



Synthesis of New Slow-Release Nanocarriers (ZnO/SiO₂ and ZnO/CDs): An Innovative Approach to Enhance Zinc Recovery Efficiency in Bread Wheat Cultivation in Calcareous Soils

Sima Afra¹ | Mirhassan Rasouli-Sadaghiani^{2✉} | Mohammad Jafar Malakouti³ | Mina Alikhani⁴ | Ebrahim Sepehr⁵ | Aziz Majidi⁶

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: s.afra@urmia.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail. E-mail: m.rsadaghian@urmia.ac.ir

3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran-Iran. E-mail:

mjmalakouti@modares.ac.ir

4. Pharmaceutical Research Center, Pharmaceutical Technology Institute, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad-Iran. E-mail: Alikhanimina85@yahoo.com

5. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: e.sepehr@urmia.ac.ir

6. Soil and Water Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Urmia-Iran. E-mail: a.majidi@areeo.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 14, 2025

Revised: May. 19, 2026

Accepted: June. 10, 2026

Published online: July. 2026

Keywords:

**Nano zinc oxide,
Slow-release fertilizers,
Wheat genotypes,
Zinc Release**

ABSTRACT

This study aimed to synthesize two novel zinc nanocarriers, carbon-dots (ZnO/CDs) and mesoporous silica (ZnO/SiO₂), as slow-release zinc fertilizers and to compare their effects with ZnSO₄ on Zn concentration and yield of grain and shoot, as well as the zinc recovery efficiency across four bread wheat varieties under calcareous soil conditions. After synthesis, their size, surface structure, and elemental composition were characterized. A greenhouse experiment was carried out in a factorial arrangement with seven treatments, including three zinc fertilizer sources (ZnO/CDs, ZnO/SiO₂, and ZnSO₄), two application methods (soil application at 5 mg kg⁻¹ and foliar-spraying at 0.02% w/v), and four wheat cultivars (Heidary, Pishgam, Mihan, and Heyran) during 2023. The results showed that foliar-spraying of ZnO/SiO₂ resulted in the highest grain zinc concentration (38 mg kg⁻¹) and shoot zinc concentration (56 mg kg⁻¹) in both Heyran and Heidary. The highest grain and shoot yields were also observed under this treatment in the same cultivars. Soil incubation results indicated that zinc release from ZnO/SiO₂ and ZnO/CDs occurred gradually. Within 20 days, approximately 28% and 42%, respectively, of the initial Zn²⁺ concentration (2 mg kg⁻¹) was released, whereas 100% of Zn²⁺ from ZnSO₄ was released during this period. Zinc recovery efficiency in response to zinc sources varied significantly among genotypes and was affected by fertilizer type, and wheat genotype. The highest zinc recovery efficiency was obtained with foliar-spraying of ZnO/SiO₂ in Heyran and Heidary cultivars, while the lowest efficiency was associated with soil application of ZnSO₄ in Pishgam and Mihan cultivars.

Cite this article: Arfa, S., Rasouli-Sadaghiani, M., Malakouti, M.J., Alikhani, M., Sepehr, E., Majidi, A., (2026) Synthesis of New Slow-Release Nanocarriers (ZnO/SiO₂ and ZnO/CDs): An Innovative Approach to Enhance Zinc Recovery Efficiency in Bread Wheat Cultivation in Calcareous Soils, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (5), 1055-1073. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.406046.670052>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.406046.670052>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The unbalanced use of chemical fertilizers in intensive cropping systems has disrupted food security due to the increasing global population. Nanotechnology has emerged as a novel approach to enhance fertilizer efficiency and improve the productivity of agricultural products. Given that zinc deficiency in agricultural soils leads to significant nutritional problems, slow-release nanofertilizers can reduce nutrient losses and assist in better nutrient management. This study aims to identify zinc-efficient genotypes in bread wheat using newly synthesized carbon- and silica-based nanocarriers.

Materials and Methods

This study was conducted at the Greenhouse Research Center of Urmia University in 2023 to evaluate the effects of three Zn sources (ZnO/SiO₂, ZnO/CDs, and ZnSO₄) using two application methods (soil_{App} and foliar_{Spry}) on four wheat varieties (Heidary, Pishgam, Mihaan, and Heyran). The experiment utilized a factorial design with complete random blocks, consisting of seven treatments and three replicates. Each pot contained 8 kg of severely Zn-deficient soil. Before planting, necessary N-P-K nutrients were applied. In the soil_{App} method, 5 mg/kg was applied before planting, and in the foliar_{Spry}, Zn-containing fertilizer solution 0.02% w/v for the desired treatments was sprayed on wheat leaves in three stages. The concentration and yield of the grain and shoot, as well as their effect on Zn recovery efficiency, were determined. Additionally, soil incubation experiment for evaluating the Zn²⁺ slow-release characteristics of ZnO/SiO₂ and ZnO/CDs nanocarriers was conducted.

Results and Discussion

The study identifies ZnO/SiO₂ and ZnO/CDs nanocomposites, confirming key elements through EDS analysis. ZnO/SiO₂ has about 16% Zn content and a surface area of ~100 m²/g, while ZnO/CDs has ~14% Zn and an average diameter of 114 nm. These nanocomposites show potential for scientific research. Complexation can increase the residence time of compounds in the soil and has a significant impact on the movement and availability of Zn in the soil ecosystem. The soil incubation results showed that all Zn present in ZnSO₄ was released within 20 days, while the release of Zn²⁺ from ZnO/SiO₂ and ZnO/CDs continued gradually and in a controlled manner for up to 40 days, reaching concentrations of 1.44 and 1.17 mg/kg, respectively. Therefore, they can be introduced as slow-release sources of zinc. The effects of fertilizer sources, wheat varieties, and their interactions on the Zn concentration and grain yield were significant. Overall, compared to ZnSO₄, nanofertilizers, especially ZnO/SiO₂, not only increased the Zn concentration in the grains and shoots, but also significantly improved their yield. The varieties Hayran and Heidary showed the best response to these fertilizer sources across all varieties. Although ZnO/CDs showed positive results similar to ZnO/SiO₂, its overall effect was less than that of ZnO/SiO₂. This difference may be due to the positive effect of silicon in ZnO/SiO₂, which helps enhance photosynthetic activities and plant growth. The Zn recovery efficiency in wheat genotypes is significantly influenced by the source and application method of Zn fertilizers, the genotypes Heidary and Hayran demonstrated superior performance with nanofertilizers ZnO/SiO₂, and achieved increases in zinc recovery efficiency compared to ZnSO₄.

Conclusion

This study demonstrated that the nanofertilizers ZnO/SiO₂ and ZnO/CDs significantly increased zinc recovery efficiency and improved the continuous availability of zinc to plants. Additionally, selecting the type and application method of fertilizers based on soil conditions and genotypes is essential to enhance productivity and reduce dependence on chemical fertilizers. Further under greenhouse and field conditions are necessary to optimize the performance of these nanocarriers, as well as to investigate drought-resistant wheat genotypes, considering the prevailing water scarcity in the country.

Funding

The study was funded by the University of Urmia, Country Iran.

Authorship contribution

For this research articles the authors' contributions to the article extracted from the thesis are approximately as follows:

First author: Sima Afra: Preparation and preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analyzing and interpreting information and results, preparing the draft of the article

Second and third authors: Mirhassan Rasouli-Sadaghiani and Mohammad Jafar Malakouti, thesis supervisors, research design, supervising the stages of research, reviewing and controlling the results,

correcting, reviewing and finalizing the article.

Fourth, fifth and sixth authors: Mina Alikhani, Ebrahim Sepehr and Aziz Majidi, thesis advisors, participating in research design, supervising the research, reading and reviewing the article

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Authorship limited to Sima Afra, Mirhassan Rasouli-Sadaghiani and Mohammad Jafar Malakouti, Mina Alikhani have contributed substantially to the work re-reported.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

Not used AI-assisted technologies in the writing process.

Data availability statement

Data from this study are available upon request from the authors.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

سنتز نانوحامل‌های جدید کُندرهش روی (ZnO/SiO_2 و ZnO/CDs): راهکاری نوین در بهبود کارایی بازیافت روی در گندم نان در خاک‌های آهکی

سیما افرا^۱، میرحسن رسولی صدقیانی^۲✉، محمدجعفر ملکوتی^۳، مینا علیخانی^۴، ابراهیم سپهر^۵، عزیز مجیدی^۶

۱. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: s.afra@urmia.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.rsadaghian@urmia.ac.ir

۳. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران. رایانامه: mjmalakouti@modares.ac.ir

۴. مرکز تحقیقات دارویی، مؤسسه فناوری دارویی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، ایران. رایانامه: Alikhanimina85@yahoo.com

۵. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: e.sepehr@urmia.ac.ir

۶. مرکز تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش منابع طبیعی و کشاورزی، ارومیه-ایران. رایانامه: a.majidi@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مطالعه حاضر با هدف سنتز دو نانوحامل جدید روی، کربن داتی (ZnO/CDs) و مزوپورسیلیس (ZnO/SiO_2) به عنوان کودهای کُندرهش روی و مقایسه تأثیر آن‌ها و کود ZnSO_4 بر غلظت روی و عملکرد در دانه و شاخساره، همچنین بر کارایی بازیافت روی چهار رقم گندم نان در شرایط خاک‌های آهکی انجام شد. پس از سنتز نانوحامل‌ها، اندازه، ساختار سطحی و درصد عناصر نانوذرات ZnO شناسایی شدند. یک آزمایش گلخانه‌ای در قالب طرح فاکتوریل با هفت تیمار شامل سه منبع کودی (ZnO/CDs و ZnO/SiO_2 و ZnSO_4) با دو شیوه مصرف؛ خاکی (۵ میلی گرم روی بر کیلوگرم خاک) و محلول پاشی (۰/۰۲ درصد وزنی/حجمی) و چهار رقم گندم (حیدری، پیشگام، میهن و حیران) در سال ۱۴۰۲ انجام شد. نتایج نشان داد محلول پاشی ZnO/SiO_2 منجر به بالاترین غلظت روی دانه (۳۸ میلی گرم بر کیلوگرم) و غلظت روی شاخساره (۵۶ میلی گرم بر کیلوگرم) در هر دو رقم حیران و حیدری شد. بیشترین عملکرد دانه و شاخساره نیز با همین تیمار در ارقام مزبور مشاهده شد. نتایج آنکوباسیون خاک نشان داد رهایش روی از نانو کودهای ZnO/CDs و ZnO/SiO_2 به صورت تدریجی بود، به طوری که طی ۳۰ روز، به ترتیب حدود ۲۸ و ۴۲ درصد Zn^{+2} از غلظت اولیه منابع کودی مصرفی (۲ میلی گرم بر کیلوگرم) در خاک فراهم بود. درحالی که تمامی Zn^{+2} موجود در کود ZnSO_4 در این مدت آزاد شد. کارایی بازیافت روی در پاسخ به مصرف خاکی منابع روی در ارقام، به طور معنی داری متفاوت و تحت تأثیر نوع کود و ژنوتیپ‌های گندم قرار گرفت. بیشترین بازیافت روی با ZnO/SiO_2 در ارقام حیران و حیدری و کمترین آن با ZnSO_4 مربوط به ارقام پیشگام و میهن بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۲۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۲۰	
تاریخ انتشار: مرداد ۱۴۰۵	
واژه‌های کلیدی:	
رهایش روی، ژنوتیپ‌های گندم، کودهای کُندرهش، نانوذرات اکسیدروی	

استناد: لرمحمد حسنی؛ محبوبه، طالب نژاد؛ رضوان، نوشادی؛ مسعود، (۱۴۰۴) ارزیابی بهره‌وری اقتصادی آب در کشت کینوا با کاربرد آب شور و کم آبیاری در سیستم آبیاری قطره‌ای نواری در استان فارس، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۵)، ۱۰۵۵-۱۰۷۳



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.406046.670052>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.406046.670052>

مقدمه

افزایش جهانی جمعیت و گسترش سیستم‌های کشت فشرده همراه با مصرف نامتعادل کودهای شیمیایی، به یکی از چالش‌های اصلی امنیت غذایی تبدیل شده است (Jalal et al., 2023)؛ بنابراین توسعه راهکارهای نوین ضمن افزایش کارایی مصرف نهاده‌ها و کاهش اثرات زیست‌محیطی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به‌شمار می‌آید (Yaseen et al., 2020). در این راستا، نانوتکنولوژی به‌عنوان رویکردی نوین در کشاورزی، پتانسیل بالایی در دستیابی به کشاورزی پایدار با تمرکز بر بهبود کارایی کودها و افزایش بهره‌وری محصولات دارد (Ahmad et al., 2020). نانوکودها با بهبود مدیریت مواد مغذی بخصوص ریزمغذی‌ها و افزایش کارایی آن‌ها، راهکاری مؤثر جهت کاهش تلفات و دفعات مصرف کودها ارائه داده‌اند (Munir et al., 2018; Kah et al., 2019). در بین ریزمغذی‌ها، کمبود روی مشکلات تغذیه‌ای عمده‌ای در مساحت قابل‌توجهی از زمین‌های زراعی جهان (تقریباً یک‌سوم) ایجاد کرده است (Cakmak, 2008). برآوردها نشان می‌دهد که کمبود روی و سوءتغذیه ناشی از آن، حدود ۱۷/۵ درصد از جمعیت جهان را تحت‌تأثیر قرار داده است (Maxfield et al., 2023)، به‌ویژه در مناطقی که الگوی غذایی غالب‌شان مبتنی بر غلاتی مانند گندم است (singh et al., 2023). چراکه گندم در مقایسه با سایر گونه‌های غلات؛ مانند چاودار، تریتیاله و جو از کارایی پایینی در جذب روی برخوردار است (Cakmak et al., 1997; Zou et al., 2012). روی در بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه؛ سنتز پروتئین، متابولیسم کربوهیدرات و متابولیسم اکسین نقش دارد (Rehman et al., 2021). عواملی نظیر برهم‌کنش‌های کاتیونی مانند غلظت‌های بالای کلسیم (Deng et al., 2014)، پی‌اچ بالای خاک، حضور بی‌کربنات‌ها و اکسیدها، عدم تعادل در غلظت ماکرومغذی‌ها و تحرک پایین عنصر روی در محلول خاک، موجب کاهش کارایی جذب این عنصر برای گیاه می‌شوند (Cakmak, 2008). پیامد این شرایط، تجمع ناکافی روی در بافت‌های گیاهی و در نهایت افزایش خطر بروز سوءتغذیه انسانی است (Zulfiqar et al., 2021). امروزه در بیشتر نقاط جهان، کشت گندم به‌منظور دستیابی به امنیت غذایی در مقایسه با هر محصول تجاری دیگری افزایش یافته است (FAO, 2019; Galindo et al., 2022). برنامه HarvestPlus که در سال ۲۰۰۳ به‌عنوان یک تحقیقات جهانی و مشارکتی با هدف ارتقا امنیت غذایی آغاز به کار کرد، بر تولید محصولات غذایی اصلی غنی از ریزمغذی‌ها به‌منظور مقابله با کمبود آن‌ها طراحی شد (Bouis and Saltzman 2017). این ابتکار، «زیست‌غنی‌سازی» را به‌عنوان استراتژی ترجیحی برای غنی‌سازی ریزمغذی غلات معرفی می‌کند. زیست‌غنی‌سازی با استفاده از کود روی (تقویت زراعی) به‌عنوان روشی انتخابی برای افزایش محتوای روی دانه و احتمالاً بهبود عملکرد آن مطرح شده است (Dapkekar et al., 2018) و دستیابی به ژنوتیپ‌هایی با محتوای بالای روی دانه جهت کشت در خاک‌های فقیر از روی، در آینده زیست‌غنی‌سازی کشاورزی را به یک ضرورت تبدیل خواهد کرد. در برنامه‌های زیست‌غنی‌سازی غلات، انتخاب ارقام دارای کارایی بالاتر جذب روی به‌رغم تنوع ژنتیکی موجود میان آن‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Rengel, 2001; Velu et al., 2014). نیل به این رویکرد عمدتاً از طریق غنی‌سازی مزرعه‌ای و شناسایی ارقام کارآمد امکان‌پذیر است (Gupta et al., 2022). باوجودی که کودهای شیمیایی حاوی ریزمغذی‌ها، یکی از راهکارهای متداول برای افزایش جذب این عناصر در غلات هستند، به‌دلیل کارایی پایین جذب گیاهان (حدود ۴ تا ۸ درصد از مقدار مصرف‌شده)، پاسخگوی تقاضای تغذیه‌ای گیاه نیستند (Hussain et al., 2015). اخیراً انتقال هوشمند عناصر غذایی از طریق حامل‌های نانومقیاس به‌عنوان رویکردی نوین در کشاورزی مطرح شده است. نانوکودها^۱ بسیار کارآمد بوده و باوجود سطح وسیع خود، قادر به جذب بسیاری از ریزمغذی‌ها هستند که با آزادسازی مداوم، تدریجی و متناسب با نیاز گیاه، منجر به افزایش کارایی استفاده از مواد مغذی می‌شوند (Mahmood et al., 2024). این کودها عمدتاً از طریق کپسوله‌سازی عناصر غذایی در ساختارهای نانومتخلخل یا پوشش‌های پلیمری نازک به شکل نانوذرات یا امولسیون تولید شده (Panpatte et al., 2016) و از نظر عملکردی در گروه کودهای کُندرها^۲ قرار می‌گیرند (Chhowalla, 2017). در سال‌های اخیر در خصوص تأثیر مثبت نانوکودهای روی بر افزایش ۳۰ درصدی عملکرد و بهبود محتوای ویتامین C و آنتی‌اکسیدان‌ها در گوجه‌فرنگی (Khodakovskaya et al., 2013)، افزایش ۲۵ درصدی عملکرد و محتوای پروتئین پیاز (Laware and Raskar, 2014) و افزایش ۲۳ و ۱۸ درصدی عملکرد و محتوای پروتئین دانه‌های سویا (Jalal et al., 2023) و بهبود کیفیت تغذیه‌ای، میزان کلروفیل و ویتامین C برگ‌های اسفناج (Kisan et al., 2021) نیز تحقیقات متعددی صورت گرفته است. با وجود پیشرفت‌های اخیر در توسعه نانوکودهای روی، نقش نانوحامل‌ها در تعدیل پاسخ‌های فیزیولوژیک و

1 Biofortification

2 Nano fertilizers

3 Slow Release Fertilizers



ژنوتیپی گیاهان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به غلظت کم روی قابل دسترس ($0/1$ تا $0/2$ میلی گرم بر کیلوگرم) در خاک‌های آهکی (Gupta, 2005)، یافتن روش‌های اقتصادی مناسب تولید، ضمن ارتقای کمی و کیفی عملکرد گندم در مزارع ایران (به دلیل ماهیت آهکی خاک‌ها)، نیازمند راهبردهای نوینی است که کارایی استفاده از روی را با بهره‌گیری از فناوری نانو افزایش دهد. اگرچه گندم به‌طور کلی کارایی پایینی در جذب و انتقال روی به دانه دارد، اما تفاوت‌های مهمی در روی کارایی میان ارقام، به‌ویژه میان گندم‌های نان وجود دارد (Dapkekar et al., 2018). باوجود ویژگی‌های شیمیایی و ساختاری متفاوت نانوحامل‌ها (بسترهای سیلیکایی در مقایسه با حامل‌های کربنی) که می‌توانند الگوهای متمایزی از رهایش، جذب و نهایتاً بازیافت روی در ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان ایجاد کنند، ضرورت بررسی هم‌زمان اثر نانوحامل‌ها، شیوه کاربرد آن‌ها و زمینه ژنتیکی گیاه، برجسته می‌گردد. مطالعه حاضر با به‌کارگیری نانوحامل‌های مبتنی بر کربن و سیلیس با علم بر تنوع ژنتیکی بین ارقام گندم نان، به‌منظور دسته‌بندی ژنوتیپ‌های کارای روی با استفاده از معیارهای عملکرد بالاتر و کارایی جذب در شرایط کمبود روی انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش

مواد شیمیایی مورد استفاده در این مطالعه از شرکت Sigma-Aldrich، انگلستان تأمین شده‌اند که شامل تترا اتیل اورتوسیلیکات (TEOS)، هیدروکسید سدیم (NaOH)، استات روی دی‌هیدرات ($(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$) و D-فروکتوز است.

سنتز نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) و تهیه نانوکود ZnO/SiO_2

برای سنتز نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) از روش کلاسیک استوبر استفاده شد (Stöber et al., 1968). بدین منظور، ۷۴ میلی لیتر اتانول ۹۶ درصد، ۱۰ میلی لیتر آب دیونیزه و $3/14$ میلی لیتر محلول آمونیاک ۲۵ درصد در یک بالن ریخته و مخلوط حاصل در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه به‌صورت یکنواخت همزده شد. سپس ۶ میلی لیتر تترا اتیل اورتوسیلیکات (TEOS) سریع به مخلوط افزوده شد. واکنش در همان دما به مدت ۱ ساعت تحت هم‌زدن ادامه یافت تا تشکیل نانوذرات SiO_2 انجام شد. پس از پایان واکنش، سوسپانسیون حاصل در سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. رسوب جمع‌آوری شده چندین بار با اتانول ۹۶ درصد شستشو داده شد و در نهایت در آن ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت خشک گردید. برای تهیه این نانوکود از روش سنتز حالت جامد استفاده شد. $0/3$ گرم استات روی دی‌هیدرات ($(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$) با $0/7$ گرم نانوذرات SiO_2 سنتز شده به‌طور کامل مخلوط و یکنواخت گردید. سپس مخلوط تهیه‌شده در یک بوته مناسب قرار داده شد و در کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت تکلیس شد. پس از سرد شدن نمونه در دمای محیط، جهت جلوگیری از جذب رطوبت، محصول نهایی در دسیکاتور حاوی ۵۰ گرم فسفر پنتوکسید (P_2O_5) به‌عنوان خشک‌کننده نگهداری شد.

تهیه نانوکود ZnO/CDs

برای تهیه محلول آبی نقاط کربنی (CDs)، مخلوطی از ۵ میلی لیتر D-فروکتوز (۵۰۰ میلی مولار) و ۵ میلی لیتر NaOH (۵۰۰ میلی مولار) ترکیب و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سنتز نانوساختارهای هیبرید ZnO/CDs با استفاده از روش هیدروترمال در دمای پایین انجام شد. در این فرآیند، $0/274$ گرم (۱۲۵ میلی مولار) $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ در محلول CDs، در دمای اتاق حل شد. سپس pH آن با اضافه کردن تدریجی محلول NaOH ۸ مولار، در حالی که به شدت هم زده می‌شد، روی ۱۰ تنظیم شد. مخلوط حاصل به یک راکتور هیدروترمال (اتوکلاو) ۲۰ میلی لیتری منتقل شده و به مدت ۳ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. پس از واکنش، محصول از طریق سانتریفیوژ جمع‌آوری شده، چندین بار با آب دیونیزه شسته شده تا ناخالصی‌ها حذف شوند و به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شد (Bozetine et al., 2016).

شناسایی نانوکودهای سنتز شده (ZnO/CDs و ZnO/SiO_2)

برای بررسی ساختار شیمیایی نمونه‌ها، آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) با مشخصات دستگاه (PerkinElmer، Scientific Thermo، ساخت آمریکا) انجام شد. مقدار مناسبی از نمونه‌های ZnO/SiO_2 و ZnO/CDs تهیه شده با پتاسیم برمید خشک (KBr) آسیاب شده و قرص KBr به روش فشاری تهیه گردید. طیف‌های FT-IR در محدوده عدد موج ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ سانتیمتر معکوس (cm^{-1}) ثبت شدند. به‌منظور بررسی مورفولوژی سطحی کودهای ZnO/SiO_2 و ZnO/CDs ، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3، ساخت شرکت TESCAN، جمهوری چک استفاده شد. نمونه‌ها پس از قرارگیری روی نوار کربنی رسانا

در شرایط خلأ تصویربرداری شدند. این روش تصویربرداری با وضوح بالا امکان مشاهده دقیق ساختار، شکل ذرات و ویژگی‌های سطحی نمونه‌ها را فراهم می‌کند. تصویربرداری در ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ کیلوولت انجام شد. همچنین به منظور تعیین ترکیب عنصری و انجام آنالیز نیمه کمی عناصر موجود در نمونه‌های کود تهیه شده، از طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) متصل به میکروسکوپ FESEM استفاده شد. طیف‌های EDS از چندین ناحیه و نقطه منتخب بر روی سطح نمونه‌ها ثبت گردید. اندازه هیدرودینامیکی ذرات و توزیع اندازه از نمونه‌های ZnO/SiO₂ و ZnO/CDs با روش پراکندگی نور دینامیک (DLS) اندازه‌گیری شد. برای این منظور، مقدار مشخصی از هر نمونه در آب دیونیزه (حلال مورد استفاده) پراکنده گردید و جهت دستیابی به سوسپانسیون یکنواخت، پیش از اندازه‌گیری تحت فراصوت قرار گرفت. سپس محلول تهیه شده درون کووت‌های مخصوص تزریق و اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق انجام شد. نتایج به صورت میانگین قطر هیدرودینامیکی گزارش گردید. به منظور ارزیابی بار سطحی و پایداری کلئیدی از نمونه‌های ZnO/SiO₂ و ZnO/CDs، پتانسیل زتا نیز اندازه‌گیری شد. در این آزمون، سوسپانسیون آماده شده در سل زتا ریخته شد و اندازه‌گیری‌ها پس از تنظیم شرایط پایدار انجام گرفت. کلیه اندازه‌گیری‌های DLS با دستگاه Zetasizer Nano ZS-90 ساخت شرکت Malvern انگلستان انجام شد. برای کمی‌سازی مقدار عنصر روی در نمونه‌های ZnO/SiO₂ و ZnO/CDs از روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES)، مدل Spectro Arcos، ساخت آلمان استفاده شد. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، حدود ۲ میلی‌گرم از هر نمونه در ۵ میلی‌لیتر از اسید کلریدریک ۳ مولار حل شد و سپس با آب دیونیزه به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسید و برای اندازه‌گیری ICP-OES مورد استفاده قرار گرفت.

خواص شیمیایی خاک

نمونه‌های خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری منطقه انزل ارومیه-ایران با کمبود شدید روی (جدول ۱)، به منظور بررسی تاثیر منابع کودی روی بر برخی ویژگی‌های ارقام گندم طرح، جمع‌آوری شدند. نمونه‌ها پس از خشک شدن در هوای آزاد، با استفاده از الک ۲ میلی‌متری الک شد و خواص فیزیکوشیمیایی خاک در آزمایشگاه طبق جدول ۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

جدول ۱. خواص فیزیکوشیمیایی نمونه خاک

ارجاعات به روش اندازه‌گیری	مقدار	ویژگی
(Roades, 1996)	0.91	EC (dS m ⁻¹)
(Thomas, 1996)	7.69	pH
	166	K _{ava} (mgkg ⁻¹)
(Ben, 1954)	1.55	P _{ava} (mgkg ⁻¹)
(Buyoucos, 1962)	S-C-L	Texture
(Joepert and Suarez, 1996)	14.63	CaCO ₃ (%)
(Lindsay and Norvell, 1978)	0.2	DTPA-Zn (mgkg ⁻¹)
"	4.37	DTPA-Fe (mgkg ⁻¹)
"	2.71	DTPA-Mn (mgkg ⁻¹)
"	0.56	DTPA-Cu (mgkg ⁻¹)
(Walkley and Black, 1934)	0.53	Organic carbon (%)
(Bremner, 1965)	0.07	Total nitrogen (%)

بررسی آزادسازی روی از نانوحامل‌ها در خاک

آزمایش آنکوباسیون خاک (مشخصات خاک در جدول ۱) برای ارزیابی ویژگی آزادسازی آهسته Zn²⁺ از منابع کودی طرح با تیمارهای: ZnSO₄، ZnO/SiO₂ و ZnO/CDs در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش، ۰/۲ میلی‌گرم از منابع مختلف کودی روی به ۱۰۰ گرم خاک (۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) موجود در لیوان‌های پلاستیکی افزوده شد. رطوبت خاک در طول دوره آزمایش، در سطح ۷۰ درصد ظرفیت زراعی با استفاده از آب مقطر حفظ شد. نمونه‌ها در شرایط تاریکی و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌برداری از خاک در فواصل زمانی ۰، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ روز پس از آغاز آنکوباسیون انجام شد. نمونه‌ها پس از برداشت، در هوای آزاد خشک شدند. غلظت روی قابل دسترس با استفاده محلول استخراج کننده DTPA-TEA تعیین و سپس مقدار روی استخراج شده به وسیله طیف‌سنجی جذب اتمی (Lindsay and Norvell, 1978) اندازه‌گیری شد.

مطالعات کشت گلخانه‌ای

این تحقیق در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، در ۱۱ کیلومتری شمال غربی ارومیه به طول جغرافیایی: 0497924 و عرض جغرافیایی: 4167778، با ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا، در پاییز و زمستان سال ۱۴۰۲ اجرا شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب

طرح کاملاً تصادفی به منظور ارزیابی تاثیر سه منبع کود روی ZnO/SiO_2 و ZnO/CDs و $ZnSO_4$ با دو شیوه کاربرد (خاکی و محلول پاشی) بر برخی ویژگی‌های کیفی چهار رقم گندم بومی منطقه (حیدری، پیشگام، میهن و حیران؛ تهیه شده از مرکز تحقیقات کشاورزی استان آذربایجان غربی) با هفت تیمار و سه تکرار انجام شد. هر گلدان با ۸ کیلوگرم خاک با کمبود شدید روی (ماهیت آهکی خاک استان) پر شد. قبل از کاشت بذرها، N-P-K مورد نیاز خاک طبق توصیه کودی برای هر گلدان؛ از منابع اوره، سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم به ترتیب به غلظت ۱۰۰، ۳۰ و ۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک رسید. تیمار اول؛ نمونه کنترلی (عدم استفاده از روی)؛ تیمار دوم؛ مصرف خاکی روی از منبع $ZnSO_4$ قبل از کاشت؛ تیمار سوم؛ برگ پاشی روی از منبع $ZnSO_4$ ؛ تیمار چهارم؛ مصرف خاکی روی از منبع ZnO/CDs قبل از کاشت؛ تیمار پنجم؛ برگ پاشی روی از منبع ZnO/CDs ؛ تیمار ششم؛ مصرف خاکی روی از منبع ZnO/SiO_2 قبل از کاشت؛ تیمار هفتم؛ برگ پاشی روی از منبع ZnO/SiO_2 . میزان روی مصرفی در کاربرد خاکی ۵ میلی گرم روی بر کیلوگرم خاک بود و برای محلول پاشی غلظت ۰/۰۲ درصد وزنی/حجمی، در مراحل (۱) ساقه روی، (۲) قبل از ظهور سنبله و (۳) چین پرشدن دانه، (هر مرحله ۳۰ میلی لیتر) در نظر گرفته شد. ریزمغذی‌ها نیز با محلول هوگلند طی مراحل رشد در سه مرحله تأمین شدند (Hoagland et al., 1938). سپس ۱۰ بذر استریل در هر گلدان کاشته شد. پس از جوانه زنی، تعداد گیاهان در هر گلدان، با تکنیک‌سازی نهال‌های اضافی به هفت کاهش یافت. در طول فصل رشد، آبیاری با استفاده از آب مقطر در حد ظرفیت زراعی انجام شد. همه گندم‌ها پس از رشد نهایی (۱۷۰ روز پس از کشت) به منظور تعیین پارامترهای مورد نظر؛ عملکرد و غلظت روی دانه و اندام‌هوایی برداشت شدند. پارامتر بازیافت روی تعیین گردید. در نمونه‌های گیاهی، غلظت‌های روی به روش هضم خشک (Chapman and Pratt, 1961) و با استفاده از طیف‌سنج جذب اتمی تعیین شد.

کارایی بازیافت روی

بازیابی روی (Zinc recovery) مقدار افزایش جذب روی به ازاء واحد مصرف کود روی را نشان می‌دهد و تحت تأثیر نرخ، منبع و روش کاربرد روی قرار دارد (Montoya et al., 2020). کارایی بازیافت روی شاخصی مهم در ارزیابی توانایی گیاه برای جذب، انتقال و استفاده مؤثر از روی تأمین‌شده از منابع کودی است (Marschner, 2012; Cakmak, 2008). توانایی ارقام مختلف گندم در تجمع روی در دو حالت تغذیه با و بدون روی، متفاوت است و مقادیر کل روی جذب شده در اندام‌هوایی بهتر از غلظت روی می‌تواند اختلاف بین ژنوتیپ‌ها را نشان دهد (Khoshgoftar et al., 2006). بر این اساس شاخص‌های مختلفی برای برآورد روی کارایی توسط پژوهشگران استفاده شده است؛ از جمله تفاوت جذب نمونه تیمار شده و کنترلی تقسیم بر میزان روی مصرفی (Lu et al., 2012; Montoya et al., 2020). در این تحقیق، برای تعیین کارایی بازیافت روی با شیوه کاربرد خاکی از رابطه زیر استفاده گردید:

$$ZnRE = \frac{Zn\ Ut - Zn\ Uc}{Zn\ rate} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

مقدار ZnRE کارایی بازیافت روی در اندام‌هوایی (مجموع دانه و شاخساره)، Zn Ut و Zn Uc مقدار روی جذب شده در اندام‌هوایی (میلی گرم بر گلدان) به ترتیب در شرایط کاربرد منابع کودی روی و شرایط کنترلی و Zn rate میزان مصرف روی (۴۰ میلی گرم بر گلدان در مصرف خاکی) است. مقدار جذب روی بر اساس غلظت روی (میلی گرم بر کیلوگرم) و وزن خشک اندام‌هوایی (گرم در گلدان) محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

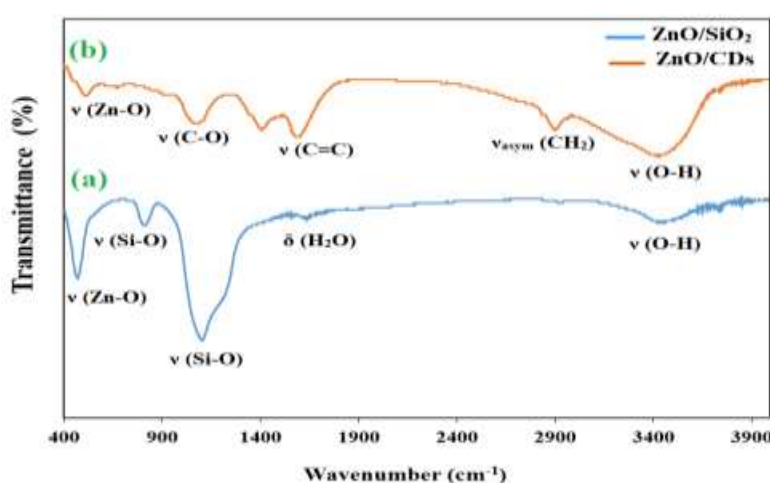
نرم‌افزار SAS برای تجزیه و تحلیل‌های آماری و مدل‌های خطی عمومی (GLM) برای تجزیه و تحلیل واریانس اثرات اصلی (منابع کودی و ارقام گندم) و تعاملات آن‌ها استفاده شد. میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح معنی‌داری $P < 0.01$ مقایسه شدند.

یافته‌های پژوهش

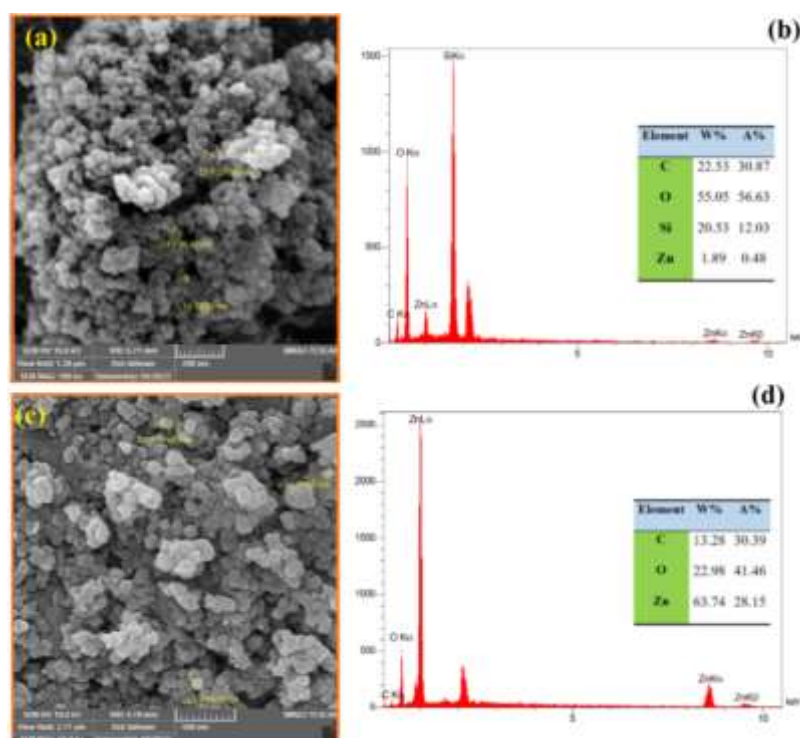
ویژگی‌های ساختاری نانوکودهای سنتز شده

در شکل ۱ طیف FT-IR نانوکودهای ZnO/CDs و ZnO/SiO_2 ارائه شده است. باند پهن مشاهده شده در ناحیه عدد موجی 3448 cm^{-1} به ارتعاش کششی گروه OH مولکول آب مربوط بوده و ارتعاش خمشی مولکول آب در محدوده عدد موجی 1647 cm^{-1} مشاهده شد. ارتعاشاتی که در گستره 812 cm^{-1} و 470 cm^{-1} ظاهر شد، به ترتیب مربوط به ارتعاش‌های کششی Si-O و Zn-O می‌باشد که تشکیل ساختار نانوکامپوزیتی ZnO/SiO_2 را تأیید می‌کنند. شکل ۲ و طیف EDS حضور عناصر Zn، Si و O را در ترکیب نانوکود ZnO/SiO_2 تأیید می‌کند. افزون بر این، به منظور تعیین دقیق‌تر مقدار عنصر روی، آنالیز ICP-OES انجام شد که نتایج آن نشان داد نانوکود سنتز شده حاوی حدود

۱۶ درصد وزنی عنصر روی بود. به‌منظور بررسی مورفولوژی نانوکود ZnO/SiO₂، تصاویر FESEM مورد تحلیل قرار گرفت. تصاویر نشان داد که ذرات عمدتاً کروی بوده و مقدار کمی تجمع ذرات در آن‌ها مشاهده شده است (شکل ۲-ا). براساس نتایج DLS نیز، اندازه ذرات در نانوکود ZnO/SiO₂ حدود ۱۲۰ نانومتر به‌دست آمد. در نانوکود ZnO/CDs، ارتعاش کششی OH مولکول آب به‌صورت نواری پهن در محدوده‌ی عدد موجی ۳۴۲۴ cm⁻¹ و باند مشاهده‌شده در عدد موجی ۲۹۲۹ cm⁻¹ به ارتعاش کششی نامتقارن گروه متیلن (CH₂) مربوط است. ارتعاشات کششی پیوند کربن-کربن (C=C) و کربن-اکسیژن (C-O) و روی-اکسیژن (Zn-O) به ترتیب در عدددهای موجی ۱۵۹۰^۱، ۱۰۸۱ cm⁻¹ و ۴۷۴ cm⁻¹ ظاهر شدند. حضور این باندها تشکیل موفق ساختار نانوکامپوزیتی ZnO/CDs را تأیید می‌کند. طیف EDS نشان داد که نانوکود ZnO/CDs از عناصر Zn، C و O تشکیل شده است. علاوه‌براین، به‌منظور تعیین دقیق‌تر میزان روی در ساختار نانوکود ZnO/CD، آنالیز ICP-OES انجام شد که نتایج، حاکی از وجود حدود ۱۴ درصد وزنی عنصر روی در نمونه سنتز شده بود. بررسی مورفولوژی نانوکود ZnO/CDs با تصاویر FESEM مطابق شکل ۲-ب، نشان داد ذرات عمدتاً دارای مورفولوژی خوشه‌ای بوده و میزان اندکی تجمع ذرات وجود داشت. براساس نتایج DLS، اندازه ذرات در نانوکود ZnO/CDs حدود ۱۱۴ نانومتر به‌دست آمد.



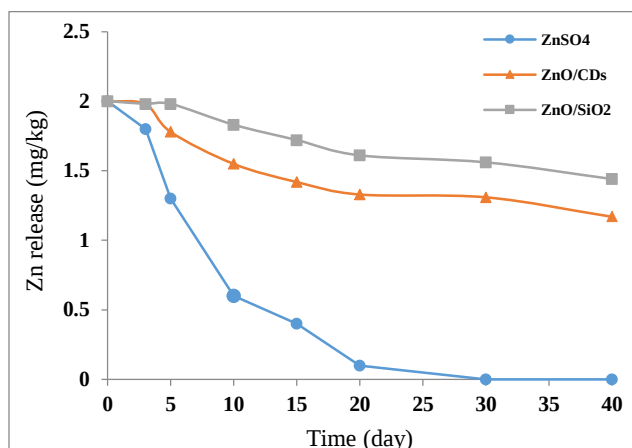
شکل ۱. طیف‌های FT-IR مربوط به (a) نانوذرات ZnO/SiO₂ و (b) نانوذرات ZnO/CDs



شکل ۲. تصاویر FESEM و آنالیز EDS مربوط به (a، b) نانوکامپوزیت‌های ZnO/SiO₂ و (c، d) نانوکامپوزیت‌های ZnO/CDs.

بررسی فراهمی روی در کاربرد ترکیبات کودی سنتز شده طی زمان

الگوی تغییرات فراهمی روی از کودهای $ZnSO_4$ ، ZnO/SiO_2 و ZnO/CDs در خاک، در شکل ۳ ارائه شده است. مطابق شکل، منابع کودی مورد بررسی، الگوی متفاوتی از فراهمی روی در خاک نشان دادند. غلظت اولیه روی در تیمارها، ۲ میلی گرم بر کیلوگرم در نظر گرفته شده بود. براساس نتایج، تمام فراهمی روی از منبع $ZnSO_4$ طی ۳۰ تقریباً به صفر رسید. در حالی که فراهمی Zn^{2+} از منابع ZnO/CDs و ZnO/SiO_2 به صورت کاملاً تدریجی و تا روز ۴۰ بصورت کاهشی ادامه داشت تا به ترتیب به غلظت‌های ۱/۴۴ و ۱/۱۷ میلی گرم بر کیلوگرم رسید. این نتایج نشان داد که استفاده از نانوحامل‌هایی نظیر مزوپور سیلیکا و نقاط کربنی می‌تواند منجر به رهایش کنترل شده یون Zn^{2+} گشته و پتانسیل بالایی در بهبود کارایی مصرف کودهای روی در خاک را فراهم آورد.



شکل ۳. الگوهای فراهمی روی از منابع مختلف کود روی ZnO/SiO_2 و ZnO/CDs و $ZnSO_4$. نتایج نشان دهنده میانگین مقادیر سه تکرار است.

پاسخ‌های گیاهی ژنوتیپ‌های مختلف گندم به مصرف منابع روی

اثر نانوحامل و ژنوتیپ بر غلظت روی دانه

اثر منابع کودی و شیوه مصرف آن‌ها بر غلظت روی دانه، در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) اثرات اصلی منبع کودی، رقم گندم و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر غلظت روی دانه در سطح یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$). در شرایط کمبود روی، غلظت روی دانه در ارقام تقریباً مشابه بوده و در دامنه ۸ تا ۹/۹ میلی گرم بر کیلوگرم قرار داشت. کاربرد منابع مختلف روی موجب افزایش معنی‌دار غلظت روی دانه‌ها نسبت به تیمار کنترلی شد. افزایش غلظت روی دانه‌ها در مصرف خاکی نسبت به شاهد بین ۳۴ تا ۲۵۰ درصد و در محلول‌پاشی بین ۷۴ تا ۲۹۳ درصد بود. محلول‌پاشی در مقایسه با مصرف خاکی اثربخشی بیشتری در بهبود غلظت روی دانه ارقام گندم نشان داد. این تفاوت در اثرگذاری می‌تواند ناشی از دسترسی مستقیم‌تر عنصر روی در روش محلول‌پاشی باشد که منجر به جذب مؤثرتر از طریق برگ‌ها و انتقال سریع‌تر به اندام‌های زایشی می‌شود. هرچند تفاوت اثرگذاری محلول‌پاشی با مصرف خاکی در نانوکودها، فاحش نبود که احتمالاً به آزادسازی تدریجی و جذب پایدارتر عنصر روی مربوط شده و نشان‌دهنده بهبود کارایی نانوکودها به دلیل آزادسازی کنترل شده عنصر روی بود. نانوکودهای مبتنی بر ZnO ، به‌ویژه در بستر SiO_2 ، موجب افزایش معنی‌دار شاخص مورد بررسی در تمامی ارقام گندم شدند. این افزایش تا حدود چهار برابر نسبت به نمونه‌های کنترلی و بیش از دو برابر نسبت به $ZnSO_4$ بود. بیشترین غلظت روی دانه‌ها با محلول‌پاشی و سپس مصرف خاکی نانوکود ZnO/SiO_2 در ارقام حیران و حیدری (هر دو به یک میزان) به ترتیب ۳۸ و ۳۵ میلی گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. طبق نتایج در همه تیمارها، غلظت روی دانه‌های ارقام حیران و حیدری به‌طور معناداری بیشتر از ارقام میهن و پیشگام بود (جدول ۲). پاسخ متفاوت ارقام بیانگر وجود تعامل ژنوتیپ $\times$ منبع کودی بود، عبارتی این تفاوت‌ها ممکن است ناشی از اختلافات ژنوتیپی در جذب و استفاده از عناصر غذایی باشد. مطالعات پیشین نیز بر وجود تفاوت در غلظت روی دانه در ژنوتیپ‌های گندم تأکید داشتند (Kalayci et al., 1999; Singh et al., 2017). افزایش غلظت روی دانه در تمامی ارقام، با تیمارهای نانوکودی، با نتایج حاصل از تحقیق Alikhani et al (۲۰۲۳) در استفاده از نانوکربن‌دات‌ها و Adhikary et al (۲۰۲۰) در کاربرد نانواکسیدروی همخوانی داشت.

جدول ۲. تاثیر منابع مختلف کودی (ZnO/SiO_2 , ZnO/CDs , $ZnSO_4$) با دو شیوه مصرف بر غلظت روی و عملکرد در دانه چهار رقم گندم

ژنوتیپ	منبع کودی	شیوه مصرف	غلظت روی (میلی گرم بر کیلوگرم)			
			عملکرد (گرم بر گلدان)		غلظت روی (میلی گرم بر کیلوگرم)	
			شاخصاره	دانه	شاخصاره	دانه
پیشگام	کنترلی	کنترلی	۹/۵۹ ^{mn}	۱۱/۱۳ ^{ijk}	۱۸ ⁿ	۹/۹ ^{im}
		مصرف خاکی	۱۰/۷۸ ^l	۱۱/۸۳ ^{hi}	۲۶/۱ ^l	۱۳ ^j
		محلول پاشی	۱۱/۹۷ ^j	۱۵/۴ ^g	۳۶/۵ ^j	۱۹/۹ ^h
		مصرف خاکی	۱۴/۰۷ ^{efg}	۱۷/۳۹ ^{de}	۴۴/۲ ^e	۲۸/۸ ^e
		محلول پاشی	۱۴/۱۴ ^{ef}	۱۸/۶۲ ^c	۴۵/۶ ^d	۳۲/۵ ^c
		مصرف خاکی	۱۵/۸۹ ^b	۲۱/۲۱ ^a	۵۳ ^b	۳۵/۱ ^b
	ZnSO ₄	محلول پاشی	۱۶/۵۲ ^a	۲۱/۷۷ ^a	۵۶/۱ ^a	۳۷/۶ ^a
		کنترلی	۸/۴۷ ^o	۷/۷۳ ^m	۱۶ ^o	۸ ⁿ
		مصرف خاکی	۹/۶۶ ^{mn}	۱۰/۵۷ ^{kl}	۱۹/۱ ⁿ	۱۰/۸ ^l
		محلول پاشی	۱۱/۰۶ ^{kl}	۱۳/۴۴ ^h	۳۷/۷ ^k	۱۶/۴ ^j
		مصرف خاکی	۱۲/۶ ⁱ	۱۵/۳۳ ^f	۳۴/۵ ^j	۲۲/۹ ^g
		محلول پاشی	۱۳/۵۱ ^{gh}	۱۶/۶۶ ^e	۳۵/۸ ⁱ	۲۵/۶ ^f
پیشگام	ZnO/CDs	مصرف خاکی	۱۴/۶۳ ^{de}	۱۸/۷۶ ^c	۴۱/۲۲ ^g	۲۷ ^e
		محلول پاشی	۱۵/۲۶ ^c	۱۷/۹۷ ^{bc}	۴۲/۴ ^{fg}	۳۲/۱ ^c
	ZnO/SiO ₂	کنترلی	۹/۱ ⁿ	۱۰/۳۹ ^{lm}	۱۶/۵ ^o	۸/۵ ⁿ
		مصرف خاکی	۹/۹۴ ^m	۱۱/۱۳ ^{ijk}	۲۰/۷ ^m	۱۱/۸ ^k
		محلول پاشی	۱۱/۴۱ ^k	۱۲/۷۹ ^h	۲۸/۱ ^k	۱۸/۸ ⁱ
		مصرف خاکی	۱۳/۴۴ ^h	۱۵/۸۹ ^f	۳۶ ⁱ	۲۴/۸ ^f
پیشگام	ZnO/CDs	محلول پاشی	۱۴ ^{efgh}	۱۷/۵۷ ^d	۳۸/۷ ^h	۲۷/۷ ^e
		مصرف خاکی	۱۵/۱۲ ^{cd}	۱۹/۶ ^b	۴۲/۸ ^f	۲۹/۴ ^d
	ZnO/SiO ₂	محلول پاشی	۱۵/۸۲ ^b	۲۱/۱۴ ^a	۴۳/۴ ^{ef}	۳۲/۶ ^c
		کنترلی	۱۰/۰۱ ^m	۱۰/۹۹ ^{jk}	۱۸ ⁿ	۹/۷ ^m
		مصرف خاکی	۱۰/۶۴ ^l	۱۱/۶۹ ^{hij}	۲۳/۲ ^l	۱۳ ^j
		محلول پاشی	۱۲/۳۲ ^{ij}	۱۵/۶۱ ^g	۳۳/۵ ^j	۲۱/۳ ^h
پیشگام	ZnO/CDs	مصرف خاکی	۱۳/۹۳ ^{fgh}	۱۷/۵۷ ^d	۴۴/۳ ^e	۲۷ ^e
		محلول پاشی	۱۴/۴۹ ^{ef}	۱۸/۹ ^{bc}	۴۷/۱ ^c	۳۲/۹ ^c
		مصرف خاکی	۱۵/۹۶ ^b	۲۱/۱۴ ^a	۵۳ ^b	۳۵/۲ ^b
	ZnO/SiO ₂	محلول پاشی	۱۶/۵۲ ^a	۲۱/۷ ^a	۵۶/۲ ^a	۳۷/۷ ^a

جدول ۳. جدول تجزیه واریانس اثر منابع کودی (کاربرد خاکی و محلولپاشی) و ارقام گندم بر برخی ویژگی‌ها و کارایی بازیافت روی چهار رقم گندم

درجه		میانگین مربعات				درجه	
منابع تغییرات	آزادی	غلظت روی دانه	غلظت روی اندام‌هوایی	عملکرد دانه	وزن خشک اندام‌هوایی	منابع تغییرات	آزادی
رقم	۳	۱۱۹/۳**	۳۲۱/۸**	۰/۴**	۰/۱۴۴**	رقم	۳
تیمار کودی	۶	۱۲۷۴/۷**	۱۸۲۸/۰**	۴/۳۵**	۱/۶۱**	تیمار کودی	۲
رقم × تیمار کودی	۱۸	۴/۹**	۱۸/۰**	۰/۰۰۸*	۰/۰۰۱ ^{ns}	رقم × تیمار کودی	۶
خطا	۵۴	۰/۳	۰/۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	خطا	۲۴

اثر نانوحامل و ژنوتیپ بر غلظت روی شاخصاره

تأثیر نوع کود با روش مصرف آن‌ها و رقم گندم بر غلظت روی شاخصاره در جدول ۳ ارائه شده است ($p < 0.01$). در شرایط کمبود روی، اختلاف غلظت روی شاخصاره ارقام مختلف گندم، هم‌راستا با تحقیق Cakmak et al (۱۹۹۸)، کم و میزان آن در محدوده ۱۶ تا ۱۷/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. پتانسیل متفاوت منابع روی مصرفی و اختلافات ژنوتیپی بین ارقام گندم، دامنه متفاوتی از افزایش غلظت روی در شاخصاره را رقم زد. در این راستا، استفاده از نانوکودها منجر به افزایش قابل توجه غلظت روی شاخصاره همه ارقام گندم نسبت به نمونه‌های



کنترلی شد و محلول پاشی ZnO/SiO_2 ، غلظت روی شاخساره ارقام گندم را به بیشترین میزان در بازه ۴۲/۴ تا ۵۶/۲ میلی گرم بر کیلوگرمی رساند. ولیکن در همه تیمارها، غلظت روی در شاخساره ارقام حیران و حیدری بیشتر از ارقام میهن و پیشگام بود (جدول ۲). این تفاوتها می تواند به ویژگی های فیزیولوژیکی و ریشه ای ارقام، از جمله فعالیت ناقل های عناصر کم مصرف و کارایی انتقال در آوندها، مرتبط باشد. این شاخص با محلول پاشی، سپس کاربرد خاکی ZnO/SiO_2 برای ارقام حیران و حیدری، به ترتیب ۵۶ و ۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم (هر دو به یک میزان) مشاهده شد که در مقایسه با نمونه کنترلی، افزایش ۲۱۱ و ۱۹۴ درصدی نشان داد که خود حاکی از توان جذب بالای روی، در این ارقام بود. پاسخ قوی تر این ارقام به نانوکودها نشان داد اثر متقابل رقم $\times$ نوع کود نقش مهمی در بهینه سازی مدیریت تغذیه روی دارد. افزایش غلظت روی شاخساره، با نتایج Jalal et al (۲۰۲۳) در محلول پاشی با نانوکودهای روی (۲۹/۳ تا ۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، تحقیق Mazhar et al (۲۰۲۳) در استفاده نانو اکسید روی (۴۶/۶ میلی گرم بر کیلوگرم) و Singh et al (۲۰۲۲) در استفاده از $N+P+K$ به همراه نانو روی (۳/۳۴ میلی گرم بر ۱۰۰ گرم) همسو بود. روش مصرف نانوکودها تفاوت معنی داری در غلظت روی شاخساره ایجاد نکرد. ولیکن در مورد $ZnSO_4$ ، روش مصرف، تعیین کننده بود. محلول پاشی $ZnSO_4$ در افزایش غلظت روی شاخساره، کارآمدتر از مصرف خاکی آن عمل کرد، که بیانگر محدودیت جذب روی از خاک به دلیل تثبیت شیمیایی آن بود. در مقابل، اختلاف بین اثربخشی محلول پاشی و مصرف خاکی در نانوکودها اندک بود که نشان داد این کودها حتی در مصرف خاکی نیز از کارایی بالایی برخوردارند و توانستند بر محدودیت های رایج جذب روی در خاک های آهکی غلبه کنند.

اثر نانوحامل و ژنوتیپ بر عملکرد دانه

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۲، منابع مختلف تأمین روی تأثیر معنی داری بر عملکرد دانه گندم در تمامی ارقام مورد بررسی داشتند. این افزایش عملکرد، هم راستا با افزایش جذب روی مشاهده شد. محلول پاشی ZnO/SiO_2 و ZnO/CDs ، منجر به افزایش ۱/۷۴ و ۱/۵۱ برابری عملکرد دانه نسبت به نمونه های کنترلی شد. با وجود تنوع ژنوتیپی، ارقام حیران و حیدری بهترین پاسخ به منابع کودی و بالاترین پتانسیل عملکرد دانه را نشان دادند. رقم میهن، گرچه بالاترین افزایش عملکرد دانه را نداشت، ولی بالاترین شدت پاسخ به تیمارها و دامنه افزایش عملکرد نسبت به نمونه کنترلی را در میان ارقام با منابع کودی بخود اختصاص داد که نشان دهنده پاسخ دهی بیشتر این رقم به رفع کمبود روی بود. این، در حالی ست که عملکرد مطلق بالای رقم حیدری، بیانگر پتانسیل ژنتیکی بالاتر این رقم در تولید دانه بود. این نتایج بر اهمیت اثر متقابل رقم $\times$ نوع کود در دستیابی به حداکثر عملکرد دانه تأکید دارد. نانوکود ZnO/SiO_2 اثر افزایشی بیشتری نسبت به ZnO/CDs بر عملکرد دانه نشان داد که می تواند ناشی از حضور SiO_2 در ساختار این نانوکود و نقش آن در بهبود کارایی مصرف عناصر غذایی و افزایش تحمل گیاه به تنش های فیزیولوژیک باشد. این افزایش با نتایج Azam et al (۲۰۲۲)، Mahmood et al (۲۰۲۴) و یافته های Singh et al (۲۰۲۱) که با مصرف خاکی نانوذرات اکسید روی با دوز ۵ میلی گرم روی بر کیلوگرم خاک در زمان کاشت بهبود قابل توجهی در عملکرد دانه گزارش کردند، همخوانی داشت. تغییر در شیوه کاربرد نانوکودها تأثیر معنی داری بر عملکرد دانه ارقام نداشت، در حالی که در $ZnSO_4$ محلول پاشی نسبت به مصرف خاکی کارآمدتر بود.

اثر نانوحامل و ژنوتیپ بر وزن خشک شاخساره

نتایج نشان داد که اثرات اصلی منابع کود و ارقام گندم بر وزن خشک شاخساره ارقام گندم معنادار بود ($p < 0.01$)، ولی اثرات متقابل آن ها بر هم معنی دار نبود (جدول ۳). در شرایط کمبود روی، وزن خشک شاخساره تمامی ارقام بسیار کم و دامنه آن از ۸/۴۷ تا ۱۰/۰۱ گرم بر گلدان متغیر بود. ماده خشک شاخساره در پاسخ به کاربرد روی، به طور معنی داری افزایش یافت. سهم نانوکود ZnO/SiO_2 ، در این افزایش، بیشترین بود (جدول ۲)، که نشان دهنده نقش مؤثر این نانوکود در ارتقای زیست توده گیاه بود. ارقام حیدری و حیران با تولید ۱۶/۵۲ گرم بر گلدان (هر دو به یک میزان) بیشترین ماده خشک شاخساره را با محلول پاشی ZnO/SiO_2 تولید کردند. این افزایش در مقایسه با نمونه کنترلی برای رقم حیدری ۷۲ درصد و برای رقم حیران ۶۵ درصد بود. واکنش متفاوت ارقام گندم به تیمارهای کودی می تواند نشان دهنده وجود تنوع ژنتیکی در ظرفیت تولید زیست توده و بهره وری فتوسنتزی ارقام در پاسخ به کاربرد روی باشد. افزایش وزن خشک شاخساره در تیمارهای نانوکودی را می توان به بهبود وضعیت تغذیه ای روی و به تبع آن، افزایش کارایی فتوسنتز و تحریک تقسیم و طول شدن سلولی نسبت داد. با توجه به نقش کلیدی روی در تنظیم هورمون های رشدی، تقسیم سلولی و سنتز مواد و تأمین پایدار آن از طریق نانوکودها، افزایش تجمع ماده خشک شاخساره دور از انتظار نبود. همچنین اثر هم افزایی SiO_2 در افزایش رشد ساقه، باعث بهبود استحکام بافت ها ضمن افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی شد. وجود سیلیس جرم واحد طول ساقه را افزایش داده و این افزایش سبب مقاومت گیاه به

ورس می‌شود (Murillo-Amador et al., 2006). تاثیر مثبت نانوذرات سیلیکا بر افزایش عملکرد اندام‌هوایی با تحقیقات Adil et al (۲۰۲۲) و Abd-Elzaher et al (۲۰۲۵) هم‌راستا بود. کود ZnO/CDs نیز نتایج قابل قبولی ارائه داد با این ویژگی که تغییر در شیوه مصرف نانوکودها، در عملکرد شاخساره تفاوت چندانی ایجاد نکرد و کارایی مصرف خاکی تقریباً معادل محلول‌پاشی بود. این موضوع نشان‌دهنده جذب پایدار و تدریجی روی از نانوکودها بود. کود مرسوم $ZnSO_4$ ، وزن خشک کمتری نسبت به دو کود دیگر به‌ویژه در شیوه مصرف خاکی (به دلیل تثبیت روی در خاک و ایجاد محدودیت جذب) تولید کرد. محلول‌پاشی $ZnSO_4$ نسبت به مصرف خاکی در افزایش این شاخص مؤثرتر بود.

تعامل نانوحامل $\times$ ژنوتیپ بر کارایی بازیافت روی

نتایج جدول ۳ نشان داد کارایی بازیافت روی در مصرف خاکی منابع کودی طرح به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر ژنوتیپ و نوع کود آن قرار داشت. مصرف $ZnSO_4$ منجر به کمترین مقدار کارایی بازیافت روی در اندام‌هوایی و ZnO/SiO₂ مؤثرترین تیمار در افزایش این شاخص در تمامی ارقام بود. بدین معنی که هر چهار رقم طرح، با مصرف ZnO/SiO₂ بالاترین کارایی بازیافت روی را نشان دادند. بازیافت روی از منابع کود اعمالی به خاک متفاوت بود. بر این اساس نانوکودهای ZnO/CDs و ZnO/SiO₂ با تداوم آزادسازی روی و فراهمی شرایط دسترسی پایدار گیاه به این عنصر در مقایسه با شرایط تثبیت آن در خاک با کود $ZnSO_4$ ، افزایش چند برابری کارایی را نشان دادند (جدول ۴). در تحقیق Zulfiqar et al (۲۰۲۰) نیز کارایی بازیافت برای $ZnSO_4$ ، ۱/۲۶ - ۱/۳۹٪ و Kumar et al (۲۰۱۸) مقدار آن ۲/۲۵ - ۲/۳٪ گزارش شد. انتخاب ژنوتیپ‌های کارآمد گیاه در مقایسه‌های روی کارایی مهم است. اگرچه گندم ذاتا روی کارایی پایینی دارد، اما تفاوت‌های مهمی در روی کارایی میان ارقام گندم‌های نان وجود دارد (Dapkekar et al., 2018). به‌طور کلی، ارقام حیدری و حیران با داشتن کارایی بهتر در جذب روی، به‌عنوان ژنوتیپ‌های با کارایی بازیافت بیشتر روی نسبت به ارقام پیشگام و میهن شناسایی شدند. برتری این ارقام در کارایی بازیافت، احتمالاً به ویژگی‌های ژنتیکی و توانایی متفاوت آن‌ها در جذب و استفاده از روی توسط ریشه‌ها و ناقل‌های این ارقام، کارایی بالاتر در انتقال آوندی و تخصیص بهتر این عنصر به اندام‌های زایشی باز می‌گردد. بر این اساس کارایی جذب و استفاده از روی صرفاً تابع فراهمی عنصر در خاک نبوده، بلکه به ظرفیت ژنتیکی گیاه برای جذب، انتقال و تخصیص روی نیز وابسته است. کارایی بالاتر نانوکودها می‌تواند با رهایش تدریجی و زیست‌فراهمی بالاتر روی متناسب با نیاز گیاه در حال رشد، جذب پایدارتر و کنترل‌شده‌تری برای گیاه مرتبط باشد. مطالعه حاضر به‌منظور دسته‌بندی ژنوتیپ‌های با کارایی بازیافت روی بیشتر با استفاده از معیارهای عملکرد بالاتر و کارایی جذب بیشتر در شرایط کمبود روی ضمن بررسی کارایی منابع کودی طرح انجام شد. این یافته‌ها اهمیت تلفیق اصلاح نباتات با راهبردهای نوین کوددهی را برای بهینه‌سازی استفاده از منابع غذایی در گیاهان برجسته می‌سازد.

جدول ۴. مقادیر درصد کارایی بازیافت روی (Zinc recovery efficiency) در اندام‌هوایی ارقام گندم از منابع کودی در شیوه کاربرد خاکی

ارقام گندم	منابع کودی روی		
	ZnSO ₄	ZnO/CDs	ZnO/SiO ₂
حیدری	۰/۳۰ ^f	۲/۱ ^c	۳/۲۶ ^a
پیشگام	۰/۲۱ ^h	۱/۴۳ ^e	۲/۲۴ ^{bc}
میهن	۰/۲۶ ^g	۱/۶۱ ^d	۲/۴۷ ^b
حیران	۰/۳۹ ^g	۲/۰۱ ^c	۳/۲۵ ^a

بحث

تعامل میان ترکیبات مختلف مبتنی بر فلز و خاک بینش‌های ارزشمندی را در کاربردهای احتمالی آن‌ها در کشاورزی ارائه می‌دهد (Marrugo-Negrete et al., 2017). به بیان Ghasemi et al (۲۰۱۳) کمپلکس‌سازی، قابلیت تجزیه ترکیبات را کاهش داده و مدت زمان ماندگاری آن‌ها در خاک را افزایش می‌دهد. در این مطالعه، پتانسیل نانوکودهای ZnO/CDs و ZnO/SiO₂ به‌عنوان راه‌حلی نوآورانه در بهبود کارایی بازیافت روی در ارقام مختلف گندم بررسی شد. آزمایش انکوباسیون منابع روی طرح، نرخ‌های متفاوتی از فراهمی روی در خاک، طی زمان نشان دادند. سطح ویژه بالای سیلیکا (تقریباً ۱۰۰ مترمربع بر گرم) و حجم حفره‌ها (۰/۱۵ میرمکعب بر گرم) محیط مناسبی برای محبوس کردن نانوذرات ZnO فراهم کرده است و گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل در کربن‌دات‌ها با یون‌های روی تشکیل کمپلکس‌های پایدار می‌دهند (Khayal et al., 2021; Yuvaraj & Subramanian, 2021) که بر حاملیت این نانو ذرات اشاره دارد. فراهمی اولیه روی از حامل‌های نانو (ZnO/CDs و ZnO/SiO₂) در خاک برای ۱۰ روز اول سریع، اما پس از آن به‌صورت آهسته و تدریجی بود.



بطوریکه فراهمی روی خاک از غلظت ۲ میلی گرم بر کیلوگرم در نانوحامل های SiO_2 و CDs پس از ۴۰ روز، به ترتیب به ۰/۵۶ و ۰/۸۳ میلی گرم بر کیلوگرم رسید، درحالیکه برای ZnSO_4 صفر شد. پیش از این، مطالعات Kumar et al (۲۰۱۸) نیز بر فراهمی تدریجی روی از نانوالیاف کربنی در خاک تأکید داشتند. Yuvaraj و Subramanian (۲۰۲۱) در مطالعه خود با استفاده از نانوکودهای کربنی حاوی سولفات روی، فراهمی ۲/۵ میلی گرم روی پس از ۲۵ روز در خاک را مشاهده کردند. ویژگی های خاص نانوحامل ها باعث کاهش اتلاف کود و افزایش قابلیت جذب روی گیاه، حتی در خاک های با محدودیت جذب روی (آهکی) و با شیوه مصرف خاکی گردید. از مراحل فیزیولوژیکی انتقال و انباشت روی به دانه، جذب ریشه ای و انتقال از ساقه به دانه می باشد و بیشتر روی تخصیص یافته به دانه گندم ناشی از ورود روی به ساقه ها پس از گلدهی است (Garnett and Graham, 2005). در این حالت، انتقال روی از طریق آوندهای چوبی و از طریق پروتئین های پیوندی با فلز شیره انجام می شود (Page et al., 2006). رهش کند روی در نانوکودها (براساس آزمایشات انکوباسیون) همزمان با مراحل نیاز گیاه و کارایی بالای جذب و انتقال موادمغذی، غنی سازی زراعی دانه را به همراه دارد (Adhikary et al., 2020; Umar et al., 2021; Mazhar et al., 2023). همچنین، بار منفی سطح آن ها (میلی ولت $-24/88$ و ZnO/CDs و $-18/69$ و ZnO/SiO_2) به دلیل گروه های عاملی مانند C-O، Si-O و OH- می تواند حمل و نقل روی از ریشه به شاخساره گیاهان را تقویت کند (Alikhani et al., 2023). استفاده از نانوکودها در مراحل اولیه و انتهایی رشد محصولات، می تواند تأثیرگذاری بهتری در غنی سازی بیولوژیکی محصولات داشته باشد، عبارتی کاربرد نانوکود روی در مراحل رشد، خوشه دهی و پرشدن دانه های گندم می تواند توسعه دانه و غلظت روی دانه را بهبود بخشد (Jalal et al., 2022). نانوکودها در بهبود عملکرد دانه نیز از تیمارهای ZnSO_4 کارآمدتر بودند. معنی داری اثر تیمار کودی بیانگر نقش تعیین کننده منبع و روش تأمین روی در پرشدگی دانه بود. کمبود روی منجر به عقیم شدن خوشه ها، توسعه ضعیف اندام های زایشی، کاهش فتوسنتز و در نهایت کاهش عملکرد محصول می شود (Azam et al., 2022). عملکرد شاخساره در خاک های با کمبود روی، نسبت به عملکرد دانه های گندم به کوددهی روی حساس تر است (Kutman et al., 2010) که احتمالاً به دلیل عدم تعادل ناشی از کمبود روی در توسعه ارگان های زایشی است (Cakmak and Engels, 1999). با توجه به بررسی های انجام شده ورس عامل مهمی در کاهش عملکرد گندم می باشد. سیلیس موجود در ZnO/SiO_2 با ته نشین شدن در دیواره سلولی آوندچوبی؛ از فرو ریختن آوندها در شرایط ترقق زیاد جلوگیری و با استحکام ساقه موجب کاهش ورس بوته و تحمل گیاه در برابر خمیدگی می شود (Rajput et al., 2021; Verma et al., 2022). علی رغم کاربرد نرخ کمتر روی در محلول پاشی نسبت به کاربرد خاکی، موادمغذی به راحتی به گیاه منتقل می شوند (Hanwate et al., 2018). اندازه بسیار کوچک، سطح بسیار زیاد و وجود چندین سایت اتصال، نانوذرات را به عنوان نانوحامل هایی برای مولکول های فعال زیستی و غیرزیستی مطرح کرده است که می توانند به راحتی از سلول ها عبور کنند (Kwak et al., 2019) و در انتقال فلز روی از آوندهای چوبی به اندام هوایی موثر باشند (Kulikova et al., 2014). کاربرد نانوکودهای روی می تواند به افزایش تحرک روی در فلوئم و افزایش دسترسی زیستی آن در آندوسپرم گیاهان زراعی کمک کند (Ahmad et al., 2020). براساس تحقیق Doolette et al (۲۰۱۸)، روی می تواند در ۶ تا ۱۲ ساعت اول پس از محلول پاشی، به سرعت جذب و منتقل شود. این موضوع، در شرایطی که ریشه های گیاه به دلیل ویژگی های آهکی خاک دچار مشکل در جذب عنصر می گردند، اهمیت بیشتری پیدا می کند (Voogt et al., 2013). کارایی بازیافت روی عمدتاً توانایی جذب روی گیاه، در شرایط کمبود آن در خاک و تحت تأثیر نوع کود و تفاوت های ژنوتیپی گیاه در مقاومت به کمبود روی قرار دارد (Genc et al., 2020). براساس نتایج بیشترین سطح بازیافت روی اندام هوایی ارقام، با نانوکودها، بالاخص کود ZnO/SiO_2 مشاهده شد. کارایی بالای نانو اکسیدهای روی (ZnO/CDs و ZnO/SiO_2) به اندازه کوچک، افزایش سطح، خواص منحصربه فرد (Azam et al., 2022) و آزادسازی پایدار و متناسب با نیاز گیاه روی نسبت داده شده است (Doolette et al., 2020). Danesh-Shahraki و Naderi (۲۰۱۸) اهمیت نانوکودها را در افزایش کارایی استفاده از موادمغذی تأیید کرده اند. کارایی بازیافت بالای روی در ژنوتیپ های حیدری و حیران، نیز می تواند به تفاوت در جذب روی ناشی از تغییرات در مورفولوژی ریشه، آزادسازی اسیدهای آلی متصل به روی و تفاوت ها در الگوی جذب و انتقال روی مربوط باشد (Rengel, 1999; Singh et al., 2019; Moretti et al., 2020). پیش از این نیز، مطالعات Peleg et al (۲۰۰۸) با ۲۴ ژنوتیپ، Singh et al (۲۰۱۷) با چهار ژنوتیپ و Singh et al (۲۰۲۰) با ۲۵ ژنوتیپ، پتانسل شاخص کارایی روی برای غربالگری ارقام گندم در خاک های در مواجهه با کمبود روی را نشان داده اند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج، فراهمی کنترل‌شده روی از نانوکودهای ZnO/SiO_2 و ZnO/CDs در خاک، تأثیر مثبتی بر تداوم دسترسی روی گیاه و بهبود کارایی بازیافت روی در گندم داشت. تفاوت‌های مشاهده شده در کارایی بازیافت روی بین ارقام مختلف گندم، پتانسیل متفاوت ارقام در پاسخ به شرایط کمبود روی را نشان داد. ارقام حیدری و حیران بالاترین کارایی بازیافت روی و بیشترین غلظت روی و عملکرد در دانه و شاخساره را با محلول‌پاشی ZnO/SiO_2 نشان دادند. لزوم استفاده از شیوه‌های نوین در کشاورزی و توجه به فناوری‌های نانو، وابستگی به کودهای شیمیایی و تبعات آن (آلودگی زیست‌محیطی) را کاهش داده و توسعه کشت گیاهان روی‌کارا، به افزایش بهره‌وری محصولات و سطح سلامت جامعه کمک می‌کند. با این حال، انجام آزمایش‌های بیشتر در شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای برای بهینه‌سازی عملکرد این نانوحامل‌ها، همچنین بررسی ژنوتیپ‌های گندم دیم با توجه به شرایط کم‌آبی حاکم بر کشور، ضروری است. انتخاب نوع و شیوه کاربرد کود باید بر اساس شرایط خاک و با در نظر گرفتن ژنوتیپ‌ها انجام شود تا بهترین نتیجه حاصل گردد. همچنین یافته‌های این مطالعه تأکید دارد که طراحی نانوکودهای روی نباید صرفاً بر افزایش فراهمی عنصر متمرکز باشد، بلکه ماهیت نانوحامل و زمینه ژنتیکی محصول نیز باید به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه ارومیه، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: سیما افرا، میرحسن رسولی صدقیانی تهیه گزارش پژوهش: سیما افرا و محمدجعفر ملکوتی؛ تحلیل داده‌ها: سیما افرا، میر حسن رسولی صدقیانی و مینا علیخانی
نویسندگان هر یک بنوعی در مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.
مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:
نویسنده اول: سیما افرا: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله
نویسنده دوم و سوم: میرحسن رسولی صدقیانی و محمدجعفر ملکوتی اساتید راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله
نویسنده چهارم، پنجم و ششم: مینا علیخانی و ابراهیم سپهر و عزیز مجیدی اساتید مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

اعلامیه استفاده از هوش مصنوعی

نویسندگان در نگارش مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نکرده‌اند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.



REFERENCES

- Abd-Elzaher, M. A., El-Desoky, M. A., Khalil, F. A., Eissa, M. A., & Amin, A. E. E. A. (2025). Exogenously applied proline with silicon and zinc nanoparticles to mitigate salt stress in wheat plants grown on saline soil. *Journal of Plant Nutrition*, 48(9), 1559-1576.
- Adhikary, S., Mandal, N., Rakshit, R., Das, A., Kumar, V., Kumari, N., & Homa, F. (2020). Field evaluation of Zincated nanoclay polymer composite (ZNCPC): Impact on DTPA-extractable Zn, sequential Zn fractions and apparent Zn recovery under rice rhizosphere. *Soil and Tillage Research*, 201, 104607.
- Adil, M., Bashir, S., Bashir, S., Aslam, Z., Ahmad, N., Younas, T., & Elshikh, M. S. (2022). Zinc oxide nanoparticles improved chlorophyll contents, physical parameters, and wheat yield under salt stress. *Frontiers in plant science*, 13, 932861.
- Ahmad, P., Alyemeni, M. N., Al-Huqail, A. A., Alqahtani, M. A., Wijaya, L., Ashraf, M., & Bajguz, A. (2020). Zinc oxide nanoparticles application alleviates arsenic (As) toxicity in soybean plants by restricting the uptake of as and modulating key biochemical attributes, antioxidant enzymes, ascorbate-glutathione cycle and glyoxalase system. *Plants*, 9(7), 825.
- Ali, M., Sharif, M., Ahmad, W., & Ahmed, I. (2023). Assessing potent zinc solubilizing bacteria to augment wheat yield and zinc biofortification. *Gesunde Pflanzen*, 75(4), 1061-1073.
- Alikhani, M., Mirbolook, A., Sadeghi, J., & Lakzian, A. (2023). Effect of a new slow-release zinc fertilizer based on carbon dots on the zinc concentration, growth indices, and yield in wheat (*Triticum aestivum*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 200, 107783.
- Azam, M., Bhatti, H. N., Khan, A., Zafar, L., & Iqbal, M. (2022). Zinc oxide nano-fertilizer application (foliar and soil) effect on the growth, photosynthetic pigments and antioxidant system of maize cultivar. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 42, 102343.
- Bouis, H. E., & Saltzman, A. (2017). Improving nutrition through biofortification: a review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global food security*, 12, 49-58.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465.
- Bozetine, H., Wang, Q., Barras, A., Li, M., Hadjersi, T., Szunerits, S., & Boukherroub, R. (2016). Green chemistry approach for the synthesis of ZnO-carbon dots nanocomposites with good photocatalytic properties under visible light. *Journal of Colloid and Interface Science*, 465, 286-294.
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen—total. Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties, 9, 595-624.
- 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 zinc deficiency in calcareous soils. *Plant and Soil*, 188, 1-10.
- Cakmak, I., Torun, B., Erenoğlu, B., Öztürk, L., Marschner, H., Kalayci, M., & Yilmaz, A. (1998). Morphological and physiological differences in the response of cereals to zinc deficiency. *Euphytica*, 100(1), 349-357.
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? *Plant and soil*, 302, 1-17.
- Cakmak, I., & Engels, C. (2024). Role of mineral nutrients in photosynthesis and yield formation. In *Mineral nutrition of crops* 141-168. CRC Press.
- Chapman, H. D., & Pratt, P. F. (1962). Methods of analysis for soils, plants and waters. *Soil Science*, 93(1), 68.
- Chhowalla, M. (2017). Slow release nanofertilizers for bumper crops.
- Dapkekar, A., Deshpande, P., Oak, M. D., Paknikar, K. M., & Rajwade, J. M. (2018). Zinc use efficiency is enhanced in wheat through nanofertilization. *Scientific reports*, 8(1), 6832.
- Deng, T. H. B., Cloquet, C., Tang, Y. T., Sterckeman, T., Echevarria, G., Estrade, N., & Qiu, R. L. (2014). Nickel and zinc isotope fractionation in hyperaccumulating and nonaccumulating plants. *Environmental science & technology*, 48(20), 11926-11933.
- Doolette, C. L., Read, T. L., Li, C., Scheckel, K. G., Donner, E., Kopittke, P. M., & Lombi, E. (2018). Foliar application of zinc sulphate and zinc EDTA to wheat leaves: differences in mobility, distribution, and speciation. *Journal of experimental botany*, 69(18), 4469-4481.
- Doolette, C. L., Read, T. L., Howell, N. R., Cresswell, T., & Lombi, E. (2020). Zinc from foliar-applied nanoparticle fertiliser is translocated to wheat grain: a ⁶⁵Zn radiolabelled translocation study comparing conventional and novel foliar fertilisers. *Science of The Total Environment*, 749, 142369.
- FAO. United Nations Food and Agricultural Organization. (2019). Wheat yields global by country. Available

- at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (Accessed 20 Oct 2022).
- Galindo, F. S., Pagliari, P. H., Fernandes, G. C., Rodrigues, W. L., Boleta, E. H. M., Jalal, A.,... & Teixeira Filho, M. C. M. (2022). Improving sustainable field-grown wheat production with *Azospirillum brasilense* under tropical conditions: a potential tool for improving nitrogen management. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 821628.
- Garnett, T. P., & Graham, R. D. (2005). Distribution and remobilization of iron and copper in wheat. *Annals of botany*, 95(5), 817-826.
- Genc, Y., McDonald, G. K., & Graham, R. D. (2006). Contribution of different mechanisms to zinc efficiency in bread wheat during early vegetative stage. *Plant and soil*, 281(1), 353-367.
- Guo, H., White, J. C., Wang, Z., & Xing, B. (2018). Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 6, 77-83.
- Gupta, A. P. (2005). Micronutrient status and fertilizer use scenario in India. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18(4), 325-331.
- Gupta, S., Zaman, M., Fatima, S., Shahzad, B., Brazier, A. K., Moran, V. H.,... & Lowe, N. M. (2022). The impact of consuming zinc-biofortified wheat flour on haematological indices of zinc and iron status in adolescent girls in rural Pakistan: a cluster-randomised, double-blind, controlled effectiveness trial. *Nutrients*, 14(8), 1657.
- Hanwate, G. R., Giri, S. N., & Yelvikar, N. V. (2018). Effect of foliar application of micronutrients on nutrient uptake by soybean crop. *Int. J. Pure App. Biosci*, 6(5), 261-265.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1938). The water-culture method for growing plants without soil.
- Holloway, R. E., Graham, R. D., McBeath, T. M., & Brace, D. M. (2010). The use of a zinc-efficient wheat cultivar as an adaptation to calcareous subsoil: a glasshouse study. *Plant and soil*, 336(1), 15-24.
- Hussain, A., Arshad, M., Zahir, Z. A., & Asghar, M. (2015). Prospects of zinc solubilizing bacteria for enhancing growth of maize. *Pakistan journal of agricultural sciences*, 52(4).
- Jalal, A., Galindo, F. S., Freitas, L. A., da Silva Oliveira, C. E., de Lima, B. H., Pereira, Í. T.,... & Teixeira Filho, M. C. M. (2022). Yield, zinc efficiencies and biofortification of wheat with zinc sulfate application in soil and foliar nanozinc fertilisation. *Crop and Pasture Science*.
- Jalal, A., Oliveira, C. E. D. S., Fernandes, G. C., da Silva, E. C., da Costa, K. N.,... & Teixeira Filho, M. C. M. (2023). Integrated use of plant growth-promoting bacteria and nano-zinc foliar spray is a sustainable approach for wheat biofortification, yield, and zinc use efficiency. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1146808.
- Kah, M., Tufenkji, N., & White, J. C. (2019). Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature nanotechnology*, 14(6), 532-540.
- Khayal, A., Dawane, V., Amin, M. A., Tirth, V., Yadav, V. K., Algahtani, A.,... & Jeon, B. H. (2021). Advances in the methods for the synthesis of carbon dots and their emerging applications. *Polymers*, 13(18), 3190.
- Kisan, B., Shruthi, H., Sharanagouda, H., Revanappa, S. B., & Pramod, N. K. (2015). Effect of nano-zinc oxide on the leaf physical and nutritional quality of spinach. *Agrotechnology*, 5(1), 135.
- Khodakovskaya, M. V., Kim, B. S., Kim, J. N., Alimohammadi, M., Dervishi, E., Mustafa, T., & Cernigla, C. E. (2013). Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small*, 9(1), 115-123.
- Khoshgoftar, A. H., H. Shariatmadari, N. Karimian and M. R. Khajepour. (2006). Responses of wheat genotypes to zinc fertilization under saline soil conditions. *journal of Plant Nutrition*. 29,1543-1556.
- Kalayci, M., Torun, B., Eker, S. E. L. İ. M., Aydin, M., Ozturk, L., & Cakmak, I. (1999). Grain yield, zinc efficiency and zinc concentration of wheat cultivars grown in a zinc-deficient calcareous soil in field and greenhouse. *Field Crops Research*, 63(1), 87-98.
- Kulikov, S. N., Lisovskaya, S. A., Zelenikhin, P. V., Bezrodnykh, E. A., Shakirova, D. R., Blagodatskikh, I. V., & Tikhonov, V. E. (2014). Antifungal activity of oligochitosans (short chain chitosans) against some *Candida* species and clinical isolates of *Candida albicans*: Molecular weight-activity relationship. *European journal of medicinal chemistry*, 74, 169-178.
- Kumar, A., Denre, M., & Prasad, R. (2018). Agronomic biofortification of zinc in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Current Science*, 115(5), 944-948.
- Kutman, U. B., Yildiz, B., Ozturk, L., & Cakmak, I. (2010). Biofortification of durum wheat with zinc through soil and foliar applications of nitrogen. *Cereal Chemistry*, 87(1), 1-9.
- Kwak, S. Y., Lew, T. T. S., Sweeney, C. J., Koman, V. B., Wong, M. H., Bohmert-Tatarev, K.,... & Strano, M. S. (2019). Chloroplast-selective gene delivery and expression in planta using chitosan-complexed



- single-walled carbon nanotube carriers. *Nature nanotechnology*, 14(5), 447-455.
- Laware, S. L., and Raskar, S. (2014). Influence of zincoxide Nanoparticles on growth, flowering and seed productivity in onion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 3(7):874-88.
- 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.
- Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, 5, 437-474.
- Lu, X., Cui, J., Tian, X., Ogunniyi, J. E., Gale, W. J., & Zhao, A. (2012). Effects of zinc fertilization on zinc dynamics in potentially zinc-deficient calcareous soil. *Agronomy Journal*, 104(4), 963-969.
- Mahmood, I., Sami, A., Asad, S. A., Shah, G. A., Rana, R. M., Raja, N. I., & Awan, T. H. (2024). Zinc-Oxide-Nanoparticles in Conjugation with Zn-Solubilizing Bacteria Improve Zn Biofortification and Nitrogen Use Efficiency in Wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(3), 5565-5585.
- Marschner, H. (2012). Mineral nutrition of higher plants, (Vol. 672, 3rd ed.). London: Academic Press.
- Matichenkov, V. V., & Kosobrukhov, A. A. (2004). Si effect on the plant resistance to salt toxicity. *Proceedings of the ISCO*, 13.
- Maxfield, L., Shukla, S., & Crane, J. S. (2023). Zinc deficiency. [Updated 2022 Nov 21]. *StatPearls*
- Mazhar, Z., Akhtar, J., Alhodaib, A., Naz, T., Zafar, M. I., Iqbal, M. M., & Naz, I. (2023). Efficacy of ZnO nanoparticles in Zn fortification and partitioning of wheat and rice grains under salt stress. *Scientific reports*, 13(1).
- Marrugo-Negrete, J., Pinedo-Hernández, J., & Díez, S. (2017). Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. *Environmental research*, 154, 380-388.
- Montoya, M., Vallejo, A., Recio, J., Guardia, G., & Alvarez, J. M. (2020). Zinc-nitrogen interaction effect on wheat biofortification and nutrient use efficiency. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(2), 169-179.
- Munir, T., Rizwan, M., Kashif, M., Shahzad, A., Ali, S., Amin, N.,... & Imran, M. (2018). EFFECT OF ZINC OXIDE NANOPARTICLES ON THE GROWTH AND Zn UPTAKE IN WHEAT (TRITICUMAESTIVUM L.) BY SEED PRIMING METHOD. *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures (DJNB)*, 13(1).
- Moretti, L. G., Crusciol, C. A., Kuramae, E. E., Bossolani, J. W., Moreira, A., Costa, N. R.,... & Hungria, M. (2020). Effects of growth-promoting bacteria on soybean root activity, plant development, and yield. *Agronomy Journal*, 112(1), 418-428.
- Page, V., Weisskopf, L., & Feller, U. (2006). Heavy metals in white lupin: uptake, root-to-shoot transfer and redistribution within the plant. *New Phytologist*, 171(2), 329-341.
- Panpatte, D. G., Jhala, Y. K., Shelat, H. N., & Vyas, R. V. (2016). Nanoparticles: the next generation technology for sustainable agriculture. In *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity: Vol. 2: Functional applications* (pp. 289-300). New Delhi: Springer India.
- Peleg, Z., Saranga, Y., Yazici, A., Fahima, T., Ozturk, L., & Cakmak, I. (2008). Grain zinc, iron and protein concentrations and zinc-efficiency in wild emmer wheat under contrasting irrigation regimes. *Plant and Soil*, 306, 57-67.
- Rajput, V. D., Minkina, T., Kumari, A., Harish, Singh, V.K., Verma, K. K.,... & Keswani, C. (2021). Coping with the challenges of abiotic stress in plants: New dimensions in the field application of nanoparticles. *Plants*, 10(6), 1221.
- Rehman, A., Farooq, M., Asif, M., & Ozturk, L. (2019). Supra-optimal growth temperature exacerbates adverse effects of low Zn supply in wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(4), 656-666.
- Rengel, Z. (2001). Genotypic differences in micronutrient use efficiency in crops. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7-8), 1163-1186.
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 417-435.
- Rokbani, H., Daigle, F., & Ajji, A. (2018). Combined effect of ultrasound stimulations and autoclaving on the enhancement of antibacterial activity of ZnO and SiO₂/ZnO nanoparticles. *Nanomaterials*, 8(3), 129.
- Shukla, A. K., Behera, S. K., Pakhre, A., & Chaudhari, S. K. (2018). Micronutrients in soils, plants, animals and humans. *Indian Journal of Fertilisers*, 14(3), 30-54.
- Singh, D., Rajawat, M. V. S., Kaushik, R., Prasanna, R., & Saxena, A. K. (2017). Beneficial role of endophytes in biofortification of Zn in wheat genotypes varying in nutrient use efficiency grown in soils sufficient and deficient in Zn. *Plant and Soil*, 416, 107-116.

- Singh, P., Shukla, A. K., Behera, S. K., Tiwari, P. K., Das, S., & Tripathi, A. (2020). Categorization of diverse wheat genotypes for zinc efficiency based on higher yield and uptake efficiency. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 648-656.
- Singh, K., Madhusudanan, M., Verma, A. K., Kumar, C., & Ramawat, N. (2021). Engineered zinc oxide nanoparticles: an alternative to conventional zinc sulphate in neutral and alkaline soils for sustainable wheat production. *3 Biotech*, 11(7), 322.
- Singh, B. V., Singh, S., Verma, S., Yadav, S. K., Mishra, J., Mohapatra, S., & Gupta, S. P. (2022). Effect of Nano-nutrient on growth attributes, yield, Zn content, and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Environment and Climate Change*, 12(11), 2028-2036.
- Singh, S., Kaur, J., Ram, H., Singh, J., & Kaur, S. (2023). Agronomic bio-fortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) to alleviate zinc deficiency in human being. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 505-526.
- Stöber, W., Fink, A., & Bohn, E. (1968). Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range. *Journal of colloid and interface science*, 26(1), 62-69.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, 5, 475-490.
- Umar, W., Hameed, M. K., Aziz, T., Maqsood, M. A., Bilal, H. M., & Rasheed, N. (2021). Synthesis, characterization and application of ZnO nanoparticles for improved growth and Zn biofortification in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(9), 1164-1176.
- Velu, G., Ortiz-Monasterio, I., Cakmak, I., Hao, Y., & Singh, R. Á. (2014). Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. *Journal of cereal science*, 59(3), 365-372.
- Verma, K. K., Song, X. P., Lin, B., Guo, D. J., Singh, M., Rajput, V. D., & Li, Y. R. (2022). Silicon induced drought tolerance in crop plants: physiological adaptation strategies.
- Voogt, W., Blok, C., Eveleens, B., Marcelis, L., & Bindraban, P. S. (2013). Foliar fertilizer application—Preliminary review. VFRC report, 2, 43.
- 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.
- Yaseen, R., Ahmed, A. I., Omer, A. M., Agha, M. K., & Emam, T. M. (2020). Nano-fertilizers: Bio-fabrication, application and biosafety. *Novel Research in Microbiology Journal*, 4(4), 884-900.
- Yuvaraj, M., & Subramanian, K. S. (2021). Carbon sphere-zinc sulphate nanohybrids for smart delivery of zinc in rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports*, 11(1), 9508.
- Zou, C. Q., Zhang, Y. Q., Rashid, A., Ram, H., Savasli, E., Arisoy, R. Z., & Cakmak, I. (2012). Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. *Plant and soil*, 361, 119-130.
- Zulfiqar, U., Hussain, S., Maqsood, M., Ishfaq, M., & Ali, N. (2021). Zinc nutrition to enhance rice productivity, zinc use efficiency, and grain biofortification under different production systems. *Crop Science*, 61(1), 739-749.