

تأثیر کاربرد قارچ میکوریزا و سطوح مختلف زئولیت بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، غلظت عناصر پرمصرف و کم‌مصرف در دانه و ریشه گیاه گندم آبی رقم چمران ۲

مریم اسدی‌پور^۱، علی خورگامی*^۱ و منوچهر سیاح‌فر^۲

^۱ گروه زراعت، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

^۲ بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران

چکیده

تأثیر کاربرد قارچ میکوریزا و سطوح مختلف زئولیت بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، غلظت عناصر پرمصرف و کم‌مصرف در دانه و ریشه گیاه گندم آبی رقم (چمران ۲)، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار در خرم‌آباد در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ اجرا شد. فاکتورهای مورد مطالعه شامل قارچ‌های میکوریزا در چهار سطح (شاهد، گلوموس موسه‌آ، گلوموس اینترادیس و گلوموس موسه‌آ + گلوموس اینترادیس) و کاربرد زئولیت (صفر، ۶، ۹ و ۱۲ تن در هکتار) بودند. نتایج نشان داد که استفاده همزمان از قارچ‌های میکوریزا و زئولیت با سطوح بالا بر غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، مس و منگنز دانه، فسفر، پتاسیم و آهن ریشه افزود. بیشترین غلظت نیتروژن ریشه (۱/۵ درصد)، آهن دانه (۱۷۰/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم)، روی ریشه (۵۳/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار تلقیح با گونه‌های گلوموس موسه‌آ + گلوموس اینترادیس و کاربرد ۱۲ تن در هکتار زئولیت مشاهده شد. کود زئولیت موجب کاهش آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز شد. براساس نتایج مقایسه میانگین اثر سال × میکوریزا × زئولیت، تیمار تلقیح گلوموس موسه‌آ + گلوموس اینترادیس و کاربرد ۱۲ تن در هکتار زئولیت در سال دوم با میانگین ۶۷/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم و تیمار تلقیح با گلوموس اینترادیس و کاربرد ۱۲ تن در هکتار زئولیت در سال دوم با میانگین ۵۸/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب بیشترین غلظت عناصر روی دانه و مس ریشه را به خود اختصاص دادند. در مجموع می‌توان گفت استفاده از قارچ‌های گلوموس موسه‌آ + گلوموس اینترادیس به همراه اصلاح‌کننده خاک (زئولیت) در مزارع گندم رقم چمران می‌تواند موجب بهبود غلظت عناصر در دانه و ریشه گندم شود و نقش مهمی در تولید پایدار گیاه ایفا کند.

واژگان کلیدی: آهن، پراکسیداز، روی، مس و نیتروژن

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷، اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

* نویسنده مسئول، رایانامه: 0070588554@iau.ir



حق انتشار این مستند، متعلق به انجمن فیزیولوژی گیاهی ایران است. © ۱۴۰۳

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

مقدمه

گندم حدود یک پنجم کالری و پروتئین غذایی جهان را تأمین می‌کند و نقش مهمی در امنیت غذایی دارد. تغییرات اقلیمی تهدیداتی برای تولید گندم ایجاد کرده است که نیاز به استراتژی‌های سازگاری را ضروری می‌سازد. همچنین، افزایش آگاهی از تغییرات زیست‌محیطی و فواید رژیم‌های غذایی گیاهی، تحقیقات را به سمت حفظ تولید و بهبود کیفیت گندم هدایت کرده است (Voucko et al., 2025). براساس آمار فائو در سال ۲۰۲۴، چین با تولید ۱۴۰/۱ میلیون تن بزرگ‌ترین تولیدکننده گندم در جهان بود. پس از چین، اتحادیه اروپا و هندوستان به ترتیب با تولید ۱۲۲/۱ و ۱۱۳/۲ میلیون تن در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. ایران نیز با تولید ۱۶ میلیون تن، به‌عنوان سیزدهمین تولیدکننده گندم در دنیا شناخته شده است (FAO, 2024). امنیت غذایی جهانی در اهداف توسعه پایدار سازمان ملل قرار دارد و افزایش جمعیت و کاهش منابع فشار بر کشاورزی را افزایش می‌دهد. برای حفظ بهره‌وری در شرایط کاهش حاصلخیزی خاک و افزایش آفات، علم کشاورزی باید فناوری‌ها را اصلاح کرده و رویکردی پایدار اتخاذ کند. ژئولیت‌ها، به‌عنوان آلومینوسیلیکات‌های کریستالی، می‌توانند به‌عنوان راه‌حلی برای این چالش‌ها عمل کنند. خواص آن‌ها به‌عنوان مبدل‌های یونی و جاذب‌های آب می‌تواند پایداری کشاورزی را افزایش دهد، راندمان استفاده از نیتروژن را بهبود بخشد و نیاز به کودهای شیمیایی را کاهش دهد (Sarkar et al., 2025). ژئولیت با آزادکردن مواد مغذی در خاک و تأثیر بر استفاده از نیتروژن، فسفر و پتاسیم به بهبود کیفیت خاک کمک می‌کند. همچنین، این ماده قادر به جمع‌آوری آلاینده‌های عناصر سنگین است و تحقیقات نشان داد که ژئولیت می‌تواند اثرات منفی شوری و تنش خشکی بر گیاهان را کاهش دهد (Aslan and Arsalan, 2024). در بررسی تأثیر ژئولیت بر بهبود عملکرد گندم، نتایج نشان داد که استفاده از ژئولیت می‌تواند اثرات منفی کاهش مصرف نیتروژن را کاهش دهد و به افزایش کارایی مصرف مواد مغذی و انعطاف‌پذیری محصول کمک کند. همچنین، کاربرد ژئولیت

منجر به افزایش عملکرد دانه، محتوای نیتروژن، پروتئین و قند در دانه‌های گندم شد. این مطالعه بر پتانسیل ژئولیت به‌عنوان ابزار مؤثر برای بهینه‌سازی تولید گندم و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از کوددهی بیش از حد نیتروژن تأکید نمود (AbDEL-Azeiz et al., 2024). محققان در بررسی مکانیسم اثر کاربرد ژئولیت بر افزایش محتوای عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن دانه بیان نمودند که ژئولیت قدرت ریشه را در دسترسی به مواد مغذی خاک افزایش می‌دهد. بین میزان قدرت ریشه در زمان پرشدن دانه و سنتز فیتوهورمون‌ها به‌ویژه سیتوکینین ارتباط نزدیکی وجود دارد که منجر به تنظیم فتوسنتز، بهبود تجمع ماده خشک و تجمع عناصر به‌ویژه نیتروژن در دانه می‌شود. از سوی دیگر افزایش تجمع نیتروژن توسط ژئولیت ممکن است به دلیل سطح ویژه بزرگ و توانایی بالای تبادل نیتروژن آن باشد (Sun et al., 2023).

براساس گزارش‌ها، از کل کود فسفر استفاده شده در خاک، حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد جذب گیاه شده و مابقی به‌صورت غیرقابل جذب درآمده و در خاک تجمع می‌یابد (Zhang et al., 2018). با توجه به کارایی اندک، افزایش قیمت جهانی و وارداتی بودن بخش عمده کودهای شیمیایی و همچنین آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف این کودها، باید ضمن تجدیدنظر در مدیریت استفاده از کودهای فسفاته، به پیشرفت‌های نوین مانند استفاده از نهاده‌های زیستی توجه بیشتری شود. امروزه از ریزجانداران حل‌کننده فسفات در سطوح وسیع به‌عنوان کود زیستی به‌منظور افزایش تولید و حفظ سلامت خاک استفاده می‌شود (Da Silva et al., 2023). در سال‌های اخیر کاربرد مواد معدنی طبیعی به‌منظور بهبود باروری، اصلاح ساختمان فیزیکی و شیمیایی خاک که منجر به افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک نیز می‌شود توصیه شده است که ژئولیت یکی از این مواد است. ژئولیت‌ها به‌عنوان اصلاح‌کنندگان خاک و کود، برخلاف سایر اصلاح‌کنندگان در طول مدت حضور خود شکسته نمی‌شوند و شرایط را برای نگهداری عناصر و رطوبت بهبود می‌بخشند. از این‌رو اضافه کردن ژئولیت به کودهای زیستی به‌طور معنی‌داری هزینه‌های

ناشی از مصرف کود و آب را در زمین‌های کشاورزی کاهش می‌دهد (Jabbar, 2025).

وابستگی بیش از حد به نهاده‌های شیمیایی در کشاورزی رایج، اصول کشاورزی پایدار را در معرض تهدید قرار داده است. بر این اساس، کاهش مصرف کودهای شیمیایی، تلفیق و یا جایگزینی آنها با انواع کودهای آلی و بیولوژیک به منظور رسیدن به تولید پایدار در کشاورزی مورد توجه زیادی قرار گرفته است (El Sheikh and Ray, 2017). تولید و کاربرد کودهای بیولوژیک یکی از مؤلفه‌های اساسی در بیوتکنولوژی خاک و به تبع آن مدیریت تلفیقی تغذیه گیاه محسوب می‌شود. مقدار مصرف کودهای بیولوژیک در مقایسه با کودهای شیمیایی بسیار ناچیز است و این امر سبب کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی خواهد شد. امروزه اهمیت کودهای بیولوژیک نه تنها به خاطر تأمین نیازهای گیاه، بلکه از آن جهت است که به محیط‌زیست آسیب نمی‌رسانند و به بهبود کیفیت محصولات کشاورزی و در نتیجه سلامت مصرف‌کنندگان کمک می‌کنند (Farid et al., 2023). استفاده از کودهای زیستی در آینده به دلیل داشتن پتانسیل‌های زیاد در کاهش تنش‌های شوری، خشکی، تعادل مواد مغذی و عدم سمیت فلزهای سنگین در گیاهان، گزینه مناسبی برای تولید محصول مطلوب خواهد بود (Kaur et al., 2023). حضور کودهای زیستی باعث بهبود خصوصیات خاک نظیر محتوای ماده آلی و افزایش دسترسی عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم و عناصر ریزمغذی می‌شود (Meddad, 2017). با کاربرد میکوریزا، خاک قادر است ساختار و حاصلخیزی خود را در طول زمان بهتر حفظ کند و زمینه‌ای پایدار برای گیاهان و حیوانات مختلف فراهم کند (Islam, 2022). این تجمع‌ها برای توسعه و حفظ شکل خاک ریز متخلخل و نفوذپذیر به آب حیاتی هستند و برای جلوگیری از تجزیه و چرخه مکمل‌های عملی ضروری است (Dhiman et al., 2022). تخریب و از بین رفتن زمین‌های زراعی، که با شرایط خشکسالی تشدید می‌شود، مانع رشد و بهره‌وری گندم دوروم شده است. این مطالعه پتانسیل ترکیب کود حاوی عناصر ضروری (PK-Ca-Mg-Fe-Mn-Zn-B-Cu-Mo) و

قارچ‌های میکوریزا را که هم به صورت جداگانه و هم به صورت ترکیبی استفاده می‌شوند، برای افزایش ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکردی گندم، در عین کاهش تأثیر خشکسالی (۷۵ درصد ظرفیت مزرعه، آبیاری خوب و ۲۵ درصد ظرفیت مزرعه)، ارزیابی کرد. ترکیب میکوریزا و کود به طور قابل توجهی وزن هزار دانه را تقریباً ۳ برابر بیشتر از شاهد تحت تنش ۲۵ درصد ظرفیت مزرعه بهبود بخشید. علاوه بر این، تیمارهای ترکیب میکوریزا و کود مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی گیاهان گندم را افزایش دادند (El Mazouni et al., 2025). قارچ‌های میکوریزا می‌توانند راندمان مصرف آب و جذب فسفر برنج کشت شده به روش هوازی را بهبود بخشند (Watts-Williams et al., 2025). لذا با توجه به اهمیت بهبود غلظت عناصر حیاتی در محصول نهایی گندم رقم چمران ۲، این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات انفرادی و توأم استفاده از قارچ‌های میکوریزا (*Glomus spp.*) و سطوح مختلف زئولیت در خاک منطقه خرم‌آباد، بر غلظت جذب و تجمع عناصر پرمصرف و کم‌مصرف در اندام‌های حیاتی ریشه (محل جذب) و دانه (محصول نهایی) اجرا شد تا زمینه برای معرفی یک استراتژی مدیریتی پایدار فراهم آید.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر کاربرد قارچ میکوریزا و سطوح مختلف زئولیت بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، غلظت عناصر پرمصرف و کم‌مصرف در دانه و ریشه گیاه گندم آبی رقم چمران ۲ (*Triticum aestivum L.*) آزمایشی در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد، واقع در بخش کمالوند شهرستان خرم‌آباد، طی دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ طراحی و اجرا شد. تغییرات میزان دما و بارندگی در بازه زمانی ابتدای آبان تا پایان خرداد هر دو سال زراعی، این منطقه جغرافیایی در جدول ۱ آمده است. مدل آماری این آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. عوامل مورد بررسی شامل زئولیت در چهار سطح (شاهد، ۶، ۹ و ۱۲

جدول ۱- داده‌های هواشناسی شامل حداکثر دما، حداقل دما و بارندگی طی دوره اجرای آزمایش

۱۴۰۲				۱۴۰۱			
بارندگی (میلی‌متر)	حداکثر دما (°C)	حداقل دما (°C)	ماه	بارندگی (میلی‌متر)	حداکثر دما (°C)	حداقل دما (°C)	ماه
۴۵/۸	۲۲/۵	۸/۱	آبان	۷۱/۱	۲۲	۸/۵	آبان
۲۹/۲	۱۷/۴	۱/۹	آذر	۲۸/۸	۱۶/۲	۳/۷	آذر
۴۳	۱۴/۵	۱/۳	دی	۵۵/۲	۱۱	۰/۷	دی
۹۹/۶	۱۳/۴	۱/۴	بهمن	۹۲/۷	۱۱/۳	-۰/۳	بهمن
۶۷/۸	۱۵/۵	۲/۱	اسفند	۶۵/۸	۱۹/۵	۱/۴	اسفند
۹۴/۶	۲۱/۹	۶/۲	فروردین	۱۲۳/۹	۲۰	۵/۷	فروردین
۱۰۸	۲۶/۱	۱۰/۵	اردیبهشت	۲۱/۶	۲۷/۶	۸/۵	اردیبهشت
۰/۴	۳۶/۸	۱۶/۱	خرداد	۱۵/۱	۳۴/۸	۱۵/۱	خرداد

جدول ۲- آنالیز خاک مزرعه

سال	بافت خاک	pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	کربن آلی نیتروژن (درصد)	فسفر	پتاسیم	مس	روی	بور	منگنز	آهن	
					(میلی‌گرم بر کیلوگرم)							
۱۴۰۱	لومی رسی	۷/۶۷	۱/۱۴	۱/۷۵	۰/۱۸	۲۳/۴	۲۱۸	۱/۳۷	۰/۵۷	۱/۶۶	۹/۶۴	۳/۵۸
۱۴۰۲	لومی رسی	۷/۶۳	۱/۵۲	۱/۶۴	۰/۲۷	۲۳/۱	۲۴۵	۱/۷۴	۰/۸۰	۱/۶۱	۹/۷	۳/۸۷

جدول ۳- نتایج تجزیه فیزیکوشیمیایی زئولیت

نمونه	اکسید آهن	اکسید گوگرد	کلرید	سیلیسیم دی‌اکسید	آلومینیوم اکسید	اکسید پتاسیم	اکسید سدیم	اکسید کلسیم
میانگین زئولیت استفاده شده	۰/۷۴	۰/۶۳	۰/۸۱	۶۸/۰۴	۱۰/۸۷	۴/۲۹	۳/۸۵	۰/۸۴

C.E.C= 200 meq 100 g⁻¹

در هر سال زراعی، کود حیوانی گاوی به میزان ثابت ۱۰ تن در هکتار (به‌عنوان تیمار پایه و اصلاح‌کننده)، به‌صورت یکنواخت به خاک اضافه گردید. نتایج آنالیز فیزیکوشیمیایی این کود حیوانی در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین کود اوره به‌صورت سرک نیز در میانه رشد استفاده شد.

کشت برای هر دو سال زراعی در مزرعه بدون شخم انجام گرفت اما برای سهولت اجرای طرح پس از ریسمان‌کشی و گونیاکردن زمین، کاشت براساس نقشه آزمایش و تیمارهای مربوطه در کرت‌های آزمایشی اجرا شد. بعد از عملیات آماده‌سازی زمین، زئولیت با توجه به تیمارها با خاک سطحی

تن در هکتار) (Mirzakhani and Maleki, 2015) و کود زیستی میکوریزا در چهار سطح (شاهد، تلقیح با گونه گلوموس موسه‌آ، اینترادیس و تلقیح با هر دو گونه گلوموس موسه‌آ + گلوموس اینترادیس) (Mardoukhi et al., 2008) بود. قبل از شروع آزمایش، برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌هایی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک از نقاط مختلف مزرعه جمع‌آوری و سپس به آزمایشگاه خاک ارسال گردید. نتایج مربوط به آنالیز خاک و کود زئولیت در جدول ۲ و ۳ آمده است. تمامی کرت‌ها (تیمارها)، از نظر تأمین نیازهای غذایی پایه، یکسان مدیریت شدند. بدین منظور، قبل از کاشت

جدول ۴- آنالیز کود حیوانی

کود گاوی	pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	رطوبت	ماده آلی	نیتروژن	فسفر (درصد)	پتاسیم	سدیم
۱۴۰۱	۷/۴۳	۲/۹۸	۳۴/۵	۷۷/۶	۱/۵۱	۰/۶۵	۱/۷۱	۱/۲۵
۱۴۰۲	۷/۶۰	۲/۷۷	۳۴/۱	۷۸/۳	۱/۹۸	۰/۵۲	۱/۰۲	۱/۱۹

ادامه جدول ۴-

سدیم	منیزیم	کلسیم	گوگرد	آهن	مس	روی	منگنز
(درصد)			(میلی‌گرم بر کیلوگرم)				
۱/۲۵	۰/۴۹	۱/۵۲	۰/۲۱	۵۱۱/۲	۱۸/۹	۱۴۱/۳	۱۹۷/۱
۱/۱۹	۰/۶۷	۱/۳۲	۰/۱۸	۵۱۹/۳	۱۸/۹	۱۵۲/۲	۲۰۱/۲

هر کرت مخلوط شد. زئولیت مصرفی نیز از نوع کریستوبالیت و قابلیت تبادل کاتیونی حدود ۲۰۰ میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم بود. زئولیت مورد نیاز از شرکت افرازند (استخراج‌شده از معادن زئولیت طبیعی شهر سمنان) تهیه گردید. نتایج تجزیه شیمیایی این محموله نشان داد که میانگین ترکیب سنگ استخراج‌شده شامل حدود ۷۰ درصد زئولیت کریستوبالیت و مابقی از کانی‌های کلینوپتیلولیت و کوارتز تشکیل شده است. کود زیستی میکوریزا شامل گلوموس موسه‌آ و گلوموس اینترادیس بود. این کود دارای ۱۵ اسپور در هر گرم و ۹۳۰ هیف از قارچ میکوریزا در هر سانتی‌متر مکعب است که از شرکت تولیدکننده کود بیولوژیک با نام ارگانیک واقع در شهرستان همدان تهیه گردید. این شرکت دارای مجوز رسمی تولید کودهای بیولوژیک از دانشگاه صنعتی مونیخ آلمان است که مورد تأیید مؤسسه تحقیقات خاک و آب سازمان تحقیقات کشاورزی کشور می‌باشد. پس از فرآیند تلقیح، بذور در سایه خشک شده و کشت بذور در تاریخ ۲۰ آبان انجام شد. بذر مورد نیاز از مرکز تحقیقات کشاورزی خرم‌آباد تهیه شد. هر بلوک شامل ۱۶ کرت با مساحت ۷/۲ مترمربع (عرض ۱/۲۰ و طول ۶ متر) بود و فاصله هر خط کاشت ۲۰ سانتی‌متر بود. هر کرت شامل ۶ خط کاشت و بین کرت‌ها یک خط نکاشت در نظر گرفته شد. فاصله دو بلوک ۲ متر بود و این کشت در سال دوم نیز تکرار شد. برای جلوگیری از اختلاط

تیمارها، فاصله کرت‌ها یک متر و فاصله تکرارها دو متر تعیین شد. مبارزه با علف‌های هرز به وسیله وجین‌کار دستی انجام گرفت. همچنین در طی فصل رشد، آسیب قابل توجهی از نظر هجوم آفات یا بیماری‌های گیاهی مشاهده نشد.

به‌منظور اندازه‌گیری عناصر غذایی (دانه و ریشه)، یک گرم از نمونه‌های پودر شده را برداشته و با استفاده از نیتریکاسید و در بلوک‌های هضم، فرآیند هضم اسیدی (معدنی‌سازی) برای آزادسازی کامل عناصر انجام شد. از این محلول هضم‌شده برای اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی استفاده شد. غلظت عناصر نیتروژن به‌صورت تیتراسیون با دستگاه تمام اتوماتیک کج‌دال، فسفر با معرف وانادات مولیبدات با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (model: BT600 Plus, Canada) در طول موج ۴۵۰ نانومتر، غلظت عنصر پتاسیم (با محلول کلروسزیم ۰/۸۷ گرم در لیتر) در عصاره استخراج‌شده با استفاده از دستگاه فلیم‌فتمتر (model: PFP7, UK) اندازه‌گیری شدند (Waling *et al.*, 1989). غلظت عناصر آهن، روی، مس و منگنز در عصاره حاصل با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Perkin Elmer, USA make Analyst 400) اندازه‌گیری شد.

فعالیت آنزیم کاتالاز طبق روش (Aebi, 1984) و بر پایه تجزیه پراکسید هیدروژن توسط آنزیم کاتالاز اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها از برگ‌های جوان و فعال در محله گلدهی برداشته شد. کمپلکس واکنشی شامل ۱/۵ میلی‌لیتر از بافر فسفات

پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷)، ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول آنزیمی بود که حجم نمونه‌ها با اضافه کردن آب مقطر به ۳ میلی‌لیتر رسید. با افزودن پراکسید هیدروژن واکنش آغاز گردید و کاهش در جذب نمونه‌ها در طول موج ۲۴۰ نانومتر در مدت یک دقیقه ثبت شد. برای سنجش میزان آنزیم پراکسیداز کمپلکس واکنشی (۱ میلی‌لیتر) شامل ۲۵۰ میکرولیتر از محلول بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷)، ۲۵۰ میکرولیتر از آسکوربات ۱ میلی‌مولار، ۲۵۰ میکرولیتر از EDTA ۰/۴ میلی‌مولار، ۱۹۰ میکرولیتر آب دو بار تقطیر، ۱۰ میکرولیتر از پراکسید هیدروژن ۱۰ میلی‌مولار و ۵۰ میکرولیتر از محلول آنزیمی استخراج شد. جذب کمپلکس واکنشی در طول موج ۲۹۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV-2100-VIS ساخت آمریکا) خوانده شد و با استفاده از ضریب خاموشی $2/8 \text{ mmol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ میزان فعالیت این آنزیم محاسبه شد (Sairam et al., 2002). فعالیت سوپراکسید دیسموتاز طبق روش (Giannopolitis and Ries, 1977)، به این صورت انجام شد که ۰/۲ گرم نمونه منجمد در ۳ میلی‌لیتر بافر HEPES-KOH ۵۰ میلی‌مولار با pH معادل ۷/۸ حاوی EDTA ۰/۱ میلی‌مولار عصاره‌گیری شد. همگن‌های حاصل در ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد و بخش رویی برای سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز مورد استفاده قرار گرفت. مخلوط واکنش شامل، ۲ میلی‌لیتر بافر HEPES-KOH ۵۰ میلی‌مولار با pH معادل ۱۰/۲، ۱۰/۲ L-methionine، ۱۲ میلی‌مولار نیترویلو تترازولیوم ۷۵ میکرومولار، ریبوفلاوین ۱ میکرومولار و ۲۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی است. نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در شدت نور تقریباً ۸۰۰۰ لوکس (در زیر نور خورشید) قرار گرفت و پس از این مدت جذب آنها در طول موج ۵۶۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV-2100-VIS ساخت آمریکا) خوانده شد. همچنین از یک لوله آزمایش حاوی مخلوط واکنش بدون عصاره آنزیمی به عنوان شاهد (بلانک) استفاده شد. یک واحد فعالیت سوپراکسید دیسموتاز به‌عنوان مقدار آنزیمی در نظر گرفته می‌شود که منجر به مهار

۵۰ درصد احیای نوری نیترویلو تترازولیوم می‌گردد.

پس از آزمون بارتلت و اطمینان از متجانس بودن واریانس خطاهای آزمایشی، تجزیه واریانس مرکب برای صفات اندازه‌گیری شده انجام شد. تجزیه واریانس داده‌های حاصل از اندازه‌گیری صفات و مقایسه میانگین داده‌ها به روش آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS ver 9.1 صورت گرفت و رسم نمودارها به وسیله نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

غلظت نیتروژن دانه و ریشه: غلظت نیتروژن دانه و ریشه تحت تأثیر تلقیح میکوریزا و ژئولیت در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شدند. همچنین غلظت نیتروژن ریشه تحت اثر متقابل دوگانه ژئولیت × تلقیح میکوریزا در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵ و ۶). نتایج مقایسه میانگین اثر گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا بر غلظت نیتروژن دانه نشان داد که بیشترین غلظت نیتروژن دانه با میانگین ۲/۴۳ درصد در تیمار تلقیح با قارچ‌های گلوبوموس موسه‌آ + گلوبوموس اینترارادیس مشاهده گردید که در یک گروه آماری با قارچ گلوبوموس اینترارادیس قرار گرفت و در مقایسه با کمترین غلظت نیتروژن دانه در تیمار شاهد (عدم تلقیح)، ۱۶ درصد افزایش نشان داد. تغییرات غلظت نیتروژن دانه در سطوح مختلف ژئولیت نشان داد که استفاده از ژئولیت به افزایش غلظت نیتروژن دانه کمک کرده است، به طوری که تیمار ۱۲ تن در هکتار با میانگین ۲/۴۱ درصد بیشترین غلظت نیتروژن دانه را به خود اختصاص داد و در گروه آماری مشابهی با تیمار ۹ تن در هکتار قرار گرفت. همچنین کمترین غلظت نیتروژن دانه با میانگین ۲/۱۶ درصد از تیمار شاهد به دست آمد (جدول ۷).

براساس یافته‌های مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه ژئولیت × تلقیح میکوریزا بر غلظت نیتروژن ریشه، تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا در سطوح گوناگون ژئولیت باعث افزایش غلظت نیتروژن ریشه گردید، به طوری که بیشترین

جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب اثر زئولیت و قارچ میکوریزا بر برخی عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف دانه طی دو سال زراعی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	مس
سال (A)	۱	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۱۴۳۵/۴ ^{**}	۲۷۱/۷ ^{**}	۰/۰۸ ^{ns}
تکرار در سال	۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۱۹/۱	۸/۶۹	۱۱/۶۲
زئولیت (B)	۳	۰/۶۹ ^{**}	۰/۰۱ ^{**}	۰/۲۴ ^{**}	۴۲۳۰/۱ ^{**}	۸۲۸/۷ ^{**}	۹۹/۴ ^{**}
(B) × (A)	۳	۰/۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۹ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۴ ^{ns}	۱۵۳/۳ ^{**}	۱۷/۱ ^{**}	۱/۹۶ ^{ns}
قارچ میکوریزا (C)	۳	۰/۲۶ ^{**}	۰/۰۰۰۰۴ ^{**}	۰/۱۰ ^{**}	۳۰۳۶/۹ ^{**}	۴۷۸/۷ ^{**}	۵۶/۶ ^{**}
(C) × (A)	۳	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۶ ^{ns}	۴۷/۴ ^{ns}	۵۸/۵ ^{**}	۰/۷۹ ^{ns}
(C) × (B)	۹	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۱۲۲/۵ ^{**}	۴۰/۹ ^{**}	۱/۵۹ ^{ns}
(C) × (B) × (A)	۹	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۳۱/۷ ^{ns}	۱۰/۹ ^{**}	۰/۸۸ ^{ns}
خطای آزمایش	۶۰	۰/۰۱	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۶	۲۳/۲	۳/۵۳	۴/۵۴
ضریب تغییرات (%)	-	۴/۹	۵/۸	۶/۳	۳/۳	۳/۶	۸/۵

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی دار، معنی دار در سطوح احتمال خطای پنج و یک درصد

جدول ۶- تجزیه واریانس مرکب اثر زئولیت و قارچ میکوریزا بر برخی عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف ریشه طی دو سال زراعی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	مس
سال (A)	۱	۰/۱۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۶ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۵۵۵/۴ ^{ns}	۶۲۱/۸ ^{ns}	۵۰/۵ ^{ns}
تکرار در سال	۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۳	۳۴۸/۹	۶/۵۹	۰/۶۰
زئولیت (B)	۳	۰/۴۳ ^{**}	۰/۰۰۰۰۸ ^{**}	۰/۱۱ ^{**}	۶۶۷/۴ ^{**}	۱۰۸۱/۵ ^{**}	۵/۰۵ ^{ns}
(B) × (A)	۳	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۴ ^{ns}	۵۱/۷ ^{ns}	۰/۳۳ ^{ns}	۴/۹۳ ^{ns}
قارچ میکوریزا (C)	۳	۰/۱۷ ^{**}	۰/۰۰۰۰۳ ^{**}	۰/۰۴ ^{**}	۳۰۶/۶ [*]	۵۷۹/۶ ^{**}	۵/۹۱ ^{ns}
(C) × (A)	۳	۰/۰۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۶ ^{ns}	۱۱/۶ ^{ns}	۲۴/۶ ^{ns}	۱/۴۸ ^{ns}
(C) × (B)	۹	۰/۰۱ ^{**}	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۱۸/۳ ^{ns}	۷۱/۳ ^{**}	۷/۳ ^{**}
(C) × (B) × (A)	۹	۰/۰۰۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۹ ^{ns}	۱۲/۳ ^{ns}	۵/۵۳ ^{ns}	۳/۲۸ ^{ns}
خطای آزمایش	۶۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۱	۹۶/۳	۶/۸۲	۲/۸۶
ضریب تغییرات (%)	-	۳/۵	۷/۶	۹/۷	۹/۲	۶/۷	۹/۸

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی دار، معنی دار در سطوح احتمال خطای پنج و یک درصد

افزایش داده است (جدول ۸).

قارچ‌های میکوریزایی با تولید هورمون‌های گیاهی می‌توانند رشد گیاه و یا رشد ریشه را تشدید کنند، در نتیجه ظرفیت جذب عنصر نیتروژن را بالا می‌برند. در آزمایشی تلقیح میکوریزا نشان داد که رشد ریشه و گره‌زایی ریشه تحریک

غلظت نیتروژن با میانگین ۱/۵۸ درصد در تیمارهای تلقیح با قارچ‌های گلوبوس موسه‌آ + گلوبوس اینترادیس و کاربرد ۱۲ تن در هکتار زئولیت مشاهده شد که نسبت به تیمار عدم تلقیح در سطوح ۱۲، ۹، ۶ و عدم کاربرد زئولیت به ترتیب به میزان ۱۸، ۲۰، ۲۳ و ۳۲ درصد غلظت نیتروژن ریشه را

جدول ۷- مقایسه میانگین اثرات اصلی قارچ میکوریزا و ژئولیت بر برخی عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف دانه گندم

تیماها	نیتروژن دانه	فسفر دانه	پتاسیم دانه	مس دانه	منگنز دانه
	(درصد)	(درصد)	(میلی گرم در کیلوگرم)	(میلی گرم در کیلوگرم)	(میلی گرم در کیلوگرم)
قارچ میکوریزا					
شاهد	۲/۱۶ ^c	۰/۲۹ ^c	۱/۱۹ ^c	۲۳/۶ ^b	۵۴/۲ ^d
گلو موس موسه آ	۲/۲۹ ^b	۰/۳۰ ^b	۱/۲۷ ^b	۲۴/۸ ^b	۵۷/۴ ^c
گلو موس اینترادیس	۲/۳۵ ^{ab}	۰/۳۱ ^a	۱/۳۲ ^a	۲۵/۱ ^a	۶۰/۱ ^b
موسه آ + اینترادیس	۲/۴۱ ^a	۰/۳۲ ^a	۱/۳۴ ^a	۲۶/۶ ^a	۶۲/۶ ^a
ژئولیت (تن در هکتار)					
۰	۲/۰۵ ^c	۰/۲۸ ^c	۱/۱۴ ^b	۲۲/۹ ^b	۵۰/۹ ^c
۶	۲/۳۴ ^b	۰/۳۱ ^b	۱/۳۱ ^a	۲۵/۹ ^a	۵۹/۴ ^b
۹	۲/۳۸ ^{ab}	۰/۳۲ ^{ab}	۱/۳۲ ^a	۲۶/۴ ^a	۶۱/۳ ^a
۱۲	۲/۴۳ ^a	۰/۳۴ ^a	۱/۳۵ ^a	۲۶/۵ ^a	۶۲/۶ ^a

میانگین های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی داری با یکدیگر در آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد ندارند.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل ژئولیت × قارچ میکوریزا بر برخی عناصر غذایی ریشه گندم

تیماها	نیتروژن ریشه	روی ریشه	مس ریشه
ژئولیت (تن در هکتار)	قارچ میکوریزا	(درصد)	(میلی گرم در کیلوگرم)
۰			
شاهد	۱/۰۸ ^j	۲۸/۳ ^j	۱۵/۱ ^e
گلو موس موسه آ	۱/۱۰ ^{ij}	۲۹/۴ ^j	۱۷/۲ ^{abcd}
گلو موس اینترادیس	۱/۱۵ ^{hi}	۲۹/۹ ^j	۱۷/۳ ^{bcde}
موسه آ + اینترادیس	۱/۱۷ ^h	۳۰/۶ ^j	۱۶/۱ ^{cde}
۶			
شاهد	۱/۲۲ ^g	۳۴/۱ ⁱ	۱۵/۲ ^{de}
گلو موس موسه آ	۱/۳۴ ^{de}	۳۸/۵ ^{fgh}	۱۶/۲ ^{cde}
گلو موس اینترادیس	۱/۳۷ ^{cd}	۴۰/۶ ^{ef}	۱۸/۳ ^{ab}
موسه آ + اینترادیس	۱/۳۹ ^{cd}	۴۳/۱ ^{de}	۱۷/۳ ^{bcd}
۹			
شاهد	۱/۲۶ ^{fg}	۳۵/۵ ^{hi}	۱۶/۴ ^{cde}
گلو موس موسه آ	۱/۳۵ ^d	۳۸/۹ ^{fg}	۱۶/۵ ^{cde}
گلو موس اینترادیس	۱/۴۰ ^c	۴۶/۹ ^{cd}	۱۹/۳ ^a
موسه آ + اینترادیس	۱/۵۱ ^b	۵۱/۵ ^{ab}	۱۷/۹ ^{bcd}
۱۲			
شاهد	۱/۲۹ ^{ef}	۳۶/۸ ^{ghi}	۱۶/۶ ^{cde}
گلو موس موسه آ	۱/۳۶ ^{cd}	۳۹/۱ ^f	۱۷/۱ ^{abc}
گلو موس اینترادیس	۱/۵۰ ^b	۴۸/۶ ^{bc}	۱۹/۹ ^a
موسه آ + اینترادیس	۱/۵۸ ^a	۵۳/۹ ^a	۱۷/۷ ^{abcd}

میانگین های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی داری با یکدیگر در آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد ندارند.

گردید که افزایش تشکیل ریشه‌های موئین، جذب آب و غلظت نیتروژن را به همراه داشت (Wen et al., 2022). قارچ‌های میکوریزا تأثیر عمیقی بر فیزیولوژی ریشه گیاه گذاشته که سبب فعال ساختن گلوتامین سنتتاز، آرزیناز و اوره‌آز شده و از این طریق غلظت نیتروژن را در گیاهان میزبان افزایش می‌دهند (Bago et al., 2001). Aljenaby و همکاران (۲۰۲۲) اثر قارچ‌های آربوسکولار بر رشد و غلظت نیتروژن در گیاه گندم بررسی کردند و نشان دادند که اثر گونه‌های مختلف میکوریزایی بر نیتروژن دانه معنی‌دار و مقدار نیتروژن در تیمار شاهد کمتر از تیمار همزیست با گونه‌های مختلف میکوریزا بود که با نتایج این پژوهش همسو بود. از طرفی ثابت شده است که هیف‌های خارجی قارچ‌های میکوریزا آمونیوم را جذب می‌کنند و این میسیلیوم‌ها نقش مستقیمی در فراهم کردن نترات برای ریشه بازی می‌کنند در نتیجه موجب افزایش نیتروژن ریشه می‌گردند (Smith and Smith, 2011). در این آزمایش، افزودن زئولیت به خاک موجب بهبود خصوصیات خاک، رشد ریشه و رهاسازی کنترل‌شده نیتروژن شد که در نتیجه، جذب نیتروژن افزایش یافته و رشد گندم به‌طور قابل توجهی بهبود یافت. پلیمرهای زئولیت، به‌ویژه کلینوپتیلولایت، به دلیل افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و تمایل بالا برای جذب نیتروژن، می‌تواند در کاهش شستشوی نیتروژن و افزایش نیتروژن در گیاه و خاک مؤثر باشد (حضرتی و همکاران، ۱۳۹۹). در مطالعه‌ای که روی گندم انجام شده استفاده از زئولیت جذب نیتروژن گیاه را افزایش داده است (Ma et al., 2023). Azimnejad و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی اثر زئولیت و تلقیح با قارچ‌های میکوریزا بر نیتروژن دانه گندم اظهار کردند که زئولیت و تلقیح با گونه‌های گلوموس موسه‌آ و گلوموس ایترارادیس اثر مثبت و معنی‌داری بر نیتروژن دانه داشتند به طوری که بیشترین غلظت نیتروژن دانه با میانگین ۱/۸۳ درصد با کاربرد ۹ تن در هکتار زئولیت و تلقیح با قارچ‌های میکوریزا حاصل شد.

غلظت فسفر دانه و ریشه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت فسفر دانه و ریشه تحت تأثیر تلقیح میکوریزا و

زئولیت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۵ و ۶). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین غلظت فسفر دانه با میانگین ۰/۳۴ درصد در تیمار تلقیح همزمان با گونه‌های گلوموس موسه‌آ + گلوموس ایترارادیس به دست آمد. در بین سطوح زئولیت، بیشترین غلظت فسفر دانه با میانگین ۰/۳۲ درصد در سطح ۱۲ تن در هکتار زئولیت مشاهده شد (جدول ۷). همچنین بیشترین غلظت فسفر ریشه با میانگین ۰/۲۶ درصد در تیمار تلقیح همزمان با گونه‌های گلوموس موسه‌آ + گلوموس ایترارادیس به دست آمد و نسبت به تیمار عدم تلقیح به میزان ۱۵ درصد غلظت فسفر ریشه را افزایش داد. در بین سطوح زئولیت، بیشترین غلظت فسفر دانه با میانگین ۰/۲۶ درصد در سطح ۱۲ تن در هکتار زئولیت مشاهده شد (جدول ۹).

فسفر یکی از عناصر کلیدی برای رشد گیاه است و در فرایندهای حیاتی مؤثر بر عملکرد گیاه نقش دارد. فسفر به دلیل تحرک، جذب آن توسط گیاهان دشوار است. میکوریزا می‌تواند با افزایش سطح جذب ریشه، کارایی جذب فسفر را بهبود بخشد و در نتیجه به رشد و افزایش عملکرد گندم کمک کند که علت آن می‌تواند به دلیل ترشح آنزیم فسفاتاز و اسیدهای آلی حل‌کننده فسفر نظیر اسید مالیک از ریشه گیاهان تلقیح‌یافته باشد و از سویی دیگر در گیاهان میکوریزایی، افزایش مجموع سطح ریشه به دلیل تشکیل میسیلیوم در منطقه تارهای کشنده و تغییرات شیمیایی و تغییرات pH در ریزوسفر در فراهمی فسفر قابل دسترس دانه و ریشه تأثیر معنی‌داری داشته است. Beslemes و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیق خود بیان کردند که میانگین غلظت فسفر در تلقیح گیاه با دو گونه قارچ میکوریزا نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری بیشتر است. همچنین بیان کردند که همزیستی میکوریزا از طریق بهبود گسترش هیف‌های قارچ در منافذ خاک به‌طور فیزیکی موجب افزایش جذب فسفر در پیکره رویشی جو شده و در پی آن با افزایش وزن خشک گیاه سبب بهبود غلظت فسفر در دانه و ریشه جو شده است. نتایج محققین بر روی غلات نشان می‌دهد محتویات فسفر دانه در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ

جدول ۹- مقایسه میانگین اثرات اصلی قارچ میکوریزا و زئولیت بر برخی عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف ریشه گندم

تیمارها	فسفر ریشه	پتاسیم ریشه	آهن ریشه
	(درصد)	(میلی گرم در کیلوگرم)	(میلی گرم در کیلوگرم)
قارچ میکوریزا			
شاهد	۰/۲۳ ^c	۱/۱۳ ^c	۱۰۲/۲ ^b
گلو موس موسه آ	۰/۲۴ ^b	۱/۱۸ ^b	۱۰۵/۹ ^{ab}
گلو موس ایتترادیس	۰/۲۵ ^{ab}	۱/۲۰ ^a	۱۰۷/۱ ^a
موسه آ + ایتترادیس	۰/۲۶ ^a	۱/۲۲ ^a	۱۱۰/۶ ^a
زئولیت (تن در هکتار)			
۰	۰/۲۲ ^b	۱/۰۶ ^b	۹۸/۸ ^b
۶	۰/۲۵ ^a	۱/۱۸ ^a	۱۰۶/۶ ^a
۹	۰/۲۶ ^a	۱/۲۰ ^a	۱۰۹/۸ ^a
۱۲	۰/۲۶ ^a	۱/۲۲ ^a	۱۱۰/۷ ^a

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد ندارند.

فسفر نسبت به تیمار عدم کاربرد زئولیت در گیاه ذرت شد (Amirahmadi et al., 2022).

غلظت پتاسیم دانه و ریشه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت پتاسیم دانه و ریشه تحت تأثیر تلقیح میکوریزا و زئولیت در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۵ و ۶). نتایج مقایسه میانگین اثر تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا بر غلظت پتاسیم دانه (جدول ۷) و ریشه (جدول ۹) گندم نشان داد که تلقیح با گونه‌های مختلف میکوریزا نسبت به عدم تلقیح موجب افزایش غلظت پتاسیم دانه و ریشه شد به طوری که بیشترین غلظت پتاسیم دانه و ریشه از تلقیح همزمان با دو قارچ گلو موس موسه آ + گلو موس ایتترادیس به ترتیب با میانگین‌های ۱/۳۵ و ۱/۲۲ درصد به دست آمد که اختلاف معنی‌داری در تلقیح با قارچ گلو موس ایتترادیس با میانگین‌های ۱/۳۲ و ۱/۲۰ درصد و قارچ گلو موس موسه آ با میانگین‌های ۱/۳۱ و ۱/۱۸ درصد به ترتیب در پتاسیم دانه و ریشه نداشتند و از طرفی نسبت به کمترین غلظت پتاسیم دانه و ریشه در تیمار عدم تلقیح با قارچ میکوریزا به میزان ۱۶ درصد پتاسیم دانه و ۱۳ درصد پتاسیم ریشه را افزایش دادند. نتایج مقایسه میانگین اثر زئولیت بر

میکوریزا بیشتر از گیاهان تلقیح نشده بود (Hussain et al., 2021). در پژوهشی دیگر غلظت فسفر دانه در گیاه گندم در اثر تلقیح با قارچ‌های میکوریزا افزایش یافت (Marrassini et al., 2024). زئولیت توانایی جذب یون‌ها از جمله فسفر را دارند که می‌تواند به حفظ فسفر در خاک و جلوگیری از آبکشی آن کمک کند. این ویژگی به بهبود دسترسی گیاه به فسفر و افزایش غنای آن در دانه‌ها کمک می‌کند و در تشکیل دانه نقش مهمی ایفا می‌کند (Zheng et al., 2019)، بنابراین فراهمی این عناصر سبب افزایش غلظت فسفر در دانه و ریشه گندم شده است. همچنین زئولیت‌ها می‌توانند به بهبود ساختار خاک و افزایش جذب فسفر توسط ریشه‌های گیاهان کمک کنند، که این امر به بهینه‌سازی استفاده گیاهان از فسفر منجر می‌شود (Cataldo et al., 2021). گزارش شده است که به علت نقش مثبت مواد زئولیت بر تنظیم اسیدیته خاک، کاربرد آن همراه با میکوریزا به طور قابل توجهی موجب بهبود جذب و کارایی عناصر فسفر، نیتروژن و پتاسیم در دانه و اندام‌های هوایی گندم شد (Khalik et al., 2024). در پژوهشی دیگر گزارش شده است که به کارگیری کود زئولیت با افزایش حلالیت و فراهمی فسفر، موجب افزایش ۲۳ درصدی غلظت

پتاسیم دانه و ریشه نشان داد که کاربرد این کود در غلظت‌های بالا موجب افزایش غلظت پتاسیم دانه و ریشه شد به طوری که تیمار ۱۲ و ۹ تن در هکتار به ترتیب با میانگین‌های ۱/۳۴ و ۱/۳۲ درصد بیشترین غلظت پتاسیم دانه و میانگین‌های ۱/۲۲ و ۱/۲۰ درصد بیشترین غلظت پتاسیم ریشه را به خود اختصاص دادند. در حالی که کمترین غلظت پتاسیم دانه و ریشه به ترتیب با میانگین‌های ۱/۱۹ و ۱/۱۳ درصد در تیمار شاهد مشاهده شد.

پتاسیم در افزایش نشاسته، کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها، بهبود فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌ها، تقویت سنتز پروتئین، کربوهیدرات‌ها و روغن نقش مهمی دارد. همچنین، این عنصر به گیاهان در مقابله با آفت‌ها و بیماری‌ها کمک می‌کند (Choudhury and Khanif, 2011). در رابطه با پتاسیم، می‌توان بیان نمود که از بین شکل‌های مختلف این عنصر، فقط شکل‌های محلول و تبادل‌پذیر آن قابل استفاده گیاه هستند و بقیه شکل‌ها تقریباً غیرقابل استفاده هستند. بنابراین برای تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه، این عنصر باید به طریقی از شکل‌های تثبیت شده و معدنی به شکل‌های تبادل‌پذیر و محلول تبدیل شود. ریزجانداران گوناگون از جمله قارچ‌ها و باکتری‌ها قادرند سیلیکات را تجزیه کرده و عناصری چون پتاسیم، آهن، فسفر و روی را آزاد کنند (Shady et al., 1984). گزارش شده است که افزایش درصد کلونیزاسیون ریشه به طور معناداری جذب پتاسیم در دانه و ریشه گندم را افزایش می‌دهد (فیاض و زاهدی، ۱۳۹۹). عنصر پتاسیم نیز مانند فسفر و روی به دلیل تحرک کم در خاک، از طریق فرآیند پخشیدگی به سمت ریشه حرکت می‌کنند و جذب آن از طریق تارهای کشنده تا فاصله دو میلی‌متری از سطح ریشه انجام می‌شود. در گیاهان با رابطه همزیستی میکوریزی، شبکه میسلومی قارچ تا فاصله ۱۴ سانتی‌متری ریشه گسترش می‌یابد و توانایی گیاه در جذب این عناصر را افزایش می‌دهد (Al-Karaki et al., 1998). در آزمایشی در بررسی اثر غلظت پتاسیم تحت شرایط تلقیح با قارچ‌های میکوریزا گزارش شد که گونه‌های مختلف میکوریزا اثر مثبت و معنی‌داری بر غلظت پتاسیم دانه گندم داشت (Han et al., 2025). افزایش رشد گیاهان در تیمارهای حاوی

ژئولیت به دلیل افزایش فراهمی برخی عناصر غذایی است. در این تیمارها، جایگزینی کلسیم به جای آمونیوم و پتاسیم در ژئولیت، علاوه بر تأمین پتاسیم، باعث حل شدن کانی‌های فسفره و افزایش غلظت فسفر در خاک و گیاه می‌شود. این فرآیندها، یعنی تبادل کاتیونی و حلالیت کانی‌های فسفره، نقش مهمی در جذب و آزادسازی عناصر غذایی و تأمین نیازهای گیاهان دارند (Gruener et al., 2007). در برخی از مطالعات، اثر مثبت ژئولیت بر جذب پتاسیم دانه ذرت (Amirahmadi et al., 2022) و گندم (AbdEL-Azeiz et al., 2024) گزارش شده است. محققین در بررسی اثر ژئولیت بر جذب عناصر غذایی گزارش کردند که با توجه به اینکه پتاسیم یکی از اجزای اصلی ژئولیت است، بنابراین افزایش جذب پتاسیم به وسیله توده گیاهی منطقی به نظر می‌رسد (جامی و همکاران، ۱۳۹۷).

غلظت آهن دانه و ریشه: نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سال، ژئولیت، تلقیح میکوریزا، اثر متقابل دوگانه سال × ژئولیت و ژئولیت × تلقیح میکوریزا بر غلظت آهن دانه در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر اصلی ژئولیت و تلقیح میکوریزا بر غلظت آهن ریشه در سطح احتمال خطای پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۵ و ۶).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه سال × ژئولیت بر غلظت آهن دانه، کاربرد ژئولیت در هر دو سال زراعی موجب افزایش غلظت آهن دانه شد به طوری که غلظت‌های ۱۲ و ۹ تن در هکتار به ترتیب با میانگین‌های ۱۶۰/۵ و ۱۵۶/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم در سال دوم از بیشترین آهن دانه برخوردار بودند و نسبت به کمترین غلظت آهن در تیمار شاهد به میزان ۲۳ و ۲۱ درصد در سال اول و ۲۲ و ۲۰ درصد در سال دوم آهن دانه را افزایش دادند (جدول ۱۰).

مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه ژئولیت × تلقیح میکوریزا بر غلظت آهن دانه نشان داد که تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ میکوریز همراه با افزایش سطوح ژئولیت غلظت آهن دانه را افزایش داد به طوری که تلقیح همزمان با قارچ‌های گلوبوموس

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل سال × زئولیت بر آهن دانه گندم

آهن دانه (میلی گرم در کیلوگرم)	تیمارها	
	زئولیت (تن در هکتار)	سال
۱۲۳/۷ ^e	۰	اول
۱۳۹/۴ ^d	۶	
۱۴۶/۳ ^c	۹	
۱۵۱/۲ ^b	۱۲	
۱۲۵/۹ ^e	۰	دوم
۱۵۰/۳ ^b	۶	
۱۵۶/۹ ^a	۹	
۱۶۰/۵ ^a	۱۲	

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد ندارند.

هکتار اختلاف معنی‌داری نداشتند و نسبت به تیمار شاهد موجب افزایش ۷ و ۵ درصد آهن ریشه شدند (جدول ۹).
تأثیر رابطه همزیستی میکوریزایی در جذب آهن به شدت تحت تأثیر عواملی از قبیل نوع گیاه میزبان، گونه قارچ میکوریزایی، pH خاک، همچنین غلظت فسفر اضافه‌شده به خاک و درجه حرارت قرار می‌گیرد (Raju *et al.*, 1990).
همچنین بررسی اثر تلقیح قارچ‌های میکوریزی در کشت جو (Watts-Williams and Gilbert, 2021) و برنج (Nguyen *et al.*, 2025) در مزرعه نشان داد که در تیمارهای تلقیح‌شده، جذب آهن و روی بیشتر از گیاهان تلقیح نشده است.
امانی‌ماچانی و همکاران (۱۴۰۰) با مقایسه اثر گونه‌های مختلف میکوریزایی بر جذب عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف در آویشن‌باغی مشاهده کردند که غلظت عنصر آهن، روی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم در آویشن با کاربرد قارچ میکوریزا به ترتیب ۱۷، ۱۱، ۱۹، ۴۵ و ۲۰ درصد نسبت به عدم مصرف قارچ افزایش یافت. گزارش شده است که قارچ‌های میکوریزا با بهبود انحلال مواد معدنی و ترشح اسیدهای آلی، به جذب عناصر غذایی توسط درختان کمک می‌کنند. این قارچ‌ها همچنین ممکن است با تغییر pH، جذب و غلظت آهن در درختان را افزایش دهند (Li and Christie, 2001). اثر

موسه‌آ + گلوموس اینترادیس و کاربرد ۱۲ تن در هکتار زئولیت با میانگین ۱۷۰/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم از بیشترین غلظت آهن دانه برخوردار بود که با همین تیمار تلقیح در غلظت ۹ تن در هکتار زئولیت اختلاف معنی‌داری نداشتند و نسبت به کمترین غلظت آهن دانه در تیمار شاهد (عدم تلقیح میکوریزا و عدم کاربرد زئولیت) به میزان ۳۱ درصد غلظت آهن دانه را افزایش داد (جدول ۱۱).

مقایسه میانگین اثر اصلی تلقیح میکوریزا بر غلظت آهن ریشه نشان داد که تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا موجب افزایش این صفت شدند به طوری که بیشترین غلظت آهن ریشه با میانگین‌های ۱۱۰/۷، ۱۰۹/۸ و ۱۰۶/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار تلقیح همزمان و جداگانه با قارچ‌های میکوریز گلوموس موسه‌آ و گلوموس اینترادیس مشاهده شد در حالی که تیمار عدم تلقیح میکوریزا با ۹۸/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم کمترین غلظت آهن ریشه را به خود اختصاص داد.
تغییرات غلظت آهن ریشه در سطوح مختلف غلظت کود زئولیت نشان داد که کاربرد زئولیت منجر به افزایش غلظت آهن ریشه شد به طوری که غلظت‌های ۱۲ و ۹ تن در هکتار به ترتیب با میانگین‌های ۱۱۰/۶ و ۱۰۷/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم از بیشترین آهن ریشه برخوردار بودند که با غلظت ۶ تن در

جدول ۱۱- مقایسه میانگین اثر متقابل زئولیت × قارچ میکوریزا بر غلظت آهن دانه گندم

آهن دانه (میلی گرم در کیلوگرم)	تیمارها	
	قارچ میکوریزا	زئولیت (تن در هکتار)
۱۱۸/۲ ⁱ	شاهد	۰
۱۲۲/۱ ^k	گلو موس موسه آ	
۱۲۹/۶ ^j	گلو موس اینترادیس	
۱۳۲/۷ ^{ij}	موسه آ + اینترادیس	۶
۱۳۴/۹ ^{hij}	شاهد	
۱۴۰/۱ ^{fg}	گلو موس موسه آ	
۱۵۲/۱ ^{cd}	گلو موس اینترادیس	۹
۱۵۲/۶ ^{cd}	موسه آ + اینترادیس	
۱۳۵/۸ ^{ghi}	شاهد	
۱۴۳/۱ ^{ef}	گلو موس موسه آ	۱۲
۱۵۷/۴ ^c	گلو موس اینترادیس	
۱۶۸/۸ ^{ab}	موسه آ + اینترادیس	
۱۳۸/۵ ^{fgh}	شاهد	
۱۴۸/۳ ^{de}	گلو موس موسه آ	
۱۶۵/۶ ^b	گلو موس اینترادیس	
۱۷۰/۸ ^a	موسه آ + اینترادیس	

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد ندارند.

(Ebrahimi Chamani et al., 2022).

غلظت روی دانه و ریشه: غلظت روی دانه تحت اثر اصلی سال، زئولیت، تلقیح میکوریزا، اثر متقابل دوگانه سال × زئولیت، سال × تلقیح میکوریزا، زئولیت × تلقیح میکوریزا و اثر متقابل سه‌گانه سال × زئولیت × تلقیح میکوریزا در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). همچنین غلظت روی ریشه تحت اثر اصلی زئولیت، تلقیح میکوریزا و اثر متقابل دوگانه زئولیت × تلقیح میکوریزا در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). براساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه سال × زئولیت × تلقیح میکوریزا بر غلظت روی دانه گندم، در هر دو سال زراعی تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا و کاربرد زئولیت موجب افزایش این صفت شدند به طوری که بیشترین غلظت

زئولیت بر جذب آهن در گیاهان، به ویژه در افزایش دسترسی به آهن و کاهش عناصر سمی در خاک‌های آلوده قابل توجه است. زئولیت‌ها، به عنوان آلومینوسیلیکات‌های طبیعی، می‌توانند خواص خاک را بهبود بخشند و بر دینامیک مواد مغذی، از جمله جذب آهن در گیاهان تأثیر بگذارند. Bocharnikova و همکاران (۲۰۲۰) اظهار کردند که زئولیت با تحریک رشد سیستم ریشه برای جذب مواد مغذی از جمله آهن بسیار مهم است. در آزمایشی دیگر در بررسی اثر زئولیت و تلقیح میکوریزا بر غلظت برخی عناصر غذایی دانه در ارقام مختلف ذرت گزارش شده است که زئولیت و تلقیح میکوریزایی اثر مثبت و معنی‌داری بر جذب عنصر آهن دانه داشت به طوری که بیشترین غلظت آهن با میانگین ۱۴۳/۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار کاربرد همزمان زئولیت و آربوسکولار حاصل شد

جدول ۱۲- مقایسه میانگین اثر متقابل سال × زئولیت × قارچ میکوریزا بر غلظت روی دانه گندم

روى دانه (میلی گرم در کیلوگرم)	تیمارها		سال
	قارچ میکوریزا	زئولیت (تن در هکتار)	
۳۹/۸ ^t	شاهد		اول
۴۰/۴ ^t	گلو موس موسه آ	۰	
۴۰/۶ ^t	گلو موس اینترادیس		
۴۴/۰ ^{nopr}	موسه آ + اینترادیس		
۴۵/۴ ^{mno}	شاهد		اول
۴۹/۰ ^{ijkl}	گلو موس موسه آ	۶	
۴۹/۹ ^{hijk}	گلو موس اینترادیس		
۵۱/۲ ^{fghi}	موسه آ + اینترادیس		
۴۷/۲ ^{klm}	شاهد		اول
۴۹/۸ ^{hijk}	گلو موس موسه آ	۹	
۵۲/۴ ^{efgh}	گلو موس اینترادیس		
۵۳/۷ ^{ef}	موسه آ + اینترادیس		
۴۸/۲ ^{ijkl}	شاهد		اول
۴۹/۹ ^{hijk}	گلو موس موسه آ	۱۲	
۵۳/۱ ^{efg}	گلو موس اینترادیس		
۶۰/۱ ^{cd}	موسه آ + اینترادیس		
۴۱/۳ st	شاهد		دوم
۴۲/۱ ^{rst}	گلو موس موسه آ	۰	
۴۲/۶ ^{rst}	گلو موس اینترادیس		
۴۳/۵ ^{opr}	موسه آ + اینترادیس		
۴۴/۴ ^{mno}	شاهد		دوم
۵۰/۴ ^{ghij}	گلو موس موسه آ	۶	
۵۴/۴ ^e	گلو موس اینترادیس		
۵۷/۴ ^d	موسه آ + اینترادیس		
۴۴/۹ ^{mno}	شاهد		دوم
۵۳/۵ ^{ef}	گلو موس موسه آ	۹	
۶۰/۲ ^{cd}	گلو موس اینترادیس		
۶۳/۶ ^b	موسه آ + اینترادیس		
۴۶/۸ ^{lmn}	شاهد		دوم
۵۳/۶ ^{ef}	گلو موس موسه آ	۱۲	
۶۱/۵ ^{bc}	گلو موس اینترادیس		
۶۷/۸ ^a	موسه آ + اینترادیس		

میانگین های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی داری با یکدیگر در آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد ندارند.

جذب روی دانه توسط گیاه گندم اشاره کرده‌اند (Hui et al., 2022). در تحقیقی گزارش شد که حضور میکوریزا غلظت روی را در اندام‌های هوایی گندم به میزان ۱۹ درصد و در اندام‌های زیرزمینی تا ۱۴ درصد افزایش داد، این افزایش به تخلیه بیشتر خاک از روی بر اثر نفوذ ریشه‌های نازک قارچی در حفرات ریز خاک نسبت داده شد (نامداری و باغبانی آرانی، ۱۴۰۳). در آزمایشی دیگر گزارش شده است که قارچ‌های میکوریزا قادرند روی را جذب کرده و به گیاه میزبان منتقل کنند، که این امر به افزایش غلظت روی در گیاه، به‌ویژه در شرایط کمبود خاک کمک می‌کند. ویژگی‌های ریشه گیاه مانند سرعت رشد، سرعت جذب عناصر، طول کل ریشه و سطح جذب ریشه در جذب عناصر غذایی غیرمتحرک مؤثر هستند. با افزایش طول و سطح جذب ریشه به واسطه قارچ‌های میکوریزا، غلظت روی در گیاهان افزایش می‌یابد (عالی‌پور و همکاران، ۱۳۹۵). کاربرد کود زئولیت به‌طور قابل توجهی جذب عناصر کم‌مصرف مانند روی و منگنز را در دانه گیاهان افزایش می‌دهند. رطوبت خاک و دسترسی به مواد مغذی را بهبود بخشیده و نه تنها رشد گیاه را افزایش می‌دهد بلکه محتوای روی در گیاهان را نیز بالا می‌برد و به بهبود بهره‌وری کشاورزی و رفع کمبودهای تغذیه‌ای کمک می‌کند. پژوهشگران در بررسی اثر مواد سوپرچاذب زئولیت بر خصوصیات بیوشیمیایی دو رقم لوبیا قرمز در استان لرستان اظهار داشتند که زئولیت اثر مثبت و معنی‌داری بر جذب روی دانه داشت به‌طوری‌که مصرف ۹ تن در هکتار زئولیت با میانگین ۶۶/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم از بیشترین غلظت روی دانه برخوردار بود و نسبت به تیمار شاهد به‌میزان ۹ درصد غلظت روی را افزایش داد (کلایی و همکاران، ۱۴۰۳). افزایش سطوح زئولیت موجب افزایش غلظت پتاسیم در دانه و ریشه شد و محققین زیادی در پژوهش‌های خود در گندم به آن اشاره کرده‌اند (Mahmoud et al., 2020) که مطابق با نتایج حاصل از این تحقیق است.

غلظت مس دانه و ریشه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت مس دانه تحت اثر اصلی زئولیت و تلفیق میکوریزا

روی دانه با میانگین ۶۷/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار تلقیح همزمان با گونه‌های قارچ گلوبوس موسه‌آ + گلوبوس اینترادیس و کاربرد ۱۲ تن در هکتار کود زئولیت در سال دوم مشاهده شد که نسبت به کمترین میزان آن در تیمار عدم تلقیح میکوریزا با غلظت‌های ۹، ۶ تن در هکتار زئولیت و عدم کاربرد زئولیت در سال اول به‌میزان ۴۰ و ۴۲ درصد غلظت روی دانه را افزایش داد (جدول ۱۲).

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه زئولیت × تلقیح میکوریزا بر غلظت روی ریشه گندم نشان داد که تلقیح میکوریزا و کاربرد زئولیت اثر مثبت و معنی‌داری بر غلظت روی ریشه داشت به‌طوری‌که تیمارهای تلقیح با گونه‌های قارچ گلوبوس موسه‌آ + گلوبوس اینترادیس و غلظت ۱۲ تن در هکتار با میانگین ۵۳/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم بیشترین غلظت روی ریشه را به خود اختصاص دادند که با همین تیمار تلقیح میکوریزا در غلظت ۹ تن در هکتار اختلاف معنی‌داری نداشت. همچنین نتایج نشان داد که کمترین غلظت روی ریشه در تیمار شاهد (عدم کاربرد زئولیت و تلقیح میکوریزا) با میانگین ۲۸/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که با تیمار تلقیح همزمان یا جداگانه با گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا در تیمار عدم کاربرد زئولیت اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۸).

روی در بسیاری از سیستم‌های آنزیمی گیاه، نقش کاتالیزوری، فعال‌کننده و یا ساختمانی دارد و در ساخته‌شدن و تجزیه پروتئین‌های گیاه نیز دخیل است و با انتقال اسیدهای آمینه و کاهش تجزیه و تخریب از تجمع اسیدهای آمینه می‌کاهد. کمبود روی یکی از رایج‌ترین کمبودهای ریزمغذی در محصولات زراعی، به‌ویژه غلات در سطح جهانی است که منجر به کاهش شدید عملکرد و کیفیت غذایی محصولات می‌شود. در ایران، بیش از ۶۰ درصد خاک‌های زراعی دچار کمبود روی هستند که این موضوع باعث کاهش ۵۰ درصدی عملکرد محصول شده است. همچنین، در بیش از ۸۰ درصد خاک‌های زراعی ایران، غلظت روی قابل استفاده کمتر از یک میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است (Malakouti, 2007). بسیاری از محققین به نقش مثبت همزیستی میکوریزایی در افزایش

در سطح احتمال خطای یک درصد معنی دار شد (جدول ۵). همچنین غلظت مس ریشه تحت اثر متقابل دوگانه زئولیت × تلقیح میکوریزا در سطح احتمال خطای یک درصد معنی دار گردید (جدول ۶). تغییرات غلظت مس دانه در بین تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا نشان داد که تلقیح با این قارچ‌ها موجب افزایش غلظت مس دانه می‌گردد به طوری که بیشترین غلظت مس دانه با میانگین‌های ۲۶/۵، ۲۶/۴ و ۲۵/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم از تلقیح همزمان یا جداگانه با گونه‌های قارچ گلوموس موسه‌آ و گلوموس اینترارادیس به دست آمد که نسبت به کمترین غلظت مس در تیمار عدم تلقیح میکوریزا به میزان ۱۵ و ۱۲ درصد مس دانه را افزایش دادند. نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی کود زئولیت بر غلظت مس دانه گویای آن بود که زئولیت موجب افزایش این صفت شد به طوری که غلظت‌های ۱۲ و ۹ تن در هکتار به ترتیب با میانگین‌های ۲۶/۶ و ۲۵/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم از بیشترین غلظت مس دانه برخوردار بودند که نسبت به غلظت ۶ تن در هکتار و عدم کاربرد زئولیت به ترتیب به میزان ۸ و ۱۱ درصد غلظت مس دانه را افزایش دادند (جدول ۷).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه زئولیت × تلقیح میکوریزا بر غلظت مس ریشه، تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا در غلظت‌های مختلف زئولیت منجر به افزایش غلظت مس ریشه گندم شد به طوری که بیشترین غلظت مس ریشه با میانگین‌های ۱۹/۹ و ۱۹/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم از تلقیح با قارچ گلوموس اینترارادیس به ترتیب در غلظت‌های ۱۲ و ۹ تن در هکتار زئولیت به دست آمد و نسبت به کمترین غلظت مس در تیمار شاهد (عدم کاربرد زئولیت و عدم تلقیح میکوریزا) به میزان ۲۵ و ۲۱ درصد مس ریشه را افزایش دادند (جدول ۸). همانند عنصر روی، غلظت مس موجود محلول خاک، بسیار اندک است و از طرف دیگر، ضریب پخشیدگی این عنصر در خاک بسیار کم می‌باشد. این دو عامل باعث شده است تا در گیاهان میکوریزایی، غلظت مس جذب‌شده بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزایی باشد (Kaur et al., 2014). در آزمون‌های مزرعه‌ای انجام‌شده، رابطه همزیستی میکوریزایی

منجر به افزایش مس دانه، ریشه و ساقه در گیاه گندم شده است (Turchetto et al., 2022)، لیکن چنین تأثیری در گندم مشاهده شد. در آزمایشی دیگر در اظهار شد که افزایش غلظت مس در گیاه می‌تواند به دلیل افزایش رشد گیاه بر اثر همزیستی میکوریزایی رخ دهد چرا که با افزایش وزن خشک گیاه میزان جذب عناصر غذایی از جمله غلظت مس توسط آن بیشتر می‌شود و خاک را به مقدار بیشتری از عناصر غذایی تخلیه می‌کند. قارچ میکوریزا با جذب عناصر غذایی از طریق گسترش سیستم ریشه‌ای و کاوش خاک به وسیله هیف‌های خارجی در ریشه‌های مویی و کاهش منیزیم به جذب عنصر مس کمک می‌کنند (Khosrojerdi et al., 2013). در گیاه گندم، Abu-Elsaoud و همکاران (۲۰۱۷) مشاهده کردند که همزیستی میکوریزایی با افزایش طول ریشه‌ها و همچنین افزایش سطح جذب توسط ریشه‌های قارچی، جذب مس ریشه و ساقه را به ترتیب از ۳/۳۴ به ۷/۱۷ و از ۳/۰۳ به ۴/۱۱ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش و غلظت مس دانه را از ۱۰/۸۲ به ۴/۹۹ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش داد. زئولیت‌ها می‌توانند عناصر غذایی نظیر مس، آهن، روی، نیتروژن، فسفر و سایر عناصر را در محیط ریشه گیاه نگه داشته و در زمان نیاز گیاه، این عناصر را آزاد نموده و در اختیار گیاه قرار دهند (Stylianou et al., 2004). محققان با بررسی اثر زئولیت بر غلظت عناصر غذایی در لوبیا سبز گزارش کردند که بیشترین غلظت مس غلاف با میانگین ۲۳/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار کاربرد زئولیت غنی‌شده با روی و مس حاصل شد (محمدزاده و همکاران، ۱۴۰۱).

غلظت منگنز دانه و ریشه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت منگنز دانه تحت اثر اصلی زئولیت و تلقیح میکوریزا در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۵). همچنین غلظت منگنز ریشه تحت اثر اصلی زئولیت، اثر متقابل دوگانه سال × زئولیت، سال × تلقیح میکوریزا و اثر متقابل سه‌گانه سال × زئولیت × تلقیح میکوریزا در سطح احتمال خطای یک و پنج درصد معنی دار شد (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی تلقیح میکوریزا بر غلظت منگنز دانه گویای آن بود که

تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا موجب افزایش منگنز دانه شد به طوری که تلقیح گونه‌های گلوموس موسه آ + گلوموس اینترادیس و تلقیح گونه گلوموس اینترادیس به ترتیب با میانگین‌های ۶۳/۶ و ۶۱/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بیشترین غلظت منگنز دانه را به خود اختصاص دادند. کمترین غلظت منگنز دانه نیز در تیمار عدم تلقیح میکوریزا با میانگین ۵۰/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد. در نتایج اثر اصلی زئولیت بر غلظت منگنز دانه نیز مشاهده شد که بیشترین و کمترین غلظت منگنز دانه با میانگین‌های ۶۲/۶ و ۵۴/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب از تیمار ۱۲ تن در هکتار و عدم کاربرد زئولیت به دست آمد (جدول ۷).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه سال × زئولیت × تلقیح میکوریزا بر غلظت منگنز ریشه گندم، تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا و کاربرد کود زئولیت در دو سال زراعی موجب افزایش منگنز ریشه شد به طوری که بیشترین غلظت منگنز ریشه با میانگین ۵۸/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم از تلقیح با قارچ گلوموس اینترادیس و کاربرد ۹ تن در هکتار زئولیت در سال دوم به دست آمد که با اکثر تیمارهای آزمایشی اختلاف معنی‌داری نداشت و نسبت به کمترین غلظت منگنز در تیمار شاهد (عدم تلقیح میکوریزا و عدم کاربرد زئولیت) به میزان ۲۹ درصد منگنز ریشه را افزایش داد (جدول ۱۳).

منگنز یک ریزمغذی ضروری برای رشد گیاه است که در فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف نقش دارد. این عنصر به‌عنوان کوفاکتور آنزیم‌های مرتبط با فتوسنتز، سنتز آنتی‌اکسیدان و دفاع در برابر پاتوژن‌ها عمل کرده و همچنین به جذب مواد مغذی، رشد ریشه و سلامت میکروبی خاک کمک می‌کند (Khoshru *et al.*, 2023). در همزیستی گیاه ذرت با میکوریزا محتوای منگنز خاک کاهش و منگنز اندام‌های هوایی گیاه افزایش نشان داده بود (Dehghanian *et al.*, 2018) که با نتایج آزمایش حاضر مطابقت دارد. ناصری و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی اثر باکتری‌های حل‌کننده فسفات و قارچ میکوریزا بر تجمع عناصر غذایی در ریشه، کاه و کلش و خاک گندم دیم گزارش کردند

که تیمار باکتری سودوموناس و قارچ میکوریزا به دلیل داشتن طول و حجم ریشه قوی‌تر نسبت به تیمار شاهد توانست سطح بیشتری از ریزوسفر خاک را مورد استفاده قرار دهد و با جذب عناصر غذایی از جمله منگنز موجب انتقال آن به اندام‌های هوایی شود. Liu و همکاران (۲۰۰۰) گزارش کردند که شرکت قارچ میکوریزا آریوسکولار در جذب منگنز، آهن، روی و مس به وسیله ذرت توسط سطوح فسفر و عناصر غذایی کم‌مصرف تحت تأثیر قرار گرفته است به طوری که غلظت منگنز با کاربرد قارچ میکوریزا افزایش یافت. از آنجایی که جذب عناصر غذایی ارتباط نزدیکی با میزان رطوبت قابل دسترس دارد و هر چه مقدار رطوبت خاک افزایش یابد جذب عناصر ریزمغذی مانند منگنز بیشتر صورت می‌پذیرد در نتیجه مواد زئولیت از طریق بهبود جذب رطوبت موجب افزایش جذب منگنز در گیاه می‌شوند. بر اساس نتایج Zubkova و همکاران (۲۰۲۲) زئولیت‌ها با دسترسی بیشتر به آب موجب افزایش غلظت جذب منگنز دانه در کلزا به میزان ۲۰ درصد بیشتر از تیمار شاهد گردید. در بررسی کاربرد کود زئولیت و اکسید منگنز بر منگنز دانه و ریشه در گندم، نتایج نشان داد که زئولیت موجب افزایش منگنز شد به طوری که بیشترین غلظت منگنز ریشه و دانه به ترتیب با میانگین‌های ۱۲۰/۳ و ۴۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم با مصرف ۳۸ درصد زئولیت (جرم ۴۶ گرم) حاصل گردید (Wang *et al.*, 2021).

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز تحت اثر اصلی زئولیت و میکوریزا در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۱۴). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین فعالیت کاتالاز با میانگین ۲۸/۶۲ میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی در تلقیح همزمان گلوموس موسه آ + گلوموس اینترادیس مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد به میزان ۷ درصد فعالیت کاتالاز را افزایش داد. بیشترین فعالیت پراکسیداز با میانگین ۱۰۵/۴۵ میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی در تلقیح همزمان گونه‌های گلوموس موسه آ + گلوموس اینترادیس مشاهده شد که با تلقیح گلوموس موسه آ

جدول ۱۳- مقایسه میانگین اثر متقابل سال × ژئولیت × قارچ میکوریزا بر غلظت منگنز ریشه گندم

منگنز ریشه (میلی گرم در کیلوگرم)	تیماها		سال
	قارچ میکوریزا	ژئولیت (تن در هکتار)	
۴۱/۷ ^l	شاهد		اول
۴۵/۷ ^{hijkl}	گلو موس موسه آ	۰	
۴۹/۹ ^{bcdefghijk}	گلو موس اینترادیس		
۴۹/۷ ^{cdefghijk}	موسه آ + اینترادیس		
۵۴/۸ ^{bcde}	شاهد		
۵۱/۷ ^{bcdefghij}	گلو موس موسه آ	۶	
۴۸/۶ ^{defghijkl}	گلو موس اینترادیس		
۵۲/۳ ^{bcdefgh}	موسه آ + اینترادیس		
۵۵/۱ ^{abcde}	شاهد		
۴۶/۲ ^{hijkl}	گلو موس موسه آ	۹	
۴۹/۳ ^{cdefghijk}	گلو موس اینترادیس		
۵۷/۲ ^{ab}	موسه آ + اینترادیس		
۵۵/۹ ^{abcd}	شاهد		دوم
۵۴/۵ ^{abcdef}	گلو موس موسه آ	۱۲	
۴۶/۷ ^{ghijkl}	گلو موس اینترادیس		
۴۶/۴ ^{hijkl}	موسه آ + اینترادیس		
۵۱/۶ ^{bcdefghij}	شاهد		
۵۴/۶ ^{abcdef}	گلو موس موسه آ	۰	
۵۱/۶ ^{bcdefghij}	گلو موس اینترادیس		
۴۷/۸ ^{efghijkl}	موسه آ + اینترادیس		
۵۲/۱ ^{bcdefgh}	شاهد		
۵۴/۲ ^{abcdef}	گلو موس موسه آ	۶	
۴۸/۸ ^{defghijkl}	گلو موس اینترادیس		
۵۱/۹ ^{bcdefghi}	موسه آ + اینترادیس		
۵۶/۵ ^{abcd}	شاهد		
۵۳/۱ ^{bcdefgh}	گلو موس موسه آ	۹	
۵۸/۵ ^a	گلو موس اینترادیس		
۴۳/۱ ^{kl}	موسه آ + اینترادیس		
۴۴/۳ ^{ijkl}	شاهد		۱۲
۴۷/۶ ^{efghijkl}	گلو موس موسه آ		
۴۴/۵ ^{ijkl}	گلو موس اینترادیس		
۴۸/۴ ^{efghijkl}	موسه آ + اینترادیس		

میانگین های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی داری با یکدیگر در آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد ندارند.

جدول ۱۴- تجزیه واریانس مرکب اثر زئولیت و قارچ میکوریزا بر برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت طی دو سال زراعی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		کاتالاز	پراکسیداز
سال	۱	۱۸۱/۵ ^{ns}	۲۶۴۶/۷ ^{ns}
تکرار در سال	۴	۱/۵۶	۲۱/۵
زئولیت	۳	۲۶/۴ ^{**}	۲۲۰/۷ ^{**}
سال × زئولیت	۳	۴/۹ ^{ns}	۴/۶ ^{ns}
قارچ میکوریزا	۳	۲۴/۸ ^{**}	۱۰۹/۲ ^{**}
سال × قارچ میکوریزا	۳	۲/۵ ^{ns}	۴/۵ ^{ns}
زئولیت × قارچ میکوریزا	۹	۴/۴ ^{ns}	۹/۲ ^{ns}
سال × زئولیت × قارچ میکوریزا	۹	۲/۷ ^{ns}	۵/۷ ^{ns}
خطای آزمایش	۶۰	۲/۵	۶۲/۸
ضریب تغییرات (درصد)	-	۵/۸	۷/۷

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی دار، معنی دار در سطوح احتمال خطای پنج و یک درصد

دیسموتاز به ترتیب با میانگین‌های ۲۵/۸۷، ۹۸/۳۰ و ۲۵۰/۱۵ میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی در غلظت ۱۲ تن در هکتار زئولیت مشاهده شد (جدول ۱۵).

کاتالاز و پراکسیداز از جمله آنتی‌اکسیدان‌های مؤثر در سیستم دفاعی اکثر گیاهان در مقابله با تنش‌های غیرزیستی است. این آنزیم‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم پراکسید هیدروژن را به آب و اکسیژن تبدیل کند و سمیت این رادیکال آزاد را به‌طور کامل حذف کنند. کاتالاز یکی از سریع‌ترین آنتی‌اکسیدان‌ها شناخته شده است که می‌تواند کمتر از یک دقیقه شش میلیون رادیکال آزاد پراکسید هیدروژن را به آب و اکسیژن تبدیل نماید. سوپراکسید دیسموتاز جزء متالوآنزیم‌هایی است که سوپراکسید را به پراکسید هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌کند (صفرزاده و همکاران، ۱۳۹۸). تلقیح همزمان قارچ‌های میکوریزا منجر به القای قوی‌تر پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی شد. این تقویت سیستم دفاعی، در کنار افزایش قابل توجه در جذب فسفر، احتمالاً نقش مهمی در بهبود کلی سلامت و پایداری گیاه در برابر فشارهای محیطی داشته است. افزایش همزمان در فسفر (بهبود وضعیت تغذیه‌ای) و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (بهبود وضعیت دفاعی)، یک حالت فنوتیپی مطلوب در گیاهان

و گلوموس اینترادیس اختلاف معنی‌داری نداشت و نسبت به تیمار شاهد ۵ درصد فعالیت پراکسیداز را افزایش داد. همچنین تیمارهای تلقیح با گونه‌های گلوموس موسه‌آ + گلوموس اینترادیس و گلوموس اینترادیس به ترتیب با میانگین‌های ۲۶۴/۲۶ و ۲۶۱/۲۶ میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی، بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را به خود اختصاص دادند و نسبت به تیمار شاهد ۴ درصد فعالیت این آنزیم را افزایش داد (جدول ۱۵).

نتایج مقایسه میانگین زئولیت نشان داد که کاربرد زئولیت موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت شد به‌طوری‌که بیشترین میزان فعالیت کاتالاز با میانگین ۲۸/۷۹ میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی از تیمار شاهد، بیشترین فعالیت پراکسیداز با میانگین‌های ۱۰۵/۴۹، ۱۰۴/۴۶ و ۱۰۳/۴۲ میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی و سوپراکسید دیسموتاز با میانگین‌های ۲۶۴/۲۶، ۲۶۲/۲۵ و ۲۵۹/۲۲ میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی به ترتیب از تیمارهای شاهد و غلظت‌های ۶ و ۹ تن در هکتار زئولیت حاصل شد. بین غلظت‌های ۹ و ۶ تن در هکتار زئولیت از نظر کاتالاز اختلافی معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین کمترین میزان فعالیت کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید

جدول ۱۵- مقایسه میانگین اثرات اصلی قارچ میکوریزا و زئولیت بر برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت گندم

تیماها	کاتالاز	پراکسیداز	سوپراکسید دیسموتاز
	(میلی گرم پروتئین در عصاره آنزیمی)		
قارچ میکوریزا			
شاهد	۲۶/۰۲ ^c	۱۰۰/۳۲ ^b	۲۵۳/۱۸ ^b
گلو موس موسه‌آ	۲۶/۸۸ ^{bc}	۱۰۱/۴۴ ^{ab}	۲۵۷/۲۰ ^{ab}
گلو موس اینترادیس	۲۷/۷۶ ^b	۱۰۳/۴۵ ^{ab}	۲۶۱/۲۶ ^a
موسه‌آ + اینترادیس	۲۸/۶۲ ^a	۱۰۵/۴۵ ^a	۲۶۴/۲۶ ^a
زئولیت (تن در هکتار)			
۰	۲۸/۹۹ ^a	۱۰۵/۴۹ ^a	۲۶۴/۲۶ ^a
۶	۲۷/۶۸ ^b	۱۰۴/۴۶ ^a	۲۶۲/۲۵ ^a
۹	۲۷/۸۵ ^b	۱۰۳/۴۲ ^a	۲۵۹/۲۲ ^a
۱۲	۲۵/۸۷ ^c	۹۸/۳۰ ^b	۲۵۰/۱۵ ^b

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد ندارند.

تحت همزیستی ایجاد می‌کند. نتایج بسیاری از مطالعات بیانگر اثر مثبت میکوریزا بر افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز در گندم است (Faria et al., 2022). در مطالعه کلونیزاسیون، میکوریزا در گندم منجر به فعالیت بالاتر آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز می‌شود (Aljenaby et al., 2022). در گیاه گندم کاربرد قارچ میکوریزا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که قارچ‌های میکوریزایی ضمن همزیستی با گیاه میزبان و جذب فسفر، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز را افزایش می‌دهند (صبغ و همکاران، ۱۳۹۹). زئولیت‌ها به دلیل توانایی در جذب و نگهداری رطوبت موجود در خاک و تأمین متعادل عناصر غذایی موجب ممانعت از بروز تنش خشکی و غذایی و لذا موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز شد. این نتیجه با یافته‌های سایر پژوهشگران روی گندم (Elsawy et al., 2023) و جو (Mahmoud et al., 2021) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد آهن، روی دانه و منگنز ریشه بالاتر

در سال دوم آزمایش که از میزان و توزیع بارش بهتری برخوردار بود، بدست آمد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که همه عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در گیاه گندم رقم چمران تو آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت تحت تأثیر تلقیح میکوریزا و زئولیت قرار گرفت. به طوری که تلقیح همزمان با قارچ‌های گلو موس موسه‌آ + و گلو موس اینترادیس بدون تفاوت معنی‌دار با گونه‌های گلو موس موسه‌آ یا گلو موس اینترادیس اثرات بهبودبخشی بر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، مس و منگنز دانه، فسفر، پتاسیم و آهن ریشه و آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز داشتند. بالاترین غلظت این عناصر نیز در تیمار کاربرد ۱۲ و ۹ تن در هکتار زئولیت به دست آمد. مقایسه میانگین اثر متقابل سال × میکوریزا × زئولیت نشان داد که تیمار تلقیح گلو موس موسه‌آ + گلو موس اینترادیس و کاربرد ۱۲ تن در هکتار زئولیت در سال دوم با میانگین ۶۷/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم و تیمار تلقیح با گلو موس اینترادیس و کاربرد ۱۲ تن در هکتار زئولیت در سال دوم با میانگین ۵۸/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب بیشترین غلظت عناصر روی دانه و مس ریشه را به خود اختصاص دادند. در مجموع، پیشنهاد می‌گردد که در برنامه مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای گندم رقم

چمران ۲، از مایه تلقیح مرکب قارچ‌های میکوریزایی و کود
ژئولیت در مناطق مشابه انجام این تحقیق استفاده شود.

منابع

- امانی‌ماچیانی، مصطفی، جوانمرد، عبدالله، استادی، علی، و مرشدلو، محمدرضا (۱۴۰۰). ارزیابی عملکرد اسانس و شاخص‌های اکولوژیکی در کشت مخلوط آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) و سویا (*Glycine max* L.) با کاربرد قارچ میکوریزا. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۱(۳)، ۳۱-۵۰. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.351323.2835>
- جامی، محمدقاسم، فلاوند، امیر، مدرس‌ثانوی، سید علی محمد، مختصی بیدگلی، علی، باغبانی‌آرانی، ابولفضل، و نامداری، امین (۱۳۹۷). اثر کود دامی، ژئولیت و آبیاری بر ویژگی‌های خاک و عملکرد دانه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.). *نشریه علوم زراعی ایران*، ۲۰(۲)، ۱۵۱-۱۶۷.
- حضرتی، سعید، خوری‌زاد، سارا، و صادقی بختوری، امیررضا (۱۳۹۹). بهبود رشد، عملکرد و کارایی مصرف نیتروژن تحت رژیم‌های مختلف نیتروژن در گیاه دارویی مریم‌گلی با کاربرد ژئولیت. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۹(۳۹)، ۲۷۳-۲۸۸. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.10.059>
- صباغ، سیدکاظم، سرافراز اردکانی، محمدرضا، طاعری، مرضیه، بلوک‌یزدی، حمیدرضا (۱۳۹۹). تأثیر قارچ میکوریزا بر روی فعالیت‌های آنزیمی و شرایط رشدی هشت ژنوتیپ گندم. *تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک*، ۲(۱)، ۵۲-۴۳. <https://doi.org/10.22034/csrar.2020.119122>
- صفرزاده، آرزو، برزین، گیتی، و طالعی، داریوش (۱۳۹۸). اثر نیتریک اکساید و آربوسکولار میکوریزا بر برخی صفات فیزیولوژیک گیاه شیرین‌بیان تحت تنش شوری. *علوم باغبانی*، ۳۳(۱)، ۵۳-۶۴. <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v33i1.68893>
- عالی‌پور، حامد، نیکبخت، علی، اعتمادی، نعمت‌اله، نوربخش، فرشید، و رجالی، فرهاد (۱۳۹۵). بررسی اثر قارچ‌های میکوریزا بر رشد و جذب عناصر غذایی درختان چنار. *مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۶(۲۱)، ۸۱-۹۰. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.6.21.81>
- فیاض، فیروزه، و زاهدی، مرتضی (۱۳۹۹). اثرات تلقیح با قارچ میکوریزا و ازتوباکتر بر رشد و پاسخ‌های اکسیداتیو گندم به تنش شوری و آلودگی کادمیم. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۹(۳۹)، ۲۵۷-۲۷۲.
- کلایی، امیر، رفیعی، مسعود، خورگامی، علی، و طالشی، کاظم (۱۴۰۳). اثر کود دامی- شیمیایی و ژئولیت بر صفات مورفو- فیزیولوژیک دو رقم لوبیا قرمز (*Phaseolus vulgaris* L.). *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۷(۱)، ۸۰-۵۹. <https://doi.org/10.22069/EJCP.2024.21648.2597>
- محمدزاده، مهیار، نیک‌نژاد، یوسف، فلاح‌آملی، هرمز، براری، داوود، و باغبانی، سیدمیثم (۱۴۰۱). اثر ژئولیت و کود مرغی غنی‌شده با روی و مس بر ویژگی‌های زراعی و فیزیولوژیکی لوبیا سبز. *پژوهش‌های حبوبات ایران*، ۱۳(۱)، ۹۹-۱۱۲. <https://doi.org/10.22067/ijpr.v13i1.2105-1007>
- ناصری، رحیم، براری، مهرشاد، زارع، محمدجواد، خاوازی، کاظم، و طهماسبی، زهرا (۱۳۹۸). میزان تجمع باقیمانده عناصر غذایی در ریشه، گاه و کلش و خاک گندم دیم تحت کاربرد باکتری‌های حل‌کننده فسفات و قارچ میکوریزا. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۷(۴)، ۱۷۹-۱۹۵.
- نامداری، امین، و باغبانی‌آرانی، ابولفضل (۱۴۰۳). تأثیر بقایای گیاهی، همزیستی میکوریزایی و سولفات‌روی در تناوب لگوم و غیرلگوم بر جذب عناصر غذایی و عملکرد گندم. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۵(۲)، ۷۳-۸۸. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.362563.655020>
- AbdEL-Azeiz, E. H., Elsonbaty, A., & Elsherpiny, M. A. (2024). Enhancing the quantitative and qualitative traits of wheat grown with low mineral nitrogen level through zeolite, sorbitol and copper. *Egyptian Journal of Soil Science*,

- 64(3), 1053-1067. <https://doi.org/10.21608/EJSS.2024.285238.1755>
- Abu-Elsaoud, A. M., Nafady, N. A., & AbdelAzeem, A. M. (2017). Arbuscular mycorrhizal strategy for zinc mycoremediation and diminished translocation to shoots and grains in wheat. *Plos One*, *12*(11), e0188220. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188220>
- Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, *105*, 121-126. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3)
- Aljenaby, H. K., Mohammed, B. T., & Al-Semmak, Q. H. (2022). The interaction between the mineral and nano zinc with mycorrhiza on the concentration of some nutrients, the ratio of K/Na and the proportion of protein in grains of wheat (*Triticum aestivum* L.) irrigated with saline water. *Neuro Quantology*, *20*(12), 1183. <https://doi.org/10.14704/NQ.2022.20.12.NQ77099>
- Al-Karaki, G. N., Al-Raddad, A., & Clark, R. B. (1998). Water stress and mycorrhizal isolates effects on growth and nutrient acquisition of wheat. *Journal of Plant Nutrition*, *21*, 891-902. <https://doi.org/10.1080/01904169809365451>
- Amirahmadi, E., Ghorbani, M., & Moudry, J. (2022). Effects of zeolite on aggregation, nutrient availability, and growth characteristics of corn (*Zea mays* L.) in cadmium-contaminated soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, *233*(11), 436. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05910-4>
- Aslan, M. U., & Arslan, H. (2024). The effect of zeolites on soil and plant: A review. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *55*(14), 2197-2216. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2346211>
- Azimnejad, A., Fallah Amoli, H., Niknejad, Y., Ahmadpour, A., & Barari Tari, D. (2023). Fertilizer management strategies for improved quality and yield in winter wheat. *SN Applied Sciences*, *5*(8), 227. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05440-6>
- Bago, B., Pfeffer, P., & Shachar-Hill, Y. (2001). Could the urea cycle be translocating nitrogen in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist*, *149*, 4-8. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00016.x>
- Beslemes, D., Tigka, E., Roussis, I., Kakabouki, I., Mavroeidis, A., & Vlachostergios, D. (2023). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on nitrogen and phosphorus uptake efficiency and crop productivity of two-rowed barley under different crop production systems. *Plants*, *12*(9), 1908. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10633>
- Bocharnikova, E. A., Shabayev, V. P., Ostroumov, V. E., & Demin, D. V. (2020). Natural zeolites: Prospects for heavy metal polluted soil remediation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *921*(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/921/1/012003>
- Cataldo, E., Salvi, L., Paoli, F., Fucile, M., Masciandaro, G., Manzi, D., Masini, C. M., & Mattii, G. B. (2021). Application of zeolites in agriculture and other potential uses: A review. *Agronomy*, *11*, 1547. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081547>
- Choudhury, M. A., & Khanif, Y. M. (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.
- Da Silva, L. I., Pereira, M. C., de Carvalho, A. M. X., Buttros, V. H., Pasqual, M., & Doria, J. (2023). Phosphorus-solubilizing microorganisms: A key to sustainable agriculture. *Agriculture*, *13*(2), 462. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>
- Dehghanian, H., Halajnia, A., Lakzian, A., & Astaraei, A. R. (2018). The effect of earthworm and arbuscular mycorrhizal fungi on availability and chemical distribution of Zn, Fe and Mn in a calcareous soil. *Applied Soil Ecology*, *130*, 98-103. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.06.002>
- Dhiman, M., Sharma, L., Kaushik, P., Singh, A., & Sharma, M. M. (2022). Mycorrhiza: An ecofriendly bio-tool for better survival of plants in nature. *Sustainability*, *14*, 10220. <https://doi.org/10.3390/su141610220>
- Ebrahimi Chamani, H., Fallah Amoli, H., Niknejad, Y., & Barari Tari, D. (2022). Effects of zeolite and biofertilizers on yield components, yield and nutrients uptake in grains of two corn cultivars (cv. 6010 and ns71). *Journal of Plant Nutrition*, *45*(11), 1670-1681. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.2014876>
- El Mazouni, N., Mesnaoui, M., Labbilita, T., Ait-El-Mokhtar, M., Khoulood, M., & Meddich, A. (2025). Formulating a fertilizer based on vitreous fertilizers and arbuscular mycorrhizal fungi to improve wheat growth and yield under water stress. *Journal of Crop Health*, *77*(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s10343-024-01094-5>
- El Sheikha, A. F., & Ray, R. C. (2017). Potential impacts of bioprocessing of sweet potato. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *57*(3), 455-471. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.960909>
- Elsawy, H. I., Mohamed, A. M., Mohamed, E. N., & Gad, K. I. (2023). The Potential of a mixture of zeolite, calcium, and organic compounds on mitigating the salinity stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Egyptian Journal of Agricultural Research*, *101*(2), 362-381. <https://doi.org/10.21608/EJAR.2023.194831.1368>
- FAO. (2024). World Food and Agriculture Statistical Pocketbook. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Faria, J. M., Pinto, A. P., Teixeira, D., Brito, I., & Carvalho, M. (2022). Diversity of native arbuscular mycorrhiza extraradical mycelium influences antioxidant enzyme activity in wheat grown under Mn toxicity. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *108*(3), 451-456. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03240-5>

- Farid, I., Abbas, M. H., & El-Ghozoli, A. (2023). Increasing wheat production in arid soils: Integrated management of chemical, organic-and bio P and K-inputs. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 7(2023), 163-178. <https://doi.org/10.21608/jenvbs.2023.221177.1223>
- Giannopolitis, C. N., & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59(2), 309-314. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.59.2.309>. 1997
- Gruener, J. E., Ming, D. W., Galindo, C., Henderson, K. E., & Golden, D. C. (2007). Plant productivity and characterization of zeoponic substrates after three successive crops of radish (*Raphanus sativus* L.). *Microporous and Mesoporous Materials*, 105, 279-284. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.04.016>
- Han, A. Q., Chen, S. B., Zhang, D. D., Liu, J., Zhang, M. C., Wang, B., Xiao, Y., Liu, H. T., Guo, T. C., & Kang, G. Z. (2025). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and nutrient uptake in wheat under low potassium stress. *Plants*, 14, 1288. <https://doi.org/10.3390/plants14091288>
- Hui, X., Wang, X., Luo, L., Wang, S., Guo, Z., Shi, M., & Wang, Z. (2022). Wheat grain zinc concentration as affected by soil nitrogen and phosphorus availability and root mycorrhizal colonization. *European Journal of Agronomy*, 134, 126469. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126469>
- Hussain, S., Sharif, M., & Ahmad, W. (2021). Selection of efficient phosphorus solubilizing bacteria strains and mycorrhiza for enhanced cereal growth, root microbe status and N and P uptake in alkaline calcareous soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(3), 259-268. <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1904793>
- Islam, M. A. (2022). Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Plant Growth, Yield, and Plant-Parasitic Nematode Control in Organic Tomato Production: A Field Study and a Systematic Review. Hochschule Rhein-Waal: Westfalen, Germany.
- Jabbar, H. A. (2025). Zeolite application improves soil structure and water retention in agriculture. *Academia Open*, 10(1), 10-21070. <https://doi.org/10.21070/acopen.10.2025.11393>
- Kaur, L., Rattan, P., Reddy, A. H., & Sharma, A. (2023). Effect of organic manures and bio-fertilizers on growth and yield of radish (*Raphanus sativus* L.). *The Pharma Innovation Journal*, 12(7), 1249-1254.
- Kaur, R., Singh, A., & Kang, J. S. (2014). Influence of different types mycorrhizal fungi on crop productivity. *Current Agriculture Research Journal*, 2(1), 51-54. <http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.2.1.07>
- Khaliq, A., Shehzad, M., Huma, M. K., Tahir, M. M., Javeed, H. M. R., Saeed, M. F., Jamal, A., Mihoub, A., Radicetti, E., & Mancinelli, R. (2024). Synergistic effects of urea, poultrymanure, and zeolite on wheat growth and yield. *Soil System*, 8, 18. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010018>
- Khoshru, B., Mitra, D., Nosratabad, A. F., Reyhanitabar, A., Mandal, L., Farda, B., & Mohapatra, P. K. D. (2023). Enhancing manganese availability for plants through microbial potential: A sustainable approach for improving soil health and food security. *Bacteria*, 2(3), 129-141. <https://doi.org/10.3390/bacteria2030010>
- Khosrojerdi, M., Shahsavani, Sh., Gholipor, M., & Asghari, H. R. (2013). Effect of rhizobium inoculation and mycorrhizal fungi on some nutrient uptake by chickpea at different levels of iron sulfate fertilizer. *Electronic Journal of Crop Production*, 6(3), 71-87. <https://doi.org/10.1.2008739.1392.6.3.5.5>
- Li, X. L., & Christie, P. (2001). Changes in soil solution Zn and pH and uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal red clover in Zn contaminated soil. *Chemosphere*, 42, 201-207. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00126-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00126-0)
- Liu, A., Hamel, C., Hamilton, R. I., Ma, B. L., & Smith, D. L. (2000). Acquisition of Cu, Zn, Mn, and Fe by mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) grown in soil at different P and micronutrient levels. *Mycorrhiza*, 9, 331-336. <https://doi.org/10.1007/s005720050277>
- Ma, L., Song, Y., Wang, J., Shan, Y., Mao, T., Liang, X., & Zhang, H. (2023). Porous minerals improve wheat shoot growth and grain yield through affecting soil properties and microbial community in coastal saline land. *Agronomy*, 13(9), 2380. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092380>
- Mahmoud, A. W. M., Abdeldaym, E. A., Abdelaziz, S. M., El-Sawy, M. B., & Mottaleb, S. A. (2020). Synergetic effects of zinc, boron, silicon, and zeolite nanoparticles on confer tolerance in potato plants subjected to salinity. *Agronomy*, 10(1), 19. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010019>
- Mahmoud, A. W. M., Mottaleb, A. Z. A., Rowezak, S. A., & Salama, M. M. (2021). The role of nano-silicon and other soil conditioners in improving physiology and yield of drought stressed barley crop. *Agriculture (Polnohospodárstvo)*, 67(3), 124-143. <https://doi.org/10.2478/agri-2021-0012>
- Malakouti, M. J. (2007). Zinc is a neglected element in the life cycle of plants. Middle Eastern and Russian. *Journal of Plant Science and Biotechnology*, 1(1), 1-12.
- Mardoukhi, B., Rejali, F., Malakouti, M. J., & Mardoukhi, V. (2008). Evaluation of AM fungi effect on yield and yield component of two wheat cultivars at different levels of salinity. *Iranian Journal of Soil Research*, 22(1), 83-95. <https://doi.org/10.22092/IJSR.2008.126988>
- Marrassini, V., Ercoli, L., Piazza, G., & Pellegrino, E. (2024). Plant genotype and inoculation with indigenous arbuscular mycorrhizal (AM) fungi modulate wheat productivity and quality of processed products through changes in the frequency of root AM fungal taxa. *Field Crops Research*, 315, 109456. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109456>

- Meddad, A. (2017). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and fertilization levels on industrial tomato growth and production. *International Journal of Agriculture and Biology*, 19(2), 341-347. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0287>
- Mirzakhani, M., & Maleki, G. R. (2015). Evaluation of some physiological characteristics of wheat under water stress and zeolite application. *Applied Field Crops Research*, 28(107), 58-66.
- Nguyen, T. D., Sai, N., Johnson, A. A., Lombi, E., Smith, E., Doolette, C. L., & Watts-Williams, S. J. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi increase aleurone layer zinc concentration but reduce overall zinc bioavailability in rice grain. *Plants, People, Planet*, 1-12. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10633>
- Raju, P. S., Clark, R. B., Ellis, J. R., & Maranville, J. W. (1990). Effects of species of VA-mycorrhizal fungi on growth and mineral uptake of sorghum at different temperature. *Plant and Soil*, 121, 165-170.
- Sairam, R. K., Rao, K. V., & Srivastava, G. (2002). Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. *Plant Science*, 163, 1037-1046. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00278-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00278-9)
- Sarkar, S., Upadhyay, P. K., Mitran, T., Rathore, S. S., Singh, R. K., Shekhawat, K., & Singh, V. K. (2025). The multifaceted role of zeolites in modern agriculture and environmental management. *Journal of Plant Nutrition*, 1-28. <https://doi.org/10.1080/01904167.2025.2518245>
- Shady, M. A., Ibrahim, I., & Afify, A. H. (1984). Mobilization of elements and their effects on certain plant growth characteristics as influenced by some silicate bacteria. *Egyptian Journal of Anaesthesia Botany*, 27(1-7), 17-30.
- Smith, S. E., & Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology*, 63, 227-250. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103846>
- Stylianou, M. A., Inglezakis, V. J., & Loizidou, M. D. (2004). Effects of zeolite addition on soil chemistry- open field experiments. *Protection and Restoration of the Environment*, 11, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.06.009>
- Sun, Y., Xie, J., Hou, H., Li, M., Wang, Y., & Wang, X. (2023). Effects of zeolite on physiological characteristics and grain quality in rice under alternate wetting and drying irrigation. *Water*, 15(13), 2406. <https://doi.org/10.3390/w15132406>
- Turchetto, R., Volpi, G. B., da Silva, R. F., da Ros, C. O., da Rosa, G. M., Barros, S., & da Silva, A. P. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi in wheat grown in copper contaminated soil. *Semina: Ciências Agrárias Londrina*, 43(4), 1579-1594. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n4p1579>
- Voucko, B., Bartkiene, E., Rakszegi, M., & Rocha, J. M. F. (2025). Wheat: From nutrition to cultivation and technology. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1563397. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1563397>
- Waling, I., Van Vark, W., Houba, V. J. G., & Van Der Lee, J. J. (1989). Soil and Plant Analysis, a Series of Syllabi part 7. Plant Analysis Procedures. Wageningen Agriculture University.
- Wang, W., Lu, T., Liu, L., Yang, X., Sun, X., Qiu, G., ... & Zhou, D. (2021). Zeolite-supported manganese oxides decrease the Cd uptake of wheat plants in Cd-contaminated weakly alkaline arable soils. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126464. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126464>
- Watts-Williams, S. J., & Gilbert, S. E. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi affect the concentration and distribution of nutrients in the grain differently in barley compared with wheat. *Plants, People, Planet*, 3(5), 567-577. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10090>
- Watts-Williams, S. J., Gill, A. R., Nguyen, T. D., Tavakkoli, E., Jewell, N., & Brien, C. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi can improve the water use and phosphorus acquisition efficiencies of aerobically grown rice. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 4(1), e70040. <https://doi.org/10.1002/sae2.70040>
- Wen, Z., Chen, Y., Liu, Z., & Meng, J. (2022). Biochar and arbuscular mycorrhizal fungi stimulate rice root growth strategy and soil nutrient availability. *European Journal of Soil Biology*, 113, 103448. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103448>
- Zhang, L., Shi, N., Fan, J., Wang, F., George, T. S., & Feng, G. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi stimulate organic phosphate mobilization associated with changing bacterial community structure under field conditions. *Environmental Microbiology*, 20(7), 2639-2651. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14289>
- Zheng, J., Chen, T., Chi, D., Xia, G., Wu, Q., Liu, G., & Siddique, K. H. (2019). Influence of zeolite and phosphorus applications on water use, P uptake and yield in rice under different irrigation managements. *Agronomy*, 9(9), 537. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090537>
- Zubkova, T. V., Vinogradov, D. V., & Dubrovina, O. A. (2022). Effect of zeolite on the micro-morphological and biochemical features of the spring rapeseed (*Brassica napus* L.). *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 54(1), 153-164. <http://doi.org/10.54910/sabrao2022.54.1.14>

Effect of mycorrhizal fungi and different levels of zeolite on the activity of antioxidant enzymes and the concentration of macro- and micro-elements in grain and root of water wheat plant (Chamran 2 cultivar)

Maryam Asadipoor¹, Ali Khorgami¹ and Manouchehr Sayahfar²

¹ Department of Agronomy, Khor. C., Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

² Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khorramabad, Iran

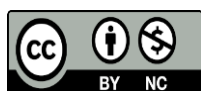
Abstract

The effect of mycorrhizal fungi application and different levels of zeolite on the concentration of macro- and microelements in the grain and root of irrigated wheat (Chamran 2 cultivar) was investigated. A factorial experiment in a completely randomized block design with three replications was conducted in Khorramabad during the two cropping seasons of 2022 and 2023. The studied factors included mycorrhizal fungi at 4 levels (control, *Glomus mosseae*, *Glomus intraradices*, and *Glomus mosseae* + *Glomus intraradices*) and zeolite application (0, 6, 9, and 12 ton h⁻¹). The results showed that the simultaneous use of mycorrhizal fungi and zeolite at high levels increased the concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, copper, and manganese in the grain, and phosphorus, potassium, and iron in the root. The highest concentration of root nitrogen (1.5%), grain iron (170.8 mg kg⁻¹), and root zinc (53.9 mg kg⁻¹) was observed in the treatment inoculated with *Glomus mosseae* + *Glomus intraradices* and 12 tons per hectare of zeolite. Zeolite fertilizer reduced the activity of catalase, peroxidase, and superoxide dismutase enzymes. Based on the results of the mean comparison of the year × mycorrhiza × zeolite interaction, the treatment inoculated with *Glomus mosseae* + *Glomus intraradices* and 12 tons h⁻¹ of zeolite in the second year with an average of 67.8 mg kg⁻¹, and the treatment inoculated with *Glomus intraradices* and 12 tons h⁻¹ per hectare of zeolite in the second year with an average of 58.5 mg kg⁻¹, respectively, had the highest concentrations of zinc in the grain and copper in the root. In general, it can be concluded that the use of *Glomus mosseae* + *Glomus intraradices* fungi along with soil amendment (zeolite) in Chamran wheat fields can improve the concentration of elements in the wheat grain and root and play an important role in sustainable plant production.

Keywords: Iron, Peroxidase, Zinc, Copper, Nitrogen

Received: Sep. 15, 2025; Revised: Nov. 18, 2025; Accepted: Des. 08, 2025; Published Online: June. 02, 2026

*Corresponding Author: 0070588554@iau.ir



Copyright © 2025 Iranian Society of Plant Physiology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.