در دانه محدود می‌شود و در چنین شرایطی ممکن است طول دوره انباشت مواد در دانه نیز کاهش یابد. این پژوهش‌گران کاهش چشم‌گیر طول مدت پر شدن دانه را ۱۵ تا ۲۴ درصد و عملکرد دانه را ۱۱ تا ۳۴ درصد گزارش کردند. علاوه بر این، پیری زودرس برگ ناشی از خشکی و کاهش تولید ماده خشک کل، سهم قابل توجهی در کاهش عملکرد دانه دارد (Islam et al., 2021). نتایج لیلایه و الخطیب (Leilah & Al-Khateeb, 2005) نیز حاکی از کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی به‌سبب کاهش تعداد سنبله در متر مربع، وزن هزار دانه و عملکرد زیست‌توده بود که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش رطوبتی، کاربرد نانوسیلیسیم نسبت به عدم کاربرد آن عملکرد دانه را افزایش داد و این افزایش در

(Triboui, 2008). گنگ و همکاران (Gong *et al.*, 2008) عنوان کردند که افزایش پروتئین در گیاه با محلول پاشی نانوسیلیسیم تحت شرایط تنش کم آبی می‌تواند در ارتباط سنتز پروتئین‌های جدید و افزایش پروتئین‌های مرتبط با ایجاد تحمل به تنش اکسیداتیو باشد.

این حالت، مقدار پروتئین قسمت‌های غیر آندوسپرم مانند جنین، پوسته و لایه آلورون، بیش از آندوسپرم نشاسته‌ای است و درصد پروتئین دانه افزایش می‌یابد. البته در برخی گزارش‌ها عنوان شده است که تنش کم آبی بر میزان انتقال مجدد نیتروژن به دانه‌ها تاثیری ندارد (Daniel &



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر کم آبی و نانوسیلیسیم بر پروتئین دانه گندم

Figure 1. Comparison of means of the effect of water deficit and nanosilicon on wheat grain protein

برداشت وابستگی زیادی به تغییرات عملکرد دانه دارد. بر اساس رابطه شاخص برداشت (نسبت عملکرد اقتصادی به عملکرد زیستی) هر عاملی که باعث شود عملکرد دانه بیش از وزن خشک کل گیاه تحت تأثیر قرار گیرد، باعث تغییر شاخص برداشت می‌شود. بنابراین، سیلیسیم با کاهش اثر تنش خشکی، موجب افزایش بیش‌تر عملکرد دانه شده و سبب افزایش شاخص برداشت شده است.

نتایج مطالعات قبلی نیز نشان می‌دهد که کاربرد سیلیسیم در غلات موجب افزایش مقدار محصول دانه از طریق افزایش درصد پر شدن دانه می‌شود که در نهایت افزایش عملکرد را به دنبال دارد (Fallah *et al.*, 2004). علاوه بر این، گزارش شده است که محلول پاشی سیلیسیم با افزایش شاخص افت دمای سایه‌انداز و به عبارت دیگر کاهش دمای سایه‌انداز (کانوپی) گیاه منجر به بهبود بیش‌تر عملکرد دانه نسبت به عملکرد زیست‌توده می‌شود و در نهایت موجب افزایش شاخص برداشت در شرایط تنش خشکی در گندم می‌شود (Maghsoudi & Emam, 2016). یوسفی و اثنی‌عشری (Yousefi & Esna-Ashari, 2017) نیز اظهار داشتند که تغذیه بهینه با سیلیسیم سبب افزایش رشد و تولید حجمی و وزنی ریشه‌ها می‌شود و در نهایت سطح کل جذب‌کننده عناصر

شاخص برداشت

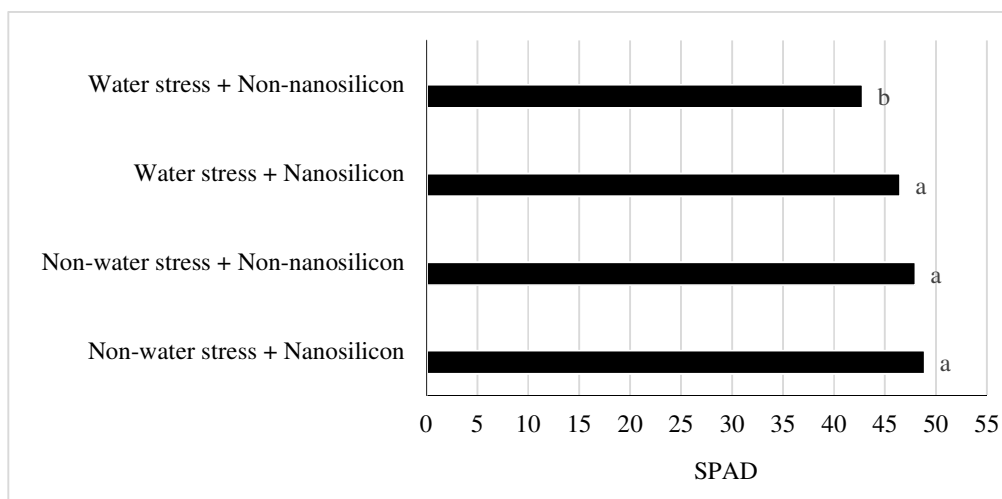
نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم در سطح احتمال پنج درصد و اثر رقم در سطح احتمال یک درصد بر شاخص برداشت معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم نشان داد که تیمار بدون تنش با مصرف نانوسیلیسیم نسبت به سایر تیمارها بیش‌ترین میزان (۴۱/۸ درصد) شاخص برداشت را به خود اختصاص داد (جدول ۴). همچنین، تفاوت این شاخص در تیمار بدون تنش بدون مصرف نانوسیلیسیم با تیمار تنش با مصرف نانوسیلیسیم معنی‌دار بود. تیمار تنش و بدون مصرف نانوسیلیسیم نیز کم‌ترین میزان شاخص برداشت (۳۸/۲) را داشت که با تیمار تنش با مصرف نانوسیلیسیم اختلاف معنی‌داری داشت. این نتایج نشان داد که مصرف نانوسیلیسیم تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش رطوبتی، شاخص برداشت را افزایش داد، ولی تأثیر آن در شرایط تنش بیش‌تر بود. پورکر و همکاران (Porker *et al.*, 2020) اظهار کردند که شاخص برداشت بیانگر چگونگی تسهیم مواد پرورده بین سازه‌های رویشی گیاه و دانه می‌باشد. از آنجایی که یکی از اجزای محاسبه شاخص برداشت عملکرد دانه است، تغییرات شاخص

را به خود اختصاص داد، اما این مقدار با عدد سبزی‌نگی برگ در تیمارهای بدون تنش - بدون مصرف نانوسیلیسیم و تنش - با مصرف نانوسیلیسیم تفاوت آماری معنی‌داری نداشت. در مقابل، تیمار تنش - بدون مصرف نانوسیلیسیم، دارای کم‌ترین میزان عدد سبزی‌نگی برگ (۴۲/۸) بود و تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها داشت (شکل ۲). بر اساس نتایج این آزمایش، به نظر می‌رسد که محلول‌پاشی نانوسیلیسیم در شرایط بدون تنش تاثیر معنی‌داری بر سبزی‌نگی برگ نداشته باشد، اما تحت شرایط تنش کم‌آبی قادر است سبزی‌نگی برگ را در حد متعادلی حفظ کند و از این لحاظ بر عملکرد فتوسنتزی گیاه در شرایط تنش موثر باشد. نتایج مطالعات قبلی نیز نشان می‌دهد که سیلیسیم سبب رسوب سیلیس در پهنک برگ، افزایش استحکام برگ‌ها و در نتیجه افزایش غلظت کلروفیل در برگ‌ها می‌شود و از این طریق موجب جلوگیری از کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش خشکی می‌شود (Adatia & Beasford, 1986). همچنین، سیلیسیم قادر است تحت شرایط تنش، از کلروفیل گیاه محافظت کند و با افزایش فعالیت آنزیم ریبولوز کربوکسیلاز بی فسفات سبب افزایش فتوسنتز و عملکرد دانه شود (Liang, 1998).

افزایش می‌یابد. نتایج مقایسه میانگین رقم‌های مورد مطالعه نیز اختلاف معنی‌دار بین آن‌ها را از نظر شاخص برداشت نشان داد (جدول ۴). رقم الوند با ۴۲/۸ درصد دارای بیش‌ترین شاخص برداشت و رقم پیش‌تاز با ۳۸/۷ درصد دارای کم‌ترین شاخص برداشت بودند. دای و همکاران (Dai et al., 2016) نشان دادند که شاخص برداشت در رقم‌های مختلف گندم متفاوت است. این امر حاکی از آن است که توانایی رقم‌ها در انتقال و انباشتگی مواد فتوسنتزی به‌ویژه از برگ به دانه‌ها متفاوت است.

شاخص سبزی‌نگی برگ (SPAD)

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها در مورد شاخص سبزی‌نگی برگ که نشان‌دهنده میزان سبزی‌نگی و کلروفیل برگ است، نشان داد که اثر تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم بر شاخص سبزی‌نگی برگ (عدد کلروفیل‌متر) در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود، اما عدد سبزی‌نگی برگ تحت تاثیر رقم و برهم‌کنش تنش - نانوسیلیسیم × رقم قرار نگرفت (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر تیمارهای تنش - نانوسیلیسیم از نظر شاخص سبزی‌نگی برگ نشان داد که اگرچه تیمار بدون تنش با مصرف نانوسیلیسیم نسبت به سایر تیمارها، بیش‌ترین میزان عدد سبزی‌نگی برگ (۴۸/۹)



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر کم‌آبی و نانوسیلیسیم بر شاخص سبزی‌نگی برگ (SPAD) گندم

Figure 2. Comparison of means of the effect of water deficit and nanosilicon on wheat greenness index (SPAD)

شرایط بدون تنش و تنش کم‌آبی آخر فصل در رقم‌های گندم مورد بررسی شد، به‌طوری که کاربرد نانوسیلیسیم در شرایط بدون تنش کم‌آبی موجب افزایش ۷/۳، ۵/۱ و ۶/۱ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد آزمایش

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد نانوسیلیسیم موجب افزایش تعداد سنبله در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد زیست‌توده و عملکرد کمی و کیفی دانه در هر دو

تضاد منافع

نویسندگان تأیید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تا کنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

(بدون تنش - بدون کاربرد نانوسیلیسیم) به‌ترتیب در سه رقم الوند، پیشگام و پیشتاز شد. علاوه بر این، تنش کم‌آبی آخر فصل موجب کاهش بیش‌تر عملکرد دانه رقم الوند نسبت به دو رقم پیشگام و پیشتاز شد، ولی کاربرد نانوسیلیسیم توانست این کاهش را به‌نحو مطلوبی به‌ویژه در رقم الوند جبران کند. محلول‌پاشی نانوسیلیسیم با بهبود اجزای عملکرد گندم تحت شرایط کم‌آبی، توانست سبب افزایش ۱۸ درصدی عملکرد دانه در رقم الوند، ۸ درصدی در رقم پیشگام و ۹ درصدی در رقم پیشتاز شود. در مجموع رقم الوند نسبت به دو رقم دیگر، پاسخ بهتری به محلول‌پاشی نانوسیلیسیم طی تنش کم‌آبی آخر فصل نشان داد. اگرچه برای تأیید نتایج این مطالعه، تکرار آزمایش‌های مشابه در سال‌های مختلف و به‌ویژه با سایر غلظت‌های نانوسیلیسیم و رقم‌های دیگر گندم ضروری است، اما بر اساس نتایج این پژوهش، محلول‌پاشی با غلظت ۳۰ گرم در لیتر نانوسیلیسیم به‌منظور جبران کاهش عملکرد دانه رقم‌های گندم در اثر تنش کم‌آبی آخر فصل پیشنهاد می‌شود.

References

- Abdoli, M., & Saeidi, M. (2015). Effect of drought stress during grain filling on yield and its components, gas exchange variables, and some physiological traits of wheat cultivars. *Journal of Agricultural Science & Technology*, 17(4), 885-898. doi: [10.1001.1.16807073.2015.17.4.14.1](https://doi.org/10.1001.1.16807073.2015.17.4.14.1).
- Abid, M., Ali, S., Qi, L. K., Zahoor, R., Tian, Z., Jiang, D., Snider, J. L., & Dai, T. (2018). Physiological and biochemical changes during drought and recovery periods at tillering and jointing stages in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*, 8, 1-15. doi: [10.1038/s41598-018-21441-7](https://doi.org/10.1038/s41598-018-21441-7).
- Adatia, M. H., & Beasford, R. T. (1986). The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. *Annals of Botany*, 58(3), 343-351. doi: [10.1093/oxfordjournals.aob.a087212](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087212).
- Ahmad, F., Lah, M., Aziz, T., Maqsood, M. A., Tahir, M., & Kanwal, S. (2007). Effect of silicon application on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth under water deficiency stress. *Emirates Journal of Food & Agriculture*, 19, 1-7. doi: [10.9755/ejfa.v12i1.5170](https://doi.org/10.9755/ejfa.v12i1.5170).
- Alavifazel, M. (2016). Assessment of remobilization rate to grain durum and bread wheat genotypes in response to nitrogen amounts. *Crop Physiology Journal*, 7(28), 5-18. [In Persian]. doi: [10.1001.1.2008403.1394.7.28.1.2](https://doi.org/10.1001.1.2008403.1394.7.28.1.2).
- Alizadeh, A., & Kamali, G. H. (2008). Crop Water Requirement in Iran. Astan Ghods Razavi Publication. Mashhad, Iran. 228 p. [In Persian].
- Ashfaq, W., Brodie, G., Fuentes, S., Pang, A., & Gupta, D. (2024). Silicon improves root system and canopy physiology in wheat under drought stress. *Plant & Soil*, 502, 279-296. doi: [10.1007/s11104-023-06202-4](https://doi.org/10.1007/s11104-023-06202-4).
- Behdad, M., Paknejad, F., Mahdavi Damghani, A., Vazan, S., & Moarrefi, M. (2022). Effects of drought stress on agronomical traits of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta-analysis. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 15(1), 53-65. [In Persian]. doi: [10.22077/escs.2020.3377.1851](https://doi.org/10.22077/escs.2020.3377.1851).
- Bihanta, M., Shirkavand, M., Hasanpour, J., & Afzalifar, A. (2018). Evaluation of durum wheat genotypes under normal irrigation and drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, 9(24), 119-136. [In Persian]. doi: [10.29252/jcb.9.24.119](https://doi.org/10.29252/jcb.9.24.119).

- Bukhari, M. A., Ahmad, Z., Ashraf, M. Y., Afzal, M., Nawaz, F., Nafees, M., Jatoti, W. M., Malghani, N. A., Shah, A. N., & Manan, A. (2021). Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) Through Improving Photosynthetic Pigments, Biochemical and Yield Characters. *Silicon*, 13, 4757-4772. doi: [10.1007/s12633-020-00797-4](https://doi.org/10.1007/s12633-020-00797-4).
- Bulman, P., & Hunt, L. A. (1988). Relationships among tillering, spike number and grain yield in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Ontario. *Canadian Journal of Plant Science*, 168, 583-596. doi: [10.4141/cjps88-07](https://doi.org/10.4141/cjps88-07).
- Dai, J., Bean, B., Brown, B., Bruening, W., Edwards, J., Flowers, M., Karow, R., Lee, C., Morgan, G., Ottman, M., Ransom, J., & Wiersma, J. (2016). Harvest index and straw yield of five classes of wheat. *Biomass & Bioenergy*, 85, 223-227. doi: [10.1016/j.biombioe.2015.12.023](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.023).
- Daniel, C., & Triboi, E. (2008). Changes in wheat protein aggregation during grain development: Effects of temperature and water stress. *Journal of Agronomy*, 16, 1-12. doi: [10.1016/S1161-0301\(01\)00114-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00114-9).
- Devanna, B. N., Mandlik, R., Raturi, G., Sudhakaran, S. S., Sharma, Y., Sharma, S., Rana, N., Bansal, R., Barvkar, V., Tripathi, D. K., Shivaraj, S. M., & Deshmukh, R. (2021). Versatile role of silicon in cereals: Health benefits, uptake mechanism, and evolution, *Plant Physiology & Biochemistry*, 165, 173-186. doi: [10.1016/j.plaphy.2021.03.060](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.060).
- Emam, Y., Ranjbar A. M., & Bahrani, M. J. (2007). Evaluation of yield and yield components in wheat genotypes under post-anthesis drought stress. *Journal of Crop Production & Processing*, 11(1), 317-328. doi: [20.1001.1.22518517.1386.11.1.24.1](https://doi.org/10.1001.1.22518517.1386.11.1.24.1).
- Epstein, E., & Bloom, A. (2004). Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives. Second Edition. Sinauer Associates, Oxford University Press. 380 p.
- Etesami, E., & Jeong, B. R. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 147, 881-896. doi: [10.1016/j.ecoenv.2017.09.063](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063).
- Fallah, A., Visperas, R. M., & Alejar, A. A. (2004). The interactive effect of silicon and spikelet filling in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal Article*, 3044, 174-176.
- Frantová, N., Rábek, M., Elzner, P., Středa, T., Jovanovic, I., Holková, L., Martinek, P., Smutná, P., & Prášil, I. T. (2022). Different drought tolerance strategy of wheat varieties in spike architecture. *Agronomy*, 12, 2328. doi: [10.3390/agronomy12102328](https://doi.org/10.3390/agronomy12102328).
- Gong, H., Chen, K., Chen, G., Wang, S., & Zhang, C. (2003). Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Journal of Plant Nutrition*, 26(5), 1055-1063. doi: [10.1081/PLN-120020075](https://doi.org/10.1081/PLN-120020075).
- Gong, H. J., Chen, K. M., & Zhao, Z. G. (2008). Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. *Biologia Plantarum*, 52, 592-596. doi: [10.1007/s10535-008-0118-0](https://doi.org/10.1007/s10535-008-0118-0).
- Habibi, D. (2011). Effect of plant growth promoting rhizobacteria, foliar application of amino acids and silicic acid on yield and yield components of wheat under drought stress conditions. *Journal of Crop Production Research*, 3(1) 71-87. [In Persian].
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T. I., Khan, M. I. R., & Fujita, M. (2018). Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus* L. *South African Journal of Botany*, 115, 50-57. doi: [10.1016/j.sajb.2017.12.006](https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.12.006).
- Hosseinalipour, B., Rahnama, A., & Farrokhan Firouzi, A. (2020). Effect of drought stress on wheat root growth and architecture at vegetative growth stage. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 51(1), 63-75. doi: [10.22059/ijfcs.2019.266586.654531](https://doi.org/10.22059/ijfcs.2019.266586.654531).
- Irfan, M., Maqsood, M. A., Rehman, H. U., Mahboob, W., Sarwar, N., Hafeez, O. B. A., Hussain, S., Ercisli, S., Akhtar, M., & Aziz, T. (2023). Silicon nutrition in plants under water-deficit conditions: Overview and prospects. *Water*, 15(4), 739. doi: [10.3390/w15040739](https://doi.org/10.3390/w15040739).
- Islam, M. A., De, R. K., Hossain, M. A., Haque, M. S., Uddin, M. N., Fakir, M. S. A., Kader, M. A., Dessoky, E. S., Attia, A. O., El-Hallous, E. I., & Hossain, A. (2021). Evaluation of the tolerance ability of wheat genotypes to drought stress: Dissection through culm-reserves contribution and grain filling physiology. *Agronomy*, 11(6), 1252. doi: [10.3390/agronomy11061252](https://doi.org/10.3390/agronomy11061252).
- Kafi, M., Zand, E., Kamkar, B., Sharifi, H. R., & Goldani, M. (2000). Plant Physiology. Jihad-e-Daneshgahi of Mashhad Publication. 379 p. [In Persian].
- Karmollachaab, A., Bakhshandeh, A., Gharineh, M. H., Moradi Telavat, M. R., & Fathi, G. (2015). Effect of silicon application on morpho-physiological characteristics, grain yield and nutrient content of bread wheat under water stress conditions. *Journal of Crop Production & Processing*, 4(14), 133-145. [In Persian]. doi: [20.1001.1.22518517.1393.4.14.12.2](https://doi.org/10.1001.1.22518517.1393.4.14.12.2).

- Kim, Y. H., Khan, A. L., Waqas, M., & Lee, I. J. (2017). Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. *Frontiers in Plant Science*, 8, 510. doi: [10.3389/fpls.2017.00510](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510).
- Kizilgeci, F., Yildirim, M., Islam, M. S., Ratnasekera, D., Iqbal, M. A., & Sabagh, A. E. (2021). Normalized difference vegetation index and chlorophyll content for precision nitrogen management in durum wheat cultivars under semi-arid conditions. *Sustainability*, 13, 3725. doi: [10.3390/su13073725](https://doi.org/10.3390/su13073725).
- Leilah, A. A., & Al-Khateeb, S. A. (2005). Statistical analysis of wheat yield under drought conditions. *Journal of Arid Environments*, 61(3), 483-496. doi: [10.1016/j.jaridenv.2004.10.011](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.10.011).
- Liang, Y. (1998). Effects of silicon on leaf ultrastructure, chlorophyll content and photosynthetic activity in barley under salt stress. *Pedosphere*, 8(4), 289-296.
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. G., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147(2), 422-428. doi: [10.1016/j.envpol.2006.06.008](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008).
- Maghsoudi, K., & Emam, Y. (2016). Response of bread wheat cultivars to foliar application of silicon under post anthesis drought stress conditions. *Journal of Crop Production & Processing*, 6(19), 1-13. [In Persian]. doi: [10.18869/acadpub.jcpp.6.19.1](https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.6.19.1).
- Mehraban, A., Tobe, A., Gholipouri, A., Amiri, E., Ghafari, A., & Rostaii, M. (2019). The effects of drought stress on yield, yield components, and yield stability at different growth stages in bread wheat cultivar (*Triticum aestivum* L.). *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(2), 739-746. doi: [10.15244/pjoes/85350](https://doi.org/10.15244/pjoes/85350).
- Ming, D., Pei, Z., Naeem, M., Gong, H., & Weijun, Z. (2012). Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland Rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 198(1), 14-26. doi: [10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x).
- Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., Aghakhani, A., & Feizi, M. (2008). Effects of leaching on soil desalinization for wheat crop in an arid region. *Plant, Soil & Environment*, 54(1), 20-29. doi: [10.17221/2780-PSE](https://doi.org/10.17221/2780-PSE).
- Mushtaq, A., Jamil, N., Rizwan, S., Mandokhel, F., Riaz, M., Hornyak, G. L., Najam Malghani, M., & Shahwani, N. (2018). Engineered silica nanoparticles and silica nanoparticles containing controlled release fertilizer for drought and saline areas. First International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET-2018), 2-3 April 2018, Baleli, Quetta 87300, Pakistan. IOP Conference Series: Materials Science & Engineering, 414, 012029. doi: [10.1088/1757-899X/414/1/012029](https://doi.org/10.1088/1757-899X/414/1/012029).
- Nawaz, F., Ahmad, R., Waraich, E. A., Naeem, M. S., & Shabbir, R. N. (2012). Nutrient uptake, physiological responses, and yield attributes of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to early and late drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 35(6), 961-974. doi: [10.1080/01904167.2012.663637](https://doi.org/10.1080/01904167.2012.663637).
- 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*, 36(4), 335-347. [In Persian]. doi: [10.22092/ijsr.2023.358545.663](https://doi.org/10.22092/ijsr.2023.358545.663).
- Philipp, N., Weichert, H., Bohra, U., Weschke, W., Schulthess, A. W., & Weber, H. (2018). Grain number and grain yield distribution along the spike remain stable despite breeding for high yield in winter wheat. *PLoS One*, 13(10), e0205452. doi: [10.1371/journal.pone.0205452](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205452).
- Porker, K., Straight, M., & Hunt, J. R. (2020). Evaluation of G×E×M interactions to increase harvest index and yield of early sown wheat. *Frontiers in Plant Science*, 11, 994. doi: [10.3389/fpls.2020.00994](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00994).
- Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Etminan, A., Shooshtari, L., Maleki-Tabrizi, N., & Pocai, P. (2020). Effects of drought stress on some agronomic and morpho-physiological traits in durum wheat genotypes. *Sustainability*, 12, 5610. doi: [10.3390/su12145610](https://doi.org/10.3390/su12145610).
- Rajput, V. D., Minkina, T., Feizi, M., Kumari, A., Khan, M., Mandzhieva, S., Sushkova, S., El-Ramady, H., Verma, K. K., Singh, A., van Hullebusch, E. D., Singh, R. K., Jatav, H. S., & Choudhary, R. (2021). Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth. *Biology*, 10(8), 791. doi: [10.3390/biology10080791](https://doi.org/10.3390/biology10080791).
- Saleem, M. (2003). Response of durum and bread wheat genotypes to drought stress: Biomass and yield components. *Asian Journal of Plant Sciences*, 2(3), 290-293. doi: [10.3923/ajps.2003.290.293](https://doi.org/10.3923/ajps.2003.290.293).
- Salem, E. M. M., Kenawey, M. K. M., Saady, H. S., & Mubarak, M. (2022). Influence of silicon forms on nutrients accumulation and grain yield of wheat under water deficit conditions. *Gesunde Pflanzen*, 74, 539-548. doi: [10.1007/s10343-022-00629-y](https://doi.org/10.1007/s10343-022-00629-y).

- Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., Zink, M., Sheffield, J., Wood, E. F., & Marx, A. (2018). Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*, 8, 421-426. doi: [10.1038/s41558-018-0138-5](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5).
- Shamsi, K., Petrosyan, M., Noor-Mohammadi, G., Haghparsat, A., Kobraee, S., & Rasekhi, B. (2011). Differential agronomic responses of bread wheat cultivars to drought stress in the west of Iran. *African Journal of Biotechnology*, 10(14), 2708-2715. doi: [10.5897/AJB10.1133](https://doi.org/10.5897/AJB10.1133).
- Tabassam, M., Hussain, M., Sami, A., Shabbir, I., Bhutta, A. N., Mubusher, M., & Ahmad, S. (2014). Impact of drought on the growth and yield of wheat. *Scientia Agriculturae*, 7(1), 11-18. doi: [10.15192/PSCP.SA.2014.3.1.1118](https://doi.org/10.15192/PSCP.SA.2014.3.1.1118).
- Tavakoli, A., Hasani, A., & Afsahi, K. (2023). Studying the grain growth process of wheat varieties under drought stress conditions using mathematical models. *Cereal Research*, 13(2), 99-114. [In Persian]. doi: [10.22124/CR.2023.25679.1788](https://doi.org/10.22124/CR.2023.25679.1788).
- Verma, K. K., Song X. P., Singh, M., Huang, H. R., Bhatt, R., Xu, L., Kumar, V., & Li, Y. R. (2022). Influence of nanosilicon on drought tolerance in plants: An overview. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1014816. doi: [10.3389/fpls.2022.1014816](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1014816).
- Wang, M., Wang, R., Mur, L. A. J., Ruan, J., Shen, Q., & Guo, S. (2021). Functions of silicon in plant drought stress responses. *Horticulture Research*, 8, 254. doi: [10.1038/s41438-021-00681-1](https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1).
- Willick, I. R., Lahlali, R., Vijayan, P., Muir, D., Karunakaran, C., & Tanino, K. K. (2018). Wheat flag leaf epicuticular wax morphology and composition in response to moderate drought stress are revealed by SEM, FTIR-ATR and synchrotron X-ray spectroscopy. *Physiologia Plantarum*, 162, 316-332. doi: [10.1111/ppl.12637](https://doi.org/10.1111/ppl.12637).
- Xu, R., Huang, J., Guo, H., Wang, C., & Zhan, H. (2023). Functions of silicon and phytolith in higher plants. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2198848. doi: [10.1080/15592324.2023.2198848](https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2198848).
- Yadav, S., Modi, P., Dave, A., Vijapura, A., Patel, D., & Patel, M. (2020). Effect of abiotic stress on crops. In: Hasanuzzaman, M., Filho, M. C. M. T., Fujita, M., & Nogueira, T. A. R. (Eds.). *Sustainable Crop Production*. IntechOpen, London. doi: [10.5772/intechopen.88434](https://doi.org/10.5772/intechopen.88434).
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3), 50. doi: [10.3390/horticulturae7030050](https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050).
- Yousefi, R., Bannayan Aval, M., Khorramdel, S., & Nassiri Mahallati, M. (2018). Comparison of old and new dryland wheat cultivars in response to different planting dates. *Applied Field Crops Research*, 31(2), 46-72. [In Persian]. doi: [10.22092/aj.2018.115913.1202](https://doi.org/10.22092/aj.2018.115913.1202).
- Yousefi, R., & Esna-Ashari, M. (2017). The effect of micro- and nanoparticles of silicon on concentration of macro- and micro elements and silicon content of strawberry plant in soilless culture condition. *Journal of Science & Technology of Greenhouse Culture*, 8(1), 57-71. [In Persian]. doi: [10.18869/acadpub.ejgcst.8.1.57](https://doi.org/10.18869/acadpub.ejgcst.8.1.57).
- Zargar, S. M., Mahajan, R., Bhat, J. A., Nazir, M., & Deshmukh, R. (2019) Role of silicon in plant stress tolerance: Opportunities to achieve a sustainable cropping system. *3 Biotech*, 9, 73. doi: [10.1007/s13205-019-1613-z](https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z).
- Zaynalinezhad, K., Weber, W. E., Röder, M. S., Sharma, S., Lohwasser, U., & Meyer, R. C. (2012). QTL analysis for thousand-grain weight under terminal drought stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 186, 127-138. doi: [10.1007/s10681-011-0559-y](https://doi.org/10.1007/s10681-011-0559-y).
- Zhang, K., Zhao, F., & Zhang, B. (2023). Soil water content at planting affects determining agricultural drought for rainfed spring wheat. *Atmosphere*, 14(4), 665. doi: [10.3390/atmos14040665](https://doi.org/10.3390/atmos14040665).
- Zhou, Y., Chen, Z. X., Cheng, M. P., Chen, J., Zhu, T. T., Wang, Y. X., Qi, P. F., Chen, G. Y., Jiang, Q. T., Wei, Y. M., Luo, M. C., Nevo, E., Allaby, R. G., Liu, J. R., Dvorak, J., & Zheng, Y. L. (2018). Uncovering the dispersion history, adaptive evolution and selection of wheat in China. *Plant Biotechnology Journal*, 16, 280-291. doi: [10.1111/pbi.12770](https://doi.org/10.1111/pbi.12770).