



Enhancing Drought Stress Tolerance in Wheat through Phosphorus and Zinc Management

Pouriya Tohidtalab¹ | Hossein Mirseyed Hosseini² | Seyed Majid Mousavi³

1. Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail:

pouryathb78@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran,

Karaj, Iran. E-mail: mirseyed@ut.ac.ir

3. Corresponding Author, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension

Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: majid62mousavi@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 19, 2025

Revised: Dec. 21, 2025

Accepted: Jan. 6, 2026

Published online: Feb. 2026

Keywords:

**Nutrition Management,
Rhizosheath,
Water Deficit Stress,
Wheat.**

ABSTRACT

Drought stress is one of the major limiting factors for plant growth and productivity, posing serious challenges to agricultural production. Nutrient management, particularly the supply of key elements such as phosphorus and zinc, can play a significant role in enhancing plant resistance to drought conditions. This study aimed to investigate the effect of phosphorus and zinc application on the drought tolerance of two wheat cultivars (Tajan and Heydari) during the summer of 2024 in the research greenhouses of the Soil and Water Research Institute in Alborz Province, Iran. The experiment was conducted as a factorial design within a completely randomized layout, including four factors: method of phosphorus and zinc application (soil and seed priming), irrigation levels (100% and 50% of field capacity), and wheat cultivar (Tajan, as drought-sensitive; Heidari, as drought-resistant). Results indicated that drought stress negatively affected morphological and performance traits of wheat. However, soil application of phosphorus (12 mg/kg) and zinc (2 mg/kg) under drought stress significantly increased dry weight of shoots and roots (up to 500%), plant height and root length (up to 130%), and relative water content (by up to 200%). Moreover, soil-applied zinc played a crucial role in rhizosheath formation as a defense mechanism against drought. Overall, simultaneous soil application of phosphorus and zinc proved more effective than seed priming in improving wheat tolerance to drought stress, leading to better biomass allocation and enhanced plant resilience.

Cite this article: Tohidtalab, P., Mirseyed Hosseini, H., Mousavi, S.M., (2026) Enhancing drought stress tolerance in wheat through phosphorus and zinc management, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (12), 3351-3373. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404624.670035>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404624.670035>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Water deficit stress is one of the most critical abiotic factors limiting plant growth and agricultural productivity worldwide. Its impact is particularly severe in arid and semi-arid regions such as Iran, where annual precipitation is significantly lower than the global average and access to freshwater resources is limited. Drought stress disrupts physiological, biochemical, and morphological processes in plants, leading to reduced photosynthesis, impaired nutrient uptake, oxidative damage, and ultimately lower yields. To cope with such stress, plants employ various mechanisms including osmotic adjustment, hormonal regulation, antioxidant defense activation, and rhizosheath formation, a soil layer adhering to roots that enhances water and nutrient absorption under dry conditions. Among agronomic strategies to mitigate drought effects, nutrient management plays a pivotal role. Balanced and targeted application of essential nutrients can improve plant resilience and maintain productivity under stress. Phosphorus (P) and zinc (Zn) are two key elements involved in root development, membrane stability, water relations, and enzymatic functions, making them crucial for enhancing drought tolerance.

Objective

This study aimed to evaluate the effects of phosphorus and zinc application, both individually and in combination, on the growth and drought resistance of two wheat cultivars with contrasting drought sensitivity. The research focused on comparing soil application and seed priming methods to determine the most effective nutrient delivery strategy under water deficit conditions.

Methodology

The experiment was conducted during the summer of 2024 in the research greenhouses of the Soil and Water Research Institute in Alborz Province, Iran. A factorial experiment was arranged in a completely randomized design with four factors and three replications, totaling 192 experimental units. The first factor was soil application of phosphorus and zinc in four levels: no application (control), phosphorus (12 mg/kg) only, zinc (2 mg/kg) only, and combined phosphorus and zinc. The second factor was seed priming with the same four levels. The third factor was irrigation regime: optimal irrigation at 100% field capacity and deficit irrigation at 50% field capacity. The fourth factor was wheat cultivar: Tajan (drought-sensitive) and Heydari (drought-tolerant). Fertilizer rates were determined based on soil test results, and seed priming was performed using a standardized concentration of 10Zn/10P₂O₅ (w/w) per 2 kg of seed. Morphological and physiological traits including shoot and root dry weight, shoot height, root length, relative water content (RWC), rhizosheath weight, and biomass allocation ratios were measured. Statistical analysis was performed using SAS 9.4 software, and mean comparisons were conducted using Duncan's test at $P \leq 0.05$.

Results

Drought stress significantly reduced morphological traits and yield components in both wheat cultivars. However, soil application of phosphorus and zinc under deficit irrigation conditions led to remarkable improvements in plant performance. Dry weight of shoots and roots increased by 400–500%, while shoot height and root length rose by 50–130%. Relative water content showed a 200% increase in stressed plants receiving combined soil application of phosphorus and zinc. Zinc application via soil had the most pronounced effect on rhizosheath formation, indicating its role in enhancing root-soil interactions and water uptake under drought. Comparatively, nutrient delivery through soil was more effective than seed priming in improving drought tolerance. Biomass allocation indices such as root-to-shoot ratio, shoot biomass allocation ratio, and rhizosheath mass ratio revealed that phosphorus and zinc application moderated biomass distribution, contributing to better stress adaptation. The drought-tolerant cultivar Heydari consistently outperformed Tajan across most measured traits, but both cultivars benefited from nutrient treatments.

Conclusion

The findings demonstrate that strategic nutrient management, particularly simultaneous soil application of phosphorus and zinc, significantly enhances drought tolerance in wheat. This approach improves root development, water retention, and biomass allocation, thereby mitigating the adverse effects of water deficit stress. Given the increasing frequency of drought events and the importance of wheat as a staple crop, integrating phosphorus and zinc management into agronomic practices offers a practical and effective solution for sustaining wheat production under challenging environmental conditions.

Authors Contribution

Porya Tohid talab; design and conducting the experiments and data collection writing first draft
Hossein Mirseyed Hosseini: supervision and experimental arrangements editing final draft

Seyed Majid Mousavi: experimental design and facility, supervision and control of the data collection and final results

Data Availability Statement

The datasets generated during and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Acknowledgements

The authors sincerely appreciate the efforts and support provided by Soil and Water Research Institute (SWRI), Karaj, Iran.

Ethical considerations

Not applicable.

Conflict of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

افزایش مقاومت به تنش کم‌آبی در گندم با مدیریت مصرف فسفر و روی

پوریا توحیدطلب^۱ | حسین میر سیدحسینی^۲ | سید مجید موسوی^۳^۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: pouryathb78@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mirseyed@ut.ac.ir^۳. نویسنده مسئول، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه:majid62mousavi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تنش کم‌آبی یکی از عوامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان است که تولیدات کشاورزی را با چالش جدی مواجه می‌سازد. مدیریت تغذیه‌ای گیاه، به‌ویژه تأمین عناصر کلیدی مانند فسفر و روی، می‌تواند نقش مؤثری در افزایش مقاومت گیاهان به این تنش ایفا کند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کاربرد فسفر و روی بر مقاومت دو رقم گندم (تجن و حیدری) در برابر تنش کم‌آبی، در تابستان ۱۴۰۳ در گلخانه‌های مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور در استان البرز انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار فاکتور شامل نوع و میزان مصرف فسفر و روی (خاکی و بذرمال)، سطح آبیاری (۱۰۰٪ و ۵۰٪ رطوبت ظرفیت زراعی) و رقم گندم (تجن به عنوان رقم حساس به کم‌آبی؛ حیدری به عنوان رقم مقاوم به کم‌آبی) اجرا گردید. نتایج نشان داد که تنش کم‌آبی اثر منفی بر صفات مورفولوژیکی و عملکردی گندم دارد، اما مصرف فسفر (۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و روی (۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از طریق خاک تحت تنش کم‌آبی موجب افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی و ریشه (تا ۵۰٪)، ارتفاع گیاه و طول ریشه (تا ۱۳۰٪) و محتوای رطوبت نسبی (تا ۲۰۰٪) شد. همچنین مصرف خاکی روی نقش مهمی در تشکیل ریزوشیت به‌عنوان مکانیسم دفاعی در برابر کم‌آبی داشت. در مجموع، کاربرد همزمان فسفر و روی از طریق خاک، نسبت به بذرمال، اثربخشی بیش‌تری در بهبود تحمل گندم به تنش کم‌آبی نشان داد و موجب تعدیل تخصیص زیست‌توده و افزایش مقاومت گیاهان شد.
واژه‌های کلیدی: تنش کم‌آبی، ریزوشیت، گندم، مدیریت تغذیه.	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۳۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶	
تاریخ انتشار: اسفند ۱۴۰۴	
استناد: توحیدطلب؛ پوریا، میرسیدحسینی؛ حسین، موسوی؛ سیدمجید، (۱۴۰۴) افزایش مقاومت به تنش کم‌آبی در گندم با مدیریت مصرف فسفر و روی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۲)، ۳۳۷۳-۳۳۵۱. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404624.670035	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404624.670035	



مقدمه

امروزه عوامل متعددی که عمدتاً از فعالیت‌های انسانی نشأت می‌گیرند، تولیدات کشاورزی را با چالش‌های گوناگون مواجه کرده‌اند. تخریب اراضی، فرسایش خاک، آلودگی منابع خاک و آب، کاهش حاصلخیزی خاک، گرمایش زمین، تغییرات اقلیمی و بروز تنش‌های محیطی مختلف از جمله مهم‌ترین مشکلاتی است که صنعت کشاورزی در قرن اخیر با آن‌ها دست و پنجه نرم می‌کند (Mousavi and Tohidtalab, 2025; Mousavi et al., 2024). از میان تنش‌های محیطی، تنش کم‌آبی را می‌توان به عنوان متداول‌ترین و مهم‌ترین تنش غیرزیستی در نظر گرفت. بروز تنش کم‌آبی در گیاهان سبب ایجاد تغییرات منفی در فرآیندهای فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، مورفولوژیکی، سلولی و مولکولی می‌شود. کاهش میزان فتوسنتز و مقدار کلروفیل، مختل شدن تنفس و تعرق، محدود شدن جذب و انتقال عناصر غذایی، کاهش سنتز پروتئین و اختلال در روابط آبی گیاه از جمله مهم‌ترین اثرات تنش کم‌آبی بر گیاهان است. همچنین بروز تنش کم‌آبی می‌تواند منجر به تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) شده و موجب ایجاد آسیب‌های اکسیداتیو به زیست مولکول‌ها شود (Iqbal et al., 2020; Umair Hassan et al., 2020). در نتیجه، رشد و توسعه گیاهان محدود شده و عملکرد آن‌ها کاهش می‌یابد. گیاهان هنگام مواجهه با کم‌آبی از مکانیسم‌های مختلفی برای مقابله با آن استفاده می‌کنند که مبنای اغلب آن‌ها بهبود راندمان مصرف آب و تنظیم روابط آبی گیاه است. تسریع رشد و کوتاه‌تر شدن مراحل آن، ایجاد برگ‌هایی با سطح کوچک‌تر، تنظیم اسمزی، تنظیم هورمونی و فعال شدن سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی مکانیسم‌های عمده گیاهان در مقابله با تنش کم‌آبی هستند (Mousavi et al., 2025b). تشکیل ریزوشیت، لایه خاک چسبیده به ریشه گیاه، از دیگر مکانیسم‌های مقابله گیاهان با تنش کم‌آبی است. ریزوشیت به علت خواص منحصر به فردی که دارد می‌تواند با بهبود توانایی گیاه در جذب آب و عناصر غذایی در محیط‌های خشک، مقاومت آن را در برابر تنش کم‌آبی افزایش دهد (Basirat et al., 2019; Cheraghi et al., 2023a).

با توجه به این که متوسط بارندگی سالیانه در ایران بسیار کمتر از جهان است، همچنین دسترسی محدود به منابع آب شیرین، کشاورزان در اغلب نقاط کشور با مشکل کم‌آبی مواجه هستند (محمدجانی و یزدانیان، ۱۳۹۳). مخصوصاً در تولید گندم که محصولی استراتژیک محسوب می‌شود، بروز تنش خشکی منجر به کاهش عملکرد کمی و کیفی گندم می‌گردد. از این رو، یافتن راه‌هایی برای کاهش اثرات منفی تنش کم‌آبی بر گیاهانی مانند گندم ضروری است. روش‌های مدیریتی مختلفی را می‌توان در شرایط کم‌آبی به کار برد. از جمله این روش‌ها می‌توان به مدیریت زمان کشت، انتخاب و کاشت ارقام مقاوم به کم‌آبی، مالچ پاشی، تلقیح ریزوباکتری‌های محرک رشد و قارچ مایکوریزا با گیاه، مدیریت شخم و خاکورزی، افزایش تراکم کشت، آیش زمین، استفاده از تنظیم کننده‌های رشد گیاه و مدیریت روش‌های آبیاری اشاره کرد (Mousavi et al., 2025b).

یکی از روش‌های مطلوب و کارآمد در تقلیل اثرات تنش کم‌آبی بر گیاهان مدیریت تغذیه گیاه، مخصوصاً تغذیه بهینه و بر مبنای نتایج آزمون خاک است. مصرف نامتعادل عناصر غذایی و کودها سبب افت عملکرد محصول می‌شود. این کاهش در شرایط وجود کم‌آبی شدیدتر است. اما مصرف بهینه و متعادل عناصر غذایی موجب حفظ عملکرد و افزایش مقاومت گیاه به تنش کم‌آبی می‌شود (Tadayon et al., 2017; Mousavi et al., 2025a; Hansel et al., 2025). به عنوان مثال، ارائه پتاسیم (K) در شرایط کم‌آبی موجب افزایش دسترسی گیاه به آب در حبوبات شد (Sangakkara et al., 2000). در پژوهشی گزارش شد که مصرف بهینه کلسیم منجر به افزایش تحمل گیاه کلزا به تنش کم‌آبی شد. همچنین گزارش‌ها حاکی از آن است که مصرف سیلیسم و سلنیوم نیز سبب بهبود جذب آب و افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش کم‌آبی می‌شود (Cheraghi et al., 2023b; Farooq et al., 2014).

فسفر (P) و روی (Zn) به علت نقش‌های ویژه‌ای که در فرآیندهای مختلف و رشد گیاهان دارند، دو عنصر کلیدی در افزایش مقاومت گیاهان و حفظ عملکرد آن‌ها در شرایط تنش کم‌آبی محسوب می‌شوند. برای مثال، فسفر در پایداری غشای سلولی، فتوسنتز، تعادل آبی، معماری و توسعه ریشه‌ها، تنظیم روزه‌ها، تقسیم سلولی و ذخیره انرژی نقش اساسی ایفا می‌کند (Mousavi et al., 2025b; Bechtaoui et al., 2018; Tariq et al., 2021). در مطالعه‌ای بر روی گندم تحت تنش کم‌آبی، مشخص شد که در مراحل اولیه رشد، ارائه فسفر موجب بهبود رشد ریشه و استقرار اولیه گیاهان می‌شود (Ahmed et al., 2018). همچنین گزارش شده که فسفر بر فعالیت آنزیمی و هورمونی گیاه نیز در شرایط تنش کم‌آبی تأثیر مثبت دارد (Begum et al., 2020). روی نیز نقش مهمی در ساختار آنزیم‌ها، افزایش راندمان مصرف آب، بهبود هدایت روزه‌ای، افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و سرعت فتوسنتز، بهبود عملکرد دفاع آنتی‌اکسیدانی و حفظ



پایداری غشای سلولی دارد (Mousavi et al., 2025b; Karim et al., 2012). چنین اثراتی می‌تواند منجر به افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش کم‌آبی شود. به عنوان مثال، نتایج به دست آمده از مطالعه Cakmak (۲۰۰۸) نشان داد که در شرایط تنش کم‌آبی، پوشش دادن بذور با روی موجب بهبود جوانه زنی، عملکرد و سنتز هورمون‌های نظیر جیبرلیک‌اسید و ایندول‌استیک‌اسید در گیاهان ذرت، نخود و گندم می‌شود. گزارش شده است که مصرف مقادیر کافی روی هنگام مواجهه گیاهان با تنش کم‌آبی، سبب کاهش اتلاف آب، افزایش مقدار آب نسبی، کاهش نشت الکترولیت و افزایش مقدار کلروفیل و کاروتنوئید در گیاهان می‌گردد (Kheirizadeh Arough et al., 2016). در مطالعه‌ای بر روی گندم مشخص شد که مصرف نامتعادل فسفر و روی موجب کاهش عملکرد گندم شد. در حالی که مصرف متعادل تر این عناصر تأثیر برهمکنش منفی آن‌ها را بر عملکرد کاهش داد (Sebhatleab et al., 2025). در مطالعه دیگری، سطوح مختلف فسفر و روی در شرایط کم‌آبیاری در گیاه گندم مصرف گردید. نتایج نشان داد که مصرف ۱۰۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و ۱۵ کیلوگرم روی در هکتار موجب افزایش معنی‌دار رشد و عملکرد گیاهان شد و سود اقتصادی مطلوبی ایجاد نمود (Jan et al., 2024). Sacristán et al. (۲۰۱۹) با مصرف ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر و ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی در گندم دریافتند که کاربرد همزمان این دو عنصر موجب ایجاد اختلال در جذب روی و کاهش عملکرد گیاهان گردید. اگرچه نقش فسفر و روی در گیاهان در مطالعات گذشته مشخص شده است، اما نقش مصرف توأم آن‌ها، با توجه به گزارشات متناقض و نیز در نظر گرفتن اثر آنتاگونیستی احتمالی، در افزایش تحمل گندم به تنش‌های محیطی مثل کم‌آبی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. لذا تحقیق حاضر به دنبال مشخص کردن نقش مصرف هر عنصر به تنهایی یا به صورت همزمان از طریق خاک و به صورت بذرمال، در افزایش تحمل دو رقم گندم حساس و مقاوم به خشکی در شرایط تنش کم‌آبی می‌باشد. همچنین، تأثیر این دو عنصر در تشکیل رایزوشیت، بعنوان یک مکانیسم مهم دفاعی گیاه در شرایط تنش کم‌آبی (Basirat et al., 2019)، مورد بررسی قرار گرفته که یکی دیگر از جنبه‌های مهم نوآوری این مطالعه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل اجرا، نمونه برداری و تجزیه خاک

تحقیق حاضر در گلخانه‌های تحقیقاتی موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، واقع در مشکین دشت استان البرز اجرا شد. این منطقه دارای اقلیم سرد بوده و اختلاف دما سالانه آن اغلب حدود ۳۸ درجه سانتی‌گراد است. گلخانه تحت یک چرخه نوری ۱۴ ساعت روشنایی و ۱۰ ساعت تاریکی قرار داشت و دمای روز و شب به ترتیب ۲۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده بود. رطوبت نسبی در طول دوره رشد بین ۵۰ تا ۶۰ درصد متغیر بود. پس از انتخاب و نمونه برداری از خاک مناسب، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از طریق تجزیه آزمایشگاهی مشخص گردید. این خصوصیات شامل (۱) پتاسیم قابل جذب (Pratt, 1965؛ ۲) فسفر قابل جذب (Olsen et al., 1954؛ ۳) مس، روی، منگنز و آهن قابل استخراج با DTPA (Lindsay and Norvell, 1978؛ ۴) نیتروژن کل (Bremner, 1965؛ ۵) pH گل اشباع (Richards, 1954؛ ۶) ظرفیت تبادل کاتیونی (Chapman, 1965؛ ۷) قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع (Richards, 1954؛ ۸) کربنات کلسیم معادل (Allison and Moodie, 1965؛ ۹) رطوبت ظرفیت زراعی (Richards, 1949؛ ۱۰) ماده آلی (Walkly and Black, 1934؛ ۱۱) بافت خاک (Bouyoucos, 1962) بودند.

منابع کودی، میزان و روش مصرف

در پژوهش حاضر، از دو روش مصرف خاکی و بذرمال کردن برای اعمال تیمارهای کودی مورد نظر به گلدان‌ها استفاده شد. برای تیمارهای بذرمال فسفر و روی از روش مورد تأیید موسسه تحقیقات خاک و آب کشور استفاده گردید. بدین صورت که برای هر ۲۵۰ کیلوگرم بذر، دو کیلوگرم کود بذرمال با ترکیب غلظتی $10\text{Zn}/10\text{P}_2\text{O}_5$ به صورت وزنی/وزنی در نظر گرفته شد. سپس کودهای بذرمال روی بذور مورد نظر اسپری و در شرایط کنترل شده خشک شدند. برای مصرف خاکی عناصر فسفر و روی، به ترتیب از منابع کودی دی‌آمونیم‌فسفات $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ و سولفات روی $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ استفاده گردید. میزان مصرف این کودها از طریق خاک بر اساس نتایج آزمون خاک بود و برای فسفر ۲۷۰ کیلوگرم بر هکتار (۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر عنصری) و برای روی ۴۰ کیلوگرم بر هکتار (۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی عنصری) مصرف شد. لازم به ذکر است از دستورالعمل مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گندم، انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب (مشیری و همکاران، ۱۳۹۳) جهت تعیین مقدار مورد نیاز مصرف کودهای نیتروژن و پتاسه استفاده شد؛ در این دستورالعمل، اطلاعات مربوط به اقلیم، عملکرد پتانسیل منطقه و نتایج آزمون خاک برای عناصر مورد نظر مبنای انجام توصیه کودی قرار

می‌گیرد؛ بر این اساس، با در نظر گرفتن عملکرد پتانسیل گندم آبی در منطقه کرج به میزان ۶ تن در هکتار و اقلیم سرد منطقه و نیز مقدار کربن آلی خاک، تأمین نیتروژن مورد نیاز خاک از منابع کودی آورده به میزان ۳۳۰ کیلوگرم بر هکتار (۷۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود) و برای تأمین پتاسیم از منبع سولفات پتاسم به میزان ۱۲۰ کیلوگرم بر هکتار (۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود) استفاده شد. این مقادیر بر اساس وزن خاک مورد استفاده در گلدان‌ها تبدیل شد و بر اساس دستورالعمل مدیریت تغذیه‌ای و کوددهی گندم در مراحل مشخص رشد فیزیولوژیکی گندم (مقیاس زادکس) اضافه گردید.

اجرای آزمایش

به منظور بررسی دقیق‌تر رشد ریشه و کاهش خطا در اندازه‌گیری‌های مربوط به ریزوشیت تشکیل شده در گیاهان تحت تأثیر تیمارهای مختلف، از گلدان‌هایی با ابعاد کوچک (قطر دهانه و ارتفاع به ترتیب ۷ و ۱۵ سانتی‌متر) در تحقیق حاضر استفاده شد. وزن خاک هر گلدان ۲۰۰ گرم و تعداد بذر کشت شده نیز سه عدد بود. پس از استقرار اولیه گیاهان، عمل تنک کردن انجام شد تا یک گیاه در هر گلدان باقی بماند. لازم به ذکر است که ارقام گندم استفاده شده در مطالعه حاضر تجن (T) و حیدری (H) بودند که به ترتیب حساس و مقاوم به کم‌آبی می‌باشند. پس از گذشت دو هفته از جوانه‌زنی گیاهان، اعمال تنش کم‌آبی آغاز شد و گیاهان تحت تنش سه چرخه کم‌آبی را متحمل شدند. اعمال تیمارهای آبیاری در پژوهش حاضر به روش وزنی انجام شد و در طول دوره تنش گیاهان تحت آبیاری بهینه به اندازه ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی (FC) و گیاهان تحت تنش به اندازه ۵۰٪ ظرفیت زراعی آب دریافت می‌کردند. به همین منظور، پس از تعیین ظرفیت مزرعه (Richards, 1949)، گلدان‌ها به‌طور روزانه توزین شدند و برای رساندن رطوبت خاک به سطح هدف هر تیمار، مقدار آب مورد نیاز بر اساس اختلاف وزن فعلی گلدان با وزن متناظر با درصد مورد نظر ظرفیت مزرعه محاسبه و به‌صورت یکنواخت اضافه گردید (Basirat et al., 2019; Cheraghi et al., 2024).

بررسی صفات مورفولوژیکی و عملکردی

جهت بررسی تأثیر تیمارهای تغذیه‌ای اعمال شده بر گیاهان در شرایط تنش کم‌آبی، پس از اتمام کشت و چرخه‌های تنش برخی صفات مورفولوژیکی و عملکردی شامل وزن خشک و ارتفاع اندام هوایی، وزن خشک و طول ریشه، محتوی رطوبت نسبی، وزن ریزوشیت تشکیل شده و زیست‌توده خشک گیاه اندازه‌گیری شدند. همچنین نسبت ریشه به اندام هوایی^۱ یا R/S (Poorter et al., 2012)، نسبت ارتفاع اندام هوایی به طول ریشه^۲ یا SH/RL (Kramer and Boyer, 1995)، نسبت تخصیص زیست‌توده اندام هوایی^۳ یا SBAR (Poorter et al., 2012)، طول ریشه ویژه^۴ یا SRL (Ostonen et al., 2007) و نسبت وزن ریزوشیت^۵ یا RMR (Addesso et al., 2023) نیز به منظور بررسی نحوه پاسخ گیاهان به عناصر ارائه شده از طریق روابط زیر محاسبه گردید:

$$SBAR = \frac{\text{وزن خشک اندام هوایی}}{\text{وزن خشک کل گیاه}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$R/S = \frac{\text{وزن خشک ریشه}}{\text{وزن خشک اندام هوایی}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$SH/RL = \frac{\text{ارتفاع اندام هوایی}}{\text{طول ریشه}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$SRL = \frac{\text{طول ریشه}}{\text{وزن خشک ریشه}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$RMR = \frac{\text{وزن ریزوشیت}}{\text{وزن خشک ریشه}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

1 Root to Shoot Ratio

2 Shoot Height to Root Length Ratio

3 Shoot Biomass Allocation Ratio

4 Specific Root Length

5 Rhizosphere Mass Ratio



برای اندازه‌گیری RWC، نمونه برگ پس از جدا شدن توزین گردید تا وزن تر (FW) آن ثبت گردد. سپس به مدت ۴ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور شد تا وزن آن در حالت متورم شده (TW) مشخص شود. پس از آن، به مدت ۲۴ ساعت در آون ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا وزن خشک (DW) آن نیز ثبت گردد (Weatherley, 1950). مقدار RWC با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$RWC = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

مقدار ریزوشیت تشکیل شده در گیاهان به روش وزنی اندازه‌گیری شد. بدین صورت که پس از خارج کردن ریشه‌ها از خاک و تکان دادن آن‌ها به منظور جدا کردن خاک ریزوسفری، ریشه به همراه خاک چسبیده به آن (ریزوشیت) وزن شد. سپس ریشه به آرامی شسته شد تا خاک ریزوشیتی نیز جدا گردد. پس از خشک شدن رطوبت، ریشه‌ها مجدداً توزین شدند و وزن تر آن‌ها ثبت گردید. از اختلاف وزن ریشه همراه با ریزوشیت و وزن تر ریشه بدون ریزوشیت، وزن مقدار ریزوشیت تشکیل شده در هر گیاه محاسبه گردید (Basirat et al., 2019).

تحلیل آماری و اطلاعات تیمارها

مطالعه حاضر به صورت آزمایشات فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار فاکتور اجرا شد و هر تیمار سه تکرار داشت. فاکتور اول مصرف فسفر و روی از طریق خاک دارای چهار حالت (۱) عدم مصرف فسفر و روی (شاهد)؛ (۲) مصرف فقط فسفر (۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم)؛ (۳) مصرف فقط روی (۲ میلی گرم بر کیلوگرم)؛ (۴) مصرف همزمان فسفر و روی، بود. فاکتور دوم مصرف فسفر و روی به صورت بذرمال بود که همان چهار حالت فاکتور اول را داشت. توضیح و نحوه نمایش فاکتورها یا تیمارهای تغذیه‌ای در جدول ۱ ارائه شده است. فاکتور سوم سطوح آبیاری بود که دو حالت (۱) آبیاری بهینه به میزان ۱۰۰٪ رطوبت زراعی؛ (۲) آبیاری تحت تنش یا کم‌آبیاری به میزان ۵۰٪ رطوبت زراعی را شامل می‌شد. فاکتور چهارم رقم گندم بود که دو حالت داشت و شامل (۱) رقم تجن (حساس به کم‌آبی)؛ (۲) رقم حیدری (مقاوم به کم‌آبی)، می‌شد. بنابراین در کل ۱۹۲ واحد آزمایشی در این پژوهش وجود داشت. تحلیل آماری نتایج به دست آمده با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 صورت گرفت و مقایسه میانگین به روش دانکن و در سطح معنی‌داری $P \leq 0.05$ انجام شد.

جدول ۱. اطلاعات و نحوه نمایش تیمارهای تغذیه‌ای

شماره	اطلاعات	نحوه نمایش تیمارها*
۱	عدم مصرف فسفر و روی از خاک، عدم مصرف بذرمال فسفر و روی (شاهد)	$PS_0C_0ZnS_0C_0$
۲	عدم مصرف فسفر و روی از خاک، مصرف بذرمال فسفر	$PS_0C_1ZnS_0C_0$
۳	عدم مصرف فسفر و روی از خاک، مصرف بذرمال روی	$PS_0C_0ZnS_0C_1$
۴	عدم مصرف فسفر و روی از خاک، مصرف بذرمال فسفر و روی	$PS_0C_1ZnS_0C_1$
۵	مصرف فسفر از خاک، عدم مصرف بذرمال فسفر و روی	$PS_1C_0ZnS_0C_0$
۶	مصرف فسفر از خاک، مصرف فسفر بذرمال	$PS_1C_1ZnS_0C_0$
۷	مصرف فسفر از خاک، مصرف بذرمال روی	$PS_1C_0ZnS_0C_1$
۸	مصرف فسفر از خاک، مصرف بذرمال فسفر و روی	$PS_1C_1ZnS_0C_1$
۹	مصرف روی از خاک، عدم مصرف بذرمال فسفر و روی	$PS_0C_0ZnS_1C_0$
۱۰	مصرف روی از خاک، مصرف بذرمال فسفر	$PS_0C_1ZnS_1C_0$
۱۱	مصرف روی از خاک، مصرف روی بذرمال	$PS_0C_0ZnS_1C_1$
۱۲	مصرف روی از خاک، مصرف بذرمال فسفر و روی	$PS_0C_1ZnS_1C_1$
۱۳	مصرف فسفر و روی از خاک، عدم مصرف بذرمال فسفر و روی	$PS_1C_0ZnS_1C_0$
۱۴	مصرف فسفر و روی از خاک، مصرف بذرمال فسفر	$PS_1C_1ZnS_1C_0$
۱۵	مصرف فسفر و روی از خاک، مصرف بذرمال روی	$PS_1C_0ZnS_1C_1$
۱۶	مصرف فسفر و روی از خاک، مصرف بذرمال فسفر و روی	$PS_1C_1ZnS_1C_1$

* (P = کود فسفر؛ Zn = کود روی؛ S = مصرف از خاک؛ C = مصرف بذرمال؛ اندیس عددی صفر: عدم مصرف کود؛ اندیس عددی یک: مصرف کود)

نتایج و بحث

خصوصیات خاک مورد استفاده

برخی از خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد که خاک استفاده شده در این آزمایش دارای pH قلیایی است. همچنین خاک دارای بافت لوم بوده و از نظر شوری، غیرشور می‌باشد. نکته مهم در مورد خصوصیات خاک، پایین بودن مقدار فسفر و روی از حد بهینه است که دلیل اصلی انتخاب این خاک می‌باشد و می‌توان تیمارهای تغذیه‌ای را بر آن اعمال کرد.

جدول ۲. برخی خصوصیات خاک مورد مطالعه

پارامتر	واحد	مقدار
pH*	-	۸/۰۱
بافت	-	لوم
رس	%	۲۱
سیلت	%	۴۵
شن	%	۳۴
کربنات کلسیم معادل	%	۱۳/۳
ظرفیت تبادل کاتیونی	meq/100g _{soil}	۱۱/۳۷
رطوبت ظرفیت زراعی	% (وزنی / وزنی)	۲۴
کربن آلی	%	۰/۵۸
نیتروژن کل	%	۰/۰۵۹
پتاسیم قابل استفاده	mg/kg	۱۸۵
فسفر قابل جذب	mg/kg	۵/۶
آهن قابل جذب	mg/kg	۵/۱۸
روی قابل جذب	mg/kg	۰/۷
مس قابل جذب	mg/kg	۱/۳۶
منگنز قابل جذب	mg/kg	۱۳/۹۴

* اندازه‌گیری شده در گل اشباع

صفات مورفولوژیکی و عملکردی

نتایج تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در جداول ۳ و ۷ ارائه شده است. همانطور که در این جداول مشاهده می‌شود، اثرات متقابل چهارگانه فاکتورها برای تمام صفات معنی‌دار شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در گیاهان تحت تنش کم‌آبی در رقم حیدری و در تیماری که فسفر و روی را به طور همزمان از خاک و به صورت بذرمال ($PS_1C_1ZnS_1C_1$) دریافت کرده بود ثبت گردید که افزایش ۴۹۰ درصدی نسبت به شاهد همین رقم در شرایط تنش داشت (شکل ۱). در رقم تجن نیز در شرایط تنش بیش‌ترین مقدار در تیماری که فسفر و روی از خاک و بذرمال روی دریافت کرده بود ($PS_1C_0ZnS_1C_1$) مشاهده شد و افزایش ۳۷۳ درصدی نسبت به شاهد تغذیه‌ای همین رقم داشت. بیش‌ترین مقادیر وزن خشک اندام هوایی در شرایط آبیاری بهینه نیز در ارقام تجن و حیدری در تیمار $PS_1C_1ZnS_1C_1$ ثبت گردید که به ترتیب افزایش ۳۶۰ و ۵۵۸ درصدی نسبت به شاهد تغذیه‌ای این ارقام در شرایط آبیاری بهینه داشت (شکل ۱).

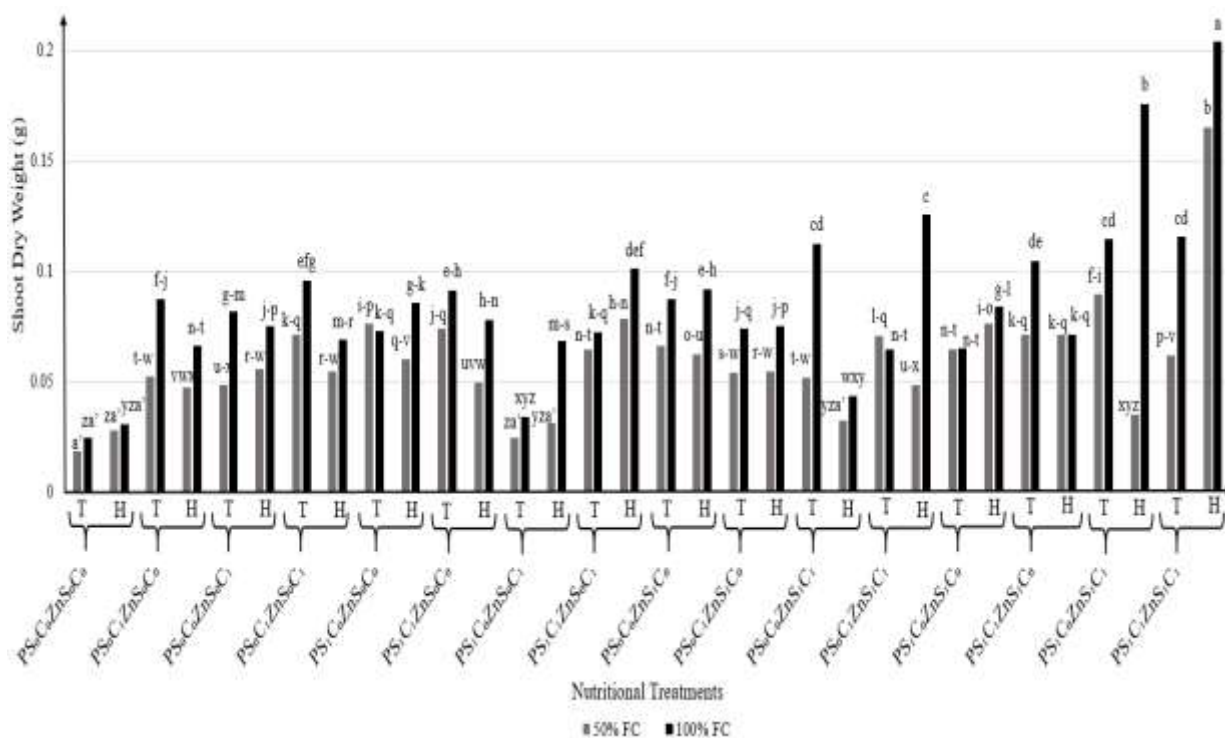
در شرایط تنش کم‌آبی، بیش‌ترین مقدار وزن خشک ریشه در رقم تجن و در تیماری که در آن روی فقط از طریق خاک مصرف شده بود ($PS_0C_0ZnS_1C_0$) ثبت شد و افزایش معنی‌دار و ۵۳۲ درصدی نسبت به شاهد این رقم در شرایط تنش داشت (شکل ۲). در رقم حیدری نیز بیش‌ترین مقدار وزن خشک ریشه در شرایط تنش در همین تیمار با افزایش ۴۷۷ درصدی نسبت به شاهد این رقم مشاهده گردید. گیاهان تحت آبیاری بهینه (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، بیش‌ترین مقادیر وزن خشک ریشه برای رقم تجن در تیمارهای $PS_0C_0ZnS_1C_0$ و $PS_0C_1ZnS_1C_0$ مشاهده شد که ۳۹۰ درصد بیش‌تر از شاهد این رقم بود. در رقم حیدری نیز تیمار $PS_0C_0ZnS_1C_0$ با افزایش ۴۳۰ درصدی نسبت به شاهد بیش‌ترین مقدار وزن خشک ریشه را در شرایط آبیاری بهینه نشان داد (شکل ۲).



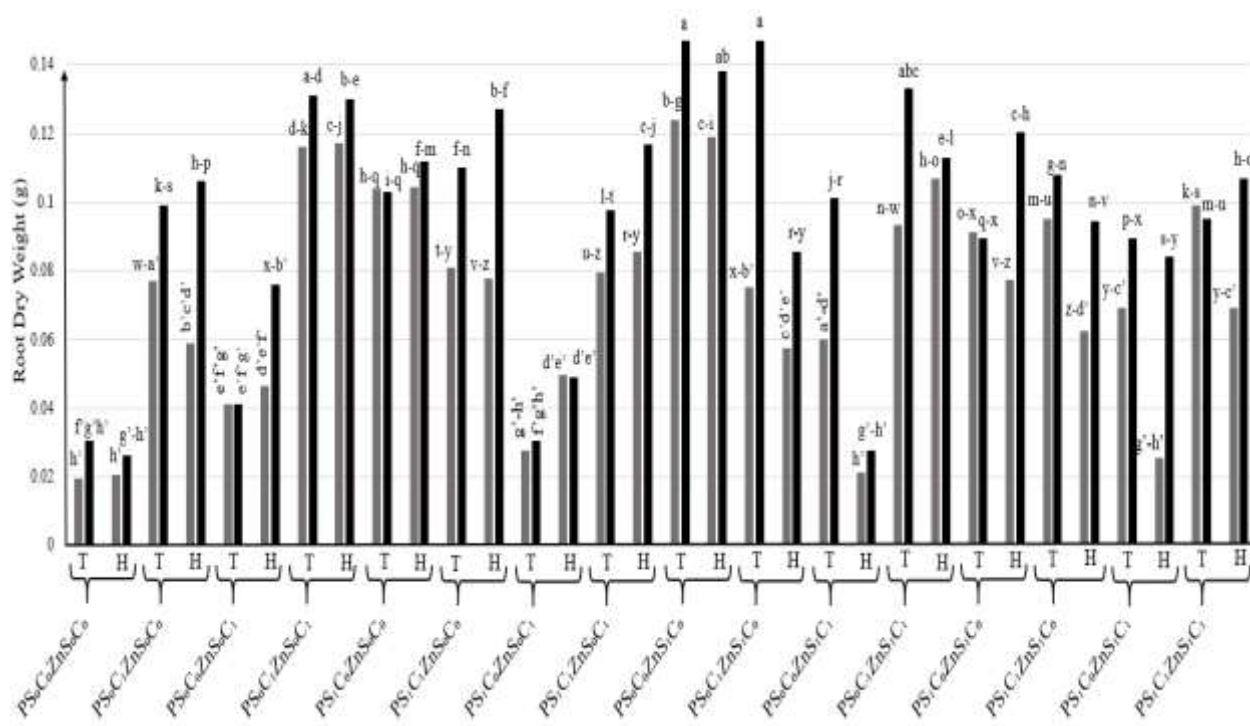
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس تغییرات وزن خشک و ارتفاع اندام هوایی، وزن خشک و طول ریشه، محتوی رطوبت نسبی و وزن ریزوشیت تشکیل شده متأثر از مصرف فسفر و روی از طریق خاک و بذرمال در دو رقم گندم تحت تنش کم‌آبی و آبیاری بهینه

منبع تغییرات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات				
		وزن خشک اندام هوایی (g)	وزن خشک ریشه (g)	وزن ریزوشیت (g)	ارتفاع اندام هوایی (cm)	طول ریشه (cm)
تکرار	۲	۰/۰۰۰۰۷(ns)	۰/۰۰۰۰۲(ns)	۰/۰۱۷(ns)	۲/۷۵(ns)	۲/۰۲۳(ns)
مصرف خاکی کود (F)	۳	۰/۰۱۵۲**	۰/۰۰۵۴**	۱/۴۳۱**	۶۵/۴۴**	۲/۰۴۲(ns)
کود بذرمال (SP)	۳	۰/۰۰۷۹**	۰/۰۲۴۷**	۲/۵۵۱**	۱۳۸/۵۸**	۰/۶۵۲(ns)
آبیاری (I)	۱	۰/۰۳۲۵**	۰/۰۲۳۹**	۵/۵۲۸**	۳۶۰/۵۲**	۱۲۰/۵۷**
رقم (C)	۱	۰/۰۰۰۸۸**	۰/۰۰۱۷**	۹/۴۸۱**	۱/۸۶(ns)	۱۰۵/۶۸**
F×SP	۹	۰/۰۰۴۰۵**	۰/۰۰۸۲**	۰/۷۸۴**	۴۶/۹۳**	۲۷/۵۳**
F×I	۳	۰/۰۰۰۹۸**	۰/۰۰۰۴۲*	۰/۷۵۶**	۱/۲۶(ns)	۳/۴۵۷*
F×C	۳	۰/۰۰۲۵۴**	۰/۰۰۳۳**	۰/۳۰۱**	۵/۴۴**	۳/۲۲۷*
SP×I	۳	۰/۰۰۰۲*	۰/۰۰۱۱**	۰/۶۸۲**	۴/۲۴**	۷/۸۷۴**
SP×C	۳	۰/۰۰۳۷**	۰/۰۰۰۷۶**	۰/۷۲۸**	۷/۲۹**	۴/۱۱۸*
I×C	۱	۰/۰۰۰۱۱**	۰/۰۰۰۵۸*	۰/۷۶۹**	۲۸/۶۷**	۲۲/۴۴**
F×SP×I	۹	۰/۰۰۰۷۵**	۰/۰۰۰۳۵**	۰/۱۲۳**	۶/۵۳**	۸/۵۱۸**
F×SP×C	۹	۰/۰۰۰۲۴**	۰/۰۰۰۸۱**	۰/۵۳۹**	۲۴/۰۳۲**	۲۱/۱۲**
F×I×C	۳	۰/۰۰۰۶۲**	۰/۰۰۰۲۱**	۰/۲۵۴**	۴/۲۵**	۰/۷۴۵(ns)
SP×I×C	۳	۰/۰۰۰۵۵**	۰/۰۰۰۰۲(ns)	۰/۳۶**	۵/۰۴۷**	۴/۸۶۶**
F×SP×I×C	۹	۰/۰۰۰۱۷**	۰/۰۰۰۰۲**	۰/۲۰۰۶**	۵/۳۹**	۶/۷۸۸**
خطا	۱۲۶	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۱۵۳	۰/۸۸۱۸	۱/۰۷۸۲
ضریب تغییرات (%)		۱۲/۲۶	۱۲/۴۸	۱۲/۹۹	۵/۹۳	۸/۲۱

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح $P \leq 0.05$ و $P \leq 0.01$; ns=عدم معنی‌داری؛ RWC=محتوی رطوبت نسبی.



شکل ۱. تأثیر تیمارهای تغذیه‌ای بر وزن خشک اندام هوایی دو رقم گندم در شرایط تنش کم‌آبی و آبیاری بهینه (P=مصرف فسفر؛ Zn=مصرف روی؛ S=مصرف از طریق خاک؛ C=مصرف از طریق بذرمال؛ اندیس عددی صفر=عدم مصرف کود؛ اندیس عددی یک=مصرف کود؛ T=رقم گندم تاجن؛ H=رقم گندم حیدری؛ FC=ظرفیت زراعی؛ سطح معنی‌داری $P \leq 0.05$).



شکل ۲. تأثیر تیمارهای تغذیه‌ای بر وزن خشک ریشه دو رقم گندم در شرایط تنش کم‌آبی و آبیاری بهینه (P =مصرف فسفر؛ Zn =مصرف روی؛ S =مصرف از طریق خاک؛ C =مصرف از طریق بذرمال؛ اندیس عددی صفر=عدم مصرف کود؛ اندیس عددی یک=مصرف کود؛ T =رقم گندم تجن؛ H =رقم گندم حیدری؛ FC =ظرفیت زراعی؛ سطح معنی‌داری $(P \leq 0.05)$.

در گیاهان تحت تنش کم‌آبی، بیش‌ترین میزان ارتفاع اندام هوایی در هر دو رقم تجن و حیدری در تیمار $PS_1C_1ZnS_1C_0$ مشاهده گردید که به ترتیب ۱۰۹ و ۱۲۸ درصد بیش‌تر از شاهد این ارقام در شرایط تنش بود (جدول ۴). در بین گیاهان تحت آبیاری بهینه، بیش‌ترین مقدار ارتفاع اندام هوایی در ارقام تجن و حیدری به ترتیب در تیمارهای $PS_1C_1ZnS_1C_1$ و $PS_1C_0ZnS_0C_0$ ثبت شد. مقدار ارتفاع اندام هوایی در این تیمارها به ترتیب ۷۴ و ۶۵ درصد بیش‌تر از شاهد ارقام تجن و حیدری تحت آبیاری بهینه داشت. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، بیش‌ترین مقدار طول ریشه در بین گیاهان تحت تنش، در رقم حیدری و در تیمار $PS_0C_0ZnS_1C_0$ ثبت شد و افزایش ۸۱ درصدی نسبت به شاهد این رقم در شرایط تنش کم‌آبی داشت. در رقم تجن نیز تیمار $PS_0C_1ZnS_0C_0$ با افزایش ۴۷ درصدی نسبت به شاهد این رقم، بیش‌ترین میزان را از نظر طول ریشه در شرایط تنش داشت. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، بیش‌ترین مقدار طول ریشه در رقم تجن در تیمار $PS_1C_0ZnS_1C_0$ و در رقم حیدری در تیمار $PS_0C_0ZnS_0C_1$ ثبت شده است که به ترتیب افزایش ۳۱ و ۱۰۲ درصدی نسبت به شاهد تغذیه‌ای این ارقام داشتند (جدول ۴).

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، مشاهده می‌گردد که در شرایط تنش کم‌آبی رقم حیدری با دریافت فسفر و روی از طریق خاک و بذرمال فسفر ($PS_1C_1ZnS_1C_0$)، بیش‌ترین مقدار را از نظر محتوی رطوبت نسبی (RWC) ثبت کرده است که ۲۰۶ درصد بیش‌تر از شاهد این رقم در شرایط تنش است. در گیاهان تحت تنش رقم تجن نیز بیش‌ترین میزان RWC با افزایش ۲۱۵ درصدی نسبت به شاهد تغذیه‌ای این رقم در تیمار $PS_1C_0ZnS_1C_0$ مشاهده شد. تیمارهای $PS_0C_0ZnS_1C_0$ و $PS_0C_1ZnS_1C_0$ به ترتیب در ارقام تجن و حیدری افزایش ۱۳۳ و ۱۲۰ درصدی نسبت به شاهد تغذیه‌ای این ارقام داشتند و بیش‌ترین مقدار محتوی رطوبت نسبی را در شرایط آبیاری بهینه ثبت کردند (جدول ۴).

نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر نشان داد که در شرایط تنش کم‌آبی بیش‌ترین میزان ریزوشیت تشکیل شده در رقم تجن و در تیمار تغذیه‌ای $PS_0C_0ZnS_1C_0$ ثبت شده است که ۱۴۰ درصد بیش‌تر از شاهد این رقم است (شکل ۳). این تیمار تغذیه‌ای همچنین بیش‌ترین مقدار تشکیل ریزوشیت را برای رقم حیدری ثبت کرد که افزایش ۱۶۵ درصدی نسبت به شاهد این رقم در شرایط تنش داشت. در گیاهان تحت آبیاری بهینه نیز به ترتیب تیمارهای $PS_1C_1ZnS_1C_0$ و $PS_0C_0ZnS_1C_0$ سبب بیش‌ترین مقدار ریزوشیت در ارقام تجن و حیدری نسبت به شاهد این ارقام شدند.



جدول ۴. مقایسه میانگین برای صفات ارتفاع اندام هوایی، طول ریشه و محتوی رطوبت نسبی متأثر از مصرف فسفر و روی از طریق خاک و بذرمال در دو رقم گندم تحت تنش کم‌آبی و آبیاری بهینه

خصوصیات گیاه مربوط به هر رقم						سطوح آبیاری	تیماهای تغذیه‌ای
RWC (%)		طول ریشه (cm)		ارتفاع اندام هوایی (cm)			
H	T	H	T	H	T		
۲۰/۵۶ (w-a')	۱۴/۸۶ (a')	۹/۴۶۶ (b'c')	۹/۰۶۶ (c')	۷/۹ (z)	۸/۴۳۳ (y)	۵۰٪ FC	PS ₀ C ₀ ZnS ₀ C ₀
۴۰/۸۳ (p-s)	۳۰/۶۸ (s-w)	۱۰/۱۳۳ (z-c')	۱۱/۱۶۶ (s-a')	۱۲/۱ (t-w)	۱۱/۰۶۶ (wx)	۱۰۰٪ FC	
۲۵/۸۴۳ (u-z)	۱۵/۴ (za')	۱۳/۲۵ (g-p)	۱۳/۳۳ (g-p)	۱۴/۸ (m-q)	۱۶/۷۳۳ (g-k)	۵۰٪ FC	PS ₀ C ₁ ZnS ₀ C ₀
۴۳/۸۳۳ (m-r)	۳۴/۹۳ (r-u)	۱۴/۳۵ (e-h)	۱۲/۰۱۶ (l-w)	۱۷/۲۶۶ (f-i)	۱۹/۷۳۳(ab)	۱۰۰٪ FC	
۴۳/۹۲ (m-r)	۲۴/۰۷ (v-a')	۱۱/۰۶۶ (t-b')	۱۰/۹۸۳ (u-b')	۱۱/۹۶۶ (xw)	۱۳/۲۶۶ (r-v)	۵۰٪ FC	PS ₀ C ₀ ZnS ₀ C ₁
۵۳/۷۱۶ (h-n)	۳۹/۶۲ (qrs)	۲۰/۴۸۳ (a)	۱۴ (f-j)	۱۴/۱۶۶ (o-r)	۱۳/۵۳۳ (q-u)	۱۰۰٪ FC	
۵۱/۵۷۳ (i-o)	۲۴/۴۴۶ (u-a')	۱۳/۷۵ (g-k)	۹/۵ (a'b'c')	۱۶/۷۶۶ (g-k)	۱۴/۴ (n-r)	۵۰٪ FC	PS ₀ C ₁ ZnS ₀ C ₁
۵۰/۳۷ (j-p)	۳۸/۱۵ (q-t)	۱۴/۶۳۳ (d-g)	۱۱/۷ (p-z)	۱۷/۳۵ (e-i)	۱۷/۷۱۶ (d-i)	۱۰۰٪ FC	
۳۸/۹۲۳ (qrs)	۲۶/۸۴۶ (u-y)	۱۳/۶۵ (g-l)	۱۲/۷۶۶ (h-s)	۱۷/۵۸۳ (e-i)	۱۷/۴۶۶ (e-i)	۵۰٪ FC	PS ₁ C ₀ ZnS ₀ C ₀
۷۹/۳۰۶ (bcd)	۴۴/۳۴ (l-r)	۱۲/۷۸۳ (h-s)	۱۲/۸۶۶ (h-r)	۲۰/۰۱۶ (a)	۱۸/۴ (b-f)	۱۰۰٪ FC	
۳۸/۴۵۳ (q-t)	۳۴/۰۹۶ (r-v)	۱۱/۸۶۶ (m-y)	۱۰/۷۸۳ (u-b')	۱۲/۱۵ (t-w)	۱۷/۴۳۳ (e-i)	۵۰٪ FC	PS ₁ C ₁ ZnS ₀ C ₀
۶۲/۶۵۶ (e-h)	۵۸/۱۶۶ (g-j)	۱۱/۸۳۳ (n-y)	۱۳/۶۶۶ (g-l)	۱۷/۶۱۶ (e-i)	۱۹/۴۵ (abc)	۱۰۰٪ FC	
۴۲/۴۸۶ (o-r)	۲۲/۷۲۶ (w-a')	۱۱/۸۸۳ (m-y)	۱۱/۴۱۶ (q-z)	۱۲/۰۵ (uvw)	۸/۹۸۳ (yz)	۵۰٪ FC	PS ₁ C ₀ ZnS ₀ C ₁
۶۴/۲۵۶ (efg)	۵۱/۵۷۶ (i-o)	۱۳/۵ (g-n)	۱۱/۳۸۳ (q-z)	۱۸/۸۵ (a-e)	۱۱/۴۶۶ (w)	۱۰۰٪ FC	
۴۳/۲۵ (n-r)	۱۹/۱۵۳ (x-a')	۱۱/۴ (q-z)	۱۲/۲۳۳ (k-v)	۱۶/۳۸۳ (i-l)	۱۶/۴ (i-l)	۵۰٪ FC	PS ₁ C ₁ ZnS ₀ C ₁
۵۴/۹۷ (g-k)	۶۰/۳۸۳ (f-j)	۱۶/۱ (bcd)	۱۲ (l-x)	۱۸/۴۳۳ (b-f)	۱۷/۱۶۶ (f-j)	۱۰۰٪ FC	
۲۳/۰۴ (w-a')	۱۹/۲۸ (x-a')	۱۷/۱۸۳ (bc)	۱۲/۳۵ (j-u)	۱۶/۲۱۶ (i-m)	۱۷/۲۳۳ (f-i)	۵۰٪ FC	PS ₀ C ₀ ZnS ₁ C ₀
۶۴/۴۴۳ (efg)	۷۱/۵۰۳ (de)	۱۹/۲۶۶ (a)	۱۲/۱ (k-v)	۱۸/۴ (b-f)	۱۷/۵ (e-i)	۱۰۰٪ FC	
۵۹/۹۰۶ (f-j)	۱۹/۹۲۶ (x-a')	۱۰/۸ (u-b')	۱۰/۳۳۳ (x-c')	۱۶/۵۱۶ (h-l)	۱۵/۱۸۳ (l-p)	۵۰٪ FC	PS ₀ C ₁ ZnS ₁ C ₀
۸۹/۸۵ (a)	۴۰/۵۶۳ (p-s)	۱۳/۵۱۶ (g-m)	۱۱/۲۳۳ (r-z)	۱۹/۳ (abc)	۱۷/۹۵ (c-h)	۱۰۰٪ FC	
۴۵/۸۸۳ (k-q)	۳۸/۴۱۶ (q-t)	۱۰/۴ (w-c')	۱۲/۸۳۳ (h-s)	۸/۲۳۳ (yz)	۱۳/۹۳۳ (p-s)	۵۰٪ FC	PS ₀ C ₀ ZnS ₁ C ₁
۶۹/۱۰۶ (def)	۴۱/۴۴۶ (o-r)	۱۰/۵۶ (v-c')	۱۳/۷۶۶ (g-k)	۱۲/۴۳۳ (s-w)	۱۶/۸ (g-k)	۱۰۰٪ FC	
۴۵/۹۵ (k-q)	۱۸/۰۱۳ (x-a')	۱۱/۷۱ (p-z)	۱۱/۴۵ (q-z)	۱۳/۶۱۶ (q-t)	۱۵/۵۳۳ (k-o)	۵۰٪ FC	PS ₀ C ₁ ZnS ₁ C ₁
۸۵/۰۱ (abc)	۴۶/۷۸۶ (k-q)	۱۵/۷۸ (cde)	۱۱/۴۶۶ (q-z)	۱۹/۸۳۳ (ab)	۱۵/۵۵ (k-o)	۱۰۰٪ FC	
۵۴/۷۶ (g-l)	۴۶/۸۱۶ (k-q)	۱۱/۷۳ (o-z)	۱۲/۶۶۶ (i-t)	۱۴/۵ (n-r)	۱۵/۷ (j-n)	۵۰٪ FC	PS ₁ C ₀ ZnS ₁ C ₀
۷۵/۲۳۶ (cd)	۶۲/۷۶۶ (e-h)	۱۲/۹۳ (h-q)	۱۴/۶۵ (d-g)	۱۹/۷۳۳ (ab)	۱۹/۲۳۳ (a-d)	۱۰۰٪ FC	
۶۳/۰۵ (e-h)	۲۸/۲۶ (t-x)	۱۴/۳۱۶ (e-i)	۱۱/۴۳۳ (q-z)	۱۸/۰۵ (d-g)	۱۷/۶۳۳ (e-i)	۵۰٪ FC	PS ₁ C ₁ ZnS ₁ C ₀
۷۰/۹۷۳ (de)	۴۴/۰۳۶ (m-r)	۱۷/۵۱۶ (b)	۱۲ (l-x)	۱۹/۳ (abc)	۱۸/۰۸۳ (c-g)	۱۰۰٪ FC	
۵۳/۹۹ (g-m)	۳۴/۵۲۶ (r-v)	۱۰/۳ (x-c')	۱۰/۲۶۶ (y-c')	۹/۶۳۳ (xy)	۱۵/۴۳۳ (l-p)	۵۰٪ FC	PS ₁ C ₀ ZnS ₁ C ₁
۸۵/۹۵ (ab)	۳۸/۳۱۶ (q-t)	۱۵/۵۵ (c-f)	۱۱/۸۵ (m-y)	۱۷/۳۳۳ (e-i)	۱۷/۵۳۳ (e-i)	۱۰۰٪ FC	
۵۵/۶۷ (g-k)	۱۶/۹۹۶ (yza')	۱۳/۲۶۶ (g-p)	۱۱/۸۳۳ (n-y)	۱۷/۰۸۳ (f-j)	۱۵/۲ (l-p)	۵۰٪ FC	PS ₁ C ₁ ZnS ₁ C ₁
۶۲/۰۶۳ (e-i)	۳۸/۰۵ (q-t)	۱۳/۴ (g-o)	۱۱/۸ (o-z)	۱۷/۵۳۳ (e-i)	۱۹/۲۶۶ (abc)	۱۰۰٪ FC	

P =مصرف فسفر؛ Zn =مصرف روی؛ S =مصرف از طریق خاک؛ C =مصرف از طریق بذرمال؛ اندیس عددی صفر=عدم مصرف کود؛ اندیس عددی

یک=مصرف کود؛ T =رقم گندم تجن؛ H =رقم گندم حیدری؛ FC =ظرفیت زراعی؛ سطح معنی‌داری $P \leq 0.05$.

نتایج مطالعه حاضر مشخص کرد که تیمار تغذیه‌ای $PS_1C_1ZnS_1C_1$ بیش‌ترین میزان زیست‌توده خشک گیاه را در شرایط تنش کم‌آبی و در رقم حیدری تشکیل داده است (جدول ۵). این تیمار موجب افزایش ۳۷۷ درصدی زیست‌توده خشک کل گیاه نسبت به شاهد تغذیه‌ای رقم حیدری در شرایط تنش شده است. در بین گیاهان تحت تنش رقم تجن نیز بیش‌ترین مقدار زیست‌توده خشک گیاه با افزایش ۴۰۰ درصدی نسبت به شاهد در تیمار $PS_0C_0ZnS_1C_0$ مشاهده شد. در شرایط آبیاری بهینه، تیمارهای $PS_0C_1ZnS_0C_1$ و $PS_1C_1ZnS_1C_1$ به ترتیب با افزایش ۳۰۵ و ۴۴۵ درصدی نسبت به شاهد هر رقم، بیش‌ترین مقدار زیست‌توده خشک گیاه را در رقم‌های تجن و حیدری ثبت کردند (جدول ۵).

با توجه به جدول ۵، مشاهده می‌شود که در شرایط تنش کم‌آبی تیمار $PS_1C_1ZnS_1C_1$ بیش‌ترین مقدار نسبت تشکیل زیست‌توده اندام هوایی (SBAR) را در رقم حیدری سبب شده است. تیمار $PS_1C_0ZnS_1C_1$ نیز در رقم تجن بیش‌ترین میزان SBAR را در شرایط

تنش ثبت کرده است. میزان SBAR در دو تیمار اخیر به ترتیب حدود ۲۳ و ۱۴ درصد بیش‌تر از شاهد تغذیه‌ای ارقام حیدری و تجن در شرایط تنش بود. در ارقام تجن و حیدری تحت آبیاری بهینه، بیش‌ترین میزان SBAR به ترتیب در تیمارهای $PS_0C_0ZnS_0C_1$ و $PS_1C_0ZnS_1C_1$ ثبت گردید که افزایش ۴۷ و ۲۴ درصدی نسبت به شاهد این تیمارها در شرایط آبیاری بهینه داشت (جدول ۵).

نتایج نشان می‌دهد که مصرف روی از طریق خاک و بذرمال فسفر و روی ($PS_0C_1ZnS_1C_1$) در شرایط تنش کم‌آبی سبب ثبت بیش‌ترین مقدار نسبت ریشه به اندام هوایی (R/S) در رقم حیدری شد (جدول ۵). این مقدار ۱۹۸ درصد بیش‌تر از شاهد این رقم بود. در رقم تجن نیز تیمار تغذیه‌ای $PS_0C_0ZnS_1C_0$ با ۸۱ درصد افزایش نسبت به شاهد، بیش‌ترین میزان R/S را در شرایط تنش نشان داد. در گیاهان تحت آبیاری بهینه، بیش‌ترین مقدار R/S به ترتیب در تیمارهای $PS_0C_1ZnS_1C_1$ و $PS_0C_1ZnS_0C_1$ برای ارقام تجن و حیدری مشاهده گردید که افزایش ۷۵ و ۱۲۶ درصدی نسبت به شاهد داشتند (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میانگین صفات زیست‌توده خشک کل گیاه، SBAR و نسبت R/S متأثر از مصرف فسفر و روی از طریق خاک و بذرمال در دو رقم

گندم تحت تنش کم‌آبی و آبیاری بهینه

تیمارهای تغذیه‌ای	سطوح آبیاری	خصوصیات گیاه مربوط به هر رقم					
		SBAR			زیست‌توده خشک کل گیاه (گرم/گلدان)		
		نسبت R/S		نسبت R/S		نسبت R/S	
H	T	H	T	H	T	H	T
$PS_0C_0ZnS_0C_0$	۵۰٪ FC	۰/۷۴ (s-z)	۱/۰۵ (l-u)	۰/۵۷۷ (c-g)	۰/۴۹۱ (h-o)	۰/۰۴۹ (d'e')	۰/۰۳۸ (e')
$PS_0C_1ZnS_0C_0$	۱۰۰٪ FC	۰/۸۴ (p-y)	۱/۱۹ (i-p)	۰/۵۴۳ (d-j)	۰/۴۵۸ (k-s)	۰/۰۵۷ (d'e')	۰/۰۵۶ (d'e')
$PS_0C_0ZnS_0C_1$	۵۰٪ FC	۱/۳۱ (g-n)	۱/۴۷ (e-j)	۰/۴۳۷ (m-u)	۰/۴۰۴ (p-x)	۰/۱۰۷ (xyz)	۰/۱۲۹ (u-x)
$PS_0C_0ZnS_0C_1$	۱۰۰٪ FC	۱/۶۱ (c-h)	۱/۱۲ (i-s)	۰/۳۸۲ (s-z)	۰/۴۶۹ (i-q)	۰/۱۷۳ (l-q)	۰/۱۸۶ (h-m)
$PS_0C_1ZnS_0C_1$	۵۰٪ FC	۰/۸۲ (p-y)	۰/۸۸ (o-x)	۰/۵۴۸ (d-i)	۰/۵۴۱ (d-j)	۰/۱۰۲ (yza')	۰/۰۹ (za'b')
$PS_0C_1ZnS_0C_1$	۱۰۰٪ FC	۱/۰۰۷ (m-v)	۰/۵ (xyz)	۰/۴۹۹ (g-m)	۰/۶۶۵ (ab)	۰/۱۵۱ (q-u)	۰/۱۲۳ (v-y)
$PS_0C_1ZnS_0C_1$	۵۰٪ FC	۲/۲۰۶ (a)	۱/۶۵ (c-g)	۰/۳۱۵ (yz)	۰/۳۸ (s-z)	۰/۱۷۱ (l-q)	۰/۱۸۷ (h-l)
$PS_1C_0ZnS_0C_0$	۱۰۰٪ FC	۱/۹۰۹ (a-d)	۱/۳۷ (e-m)	۰/۳۴۶ (v-z)	۰/۴۲۱ (m-v)	۰/۱۹۹ (f-j)	۰/۲۲ (cde)
$PS_1C_0ZnS_0C_0$	۵۰٪ FC	۱/۷۴ (b-c)	۱/۳۶ (e-m)	۰/۳۶۷ (u-z)	۰/۴۲۲ (m-v)	۰/۱۶۴ (m-r)	۰/۱۸ (j-o)
$PS_1C_1ZnS_0C_0$	۱۰۰٪ FC	۱/۳۳ (f-n)	۱/۴۱ (e-l)	۰/۴۳۲ (m-u)	۰/۴۱۳ (n-w)	۰/۱۹۸ (f-k)	۰/۱۷۶ (k-p)
$PS_1C_1ZnS_0C_0$	۵۰٪ FC	۱/۵۹ (d-h)	۱/۰۹ (j-t)	۰/۳۹۲ (q-z)	۰/۴۷۸ (i-p)	۰/۱۲۷ (u-x)	۰/۱۵۵ (p-s)
$PS_1C_0ZnS_0C_1$	۱۰۰٪ FC	۱/۶۲ (c-g)	۱/۲۰۲ (i-p)	۰/۳۸۱ (s-z)	۰/۴۵۴ (l-s)	۰/۲۰۵ (e-i)	۰/۲۰۱ (f-j)
$PS_1C_0ZnS_0C_1$	۵۰٪ FC	۱/۶۵ (c-g)	۱/۱۲ (i-s)	۰/۳۹۴ (q-y)	۰/۴۷۱ (i-q)	۰/۰۸۱ (a'b'c')	۰/۰۵۲ (d'e')
$PS_1C_1ZnS_0C_1$	۱۰۰٪ FC	۰/۷۱ (t-z)	۰/۹۴ (n-v)	۰/۵۸۳ (c-f)	۰/۵۳۴ (e-k)	۰/۱۱۷ (wxy)	۰/۰۶۴ (c'd')
$PS_1C_1ZnS_0C_1$	۵۰٪ FC	۱/۰۸ (k-t)	۱/۲۴ (h-o)	۰/۴۷۸ (i-p)	۰/۴۴۷ (l-t)	۰/۱۶۴ (m-r)	۰/۱۴۴ (r-v)
$PS_0C_0ZnS_1C_0$	۱۰۰٪ FC	۱/۱۶ (i-q)	۱/۳۵ (f-n)	۰/۴۶۴ (j-r)	۰/۴۲۸ (m-u)	۰/۲۱۸ (c-f)	۰/۱۷ (l-q)
$PS_0C_0ZnS_1C_0$	۵۰٪ FC	۱/۹۰۲ (a-d)	۱/۹۰۱ (a-d)	۰/۳۴۴ (v-z)	۰/۳۴۸ (v-z)	۰/۱۸۲ (i-n)	۰/۱۹ (g-l)
$PS_0C_1ZnS_1C_0$	۱۰۰٪ FC	۱/۵۰۶ (e-i)	۱/۷ (b-f)	۰/۴ (p-x)	۰/۳۷۱ (t-z)	۰/۲۳ (cd)	۰/۲۳۵ (cd)
$PS_0C_1ZnS_1C_0$	۵۰٪ FC	۱/۰۴ (l-u)	۱/۳۶ (e-m)	۰/۴۹ (h-o)	۰/۴۲۸ (m-u)	۰/۱۱۲ (w-z)	۰/۱۲۹ (t-x)
$PS_0C_0ZnS_1C_1$	۱۰۰٪ FC	۱/۱۳ (i-r)	۱/۹۹ (abc)	۰/۴۶۷ (j-q)	۰/۳۳۴ (w-z)	۰/۱۶۱ (n-r)	۰/۲۲۱ (c-f)
$PS_0C_0ZnS_1C_1$	۵۰٪ FC	۰/۶۸ (u-z)	۱/۱۵ (i-r)	۰/۶۱۴ (j-p)	۰/۴۶۷ (j-q)	۰/۰۵۴ (z)	۰/۱۱۲ (w-z)
$PS_0C_1ZnS_1C_1$	۱۰۰٪ FC	۰/۶۵ (v-z)	۰/۹۰۷ (o-w)	۰/۶۰۹ (b-e)	۰/۵۲۵ (f-l)	۰/۰۷۱ (b'c'd')	۰/۲۱۴ (d-g)
$PS_0C_1ZnS_1C_1$	۵۰٪ FC	۲/۲۰۷ (a)	۱/۳۲ (f-n)	۰/۳۱۴ (z)	۰/۴۳۲ (m-u)	۰/۱۵۵ (p-s)	۰/۱۶۴ (m-r)
$PS_1C_0ZnS_1C_0$	۱۰۰٪ FC	۰/۹۰۲ (o-w)	۲/۰۸ (ab)	۰/۵۲۵ (f-l)	۰/۳۲۷ (xyz)	۰/۲۳۹ (bc)	۰/۱۹۸ (f-k)
$PS_1C_0ZnS_1C_0$	۵۰٪ FC	۱/۰۰۶ (m-v)	۱/۴۲ (e-l)	۰/۴۹۸ (g-m)	۰/۴۱۴ (n-v)	۰/۱۵۴ (p-t)	۰/۱۵۶ (o-s)
$PS_1C_1ZnS_1C_0$	۱۰۰٪ FC	۱/۴۶ (e-k)	۱/۳۷ (e-m)	۰/۴۱۱ (o-w)	۰/۴۲۲ (m-v)	۰/۲۰۴ (e-j)	۰/۱۵۴ (p-s)
$PS_1C_1ZnS_1C_0$	۵۰٪ FC	۰/۸۹ (o-w)	۱/۳۴ (f-n)	۰/۵۲۵ (d-k)	۰/۴۲۸ (m-u)	۰/۱۳۴ (s-w)	۰/۱۶۶ (l-r)
$PS_1C_0ZnS_1C_1$	۱۰۰٪ FC	۱/۳۳ (f-n)	۱/۰۳ (m-v)	۰/۴۳۱ (m-u)	۰/۴۹۲ (h-n)	۰/۱۶۶ (m-r)	۰/۲۱۳ (d-g)
$PS_1C_0ZnS_1C_1$	۵۰٪ FC	۰/۷۷ (r-z)	۰/۷۸ (q-z)	۰/۵۷۳ (d-g)	۰/۵۶۳ (d-h)	۰/۰۶۱ (c'd'e')	۰/۱۵۹ (n-r)
$PS_1C_1ZnS_1C_1$	۱۰۰٪ FC	۰/۴۷ (yz)	۰/۷۹ (q-z)	۰/۶۷۷ (ab)	۰/۵۶ (d-h)	۰/۲۶ (b)	۰/۲۰۴ (e-j)
$PS_1C_1ZnS_1C_1$	۵۰٪ FC	۰/۴۱ (z)	۱/۶۳ (c-g)	۰/۷۰۴ (a)	۰/۳۸۵ (r-z)	۰/۲۳۴ (cd)	۰/۱۶۱ (n-r)
	۱۰۰٪ FC	۰/۵۲ (w-z)	۰/۸۲ (p-y)	۰/۶۵۵ (abc)	۰/۵۴۹ (d-i)	۰/۳۱۱ (a)	۰/۲۱۱ (d-h)

P=مصرف فسفر؛ Zn=مصرف روی؛ S=مصرف از طریق خاک؛ C=مصرف از طریق بذرمال؛ اندیس عددی صفر=عدم مصرف کود؛ اندیس عددی

یک=مصرف کود؛ T=رقم گندم تجن؛ H=رقم گندم حیدری؛ FC=ظرفیت زراعی؛ SBAR=نسبت تخصیص زیست‌توده اندام هوایی؛ R/S=نسبت وزن

خشک ریشه به اندام هوایی؛ سطح معنی‌داری = 0.05.

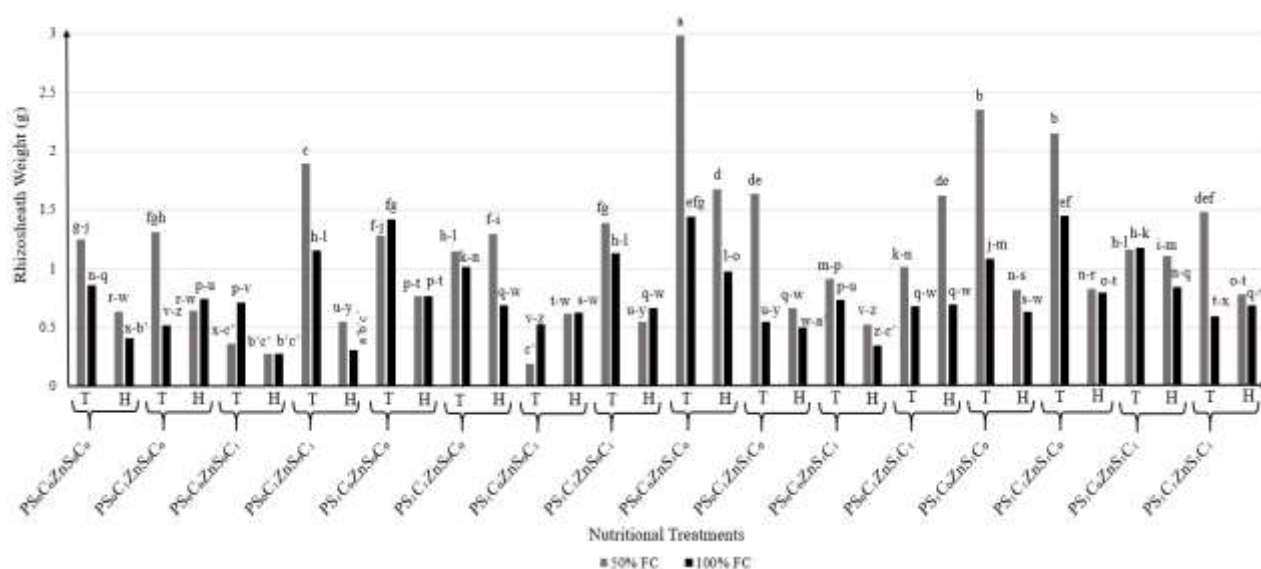


نتایج حاکی از آن است که در گیاهان تحت تنش کم آبی رقم تجن، تیمار تغذیه‌ای $PS_1C_1ZnS_0C_1$ با افزایش ۷۷ درصدی نسبت به شاهد این رقم، بیش‌ترین مقدار را از نظر نسبت ارتفاع اندام هوایی به طول ریشه (SH/RL) سبب شده است (جدول ۶). در رقم حیدری نیز تیمار $PS_0C_1ZnS_1C_0$ با ۸۴ درصد افزایش نسبت به شاهد این رقم، بیش‌ترین میزان نسبت SH/RL را در شرایط تنش ثبت کرد. در ارقام تجن و حیدری تحت آبیاری بهینه، بیش‌ترین میزان نسبت SH/RL به ترتیب با ۶۷ و ۳۱ درصد افزایش نسبت به شاهد هر رقم، در تیمارهای $PS_1C_0ZnS_0C_0$ و $PS_0C_1ZnS_0C_0$ مشاهده شد (جدول ۶).

جدول ۶. مقایسه میانگین صفات نسبت SH/RL، SRL و RMR متأثر از مصرف فسفر و روی از طریق خاک و بذرمال در دو رقم گندم تحت تنش کم آبی و آبیاری بهینه

تیمارهای تغذیه‌ای	سطوح آبیاری	خصوصیات گیاه مربوط به هر رقم					
		RMR		SRL (cm/g)		نسبت SH/RL	
		H	T	H	T	H	T
$PS_0C_0ZnS_0C_0$	۵۰٪ FC	۳۱/۶۵ (c)	۶۴/۳۳ (a)	۴۶۷ (b)	۴۶۴ (b)	۰/۸۲۸ (yza')	۰/۹۲۹ (xyz)
$PS_0C_1ZnS_0C_0$	۱۰۰٪ FC	۱۵/۵۹ (g-l)	۲۸/۵۸ (cd)	۳۸۷ (bc)	۳۷۱ (cd)	۱/۱۹ (m-u)	۰/۹۹۸ (u-y)
$PS_0C_1ZnS_0C_0$	۵۰٪ FC	۱۰/۶۹ (k-x)	۱۷/۲۶ (f-i)	۲۲۳ (f-k)	۱۷۴ (h-o)	۱/۱۱ (o-x)	۱/۲۶ (j-r)
$PS_0C_1ZnS_0C_0$	۱۰۰٪ FC	۷/۰۲۵ (q-z)	۵/۳۹ (v-z)	۱۳۴ (k-p)	۱۲۱ (m-p)	۱/۲۰۷ (l-t)	۱/۶۵ (a)
$PS_0C_0ZnS_0C_1$	۵۰٪ FC	۵/۹۹۹ (u-z)	۹/۰۰۵ (n-y)	۲۴۷ (f-i)	۲۸۶ (def)	۱/۰۸۶ (r-x)	۱/۲۲ (l-s)
$PS_0C_0ZnS_0C_1$	۱۰۰٪ FC	۳/۸۱۸ (yz)	۱۷/۶۴ (fgh)	۲۷۹ (efg)	۳۴۶ (cde)	۰/۶۹۲ (a')	۰/۹۶ (v-y)
$PS_0C_1ZnS_0C_1$	۵۰٪ FC	۴/۷۴ (xyz)	۱۶/۶۲ (g-k)	۱۱۷ (m-p)	۸۲ (p)	۱/۲۲۴ (l-s)	۱/۵۱۹ (a-f)
$PS_0C_1ZnS_0C_1$	۱۰۰٪ FC	۲/۳۷ (z)	۸/۷۸ (o-y)	۱۱۳ (m-p)	۸۸ (op)	۱/۱۸۶ (m-u)	۱/۵۱۷ (a-g)
$PS_1C_0ZnS_0C_0$	۵۰٪ FC	۷/۴۲ (p-z)	۱۲/۴۲ (g-s)	۱۳۱ (l-p)	۱۲۴ (m-p)	۱/۲۹۴ (i-p)	۱/۳۷ (e-m)
$PS_1C_0ZnS_0C_0$	۱۰۰٪ FC	۶/۸۷ (r-z)	۱۳/۸۸ (g-o)	۱۱۴ (m-p)	۱۲۵ (m-p)	۱/۵۶۸ (a-e)	۱/۴۴ (c-j)
$PS_1C_1ZnS_0C_0$	۵۰٪ FC	۱۷/۰۱ (f-j)	۱۴/۵۲ (g-o)	۱۵۴ (j-p)	۱۳۳ (k-p)	۱/۰۲۷ (s-y)	۱/۶۳ (abc)
$PS_1C_1ZnS_0C_0$	۱۰۰٪ FC	۵/۴۳ (v-z)	۹/۲۵ (m-y)	۹۳ (op)	۱۲۵ (m-p)	۱/۴۸۹ (a-i)	۱/۴۲ (d-k)
$PS_1C_0ZnS_0C_1$	۵۰٪ FC	۱۲/۹۰۷ (g-r)	۷/۰۹۹ (q-z)	۲۵۰ (fgh)	۴۲۹ (bc)	۱/۰۱۶ (t-y)	۰/۷۹ (za')
$PS_1C_0ZnS_0C_1$	۱۰۰٪ FC	۱۲/۹۹۶ (g-q)	۱۸/۴۱ (efg)	۲۸۰ (d-g)	۴۰۰ (bc)	۱/۴۰۲ (e-l)	۱/۰۰۵ (t-y)
$PS_1C_1ZnS_0C_1$	۵۰٪ FC	۶/۴۳ (s-z)	۱۷/۵۱ (fgh)	۱۳۴ (k-p)	۱۵۳ (j-p)	۱/۴۳۸ (c-j)	۱/۳۶ (e-n)
$PS_1C_1ZnS_0C_1$	۱۰۰٪ FC	۵/۷۳ (v-z)	۱۱/۹ (h-u)	۱۳۸ (k-p)	۱۲۴ (m-p)	۱/۱۴۴ (o-w)	۱/۴۴۲ (b-j)
$PS_0C_0ZnS_1C_0$	۵۰٪ FC	۱۴/۱۱ (g-o)	۲۴/۰۵ (cd)	۱۴۴ (k-p)	۹۹ (nop)	۰/۹۴۴ (w-z)	۱/۴۰۷ (d-l)
$PS_0C_0ZnS_1C_0$	۱۰۰٪ FC	۷/۰۵۵ (q-z)	۹/۸۰۷ (l-y)	۱۴۰ (k-p)	۸۲ (p)	۰/۹۵۵ (w-z)	۱/۴۴۹ (a-j)
$PS_0C_1ZnS_1C_0$	۵۰٪ FC	۱۱/۸۸ (h-u)	۲۵/۱۰۸ (d)	۱۹۴ (g-m)	۱۴۸ (j-p)	۱/۵۳۲ (a-f)	۱/۴۷ (a-i)
$PS_0C_1ZnS_1C_0$	۱۰۰٪ FC	۵/۹۲۲ (u-z)	۳/۸۲۹ (yz)	۱۵۸ (i-p)	۷۶ (p)	۱/۴۳۱ (c-k)	۱/۶۱ (a-d)
$PS_0C_0ZnS_1C_1$	۵۰٪ FC	۲۷/۶۱ (cd)	۱۵/۲۱ (g-m)	۵۸۱ (a)	۲۱۹ (f-l)	۰/۷۹۲ (za')	۱/۰۹ (q-x)
$PS_0C_1ZnS_1C_1$	۱۰۰٪ FC	۱۲/۵۷ (g-r)	۷/۲۳۴ (p-z)	۳۸۴ (bc)	۱۳۶ (k-p)	۱/۱۷۸ (m-u)	۱/۲۳ (k-s)
$PS_0C_1ZnS_1C_1$	۵۰٪ FC	۱۵/۳۵ (g-l)	۱۱/۱۳ (j-w)	۱۱۰ (m-p)	۱۲۳ (m-p)	۱/۱۶۶ (n-v)	۱/۳۶۵ (e-n)
$PS_0C_1ZnS_1C_1$	۱۰۰٪ FC	۶/۱۱۸ (u-z)	۵/۰۹۷ (w-z)	۱۳۹ (k-p)	۸۵ (op)	۱/۲۶۲ (j-r)	۱/۳۶۴ (f-n)
$PS_1C_0ZnS_1C_0$	۵۰٪ FC	۱۰/۷۰۶ (k-x)	۲۶/۰۲۵ (cd)	۱۵۴ (j-p)	۱۴۱ (k-p)	۱/۲۴۹ (j-r)	۱/۲۴ (j-r)
$PS_1C_0ZnS_1C_0$	۱۰۰٪ FC	۵/۲۹۴ (v-z)	۱۲/۲۲۹ (h-t)	۱۰۸ (m-p)	۱۶۴ (h-p)	۱/۵۴۲ (a-f)	۱/۳۱ (g-o)
$PS_1C_1ZnS_1C_0$	۵۰٪ FC	۱۳/۸۴ (g-o)	۲۲/۷۹ (def)	۲۳۷ (f-j)	۱۲۰ (m-p)	۱/۲۶۲ (j-r)	۱/۵۵ (a-f)
$PS_1C_0ZnS_1C_1$	۱۰۰٪ FC	۸/۵۱۲ (o-y)	۱۳/۷۴ (g-o)	۱۸۷ (h-n)	۱۱۱ (m-p)	۱/۱۰۲ (p-x)	۱/۵۰۷ (a-h)
$PS_1C_0ZnS_1C_1$	۵۰٪ FC	۴۴/۵۲ (b)	۱۶/۷۷ (f-j)	۴۱۰ (bc)	۱۴۹ (g-n)	۰/۹۶۶ (xyz)	۱/۵۰۵ (a-h)
$PS_1C_0ZnS_1C_1$	۱۰۰٪ FC	۱۰/۰۹ (l-x)	۱۳/۲۲ (g-p)	۱۸۵ (h-n)	۱۳۲ (k-p)	۱/۱۲۱ (o-x)	۱/۴۸ (a-i)
$PS_1C_1ZnS_1C_1$	۵۰٪ FC	۱۱/۲۵۲ (i-v)	۱۵/۰۳۶ (g-n)	۱۹۲ (g-m)	۱۱۹ (m-p)	۱/۲۹۷ (i-p)	۱/۲۹ (i-q)
$PS_1C_1ZnS_1C_1$	۱۰۰٪ FC	۶/۴۵۴ (s-z)	۶/۳۰۵ (t-z)	۱۲۵ (m-p)	۱۲۶ (m-p)	۱/۳۱۱ (h-o)	۱/۶۴ (ab)

P =مصرف فسفر؛ Zn =مصرف روی؛ S =مصرف از طریق خاک؛ C =مصرف از طریق بذرمال؛ اندیس عددی صفر=عدم مصرف کود؛ اندیس عددی یک=مصرف کود؛ T =رقم گندم تجن؛ H =رقم گندم حیدری؛ FC =ظرفیت زراعی؛ SH/RL =نسبت ارتفاع اندام هوایی به طول ریشه؛ SRL =طول ریشه ویژه؛ RMR =نسبت وزن رایزوشیت؛ سطح معنی‌داری $P \leq 0.05$.



شکل ۳. تأثیر تیمارهای تغذیه‌ای بر وزن ریزوشیت تشکیل شده در دو رقم گندم در شرایط تنش کم‌آبی و آبیاری بهینه (P =مصرف فسفر؛ Zn =مصرف روی؛ S =مصرف از طریق خاک؛ C =مصرف از طریق بذرمال؛ اندیس عددی صفر=عدم مصرف کود؛ اندیس عددی یک=مصرف کود؛ T =رقم گندم تجن؛ H =رقم گندم حیدری؛ FC =ظرفیت زراعی؛ سطح معنی‌داری $P \leq 0.05$).

همان گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، بیش‌ترین مقدار طول ریشه ویژه (SRL) در شرایط تنش در رقم تجن در تیمار $PS_1C_0ZnS_0C_1$ ثبت شده است که کاهش ۷/۵ درصدی و غیرمعنی‌دار نسبت به شاهد این رقم دارد. همچنین در رقم حیدری نیز بیش‌ترین مقدار SRL در تیمار $PS_0C_0ZnS_1C_1$ مشاهده شد که افزایش ۲۴ درصدی و معنی‌دار با شاهد رقم حیدری داشت. در شرایط آبیاری بهینه نیز بیش‌ترین میزان SRL برای رقم تجن در تیمار $PS_1C_0ZnS_0C_1$ ثبت شد که ۷/۸ درصد بیش‌تر از شاهد این رقم بود، اما اختلاف معنی‌دار نداشت. در رقم حیدری نیز بیش‌ترین میزان SRL در تیمار $PS_0C_0ZnS_1C_1$ مشاهده شد که کاهش ۰/۷۷ درصدی و غیرمعنی‌دار با شاهد آن در شرایط آبیاری بهینه داشت (جدول ۶).

بیش‌ترین مقدار نسبت وزن ریزوشیت (RMR) در شرایط تنش کم‌آبی برای رقم تجن در تیمار $PS_1C_0ZnS_1C_0$ مشاهده شد که کاهش ۵۹/۹ درصدی و معنی‌دار با شاهد این رقم داشت (جدول ۶). برای رقم حیدری نیز در شرایط تنش تیمار $PS_1C_0ZnS_1C_1$ بیش‌ترین میزان RMR را نشان داد که ۴۱ درصد بیش‌تر از شاهد آن بود. در شرایط آبیاری بهینه، بیش‌ترین مقدار RMR در تیمار $PS_1C_0ZnS_1C_0$ مشاهده گردید که به ترتیب در ارقام تجن و حیدری ۳۵ و ۱۷ درصد کم‌تر از شاهد آن‌ها بود. این کاهش برای رقم تجن معنی‌دار و برای رقم حیدری غیرمعنی‌دار بود (جدول ۶).

با توجه به نتایج به دست آمده، بروز تنش کم‌آبی سبب کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی و ریشه گندم شده است. همچنین مشاهده می‌شود طول ریشه و ارتفاع اندام هوایی نیز در اثر تنش کم‌آبی کاهش معنی‌داری ($P < 0.05$) در هر دو رقم گندم داشته است. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که مصرف فسفر و روی از طریق خاک به ترتیب به میزان ۱۲ و ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و به صورت بذرمال موجب افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) وزن خشک و ارتفاع اندام هوایی ارقام گندم در شرایط تنش کم‌آبی و آبیاری بهینه می‌شود (شکل ۱؛ جدول ۴). همچنین مشخص شد که مصرف روی از طریق خاک بیش‌ترین تأثیر را بر رشد ریشه در شرایط تنش و آبیاری بهینه داشته است، زیرا مقدار وزن خشک ریشه و طول آن در اثر مصرف روی از طریق خاک افزایش معنی‌دار نسبت به شاهد در هر دو رقم داشته است (شکل ۲؛ جدول ۴). این افزایش به نقش روی در تشکیل و پایداری کلروفیل و افزایش راندمان فتوسنتز سبب بهبود رشد گیاه و توسعه ریشه می‌شود. همچنین روی سبب تقویت عملکرد آنزیم‌ها شده و از این طریق فرآورده‌های مختلف و رشد کلی گیاه را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، روی با افزایش تولید هورمون‌های رشد (مثل اکسین) می‌شود (Rehman et al., 2018). گزارش شده که سطوح متفاوت روی، اعم از کمبود یا کفایت، موجب تغییر در مسیرهای مولکولی مرتبط با جذب و انتقال این عنصر شده و نیز در تنظیم هورمون‌های گیاهی، به‌ویژه مسیرهای وابسته به اکسین نقش مهمی ایفا می‌کند (Liu et al., 2025). این امر مؤید آن است که مدیریت بهینه حاصلخیزی خاک و تغذیه گندم در شرایط تنش کم‌آبی، می‌تواند سبب بهبود مقاومت گندم و افزایش عملکرد آن شود (Tadayon et al., 2025).



مشاربه با یافته‌های پژوهش حاضر، Ahmadian et al. (۲۰۲۱) گزارش کردند که بروز تنش کم‌آبی سبب کاهش ارتفاع اندام هوایی در گندم شد. در حالی که مصرف روی به صورت نانوکلات روی در شرایط تنش سبب افزایش ارتفاع اندام هوایی در گیاهان شد. در مطالعه دیگری بر روی گندم، مشخص شد که صفات مورفولوژیکی گیاهان در شرایط تنش کم‌آبی با افزایش میزان مصرف فسفر بهبود می‌یابد (Mumtaz et al., 2014). در گیاهان گندم کشت شده در مزرعه، Ding et al. (۲۰۲۰) گزارش کردند که اعمال تنش کم‌آبی بر گیاهان سبب محدود شدن خصوصیات مرتبط با عملکرد و کاهش ارتفاع اندام هوایی شد. اما ویژگی‌های عملکردی و مورفولوژیکی گیاهان پس از مصرف کود فسفر به دلیل کم‌تر شدن اثرات تنش بهبود پیدا کرد.

جدول ۷. نتایج تجزیه واریانس تغییرات زیست‌توده خشک کل گیاه، SBAR، نسبت R/S، نسبت SH/RL، RMR و متاثر از مصرف فسفر و روی از طریق خاک و بذرمال در دو رقم گندم تحت تنش کم‌آبی و آبیاری بهینه

منبع تغییرات	درجه آزادی (df)	زیست‌توده خشک کل گیاه (گرم/گلدان)	SBAR	نسبت R/S	نسبت SH/RL	SRL (cm/g)	RMR
تکرار	۲	۰/۰۰۰۰۹ (ns)	۰/۰۰۰۷۶ (ns)	۰/۰۱۰۳ (ns)	۰/۰۵۵۱*	۱۶۱۳ (ns)	۶/۹۶۳۱ (ns)
مصرف خاکی کود (F)	۳	۰/۰۲۷۵**	۰/۰۶۳۷**	۱/۳۵۰۳**	۰/۲۶۹۱**	۵۹۱۱۲**	۱۹۰/۰۰۹**
کود بذرمال (SP)	۳	۰/۰۴۸۸**	۰/۱۵۳۱**	۲/۸۶۷۵**	۰/۸۴۵**	۲۷۴۹۱۵**	۶۶۷/۳۹**
آبیاری (I)	۱	۰/۱۱۳۳**	۰/۰۱۴۲*	۰/۳۹۳۶**	۰/۳۱۳۴**	۶۰۲۱۶**	۳۰۱۶/۸۹**
رقم (C)	۱	۰/۰۰۰۱۵ (ns)	۰/۰۳۵۳**	۰/۲۵۱۲*	۱/۲۰۹۹**	۶۰۱۲۱**	۸۱۷/۰۹**
F×SP	۹	۰/۰۱۸۸**	۰/۰۳۷**	۰/۸۷۱۶**	۰/۱۴۳۷**	۸۲۷۵۰**	۵۷۷/۰۹**
F×I	۳	۰/۰۰۲۳۸**	۰/۰۰۰۹۲ (ns)	۰/۰۱۶۹ (ns)	۰/۰۱۸۶ (ns)	۳۹۰۹ (ns)	۲۳۹/۹۳**
F×C	۳	۰/۰۰۵۹۴**	۰/۰۳۷۸**	۰/۷۸۰۶**	۰/۱۱۴۹**	۵۲۸۰۳**	۲۵۶/۸۴**
SP×I	۳	۰/۰۰۳۳۷**	۰/۰۱۶**	۰/۳۱۹۳**	۰/۰۳۰۴ (ns)	۴۳۴۰ (ns)	۱۰۲/۶۱**
SP×C	۳	۰/۰۰۷۲۴**	۰/۰۰۵۳ (ns)	۰/۰۴۲۵ (ns)	۰/۰۶۵**	۷۵۲۴ (ns)	۴۳۹/۲۳**
I×C	۱	۰/۰۰۳۳**	۰/۰۰۰۴۵ (ns)	۰/۰۲۹۲ (ns)	۰/۰۱۴۲ (ns)	۸۷۸۰ (ns)	۱/۲۰۹۲ (ns)
F×SP×I	۹	۰/۰۰۱۶**	۰/۰۰۵۲*	۰/۱۶۶**	۰/۱۱۹**	۸۹۸۱**	۱۹۰/۸۷**
F×SP×C	۹	۰/۰۰۴۳**	۰/۰۱۶**	۰/۳۳۳**	۰/۱۶۴**	۲۷۵۰۸**	۱۰۲/۷۲**
F×I×C	۳	۰/۰۰۳۱**	۰/۰۲۵**	۰/۸۱۶**	۰/۰۲۶ (ns)	۷۰۴۰ (ns)	۶۷/۳۴**
SP×I×C	۳	۰/۰۰۰۶۳**	۰/۰۰۳۱ (ns)	۰/۱۲۶ (ns)	۰/۰۶۶**	۳۱۹۱ (ns)	۳۲۸/۴۹**
F×SP×I×C	۹	۰/۰۰۱۹**	۰/۰۱۳۱**	۰/۳۴**	۰/۰۶۷**	۸۲۰۶**	۵۰/۷۴**
خطا	۱۲۶	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۲۴	۰/۰۵۶۷	۰/۰۱۵۹	۳۲۱۰	۱۳/۹۷۵
ضریب تغییرات (%)		۹/۶۱	۱۰/۵	۱۹/۲۹	۹/۹۵	۲۹/۴۴	۲۷/۵۵

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح $P \leq 0.05$ و $P \leq 0.01$ ؛ ns=عدم معنی‌داری؛ SBAR=نسبت تخصیص زیست‌توده اندام هوایی؛ R/S=نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی؛ SH/RL=نسبت ارتفاع اندام هوایی به طول ریشه؛ SRL=طول ریشه ویژه؛ RMR=نسبت وزن ریزوشیت.

همان‌طور که در نتایج ارائه شده در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مصرف فسفر (۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و روی (۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از طریق خاک تأثیر معنی‌داری بر افزایش زیست‌توده خشک کل گیاه در شرایط تنش کم‌آبی داشت. این امر از نقش‌های مهم این دو عنصر در افزایش زیست‌توده، رشد و توسعه ریشه و اندام هوایی گیاه نشأت می‌گیرد (Asghar and Bashir, 2020). فسفر با ایفای نقش در انتقال انرژی و سنتز ترکیبات حیاتی، تقسیم سلولی و رشد اندام‌های هوایی و زیرزمینی را تقویت می‌کند. روی نیز به‌عنوان کوفاکتور آنزیم‌ها و عامل کلیدی در سنتز اکسین، توسعه ریشه و جذب بهتر آب و عناصر غذایی را تحریک می‌نماید. مصرف همزمان این دو عنصر اثر هم‌افزایی ایجاد کرده و با افزایش کارایی جذب و فتوسنتز، زیست‌توده خشک کل گیاه و عملکرد گندم را به‌طور معنی‌داری ارتقا می‌دهد (Sebhatleab et al., 2025). Zhang et al. (۲۰۲۲) گزارش کردند که صفات مرتبط با ریشه گندم، مثل طول و وزن خشک ریشه در اثر مصرف مقادیر کم فسفر در شرایط تنش کم‌آبی بهبود می‌یابد. Sakya et al. (۲۰۲۱) با مصرف سولفات روی به میزان ۲۰-۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کردند که در گیاهان گوجه‌فرنگی تحت تنش کم‌آبی وزن خشک ریشه به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد بروز تنش کم‌آبی سبب کاهش زیست‌توده خشک کل گیاه می‌شود (جدول ۵). مشاربه با این نتایج، در مطالعه‌ای بر

روی گیاه ذرت، Weisany et al. (۲۰۲۱) با اعمال تنش کم‌آبی بر گیاهان گزارش کردند که وزن تر و خشک و سایر خصوصیات مرتبط با عملکرد گیاهان به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. آن‌ها علت این کاهش را محدود شدن جذب عناصر غذایی ضروری توسط گیاه عنوان کردند. پس از مصرف روی به صورت محلول پاشی برگ، نتایج نشان داد که وزن خشک و ارتفاع اندام هوایی، وزن خشک و طول ریشه گیاهان تحت تنش به طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد. این یافته‌ها با نتایج مطالعه حاضر نیز هم‌راستا بود.

رایزوشیت بخشی از خاک رایزوسفری است که با قدرت بیش‌تری نسبت به خاک سایر بخش‌های رایزوسفر به ریشه چسبیده است. رایزوشیت نوک ریشه‌های گیاه را در برابر خشک شدن خاک حفاظت می‌کند و می‌تواند سبب بهبود تماس هیدرولیکی و مکانیکی خاک و ریشه می‌شود. بنابراین روابط خاک، آب و گیاه در شرایط کم‌آبی و نیز راندمان مصرف آب گیاه توسط رایزوشیت بهبود می‌یابد. همچنین خصوصیات بیولوژیکی و شیمیایی رایزوشیت از طریق افزایش تحرک، قابلیت دسترسی و جذب عناصر غذایی توسط ریشه، راندمان مصرف عناصر را در گیاه تحت شرایط کم‌آبی بهبود می‌بخشد (Cheraghi et al., 2023a; Cheraghi et al., 2024). رایزوشیت در پاسخ به بروز شرایط کم‌آبی در گیاهان تشکیل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، اعمال تنش کم‌آبی در گیاهان گندم سبب افزایش تشکیل رایزوشیت در هر دو رقم نسبت به شرایط آبیاری بهینه شده است. همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد که مصرف روی به مقدار ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم از طریق خاک بیش‌ترین تأثیر را بر تشکیل رایزوشیت در شرایط تنش داشته است. این امر می‌تواند به نقش روی در سیگنال‌دهی تنش و تنظیم اسمزی که سبب ایجاد پاسخ‌های مرتبط با تنش کم‌آبی می‌شود، مربوط شود (Pandya et al., 2023). دو عامل مهمی که در تشکیل رایزوشیت و کارایی آن نقش اساسی دارند، ترشحات ریشه‌ای مثل موسیلاژ و حضور ریشه‌های موئین هستند (Basirat et al., 2019). روی علاوه بر بهبود ترکیب ترشحات ریشه‌ای، می‌تواند سبب افزایش تولید و ترشح موسیلاژ به عنوان یک لایه محافظت‌کننده ریشه در شرایط کم‌آبی شود. موسیلاژ دسترسی گیاه به عناصر غذایی و آب را تسهیل کرده و امکان تشکیل رایزوشیت را تقویت می‌کند (Hassan et al., 2022). بهبود استقرار، رشد و توسعه ریشه و نیز بهبود وضعیت مویریشه‌ها احتمال تشکیل رایزوشیت را در شرایط کم‌آبی افزایش می‌دهد. به عنوان مثال، Cheraghi et al. (۲۰۲۴) گزارش کردند که بهبود تراکم و طول مویریشه‌ها در اثر مصرف سیلیسم منجر به افزایش تشکیل رایزوشیت در گندم تحت تنش کم‌آبی شد. روی نیز با بهبود رشد ریشه و افزایش قابلیت هدایت هیدرولیکی آن می‌تواند تشکیل رایزوشیت و عملکرد آن را تقویت کند (Zhang et al., 2021).

با توجه به نتایج به دست آمده، بروز تنش کم‌آبی موجب کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) محتوی رطوبت نسبی (RWC) در هر دو رقم تجن و حیدری نسبت به شرایط آبیاری بهینه شده است (جدول ۴). علت این امر محدود شدن جذب آب توسط ریشه و اختلال در روابط آبی گیاه در شرایط تنش می‌باشد (Mousavi et al., 2025b). اما مصرف ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر و ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی از طریق خاک موجب افزایش معنی‌دار مقدار RWC در گیاهان تحت تنش شد. در شرایط آبیاری بهینه نیز مصرف روی از طریق خاک نقش قابل توجهی در افزایش RWC هر دو رقم داشت. به نظر می‌رسد در کل نقش روی در افزایش مقدار RWC در شرایط تنش کم‌آبی و آبیاری بهینه پررنگ‌تر از فسفر باشد. با توجه به نتایج مربوط به وزن رایزوشیت (شکل ۳)، روی نقش قابل توجهی نیز در تشکیل رایزوشیت در گیاهان داشته است. با در نظر گرفتن کارکرد رایزوشیت در افزایش جذب آب و عناصر غذایی توسط ریشه و بهبود روابط آبی گیاه در شرایط کم‌آبی، می‌توان افزایش تشکیل رایزوشیت را به عنوان یکی از دلایل بهبود RWC در گیاهان تحت تنش در نظر گرفت. هم‌راستا با نتایج پژوهش حاضر، نتایج مطالعه Ghanem et al. (۲۰۲۵) نیز نشان داد که اعمال تنش کم‌آبی سبب کاهش RWC در گندم نان شده و روابط آبی و راندمان مصرف آب توسط گیاه را محدود می‌کند. اما محلول پاشی روی به میزان ۵۰۰ پی‌پی‌ام منجر به افزایش RWC تا حدود ۷۰ درصد در گیاهان تحت تنش گردید. مشابه با این نتیجه، Khan et al. نیز گزارش کردند با افزایش مقدار مصرف روی در شرایط تنش کم‌آبی، مقدار RWC نیز افزایش می‌یابد. یکی از دلایل افزایش RWC در اثر مصرف روی، افزایش و تسهیل جذب آب توسط ریشه گیاه است (Salem, 2021). علت دیگر آن افزایش جریان یون پتاسیم به درون سلول‌های نگهبان روزنه در شرایط تنش کم‌آبی است که سبب بهبود هدایت روزنه‌ای شده و راندمان مصرف آب توسط گیاه را افزایش می‌دهد (Umair Hassan et al., 2020). علاوه بر این، ارائه روی به گیاه در شرایط کم‌آبی سبب بهبود تنظیم روزنه‌ای از طریق افزایش پایداری غشاء سلولی شده و حفظ ثبات محتوی رطوبت برگ می‌شود (Fatemi et al., 2020).

نسبت تخصیص زیست‌توده اندام هوایی (SBAR) یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی پاسخ گیاه به شرایط محیطی و مدیریتی است که بیانگر سهم اندام هوایی از کل ماده خشک تولید شده توسط گیاه می‌باشد. این نسبت به‌ویژه در شرایط تنش کم‌آبی، به‌عنوان شاخصی برای سنجش کارایی فتوسنتز، توسعه ساختار هوایی، و توانایی گیاه در حفظ عملکرد اقتصادی مورد توجه قرار می‌گیرد (Blum,



2011). نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کاربرد ۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم فسفر از طریق خاک و روی به صورت بذرمال، تأثیر قابل توجهی بر افزایش SBAR در ارقام گندم تحت شرایط تنش کم آبی دارد (جدول ۵). در شرایط کم آبی، گیاهان معمولاً با تغییر در الگوی تخصیص زیست توده، سعی در حفظ تعادل بین جذب آب و تولید ماده خشک دارند. افزایش نسبت زیست توده اندام هوایی می تواند نشان دهنده موفقیت گیاه در حفظ رشد فتوسنتزی و تولید دانه باشد، در حالی که کاهش آن ممکن است بیانگر تمرکز گیاه بر توسعه ریشه جهت جذب آب بیش تر باشد (Blum, 2011). بنابراین، این شاخص نه تنها بازتابی از وضعیت فیزیولوژیکی گیاه است، بلکه می تواند به عنوان معیار انتخاب ژنوتیپ های مقاوم به خشکی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

صفات مورفولوژیکی مانند نسبت ریشه به اندام هوایی (R/S) و نسبت ارتفاع اندام هوایی به طول ریشه (SH/RL) از شاخص های کلیدی در ارزیابی پاسخ گیاهان به شرایط محیطی، به ویژه تنش کم آبی محسوب می شوند. این شاخص ها بیانگر الگوی تخصیص منابع گیاه به اندام های زیرزمینی و هوایی هستند و نقش مهمی در تعیین کارایی جذب آب، فتوسنتز، و تحمل به تنش دارند (Comas et al., 2013; Lynch, 2011). نسبت R/S معمولاً در شرایط تنش کم آبی افزایش می یابد. زیرا گیاه با تخصیص بیش تر زیست توده به ریشه، سعی در افزایش سطح جذب آب و مواد غذایی دارد. با این حال، افزایش بیش از حد این نسبت ممکن است به کاهش رشد اندام هوایی و عملکرد اقتصادی منجر شود. از سوی دیگر، نسبت SH/RL شاخصی برای سنجش تعادل بین توسعه عمودی اندام هوایی و گسترش ریشه است. کاهش این نسبت در شرایط کم آبی معمولاً نشان دهنده تمرکز گیاه بر توسعه ریشه و کاهش رشد اندام هوایی است (Mathew et al., 2019). در آزمایش حاضر، مصرف ۲ میلی گرم بر کیلوگرم روی از طریق خاک و فسفر به صورت بذرمال موجب افزایش معنی دار هر دو نسبت R/S و SH/RL در گیاهان گندم تحت تنش کم آبی شد (جدول ۵ و ۶). این یافته حاکی از آن است که تغذیه هدفمند با عناصر کلیدی می تواند الگوی تخصیص زیست توده را به نحوی تنظیم کند که هم توسعه ریشه و هم رشد اندام هوایی به طور همزمان بهبود یابد. طول ریشه ویژه (SRL) یکی از صفات مهم مورفولوژیکی ریشه است و بیانگر ظرفیت، کارایی و ظرفیت اکتشافی سیستم ریشه در واحد جرم می باشد (Ostonen et al., 2007). این شاخص نشان می دهد که گیاه تا چه حد توانسته با صرف کم ترین زیست توده، بیش ترین گسترش ریشه را در خاک ایجاد کند. بنابراین SRL به عنوان شاخصی برای ارزیابی کارایی جذب آب و عناصر غذایی، به ویژه در شرایط تنش کم آبی، کاربرد گسترده ای دارد (Freschet et al., 2021). در شرایط کم آبی، افزایش SRL معمولاً به عنوان یک پاسخ سازگاری گیاه تلقی می شود که با تولید ریشه های نازک تر و بلندتر، سطح تماس با خاک را افزایش داده و توانایی جذب منابع محدود را بهبود می بخشد. با این حال، پاسخ SRL به تنش کم آبی و تغذیه گیاه می تواند بسته به ژنوتیپ و نوع تیمار متفاوت باشد. در پژوهش حاضر، مصرف فسفر و روی از طریق خاک و بذرمال روی موجب افزایش معنی دار SRL در رقم حیدری به تحت تنش کم آبی شد (جدول ۶). با توجه به این که رقم حیدری مقاوم به کم آبی است، این افزایش احتمالاً ناشی از تحریک رشد ریشه های جانبی و نازک تر توسط فسفر و روی بوده که با بهبود متابولیسم انرژی، سنتز آنزیم ها و توسعه سلولی همراه است (Lynch, 2011; Broadley et al., 2007). فسفر با ایفای نقش در تولید ATP و توسعه ریشه های جوان، و روی با تأثیر بر فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی و تنظیم هورمون های رشد، توانسته اند ظرفیت اکتشافی ریشه را در واحد جرم افزایش دهند. اما در رقم تجن که حساس به کم آبی است، نتایج نشان داد مصرف فسفر از طریق خاک موجب کاهش SRL شده است (جدول ۶). این کاهش ممکن است ناشی از تحریک رشد ریشه های ضخیم تر و سنگین تر در این رقم باشد که با افزایش وزن خشک ریشه، نسبت طول به وزن کاهش یافته است. چنین پاسخی می تواند بیانگر تفاوت های ژنتیکی در نحوه تخصیص منابع به ساختار ریشه باشد، به طوری که برخی ژنوتیپ ها در پاسخ به فسفر، به جای توسعه ریشه های نازک، به تولید ریشه های ذخیره ای و ساختاری تمایل دارند (Comas et al., 2013).

نسبت وزن ریزوشیت RMR یکی از صفات مهم در مطالعات ریشه شناسی و فیزیولوژی گیاهان است که به صورت نسبت وزن ریزوشیت به وزن خشک ریشه تعریف می شود. این شاخص بیانگر توانایی گیاه در ایجاد و حفظ تعاملات فیزیکی و بیولوژیکی بین ریشه و خاک اطراف آن است و نقش مهمی در جذب آب، تثبیت ریشه، و افزایش تحمل به تنش های محیطی ایفا می کند (Delhaize et al., 2012). ریزوشیت به عنوان ناحیه ای فعال در اطراف ریشه، تحت تأثیر ترشحات ریشه ای، فعالیت میکروبی و ویژگی های فیزیکی خاک شکل می گیرد. افزایش RMR معمولاً با افزایش ترشحات ریشه ای، توسعه مویریشه ها، و فعالیت میکروبی همراه است که در شرایط تنش کم آبی می تواند به حفظ رطوبت موضعی و ارتقاء جذب عناصر غذایی کمک کند (Addesso et al., 2023). در مطالعه حاضر، مصرف ۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم فسفر و ۲ میلی گرم بر کیلوگرم روی از طریق خاک موجب افزایش معنی دار RMR در رقم مقاوم گندم (حیدری) تحت تنش کم آبی شد (جدول ۶). در حالی که در رقم حساس (تجن)، همین تیمار موجب کاهش RMR گردید. افزایش RMR در رقم مقاوم

نشان‌دهنده توانایی این ژنوتیپ در تحریک ترشحات ریشه‌ای و توسعه مویریشه‌ها در پاسخ به تغذیه فسفر و روی است. فسفر با نقش در متابولیسم انرژی و توسعه سلولی، و روی با تأثیر بر سنتز هورمون‌های رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، موجب افزایش تعامل ریشه با خاک و تشکیل ریزوشیت فعال‌تر شده‌اند (Lynch, 2011; Broadley et al., 2007). در مقابل، کاهش RMR در رقم حساس ممکن است ناشی از ضعف در پاسخ‌گویی فیزیولوژیکی به تیمارهای تغذیه‌ای باشد. اما نکته قابل توجه آن است که به طور کلی، مقدار ریزوشیت تشکیل شده در رقم حساس تجن بیش‌تر از رقم مقاوم به کم‌آبی حیدری است (شکل ۳). بنابراین کاهش RMR در رقم حساس به کم‌آبی تجن با توجه به نحوه محاسبه آن (رابطه ۵) و نقش وزن خشک ریشه قابل توجیه است، چرا که نه تنها مقدار ریزوشیت تشکیل شده در این رقم بیش‌تر از رقم حیدری است، بلکه رقم تجن وزن خشک ریشه بیش‌تری نیز نسبت به رقم حیدری در شرایط تنش در اغلب تیمارهای تغذیه‌ای تولید کرده است (شکل ۲ و ۳). چنین پاسخی می‌تواند بیانگر تفاوت‌های ژنتیکی در راهبردهای سازگاری با کم‌آبی باشد. بنابراین، تفاوت در رفتار RMR بین دو رقم نشان‌دهنده نقش کلیدی این صفت در تحمل به خشکی و کارایی جذب منابع است. افزایش RMR در رقم مقاوم می‌تواند به عنوان شاخصی برای غربال‌گری ژنوتیپ‌های برتر در شرایط کم‌آبی مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تعیین نقش کاربرد فسفر و روی در افزایش تحمل دو رقم گندم به تنش کم‌آبی انجام شد. بروز تنش خشکی اثر منفی بر صفات مورفولوژیکی و عملکردی هر دو رقم گندم گذاشت. به طور کلی، نتایج نشان داد که مصرف فسفر و روی از طریق خاک و بر اساس نتایج آزمون خاک (به ترتیب ۱۲ و ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای فسفر و روی) همراه با بذرمال فسفر و روی، تأثیر مثبتی بر وزن خشک و ارتفاع اندام هوایی، وزن خشک و طول ریشه، مقدار RWC و زیست‌توده خشک کل گیاه می‌گذارد. اعمال تنش کم‌آبی همچنین سبب افزایش معنی‌دار تشکیل ریزوشیت در گیاهان تحت تنش کم‌آبی شد. مصرف روی از طریق خاک تأثیر قابل توجهی بر میزان ریزوشیت تشکیل شده در ارقام گندم تحت تنش داشت. بررسی نتایج صفات SBAR، نسبت R/S و نسبت SH/RL حاکی از آن است که مصرف فسفر و روی از خاک و به صورت بذرمال سبب بهبود تعادل در تخصیص منابع بین اندام‌های هوایی و زیرزمینی گیاهان تحت تنش شده است که می‌تواند نشان‌دهنده افزایش تحمل آن‌ها در برابر تنش کم‌آبی باشد. نتایج صفات SRL و RMR نیز مشخص کرد که تفاوت‌های ژنوتیپی نقش بسزایی در پاسخ گیاهان به شرایط کم‌آبی و تیمارهای تغذیه‌ای دارند. به طوری که مصرف فسفر و روی در رقم حیدری (مقاوم به کم‌آبی) نتایج بهتری از نظر رشد ریشه و عملکرد ریزوشیت نسبت به رقم تجن (حساس به کم‌آبی) ثبت کرد. در کل، نتایج نشان‌دهنده آن است که تأثیر مصرف توأم فسفر و روی بر افزایش تحمل گندم به کم‌آبی بهتر از مصرف تکی آن‌هاست. همچنین تأثیر مصرف این عناصر از طریق خاک بیش‌تر از مصرف آن‌ها به صورت بذرمال است. علاوه بر این، به نظر می‌رسد نقش روی در بهبود صفات عملکردی و مورفولوژیکی گندم و افزایش مقاومت آن به کم‌آبی پررنگ‌تر از نقش فسفر باشد.

اگرچه نتایج حاصل شده در مطالعه حاضر دیدگاه نسبتاً مطلوبی از نقش کاربرد فسفر و روی در افزایش تحمل گندم به تنش کم‌آبی ارائه داد، اما بررسی دقیق‌تر وضعیت ریشه، مخصوصاً صفات مرتبط با قطر و طول مویریشه‌ها، وضعیت ترشح موسیلاژ و فعالیت میکروبی سطح ریشه متأثر از تیمارهای تغذیه‌ای اعمال شده در پژوهش حاضر و نقش آن‌ها بر تشکیل ریزوشیت، نیازمند انجام تحقیقات بیش‌تر با استفاده از تجهیزات و روش‌های پیشرفته مثل عکس‌برداری با کمک رادیو ایزوتوپ‌ها و ... است. علاوه بر این، بهره‌گیری از مواد مختلف مانند هورمون‌ها، اسمولیت‌ها، عناصر غذایی، اسیدهای آلی و ... برای پوشش‌دهی بذور نیز می‌تواند منجر به دستیابی به نتایج امیدبخش در افزایش تحمل گندم به شرایط کم‌آبی شود.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- محمدجانی، اسماعیل. یزدانیان، نازنین. (۲۰۱۴). تحلیل وضعیت بحران آب در کشور و الزامات مدیریتی آن. نشریه روند، ۲۱ (۶۵ و ۶۶)، ۱۱۷-۱۴۴. به فارسی.
- مشیری، فرهاد، خادمی، زهرا، سعادت، سعید، رشیدی، ناصر، و شهابی علی‌اصغر. (۲۰۱۴). راهنمای مدیریت یکپارچه حاصلخیزی خاک و تغذیه گندم. نشریه مؤسسه تحقیقات خاک و آب. به فارسی.

REFERENCES

- Addesso, R., Sofo, A., & Amato, M. (2023). Rhizosheath: roles, formation processes and investigation



- methods. *Soil Systems*, 7(4), 106. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040106>
- 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>
- Ahmed, M., Khan, S., Irfan, M., Aslam, M. A., Shabbir, G., Ahmad, S., & Adnan, M. (2018). Effect of phosphorus on root signaling of wheat under different water regimes. In *Global Wheat Production* (pp. 1-29). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75806>
- Allison, L. E., & Moodie, C. D. (1965). Carbonate. In *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 1379-1396. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c40>
- Asghar, M. G., & Bashir, A. (2020). Protagonist of mineral nutrients in drought stress tolerance of field crops. In *Abiotic Stress in Plants*. IntechOpen <https://doi.org/10.5772/intechopen.94135>
- Basirat, M., Mousavi, S. M., Abbaszadeh, S., Ebrahimi, M., & Zarebanadkouki, M. (2019). The rhizosheath: a potential root trait helping plants to tolerate drought stress. *Plant and Soil*, 445(1), 565-575. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04334-0>
- Bechtaoui, N., Rabiou, M. K., Raklami, A., Oufdou, K., Hafidi, M., & Jemo, M. (2021). Phosphate-dependent regulation of growth and stresses management in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 679916. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.679916>
- Begum, N., Ahanger, M. A., & Zhang, L. (2020). AMF inoculation and phosphorus supplementation alleviates drought induced growth and photosynthetic decline in *Nicotiana tabacum* by up-regulating antioxidant metabolism and osmolyte accumulation. *Environmental and Experimental Botany*, 176, 104088. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104088>
- Blum, A. (2011). *Plant breeding for water-limited environments*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7491-4>
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Bremner, J. M. (1965). Total nitrogen. In *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 1149-1178. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c32>
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New phytologist*, 173(4), 677-702. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification?. *Plant and soil*, 302(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>
- Chapman, H. D. (1965). Cation-exchange capacity. In *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*, 9, 891-901. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c6>
- Cheraghi, M., Moteszarezhadeh, B., Mousavi, S. M., Basirat, M., Alikhani, H. A., & Zarebanadkouki, M. (2024). Application of silicon improves rhizosheath formation, morpho-physiological and biochemical responses of wheat under drought stress. *Plant and Soil*, 503(1), 263-281. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06584-z>
- Cheraghi, M., Motesharezhadeh, B., Mousavi, S. M., Ma, Q., & Ahmadabadi, Z. (2023b). Silicon (Si): a regulator nutrient for optimum growth of wheat under salinity and drought stresses-a review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(9), 5354-5378. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-10959-4>
- Cheraghi, M., Motesharezhadeh, B., Mousavi, S.M., Basirat, M., & Alikhani, H.A. (2025). Phosphorus bioavailability and silicon fractionation in wheat rhizosphere affected by soil water content and silicon application. *Rhizosphere*, 33, p.101017.
- Cheraghi, M., Mousavi, S. M., & Zarebanadkouki, M. (2023a). Functions of rhizosheath on facilitating the uptake of water and nutrients under drought stress: A review. *Plant and Soil*, 491(1), 239-263. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06126-z>
- Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in plant science*, 4, 442. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442>
- Delhaize, E., James, R. A., & Ryan, P. R. (2012). Aluminium tolerance of root hairs underlies genotypic differences in rhizosheath size of wheat (*Triticum aestivum*) grown on acid soil. *New Phytologist*, 195(3), 609-619. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04183.x>
- Ding, Z., Kheir, A. M., Ali, M. G., Ali, O. A., Abdelaal, A. I., Lin, X. E., ... & He, Z. (2020). The integrated effect of salinity, organic amendments, phosphorus fertilizers, and deficit irrigation on soil properties, phosphorus fractionation and wheat productivity. *Scientific Reports*, 10(1), 2736. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59650-8>
- Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical reviews in plant sciences*, 33(4), 331-349. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291>

- Fatemi, H., Zaghdoud, C., Nortes, P. A., Carvajal, M., & Martínez-Ballesta, M. D. C. (2020). Differential aquaporin response to distinct effects of two Zn concentrations after foliar application in pak choi (*Brassica rapa* L.) plants. *Agronomy*, 10(3), 450. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030450>
- Freschet, G. T., Roumet, C., Comas, L. H., Weemstra, M., Bengough, A. G., Rewald, B., ... & Stokes, A. (2021). Root traits as drivers of plant and ecosystem functioning: current understanding, pitfalls and future research needs. *New Phytologist*, 232(3), 1123-1158. <https://doi.org/10.1111/nph.17072>
- Ghanem, H. E., Hamza, D. A., Zain El-Abdeen, A. A., Elbatrawy, W. S., & El-Habashy, H. M. (2025). Influence of zinc foliar spray on growth, some important physiological processes, yield and yield attributes of bread wheat under water stress. *Scientific Reports*, 15(1), 14943. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94728-1>
- Hansel, F. D., Amado, T. J., Ruiz Diaz, D. A., Rosso, L. H., Nicoloso, F. T., & Schorr, M. (2017). Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. *Agronomy Journal*, 109(6), 2936-2944. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.04.0202>
- Hassan, M. U., Nawaz, M., Mahmood, A., Shah, A. A., Shah, A. N., Muhammad, F., ... & Qari, S. H. (2022). The role of zinc to mitigate heavy metals toxicity in crops. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 990223. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.990223>
- Iqbal, S., Farooq, M., Cheema, S. A., & Afzal, I. (2017). Boron seed priming improves the seedling emergence, growth, grain yield and grain biofortification of bread wheat. *International Journal of Agriculture & Biology*, 19(1). <https://doi.org/10.17957/ijab/15.0261>
- Jan, A. L., Amanullah, Mihoub, A., Fawad, M., Saeed, M. F., Khan, I., ... & Jamal, A. (2024). Enhancing wheat performance through phosphorus and zinc management strategies under varied irrigation regimes. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05235-8>
- Karim, M. R., Zhang, Y. Q., Zhao, R. R., Chen, X. P., Zhang, F. S., & Zou, C. Q. (2012). Alleviation of drought stress in winter wheat by late foliar application of zinc, boron, and manganese. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(1), 142-151. <https://doi.org/10.1002/jpln.201100141>
- Khan, R., Gul, S., Hamayun, M., Shah, M., Sayyed, A., Ismail, H., & Gul, H. (2016). Effect of foliar application of zinc and manganese on growth and some biochemical constituents of *Brassica juncea* grown under water stress. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 16, 984-997. DOI: 10.5829/idosi.ajeaes.2016.16.5.12923
- Kheirizadeh Arough, Y., Seyed Sharifi, R., & Seyed Sharifi, R. (2016). Bio fertilizers and zinc effects on some physiological parameters of triticale under water-limitation condition. *Journal of Plant Interactions*, 11(1), 167-177. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1262914>
- Kramer, P. J., & Boyer, J. S. (1995). *Water relations of plants and soils*. Academic press.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Liu, G., Ma, M., Wang, Z., Li, Q., Liu, F., Sun, Y., ... & Liu, C. (2025). Root transcriptome of wheat genotypes under zinc sufficient and deficiency conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 44(5), 2200-2212. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11538-x>
- Lynch, J. P. (2011). Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. *Plant physiology*, 156(3), 1041-1049. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175414>
- Mathew, I., Shimelis, H., Mutema, M., Clulow, A., Zengeni, R., Mbava, N., & Chaplot, V. (2019). Selection of wheat genotypes for biomass allocation to improve drought tolerance and carbon sequestration into soils. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205(4), 385-400. <https://doi.org/10.1111/jac.12332>
- Mohammadjani, E. & Yazdani, N. (2014). Analysis of the Water Crisis Situation in the Country and its Management Requirements. *Trend Quarterly*, 21(65 & 66), 117-144. In Persian.
- Moshiri, F., Khademi, Z., Saadat, S., Rashidi, N., & Shahabi, AliAsghar. (2014). Guidelines for Integrated Management of Soil Fertility and Wheat Nutrition. Soil and Water Research Institute. In Persian.
- Mousavi, S. M., & Tohidtalab, P. (2025). Potential roles of biochar on nutrient supplies to plants. In *Biochar Revolution* (pp. 117-134). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73154-9_7
- Mousavi, S. M., Tadayon, M. S., & Far, J. S. (2025a). Integrated application of foliar biostimulants and biofertilizers improves wheat resilience, nutrient uptake, and yield under deficit irrigation in semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 322, 109958. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109958>
- Mousavi, S. M., Tohidtalab, P., & Abolfathi, P. (2024). The importance and necessity to consider cadmium (Cd) as a problematic element in soil fertility and plant nutrition. In *Plant Responses to Cadmium Toxicity: Insights into Physiology and Defense Mechanisms* (pp. 43-88). Nature Switzerland, Springer,



- Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73266-9_2
- Mousavi, S. M., Tohidtalab, P., & Sedaghat, A. (2025b). Optimal management of plant nutrition in arid and semiarid regions for sustainable agriculture. In *Sustainable Agriculture under Drought Stress* (pp. 287-314). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23956-4.00019-3>
- Mumtaz, M. Z., Aslam, M., Jamil, M., & Ahmad, M. (2014). Effect of different phosphorus levels on growth and yield of wheat under water stress conditions. *Journal of Environment and Earth Science*, 4(19), 23-30.
- Olsen, S. R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (No. 939). US Department of Agriculture.
- Ostonen, I., Püttsepp, Ü., Biel, C., Alberton, O., Bakker, M. R., Löhmus, K., ... & Brunner, I. (2007). Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems*, 141(3), 426-442. <https://doi.org/10.1080/11263500701626069>
- Pandya, P., Kumar, S., Sakure, A. A., Rafaliya, R., & Patil, G. B. (2023). Zinc oxide nanopriming elevates wheat drought tolerance by inducing stress-responsive genes and physio-biochemical changes. *Current Plant Biology*, 35, 100292. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2023.100292>
- Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New phytologist*, 193(1), 30-50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- Pratt, P. F. (1965). Potassium. In *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 1022-1030. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c20>
- Rehman, A., Farooq, M., Ozturk, L., Asif, M., & Siddique, K. H. (2018). Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. *Plant and Soil*, 422(1), 283-315. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3507-3>
- Richards, L. A. (1949). Methods of measuring soil moisture tension. *Soil science*, 68(1), 95. <https://doi.org/10.1097/00010694-194907000-00008>
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (No. 60). US Government Printing Office. <https://doi.org/10.1093/aibsbulletin/4.3.14-a>
- Sacristán, D., González-Guzmán, A., Barrón, V., Torrent, J., & Del Campillo, M. C. (2019). Phosphorus-induced zinc deficiency in wheat pot-grown on noncalcareous and calcareous soils of different properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(2), 208-223. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1492714>
- Sakya, A. T., Sulistyaningsih, E., Purwanto, B. H., & Indradewa, D. (2021). Application ZnSO₄ on tomato growth under drought stress conditions. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 637, No. 1, p. 012077). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/637/1/012077>
- Salem, E. (2021). Effect of ascorbic acid and zinc on the productivity of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under saline stress conditions. *Egyptian Journal of Agronomy*, 43(1), 45-54. <https://doi.org/10.21608/agro.2021.51398.1240>
- Sangakkara, U. R., Frehner, M., & Nösberger, J. (2000). Effect of soil moisture and potassium fertilizer on shoot water potential, photosynthesis and partitioning of carbon in mungbean and cowpea. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 185(3), 201-207. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2000.00422.x>
- Sebhatleab, M., Gebresamuel, G., Girmay, G., Tsehaye, Y., & Haile, M. (2025). Effect of phosphorus and zinc fertilization on yield and nutrient use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.) in Tigray highlands of Northern Ethiopia. *Crops*, 5(3), 32. <https://doi.org/10.3390/crops5030032>
- Tadayon, M. S., Mousavi, S. M., Hosseini, S. M., & Sadeghi, S. (2025). Integrated nutrient management and deficit irrigation: Enhancing wheat resilience and productivity under drought stress. *Agronomy Journal*, 117(6), e70231. <https://doi.org/10.1002/agj2.70231>
- Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O. A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., ... & Zhang, A. (2018). Phosphorous fertilization alleviates drought effects on *Alnus cremastogyne* by regulating its antioxidant and osmotic potential. *Scientific reports*, 8(1), 5644. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24038-2>
- Umair Hassan, M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., ... & Guoqin, H. (2020). The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*, 10(9), 396. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090396>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Weatherley, P. (1950). Studies in the water relations of the cotton plant. I. The field measurement of water deficits in leaves. *New Phytologist*, 81-97. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1950.tb05146.x>
- Weisany, W., Mohammadi, M., Tahir, N. A. R., Aslanian, N., & Omer, D. A. (2021). Changes in growth and

- nutrient status of maize (*Zea mays* L.) in response to two zinc sources under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(4), 3367-3377. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00612-y>
- Zhang, L., Yan, M., Ren, Y., Chen, Y., & Zhang, S. (2021). Zinc regulates the hydraulic response of maize root under water stress conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 159, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.12.014>
- Zhang, X., Li, C., Lu, W., Wang, X., Ma, B., Fu, K., ... & Li, C. (2022). Comparative analysis of combined phosphorus and drought stress-responses in two winter wheat. *PeerJ*, 10, e13887. <https://doi.org/10.7717/peerj.13887>