Journal of
Plant Environmental Physiology

Print ISSN: 2423-7671
Online ISSN: 2783-4689

Islamic Azad University
Gorgan Branch

PSI
انجمن جلبک شناسی ایران
Phycological Society of Iran

Evaluation of some root growth traits and activity of enzyme and nonenzyme antioxidants of different cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* var. *durum*) effected by phosphorous fertilizer and mycorrhizal fungi in rainfed condition

Houshang Naseri Rad[1*], Rahim Naseri[2]

[1] Department of Agriculture, Payame Noor University. Tehran. Iran. E-mail: hgnaseri@pnu.ac.ir
[2] Department of Plant Production Technology, Dehloran Faculty of Agriculture and Engineering, Ilam University, Ilam, Iran, Email: r.naseri@ilam.ac.ir

Article type:
Research article

Article history
Received: 21.03.2021
Revised: 29.10.2021
Accepted: 02.11.2021
Published: 22.02.2023

Keywords
Glutathione synthetase
Malondialdehyde
Root length density
Root water content
Superoxide dismutase

Abstract

In order to evaluate the effect of mycorrhizal fungi and phosphorous fertilizer on some root growth traits and activity of enzyme and nonenzyme antioxidants of durum wheat in rainfed conditions, an experiment was carried out as factorial based on a randomized complete block design with three replications at Sarableh Agricultural Research station during growing season 2018-2019. Four cultivars of durum wheat (Dehdasht, Zahab, Savarz and Saji) as the first factor and five levels of fertilizer source (control, 25 and 50 kg.ha^{-1} P, mycorrhizal fungi (GM), mycorrhizal fungi + 25 kg.ha^{-1} P) as the second factor were considered. The average comparison results of simple effects indicated that Zahab and Saji cultivars among cultivars and combination treatment of mycorrhizal + 25 kg / ha P and then 50 kg / ha P had the greatest effect on improving the studied traits. The interaction effect of cultivars and fertilizer sources revealed that the combined use of phosphorous fertilizer and mycorrhizal fungi had better results compared to their use alone. So that, the highest fresh and dry weight, length density, and root water content and activity of ascorbate peroxidase, peroxidase, catalase, superoxide dismutase and glutathione synthetase was obtained in combined treatment of mycorrhizal and phosphorus fertilizer at Zahab and Saji cultivars. However, the lowest specific root length, and malondialdehyde and hydrogen peroxide activity were obtained in the same treatment and cultivars. In general, the results showed that inoculation with mycorrhizal fungi in rainfed conditions, especially in Zahab and Saji cultivars, in addition to reducing the application of phosphorus fertilizer can improve root growth characteristics and activity of enzyme and nonenzyme antioxidants. As a result, it reduces the peroxidation of membrane lipids (the decline in production of malondialdehyde and hydrogen peroxide) and increases drought stress tolerance.

Cite this article as: Naseri Rad, H., Naseri, R. (2022). Evaluation of some root growth traits and activity of enzyme and nonenzyme antioxidants of different cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum var. durum*) effected by phosphorous fertilizer and mycorrhizal fungi in rainfed condition. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 68(4): 1-23.

©The author(s)
Publisher: Islamic Azad University, Gorgan branch
Doi: 10.30495/iper.2022.690239
Dor: 20.1001.1.24237671.1401.17.68.7.6

فیزیولوژی محیطی گیاهی
شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۷۶۷۱
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۶۸۹
دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان
PSI انجمن جلبک شناسی ایران Phycological Society of Iran

ارزیابی برخی صفات رشدی ریشه و فعالیت آنتی اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی ارقام مختلف گندم دوروم (*Triticum turgidum* var. *durum*) تحت تاثیر کود فسفر و قارچ مایکوریزا در شرایط دیم

هوشنگ ناصری‌راد[1*]، رحیم ناصری[2]

۱ استادیار گروه علوم کشاورزی دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، رایانامه: hgnaseri@pnu.ac.ir

۲ گروه تکنولوژی تولیدات گیاهی، آموزشکده فنی مهندسی و کشاورزی دهلران، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران، رایانامه: r.naseri@ilam.ac.ir

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱
تاریخ چاپ: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳

واژه‌های کلیدی:
تراکم طول ریشه
سوپراکسیددسموتاز
گلوتاتیون سنتتاز مالون دی آلدئید
محتوی آب ریشه

چکیده

به منظور بررسی تاثیر قارچ مایکوریزا و کود فسفر بر برخی ویژگی‌های رشدی ریشه و فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی گندم دوروم در شرایط دیم، آزمایشی مزرعه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه‌ی مرکز تحقیقات کشاورزی سرابله در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ انجام شد. چهار رقم گندم دوروم (دهدشت، ذهاب، ساورز و ساجی) به عنوان فاکتور اول و پنج سطح منبع کودی (عدم مصرف کود، ۲۵ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر، قارچ مایکوریزا (GM) و ترکیب قارچ مایکوریزا +۲۵ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر) به‌عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شدند. نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده نشان داد که در بین ارقام، رقم‌های ذهاب و ساجی و در بین منابع کودی، تیمار ترکیبی مایکوریزا + ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر و پس از آن ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر بیشترین تاثیر را در بهبود صفات مورد مطالعه داشتند. اثر متقابل رقم و منابع کودی مشخص نمود که استفاده تلفیقی از کود فسفر و قارچ مایکوریزا نتایج بهتری در مقایسه با کاربرد آنها به تنهایی دارد. به طوریکه بیشترین وزن‌تر و خشک، تراکم طول و محتوی آب ریشه و فعالیت آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسیددسموتاز و گلوتاتیون سنتتاز از تیمار تلفیقی مایکوریزا و کود فسفر و در اقام ذهاب و ساجی حاصل شد. اگرچه، کمترین طول مخصوص ریشه، فعالیت مالون دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن در همین تیمار و ارقام به دست آمد. به‌طورکلی، نتایج نشان داد که تلقیح با قارچ مایکوریزا در شرایط دیم به ویژه در ارقام ذهاب و ساجی علاوه بر کاهش مقدار کاربرد کود شیمیایی فسفره می‌تواند از طریق بهبود ویژگی‌های رشدی ریشه و به دنبال آن افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی باعث کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء (کاهش تولید مالون دی آلدئید و پراکسید هیدروژن) و در نتیجه افزایش تحمل به تنش خشکی شود.

استناد: ناصری‌راد، هوشنگ؛ ناصری، رحیم. (۱۴۰۱). ارزیابی برخی صفات رشدی ریشه و فعالیت آنتی اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی ارقام مختلف گندم دوروم (*Triticum turgidum* var. *durum*) تحت تاثیر کود فسفر و قارچ مایکوریزا در شرایط دیم. *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۶۸ (۴)، ۲۳-۱.

Doi: 10.30495/iper.2022.690239
Dor: 20.1001.1.24237671.1401.17.68.7.6

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

فسفر یکی از عناصر غذایی ضروری است که عملکرد کلیدی در متابولیسم کربوهیدرات و سیستم انتقال انرژی گیاهان دارد. فسفر جزء حیاتی مولکول‌های DNA، RNA، ATP و فسفولیپیدها است، به‌طوری که کمبود این عنصر می‌تواند بسیاری از فرآیندهای متابولیکی گیاه از جمله تقسیم و توسعه سلولی، تنفس و فتوسنتز را کاهش دهد (Sims and Sharpley, 2005). یکی از روش‌های تامین نیاز فسفر گیاهان به وسیله‌ی کودهای شیمیایی است، اما متاسفانه مقدار زیادی از فسفر موجود در این کودها پس از ورود به زمین به شکل نامحلول درآمده و از دسترس گیاهان خارج می‌شود (Adhya et al., 2015). به‌طوری‌که کارایی کودهای شیمیایی فسفر در خاک‌های قلیایی و آهکی کمتر از ۲۰ درصد گزارش شده است (Tisdale et al., 1993). علاوه بر کاربرد کودهای شیمیایی، یکی از روش‌های جایگزین به منظور تامین فسفر موردنیاز گیاهان استفاده از منابع بیولوژیکی است، تحقیقات انجام گرفته در سراسر جهان نشان می‌دهد که کاربرد کودهای بیولوژیکی می‌تواند دسترسی گیاهان به فسفر خاک را افزایش دهد و مانع مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی شود (Zahir et al., 2006). در این رابطه نتایج آزمایش‌های مختلف نشان داد که تلفیق کودهای بیولوژیک (قارچ مایکوریزا و باکتری‌های حل‌کننده فسفات) به همراه کودهای شیمیایی فسفره بر روی گیاهانی مانند سورگوم و ذرت باعث کاهش ۵۰ درصدی کاربرد کود شیمیایی فسفره شد (Yazdani et al., 2009; Heydari et al., 2014). قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار از جمله مهمترین کودهای بیولوژیک هستند که از طریق تولید آنزیم فسفاتاز و تسهیل هیدرولیز فسفر از ترکیبات طبیعی آن باعث افزایش جذب فسفر و رشد گیاهان می‌شوند (Koide and Kabir, 2000; Baum et al., 2015). در حقیقت، قارچ مایکوریزا آربسکولار در طول همزیستی خود با ریشه‌ی گیاهان میزبان از طریق توسعه سیستم ریشه به وسیله‌ی شبکه هیف مانند خود نه تنها باعث بهبود جذب آب و کاهش اثرات زیانبار تنش خشکی می‌شود (Augé et al., 2007)، بلکه سبب افزایش جذب عناصر غذایی موردنیاز گیاه نیز می‌گردد (Omirou et al., 2013). طی آزمایشی که اثر قارچ مایکوریزا بر روی گندم تحت شرایط تنش آبی مورد بررسی قرار گرفت، مشخص گردید که کاربرد مایکوریزا سبب افزایش وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی گندم در مقایسه با شاهد شد (Khalvati et al., 2005). Bagayoko و همکاران (2000) نیز با بررسی اثر مایکوریزا و فسفر بر روی رشد و جذب عناصر غذایی سورگوم گزارش کردند که گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا و کود فسفر در مقایسه با گیاهان شاهد وزن خشک ریشه و شاخه‌ی سورگوم را به‌طور معنی‌داری افزایش دادند. همچنین Shao و همکاران (2021) نشان دادند که تیمار گیاهان چای با مایکوریزا باعث افزایش طول کل ریشه، طول ریشه‌های موئین و تعداد ریشه‌های جانبی نسبت به گیاهان شاهد شد.

همزیستی قارچ مایکوریزا با ریشه‌ی گیاهان همچنین باعث بهبود هدایت هیدرولیکی ریشه، تبادلات گازی گیاه (Bárzana et al., 2014)، تنظیمات اسمزی (Aroca et al., 2007) و تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Bompadreet al., 2014). یکی از راهکارهای که گیاهان برای مقابله یا تعدیل اثر تنش بکار می‌گیرند، تولید آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی از جمله سوپراکسیددسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز، گلوتاتیون ردوکتاز، پلی فنل اکسیداز و آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی مانند آسکوربات و گلوتاتیون است (Agarwal and Pandy, 2004). این آنزیم‌ها باعث کاهش گونه‌های فعال اکسیژن و

محافظت سلول‌ها در برابر تنش اکسیداتیو می‌شوند (Cheynier et al., 2013). در این زمینه گزارش شده است که کودهای زیستی سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شوند (Ma et al., 2011). همچنین طی پژوهشی دیگر مایه‌زنی گندم با قارچ مایکوریزا آربسکولار سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز شد (Khalafallah et al., 2008). Zhu و همکاران (۲۰۱۱) نیز طی مطالعه خود گزارش کردند که تلقیح گیاه ذرت با قارچ مایکوریزا آربسکولار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز را افزایش داد.

گندم دوروم (*Triticum durum* L.) جزء گندم‌های تتراپلوئید است که پس از گندم نان از نظر تامین انرژی و پروتئین دارای بیشترین اهمیت است (Oleson, 1996). این نوع گندم برای تهیه محصولات خمیری از جمله ماکارونی و اسپاگتی کاربرد دارد (Abaye et al., 1997). از آنجایی که در ایران بیش از نیمی از سطوح زیرکشت گندم به صورت دیم هستند، این گیاه با تنش‌های مختلف خشکی و شوری همراه است (Ministry of Agriculture-Jahad, 2016). همانطور که بیان شد کودهای زیستی اثر مثبتی در کاهش تنش خشکی، حل کردن فسفات نامحلول در خاک و از این‌رو کاهش خطرات زیست محیطی دارند (Attarzadeh et al., 2019). بنابراین هدف از این مطالعه بررسی رشد ریشه و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی تحت تاثیر کاربرد ترکیبی کود فسفر و قارچ میکوریزا آربسکولار بر روی گندم دوروم تحت شرایط دیم بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه مرکز تحقیقات کشاورزی سرابله با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ٤٥ دقیقه و با طول جغرافیایی ٣٤ درجه و ٤٦ دقیقه و ارتفاع ۹۷۵ متر از سطح دریا در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد. اطلاعات هواشناسی منطقه مورد آزمایش شامل بارندگی، رطوبت و دما در جدول ۱ ارائه شده است.

تیمارهای آزمایشی شامل چهار رقم گندم دوروم (دهدشت، ذهاب، ساورز و ساجی) و پنج سطح منابع کودی شامل: ۱- تیمار شاهد (عدم مصرف کود) ۲- ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر ۳- قارچ مایکوریزا (GM) ٤- قارچ مایکوریزا +۲۵ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر و ۵- ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر (۱۰۰٪ درهکتار فسفر) بودند. ابعاد هر کرت آزمایش هشت مترمربع بود که داخل آن تعداد هشت ردیف در نظر گرفته شد، به‌گونه‌ای‌که طول هر ردیف چهار متر و فاصله بین ردیف ۲۰ سانتی‌متر بود. تکرارهای آزمایش نیز با فاصله یک متر ایجاد شدند. همچنین مقدار بذر مصرفی برای هر هکتار ۱۲۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد. کودهای نیتروژن و فسفر براساس آزمون خاک (جدول ۲) مورد استفاده قرار گرفتند. کود فسفر مورد نیاز گیاه از منبع سوپر فسفات تریپل تهیه و در زمان کاشت مصرف گردید. کود نیتروژن نیز به میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار در دو مرحله‌ی کاشت و شروع ساقه‌دهی به زمین داده شد. لازم به ذکر است که براساس آزمایش خاک و نیاز گیاه، ۱۰۰ درصد کود توصیه شده معادل ۵۰ کیلوگرم فسفر در هکتار در نظر گرفته شد.

بذور گندم از مرکز تحقیقات کشاورزی ایلام و قارچ مایکوریزا از بخش تحقیقات بیولوژی خاک موسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شدند. سپس قبل از کاشت، بذور گندم با قارچ مایکوریزا که هر گرم آن دارای ۱۲۰ اسپور زنده بود، تلقیح شدند. پس

از آغشته کردن بذور با قارچ مایکوریزا، بذور به مدت چند دقیقه در داخل ظرف مورد نظر چرخانده شدند تا مایه تلقیح به کمک صمغ عربی بذر به خوبی سطح بذر را (تلقیح به صورت بذر مال) پوشش دهد. سپس بذور تیمار شده به مدت ده دقیقه روی یک سطح تمیز در سایه قرار داده شدند تا خشک شوند. در نهایت پس از تهیه کردن بستر کاشت، بذور تلقیح شده در شیارهای ایجاد شده کشت شدند.

جدول ۱: مشخصات آب و هوایی منطقه چرداول-سرابله در سال زراعی ۹۸- ۱۳۹۷

ماه	بارندگی (میلی‌متر)	دمای حداقل مطلق (درجه سانتی‌گراد)	دمای حداکثر مطلق (درجه سانتی‌گراد)	متوسط دما (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی (درصد)	دمای زیر صفر (تعداد روز)	متوسط حداقل دما (درجه سانتی‌گراد)	متوسط حداکثر دما (درجه سانتی‌گراد)
مهر	۳۵/۵	۱۱/۶	۳۶	۲۳/۷	۳۳	۰	۱۶/۱	۳۱/۳
آبان	۱۸۶/۷	۴/۲	۲۷	۱۴/۲	۶۹	۰	۹/۵	۱۸/۹
آذر	۱۵۹/۲	۱/۴	۱۸/۲	۹/۲	۸۰	۰	۵/۲	۱۳/۲
دی	۱۰۸/۵	-۳/۸	۱۵/۲	۶/۴	۶۶	۱۲	۱/۳	۱۱/۶
بهمن	۱۵۷/۴	-۳/۴	۲۰/۶	۸/۷	۵۶	۸	۳	۱۴/۳
اسفند	۶۲/۴	۱/۸	۲۴	۱۲/۲	۵۸	۰	۶	۱۸/۵
فروردین	۱۷۸/۴	-۰/۴	۲۵/۸	۱۲/۶	۶۸	۱	۷	۱۸/۱
اردیبهشت	۱۲/۸	۲/۴	۳۵/۲	۱۸/۸	۴۸	۰	۱۰/۳	۲۷/۳
خرداد	۰	۱۲	۴۱/۴	۲۸/۱	۲۶	۰	۱۷/۴	۳۴/۱
جمع	۹۰۰/۹	۵/۵	۲۷/۰۴	۱۴/۸	۵۶	۲۱	۸/۴	۲۰/۸

جدول ۲: برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی سرابله در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷

بافت خاک	آهن	روی	مس	منگنز	منیزیم	فسفر	پتاسیم	نیتروژن کل	کربن آلی	هدایت الکتریکی	اسیدیته
						قابل دسترس					
	میلی‌گرم در کیلوگرم							درصد	درصد	دسی‌زیمنس برمتر	
لومی‌رسی	۵/۷۱	۱/۲	۱/۴	۸/۱	۲۳۰	۶/۸	۲۸۱	۰/۱۳	۱/۴	۰/۵۵	۷/۱۲

برای اندازه‌گیری صفات ریشه از یک استوانه‌ی فلزی به طول ۳۰ سانتی‌متر و عرض دو سانتی‌متر که به صورت دستی ساخته شده بود، استفاده گردید. بعد از مرحله‌ی گرده‌افشانی با استفاده از استوانه‌ی فلزی ریشه‌ها از خاک برداشت شدند. سپس در داخل ظرف یکبار مصرف قرار گرفته و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از انتقال به آزمایشگاه ریشه‌ها شسته شده و برای اندازه‌گیری صفات در داخل یخچال نگهداری شدند. وزن تر ریشه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت یک هزارم اندازه‌گیری شد. سپس به منظور اندازه-گیری وزن خشک ریشه، ریشه‌های مورد آزمایش به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در داخل آون قرار گرفتند و پس از خشک شدن مجددا با ترازوی دیجیتال مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند.

محاسبه طول مخصوص ریشه با استفاده از رابطه ۱ انجام گرفت (Mahanta et al., 2014)، که در این فرمول SRL نشاندهنده طول مخصوص ریشه، RL طول ریشه و DRW وزن خشک ریشه است.

$$SRL = RL/DRW \quad \text{رابطه (۱)}$$

تراکم طول ریشه از طریق رابطه ۲ به دست آمد (Mahanta et al., 2014)، که در این معادله RLD

نشاندهنده تراکم طول ریشه، RL طول ریشه و SV حجم خاک است.

رابطه (۲) $RLD = RL/SV$

محتوی آب ریشه با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه شد (Hasanabadi et al., 2010)، که در این رابطه RWC نشاندهنده محتوی آب ریشه، RFW وزن تر ریشه و DRW وزن خشک ریشه است.

رابطه (۳) $$RWC = \frac{FRW-DRW}{DRW}$$

برای اندازه‌گیری صفات آنتی‌اکسیدانی، دو هفته بعد از مرحله گرده‌افشانی از برگ پرچم نمونه‌برداری انجام گرفت. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز طبق روش ناکانو و آساد (Nakano and Asada, 1981) با اسپکتروفتومتر مورد سنجش قرار گرفت. فعالیت آنزیم پراکسیداز به روش مک‌آدام و همکاران (Mac-Adam et al, 1992) و آنزیم کاتالاز به روش ابی (Aebi, 1984) صورت گرفت. سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسیددسموتاز براساس روش مینامی و یوشیکاوا (Minami and Yoshikawa, 1979) انجام گردید. فعالیت آنزیم گلوتاتیون سنتتاز نیز به روش بوتلر و گیلبرت (Beutler and Gelbart, 1986) انجام شد. استخراج پراکسیدهیدروژن و سنجش آن به روش لرتو و ولیکوا (Loreto and Velikova, 2001) انجام شد. برای اندازه‌گیری مالون دی آلدئید، مقدار ۰/۵ گرم از نمونه برگ تازه در طول موج ۵۳۲ نانومتری مورد سنجش قرار گرفت (Stewart and Bewley, 1980).

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 و ترسیم شکل‌ها توسط نرم افزار اکسل انجام گرفت.

نتایج

وزن تر ریشه: نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که رقم، منابع کودی و ترکیب تیماری این دو عامل بر وزن تر ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ارقام ذهاب و ساجی و منابع کودی مایکوریزا و کود فسفر به صورت تلفیقی و کود فسفر با کاربرد ۵۰ کیلوگرم در هکتار به تنهایی در مقایسه با سایر ارقام و منابع کودی بیشترین وزن تر ریشه را با اختلاف معنی‌داری به خود اختصاص دادند (جدول ٤). در برهمکنش ارقام و منابع کودی نیز مشخص گردید که ارقام ذهاب و ساجی با کاربرد توام مایکوریزا و کود فسفر به ترتیب با ۱۲/۹۹ و ۱۲/۹۵ گرم بیشترین وزن تر ریشه و ارقام دهدشت و ساورز در شرایط عدم کاربرد کود به ترتیب با مقادیر ۳/٦۵ و ۳/٤۲ گرم کمترین وزن تر ریشه را به همراه داشتند (شکل ۱).

وزن خشک ریشه: با توجه به نتایج تجزیه واریانس مشاهده شد که کاربرد رقم و منابع کودی در سطح احتمال یک درصد و اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر وزن خشک ریشه معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج اثرات متقابل نشان داد که تمامی ارقام در ترکیب با منابع کودی به طور قابل توجهی وزن خشک ریشه را نسبت به عدم کاربرد کود افزایش دادند (شکل ۲) ، اگرچه در بین تیمارها، اعمال تیمار ترکیبی مایکوریزا و کود فسفر بر روی رقم ساجی و سپس ارقام ساورز و ذهاب بیشترین وزن خشک ریشه را دارا بود (شکل ۲).

طول مخصوص ریشه: براساس نتایج جدول ۳ مشخص گردید که اثرات ساده و متقابل رقم و منابع کودی بر صفت طول مخصوص ریشه معنی‌دار بود. در بین ارقام، رقم ساورز و دهدشت با مقادیر ٤۳/۳٤ و ٤۱/۵۰ سانتی‌متر بر گرم و در بین منابع کودی،

تیمار شاهد (عدم کاربرد کود) با ۷۲/۸۶ سانتی‌متر برگرم باعث افزایش معنی‌دار طول مخصوص ریشه نسبت به سایر تیمارها شدند (جدول ٤). در برهمکنش رقم و منابع کودی مشاهده شد که کلیه ارقام در ترکیب با منابع کودی باعث کاهش طول مخصوص ریشه شدند، به‌طوری‌که ارقام مورد مطالعه با کاربرد تیمار ترکیبی مایکوریزا و کود فسفر و تیمار ۵۰ کیلوگرم کود فسفر کمترین طول مخصوص ریشه را ثبت کردند (شکل ۳).

تراکم طول ریشه: تراکم طول ریشه به‌طور معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) تحت تاثیر ارقام و مصرف منابع مختلف کودی قرار گرفت. همچنین اثر برهمکنش آن‌ها بر این صفات معنی‌دار بود (جدول ۳). با توجه به نتایج مشخص شد که رقم ساجی نسبت به سایر ارقام در گروه آماری متفاوتی قرار گرفت و بیشترین تراکم طول ریشه (۰/۱۱٤ سانتی‌متر بر سانتی‌مترمکعب) را ثبت کرد (جدول ٤). با انجام مقایسه میانگین مشاهده گردید که در بین منابع کودی کاربرد تلفیقی مایکوریزا و کود فسفر دارای بیشترین تراکم طول ریشه (۰/۱٤ سانتی‌متر بر سانتی‌مترمکعب) بود (جدول ٤). اثر متقابل ارقام و منابع کودی نیز نشان داد، بیشترین تراکم طول ریشه از ارقام ساورز و ساجی تحت کاربرد توام مایکوریزا و کود فسفر و کمترین مقدار این صفت از رقم دهدشت در شرایط عدم کاربرد کود حاصل شد که نسبت به شاهد (عدم کاربرد کود) به‌ترتیب باعث افزایش ۹۳ و ۸۹ درصدی در تراکم طول ریشه شد (شکل ٤).

محتوی آب ریشه: براساس نتایج جدول ۳ اثر ارقام، منابع کودی و برهمکنش این دو عامل از نظر تاثیر بر این صفت اختلاف معنی‌داری را در سطح احتمال یک درصد داشتند. با توجه به شکل ۵ در هر یک از تیمارهای منابع کودی به جزء تیمار ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر کمترین محتوی آب ریشه از ارقام دهدشت و ساورز به دست آمد، در حالی که بیشترین محتوی آب ریشه با میانگین ۱۲/۷٤ و ۱۲/٦۷ گرم به ترتیب از ارقام ذهاب و ساجی در مصرف تیمار تلفیقی مایکوریزا و ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر حاصل شد (شکل ۵).

جدول ۳: تجزیه واریانس اثر ارقام و منابع کودی بر برخی ویژگی‌های ریشه گندم دوروم در شرایط دیم

منابع تغییر	درجه آزادی	وزن تر	وزن خشک	طول مخصوص	تراکم طول	محتوی آب
بلوک	۲	٤/۵۱**	۰/٤٦**	۳۲۷/۷۵^{ns}	۰/۰۰۲**	٤/٤۵**
رقم	۳	۱۱/۷۷**	۰/۳٤**	۳۲۸/۵٤*	۰/۰۰۰۲**	۱۱/۹۹**
منابع کودی	٤	۹٤/۱۷**	۱۳/٤۹**	٤۸۷٦/۹۰**	۰/۰۰۷**	۹۰/۳۳**
رقم × منابع کودی	۱۲	۱/۵۵**	۰/۱٦*	۲٤۰/٦۸*	۰/۰۰۰۰۷*	۱/۵۵**
خطا	۳۸	۰/٤۲	۰/۰۷	۱۰۱/۸۰	۰/۰۰۰۰۳	۰/٤۵
ضریب تغییرات		۷/۹۳	۱۳/۲٤	۲٦/۲٤	۵/۱۷	۸/٤۱

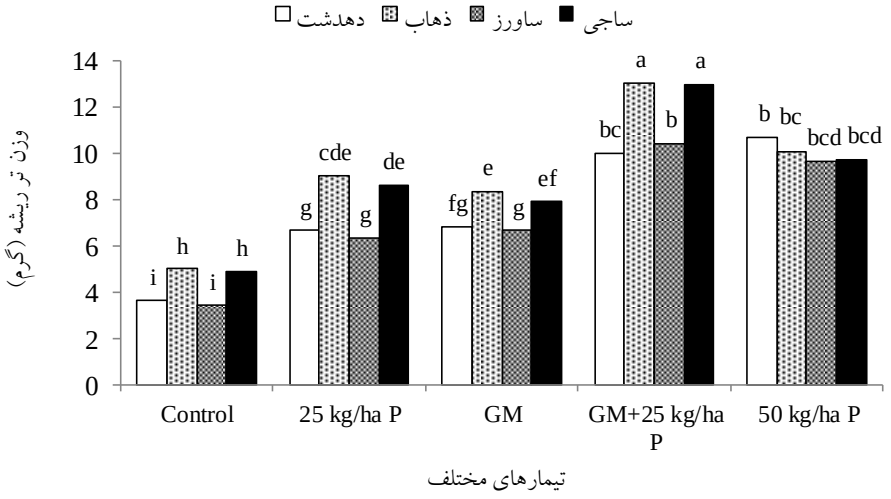
ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح ۵ درصد و ۱ درصد

جدول ٤: اثر ارقام و منابع کودی بر برخی ویژگی‌های ریشه گندم دوروم در شرایط دیم

	تیمارها	وزن تر (گرم)	وزن خشک (گرم)	طول‌مخصوص (سانتی‌متر بر گرم)	تراکم طول (سانتی‌متر طول ریشه بر سانتی‌مترمکعب خاک)	محتوی آب (گرم)
ارقام	دهدشت	۷/۵٦b	۱/۷۸b	٤۱/۵۰ab	۰/۱۰٤c	۷/۳٤b
	ذهاب	۹/۰۷a	۲/۰۵a	۳۳/۷٤b	۰/۱۱۰b	۸/۸٦a
	ساورز	۷/۳۰b	۱/۹٦ab	٤۳/۳٤a	۰/۱۰۹c	۷/۰۵b
	ساجی	۸/۸۱a	۲/۱۳a	۳۵/۲٤b	۰/۱۱٤a	۸/۵۹a
	LSD (p=0.05)					
منابع کودی	Control	٤/۲٤d	۰/٦۳d	۷۲/۸٦a	۰/۰۸d	٤/۰۹d
	25 kg/ha P	۷/٦٦c	۱/٦۰c	۳۵/۹۱b	۰/۱۰c	۷/٤۵c
	GM	۷/٤۳c	۱/۵۹c	۳۵/۷۹b	۰/۱۰c	۷/۲۱c
	GM+25 kg/ha P	۱۱/۵۹a	۳/۲۷a	۲۲/۹۲c	۰/۱٤a	۱۱/۳۰a
	50 kg/ha P	۱۰/۰۲a	۲/۸۲b	۲٤/۷۸b	۰/۱۳b	۹/۷٤b
	LSD (p=0.05)					

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند (p≤۰/۰۵)

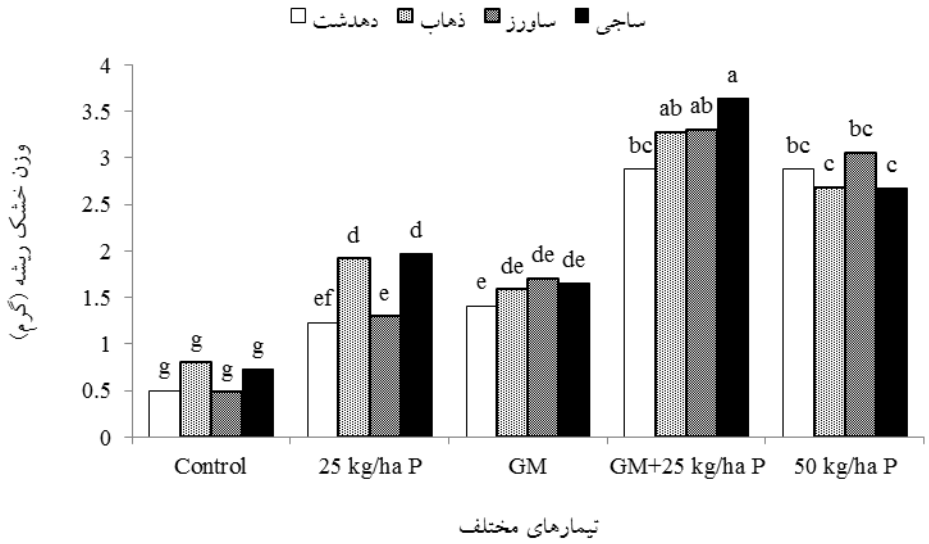
Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ۱: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر وزن تر ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

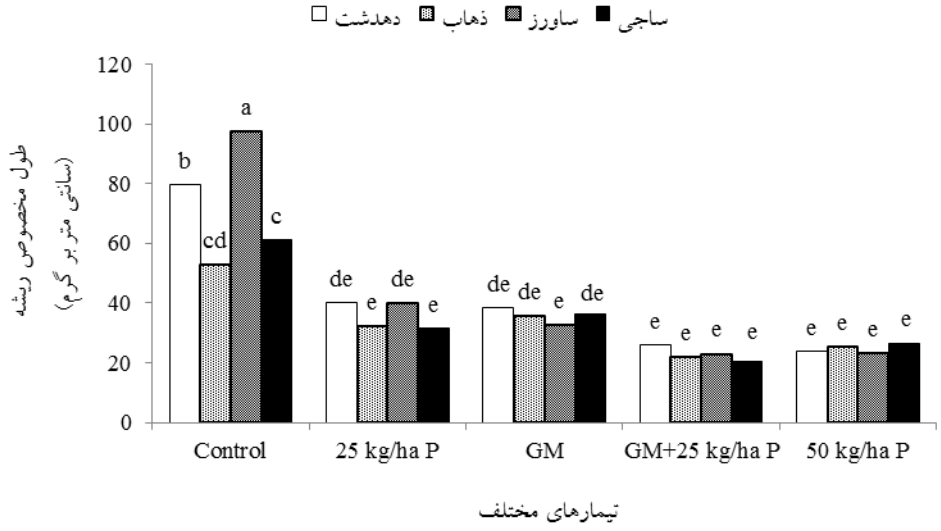
Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ۲: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر وزن خشک ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

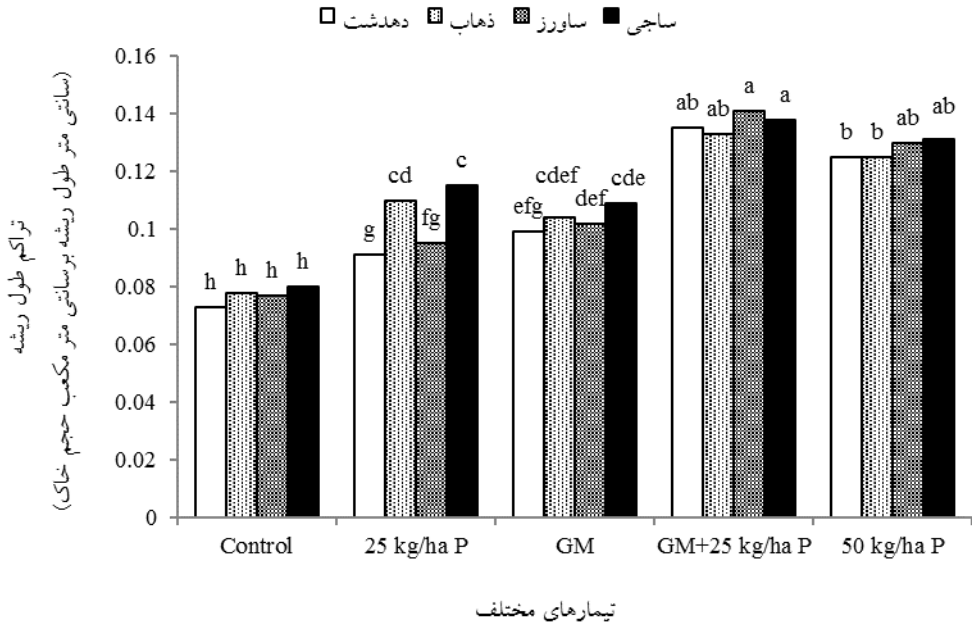
Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ۳: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر طول مخصوص ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

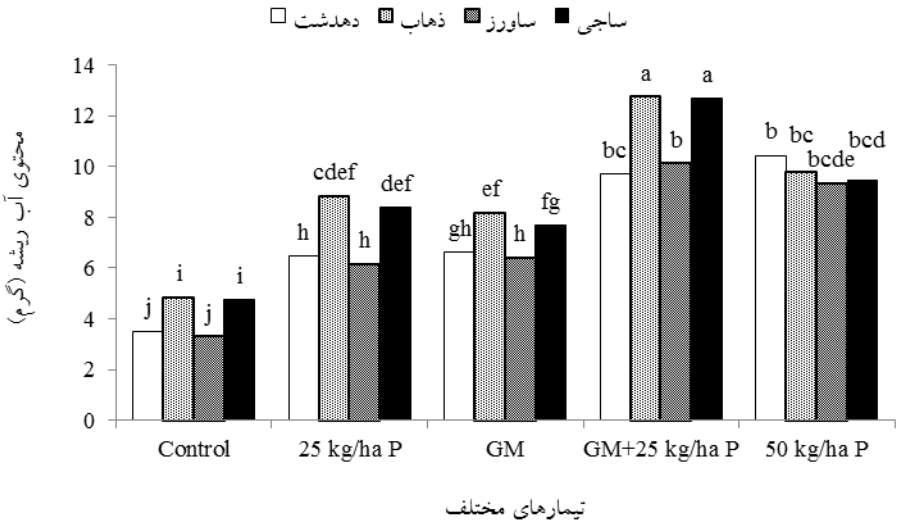
Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ٤: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر تراکم طول ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ٥: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر محتوی آب ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار

فعالیت آسکوربات پراکسیداز: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر ارقام و منابع کودی مختلف و برهمکنش این فاکتورها بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار بود (جدول ٥). ارقام ذهاب، ساجی و ساورز در مقایسه با رقم دهدشت و تیمار ترکیبی مایکوریزا و کود فسفر نسبت به سایر منابع کودی با اختلاف معنی‌داری فعالیت آنزیم آسکوربات

پراکسیداز را افزایش دادند (جدول ٦). در مورد برهمکنش ارقام و منابع کودی بر فعالیت این آنزیم مشخص شد که رقم ساجی با مصرف توام مایکوریزا + ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر بیشترین مقدار این صفت را به خود اختصاص داد که در مقایسه با تیمارهای ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر، ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر، مایکوریزا و شاهد به ترتیب موجب افزایش ۳۷، ۸۸، ۱۲٤و ۳٦۸ درصدی فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شد (شکل ٦).

فعالیت پراکسیداز: بر طبق نتایج، اثر رقم، منابع کودی و اثر متقابل این دو عامل بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز معنی‌دار گردید (جدول ۵). اثر متقابل رقم و منابع کودی نشان داد که کلیه ارقام در ترکیب با منابع کودی مایکوریزا + ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر به صورت تلفیقی و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر به صورت جداگانه در مقایسه با عدم کاربرد کود افزایش معنی‌داری را در میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز داشتند (شکل ۷)، به‌طوری‌که در بین این تیمارها، ارقام ساجی و ذهاب در ترکیب با منبع کودی توام مایکوریزا و کود فسفر به ترتیب با مقادیر ۱۵/۵ و ۱۵/۲۰ میلی‌گرم پروتئین در دقیقه بیشترین میزان فعالیت این آنزیم را ثبت کردند (شکل ۷).

فعالیت کاتالاز: فعالیت آنزیم کاتالاز به طور معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) تحت تاثیر اثرات ساده رقم و منابع کودی و اثر متقابل این دو عامل قرار گرفت (جدول ۵). نتایج اثر متقابل نشان داد که بیشترین فعالیت این آنزیم در ارقام ذهاب و ساجی با کاربرد توام مایکوریزا و کود فسفر و کمترین مقادیر این صفت در ارقام دهدشت و ساورز تحت شرایط عدم کاربرد کود به دست آمد (شکل ۸). به بیانی دیگر کاربرد توام مایکوریزا و کود فسفر بر روی ارقام ذهاب و ساجی توانست فعالیت آنزیم کاتالاز را به ترتیب ۲۵۵ و ۲۵۳ درصد نسبت به رقم دهدشت و ۲۷۹ و ۲۷۷ درصد نسبت به رقم ساورز در شرایط عدم کاربرد کود افزایش دهد (شکل ۸).

فعالیت سوپراکسیددسموتاز: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر ارقام، منابع کودی و برهمکنش این دو عامل از نظر تاثیر بر این صفت اختلاف معنی-داری را در سطح احتمال یک درصد داشتند (جدول ۵). با توجه به شکل ۹ در هر یک از تیمارهای منابع کودی به جزء تیمار ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر، کمترین فعالیت آنزیم سوپراکسیددسموتاز از ارقام دهدشت و ساورز به دست آمد، در حالی که بیشترین فعالیت سوپراکسیددسموتاز با میانگین ۲٦/۳۵ و ۲۵/۸٤ میلی‌گرم پروتئین در دقیقه به ترتیب از ارقام ساجی و ذهاب در مصرف تیمار تلفیقی مایکوریزا + ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر حاصل شد (شکل ۹). به طورکلی کاربرد کود فسفر، مایکوریزا و هر دو منبع کودی باعث افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسیددسموتاز نسبت به شرایط عدم مصرف کود شدند (شکل ۹).

فعالیت گلوتاتیون سنتتاز: مقایسه میانگین اثرات ساده نشان داد که در بین ارقام، رقم‌های ذهاب، ساجی و ساورز و در بین منابع کودی کاربرد توام مایکوریزا و کود فسفر اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشتند و توانستند بیشترین فعالیت آنزیم گلوتاتیون سنتتاز را ثبت کنند (جدول ۵، ٦). نتایج برهمکنش فاکتورهای آزمایشی نیز نشان داد بیشترین فعالیت آنزیم گلوتاتیون سنتتاز در کلیه ارقام مورد مطالعه در شرایط کاربرد تلفیقی مایکوریزا + ۲۵ کیلوگرم کود فسفر و ۵۰ کیلوگرم کود فسفر حاصل شد (شکل ۱۰)، اگرچه رقم ساجی در ترکیب با مایکوریزا و کود فسفر با مقدار ۳/٦۷ میلی‌گرم پروتئین در دقیقه بالاترین

فعالیت آنزیم گلوتاتیون سنتتاز را بین تیمارها به ثبت رساند (شکل ۱۰).

پراکسید هیدروژن: با توجه به نتایج مقایسه میانگین مشخص شد که ارقام ساورز و دهدشت و تیمار عدم کاربرد کود در مقایسه با سایر تیمارها افزایش معنی-داری در فعالیت پراکسید هیدروژن داشتند (جدول ۵، ٦). همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود کاربرد منابع مختلف کودی بر روی تمامی ارقام توانسته است میزان فعالیت پراکسیدهیدروژن را به طور قابل توجهی در مقایسه با شرایط عدم کاربرد کود کاهش دهد. در شرایط عدم کاربرد کود مشاهده می‌شود که ارقام ذهاب و ساجی نسبت به به رقم دهدشت به ترتیب ۲۷ و ۲۳ درصد و نسبت به رقم ساورز به ترتیب ۳۱ و ۲۸ درصد باعث کاهش فعالیت پراکسیدهیدروژن شدند (شکل ۱۱)، این موضوع نشان می‌دهد که ارقام ذهاب و ساجی ممکن است از نظر ژنتیکی مقاومت بیشتر یا مکانیزم‌های بهتری در برابر تولید پراکسید هیدروژن داشته باشند.

مالون دی آلدئید: فعالیت مالون دی آلدئید به طور معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) تحت تاثیر ارقام، مصرف منابع مختلف کودی و برهمکنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۵). با توجه به نتایج مشخص شد که ارقام دهدشت و ساورز نسبت به ارقام ذهاب و ساجی در گروه آماری متفاوتی قرار گرفتند و بیشترین فعالیت مالون دی آلدئید را ثبت کردند (جدول ٦). با انجام مقایسه میانگین مشخص گردید که در بین منابع کودی تیمار شاهد با ٤۰/۹ میکروگرم در گرم وزن تازه دارای بیشترین فعالیت مالون دی آلدئید بود (جدول ٦). اثر متقابل ارقام و منابع کودی نیز نشان داد که ارقام دهدشت و ساورز در تیمار عدم مصرف کود بیشترین و ارقام ذهاب و ساجی با مصرف توأم کود فسفر و مایکوریزا کمترین فعالیت مالون دی آلدئید را داشتند (شکل ۱۲).

جدول ۵: تجزیه واریانس اثر ارقام و منابع کودی بر فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی گندم دوروم در شرایط دیم

منابع تغییر	درجه آزادی	آسکوربات پراکسیداز	پراکسیداز	کاتالاز	سوپراکسیددسموتاز	گلوتاتیون سنتتاز	پراکسید هیدروژن	مالون دی آلدئید
بلوک	۲	٤/۳۳*	۲۳/٤۳**	٤/۳۸**	٦۷/۷۲**	۰/۲۷*	۲/۰۳**	۱/۱٦ns
رقم	۳	۳/۷۰*	۲۸/۳۷**	۱۱/٦۰**	۸۱/۹۹**	۰/۲۳*	۱/۵۳**	۲/۰۷**
منابع کودی	٤	۲۱۵/٤۸**	۱۱۰/۵۵**	۹۳/۹۷**	۳۱۹/٤۸**	۱۳/٤۷**	٤۷/٦۹**	۵٤/٤۲**
رقم × منابع کودی	۱۲	۲/٦۰*	۲/۹۸**	۱/۵۵**	۸/٦۲**	۰/۱٦*	۰/۵۵**	۱/۲۱**
خطا	۳۸	۰/۹۹	۰/٦۳	۰/٤۲	۱/۸۱	۰/۰٦	۰/۱۸	۰/٤۵
ضریب تغییرات		۱۲/۱۲	۸/۹۳	۷/۸۷	۸/۹۳	۱۲/۱۱	۱۸/۰۷	۱/۷۹

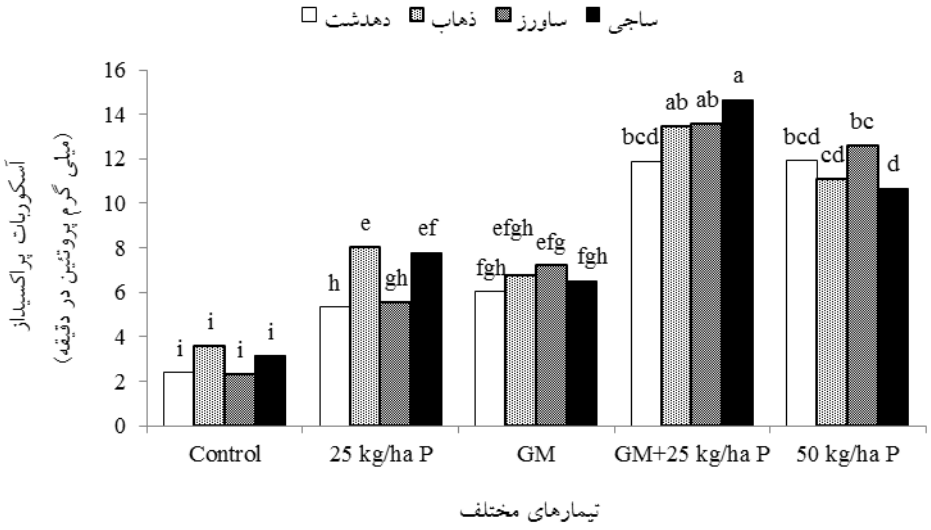
ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح ۵ درصد و ۱ درصد

جدول ٦: اثر ارقام و منابع کودی بر بر فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی گندم دوروم در شرایط دیم

	تیمارها	آسکوربات پراکسیداز	پراکسیداز	کاتالاز	سوپراکسیددسموتاز	گلوتاتیون سنتتاز	پراکسید هیدروژن	مالون دی آلدئید
		میلی‌گرم پروتئین در دقیقه						میکروگرم در گرم وزن تازه
ارقام	دهدشت	۷/۵۲b	۷/۵۲b	۷/۵٦b	۱۲/۷۸b	۱/۸۸b	۲/٤٤ab	۳۷/۷۱a
	ذهاب	۸/۵۹a	۹/۹٦a	۹/۰۷a	۱٦/۹۳a	۲/۱۵a	۲/۰٤c	۳۷/۰٤b
	ساورز	۸/۲۵ab	۷/۸۵b	۷/۳۰b	۱۳/۳۵b	۲/۰٦ab	۲/۷٤a	۳۷/۷٤a
	ساجی	۸/۵٦a	۱۰/۱۵a	۸/۷۹a	۱۷/۲۵a	۲/۱٤a	۲/۱۳bc	۳۷/۱۳b
	LSD (p=0.05)							
منابع کودی	Control	۲/۸٦d	۵/۱۳d	٤/۲٤d	۸/۷۳d	۰/۷۱d	۵/۵۷a	٤۰/۹۰a
	25 kg/ha P	٦/٦۸c	۷/۷۰c	۷/٦۵c	۱۳/۰۹c	۱/٦۷c	۲/٤۹b	۳۷/٤۹b
	GM	٦/٦۳c	۷/۸٦c	۷/٤۲c	۱۳/۳٦c	۱/٦٦c	۲/۲۵b	۳۷/۲۵b
	GM+25 kg/ha P	۱۳/٤۱a	۱۳/۰۵a	۱۱/۵۸ a	۲۲/۱۹a	۳/۳۵a	۰/۵۹c	۳۵/۵۹c
	50 kg/ha P	۱۱/۵۸b	۱۰/٦۱b	۱۰/۰۲ b	۱۸/۰۳b	۲/۸۹b	۰/۷۹c	۳۵/۷۹c
	LSD (p=0.05)							

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند (p≤۰/۰۵)

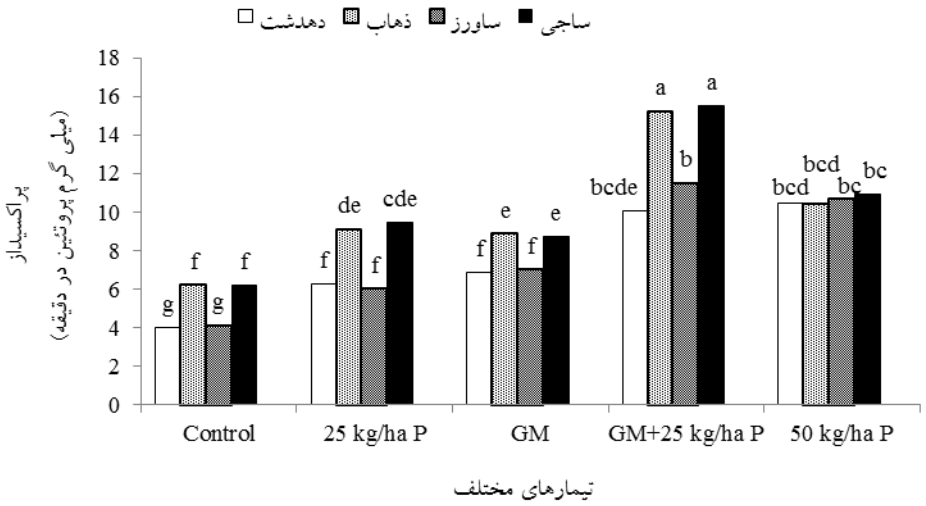
Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ٦: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

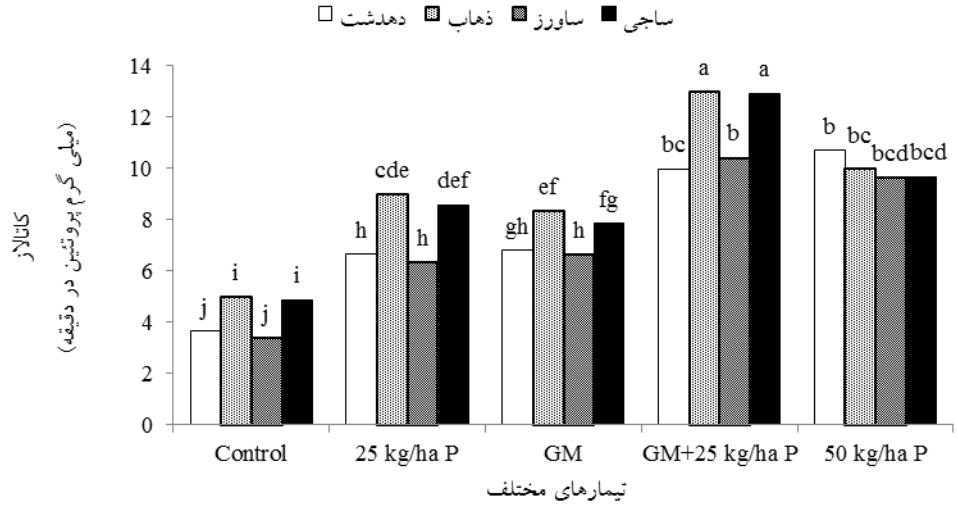
Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ۷: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر فعالیت آنزیم پراکسیداز گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

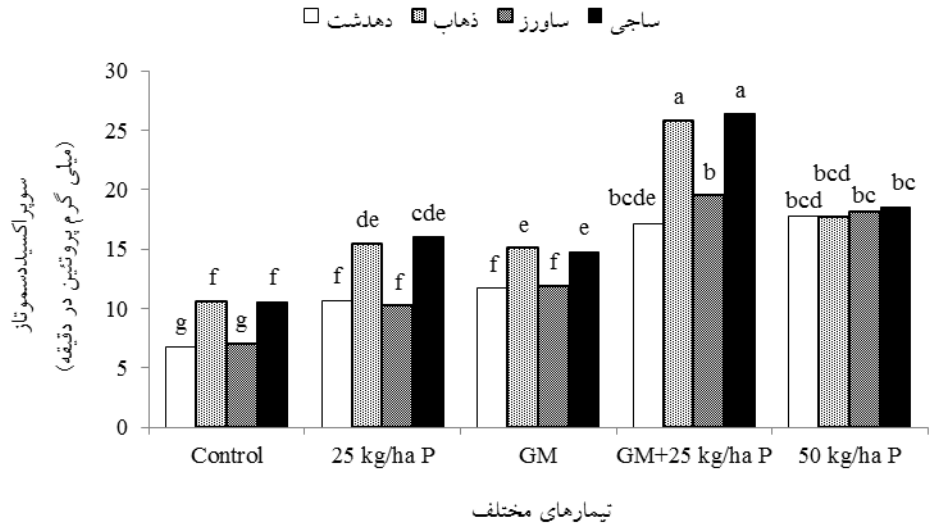
Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ۸: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر فعالیت آنزیم کاتالاز گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

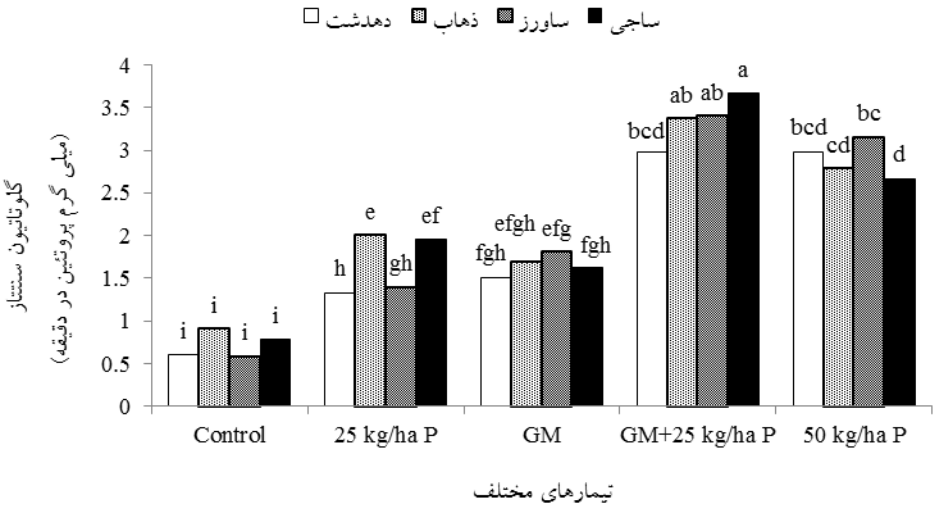
Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ۹: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر فعالیت آنزیم سوپراکسیددسموتاز گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

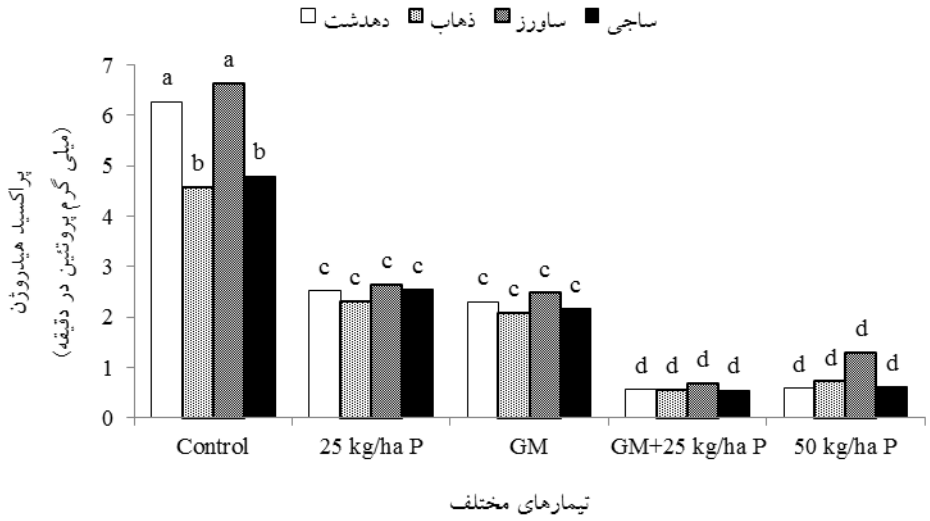
Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ۱۰: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر فعالیت آنزیم گلوتاتیون سنتتاز گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

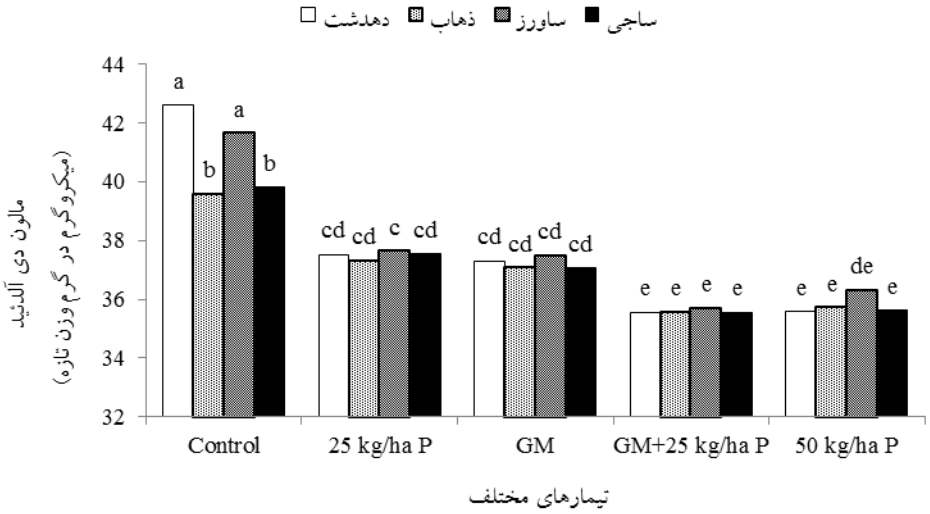
Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ۱۱: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر فعالیت آنزیم پراکسید هیدروژن گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار



شکل ۱۲: اثر متقابل رقم و منابع کودی بر فعالیت مالون دی آلدئید گندم دوروم تحت شرایط دیم

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر شکل، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Control: شاهد یا عدم کاربرد کود، GM: قارچ مایکوریزا آربسکولار

بحث

نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد توام مایکوریزا و کود فسفر بر روی ارقام ساجی و ذهاب توانست وزن تر و خشک ریشه را نسبت به شرایط عدم کاربرد کود به‌طورقابل توجهی افزایش دهد. کاهش وزن تر و خشک ریشه در شرایط عدم کاربرد

کود می‌تواند به علت اثر منفی تنش خشکی بر میزان فتوسنتز گیاه باشد (Yaghoubian et al., 2014). اگرچه افزایش وزن تر و خشک ریشه با اعمال مایکوریزا ممکن است به علت کاهش غلظت آبسیزیک اسید و افزیش مقدار سیتوکینین در داخل سیستم ریشه‌ی گیاه و ترشح اسیدهای آلی حل کننده فسفر مانند اسید مالیک در خارج از سیستم ریشه باشد که موجب افزایش جذب آب و فسفر و بنابراین گسترش سیستم ریشه‌ای گیاه می‌شود (Smith et al., 2010). در این زمینه گزارش‌هایی مبنی بر افزایش وزن تر ریشه با کاربرد مایکوریزا در گیاه بادرشبو (Fadaee et al., 2018) و افزایش وزن خشک ریشه در گیاهانی همچون ذرت (Yar Mahmoodi et al., 2012) و جو (Bayani et al., 2016) گزارش شده است که موافق نتایج این پژوهش است.

یافته‌های این مطالعه نشان داد که در شرایط عدم کاربرد کود، ارقام دهدشت و ساورز در مقایسه با ذهاب و ساجی افزایش بسیار قابل توجهی در طول مخصوص ریشه داشتند که این تفاوت در مکانیزم‌های مقابله با خشکی احتمالا به علت ژنتیک‌های متفاوت این ارقام می‌باشد. با این حال، با اعمال منابع کودی مختلف (به ویژه تیمارهای مایکوریزا + فسفر و ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر) بر کلیه ارقام مورد بررسی در مقایسه با شرایط عدم کاربرد کود، به طور معنی-داری طول مخصوص ریشه کاهش و تراکم طول ریشه افزایش نشان داد. با توجه به این نتایج به نظر می‌رسد که گندم دوروم در شرایطی که عناصر غذایی موردنیاز آن‌ها فراهم باشد تمایل بیشتری به افزایش تراکم طول ریشه نسبت به طول مخصوص ریشه دارند. در این رابطه، Bagayoko و همکاران (2000) طی آزمایش خود با بررسی تاثیر مایکوریزا و فسفر بر صفات رشدی سورگوم در خاک‌های کم فسفر شرق آفریقا بیان داشتند که با کاربرد کود فسفر، قارچ مایکوریزا جذب عناصر غذایی فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و روی را ۲/۵ تا ٦ برابر در سورگوم افزایش داد و به دنبال آن باعث افزایش تراکم طول ریشه‌ی این گیاه شد.

بر طبق نتایج حاصل از پژوهش، محتوی آب ریشه در شرایط عدم کاربرد کود کمترین مقدار بود، در حالی‌که با کاربرد منابع کودی، محتوی آب ریشه‌ی تمام ارقام افزایش یافت و بیشترین مقدار آن در ارقام ذهاب و ساجی در تیمار ترکیبی مایکوریزا و فسفر به دست آمد. در همین راستا، Zhu و همکاران (2011) با ارزیابی اثر مایکوریزا بر وضعیت آب ذرت در شرایط تنش دمای بالا گزارش کردند که گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده به دلیل افزایش کلونیزاسیون ریشه و بهبود ظرفیت جذب آب، کارایی مصرف آب، ظرفیت نگهداری آب و محتوی نسبی آب گیاه را افزایش دادند. به عبارت دیگر، قارچ مایکوریزا جذب آب گیاهان میزبان را به وسیله‌ی هیف‌های خارجی که اغلب در افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه، تنظیم اسمزی و ترکیب کربوهیدرات‌ها نقش دارند، بهبود می‌بخشد (Ruiz-Lozano, 2003; Augé, 2004; Evelin et al., 2009). بعلاوه، همزیستی با مایکوریزا باعث می‌شود گیاه نگهداری آب را افزایش دهد و از اختلالات فیزیولوژیکی جلوگیری کند (Zhu et al., 2011).

به‌طورکلی مشخص شد که صفات وزن تر و خشک، تراکم طول و محتوی آب ریشه (به جز طول مخصوص ریشه) با اعمال منابع کودی ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر و قارچ مایکوریزا به صورت جداگانه در مقایسه با شاهد بهبود یافتند، اگرچه افزایش کود فسفر به ۵۰ کیلوگرم در هکتار و ترکیب قارچ مایکوریزا با کود فسفر افزایش بسیار بیشتری در بهبود صفات نشان دادند. از آنجایی که محدوده بحرانی فسفر قابل دسترس خاک برای گندم بین ۷ تا ۱۸

میلی‌گرم در کیلوگرم است (Poulton et al., 2013). نتایج آنالیز خاک نشان داد که خاک مورد مطالعه ما با کمبود فسفر قابل دسترس (۶/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) مواجه است. براساس یافته‌های مطالعات مختلف گزارش شده است که در خاک‌هایی با کمبود فسفر، افزودن فسفر به خاک باعث افزایش کلونیزاسیون ریشه به وسیله‌ی قارچ مایکوریزا می‌گردد (Li et al., 1991)، اگرچه با افزایش سطوح فسفر خاک توسعه کلونیزاسیون ریشه توسط قارچ کاهش می‌یابد (Xie et al., 2014; Wu et al., 2015). با توجه به اینکه حفظ و ثبات رابطه‌ی همزیستی قارچ با گیاه میزبان به جریان انتقال کربن از گیاه به قارچ بستگی دارد (Todd et al., 1984). در شرایطی که در خاک محدودیت فسفر وجود ندارد و گیاه برای جذب فسفر نیازی به مشارکت با قارچ ندارد، ریشه‌های گیاه میزبان برای کاهش انتقال کربن، کلونیزاسیون ریشه به وسیله‌ی قارچ را کاهش می‌دهند (Shao et al., 2021). بنابراین تاثیر قابل توجه تیمار توام قارچ مایکوریزا و کود فسفر در مقایسه با کاربرد آن‌ها به تنهایی بر صفات مورد بررسی به علت بهبود جذب فسفر در هر واحد طول ریشه است که ناشی از افزایش کل سطح ریشه به وسیله‌ی رشد هیف‌های قارچ می‌باشد (Li et al., 1991).

تنش‌های مختلف محیطی باعث تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن و اختلالات فیزیولوژیکی در گیاهان می‌شوند (Mittler 2002)، از این‌رو گیاهان برای حفاظت خود در برابر تنش‌های اکسیداتیو، آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی تولید می‌کنند که می‌توانند به‌طور موثری از تجمع رادیکال سوپراکسید (O_2^-) و پراکسیدهیدروژن (H_2O_2) جلوگیری کنند (Jaleel et al., 2009) و اثرات رادیکال‌های آزاد اکسیژن را که باعث تخریب ترکیبات سلولی مانند لیپیدها، کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها می‌شوند را کاهش دهند (Gholinezhad et al., 2020). در مطالعه حاضر، فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسیددسموتاز و گلوتاتیون سنتتاز در تمامی ارقام با اعمال منابع کودی مایکوریزا و فسفر در مقایسه با شاهد (عدم کاربرد کود) افزایش یافت، اگرچه کاربرد تیمار ترکیبی مایکوریزا + ۲۵ کیلوگرم فسفر در هکتار به ویژه در ارقام ذهاب و ساجی توانست بیشترین مقدار فعالیت آنزیم‌ها را به خود اختصاص دهد. افزایش فعالیت در آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نشاندهنده افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی است (Alguacil et al., 2006). در این زمینه، Yaghoubian و همکاران (2014) با بررسی اثر قارچ مایکوریزا بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گندم تحت تنش خشکی بیان کردند که با افزایش شدت تنش خشکی، گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا به طور معنی‌داری سطح فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز را افزایش دادند، بنابراین باعث کاهش پراکسیداسیون ترکیبات غشاء و افزایش مقاومت به خشکی گندم شدند. Salah و همکاران (2015) نیز طی مطالعه خود بر روی برنج، گزارش کردند که کاربرد مایکوریزا تحت شرایط تنش سبب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز شد. همچنین Gholinezhad و همکاران (2020) طی تحقیق خود بر روی گیاه کنجد تحت شرایط تنش آب، مشاهده نمودند که تلقیح گیاه با قارچ مایکوریزا فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی آسکوربات پراکسیداز، سوپراکسیددسموتاز و کاتالاز را افزایش داد. نتایج مشابه دیگری در پژوهش‌های گذشته ارائه شده است، مطابق این مطالعات، قارچ مایکوریزا توانست زیان اکسیداتیو ناشی از تنش دما در ذرت (Zhu et al., 2010)، تنش سرما در گیاه علوفه‌ای (*Elymus napus*) (Chu et al., 2016)، تنش خشکی در دانهال‌های

مرکبات (Wu et al., 2006) و تنش شوری در فلفل شیرین (Hegazi et al., 2017) را کاهش دهد.

مقدار مالون دی آلدئید در آزمایش‌های مختلف به عنوان یک نشانگر برای درجه‌ی پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء استفاده می‌شود (Thompson et al., 1988;Ali et al., 2005). به عبارت دیگر، اگر آنزیم‌های آنتی اکسیدانی تحت شرایط تنش نتوانند رادیکال‌های آزاد اکسیژن را از بین ببرند، زیان اکسیداتیو توسعه پیدا می‌کند و محصولات تخریبی از جمله مالون دی آلدئید که حاصل تخریب چربی‌ها است افزایش می‌یابد (Mashhadi Akbar Bojar, 2011). نتایج مطالعه ما نشان داد که با اعمال مایکوریزا و کود فسفر بر روی ارقام مختلف گندم تحت شرایط دیم مقدار مالون دی آلدئید برگ کاهش معنی‌داری در مقایسه با شاهد داشت. کاهش میزان پراکسیداسیون غشاء و به دنبال آن کاهش تولید مالون دی آلدئید با کاربرد قارچ مایکوریزا در شرایط تنش در گیاهانی نظیر گندم (Yaghoubian et al., 2014)، ذرت (Zhu et al., 2010) و سویا (S. Sheteiwy et al., 2021) گزارش شده است که مؤید نتایج این پژوهش است. پراکسید هیدروژن همانند مالون دی آلدئید نیز به‌عنوان نشانگر فیزیولوژیکی گیاه در برابر تنش به کار می‌رود و سطح بالای آن نشاندهنده ایجاد تنش اکسیداتیو است (Erdogan et al., 2016). در این مطالعه مشخص شد کلیه ارقام در تیمار عدم کاربرد کود در مقایسه با سایر تیمارها دارای بیشترین مقدار پراکسید هیدروژن هستند که به معنای افزایش گونه‌های فعال اکسیژن در گیاه در شرایط تنش خشکی می‌باشد، اگرچه گیاهانی که با منابع کودی مایکوریزا و فسفر تیمار شده بودند مقدار پراکسید هیدروژن را به‌طور معنی‌داری کاهش دادند. به نظر می‌رسد که منابع کودی به ویژه مصرف توام مایکوریزا و فسفر به علت بهبود وزن تر و خشک، تراکم طول و محتوی آب ریشه و در نتیجه افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی توانستند باعث کاهش رادیکال‌های فعال اکسیژن و در نتیجه کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء و کاهش تولید مالون دی آلدئید و پراکسید هیدروژن شوند (Yaghoubian et al., 2014). نتایج همچنین نشان داد که ارقام ذهاب و ساجی نسبت به دهدشت و ساورز مقدار مالون دی آلدئید و پراکسید هیدروژن کمتری داشتند. پایین بودن مقدار این پارامترها در ارقام ذهاب و ساجی نشاندهنده توان دفاع آنتی اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی بالای این دو رقم در برابر تنش اکسیداتیو و کاهش تخریب اکسیداتیو غشاهای سلولی است (Gholinezhad et al., 2020). با توجه به این نتایج می‌توان بیان داشت که ارقام ذهاب و ساجی در مقایسه با دهدشت و ساورز از میزان تحمل بالایی در برابر تنش خشکی برخوردار هستند.

نتیجه‌گیری

استفاده از فن‌آوری کودهای زیستی به ویژه به منظور مدیریت فسفر خاک در خاک‌های با کمبود فسفر و رطوبت خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از کود فسفر و قارچ مایکوریزا در زراعت دیم به دلیل افزایش سیستم ریشه‌ای گیاه و در نتیجه جذب بیشتر آب و عناصر غذایی باعث بهبود صفات وزن تر و خشک، تراکم طول و محتوی آب ریشه به ویژه در ارقام ذهاب و ساجی شد، خسارت اکسیداتیو ناشی از خشکی که شامل پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدئید بود با کاربرد منابع کودی کاهش یافت در حالی که فعالیت آنتی اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی آسکوربات پراکسیداز، سوپراکسیددسموتاز، پراکسیداز، کاتالاز و گلوتاتیون سنتتاز افزایش نشان داد. نتایج این مطالعه به خوبی مشخص نمود که استفاده تلفیقی از کود فسفر و قارچ مایکوریزا نتایج

بهتری در مقایسه با کاربرد آنها به تنهایی دارد. همچنین یافته‌های این پژوهش نشان داد که رقم‌های ساجی و ذهاب در مقایسه با ساورز و دهدشت به علت سیستم آنتی اکسیدانی موثرتر مقاومت بیشتری به خشکی دارند و نتایج بهتری در شرایط دیم ایلام ثبت نمودند.

References

Abaye, A.O., Brann, D.E., Alley, M.M. and Griffey, C.A. (1997). Winter durum wheat: Do we have all the answer. Crop Soil Environment Science. 424-802.

Adhya, T.K., Kumar, N., Reddy, G., Podile, A.R., Bee, H. and Samantaray, B. (2015). Microbial mobilization of soil phosphorus and sustainable P management in agricultural soils. Current Science. 108: 1280–1287.

Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. Methods in Enzymology. 105: 121-126.

Agarwal, S. and Pandy, V. (2004). Antioxidant enzyme responses to NaCl stress in Cassia angustifolia. Biologia Plantarum. 48: 555-560.

Alguacil, M., Caravaca, F., Dı´az-Vivancos, P., Herna´ndez, J.A. and Roldan, A. (2006). Effect of arbuscular mycorrhizae and induced drought stress on antioxidant enzyme and nitrate reductase activities in *niperus oxycedrus* L. grown in a composted sewage sludge-amended semi-arid soil. Plant and Soil. 279: 209–218.

Aroca, R., Porcel, R. and Ruiz Lozano, J.M. (2007). How does arbuscular mycorrhizal symbiosis regulate root hydraulic properties and plasma membrane aquaporins in Phaseolus vulgaris under drought, cold or salinity stresses?. New Phytologist. 173: 808–816.

Attarzadeh, M., Balouchi, H., Rajaie, M. and Movahhedi Dehnavi, M. (2019). Growth and nutrient content of Echinacea purpurea as affected by the combination of phosphorus with arbuscular mycorrhizal fungus and Pseudomonas florescent bacterium under different irrigation regimes. Journal of Environmental Management. 231: 182–188.

Augé, R.M. (2004). Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. Canadian Journal of Soil Science. 84: 373–381.

Augé, R.M., Toler, H.D., Moore, J.L., Cho, K. and Saxton, A.M. (2007). Comparing contributions of soil versus root colonization to variations in stomatal behavior and soil drying in mycorrhizal Sorghum bicolor and *Cucurbita pepo*. Journal of Plant Physiology. 164:1289–1299.

Bagayoko, M., George, E., Romheld, V. and Buerkert, A. (2000). Journal of Agricultural Science, Cambridge, 135: 399–407.

Bárzana, G., Aroca, R., Bienert, G.P., Chaumont, F. and Ruiz-Lozano, J.M. (2014). New insights into the regulation of aquaporins by the arbuscular mycorrhizal symbiosis in maize plants under drought stress and possible implications for plant performance. Molecular Plant-Microbe Interactions Journal. 27: 349–363.

Baum, C., El-Tohamy, W. and Gruda, N. (2015). Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using arbuscular mycorrhizal fungi: a review. Scientia Horticulturae. 187: 131–141.

Bayani, R., Saateyi, A. and Faghani, E. (2016). Some root traits of barley (*Hordeum vulgare* L.) as affected by mycorrhizal symbiosis under drought stress. Journal of Crop production and processing. 6(19):125-135.

Beutler, E. and Gelbart, T. (1986). Improved assay of the enzymes of glutathione synthesis: y-lutamylcysteine synthetase and glutathione synthetase. Clinica Chimica Acra. 158: 115-123.

Bompadre, M.J., Silvani, V.A., Bidondo, L.F., Ríosde Molina, M.D.C., Colombo, R.P., Pardo, A.G. and Godeas, A.M. (2014). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate oxidative stress in pomegranate plants growing under different irrigation conditions. Botany. 92: 187–193.

Cheynier, V., Comte, G., Davies, K.M., Lattanzio, V. and Martens, S. (2013). Plant phenolics: recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology. Plant Physiology and Biochemistry. 72: 1–20.

Chu, X.T., Fu, J.J., Sun, Y.F., Xu, Y.M., Miao, Y.J., Xu, Y.F. and Hu, T.M. (2016). Effect of arbuscular mycorrhizal ungus inoculation on cold stress-induced oxidative damage in leaves of Elymus nutans Griseb. South African Journal of Botany. 104: 21–29.

Erdogan, U., Cakmakci, R., Varmazyari, A., Turan, M., Erdogan, Y. and Kitir, N. (2016). Role of inoculation with multi-trait rhizobacteria on strawberries under water deficit stress. Zemdirbyste-Agriculture. 103(1): 67–76.

Evelin, H., Kapoor, R. and Giri, B. (2009). Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. Annals of Botany. 104:1263–1280.

Fadaee, E., Parvizi, Y., Gerdakane, M. and Khan-ahmadi, M. (2018). The effects of mycorhiza (*Glomus mosseae* and *Glomus intraradiceae*) and phosphorus on growth and phytochemical traits of dracocephalum moldavica l. under drought stress. Journal of Medicinal Plants. 17(66): 117-130.

Gholinezhad, E., Darvishzadeh, R., Siavash Moghaddam, S. and Popovi ć-Djordjević, J. (2020). Effect of mycorrhizal inoculation in reducing water stress in sesame (*Sesamum indicum* L.): The assessment of agrobiochemical traits and enzymatic antioxidant activity. Agricultural Water Management. 238: 106234.

Hasanabadi, T., Ardakani, M.R., Rejali, F., Paknejad, F., Eftekhari, S.A. and Zargari K. (2010). Response of barley root characters to co-inoculation with *Azospirillum lipoferum* and *Pseudomonas flouresence* under different levels of nitrogen. American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science. 9(2): 156-162.

Hegazi, A.M., El-Shraiy, A.M. and Ghoname, A.A. (2017). Mitigation of salt stress negative effects on sweet pepper using arbuscular mycorrhizal fungus (AMF), *Bacillus megaterium* and Brassinosteroids (BRs). Gesunde Pflanzen. 69: 91–102.

Heydari, A., Nasri, M. and Ghoshchi, F. (2014). The study of Symbiotic of mycorrhizae and phosphorus fertilizer on yield and yield components of corn in Robat karim region. Agronomic Research in Semi Desert Regions. 11: 161-170.

Jaleel, C.A., Riadh, K., Gopi, R., Manivannan, P., Inès, J., AI-Juburi, H.J., Zhao, C.X., Shao, H.B. and Panneerselvam, R. (2009). Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints. Acta Physiologiae Plantarum. 31:427–436.

Khalafallah, A.A. and Abo-Ghalia, H.H. (2008). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the metabolic products and activity of antioxidant system in wheat plants subjected to short-term water stress, followed by recovery at different growth stages. Journal of Applied Sciences Research. 4: 559-569.

Khalvati, M.A., Mzafar, A. and Schmidhalter, U. (2005). Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hypha and its signification for leaf growth, water relations and gas exchange of barley subjected to drought stress. Plant Biology Stuttgart. 7(6): 706-712.

Koide, R. and Kabir, Z. (2000). Extraradical hyphae of the mycorrhizal fungus Glomus intraradices can hydrolyse organic phosphate. New Phytologist. 148: 511 –517.

Li, X.L., George, E. and Marschner, H. (1991). Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil. Plant and Soil. 136: 41–48.

Loreto, F. and Velikova, V. (2001). Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. Plant Physiology. 127(4): 1781-1787.

Ma, Y., Prasad, M.N.V., Rajkumar, M. and Freitas, H. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. Biotechnology Advances. 29(2): 248-258.

Mac-Adam, J.W., Nelson, C.J. and Sharp, R.E. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue I. Spatial distribution of ionically bound peroxidase activity in genotypes differing in length of the elongation zone. Plant Physiology. 9 (3): 872-878.

Mahanta, D., Rai, R.K., Mishra, S.D., Raja, A., Purakayastha, T.J. and Varghese, E. (2014). Influence of phosphorus and biofertilizers on soybean and wheat root growth and properties. Field Crops Research. 166: 1-9.

Mashhadi Akbar Bojar, M. (2011). Heavy metals and oxidative stress in plants. The first oxidative stress workshop. Karaj Islamic Azad University. Faculty of Agriculture and Natural Resources.

Minami, M. and Yoshikawa, H. (1979). A simplified assay method of superoxide dismutase activity for clinical use. Clinica Chimica Acta. 92: 337–342.

Ministry of Agriculture- Jahad. Agricultural statistic. 2016-17.

Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends in Plant Science. 7: 405–410

Nakano, Y. and Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant Cell Physiology. 22: 867-880.

Oleson, B.T. (1996). World wheat production utilization and trade. In:Bushuk , W. and Rasper. V.F (eds). Wheat production, properties and quality. Chapman and Hall, 1 -11.

Omirou, M., Ioannides, I.M. and Ehaliotis, C. (2013). Mycorrhizal inoculation affects arbuscular mycorrhizal diversity in watermelon roots, but leads to improved colonization and plant response under water stress only. Applied Soil Ecology. 63: 112–119.

Poulton, P.R., Johnston, A.E. and White, R.P. (2013). Plant – available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam. Soil Use and Management. 29: 4–11.

Ruiz-Lozano, J.M. (2003). Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress: new perspectives for molecular studies. Mycorrhiza. 13: 309–317.

Sheteiwy, S. Fathi Ismail Ali, M., Xiong, D., Brestic, Y.C., Skalicky, M., Alhaj Hamoud, M., Ulhassan, Y., Shaghaleh, Z., AbdElgawad, H., Farooq, H., Sharma, M., and El-Sawah, M.A. (2021). Physiological and biochemical responses of soybean plants inoculated with Arbuscular mycorrhizal fungi and Bradyrhizobium under drought stress. BMC Plant Biology. 21: 195.

Salah, M.S., Guan, Y., Cao, D., Li, J., Nawaz, A., Hu, Q., Weimin, H., Mimgyu, N. and Jin, H. (2015). Seed priming with polyethylene glycol regulating the physiological and molecular mechanism in rice (*Oryza sativa* L.) under nano-ZnO stress. Scientific Reports. 5:14278.

Shao, Y.D., Hu, X.C., Wu, Q.S., Yang, T.Y., Srivastava, A.K., Zhang, D.J., Gao, X.B. and Kuca, K. (2021). Mycorrhizas promote P acquisition of tea plants through changes in root morphology and P transporter gene expression. South African Journal of Botany. 137: 455 462.

Sims, J.T. and Sharpley, A.N. (2005). Phosphorus: agriculture and the environment. American Society of Agronomy, Wisconsin USA.

Smith, S.E., Facelli, E., Pope, S. and Smith, A. (2010). Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. Plant and Soil. 326(1 -2): 3-20

Stewart, R.R. and Bewley, J.D. (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. Plant Physiology. 65(2): 245-248.

Tisdale, S., Nelson, W., Beaton, J. and Havlin, J. (1993). Soil Fertility and Fertilizers, fifth ed. Macmillan Publication Company, New York.

Todd, R.L., Giddens, J.E., Kral, D.M. and Hawkins, S.L. (1984). Microbial–Plant Interactions. In ASA Special Publication Number 47. Proceedings of the Symposium held at Fort Collins, Colorado, USA, 5–10 August 1979. Madison, WI, USA: SSSA-ASA-SSA.

Wu, Q.S., Xia, R.X. and Zou, Y.N. (2006). Reactive oxygen metabolism in mycorrhizal and non-mycorrhizal citrus (*Poncirus trifoliata*) seedlings subjected to water stress. Journal of Plant Physiology. 163:1101–1110.

Wu, Q.S., Li, Y., Zou, Y.N. and He, X.H. (2015). Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliate orange grown under different P levels. Mycorrhiza. 25: 121–130.

Xie, X., Weng, B., Cai, B., Dong, Y. and Yan, C. (2014). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and phosphorus supply on the growth and nutrient uptake of Kandelia obovata (Sheue, Liu & Yong) seedlings in autoclaved soil. Applied Soil Ecology. 75: 162– 171.

Yaghoubian, Y., Mohammadi Goltapeh, E., Pirdashti, H., Esfandiari, E., Feiziasl, V., Kari Dolatabadi, H., Varma, A. and Haryani Hassim, M. (2014). Effect of Glomus mosseae and

Piriformospora indica on growth and antioxidant defense responses of wheat plants under drought stress. Agricultural Research. 3(3):239–245.

Yar Mahmoodi, Z., Ariana, L. and Alizadeh, O. (2012). Investigation of morphological properties of maize under stable agricultural conditions. Crop Production in Environmental Stress. 4(2): 15-20.

Yazdani, M., Bahmanyar, M., Pirdashti, H. and Esmaili, M.A. (2009). Effect of phosphate solubilization microorganisms (PSM) and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield and yield components of corn (*Zea mays* L.). World Academy of Science, Engineering and Technology. 37: 90-92.

Zahir, Z.A., Arshad, M. and Khalid, A. (2006). Phytohormones: microbial production and applications. In: Andrew, S., Ball, E.F. (Eds.), Norman Uphoff, Hans Herren, Olivier Husson, Mark Laing, Cheryl Palm, Jules Pretty, Pedro Sanchez, Nteranya Sanginga, Janice Thies (Ed.), Biological Approaches to Sustainable Soil System, first ed. CRC Press, Boca Raton, pp. 207 – 220.

Zhu, X., Song, F. and Xu, H. (2010). Influence of *arbuscular mycorrhiza* on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activity of maize plants under temperature stress. Mycorrhiza. 20:325–332.

Zhu, X., Song, F. and Liu, S. (2011). *Arbuscular mycorrhiza* impacts on drought stress of maize plants by lipid peroxidation, proline content and activity of antioxidant system. Journal of Food, Agriculture and Environment. 9: 583-587.