



The impact of foliar application of bulk and nanoparticle forms of iron and zinc on the yield quantity and quality of bread and durum wheat in rainfed condition

Somayeh Karami Chameh¹ , Mohammad Javad Zarea¹ ✉, Mohsen Saeidi^{2,3} , Saeid Jalali Honarmand^{2,3}  & Akbar Shabani⁴ 

¹ Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.

² Department of Plant Production and Genetics, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran.

³ Cereal Research Center, Razi University, Kermanshah, Iran.

⁴ Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ministry of Agriculture Jihad, Iran.

✉ Corresponding author. E-mail: mj.zarea@ilam.ac.ir

ABSTRACT

Introduction: Wheat (*Triticum aestivum* L.) is a major crop that is widely cultivated in a wide range of different regions in the world and is considered an important source of protein, carbohydrates, amino acids, fiber and vitamins. Among the factors limiting the performance of this crop, water is the most important factor that reduces its performance, especially in semi-arid and arid regions of the world, including Iran. Therefore, meeting the food needs of the growing population is a problem. Also, iron and zinc deficiencies is one of the most important factors limiting the production and quality of wheat in calcareous soils of dryland areas. Therefore, the significance of further studies on drought stress and wheat leads researchers to use various methods, including the application of micronutrients at specific stages of wheat phenology.

Materials and methods: This study aimed to investigate the effects of combined foliar application of conventional (chelated) and modern (nano) forms of iron and zinc fertilizers on yield, yield components, nutritional quality, and grain concentration of these elements in four bread and durum wheat cultivars under rainfed conditions. The experiment was conducted in a split-plots experiment with randomized complete block design in three replications and two consecutive cropping years in Kermanshah province. The main factor included four wheat cultivars (two bread cultivars: Rijaw and Jam; two durum cultivars: Zardak and Tabesh) and the subfactor included nine fertilizer treatments (control; water, chelated and nano-chelated iron and zinc at concentrations of 0, 4 and 8 mg L⁻¹).

Results: The results of the composite analysis showed that the interaction effect of cultivar and fertilizer type was significant on the most traits. The highest plant height (93.8 cm), leaf relative moisture percentage (86.77%), leaf area (26.31cm²) and number of grains per spike (33 grains) were obtained in bread wheat of Jam cultivar with 8 mg L⁻¹ zinc nanochelate treatment. Grain yield and biomass increased significantly under the influence of nanofertilizers, especially at 8 mg L⁻¹ concentration. The highest yield was obtained in 8 mg L⁻¹ zinc nanochelate treatment in Jam cultivar (2791 kg ha⁻¹), and then in 8 mg L⁻¹ zinc nanochelate treatment in Rijaw cultivar (2616 kg ha⁻¹). In addition, carbohydrate content, grain protein, iron and zinc concentration of grain increased significantly in nanochelate treatments. The application of iron and zinc nanochelates, especially at 8 mg L⁻¹ concentration, significantly improved physiological traits, increased yield and enriched wheat grains with iron and zinc. The difference in response of cultivars indicates the importance of selecting the suitable cultivar along with modern nutritional management.

Conclusion: Overall, these findings clearly confirm that the response of wheat cultivars to the application of micronutrients (iron and zinc) is very specific and genotype-dependent. Therefore, the application of nanofertilizers could be recommended as an effective strategy in improving the yield and quality of rainfed wheats, especially bread wheat, and also in biofortification programs. Bread cultivars showed a more favorable response to foliar application of nanofertilizers and were superior in photosynthesis and yield indices.

Keywords: Nanofertilizer, Rainfed wheat, Grain yield, Protein quality, Micronutrients.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 13 Apr 2025, Revised: 11 Jun 2025, Accepted: 21 Aug 2025, Published online: 23 Sep 2025

Cite this article: Karami Chameh, S., Zarea, M. j., Saeidi, M., Jalali-Honarmand, S. & Shabani, A. (2025). The impact of foliar application of bulk and nanoparticle forms of iron and zinc on the yield quantity and quality of bread and durum wheat in rainfed condition. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 4(3), 347-372. DOI: [10.22126/cbb.2025.12382.1113](https://doi.org/10.22126/cbb.2025.12382.1113)





بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات



شاپا الکترونیکی: ۵۱۷۰-۲۷۸۳

بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات

Homepage: <https://cbb.razi.ac.ir>

اثر محلول پاشی شکل بالک و نانو ذره آهن و روی بر کمیت و کیفیت عملکرد گندم نان و دوروم در کشت دیم

سمیه کرمی چمه^۱، محمد جواد زارع^۱✉، محسن سعیدی^۲، سعید جلالی هنرمند^۳ و اکبر شعبانی^۴

^۱ گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام.

^۲ گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

^۳ مرکز تحقیقات غلات، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

^۴ موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال بذر. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی. وزارت جهاد کشاورزی. ایران.

✉ نویسنده مسئول. رایانامه: mj.zarea@ilam.ac.ir

چکیده

مقدمه: گندم (*Triticum aestivum* L.) یک گیاه زراعی اصلی و مهم است که به طور گسترده در طیف وسیعی از مناطق جهان کشت می‌گردد و یکی از منابع مهم پروتئین، کربوهیدرات، اسیدهای آمینه، فیبر و ویتامین محسوب می‌گردد. در بین عوامل محدودکننده عملکرد گندم، آب مهم‌ترین عاملی است که به خصوص در مناطق نیمه خشک و خشک جهان از جمله ایران باعث کاهش عملکرد آن می‌گردد. از اینرو تامین نیاز غذایی جمعیت رو به رشد را با مشکل مواجه می‌کند. همچنین کمبود آهن و روی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید و کیفیت گندم در خاک‌های آهنکی مناطق دیم است. بنابراین به دلیل اهمیت تنش خشکی روی عملکرد گندم، محققان را به سمت استفاده از روش‌های متنوع از جمله تامین عناصر ریزمغذی در مراحل خاص از فنولوژی گندم برای جبران کمبود عملکرد این محصول مهم سوق داده است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش با هدف بررسی اثرات محلول پاشی ترکیبی فرم‌های بالک از شرکت شیمی کرد و نانوذرات آهن و روی که از شرکت خضرا بر عملکرد، اجزای عملکرد، کیفیت غذایی و غلظت این عناصر در دانه چهار رقم گندم نان و دوروم در شرایط دیم اجرا شد. آزمایش به صورت کرت‌های دو بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی متوالی در استان کرمانشاه انجام شد. فاکتور اصلی شامل چهار رقم گندم (دو رقم گندم نان: ریژاو و جام؛ دو رقم دوروم: زردک و تابش) و فاکتور فرعی شامل نه تیمار کودی و تیمار شاهد (آب)، بالک و نانو ذرات آهن و روی در غلظت‌های (۴، ۸ و ۱۶ میلی‌گرم در لیتر) بود.

یافته‌ها: نتایج تجزیه مرکب نشان داد اثر متقابل رقم و نوع کود بر اغلب صفات معنی‌دار بود. بیش‌ترین ارتفاع بوته (۹۳/۸ سانتی‌متر) محتوی نسبی آب برگ (۸۶/۷۷ درصد)، سطح برگ (۲۶/۳۱ سانتی‌متر مربع) و تعداد دانه در سنبله (۳۳ دانه) در گندم نان رقم جام با تیمار نانوذرات روی هشت میلی‌گرم در لیتر حاصل شد. عملکرد دانه و زیست‌توده تحت تأثیر مصرف نانوذرات به‌ویژه در غلظت هشت میلی‌گرم در لیتر افزایش معنی‌دار یافت و بیش‌ترین عملکرد در تیمار نانوذره‌های روی هشت میلی‌گرم در لیتر در رقم جام (۲۷۹۱ کیلوگرم در هکتار) و سپس در تیمار نانو ذره روی هشت میلی‌گرم در لیتر در رقم ریژاو (۲۶۱۶ کیلوگرم در هکتار) حاصل شد. علاوه بر این، محتوای کربوهیدرات‌ها، پروتئین دانه، غلظت آهن و روی دانه به‌طور قابل‌توجهی در تیمارهای نانو ذره‌های آهن و روی افزایش یافت. کاربرد نانو ذره‌های آهن و روی، به‌ویژه در غلظت هشت میلی‌گرم در لیتر، به‌طور معنی‌داری موجب بهبود صفات فیزیولوژیک، افزایش عملکرد و غنی‌سازی دانه‌های گندم با آهن و روی شد. تفاوت واکنش ارقام نشان‌دهنده اهمیت انتخاب رقم مناسب در کنار مدیریت نوین تغذیه‌ای است.

نتیجه‌گیری: در مجموع، این یافته‌ها به وضوح مؤید این موضوع است که پاسخ ارقام گندم به کاربرد عناصر ریزمغذی (آهن و روی) بسیار اختصاصی و وابسته به ژنوتیپ است. بنابراین، کاربرد نانوذرات می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر در بهبود عملکرد و کیفیت گندم‌های دیم به‌ویژه گندم نان و نیز در برنامه‌های غنی‌سازی زیستی توصیه گردد. ارقام گندم مورد بررسی واکنش مطلوب‌تری به محلول پاشی نانوکودها نشان دادند و در شاخص‌های فتوسنتزی و عملکرد برتر بودند.

واژه‌های کلیدی: نانوکود، گندم دیم، عملکرد دانه، کیفیت پروتئین، ریزمغذی.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نوع مقاله: دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴ **اصلاح:** ۱۴۰۴/۰۳/۲۱ **پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۵/۳۰، **انتشار آنلاین:** ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

استناد: کرمی چمه، س.، زارع، م. ج.، سعیدی، م.، جلالی هنرمند، س. و شعبانی، ا. (۱۴۰۴). اثر محلول پاشی شکل بالک و نانو ذره آهن و روی بر کمیت و کیفیت

عملکرد گندم نان و دوروم در کشت دیم. *بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات*، ۴(۳)، ۳۴۷-۳۷۲. DOI: [10.22126/cbb.2025.12382.1113](https://doi.org/10.22126/cbb.2025.12382.1113)



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

گندم (*Triticum spp.*) از مهم‌ترین محصولات استراتژیک جهان است که نقشی اساسی در تأمین امنیت غذایی بشر ایفاء می‌کند. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، سطح زیرکشت جهانی گندم حدود ۲۲۰ میلیون هکتار برآورد شده و تولید آن بالغ بر ۷۹۹ میلیون تن می‌باشد (FAO, 2025). کشورهای چین، هند، روسیه و ایالات متحده به‌عنوان تولیدکنندگان عمده این محصول شناخته می‌شوند و بیش از نیمی از تولید جهانی را در اختیار دارند. گندم به‌دلیل نقش کلیدی در رژیم غذایی و سهم بالای آن در تأمین کالری و پروتئین روزانه، در اغلب کشورها محصولی راهبردی محسوب می‌شود. در ایران نیز گندم اصلی‌ترین محصول زراعی بوده و بیشترین سطح زیرکشت را در بین محصولات کشاورزی به خود اختصاص داده است. طبق آمار وزارت جهاد کشاورزی، سطح زیرکشت گندم کشور در سال ۱۴۰۲، بیش از ۶ میلیون هکتار است که حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد آن به کشت دیم اختصاص دارد. تولید سالانه گندم ایران به طور میانگین بین ۱۳ تا ۱۶ میلیون تن گزارش شده است (Seyed Sharifi et al., 2024).

در شرایط دیم، تنش کمبود آب ناشی از نامناسب بودن مقدار و توزیع بارندگی، روی فرایندهای رشد و نمو گیاهان مؤثر است که به صورت تغییرات بیوشیمیایی، فیزیولوژیک و ریخت‌شناختی بروز می‌کند (Seleiman et al., 2021). همچنین، کمبود عناصر ریزمغذی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان در خاک‌های

آهکی و قلیایی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. آهن و روی از جمله عناصر ضروری برای گیاهان بوده و در فرایندهای حیاتی متعددی نقش ایفا می‌کنند. آهن در ساخت کلروفیل، زنجیره انتقال الکترون و فعالیت آنزیم‌های کلیدی دخیل است و کمبود آن منجر به بروز کلروز و کاهش فتوسنتز می‌شود (Marschner, 2012). عنصر روی نیز در سنتز پروتئین‌ها، فعالیت آنزیم‌ها، تثبیت غشاءهای سلولی و تنظیم رشد هورمونی گیاه اهمیت دارد (Alloway, 2008). کمبود روی در بیش از ۳۰ درصد خاک‌های جهان مشاهده شده (Cakmak, 2008) و یکی از دلایل اصلی کاهش عملکرد و کیفیت غلات از جمله گندم است. استفاده از نانومواد یا بسته‌های کودی بالک شده می‌توانند یک یا چند ماده مغذی را برای بهبود رشد و تولید با عملکرد بهتر نسبت به کودهای معمولی تأمین کنند (Rakhimova et al., 2021; Kamali Omid et al., 2022). کاربرد کودهای آهن و روی به شکل بالک به‌دلیل پایداری بالاتر در خاک و قابلیت جذب بهتر نسبت به فرم‌های معدنی، به‌عنوان روشی مؤثر در رفع کمبود این عناصر توصیه می‌شود. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که محلول‌پاشی بالک آهن و روی بر گیاهان زراعی موجب بهبود رشد رویشی، افزایش شاخص کلروفیل و در نهایت افزایش معنی‌دار عملکرد دانه می‌گردد (Sharma et al., 2013).

در سال‌های اخیر، فناوری نانو به‌عنوان رویکردی نوین در مدیریت تغذیه گیاهی مطرح شده است. نانوکودهای حاوی عناصری مانند روی، رشد و توسعه سیستم ریشه را

خاک‌های آهکی و قلیایی کشور، بررسی روش‌های نوین تغذیه گیاهی اهمیت ویژه‌ای دارد. اگرچه تحقیقات متعددی در سطح بین‌المللی به تأثیر کودهای فرم بالک و نانوکودها بر محصولات مختلف پرداخته‌اند، اما اطلاعات اندکی درباره کاربرد ترکیبی این کودها در شرایط دیم ایران و بر روی ارقام مختلف گندم نان و دوروم وجود دارد. از این رو، انجام پژوهش حاضر علاوه بر پر کردن خلأ علمی در این حوزه، می‌تواند مبنایی برای ارائه راهکارهای عملی به منظور افزایش عملکرد و غنی‌سازی دانه‌های گندم با آهن و روی باشد. این موضوع از منظر سلامت عمومی نیز حائز اهمیت است، زیرا کمبود ریزمغذی‌ها به‌ویژه روی و آهن یکی از مشکلات تغذیه‌ای رایج در جوامع انسانی محسوب می‌شود. بر این اساس، هدف از مطالعه حاضر بررسی اثر محلول‌پاشی ترکیبی کودهای بالک آهن و روی و نانوذرات آهن و روی بر محتوای آهن و روی دانه و عملکرد چهار رقم گندم دیم پاییزه تحت شرایط کشت دیم می‌باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند گامی مؤثر در جهت بهبود کارایی مصرف کود، افزایش عملکرد و ارتقای ارزش تغذیه‌ای گندم در ایران باشد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در دو سال زارعی متوالی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ و ۱۴۰۳-۱۴۰۴ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹/۵۲ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵/۹۴ دقیقه شرقی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۱۹ متر منطقه که از نظر اقلیمی دوماستن، جزء آب و هوای

تحریک می‌کنند. ریشه‌های قوی‌تر و عمیق‌تر می‌توانند به لایه‌های مرطوب‌تر خاک دسترسی پیدا کرده و آب بیش‌تری جذب کنند (El-Shal *et al.*, 2022). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که استفاده از نانوکودها می‌تواند به حفظ محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش خشکی کمک کند. این امر باعث می‌شود گیاه برای مدت طولانی‌تری فعالیت فیزیولوژیک خود را حفظ کند (Fatollahpour Grangah *et al.*, 2020) و نقش مهمی در کاهش اثرات کم آبی در مزارع دیم دارند. نانوکودها به‌دلیل سطح ویژه بالا، قابلیت آزادسازی تدریجی عناصر و نفوذپذیری بیش‌تر در سلول‌های گیاهی، کارایی جذب عناصر غذایی را افزایش می‌دهند (DeRosa *et al.*, 2010). پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که مصرف نانوذرات اکسید آهن و روی در غلات منجر به افزایش رشد، بهبود کارایی فتوسنتزی و غنی‌سازی دانه با ریزمغذی‌ها می‌شود (Liu & Lal, 2015; Rameshaiah *et al.*, 2015). همچنین گزارش شده است که کاربرد نانوذرات ZnO در گندم باعث بهبود رشد گیاه و افزایش غلظت روی در دانه شده است (Dimkpa *et al.*, 2017).

نتایج مشابهی در نخود فرنگی (*Pisum sativum*) و برنج (*Oryza sativa*) نیز گزارش شده است که نشان‌دهنده قابلیت بالای نانوکودها در بهبود عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی می‌باشد (Rizwan *et al.*, 2019; Raliya *et al.*, 2016).

با توجه به سهم بالای کشت دیم در ایران و محدودیت‌های موجود در تأمین عناصر ریزمغذی در

در سه سطح غلظت های ۰، ۴ و ۸ میلی گرم در لیتر می باشند.

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک در سال های زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ و ۱۴۰۳-۱۴۰۴، یک نمونه خاک مرکب از عمق ۰-۳۰ سانتی متری محل اجرای طرح تهیه و در آزمایشگاه بخش تحقیقات خاک و آب مورد تجزیه قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

سرد معتدل طبقه بندی می شود اجرا شد.. آزمایش به صورت کرت دو بار خرد شده و در قالب طرح پایه بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. ارقام گندم دیم پاییزه به عنوان فاکتور اصلی شامل دو رقم گندم نان (ریزاو و جام) و دو رقم گندم دوروم (زردک و تابش) و فاکتور فرعی نیز شامل مصرف ترکیبی کودهای مرسوم آهن و روی و کودهای نانوذره آهن و نانوذره روی

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش (عمق ۰-۳۰ سانتی متر)

Table 1: Physical and chemical characteristics of the tested soil (depth 0-30 cm)												
سال زراعی Crop year	کلاس بافت Texture class	شن Sand %	رس Clay %	سیل ت Sil %	ماده آلی OC %	نیتروژن N (ppm)	شوری EC (ds/m)	اسیدیته ° pH	آهن Fe (ppm)	روی Zn (ppm)	فسفر P (ppm)	پتاسیم K (ppm)
2023 - 2024	رسی سیلتی Silty clay	10.7	45.4	43.9	0.97	0.09	1.26	7.8	4.5	0.47	18.74	130
2024 - 2025	رسی سیلتی Silty clay	10.7	45.4	43.9	0.99	0.083	1.13	7.7	5.6	0.53	19.98	141

به ۳۶ کرت به ابعاد چهار متر طول و یک و نیم متر عرض و فاصله خطوط کشت ۲۵ سانتی متر از یکدیگر تقسیم بندی شد. هر کرت دارای ۵ ردیف کشت و یک خط نکاشت بین هر کرت است. مقدار کاشت بذر در هر کرت بر اساس میزان بذر مصرفی در گندم دیم به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار محاسبه و تراکم مورد نیاز به دست آمد

بذر ارقام گندم از معاونت موسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود تهیه شد. جهت آماده سازی، ابتدا زمین با گاوآهن برگرداندار شخم زده شد و سپس دو دیسک عمود برهم برای خرد کردن کلوخه ها زده و تسطیح انجام شد. پس از انجام عملیات خاکورزی و پیاده سازی نقشه طرح، اختصاص تیمار به واحدهای آزمایش به صورت تصادفی انجام گرفت و بر اساس تعداد تیمارهای آزمایش هر بلوک

بیولوژیک و پس از بوجاری بذر عملکرد دانه هر تیمار محاسبه شد. ۱۰ بوته به طور تصادفی از هر کرت مربوط به هر تیمار انتخاب شده و پس از تعیین ارتفاع بوته، تعداد دانه در سنبله هر بوته میانگین لحاظ شد. همچنین تمام سنبله‌های یک خط یک متری از هر کرت با رعایت اثر حاشیه شمارش شده و سپس تعداد سنبله در متر مربع محاسبه شد. پنج تکرار هزار تایی که به طور تصادفی انتخاب، وزن شده و میانگین آن‌ها به عنوان وزن هزار دانه تعیین شد. برای اندازه‌گیری غلظت آهن و روی در دانه به روش خاکستر خشک از دستگاه جذب اتمی استفاده گردید (Lindsay & Norvel., 1978). برای سنجش پروتئین کل از روش کلدال یا کجلدال با برخی تغییرات (Abdi Benemar *et al.*, 2023) استفاده شد. برای اندازه‌گیری محتوی فندهای محلول کل برگ از روش Irigoyen و همکاران در سال ۱۹۹۲ استفاده شد.

تجزیه آماری داده‌ها به صورت تجزیه مرکب هر دو سال اجرای آزمایش و با استفاده از نرم افزار SAS 9.2 پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از روش حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد. در تجزیه مرکب داده‌ها نیز اثر سال نیز به صورت تصادفی در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر متقابل رقم و ترکیب کودهای آهن و روی بر ارتفاع بوته گندم معنی دار بود

و کاشت به صورت دستی در عمق حدود سه تا پنج سانتی‌متری خاک و روی ردیف‌ها انجام شد.

کاربرد غلظت‌های نانوذرات در دو مرحله نموی شامل ابتدای گلدهی و بعد از گلدهی به صورت محلول‌پاشی اندام هوایی صورت گرفت. در طول فصل زراعی مراقبت‌های زراعی لازم شامل کوددهی براساس جدول آزمایش عناصر غذایی خاک، مبارزه با علف‌های هرز به صورت دستی و در صورت نیاز مبارزه با آفات و بیماری‌ها براساس نیاز با استفاده از سموم مناسب انجام شد.

در طول دوره رشد جهت اندازه‌گیری میانگین سطح برگ تک بوته بر حسب سانتی‌متر مربع در دو مرحله گلدهی و پس از گلدهی از هر کرت به طور تصادفی تعداد ۱۰ بوته انتخاب و سطح برگ آن‌ها با استفاده از نرم افزار Digimizer V4.1.1.0 محاسبه شد. برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ ۷۲ ساعت بعد از دومین تیمار محلول‌پاشی از رابطی بار و ویدرلی (Barr and Weatherley, 1962) و براساس فرمول زیر استفاده شد.

$$RWC (\%) = ((FW - DW) / (TW - DW)) \times 100$$

که در این رابطه، FW: وزن تازه برگ، TW: وزن اشباع شده برگ و DW: وزن خشک نمونه‌ها می‌باشند.

در زمان رسیدگی فیزیولوژیک پس از برداشت در واحد سطح، عملکرد دانه و زیست توده و سایر صفت‌های زراعی مرتبط با آن مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. همچنین، در زمان مذکور یک متر مربع از هر کرت برداشت شده و وزن خشک کل اندام‌ها به عنوان عملکرد

(جدول ۲). در بین تمامی تیمارهای اعمال شده در ارقام مختلف، تیمار نانو ذره روی ۸ میلی گرم بر لیتر در رقم جام با میانگین ارتفاع ۹۳/۸۵ سانتی متر دارای بالاترین ارتفاع بوته بود که نسبت به شاهد ۴۵ درصد افزایش داشت، که حاکی از پاسخ فوق العاده مثبت این رقم به ترکیب کودی مذکور است. در مقابل، تیمارهای شکل بالک آهن ۴ میلی گرم در لیتر و شاهد در رقم ریژاو به ترتیب با میانگین ارتفاع ۶۴/۱ و ۶۴/۸ سانتی متر، کمترین ارتفاع بوته را به خود اختصاص دادند. بالاترین ارتفاع بوته در رقم تابش و زردک در تیمار نانو ذره روی ۸ میلی گرم در لیتر و در رقم ریژاو بالاترین ارتفاع بوته در تیمار نانو ذره آهن ۸ میلی گرم در لیتر که به ترتیب ۱۷، ۲۱ و ۱۵ درصد نسبت به شاهد افزایش داشتند (جدول ۳). این نتایج به وضوح نشان دهنده تأثیر مثبت و قابل توجه کودهای آهن و روی بر بهبود رشد رویشی و افزایش ارتفاع بوته‌های گندم در مقایسه با تیمار شاهد است.

جدول ۲: نتایج تجزیه مرکب اثر رقم و ترکیب کودهای آهن و روی بر برخی صفات گندم.

Table 2: Results of composite analysis of the effect of cultivar and combination of iron and zinc fertilizers on some wheat traits.

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	میزان نسبی آب برگ Relative water content	سطح برگ Leaf area	وزن هزار دانه Thousand grain weight	تعداد دانه در سنبله Number of grains per spike	تعداد سنبله در مترمربع Number of spikes per m ²
سال Year	1	831 *	۶۴۲ ^{ns}	182.44 ^{ns}	416*	229 ^{ns}	28798 *
تکرار Replication	4	97	1271	10.69	49	136	777
رقم Cultivar	3	1402*	279 ^{ns}	49.89 ^{ns}	1013*	352 ^{ns}	152489 *
رقم × سال Cultivar*year	3	57 ^{ns}	434**	40.03**	78**	59 *	6013**
خطای Errora	12	63	62	2.71	11.2	14	459
کود Fertilizer	8	317*	439*	92.63**	98.5*	165**	8974**
کود × سال Fertilizer*year	8	69 ^{ns}	78 ^{ns}	14.6 ^{ns}	17.7*	8 ^{ns}	971*
رقم × کود Cultivar*Fertilier	24	62*	64**	2.87*	6 ^{ns}	4*	990**
رقم × کود × سال Cultivar*	24	29 ^{ns}	16 ^{ns}	1.28 ^{ns}	3 ^{ns}	۱/۸ ^{ns}	197 ^{ns}

Fertilier *year							
خطای کل Total error	128	38	70	3.98	8	5.5	384
ضریب تغییرات CV(%)	-	8	11	34.9	8.3	9.3	8

ns, * and **: به ترتیب معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد و عدم معنی‌داری

ns, * and **: Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively

جدول ۳: نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل رقم و ترکیب کودهای آهن و روی بر برخی صفات گندم

Table 3: Results of comparing the average interaction effect of cultivar and combination of iron and zinc fertilizers on some wheat traits

ارقام Cultivars	کود Fertilizer	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)	محتوای نسبی آب برگ Relative water content (%)	سطح برگ Leaf area (cm ²)	تعداد دانه در سنبله Number of grains per spike	تعداد سنبله در مترمربع Number of spikes per m ²
تابش Tabeh	شاهد Control	68.63 ^{k-n}	78.53 ^{a-d}	18.7 ^{m-p}	19.22 ^s	2.32 ^{f-i}
	بالک آهن ۴ میلی گرم در لیتر Fe (bulk): 4 mg L ⁻¹	73.92 ^{fm}	64.38 ^{gh}	19.10 ^{l-o}	18.79 ^s	317.76 ^b
	بالک آهن ۸ میلی گرم در لیتر Fe (bulk): 8 mg L ⁻¹	69.53 ^{k-n}	65.5 ^{fgh}	20.20 ⁱ⁻ⁿ	20.73 ^{p-s}	291.03 ^{cd}
	بالک روی ۴ میلی گرم در لیتر Zn (bulk): 4 mg L ⁻¹	75.51 ^{c-k}	7.03 ^{c-h}	20.7 ^{g-n}	20.5 ^{qrs}	316.05 ^b

بالک روی ۸ میلی گرم در لیتر Fe (bulk): 4 mg L ⁻¹	79.96 ^{b-h}	74.15 ^{c-f}	22.47 ^{c-i}	23.47 ^{l-o}	270.62 ^{d-g}
نانو ذره آهن ۴ میلی گرم بر لیتر Fe (nanoparticles): 4 mg L ⁻¹	72.18 ^{i-m}	72.85 ^{c-h}	20.41 ^{h-n}	21.98 ^{n-r}	287.82 ^{cd}
نانو ذره آهن ۸ میلی گرم در لیتر Fe (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	77.03 ^{c-j}	71.89 ^{c-h}	21.64 ^{e-k}	25.09 ^{g-m}	366.06 ^a
نانو ذره روی ۴ میلی گرم در لیتر Fe (nanoparticles): 4 mg L ⁻¹	78.04 ^{b-i}	73.08 ^{c-h}	21.53 ^{f-k}	22.69 ^{m-q}	283.39 ^{cde}
نانو ذره روی ۸ میلی گرم در لیتر Fe (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	80.55 ^{b-g}	79.22 ^{abc}	24.37 ^{abc}	27.73 ^{c-g}	249.19 ^{g-k}

جام Jam	شاهد Control	74.29 ^{e-m}	64.38 ^{g-h}	18.99 ^{mno}	21.96 ^{n-r}	251.75 ^{f-j}
	بالک آهن ۴ میلی گرم در لیتر Fe (bulk): 4 mg L ⁻¹	82.57 ^{bc}	69.28 ^{d-h}	20.19 ^{j-n}	24.85 ^{i-m}	248.65 ^{g-k}
	بالک آهن ۸ میلی گرم در لیتر Fe (bulk): 8 mg L ⁻¹	74.76 ^{d-l}	67.89 ^{e-h}	20.43 ^{h-n}	25.69 ^{f-l}	213.65 ^m
	بالک روی ۴ در میلی گرم بر لیتر Zn (bulk): 4 mg L ⁻¹	81.47 ^{bcd}	74.95 ^{c-f}	22.86 ^{bg}	24.95 ^{hm}	236.02 ^{i-l}

بالک روی ۸ میلی گرم در لیتر Zn (bulk): ۸ mg L ⁻¹	81.64 ^{bcd}	72.08 ^{c-h}	22.69 ^{b-h}	28.99 ^{cd}	210.05 ^m
نانو ذره آهن ۴ میلی گرم در لیتر Fe (nanoparticles): ۴ mg L ⁻¹	81.03 ^{b-e}	73.23 ^{c-h}	21.32 ^{f-l}	26.25 ^{ek}	229.83 ^{j-m}
نانو ذره آهن ۸ میلی گرم در لیتر Fe (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	84.59 ^b	76.18 ^{b-e}	23.82 ^{b-e}	28.86 ^{cde}	219.36 ^{lm}
نانو ذره روی ۴ میلی گرم در لیتر Zn (nanoparticles): 4 mg L ⁻¹	84.93 ^b	7.75 ^{a-d}	23.91 ^{b-e}	27.63 ^{ch}	228.22 ^{klm}
نانو ذره روی ۸ میلی گرم در لیتر Zn (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	93.85 ^a	86.77 ^a	26.31 ^a	33.28 ^a	213.00 ^m

ریژاو Rijaw	شاهد Control	64.81 ⁿ	63.86 ^h	17.78 ^{op}	18.85 ^{rs}	298.93 ^{bc}
	بالک آهن ۴ میلی گرم در لیتر Fe (bulk): 4 mg L ⁻¹	64.19 ⁿ	63.81 ^h	19.87 ^{j-o}	21.43 ^{o-s}	279.4 ^{cde}
	بالک آهن ۸ میلی گرم در لیتر Fe (bulk): ۸ mg L ⁻¹	67.29 ^{mn}	70.55 ^{c-h}	22.81 ^{b-g}	24.12 ^{j-o}	262.44 ^{e-h}
	بالک روی ۴ میلی گرم در لیتر Zn (bulk):	69.31 ^{k-n}	71.00 ^{c-h}	21.48 ^{f-k}	23.13 ^{l-q}	274.14 ^{def}

4 mg L ⁻¹						
بالک روی ۸ میلی گرم در لیتر	70.49 ^{j-n}	72.65 ^{c-h}	23.49 ^{b-f}	26.71 ^{c-j}	248.01 ^{h-k}	
Zn (bulk):						
۸ mg L ⁻¹						
نانو ذره آهن ۴ میلی گرم در لیتر	68.17 ^{lmn}	73.76 ^{c-g}	21.65 ^{e-k}	23.27 ^{l-p}	278.54 ^{cde}	
Fe (nanoparticles):						
4 mg L ⁻¹						
نانو ذره آهن ۸ میلی گرم در لیتر	78.72 ^{bi}	74.93 ^{c-f}	21.81 ^{dj}	24.45 ⁱ⁻ⁿ	249.83 ^{g-k}	
Fe (nanoparticles):						
8 mg L ⁻¹						
نانو ذره روی ۴ میلی گرم در لیتر	72.07 ^{i-m}	74.29 ^{c-f}	23.83 ^{b-e}	24.51 ⁱ⁻ⁿ	265.07 ^{e-h}	
Zn (nanoparticles):						
4 mg L ⁻¹						
نانو ذره روی ۸ میلی گرم در لیتر	72.93 ^{h-m}	78.41 ^{a-d}	24.86 ^{ab}	28.09 ^{c-f}	237.91 ^{i-l}	
Zn (nanoparticles):						
8 mg L ⁻¹						

زردک	شاهد	70.27 ^{j-n}	70.96 ^{ch}	16.65 ^p	23.68 ^{k-o}	186.85 ⁿ
Zardk	Control					
	بالک آهن ۴ میلی گرم در لیتر	72.41 ^{i-m}	۰.۶/75 ^{c-f}	18.59 ^{nop}	26.47 ^{dj}	180.87 ^{no}
	Fe (bulk):					
	4 mg L ⁻¹					
	بالک آهن ۸ میلی گرم در لیتر	71.96 ^{i-m}	74.86 ^{c-f}	19.50 ^{k-o}	28.41 ^{cde}	163.3 ^o
	Fe (bulk):					
	8 mg L ⁻¹					
	بالک روی ۴ میلی	74.84 ^{d-l}	76.53 ^{b-e}	20.67 ^{g-n}	26.30 ^{d-k}	178.51 ^{no}

گرم در لیتر					
Zn (bulk):					
4 mg L ⁻¹					
بالک روی ۸ میلی گرم در لیتر	73.54 ^{g-m}	77.60 ^{a-d}	20.60 ^{g-n}	27.91 ^{c-f}	1636.69 ^o
Zn (bulk):					
8 mg L ⁻¹					
نانو ذره آهن ۴ میلی گرم در لیتر	73.21 ^{h-m}	74.82 ^{c-f}	19.49 ^{ko}	26.93 ^{ci}	170.17 ^{no}
Fe (nanoparticles):					
4 mg L ⁻¹					
نانو ذره آهن ۸ میلی گرم در لیتر	75.6 ^{c-k}	77.12 ^{b-e}	20.88 ^{g-m}	29.34 ^{bc}	160.48 ^o
Fe (nanoparticles):					
8 mg L ⁻¹					
نانو ذره روی ۴ میلی گرم در لیتر	77.13 ^{c-j}	78.39 ^{a-d}	20.93 ^{g-m}	28.52 ^{cde}	167.77 ^{no}
Zn (nanoparticles):					
4 mg L ⁻¹					
نانو ذره روی ۸ میلی گرم در لیتر	80.79 ^{b-f}	84.94 ^{ab}	24.06 ^{a-d}	31.73 ^{ab}	162.56 ^o
Zn (nanoparticles):					
8 mg L ⁻¹					

در هر ستون، تیمارهایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری باهم ندارند.

In each column, treatments that have common letters are not significantly different from each other based on the LSD test at the 5% probability level.

نتایج حاصل از بررسی اثر متقابل ارقام و ترکیبات کودهای

محتوای نسبی آب برگ

آهن و روی نشان داد که محتوای نسبی آب برگ تحت

مؤثر در بهبود وضعیت آبی و پایداری فیزیولوژیک گندم دیم توصیه گردد.

سطح برگ

میانگین سطح برگ تک بوته بر حسب سانتی‌متر مربع نتایج بررسی اثر متقابل ارقام و تیمارهای مختلف آهن و روی نشان داد که سطح برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع کود و رقم قرار گرفت (جدول ۲). بیشترین مقدار سطح برگ تک بوته در رقم جام تحت تیمار نانوذره‌های روی ۸ میلی‌گرم در لیتر (۲۶/۳۱ سانتی‌متر مربع) مشاهده گردید و ارقام ریژاو، تابش و زردک نیز به ترتیب بیش‌ترین سطح برگ را تحت تیمار نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم بر لیتر را داشته‌اند (جدول ۳)، که بیانگر اثر مثبت این ترکیب بر توسعه سطح فتوسنتزی گیاه است. تیمار آب در رقم زردک کم‌ترین سطح برگ را داشته است. به‌طور کلی، مصرف نانوکلات‌ها به‌ویژه نانو ذره روی در غلظت ۸ میلی‌گرم بر لیتر موجب افزایش قابل توجه سطح برگ در اکثر ارقام شد. مقایسه بین ارقام نشان داد که گندم‌های نان (جام و ریژاو) واکنش مطلوب‌تری به مصرف نانوکودها داشتند و توانستند سطح برگ بیش‌تری تولید کنند، در حالی که در ارقام دوروم، به‌ویژه زردک، کم‌ترین مقدار سطح برگ در تیمار شاهد به دست آمد. این نتایج حاکی از نقش تفاوت‌های ژنتیکی در بهره‌برداری از نهاده‌های نوین است و نشان می‌دهد که انتخاب رقم مناسب می‌تواند کارایی نانوکودها را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

تأثیر رقم و شکل مصرف کود قرار گرفت (جدول ۲). در میان ارقام مورد بررسی، گندم نان جام و گندم دوروم رقم زردک بیشترین محتوای نسبی آب برگ را در تیمار نانوذره روی ۸ میلی‌گرم بر لیتر بترتیب با ۸۶/۷ و ۸۴/۹ درصد به خود اختصاص دادند، که نشان‌دهنده پتانسیل ژنتیکی بالای این ارقام در بهره‌برداری از کودهای نوین و سازگاری بهتر با شرایط دیم است (جدول ۳). در مقابل، رقم ریژاو در تیمار شاهد و مصرف کودهای بالک آهن ۴ میلی‌گرم بر لیتر، مقادیر حداقل محتوای نسبی آب برگ را داشتند. این نتایج بیانگر آن است که انتخاب رقم مناسب به همراه مدیریت صحیح تغذیه می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات تنش خشکی در شرایط دیم ایفا کند. واکنش ارقام به تیمارهای نوع مصرف کود متفاوت بود.

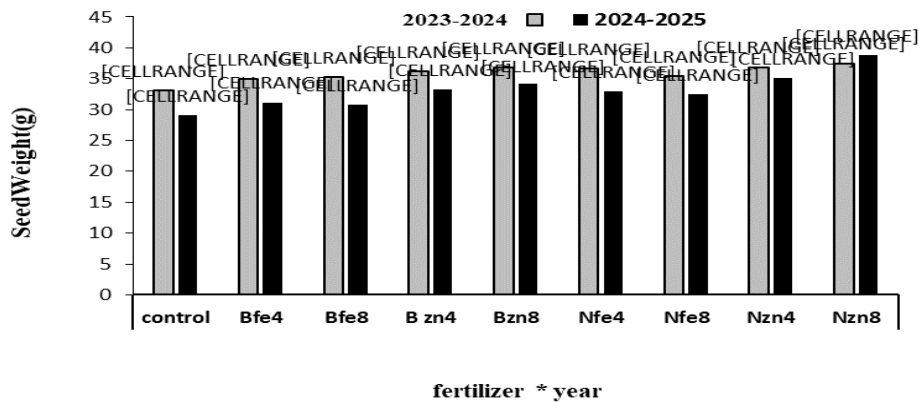
مصرف نانو ذرات به‌ویژه در غلظت ۸ میلی‌گرم بر لیتر، موجب افزایش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ در مقایسه با کودهای مرسوم گردید. این موضوع را می‌توان ناشی از اندازه کوچک ذرات، افزایش سطح تماس، و قابلیت جذب و انتقال بالاتر نانوکودها دانست که در نهایت به بهبود وضعیت آبی و حفظ تعادل اسمزی سلول‌ها منجر می‌شود. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که کاربرد نانوکودهای آهن و روی، علاوه بر بهبود جذب ریزمغذی‌ها، موجب افزایش کارایی مصرف آب و حفظ پایداری غشاء سلولی می‌شود (Barrs & Weatherley, 2013). بنابراین، نتایج این تحقیق تأکید می‌کند که استفاده از نانوکودها، به‌ویژه نانوذره روی، می‌تواند به‌عنوان راهکاری

دانه در تیمار نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم بر لیتر در سال دوم (۳۹ گرم) و سال اول (۳۸ گرم) بدست آمد. کم‌ترین وزن هزار دانه نیز در تیمار شاهد به دست آمد (شکل ۱). تیمارهای نانوذره نسبت به اشکال بالک از وزن هزار دانه بالاتری برخوردار بودند. اگر تأمین عناصر مغذی در زمان مناسب (انتقال کربوهیدرات‌ها به دانه) انجام شود، مواد فتوسنتزی انتقال یافته به دانه افزایش می‌یابد و وزن دانه زیاد می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد نانوکودها با تأمین کافی نیتروژن و سایر عناصر در دوره‌های حساس پر شدن دانه‌ها موجب افزایش وزن هزار دانه شده است. همچنین مطالعات افزایش وزن هزار دانه گیاه با کاربرد نانوکود را نشان داده‌اند (Mahroon *et al.*, 2024).

افزایش سطح برگ در اثر کاربرد نانوکودها علاوه بر بهبود ظرفیت فتوسنتزی، موجب افزایش ماده خشک و در نهایت بهبود عملکرد می‌گردد. پژوهش‌های پیشین نیز نشان داده‌اند که محلول‌پاشی نانوکودها می‌تواند موجب توسعه سطح برگ، تأخیر در پیری برگ و افزایش پایداری فتوسنتز در شرایط دیم گردد (Xu *et al.*, 2025; Ding *et al.*, 2023). بنابراین، نتایج این تحقیق تأکید می‌کند که استفاده از نانو ذره روی، به‌ویژه در غلظت ۸ میلی‌گرم بر لیتر، می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مدیریتی مؤثر برای بهبود شاخص سطح برگ و افزایش پتانسیل فتوسنتزی در گندم‌های دیم، به‌ویژه ارقام نان، توصیه شود.

وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر کود و سال بر وزن هزار دانه گندم معنی دار شد (جدول ۲). بیش‌ترین وزن هزار



شکل ۱: اثر متقابل تیمارهای کودی آهن و روی بر وزن هزار دانه گندم طی دو سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و ۱۴۰۴-۱۴۰۳

۱۴۰۳

Figure 1: Interaction effect of iron and zinc fertilizer treatments on the thousand-grain weight of wheat grains over two crop years of 2023-2024 and 2024-2025

تعداد دانه در سنبله

این شاخص مهم عملکرد، به شدت تحت تأثیر تیمارهای کودی قرار گرفت (جدول ۲). بالاترین مقدار در تیمار **نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر رقم جام (۳۳ دانه در سنبله) و سپس رقم زردک (۳۲ دانه)** به دست آمد و کمترین مقدار آن در تیمارهای اشکال بالک آهن ۴ میلی‌گرم بر لیتر (۱۹ دانه) و شاهد (۱۹ دانه) در رقم تابش و شاهد در رقم ریژاو (۲۰ دانه) مشاهده شد (جدول ۳). افزایش تعداد دانه احتمالاً ناشی از بهبود تغذیه زایشی و افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به سنبله‌هاست (Marhoon, 2024). تفاوت بین ارقام نشان داد که رقم جام بیشترین پتانسیل تولید دانه در سنبله را دارد و در پاسخ به نانوکودها رشد چشمگیری داشت.

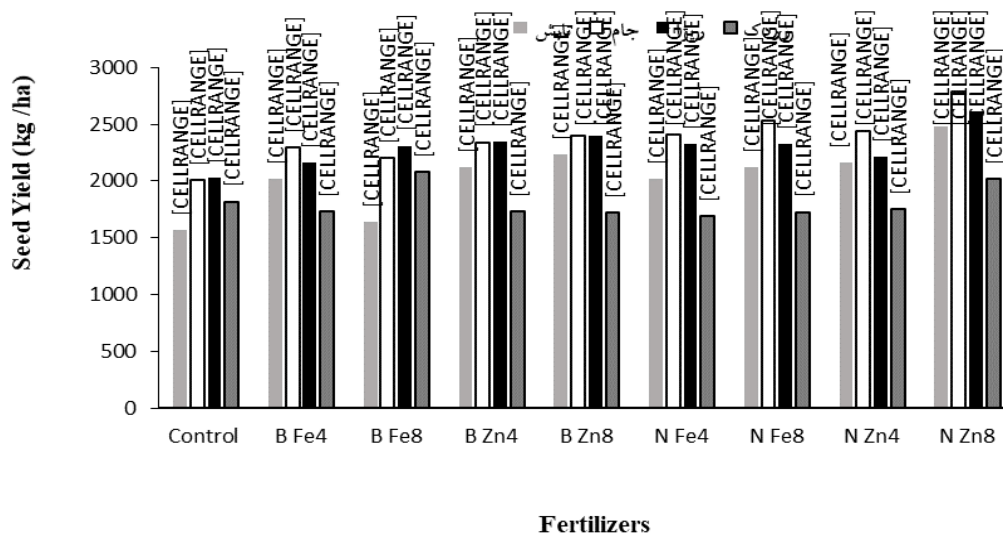
تعداد سنبله در مترمربع

این صفت به طور مستقیم با پتانسیل زایشی و عملکرد ارتباط دارد. بالاترین مقدار در تیمار **نانوذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر رقم تابش (۳۶۶ سنبله در مترمربع)** مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار در تمام تیمارهای کودی در رقم زردک بود (جدول ۳). این نشان می‌دهد که نانوکودها علاوه بر تحریک رشد رویشی، در فرآیند افزایش کمیت بذر در نتیجه افزایش تشکیل سنبله‌ها نیز مؤثر باشند. مقایسه بین ارقام نشان داد که رقم جام در شرایط محلول‌پاشی نانوکود بیشترین پتانسیل زایشی را دارد، در حالی که رقم تابش کمترین واکنش مثبت را نشان داد.

عملکرد دانه

عملکرد دانه به عنوان شاخص نهایی محصول، بیشترین تغییر را از تیمارهای کودی پذیرفت (جدول ۴). بیشترین عملکرد در تیمار نانوذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر در رقم جام (۲۷۹۱ کیلوگرم در هکتار) و سپس در تیمار نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر در رقم ریژاو (۲۶۱۶ کیلوگرم در هکتار) ثبت شد که نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۳۹ و ۲۹ درصد افزایش داشت در حالی که کمترین مقدار در تیمارهای کودی رقم زردک مشاهده گردید. در رقم زردک، بیشترین عملکرد دانه در بین تیمارهای کودی مربوط به تیمار نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر بود (شکل ۲). این نتایج بر اهمیت انتخاب ترکیب بهینه کود و رقم مناسب برای دستیابی به حداکثر پتانسیل رشد و عملکرد گندم تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که برنامه‌های مدیریت تغذیه‌ای باید به صورت خاص برای هر ژنوتیپ طراحی و بهینه‌سازی شوند.

مصرف نانوکودها، به‌ویژه نانوذره روی، با افزایش صفات رشدی و فیزیولوژیک، در نهایت موجب افزایش عملکرد دانه شد. این نتایج نشان‌دهنده برتری قابل ملاحظه نانوکودها نسبت به کودهای مرسوم در شرایط کشت دیم است. مطالعات مختلف نشان داده است در نتیجه افزودن کودهای نانو، افزایش قابل توجهی در عملکرد دانه گندم مشاهده شده است (AL-Juthery *et al.*, 2018; Armin & Mashhadi., 2014).



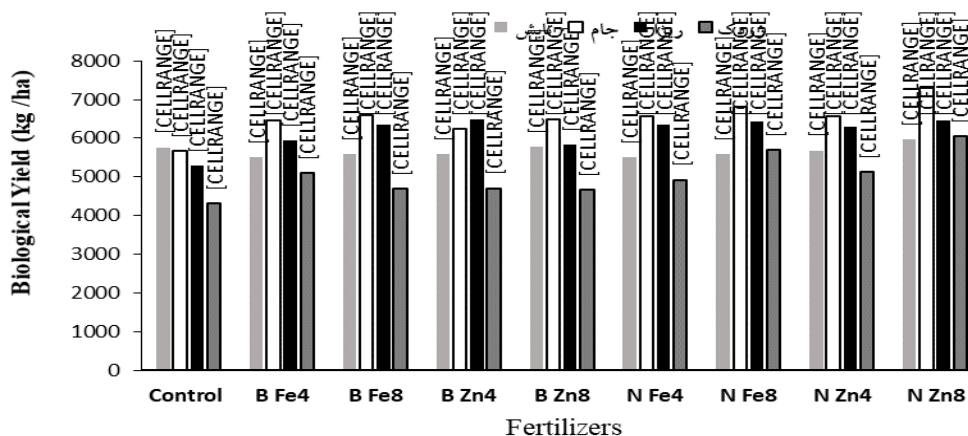
شکل ۲: اثر متقابل تیمارهای کودی آهن و روی بر عملکرد دانه ارقام گندم

Figure 2: Interaction effect of iron and zinc fertilizer treatments on grain yield of wheat cultivars

عملکرد بیولوژیک

مشخصی نسبت به سایر ارقام، پاسخ بهتری به تیمارهای کودی، به ویژه نانوذره‌ها نشان داد. عملکرد بیولوژیک برتر رقم جام را می‌توان عمدتاً به انباشت بالای کربوهیدرات و پروتئین‌های متنوع در بوته نسبت داد (Armin *et al.*, 2014). این برتری در عملکرد دانه، خود حاصل افزایش اجزای عملکرد و همچنین ویژگی‌های مطلوب رشد، از جمله ارتفاع بیش‌تر گیاه است که با افزایش سطح در معرض نور، امکان انجام فرآیند فتوسنتز کارآمدتری را فراهم می‌کند. گزارش‌های متعددی از افزایش عملکرد بیولوژیک گندم با کاربرد نانوکودها گزارش شده است (Hamoda, 2024; Al-Ghazali & Al-Zubaidy, 2023; Al-Juthery *et al.*, 2018).

اثر متقابل فاکتورهای مورد مطالعه بر عملکرد بیولوژیک نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). بیش‌ترین عملکرد بیولوژیک (۷۳۰۳ کیلوگرم در هکتار) در تیمار نانوذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر و رقم جام مشاهده شد. کم‌ترین مقدار آن (۴۳۰۶ کیلوگرم در هکتار) نیز مربوط به تیمار شاهد در رقم زردک بود. تنها در تیمار شکل بالک روی ۴ میلی‌گرم در لیتر رقم ریژاو نسبت به سایر ارقام از جمله جام عملکرد بیولوژیک بالاتری داشته است و در سایر تیمارهای کودی رقم جام وضعیت بهتری داشته است (شکل ۳). رقم جام به طور



شکل ۳: اثر متقابل تیمارهای کودی آهن و روی بر عملکرد بیولوژیک ارقام گندم

Figure 3: Interaction effect of iron and zinc fertilizer treatments on biological yield of wheat cultivars

جدول ۴: نتایج تجزیه مرکب اثر رقم و ترکیب کودهای آهن و روی بر برخی صفات گندم.

Table 4: Results of combine analysis of the effect of cultivar and combination of iron and zinc fertilizers on some wheat traits.

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی df	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	محتوای پروتئین کل Total protein content	محتوای کربوهیدرات کل Total carbohydrate content	غلظت آهن Iron concentration	غلظت روی Zinc concentration
سال Year	1	1804143.65*	13658000 ns	56.06 ns	365.08 ns	0.1 ns	0.05 ns
تکرار (سال) Replication	4	463694.12 *	6475629.99	2.09	412.24	0.06	0.0016
رقم Cultivar	3	3649482.55*	22394785.91ns	9.37 ns	57.54 ns	0.07 ns	0.06 ns
رقم × سال Cultivar*year	3	433921.35ns	3158615.25 ns	11.42 *	72.65 ns	0.02 **	0.01 *
خطای Errora	12	142501.39*	997546.78	2.82 ns	33.92	0.0018	0.0024
کود Fertilizer	8	635333.5 **	2516929.41 *	7.52 *	73.5 *	0.46 **	0.19 **
کود × سال Fertilizer*year	8	66526.57 ns	515458.08 ns	1.76 ns	12.57 ns	0.0049 ns	0.002 *

رقم × کود Cultivar* Fertilier	24	136097.49**	501091.39**	1.32**	5.91*	0.084**	0.054**
رقم × کود × سال Cultivar* Fertilier *year	24	14882.84 ^{ns}	117513.51 ^{ns}	0.32 ^{ns}	2.41 ^{ns}	0.0007 ^{ns}	0.0005 ^{ns}
خطای کل Total error	128	58146.98	606735.3	1.5	13.91	0.0036	0.0009
ضریب تغییرات C.V%	-	11.31	13.35	10.82	12.2	13.04	7.69

*, ** و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد و عدم معنی‌داری

*, ** and ^{ns} are significant at the 5 and 1 percent levels, respectively, and non-significant.

محتوای پروتئین کل

می‌تواند ناشی از افزایش جذب و انتقال نیتروژن و بهبود متابولیسم اسیدهای آمینه باشد (۴). این نتایج اهمیت نانوکودها را در بهبود کیفیت تغذیه‌ای دانه نشان می‌دهد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد. به طوریکه مطالعات نشان داده است که افزودن کودهای نانو به‌طور معنی‌داری محتوای پروتئین دانه گندم را در شرایط تنش خشکی افزایش می‌دهد (AL-Juthery *et al.*, 2019). همچنین، داپککار و همکاران نشان دادند که مصرف نانوکودهای آهن و روی، به‌ویژه در مراحل زایشی، موجب بهبود متابولیسم نیتروژن و افزایش محتوای پروتئین می‌شود. محلول‌پاشی روی تحت تنش خشکی، از طریق بهبود فعالیت آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم نیتروژن و افزایش تثبیت پروتئین در دانه، موجب ارتقای کیفیت نهایی محصول می‌شود (Dapkekar *et al.*, 2018). افزون بر این، مطالعات نشان داده است که کاربرد نانوذرات ZnO نه تنها عملکرد دانه را

نتایج این پژوهش نشان داد که محتوای پروتئین دانه گندم به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل رقم و تیمارهای محلول‌پاشی آهن و روی قرار گرفت (جدول ۴). بیش‌ترین مقدار در تیمار نانوذره‌های روی ۸ میلی‌گرم در لیتر رقم ریژا (۱۲/۷۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) ثبت شد که نسبت به شاهد این رقم حدود ۱۹ درصد افزایش داشت. در حالی که کم‌ترین مقدار در تیمار شاهد رقم جام (۹/۵۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده گردید. این نتایج بیانگر آن است که محلول‌پاشی نانوذره روی در غلظت‌های بالاتر، با بهبود دسترسی گیاه به ریزمغذی‌ها، توانایی سنتز ترکیبات نیتروژنی و در نهایت تجمع پروتئین در دانه را افزایش می‌دهد (۶). در همه ارقام، استفاده از کودهای آهن به صورت نانوذره نسبت به شکل بالکی آنها باعث افزایش محتوای پروتئین کل شده است (جدول ۵). افزایش پروتئین دانه در اثر مصرف نانوکودها

بهبود می‌بخشد بلکه غلظت پروتئین و روی را نیز در دانه افزایش می‌دهد (Kausar *et al.*, 2023).

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر رقم و ترکیب کودهای آهن و روی بر صفات کیفی دانه گندم

Table 5 - Results of the mean comparison effect of cultivar and iron and zinc fertilizers on wheat grain quality traits

رقم Variety	کود Fertilizer	محتوای پروتئین کل (میلی گرم بر گرم) Total protein content (mg/g)	محتوای کربوهیدرات کل (میلی گرم بر گرم) Total carbohydrate content (mg/g)	غلظت آهن (میلی گرم بر گرم) Iron concentration (mg/g)	غلظت روی (میلی گرم بر گرم) Zinc concentration (mg/g)
	شاهد Control	10.99 ^{c-g}	29.73 ^{c-h}	0.43 ^{jk}	0.32 ^{j-m}
	بالک آهن ۴ میلی گرم بر لیتر Fe (bulk): 4 mg L ⁻¹	10.26 ^{gh}	28.63 ^{d-h}	0.46 ^{ij}	0.27 ^{n-o}
	نانوذره ۸ میلی گرم بر لیتر Fe (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	10.46 ^{gh}	29.38 ^{d-h}	0.52 ^{g-i}	0.26 ^o
	بالک روی ۴ میلی گرم بر لیتر Zn (bulk): 4 mg L ⁻¹	10.68 ^{f-h}	30.85 ^{a-g}	0.32 ^{lmn}	0.41 ^g
تابش Tabesh	بالک روی ۸ میلی گرم بر لیتر Zn (bulk): 8 mg L ⁻¹	10.85 ^{d-h}	31.79 ^{a-f}	0.32 ^{l-n}	0.46 ^e
	نانو ذره آهن ۴ میلی گرم بر لیتر Fe (nanoparticles): 4 mg L ⁻¹	11.23 ^{b-g}	30.12 ^{b-h}	0.52 ^{g-i}	0.33 ^{j-m}
	نانو ذره آهن ۸ میلی گرم بر لیتر Fe (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	11.61 ^{a-g}	31.34 ^{a-f}	0.61 ^{c-f}	0.22 ^p

	نانو ذره روی ۴ میلی‌گرم بر لیتر Zn (nanoparticles): 4 mg L ⁻¹	11.11 ^{b-g}	31.86 ^{a-f}	0.30 ⁿ	0.46 ^{ef}
	نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم بر لیتر Zn (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	11.88 ^{a-f}	34.03 ^{ab}	0.30 ⁿ	0.50 ^{b-d}
جام Jam	شاهد Control	9.52 ^h	25.98 ^h	0.43 ^{jk}	0.32 ^{k-m}
	بالک آهن ۴ میلی‌گرم بر لیتر Fe (bulk): 4 mg L ⁻¹	10.67 ^{f-h}	29.26 ^{d-h}	0.52 ^{hi}	0.32 ^{k-m}
	بالک آهن ۸ میلی‌گرم بر لیتر Fe (bulk): 8 mg L ⁻¹	10.35 ^{gh}	28.33 ^{e-h}	0.54 ^{f-h}	0.29 ^{m-o}
	بالک روی ۴ میلی‌گرم بر لیتر Zn (bulk): 4 mg L ⁻¹	10.82 ^{e-h}	29.99 ^{b-h}	0.34 ^{l-n}	0.41 ^g
	بالک روی ۸ میلی‌گرم بر لیتر Fe (bulk): 8 mg L ⁻¹	11.43 ^{a-g}	31.35 ^{a-f}	0.32 ^{lmn}	0.43 ^{fg}
	نانو ذره آهن ۴ میلی‌گرم بر لیتر Zn (nanoparticles): 4 mg L ⁻¹	10.76 ^{e-h}	30.01 ^{b-h}	0.64 ^{bcd}	0.33 ^{i-l}
	نانو ذره آهن ۸ میلی‌گرم بر لیتر Fe (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	11.26 ^{b-g}	30.92 ^{a-g}	0.71 ^{ab}	0.31 ^{k-m}
	نانو ذره روی ۴ میلی‌گرم بر لیتر Zn (nanoparticles): 4 mg L ⁻¹	11.26 ^{b-g}	31.65 ^{a-f}	0.37 ^{klm}	0.49 ^{c-e}

	نانو ذره روی ۸ میلی گرم بر لیتر Zn (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	12.38 ^{abc}	35.05 ^a	0.38 ^{kl}	0.61 ^a
ریژاو Rizhao	شاهد Control	10.77 ^{e-h}	26.7 ^{g-h}	0.44 ^{jk}	0.31 ^{k-m}
	بالک آهن ۴ میلی گرم بر لیتر Fe (bulk): 4 mg L ⁻¹	10.43 ^{gh}	26.3 ^{e-h}	0.47 ^{ij}	0.29 ^{m-o}
	بالک آهن ۸ میلی گرم بر لیتر Fe (bulk): 8 mg L ⁻¹	11.97 ^{a-f}	29.43 ^{d-h}	0.58 ^{d-g}	0.3 ^{l-n}
	بالک روی ۴ میلی گرم بر لیتر Zn (bulk): 4 mg L ⁻¹	11.35 ^{b-g}	29.7 ^{d-h}	0.30 ⁿ	0.36 ^{hi}
	بالک روی ۸ میلی گرم بر لیتر Fe (bulk): 8 mg L ⁻¹	11.95 ^{a-f}	31.42 ^{a-f}	0.33 ^{lmn}	0.42 ^g
	نانو ذره آهن ۴ میلی گرم بر لیتر Fe (nanoparticles): 4 mg L ⁻¹	12.48 ^{ab}	27.86 ^{f-h}	0.56 ^{e-h}	0.34 ^{h-k}
	نانو ذره آهن ۸ میلی گرم بر لیتر Fe (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	12.23 ^{a-d}	29.66 ^{d-h}	0.64 ^{bcd}	0.31 ^{k-m}
	نانو ذره روی ۴ میلی گرم بر لیتر Zn (nanoparticles): 4 mg L ⁻¹	12.34 ^{a-c}	30.78 ^{b-g}	0.31 ^{mn}	0.41 ^g
	نانو ذره روی ۸ میلی گرم بر لیتر Zn (nanoparticles): 8 mg L ⁻¹	12.78 ^a	32.16 ^{a-e}	0.33 ^{l-n}	0.47 ^{de}

زردک Zardak	شاهد Control	10.27 ^{g-h}	28.44 ^{e-h}	0.51 ^{hi}	0.37 ^h
	بالک آهن ۴ میلی‌گرم بر لیتر	12.16 ^{a-e}	31.91 ^{a-f}	0.62 ^{cde}	0.33 ^{i-l}
	Fe (bulk): 4 mg L ⁻¹				
	بالک آهن ۸ میلی‌گرم بر لیتر	11.54 ^{a-g}	31.63 ^{a-f}	0.67 ^{abc}	0.32 ^{k-m}
	Fe (bulk): 8 mg L ⁻¹				
	بالک روی ۴ میلی‌گرم بر لیتر	11.09 ^{b-g}	31.41 ^{a-f}	0.31 ^{lmn}	0.48 ^{c-e}
	Zn (bulk): 4 mg L ⁻¹				
	بالک روی ۸ میلی‌گرم بر لیتر	11.12 ^{b-g}	31.46 ^{a-f}	0.30 ⁿ	0.51 ^{bc}
	Zn (bulk): 8 mg L ⁻¹				
	نانو ذره آهن ۴ میلی‌گرم بر لیتر	11.45 ^{a-g}	32.20 ^{a-e}	0.67 ^{abc}	0.36 ^{h-j}
	Fe (nanoparticles): 4 mg L ⁻¹				
	نانو ذره آهن ۸ میلی‌گرم بر لیتر	12.07 ^{a-f}	32.84 ^{a-d}	0.72 ^a	0.36 ^{h-i}
	Fe(nanoparticles): 8 mg L ⁻¹				
	نانو ذره روی ۴ میلی‌گرم بر لیتر	11.92 ^{a-f}	32.29 ^{a-e}	0.34 ^{lmn}	0.52 ^b
	Zn(nanoparticles): 4 mg L ⁻¹				
	نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم بر لیتر	12.06 ^{a-f}	33.99 ^{a-c}	0.34 ^{lmn}	0.59 ^a
	Zn(nanoparticles): 8 mg L ⁻¹				

در هر ستون، تیمارهایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

In each column, treatments that have the same letters are not significantly different from each other based on the LSD test at the 5% probability level.

محتوای کربوهیدرات کل

میزان کربوهیدرات کل دانه نیز تحت تأثیر تیمارهای کودی قرار گرفت (جدول ۴). بیشترین مقدار در تیمار نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر رقم جام (۳۵/۰۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد و کمترین مقدار آن در تمامی ارقام در تیمار شاهد و بالک آهن ۴ میلی‌گرم در لیتر به‌دست آمد (جدول ۵). نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر در تمامی ارقام محتوای کربوهیدرات را به طور قابل توجهی افزایش داشته است به طوری‌که محتوای کربوهیدرات در ارقام تابش، جام، ریژاو و زردک نسبت به شاهد به ترتیب ۱۴، ۳۵، ۲۰ و ۱۹ درصد افزایش داشته است. افزایش کربوهیدرات‌ها نشان‌دهنده بهبود فتوسنتز و انتقال مواد پرورده در حضور نانوکودهاست. این امر نقش مؤثری در بهبود ارزش انرژی دانه ایفا می‌کند.

غلظت آهن و روی دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل رقم و ترکیب کودهای آهن و روی بر غلظت آهن و روی دانه گندم معنی‌دار بود (جدول ۴). غلظت عناصر ریزمغذی در دانه با کاربرد کودهای آهن و روی به‌طور چشمگیری بهبود یافت. بیشترین غلظت آهن در تیمار نانو ذره آهن ۸ میلی‌گرم در لیتر رقم زردک (۷۲/۰ میلی‌گرم در گرم) و بیشترین غلظت روی در تیمار نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر رقم جام (۶۱/۰ میلی‌گرم در گرم) و تیمار نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر رقم زردک (۰/۵۹ میلی‌گرم در گرم) ثبت شد (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد که نانوکودها علاوه بر افزایش عملکرد، نقش کلیدی در

غنی‌سازی زیستی دانه دارند و می‌توانند به بهبود امنیت غذایی و کاهش کمبود ریزمغذی‌ها در رژیم غذایی کمک کنند. به طور کلی، کاربرد نانو ذره‌های آهن و روی به ویژه در سطح ۸ میلی‌گرم در لیتر، منجر به بهبود معنی‌دار در جذب و انباشت این عناصر در دانه اکثر ارقام مورد مطالعه در مقایسه با تیمار شاهد و فرم‌های معمول بالک شد. این یافته‌ها مؤثر بودن استفاده از نانوذرها به عنوان منبع کودی برای بهبود کیفیت غذایی دانه گندم از طریق افزایش غلظت عناصر ریزمغذی آهن و روی را به وضوح نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، محلول‌پاشی نانوذرها به‌ویژه در غلظت ۸ میلی‌گرم در لیتر، موجب افزایش معنی‌دار تمام صفات رشدی، فیزیولوژیک، زایشی و کیفی گندم دیم شد. ارقام نان (جام و ریژاو) واکنش بهتری نسبت به ارقام دوروم نشان دادند و بالاترین عملکرد و کیفیت دانه را به خود اختصاص دادند. نتایج تجزیه مرکب نشان داد اثر متقابل رقم و نوع کود بر اغلب صفات معنی‌دار بود. بیشترین ارتفاع بوته، محتوی نسبی آب برگ، سطح برگ و تعداد دانه در سنبله در گندم نان رقم جام با تیمار نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر حاصل شد. عملکرد دانه و زیست‌توده تحت تأثیر مصرف نانوکودها به‌ویژه در غلظت ۸ میلی‌گرم در لیتر افزایش معنی‌دار یافت و بیشترین عملکرد در تیمار نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر در رقم جام و سپس در تیمار نانو ذره روی ۸ میلی‌گرم در لیتر در رقم ریژاو حاصل شد. علاوه بر این، محتوای کربوهیدرات،

ارقام گندم به کاربرد کودهای میکرو (آهن و روی) بسیار خاص و وابسته به ژنوتیپ است. بنابراین، کاربرد نانوکودها می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر در بهبود عملکرد و کیفیت گندم‌های دیم بویژه گندم نان و نیز در برنامه‌های غنی‌سازی زیستی توصیه گردد. ارقام نان واکنش مطلوب‌تری به محلول‌پاشی نانوکودها نشان دادند و در شاخص‌های فتوسنتزی و عملکرد برتر بودند.

پروتئین دانه، غلظت آهن و روی دانه به‌طور قابل توجهی در تیمارهای نانو ذره افزایش یافت. کاربرد نانو ذره آهن و روی، به‌ویژه در غلظت ۸ میلی‌گرم در لیتر، به‌طور معنی‌داری موجب بهبود صفات فیزیولوژیک، افزایش عملکرد و غنی‌سازی دانه‌های گندم با آهن و روی شد. تفاوت واکنش ارقام نشان‌دهنده اهمیت انتخاب رقم مناسب در کنار مدیریت نوین تغذیه‌ای است. در مجموع، این یافته‌ها به وضوح مؤید این موضوع است که پاسخ

References

- Abdi Benemar, H., Seifdavati, J., & Fathi Achachlouei, B. 2018. Comparison of Hach Method with Kjeldahl Method for Determining of Crude Protein Contents of Some Animal Feeds. *Research On Animal Production*, 818: 107-112.
- Al-Juthery, H. W., Hassan, A. K. H., Musa, R. F., & Sahan, A. H. 2018. Maximize growth and yield of wheat by foliar application of complete nano-fertilizer and some bio-stimulators. *Research on Crops*, 19,3, 387-393. DOI : 10.31830/2348-7542.2018.0001.4.
- Alloway, B. J. 2008. Zinc in soils and crop nutrition (2nd ed.). Paris: International Zinc Association (IZA) and International Fertilizer Industry Association (IFA). <http://dx.doi.org/10.4236/abb.2016.76027>.
- Armin, MSA .S., Mashhadi. 2014. Effect of Time and Concentration of nano-Fe Foliar application on Yield and Yield Components of Wheat. *International Journal of Biological Sciences*, 4 ,1, 69-75. <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/4.9.69-75>.
- Barrs, H. D., & Weatherley, P. E. 2013. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian journal of biological sciences* 5,3, 413-428. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification. *Plant and soil*, 302,1, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>.
- 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. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25247-5>.
- DeRosa, M. C., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R., & Sultan, Y. 2010. Nanotechnology in fertilizers. *Nature nanotechnology*, 5,2, 91-91. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.2>
- Dimkpa, C. O., Bindraban, P. S., Fugice, J., Agyin-Birikorang, S., Singh, U., & Hellums, D. (2017). Composite micronutrient nanoparticles and salts decrease drought stress in soybean. *Agronomy for Sustainable Development*, 37,5, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0441-7>
- Ding, Y., Zhao, W., Zhu, G., Wang, Q., Zhang, P., & Rui, Y. 2023. Recent trends in foliar nanofertilizers: a review. *Nanomaterials*, 13,21, 2906. <https://doi.org/10.3390/nano13212906>.

- El-Shal, R. M., El-Naggar, A. H., El-Beshbeshy, T. R., Mahmoud, E. K., El-Kader, N. I. A., Missaui, A. M., ... & El-Sharkawy, M. S. 2022. Effect of nano-fertilizers on alfalfa plants grown under different salt stresses in hydroponic system. *Agriculture*, 12,8, 1113. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081113>.
- Fatollahpour Grangah, M., Rashidi, V., Mirshekari, B., Khalilvand Behrouzgar, E., & Farahvash, F. 2020. Effects of nano-fertilizers on physiological and yield characteristics of pinto bean cultivars under water deficit stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43(19), 2898-2910. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1799000>.
- Irigoyen, J. J., Einerich, D. W. & SánchezDíaz, M. .1992. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia plantarum*, 84 ,1, 55-60. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x>.
- Kamali Omidi, T., Khorgami, A., & Taleshi, K. 2022. Effect of foliar application of humic acid levels and nano-fertilizer application on some quantitative and qualitative traits of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) in climatic conditions of Khorramabad area, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 20,3, 467-476. DOI: 10.22124/CJES.2022.5638.
- Kausar, A., Hussain, S., Javed, T., Zafar, S., Anwar, S., Hussain, S., ... & Saqib, M. 2023. Zinc oxide nanoparticles as potential hallmarks for enhancing drought stress tolerance in wheat seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 195, 341-350. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.01.014>.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42,3,: 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>.
- Liu, R., & Lal, R. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*, 514, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104>
- Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W. N., & Biswas, P. 2016. Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*, 7,12, 1584-1594. <https://doi.org/10.1039/C5MT00168D>
- Rameshaiah, G. N., Pallavi, J., & Shabnam, S. 2015. Nano fertilizers and nano sensors—An attempt for developing smart agriculture., 3,1, 314-320. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>.
- Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Adrees, M., Ibrahim, M., ... & Al-Wabel, M. I. 2019. Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 322,2, 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.061>.
- Al-Ghazali, Z. A. K., & Al-Zubaidy, S. A. A. H. 2023. Effect of Combinations of Chemical, Nano-Fertilizer and Bio-Fertilizer NPK on Yield and Quality Traits of some Bread Wheat Cultivars *Triticum aestivum* L. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1262, No. 5, p. 052049). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1262/5/052049>.
- Hamoda, A. M. 2024. Effect of nano-fertilizer and bio-growth regulator on yield attributes of wheat. *Journal of Plant Production*, 15,3, 101-109. <https://doi.org/10.21608/jpp.2024.266830.1305>.

- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., ... & Battaglia, M. L. 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10,2, 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>.
- Seyed Sharifi, R., Khalilzadeh, R., Pirzad, A., & Anwar, S. 2020. Effects of biofertilizers and nano zinc-iron oxide on yield and physicochemical properties of wheat under water deficit conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51.19, 2511-2524. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1845350.3>
- Sharma, A., Dhaliwal, S. S., & Shukla, A. K. 2013. Enhancing grain zinc and iron concentration through foliar application of zinc and iron salts in wheat genotypes grown on typic ustipsamment. *Journal of Xu, J., Cui, Y., Wang, J., Liu, Z., Zhao, C., Liu, Z., Niu, N., Chen, L., Xhao, X & Fu, Y. 2025. Advances of nano-photofertilizers in plant research. Nanoscale*, 17 ,27, 16153-16192. <https://doi.org/10.1039/D5NR00906E>.