

اثر نانوکود ارگانیک و اسید فولویک بر عملکرد و برخی از شاخص‌های کیفی گندم در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

خدیدجه آقائی فرد^۱، یاور درگاهی^۲، احمد توبه^۳، اصغر مهربان^{۴*}، کمال شهبازی هومونلو^۵، کرامت اخوان^۶

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۳- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۴- استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.

۵- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.

۶- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.

چکیده مبسوط

مقدمه: تنش خشکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که رشد و عملکرد گندم را به‌ویژه در مناطق دیم و نیمه‌خشک محدود می‌کند. آبیاری تکمیلی در مراحل حساس رشد و کاربرد ترکیبات آلی مانند نانوکود ارگانیک و اسید فولویک از راهکارهای مؤثر برای بهبود تحمل به تنش کم‌آبی و افزایش کمیت و کیفیت محصول است. این پژوهش با هدف بررسی اثر نانوکود ارگانیک و اسید فولویک بر عملکرد و شاخص‌های کیفی گندم در شرایط مختلف آبیاری انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش: آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان) اجرا گردید. عامل اصلی شامل سه سطح آبیاری (بدون آبیاری یا دیم، آبیاری تکمیلی در مرحله خوشه‌دهی و آبیاری کامل) و عوامل فرعی شامل دو رقم گندم «دیم» «آفتاب» و آبی «تکتاز»، پیش‌تیمار بذر با نانوکود ارگانیک (صفر و یک در هزار) و محلول‌پاشی اسید فولویک (با غلظت‌های صفر، ۵ و ۱۰ گرم در لیتر) بودند. صفات اندازه‌گیری‌شده شامل غلظت عناصر ریزمغذی (آهن، روی، منگنز، بر و مس)، درصد فسفر و پتاسیم دانه، عملکرد فسفر دانه، میزان اسید فیتیک، نسبت مولی اسید فیتیک به آهن و روی، درصد پروتئین دانه و عملکرد دانه بودند.



* نگارنده مسئول: asgharmehraban@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۸

یافته‌های پژوهش: نتایج نشان داد که بیشترین غلظت آهن (۹۵/۴۹۵)، روی (۴۰/۲۴۱)، منگنز (۶۱/۳۳۵)، بر (۹/۲۴۶) و مس (۳۹/۳۴۹) میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار آبیاری کامل × رقم تکتاز و کمترین مقادیر در شرایط دیم × رقم تکتاز به‌دست آمد. پیش‌تیمار بذر با نانوکود ارگانیک به‌طور معنی‌داری درصد فسفر و پتاسیم دانه را به‌ترتیب ۳/۷۳ و ۲/۴۷ درصد افزایش داد و محلول‌پاشی اسید فولویک (۱۰ گرم در لیتر) نیز درصد فسفر دانه را ۷/۳۴ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. در هر سه سطح آبیاری، کاربرد توأم نانوکود ارگانیک و اسید فولویک باعث کاهش معنی‌دار اسید فیتیک دانه و نسبت مولی آن به آهن و روی گردید. درصد پروتئین دانه در اثر پیش‌تیمار با نانوکود ارگانیک ۷/۸ درصد و در اثر محلول‌پاشی اسید فولویک با غلظت‌های ۵ و ۱۰ گرم در لیتر به‌ترتیب ۸/۴۶ و ۱۳/۳۹ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. بیشترین عملکرد دانه (۶۰۸۲ کیلوگرم در هکتار) در تیمار آبیاری کامل × پیش‌تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول‌پاشی ۱۰ گرم در لیتر اسید فولویک × رقم تکتاز حاصل شد، در حالی‌که کمترین عملکرد (۱۲۱۸ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار دیم × بدون نانوکود و اسید فولویک × رقم تکتاز بود. به‌طور کلی، کاربرد نانوکود ارگانیک و محلول‌پاشی اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر، به‌ویژه با آبیاری تکمیلی، ضمن افزایش عملکرد دانه، پروتئین و غنی‌سازی ریزمغذی‌ها، باعث کاهش ترکیب ضدتغذیه‌ای اسید فیتیک گردید و می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر در راستای کشاورزی پایدار و بهبود کیفیت گندم در مناطق دیم و نیمه‌خشک توصیه شود.

کلمات کلیدی: آبیاری تکمیلی، اسید فیتیک، درصد پروتئین دانه، محلول‌پاشی، گندم

مقدمه

فتوسنتز را مهار کرده و با ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاه، رشد و در نتیجه عملکرد گندم را کاهش می‌دهد (Wang et al., 2018; Dhakal, 2021). با این حال، این تنش بسته به زمان، مدت و شدت آن بر رشد و کیفیت گندم اثر می‌گذارد (Tatar et al., 2016). محققان گزارش کرده‌اند که رشد، فتوسنتز، فرآیندهای متابولیک، جذب مواد مغذی و عملکرد گندم در اثر تنش خشکی، کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد (Hasanuzzaman et al., 2017). در یک پژوهش، تنش خشکی باعث کاهش قابل توجه مواد مغذی مانند فسفر، کلسیم، روی، سدیم، پتاسیم، آهن و منیزیم شد. این به دلیل اثر منفی آن بر جذب عناصر غذایی، تنظیم و مصرف آن‌ها در گیاه به دلیل فعالیت های فیزیولوژیکی نامناسب بود (Tanveer et al., 2024). ایستپلیلر و همکاران (Istipliler et al., 2017) کاهش عملکرد دانه در مرحله پس از گرده‌افشانی بر اثر تنش خشکی را گزارش کردند. عبدلاوی و همکاران (Abdellaoui

گندم (*Triticum aestivum* L.) به‌عنوان پر مصرف‌ترین غله در جهان، نقش اساسی در تهیه غذای انسان‌ها ایفا می‌کند (Giraldo et al., 2019). این گیاه، منبع اصلی پروتئین و انرژی برای بخش عظیم جمعیت دنیا به‌شمار می‌رود و به‌عنوان غذای پایه در بسیاری از کشورهای دنیا شناخته می‌شود. گندم حدود ۲۰ درصد از پروتئین و ۲۱ درصد از کالری مورد نیاز حدود ۴/۵ میلیارد نفر را در ۹۴ کشور مختلف جهان تأمین می‌کند (Chowdhury et al., 2021).

در حال حاضر تنش خشکی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین تنش‌های غیرزنده است که می‌تواند رشد و عملکرد گندم را مختل کند (Duan et al., 2017). به‌طوری‌که، تنش آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک یکی از دلایل اصلی در کاهش شاخص‌های کمی و کیفی گیاهان است (Jahan et al., 2015). تنش خشکی میزان آب گیاه را کاهش داده،

هستند و توانایی حمل مناسب یون‌های عناصر غذایی را دارند (Subramanian *et al.*, 2015). تحقیقات نشان داده است که تولید نهاده‌های کودی با اندازه نانو می‌تواند اثر مفیدی بر کارایی کودها داشته باشد (Mastronardi *et al.*, 2015).

در کشاورزی پایدار و ارگانیک، هدف اصلی کاربرد کودهای آلی و زیستی، افزایش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی است (Haj Seyyed Hadi and Rezai Ghale, 2016). نشان داده شده است که مواد آلی بر رشد گیاه، عملکرد، جذب مواد مغذی و دسترسی به عناصر غذایی تأثیر دارند (Dinçsoy and sonmez, 2019). همچنین، کاربرد

خارجی برخی ترکیبات آلی علاوه بر افزایش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی، به‌عنوان یک استراتژی مهم برای بهبود تحمل به تنش گیاه ظاهر شده است (Bhat *et al.*, 2023). در این راستا، یکی از منابع مهم مواد آلی، اسیدهای آلی هستند (Karimi *et al.*, 2016). نشان داده شده است که اسید فولویک، یک مشتق طبیعی فولات، واکنش‌های گیاه را به تنش‌های غیرزیستی مختلف از جمله خشکی تعدیل می‌کند. اسید فولویک نقش مهمی در گیاهان به‌عنوان یک کوفاکتور در متابولیسم تک کربن و مشارکت در سنتز اسیدهای نوکلئیک و اسیدهای آمینه ایفا می‌کند (Alsamadany *et al.*, 2022). علاوه بر این، دارای خواص آنتی اکسیدانی است و می‌تواند آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش‌های محیطی را کاهش دهد (Tanveer *et al.*, 2024).

اسید فولویک در واقع ماده‌ای هیومیکی است که حاصل تجزیه بقایای موجودات زنده و بدون اثرهای مخرب زیست محیطی است (Ayoubizadeh *et al.*, 2020). محلول‌پاشی اسید فولویک می‌تواند یک رویکرد سازگار با محیط زیست و مؤثر برای دستیابی به تقویت زیستی زراعی باشد (Wang *et al.*, 2020). در آزمایشی با مصرف محرک رشد

(*et al.*, 2022) بیان کردند که تنش خشکی در گندم، اثر منفی روی صفات عملکرد دانه داشت. زانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2018) نیز، در پژوهش خود اعلام کردند که در تنش‌های ملایم و شدید عملکرد دانه گندم بین ۲۱ تا ۳۲ درصد کاهش یافت.

با این حال، اعمال آبیاری تکمیلی در مرحله بحرانی نیاز آبی گیاه، یکی از روش‌های مؤثر در جلوگیری از نوسان عملکرد و دستیابی به تولید پایدار محصولات کشت دیم در مناطق خشک و نیمه-خشک می‌باشد. در این روش، اثرات تنش خشکی بر گیاه کاهش یافته و رطوبت نسبتاً مناسبی برای گیاه، به‌ویژه در مراحل حساس رشد گیاه، فراهم می‌گردد و به‌دنبال آن عملکرد بهبود می‌یابد (Karimi and Joleini, 2019). در یک بررسی، آبیاری تکمیلی به‌میزان ۵۰ میلی‌متر آبیاری در مرحله گلدهی نسبت به بدون آبیاری، عملکرد دانه گندم را ۴۳ درصد افزایش داد (Heidarpour and Talaei, 2017). مان و همکاران (Man *et al.*, 2016) گزارش کردند که آبیاری تکمیلی در گندم باعث افزایش ۲۸ و ۲۲ درصدی عملکرد دانه در دو رقم گندم شد. جنگ‌دوست و همکاران (Jangdoust *et al.*, 2017) نیز، اعلام کردند که تنش خشکی موجب کاهش عملکرد دانه (۱۹/۷۲ درصد) نسبت به تیمار آبیاری تکمیلی گردید.

در سال‌های اخیر، استفاده بیش از حد کودهای شیمیایی و مصرف کمتر کودهای آلی، منجر به کاهش قابل توجه مقدار ماده آلی خاک شده است (Karimi *et al.*, 2016). همچنین، از آن‌جا که بیشتر این عناصر غذایی به‌طور مؤثر توسط گیاهان جذب نمی‌شوند، استفاده از نانوکودها می‌تواند کارایی جذب کودها، عملکرد و کیفیت محصول را افزایش دهد و اثرهای منفی کودهای شیمیایی را کاهش دهد (Seleiman *et al.*, 2020). نانوکودها حامل عناصر غذایی در ابعاد ۳۰ تا ۴۰ نانومتر

اسید فولویک در مراحل فنولوژیکی مختلف گندم، عملکرد و پروتئین دانه گندم افزایش یافت (Javadi et al., 2017). پورمراد و همکاران (Pourmorad et al., 2018) و زبون و باقیر (Zeboon and Baqir, 2023) نیز، در پژوهش خود بیان کردند که محلول پاشی اسید فولویک به طور قابل توجهی بر عملکرد دانه اثر گذاشت و سبب افزایش عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد. در برخی از مطالعات اثر اسید فولویک بر افزایش طول ریشه و افزایش جذب عناصر معدنی نیز، گزارش شده است (Javadi et al., 2017). در یک بررسی، اسید فولویک جذب مواد مغذی را بهبود بخشید. حداکثر جذب فسفر، کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم تحت تیمار ترکیبی اسید فولویک و کنسرسیوم باکتریایی مشاهده شد. در حالی که، بیشترین مقدار فسفر و کلسیم در تیمار محلول-پاشی اسید فولویک به دست آمد (Tanveer et al., 2024).

از طرفی، با توجه به اهمیت گندم در تغذیه مردم کشورها، توجه به کیفیت آن به خصوص از نظر میزان ریزمغذی ها مانند آهن، میزان حضور ترکیبات ضد تغذیه ای مانند اسید فیتیک و عملکرد کمی و کیفی پروتئین با هدف کمک به بهبود شرایط تغذیه ای مردم به ویژه اقشار کم درآمد و آسیب پذیر ضروری می باشد (Javadi et al., 2017). به طوری که، کم خونی ناشی از فقر آهن از مشکلات کنونی جامعه می باشد که دلیل اصلی آن تنوع پائین رژیم غذایی مردم این کشورها و نقش عمده غلات به خصوص گندم در تأمین انرژی و ریزمغذی ها است (Javadi et al., 2017). همچنین، فیتیک اسید موجود در دانه گندم از عواملی است که موجب کاهش دسترسی زیستی عناصر ریز مغذی یا به عبارت دیگر کاهش میزان جذب این عناصر در دستگاه گوارش انسان می گردد. این اسید با آهن، روی، کلسیم و مس کمپلکس تشکیل داده

و بدین ترتیب موجب دفع این عناصر از بدن می شود. بنابراین با کاهش این اسید در دانه گندم از طریق اصلاح نباتات می توان به طور مؤثری دسترسی زیستی به عناصر ریزمغذی مهمی مانند آهن و روی را افزایش داد (Rajabi, 2015).

بر این اساس، امروزه محققان به دنبال راهکاری هستند که ضمن افزایش عملکرد گیاهان زراعی، بتوانند کیفیت آن ها را با استفاده از روش های به زراعی و به نژادی افزایش دهند. در این راستا، غنی سازی زیستی روشی است که هر دو بعد کمی و کیفی امنیت غذایی را به طور هم زمان متأثر می کند و محققان بسیاری آن را مناسب ترین راه برای بهبود امنیت غذایی و کاهش سوء تغذیه عنوان می کنند (Blancquaert et al., 2014; Abdoli et al., 2016; Esfandiari and Abdoli, 2016; Esfandiari et al., 2016). بنابراین به دلیل اهمیت محرک های رشد گیاهی بر روی جذب عناصر غذایی و ویژگی های رشدی گندم به ویژه در شرایط تنش کم آبی، این تحقیق با هدف بررسی اثر نانوکود ارگانیک و اسید فولویک بر جذب عناصر غذایی، عملکرد و برخی از شاخص های کیفی گندم در شرایط نرمال و تنش کم آبی اجرا گردید.

مواد و روش ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه پژوهشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، با مختصات عرض جغرافیایی ۳۹ درجه و ۲۳ دقیقه و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۲۵ دقیقه و با ارتفاع ۸۲/۶ متر از سطح دریا به صورت اسپلش پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. قبل از اجرای آزمایش، ده نمونه خاک از قسمت های مختلف مزرعه از عمق ۳۰-۰ سانتی متر برداشت و به صورت یک نمونه ترکیبی جهت تعیین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه انتقال داده شد. خلاصه شرایط آب و

هوایی از کاشت تا برداشت محصول و نتایج تجزیه
نمونه خاک محل آزمایش به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی شهرستان پارس آباد مغان در طول دوره رشد سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳
Table 1- Meteorological information of Pars-Abad Moghan County during the growing period of the 2023-2024 crop year

ماه Month	میانگین حداقل دمای هوا (°C) Mean min. temperature (°C)	میانگین حداکثر دمای هوا (°C) Mean max. temperature (°C)	میانگین کل دمای هوا (°C) Mean temperature (°C)	بارندگی (mm) Rainfall (mm)	رطوبت نسبی (%) Mean relative humidity (%)	میانگین تبخیر (mm/day) Mean evaporation (mm)	میانگین ساعت آفتابی (h/day) Mean hours of sunshine (h/day)
آبان (Oct-Nov)	10.1	22.1	16.1	1.9	74.8	1.9	5.9
آذر (Nov-Dec)	3.7	15.4	9.6	11.8	75.6	0.6	4.9
دی (Dec-Jan)	0.1	12.4	6.3	27.2	75.1	0.0	5.1
بهمن (Jan-Feb)	0.5	12.0	6.3	18.2	76.9	0.0	4.5
اسفند (Feb-Mar)	1.2	11.1	6.1	34.7	76.8	0.0	4.4
فروردین (Mar-Apr)	7.0	20.6	13.8	27.1	74.1	3.3	6.6
اردیبهشت (Apr-May)	11.6	24.6	18.1	38.4	71.2	4.5	7.6
خرداد (May-Jun)	17.0	32.1	24.5	9.0	64.0	6.8	9.2

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش
Table 2- Physical and chemical properties of the soil at the experiment location

بافت خاک Soil texture	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی Ec (ds.m ⁻¹)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	نیتروژن کل Total N (%)	کربن آلی OC (%)
لوم رسی Clay loam	35	27.5	37.5	8.05	0.72	8.72	476.62	0.07	0.94

شد. هر کرت آزمایشی شامل شش ردیف ۵ متری
با فاصله ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۳۰۰ بذر در
مترمربع بود که بذرها پس از ضدعفونی با قارچ‌کش

عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم، دیسک،
تسطیح و کرت‌بندی در پاییز و قبل از کشت انجام

۲ ساعت خشک شدند. بعد از آسیاب شدن از الک ۱ میلی متری عبور داده شدند تا نمونه آزمایشگاهی آماده شد. همه نمونه‌های آرد با استفاده از ترکیب اسید نیتریک و کلریدریک هضم شدند. اندازه‌گیری عناصر ریز مغذی با استفاده از دستگاه جذب اتمی انجام شد. غلظت بر و پتاسیم موجود در دانه به وسیله دستگاه فلیم فتومتر به دست آمد. فسفر دانه نیز، توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. عملکرد فسفر از حاصل ضرب درصد فسفر در عملکرد دانه به دست آمد (Mahmoodi Zoee et al., 2016). غلظت نیتروژن دانه با روش کج‌دال اندازه‌گیری و سپس درصد پروتئین نمونه با اعمال ضریب ۶/۲۵ (فاکتور پروتئین) محاسبه شد (Rossi et al., 2004). اندازه‌گیری میزان اسید فیتیک دانه با استفاده از دستگاه الایزا و منحنی استاندارد به روش هاگ و لانتش (Haug and Lantzsch, 1983) صورت گرفت. نسبت مولی اسید فیتیک به روی و آهن نیز، از طریق رابطه زیر محاسبه شد (Karami et al., 2013):

رابطه (۱)

$$\text{نسبت مولی} = \frac{(\text{وزن مولی اسید فیتیک} / \text{غلظت اسید فیتیک (mg)})}{(\text{وزن مولی عنصر} / \text{غلظت عنصر در دانه (mg)})}$$

در نهایت، پس از جمع‌آوری داده‌ها و انجام آزمون ارزیابی نرمال بودن داده‌ها، تجزیه داده‌های آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ و مقایسه میانگین داده‌ها نیز بر پایه آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. قبل از انجام تجزیه واریانس، داده‌های مربوط به درصد فسفر و پتاسیم دانه در ۱۰۰ و میزان بر در ۱۰ ضرب شدند. عملکرد دانه و میزان اسید فیتیک نیز، به دلیل بزرگ بودن داده‌ها، بر ۱۰۰ تقسیم شدند.

نتایج و بحث

کاربوکسین تیرام ۲ در هزار با دستگاه بذرکار تمام اتوماتیک (وینتر اشتایگر، ساخت اتریش) در عمق ۵ تا ۷ سانتی متری و در تاریخ پانزدهم آبان ماه سال ۱۴۰۲ کشت شدند. تیمارها شامل، فاکتور اصلی در سه سطح آبیاری (به ترتیب شامل بدون آبیاری (دیم)، آبیاری تکمیلی در مرحله خوشه‌دهی و آبیاری کامل) و فاکتورهای فرعی شامل پیش تیمار بذور با نانوکود ارگانیک (با غلظت‌های صفر و یک در هزار)، محلول‌پاشی اسید فولویک (با غلظت‌های ۰، ۵ و ۱۰ گرم در لیتر) در زمان‌های پنجه‌دهی، گلدهی و پرشدن دانه و دو رقم گندم دیم (رقم آفتاب) و آبی (رقم تکتاز) بود.

در این تحقیق، رقم‌های گندم مورد استفاده از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان) تهیه شد. نانوکود ارگانیک از شرکت پدیده پالیز شکوفا و اسید فولویک نیز، از شرکت آویژه سبز بهاران تهیه شد. آبیاری تکمیلی در زمان خوشه‌دهی انجام شد. در تیمار آبیاری کامل، آبیاری بر اساس نیاز گیاه و عرف منطقه انجام شد. برای جذب بهتر اسید فولیک از سطح برگ ضمن اضافه نمودن چند قطره توئین به عنوان مویان به محلول مورد استفاده، عملیات محلول-پاشی با استفاده از سمپاش پستی به ازای هر مترمربع انجام شد. لازم به ذکر است که برای کاهش میزان تبخیر محلول یاد شده از سطح برگ در اثر تابش نور خورشید و همچنین، تجزیه شدن اسید فولویک در شدت نور زیاد، محلول‌پاشی در ساعات پایانی روز انجام شد. در طول آزمایش، با استفاده از وجین دستی با علف‌های هرز مبارزه شد و هیچ‌گونه آفت‌کش شیمیایی در مزرعه مصرف نگردید.

در پایان، عملکرد نهایی دانه از گیاهان دو ردیف میانی و با حذف نیم‌متر حاشیه از ابتدا و انتهای هر کرت در زمان رسیدگی بوته‌ها تعیین شد. بعد از شستن نمونه‌ها، دانه‌ها در دمای ۷۰ درجه به مدت

غلظت آهن دانه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که علاوه بر اثر اصلی تیمارهای آزمایش، اثر متقابل آبیاری $\times$ رقم نیز بر غلظت آهن دانه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۳). معنی دار بودن اثر متقابل آبیاری $\times$ رقم نشان می دهد که رقم ها از نظر توانایی جذب و انتقال آهن در شرایط مختلف رطوبتی تفاوت دارند. بیشترین غلظت آهن دانه در تیمار آبیاری کامل $\times$ رقم تکتاز به میزان ۹۵/۴۹۱ میلی گرم در کیلوگرم به دست آمد. در تیمار بدون آبیاری (دیم) $\times$ رقم تکتاز نیز، کمترین میزان این صفت به میزان ۷۹/۰۸۸ میلی گرم در کیلوگرم حاصل شد (جدول ۴). افزایش غلظت آهن دانه در شرایط آبیاری کامل را می توان به بهبود فرآیندهای جذب، انتقال و انباشت این عنصر در گیاه نسبت داد. آهن از طریق جریان توده ای و انتشار در محلول خاک به ریشه می رسد و وجود رطوبت کافی، حرکت یون های آهن در خاک و تماس آن ها با سطح ریشه را تسهیل می کند. برخی از محققان کاهش جذب آهن توسط گندم در شرایط آبیاری بر اساس ۶۰ درصد ظرفیت زراعی (Nawaz et al., 2015) و تفاوت در مقدار آهن دانه در بین ارقام و ژنوتیپ های گندم (Rajabi, 2015) را گزارش کرده اند. رفیع و همکاران (Rafie et al., 2021) نیز، در بررسی خود گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش معنی دار (۹/۴ درصد) غلظت عنصر آهن دانه نسبت به تیمار آبیاری در شرایط نرمال گردید. در پژوهش آن ها، اثر کاربرد محرک های رشد از جمله اسید فولویک بر غلظت عنصر آهن دانه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود؛ اما، اثر متقابل تیمار آبیاری و محرک های رشد بر غلظت عنصر آهن دانه گندم معنی دار نبود و علی رغم افزایش ۸ درصدی غلظت عنصر آهن دانه در تیمار اسید فولویک، اختلاف آن نسبت به شاهد معنی دار نبود.

جوادی و همکاران (Javadi et al., 2017) در پژوهش خود روی گندم اعلام کردند که غلظت آهن انباشته شده در دانه در اثر پیش تیمار بذور با غلظت ۲۵ میکرومولار اسید فولویک به همراه محلول پاشی برگی این ویتامین در مرحله ساقه - دهی و پیش تیمار بذور با غلظت ۲۵ میکرومولار اسید فولویک به همراه محلول پاشی برگی این ویتامین در مرحله سنبله دهی در مقایسه با شاهد به طور معنی دار افزایش یافت. برخی از محققان نیز، افزایش غلظت آهن انباشته شده در دانه در اثر کاربرد اسید فولویک در جو و گندم را گزارش کرده اند (Abdoli et al., 2014; Javadi et al., 2016).

همچنین، به نظر می رسد محلول پاشی نانوکودها نقش مؤثری در تأمین عناصر ضروری گیاه داشته و سبب غنی سازی دانه گندم از نظر برخی عناصر غذایی می گردد. به طوری که، بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al., 2022) در پژوهش خود روی گندم گزارش کردند که اثر نانوکود بر غلظت آهن دانه معنی دار بود و محلول پاشی نانوکود سبب افزایش ۳/۷ درصد غلظت آهن دانه نسبت به بدون کاربرد نانوکود شد.

غلظت روی دانه: در این پژوهش، علاوه بر اثر اصلی تیمارهای آزمایش، اثر متقابل آبیاری $\times$ رقم بر غلظت روی دانه معنی دار بود (جدول ۳). بیشترین غلظت روی دانه در تیمار آبیاری کامل $\times$ رقم تکتاز به میزان ۴۰/۲۴۱ میلی گرم در کیلوگرم به دست آمد. کمترین میزان این صفت نیز، در تیمار بدون آبیاری (دیم) $\times$ رقم تکتاز به میزان ۳۱/۸۳۱ میلی گرم در کیلوگرم حاصل شد (جدول ۴). همچنین، با بهبود وضعیت تأمین آب، غلظت روی دانه در هر دو رقم روند افزایشی نشان داد، اما شدت پاسخ رقم تکتاز به شرایط آبیاری مطلوب بیشتر از رقم آفتاب بود.

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه گندم Table 3- Analysis of variance of studied wheat traits

میانگین مربعات (Mean of squares)								درجه آزادی	منابع تغییر (Source of variations)
پتاسیم K	عملکرد فسفر دانه Seed P yield	فسفر P	مس Cu	بر B	منگنز Mn	روی Zn	آهن Fe	df	
336.247**	42.863**	329.803**	110.585**	1231.086**	371.443**	303.494**	256.171**	2	تکرار Replication
4869.116**	1102.499**	181.103**	2940.757**	5279.237**	4181.518**	386.536**	1139.987**	2	آبیاری Irrigation
12.847	1.352	0.850	3.854	5.099	6.321	5.870	5.042	4	آبیاری × تکرار Irrigation × Replication
33.898*	3.073**	425.973**	19.882*	51.816*	52.467**	18.922*	48.988*	1	رقم cultivar
32.308*	151.081**	54.924**	48.735**	173.080**	160.211**	80.035**	704.761**	1	نانوکود ارگانیک Organic nanofertilizer
27.336*	118.132**	64.767**	66.681**	143.676**	150.148**	71.964**	697.811**	2	اسید فولویک fulvic acid
0.101 ^{ns}	1.637*	0.307 ^{ns}	5.167 ^{ns}	0.009 ^{ns}	5.701 ^{ns}	1.550 ^{ns}	36.308 ^{ns}	1	رقم × نانوکود ارگانیک cultivar× Organic nanofertilizer
0.363 ^{ns}	0.607 ^{ns}	0.813 ^{ns}	1.029 ^{ns}	1.612 ^{ns}	0.836 ^{ns}	0.359 ^{ns}	1.189 ^{ns}	2	رقم × اسید فولویک cultivar× fulvic acid
0.143 ^{ns}	4.144**	1.082 ^{ns}	0.306 ^{ns}	6.067 ^{ns}	0.165 ^{ns}	0.264 ^{ns}	18.785 ^{ns}	2	نانوکود ارگانیک × اسید فولویک Organic nanofertilizer × fulvic acid
6.518 ^{ns}	139.455**	4.977 ^{ns}	79.384**	44.500**	55.403**	32.054**	251.193**	2	آبیاری × رقم Irrigation× cultivar
0.173 ^{ns}	1.603*	0.897 ^{ns}	1.202 ^{ns}	1.140 ^{ns}	2.200 ^{ns}	0.373 ^{ns}	1.545 ^{ns}	2	آبیاری × نانوکود ارگانیک Irrigation× Organic nanofertilizer
0.101 ^{ns}	7.453**	1.885 ^{ns}	1.550 ^{ns}	1.284 ^{ns}	0.179 ^{ns}	0.334 ^{ns}	2.441 ^{ns}	4	آبیاری × اسید فولویک Irrigation× fulvic acid
0.123 ^{ns}	0.112 ^{ns}	0.041 ^{ns}	0.066 ^{ns}	1.012 ^{ns}	0.325 ^{ns}	0.164 ^{ns}	0.695 ^{ns}	2	رقم × نانوکود ارگانیک × اسید فولویک cultivar× Organic nanofertilizer× fulvic acid
0.503 ^{ns}	7.296**	0.117 ^{ns}	5.661 ^{ns}	0.719 ^{ns}	2.350 ^{ns}	0.196 ^{ns}	0.690 ^{ns}	2	آبیاری × رقم × نانوکود ارگانیک Irrigation× cultivar× Organic nanofertilizer
0.041 ^{ns}	0.505 ^{ns}	0.698 ^{ns}	1.867 ^{ns}	1.059 ^{ns}	1.257 ^{ns}	0.067 ^{ns}	6.211 ^{ns}	4	آبیاری × رقم × اسید فولویک Irrigation× Variety× fulvic acid
0.128 ^{ns}	0.200 ^{ns}	0.179 ^{ns}	0.115 ^{ns}	3.138 ^{ns}	0.500 ^{ns}	0.344 ^{ns}	1.625 ^{ns}	4	آبیاری × نانوکود ارگانیک × اسید فولویک Irrigation× Organic nanofertilizer× fulvic acid
0.143 ^{ns}	0.382 ^{ns}	0.316 ^{ns}	1.043 ^{ns}	0.361 ^{ns}	1.156 ^{ns}	0.391 ^{ns}	1.937 ^{ns}	4	آبیاری × رقم × نانوکود ارگانیک × اسید فولویک Irrigation× cultivar× Organic nanofertilizer× fulvic acid
5.852	0.381	3.442	2.951	7.934	5.378	3.263	10.249	66	خطای آزمایش Error
5.355	5.377	4.858	5.959	3.617	4.708	5.031	3.656		ضریب تغییرات C.V. (%)

ns, *, and ** are non-significant, significant at the 5% and 1% levels, respectively. ns, *, and ** به ترتیب غیر معنی دار، معنی دار در سطح ۵ درصد و ۱ درصد می باشد.

جدول ۴- اثر متقابل آبیاری × رقم بر غلظت عناصر مورد مطالعه در گندم

Table 4- Interaction effect of irrigation × variety on the concentration of studied elements in wheat

B (mg.kg ⁻¹)	Cu (mg.kg ⁻¹)	Mn (mg.kg ⁻¹)	Zn (mg.kg ⁻¹)	Fe (mg.kg ⁻¹)	تیمار Treatment
6.671d	20.155d	38.769e	33.100d	83.968c	No irrigation (rainfed) × Aftab بدون آبیاری (دیم) × رقم آفتاب
6.616d	18.458e	37.415e	31.831e	79.088d	No irrigation (rainfed) × Taktaz بدون آبیاری (دیم) × رقم تکتاز
7.616c	29.805c	49.031d	36.020c	88.068b	Supplemental irrigation × Aftab آبیاری تکمیلی × رقم آفتاب
7.705c	29.960c	51.099c	36.510c	79.012b	Supplemental irrigation × Taktaz آبیاری تکمیلی × رقم تکتاز
8.865b	35.232b	57.867b	37.738b	89.824b	Full irrigation × Aftab cultivar آبیاری کامل × رقم آفتاب
9.246a	39.349a	61.335a	40.241a	95.491a	Full irrigation × Taktaz cultivar آبیاری کامل × رقم تکتاز

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار با هم ندارند.

Means with common letters in each column are not significantly different from each other at the 5% probability level based on the LSD test.

این عنصر شد. بیرانوند و همکاران (Beiranvand *et al.*, 2022) نیز، گزارش کردند که اثر نانوکود بر غلظت روی دانه معنی‌دار بود و محلول‌پاشی نانوکود سبب افزایش ۱۵/۲ درصد غلظت روی دانه نسبت به شاهد شد.

نتایج حاصل از پژوهش‌های رفیع و همکاران (Rafie *et al.*, 2021) نشان داد که تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار غلظت روی دانه به میزان ۶ درصد در مقایسه با تیمار آبیاری نرمال شد. نتایج مشابهی توسط بخاری و همکاران (Bukhari *et al.*, 2015) نیز گزارش شده است. فریدنیا و همکاران (Faridnia *et al.*, 2022) نیز اعلام کردند که در شرایط کم آبیاری، غلظت روی دانه کاهش یافت و بیشترین میزان آن مربوط به تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) به مقدار ۴۱/۷۳ میلی گرم بر کیلوگرم بود. به نظر می‌رسد علت کاهش غلظت روی در دانه در شرایط کم آبیاری را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با کاهش میزان رطوبت خاک، تحرک عنصر روی در گیاه کاهش می‌یابد که همین امر سبب کاهش

افزایش غلظت روی دانه در شرایط آبیاری کامل را می‌توان به بهبود تحرک این عنصر در محلول خاک و افزایش کارایی جذب ریشه نسبت داد. تفاوت در غلظت روی دانه در بین ارقام و ژنوتیپ‌های گندم به وسیله رجبی (Rajabi, 2015) نیز گزارش شده است. نتایج آزمایش شیری و همکاران (Shiri *et al.*, 2019) نشان داد که اثر اصلی ژنوتیپ‌ها و محلول‌پاشی عناصر ریز مغذی بر غلظت روی دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و بین ژنوتیپ‌ها اختلاف معنی‌دار وجود داشت. به‌طوری‌که، بدون کاربرد برگی عناصر ریز مغذی کمترین و محلول‌پاشی روی بیشترین مقدار غلظت روی دانه را موجب شدند. در پژوهش آن‌ها، مقدار غلظت روی دانه به هنگام محلول‌پاشی با آهن و آهن + روی به‌طور معنی‌دار بیشتر از شاهد و کمتر از محلول‌پاشی با روی بود (Shiri *et al.*, 2019). رفیع و همکاران (Rafie *et al.*, 2021) گزارش کردند که اثر محرک‌های رشد از جمله اسید فولویک بر غلظت روی دانه معنی‌دار بود و در مقایسه با شاهد سبب افزایش ۱۰/۱۵ درصد میزان

انتقال آن به دانه‌ها می‌شود. روی در فتوسنتز، تولید پروتئین، فعالیت هورمون‌های گیاهی، جذب مواد غذایی و رشد سلول‌ها نقش مهمی دارد و از این طریق تحریک رشد رویشی و زایشی گیاهان را باعث می‌شود (Alam et al., 2020).

غلظت منگنز دانه: علاوه بر اثر اصلی تیمارهای آزمایش، اثر متقابل آبیاری $\times$ رقم بر غلظت منگنز دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین غلظت منگنز دانه در تیمار آبیاری کامل $\times$ رقم تکتاز به میزان ۶۱/۳۳۵ میلی-گرم در کیلوگرم به دست آمد. کمترین میزان این صفت نیز، به طور مشترک در تیمار بدون آبیاری (دیم) در رقم‌های تکتاز و آفتاب به ترتیب به میزان ۳۷/۴۱۵ و ۳۸/۷۶۹ میلی-گرم در کیلوگرم حاصل شد (جدول ۴). همچنین، با بهبود وضعیت رطوبت خاک، غلظت منگنز دانه در هر دو رقم افزایش یافت، اما رقم تکتاز در شرایط آبیاری کامل بیشترین توانایی را در انباشت این عنصر نشان داد. به نظر می‌رسد از آنجایی که، منگنز یکی از عناصر ضروری برای گیاه بوده و در فرآیندهای مهمی مانند فتوسنتز، فعال‌سازی آنزیم‌های متعدد، متابولیسم نیتروژن و دفاع آنتی‌اکسیدانی نقش دارد لذا، حفظ تأمین آب با افزایش فعالیت ریشه و کارایی جذب عناصر، شرایط مطلوب‌تری برای انتقال منگنز به دانه فراهم می‌کند. رفیع و همکاران (Rafie et al., 2021) در بررسی خود گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار در تمامی عناصر غذایی دانه گندم در سطح احتمال ۵ درصد شد؛ اما، اثر کاربرد محرک‌های رشد از جمله اسید فولویک بر میزان عناصر غذایی دانه (به جز پتاسیم) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. در پژوهش آن‌ها اثر متقابل تیمار آبیاری و محرک‌های رشد بر میزان عناصر غذایی گندم معنی‌دار نبود (Rafie et al., 2021).

برخی از پژوهش‌گران نیز، گزارش کردند که تنش خشکی غلظت منگنز دانه را نسبت به تیمار آبیاری نرمال کاهش می‌دهد (Bukhari et al., 2015; Rafie et al., 2021) که مقدار این کاهش در بررسی رفیع و همکاران (Rafie et al., 2021) به میزان ۴ درصد بود. همچنین، افزایش جذب عنصر منگنز در اثر کاربرد اسید فولویک توسط برخی از محققان گزارش شده است (Samavat and Rafie et al., 2021; Samavat, 2014). به طوری-که، رفیع و همکاران (Rafie et al., 2021) در پژوهش خود روی گندم اعلام کردند که کاربرد اسید فولویک سبب افزایش ۱۱ درصد غلظت منگنز دانه در مقایسه با تیمار شاهد شد.

غلظت بر: نتایج نشان داد که علاوه بر اثر اصلی تیمارهای آزمایش، اثر متقابل آبیاری $\times$ رقم بر غلظت بر دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین غلظت بر دانه در تیمار آبیاری کامل $\times$ رقم تکتاز به میزان ۹/۲۴۶ میلی-گرم در کیلوگرم به دست آمد. تیمار بدون آبیاری (دیم) $\times$ رقم تکتاز نیز، کمترین میزان این صفت (به میزان ۶/۶۱۶ میلی-گرم در کیلوگرم) را داشت که با تیمار بدون آبیاری (دیم) $\times$ رقم آفتاب (به میزان ۶/۶۷۱ میلی-گرم در کیلوگرم) در یک گروه آماری مشترک بود (جدول ۴). همچنین، افزایش سطح آبیاری در هر دو رقم سبب افزایش غلظت بر دانه شد، اما رقم تکتاز در شرایط آبیاری کامل بیشترین ظرفیت تجمع این عنصر را نشان داد. افزایش غلظت بر در شرایط آبیاری کامل را می‌توان به بهبود انتقال این عنصر از محلول خاک به ریشه و افزایش جریان تعرق نسبت داد. به نظر می‌رسد رطوبت ناکافی در خاک، حجم و پراکنش ریشه‌ها را در خاک کاهش داده و با تأثیر بر فراهمی عناصر غذایی در خاک، جذب عناصر غذایی را کاهش می‌دهد (Karimi, 2008). سوتهار و همکاران (Sootahar et al., 2019) در

بررسی خود گزارش کردند که اسید فولویک می-تواند با تحریک رشد و عملکرد ریشه و با ترشح اسیدهای آلی از ریشه سبب افزایش جذب عناصر غذایی شود. نانوکودها نیز، در تأمین عناصر غذایی گیاه نقش اساسی داشته و موجب فراهمی و جذب برخی از عناصر ضروری گیاه و در نتیجه غنی‌سازی دانه گندم می‌شوند (Beiranvand et al., 2022).

غلظت مس: علاوه بر اثر اصلی تیمارهای آزمایش، اثر متقابل آبیاری × رقم نیز، بر غلظت مس دانه اثر معنی‌دار داشت (جدول ۳). معنی‌دار بودن اثر متقابل آبیاری و رقم نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌های مورد بررسی از نظر جذب، انتقال و انباشت مس در شرایط مختلف رطوبتی با یکدیگر تفاوت دارند. رفیع و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی خود نشان دادند که اثر محرک‌های رشد از جمله اسید فولویک بر میزان عنصر مس دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بیشترین غلظت مس دانه در تیمار آبیاری کامل × رقم تکتاز به‌میزان ۳۹/۳۴۹ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد. کمترین میزان این صفت نیز، در تیمار بدون آبیاری (دیم) × رقم تکتاز به‌میزان ۱۸/۴۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم حاصل شد (جدول ۴). افزایش غلظت مس در شرایط آبیاری کامل را می‌توان به حفظ فعالیت ریشه، افزایش جریان ترق و بهبود انتقال این عنصر از محلول خاک به اندام‌های هوایی نسبت داد. در مقابل، تش خشکی با کاهش رشد ریشه، محدود شدن انتقال عناصر از طریق آوند چوبی و کاهش فعالیت ناقل‌های غشایی، جذب و انتقال مس به دانه را کاهش می‌دهد.

برخی از پژوهش‌گران بیان نمودند که اسید فولویک می‌تواند با تحریک رشد و عملکرد ریشه و با ترشح اسیدهای آلی از ریشه، سبب افزایش جذب عناصر غذایی شود (Sootahar et al., 2019). رفیع و همکاران (Rafie et al., 2020) نیز،

در پژوهش خود نشان دادند که کاربرد اسید فولویک سبب افزایش میزان این عنصر در مقایسه با تیمار شاهد شد. در پژوهش حاضر نیز، معنی‌دار بودن اثر اصلی اسید فولویک بر غلظت مس، در کنار معنی‌دار نبودن اثر متقابل آن با تیمار آبیاری، نشان می‌دهد که این ترکیب مستقل از شرایط رطوبتی توانسته است کارایی جذب مس را بهبود بخشد.

درصد فسفر دانه: نتایج نشان داد که اثر اصلی تیمارهای آزمایش بر درصد فسفر دانه اثر معنی‌دار داشت. اما، اثر متقابل تیمارهای آزمایش در این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۳). بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al., 2022) نیز، گزارش کردند که اثر آبیاری تکمیلی و نانوکود بر میزان فسفر دانه معنی‌دار بود. در شرایط آبیاری کامل بیشترین درصد فسفر دانه به‌میزان ۰/۴۰۶ درصد به‌دست آمد که نسبت به تیمار بدون آبیاری و آبیاری تکمیلی به‌ترتیب به‌میزان ۱۲/۴۷ و ۷/۱۲ درصد افزایش داشت. رقم آفتاب (۰/۴۰۲ درصد) فسفر دانه بالاتری از رقم تکتاز داشت. در اثر کاربرد پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک و محلول‌پاشی اسید فولویک میزان فسفر دانه افزایش یافت. میزان این افزایش نسبت به بدون کاربرد این محلول‌ها برای نانوکود ارگانیک ۳/۷۳ درصد و برای اسید فولویک ۷/۳۴ درصد بود (جدول ۵). به‌نظر می‌رسد افزایش فسفر دانه در اثر کاربرد نانوکود ارگانیک و اسید فولویک به‌دلیل بهبود دسترسی گیاه به فسفر و افزایش کارایی جذب آن در گیاه است. اسید فولویک با تشکیل کمپلکس‌های محلول، کاهش تثبیت فسفر در خاک، افزایش نفوذ پذیری غشای سلولی و تحریک رشد ریشه، جذب این عنصر را تسهیل می‌کند. در حالی‌که، نانوکود ارگانیک با افزایش کارایی استفاده از عناصر غذایی و بهبود

وضعیت تغذیه‌ای گیاه، انتقال فسفر به دانه را تقویت می‌کند.

جدول ۵- اثر اصلی تیمارهای آزمایش بر غلظت عناصر فسفر و پتاسیم دانه در گندم

Table 5 - Main effect of experimental treatments on grain P and K concentrations in wheat

محلول‌پاشی اسید فولویک Foliar spraying of fulvic acid			پیش تیمار با نانوکود ارگانیک Pretreatment with organic nanofertilizer		رقم Cultivar		آبیاری Irrigation			تیمار Treatment
10 g.l ⁻¹	5 g.l ⁻¹	0 g.l ⁻¹	یک در هزار One per thousand	بدون پیش تیمار Without Pretreatment	تکتاز Taktaz	آفتاب Aftab	کامل Full	تکمیلی Supplemental	بدون آبیاری No Irri.	
0.395a	0.383b	0.368c	0.389a	0.375b	0.362b	0.402a	0.406a	0.379b	0.361c	فسفر (%) P
0.456a	0.452a	0.447a	0.457a	0.446b	0.453a	0.450a	0.567a	0.454b	0.334c	پتاسیم (%) K

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار با هم ندارند.

Means with common letters in each column are not significantly different from each other at the 5% probability level based on the LSD test.

به‌نظر می‌رسد محلول‌پاشی نانوکود ارگانیک نقش مؤثری در تأمین عناصر ضروری گیاه داشته و سبب غنی‌سازی دانه گندم از نظر برخی عناصر ضروری می‌گردد (Beiranvand et al., 2022). به-طوری‌که، در پژوهش بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al., 2022) محلول‌پاشی نانوکود سبب افزایش ۲۳ درصد میزان فسفر دانه نسبت به بدون کاربرد نانوکود شد. رفیع و همکاران (Rafie et al., 2021) نیز، گزارش کردند که کاربرد اسید فولویک در گندم سبب افزایش میزان فسفر دانه نسبت به تیمار شاهد شد.

درصد پتاسیم دانه: در این پژوهش، اثر اصلی تیمارهای آزمایش بر درصد پتاسیم دانه معنی‌دار بود. اما، اثر متقابل تیمارهای آزمایش در این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۳). بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al., 2022) گزارش کردند که اثر آبیاری تکمیلی بر میزان پتاسیم دانه معنی‌دار بود. همچنین، در آزمایش آن‌ها، اثر متقابل آبیاری تکمیلی × نانوکود × متانول بر میزان پتاسیم دانه اثر معنی‌دار داشت (Beiranvand et al., 2022).

فریدنیا و همکاران (Faridnia et al., 2022) گزارش کردند که با افزایش تنش کم‌آبی فسفر دانه افزایش یافت و بیشترین میزان آن مربوط به تیمار آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری به‌میزان ۰/۲ درصد بود. این در حالی بود که، نتایج حاصل از پژوهش‌های رفیع و همکاران (Rafie et al., 2021) نشان داد که آبیاری نرمال سبب افزایش معنی‌دار (۱۰/۵ درصد) عنصر فسفر نسبت به شرایط تنش گردید. بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al., 2022) نیز، بیان کردند که آبیاری تکمیلی سبب افزایش ۳۲ درصد فسفر دانه نسبت به شرایط دیم شد. به‌نظر می‌رسد رطوبت ناکافی در خاک، حجم و پراکنش ریشه را در خاک کاهش داده و با تأثیر بر فراهمی عناصر مغذی در خاک، جذب عناصر غذایی از جمله فسفر را کاهش می‌دهد (Karimi, 2008). تأمین آب موجب افزایش جذب اغلب عناصر به‌ویژه عناصر کم‌تحرك در خاک گردیده و انتقال عناصر از اندام هوایی به دانه را بهبود می‌بخشد (Beiranvand et al., 2022).

روند افزایشی در پتاسیم دانه ایجاد کرد اما معنی-دار نبودن این افزایش نشان می‌دهد که تأثیر آن بر جذب پتاسیم در شرایط این آزمایش محدودتر از اثر آن بر سایر عناصر ریزمغذی بوده است. این یافته‌ها با نتایج رفیع و همکاران (Rafie et al., 2020) تا حدودی هم‌خوانی دارد. زیرا آنان نیز، بیشترین میزان عنصر پتاسیم دانه را در تیمار مصرف توأم محرک‌های رشد گزارش کردند که بیانگر نقش مدیریت تغذیه در بهبود غلظت پتاسیم گیاه است.

افزایش جذب پتاسیم رابطه مستقیمی با افزایش رشد سبزینه‌ای گیاه دارد که خود وابسته به جذب نیتروژن در گیاه است (Choudhury and Khanif, 2011). در بررسی رفیع و همکاران (Rafie et al., 2021) تیمار آبیاری بر اساس ۱۳۰ میلی‌متر تبخیر سبب کاهش معنی‌دار و ۷ درصدی میزان پتاسیم دانه نسبت به تیمار آبیاری بر اساس ۷۰ میلی‌متر تبخیر شد. بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al., 2022) اعلام کردند که آبیاری تکمیلی سبب افزایش ۵ درصد میزان پتاسیم دانه نسبت به شرایط دیم شد. فریدنیا و همکاران (Faridnia et al., 2022) نیز، بیان کردند که با افزایش مقدار تنش کم‌آبی پتاسیم دانه کاهش یافت و بیشترین مقدار آن مربوط به تیمارهای آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) به میزان ۵/۲۸ درصد بود. دلیل این امر آن است که در شرایط کم‌آبیاری رشد ریشه و همچنین انتشار کاتیون پتاسیم در خاک هر دو محدود می‌شود و جذب پتاسیم توسط ریشه کاهش می‌یابد و در نتیجه تأمین پتاسیم کافی برای گیاه برای تحمل آن در مقابل تنش کم‌آبی امری ضروری است (Wang et al., 2013; Arti et al., 2014).

عملکرد فسفر دانه: علاوه بر اثر اصلی تیمارهای آزمایش، اثر متقابل رقم × نانوکود ارگانیک، نانوکود

بخاری و همکاران (Bukhari et al., 2015) نیز، اثر تنش خشکی بر جذب فسفر و پتاسیم را معنی‌دار گزارش کردند. رفیع و همکاران (Rafie et al., 2021) اعلام کردند که اثر محرک‌های رشد از جمله اسید فولویک بر میزان پتاسیم دانه معنی‌دار بود و هرچند که سبب افزایش جزئی میزان پتاسیم دانه شد اما، اختلاف آن با تیمار شاهد معنی‌دار نبود و هر دو در یک گروه آماری مشترک بودند.

در پژوهش حاضر، در شرایط آبیاری کامل بیشترین درصد پتاسیم دانه به‌میزان ۵۶۷/۰ درصد به‌دست آمد که نسبت به تیمار بدون آبیاری (دیم) و آبیاری تکمیلی به‌ترتیب به‌میزان ۶۹/۷۶ و ۲۴/۸۹ درصد افزایش نشان داد. افزایش درصد پتاسیم در شرایط آبیاری کامل را می‌توان به بهبود جذب این عنصر از طریق حفظ فعالیت ریشه و افزایش جریان انتقال آب در گیاه نسبت داد. پتاسیم بر خلاف بسیاری از عناصر کم‌تحرک، عمدتاً همراه با جریان تعرق و از طریق ناقل‌های غشایی اختصاصی جذب می‌شود؛ بنابراین، کاهش رطوبت خاک در شرایط تنش خشکی با کاهش هدایت هیدرولیکی ریشه، محدود شدن جریان تعرق و افت فعالیت ناقل‌های پتاسیم، جذب و انتقال این عنصر به دانه را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که، از نظر درصد پتاسیم دانه بین رقم‌ها تفاوتی وجود نداشت و در یک گروه آماری مشترک بودند. در اثر کاربرد نانوکود ارگانیک و محلول‌پاشی اسید فولویک، میزان پتاسیم دانه افزایش یافت. اما، افزایش درصد پتاسیم دانه در اثر محلول‌پاشی اسید فولویک معنی‌دار نبود. پیش تیمار بذور با نانوکود ارگانیک نیز سبب افزایش ۴۷/۲ درصد این صفت نسبت به بدون کاربرد این نانوکود شد (جدول ۵). به‌نظر می‌رسد افزایش پتاسیم دانه در اثر پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک به‌دلیل بهبود رشد ریشه، افزایش سطح جذب و ارتقای کارایی استفاده از عناصر غذایی باشد. در مقابل، اگرچه اسید فولویک

ارگانیک به میزان ۴/۷۳۲ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۶). برتری تیمار آبیاری کامل × رقم تکتاز × نانوکود ارگانیک بیانگر آن است که در شرایط رطوبتی مطلوب، ظرفیت رقم تکتاز برای استفاده از فسفر و انتقال آن به دانه، در حضور نانوکود ارگانیک بیشتر شده است. در مقابل، کمترین عملکرد فسفر در شرایط بدون آبیاری و بدون کاربرد نانوکود نشان‌دهنده اثر هم‌زمان محدودیت آب و کاهش ورودی تغذیه‌ای بر جذب و تجمع فسفر در دانه است.

ارگانیک × اسید فولویک، آبیاری × رقم، آبیاری × نانوکود ارگانیک، آبیاری × اسید فولویک، آبیاری × رقم × نانوکود ارگانیک بر عملکرد فسفر دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل سه-گانه آبیاری × رقم × نانوکود ارگانیک نشان داد که تیمار آبیاری کامل × رقم تکتاز × پیش‌تیمار بذور با نانوکود ارگانیک بیشترین (۲۱/۴۶۰) کیلوگرم در هکتار) میزان عملکرد فسفر دانه را داشت. کمترین میزان این صفت نیز، در تیمار بدون آبیاری × رقم تکتاز × بدون کاربرد پیش‌تیمار بذور با نانوکود

جدول ۶- اثر متقابل آبیاری × رقم × نانوکود ارگانیک بر عملکرد فسفر دانه ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) در گندم

Table 6- Interaction effect of irrigation × cultivar × organic nanofertilizer on grain P yield ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) in wheat

آبیاری کامل Full irrigation	آبیاری تکمیلی Supplemental irrigation	بدون آبیاری (دیم) No irrigation (rainfed)	تیمار Treatment
14.159d	9.958f	6.326h	بدون پیش‌تیمار بذور با نانوکود ارگانیک × رقم آفتاب Without seed pretreatment with organic nanofertilizer × Aftab cultivar
18.190b	8.415g	4.732i	بدون پیش‌تیمار بذور با نانوکود ارگانیک × رقم تکتاز Without seed pretreatment with organic nanofertilizer × Taktaz cultivar
16.420c	11.881e	9.976f	پیش‌تیمار بذور با غلظت یک در هزار نانوکود ارگانیک × رقم آفتاب Seed pretreatment with a concentration of one per thousand organic nanofertilizer × Aftab cultivar
21.460a	10.341f	5.893h	پیش‌تیمار بذور با غلظت یک در هزار نانوکود ارگانیک × رقم تکتاز Seed pretreatment with a concentration of one per thousand organic nanofertilizer × Taktaz cultivar

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار با هم ندارند.

Means with common letters in each column are not significantly different from each other at the 5% probability level based on the LSD test.

مستقل هر یک از عوامل کافی نیست و مدیریت هم‌زمان آبیاری، رقم و تغذیه می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش این صفت داشته باشد. در تأیید این یافته‌ها، بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al., 2022) نیز، گزارش کردند که تأمین آب موجب افزایش جذب اغلب عناصر به‌ویژه

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تأمین آب کافی همراه با استفاده از نانوکود ارگانیک، به‌ویژه در رقم تکتاز، می‌تواند کارایی جذب و انتقال فسفر و در نتیجه عملکرد فسفر دانه را بهبود بخشد. وجود اثرات متقابل متعدد نیز، بیانگر آن است که ارزیابی عملکرد فسفر دانه صرفاً بر اساس اثر

عناصر کم‌تحرک در خاک گردیده و انتقال عناصر از اندام هوایی به دانه را بهبود می‌بخشد.

فیتیک اسید دانه: در این پژوهش، علاوه بر اثر اصلی تیمارهای آزمایش، اثر متقابل تیمارهای آزمایش بر میزان فیتیک اسید دانه معنی‌دار بود (جدول ۷). بیشترین میزان فیتیک اسید دانه در تیمار آبیاری کامل × رقم تکتاز × بدون کاربرد پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × بدون محلول‌پاشی اسید فولویک به‌میزان ۲۰۷۲۴/۲۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد (جدول ۸).

کمترین میزان فیتیک اسید دانه در تیمار بدون آبیاری × رقم آفتاب × پیش تیمار بذر با غلظت یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول‌پاشی ۱۰ گرم در لیتر اسید فولویک به‌میزان ۶۱۶۳/۳۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم حاصل شد. در مجموع در هر سه شرایط آبیاری در رقم‌های مورد مطالعه، پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک و محلول‌پاشی اسید فولویک و مصرف توأم آن‌ها سبب کاهش میزان فیتیک اسید دانه شدند (جدول ۸). این نتایج می‌تواند ناشی از تغییر در جذب، تخصیص و ذخیره‌سازی فسفر در دانه و همچنین بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه در مراحل تشکیل و پر شدن دانه باشد. کاهش میزان فیتیک اسید در تیمارهای نانوکود ارگانیک و اسید فولویک را می‌توان تا حدی به بهبود جذب و کارایی مصرف عناصر غذایی و افزایش فعالیت ریشه نسبت داد. اسید فولویک به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی متعدد می‌تواند با عناصر غذایی اثر متقابل داشته و شرایط جذب و

انتقال آن‌ها را بهبود دهد. همچنین، بهبود رشد و فعالیت ریشه در اثر کاربرد مواد آلی می‌تواند دسترسی گیاه به عناصر غذایی را افزایش داده و در نتیجه بر ترکیب شیمیایی دانه اثر بگذارد. در این راستا، ملکوتی (Malakouti, 2011) گزارش کرد که غنی‌سازی دانه با ریز مغذی‌ها در مزرعه می‌تواند غلظت روی دانه را افزایش و مقدار اسید فیتیک را کاهش دهد. این موضوع از نظر تغذیه انسانی نیز، اهمیت دارد. زیرا فیتات با عناصر معدنی نظیر روی، آهن و کلسیم کمپلکس تشکیل داده و در نتیجه می‌تواند زیست‌فراهمی این عناصر را کاهش دهد.

نتایج حاضر با یافته‌های جوادی و همکاران (Javadi et al., 2017) مطابقت دارد. به‌طوری‌که، آن‌ها بیان کردند که کاربرد خارجی اسید فولویک توانست میزان فیتیک اسید موجود در دانه گندم را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش دهد. بنابراین، کاهش فیتیک اسید مشاهده شده در اثر کاربرد توأم نانوکود ارگانیک و اسید فولویک را می‌توان حاصل برهم‌کنش بهبود تغذیه معدنی، افزایش کارایی جذب عناصر و تغییر در الگوی تجمع ترکیبات ذخیره‌ای دانه دانست. بیشترین کاهش فیتیک اسید در تیمار بدون آبیاری × رقم آفتاب × پیش تیمار نانوکود ارگانیک × محلول‌پاشی اسید فولویک نیز، نشان می‌دهد که پاسخ این صفت به نهاده‌های تغذیه‌ای به شرایط آبی و رقم گیاه وابسته بوده است.

جدول ۷- تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه در گندم

Table 7- Analysis of variance of studied traits in wheat

میانگین مربعات (Mean of squares)					درجه آزادی	منابع تغییر (Source of variations)
عملکرد دانه Grain yield	پروتئین دانه Seed protein	نسبت مولی فیتیک اسید به روی Molar ratio of phytic acid to zinc	نسبت مولی فیتیک اسید به آهن Molar ratio of phytic acid to iron	فیتیک اسید Phytic acid		
12.657**	18.558**	233.239**	3.032**	33.036**	2	تکرار Replication
5939.941**	86.906**	3434.722**	498.095**	76708.012**	2	آبیاری Irrigation
0.532	0.819	11.345	0.131	2.141	4	آبیاری × تکرار Irrigation × Replication
226.126**	59.974**	200.326**	27.995**	4603.010**	1	رقم cultivar
672.442**	34.191**	582.093**	76.023**	3075.532**	1	نانوکود ارگانیک Organic nanofertilizer
464.191**	32.207**	534.851**	78.305**	3051.844**	2	اسید فولویک fulvic acid
5.356**	0.379 ^{ns}	2.547 ^{ns}	0.349 ^{ns}	1/080*	1	رقم × نانوکود ارگانیک cultivar × Organic nanofertilizer
0.649*	0.531 ^{ns}	0.375 ^{ns}	0.187 ^{ns}	27.397**	2	رقم × اسید فولویک cultivar × fulvic acid
13.373**	0.273 ^{ns}	11.078*	1.158**	164.808**	2	نانوکود ارگانیک × اسید فولویک Organic nanofertilizer × fulvic acid
1228.029**	2.225 ^{ns}	2.382 ^{ns}	0.818*	753.268**	2	آبیاری × رقم Irrigation × cultivar
8.593**	1.107 ^{ns}	3.215 ^{ns}	0.211 ^{ns}	13.375**	2	آبیاری × نانوکود ارگانیک Irrigation × Organic nanofertilizer
15.748**	0.202 ^{ns}	24.339**	3.616**	252.485**	4	آبیاری × اسید فولویک Irrigation × fulvic acid
0.622*	0.651 ^{ns}	3.376 ^{ns}	0.120 ^{ns}	10.901**	2	رقم × نانوکود ارگانیک × اسید فولویک cultivar × Organic nanofertilizer × fulvic acid
47.208**	0.068 ^{ns}	7.809 ^{ns}	0.385 ^{ns}	84.551**	2	آبیاری × رقم × نانوکود ارگانیک Irrigation × cultivar × Organic nanofertilizer
4.533**	0.554 ^{ns}	0.653 ^{ns}	0.101 ^{ns}	4.008**	4	آبیاری × رقم × اسید فولویک Irrigation × Variety × fulvic acid
2.202**	0.235 ^{ns}	13.105**	1.569**	183.524**	4	آبیاری × نانوکود ارگانیک × اسید فولویک Irrigation × Organic nanofertilizer × fulvic acid
2.312**	0.309 ^{ns}	0.850 ^{ns}	0.079 ^{ns}	13.715**	4	آبیاری × رقم × نانوکود ارگانیک × اسید فولویک Irrigation × cultivar × Organic nanofertilizer × fulvic acid
0/183	1.935	3.430	0.225	0.170	66	خطای آزمایش Error
1.450	9.286	5.474	4.002	3.341		ضریب تغییرات (C.V. %)

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی دار، معنی دار در سطح ۵ درصد و ۱ درصد می باشد.

ns, *, and ** are non-significant, significant at the 5% and 1% levels, respectively.

جدول ۸- اثر متقابل آبیاری × رقم × نانوکود ارگانیک × اسید فولویک بر میزان فیتیک اسید (mg.kg^{-1}) گندم
Table 8- Interaction effect of irrigation × cultivar × organic nanofertilizer × fulvic acid on phytic acid content (mg.kg^{-1}) of wheat

آبیاری کامل Full irrigation	آبیاری تکمیلی Supplemental irrigation	بدون آبیاری Without irrigation	تیمارها Treatments
18224.9c	12758.5o	8728.4x	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک × رقم آفتاب No seed pretreatment with organic nanofertilizer × No foliar spraying of fulvic acid × Aftab cultivar
15576.3i	12169.8q	7932.8j	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 5 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم آفتاب No seed pretreatment with organic nanofertilizer × foliar spraying 5 g.l^{-1} fulvic acid × Aftab cultivar
14923.8j	11979.5r	7679.3j	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 10 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم آفتاب No seed pretreatment with organic nanofertilizer × foliar spraying 10 g.l^{-1} fulvic acid × Aftab cultivar
16673.5f	12389.3p	77811.3\	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک × رقم آفتاب Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × no foliar spraying of fulvic acid × Aftab cultivar
15987.2g	10957.8u	6738.9-	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 5 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم آفتاب Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × foliar spraying of 5 g.l^{-1} fulvic acid × Aftab cultivar
13887.8k	9938.8v	6163.3,	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 10 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم آفتاب Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × foliar spraying of 10 g.l^{-1} fulvic acid × Aftab cultivar
20724.2a	13689.9l	9094.8w	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک × رقم تکتاز No seed pretreatment with organic nanofertilizer × No foliar spraying of fulvic acid × Taktaz cultivar
18079.5d	12989.2n	8498.6y	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 5 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم تکتاز No seed pretreatment with organic nanofertilizer × foliar spraying 5 g.l^{-1} fulvic acid × Taktaz cultivar
17997.2e	12976.3n	7854.7\	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 10 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم تکتاز No seed pretreatment with organic nanofertilizer × foliar spraying 10 g.l^{-1} fulvic acid × Taktaz cultivar
18556.8b	13059.5m	8173.3z	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک × رقم تکتاز Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × no foliar spraying of fulvic acid × Taktaz cultivar
18122.8d	11874.2s	7802.4\	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 5 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم تکتاز Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × foliar spraying of 5 g.l^{-1} fulvic acid × Taktaz cultivar
15878.9h	11216.2t	7434.8^	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 10 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم تکتاز Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × foliar spraying of 10 g.l^{-1} fulvic acid × Taktaz cultivar

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف

معنی‌دار با هم ندارند.

Means with common letters in each column are not significantly different from each other at the 5% probability level based on the LSD test.

شاهد به طور معنی دار نسبت مولی فیتیک اسید به آهن کمتری داشتند. همچنین، ارقام و ژنوتیپ-هایی با نسبت مولی بالا دارای غلظت فیتیک اسید کمتر و آهن بیشتر بودند (Shiri et al., 2019). به نظر می رسد علت این کاهش به افزایش غلظت آهن و کاهش غلظت فیتیک اسید در تیمارها مربوط باشد.

نسبت مولی فیتیک اسید به روی

علاوه بر اثر اصلی تیمارهای آزمایش، اثر متقابل پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی اسید فولویک، آبیاری × محلول پاشی اسید فولویک، آبیاری × پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی اسید فولویک بر نسبت مولی فیتیک اسید به روی معنی دار بود (جدول ۷). تفاوت در مقدار نسبت مولی فیتیک اسید به روی در بین ارقام و ژنوتیپ های گندم گزارش شده است (Rajabi, 2015). بیشترین نسبت مولی فیتیک اسید به روی در تیمار آبیاری کامل × بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × بدون کاربرد اسید فولویک به میزان ۵۲/۹۹۴ به دست آمد. این نتیجه احتمالاً به دلیل فراهم بودن شرایط مناسب رشد و افزایش سنتز ترکیبات ذخیره ای دانه، از جمله فیتیک اسید در کنار محدود بودن جذب و تجمع روی در نبود تیمارهای تغذیه ای بوده است. تیمار بدون آبیاری × پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی ۱۰ گرم در لیتر اسید فولویک نیز، کمترین (۱۹/۵۸۲) میزان این نسبت را داشت. در مجموع در هر سه شرایط آبیاری، پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک و محلول پاشی اسید فولویک و مصرف توأم آن ها سبب کاهش نسبت مولی فیتیک اسید به روی شدند (جدول ۹). به نظر می رسد علت کاهش نسبت مولی فیتیک اسید به روی، به دلیل افزایش غلظت عنصر روی و همچنین کاهش

نسبت مولی فیتیک اسید به آهن: نتایج پژوهش حاضر نشان داد که علاوه بر اثر اصلی تیمارهای آزمایش، اثر متقابل پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی اسید فولویک، آبیاری × رقم، آبیاری × محلول پاشی اسید فولویک و آبیاری × پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی اسید فولویک بر نسبت مولی فیتیک اسید به آهن معنی دار بود (جدول ۷). بیشترین نسبت مولی فیتیک اسید به آهن در تیمار آبیاری کامل × بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک به میزان ۱۹/۱۲۱ به دست آمد. تیمار بدون آبیاری (دیم) × پیش تیمار بذر با غلظت یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی ۱۰ گرم در لیتر اسید فولویک نیز، کمترین (۶/۴۶۶) میزان این نسبت را داشت. در مجموع در هر سه شرایط آبیاری، پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک و محلول پاشی اسید فولویک و مصرف توأم آن ها سبب کاهش نسبت مولی فیتیک اسید به آهن شدند (جدول ۹). کاهش این نسبت در تیمارهای حاوی نانوکود و اسید فولویک را می توان به بهبود جذب، انتقال و تجمع آهن در دانه و هم زمان کاهش سنتز یا تجمع فیتیک اسید نسبت داد. اسید فولویک به دلیل وزن مولکولی پایین و داشتن گروه های عاملی کربوکسیل و فنولی، توانایی تشکیل کمپلکس با عناصر ریزمغذی به ویژه آهن را دارد و از طریق افزایش تحرک این عنصر در خاک و تسهیل انتقال آن در آوندهای گیاهی، غلظت آهن دانه را افزایش می دهد. از سوی دیگر، نانوکود ارگانیک با فراهم کردن تدریجی عناصر غذایی، تحرک رشد ریشه و افزایش سطح جذب، کارایی جذب آهن را بهبود می بخشد و در نتیجه نسبت مولی فیتیک اسید به آهن کاهش می یابد. شیرری و همکاران (Shiri et al., 2019) گزارش کردند که همه تیمارهای محلول پاشی در مقایسه با

جدول ۹- اثر متقابل آبیاری × نانوکود ارگانیک × اسید فولویک بر نسبت مولی فیتیک اسید به آهن و روی در گندم

Table 9- Interaction effect of irrigation × organic nanofertilizer × fulvic acid on the molar ratio of phytic acid to iron and zinc in wheat

نسبت مولی فیتیک اسید به روی Molar ratio of phytic acid to zinc			نسبت مولی فیتیک اسید به آهن Molar ratio of phytic acid to iron			تیمار Treatment
آبیاری کامل Full irri.	آبیاری تکمیلی Supplemental irri.	بدون آبیاری No irri.	آبیاری کامل Full irri.	آبیاری تکمیلی Supplemental irri.	بدون آبیاری No irri.	
52.994a	39.156e	29.142gh	19.121a	13.560e	10.132h	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک No seed pretreatment with organic nanofertilizer × No foliar spraying of fulvic acid
43.892bc	35.607f	25.636ij	15.749c	12.331fg	8.743j	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی ۵ g.l ⁻¹ اسید فولویک Without seed pretreatment with organic nanofertilizer × foliar spraying 5 g.l ⁻¹ fulvic acid
41.143de	34.052f	23.784j	14.732d	11.839g	8.027k	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی ۱۰ g.l ⁻¹ اسید فولویک Without seed pretreatment with organic nanofertilizer × foliar spraying 10 g.l ⁻¹ fulvic acid
45.669b	35.345f	25.216ij	16.599b	12.510f	8.680j	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × no foliar spraying of fulvic acid
42.703cd	30.479g	21.610k	15.073d	10.536h	7.252l	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی ۵ g.l ⁻¹ اسید فولویک Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × foliar spraying of 5 g.l ⁻¹ fulvic acid
35.765f	27.250hi	19.582k	12.631f	9.385i	6.466m	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی ۱۰ g.l ⁻¹ اسید فولویک Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × foliar spraying of 10 g.l ⁻¹ fulvic acid

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار با هم ندارند.

Means with common letters in each column are not significantly different from each other at the 5% probability level based on the LSD test.

محلول پاشی اسید فولویک اثر مثبتی بر درصد پروتئین دانه داشتند. به طوری که، پیش تیمار بذر با غلظت یک در هزار نانوکود ارگانیک سبب افزایش معنی دار $7/8$ درصد پروتئین دانه و محلول پاشی اسید فولویک با غلظت های ۵ و ۱۰ گرم در لیتر به ترتیب سبب افزایش $8/46$ و $13/39$ درصد پروتئین دانه نسبت به تیمار شاهد شدند (جدول ۱۰).

افزایش میزان پروتئین دانه گندم به دلیل نقش تغذیه ای ویژه آن در تغذیه مردم کشورهای در حال توسعه از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا طبق گزارش سازمان خوار و بار جهانی، سالانه در حدود ۶۳۰ میلیون تن گندم در جهان تولید می گردد که با احتساب میانگین ۱۰ درصد پروتئین برای آن، این محصول سالانه ۶۳ میلیون تن پروتئین تولید می کند که حاکی از نقش ویژه این گیاه در تأمین پروتئین مورد نیاز جامعه بشری است. براین اساس، محققان تلاش می کنند که با استفاده از راه کارهای مختلف میزان پروتئین دانه گندم را افزایش دهند که از جمله می توان به کاربرد خارجی اسید فولویک و افزایش میزان روی با استفاده از روش های به زراعی و به نژادی اشاره نمود (Javadi et al., 2017).

افزایش میزان پروتئین در دانه های گندم در شرایط کم آبی توسط پژوهش گران گزارش شده است (Barutcular et al., 2016; Shahzad et al., 2022; Liu et al., 2021; Kamali and Shahabian, 2021). خود روی گندم نشان دادند که آبیاری تکمیلی در مرحله گل دهی و دانه بندی باعث افزایش ۲۵ درصد میزان پروتئین دانه گندم شد. عبدلوی و همکاران (Abdellaoui et al., 2022) نیز بیان کردند که میزان پروتئین دانه در شرایط تنش خشکی بیشتر از شرایط آبیاری کامل بود.

غلظت فیتیک اسید در تیمارهای مورد مطالعه باشد. اثر هم زمان نانوکود ارگانیک و اسید فولویک نیز، احتمالاً ناشی از هم افزایی این دو تیمار در افزایش فعالیت ریشه و بهبود انتقال عناصر ریزمغذی به دانه بوده است. از سوی دیگر، بهبود وضعیت تغذیه ای گیاه می تواند متابولیسم فسفر را تعدیل کرده و از تجمع بیش از حد فیتیک اسید که مهم ترین شکل ذخیره فسفر در بذر محسوب می شود جلوگیری کند. بنابراین، نسبت مولی فیتیک اسید به روی کاهش یافته است. در یک پژوهش نیز، غلظت فیتیک اسید در دانه های گندم به طور قابل توجهی کاهش یافت و نسبت مولی فیتیک اسید به روی پس از کاربرد روی به زیر ۱۵ رسید (Wang et al., 2015).

درصد پروتئین دانه: نیتروژن که مهم ترین ماده مغذی معدنی برای گیاهان است، بخش اساسی از چندین آمینو اسید، پروتئین، DNA (اسید دئوکسی ریبونوکلیک)، ATP (آدنوزین تری فسفات)، کلروفیل ها و واحدهای ساختاری سلول می باشد (Seleiman et al., 2021). در این پژوهش، اثر اصلی تیمارهای آزمایش بر درصد پروتئین دانه معنی دار بود. اما، اثر متقابل تیمارهای آزمایش بر این صفت معنی دار نبود (جدول ۷). بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al., 2022) نشان دادند که پروتئین دانه به طور معنی دار تحت تأثیر کاربرد نانوکود قرار گرفت. تنویر و همکاران (Tanveer et al., 2024) نیز، بیان کردند که اسید فولویک بر محتوی پروتئین اثر معنی دار داشت.

در پژوهش حاضر، بیشترین درصد پروتئین دانه در تیمار بدون آبیاری (دیم) به میزان $16/641$ درصد و کمترین آن در تیمار آبیاری کامل به میزان $13/563$ درصد به دست آمد. رقم آفتاب نسبت به رقم تکتاز $10/47$ درصد پروتئین دانه بیشتری داشت. پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک و

جدول ۱۰- اثر اصلی تیمارهای آزمایش بر درصد پروتئین دانه گندم

Table 10 - Main effect of experimental treatments on wheat grain protein percentage

رقم Cultivar		محلول پاشی اسید فولویک Foliar spraying of fulvic acid			پیش تیمار با نانوکود ارگانیک Pretreatment with organic nanofertilizer		آبیاری Irrigation			تیمار Treatment
تکتاز Taktaz	آفتاب Aftab	10 g.l ⁻¹	5 g.l ⁻¹	0 g.l ⁻¹	یک در هزار One per thousand	بدون پیش تیمار Without pretreatment	کامل Full	تکمیلی Supplemental	بدون آبیاری No irri.	
14.2b	15.7a	15.8a	15.1b	13.9c	15.5a	14.4b	13.5c	14.7b	16.6a	پروتئین دانه (%) Seed protein (%)

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار با هم ندارند.

Means with common letters in each column are not significantly different from each other at the 5% probability level based on the LSD test

کند. از طرفی، متیونین اولین اسید آمینه‌ای است که در پروتئین‌سازی در ابتدای توالی اسیدهای آمینه قرار می‌گیرد (Esfandiari and Mahboob, 2022).

عملکرد دانه: در این پژوهش، علاوه بر اثر اصلی، اثر متقابل تیمارهای آزمایش بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۷). اثر متقابل آبیاری × رقم × پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی اسید فولویک سبب افزایش عملکرد دانه شد. بیشترین میزان عملکرد دانه در تیمار آبیاری کامل × پیش تیمار بذر با غلظت یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر × رقم تکتاز به میزان ۶۰۸۲/۲۵ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. کمترین میزان آن نیز، در تیمار بدون آبیاری × بدون کاربرد پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک × رقم تکتاز به میزان ۱۲۱۸/۰۹۸ کیلوگرم در هکتار حاصل شد (جدول ۱۱).

محققان گزارش کردند که در شرایط کم‌آبی، اسید فولویک با مشارکت در تشکیل پروتئین‌ها و

مشخص شده است که اسید فولویک سنتز پروتئین و اسید نوکلئیک را تنظیم می‌کند، تقسیم سلولی را تسریع می‌کند، تولید هورمون را تحریک می‌کند و جذب مواد مغذی را در گیاهان بهبود می‌بخشد (Salem et al., 2022; Khater et al., 2023). در این راستا، نتایج پژوهش سیبیان و همکاران (Sibian et al., 2016) نشان داد که اسید فولویک باعث افزایش محتوی پروتئین در دانه‌ها در طول فرآیند جوانه‌زنی می‌شود. جوادی و همکاران (Javadi et al., 2017) نیز، نشان دادند که پیش تیمار بذور با غلظت ۲۵ میکرومولار اسید فولویک به همراه محلول پاشی برگی این ویتامین در مرحله ساقه‌دهی توانست میزان پروتئین دانه را در مقایسه با شاهد افزایش دهد. ایشان بیان کردند که اسید فولویک سبب افزایش میزان اسید گلوتامیک و متیونین در گیاهان شده و از این طریق بر پروتئین‌سازی اثر گذاشته و میزان آن را افزایش داده است (Javadi et al., 2017). زیرا اسید گلوتامیک علاوه بر شرکت در ساختار این ویتامین به عنوان ریشه جانبی، در انتقال بنیان آمین مورد نیاز برای ایجاد سایر اسیدهای آمینه نقش ایفا می‌-

پنجه‌های بارور در بوته، تعداد سنبلچه در سنبله و تعداد دانه در سنبله عنوان کردند (Javadi et al., 2017). پورمراد و همکاران (Pourmorad et al., 2018) نیز، در پژوهش خود بیان کردند که محلول‌پاشی اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر سبب افزایش ۲۴/۹ درصد عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد.

در پژوهش زبون و باقیر (Zeboon and Baqir, 2023) محلول‌پاشی با اسید فولویک به‌طور قابل توجهی بر عملکرد دانه اثر گذاشت. بیشترین میانگین برای این صفت توسط گیاهان محلول-پاشی شده با اسید فولویک با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر به‌ترتیب با ۴۵/۱۳ درصد و ۴۷/۳۷ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد به‌دست آمد. تیمار شاهد نیز، کمترین میانگین عملکرد دانه را در طول دو فصل رشد، با ۳/۵۹ و ۳/۴۲ تن در هکتار داشت (Zeboon and Baqir, 2023). رفیع و همکاران (Rafie et al., 2021) نیز، اعلام کردند که کاربرد اسید فولویک سبب افزایش ۱۴/۶ درصد عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد. بدیهی است که کاربرد اسید فولویک با افزایش میزان اسیدهای آمینه موجود در دانه به‌ویژه اسیدهای آمینه ضروری و میزان پروتئین به‌همراه افزایش عملکرد دانه، روشی مناسب برای بهبود ابعاد کمی و کیفی گندم و کاهش اثرات منفی سوء تغذیه در کوتاه مدت می‌باشد (Javadi et al., 2017). این یافته‌ها با یافته‌های پژوهش‌گران دیگر نیز، مطابقت دارد (ELMetwally and Dawood, 2017; Youssif, 2021; Elewi and Zeboon, 2021).

آنزیم‌های مرتبط با عملکرد در تنش، نقش‌های متعددی در حفظ عملکردهای طبیعی ایفا می‌کند. همچنین، به تولید آنتی اکسیدان‌هایی کمک می‌کند که می‌توانند اثر تنش اکسیداتیو را که ممکن است در اثر کمبود آب در طول دوره خشکسالی ایجاد شود، کاهش دهند (Al-Elwany et al., 2022). با این‌حال، فتوسنتز خوب نیازمند مکانیسم‌های کارآمد برای مقابله با تنش است، که نوآوری اسید فولویک برای سنتز کلروفیل‌ها انجام می‌دهد. از این‌رو، با افزایش فتوسنتز و ساختار ریشه بیشتر، گیاهان می‌توانند در برابر کم‌آبی بهتر مقاومت کنند (Ibrahim et al., 2021). با ایجاد این عوامل فیزیولوژیک و بیوشیمیایی، اسید فولویک رشد، عملکرد و سازگاری گیاهان را با محیط‌های کم‌آب افزایش می‌دهد، که برای تأمین پایدار غذا و خوراک در مناطق خشک اهمیت زیادی دارد (Seleiman et al., 2021).

در این راستا، جوادی و همکاران (Javadi et al., 2017) به این نتیجه رسیدند که کاربرد خارجی اسید فولویک سبب افزایش عملکرد دانه در مقایسه با بدون کاربرد آن شد. به‌طوری‌که، در این مطالعه میزان عملکرد دانه گندم در اثر کاربرد خارجی اسید فولویک از ۱۱۸/۲ گرم در مترمربع در شاهد به ۱۷۰/۲ و ۱۴۹/۹ گرم در مترمربع به‌ترتیب در اثر پیش تیمار بذور با غلظت ۲۵ میکرومولار اسید فولویک به‌همراه محلول‌پاشی برگ‌ی این ویتامین در مرحله ساقه‌دهی و پیش تیمار بذور با غلظت ۲۵ میکرومولار اسید فولویک به‌همراه محلول‌پاشی برگ‌ی این ویتامین در مرحله سنبله‌دهی رسید. ایشان دلایل افزایش عملکرد دانه در اثر کاربرد خارجی اسید فولویک در مقایسه با شاهد را افزایش پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد دانه مانند تعداد

جدول ۱۱- اثر متقابل آبیاری × رقم × نانوکود ارگانیک × اسید فولویک بر عملکرد دانه (kg.ha^{-1}) گندم
Table 11- Interaction effect of irrigation × Cultivar × Organic nanofertilizer × Fulvic acid on grain yield (kg.ha^{-1}) of wheat

آبیاری Irrigation			تیمار Treatment
کامل Full	تکمیلی Supplemental	بدون آبیاری No irri.	
2931.2k	2295.9r	1457.7x	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک × رقم آفتاب No seed pretreatment with organic nanofertilizer × No foliar spraying of fulvic acid × Aftab cultivar
3380.3h	2558.0o	1694.8v	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 5 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم آفتاب No seed pretreatment with organic nanofertilizer × foliar spraying 5 g.l^{-1} fulvic acid × Aftab cultivar
3765.8g	2836.4lm	1875.1u	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 10 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم آفتاب No seed pretreatment with organic nanofertilizer × foliar spraying 10 g.l^{-1} fulvic acid × Aftab cultivar
3271.3i	2638.1n	2005.5t	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک × رقم آفتاب Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × no foliar spraying of fulvic acid × Aftab cultivar
3725.2g	2900.6kl	2597.9o	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 5 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم آفتاب Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × foliar spraying of 5 g.l^{-1} fulvic acid × Aftab cultivar
4194.5f	3266.6i	3088.0j	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 10 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم آفتاب Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × foliar spraying of 10 g.l^{-1} fulvic acid × Aftab cultivar
4353.8e	2116.9s	1218.0y	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک × رقم تکتاز No seed pretreatment with organic nanofertilizer × No foliar spraying of fulvic acid × Taktaz cultivar
4862.7d	2384.1q	1388.5x	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 5 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم تکتاز No seed pretreatment with organic nanofertilizer × foliar spraying 5 g.l^{-1} fulvic acid × Taktaz cultivar
5290.6c	2570.6no	1615.5w	بدون پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 10 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم تکتاز No seed pretreatment with organic nanofertilizer × foliar spraying 10 g.l^{-1} fulvic acid × Taktaz cultivar
4865.7d	2475.1p	1423.5x	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × بدون محلول پاشی اسید فولویک × رقم تکتاز Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × no foliar spraying of fulvic acid × Taktaz cultivar
5531.9b	2790.6m	1637.7uw	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 5 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم تکتاز Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × foliar spraying of 5 g.l^{-1} fulvic acid × Taktaz cultivar
6082.2a	3058.3j	2026.4t	پیش تیمار بذر با یک در هزار نانوکود ارگانیک × محلول پاشی 10 g.l^{-1} اسید فولویک × رقم تکتاز Seed pretreatment with one per thousand organic nanofertilizer × foliar spraying of 10 g.l^{-1} fulvic acid × Taktaz cultivar

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف

معنی‌دار با هم ندارند.

Means with common letters in each column are not significantly different from each other at the 5% probability level based on the LSD test

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، کاربرد ترکیبات آلی علاوه بر افزایش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی، به عنوان یک استراتژی مهم برای بهبود تحمل به تنش کم‌آبی در گیاه ظاهر شدند. به‌طوری‌که در هر سه شرایط آبیاری، کاربرد نانوکود ارگانیک و محلول‌پاشی اسید فولویک نقش مؤثری در تأمین عناصر ضروری گیاه داشت و علاوه بر افزایش درصد پروتئین و عملکرد دانه، جذب مواد مغذی و دسترسی به عناصر غذایی، سبب غنی‌سازی دانه گندم از نظر برخی عناصر غذایی گردیدند. بیشترین غلظت آهن، روی، منگنز، بر، مس دانه در تیمار آبیاری کامل $\times$ رقم تکتاز به‌دست آمد. در اثر کاربرد پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک و محلول‌پاشی اسید فولویک، درصد فسفر و پتاسیم دانه افزایش یافت.

در هر سه شرایط آبیاری در رقم‌های مورد مطالعه، پیش تیمار بذر با نانوکود ارگانیک و محلول‌پاشی اسید فولویک و مصرف توأم آن‌ها سبب کاهش میزان فیتیک اسید دانه، نسبت مولی فیتیک اسید به آهن و نسبت مولی فیتیک اسید به روی شدند. فیتیک اسید موجود در دانه گندم از عواملی است که موجب کاهش دسترسی زیستی عناصر ریز مغذی یا به عبارت دیگر کاهش میزان جذب این عناصر در دستگاه گوارش انسان می‌گردد. این اسید با آهن، روی، کلسیم و مس کمپلکس تشکیل داده

و بدین ترتیب موجب دفع این عناصر از بدن می‌شود. پیش تیمار بذر با غلظت یک در هزار نانوکود ارگانیک سبب افزایش معنی‌دار $7/8$ درصد پروتئین دانه و محلول‌پاشی اسید فولویک با غلظت‌های ۵ و ۱۰ گرم در لیتر به‌ترتیب سبب افزایش $8/46$ و $13/39$ درصد پروتئین دانه نسبت به تیمار شاهد شدند. بیشترین میزان عملکرد دانه نیز، در تیمار آبیاری کامل $\times$ پیش تیمار بذر با غلظت یک در هزار نانوکود ارگانیک $\times$ محلول‌پاشی اسید فولویک با غلظت ۱۰ گرم در لیتر $\times$ رقم تکتاز به‌میزان $6082/25$ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. لذا، توصیه می‌شود در جهت رسیدن به اهداف کشاورزی پایدار و بهبود کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی در این مناطق و اقلیم‌های مشابه از پیش تیمار نانوکود ارگانیک و محلول‌پاشی ۱۰ گرم در لیتر اسید فولویک استفاده گردد.

سیاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه محقق اردبیلی به‌واسطه فراهم‌سازی امکانات مالی لازم جهت پیش‌برد این تحقیق تقدیر و تشکر می‌شود. همچنین، مراتب تقدیر و تشکر خود را از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان) بابت در اختیار قرار دادن امکانات مزرعه‌ای و آزمایشگاهی لازم برای این کار پژوهشی ابراز می‌داریم.

منابع

- Abdellaoui MA, Taghouti M, Diria G, Hassane MM, El Yacoubi H, Bennani S. 2022. Impact of water stress on the productivity and quality parameters of wheat and their potential use in the breeding program. *Environmental Science Proceedings* 16 (1): 13- 17. DOI: 10.3390/environsciproc2022016013.
- Abdoli M, Esfandiari E, Mosavi SB, Sadeghzadeh B. 2014. Effects of foliar application of zinc sulfate at different phenological stages on yield formation and grain zinc content of bread wheat (cv. Kohdasht). *Azarian Journal of Agriculture* 1(1): 11-17.

- Abdoli M, Esfandiari E, Sadeghzadeh B, Mosavi SB. 2016. Zinc application methods affect agronomy traits and grain micronutrients in bread and durum wheat under zinc-deficient calcareous soil. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences* 26(2): 202-214.
- Alam N, Anis M, Javed SB, Alatar AA. 2020. Stimulatory effect of copper and zinc sulphate on plant regeneration, glutathioneS-transferase analysis and assessment of antioxidant activities in *Mucuna pruriens* L. (DC). *Plant Cell Tissue and Organ Culture* 141(1): 155-166. DOI: 10.1007/s11240-020-01776-8.
- Al-Elwany OA, Hemida KA, Abdel-Razek MA, El-Mageed TAA, El-Saadony MT, AbuQamar SF, Taha RS. 2022. Impact of folic acid in modulating antioxidant activity, osmo-protectants, anatomical responses, and photosynthetic efficiency of *Plectranthus amboinicus* under salinity conditions. *Frontiers in Plant Science* 13: 887091. DOI: 10.3389/fpls.2022.887091.
- Alsamadany H, Mansour H, Elkelish A, Ibrahim MF. 2022. Folic acid confers tolerance against salt stress-induced oxidative damages in snap beans through regulation growth, metabolites, antioxidant machinery and gene expression. *Plants* 11(11): 1459. <https://doi.org/10.3390/plants11111459>.
- Arti S, Surekha A, Minal M. 2014. Potassium solubilisers: Occurrence, mechanism and their role as competent biofertilizers. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 3(9): 622-629.
- Ayoubizadeh N, Laei G, Amini Dehaghi M, Masoud Sinaki J, Rezvan Bidokhti S. 2020. Effect of drought stress and foliar nutrition of iron nano-chelate and fulvic acid on grain yield and fatty acids composition in seed oil of two sesame cultivars. *Journal of Crops Improvement* 22(2): 231-243. <https://doi.org/10.22059/jci.2020.281730.2220>. (In Persian).
- Barutcular C, Yildirim M, Koc M, Akinci C, Tanrikulu A, El Sabagh A, Albayrak O. 2016. Quality traits performance of bread wheat genotypes under drought and heat stress conditions. *Fresenius Environmental Bulletin* 25(12): 6159- 6165.
- Beiranvand E, Khorgami A, Rafiee M, Mir Derikvand R, Vafaiee SH. 2022. Effect of foliar application of nano fertilizer and methanol on morphophysiological properties of rainfed wheat in terms of supplementary irrigation. *Journal of Plant Process and Function* 11(51): 225-239. DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.51.14.1. (In Persian).
- Bhat MA, Mishra AK, Jan S, Bhat MA, Kamal MA, Rahman S, Shah AA, Jan AT. 2023. Plant growth promoting rhizobacteria in plant health: a perspective study of the underground interaction. *Plants* 12(3): 629. <https://doi.org/10.3390/plants12030629>.
- Blancquaert D, De Steur H, Gellynck X, Van Der Straeten. 2014. Present and future of folate biofortification of crop plants. *Journal of Experimental Botany* 65(4): 895-906. DOI: 10.1093/jxb/ert483.
- Bukhari MA, Ashraf MY, Ahmad R, Waraich EA, Hameed M. 2015. Improving drought tolerance potential in wheat (*Triticum aestivum*) through exogenous silicon supply. *Pakistan Journal of Botany* 47(5): 1641-1648.
- Choudhury MA, Khanif YM. 2011. Effects of nitrogen, copper and magnesium fertilization on nutrition of some macro and micro nutrients of rice crop. *Bangladesh Research Publications Journal* 5(3): 201- 206.
- Chowdhury MK, Hasan M, Bahadur M, Rafiqul Islam M, Abdul Hakim M, Aamir Iqbal M. 2021. Evaluation of drought tolerance of some wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes through phenology, growth, and physiological indices. *Agronomy Journal* 11(9): 1792. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091792>.
- Dhakal A. 2021. Effect of drought stress and management in wheat-A review. *Food & Agribusiness Management (FABM)* 2(2): 62-66. DOI: 10.26480/fabm.01.2021.62.66.
- Dinçsoy M, Sönmez F. 2019. The effect of potassium and humic acid applications on yield and nutrient contents of wheat (*Triticum aestivum* L. var. Delfii) with same soil properties. *Journal of Plant Nutrition* 42(20): 2757-2772. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1658777>.
- Duan H, Zhu Y, Li J, Ding W, Wang H, Jiang L, Zhou Y. 2017. Effects of drought stress on growth and development of wheat seedlings. *International Journal of Agriculture and Biology* 19(5): 1119-1124. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0393>.

- Elewi AY, Zeboon NH. 2021. Response of yield and quality of four genotypes from sunflower to foliar spray with folic acid. *AL-Muthanna Journal of Agricultural Sciences* 8(3): 212- 222. <https://doi.org/10.52113/mjas04/8.2/41>.
- ELMetwally IM, Dawood MG. 2017. Weed management folic acid and seaweed extract effects on faba bean plants and associated weeds under sandy soil conditions. *Agric, Englnt. CIGR Journal Special issu*, 27-34.
- Esfandiari E, Abdoli M. 2016. Wheat biofortification through Zn foliar application and its effects on wheat quantitative and qualitative yields. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences* 26(4): 529-537. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.282759>.
- Esfandiari E, Mahboob S. 2022. *Plant Biochemistry (Volume II)*. Tabriz University of Medical Science Press, 322p. (In Persian).
- Esfandiari E, Abdoli M, Sadeghzadeh B, Mosavi SB. 2016. Impact of foliar zinc application on agronomic traits and grain quality parameters of wheat grown in zinc deficient soil. *Indian Journal of Plant Physiology* 21(3): 263-270. <https://doi.org/10.1007/s40502-016-0225-4>.
- Faridnia A, Paknejad F, Sadeghi Shoa M, Ilkai MN, AghaYari F. 2022. Effect of nano-micronutrients and cytokinin foliar application growth regulators on wheat grain yield and quality in low under different irrigation conditions. *Crop Production Journal* 15 (4): 85-100. DOI: 10.22069/ejcp.2023.19985.2487. (In Persian).
- Giraldo P, Benavente E, Manzano-Agugliaro F, Gimenez E. 2019. Worldwide research trends on wheat and barley: A bibliometric comparative analysis. *Agronomy Journal* 9(7): 352. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070352>.
- Haj Seyyed Hadi SM, Rezai Ghale H. 2016. The effect of different amounts of vermicompost and spraying of amino and urea acids on the quantitative and qualitative yield of German chamomile (*Matricaria chamomilla* L). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants* 31(6): 1058–1070. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2016.105894>. (In Persian).
- Hasanuzzaman M, Mahmud Al, Anee TI, Nahar K, Islam T. 2017. Abiotic stress- mediated sensing and signaling in plants: An omics perspective. Springer <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7479-0>.
- Haug W, Lantzsch HJ. 1983. Sensitive method for the rapid determination of phytate in cereal products. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 34: 1423-1426. DOI:10.1002/jsfa.2740341217.
- Heidarpour NA, Talaee S. 2017. Effects of supplemental irrigation time and nitrogen rates on yield and agronomic characteristics of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.) Kohdasht variety. *Iranian Journal of Field Crop Science* 47(4): 541-549. <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2017.129733.653920>. (In Persian).
- Ibrahim MFM, Ibrahim HA, Abd El- Gawad HG. 2021. Folic acid as a protective agent in snap bean plants under water deficit conditions. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 96 (1): 94- 109. <https://doi.org/10.1080/14620316.2020.1793691>.
- Istipliler D, Cakalogullari U, Tatar O. 2017. Mitigate grain yield losses of wheat under terminal drought stress by different nitrogen applications. *Scientific Papers. Series A. Agronomy* 60: 275-280.
- Jahan M, Ghalenoe S, Khamooshi A and Amiri MB. 2015. Evaluation of some agroecological characteristics of Basil (*Ocimum basilicum* L.) as affected by simultaneous application of water-saving superabsorbent hydrogel in soil and foliar application of humic acid under different irrigation intervals in a low inp. *Journal of Horticultural Science* 29(2): 240-254. <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.32381>. (In Persian).
- Jangdoust MR, Zarei M, Nora G. 2017. Evaluation of drought tolerance of different wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) in rainfed conditions and supplemental irrigation. *Journal of Applied Research of Plant Ecophysiology* 5(9): 73-90. (In Persian).
- Javadi A, Esfandeyari EA, Pormohammad AR, Avans A. 2017. Yield increase and improve the composition of amino acids and protein content of wheat grains with folic acid. *Journal of Crop Production* 10: 115-128. DOI: 10.22069/EJCP.2017.10396.1814. (In Persian)

- Javadi A, Esfandiari E, Pourmohammad A, Avanes A. 2016. Effects of the Folate foliar application at different growth stages on quantity and quality of the wheat yield. *Journal of Crop Production* 9(4): 57-70. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2017.9813.1766>. (In Persian)
- Kamali MI, Shahabian M. 2021. Effects of supplemental irrigation and nitrogen fertilization on yield and qualitative characteristics of wheat in Mazandaran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 6(14): 2217-2233. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.2021.14.6.15.6>. (In Persian).
- Karami M, Afyuni M, Khoshgoftarmanesh AH, Hajabbasi MA, Khademi H, Abdi A. 2013. Status and modeling of zn in wheat grain in relation to agroecosystem parameters of some arid and semi arid regions. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 17(64): 119-136. dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1392.17.64.3.3. (In Persian).
- Karimi A. 2008. Evaluation of surface irrigation regimes on nitrogen use efficiency in sugar beet farming. *Journal of Plant Production Research* 16(1): 133-148. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222050.1388.16.1.10.5>. (In Persian).
- Karimi E, Tadayyon A, Tadayyon MR. 2016. The effect of humic acid on some yield characteristics and leaf proline content of safflower under different irrigation regimes. *Agricultural Crop Management* 18(3): 609-623. <https://doi.org/10.22059/jci.2016.56624>. (In Persian).
- Karimi M, Joleini M. 2019. Supplemental irrigation in cultivation of rainfed wheat. *Journal of Water and Sustainable Development* 6(1): 29-34. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v6i1.77251>. (In Persian).
- Khater MA, Zaki FS, Dawood MG, El-Din KG, Sadak MS, Shalaby MA, El-Awadi ME. 2023. Changes in some physiological and biochemical parameters of lupine plant via two bio-stimulant yeast extract and folic acid. *Journal of Materials and Environmental Science* 14 (3): 373- 383.
- Liu J, Zhan J, Zhu G, Zhu D, Yan Y. 2022. Effects of water deficit and high N fertilization on wheat storage protein synthesis, gluten secondary structure, and breadmaking quality. *The Crop Journal* 10(1): 216- 223. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.04.006>.
- Mahmoodi Zoeek R, Nasri M, Oveysi M. 2016. Effects of humic acid spraying on yield and yield components of wheat in drought stress condition. *Ecophysiology and Phytochemistry of Medicinal and Aromatic Plants* 8(1): 10-26. (In Persian).
- Malakouti MJ. 2011. Towards improving the quality of consumed breads in Iran: A Review. *Journal of Food Science and Technology* 8 (32): 11-21. (In Persian).
- Man J, Shi Y, Yu Z, Zhang Y. 2016. Root growth, soil water variation, and grain yield response of winter wheat to supplemental irrigation. *Journal of Plant Production Science* 19 (2): 193- 205. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2015.1128097>.
- Mastronardi E, Tsae P, Zhang X, Monreal C, DeRosa MC. 2015. Strategic role of nanotechnology in fertilizers: Potential and limitations. In: Rai M, Ribeiro C, Mattoso L, Duran N. (eds) *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7_2.
- Nawaz F, Ahmad R, Ashraf MY, Waraich EA, Khan SZ. 2015. Effect of selenium foliar spray on physiological and biochemical processes and chemical constituents of wheat under drought stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 113: 191-200. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.12.003.
- Pourmorad M, Malakouti M, Tehrani MM. 2018. Study on the effect of humic acid and fulvic acid on the wheat yield and water use efficiency under drought stress. *Journal of Water and Soil* 32(5): 977-985. <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i5.71191>. (In Persian).
- Rafie MR, Solhi M, Javadzadeh M. 2020. Study the effect of plant growth biostimulants application on quantitative and qualitative characteristics of wheat in a calcareous soil (Case study in Khuzestan). *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 10(2): 69-88. DOI: 10.22069/ejsms.2020.16943.1905. (In Persian)
- Rafie MR, Solhi M, Javadzadeh M. 2021. Evaluation the effect of amini acid, fulvic acid and seaweed extract application in normal and drought stress conditions on quantitative and

- qualitative characteristics of wheat in Behbahan region. Environmental Stresses in Crop Sciences 14(1): 131-141. DOI: 10.22077/ESCS.2019.2702.1707. (In Persian).
- Rajabi R. 2015. Evaluation of genetic diversity for fertilizer use efficiency in bread wheat genotypes under rainfed Conditions of Iran. Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi) 28(3): 24-34. DOI: 10.22092/AJ.2015.106709. (In Persian).
- Rossi AM, Juarez MD, Samman NC, Villarreal M. 2004. Nitrogen contents in food: A comparison between the kjeldahl and hach methods. Argentine Chemical Society 92(4): 99- 108.
- Samavat S, Samavat S. 2014. The effects of fulic acid and sugar cane molasses on yield and qualities of tomato. International Research Journal of Applied and Basic Sciences 8(3): 266-268.
- Seleiman MF, Al- Suhaibani N, Ali N, Akmal M, Alotaibi M, Refay Y, Dindaroglu T, Abdul-Wajid HH, Battaglia ML. 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. Plants 10 (2): 259- 283. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>.
- Seleiman MF, Santanen A, Makela P. 2020. Recycling sludge on cropland as fertilizer-Advantages and risks. Resources, Conservation and Recycling 155: 104647. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104647>.
- Selem E, Hassan AA, Awad MF, Mansour E, Desoky ESM. 2022. Impact of exogenously sprayed antioxidants on physio- biochemical, agronomic, and quality parameters of potato in salt-affected soil. Plants 11 (2): 210- 221. <https://doi.org/10.3390/plants11020210>.
- Shahzad T, Ashraf M, Javaid MM, Waheed H, Abbas T, Sattar FMLA. 2018. Influence of field soil drought stress on some key physiological, yield and quality traits of selected newly- developed hexaploid bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. Sains Malaysiana 47 (11): 2625- 2635. <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2018-4711-05>.
- Shiri M, Kamrani M, Mehraban A. 2019. Effect of Fe and Zn spraying on yield and nutrients bioavailability of bread wheat cultivars. Iranian Journal of Field Crops Research 17(2): 317-326. <https://doi.org/10.22067/gsc.v17i2.74778>. (In Persian).
- Sibian MS, Saxena DC, Riar CS. 2016. Effect of pre and post germination parameters on the chemical characteristics of Bengal gram (*Cicer arietinum*). Journal of Food Science and Technology 65: 783- 790. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.09.012>.
- Sootahar MK, Zeng X, Su S, Wang Y, Bai L, Zhang Y, Li T, Zhang X. 2019. The effect of fulvic acids derived from different materials on changing properties of albic black soil in the northeast plain of china. Molecules 24(8): 1535. <https://doi.org/10.3390/molecules24081535>.
- Subramanian KS, Manikandan A, Thirunavukkarasu M, Rahale CS. 2015. Nano- fertilizers for balanced crop nutrition. In: Rai M, Ribeiro C, Mattoso L and Duran N, Eds, Nanotechnologies in food and agriculture. Springer International Publishing, Cham 69-80. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7_3.
- Tanveer Y, Yasmin H, Nosheen A, Abul Farah M, Altaf MA. 2024. Synergizing *Bacillus halotolerans*, *Pseudomonas sihuiensis* and *Bacillus atropheus* with folic acid for enhanced drought resistance in wheat by metabolites and antioxidants. BMC Plant Biology 24: 1003. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05609-0>.
- Tatar O, Bruck H, Asch F. 2016. Photosynthesis and remobilization of dry matter in wheat as affected by progressive drought stress at stem elongation stage. Journal of Agronomy and Crop Science 202(4): 292-299. <https://doi.org/10.1111/jac.12160>.
- Wang M, Zheng Q, Shen Q, Guo S. 2013. The critical role of potassium in plant stress response. International Journal of Molecular Sciences 14(4): 7370-7390. DOI: 10.3390/ijms14047370.
- Wang S, Tian X, Liu Q. 2020. The effectiveness of foliar applications of zinc and biostimulants to increase zinc concentration and bioavailability of wheat grain. Agronomy 10(2):178. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020178>.
- Wang X, Zhang X, Chen J, Wang X, Cai J, Zhou Q, Jiang D. 2018. Parental drought-priming enhances tolerance to post-anthesis drought in offspring of wheat. Frontiers in Plant Science 9: 261. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00261>.
- Wang Z, Liu Q, Pan F, Yuan L, Yin X. 2015. Effects of increasing rates of zinc fertilization on phytic acid and phytic acid/zinc molar ratio in zinc bio-fortified wheat. Field Crops Research 184: 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.09.007>.

- Youssif SBD. 2017. Response of potatoes to foliar spray with cobalamin, folic acid, and ascorbic acid under North Sinai conditions. *Middle East Journal of Agriculture Research* 6(3): 662-672.
- Zeboon NH, Baqir HA. 2023. The effect of vitamin B9 and E on the yield and its components of the wheat crop. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Fifth International Conference for Agricultural and Environment Sciences 1158: 062033. DOI: 10.1088/1755-1315/1158/6/062033.
- Zhang Z, Yin L, Li X, Zhang C, Liu C, Wu Z. 2018. The complete genome sequence of *Bacillus halotolerans* ZB201702 isolated from a drought-and salt-stressed rhizosphere soil. *Microbial Pathogenesis* 123: 246-249. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.07.019>.



Effect of Nano-Organic Fertilizer and Fulvic Acid on Yield and Some Quality Traits of Wheat under Rainfed and Supplemental Irrigation Conditions

Khadijeh Aghaeifard¹, Yavar Dargahi², Ahmad Tobeh³, Asghar Mehraban^{4*}, Kamal Shahbazi Homonlo⁵, Keramat Akhavan⁶

1- Ph.D. Graduate, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2- Ph.D. Candidate, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

3- Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

4- Assistant Professor, Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran.

5- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran.

6- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Drought stress is one of the most significant abiotic stresses constraining the growth and yield of wheat, particularly in rainfed and semi-arid regions. The application of supplemental irrigation at critical growth stages, along with organic compounds such as nano-organic fertilizer and fulvic acid, represents an effective strategy to enhance tolerance to water deficit and improve both the quantity and quality of the grain. The present study aimed to investigate the effects of nano-organic fertilizer and fulvic acid on the yield and qualitative characteristics of wheat under varying irrigation regimes.

Methodology: The experiment was conducted as a factorial split-plot arrangement within a randomized complete block design with three replications, during the 2023–2024 growing season at the research farm of the Agricultural and Natural Resources Research Center of Ardabil Province (Moghan). The main plots were allocated to three irrigation levels (no irrigation/rainfed, supplemental irrigation at the heading stage, and full irrigation). Subplots consisted of two wheat cultivars (Aftab and Tak-Taz), seed priming with nano-organic fertilizer (0 and 1:1000 v/v), and foliar application of fulvic acid at three concentrations (0, 5, and 10 g L⁻¹). The measured traits included the concentrations of micronutrients (iron, zinc, manganese, boron, and copper) in grains, grain phosphorus and potassium percentages, grain phosphorus yield, phytic acid content, the molar ratio of phytic acid to iron and zinc, grain protein percentage, and grain yield.

Research findings: The results demonstrated that the highest concentrations of iron (95.495 mg kg⁻¹), zinc (40.241 mg kg⁻¹), manganese (61.335 mg kg⁻¹), boron (9.246 mg kg⁻¹), and copper (39.349 mg kg⁻¹) were obtained under full irrigation × Tak-Taz cultivar, while the lowest values were recorded under rainfed conditions × Tak-Taz cultivar. Seed priming with nano-organic fertilizer significantly increased grain phosphorus and potassium percentages by 3.73% and 2.47%, respectively. Similarly, foliar application of fulvic acid at 10 g L⁻¹ enhanced grain phosphorus content by 7.34% compared to the control. Across all three irrigation levels, the combined application of nano-organic fertilizer and fulvic acid led to a significant reduction in grain phytic acid content and its molar ratio to iron and zinc. Grain protein percentage increased by 7.8% due to nano-organic seed priming, and by 8.46% and 13.39% with foliar application of fulvic acid at 5 and 10 g L⁻¹, respectively, relative to the control. The highest grain yield (6082 kg ha⁻¹) was achieved under the full irrigation × seed priming with nano-organic fertilizer × 10 g L⁻¹ fulvic acid × Tak-Taz cultivar combination, whereas the lowest yield (1218 kg ha⁻¹) was observed in the rainfed, no nano-organic fertilizer, and no fulvic acid treatment with the Tak-Taz cultivar. Overall, the application of nano-organic fertilizer and foliar spraying of fulvic acid at 10 g L⁻¹, particularly when combined with supplemental irrigation, not only increased grain yield, protein content, and micronutrient enrichment but also reduced the anti-nutritional compound phytic acid. Therefore, this integrated approach can be recommended as an effective strategy toward sustainable agriculture and improved wheat quality in rainfed and semi-arid regions.

Keywords: Supplemental irrigation, Phytic acid, Grain protein percentage, Foliar spraying, Wheat

* Corresponding author: asgharmehraban@gmail.com

Submit date: 2026/08/25 Accept date: 2026/09/19

