Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Crop Breeding Vol. 18, Issue 2, 2026 p: 129-145

OPEN ACCESS

Research Paper

The Effect of Soil Zinc Deficiency on Morphological Responses, Enzymatic Activity, and Amino Acid Changes in Zn-Efficient and Zn-Inefficient Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars

Samaneh Yari Kamelabad[1] and Babak Abdollahi Mandoulakani[2]

1– Ph.D Student of Genetics and Plant Breeding, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, (Corresponding author: b.abdollahi@urmia.ac.ir)

Received: 01 November, 2025 Revised: 03 February, 2026 Accepted: 05 March, 2026

Extended Abstract

Background: Bread wheat (*Triticum aestivum* L.), as one of the most important cereal crops worldwide, plays a fundamental role in providing both protein and calories for humans. However, the deficiency of micronutrients, particularly zinc (Zn), is recognized as one of the most serious challenges in wheat production and grain quality. Zinc functions as a cofactor for numerous enzymes and has a pivotal role in many essential biological processes, including photosynthesis, nitrogen metabolism, protein synthesis, and regulation of oxidative balance. Zn deficiency not only reduces crop yield but also limits the nutritional value of wheat grains, which adds to its importance from the perspective of human health and global food security. In this context, the exploitation of wheat genotypes with higher efficiency in zinc uptake and utilization can be considered a sustainable strategy to mitigate these limitations. Therefore, the present study was conducted to investigate the effects of soil Zn deficiency on morphophysiological traits, enzyme activities, and amino acid compositions in wheat genotypes with contrasting zinc efficiency to identify the underlying mechanisms of their differences and provide a basis for selecting efficient genotypes to be used in breeding programs.

Methods: This study was conducted using a factorial design in a completely randomized layout with three replications in the greenhouse of the Faculty of Agriculture, Urmia University, in autumn and winter 2023–2024. Factors included two zinc levels (no zinc application and 5 mg Zn kg^{-1} soil from zinc sulfate), seven wheat cultivars (Niknejad, Kavir, Amin, Setareh, Owj, Sarang, and Farin), and three sampling stages (vegetative, reproductive, and grain-filling). The measured traits included plant height, stem diameter, awn length, root length and volume, root fresh and dry weight, spike length and diameter, grains per spike, total number of spikes, total spike weight, thousand-grain weight, and final grain yield. The shoot zinc efficiency index was calculated to identify Zn-efficient and Zn-inefficient cultivars. Additionally, zinc concentrations in roots, leaves, and grains, copper concentration in grain, activities of superoxide dismutase (SOD) and alkaline phosphatase(ALP), and concentrations of essential (lysine, threonine, leucine, and isoleucine) and non-essential (aspartic acid, asparagine, arginine, glycine, and tyrosine) amino acids were determined in both efficient and inefficient genotypes. Data were analyzed using SAS software, and means were compared with Duncan's multiple range test.

Results: Based on the shoot zinc efficiency index, Niknejad was identified as the most Zn-efficient, while Farin was classified as the least Zn-inefficient. Analysis of variance showed that Zn deficiency significantly affected most traits at the 1% probability level. Root length and weight, spike length, grains per spike, and yield of Farin were severely reduced under Zn deficiency, whereas Niknejad maintained its growth potential. Zinc concentrations in roots and grains of Niknejad under stress were significantly higher than those in Farin, whereas differences in shoot zinc levels were less pronounced. Grain copper concentration declined more sharply in the inefficient cultivars compared to the efficient ones. Enzyme activity analysis revealed that Zn deficiency decreased SOD activity in both cultivars, but Niknejad maintained significantly higher activity. The activity of alkaline phosphatase increased in the leaves of Niknejad under Zn deficiency, while no significant changes were observed in the roots of the cultivars. Amino acid analysis showed a reduction in both essential (lysine, threonine, leucine, and isoleucine) and non-essential (aspartic acid, arginine, glycine, and tyrosine) amino acids under Zn deficiency. For example, lysine and threonine concentrations in Niknejad under Zn

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

Copyright ©2026. Yari Kamelabad and Abdollahi Mandoulakani. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

sufficiency conditions were 14.8 and 11.5 mg g^{-1}, respectively, which decreased to 9.7 and 9.5 mg g^{-1} under deficiency conditions.
Conclusion: The results showed the higher ability of the Niknejad cultivar (Zn-efficient) to adapt to Zn deficiency compared to the Farin cultivar (Zn-inefficient). The Niknejad cultivar was able to maintain root and spike growth, the number of grains per spike, and yield even under Zn deficiency conditions, while the Farin cultivar exhibited a significant reduction in these traits. Studying the activity of SOD and ALP enzymes in leaf and root indicated that the Zn-efficient cultivar, through increasing the activity of these enzymes, could sustain oxidative balance and improve Zn utilization, whereas the Zn-inefficient cultivar, under the influence of Zn deficiency, faced a reduction in enzyme activity. Furthermore, zinc concentration in the root and zinc and copper concentrations in the grain of the Zn-efficient cultivar were higher, demonstrating a higher efficiency in the uptake, translocation, and remobilization of nutrients in these cultivars. In addition, the study of amino acids revealed that zinc deficiency led to a reduction in the concentrations of both essential and non-essential amino acids in the grain of the Niknejad cultivar. In total, the findings of this research indicate that the selection of Zn-efficient cultivars can be an effective strategy for coping with Zn deficiency in soil. These cultivars, in addition to enhancing yield stability under Zn deficiency stress, also improve the nutritional quality of the grain and can be utilized as valuable genetic resources in breeding programs and in the development of new wheat cultivars.

Keywords: Alkaline phosphatase, Amino acid, Bread wheat, Micronutrients, Superoxide dismutase, Zinc efficiency

How to Cite This Article: Yari Kamelabad, S., & Abdollahi Mandoulakani, B. (2026). The Effect of Soil Zinc Deficiency on Morphological Responses, Enzymatic Activity, and Amino Acid Changes in Zn-Efficient and Zn-Inefficient Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars. *J Crop Breed,* 18(2), 129-145. DOI: 10.61882/jcb.2026.1630

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مقاله پژوهشی

تأثیر کمبود روی خاک بر پاسخ‌های مورفولوژیک، فعالیت آنزیمی و تغییرات اسیدهای آمینه در ارقام روی-کارا و روی-ناکارای گندم نان (*Triticum aestivum* L.)

سمانه یاری کامل آباد[1] و بابک عبدالهی مندولکانی[2]

۱- دانشجوی دکترای ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، (نویسنده مسوول: b.abdollahi@urmia.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۴
صفحه: ۱۲۹ تا ۱۴۵

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: گندم نان (*Triticum aestivum* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات جهان، نقش اساسی در تأمین پروتئین و کالری انسان دارد. کمبود عناصر کم‌مصرف به‌ویژه روی (Zn)، یکی از چالش‌های جدی در تولید و کیفیت گندم به‌شمار می‌رود. این عنصر به‌عنوان کوفاکتور بسیاری از آنزیم‌ها در فرآیندهای زیستی مهمی از جمله فتوسنتز، متابولیسم نیتروژن، سنتز پروتئین و تنظیم تعادل اکسیداتیو نقش دارد. کمبود روی علاوه بر کاهش عملکرد گیاه، ارزش تغذیه‌ای دانه را نیز کاهش می‌دهد که از دیدگاه سلامت انسانی اهمیت فراوانی دارد. در چنین شرایطی، استفاده از ژنوتیپ‌های گندم با کارایی بالا در جذب و استفاده از روی می‌تواند رویکردی پایدار برای مقابله با این محدودیت باشد. هدف این پژوهش، بررسی اثر کمبود روی خاک بر صفات مورفولوژیک، فعالیت آنزیمی و ترکیب اسیدهای آمینه در ارقام گندم با کارایی متفاوت در جذب و استفاده از روی بود تا امکان شناسایی ژنوتیپ‌های کارا برای به‌کارگیری در برنامه‌های به‌نژادی فراهم شود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه طی پاییز و زمستان سال ۱۴۰۲ اجرا شد. عوامل مورد مطالعه شامل دو سطح روی (عدم مصرف و مصرف پنج میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی)، هفت رقم گندم (نیک‌نژاد، کویر، امین، ستاره، اوج، سارنگ و فرین) و سه مرحله نمونه‌برداری (رویشی، زایشی و پرشدن دانه) بودند. در این پژوهش، صفات مورفولوژیک شامل ارتفاع بوته، قطر ساقه، طول ریشک، طول و حجم ریشه، وزن تر و خشک ریشه، طول و قطر سنبله، تعداد دانه در سنبله، تعداد کل سنبله‌ها، وزن کل سنبله‌ها، وزن هزار دانه و عملکرد نهایی اندازه‌گیری شدند. شاخص روی-کارایی جهت شناسایی ارقام روی-کارا و روی- ناکارا محاسبه شد. همچنین، صفات غلظت روی در ریشه، برگ و دانه، غلظت مس در دانه، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و آلکالین فسفاتاز و غلظت اسیدهای آمینه ضروری (لیزین، ترئونین، لوسین و ایزولوسین) و غیرضروری (آسپارتیک اسید، آسپاراژین، آرژنین، گلایسین و تیروزین) در ارقام روی-کارا و روی-ناکارا اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: بر اساس شاخص روی-کارایی در شاخساره، رقم نیک‌نژاد به‌عنوان روی-کارا و رقم فرین به‌عنوان روی-ناکارا شناسایی شدند. نتایج تجزیه واریانس نشان دادند که اثر کمبود روی بر اغلب صفات مورد بررسی در سطح یک درصد معنی‌دار بود. در شرایط کمبود روی، طول و وزن ریشه، طول سنبله، تعداد دانه در سنبله و عملکرد رقم فرین به‌شدت کاهش یافت، در حالی‌که رقم نیک‌نژاد توانست بخش عمده‌ای از ظرفیت رشدی خود را حفظ کند. غلظت روی در ریشه و دانه رقم نیک‌نژاد در شرایط تنش به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم فرین بود، هر چند که تفاوت غلظت روی در شاخساره کم‌تر مشهود بود. همچنین، غلظت مس دانه در رقم ناکارا نسبت به رقم کارا کاهش بیش‌تری نشان داد. بررسی فعالیت آنزیمی نشان داد که کمبود روی سبب کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در هر دو رقم شد، اما فعالیت این آنزیم در رقم نیک‌نژاد به‌طور قابل توجهی بالاتر بود. فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز در برگ رقم نیک‌نژاد تحت شرایط کمبود روی افزایش یافت، در حالی که تغییر معنی‌داری در ریشه مشاهده نشد. کمبود روی سبب کاهش غلظت اسیدهای آمینه ضروری (لیزین، ترئونین، لوسین و ایزولوسین) و غیرضروری (آسپارتیک اسید، آرژنین، گلایسین و تیروزین) در رقم نیک‌نژاد شد، به‌عنوان مثال، غلظت لیزین و ترئونین در شرایط روی کافی به‌ترتیب ۱۳/۷۶ و ۱۱/۵۵ میلی‌گرم بر گرم بود، که در شرایط کمبود به ۹/۷۶ و ۹/۵۲ میلی‌گرم بر گرم کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان دادند که رقم نیک‌نژاد (روی-کارا) توانایی بالاتری در سازگاری به کمبود روی نسبت به رقم فرین (روی- ناکارا) داشت. رقم نیک‌نژاد توانست رشد ریشه و سنبله، تعداد دانه در سنبله و عملکرد را حتی تحت شرایط کمبود روی حفظ کند، در حالی‌که رقم فرین کاهش معنی‌داری در این صفات نشان داد. فعالیت آنزیم‌های سوپر اکسید دیسموتاز و آلکالین فسفاتاز در برگ و ریشه رقم روی-کارا حفظ یا افزایش یافت که بیانگر توانایی بهتر در حفظ تعادل اکسیداتیو و بهبود استفاده از روی است، در حالی‌که رقم ناکارا کاهش فعالیت این آنزیم‌ها را نشان داد. همچنین، غلظت روی در ریشه و غلظت روی و مس در دانه رقم روی-کارا بالاتر بود و این نشان‌دهنده کارایی بالاتر جذب، انتقال و توزیع مجدد این عناصر غذایی در این ارقام است. همچنین، مطالعه اسیدهای آمینه نشان داد که کمبود روی موجب کاهش غلظت اسیدهای آمینه در دانه رقم نیک‌نژاد شد. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که انتخاب ارقام روی-کارا می‌تواند یک راهبرد مؤثر برای مقابله با کمبود روی در خاک باشد. این ارقام علاوه بر افزایش پایداری عملکرد در شرایط تنش کمبود روی، کیفیت تغذیه‌ای دانه را نیز بهبود می‌بخشند و می‌توانند به‌عنوان منابع ارزشمند ژنتیکی در برنامه‌های به نژادی و توسعه ارقام جدید گندم مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: آلکالین فسفاتاز، اسید آمینه، روی-کارایی، سوپراکسید دیسموتاز، عناصر کم‌مصرف، گندم نان

مقدمه

گندم نان (*Triticum aestivum* L.) به‌عنوان مهم‌ترین غله از خانواده متنوع و گسترده Poaceae، نقشی اساسی در تأمین امنیت غذایی جهان دارد و منبع اصلی تغذیه‌ای حدود ۴۰ درصد جمعیت جهان به‌شمار می‌رود (Khalid *et al.*, 2023; Singh *et al.*, 2023). بر اساس گزارش فائو، تولید سالانه گندم در جهان حدود ۸۰۶/۵ میلیون تن برآورد شده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ با افزایش جمعیت انسانی، تقاضای جهانی برای گندم بیش از ۷۰ درصد افزایش یابد (FAO, 2023; Vitale *et al.*, 2020). با وجود اهمیت راهبردی گندم، این محصول همانند سایر گیاهان زراعی در طول چرخه رشد خود با تنش‌های غیرزیستی متعددی مواجه است. از تنش‌های غیرزیستی می‌توان به کمبود عناصر کم‌مصرف نظیر روی (Zn) و آهن (Fe) در خاک اشاره کرد (Abdoli & Esfandiari, 2014; Rezaei Musa Dargh *et al.*, 2024). کمبود روی در خاک منجر به کاهش عملکرد

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

می‌شود (Aziz *et al*., 2017) و بر کیفیت تغذیه‌ای گیاهان زراعی تأثیر می‌گذارد (Cakmak & Kutman, 2018; Alipour Babadi *et al.,* 2025). از این‌رو افزایش غلظت روی و آهن در دانه گندم به‌عنوان یکی از اهداف اصلی برنامه‌های به‌نژادی و تغذیه‌ای در سطح جهانی مطرح شده است (Gupta *et al*., 2020).

کمبود روی یکی از شایع‌ترین اختلالات عناصر کم‌مصرف در گیاهان زراعی و همچنین یکی از مشکلات تغذیه‌ای انسان محسوب می‌شود که علاوه بر کاهش بهره‌وری کشاورزی، سلامت بیش از دو میلیارد نفر را در سراسر جهان تهدید می‌کند (Rudani *et al*., 2018; Singh *et al*., 2023). این کمبود بویژه در مناطقی که رژیم غذایی مبتنی بر غلات است، شیوع بیش‌تری دارد و می‌تواند منجر به اختلال در رشد، تضعیف سیستم ایمنی، نارسایی‌های عصبی و مشکلات یادگیری شود (Welch *et al*., 2001). محصولات دانه‌ای گندم یکی از مهم‌ترین منابع تأمین پروتئین در رژیم غذایی بخش وسیعی از جمعیت جهان محسوب می‌شوند. ارزش بیولوژیکی پروتئین موجود در این دانه‌ها به ترکیب و نسبت اسیدهای آمینه، بویژه اسیدهای آمینه ضروری بستگی دارد. اسیدهای آمینه به‌عنوان واحدهای سازنده پروتئین‌ها، نقشی کلیدی در تعیین کیفیت تغذیه‌ای دارد. از میان آن‌ها، اسیدهای آمینه ضروری به‌دلیل عدم توانایی بدن انسان در سنتز درون‌زا، باید به‌صورت مستقیم از طریق رژیم غذایی تأمین شوند (Sulek *et al*., 2023). در مقابل، اسیدهای آمینه غیرضروری قابلیت سنتز هم در بدن انسان و هم در گیاهان را دارا هستند (Tessari *et al*., 2016; Millward *et al*., 2008). شواهد پژوهشی نشان داده‌اند که کمبود روی علاوه بر کاهش عملکرد، کیفیت تغذیه‌ای دانه را از طریق محدود کردن سنتز پروتئین و تجمع اسیدهای آمینه کاهش می‌دهد (Hafeez *et al*., 2013; Castillo *et al*., 2018).

منشأ اصلی کمبود روی در محصولات زراعی، کشت آن‌ها در خاک‌های دارای فقر روی است (Sunithakumari *et al*., 2016). خاک‌هایی که میزان روی قابل استخراج آن‌ها (DTPA-Zn) کم‌تر از ۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد، به‌عنوان خاک‌های دارای کمبود روی شناخته می‌شوند (Alloway, 2009). مطالعات نشان می‌دهند که تقریباً نیمی از خاک‌های جهان دارای کمبود روی هستند (Mousavi *et al*., 2013) و بیش از نیمی از این خاک‌ها به کشت غلات اختصاص دارد (Younas *et al*., 2023). این کمبود به‌ویژه در خاک‌های آهکی با pH بالا، خاک‌های شنی و خاک‌های دارای فسفر زیاد رایج‌تر است (Hacisalihoglu & Kochian, 2003; Valipour & Alipour, 2023).

روی یک عنصر کم‌مصرف و غیر متحرک است که توسط گیاهان به شکل Zn^{+2} جذب می‌شود. این عنصر نقش مهمی در متابولیسم گیاهان دارد و به‌عنوان جزء مهم پروتئین‌ها و سایر مولکول‌های بزرگ هم به‌عنوان واحد ساختاری و هم به‌عنوان کوفاکتور کنترل کننده طیف وسیعی از آنزیم‌ها عمل می‌کند. روی در مقادیر کم و مناسب برای عملکرد طبیعی فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان ضروری است. این فرآیندها نقش مهمی در فعالیت فتوسنتزی گیاهان و تشکیل کربوهیدرات‌ها، سنتز پروتئین، تولید مثل و رشد بذر و محافظت از بیماری‌ها دارند (Tayyiba *et al*., 2021). بیش‌تر تغییرات فیزیولوژیکی ناشی از کمبود روی به اختلال در عملکرد طبیعی آنزیم‌ها مرتبط هستند (Hafeez *et al*., 2013). از جمله آنزیم‌هایی که روی در ساختار آن‌ها نقش دارد می‌توان به RNA پلیمراز[1]، آلکالین فسفاتاز[2]، الکل‌دهیدروژناز[3]، سوپراکسیددیسموتاز وابسته به مس–روی[4] و کربنیک انهیدراز[5] اشاره کرد (Li *et al*., 2013). سوپراکسید دیسموتاز و کربنیک انهیدراز دو آنزیم مهم حاوی روی در گیاهان هستند به‌طوری‌که آنزیم کربنیک انهیدراز ارتباط نزدیکی به فتوسنتز دارد و سوپراکسیددیسموتاز نقش مهمی‌در محافظت از گیاهان در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از گونه‌های اکسیژن واکنش گر (ROS)[6] ایفا می‌کند (Zeng *et al*., 2021). کمبود روی با کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز منجر به افزایش تولید ROS می‌شود (Hafeez *et al*., 2013; Hacisalihoglu *et al*., 2003). آنزیم آلکالین‌فسفاتاز که شاخص اصلی واکنش‌های خاک است، یون‌های آلی و فسفات را هیدرولیز و جدا می‌کند (Nannipieri *et al*., 2011). کمبود عناصر کم‌مصرف مانند روی و منیزیم یکی از دلایل مهم کاهش فعالیت آنزیم آلکالین‌فسفاتاز است، زیرا این دو عنصر کوفاکتور حیاتی مهم آنزیم هستند (Ray *et al*., 2017).

هرچند که روش‌های متداولی نظیر مصرف کودهای حاوی روی برای رفع مشکل کمبود روی به‌کار رفته‌اند، اما اغلب این روش‌ها کارایی و پایداری محدودی دارند (Bhardwaj *et al*., 2022). یکی از راهکارهای پایدارتر، برای مقابله با کمبود روی در تولید محصول، توسعه و بهره‌گیری از ژنوتیپ‌های گیاهی با کارایی بالا در جذب و استفاده از روی است (Roy *et al*., 2022). ژنوتیپ‌های گیاهی از نظر توانایی جذب روی از خاک و نیز استفاده درون سلولی از این عنصر تفاوت زیادی دارند (Hacisalihoglu, 2020). برخی ژنوتیپ‌ها قادرند حتی در شرایط کمبود روی رشد کنند و عملکرد خوبی داشته باشند که به این ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ‌های روی–کارا (ZE)[7] گفته می‌شود (Graham & Rengel, 1993). ارقام روی–کارا در مقایسه با ارقام روی–ناکارا (ZI)[8] در خاک‌های فقیر از روی بهتر رشد می‌کنند. این برتری از طریق استفاده کارآمدتر از روی، یعنی بهره‌وری استفاده از روی یا جذب بیش‌تر روی توسط ریشه ممکن می‌شود (Duffner *et al*., 2012). به‌عبارت دیگر، ژنوتیپ‌های روی–کارا توانایی جذب حداکثری عناصر کم‌مصرف را از طریق ریشه و انتقال مؤثر آن‌ها از ریشه به اندام‌های هوایی تحت شرایط کمبود را دارند (Khoshgoftarmanesh *et al*., 2010).

1- RNA polymerase
2- Alkaline phosphatase (ALP)
3- Alcohol dehydrogenase (ADH)
4- Cu/Zn-Superoxide dismutase (Cu/Zn-SOD)
5- Carbonic anhydrase
6- Reactive oxygen species (ROS)
7- Zn-efficient
8- Zn-inefficient

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

در پژوهشی روی ارقام روی–کارا و روی– ناکارای برنج، ارقام روی–کارا در شرایط کمبود روی با بهره‌وری بیش‌تر از این عنصر، زیست‌توده بالاتری نسبت به ارقام روی–ناکارا تولید کردند و همچنین فعالیت بالاتری از آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را نشان دادند (Kumar *et al*., 2025). در گندم نیز فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و آلکالین فسفاتاز در ارقام روی–کارا بیش‌تر از ارقام روی–ناکارا گزارش شده است (Niazkhani *et al*., 2019; Shakouri *et al*., 2022). علاوه بر این، در ذرت تحت شرایط کمبود طولانی‌مدت روی، وزن خشک ریشه و اندام هوایی در ارقام روی–کارا به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ارقام روی– ناکارا گزارش شده است (Xu *et al*., 2021).

علی‌رغم انجام مطالعات متعدد در زمینه اثر کمبود روی بر رشد، عملکرد و فعالیت آنزیمی گیاهان زراعی، مطالعات جامع در مورد تغییرات همزمان صفات مورفوفیزیولوژیک، فعالیت آنزیمی و ترکیب اسیدهای آمینه در ارقام مختلف گندم نان (روی–کارا و روی–ناکارا) محدود هستند. بنابر این، هدف از اجرای این پژوهش بررسی اثر کمبود روی بر عملکرد و اجزای عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک، فعالیت آنزیم‌های سوپر اکسید دیسموتاز و آلکالین فسفاتاز در ریشه و برگ طی مراحل زایشی و پرشدن دانه، و همچنین تعیین غلظت روی، مس و برخی اسیدهای آمینه ضروری و غیرضروری در دانه ارقام مختلف گندم نان بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه طی پاییز و زمستان سال ۱۴۰۲ به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عوامل موردمطالعه شامل کاربرد عنصر روی در دو سطح بدون مصرف روی (شرایط کمبود روی) و پنج میلی‌گرم روی در هر کیلوگرم خاک (شرایط روی کافی) از منبع سولفات روی ($ZnSO_4.7H_2O$)، و هفت رقم گندم شامل نیک‌نژاد، کویر، امین، ستاره، اوج، سارنگ و فرین (تهیه شده از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج) بودند. بافت مورد نمونه‌برداری شامل ریشه و برگ و نمونه‌برداری در سه مرحله رشدی، شامل رویشی (۲۸ روز بعد از جوانه‌زنی)، زایشی (۳۰درصد سنبله دهی) و پرشدن دانه (۱۲روز بعد از گرده‌افشانی) بودند.

خاک شنی مورد استفاده از منطقه انزل ارومیه (قالقاچی) تهیه شد و بعد از آزمایشات مقدماتی و اطمینان از فقر روی، ابتدا خاک با الک ۲ میلی‌متری غربال شد. سپس، پنج‌بار با آب معمولی و بعد از آن دوبار با آب دوبار تقطیر شسته شد. پس از آبشویی و هواخشک شدن خاک، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر شنی با استفاده از روش‌های استاندارد در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند (جدول ۱).

جدول ۱– خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک شنی مورد استفاده در مطالعه

Table 1. Chemical and physical properties of the sand soil used in the study

بافت Tex	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	آهک T.N.V	روی Zn	پتاسیم K	فسفر P	ازت کل N	کربن آلی OC	درصد اشباع SP	PH	شوری EC
	%				mg.kg-1			%				$mmoh.cm^{-1}$
S	94	2	4	1.5	0.062	n.d	n.d	0.04	45	22.5	6.9	0.9

جدول ۲– ترکیب محلول غذایی مورد استفاده در آزمایش

Table 2. The composition of the nutrient solution used in the experiment

مواد مورد استفاده Ingredients	غلظت محلول غذایی Concentration (gr. L^{-1})	مقدار محلول غذایی Amount (ml. kg^{-1})
$MnSO_4.H_2O$ / $Na_2MoO_4.2H_2O$ / $CuSO_4.5H_2O$ / $H3BO_3$	7.5 / 0.083/ 1.05/ 0.333	2
$CaCl_2.2H_2O$ / $MgSO_4.7H_2O$ / NH_4NO_3	147.016 /20.5/ 93	1
K_2SO_4 / KH_2PO_4	48.407 / 30.242	3
Fe – EDTA	41.66	2
$ZnSO_4.7H_2O$	13.14	1.67

مواد غذایی موردنیاز قبل از کشت به‌صورت محلول تهیه و با خاک به‌طور کامل مخلوط شدند (جدول۲). همچنین، به نیمی از گلدان‌ها (تیماری حاوی روی) عنصر روی به‌صورت سولفات روی ($ZnSO_4.7H_2O$) به‌میزان پنج میلی‌گرم در کیلوگرم خاک افزوده شد. بذور تهیه شده پیش از کشت به‌مدت سه دقیقه با اتانول ۷۰ درصد و سپس به‌مدت پنج دقیقه با آب اکسیژنه یک درصد ضدّعفونی و پس از شستشو با آب مقطر آماده کشت شدند. تعداد ۱۰ عدد بذر در داخل لوله‌های پلی‌اتیلن به ارتفاع ۳۴ و قطر ۱۱ سانتی‌متر حاوی چهار کیلوگرم خاک شنی کشت شدند. ۱۰ روز پس از جوانه‌زنی، تعداد گیاهان در هر گلدان به هفت عدد کاهش داده شد. آبیاری بر اساس ظرفیت زراعی با استفاده از آب دو بار تقطیر انجام گرفت و برای تأمین نیتروژن مورد نیاز، محلول نیترات آمونیوم هر ۲ هفته یک بار همراه آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه گردید.

پس از نمونه‌برداری از ریشه در سه مرحله رشدی شامل رویشی (۲۸روز پس جوانه‌زنی)، زایشی (۳۰ درصد سنبله‌دهی) و پرشدن دانه (۱۲ روز پس از گرده‌افشانی) انجام گرفت. نمونه‌ها به دو بخش تقسیم شدند. بخش اول شامل چهار بوته بود که جهت اندازه‌گیری وزن تر و خشک در سه مرحله و همچنین طول و حجم ریشه و غلظت روی ریشه در مرحله پرشدن دانه به آزمایشگاه منتقل گردیدند. بخش دوم شامل سه بوته بود که جهت سنجش فعالیت آنزیم‌ها در دو مرحله زایشی و پرشدن دانه بلافاصله در ازت مایع منجمد و در یخچال ۸۰– درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌برداری از برگ پرچم در دو مرحله زایشی و پرشدن دانه جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها انجام شد و نمونه‌ها به یخچال ۸۰– منتقل شدند. همچنین، نمونه‌برداری از شاخساره (برگ) در مرحله پرشدن دانه جهت اندازه‌گیری غلظت روی و نمونه برداری از دانه‌ها پس از رسیدگی کامل جهت اندازه‌گیری

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

غلظت عناصر کم‌مصرف روی و مس و نیز مقادیر اسیدهای آمینه ضروری و غیرضروری انجام گرفت.

پس از جداسازی بخش‌های هوایی گیاه (چهاربوته)، ریشه‌ها شسته و به آزمایشگاه منتقل شدند. وزن تر ریشه‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری گردید (Akhavan *et al*., 2010). سپس، نمونه‌ها در پاکت‌های کاغذی قرار گرفتند و پس از خشک شدن به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۸ درجه سانتی‌گراد در آون، وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. طول ریشه در مرحله پرشدن دانه پس از شناورسازی در آب توسط خط‌کش اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری حجم ریشه با استفاده از روش غلامی و همکاران (Gholami *et al*., 2023) در مرحله پرشدن دانه اندازه‌گیری شد.

برای انتخاب ارقام روی-کارا و روی-ناکارا، شاخص روی-کارایی (Cakmak *et al*., 1997) با تقسیم عملکرد ماده خشک اندام هوایی در شرایط کمبود روی بر عملکرد ماده خشک اندام هوایی در شرایط روی کافی برای هرکدام از ارقام محاسبه شد (جدول ۳).

غلظت روی ریشه و شاخساره در مرحله پرشدن دانه برای ارقام روی-کارا و روی-ناکارا پس از خشک شدن نمونه‌ها در آون اندازه‌گیری شد. غلظت عناصر روی و مس دانه پس از رسیدگی فیزیولوژیک دانه، ازطریق سوزاندن خشک در کوره الکتریکی و قرائت عصاره استخراجی با دستگاه جذب اتمی (مدل SHIMADZU AA-6300) تعیین شد (Niazkhani *et al*., 2021).

صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک

در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی دانه، صفات ارتفاع بوته، طول ریشک و طول سنبله با استفاده از خط‌کش و صفات قطر سنبله و قطر ساقه با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شدند. تعداد کل سنبله‌ها و وزن کل سنبله‌ها در یک واحد آزمایشی شامل هفت بوته یادداشت‌برداری گردید. برای اندازه‌گیری تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه، تعداد ۱۰ سنبله انتخاب و وزن ۲۰۰ عدد دانه توسط ترازوی دیجیتالی با حساسیت ۰/۰۰۱ گرم تعیین و عدد حاصل در عدد پنج ضرب شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها

برای سنجش فعالیت آنزیم‌ها، نمونه‌های برگ‌پرچم و ریشه در دو مرحله زایشی و پرشدن دانه از ارقام روی-کارا و روی-ناکارا جمع‌آوری شدند. عصاره آنزیمی بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد تهیه گردید. فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با روش بیچامپ و فریدوویچ (Beauchamp & Fridovich, 1971) و فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز با استفاده از کیت تجاری (پارسی آمازون، ایران) و دستگاه اتوآنالایزر (bt500, Farasamed, Italy) طبق دستورالعمل شرکت سازنده تعیین شد.

اسیدهای آمینه

غلظت اسیدهای آمینه ضروری (لیزین، ترئونین، لوسین و ایزولوسین) و غیرضروری (آسپارتیک اسید، آسپاراژین، آرژنین، گلایسین و تیروزین) با استفاده از روش مشتق‌سازی OPA (o-phthalaldehyde) اندازه‌گیری شد (Jones, 1986). به این منظور، ابتدا آرد حاصل از دانه‌های ارقام روی-کارا و روی-ناکارا با استفاده از دستگاه (MILESTONE ETHOS UP) تحت فرآیند هیدرولیز قرار گرفت. سپس، نمونه‌ها با بهره‌گیری از کیت آماده‌سازی نمونه (بهان تشخیص آزما، ایران) مشتق‌سازی و به دستگاه HPLC تزریق شدند و کروماتوگرام مربوطه تهیه شد.

تجزیه داده‌ها

جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها ابتدا آزمون نرمال بودن داده‌ها و اشتباهات آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه۹/۴) انجام گرفت. سپس تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین تیمارها (به روش دانکن) نیز توسط این نرم‌افزار صورت گرفت.

نتایج و بحث

روی- کارایی ارقام

جهت انتخاب ارقام روی-کارا و روی- ناکارا، شاخص روی-کارایی (Cakmak *et al*., 1997) برای هریک از ارقام محاسبه شد (جدول ۳). بر اساس نتایج حاصل از این ارزیابی، ارقام نیک‌نژاد، ستاره، امین، اوج، سارنگ، کویر و فرین به‌ترتیب بیش‌ترین تا کم‌ترین روی-کارایی را نشان دادند. در این میان، رقم نیک‌نژاد با شاخص کارایی ۱/۱۴ به‌عنوان روی-کاراترین و رقم فرین با شاخص کارایی ۰/۷۸ به‌عنوان روی-ناکاراترین رقم شناسایی شدند. یافته‌های این پژوهش با نتایج گزارش‌شده توسط نیازخانی و همکاران (Niazkhani *et al*., 2019) و شکوری و همکاران (Shakouri *et al*., 2022) همخوانی دارند، به‌طوری‌که در هر دو مطالعه نیز رقم نیک‌نژاد به‌عنوان رقم روی-کارا معرفی گردید. این نتایج نشان می‌دهند که رقم نیک‌نژاد از پایداری و سازگاری بالایی در شرایط کمبود روی برخوردار است و می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی به‌عنوان یک رقم مناسب موردتوجه قرار گیرد.

جدول ۳- روی- کارایی ارقام مورد آزمایش

Table 3. Zn efficiency of the studied cultivars

	Cultivar						
	Niknejad	Setareh	Amin	Owj	Sarang	Kavir	Farin
Zn efficiency روی-کارایی	1.14	1.01	1.003	0.92	0.86	0.86	0.78

صفات مورفولوژیک وعملکردی

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان دادند که برهمکنش سطح روی در رقم در صفات ارتفاع بوته، طول ریشه، طول سنبله، وزن کل سنبله‌ها و عملکرد، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر اصلی رقم نیز بر تمامی صفات مورفولوژیکی به جز قطر سنبله، در سطح احتمال یک یا پنج درصد معنی‌دار بود. اثر اصلی سطح روی بر صفت حجم ریشه، طول ریشه و طول سنبله، در سطح احتمال یک یا پنج درصد معنی‌دار بود.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

نتایج به‌دست آمده از مقایسه میانگین برهمکنش سطح روی در رقم (جدول ۵) نشان دادند که کمبود روی تأثیر قابل‌توجهی بر صفت ارتفاع بوته در ارقام روی-کارا و روی-ناکارا نداشت. این موضوع بیانگر آن است که ویژگی ارتفاع بوته ممکن است کم‌تر از سایر صفات رشدی تحت تأثیر وضعیت تغذیه‌ای روی قرار گیرد و یا این‌که سازوکارهای جبرانی در گیاه موجب پایداری این صفت شوند. در همین راستا، شکوری و همکاران (Shakouri *et al*., 2022) در مطالعه دیگری بر روی ارقام گندم با روی-کارایی متفاوت نتایج مشابهی را گزارش دادند. نتایج مقایسه میانگین صفت طول ریشه در شرایط کمبود روی در هردو رقم روی-کارا (نیک‌نژاد) و روی-ناکارا (فرین) به‌طور معنی‌داری کم‌تر از شرایط روی‌کافی بودند (جدول ۵). این کاهش می‌تواند ناشی از اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک وابسته به روی باشد که در رشد سلول‌های ریشه نقش دارند. بر اساس گزارش کیمورا و همکاران (Kimura *et al*., 2023)، گیاهان در شرایط کمبود روی تغییرات مورفولوژیک و مولکولی متعددی در سیستم ریشه‌ای ایجاد می‌کنند. به‌طوری‌که کمبود روی در آرابیدوپسیس باعث کاهش رشد ریشه اصلی و در عین‌حال افزایش تراکم و طول ریشه‌های جانبی شد؛ این موضوع نشان‌دهنده سازوکارهای جبرانی گیاه برای بهره‌برداری بیش‌تر از خاک در شرایط محدودیت روی است. از سوی دیگر، کارایی بالاتر جذب روی در ژنوتیپ‌های روی-کارا به عواملی نظیر معماری مطلوب‌تر ریشه (ریشه‌های بلندتر و ظریف‌تر)، آزادسازی بیش‌تر فیتوسیدروفورها و توانایی بالاتر در جذب کمپلکس روی—فیتوسیدروفور نسبت داده شده است (Singh *et al*., 2005). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که گیاهان از طریق تغییر در معماری ریشه در واکنش به تنش‌های غیر زیستی واکنش نشان می‌دهند (Rahnama *et al.,* 2019, 2024). شواهد نشان دادند که در گندم نان، ژنوتیپ‌های روی-کارا ریشه‌های بلندتر و نازک‌تری داشتند (Rengel & Graham, 1995). در برنج نیز ژنوتیپ‌های روی-کارا روی بیش‌تری به ریشه‌ها تخصیص می‌دهند و در حفظ رشد ریشه طوقه در شرایط کمبود روی موفق‌تر هستند (Nanda *et al*., 2017). بنابر این، تفاوت در پاسخ ریشه به کمبود روی میان ژنوتیپ‌های مختلف می‌تواند یکی از سازوکارهای کلیدی تعیین‌کننده کارایی روی در گیاهان زراعی باشد.

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات مورفولوژیکی در ارقام گندم نان تحت شرایط کمبود روی و روی کافی

Table 4. Analysis of variance for morphological traits in bread wheat cultivars under Zn-deficiency and Zn-sufficiency conditions

میانگین مربعات (MS)							
SD	SL	RV	RL	SD	PH	Df	S.O.V منابع تغییرات
0.02^{ns}	2.14**	656.09**	337.16**	0.000005^{ns}	5.01^{ns}	1	Zn levels سطوح روی
0.01^{ns}	2.48**	115.82*	54.13**	0.004*	316.89**	6	Cultivar رقم
0.01^{ns}	0.49**	56.87^{ns}	41.16**	0.001^{ns}	10.26*	6	Cultivar×Zn روی × رقم
0.02	0.14	44.47	11.14	0.001	3.4	28	Error خطا
8.89	4.19	19.18	8.006	8.85	2.74	--	CV% ضریب تغییرات
Y	TGW	WTS	NSA	NGS	AL	Df	S.O.V منابع تغییرات
6.68**	57.51^{ns}	21.25**	1.16^{ns}	103.05**	0.001^{ns}	1	Zn levels سطوح روی
5.92**	228.85**	34.45**	10.2**	65.81**	4.63**	6	Cultivar رقم
6.22**	104.34^{ns}	14.92**	1.88^{ns}	9.33*	0.47^{ns}	6	Cultivar×Zn روی × رقم
0.79	42.90	1.5	1.59	3.46	0.24	28	Error خطا
6.47	15.93	5.95	12.48	4.13	7.41	--	CV% ضریب تغییرات

**، * و ns: به‌ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری.

**,* and ns: respectively, significant difference at the probability level of 0.01 and 0.05 and non-significant.

ارتفاع بوته: PH، قطر ساقه: SD، طول ریشه: RL، حجم ریشه: RV، طول سنبله: SL، قطر سنبله: SD، طول ریشک: AL، تعداد دانه در سنبله:NGS، تعداد کل سنبله‌ها: NSA، وزن کل سنبله‌ها:WTS، وزن هزار دانه: TGW، عملکرد: Y

Plant height: PH, Spike diameter: SD, Root length: RL, Root volume: RV, spike length: SL, Spike diameter: SD, Awns Length: AL, Number of grains per spike: NGS, number of spike per area: NSA, weight of total spikes: WTS, Thousand seed weight: TSW, Yield: Y

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش سطوح روی در رقم بر ارتفاع بوته، طول ریشه، طول سنبله، تعداد دانه در سنبله، وزن کل سنبله‌ها و عملکرد ارقام گندم نان

Table 5. Mean comparisons for the interaction effect of zinc levels × cultivar on plant height (Cm), root length (cm), weight of total spikes, spike length, number of seeds per spike, and yield of bread wheat cultivars

Y	NSS	SL	WTS	RL	PH	Cultivar	Zn level
13.22^{cde}	41.68^{gef}	9.38^{bc}	21.22^{cde}	36.66^{d}	69.77^{cde}	Niknejad	
13.37^{cde}	46.32^{cb}	8.71^{cdefg}	17.52^{hg}	47.33^{ab}	51.05^{g}	Setareh	
13.03^{de}	41.10^{gf}	8.88^{cdef}	18.74^{fg}	36.66^{d}	69.607^{cdef}	Amin	
14.55^{bcd}	39.44^{g}	7.94^{h}	17.9^{gh}	37.66^{cd}	73.94^{a}	Owj	-Zn
13.34^{cde}	42.33^{gefd}	8.11^{gh}	21.7^{bcd}	36^{d}	70.83^{abc}	Sarang	
13.42^{cde}	48.36^{b}	9.60^{b}	23.11^{cb}	41.33^{bcd}	70.44^{bc}	Kavir	
12.54^{e}	44.99^{cebd}	8.27^{fgh}	19.09^{efg}	36.33^{d}	66.94^{def}	Farin	
14.87^{abc}	43.22^{cefd}	9.05^{bcde}	21.25^{cde}	47.66^{ab}	71.107^{abc}	Niknejad	
13.25^{cde}	45.55^{cbd}	8.49^{efgh}	18.18^{gh}	46.66^{ab}	51.44^{g}	Setareh	
10.53^{f}	43.66^{cde}	9.21^{bcd}	16.31^{h}	37.66^{cd}	66.55^{ef}	Amin	
14.12^{bcde}	44.08^{cefd}	8.55^{defgh}	20.63^{def}	41.66^{bcd}	73.27^{ab}	Owj	+Zn
16.41^{a}	45.44^{cbd}	9.16^{bcde}	22.51^{bcd}	48.33^{a}	66.21^{f}	Sarang	
14.13^{bcde}	51.99^{a}	10.77^{a}	23.58^{a}	43.66^{abc}	69.11^{cdef}	Kavir	
15.74^{ab}	52.22^{a}	8.83^{cdef}	26.79^{a}	46^{ab}	70.05^{bcd}	Farin	

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

Means with similar letter(s) in each column are not significantly different at the 1% probability level, based on Duncan's multiple range test.

کمبود روی: Zn-، روی کافی: Zn+، ارتفاع بوته: PH، طول ریشه: RL، حجم ریشه: RV، طول سنبله: SL، و تعداد دانه در سنبله: NSS

-Zn: Zn deficiency, +Zn: Zn sufficiency, Plant height: PH, Root length: RL, weight of total spikes: WTS, spike length: SL, and number of seeds per spike: NSS

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر رقم بر طول ریشک، قطر ساقه، تعداد کل سنبله و وزن هزاردانه ارقام گندم نان

Table 6. Mean comparisons for cultivar effect on awn length, stem diameter, number of spikes per area, total weight of spikes, and thousand-grain weight in of bread wheat cultivars

TGW	NSA	SD	AL	Cultivar
33.25^{c}	11.5^{a}	0.4^{bcd}	6.74^{b}	Niknejad
44.1^{ab}	8.33^{b}	0.44^{a}	5.13^{d}	Setareh
36.63^{ab}	8.83^{b}	0.39^{bcd}	7.36^{ab}	Amin
45.38^{a}	9.16^{b}	0.385^{cd}	7.12^{ab}	Owj
46.63^{a}	11^{a}	0.38^{d}	5.94^{c}	Sarang
34.2^{c}	11.33^{a}	0.42^{bc}	7.65^{a}	Kavir
47.55^{a}	10.66^{a}	0.43^{ab}	6.99^{b}	Farin

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

Means with similar letter(s) in each column are not significantly different at the 1% probability level, based on Duncan's multiple range test.

طول ریشک: AL، قطر ساقه: SD، تعداد کل سنبله: NSA، وزن کل سنبله: WTS و وزن هزاردانه: TGW

Awns Length: AL, Stem diameter: SD, Number of spike per area: NSA, Total weight of spikes: TWS and Thousand-grain weight: TGW

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط کمبود روی، تعداد دانه در سنبله در رقم روی-ناکارا (فرین) به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، در حالی‌که این کاهش در رقم روی-کارا (نیک‌نژاد) مشاهده نشد (جدول ۵). این امر نشان می‌دهد که کارایی روی در ژنوتیپ‌های مختلف می‌تواند نقش مهمی در پایداری فرآیند تشکیل دانه ایفا کند. کمبود روی یکی از عوامل اصلی محدودکننده در مراحل تشکیل و پر شدن دانه در غلات است، به‌ویژه در ژنوتیپ‌هایی که حساسیت بیش‌تری به کمبود این عنصر دارند (Khan *et al*., 2008). نیازخانی و همکاران (Niazkhani *et al.,* 2020) گزارش کردند که تعداد دانه در سنبله در ارقام روی-کارای گندم به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ارقام روی-ناکارا بود. از سوی دیگر، مطالعه اسفندیاری و عبدلی (Esfandiari & Abdoli, 2016) نشان داد که محلول‌پاشی روی با افزایش تعداد دانه در سنبله، در نهایت موجب بهبود عملکرد دانه شد. این نتایج حاکی از آن هستند که تغذیه کافی روی، چه از طریق کارایی ذاتی ژنوتیپ و چه از طریق مدیریت تغذیه‌ای، می‌تواند نقش اساسی در بهبود عملکرد و اجزای عملکرد گندم ایفا نماید.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین برهمکنش (جدول ۵)، در شرایط کمبود روی، طول سنبله در رقم روی-کارای نیک‌نژاد به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم روی-ناکارای فرین بود. این یافته نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌های روی-کارا حتی تحت شرایط محدودیت تغذیه‌ای نیز قادر به حفظ رشد سنبله هستند و این ویژگی می‌تواند در پایداری عملکرد دانه تأثیر به‌سزایی داشته باشد. طول سنبله یکی از اجزای کلیدی عملکرد محسوب می‌شود زیرا نه‌تنها با تعداد دانه در سنبله ارتباط مستقیم دارد، بلکه به‌عنوان منبع مهم مواد فتوسنتزی نزدیک به دانه‌ها عمل می‌کند (Mladenov *et al*., 2019). سنبله نسبت به سایر اندام‌های گیاه مزایای بیش‌تری در بهره‌گیری از نور دارد و همراه با ریشک‌ها مدت طولانی‌تری سبز و فعال باقی می‌ماند، به‌طوری‌که حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد از ماده خشک انباشته در دانه‌ها از طریق فتوسنتز سنبله تأمین می‌شود (Sharma *et al*., 2003). شکوری و همکاران (Shakouri *et al*., 2022) نیز بیش‌ترین طول سنبله را در رقم روی-کارای نیک‌نژاد مشاهده کردند. همچنین، اسفندیاری و همکاران (Esfandiari *et al*., 2016) نشان دادند که تیمارهای روی به‌طور کلی موجب افزایش طول سنبله در مقایسه با شاهد (کمبود روی) شدند. بنابر این، می‌توان نتیجه گرفت که کارایی روی در ژنوتیپ‌های مختلف گندم نه‌تنها در حفظ رشد رویشی بلکه در توسعه اندام‌های زایشی از جمله سنبله تأثیرگذار است و این امر در نهایت به بهبود عملکرد دانه منجر می‌شود.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

نتایج به‌دست آمده از مقایسه میانگین برهمکنش سطوح روی در رقم نشان دادند که کمبود روی تأثیر قابل‌توجهی بر روی صفت عملکرد دانه در رقم روی-کارا نیک‌نژاد نداشت در حالی‌که مقدار این صفت در شرایط کمبود روی در رقم روی-ناکارا فرین به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۵). در واقع، ارقام روی-کارا دارای ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی خاصی هستند که به آنها امکان می‌دهد در محیط‌های فقیر از روی نیز عملکرد خود را حفظ کنند. ارقام روی-کارا در مقایسه با ارقام روی-ناکارا در خاک‌هایی که روی کمی‌دارند، بهتر رشد می‌کنند. این امر از طریق استفاده کارآمدتر از روی، یعنی بهره‌وری استفاده از روی یا با جذب روی بیش‌تر توسط ریشه ممکن می‌شود (Duffner *et al*., 2012). مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که مصرف روی نقش مهمی در بهبود عملکرد دانه تحت شرایط کمبود دارد. چاکماک (Cakmak, 2008) گزارش کرد که در شرایط کمبود روی، مصرف کود روی موجب افزایش چشمگیر عملکرد دانه گندم شد. در مطالعه‌ای دیگر بر روی برنج، واکنش معنی‌داری به سطوح مختلف روی مشاهده شد و بیش‌ترین عملکرد دانه در سطح پنج میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک به دست آمد که به‌طور قابل توجهی بیش‌تر از شاهد (بدون مصرف روی) بود. (Muthukumararaja & Sriramachandrasekharan, 2012).

جدول ۷- تجزیه واریانس صفات وزن تر و خشک ریشه در شرایط کمبود روی و روی کافی در ارقام گندم نان

Table 7. Analysis of variance for root fresh and dry weights under Zn deficiency and sufficiency conditions in bread wheat cultivars

میانگین مربعات (MS)			
RDW	RFW	Df	S.O.V منابع تغییرات
o.11^{ns}	2.43^{ns}	1	Zn levels سطوح روی
7.36**	165.67**	6	Cultivar رقم
42.36**	1107.85**	2	Sampling stages مرحله
0.30**	27.17**	6	Cultivar×Zn روی × رقم
1.50**	32.85**	2	Sampling stages × Zn روی × مرحله
1.54**	91.32**	12	Sampling stages × Cultivar رقم × مرحله
0.92**	26.78**	12	Zn × Sampling stages × Cultivar روی × رقم × مرحله
0.09	4.4	84	Error خطا
12.88	12.88	--	CV% ضریب تغییرات

**، * و ns: به‌ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری.

*,**and ns: respectively, significant differences at the probability levels of 0.01 and 0.05 and non-significance.

وزن تر ریشه: RFW، وزن خشک ریشه: RDW

Root fresh weight: RFW, Root dry weight: RDW

جدول ۸- مقایسه میانگین برهمکنش سطوح روی در رقم در مرحله بر وزن تر ریشه و وزن خشک ریشه در ارقام گندم نان

Table 8. Mean comparisons for the interaction effect of Zn levels × cultivar on root fresh and dry weights in bread wheat cultivars

	Vegetative رویشی				Reproductive زایشی				Grain development پرشدن دانه			
	RFW		RDW		RFW		RDW		RFW		RDW	
	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn
Niknejad	12.56^{no} pqrs	13.18^{mn} opqrs	1.1^{rst}	1.54^{p} qr	14.87^{jkl} mnop	16.61^{hij} klm	2.21^{l} mno	2.06^{m} nop	14.24^{klm} nopq	19.21^{d} efghi	2.66^{hi} jkl	3.39^{de} f
Setareh	11.33^{op} qrstu	15.09^{ijkl} mnop	1.27 qrst	1.5^{pqr} s	22.88^{bc} d	25.01^{b}	3.23^{de} fghi	3.15^{de} fgh	17.36^{fghi} jkl	19.44^{d} efghi	2.69^{hi} jkl	3.07^{ef} ghi
Amin	8.04^{tuv}	15.61^{ijkl} mno	1.7^{op} q	3.09^{e} fghi	33.39^{a}	22.03^{bc} de	5.96^{a}	3.53^{de}	20.7^{cdef}	21.4^{bcd} ef	3.68^{c} d	4.12^{bc}
Owj	10.46^{qr} stuv	9.23^{stuv}	1.01 rst	0.95^{r} st	11.8^{opqr} st	11.08^{pq} rstu	1.92^{n} op	1.19^{qr} st	13.787^{lm} nopqr	20.42^{d} efg	3.02^{ef} ghij	3.19d efghi
Saranag	7.8^{tuv}	6.44^{v}	0.95 rst	0.93^{s} t	21.42^{bc} def	16.08^{hij} klmn	1.74^{o} pq	2.32^{kl} mno	18.8^{defghi} j	17.9^{efg} hijk	2.76^{g} hijkl	2.86^{fg} hijk
Kavir	10.05^{rst} uv	7.69^{uv}	1.76 opq	1.07^{r} st	22.88^{bc} d	21.28^{bc} def	2.59^{ij} klm	2.4^{klm} n	30.1^{a}	24.6^{bc}	4.23^{b}	4.51^{b}
Farin	7.81^{tuv}	10.31^{qrs} tuv	0.85 t	0.93^{s} t	9.793^{rst} uv	12.61^{no} pqrs	2.02^{m} nop	2.46^{jk} lmn	19.22^{defg} hi	19.85^{d} efgh	2.86^{fg} hijk	3.31^{de} fg

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

Means with similar letter(s) in each column are not significantly different at the 1% probability level, based on Duncan's multiple range test.

کمبود روی: Zn-، روی کافی: Zn+، وزن تر ریشه: RFW، وزن خشک ریشه: RDW

-Zn: Zn deficiency, +Zn: Zn sufficient, Root fresh weight: RFW, Root dry weight: RDW

نتایج تجزیه واریانس صفات وزن تر ریشه و وزن خشک ریشه (جدول ۷) در سطح احتمال یک درصد نشان داد که کلیه اثرات اصلی و متقابل، به جز اثر اصلی سطح روی، از نظر آماری معنی‌دار بودند. بر اساس مقایسه میانگین (جدول ۸)،

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

بیش‌ترین وزن تر و خشک ریشه مربوط به مرحله پرشدن دانه بود. همچنین در شرایط کمبود روی، وزن تر ریشه در هر سه مرحله در رقم روی–کارای نیک‌نژاد به طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم روی–ناکارای فرین بود. این نتایج بیانگر آن هستند که ژنوتیپ‌های روی–کارا رشد و توسعه ریشه خود را تغییر می‌دهند تا ظرفیت خود را برای جذب روی در شرایط کمبود این عنصر بهبود بخشند. از نظر فیزیولوژیک، کاهش زیست‌توده به‌ویژه در ریشه نخستین پاسخ گیاه به کمبود روی است (Nanda *et al*., 2017). مطالعه نیازخانی و همکاران (Niazkhani *et al*., 2020) نیز کاهش معنی‌دار وزن‌تر و خشک ریشه در شرایط کمبود روی را گزارش کردند و نشان دادند که ارقام روی–ناکارا نسبت به ارقام روی–کارا کاهش بیش‌تری داشتند. علاوه بر این، نتایج مطالعه‌ای دیگر بر روی ذرت نشان داد که تداوم تنش کمبود روی موجب افزایش اختلاف زیست‌توده ریشه، بین ژنوتیپ‌های حساس و متحمل به روی شد (Xu *et al*., 2021). همچنین در مطالعه‌ای، ارقام گندم روی–کارا در مقایسه با ارقام روی– ناکارا حجم ریشه قوی‌تری را در شرایط کمبود روی نشان دادند که به گیاهان کمک می‌کند تا منابع روی غیرمتحرک را در خاک به دست آورند (Noor *et al*., 2024).

جدول ۹– تجزیه واریانس غلظت روی در ریشه و شاخساره ارقام روی–کارا و روی–ناکارای گندم نان در شرایط کمبود روی و روی کافی
Table 9. Analysis of variance for Zn concentrations in the root and shoot of Zn-efficient and Zn-inefficient bread wheat cultivars under Zn deficiency and Zn sufficiency conditions

میانگین مربعات (MS)			
Shoot Zn	Root Zn	Df	S.O.V منابع تغییرات
0.82**	0.52 **	1	Zn levels سطوح روی
0.30**	0.89 **	1	Cultivar رقم
0.33**	0.4 **	1	Cultivar × Zn روی × رقم
0.004	0.005	8	Error خطا
8.57	5.69	--	CV% ضریب تغییرات

**، * و ns: به‌ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری.
*,**and ns: respectively, significant differences at the probability levels of 0.01 and 0.05 and non-significance.
غلظت روی ریشه: Root Zn، غلظت روی شاخساره: Shoot Zn
Root zinc concentration: Root Zn, Shoot zinc concentration: Shoot Zn

جدول ۱۰– مقایسه میانگین برهمکنش سطوح روی در رقم بر غلظت روی ریشه و شاخساره ارقام روی–کارا و روی–ناکارای گندم نان
Table 10. Mean comparisons for the interaction effect of Zn levels × cultivar on root and shoot Zn concentrations in Zn-efficient and Zn–inefficient bread wheat cultivars

Zn level	Cultivar	Root Zn	Shoot Zn
-Zn	Niknejad (Zn-efficient)	1.51^{ab}	0.47^{c}
	Farin (Zn-inefficient)	0.59^{c}	0.49^{c}
+Zn	Niknejad (Zn-efficient)	1.56^{a}	1.33^{a}
	Farin (Zn-inefficient)	1.38^{b}	0.68^{b}

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.
Means with similar letter(s) in each column are not significantly different at the 1% probability level, based on Duncan's multiple range test.
کمبود روی: Zn-، روی کافی: Zn+، غلظت روی ریشه: Root Zn، غلظت روی شاخساره:Shoot Zn،
-Zn: Zn deficiency, +Zn: Zn sufficient Root zinc concentration: Root Zn, Shoot zinc concentration: Shoot Zn,

غلظت عناصر غذایی در ریشه ، برگ و دانه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس غلظت عنصر روی در ریشه و برگ (جدول ۹)، کلیه اثرات اصلی و متقابل در سطح احتمال یک معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۱۰) نشان دادند کمبود عنصر روی در خاک باعث کاهش معنی‌دار غلظت این عنصر در اندام‌های ریشه و برگ شد. همچنین غلظت روی در ریشه ارقام روی–کارا به‌طور قابل توجهی بیش‌تر از ارقام روی– ناکارا بود، اگرچه در شرایط کمبود روی، تفاوت معنی‌داری بین ارقام در غلظت روی شاخساره مشاهده نشد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که ظرفیت جذب و ذخیره‌سازی روی در ریشه یکی از عوامل کلیدی در تعیین کارایی ارقام در مواجهه با کمبود روی است (Malakouti, 2007). دسترسی به روی در ریزوسفر و ژنوتیپ گیاه دو عامل اصلی کمبود روی در دانه گندم هستند و جذب روی توسط ریشه اولین گام در حرکت روی از خاک به دانه است (Noor *et al*., 2024). چاکماک و همکاران (Cakmak *et al*., 1996) نشان دادند که کارایی روی غلات عمدتاً با تفاوت در جذب روی توسط ریشه‌ها ارتباط داشت. نتایج پژوهشی دیگر در گندم نشان دادند که در شرایط کمبود، غلظت روی در ریشه بیش‌تر از اندام‌های هوایی بود زیرا انتقال روی از ریشه به شاخساره کاهش یافت یا متوقف شد (Rengel & Graham, 1995). علاوه بر این، نیازخانی و همکاران (Niazkhani *et al*., 2021) نشان دادند که غلظت روی در ریشه ارقام روی–کارای گندم بیش‌تر از ارقام روی–ناکارا بود ولی اختلاف معنی‌داری بین غلظت روی شاخساره ارقام روی–کارا و روی– ناکارا مشاهده نشد. این نتایج بیانگر اهمیت این سازوکارها در بهبود کارایی روی در ارقام روی–کارا هستند.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

جدول ۱۱- تجزیه واریانس غلظت عناصر روی و مس در دانه‌های ارقام روی-کارا و روی-ناکارای گندم نان در شرایط کمبود روی و روی کافی

Table 11. Analysis of variance for Zn and Cu concentrations in the grains of Zn-efficient and Zn-inefficient bread wheat cultivars under Zn deficiency and Zn sufficiency conditions

میانگین مربعات (MS)			
Grain Cu	Grain Zn	Df	S.O.V منابع تغییرات
0.00089^{ns}	0.36^{**}	1	Zn levels سطوح روی
0.00087^{**}	0.03^{**}	1	Cultivar رقم
0.00083^{*}	0.01^{*}	1	Cultivar × Zn روی × رقم
0.0002	0.005	28	Error خطا
7.82	15.75	--	CV% ضریب تغییرات

**، * و ns: به‌ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری.

*,**and ns: respectively, significant difference at the probability levels of 0.01 and 0.05 and non-significance.

غلظت روی دانه: Grain Zn، غلظت مس دانه: Grain Cu

Grain zinc concentration: Grain Zn, Grain Copper concentration: Grain Cu

جدول ۱۲- مقایسه میانگین برهمکنش سطوح روی در رقم بر غلظت عناصر روی و مس دانه

Table 12. Mean comparisons for the interaction effect of Zn levels × cultivar on the concentration of Zn and Cu in the grains of Zn-efficient and Zn-inefficient bread wheat cultivars

	Grain Zn							Grain Cu						
	Niknejad	Setareh	Amin	Ovj	Sarang	Kavir	Farin	Niknejad	Setareh	Amin	Ovj	Sarang	Kavir	Farin
-Zn	0.44^{cd}	0.46^{cd}	0.35^{e}_{d}	0.26^{e}	$0.39^{}_{ecd}$	0.41^{c}_{d}	0.26^{e}	0.20^{bc}	0.20^{bc}	0.18^{c}	0.18^{c}	0.20^{bc}	0.19^{b}_{c}	0.17^{c}
+Zn	0.46^{cd}	0.69^{a}	0.69^{a}	0.44^{cd}	$0.46^{}_{cd}$	0.6^{ab}	$0.53^{}_{b}$	0.18^{c}	0.19^{bc}	0.18^{c}	0.20^{b}_{c}	0.20^{bc}	0.23^{a}	0.21^{a}_{b}

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

Means with similar letter(s) in each column are not significantly different at the 1% probability level, based on Duncan's multiple range test.

کمبود روی: Zn-، روی کافی: Zn+، غلظت روی دانه: Grain Zn، غلظت مس دانه: Grain Cu

-Zn: Zn deficiency, +Zn: Zn sufficient, Grain zinc concentration: Grain Zn, Grain Copper concentration: Grain Cu

بر اساس نتایج تجزیه واریانس غلظت عناصر روی و مس در دانه گندم (جدول ۱۱)، کلیه اثرات اصلی و متقابل به غیر از اثر اصلی سطوح روی بر غلظت مس، در سطح احتمال یک یا پنج درصد معنی‌دار بودند. مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۱۲) نشان داد که در شرایط کمبود روی، غلظت روی دانه در رقم روی-ناکارای فرین نسبت به رقم روی-کارای نیک‌نژاد کاهش بیش‌تری داشت (جدول ۱۲). این یافته نشان‌دهنده توانایی بالاتر رقم نیک‌نژاد در حفظ غلظت روی دانه تحت شرایط کمبود این عنصر است و احتمالاً با کارایی بیش‌تر در جذب، انتقال و توزیع مجدد روی از اندام‌های رویشی به دانه در رقم روی- کارا مرتبط است. در مقابل، رقم روی- ناکارا به‌دلیل محدودیت در این فرایندها، افت بیش‌تری در غلظت روی دانه تجربه می‌کند. شایان ذکر است که در شرایط تأمین کافی روی، اختلاف معنی‌داری بین دو رقم مشاهده نشد. نتایج مشابه توسط نیازخانی و همکاران (Niazkhani *et al*., 2021) نیز گزارش شدند؛ آن‌ها بیان کردند که غلظت روی دانه در ارقام روی-کارا در شرایط کمبود روی بالاتر از ارقام روی-ناکارا بود.

از سوی دیگر، نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایط کمبود روی، غلظت مس دانه در رقم روی- ناکارا به طور معنی‌داری کاهش یافته است. نیازخانی و همکاران (Niazkhani *et al*., 2021) گزارش کردند غلظت مس دانه در ارقام روی-کارای گندم کم‌تر از ارقام روی-ناکارا است. همچنین، در مطالعه‌ای بر روی ارقام لوبیا، غلظت مس دانه در ارقام روی-کارا نسبت به ارقام روی-ناکارا بالاتر گزارش شد (Beygi *et al*., 2012). این نتایج نشان می‌دهد کمبود روی می‌تواند با تغییر در فعالیت ناقل‌های فلزی مشترک (مانند ZIP)، کاهش رشد و توسعه ریشه در نتیجه محدود شدن سطح جذب، و همچنین اختلال در انتقال و بازتوزیع عناصر به‌دلیل نقش روی در پایداری غشا و فعالیت پروتئین‌های دخیل در بارگیری و تخلیه آوندی اثرات غیرمستقیمی بر وضعیت مس در گیاه داشته باشد. به نظر می‌رسد ارقام روی-کارا با کارایی بالاتر در این فرآیندها قادرند تعادل غلظت عناصر کم‌مصرف در دانه را بهتر حفظ کنند.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

جدول ۱۳- تجزیه واریانس اثر کمبود روی بر فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و آلکالین فسفاتاز در ارقام روی-کارا و روی-ناکارای گندم نان

Table 13. Analysis of variance for the activities of superoxide dismutase and alkaline phosphatase enzymes in Zn-efficient and Zn-inefficient bread wheat cultivars

میانگین مربعات (MS)			
SOD	AlP	Df	S.O.V منابع تغییرات
2.35**	1837.68**	1	Zn levels سطوح روی
0.02ns	6188.02**	1	Cultivar رقم
2.008**	238.52**	1	Sampling stages مرحله
6.17**	105750.18**	1	Tissue بافت
0.38**	462.52**	1	Zn×Cultivar روی × رقم
0.66**	3250.52**	1	Zn×Sampling stages روی × مرحله
0.77**	1862.52**	1	Zn×Tissue روی × بافت
0.49**	4051.68**	1	Cultivar ×Sampling stages رقم × مرحله
1.4**	5611.68**	1	Cultivar × Tissue رقم × بافت
0.71**	325.52**	1	Sampling stages×Tissue مرحله × بافت
0.48**	2537.52**	1	Zn×Cultivar×Sampling stages روی × رقم × مرحله
0.37**	204.18*	1	Zn×Cultivar×Tissue روی × رقم × بافت
0.38**	2200.52**	1	Zn×Sampling stages×Tissue روی × مرحله × بافت
0.82**	2625.52**	1	Cultivar×Sampling stages×Tissue رقم × مرحله × بافت
0.25**	2015.02**	1	Zn×Cultivar×Samling time×Tissue روی × رقم× مرحله × بافت
0.01	28.22	32	Error خطا
7.18	7.73	--	CV% ضریب تغییرات

**، * و ns: به‌ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری.

*,**and ns: respectively, significant differences at the probability levels of 0.01 and 0.05 and non-significance.

آلکالین فسفاتاز: AlP، سوپراکسید دیسموتاز: SOD

Alkaline phosphatase: AlP, Superoxide dismutase: SOD

جدول ۱۴- مقایسه میانگین برهمکنش سطوح روی در رقم در مرحله در بافت بر آنزیم‌های مورد مطالعه در ارقام روی-کارا و روی-ناکارای گندم نان

Table 14. Mean comparisons for the interaction effect of zinc levels × cultivar × tissue × sampling stage on the activity of the enzymes studied in Zn-efficient and Zn-inefficient cultivars

Grain development پرشدن دانه				Reproductive زایشی					
SOD		ALP		SOD		ALP			
+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn		
1.21^{fg}	0.88^{i}	86.33^{f}	124^{d}	0.98^{hi}	0.91^{hi}	65.33^{g}	98^{e}	Niknejad (Zn-efficient)	Flag Leaf
1.52^{cd}	1.3^{ef}	80.33^{f}	152.33^{b}	1.29^{ef}	1.08^{gh}	180.66^{a}	137.66^{c}	Farin (Zn-inefficient)	
Grain development پرشدن دانه				Reproductive زایشی					
SOD		ALP		SOD		ALP			
+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn		
3.53^{a}	1.69^{c}	21.66^{h}	25^{h}	1.62^{cd}	1.33^{ef}	18.66^{h}	19.33^{h}	Niknejad (Zn-inefficient)	Root
2.02^{b}	1.57^{cd}	19.66^{h}	22^{h}	1.73^{c}	1.42^{de}	27^{h}	20.33^{h}	Farin (Zn-inefficient)	

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

Means with similar letter(s) in each column are not significantly different at the 1% probability level, based on Duncan's multiple range test.

کمبود روی: Zn-، روی کافی: Zn+، آلکالین فسفاتاز: ALP، سوپراکسید دیسموتاز: SOD

-Zn: Zn deficiency, +Zn: Zn sufficient, Alkaline phosphatase: ALP, Superoxide dismutase: SOD

فعالیت آنزیم‌ها

نتایج جدول ۱۳ بیانگر آن هستند که تمام اثرات اصلی و متقابل بر فعالیت آنزیم‌های مورد بررسی در سطح احتمال یک یا پنج درصد معنی‌دار بودند. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن (جدول ۱۴) نشان داد که فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز در برگ به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ریشه بود. در شرایط کمبود روی، این فعالیت در برگ رقم روی-کارا نیک‌نژاد در مراحل زایشی و پر شدن دانه افزایش یافت، در حالی‌که در بافت ریشه تغییر معنی‌داری مشاهده نشد. این افزایش فعالیت در برگ می‌تواند به‌عنوان یک سازوکار سازگاری گیاه در پاسخ به کمبود روی تعبیر شود زیرا آلکالین فسفاتاز در آزادسازی و بسیج فسفات‌های آلی نقش دارد و افزایش فعالیت آن می‌تواند کارایی استفاده از فسفر را در شرایط محدودیت عناصر کم‌مصرف بهبود دهد. با این‌حال، نتایج شکوری و همکاران (Shakouri *et al*., 2022) نشان دادند که در شرایط کمبود روی، فعالیت این آنزیم به‌طور معنی‌داری نسبت به شرایط روی کافی در ارقام روی ناکارا کاهش یافت. این اختلاف نتایج می‌تواند ناشی از تفاوت در گونه یا رقم گیاهی، مرحله رشد مورد بررسی، شدت و مدت زمان تنش کمبود روی، یا شرایط محیطی و مدیریتی آزمایش باشد. به‌نظر می‌رسد که بررسی دقیق‌تر الگوهای بیان ژنی آلکالین فسفاتاز و مسیرهای تنظیمی‌آن تحت تنش کمبود روی، همراه با مقایسه بین ارقام متحمل و حساس، می‌تواند در تبیین این تفاوت‌ها و شناسایی سازوکارهای فیزیولوژیک مؤثر مفید باشد.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

همچنین، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در هر دو مرحله زایشی و پرشدن دانه، در هر دو اندام برگ و ریشه تحت شرایط کمبود روی به‌طور معنی‌داری نسبت به شرایط روی کافی کاهش یافت (جدول ۱۴) با این‌حال، میزان فعالیت این آنزیم در ریشه بیش‌تر از برگ بود. در سطح مولکولی، مطالعات قبلی نشان دادند که بیان ژن آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در ارقام روی–کارا گندم نسبت به ارقام ناکارا بالاتر بود و فعالیت آنزیم در سطح بالا حفظ شد (Mahmoudi & Malhamlu & Abdollahi Mandoulakani, 2019). نیازخانی و همکاران (Niazkhani *et al*., 2020) نیز گزارش کردند که تحت شرایط کمبود روی، فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز در ارقام روی–کارا به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ارقام ناکارا باقی ماند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که ژنوتیپ‌های کارا با حفظ یا حتی افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز قادرند اثرات منفی کمبود روی بر تعادل اکسیداتیو را کاهش دهند، در حالی‌که ژنوتیپ‌های ناکارا با افت فعالیت آنزیم مواجه می‌شوند و آسیب اکسیداتیو افزایش می‌یابد.

جدول ۱۵– تجزیه واریانس مقادیر برخی اسیدهای آمینه ضروری و غیر ضروری ارقام روی–کارا و روی–ناکارای گندم نان در شرایط کمبود روی و روی کافی

Table 15. Analysis of variance for some essential and non-essential amino acids in Zn-efficient and Zn-inefficient bread wheat cultivars under Zn deficiency and sufficiency conditions

میانگین مربعات (MS)										
Tyrosine	Glycine	Arginine	Asparagine	Aspartic Acid	Isoleucine	Leucine	Threonine	Lysine	Df	S.O.V منابع تغییرات
5.88**	9.50**	11.95**	0.02*	13.13**	8.67**	37.58**	4.41**	5.75**	1	Zn levels سطوح روی
38.36**	45.12**	35.70**	0.05**	22.34**	36.93**	98.14**	21.97**	10.75**	1	Cultivar رقم
15.51**	19.90**	62.72**	0.00ns	72.90**	27.93**	107.60**	24.71**	10.66**	1	Cultivar ×Zn روی × رقم
0.01	0.01	0.01	0.00	0.07	0.04	0.04	0.02	0.075	4	Error خطا
1.41	1.19	0.80	9.09	2.25	1.77	0.94	1.74	2.59	--	CV% ضریب تغییرات

**، * و ns: به‌ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری.

*,**and ns: respectively, significant difference at the probability level of 0.01 and 0.05 and non-significance.

لیزین: Lysine، ترئونین: Threonine، لوسین: Leucine، ایزولوسین: Isoleucine، آسپارتیک اسید: Aspartic Acid، آسپاراژین: Asparagine، آرژنین: Arginine، گلایسین: Glycine، تیروزین: Tyrosine،

جدول ۱۶– مقایسه میانگین برهمکنش سطوح روی در رقم بر اسیدهای آمینه ضروری و غیر ضروری در دانه ارقام روی–کارا و روی–ناکارای گندم نان

Table 16. Mean comparisons for the interaction effect of zinc levels × cultivar on essential and non-essential amino acids in the seeds of Zn-efficient and Zn–ineficient bread wheat cultivars

Isoleucine	Leucine	Threonine	Lysine	Cultivar	Zn level
12.95b	23.16b	9.52b	9.76b	Niknejad (Zn-efficient)	-Zn
12.39b	23.49b	9.72b	9.75b	Farin (Zn-inefficient)	
14.60a	26.16a	11.55a	13.76a	Niknejad (Zn-efficient)	+Zn
6.57c	11.82c	4.72c	9.13b	Farin (Zn-inefficient)	
Tyrosine	**Glycine**	**Arginine**	**Aspartic Acid**	**Cultivar**	**Zn level**
11.26b	12.73b	14.62c	12.08c	Niknejad (Zn-efficient)	-Zn
9.67c	11.13c	15.99b	14.78b	Farin (Zn-inefficient)	
12.33a	13.70a	17.77a	15.56a	Niknejad (Zn-efficient)	+Zn
5.17d	5.80d	7.95d	6.18d	Farin (Zn-inefficient)	

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

Means with similar letter(s) in each column are not significantly different at the 1% probability level, based on Duncan's multiple range test.

کمبود روی: Zn-، روی کافی: Zn+، لیزین: Lysine، ترئونین: Threonine، لوسین: Leucine، ایزولوسین: Isoleucine، آسپارتیک اسید: Aspartic Acid، آسپاراژین: Asparagine، آرژنین: Arginine، گلایسین: Glycine، تیروزین: Tyrosine

-Zn: Zn deficiency, +Zn: Zn sufficient,

محتوای اسیدهای آمینه

نتایج جدول ۱۵ نشان می‌دهند که برهمکنش سطح روی در رقم برای محتوای تمامی اسیدهای آمینه اندازه‌گیری‌شده به غیر از آسپاراژین در سطح احتمال یک یا پنج درصد معنی‌دار است. بررسی مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۱۶) نشان داد که مقادیر اسیدهای آمینه ضروری لیزین، ترئونین، لوسین و ایزولوسین در رقم روی–کارای نیک‌نژاد تحت شرایط روی کافی به‌ترتیب برابر با ۱۳/۷۶، ۱۱/۵۵، ۲۶/۱۶ و ۱۴/۶۰میلی‌گرم در گرم آرد بودند. با این‌حال، در شرایط کمبود روی، مقادیر این اسیدهای آمینه به‌ترتیب به۹/۷۶، ۹/۵۲، ۲۳/۱۶، ۱۲/۹۵ میلی‌گرم در گرم کاهش یافتند. علاوه بر این، غلظت اسیدهای آمینه غیرضروری شامل آسپارتیک اسید، آرژنین، گلایسین و تیروزین نیز در دانه رقم نیک‌نژاد تحت شرایط کمبود روی به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. این کاهش احتمالاً ناشی از اثر کمبود روی بر فرآیندهای سنتز پروتئین، پایداری ریبوزوم‌ها و فعالیت آنزیم‌های وابسته به روی در مسیرهای متابولیکی اسیدهای آمینه است. در واقع، روی به عنوان یک کوفاکتور در ساختار RNA پلیمراز عمل می‌کند همچنین روی از اجزای ساختاری ریبوزوم است و محدودیت آن می‌تواند موجب کاهش نرخ ترجمه و کاهش

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

تجمع اسیدهای آمینه و بیوسنتز پروتئین در دانه شود. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که کمبود روی منجر به کاهش تجمع اسیدهای آمینه در بافت‌های گیاهی و کاهش سنتز پروتئین می‌شود (Tayyiba *et al*., 2021). در مطالعه‌ای دیگر بر روی گندم، گزارش شد که محتوای اسیدهای آمینه کل دانه، به‌ویژه لیزین و ترئونین، تحت تیمار تأمین روی افزایش یافت و این امر موجب افزایش محتوای پروتئین دانه در مقایسه با شرایط تنش کمبود روی گردید. این نتایج نشان می‌دهند که کاربرد روی نه تنها کمبود این عنصر را جبران می‌کند، بلکه از طریق بهبود سنتز اسیدهای آمینه ضروری می‌تواند کیفیت تغذیه‌ای دانه را ارتقا دهد (Esfandiri & Abdoli, 2016). محمود سلطانی و همکاران (Mahmoud Soltani *et al*., 2020) نشان دادند که با مصرف روی به صورت اختلاط با خاک میزان پروتئین کل و تمام اسیدهای آمینه موجود در دانه برنج به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت که نشان‌دهنده نقش کلیدی عنصر روی در ساخت و ساز پروتئین است. همچنین، شواهد نشان داده‌اند که کمبود روی تجمع اسیدهای آمینه ضروری نظیر لیزین، متیونین و تریپتوفان را کاهش می‌دهد که این امر ارزش بیولوژیکی پروتئین گندم را محدود می‌سازد (Sulek *et al*., 2023). این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تأمین روی نه تنها کمبود این عنصر را جبران می‌کند، بلکه با بهبود سنتز اسیدهای آمینه ضروری، کیفیت تغذیه‌ای و ارزش بیولوژیکی دانه را نیز بهبود می‌بخشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان دادند که کمبود عنصر روی در خاک تأثیر قابل‌توجهی بر صفات مورد مطالعه داشت و تفاوت‌های معنی‌داری بین ارقام روی-کارا و روی-ناکارا مشاهده شد. رقم روی-کارا (نیک‌نژاد) توانست رشد ریشه و سنبله، تعداد دانه در سنبله و عملکرد را حتی تحت شرایط کمبود روی حفظ کند، در حالی‌که رقم روی-ناکارا (فرین) کاهش معنی‌داری را در این صفات نشان داد. فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و آلکالین فسفاتاز در برگ و ریشه نشان داد که رقم روی-کارا با حفظ یا افزایش فعالیت این آنزیم‌ها قادر به حفظ تعادل اکسیداتیو و بهبود استفاده از فسفر بود، در حالی‌که رقم ناکارا تحت تأثیر کمبود روی با کاهش فعالیت آنزیم‌ها مواجه شد. همچنین، غلظت روی در ریشه و غلظت روی و مس در دانه رقم روی-کارا بالاتر بود و این نشان‌دهنده کارایی بالاتر جذب، انتقال و توزیع مجدد عناصر غذایی در این ارقام است. مطالعه اسیدهای آمینه نشان داد که کمبود روی موجب کاهش غلظت اسیدهای آمینه ضروری (لیزین و ترئونین) و غیر ضروری (آسپارتیک اسید و آرژنین) در دانه رقم نیک‌نژاد شد. به‌طور کلی، ارقام روی-کارا مقاومت بیش‌تر در برابر تنش‌های تغذیه‌ای، گزینه‌های مناسبی برای بهبود عملکرد و کیفیت محصول در خاک‌های کمبود روی محسوب می‌شوند. با توجه به یافته‌های این تحقیق، پیشنهاد می‌شود که ژنوتیپ‌های روی-کارا در شرایط مزرعه‌ای و خاک‌های با سطوح متفاوت روی بررسی شوند تا پایداری عملکرد و صفات مورفوفیزیولوژیک آن‌ها در محیط‌های واقعی کشاورزی تأیید گردد. همچنین، مطالعات مولکولی و ژنتیکی با تمرکز بر بیان ژن‌ها و مسیرهای متابولیکی مرتبط با جذب و توزیع روی می‌تواند به شناسایی سازوکارهای فیزیولوژیکی تفاوت بین ارقام کمک کند. علاوه بر این، پژوهش‌های تکمیلی در زمینه کیفیت پروتئین و اسیدهای آمینه دانه و ترکیب استفاده از ارقام کارا با مدیریت‌های تغذیه‌ای (مانند کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی روی) می‌توانند راهکارهای عملی را برای بهبود عملکرد و کیفیت تغذیه‌ای دانه در شرایط کمبود روی ارایه دهند.

References

Abdoli, M., & Esfandiari, E. (2014). Effect of zinc foliar application on the quantitative and qualitative yield and seedlings sampling characteristics of bread wheat (cv. Kohdasht). *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 3(1), 77-90.

Akhavan, S., Shabanpour, M., & Esfahani, M. (2012). Effect of soil texture and plant density on root and shoot growth of wheat. *Journal of Water and Soil,* 26(3), 727-235.

Alipour Babadi, M., Norouzi Masir, M., Moezzi, A., Rahnama Ghahfarokhi, A., & Taghavi Zahedkolaei, M. (2025). The effect of priming application of zinc aminochelate and $ZnSO_4$ fertilizer on the chemical forms of zinc in the soil solution phase and its correlation with zinc concentration in sunflower. *Iranian Journal of Soil and Water Research,* 56(5), 1379-1399. [In Persian]

Alloway, B. J. (2009). Soil factors associated with Zn deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health*, 31(5), 537-548.

Aziz, M. A., Ahmad, H. R., Corwin, D. L., Sabir, M., Hakeem, K. R., & Öztürk, M. (2017). Influence of farmyard manure on retention and availability of nickel, zinc and lead in metal-contaminated calcareous loam soils. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(3), 289-296.

Beygi, M., Savaghebi, Gh., & Motesharezadeh, B. (2012). Study of zinc efficiency in selected common bean cultivars. *Journal of Water and Soil* 26(1): 33-41. [In Persian]

Bhardwaj, A. K., Chejara, S., Malik, K., Kumar, R., Kumar, A., & Yadav, R. K. (2022). Agronomic biofortification of food crops: An emerging opportunity for global food and nutritional security. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1055278.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

Cakmak, I. (2008). Zn deficiency in wheat in Turkey. In Micronutrient deficiencies in global crop production (pp. 181-200). Dordrecht: Springer Netherlands.

Cakmak, İ., & Kutman, U. B. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 172-180.

Cakmak, I., Ekiz, H., Yilmaz, A., Torun, B., Köleli, N., Gültekin, I., ... & Eker, S. E. L. İ. M. (1997). Differential response of rye, triticale, bread and durum wheats to Zn deficiency in calcareous soils. *Plant and Soil*, 188(1), 1-10.

Cakmak, I., Sari, N. E., Marschner, H., Kalayci, M., Yilmaz, A., Eker, S. E., & Gülüt, K. Y. (1996). Dry matter production and distribution of zinc in bread and durum wheat genotypes differing in zinc efficiency. *Plant and Soil*, 180(2), 173-181.

Castillo-González, J., Owjeda-Barrios, D., Hernández-Rodríguez, A., González-Franco, A. C., Robles-Hernández, L., & López-Ochoa, G. R. (2018). Zinc metalloenzymes in plants. *Interciencia*, 43(4), 242-248.

Duffner, A., Hoffland, E., & Temminghoff, E. J. (2012). Bioavailability of zinc and phosphorus in calcareous soils as affected by citrate exudation. *Plant and Soil*, 361, 165-175.

Esfandiari, E., & Abdolı, M. (2016). Wheat biofortification through zinc foliar application and its effects on wheat quantitative and qualitative yields under zinc deficient stress. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 26(4), 529-537.

Esfandiari, E., Abdoli, M., Mousavi, S. B., & Sadeghzadeh, B. (2016). Impact of foliar zinc application on agronomic traits and grain quality parameters of wheat grown in zinc deficient soil. *Indian Journal of Plant Physiology*, 21(3), 263-270.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). World food situation. Available at: http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/.

Gholami, M., Tahmasebi, Z., & Nasseri, R. (2023). Investigating the genetic diversity of root traits in lentil (Lens culinaris Medik). *Journal of Environmental Science Studies*, 8(3), 6838-6850.

Graham, R. D., & Rengel, Z. (1993). Genotypic variation in zinc uptake and utilization by plants. In Zinc in Soils and Plants: Proceedings of the International Symposium on 'Zinc in Soils and Plants' held at The University of Western Australia, 27–28 September, 1993 (pp. 107-118). Dordrecht: Springer Netherlands.

Gupta, O. P., Pandey, V., Saini, R., Narwal, S., Malik, V. K., Khandale, T., & Singh, G. P. (2020). Identifying transcripts associated with efficient transport and accumulation of Fe and Zn in hexaploid wheat (T. aestivum L.). *Journal of Biotechnology*, 316, 46-55.

Hacisalihoglu, G. (2020). Zinc (Zn): The last nutrient in the alphabet and shedding light on Zn efficiency for the future of crop production under suboptimal Zn. *Plants,* 9(11), 1471.

Hacisalihoglu, G., & Kochian, L. V. (2003). How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. *New Phytologist*, 159(2), 341-350.

Hacisalihoglu, G., Ozturk, L., Cakmak, I., Welch, R. M., & Kochian, L. (2004). Genotypic variation in common bean in response to zinc deficiency in calcareous soil. *Plant and Soil,* 259, 71-83.

Hafeez, B. M., Khanif, Y. M., & Saleem, M. (2013). Role of zinc in plant nutrition-a review. *American Journal of Experimental Agriculture*, 3(2), 374-391.

Jones, B. N. (1986). Amino acid analysis by o-phthaldialdehyde precolumn derivatization and reverse-phase HPLC. *In Methods of protein microcharacterization: a practical handbook* (pp. 121-151). Totowa, NJ: Humana Press.

Khalid, A., Hameed, A., & Tahir, M. F. (2023). Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1053196.

Khan, M., Fuller, M., & Baloch, F. (2008). Effect of soil applied zinc sulphate on wheat (Triticum aestivum L.) grown on a calcareous soil in Pakistan. *Cereal Research Communications,* 36(4), 571-582.

Khoshgoftarmanesh, A. H., Schulin, R., Chaney, R. L., Daneshbakhsh, B., & Afyuni, M. (2010). Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development,* 30(1), 83-107.

Kimura, S., Vaattovaara, A., Ohshita, T., Yokoyama, K., Yoshida, K., Hui, A., ... & Fukao, Y. (2023). Zn deficiency-induced defensin-like proteins are involved in the inhibition of root growth in Arabidopsis. *The Plant Journal*, 115(4), 1071-1083.

Kumar, V., Gupta, R., Verma, N., & Tewari, R. K. (2025). Zn-efficient and inefficient rice cultivars show differential physiological responses under Zn deficiency. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 37(1), 20.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

Li, S., Zhou, X., Huang, Y., Zhu, L., Zhang, S., Zhao, Y., & Chen, R. (2013). Identification and characterization of the zinc-regulated transporters, iron-regulated transporter-like protein (ZIP) gene family in maize. *BMC Plant Biology*, 13, 1-14.

Mahmoud Soltani, S., Allagholipoor, M., ShakouriKatigari, M., Paykan, M., Shabanzadeh, H., Attar, A.,... & Keshtekar, F. (2020). Effect of Soil and Foliar Application of Zinc Sulfate Fertilizer on Zn and Protein Content of Grain, and Zn Content of Rice Tissues at Different Growth Stages. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(3), 309-327.

Mahmoudi Malhamlu, F., & Abdollahi Mandoulakani, B. (2019). Enhanced expression of superoxide dismutase, phenylalanine ammonia-lyase and bZIP33 transcription factor encoding genes under Zn deficiency conditions in bread wheat (Triticum aestivum L.). *Cereal Research*, 9(1), 17-26.

Malakouti, M. J. (2007). Zinc is a neglected element in the life cycle of plants. *Middle Eastern and Russian Journal of Plant Science and Biotechnology*, 1(1), 1-12.

Millward, D. J., Layman, D. K., Tomé, D., & Schaafsma, G. (2008). Protein quality assessment: impact of expanding understanding of protein and amino acid needs for optimal health1. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 87(5), 1576S-1581S.

Mladenov, V., Dimitrijević, M., Petrović, S., Boćanski, J., Banjac, B., Kondić-Špika, A., & Trkulja, D. (2019). Genetic analysis of spike length in wheat. *Genetika-Belgrade*, 51(1), 167-178.

Mousavi, S. R., Galavi, M., & Rezaei, M. (2013). Zinc (Zn) importance for crop production—a review. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(1), 64-68.

Muthukumararaja, T. M., & Sriramachandrasekharan, M. V. (2012). Effect of zinc on yield, zinc nutrition and zinc use efficiency of lowland rice. *Journal of Agricultural Technology*. 8(2), 551-561.

Nanda, A. K., Pujol, V., & Wissuwa, M. (2017). Patterns of stress response and tolerance based on transcriptome profiling of rice crown tissue under Zn deficiency. *Journal of Experimental Botany*, 68(7), 1715-1729.

Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., & Renella, G. (2011). Role of phosphatase enzymes in soil. *Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling*, 215-243.

Niazkhani, M., Mandoulakani, B. A., Jafari, M., & Rasouli-Sadaghiani, M. H. (2021). Micronutrients Concentrations in Bread Wheat Cultivars with Different Zn-Efficiency under Zn Deficient and Zn Sufficient Conditions. *Water & Soil*, 35(1).

Niazkhani, S. M., Abdollahi Mandoulakani, B., Jafari, M., & Rasouli-Sadaghiani, M. (2020). The effect of absorbable Zn deficiency on some physiological and morphological traits in bread wheat. *Applied Soil Research*, 7(4), 99-100.

Niazkhani, S.M., Abdollahi Mandoulakani, B., Jafari, M., & Rasuli Sadaghiani, M.H. (2019). Effect of soil zinc deficiency on antioxidant enzymes activity and some biochemical parameters in bread wheat. *Crop Physiology*, 11(1), 5-27.

Noor, M., Kiran, A., Shahbaz, M., Sanaullah, M., & Wakeel, A. (2024). Root system architecture associated zinc variability in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports*, 14(1), 1781.

Rahnama, A., Fakhri, S., & Meskarbashee, M. (2019). Root growth and architecture responses of bread wheat cultivars to salinity stress. *Agronomy Journal,* 111(6), 2991-2998.

Rahnama, A., Hosseinalipour, B., Farrokhian Firouzi, A., Harrison, M.T., & Ghorbanpour, M. (2024). Root architecture traits and genotypic responses of wheat at seedling stage to water-defcit stress. *Cereal Research Communications,* 52, 1499–510.

Ray, C. S., Singh, B., Jena, I., Behera, S., & Ray, S. (2017). Low alkaline phosphatase (ALP) in adult population an indicator of zinc (Zn) and magnesium (Mg) deficiency. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 5(3), 347-352.

Reeds, P. J. (2000). Dispensable and indispensable amino acids for humans. *The Journal of Nutrition*, 130(7), 1835S-1840S.

Rengel, Z., & Graham, R. D. (1995). Importance of seed Zn content for wheat Sampling on Zn-deficient soil: I. Vegetative Sampling. *Plant and Soil*, 173(2), 259-266.

Rengel, Z., & Graham, R. D. (1995). Wheat genotypes differ in Zn efficiency when grown in chelate-buffered nutrient solution: II. Nutrient uptake. *Plant and Soil*, 176(2), 317-324.

Rezaei Musa Dargh, S., Abdollahi Mandoulakani, B., & Ghasemzadeh, R. (2024). The Effect of Iron Deficiency Stress on the Relative Expression of ZIP3, ZIP6, and ZIP7 Genes in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars. *Journal of Crop Breeding,* 16(3), 52-63. [In Persian]

Roy, C., Kumar, S., Ranjan, R. D., Kumhar, S. R., & Govindan, V. (2022). Genomic approaches for improving grain zinc and iron content in wheat. *Frontiers in Genetics,* 13, 1045955.

Rudani, K., Vishal, P., & Kalavati, P. (2018). The importance of zinc in plant sampling -A review. *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*, 5(2), 38-48.

Shakouri, M., Mandoulakani, B. A., & Norouzi, M. (2022). Effect of Soil Zn deficiency on Morphological Traits, Yield, and Yield Components and Activity of Zinc-Containing Enzymes in Zn-

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]

Efficient and-Inefficient Bread Wheat Cultivars. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(19), 2529-2542.

Sharma, S. N., Sain, R. S., & Sharma, R. K. (2003). Genetics of spike length in durum wheat. *Euphytica*, 130(2), 155-161.

Singh, B., Natesan, S. K. A., Singh, B. K., & Usha, K. (2005). Improving zinc efficiency of cereals under Zn deficiency. *Current Science*, 36-44.

Singh, S., Kaur, J., Ram, H., Singh, J., & Kaur, S. (2023). Agronomic bio-fortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) to alleviate Zn deficiency in human being. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 505-526.

Sułek, A., Cacak-Pietrzak, G., Różewicz, M., & Nieróbca, A. (2023). Grabi nski, J.; Studnicki, M.; Sujka, K.; Dziki, D. Effect of Production Technology Intensity on the Grain Yield, Protein Content and Amino Acid Profile in Common and Durum Wheat Grain. *Plants 2023*, 12, 364.

Sulek, A., Cacak-Pietrzak, G., Różewicz, M., Nieróbca, A., Grabiński, J., Studnicki, M., ... & Dziki, D. (2023). Effect of production technology intensity on the grain yield, protein content and amino acid profile in common and durum wheat grain. *Plants,* 12(2), 364.

Sunithakumari, K., Devi, S. P., & Vasandha, S. (2016). Zinc solubilizing bacterial isolates from the agricultural fields of Coimbatore, Tamil Nadu, India. *Current Science*, 196-205.

Tayyiba, L., Zafar, H., Gondal, A. H., Farooq, Q., Mukhtar, M. M., Hussain, R., & Sattar, I. (2021). Efficiency of zinc in plants, its deficiency and sensitivity for different crops. *Current Research in Agricultural Science* 8, 128-134.

Tessari, P., Lante, A., & Mosca, G. (2016). Essential amino acids: master regulators of nutrition and environmental footprint?. *Scientific Reports*, 6(1), 26074.

Valipour, N., & Alipour, H. (2023). Evaluation of Genetic Diversity and Zinc Deficiency Stress Tolerance in Spring Wheat Cultivars. *Journal of Crop Breeding,* 15(48), 1-13. [In Persian]

Vitale, J., Adam, B., & Vitale, P. (2020). Economics of wheat breeding strategies: focusing on Oklahoma hard red winter wheat. *Agronomy*, 10(2), 238.

Welch, R. M. (2001). Impact of mineral nutrients in plants on human nutrition on a worldwide scale. *In Plant Nutrition: Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research* (pp. 284-285). Dordrecht: Springer Netherlands.

Xu, J., Wang, X., Zhu, H., & Yu, F. (2021). Maize genotypes with different zinc efficiency in response to low zinc stress and heterogeneous zinc supply. *Frontiers in Plant Science*, 12, 736658.

Younas, N., Fatima, I., Ahmad, I. A., & Ayyaz, M. K. (2023). Alleviation of Zn deficiency in plants and humans through an effective technique; biofortification: A detailed review. *Acta Ecologica Sinica*, 43(3), 419-425.

Zeng, H., Wu, H., Yan, F., Yi, K., & Zhu, Y. (2021). Molecular regulation of Zn deficiency responses in plants. *Journal of Plant Physiology*, 261, 153419.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-10-17]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1630]