

غربال ژنوتیپ‌های مختلف گندم در پاسخ به کلات معمولی و کود نانوکلات آهن در محلول غذایی

صادق امیدو نرگسی^{۱*}، مرتضی زاهدی^۱، حمید رضا عشقی‌زاده^۱ و امیر حسین خوشگفتارمنش^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۵)

چکیده

در سال‌های اخیر، تحقیق در رابطه با کاربرد ترکیبات نانو در زمینه‌های مختلف، از جمله در بخش کشاورزی، مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت ارزیابی سرنوشت و عملکرد نانوذرات در سیستم‌های گیاهی، در این بررسی، پاسخ ۱۳ رقم گندم نسبت به کود نانوکلات آهن در محلول غذایی هوگلدن و تحت شرایط کلات آهن معمولی و نانوکلات آهن با غلظت ۲۲/۵ میلی‌گرم در لیتر مورد مطالعه قرار گرفت. این آزمایش در گلخانه تحقیقاتی مرکز پژوهشی کشت بدون خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان، در بهار سال ۱۳۹۲ اجرا شد. نتایج نشان داد که در بین ارقام مختلف گندم، واکنش‌های مثبت و منفی قابل ملاحظه‌ای نسبت به کود نانوکلات آهن وجود دارد. نتایج نشان داد که در شرایط کاربرد کلات آهن معمولی، بین صفات مورد مطالعه، تعداد پنجه و نسبت ریشه به بخش هوایی بیشترین ضریب تغییرات را دارا بودند و کمترین ضریب تغییرات در فلورسانس کلروفیل و سطح برگ سبز مشاهده شد. در شرایط کاربرد نانوکلات آهن نیز به ترتیب صفات تعداد پنجه و نسبت ریشه به بخش هوایی بیشترین ضریب تغییرات و فلورسانس کلروفیل از کمترین ضریب تغییرات برخوردار بودند. کود نانوکلات آهن به ترتیب منجر به کاهش ۱/۱۴، ۵/۹ و ۹/۸ درصدی میانگین ماده خشک شاخساره، سطح برگ و حجم ریشه و نیز افزایش ۷/۱۳ درصدی نسبت ریشه به بخش هوایی برخی از ارقام گندم در مقایسه با کلات آهن معمولی شد. در پاسخ به کود نانوکلات آهن نسبت به کلات آهن معمولی، لاین ۹ شوری با ۴۹/۱۴ درصد افزایش و رقم استار با ۸۲/۵۱ درصد کاهش به ترتیب بیشترین و کمترین میزان تغییرات ماده خشک کل را به خود اختصاص دادند.

واژه‌های کلیدی: ژنوتیپ، کلات آهن، گندم، محلول غذایی، نانوذرات

مقدمه

۳ میلیارد نفر از مردم دنیا از کمبود آهن و روی رنج می‌برند (۱). همچنین، بیش از ۸۰۰ میلیون نفر در کشورهای در حال توسعه، به دلیل عدم دسترسی به غذای کافی، دچار سوء تغذیه هستند و کمبود برخی از عناصر کم‌مصرف نظیر آهن، روی، ید و نیز کمبود ویتامین A از مشکلات اساسی این کشورها است، به طوری که کمبود این عناصر موجب بروز لطمات شدید به سلامت انسان شده، مشکلاتی نظیر کاهش رشد فیزیکی و یادگیری، اختلال در سیستم ایمنی و کم‌خونی ایجاد می‌کند (۱).

افزایش تولید محصولات کشاورزی برای برطرف کردن نیاز غذایی جمعیت روزافزون بشر ضروری است. مدل جهانی غذا، ارائه شده توسط مؤسسه تحقیقات بین‌المللی سیاست‌گذاری غذا، نشان می‌دهد که برای برطرف کردن نیاز غذایی جمعیت جهان در سال ۲۰۲۰، تولید سالانه غلات باید ۴۰٪ افزایش یافته و از ۱۷۷۳ میلیارد تن در سال ۱۹۹۳ به حدود ۲۵۰۰ میلیارد تن در سال ۲۰۲۰ برسد. این در حالی است که بیش از

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sadegh.omidi@ag.iut.ac.ir

استفاده از نانوذرات و نانوپودرها می‌توان کودهایی کنترل شده با سرعت آزادسازی تدریجی تولید کرد (۱۹). کودهایی که با این ابعاد تولید می‌گردند از قابلیت جذب بیشتری برخوردار بوده و نسبت به کودهای رایج تأثیر بیشتری دارند. علاوه بر آن، می‌توان کودهای شیمیایی تولید کرد که با محیط زیست سازگار بوده و از آلودگی آن و همچنین شوری بیش از حد خاک جلوگیری نمود (۴).

گیاهان قادر به جذب نانوذرات از محیط زیست و انتقال آنها از طریق سیستم آوندی به بخش‌های مختلف ساقه هستند. این امر بستگی به ترکیب، شکل و اندازه نانوذرات و نیز ساختار گیاه دارد (۱۴ و ۱۷). سلول‌های گیاهی توسط دیواره سلولی نیمه‌تراوایی با منافذی به قطر ۵-۲۰ نانومتر احاطه شده‌اند و فقط نانوذرات یا تجمعی از نانوذرات با قطر کمتر از قطر منفذ دیواره سلولی توانایی عبور آسان از میان آن و رسیدن به غشای پلاسمایی را دارند (۱۶).

مطالعات نشان می‌دهد که اثر نانوذرات بر گیاهان می‌تواند مفید (بهبود جوانه‌زنی، رشد و تکامل گیاهچه) یا غیرمفید (جلوگیری از رشد ریشه) باشد (۱۳ و ۱۷). در آزمایشی، مشخص شد که کاربرد نانواکسید آهن در مقایسه با اکسید آهن معمولی (FeO) تأثیر بیشتری بر افزایش غلظت آهن در گندم داشته است (۴). در پژوهشی دیگر، طول ساقه و طول گیاهچه گندم به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر حجم و غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO₂) قرار گرفت، به‌طوری که طول ساقه و طول گیاهچه در غلظت‌های ۲ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، نسبت به تیمار شاهد، بیشتر بود (۱۱).

از سوی دیگر، سمیت نانوذرات نیز بر گیاهان گزارش شده است. در مطالعه‌ای که روی گندم انجام گرفت، نانوذرات اکسید مس (CuO) و اکسید روی (ZnO) به‌ترتیب باعث کاهش ۵۹ و ۵۳ درصدی طول ریشه شدند. ولی در مقابل، این نانوذرات تعداد ریشه را به‌ترتیب ۴۲ و ۳۵ درصد افزایش دادند (۹). در آزمایشی نیز مشاهده شد که نانوذرات مس آثاری سمی بر لویای مانگو (*Phaseolus radiatus*) و گندم (*Triticum aestivum*) از خود

به‌طور معمول، غلظت عناصر کم‌مصرف و میزان دسترسی به آنها در دانه غلات کم است. بنابراین، افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف در دانه غلات یکی از راه‌های برطرف کردن کمبود آهن و روی در انسان محسوب می‌شود (۲۰).

در ایران، به دلیل وجود شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک، مصرف زیاد فسفر در خاک، بی‌کربناته بودن آب آبیاری و کم بودن میزان مواد آلی در خاک اغلب کمبود عناصر کم‌مصرف از قبیل آهن و روی اتفاق می‌افتد (۵). آهن از جمله عناصر کم‌مصرفی است که برای رشد طبیعی و تولید مثل گیاهان زراعی مورد نیاز می‌باشد (۷). این عنصر عاملی مؤثر در ترکیب ۱۴۰ آنزیم است که واکنش‌های بیوشیمیایی منحصر به فردی را کاتالیز می‌کنند. همچنین، آهن نقش‌های مهمی را در رشد و توسعه گیاهان، از جمله ساخت کلروفیل، تیلاکوئید و توسعه کلروپلاست بر عهده دارد (۱۶). مشاهده شده است که ارقام مختلف یک گونه گیاهی پاسخ‌های متفاوتی را نسبت به سطح کم تا حد سمیت عناصر غذایی کم‌مصرف در خاک نشان می‌دهند (۱۲).

یکی از راه‌های مناسب جهت مقابله با مشکلات کمبود آهن در خاک، انتخاب یا اصلاح ارقامی با قدرت جذب بیشتر عناصر کم‌مصرف می‌باشد (۲۰). تعدادی از محققین گزارش کرده‌اند که کاربرد کودهای عناصر غذایی کم‌مصرف به صورت خاکی یا از طریق محلول‌پاشی، افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف در دانه را به همراه داشته است (۶). همچنین، در آزمایشی مشاهده شد که ژنوتیپ‌های مختلف گندم تفاوت معنی‌داری از لحاظ عملکرد دانه، اجزای عملکرد، حجم پروتئین و عملکرد پروتئین در پاسخ به کاربرد برگی آهن نسبت به یکدیگر داشتند (۶). مورگونوف و همکاران (۱۵) در آزمایشی که روی ۶۰ ژنوتیپ گندم انجام دادند مشاهده نمودند که تنوع بسیار گسترده‌ای از لحاظ غلظت آهن موجود در دانه‌های ارقام مختلف گندم وجود دارد. به‌طوری که این دامنه بین ۲۵ تا ۵۶ میلی‌گرم در کیلوگرم قرار داشت.

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه نانومواد و نانوذرات صورت گرفته است (۸). در بخش کشاورزی، با

سلولی گیاه در تجمع نانوذرات باقی مانده است (۱۶). با توجه به اینکه تحقیقات اندکی در زمینه اثر نانوکودها بر گیاهان مختلف، بخصوص گندم، انجام گرفته است و از طرفی نیز مشاهده شده است که ارقام یک گونه گیاهی پاسخ‌های متفاوتی را به کودهای مختلف از خود نشان می‌دهند، در این بررسی، پاسخ ارقام مختلف گندم به نانوکود کلات آهن در محلول غذایی ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در بهار سال ۱۳۹۲ در گلخانه تحقیقاتی مرکز پژوهشی کشت بدون خاک دانشگاه صنعتی اصفهان با میانگین دمای روزانه و شبانه به ترتیب حدود ۳۰ و ۲۲ درجه سلسیوس و شدت نور حدود ۴۰ میکرومول فوتون در متر مربع در ثانیه در محلول غذایی هوگلند انجام شد. سیزده ژنوتیپ گندم شامل ارقام نیک‌نژاد، کویر، عدل، سرخ‌تخم، سیستان، پیشتاز، طبعی، آزادی، بک‌کراس بهاره روشن، هیرمند، استار، چمران و لاین ۹ شوری از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان تهیه و در معرض کلات آهن معمولی (شاهد) و نانوکلات آهن با غلظت ۲۲/۵ میلی‌گرم در لیتر در محلول غذایی قرار گرفتند.

برای این منظور، ابتدا کود کلات آهن ساخت شرکت گرین فرتیلایزر (Green Fertilizer) ایتالیا با عامل کلات کننده EDDHA و حاوی ۶٪ آهن تهیه گردید. سپس، جهت تبدیل به ذرات نانو در آزمایشگاه دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان، فرایند آسیاب‌کاری روی پودر کلات آهن انجام گرفت. اندازه ذرات نانو به‌طور میانگین ۲۰۰ نانومتر بوده که بعد از مدت زمان ۲۰ ساعت آسیاب‌کاری در دستگاه آسیاب گلوله‌ای (Ball mill) حاصل شد. برای سنجش اندازه ذرات نانو و کلات آهن از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM- Philips- XL 30) (شکل ۱) و جهت تعیین ترکیب ذرات نانوکلات آهن و کلات آهن از دستگاه تفرق اشعه X (XRD- Phillips Expert-MPD) (شکل ۲) در دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد (۱۰).

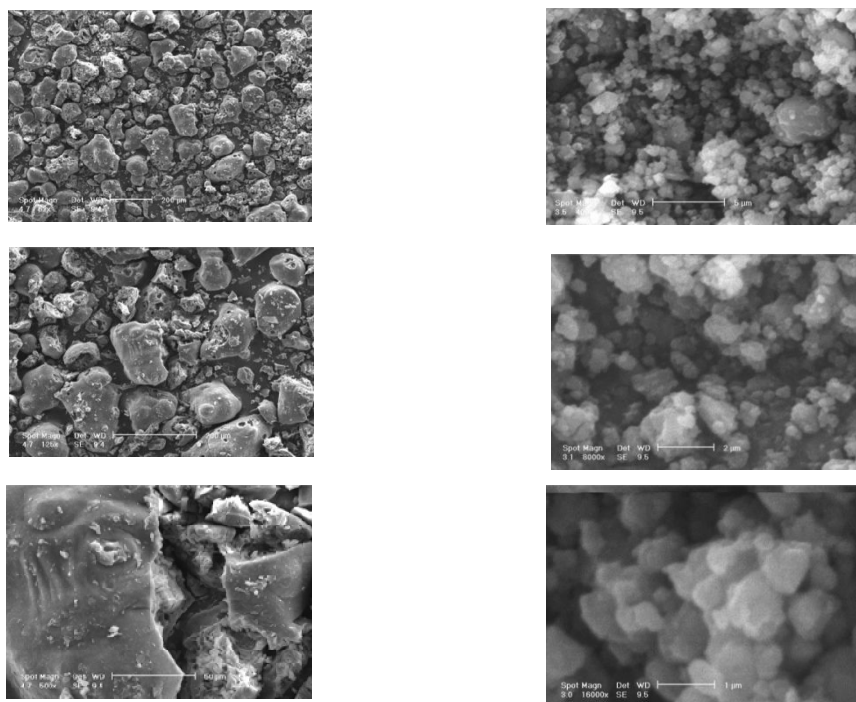
همانطور که در شکل ۲ مشخص است، تفاوت بارزی بین نمونه XRD پودر کلات آهن و نانوکلات آهن وجود ندارد. در

بجای گذاشتند، که از جمله می‌توان به کاهش رشد گیاهچه اشاره کرد. با این وجود، لویبای مانگو در مقایسه با گندم حساسیت بیشتری را نسبت به نانوذرات از خود نشان داد که محققین دلایل آن را ساختار و آناتومی ریشه ذکر کردند (۱۶).

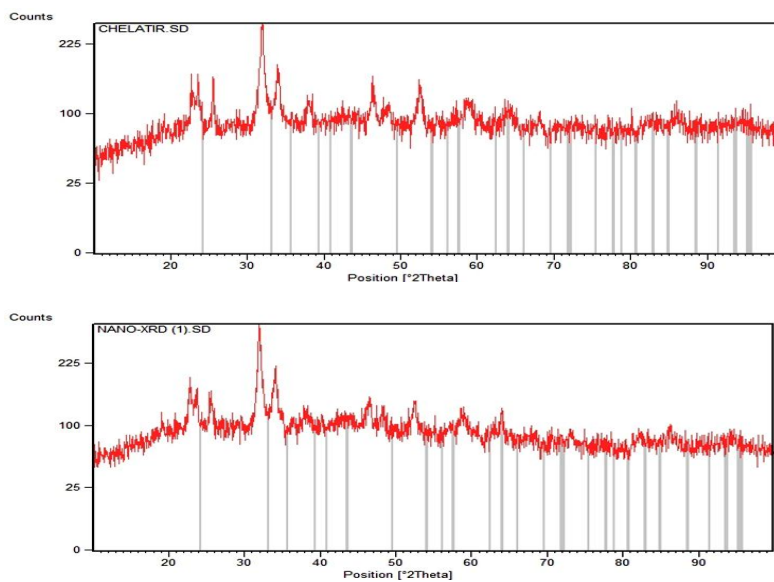
همچنین، عده‌ای از محققین گزارش دادند که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به مدت زیادی در خاک باقی مانده و به طور عمده به دیواره سلولی گندم متصل شدند. نانوذرات اکسید روی نیز در خاک باقی ماندند و در نتیجه‌ی افزایش آن، سمیت روی در گندم مشاهده شد. بعلاوه، نتایج حاصل از این تحقیقات نشان داد که نانوذرات یاد شده باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در فعالیت آنزیمی خاک (که از شاخص‌های کیفیت و سلامت خاک محسوب می‌شوند) شده است، به طوری که از فعالیت پروتئاز، کاتالاز و پراکسیداز خاک در حضور نانوذرات کاسته شد؛ اما در فعالیت اوره‌آز تغییری صورت نگرفت (۱۰).

کلات‌های Fe^{3+} و گاهی اوقات Fe^{2+} شکل‌های غالب آهن در محلول خاک یا محلول‌های غذایی می‌باشند (۱). عوامل کلات‌کننده مولکول‌های آلی هستند که می‌توانند یون‌های فلزی خاصی از قبیل کلسیم، منیزیم، آهن، کبالت، مس، روی و منگنز را به دام انداخته، سپس این یون‌های فلزی را به تدریج آزاد کنند و در نهایت به شکل قابل جذب برای گیاهان در آورند (۱۸). کود نانوکلات آهن می‌تواند به‌عنوان منبعی قابل اطمینان مورد توجه قرار گیرد، زیرا کلات آهن در دامنه گسترده‌ای از pH (۳-۱۱) از پایداری زیادی برخوردار بوده و آهن آن به تدریج آزاد می‌شود. امتیاز برتر کود نانوکلات آهن، افزایش نسبت آهن دو ظرفیتی به آهن سه ظرفیتی در سطح کلات است که منجر به افزایش ساخت کلروفیل در گیاهان می‌شود (۱۳).

همانطور که گفته شد، اثر بازدارندگی یا تحریک کنندگی نانوذرات بر گیاهان مختلف در مراحل تکاملی به اثبات رسیده است. با وجود آگاهی‌های به دست آمده از مطالعات گذشته، سؤالات زیادی در مورد سرنوشت و عملکرد نانوذرات در سیستم‌های گیاهی از قبیل فعالیت سطحی نانوذرات، پتانسیل بالقوه نانوذرات در ورود به بافت آوندی گیاه و نقش دیواره



شکل ۱. تصاویر دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از پودر کلات آهن به ترتیب با بزرگنمایی ۶۲، ۱۲۵ و ۵۰۰ برابر (چپ) و نانوکلات آهن به ترتیب با بزرگنمایی ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۶۰۰۰ برابر (راست)



شکل ۲. طیف XRD از پودر کلات آهن (بالا) و نانوکلات آهن (پایین)

آماده‌سازی و کاشت گیاهچه

بذرهای ژنوتیپ‌های مختلف گندم به مدت ۳۰ ثانیه در محلول ۵٪ درصد هیپوکلرید سدیم ضدعفونی و پس از آن به خوبی با

واقع این تصاویر نشان دهنده آن است که در ترکیب و ماهیت پودر کلات آهن طی فرایند آسیاب‌کاری تغییری حاصل نشد و با اطمینان زیاد می‌توان از آن در آزمایش مورد نظر استفاده نمود.

جدول ۱. نتایج آزمون معنی‌داری کروسکال والیس برای صفات اندازه‌گیری شده در ارقام مختلف گندم

متغیر	کای اسکور	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
تعداد پنجه	۰/۲۸۳	۱	۰/۵۹۵
شاخص سبزیگی	۰/۰۳۲	۱	۰/۸۵۸
فلورسانس کلروفیل	۰/۷۶۱	۱	۰/۳۸۳
حجم ریشه	۰/۵۵۹	۱	۰/۴۵۵
وزن خشک ریشه	۰/۳۸۲	۱	۰/۵۳۷
وزن خشک اندام هوایی	۲/۹۵	۱	۰/۰۸۶
وزن خشک کل	۱/۳۳	۱	۰/۲۴۸
نسبت ریشه به بخش هوایی	۵/۷۶	۱	۰/۰۱۶
سطح سبز برگ	۰/۹۰۱	۱	۰/۳۴۳

شده و بخش هوایی و ریشه آنها از یکدیگر جدا شد. تعداد پنجه شمارش شده، سطح برگ به وسیله دستگاه سطح برگ‌سنج الکترونیکی (مدل GA-5, Japan)، شاخص کلروفیل برگ توسط دستگاه کلروفیل‌سنج (مدل SPAD-502) و حجم ریشه بر حسب سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد (۲). سپس، ریشه و بخش هوایی هر گیاه به مدت ۴۸ ساعت در خشک‌کن با دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار داده شده و وزن خشک آنها با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

محاسبه آمار توصیفی شامل میانگین، خطای معیار، میانه، انحراف معیار، کمینه، بیشینه، دامنه، ضریب تغییرات و تجزیه واریانس بر اساس آزمون کروسکال والیس به کمک نرم افزار SPSS نسخه‌ی ۱۶ انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج آزمون معنی‌داری کروسکال والیس نشان داد که در بین صفات مورد بررسی، نسبت ریشه به بخش هوایی در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شد و کود نانوکلات آهن اثر معنی‌داری بر

آب مقطر شستشو شدند. سپس، بذرها در سینی‌های مخصوص نشا با بستر کوکوپیت کشت گردیدند. بعد از ۲۰ روز و در مرحله سه برگی، گیاهچه‌ها به ظروف حاوی محلول‌های غذایی منتقل شده و پس از استقرار، سامانه‌ی تهویه نیز برای ظرف‌های مورد نظر راه‌اندازی شد. برای این منظور، ۴ عدد ظرف مستطیل‌شکل در نظر گرفته شد که در درون هر ظرف ۹۶ گیاهچه قرار داده شد. pH محلول حدود ۵/۷ و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) حدود ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر در طول دوره آزمایش تنظیم شد.

اندازه‌گیری صفات

بعد از گذشت حدود ۱۸ روز از اعمال تیمارها و در مرحله پنجه‌زنی، سنجش وضعیت فلورسانس کلروفیل به وسیله‌ی دستگاه فلورومتر (Chlorophyll Fluorometer, Opti-) (Science, OS-30p, London) و از محل میانه‌ی برگ و بین رگبرگ اصلی و لبه‌ی جوان‌ترین برگ کامل هر گیاه انجام شد (۳). ویژگی‌های اندازه‌گیری شده شامل موارد زیر بودند: فلورسانس کمینه: F_0 ، فلورسانس بیشینه: F_m ، کارایی کوانتومی فتوسیستم II: $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$. سپس، گیاهچه‌های مورد نظر از هر محلول غذایی خارج

جدول ۲. میانگین‌های عملکرد ماده خشک ریشه، ماده خشک شاخساره و ماده خشک کل ارقام مختلف گندم در شرایط کلات‌آهن

معمولی و نانو در محلول غذایی

رقم	عملکرد ماده خشک ریشه (گرم)			عملکرد ماده خشک شاخساره (گرم)			عملکرد ماده خشک کل (گرم)		
	کلات	نانوکلات	درصد	کلات	نانوکلات	درصد	کلات	نانوکلات	درصد
	آهن	آهن	تغییر	آهن	آهن	تغییر	آهن	آهن	تغییر
لاین ۹ شوری	۰/۲۴	۰/۲۷	۱۱/۱۱	۰/۹۴	۱/۱۱	۱۵/۳۴	۱/۱۸	۱/۳۸	۱۴/۴۹
نیک نژاد	۰/۴۵	۰/۲۳	-۴۸/۸۸	۱/۸۶	۱/۰۲	-۴۵/۱۶	۲/۳۱	۱/۲۵	-۴۵/۸۸
کویز	۰/۲۸	۰/۲۹	۳/۴۴	۱/۴۲	۱/۶۸	۱۵/۴۷	۱/۷	۱/۹۷	۱۳/۷۰
عدل	۰/۳۹	۰/۳۲	-۱۷/۹۴	۲/۰۲	۱/۳۹	-۳۱/۱۸	۲/۴۱	۱/۷۱	-۲۹/۰۴
سرخ‌تخم	۰/۲۵	۰/۳۳	۲۴/۲۴	۱/۵۶	۱/۵۲	-۲/۵۶	۱/۸۱	۱/۸۵	۲/۱۶
سیستان	۰/۲۶	۰/۲۸	۷/۱۴	۱/۳	۱/۴۳	۹/۰۹	۱/۵۶	۱/۷۱	۸/۷۷
پیشناز	۰/۲۸	۰/۳۱	۹/۶۷	۱/۵۶	۱/۳۳	-۱۴/۷۴	۱/۸۴	۱/۶۴	-۱۰/۸۶
طیسی	۰/۲۵	۰/۳۵	۲۸/۵۷	۱/۶۹	۱/۳۶	-۱۹/۵۲	۱/۹۴	۱/۷۱	-۱۱/۸۵
آزادی	۰/۲۷	۰/۲۷	۰	۱/۵۸	۱/۱۸	-۲۵/۳۱	۱/۸۵	۱/۴۵	-۲۱/۶۲
بک‌کراس بهاره روشن	۰/۲۳	۰/۲۸	۱۷/۵۸	۱/۲۸	۱/۱۵	-۱۰/۱۵	۱/۵۱	۱/۴۳	-۵/۲۹
هیرمند	۰/۲۲	۰/۲۲	۰	۱/۰۹	۰/۸۸	-۱۹/۲۶	۱/۳۱	۱/۵۱	۱۳/۲۴
استار	۰/۲۷	۰/۱۴	-۴۸/۱۴	۱/۳۷	۰/۶۵	-۵۲/۵۵	۱/۶۴	۰/۷۹	-۵۱/۸۲
چمران	۰/۱	۰/۱۶	۱۲/۵	۰/۹۳	۰/۹۱	-۲/۱۵	۱/۰۷	۱/۰۷	۰
میانگین	۰/۲۷۲	۰/۲۶۵	-۰/۱	۱/۴۳	۱/۲۰	-۱۴/۱	۱/۷	۱/۴۷	-۹/۵

دیگر صفات نداشت (جدول ۱). با این وجود، میانگین عملکرد صفاتی همچون سطح برگ، ماده خشک شاخساره، ماده خشک کل و حجم ریشه تحت تأثیر کود نانوکلات آهن به ترتیب ۹/۵، ۱۴/۱، ۸/۹ و ۹/۵ درصد در مقایسه با کلات آهن معمولی (شاهد) کاهش یافت (جدول ۲ و ۳). در چندین مطالعه نیز مشاهده شده که ماده خشک گیاهی و سطوح کلروفیل حساسیت بیشتری را نسبت به نانوذرات از خود نشان داده‌اند (۱۴). در این رابطه، در آزمایشی که دو و همکاران (۱۰) انجام دادند مشاهده شد که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید روی سبب کاهش بیومس گندم شدند (۸). در مطالعه‌ای دیگر که روی گندم انجام گرفت، نانوذرات اکسید مس و اکسید روی رشد اندام هوایی را به ترتیب ۱۳ و ۸ درصد کاهش دادند (۹). نسبت ریشه به بخش هوایی در بین ارقام مختلف گندم در پاسخ به کود نانوکلات آهن به‌طور میانگین ۱۳/۷ درصد نسبت

به شاهد افزایش نشان داد (جدول ۳). به نظر می‌رسد که نانوذرات کلات آهن مورد آزمایش نتوانسته‌اند به مقدار کافی از ریشه به بخش هوایی منتقل شوند و به همین دلیل به‌طور میانگین نسبت ریشه به بخش هوایی در بین ارقام مختلف گندم افزایش یافته است. در این رابطه، در آزمایشی، مشاهده شد که نانواکسید آهن (Fe_3O_4) توسط ریشه‌های کدو (*Cucurbita maxim*) جذب شده و به قسمت‌های هوایی انتقال پیدا کردند. اما در پایان آزمایش، مشخص شد که حدود ۴۵/۵ درصد نانوذرات در ریشه گیاهان تجمع یافته و تنها حدود ۰/۶ درصد آنها به برگ‌ها منتقل شدند. همچنین، هنگامی که یکی از گونه‌های لوبیای لیما (*Phaseolus limensis*) در همین آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفت، هیچگونه جذب و انتقال نانواکسید آهن مشاهده نشد (۱۴). در آزمایشی دیگر که روی گیاه چاودار انجام شد، این

جدول ۳. میانگین‌های عملکرد حجم ریشه، سطح برگ و نسبت ریشه به بخش هوایی ارقام مختلف گندم در شرایط کلات آهن معمولی و نانو در محلول غذایی

رقم	صفات								
	نسبت ریشه به بخش هوایی			سطح برگ			حجم ریشه		
	کلات آهن	نانوکلات آهن	درصد تغییر	کلات آهن	نانوکلات آهن	درصد تغییر	کلات آهن	نانوکلات آهن	درصد تغییر
لاین ۹ شوری	۱/۱	۰/۶	-۴۵/۴۵	۱۲/۹۷	۸/۳۳	-۳۵/۷۷	۰/۲۶	۰/۲۴	-۷/۶۹
نیک نژاد	۱/۶	۱/۸	۱۱/۱۱	۱۶/۴۲	۱۴/۴۴	-۱۲/۰۵	۰/۲۴	۰/۲۳	-۴/۱۶
کویر	۱/۲	۱/۴	۱۴/۲۸	۱۶/۶۷	۱۳/۵۲	-۱۸/۸۹	۰/۲۰	۰/۱۷	-۱۵
عدل	۰/۸	۱/۲	۳۳/۳۳	۱۱/۰۴	۱۶/۶۸	۳۳/۸۱	۰/۱۹	۰/۲۳	۱۷/۳۹
سرخ تخم	۱/۰	۱/۰	۰	۱۴/۱۷	۱۷/۵۳	۱۹/۱۶	۰/۱۶	۰/۲۲	۲۷/۲۷
سیستان	۱/۵	۱/۲	-۲۰	۱۸/۳۳	۱۲/۵۲	-۳۱/۶۹	۰/۲۰	۰/۲۰	۰
پیش‌تاز	۱/۷	۱/۶	-۵/۸۸	۱۷/۵۰	۲۲/۵۰	۲۲/۲۲	۰/۱۸	۰/۲۳	۲۱/۸۳
طیسی	۲/۲	۱/۶	-۲۷/۲۷	۱۹/۵۵	۱۳/۵۸	-۳۰/۵۳	۰/۱۵	۰/۲۶	۴۲/۳۰
آزادی	۱/۵	۱/۳	-۱۳/۳۳	۱۶/۴۰	۱۱/۱۳	-۳۲/۱۳	۰/۱۷	۰/۲۳	۲۶/۰۸
بک‌کراس بهاره	۲/۰	۰/۶	-۷۰	۱۶/۶۷	۸/۳۳	-۵۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۲۴	۲۵
روشن	۰/۸	۰/۹	۱۱/۱۱	۱۳/۵۰	۱۵/۶۷	۱۳/۸۴	۰/۲۰	۰/۲۵	۲۰
هیرمند	۱/۰	۱/۲	۱۶/۶۶	۱۱/۸۸	۱۸/۵۰	۳۵/۷۸	۰/۲۰	۰/۲۲	۹/۰۹
استار	۱/۰	۰/۸	-۲۰	۱۶/۹۰	۱۰/۵۳	-۳۷/۶۹	۰/۱۵	۰/۱۸	۱۶/۶۶
چمران	۱/۳۳	۱/۱۶	-۸/۹	۱۵/۵۳	۱۴/۰۹	-۹/۵	۰/۱۹	۰/۲۲	۱۳/۷

نتیجه حاصل شد که نانوذرات اکسید روی نتوانستند از ریشه به اندام هوایی منتقل شوند. مشاهدات صورت گرفته حاکی از آن بود که این نانوذرات ابتدا به سطح ریشه متصل شده و در ادامه، درون آپوپلاست و فضاهای پروتوپلاست در آندودرم ریشه و استوانه‌ی مرکزی تجمع پیدا کردند (۱۴).

در بررسی‌های صورت گرفته در آزمایش حاضر مشاهده شد که میانگین عملکرد صفاتی همچون شاخص کلروفیل، فلورسانس کلروفیل، تعداد پنجه و ماده خشک ریشه تحت تأثیر نانو کود کلات آهن تفاوت بارزی را نسبت به شاهد (کلات آهن معمولی) نشان ندادند (جدول ۲ و ۴). همچنین نتایج حاصل از آماره‌های توصیفی نشان داد که در بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم در محلول غذایی، بین صفات مورد بررسی، تعداد پنجه و نسبت ریشه به بخش هوایی بیشترین ضریب تغییرات (به ترتیب ۱۹/۰۷ و ۱۶/۸۴) را دارا بودند (جدول ۵). تعداد پنجه از ۲ تا ۴ عدد در بین ارقام مختلف متغیر بود. کمترین نسبت ریشه به بخش هوایی مربوط به ارقام طیسی و چمران بود و بیشترین این میزان به رقم لاین ۹ شوری اختصاص یافت (جدول ۴). دلایل احتمالی می‌تواند با مورفولوژی و ساختار متفاوت ریشه‌ی ژنوتیپ‌های مختلف گندم در جذب و انتقال نانوذرات کلات آهن ارتباط داشته باشد (۱۲).

در میان صفات مورد بررسی تحت این شرایط، کمترین ضریب تغییرات در سطح برگ (۰/۱۶) و فلورسانس کلروفیل (۰/۰۲) (جدول ۵) مشاهده شد. کمترین و بیشترین میزان فلورسانس کلروفیل به ترتیب مربوط به لاین ۹ شوری و هیرمند بود (جدول ۴) و در میزان سطح برگ به ترتیب در ارقام عدل و طیسی مشاهده شد (جدول ۳).

در بررسی‌های صورت گرفته در آزمایش حاضر مشاهده شد که میانگین عملکرد صفاتی همچون شاخص کلروفیل، فلورسانس کلروفیل، تعداد پنجه و ماده خشک ریشه تحت تأثیر نانو کود کلات آهن تفاوت بارزی را نسبت به شاهد (کلات آهن معمولی) نشان ندادند (جدول ۲ و ۴).

همچنین نتایج حاصل از آماره‌های توصیفی نشان داد که در بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم در محلول غذایی، بین صفات مورد بررسی، تعداد پنجه و نسبت ریشه به بخش هوایی بیشترین ضریب تغییرات (به ترتیب ۱۹/۰۷ و ۱۶/۸۴) را دارا بودند (جدول ۵). تعداد پنجه از ۲ تا ۴ عدد در بین ارقام مختلف متغیر بود. کمترین نسبت ریشه به بخش هوایی مربوط به ارقام طیسی و چمران بود و بیشترین این میزان به رقم لاین ۹ شوری اختصاص یافت (جدول ۴). دلایل احتمالی می‌تواند با مورفولوژی و ساختار متفاوت ریشه‌ی ژنوتیپ‌های مختلف گندم در جذب و انتقال نانوذرات کلات آهن ارتباط داشته باشد (۱۲).

در میان صفات مورد بررسی تحت این شرایط، کمترین ضریب تغییرات در سطح برگ (۰/۱۶) و فلورسانس کلروفیل (۰/۰۲) (جدول ۵) مشاهده شد. کمترین و بیشترین میزان فلورسانس کلروفیل به ترتیب مربوط به لاین ۹ شوری و هیرمند بود (جدول ۴) و در میزان سطح برگ به ترتیب در ارقام عدل و طیسی مشاهده شد (جدول ۳).

جدول ۴. میانگین‌های عملکرد تعداد پنجه، شاخص سبزی‌نگی و فلورسانس کلروفیل ارقام مختلف گندم در شرایط کلات آهن معمولی و نانو در محلول غذایی

رقم	صفات								
	تعداد پنجه			شاخص کلروفیل			فلورسانس کلروفیل		
	کلات آهن	نانوکلات آهن	درصد تغییر	کلات آهن	نانوکلات آهن	درصد تغییر	کلات آهن	نانوکلات آهن	درصد تغییر
لاین ۹ شوری	۳	۳	۰	۳۷/۸۸	۳۹/۱۸	۳/۳	۰/۷۹۵	۰/۷۷۲	-۲/۸۹
نیک نژاد	۳	۳	۰	۴۰/۰۷	۴۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۷۹۶	۰/۸۲۵	۳/۵۱
کویر	۳	۴	۲۵	۳۷/۷۵	۳۸/۴۲	۱/۷۴	۰/۸۰۹	۰/۷۹	-۲/۳۴
عدل	۴	۴	۰	۳۹/۴۸	۳۵/۳۶	-۱۰/۴	۰/۸۱۹	۰/۸۰۷	-۱/۴۶
سرخ تخم	۳	۴	۲۵	۳۵/۲۲	۴۰/۱۶	۱۲/۳	۰/۸۰۶	۰/۷۹۹	-۰/۸۶
سیستان	۴	۳	-۲۵	۳۷/۷۶	۴۰/۴	۶/۵۳	۰/۸۳۶	۰/۸۱۲	-۲/۸۷
پیشناز	۴	۳	-۲۵	۳۹/۰۹	۳۸/۵۲	-۱/۴۳	۰/۸۳	۰/۸۰۸	-۲/۶۵
طیسی	۴	۴	۰	۴۱/۲۵	۳۹/۸۲	-۳/۴۶	۰/۷۹۶	۰/۸۱۶	۲/۴۵
آزادی	۳	۴	۲۵	۴۰/۰۷	۳۹/۶	-۱/۱۷	۰/۸۱	۰/۸۰۴	-۰/۷۴
بک‌کراس بهاره روشن	۴	۴	۰	۴۰/۲۳	۳۹/۱۵	-۲/۶۸	۰/۸۳۰	۰/۸۱۴	-۱/۹۲
هیرمند	۴	۴	۰	۳۶/۱۳	۳۸/۹۷	۷/۲۸	۰/۸۴۵	۰/۸۰۱	-۵/۲
استار	۲	۳	۳۳/۳	۴۱/۶۲	۳۹/۹۸	-۳/۹۴	۰/۸۱۷	۰/۸۰۴	-۱/۵۹
چمران	۴	۴	۰	۳۹/۲۸	۳۸/۳۷	-۲/۳۱	۰/۷۹۷	۰/۷۹۷	۰
میانگین	۳/۴۶	۳/۶۱	۲/۲	۳۸/۹۱	۳۹/۰۷	۱/۴	۰/۸۱۲	۰/۸۰۴	-۱/۳

جدول ۵. برخی آماره‌های توصیفی صفات اندازه‌گیری شده در ارقام مختلف گندم تحت شرایط کلات آهن معمولی و نانو در محلول غذایی

شرح آماره	کلات آهن معمولی				نانوکلات آهن			
	تعداد پنجه	شاخص کلروفیل	سطح برگ (cm ²)	نسبت ریشه به بخش هوایی	تعداد پنجه	شاخص کلروفیل	سطح برگ (cm ²)	نسبت ریشه به بخش هوایی
میانگین	۳/۴۶	۳۸/۹۰	۱۵/۵۳	۰/۱۹	۳/۶۶	۳۹/۰۷	۱۴/۰۹	۰/۲۲
خطای معیار	۰/۱۸	۰/۵۲	۰/۷۱	۰/۰۰۸	۰/۱۴	۰/۳۸	۱/۱۳	۰/۰۰۷
میان	۴	۳۹/۲۸	۱۶/۴۲	۰/۱۹	۴	۳۹/۱۸	۱۳/۵۸	۰/۲۳
انحراف معیار	۰/۶۶	۱/۸۸	۲/۵۸	۰/۰۳۲	۰/۴۹	۱/۳۱	۴/۱۰	۰/۰۲۵
کمینه	۲	۳۵/۲۲	۱۱/۰۴	۰/۱۵	۳	۳۵/۳۶	۸/۳۳	۰/۱۷
بیشینه	۴	۴۱/۶۲	۱۹/۵۵	۰/۲۶	۴	۴۰/۴۰	۲۲/۵۰	۰/۲۶
دامنه	۲	۶/۴۰	۸/۵۱	۰/۱۱	۱	۵/۰۴	۱۴/۱۷	۰/۰۹
ضریب تغییرات (%)	۱۹/۰۷	۴/۸۳	۰/۱۶	۱۶/۸۴	۱۳/۳۸	۳/۳۵	۰/۲۹	۱۱/۳۶
تعداد نمونه	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳

جدول ۶. برخی آماره‌های توصیفی صفات اندازه‌گیری شده در ارقام مختلف گندم تحت شرایط کلات آهن معمولی و نانو در محلول غذایی

شرح آماره	کلات آهن معمولی			نانوکلات آهن		
	حجم ریشه (ml)	فلورسانس کلروفیل	وزن خشک ریشه (g)	حجم ریشه (ml)	فلورسانس کلروفیل	وزن خشک ریشه (g)
میانگین	۱/۳۳	۰/۸۱	۰/۲۷	۱/۴۳	۰/۸۰	۰/۲۶
خطای معیار	۰/۱۲	۰/۰۰۴	۰/۰۲۱	۰/۰۹۱	۰/۰۰۳	۰/۰۱۷
میانه	۱/۲	۰/۸۰	۰/۲۶	۱/۴۲	۰/۸۰۴	۰/۲۸
انحراف معیار	۰/۴۵	۰/۰۱۶	۰/۰۷۶	۰/۳۲۹	۰/۰۱۳	۰/۰۶۲
کمینه	۰/۸	۰/۸۰	۰/۱۴	۰/۹۳	۰/۷۷	۰/۱۴
بیشینه	۲/۲	۰/۸۴	۰/۴۵	۲/۰۲	۰/۸۲	۰/۳۵
دامنه	۱/۴	۰/۰۵	۰/۳۱	۱/۰۹	۰/۰۵	۰/۲۲
ضریب تغییرات (%)	۰/۳۳	۰/۰۲	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۰۱۷	۰/۲۳
تعداد نمونه	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳

به ترتیب در ارقام سرخ تخم، عدل و لاین ۹ شوری مشاهده شد (جدول ۴ و ۳).

تعداد پنجه در بین ارقام مختلف متغیر بود (جدول ۴). تحت این شرایط، ارقام گندم از لحاظ ماده خشک شاخساره و ریشه نیز تفاوت بارزی را نشان دادند. به گونه‌ای که تفاوت حداکثر عملکرد ماده خشک شاخساره در رقم عدل (۲/۰۲) نسبت به حداقل این مقدار در رقم چمران (۰/۹۳) حدود ۵۳٪ و تفاوت بین حداکثر و حداقل عملکرد ماده خشک ریشه به ترتیب در ارقام نیک نژاد (۰/۴۵) و چمران (۰/۱۴) حدود ۶۸٪ بود (جدول ۲).

مشاهدات حاکی از آن بود که در شرایط نانوکلات آهن نیز تفاوت بارزی در بین ارقام مختلف گندم از لحاظ عملکرد ماده خشک شاخساره و ریشه وجود داشت. به این صورت که تفاوت بین حداکثر و حداقل ماده خشک شاخساره به ترتیب در ارقام کویر (۱/۶۸) و استار (۰/۶۵) حدود ۶۱٪ و تفاوت بین بیشترین و کمترین عملکرد ماده خشک ریشه به ترتیب در ارقام طوسی (۰/۳۵) و استار (۰/۱۴) حدود ۶۰٪ بود (جدول ۲). با توجه به این نتایج می‌توان گفت که ارقام مختلف گندم به‌طور

همچنین، بررسی‌ها نشان داد که در حضور نانوکلات آهن در محلول غذایی نیز به ترتیب تعداد پنجه (۱۳/۳۸) و نسبت ریشه به بخش هوایی (۱۱/۳۶) بیشترین ضریب تغییرات را دارا بودند (جدول ۵). با این حال، تعداد پنجه در بین ارقام مختلف متغیر بود (جدول ۵). تفاوت کمترین تعداد پنجه در بوته نسبت به بیشترین مقدار، در ارقام مختلف حدود ۳۳/۳ درصد بود (جدول ۴). همچنین، کمترین و بیشترین نسبت ریشه به بخش هوایی به ترتیب در ارقام کویر و طوسی مشاهده شد (جدول ۶). تحت این شرایط، کمترین ضریب تغییرات در فلورسانس کلروفیل (۰/۰۱۷) دیده شد (جدول ۶) و لاین ۹ شوری و رقم نیک نژاد به ترتیب کمترین و بیشترین فلورسانس کلروفیل را به خود اختصاص دادند (جدول ۴).

ژنوتیپ‌های مختلف گندم مورد مطالعه پاسخ متفاوتی به تغذیه آهن به شکل کلات معمولی و نانو نشان دادند، به گونه‌ای که در میان صفات مورد بررسی، در شرایط کلات آهن معمولی در بین ارقام مختلف گندم، حداکثر میزان شاخص کلروفیل، شاخص سطح برگ و فلورسانس کلروفیل به ترتیب مربوط به ارقام استار، طوسی و هیرمند بود و حداقل این مقادیر

نسبت ریشه به بخش هوایی تحت تأثیر نانوکلات آهن افزایش یافت و تنها در ارقام کویر، لاین ۹ شوری و نیک‌نژاد این نسبت کاهش اندکی را نشان داد. بیشترین درصد تغییر مثبت و منفی در نسبت ریشه به بخش هوایی به ترتیب در ارقام طوسی (۴۲/۳٪) و کویر (۱۵٪) مشاهده شد (جدول ۳). همچنین، در بین ژنوتیپ‌های گندم تفاوت بارزی از لحاظ حجم ریشه دیده شد. به گونه‌ای که رقم بک‌کراس بهاره روشن با ۷۰٪ بیشترین واکنش منفی و رقم عدل با ۳۳٪ بیشترین واکنش مثبت را در پاسخ به کود نانوکلات آهن نشان دادند (جدول ۳). در شرایط کلات آهن معمولی، تفاوت بین کمترین حجم ریشه در ارقام عدل و هیرمند (۵/۸) و بیشترین این مقدار در رقم طوسی (۲/۲) حدود ۶۳٪ بود (جدول ۳). این در حالی است که در شرایط نانوکلات آهن حداکثر حجم ریشه مربوط به رقم نیک نژاد (۱/۸) و حداقل این مقدار مربوط به لاین ۹ شوری و بک‌کراس بهاره روشن (۵/۶) و تفاوت بین این دو رقم حدود ۶۶٪ بود (جدول ۳). این مسئله نشان می‌دهد که در شرایط نانوکلات آهن، در بین ارقام مختلف گندم، تنوع بیشتری از لحاظ حجم ریشه وجود دارد.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم مورد مطالعه در پاسخ به کود کلات آهن به شکل معمول و نانو در محلول غذایی، تنوع چشمگیری وجود داشت و لاین ۹ شوری و رقم استار به ترتیب پاسخ مثبت و منفی قابل ملاحظه‌ای به مصرف کود نانوکلات آهن در محلول غذایی نشان دادند. به نظر می‌رسد که بتوان از نتایج مطالعه حاضر در برنامه‌های اصلاحی و در راستای اهداف مد نظر بهره جست.

قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر کود نانوکلات آهن قرار گرفته و تحت این شرایط از میزان تنوع بین ارقام هم از لحاظ میزان عملکرد ماده خشک شاخصاره (۴۷٪)، هم از نظر میزان ماده خشک ریشه (۱۱٪) و در نهایت عملکرد ماده خشک کل (۳۴٪) کاسته شد (جدول ۲).

در بین ژنوتیپ‌های گندم، ارقام استار و نیک نژاد به شدت تحت تأثیر کود نانوکلات آهن قرار گرفته و از میزان ماده خشک کل آنها به ترتیب ۵۱/۸٪ و ۴۵/۸٪ کاسته شد (جدول ۲)، اما عملکرد لاین ۹ شوری و کویر تحت این شرایط به ترتیب ۱۴/۵٪ و ۱۳/۷٪ افزایش یافت (جدول ۲). به نظر می‌رسد که به دلیل اثر بازدارندگی ذرات نانو (۱۳ و ۱۷) کاهش وزن خشک ریشه در ارقام استار و نیک‌نژاد اتفاق افتاده و به دنبال آن از وزن خشک اندام‌هوایی آنها نیز کاسته شده است. اما در مقابل، در ارقام کویر و لاین ۹ شوری به دلیل توسعه ریشه‌ها و افزایش وزن خشک ریشه آنها تحت تأثیر نانو کود کلات آهن (۹)، بر میزان وزن خشک اندام‌هوایی آنها نیز افزوده شده است. به نظر می‌رسد ساختار ریشه در این ارقام به گونه‌ای است که از قدرت جذب بیشتر نانو ذرات کلات آهن برخوردارند و به دنبال آن توانایی زیادی در انتقال این ذرات به اندام هوایی دارند که این تفاوت‌ها با توجه به تنوع ژنتیکی بین ارقام قابل توجیه است.

ساختار ریشه در بین جنس‌های گیاهی و ارقام مختلف داخل یک جنس، متفاوت بوده و یکی از عوامل مؤثر بر توان جذب و نیز کارایی تغذیه‌ای گیاهان می‌باشد. به عنوان مثال، محققین نشان داده‌اند که ارقام روی کارآمد گندم، سطح ریشه گسترده‌تری در خاک داشته و نسبت ریشه‌های ریز در آنها بیشتر است. ریشه‌های نازک‌تر سبب افزایش سطح ریشه شده و از این طریق قابلیت استفاده از روی و سایر عناصر غذایی به‌ویژه عناصر غیر پویا را افزایش می‌دهند (۱).

بررسی‌ها نشان داد که در اکثر ارقام گندم مورد مطالعه،

منابع مورد استفاده

۱. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۶. مبانی تغذیه گیاه. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲. عشقی‌زاده، ح. ر. و پ. احسان‌زاده. ۱۳۸۶. تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری بر چند ژنوتیپ ذرت: I. فلورسانس کلروفیل، خصوصیات رشد و عملکرد دانه. علوم گیاهان زراعی ایران ۴۰(۲): ۱۳۵-۱۴۴.
۳. عشقی‌زاده، ح. ر.، ش. ریاحی‌نیا و ح. ر. خزائی. ۱۳۹۲. ارزیابی نقش ویژگی‌های ریخت‌شناسی ریشه گیاه تریتیکاله (*Triticale spp*) در تولید دانه تحت شرایط کمبود آب. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۵(۱۷): ۱۳۹-۱۴۷.
۴. مظاهری‌نیا، س.، ع. آستارایی، ا. منشی و ا. فتوت. ۱۳۹۰. مقایسه مقدار جذب و تجمع آهن در گندم (*Triticum aestivum L.*) با کاربرد اکسیدهای آهن معمولی و نانو همراه با کود کمپوست زباله شهری گرانوله گوگردی. نشریه زراعت ۹۲: ۱۰۳-۱۱۱.
۵. ملکوتی، ج.، م. غیبی و م. طهرانی. ۱۳۸۴. نقش ریزمغذی‌ها در افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی. انتشارات دانشگاه تهران.
6. Ali, A.E. 2012. Effect of iron nutrient care sprayed on foliage at different physiological growth stages on yield and quality of some durum wheat (*Triticum durum L.*) varieties in sandy soil. *Asian J. Crop Sci.* 4(4): 139-149.
7. Alloway, B.J. 2008. Zinc in Soils and Crop Nutrition. Second edition, IZA and IFA Brussels, Belgium and Paris, France.
8. Chen, H. and R.Yada. 2011. Nanotechnologies in agriculture: New tools for sustainable development. *Food Sci. Technol.* 22: 585-594.
9. Dimkpa, C.O., J.E. McLean, D.E. Latta, E. Manango'n, D.W. Britt, W.P. Johnson, M.I. Boyanov and A.J. Anderson. 2012. CuO and ZnO nanoparticles: Phytotoxicity, metal speciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat. *J. Nanopart. Res.* 14: 1125-1129.
10. Du, W., Y. Sun, R. Ji, J. Zhu, J. Wu and H. Guo. 2011. TiO₂ and ZnO nanoparticles negatively affect wheat growth and soil enzyme activities in agricultural soil. *J. Environ. Monit.* 13: 822-828.
11. Horvatic, M., M. Gacic and I. Verdina-Dragojevic. 1999. Accumulation of iron, copper, manganese and nickel during maize grain maturation. *J. Agron. Crop Sci.* 182: 99-103.
12. Kaya, C., D. Higgs and M. Burton. 2000. Phosphorus acid phosphatase enzyme activity in leaves of tomato cultivars in relation to Zn supply. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31: 3239-3248.
13. Khot, L.R., S. Sankaran, J.M. Maja, R. Ehsani and E.W. Schuster. 2012. Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. *Crop Prot.* 35: 64-70.
14. Ma, X., J. Geiser-Lee, Y. Deng and A. Kolmakov. 2010. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: Phytotoxicity, uptake and accumulation. *Sci. Total Environ.* 408(16): 3053-3061.
15. Morgounov, A., H. F. Gomez-Becerra, A. Abugalieva, M. Dzhunusova, M. Yessimbekova, H. Muminjanov, Y. Zelenskiy, L. Ozturk and I. Cakmak. 2007. Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia. *Euphytica* 155: 193-203.
16. Nair, R., S.H. Varghese, B.G. Nair, T. Maekawa, Y. Yoshida and D. Sakthi Kumar. 2010. Nanoparticulate material delivery to plants: Review. *Plant Sci.* 179: 154-163.
17. Said-Al, H.A.H., Ahl and A.A. Mahmoud. 2010. Effect of zinc and/or iron foliar application on growth and essential oil of sweet basil (*Ocimum basilicum L.*) under salt stress. *Ozean J. Appl. Sci.* 3(1): 97-111.
18. Sekhon, B.S. 2003. Chelates for micronutrient nutrition among crops. *Resonance* 8(7): 46-53.
19. Sheykhbaglou, R., M. Sedghi, M. Tajbakhsh Shishevan and R. Seyed Sharifi. 2010. Effects of Nano-Iron Oxide Particles on Agronomic Traits of Soybean. *Not. Sci. Biol.* 2 (2): 112-113.
20. Zhao, A.Q., Q.L. Bao, X.H. Tian, X.C. Lu and J.G. William. 2011. Combined effect of iron and zinc on micronutrient levels in wheat (*Triticum aestivum L.*). *J. Environ. Biol.* 32: 235-239