تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات روی و آهن و برخی موادآلی بر شاخص‌های فیزیولوژیک و عملکرد گندم(*Triticum aestivum L.*)

حسین دلف عبودی[۱]، اسفندیار فاتح*[۲] و امیر آینه‌بند[۳]

۱،۲و۳) گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

نویسنده مسئول*:e.fateh@scu.ac.ir

این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد می‌باشد.

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

چکیده

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در منطقه گمبوعه، شهرستان حمیدیه، با هدف بررسی تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات روی و آهن و برخی مواد آلی بر شاخص‌های فیزیولوژیک و عملکرد گندم انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل کودهای آلی (پنج سطح) شاهد (بدون کود آلی)، بیوچار باگاس (پنج تن در هکتار)، ورمی‌کمپوست (پنج تن در هکتار)، هیومیک‌اسید (در مراحل ساقه‌دهی و گلدهی)، عصاره جلبک دریایی (در مراحل ساقه‌دهی و گلدهی، نانوذرات (۴ سطح): شاهد (بدون نانوذرات)، نانوذرات روی (دو در هزار)، نانوذرات آهن (دو در هزار)، نانوذرات آهن + روی (دو در هزار). عملکرد دانه در تیمار شاهد ۳۳۳۶ کیلوگرم/هکتار بود که با تیمار عصاره جلبک دریایی (۳۳۸۲ کیلوگرم/هکتار، ۱/۳۸ درصد افزایش) تفاوت معنی‌داری نداشت، اما نسبت به ورمی‌کمپوست (۴۵۶۰ کیلوگرم/هکتار، ۳۶/۶۹ درصد افزایش) و هیومیک‌اسید (۴۶۳۷ کیلوگرم/هکتار، ۳۸/۹۷ درصد افزایش) به طور معنی داری کمتر بود. کاربرد نانوذرات روی (۴۰۳۸ کیلوگرم/هکتار، ۱۱/۲۴ درصد افزایش) و آهن (۴۰۵۶ کیلوگرم/هکتار، ۱۱/۷۴ درصد افزایش) و ترکیب آهن + روی (۴۲۸۹ کیلوگرم/هکتار، ۱۸/۱۵ درصد افزایش) نیز عملکرد دانه را نسبت به تیمار شاهد (۳۶۳۰ کیلوگرم/هکتار) به طور معنی داری افزایش داد. شاخص سطح برگ در تیمار ورمی‌کمپوست (۴/۹۸) و هیومیک‌اسید (۵/۱۳) بیشترین مقدار را داشت. محلول‌پاشی آهن + روی شاخص سطح برگ را به ۵/۰۴ افزایش داد. بیش‌ترین محتوی کلروفیل a در تیمارهای ورمی‌کمپوست (۱/۳۵میلی‌گرم/گرم وزن تر) و هیومیک‌اسید (۱/۳۸ میلی‌گرم/گرم وزن تر) مشاهده شد. محلول‌پاشی آهن + روی (۱/۳۷میلی‌گرم/گرم وزن تر) و آهن (۱/۳۴میلی‌گرم/گرم وزن تر) نیز برتری معنی‌داری نسبت به سایر تیمارها نشان داد. بیشترین مقدار محتوی کلروفیل b در تیمارهای محلول‌پاشی آهن + روی (۸۸/ ۰میلی‌گرم/گرم وزن تر) و آهن در شرایط کاربرد هیومیک‌اسید (۰/۹۰ میلی‌گرم/گرم وزن تر) ثبت شد. محتوای روی دانه در تیمارهای ورمی‌کمپوست (۳۲/۵میلی‌گرم/کیلوگرم) و هیومیک‌اسید (۳۴/۵ میلی‌گرم/کیلوگرم) بیش‌ترین مقدار را داشت. نانوذرات روی(۳۲/۴میلی‌گرم/کیلوگرم) و ترکیب آهن + روی (۳۲/۲ میلی‌گرم/کیلوگرم) نیز افزایش معنی‌داری ایجاد کردند. بیشترین مقدار محتوای آهن دانه در تیمارهای هیومیک‌اسید (۸۷/۵ میلی‌گرم/کیلوگرم) و ورمی‌کمپوست (۸۹/۸ میلی‌گرم/کیلوگرم) مشاهده شد. نانو ذرات آهن + روی (۸۹/۲ میلی‌گرم/کیلوگرم) و آهن(۸۲/۲ میلی‌گرم/کیلوگرم) نیز عملکرد بهتری نسبت به سایر تیمارها نشان دادند. به طور کلی کاربرد ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید، محلول‌پاشی نانوذرات آهن و روی، به بهبود شاخص‌های رشد، محتوای کلروفیل، و عناصر غذایی دانه کمک کرد.

واژه‌های کلیدی: عملکرد دانه، عناصر ریزمغذی و ورمی‌کمپوست.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum L.*) به‌عنوان پرمصرف‌ترین غله در سطح جهان، نقش حیاتی در تأمین غذای انسان‌ها ایفا می‌کند. این محصول زراعی، منبع اصلی انرژی و پروتئین برای بخش اعظم جمعیت جهان به شمار می‌رود و به‌عنوان غذای پایه در بسیاری از کشورها شناخته می‌شود. گندم حدود ۲۰ درصد از پروتئین و ۲۱ درصد از کالری موردنیاز حدود ۴/۵ میلیارد نفر را در ۹۴ کشور مختلف تأمین می‌کند(Kaium Chowdhury *et al.*, 2021). در بخش کشاورزی، عواملی مانند مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی، عدم استفاده از کودهای حاوی عناصر ریزمغذی، وجود خاک‌های آهکی و فقر مواد آلی در خاک، باعث کمبود عناصر ریزمغذی در زمین‌های کشاورزی شده است (Adrees *et al.*, 2020). کشاورزان برای افزایش عملکرد محصولات خود، به‌طور پیوسته از کودهای شیمیایی بهره می‌برند. اما استفاده بیش از حد و درازمدت از این کودها، نقش مهمی در ایجاد اختلال در سیستم‌های زیستی ایفا می‌کند. یکی از راهکارهای مقابله با این مسئله، استفاده از محلول‌های حاوی نانوذرات، به‌ویژه روی و آهن، به‌عنوان یک روش بالقوه برای افزایش ویژگی‌های فیزیولوژیکی و عملکرد گندم (*Triticum aestivum L.*) می‌باشد. نانوذرات می‌توانند جذب مواد مغذی و مقاومت در برابر تنش را بهبود بخشند و منجر به رشد و باروری بهتر شوند. مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از نانوذرات می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر شاخص‌های فیزیولوژیکی مانند محتوای کلروفیل، کارایی فتوسنتز که برای سلامت گیاه و عملکرد محصول حیاتی هستند، تأثیر بگذارد (Jian *et al.*, 2025). علاوه بر این، ترکیب نانوذرات با مواد آلی می‌تواند این اثرات را بیشتر افزایش دهد و باعث بهبود دسترسی مواد مغذی و مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی شود. این رویکرد با شیوه‌های کشاورزی پایدار که هدف آن بهینه‌سازی استفاده از منابع و در عین حال به حداقل رساندن ورودی‌های شیمیایی است، هم‌سو است (El-Wahab *et al.*, 2021). نانوذرات دارای ابعادی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند و نانوذرات، خواص و ویژگی‌های متفاوتی نسبت به فرم اولیه خود دارند و همین خواص آن‌ها بر عملکرد آن‌ها اثر مثبت دارد. با کمک علم فناوری نانو، می‌توان مواد مختلف را در مقیاس کوچک و اتمی دستکاری کرد (Zulfiqar *et al.*, 2025). در واقع نانوذرات عناصر غذایی، به‌علت داشتن قابلیت جذب بیشتر توسط گیاهان، باعث کاهش نیاز به استفاده از کودهای شیمیایی می‌شوند و کاربرد نانوذرات عناصر غذایی راهکاری در راستای افزایش امنیت غذایی و کشاورزی است(Verma, 2022). گزارش شده است نانوذرات با افزایش رشد و جذب عناصر ضروری در افزایش کارایی فتوسنتز، فعال‌سازی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم بیان ژن درگیر در فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی مؤثر است (سیدشریفی و همکاران، ۱۴۰۱). آهن، جزء عناصر ضروری و کم‌مصرف، دارای نقش مهم و حیاتی بر متابولیسم پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک است. آهن بر مکانیسم‌های تنفس و اکسیداسیون-احیا در گیاهان نقش مهمی دارد. عنصر روی یکی از عناصر کم‌مصرف می‌باشد که جهت رشد طبیعی و

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

تولیدمثل گیاهان زراعی لازم است و مشخص شده است (Kumar *et al.*, 2021) . عنصر روی در محافظت از کلروپلاست، واکنش‌های فتوشیمیایی و متعادل کردن رادیکال‌های آزاد از طریق سیستم‌های آنتی‌اکسیدانتی نقش مثبت دارد. همچنین مشخص شده است که عنصر روی از جمله عناصر کم‌مصرف ضروری جهت تغذیه گیاهان می‌باشد. این عنصر نقش مهمی در سنتز پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و مقاومت غشای سلولی در رادیکال‌های اکسیژن آزاد دارد و مشخص شده است که عنصر روی در افزایش بهبود کیفیت دانه گندم اثر مثبت دارد (Karunakaran *et al.*, 2024). از مؤثرترین روش‌های تغذیه گیاه جهت افزایش عملکرد گیاهان در راستای تحقق اهداف کشاورزی اکولوژیک کاربرد کودهای آلی می‌باشد (Karunakaran *et al.*, 2024). کود آلی هیومیک اسید می‌تواند برای تأمین مواد مغذی محصولات بر اساس هیومیک‌اسید، هیومات، اسید فولویک و اسید فولویک استخراج‌شده یا فعال‌شده استفاده شود. هیومیک‌اسید، دارای وزن مولکولی ۳۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ دالتون است و کاربرد این ترکیب آلی باعث تشکیل کمپلکس‌های پایدار و نامحلول شده که باعث ایجاد کمپلکس‌های محلول با عناصر میکرو می‌شود (Rezaei & Khanmirzaei, 2024). کود هیومیک‌اسید می‌تواند خواص فیزیکی خاک و توانایی خاک در تنظیم آب، کود و گرمای هوا را بهبود بخشد(Bayat *et al.*, 2021). کلوئید موجود در هیومیک‌اسید و کلسیم موجود در خاک برای تشکیل ژل‌های لخته‌دار ترکیب می‌شوند که می‌تواند به اثرات شل شدن خاک، افزایش نفوذپذیری هوا، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی آب و بهینه‌سازی ساختار خاک‌دانه‌ها دست یابد (Rezaei & Khanmirzaei, 2024). ساختار و خواصی مشابه با درشت‌مولکول طبیعی هیومیک‌اسید دارد که ماده آلی خاک را تشکیل می‌دهد. در خاک‌های شور-قلیایی استفاده می‌شود و می‌تواند نمک‌های محلول در خاک را جذب کند، از کاتیون‌های مضر جلوگیری کند و غلظت نمک خاک و pH خاک شور-قلیایی را کاهش دهد. در واقع هیومیک‌اسید دارای قابلیت کلات‌کنندگی عناصر غذایی مختلف از قبیل پتاسیم، سدیم، روی، آهن، منیزیم و کلسیم می‌باشد. همچنین هیومیک‌اسید در افزایش تقسیم سلولی و افزایش رشد گیاهان مؤثر است. هیومیک‌اسید باعث تحریک رشد قسمت هوایی و ریشه گیاه می‌گردد، همچنین منجر به بهبود جذب عناصر غذایی از قبیل نیتروژن، کلسیم، پتاسیم، فسفر و منیزیم توسط گیاهان می‌شود (Rezaei & Khanmirzaei, 2024). وجود برخی ترکیبات محرک رشد در گیاهان، مانند جلبک‌ها باعث شده است تا از عصاره این گیاهان، جهت تولید کودهایی که منجر به افزایش رشد و عملکرد گیاهان زراعی می‌شوند، استفاده گردد. محققان نشان داده‌اند کاربرد عصاره جلبک‌های دریایی، منجر به افزایش رشد گیاهان، تعداد برگ، تحریک رشد ریشه، تسریع زمان گل‌دهی، افزایش تشکیل میوه، تأخیر در پیری برگ و افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی مانند خشکی، شوری و درجه حرارت و افزایش کمیت و کیفیت میوه، افزایش قدرت جوانه‌زنی بذرها، به تأخیر انداختن پیری در میوه‌ها، افزایش عمر پس از برداشت محصولات کشاورزی، افزایش مقاومت گیاهان در مقابل تنش‌های زیستی و غیرزیستی

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

می‌شود (Battacharyya *et al.*, 2023). کود آلی ورمی‌کمپوست غنی از مواد مغذی است و حاوی هوموس با کیفیت بالا، هورمون‌های رشد گیاهی، آنزیم‌ها و موادی است که قادر به محافظت از محصولات در برابر آفات و بیماری‌ها هستند (Bashir *et al.*, 2020).

علاوه بر این، ورمی‌کمپوست دارای تخلخل، هوادهی، زهکشی و ظرفیت نگهداری آب بالایی است. علاوه بر افزایش در دسترس بودن نیتروژن، در دسترس بودن مواد مغذی گیاهیC ، P، K، کلسیم و منیزیم در قالب‌های کرم خاکی نیز یافت می‌شود. هورمون‌های رشد گیاهی یعنی سیتوکینین‌ها و اکسین‌ها در ضایعات آلی پردازش‌شده توسط کرم‌های خاکی یافت می‌شوند. آن‌ها همچنین متابولیت‌های خاصی مانند ویتامینB ، ویتامین D و مواد مشابه را در کمپوست آزاد می‌کنند(Mamnabi *et al.*, 2020). ترکیب مواد مغذی رایج در ورمی کمپوست به شرح زیر است: کربن آلی (۹/۵-۱۷/۹۸ درصد)، نیتروژن (۰/۵-۱/۵۰ درصد)، فسفر (۰/۱-۰/۳۰ درصد)، پتاسیم (۰/۱۵-۰/۵۶ درصد)، سدیم (۰/۰۶ – ۰/۳۰ درصد)، منیزیم و کلسیم (۲۲/۶۷ – ۴۷/۶۰ میلی‌اکی والان بر ۱۰۰ گرم خاک)، مس (۲-۹/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، آهن (۲-۹/۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، روی (۵/۷۰-۱۱/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، گوگرد (۱۲۸-۵۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. از این رو، ورمی‌کمپوست تبدیل بیولوژیکی ضایعات را به یک کود آلی ارزشمند ممکن می‌سازد (فتاحی قاضی و همکاران، ۱۴۰۲).

کود آلی بیوچار ماده غنی از کربن است که از مواد اولیه آلی تحت احتراق حرارتی خاص در شرایط بدون اکسیژن تولید می‌شود. بسیاری از ضایعات آلی را می‌توان به‌عنوان خوراک برای تولید بیوچار استفاده کرد، مانند ضایعات کشاورزی و زباله‌های جامد شهری. در طی فرآیند تولید بیوچار، پسماند گیاهان صنعتی، فضولات دامی، بقایای گیاهان زراعی، جنگلی و باغی به بیوچار تبدیل می‌گردد، بیوچار یک ماده غنی از کربن است (Karimi *et al.*, 2022). جذب مکانیسم اصلی بیوچار برای حذف فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی است. ظرفیت جذب بیوچار ارتباط مستقیمی با خواص فیزیکوشیمیایی آن مانند مساحت سطح، توزیع اندازه منافذ، گروه‌های عاملی و ظرفیت تبادل کاتیونی دارد، در حالی که خواص فیزیکوشیمیایی با شرایط آماده‌سازی متفاوت است. به‌طور کلی، بیوچار تولیدشده در دمای بالا دارای مساحت سطح و محتوای کربن بالاتری است که عمدتاً به دلیل افزایش حجم ریزمنافذ ناشی از حذف ترکیبات آلی فرار در دمای بالا است (Karimi *et al.*, 2022).با توجه به اهمیت مسئله در راستای کاهش آلودگی زیست‌محیطی در اثر کاربرد کودهای شیمیایی و افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف در دانه گیاهان، این تحقیق با هدف بررسی اثر کاربرد محلول‌پاشی نانوذرات روی و آهن و کاربرد کودهای آلی (بیوچار باگاس، ورمی‌کمپوست، هیومیک‌اسید و محلول‌پاشی با جلبک دریایی) انجام شد.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول شامل سطوح مختلف کودهای آلی در پنج سطح بود: ۱- شاهد (بدون استفاده از کود آلی)، ۲- کاربرد بیوچار باگاس (به میزان پنج تن/هکتار) ۳- کاربرد کود ورمی‌کمپوست (به میزان پنج تن/هکتار)، ۴- محلول‌پاشی هیومیک‌اسید (با غلظت دو گرم/لیتر در مراحل زادوکس ۳۱ و ۶۵)، ۵- محلول‌پاشی با عصاره جلبک دریایی (با غلظت ۱ لیتر/هکتار در مراحل زادوکس ۳۱ و ۶۵). فاکتور دوم شامل استفاده از نانوذرات روی و آهن در چهار سطح بود: ۱- شاهد (عدم استفاده از نانوذرات)، ۲- نانوذرات روی با غلظت دو در هزار، ۳- نانوذرات آهن با غلظت دو در هزار، ۴- نانوذرات آهن و روی با غلظت دو در هزار. آمار هواشناسی در محدوده زمانی انجام آزمایش به‌صورت میانگین ماهانه در جدول ۱ نشان داده شده است (Bashir *et al.*, 2020; فتاحی قاضی و همکاران، ۱۴۰۲).

جدول ۱: میانگین ماهانه شرایط آب و هوایی در طول فصل رشد در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱

ماه	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد
دمای حداکثر (درجه سانتی‌گراد)	۳۲/۳	۲۶/۵	۲۵	۲۶	۲۹/۷	۳۶/۱	۴۶/۹	۴۹/۹
دمای حداقل (درجه سانتی‌گراد)	۱۱/۱	۵/۶	۲/۹	۶/۱	۷/۱	۱۰/۷	۱۹/۴	۲۵/۸
میانگین دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)	۱۹/۴	۱۵/۳	۱۴/۲	۱۵/۵	۱۸/۳	۲۴/۳	۳۳/۵	۳۹
بارندگی (میلی‌متر)	۱۵/۹	۲۰/۵	۴۵/۱	۱۳/۸	۱۷/۲	۲۰	۲	۰

نتایج تجزیه آزمون خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

عمق خاک (سانتی متر)	بافت خاک	پتاسیم قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم)	فسفر قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم)	روی قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم)	اسیدیته	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	نیتروژن (درصد)	مواد آلی (درصد)
۰-۳۰	لومی شنی	۱۳۰/۸	۱۱/۳	۱/۲	۷/۴۵	۳/۲	۰/۰۹۸	۰/۴۳

نتایج آنالیز شیمیایی کودهای آلی مورد استفاده در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: نتایج آنالیز شیمیایی ورمی کمپوست و باگاس نیشکر

ورمی کمپوست								
نیتروژن کل (درصد)	پتاسیم محلول (درصد)	فسفرقابل استفاده (درصد)	آهن‌محلول (میلی گرم بر کیلوگرم)	روی‌محلول (میلی گرم بر کیلوگرم)	بورمحلول (میلی گرم بر کیلوگرم)	منیزیم‌محلول (درصد)	ماده آلی(درصد)	*EC* (دسی زیمنس بر متر)
۱/۷	۰/۴	۰/۴	۴۵۰۰	۱۲۲	۰/۴	۰/۹	۴۰	۲/۵
بیوچار باگاس نیشکر								
۳	۳	۱	۲۲۰	۲۰۰	۱۰۰	۱/۲	۷۵	۱/۲

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

عملیات کوددهی بر اساس نتایج آزمون خاک (جدول ۲) انجام شد(Hosseini *et al.*, 2022). بر این اساس، هنگام آماده‌سازی بستر کاشت، سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۲۰ کیلوگرم/هکتار و سولفات پتاسیم به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم/هکتار به خاک اضافه شد. رقم مورد استفاده در این آزمایش چمران ۲ بود که در تاریخ ۱۶ آبان ۱۴۰۲ به‌صورت دستی کشت شد. خصوصیات رقم چمران ۲ در جدول ۴ ارائه شده است. بذور پس از ضدعفونی با قارچ‌کش با فواصل ردیف ۱۵ سانتی‌متر و فاصله بوته روی ردیف ۶/۱ سانتی‌متر (تراکم ۴۰۰ بوته/متر مربع) در کرت‌هایی به ابعاد ۳ در ۲ متر کشت شدند. مساحت هر کرت ۶ متر مربع بود. بذور روی خطوط کاشت در عمق ۱ تا ۲ سانتی‌متر کشت شدند. هر کرت دارای ۱۲ خط کاشت به فاصله ۱۵ سانتی‌متر بود. برای آبیاری، جوی‌هایی به فاصله ۲ متر بین تکرارها ایجاد شد و آبیاری به‌صورت سیفونی و کرتی انجام شد. در طول دوره آزمایش، هیچ آفت یا بیماری خاصی مشاهده نشد و با علف‌های هرز مبارزه شد. برداشت محصول در تاریخ ۱۴۰۲/۲/۱۰ انجام شد.

تیمارهای ورمی‌کمپوست و بیوچار باگاس نیشکر به مقدار ۵ تن/هکتار قبل از کاشت گندم در کرت‌های مورد نظر توزیع و به خاک اضافه شدند (Bashir *et al.*, 2020; Karimi *et al.*, 2022; Oladele & Adetunji, 2021).

محلول‌پاشی هیومیک‌اسید و عصاره جلبک دریایی در مراحل زادوکس ۳۱ (اولین گره قابل مشاهده) و ۶۵ (اوج گل‌دهی) انجام شد (Rezaei & Khanmirzaei, 2024; Battacharyya *et al.*, 2023). محلول‌پاشی نانوذرات روی و آهن نیز در این مراحل انجام شد(عباسی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Kaium Chowdhury *et al.*, 2021).

هیومیک‌اسید، عصاره جلبک دریایی، و نانوذرات روی و آهن از شرکت بایو (نمایندگی اهواز) تهیه شدند.

صفات مورد اندازه‌گیری

اندازه‌گیری شاخص سطح برگ

برای تعیین شاخص سطح برگ در مرحله زادوکس ۶۵ (اوج گل‌دهی)، ۲۰ سانتی‌متر از خطوط کاشت به‌صورت تصادفی برداشت شد. پس از جداسازی برگ‌ها، سطح برگ با دستگاه سطح‌سنج برگ (مدل LI-3000A, USA) اندازه‌گیری شد. شاخص سطح برگ از تقسیم سطح برگ بر سطح زمین تحت اشغال بوته‌ها محاسبه شد.

اندازه‌گیری عملکرد دانه

برای اندازه‌گیری اجزای عملکرد، در هر کرت (۶ متر مربع)، سه واحد نمونه‌گیری یک متر در یک متر به‌صورت تصادفی انتخاب شد. تمام بوته‌های گندم در این واحدها برداشت شدند. اجزای عملکرد به شرح زیر اندازه‌گیری شدند:

تعداد سنبله در متر مربع، تعداد سنبله‌های بارور در هر واحد نمونه‌گیری شمارش شد. تعداد دانه در سنبله، از هر واحد نمونه‌گیری، ۱۰ سنبله به‌صورت تصادفی انتخاب و تعداد دانه‌های هر سنبله شمارش شد. میانگین تعداد دانه در سنبله

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

برای هر کرت محاسبه شد. وزن هزار دانه، از دانه‌های برداشت‌شده در هر واحد نمونه‌گیری، ۱۰۰۰ دانه به‌صورت تصادفی جدا و با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شد. عملکرد دانه، دانه‌های برداشت‌شده در هر واحد نمونه‌گیری کوبیده، جدا، و با ترازوی دیجیتال وزن شدند. عملکرد دانه با استفاده از تناسب به‌صورت کیلوگرم/هکتار گزارش شد.

اندازه گیری محتوی آهن و روی در داخل دانه گندم

غلظت آهن و روی دانه‌ها به روش سوزاندن خشک، هضم، و عصاره‌گیری اندازه‌گیری شد (Adrees *et al.*, 2020). برای این منظور، ۰/۲ گرم نمونه خشک دانه گندم توزین و در کروزه سیلیسی قرار گرفت. نمونه‌ها در کوره به‌تدریج طی ۲ ساعت به دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد رسانده و به مدت ۸ ساعت در این دما نگه داشته شدند. سپس، کروزه‌ها از کوره خارج و ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ مولار به آن‌ها اضافه شد. محتویات کروزه در حمام آبی تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند، سپس از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۰ به بالن ژوژه ۱۰۰ میلی‌لیتری صاف و با آب مقطر به حجم رسانده شدند. غلظت آهن و روی با دستگاه جذب اتمی (مدل LI-3000A, USA) اندازه‌گیری شد.

کلروفیل a، b در مرحله گلدهی

محتوای کلروفیل a و b در مرحله زادوکس ۶۵ با روش اصلاح‌شده لیختن تالر و بوشنام اندازه‌گیری شد(Lichtenthaler & Buschmann, 2021). برای این منظور، پنج گرم از بافت تازه برگ توزین و به قطعات کوچک خرد شد، سپس با استون ۸۰ درصد در هاون چینی له شد و حجم آن با استون به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. محلول حاصل به‌مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. جذب نوری عصاره برگ با دستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV-160)در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد. غلظت کلروفیل a و b از طریق رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شد(Lichtenthaler & Buschmann, 2021):

رابطه ۱: $\text{Chlorophyll a} = (19.3 \times A663 - 0.86 \times A645)\ V/100W$

رابطه۲: $\text{Chlorophyll b} = (19.3 \times A645 - 3.6 \times A663)\ V/100W$

که در آن:

V = حجم محلول صاف‌شده (محلول فوقانی حاصل از سانتریفیوژ)، A = جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر، W = وزن تر نمونه (گرم).

تجزیه‌ی آماری

تجزیه آماری با نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴۹ انجام شد. نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای Word و Excel ترسیم شدند. مقایسه میانگین صفات با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

نتایج و بحث

عملکرد دانه

بررسی نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی حاکی از تأثیرپذیری صفت عملکرد دانه از اثرات اصلی فاکتورهای کود آلی و نانوذرات در سطح یک درصد بود (جدول ۴). براساس نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی سطوح کود آلی، میانگین عملکرد دانه در تیمار شاهد برابر با ۳۳۳۶ کیلوگرم در هکتار بود که با تیمار محلول‌پاشی با عصاره جلبک دریایی (۳۳۸۲ کیلوگرم در هکتار) اختلاف آماری معنی‌داری نداشتند ولی نسبت به سایر سطوح تیماری به طور معنی‌داری از میانگین پایین‌تری برخوردار بودند. در مقابل تیمارهای کاربرد کود ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید (به ترتیب ۴۵۶۰ و ۴۶۳۷ کیلوگرم در هکتار) دارای بیشترین عملکرد دانه بودند. بر این اساس نتایج نشان داد که، تیمارهای کاربرد بیوچار باگاس، ورمی‌کمپوست وهیومیک‌اسید نسبت به تیمار عدم کاربرد کود آلی، به ترتیب ۲۱، ۳۵ و ۳۷ درصد عملکرد دانه را افزایش دادند (جدول ۲). مقایسه میانگین سطوح کاربرد نانوذرات نیز نشان داد که میانگین عملکرد دانه در تیمار شاهد برابر با ۳۶۳۰ کیلوگرم در هکتار بود که به طور معنی‌داری پایین‌تر از سایر سطوح تیماری بود (جدول ۵). در مقابل عملکرد دانه تحت سطوح کاربرد نانوذرات روی، نانوذرات آهن و نانوذرات روی+آهن به ترتیب با ۱۱، ۱۲ و ۱۸ درصد به مقادیر ۴۰۳۸، ۴۰۵۶ و ۴۲۸۹ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت و از این نظر بین تیمارهای کاربرد نانوذرات روی و آهن اختلاف آماری معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۵). نتایج این پژوهش حکایت از آن داشت که هم‌راستا با افزایش سطوح کودهای آلی، عملکرد دانه نیز افزایش یافت. رئیسی ساداتی و همکاران (۱۳۹۹) در نتایج خود بیان کردند محلول‌پاشی نانواکسید روی در طول فصل رشد موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد که با پژوهش حاضر مطابقت دارد. کودهای آلی نه تنها خود منبعی غنی از عناصر پرمصرف و کم‌مصرف می‌باشند، بلکه با بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک مانند کاهش فشردگی و افزایش تخلخل خاک، تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها، افزایش سرعت نفوذ و ظرفیت نگهداری آب در خاک، افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک و همچنین بهبود جذب سایر عناصر غذایی توسط گیاه موجب افزایش رشد و عملکرد محصول می‌گردند. افزایش عملکرد دانه با کاربرد ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید به دلیل وجود مقادیر زیاد عناصر غذایی و معدنی شدن تدریجی آن‌ها از شکل آلی است که سبب در دسترس بودن عناصر غذایی در هنگام نیاز گیاه می‌شود. محلول‌پاشی روی سبب افزایش شاخص سطح برگ، جذب نور، غلظت کلروفیل و توان فتوسنتزی و نهایتاً افزایش عملکرد دانه شد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۸). در واقع تحقیقات نشان داده است که عنصر روی به دلیل نقش مهمی که در افزایش تولید و تنظیم‌کننده‌های رشد از جمله ایندول استیک اسید، کربوهیدرات‌ها و متابولیسم نیتروژن دارد، می‌تواند سبب افزایش تولید مواد فتوسنتزی و نهایتاً افزایش قدرت منبع و مخزن فیزیولوژیک شود (Damary *et al.*, 2017). همچنین

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

عنصر آهن نیز نقش مهمی در تشکیل کلروفیل، سنتز تیلاکوئید، عملکرد آنزیم‌های تنفسی و انتقال انرژی را در گیاهان بر عهده دارد و از این طریق می‌تواند بر خصوصیات رشدی و عملکردی گیاه تأثیر گذارد.

شاخص سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی نشان داد که اثرات اصلی سطوح مختلف کود آلی و محلول‌پاشی نانوذرات روی و آهن بر شاخص سطح برگ در سطح احتمال یک درصد از نظر آماری معنی‌دار هستند (جدول ۴). این یافته‌ها حاکی از تأثیر قابل‌توجه این عوامل در ارتقای رشد رویشی و گسترش سطح فتوسنتزی گیاه گندم است. بررسی مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح کود آلی نشان داد که میانگین شاخص سطح برگ در تیمارهای کاربرد ورمی‌کمپوست (۴/۹۸) و هیومیک اسید (۵/۱۳) با یکدیگر اختلاف آماری معنی‌داری نداشتند و نسبت به سایر سطوح تیماری، برتری آماری معنی‌داری را به نمایش گذاشتند (جدول ۲). این برتری می‌تواند به محتوای بالای مواد آلی، بهبود دسترسی به نیتروژن، و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک توسط این کودها نسبت داده شود. در مقابل، میانگین شاخص سطح برگ در تیمارهای بیوچار (۴/۶۳)، عصاره جلبک دریایی (۴/۴۳) ، و شاهد (۴/۳۸) از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند و اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نشان ندادند، که ممکن است به محدودیت تأمین نیتروژن و ریزمغذی‌ها در این تیمارها بازگردد.

تحلیل اثرات محلول‌پاشی نانوذرات نشان داد که بالاترین میانگین شاخص سطح برگ مربوط به تیمار محلول‌پاشی نانوذرات روی و آهن (۵/۰۴) بود، که با سایر سطوح تیماری اختلاف آماری معنی‌داری داشت. در مقابل، کمترین میانگین شاخص سطح برگ به تیمار شاهد (۴/۳۲) اختصاص داشت که با سایر سطوح نیز تفاوت آماری معنی‌داری نشان داد (جدول ۵). این نتایج با مطالعات رستمی و همکاران (۱۳۹۷) هم‌راستا است، که گزارش کردند کاربرد نانوذرات روی و آهن در شرایط تنش و غیرتنش، شاخص‌های رشد از جمله سطح برگ را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش می‌دهد. نقش کلیدی آهن در واکنش‌های اکسیداسیون-احیا و فتوسنتز، به‌ویژه از طریق تسهیل سنتز کلروفیل، می‌تواند دلیل اصلی افزایش رشد اندام‌های هوایی و شاخص سطح برگ باشد. نانوذرات، با سطح تماس بالا و قابلیت جذب بهتر، دسترسی گیاه به این عناصر را بهبود بخشیده و تولید بیوماس را تقویت می‌کنند (رستمی و همکاران، ۱۳۹۷).

کاهش محتوای نیتروژن گیاه در طی فصل رشد به تخریب زودهنگام بافت‌های برگ و کاهش دوام سطح برگ منجر می‌شود. اسید هیومیک با افزایش جذب نیتروژن و کلات‌سازی ریزمغذی‌ها، دوام و گسترش سطح برگ را بهبود می‌بخشد (Talaat & Abdel-Salam, 2024). این مکانیسم با تحریک سیستم آنتی‌اکسیدانی و تنظیم اسمزی توسط ورمی‌کمپوست، نقش مهمی در افزایش تحمل گندم به تنش خشکی ایفا می‌کند. همچنین، کاربرد ورمی‌کمپوست همراه با میکروارگانیسم‌های مؤثر، فتوسنتز و رشد رویشی را بهبود می‌بخشد، که با یافته‌های برخی محققان همخوانی دارد (Bayat

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

et al., 2021). تأخیر در تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی با استفاده از ورمی‌کمپوست می‌تواند به بهبود راندمان مصرف آب و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مرتبط باشد، که از آسیب به ساختارهای سلولی و پروتئین‌ها با کاهش تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر جلوگیری می‌کند (Mamnabi *et al.*, 2020). بنابراین، کاربرد ترکیبی کود آلی و نانوذرات می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر برای ارتقای رشد رویشی، فتوسنتز، و تولید بیوماس در گندم در نظر گرفته شود.

جدول ۴: نتایج تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گندم تحت تأثیر سطوح مختلف کود آلی و کاربرد نانوذرات

میانگین مربعات

منبع تغییر	عملکرد دانه	شاخص سطح برگ	کلروفیل a اندام هوایی	کلروفیل b اندام هوایی	محتوی روی دانه	محتوی آهن دانه
بلوک	۴۷۳۱۴۲	۴/۷۰	۰/۲۵	۰/۰۲۲	۲۹۶	۱۰۰۹
کرت اصلی (سطوح کود آلی)	۴۶۵۷۱۴۲**	۱/۳۲**	۰/۰۲۷**	۰/۰۲۸**	۱۵۳**	۳۲۴**
کرت فرعی (نانوذرات)	۱۱۲۵۰۰۵**	۱/۳۵**	۰/۰۴۵**	۰/۰۵۰**	۲۱۷**	۴۹۱**
کود آلی × نانوذرات	۱۶۹۶۹ns	۰/۰۱۵ns	۰/۰۰۰۶ ns	۰/۰۱۴**	۲/۵۳ ns	۳/۶۷ ns
خطا	۲۲۳۶۳۷	۰/۰۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۴	۵/۸۶	۲۰/۷۳
ضریب تغییرات(%)	۱۱/۸۱	۶/۴۴	۵/۳۲	۲/۷۱	۸/۱۳	۵/۴۵

**و* : به ترتیب نشانگر معنی‌دار بودن در سطح احتمال یک و پنج درصد و ns :عدم وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۵: مقایسه میانگین اثرات اصلی کود آلی و کاربرد نانوذرات بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گندم

سطوح تیمار	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	شاخص سطح برگ	کلروفیل a (میلی گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل b (میلی گرم بر گرم وزن تر)	محتوی روی دانه (میلی گرم بر کیلوگرم)	محتوی آهن دانه (میلی گرم بر کیلوگرم)
سطوح کود آلی						
شاهد عدم کاربرد)	۳۳۳۶/۳c	٤/۳۸b	۱/۲٦c	۰/۷۲d	۲٦/٥b	۷۷
بیوچار باگاس	۴۱۰۰b	٤/٦۳b	۱/۲۹c	۰/۸۱b	۲۸/٥۲b	۸۳b
ورمی کمپوست	۴۵۶۰/۵a	٤/۹۸a	۱/۳٥a	۰/۸٦a	۳۲/٥۲a	۸۷/٥a
هیومیک اسید	۴۵۶۰/۵a	٥/۱۳a	۱/۳۸a	۰/۷۸c	۳٤/٥a	۸۹/۷٥a
عصاره جلبک دریایی	۳۳۸۲/۵c	٤/٤۳b	۱/۳c	۰/۷۸c	۲٦/۷٦b	۸۰/۲٥b
سطوح نانوذرات						
شاهد (عدم کاربرد)	۳۶۳۰b	٤/۳۲c	۱/۲٤b	۰/۷٥c	۲٥/۰۱c	۷٦/۸c
نانوذرات روی	۴۰۳۸a	٤/٦٦b	۱/۲۹b	۰/۷۳c	۳۲/٤۱a	۸۰/۸b
نانوذرات آهن	۴۰۵۶a	٤/۸b	۱/۳٤a	۰/۸۳b	۲۸/٤b	۸۷/۲a
نانوذرات روی + آهن	۴۲۸۹a	٥/۰٤a	۱/۳۷a	۰/۸٥a	۳۳/۲۱a	۸۹/۲a

میانگین‌های دارای یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

محتوی کلروفیل a و b

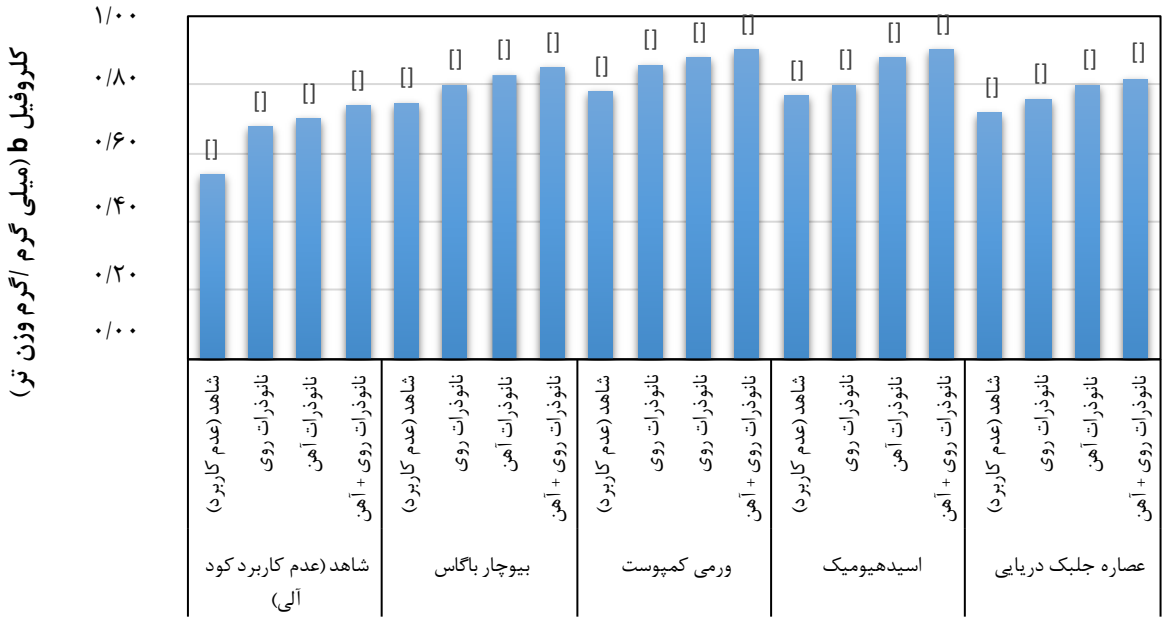
نتایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی نشان داد که محتوی کلروفیل a تنها تحت تأثیر اثرات اصلی فاکتورهای آزمایشی در سطح یک درصد قرار گرفت. در مقابل محتوی کلروفیل b تحت تأثیر اثرات اصلی و برهمکنش فاکتورهای آزمایشی در سطح یک درصد قرار گرفت (جدول ۴). بررسی نتایج مقایسه میانگین صفات آزمایشی نشان داد که تحت سطوح کود آلی،

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

میانگین محتوی کلروفیل a در تیمارهای کاربرد ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید به ترتیب برابر با ۱/۳۵ و ۱/۳۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بود که از این نظر با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند ولی نسبت به سایر سطوح تیماری برتری معنی‌داری داشتند. در مقابل بین سایر سطوح کاربرد عصاره جلبک دریایی (۱/۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، بیوچار (۱/۲۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و شاهد (۱/۲۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۵). در بین سطوح محلول‌پاشی نیز مشاهده شد که کاربرد تیمار آهن + روی (۱/۳۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و محلول‌پاشی آهن (۱/۳۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند و نسبت به سایر سطوح تیماری برتری آماری معنی‌داری داشتند ولی بین تیمارهای محلول‌پاشی روی (۱/۲۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و شاهد (۱/۲۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) اختلاف آماری معنی‌داری وجود نداشت و میانگین پایین‌تری داشتند. بررسی نتایج برهمکنش فاکتورهای آزمایشی از نظر صفت محتوی کلروفیل b نیز نشان داد که میانگین محتوی این صفت در تیمارهای محلول‌پاشی روی + آهن و محلول‌پاشی آهن تحت شرایط کاربرد هیومیک‌اسید (به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۹۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و محلول‌پاشی روی + آهن و محلول‌پاشی آهن تحت شرایط کاربرد ورمی‌کمپوست (به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۹۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) با یکدیگر اختلاف آماری معنی‌داری نداشتند و نسبت به سایر سطوح تیماری برتری آماری معنی‌داری داشتند. در مقابل کمترین میانگین این صفت (۰/۵۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مربوط به تیمار شاهد (عدم کاربرد کود آلی و محلول‌پاشی نانوذرات) بود (شکل ۱). هم راستا با این نتایج، گزارش شده است که ترکیبات آلی با کاهش pH خاک و بهبود پارامترهای رشد، توانایی خاک را برای حفظ مواد مغذی افزایش می‌دهند و از این طریق موجب بهبودی تولید رنگدانه‌های فتوسنتزی و آنتی‌اکسیدان‌ها، تحریک فعالیت میکروبی مفید و بهبود بهره‌وری ریشه می‌شوند (Bayat *et al*., 2021). از طرفی دیگر، برخی از پژوهشگران گزارش دادند که هیومیک‌اسید از طریق کلات کنندگی عناصر غذایی و قرار دادن آب و مواد غذایی بیشتر در اختیار گیاه سبب افزایش ساخت رنگیزه‌ها در گیاه می‌شود. همچنین هیومیک‌اسید سبب افزایش جذب آهن، روی، مس و منگنز می‌شود که جذب آهن و منگنز می‌تواند دلیل مناسبی بر افزایش غلظت کلروفیل برگ باشد. فتاحی قاضی و همکاران (۱۴۰۲) نیز گزارش دادند که کاربرد ورمی‌کمپوست مقدار کلروفیل a را نسبت به تیمار شاهد ۲۹ درصد افزایش داد. در واقع استفاده از تیمار ورمی‌کمپوست با عرضه نیتروژن اضافی برای گیاه تأثیر مثبتی بر میزان کلروفیل به‌ویژه در شرایط کمبود عناصر غذایی دارد (Salehi *et al*., 2016). گزارش شده است که تأخیر در تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی با کاربرد ورمی‌کمپوست می‌تواند با بهبود راندمان مصرف آب و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان مرتبط باشد که منجر به جلوگیری از آسیب به ساختارهای سلولی و پروتئین‌ها با کاهش تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر می‌شود (Mamnabi *et al*., 2020). گزارش شده است که مواد هیومیک‌اسید با کاهش pH

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

خاک و بهبود پارامترهای رشد، توانایی خاک را برای حفظ مواد مغذی افزایش می‌دهند و از این طریق موجب بهبودی تولید رنگدانه‌های فتوسنتزی و آنتی‌اکسیدان‌ها، تحریک فعالیت میکروبی مفید و بهبود بهره‌وری ریشه می‌شوند (Bayat *et al.*, 2021).



شکل۱: مقایسه میانگین محتوای کلروفیل b تحت تأثیر برهمکنش سطوح کاربرد کود آلی و نانوذرات.

ستون‌های دارای یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

محتوی روی و آهن دانه

تایج تجزیه واریانس صفات آزمایشی نشان داد که محتوی روی و آهن دانه تحت تأثیر اثرات اصلی فاکتورهای آزمایشی، شامل سطوح مختلف کود آلی و محلول‌پاشی نانوذرات روی و آهن، در سطح احتمال یک درصد از نظر آماری معنی‌دار است (جدول ۴). این یافته‌ها بیانگر نقش اساسی این عوامل در بهبود جذب و انتقال ریزمغذی‌ها به دانه گندم است.

محتوی روی دانه

بررسی مقایسه میانگین صفت محتوی روی دانه نشان داد که در میان سطوح کود آلی، بالاترین میانگین این صفت به تیمارهای ورمی‌کمپوست (۳۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و اسید هیومیک (۳۴/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) اختصاص داشت، که از نظر آماری با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند و نسبت به سایر سطوح تیماری برتری معنی‌داری را نشان دادند (جدول ۵). این برتری می‌تواند به توانایی این کودها در افزایش حلالیت روی از طریق خاصیت کلات‌کنندگی مواد آلی و تحریک فعالیت میکروبی خاک مرتبط باشد. در مقابل، میانگین محتوی روی دانه در تیمارهای بیوچار باگاس (۲۸/۵)

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

میلی‌گرم بر کیلوگرم)، عصاره جلبک دریایی (۲۶/۸) میلی‌گرم بر کیلوگرم)، و شاهد (۵/۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند و اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نشان ندادند. بررسی سطوح محلول‌پاشی نانوذرات نیز حاکی از آن بود که تیمارهای نانوذرات روی (۳۲/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نانوذرات روی + آهن (۳۲/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بالاترین میانگین محتوی روی دانه را داشتند و از نظر آماری با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند، در حالی که کمترین میانگین به تیمار شاهد (۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) اختصاص داشت (جدول ۵).

محتوی آهن دانه

تحلیل مقایسه میانگین محتوی آهن دانه تحت سطوح کود آلی نشان داد که تیمارهای اسید هیومیک (۸۷/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ورمی‌کمپوست (۸۹/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بالاترین میانگین را داشتند و از نظر آماری با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند، در حالی که نسبت به سایر سطوح برتری معنی‌داری را نشان دادند (جدول ۵). کمترین میانگین این صفت به تیمار شاهد (۷۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) اختصاص داشت، که با سایر سطوح اختلاف آماری معنی‌داری نشان داد. در بررسی سطوح محلول‌پاشی نانوذرات، تیمارهای نانوذرات روی + آهن (۸۹/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نانوذرات آهن (۸۷/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بالاترین میانگین محتوی آهن دانه را داشتند و از نظر آماری با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند، در حالی که کمترین میانگین به تیمار شاهد (۷۶/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) تعلق داشت (جدول ۵) .افزایش معنی‌دار محتوی روی و آهن دانه در تیمارهای ورمی‌کمپوست و اسید هیومیک می‌تواند به خاصیت کلات‌کنندگی مواد آلی و بهبود دسترسی بیولوژیکی این ریزمغذی‌ها در خاک نسبت داده شود. اسید هیومیک با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با یون‌های فلزی مانند روی و آهن، حلالیت آن‌ها را افزایش داده و جذب ریشه‌ای را تسهیل می‌کند (Dimkpa *et al.*, 2017).این مکانیسم با تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک، که به آزادسازی ریزمغذی‌ها از منابع غیرقابل دسترس کمک می‌کنند، تقویت می‌شود. یافته‌های حاضر با نتایج برخی محققینمطابقت داشت، که نشان داد کاربرد ورمی‌کمپوست همراه با میکروارگانیسم‌های مؤثر، جذب ریزمغذی‌ها از جمله روی و آهن را در گندم تحت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد(Talaat & Abdel-Salam, 2024). این مطالعه همچنین گزارش کرده که ورمی‌کمپوست با تنظیم سیستم آنتی‌اکسیدانی و اسمزی، انتقال این عناصر به دانه را بهبود می‌بخشد.

در مورد محلول‌پاشی نانوذرات، افزایش محتوی روی و آهن دانه در تیمارهای نانوذرات روی و نانوذرات روی + آهن می‌تواند به اندازه کوچک‌تر ذرات، سطح تماس بالاتر، و قابلیت نفوذ بهتر آن‌ها نسبت به فرم‌های سنتی نسبت داده شود .(Raliya *et al.*, 2015)این یافته‌ها با گزارش‌هایبرخی محققان که نشان دادند نانوذرات فلزی با افزایش انتقال ریزمغذی‌ها به اندام‌های زایشی، غنی‌سازی دانه را در گیاهان زراعی بهبود می‌بخشند، مطابقت دارد(Servin *et al.*,

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

2015). کاهش محتوای این عناصر در تیمار شاهد به محدودیت دسترسی طبیعی خاک به روی و آهن، به‌ویژه در شرایط تنش، اشاره دارد، که با یافته‌های برخی پژوهشگران سازگاراست(Hafez *et al.*,2020). این مطالعه نشان داد که در غیاب مکمل‌های آلی یا نانوذرات، جذب ریزمغذی‌ها در گندم تحت تنش خشکی به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد .همچنین، کاهش محتوای نیتروژن در خاک می‌تواند با محدود کردن سنتز پروتئین‌های حامل ریزمغذی‌ها، جذب و انتقال روی و آهن به دانه را مختل کند. اسید هیومیک با افزایش دسترسی نیتروژن و تشکیل کمپلکس با این عناصر، این محدودیت را جبران می‌کند (Talaat & Abdel-Salam, 2024). این مکانیسم با بهبود ساختار خاک و افزایش فعالیت میکروبی، به غنی‌سازی دانه کمک می‌کند، که با نتایج پشتیبانی می‌شود(Bayat *et al.*, 2017). بنابراین، کاربرد ترکیبی کود آلی و نانوذرات می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر برای افزایش کیفیت تغذیه‌ای دانه گندم در شرایط تنش پیشنهاد شود.

نتیجه‌گیری کلی

به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیبات کودهای آلی به طور معنی‌داری عملکرد را نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند که البته میزان این تغییر تحت تیمار کاربرد عصاره جلبک دریایی معنی‌دار نبود. کاربرد نانوذرات ترکیبی آهن + روی توانست نسبت به تیمار شاهد و کاربرد نانوذرات به تنهایی عملکرد گندم را بیشتر افزایش دهند. به نظر می‌رسد مصرف کودهای آلی ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید در تلفیق با نانوذرات آهن + روی از طریق تأثیر بر توانایی جذب و حفظ رطوبت و عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف بر خصوصیات فیزیولوژیک گندم تأثیر گذاشته و در نهایت موجب بهبود عملکرد دانه شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از کودهای آلی و نانوذرات به‌طور معناداری موجب بهبود عملکرد دانه، شاخص سطح برگ و محتوای کلروفیل گیاه شد. ورمی‌کمپوست و هیومیک‌اسید با تأثیر مثبت بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش قابلیت نگه‌داشت آب و بهبود جذب عناصر غذایی، رشد رویشی و عملکرد نهایی گیاه را ارتقا دادند. محلول‌پاشی نانوذرات آهن و روی، به‌ویژه به‌صورت ترکیبی، موجب افزایش شاخص‌های فتوسنتزی، بهبود متابولیسم نیتروژن و افزایش کارایی فیزیولوژیکی گیاه گردید .در مجموع می‌توان بیان کرد در شرایط آب و هوایی مشابه شهرستان حمیدیه، کاربرد پنج تن در هکتار ورمی‌کمپوست یا کاربرد هیومیک‌اسید و کاربرد تلفیقی نانوذرات روی + آهن، بیشترین تأثیر مثبت را بر عملکرد دانه گندم داشتند. با توجه به نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌گردد: نقش کودهای آلی بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک و متعاقباً تأثیر این عوامل بر رشد گیاه بررسی شود. تأثیر کاربرد نانوذرات روی و آهن در مراحل مختلف رشدی گیاه به منظور یافتن بهترین زمان کاربرد این ترکیبات بررسی شود.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهش و فنآوری دانشگاه شهید چمران اهواز جهت تأمین هزینه این پـژوهش کـه قسـمتی از قرارداد پژوهانه می‌باشد سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

عباسی، ن.، چراغی، ج.، و حاجی‌نیا، س. (۱۴۰۱). تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات روی و آهن بر صفات فیزیولوژیکی و عملکرد دانه گندم. مجله علوم زراعی ایران، ۲۳(۲)، ۸۵-۱۰۴. https://sid.ir/paper/367626/fa

رئیسی ساداتی، س. ی.، جهانبخش گده‌کهریز، س.، عبادی، ع.، و صدقی، م. (۱۳۹۹). اثر محلول‌پاشی نانواکسید روی بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک گندم تحت تنش خشکی. مجله علمی فیزیولوژی گیاهان زراعی، ۱۲(۴۶)، ۴۵-۶۴.

سیدشریفی، ر.، سیف امیری، ص.، و نریمانی، ح. (۱۴۰۱). اثر محلول‌پاشی نانوذرات آهن و سیلیکون بر عملکرد، مولفه‌های پر شدن دانه و برخی صفات فیزیولوژیک گلرنگ در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی. مجله علمی فیزیولوژی گیاهان زراعی، ۱۴(۵۵)، ۷۵-۹۱.

فتاحی قاضی، س.، میرمحمودی، ت.، و حمزه، ح. (۱۴۰۲). اثر ورمی‌کمپوست، هیومیک اسید و کود دامی بر عملکرد، خصوصیات بیوشیمیایی و فعالیت‌های آنزیمی در چغندر قند (Beta vulgaris L.) تحت شرایط کم‌آبی. علوم گیاهان زراعی ایران، ۵۴(۴)، ۶۱-۷۸. https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.356803.654991

Adrees, M., Khan, Z. S., Ali, S., Hafeez, M., Khalid, S., ur Rehman, M. Z., ... & Rizwan, M. (2020). Simultaneous mitigation of cadmium and drought stress in wheat by soil application of iron nanoparticles. *Chemosphere*, *238*, 124681. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124681

Battacharyya, D., Babgohari, M. Z., Rathor, P., & Prithiviraj, B. (2023). Seaweed-based biostimulants in agriculture: Current trends and future prospects. *Algal Research*, *68*, 102876. https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102876

Bashir, A., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Rehman, M. Z. U., & Qayyum, M. F. (2020). Effect of composted organic amendments and zinc oxide nanoparticles on growth and cadmium accumulation by wheat; a life cycle study. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 23926–23936. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08751-2

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

Bayat, H., Shafe, F., Aminifard, M. H., & Daghighi, S. (2021). Comparative effects of humic and fulvic acids as biostimulants on growth, antioxidant activity and nutrient content of yarrow (Achillea millefolium L.). Scientia Horticulturae, 279(1), 109-123. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109123

Dimkpa, C. O., et al. (2017). Humic acid enhances the bioavailability of iron and zinc in maize under calcareous soil conditions. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 180(4), 472-479 https://doi.org/10.1002/jsfa.8185

El-Wahab, M. M., Gabriel, M. Y., Raslan, M., & Farghali, A. A. (2021). Effect of nanoparticles of feldspar and hematite using different levels of chemical potassium fertilizer on yield and protein production of wheat. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1046*(1), 012029. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1046/1/012029

Hafez, E. M., et al. (2020). Soil application of wheat straw vermicompost enhances morpho-physiological attributes and antioxidant defense in wheat under drought stress. Frontiers in Plant Science, 11, 678. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00678

Hosseini, F., Mosaddeghi, M. R., & Dexter, A. R. (2022). Soil chemical and physical properties under different management practices in wheat fields. Soil and Tillage Research, 214, 105176. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105176

Jian, X., Zhang, L., Wang, S., & Li, Y. (2025). The role of nano-fertilizers in sustainable agriculture: Boosting crop yields and enhancing quality. *Agriculture, 15*(2), 123. https://doi.org/10.3390/agriculture15020123

Kaium Chowdhury, M., 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, 11*(9), 1792. https://doi.org/10.3390/agronomy11091792

Karimi, M., Sadeghi, R., & Mousavi, S. (2022). Biochar as a sustainable amendment for improving soil health and nutrient retention. *Soil Science Society of America Journal, 86*(3), 567-579. https://doi.org/10.1002/saj2.20345

Karunakaran, A., Fathima, Y., Singh, P., Beniwal, R., Singh, J., & Ramakrishna, W. (2024). Next-generation biofertilizers: Nanoparticle-coated plant growth-promoting bacteria biofertilizers for enhancing nutrient uptake and wheat growth. *Agriculture, 14*(4), 159. https://doi.org/10.3390/agriculture14040159

Kumar, S., Kumar, S., & Mohapatra, T. (2021). Interaction between macro-and micro-nutrients in plants. *Frontiers in Plant Science, 12*(1), 1-9. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665583

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2021). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. Current Protocols in Plant Biology, 6(3), e201. https://doi.org/10.1002/cppb.201

Mamnabi, S., Nasrollahzadeh, S., Ghassemi-Golezani, K., & Raei, Y. (2020). Improving yield-related physiological characteristics of spring rapeseed by integrated fertilizer management under water deficit conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *27*(3), 797–804. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.12.008

Oladele, S. O., & Adetunji, A. T. (2021). Biochar from agricultural residues: Effects on soil properties and crop yield. Journal of Cleaner Production, 312, 127678. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127678

Raliya, R., et al. (2015). Nutrient delivery using nanoparticles for crop growth and productivity. Journal of Nanoparticle Research, 17(7), 1-10. https://doi.org/ 10.1007/s11051-015-3017-9

Rezaei, S., & Khanmirzaei, A. (2024). Nano-biofertilizers: A new area for enhancing plant nutrition. In R. Z. Sayyed & N. Ilyas (Eds.), *Plant holobiome engineering for climate-smart agriculture* (pp. 123-145). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9999-9**Servin, A., et al. (2015).** Nanoparticle effects on nutrient uptake and metabolism in plants. Environmental Science & Technology, 49(9), 5501-5508. https://doi.org/10.1007/s11051-015-3010-3

Talaat, N. B., & Abdel-Salam, S. A. M. (2024). An innovative, sustainable, and environmentally friendly approach for wheat drought tolerance using vermicompost and effective microorganisms: Upregulating the antioxidant defense machinery, glyoxalase system, and osmotic regulatory substances. BMC Plant Biology, 24, Article 866. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05247-6

Verma, K., Song, X., Joshi, A., Tian, D., Rajput, V., Singh, M., Arora, J., Minkina, T., & Li, Y. (2022). Recent trends in nano-fertilizers for sustainable agriculture under climate change for global food security. *Nanomaterials*, *12*(1), 173. https://doi.org/10.3390/nano12010173

Zulfiqar, F., Ashraf, M., & Ahmad, A. (2025). Emerging trends and perspectives on nano-fertilizers for sustainable agriculture. *Plant Nano Biology*, *7*, 100056.

https://doi.org/10.1016/j.plana.2025.100056

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]

The effect of foliar spraying of zinc and iron nanoparticles and some organic materials on physiological indices and yield of wheat

H. Delph Aboodi [1], E. Fateh [2 *]and A. Aynehband [3]

1,2&3) Department of Plant Production and Genetics, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

***Corresponding author: e.fateh@scu.ac.ir**

This article is taken from a Master Degree dissertation.

Received date: 2025.02.12 **Accepted date: 2025.05.31**

Abstract

This study was conducted during the 2022-2023 agricultural year in Gamboueh, Hamidieh County, to evaluate the effects of foliar application of zinc and iron nanoparticles and organic fertilizers on physiological indices and wheat yield. The experiment was designed as a factorial in a randomized complete block design with three replications. Treatments included organic fertilizers (five levels): control (no organic fertilizer), bagasse biochar (5 t/ha), vermicompost (5 t/ha), humic acid (at stem elongation and flowering stages), seaweed extract (at stem elongation and flowering stages), and nanoparticles (four levels): control (no nanoparticles), zinc nanoparticles (2 per thousand), iron nanoparticles (2 per thousand), and iron + zinc nanoparticles (2 per thousand). Grain yield in the control was 3336 kg/ha, showing no significant difference with seaweed extract (3382 kg/ha, 1.38% increase), but significantly lower than vermicompost (4560 kg/ha, 36.69% increase) and humic acid (4637 kg/ha, 38.97% increase). Application of zinc nanoparticles (4038 kg/ha, 11.24% increase), iron nanoparticles (4056 kg/ha, 11.74% increase), and iron + zinc nanoparticles (4289 kg/ha, 18.15% increase) significantly increased grain yield compared to the control (3630 kg/ha). The highest leaf area index was observed in vermicompost (4.98) and humic acid (5.13) treatments, with iron + zinc foliar application increasing it to 5.04. The highest chlorophyll a content was recorded in vermicompost (1.35 mg/g fresh weight) and humic acid (1.38 mg/g fresh weight) treatments, with iron + zinc (1.37 mg/g fresh weight) and iron (1.34 mg/g fresh weight) showing significant superiority. The highest chlorophyll b content was observed in iron + zinc (0.88 mg/g fresh weight) and iron under humic acid application (0.90 mg/g fresh weight). Grain zinc content was highest in vermicompost (32.5 mg/kg) and humic acid (34.5 mg/kg) treatments, with zinc nanoparticles (32.4 mg/kg) and iron + zinc (32.2 mg/kg) showing significant increases. The highest grain iron content was recorded in humic acid (87.5 mg/kg) and vermicompost (89.8 mg/kg) treatments, with iron + zinc (89.2 mg/kg) and iron nanoparticles (82.2 mg/kg) performing better. Overall, vermicompost, humic acid, and foliar application of iron and zinc nanoparticles improved growth indices, chlorophyll content, and grain nutrient levels.

Key Words: Grain Yeild, Micronutrients and Vermicompost.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-04-26]