تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک/ جلد پنجم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۲، ص ۳۰۹-۲۸۷

مقاله پژوهشی

تأثیر کود فسفر و قارچ مایکوریزا بر ویژگی‌های رشدی ریشه و صفات فیزیولوژیک ارقام مختلف گندم دوروم (*Triticum turgidum* var. durum) تحت شرایط دیم

هوشنگ ناصری راد[1*]، رحیم ناصری[2]

۱- گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- گروه تکنولوژی تولیدات گیاهی، آموزشکده فنی مهندسی و کشاورزی دهلران، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

* مسئول مکاتبه: hgnaseri@pnu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱ /۰۳/۰۶ **DOI: 10.22034/CSRAR.2023.333877.1210**

چکیده

به منظور بررسی تأثیر قارچ مایکوریزا و کود فسفر بر برخی ویژگی‌های رشدی ریشه و صفات فیزیولوژیک گندم دوروم در شرایط دیم، آزمایشی مزرعه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه 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 و ترکیب قارچ مایکوریزا +۲۵ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر) به عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که برهمکنش رقم×منابع کودی بر ویژگی‌های رشدی ریشه و صفات فیزیولوژیک معنی‌دار بود. به‌طوری‌که بیشترین سطح (افزایش ۶۱/۷ درصدی نسبت به تیمار شاهد)، حجم مخصوص (افزایش ۹۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد)، تراکم بافت (افزایش ۹۶/۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد) و تراکم حجم ریشه (افزایش ۸۷/۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد) و بعلاوه کلروفیل a و b (بترتیب افزایش ۸۶/۷ و ۸۹/۰۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد) و پرولین (افزایش ۸۱/۹ درصدی نسبت به تیمار شاهد) از رقم ساجی با اعمال تیمار ترکیبی مایکوریزا و ۲۵ کیلوگرم در هکتار فسفر به دست آمد. به نظر می‌رسد قارچ مایکوریزا در شرایط دیم علاوه بر کاهش مقدار کاربرد کود شیمیایی فسفر می‌تواند از طریق توسعه سیستم ریشه‌ای و افزایش سطح ریشه و حجم ریشه، جذب آب و عناصر غذایی را افزایش دهد و با افزایش پرولین و قندهای محلول سبب مقاومت بیشتر گندم به کم‌آبی در شرایط دیم شود.

واژه‌های کلیدی: پرولین، تراکم حجم ریشه، رنگیزه‌های فتوسنتزی، سطح ریشه، قندهای محلول

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) مهم‌ترین گیاه زراعی جهان است که بالغ بر ۴۵ درصد پروتئین و ۵۵ درصد از کالری موردنیاز انسان را تأمین می‌کند (Mozaffari *et al*., 2017). گندم دیم به عنوان یکی از راه‌کارهای مفید برای جایگزینی محصولات کشت آبی، حتی گندم آبی از طرف کارشناسان مربوطه مورد توجه است (Dehghani Sargazi *et al*., 2021).

یکی از منابع شناخته شده تأمین انرژی و پروتئین در جهان گندم دوروم یا ماکارونی (*Triticum turgidum* L. sub sp. Durum Desf.) است. گندم دوروم در ۱۰ درصد نواحی گندم خیز دنیا کشت می‌شود که در مقایسه با گندم نان به شرایط نامساعد آب و هوایی خصوصاً شرایط آب و هوایی نیمه‌خشک سازگارتر است (Ahmadi *et al*., 2018).

فسفر یکی از عناصر پرمصرف غذایی است که دارای نقش مهمی در ساختار سلول و عملکرد کاتالیتیک در متابولیسم گیاهان است. کمبود فسفر موجب اختلال در رشد گیاه شده و جنبه‌های مختلف متابولیسم آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مصرف کودهای فسفری برای افزایش میزان فسفر و حاصلخیزی خاک و ظرفیت تولید محصولات کشاورزی در زراعت‌های مختلف رایج است (Hajiboland *et al*., 2015; Markarian *et al*., 2015).

کمبود آب به دلیل بارندگی محدود، درجه حرارت بالا و تبخیر و تعرق زیاد یکی از عوامل مهم در کاهش تولیدات کشاورزی و کاهش بازده استفاده از مناطق خشک به شمار می‌رود. کشور ایران با میانگین بارندگی سالانه ۲۲۰ میلی‌متر جزء مناطق خشک دنیا محسوب می‌شود، از این‌رو در اکثر استان‌های ایران کشت گیاه زراعی گندم با خطر جدی تنش خشکی مواجه است (Ehdaie, 1995).

از طرف دیگر، اســـتفاده از کودهای شـــیمیایی در چنین مناطقی به منظور تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان همواره باعث ایجاد اثرات مخرب زیســـت‌محیطی می‌شـــود (Perry *et al*., 2011). بنـابراین، بررســـی و کـاربرد منـابع و نهـاده‌هـای تجدیدپذیر که موجب حداکثر بهره‌وری زراعی و کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی و خطرات زیست‌محیطی شوند، ضرورت دارد (Perry *et al*., 2011).

قارچ‌های مایکوریزا از جمله کودهای زیســـتی بوده که به منظور کاهش مصـرف کودهای شـیمیایی و بهبود روابط آبی در گیاه میزبان مورد توجه محققان طی دهه‌های اخیر قرار گرفته اسـت (Smith and Read, 2008). قارچ‌های مایکوریزا با ایجاد رابطه هم‌زیســـتی با ریشـــه اغلب گیاهان زراعی موجب افزایش جذب عناصر غذایی مانند فسفر، روی و مس، افزایش جذب آب، کاهش تأثیر منفی تنش‌های محیطی و افزایش مقاومت در برابر عوامل بیماری‌زا شـده و سـبب بهبود در رشـد و عملکرد گیاهان میزبان در سیستم‌های کشاورزی پایدار می‌شوند (Jahan and Nassiri Mahallati, 2012; Sharma, 2002). در این زمینه گزارش شـده است که اسـتفاده از مایکوریزا تحت شـرایط کم‌آبی سـبب افزایش وزن خشـک ریشـه و اندام‌های هوایی گندم نسـبت به شـاهد شـد(Khalvati *et al*., 2005). محققین در پژوهشـی دیگر نیز با بررسـی اثر مایکوریزا و فسـفر بر روی رشـد و جذب عناصـر غذایی سـورگوم گزارش کردند که گیاهان تلقیح شـده با مایکوریزا و کود فسـفر در مقایسـه با گیاهان شـاهد وزن خشـک ریشـــه و شـــاخـه ســـورگوم را بـه طور معنی‌داری افزایش دادند(Bagayoko *et al*., 2000).

باتوجه به اینکه که فسـفر کمترین تحرک را در بین عناصـر غذایی دارد، قارچ مایکوریزا از طریق افزایش سـطح جذب ریشـه می‌تواند کارایی جذب فسفر در گندم را نیز افزایش دهد و از این طریق در بهبود رشد گندم مؤثر واقع شود (Naserirad *et al*., 2021). میکروارگانیســـم‌های خاک دارای تأثیر معنی‌داری بر میزان رنگیزه‌های فتوســـنتزی می‌باشـــند، به‌طوری‌که در گندم تلقیح شـــده بـا قـارچ میکوریزا میزان کلروفیـل a و b افزایش معنی‌داری از خود نشـــان دادنـد (Naseri *et al*., 2017). هم‌چنین طی آزمـایش‌هـای مختلف بر روی گیـاهـانی هم‌چون ذرت و سورگوم مشخص گردید که ترکیب قارچ مایکوریزا با کود شـیمیایی فسـفره علاوه بر کاهش ۵۰ درصـدی در کاربرد کود شـیمیایی باعث بهره‌وری بهینه از عناصـر غذایی خاک می‌شـود (Yazdani *et al*., 2009; Heydari *et al*., 2014). قارچ‌های مایکوریزا اثرات زیادی بر بیوشـیمی و فیزیولوژی گیاهان میزبان دارنـد (Al-Karaki and Clark, 1999). تولیـد پروتئین‌هـای خـاص (Gianinazzi-Pearson andGianinazzi, 1989)، آمـینـواســـیـدهـا (Tawaraya *et al*., 1994)، لـیـپـیـدهـا (Bethlenfalvay, 1997)، قندها (Tawaraya *et al*., 1994) و مـتـابـولیـت‌هـای ثـانـویـه (Morandi and Gianinazzi-Pearson, 1986) به وســـیله‌ی گیاهان میزبان تلقیح شـــده با قارچ مایکوریزا گزارش شده است. یکی از پاسخ‌های بیوشیمیایی گیاهان در برابر تنش‌های زیسـتی تجمع اسـمولیت‌های سـازگار مانند قندهای محلول و پرولین اســـت (Esna-Ashari, and Amerian 2017) که علاوه بر دخالت در تنظیم اسـمزی، باعث ممانعت از تولید رادیکال‌های آزاد، از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن، حفاظت از یکپارچگی غشاء و ثبات پروتئین‌ها می‌شوند (Amerian and Esna-Ashari, 2017). مشخص شده است که قارچ‌های مایکوریزا با هیدرولیز نشـــاســـته ســـبب افزایش قندهای محلول گیاهان میزبان می‌شـــوند (Kapoor *et al*., 2013). طی پژوهشی که بر روی گیاه ذرت در شرایط دمای بالا انجام گرفت، گزارش شـــد که محتوی قندهای محلول و پرولین در ریشـه گیاهان تلقیح شـده با مایکوریزا در مقایسـه با گیاهان تلقیح نشـده بیشـتر بود (Zhu *et al*., 2010). کاربرد مایکوریزا بر روی گیاه تریتیکاله نیز موجب افزایش وزن و حجم ریشـــه و محتوی رنگیزه‌های فتوســـنتزی شـــد (Kheirizadeh, 2016). هم‌چنین تلقیح بذور گندم با قارچ مایکوریزا ســـبب افزایش ۶ تا ۸ درصدی پروتئین خام دانه شد (Mostajeran *et al*., 2005). در گزارش‌های سـایر محققین بر گندم دیم نیز نشـان داده شـد که کاربرد قارچ میکوریزا ســـبب افزایش میزان کارتنوئید گردید (Naseri *et al*., 2017).

بنابراین، با توجه به اهمیت تلقیح قارچ مایکوریزا در کاهش اثرات منفی تنش خشـــکی در زراعـت دیم و بهبود عملکرد محصـــولات زراعی و هم‌چنین ضـــرورت بهینه‌ســـازی مصـــرف کودهای شـــیمیایی در راســـتای کشـــاورزی پایدار، هدف از این مطالعه بررســـی برخی ویژگی‌های رشـــدی ریشـــه و صـــفات فیزیولوژیک ارقام مختلف گندم دوروم تحت تأثیر کاربرد ترکیبی کود فسفر و قارچ میکوریزا تحت شرایط دیم بود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به شکل آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۲۰ تیمار و سه تکرار طی سال زراعی ۱۳۹۷-۹۸ در مزرعه مرکز تحقیقات کشاورزی سرابله با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه و با طول جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۶ دقیقه و ارتفاع ۹۷۵ متر از سطح دریا انجام شد. اطلاعات هواشناسی منطقه مورد آزمایش و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول‌های ۱ و ۲ 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) ۴- قارچ مایکوریزا +۲۵ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر و ۵- ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر (۱۰۰٪ درهکتار فسفر) بودند. بذور گندم از مرکز تحقیقات کشاورزی ایلام و قارچ مایکوریزا از بخش تحقیقات بیولوژی خاک موسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شدند. قبل از کاشت، بذور گندم با قارچ مایکوریزا که هر گرم آن دارای ۱۲۰ اسپور زنده بود، تلقیح شدند. سپس بذرها در ردیف‌هایی به طول چهار متر و با فواصل ۲۰ سانتی‌متر کشت شدند. ابعاد هر کرت آزمایش هشت متر مربع بود که داخل آن تعداد هشت ردیف در نظر گرفته شد و فاصله بین بلوک‌های آزمایش یک متر در نظر گرفته شد. هم‌چنین مقدار بذر مصرفی برای هر هکتار ۱۲۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد.

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

Table 1- Weather characteristics at Chardavol- Sarableh locale during 2018-2019 cropping season

ماه Month	بارندگی Precipitation (mm)	دمای حداقل مطلق Min temp. (◦C)	دمای حداکثر مطلق Max temp. (◦C)	متوسط دما Average of temp. (◦C)	رطوبت نسبی Relative humidity (%)	دمای زیر صفر (تعداد روز) Under zero temp. (Day No.)	متوسط حداقل دما Average of Min temp. (◦C)	متوسط حداکثر دما Average of Max temp. (◦C)
مهر Oct.	35.5	11.6	36	23.7	33	0	16.1	31.3
آبان Nov.	186.7	4.2	27	14.2	69	0	9.5	18.9
آذر Dec.	159.2	1.4	18.2	9.2	80	0	5.2	13.2
دی Jan.	108.5	-3.8	15.2	6.4	66	12	1.3	11.6
بهمن Feb.	157.4	-3.4	20.6	8.7	56	8	3	14.3
اسفند Mar.	62.4	1.8	24	12.2	58	0	6	18.5
فروردین Apr.	178.4	-0.4	25.8	12.6	68	1	7	18.1
اردیبهشت May.	12.8	2.4	35.2	18.8	48	0	10.3	27.3
خرداد Jun.	0	12	41.4	28.1	26	0	17.4	34.1
جمع Total	900.9	5.5	27.04	14.8	56	21	8.4	20.8

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. طول ریشه‌ها به وسیله دست و با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. وزن تر ریشه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت یک هزارم اندازه‌گیری شد. سپس به منظور اندازه‌گیری 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 مجدداً با ترازوی دیجیتال مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند.

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 مرحله 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.

جهت اندازه‌گیری صفات مرتبط با ریشه (وزن تر و خشک ریشه، مجموع طول ریشه و حجم ریشه) در داخل مزرعه بعد از مرحله گرده‌افشانی از استوانه‌ای فلزی (شبیه به اوگر نمونه‌برداری خاک) که به صورت دستی طراحی و الگو برداری شده بود، استفاده گردید. استوانه فلزی مورد استفاده در این پژوهش دارای ۳۰ سانتی‌متر طول و دو سانتی‌متر قطر بود (Naseri *et al.*, 2021b).

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

Table 2- Some physical and chemical properties of soil under investigation in Agricultural Research Station of Sarableh during 2018-2019 cropping season

بافت خاک Soil texture	آهن Fe	روی Zn	مس Cu	منگنز Mn	منیزیم Mg	فسفر P	پتاسیم K	نیتروژن کل Total N	کربن آلی OC	هدایت الکتریکی EC	اسیدیته pH
						Available					
	(mg kg^{-1})							(%)		(dS m^{-1})	
لومی رسی Clay loam	5.71	1.2	1.4	8.1	230	6.8	281	0.13	1.4	0.55	7.12

سطح ریشه از طریق معادله ۱ محاسبه شد (Akhavan *et al.*, 2012) که در این معادله RA نشان‌دهنده سطح ریشه، RV حجم ریشه، RL طول ریشه و SQRT ریشه دوم (جهت محاسبه از نرم‌افزار اکسل استفاده گردید) است.

$$RA = 2 \times SQRT(RV \times 3.14 \times RL) \quad (۱)$$

RA[1]= سطح ریشه، RV[2]= حجم ریشه، RL[3]= طول ریشه، SQRT= ریشه دوم

قطر ریشه با استفاده از معادله ۲ به دست آمد (Hajabbasi, 2001) که در این رابطه RD[4] نشان‌دهنده قطر ریشه، FRW[5] وزن تر ریشه، RL طول ریشه و SQRT ریشه دوم است.

$$RD = SQRT\frac{(4\times FRW)}{(RL\times 3.14)} \quad (۲)$$

حجم مخصوص ریشه با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد (Hajabbasi, 2001). در این معادله SRM[6] نشاندهنده حجم مخصوص ریشه، DRW[7] وزن خشک ریشه و SV[8] حجم خاک (به دلیل مشخص بودن ابعاد استوانه فلزی، حجم خاک محاسبه شد) است.

$$SRM = \frac{RDW}{SV} \quad (۳)$$

تراکم حجم ریشه از طریق معادله ۴ محاسبه شد (Akhavan *et al.*, 2012) که در این رابطه RMD[9] تراکم حجم ریشه، FRW وزن تر ریشه و SV حجم خاک است.

$$RMD = \frac{FRW}{SV} \quad (۴)$$

تراکم بافت ریشه نیز با استفاده از معادله ۵ انجام گرفت (Paula and Pausas, 2011) که در این معادله RTD[10] نشان‌دهنده تراکم بافت ریشه، DRW وزن خشک ریشه و RV حجم ریشه (با استفاده از استوانه مدرج بدست آمد) است.

$$RTD = DRW \times RV \quad (۵)$$

برای اندازه‌گیری میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی از برگ پرچم

[1] Root Area
[2] Root volume
[3] Root length
[4] Root diameter
[5] Fresh root weight
[6] Special root mass
[7] Dry root weight
[8] Soil volume
[9] Root mass density
[10] Root tissue density

پنج بوته به صورت تصادفی نمونه‌برداری انجام گرفت. مقدار ۰/۵ گرم از بافت برگ که رگبرگ خشبی آن جدا شده بود با ترازو وزن و در هاون چینی حاوی نیتروژن مایع ساییده شد. سپس محلول حاصل از محتوی هاون چینی که از کاغذ صافی واتمن عبور داده شده بود با افزودن استون ۸۰ درصد به حجم نهایی ۲۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در نهایت برای کاهش ناخالصی‌های احتمالی، ۱۸ میلی‌لیتر از قسمت کاملاً صاف شده محلول حاصل در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۱۰ دقیقه عصاره‌گیری شد (Arnon, 1976). پس از سانتریفیوژ مقدار جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳ (کلروفیل a)، ۶۴۶ (کلروفیل b) و ۴۷۳ (کارتنوئید) نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت و غلظت رنگیزه‌ها از طریق معادله‌های ۶ و ۷ تعیین گردید.

(۶)

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

(۷)

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

(۸)

$$\text{Carotenoid} = 100(A470) - 3.27(\text{mg. chl a}) - 104 (\text{mg. chl b})/227$$

در این معادله‌ها V نشان‌دهنده حجم محلول صاف شده (محلول رویی حاصل از سانتریفیوژ)، W وزن تر نمونه (گرم) و A جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر است. جهت اندازه‌گیری پرولین، قندهای محلول و پروتئین کل به ترتیب از روش‌های پاکوین و لیچاسور (Paquin and Lechasseur, 1979)، اریگون و همکاران (Irigoyen *et al.*, 1992) و بردفورد (Bradford, 1976) استفاده شد. جهت تعیین میزان محتوی نسبی آب برگ از معادله ۹ استفاده گردید (Smart and Bingham, 1974). در این معادله RWC نشان‌دهنده محتوی نسبی آب برگ، WF وزن تر برگ، WD وزن خشک برگ و WT وزن آماس برگ است.

(۹)

$$RWC = [(W_F - W_D)/(W_T - W_D)] \times 100$$

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

نتایج و بحث

سطح ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر رقم و منابع کودی به صورت جداگانه در سطح احتمال یک درصد و اثر برهمکنش رقم و منابع کودی در سطح احتمال پنج درصد بر سطح ریشه گندم معنی‌دار بود (جدول ۳). اثر برهمکنش ارقام و منابع کودی نشان داد که کاربرد منابع کودی نسبت به عدم استفاده از آن، سطح ریشه را به طور معنی‌داری در تمامی ارقام افزایش داد. در بین تیمارهای کودی، رقم ساجی به همراه تیمار ترکیبی مایکوریزا + ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر دارای بیشترین سطح ریشه (۱۱۰/۱۲ سانتی‌متر) بود که نسبت به تیمار شاهد افزایش ۶۱/۷ درصد را نشان داد (شکل ۱). وجود تفاوت در صفات ریشه‌ای از جمله سطح ریشه را می‌توان به دلیل اختلاف بین ارقام مورد بررسی دانست که با نتایج برخی محققین دیگر که نشان دادند بین ارقام مختلف گندم در حضور قارچ میکوریزا از نظر سطح ریشه تفاوت وجود دارد هم‌خوانی دارد(Naseri *et al.*, 2019b).

فسفر از مهم‌ترین عناصری است که نقش عمده‌ای در انتقال انرژی و رشد و تغذیه گیاهان دارد (Heydari *et al.*, 2014). اما، اکثر منابع فسفر در خاک به صورت غیرقابل جذب برای گیاهان است (Ghazi and Zak, 2003). مشخص شده است که قارچ‌های مایکوریزا با تشکیل شبکه‌های هیف‌مانند در اطراف ریشه گیاهان می‌توانند باعث افزایش سطح تماس آن‌ها با خاک و بنابراین افزایش جذب آب و عناصر غذایی به ویژه فسفر و نیتروژن از خاک شوند (Sharma, 2002). از این‌رو چنین به نظر می‌رسد که در کاربرد ترکیبی کود فسفر و مایکوریزا، قارچ مایکوریزا با افزایش جذب فسفر سبب افزایش رشد و سطح ریشه گندم می‌شود. در این زمینه، گزارش شده است که تلقیح خاک با قارچ مایکوریزا کلونیزاسیون ریشه گندم دوروم را دو برابر افزایش داد(Saia *et al.*, 2015). هم‌چنین کاربرد قارچ مایکوریزا بر گیاه بامیه سبب افزایش ۱۶ درصدی سطح ریشه در مقایسه با شاهد شد (Jabborova *et al.*, 2021).

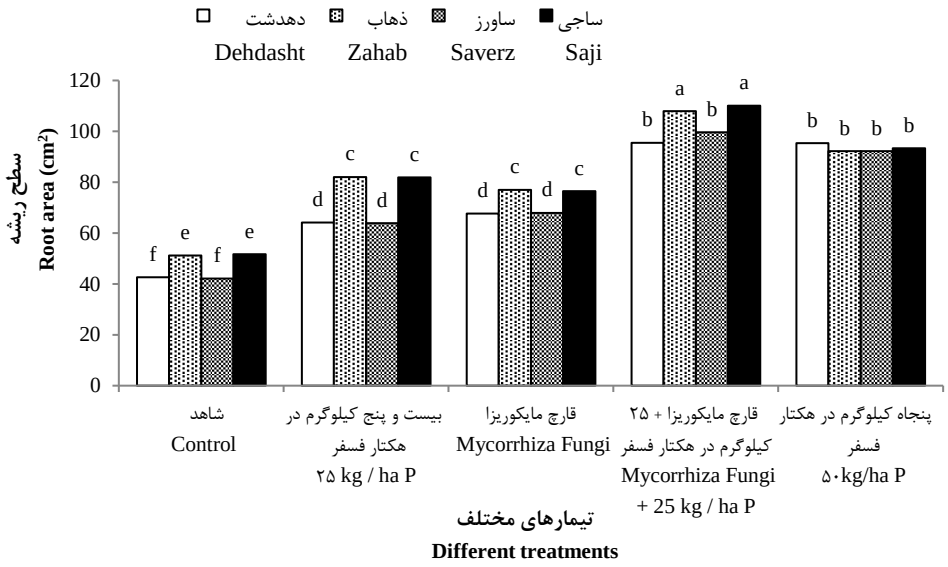
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر ارقام و منابع کودی بر برخی صفات رشدی ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

Table 3- Analysis of variance for the effect of cultivars and fertilizer sources on some root characteristics of Durum wheat in rainfed condition

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	سطح Area	قطر Diameter	حجم مخصوص Special volume	تراکم بافت Tissue density	تراکم حجم Volume density
بلوک Block (R)	2	559.09**	0.008**	0.000002**	130.58**	0.000002**
رقم Cultivar (C)	3	434.66**	0.006**	0.000001**	119.46**	0.000001**
منابع کودی Fertilizer sources (FS)	4	5685.68**	0.013**	0.00005**	2437.18**	0.00005**
رقم × منابع کودی Cultivar × Fertilizer sources (C×FS)	12	50.44*	0.0008**	0.0000006*	50.46**	0.0000006*
خطا Error	38	19.86	0.0002	0.0000002	12.77	0.0000002
ضریب تغییرات CV (%)		5.73	3.54	13.24	19.01	13.23

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطوح ۵ درصد و ۱ درصد

* and ** is significant at 5% and 1% probability levels, respectively



شکل ۱- اثر برهمکنش رقم و منابع کودی بر سطح ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

Figure 1- Interaction effect of cultivar and fertilizer sources on root area of Durum wheat in rainfed condition

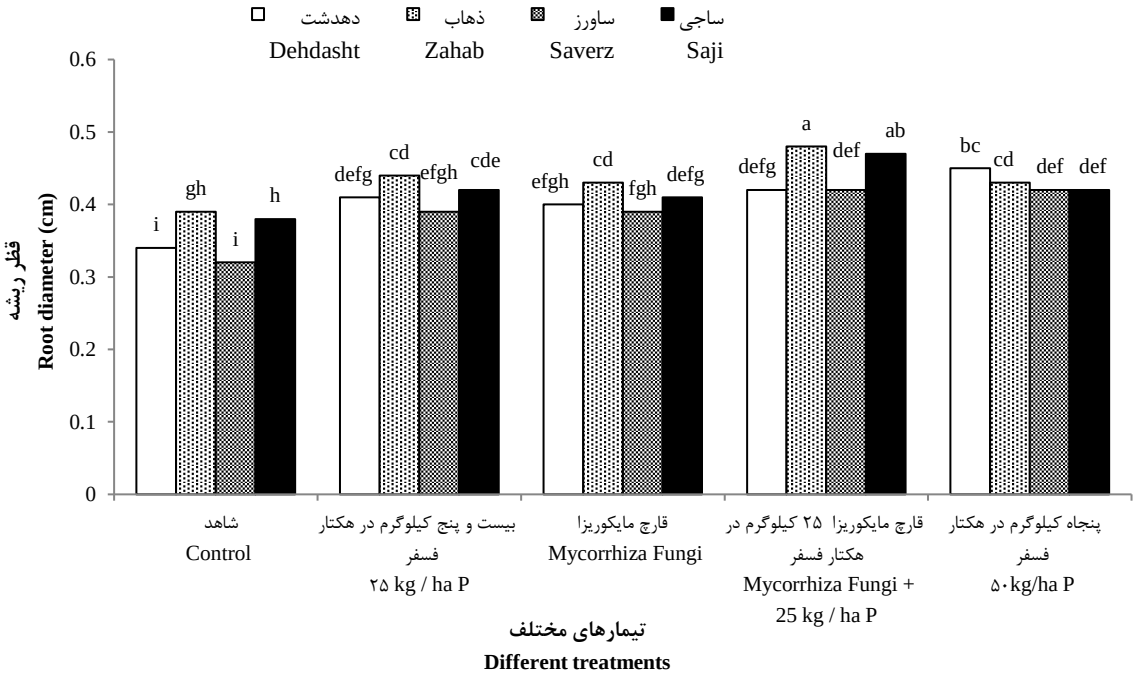
میانگین‌های با حروف متفاوت در شکل، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری دارند.

Means with different letters in each shape are significantly different based on Duncan's multiple range test P≤0.05.

قطر ریشه

براساس نتایج جدول ۳ مشخص شد که اثر رقم، منابع کودی و برهمکنش این دو فاکتور بر قطر ریشه معنی‌دار بود (p≤۰/۰۱). در برهمکنش ارقام و منابع کودی مشخص گردید که ارقام ذهاب و ساجی با کاربرد توام مایکوریزا و کود فسفر به ترتیب با ۰/۴۸ و ۰/۴۷ میلی‌متر بیشترین قطر ریشه و ارقام دهدشت و ساورز در شرایط عدم کاربرد کود با مقدار ۰/۳۴ و ۰/۳۲ میلی‌متر کمترین قطر ریشه را به همراه داشتند (شکل ۲). هم‌راستا با نتایج این پژوهش، طی آزمایشی دیگر گزارش شد که کاربرد توام مایکوریزا و کود فسفر سبب افزایش رشد ریشه جو شد(Sharma and Parma, 2004). در پژوهشی دیگر بر روی گیاه بامیه بیان شد که کاربرد قارچ مایکوریزا در مقایسه با عدم کاربرد آن و در شرایط تنش خشکی باعث افزایش ۱۷ درصدی قطر ریشه گیاه شد (Jabborova *et al.*,

(2021. هم‌چنین مطالعات مختلف نشـــان داده اســـت که قارچ مایکوریزا با افزایش جذب آب و بهبود رشـــد گیاه، به طور قابل توجهی، ارتفاع گیاه، وزن خشـک شـاخه، کل طول ریشـه، حجم ریشـه و قطر ریشـه افزایش می‌دهد (Gholamhoseini *et al*., 2013; Chitarra *et al*., 2016; Bowles *et al*., 2018).



شکل ۲- اثر برهمکنش رقم و منابع کودی بر قطر ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

Figure 2- Interaction effect of cultivar and fertilizer sources on root diameter of Durum wheat in rainfed condition

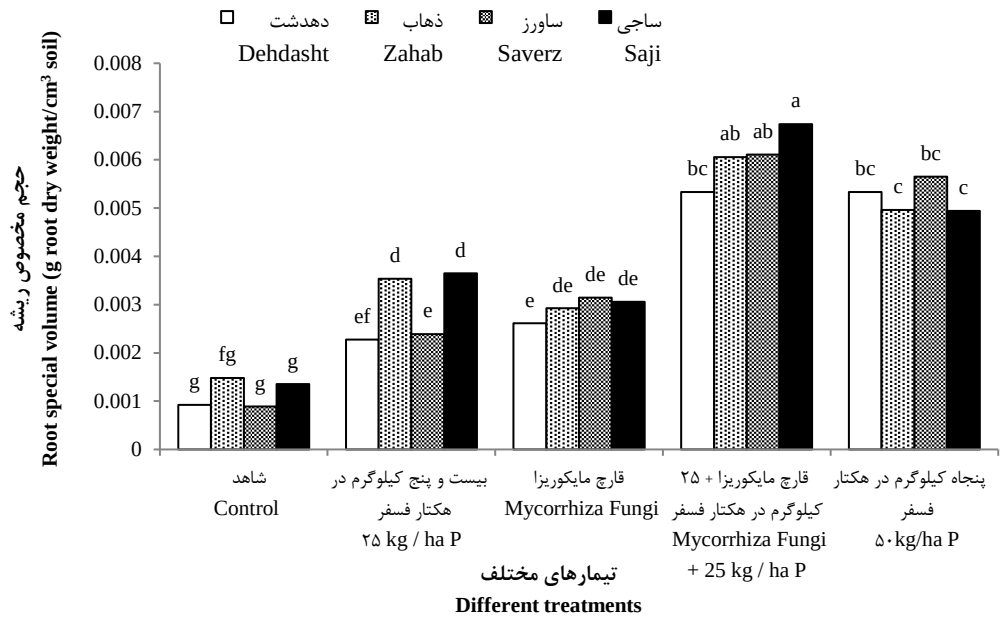
میانگین‌های با حروف متفاوت در شکل، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری دارند.

Means with different letters in each shape are significantly different based on Duncan's multiple range test P≤0.05.

حجم مخصوص ریشه

حجم مخصـوص ریشـه به طور معنی‌داری (p≤۰/۰۱) تحت تأثیر ارقام و مصـــرف منابع مختلف کودی قرار گرفت. هم‌چنین اثر برهمکنش آن‌هـا بر این صـــفـت معنی‌دار بود (p≤۰/۰۵) (جـدول ۳). اثر برهمکنش ارقـام و منـابع کودی نشـــان داد، بیشـترین حجم مخصوص ریشـه از رقم ساجی تحت کاربرد توام مایکوریزا و کود فســـفر (۰/۰۰۷ گرم وزن خشـــک ریشـــه بر ســـانتی‌متر مکعب حجم خاک) و کمترین مقدار این صـــفت از ارقام دهدشـت و سـاورز در شـرایط عدم کاربرد کود (۰/۰۰۰۹ گرم وزن خشـک ریشـه بر سـانتی مترمکعب حجم خاک) حاصـل شـد که نسـبت به تیمار شـاهد افزایش ۸۷/۱ درصدی نشـان داد (شکل ۳). به نظر می‌رسد متفاوت بودن صفات ریشه‌ای از جمله حجم مخصوص ریشه به دلیل اختلاف ژنتیکی ارقام گندم باشد. در گزارش‌های سـایر محققین نیز نشـان داده شـد که بین ارقام گندم از نظر صفات ریشه‌ای با هم اختلاف وجود دارد (Naseri *et al*., 2019b).

با توجه به معادله حجم مخصـــوص ریشـــه، این پارامتر به معنای میزان وزن خشـک ریشـه در حجم مشـخصـی از خاک اســـت. همان‌طور که قبلاً بیان گردید قارچ مایکوریزا از طریق افزایش مجموع سـطح ریشـه باعث افزایش هدایت هیدرولیکی آب و جذب عناصر فسفر و نیتروژن می‌گردد (Sharma, 2002). عنصر فسفر به واسطه نقش آن در انتقال انرژی (Heydari *et al*., 2014) و عنصر نیتروژن از طریق توسعه برگ‌های جوان و تحریک ازدیاد ریشـه‌های جانبی منجر به افزایش طول و سـطح ریشه می‌شوند (Guo *et al*., 2001; Remans *et al*., 2006). بنابراین به نظر می‌رسـد کابرد توام کود فسـفر و مایکوریزا تحت شـرایط دیم در مقایسـه با سـایر تیمارها بیشـترین تأثیر را در ازدیاد و تکثیر ریشـه دارد که به دنبال آن منجر به افزایش حجم مخصوص ریشه گندم می‌شود.



شکل ۳- اثر برهمکنش رقم و منابع کودی بر حجم مخصوص ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

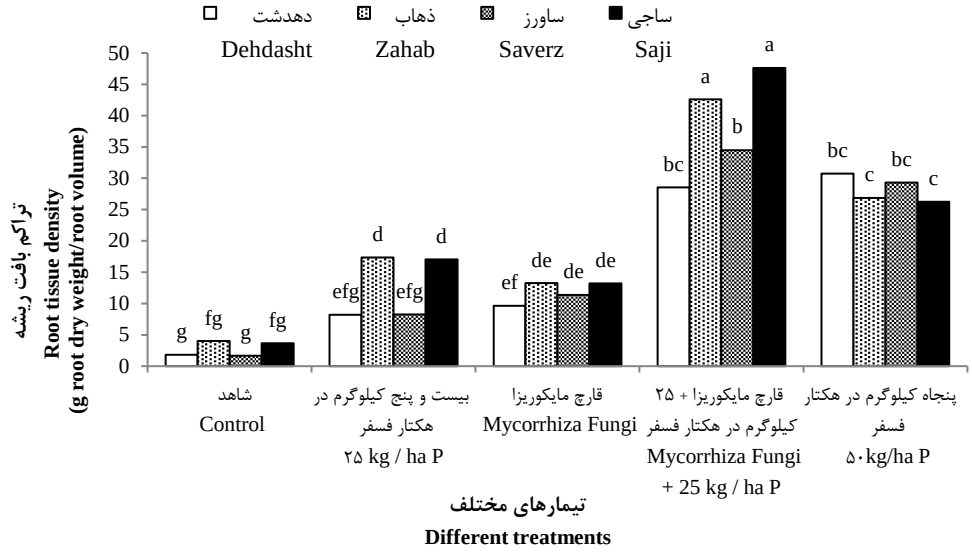
Figure 3- Interaction effect of cultivar and fertilizer sources on root special volume of Durum wheat in rainfed condition

میانگین‌های با حروف متفاوت در شکل، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری دارند.

Means with different letters in each shape are significantly different based on Duncan's multiple range test P≤0.05.

تراکم بافت ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشـــان داد که اثر ارقام و منابع کودی بر تراکم بافت ریشـه گندم دوروم معنی‌دار بود (p≤۰/۰۱) (جدول ۳). تأثیر برهمکنش ارقام و منابع کودی بر تراکم بافت ریشـــه در ســـطح احتمال یک درصـــد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین میزان تراکم بافت ریشه در ارقام ساجی (۴۸ گرم وزن خشـک ریشـه در حجم ریشـه) و ذهاب (۴۳ گرم وزن خشـک ریشه در حجم ریشه) با کاربرد ترکیبی قارچ مایکوریزا و فسفر و کمترین میزان تراکم بافت ریشـه در رقم ساورز (۱/۶۷ گرم وزن خشک ریشـه در حجم ریشـه) و در شـرایط عدم مصـرف کود به دســت آمد که افزایش ۹۶/۵ و ۹۶/۱ درصـــدی نســـبت به رقم ســـاورز در تیمار عدم مصـــرف کود نشـــان داد (شـــکل ۴). به طورکلی، ارقام ساجی و ذهاب با مصرف منابع کودی (به جز ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فســـفر) واکنش بهتری در بهبود تراکم بافت ریشـه گندم نشـان دادند (شـکل ۴). در پژوهشـی با بررسـی اثر ســویه‌های قارچ مایکوریزا و کود فســفره بر صــفات رشــدی گندم گزارش شـد که کاربرد ۸۰ کیلوگرم در هکتار کود فسـفر توام با ســویه‌های قارچ گلوموس اینترارادیز و گلوموس موســه، ماده خشـک کل و ماده خشـک ریشـه را به طور معنی‌داری در مقایسـه با گیاهان شـاهد افزایش داد (Hamidi and Marashi, 2018). هم‌چنین طی آزمایش دیگری مشـخص شـد که کاربرد ترکیبی کود شـــیمیایی، ورمی کمپوســـت و قارچ مایکوریزا در مقایســه با اعمال آن‌ها به صــورت جداگانه بر روی گیاه ذرت به طور قابل توجهی سبب افزایش طول ریشـه و وزن خشـک ریشـه شـد (Yarmahmoodi *et al*., 2012). بیان شـده اسـت که کلونیزاسیون مایکوریزا باعث افزایش سطح ریشه و جذب عناصر می‌شود. از طرف دیگر گزارش شده است که قارچ‌های مایکوریزا می‌توانند با پیش‌روی در خاک مقادیر مناسـبی از عناصـر غذایی را برای گیاه تأمین کنند که در افزایش رشـــد اندام زیرزمینی گیاه مؤثر است (Khan *et al*., 2000). بنابراین به نظر می‌رسد اعمال تیمارهای کودی با افزایش اندام زیرزمینی گیاه و به دنبال آن افزایش وزن خشـک ریشـه سـبب بهبود تراکم بافت ریشـه گندم می‌شوند.



شکل ۴- اثر برهمکنش رقم و منابع کودی بر تراکم بافت ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

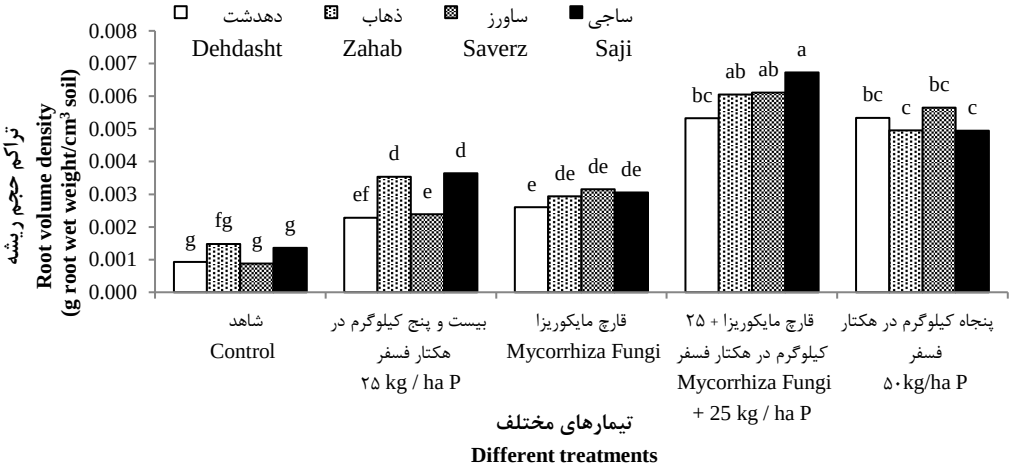
Figure 4- Interaction effect of cultivar and fertilizer sources on root tissue density of Durum wheat in rainfed condition

میانگین‌های با حروف متفاوت در شکل، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری دارند.

Means with different letters in each shape are significantly different based on Duncan's multiple range test P≤0.05.

تراکم حجم ریشه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس مشاهده شد که کاربرد رقم و منابع کودی در سطح احتمال یک درصد و اثرات برهمکنش آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر تراکم حجم ریشه معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج اثرات برهمکنش نشان داد که تمامی ارقام در ترکیب با منابع کودی به طور قابل توجهی تراکم حجم ریشه را نسبت به عدم کاربرد کود افزایش دادند. اعمال تیمار ترکیبی مایکوریزا + ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر در رقم ساجی دارای بیشترین تراکم حجم ریشه (۰/۰۰۷ گرم وزن تر ریشه بر حجم خاک) بوده که نسبت به تیمار شاهد افزایش ۸۷/۱ درصد را نشان داد (شکل ۵). قارچ میکوریزا با ایجاد تغییرات مورفولوژیک در ریشه منجر به افزایش طول ریشه، حجم ریشه، سطح ریشه، تراکم حجم ریشه و چگالی سطح ریشه می‌گردد (Naseri *et al*., 2019a; Naseri *et al*., 2019b; Naseri *et al*., 2021b).



شکل ۵- اثر برهمکنش رقم و منابع کودی بر تراکم حجم ریشه گندم دوروم تحت شرایط دیم

Figure 5- Interaction effect of cultivar and fertilizer sources on root volume density of Durum wheat in rainfed condition

میانگین‌های با حروف متفاوت در شکل، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری دارند.

Means with different letters in each shape are significantly different based on Duncan's multiple range test P≤0.05.

اگرچه افزایش وزن تر و خشک ریشه با اعمال مایکوریزا ممکن است به علت کاهش غلظت آبسیزیک اسید و افزایش مقدار سیتوکینین در داخل سیستم ریشه گیاه و ترشح اسیدهای آلی حل‌کننده 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). از این‌رو چنین به نظر می‌رسد با افزایش سیستم ریشه‌ای گیاه تراکم حجم ریشه که نشان‌دهنده مقدار وزن تر ریشه در حجم مشخصی از خاک است، افزایش می‌یابد.

محتوی نسبی آب برگ

محتوی نسبی آب برگ به طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات ساده رقم و منابع کودی ($p\leq$۰/۰۱) و اثر برهمکنش این دو عامل قرار گرفت ($p\leq$۰/۰۵) (جدول ۴). نتایج اثر برهمکنش نشان داد که استفاده از منابع کودی مختلف در مقایسه با عدم استفاده از کود بر روی ارقام مورد مطالعه سبب افزایش معنی‌دار محتوی نسبی آب برگ شد. تیمار ترکیبی مایکوریزا و فسفر و پس از آن تیمار ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر در ترکیب با ارقام مورد بررسی دارای بیشترین اثر افزایشی بر محتوی نسبی آب برگ بودند. کاربرد توام مایکوریزا + ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر در ارقام ساورز و ساجی توانست محتوی نسبی آب برگ را به ترتیب ۹۲ و ۸۷ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دهد، در سایر تیمارها کودی در این آزمایش نیز اختلاف معنی‌داری بین ارقام مورد بررسی مشاهده شد (شکل ۶). بررسی اثر قارچ مایکوریزا و کود نیتروژن تحت شرایط دو رژیم آبیاری مختلف بر روی گندم، نشان داد که قارچ مایکوریزا در هر دو شرایط آبیاری (آبیاری کامل و کم‌آبیاری) محتوی نسبی آب برگ گیاه را به طور قابل توجهی افزایش داد(Zhang *et al*., 2016). این محققان بیان داشتند که اثرات مثبت قارچ مایکوریزا بر افزایش محتوی نسبی آب برگ می‌تولند به علت بهبود تغذیه نیتروژن (Bethlenvalfay *et al*., 1998)، افزایش جذب آب به وسیله هیف‌ها (Faber *et al*., 1991) و به طور کلی افزایش رشد گیاه باشد (Bryla and Duniway, 1997). بهبود محتوی نسبی آب برگ تحت تأثیر قارچ مایکوریزا طی پژوهش‌های دیگری (Zhu *et al*., 2011) بر ذرت در شرایط تنش دمای بالا (Naseri *et al*., 2017) بر گندم دیم نیز گزارش شده است که مؤید نتایج این پژوهش است.

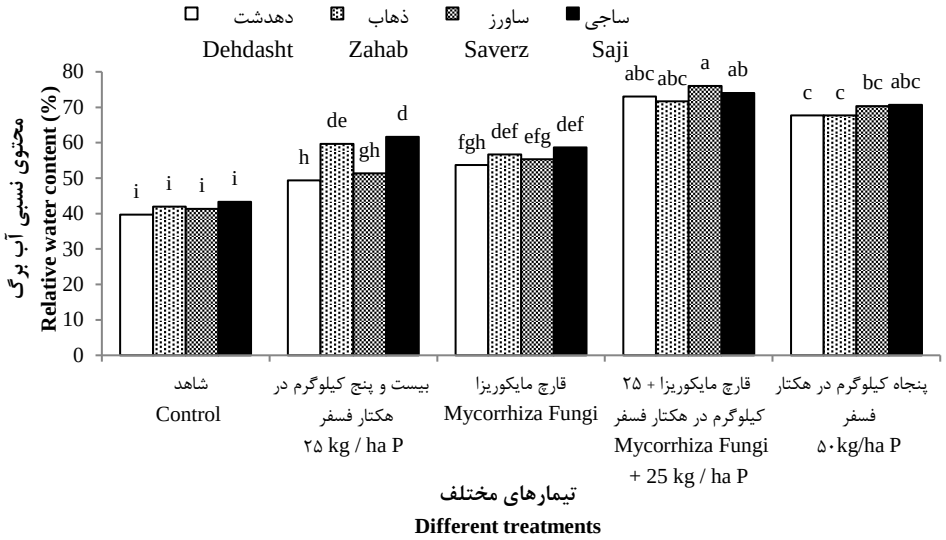
جدول ۴- تجزیه واریانس اثر ارقام و منابع کودی بر برخی صفات فیزیولوژیک برگ گندم دوروم تحت شرایط دیم

Table 4- Analysis of variance for the effect of cultivars and fertilizer sources on some leaf physiological traits of Durum wheat in rainfed condition

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	محتوی نسبی آب Relative water content	کارتنوئید Carotenoides	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	قندهای محلول Soluble sugar	پرولین Proline	پروتئین کل Total protein
بلوک Block (R)	2	689.82**	0.49*	0.37**	0.34**	87.4**	0.53**	6.53**
رقم Cultivar (C)	3	63.62**	0.19^{ns}	0.28*	0.27*	5.39**	0.38**	0.83**
منابع کودی Fertilizer sources (FS)	4	1922.14**	16.79**	13.58**	13.49**	30.92**	13.08**	10.38**
رقم × منابع کودی Cultivar × Fertilizer sources (C×FS)	12	21.41*	0.06^{ns}	0.16*	0.16*	0.74^{ns}	0.16*	0.05^{ns}
خطا Error	38	8.66	0.09	0.07	0.06	0.79	0.07	0.12
ضریب تغییرات CV (%)	-	4.97	10.72	12.98	13.43	20.82	12.23	3.17

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

ns, * and ** is no significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively



شکل ۶- اثر برهمکنش رقم و منابع کودی بر محتوی نسبی آب برگ گندم دوروم تحت شرایط دیم

Figure 6- Interaction effect of cultivar and fertilizer sources on relative water content of Durum wheat in rainfed condition

میانگین‌های با حروف متفاوت در شکل، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری دارند.

Means with different letters in each shape are significantly different based on Duncan's multiple range test P≤0.05.

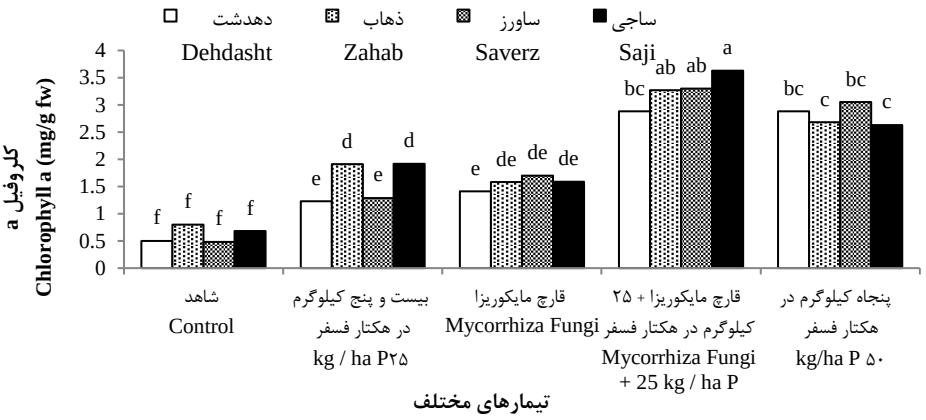
کارتنوئید

مطابق نتایج، مقدار کارتنوئید تحت تأثیر رقم و برهمکنش رقم در منابع کودی قرار نگرفت اگرچه اثر منابع کودی بر این پارامتر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، تمامی منابع کودی با اختلاف معنی‌داری مقدار کارتنوئید را در مقایسه با عدم کاربرد کود (شاهد) افزایش دادند. به‌طوری‌که تیمارهای مایکوریزا + فسفر، ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر، مایکوریزا و ۲۵ کیلوگرم در هکتار فسفر به ترتیب باعث افزایش ۱۹۰، ۱۶۴، ۶۳ و ۵۷ درصدی مقدار کارتنوئید نسبت به شاهد شدند. در این زمینه گزارش‌هایی مبنی بر افزایش مقدار کارتنوئید با کاربرد قارچ مایکوریزا در گندم دیم (Naseri *et al*., 2017) و جو دیم (Naseri *et al*., 2021a) گزارش شده است که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. کارتنوئید رنگدانه‌ای است که باعث تثبیت فاز مایع غشاهای تیلاکوئید و حفاظت از ساختارهای سلولی و دستگاه‌های فتوسنتزی در برابر نور می‌شود (Karim *et al*., 1999; Wahid *et al*., 2007). سطح بالای کارتنوئید در گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا می‌تواند به علت افزایش جذب فسفر باشد که نقش مهمی به عنوان حامل انرژی در فرآیند فتوسنتز دارد (Bastami and Majidian, 2016). بعلاوه مشخص شده است که قارچ مایکوریزا می‌تواند با افزایش کارایی مصرف آب، ظرفیت نگهداری آب و محتوی نسبی آب سبب بهبود وضعیت آبی گیاهان (Zhu *et al*., 2011) و جذب عناصر کم‌تحرکی هم‌چون فسفر شود (Auge *et al*., 1987).

کلروفیل a و b

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر رقم و منابع کودی به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد و اثر برهمکنش رقم و منابع کودی در سطح احتمال پنج درصد بر مقدار کلروفیل a و b گندم معنی‌دار بود (جدول ۴). در مورد برهمکنش ارقام و منابع کودی مشخص شد که مقدار کلروفیل a و b در ارقام مختلف با کاربرد منابع کودی نسبت به عدم کاربرد کود به طور قابل توجهی افزایش یافت، بطوری‌که تیمار مایکوریزا در ترکیب با کود فسفر بر روی رقم ساجی با ۳/۶۳ و ۳/۴۷ میلی‌گرم برگرم وزن تازه برگ به ترتیب بیشترین مقدار کلروفیل a و b را به خود اختصاص داد. در مقابل، کمترین مقادیر کلروفیل a و b به ترتیب با ۰/۴۸ و ۰/۳۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ از رقم ساورز و ۰/۵ و ۰/۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ از رقم دهدشت در شرایط عدم کاربرد کود به دست آمد (شکل ۷ و ۸). در این زمینه گزارش شده است که اعمال قارچ مایکوریزا در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد بر گیاه کاهو در مقایسه با گیاهانی که قارچ را دریافت نکرده بودند،

باعث افزایش محتوی کلروفیل a، محتوی کلروفیل b، میزان فتوسنتز خالص و تعرق شد(Yan *et al.*, 2021). هم‌چنین طی آزمایشی مشاهده شد که ارقام مختلف گندم دیم تحت تیمار قارچ مایکوریزا در مقایسه با تیمار شاهد میزان کلروفیل a و b بیشتری داشتند(Naseri *et al.*, 2017). گزارش‌ها نشان می دهد قارچ میکوریزا تولیدات آنتی‌اکسیدانتی را افزایش داده که نتیجه این افزایش آنتی اکسیدانتی موجب کم کردن گونه‌های فعال اکسیژن و محافظت سلول‌ها در برابر تنش اکسیداتیو می‌گردد (Zhu *et al.*, 2011). با توجه به نتایج پژوهش‌های مختلف علت افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی در نتیجه کاربرد قارچ مایکوریزا می‌تواند افزایش دسترسی گیاه به نیتروژن (Chandrasekhar *et al.*, 2005)، جذب بیشتر منیزیم (Giri *et al.*, 2002) و بهبود جذب فسفر باشد (Demir, 2004) که تمامی این موارد ناشی از افزایش توان جذب و انتقال آب در گیاه است (Duan *et al.*, 2008).

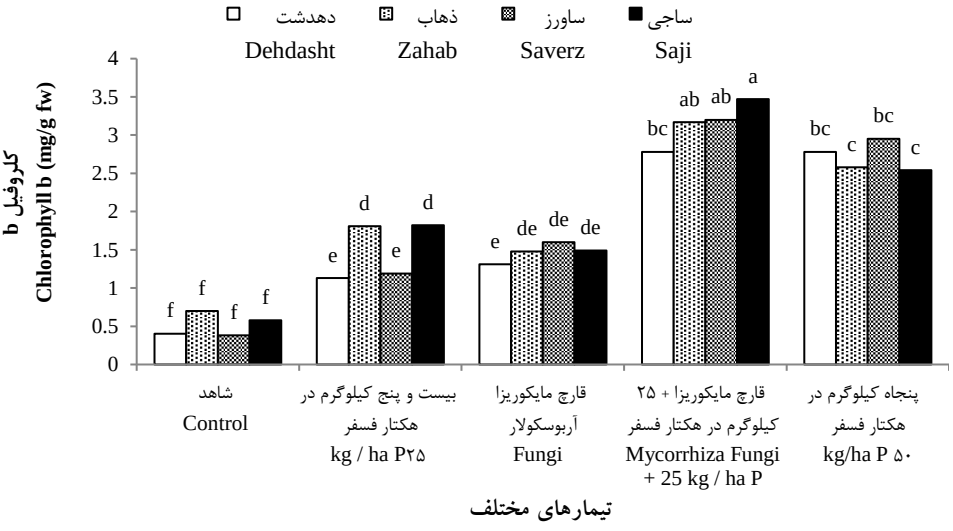


شکل ۷- اثر برهمکنش رقم و منابع کودی بر مقدار کلروفیل a گندم دوروم تحت شرایط دیم

Figure 7- Interaction effect of cultivar and fertilizer sources on value of chlorophyll a of Durum wheat in rainfed condition

میانگین‌های با حروف متفاوت در شکل، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری دارند.

Means with different letters in each shape are significantly different based on Duncan's multiple range test P≤0.05.



شکل ۸- اثر برهمکنش رقم و منابع کودی بر مقدار کلروفیل b گندم دوروم تحت شرایط دیم

Figure 8- Interaction effect of cultivar and fertilizer sources on value of chlorophyll b of Durum wheat in rainfed condition

میانگین‌های با حروف متفاوت در شکل، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری دارند.

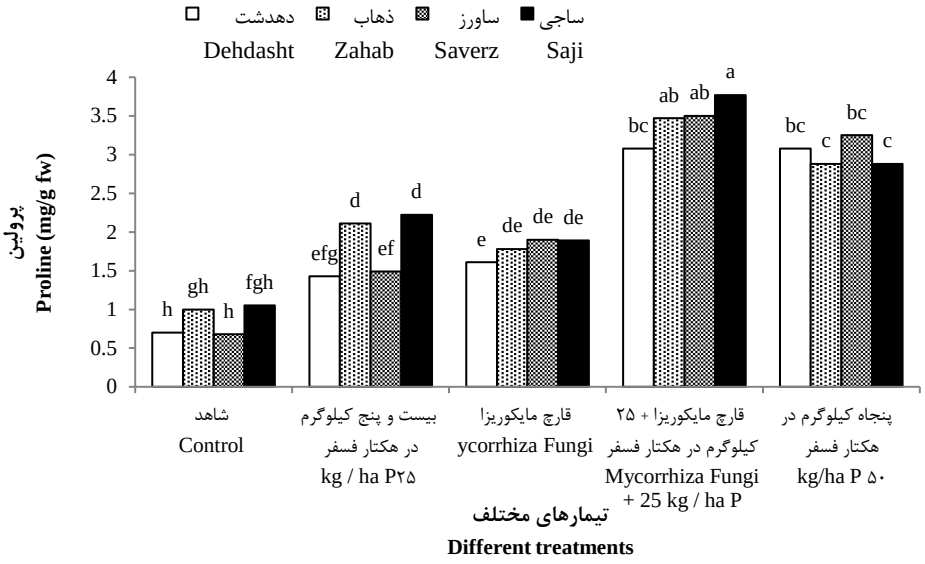
Means with different letters in each shape are significantly different based on Duncan's multiple range test P≤0.05.

قندهای محلول

اثر ارقام و منابع مختلف کودی بر محتوی قندهای محلول معنی‌دار بود ($p\leq$۰/۰۱)، اما اثر برهمکنش این فاکتورها اختلاف معنی‌داری را نشان نداد (جدول ۴). رقم ساجی با ۵/۰۹ میلی‌گرم برگرم وزن تر برگ با اختلاف معنی‌داری نسبت به سایر ارقام بیشترین قندهای محلول را به خود اختصاص داد (جدول ۵). در بین منابع کودی نیز مشخص گردید که محتوی قندهای محلول با کاربرد منابع کودی به طور معنی‌داری در مقایسه با عدم کاربرد کود افزایش داشت، به‌طوری‌که تیمارهای ترکیبی مایکوریزا و فسفر، ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر، مایکوریزا و ۲۵ کیلوگرم در هکتار فسفر به ترتیب باعث افزایش ۱۸۷، ۱۴۷، ۷۴ و ۶۵ درصدی محتوی قندهای محلول در مقایسه با شاهد شدند (جدول ۶). در این زمینه، گزارش شده است که اعمال مایکوریزا در شرایط تنش آبی متوسط و شدید باعث افزایش محتوی قندهای محلول گندم شد (Zebhi *et al.*, 2021). همچنین افزایش محتوی قندهای محلول در ارقام جو را با کاربرد توام مایکوریزا در شرایط دیم گزارش شده است(Naseri *et al.*, 2021a). بسیاری از شرایط تنش‌زای محیطی بر متابولیسم قندها و پخش مواد فتوسنتزی در گیاهان در حال رشد اثر می‌گذارند. افزایش میزان قندهای محلول به عنوان شاخص فیزیولوژیکی مهم در تنظیم اسمزی و مقاومت به تنش خشکی است. به‌طوری‌که در شرایط تنش خشکی گیاهان برای دسترسی بیشتر به آب، تجمع مواد محلول را در سلول‌ها افزایش می‌دهند (Yordanov *et al.*, 2003). علت اصلی تجمع قندهای محلول می‌تواند تجزیه قندهای نامحلول (نشاسته)، کاهش مصرف قند به علت کاهش فتوسنتز و هم‌چنین تغییرات دیگر مانند هیدرولیز باشد (Kameli and Losel, 1996). در ارتباط با نقش مایکوریزا بر میزان قندهای محلول گزارش‌های متعددی وجود دارد. در این رابطه، گزارش شده است که قارچ‌های مایکوریزا از طریق هیدرولیز نشاسته باعث افزایش قندهای محلول می‌شوند(Kapoor *et al.*, 2013). هم‌چنین این قارچ‌ها می‌توانند با افزایش مقدار هورمون‌های سیتوکینین و جیبرلین محتوی قندهای محلول را افزایش دهند، افزایش میزان این هورمون‌ها به ویژه سیتوکینین می‌تواند با انتقال یون‌های مؤثر در باز شدن روزنه‌ها و تنظیم سطح کلروفیل سبب افزایش یافتن سرعت فتوسنتز و در نهایت افزایش محتوی کربوهیدرات‌ها در گیاهان شود (Nemat-Alla *et al.*, 2008).

پرولین

اثر برهمکنش رقم و منابع کودی بر میزان پرولین در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار گردید (جدول ۴). بیشترین میزان پرولین با متوسط ۳/۷۷ میلی‌گرم برگرم از رقم ساجی با مصرف تلفیقی قارچ مایکوریزا و ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفر بدست آمد که نسبت به رقم ساورز در شرایط عدم کاربرد کود افزایش ۸۱/۹ درصدی در میزان پرولین را نشان داد (شکل ۹). افزایش پرولین در گیاه هنگام تنش، نوعی مکانیسم دفاعی محسوب می‌شود که از طریق فرآیند تنظیم اسمزی نقش مهمی در جلوگیری از تخریب آنزیم‌ها، پاک کردن رادیکال‌های هیدروکسیل، حفاظت از ساختار پروتئینی و غشاء سلول و تثبیت ساختارهای درون سلولی دارد که تحمل گیاه را در برابر تنش‌ها افزایش می‌دهد (Kafi *et al.*, 2009). در پژوهش حاضر، میزان پرولین با کاربرد مایکوریزا و کود فسفر افزایش نشان داد، چنین به نظر می‌رسد که هم‌زیستی قارچ مایکوریزا با گیاهان تحت شرایط دیم باعث فرآهمی بیشتر آب از محیط ریشه برای گیاه می‌شود. به عبارت دیگر، گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا با استفاده از روابط آبی و تغذیه بهتر نسبت به گیاهانی که مایکوریزا را دریافت نکرده‌اند در شرایط دیم کمتر دچار آسیب می‌شوند و در نتیجه با تغییر در میزان پرولین و قندهای محلول گیاه را از صدمات تنش خشکی محافظت می‌کنند (Ruiz-Lozano, 2003). گزارش شده است که در شرایط تنش، کاربرد مایکوریزا در سورگوم با کاهش سنتز پروتئین، افزایش هیدرولیز پروتئین و افزایش میزان آبسیزیک اسید سبب افزایش تجمع آمینواسیدهایی مانند پرولین می‌شود (Ehsani *et al.*, 2009). از طرف دیگر، تولید پرولین با تولید قندهای محلول ارتباط دارد، زیرا یکی از مسیرهای تولید پرولین، گلوتامات است و با افزایش تولید قندهای محلول میزان تولید گلوتامات افزایش می‌یابد و سنتز پرولین تشدید می‌شود (Alikhani and Mahmudi zarandi, 2019). افزایش میزان پرولین در نتیجه کاربرد مایکوریزا در گندم در شرایط دیم(Naseri *et al.*, 2017) و همچنین بر جو در شرایط دیم(Naseri *et al.*, 2021a) گزارش شده است که موافق نتایج پژوهش حاضر است.



شکل ۹- اثر برهمکنش رقم و منابع کودی بر میزان پرولین گندم دوروم تحت شرایط دیم

Figure 9- Interaction effect of cultivar and fertilizer sources on value of proline of Durum wheat in rainfed condition

میانگین‌های با حروف متفاوت در شکل، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری دارند.

Means with different letters in each shape are significantly different based on Duncan's multiple range test P≤0.05.

پروتئین کل

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که پروتئین کل تحت اثرات اصلی رقم و منابع کودی قرار گرفت ($p\leq۰/۰۱$) (جدول ۴). با توجه به نتایج مقایسه میانگین مشخص شد که رقم ساجی با ۱۱/۱۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه برگ دارای بیشترین مقدار پروتئین کل بود که با رقم ذهاب اختلاف معنی‌داری نداشت. در مقابل، کمترین مقدار پروتئین کل نیز با ۱۰/۴۶ و ۱۰/۶۹ میلی‌گرم برگرم به ترتیب از ارقام دهدشت و ساورز به دست آمد (جدول ۵). تفاوت این ارقام در تولید میزان پروتئین کل نشان می‌دهد که ارقام ساجی و ذهاب نسبت به ارقام دهدشت و ساورز بهتر می‌توانند در شرایط دیم مقاومت کنند که این اختلاف احتمالاً به علت ژنتیک‌های متفاوت این ارقام است. در مورد اثر منابع کودی بر میزان پروتئین کل نتایج نشان داد که اعمال منابع کودی چه به صورت جداگانه و چه به صورت ترکیبی سبب افزایش قابل توجه میزان پروتئین کل در مقایسه با عدم اعمال کود شد. به‌طوری‌که تیمارهای ترکیبی مایکوریزا و فسفر، ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر، ۲۵ کیلوگرم در هکتار فسفر و قارچ مایکوریزا توانستند میزان پروتئین کل را به ترتیب ۲۵، ۲۲، ۱۳ و ۱۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دهند (جدول ۶). در پژوهشی به منظور ارزیابی عکس‌العمل ژنوتیپ‌های گندم به تلفیق کود بیولوژیک و فسفره، گزارش شد که با افزایش مصرف فسفر به همراه قارچ مایکوریزا درصد پروتئین دانه افزایش یافت، به‌گونه‌ای که کمترین درصد پروتئین دانه با ۱۲ درصد مربوط به تیمار عدم کاربرد کود و بیشترین درصد پروتئین با ۱۵ درصد از تیمار تلقیح با قارچ مایکوریزا و مصرف ۷۵ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار به دست آمد (Rostami *et al*., 2017). محققین دیگر نیز با مطالعه ۵۲ تحقیق بر روی ۱۲ گونه از حبوبات بیان نمودند که استفاده از قارچ مایکوریزا عملکرد پروتئین دانه را ۱۴ درصد افزایش داد (Kaschuk *et al*., 2010).

تأثیر مثبت مایکوریزا بر میزان پروتئین کل در ذرت دلنه‌ای (Mobasser *et al*., 2012) و در گندم (Jiriaie *et al*., 2015) گزارش شده است که هم‌راستای نتایج این پژوهش است. مشخص شده است که قارچ مایکوریزا موجبات کد کردن ژن‌هایی در اندام‌های مختلف گیاه از جمله دانه را فراهم کرده که این ژن‌ها منجر به سنتز و تجمع برخی پروتئین‌های مقاومتی در گیاه می‌شوند که مایکوریزا از این طریق می‌تولند منجر به افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی شود (Ruiz-Lozano *et al*., 2008). هم‌چنین به نظر می‌رسد مایکوریزا با افزایش دسترسی گیاه به عناصر غذایی به ویژه نیتروژن باعث افزایش عملکرد و بنابراین مقدار پروتئین کل می‌شود (Jiriaie *et al*., 2015).

جدول ۵- اثر ارقام و منابع کودی بر برخی صفات فیزیولوژیک برگ گندم دوروم تحت شرایط دیم

Table 5- The effect of cultivars and fertilizer sources on some leaf physiological traits of Durum wheat in rainfed condition

تیمارها Treatments	کارتنوئید Carotenoides	قندهای محلول Soluble sugar	پروتئین کل Total protein
	(mg/g fw)		
ارقام Cultivars			
دهدشت Dehdasht	2.73a	3.71b	10.64c
ذهاب Zahab	2.97a	4.24b	10.92ab
ساورز Saverz	2.87a	3.98b	10.69bc
ساجی Saji	2.97a	5.09a	11.15a
منابع کودی Fertilizer sources			
عدم مصرف کود Control	1.48d	2.19d	9.49d
۲۵ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر 25 kg/ha Phosphorus	2.32c	3.62c	10.68c
قارچ مایکوریزا GM	2.41c	3.80c	10.67c
قارچ مایکوریزا +۲۵ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی فسفر GM+25 kg/ha Phosphorus	4.30a	6.28a	11.89a
۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر 50 kg/ha Phosphorus	3.92b	5.42b	11.53b
LSD (p=0.05)			

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

In each column means with similar letters are not significantly different (P≤0.05).

نتیجه‌گیری کلی

در مجموع نتایج این آزمایش نشـــان داد که تغذیه ارقام گندم با قارچ مایکوریزا و کود فسفر در شرایط دیم باعث افزایش رشـد ریشـه و صـفات فیزیولوژیک گیاه شـد. با توجه به نتایج مشـــخص شـــد که مصـــرف توام قارچ مایکوریزا به همراه ۲۵ کیلوگرم کود فسفر در هکتار در مقایسه با کاربرد جداگانه آن‌ها، تأثیر بسـیار بیشـتری در بهبود و افزایش صـفات مورد مطالعه داشـت. به نظر می‌رسـد قارچ مایکوریزا موجب افزایش سـیسـتم ریشـه‌ای گیاه و با ترشـح اسـیدهای آلی حل‌کننده فسـفر باعث جذب بیشتر فسفر می‌شود که مجموع این عوامل سبب افزایش سـطح و حجم ریشـه و به دنبال آن افزایش جذب آب و عناصـر غذایی می‌شـــود که در نهایت بهبود محتوی نســـبی آب برگ، رنگدانـه‌های فتوســـنتزی و میزان قنـدهای محلول، پرولین و پروتئین کل گنـدم را منجر می‌شـــود. هم‌چنین یافتـه‌های این پژوهش نشـان داد که ارقام سـاجی و ذهاب در مقایسـه با ارقام دهدشت و ساورز واکنش بهتری به کاربرد قارچ میکوریزا از خود نشان دادند. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گندم دوروم رقم ســـاجی به همراه قارچ مایکوریزا + ۲۵ کیلوگرم در هکتار را برای کشت در منطقه توصیه نمود.

References

Ahmadi, Kh., Darzi-Ramandi, H. and Fotokian, M.H. 2018. Effect of terminal drought stress on germination characteristics of stressed plants of five durum wheat genotypes. *Journal of Seed Research*, 7(4): 22-34. (In

Persian).

Akhavan, S., Shabanpour, M. and Esfahani, M. 2012. Soil compaction and texture effects on the growth of roots and shoots of wheat. *Journal of Water and Soil*, 26(1): 725-735.

Al-Karaki, G.A. and Clark, R.B. 1999. Mycorrhizal influence on protein and lipid of durum wheat grown at different soil phosphorus levels. *Mycorrhiza*, 9: 97-101.

Amerian, M. and Esna-Ashari, M. 2017. Effect of different levels of salinity on some physiological and cells-growth characteristics in three Potato (*Solanum tubrosum* L.) cultivars in vitro. *Plant Production Technology*, 9(1): 209-225. (In Persian).

Arnon, A.N. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23: 112-121.

Auge, R.M., Schekel, K.A. and Wample, R.L. 1987. Rose leaf elasticity changes in response to mycorrhizal colonization and drought acclimation. *Physiologia Plantarum*, 70: 175-182.

Bagayoko, M., George, E., Romheld, V. and Buerkert, A. 2000. Effects of mycorrhizae and phosphorus on growth and nutrient uptake of millet, cowpea and sorghum on a West African soil. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 135: 399-407.

Bastami, A. and Majidian, M. 2016. Comparison between mycorrhizal fungi, phosphate biofertilizer and manure application on growth parameters and dry weight of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 7(26): 23-33. (In Persian).

Bethlenfalvay, G.J., Brown, M.S., Ames, R.N. and Thomas, R.S. 1988. Effects of drought on host and endophyte development in mycorrhizal soybeans in relation to water use and phosphate uptake. *Journal of Plant Physiology*, 72: 565-71.

Bethlenfalvay, G.J., Schreiner, R.B. and Mihara, K.L. 1997. Mycorrhizal fungi effects on nutrient composition and yield of soybean seeds. *Journal of Plant Nutrition*, 20: 581-591.

Bowles, T.M., Jackson, L.E. and Cavagnaro, T.R. 2018. Mycorrhizal fungi enhance plant nutrient acquisition and modulate nitrogen loss with variable water regimes. *Global Change Biology*, 24: e171–e182.

Bradford, M.M. 1976. Rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Annals of Biochemistry*, 72: 248-254.

Bryla, D.R. and Duniway, J.M. 1997. Effects of mycorrhizal infection on drought tolerance and recovery in safflower and wheat. *Plant Soil*, 97: 95-103.

Chandrasekhar, B.R., Ambrose, G. and Jayabalan, N. 2005. Influence of biofertilizer and nitrogen source level on the growth and yield of *Echinochloa frumentacea* (Roxb.) Link. *Journal of Agricultural Technology*, 1(2): 223 -234.

Chitarra, W., Pagliarani, C., Maserti, B., Lumini, E., Siciliano, I., Cascone, P., Schubert, A., Gambino, G., Balestrini, R. and Guerrieri, E. 2016. Insights on the impact of *arbuscular mycorrhizal* symbiosis on tomato tolerance to water stress. *Plant Physiology*, 171: 1009-1023.

Dehghani Sargazi, H., Bazrafshan, O. and Zamni, H. 2021. Investigation of the effect of meteorological-agricultural drought on rainfed wheat yield in Iran using SPEI, *Nivar*, 45 (114-115): 15-26.

Demir, S. 2004. Influence of *arbuscular mycorrhizal* on some physiological, growth parameters of pepper. *Turkish Journal of Biology*, 28: 85-90.

Duan, L., Guan, C., Li, J., Eneji, A.E., Li, Z. and Zhai, Z. 2008. Compensative effects of chemical regulation with uniconazole on physiological damages caused by water deficiency during the grain filling stage of wheat. *Agronomy and Crop Science*, (19)4: 914- 920.

Ehdaie, B. 1995. Variation in water use efficiency and its components in wheat. II. Pot and field experiments. *Crop Science*, 35: 1617-1626.

Ehsani, M., Norinia, A.A. and Bakhshi Khaniki, Gh.R. 2009. Effect of salinity and Mycorrhiza on amount of proline in sorghum. *Journal of Plant Protection and Food*, 3: 11-18.

Faber, B.A., Zasoske, R.J., Munns, D.N. and Shackel, K. 1991. A method for measuring hyphal nutrition and water uptake in mycorrhizal plants. *Canadian Journal of Botany*, 69: 87-94.

Ghazi, A.K. and Zak, B.M. 2003. Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza*, 14: 263-269.

Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Dolatabadian, A., Jamshidi, E. and Khodaei-Joghan, A. 2013. Effects of *arbuscular mycorrhizal* inoculation on growth, yield, nutrient uptake and irrigation water productivity of sunflowers grown under drought stress. *Agricultural Water Management*, 117: 106–114.

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.

Gianinazzi-Pearson, V. and Gianinazzi, S. 1989. Cellular and genetic aspects of interactions between hosts and fungal synbionts in mycorrhizae. *Genome*, 31: 336-341.

Giri, B., Kapoor, R. and Mukerji, K.G. 2002. VA mycorrhizal techniques/VAM technology in establishment of plants under salinity stress condition. In: Mukerji, K.G., Manoracheir, C., and Singh, J. (Eds) Techniques in mycorrhizal studies, Dordrecht. Springer Netherlands. Pp. 313-327.

Guo, F.Q., Wang, R., Chen, M. and Crawford, N.M. 2001. The Arabidopsis dual-affinity nitrate transporter gene AtNRT1 .1 (CHL1) is activated and functions in nascent organ development during vegetative and reproductive growth. *Plant Cell*, 13: 1761-1777.

Hajabbasi, M.A. 2001. Tillage effects on soil compactness and wheat root morphology. Journal of *Agricultural Science and Technology*, 3: 67-77.

Hajiboland, R., Radpour, E. and Pasbani, B. 2015. Influence of phosphorus deficiency on drought stress tolerance in two tomato (*Solanum lycopersum* L.) cultivars. *Journal of Plant Research* (*Iranian Journal of Biology*), 27(5): 788-803. (In Persian).

Hamidi, H. and Marashi, S.K. 2018. Effect of different mycorrhizal fungi and phosphorus fertilizer on growth traits and grain yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Production Science*, 8(1): 14-21. (In Persian).

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. (In Persian).

Irigoyen, J.J., Emerich, D.W. and Sanchez-Diaz, M. 1992. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Plant Physiology*, 84: 55-60.

Jabborova, D., Annapurna, K., M. Al-Sadi, A., Alharbi, S.A., Datta, R. and Tan Kee Zuan, A. 2021. Biochar and *Arbuscular mycorrhizal* fungi mediated enhanced drought tolerance in Okra (*Abelmoschus esculentus*) plant growth, root morphological traits and physiological properties. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28: 5490-5499.

Jahan, M. and Nassiri Mahallati, M. 2012. Soil fertility and biofertilizers. Ferdowsi University of Mashhad Press. Pp. 250. (In Persian).

Jiriaie, M., Fateh, E. and Aynehband, A. 2015. Evaluation the morph physiological changes in wheat cultivars from the use of mycorrhiza and azospirillum. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12(4): 841-851. (In Persian).

Kameli, A. and Losel, D.M. 1996. Growth and sugar accumulation in durum wheat plants under water stress. *New Phytologist*, 132: 57-62.

Kapoor, R., Evelin, H., Mathur, P. and Giri, B. 2013. Arbuscular mycorrhiza: Approaches for abiotic stress tolerance in crop plants for sustainable agriculture. In: Plant acclimation to environmental stress (Eds. Tuteja, N. and Gill, S. S.) 359-401. Springer Science+Business Media, New York.

Karim, M.A., Fracheboud, Y. and Stamp, P. 1999. Photosynthetic activity of developing leaves of *Zea mays* is less affected by heat stress than that of developed leaves. *Physiologia Plantarum*, 105: 685-693.

Kaschuk, G., Leffelaar P.A., Giller, K.E., Alberton, O., Hungria, M. and Kuyper, T.W. 2010. Responses of legumes to rhizobia and *arbuscular mycorrhizal* fungi: A meta-analysis of potential photosynthate limitation of symbioses. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 125-127.

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.

Khan, M.S., Aamil, M. and Zaidi, A. 2000. Mung bean response to inoculation with N fixing and phosphate solubilizing bacteria. In: Biofertilizers and bio-pesticides, ed. A. M. Deshmukh, 40–48. Jaipur, India: Techno Science Publication.

Kheirizadeh Arough, Y. 2016. Effects of nano zinc oxide foliar application, *arbuscular mycorrhizal* fungus and free living nitrogen fixing bacteria on yield and some physiological traits of Triticale under salinity and water limitation condition. Ph.D thesis, University of Mohaghegh Ardabili, Iran. (In Persian).

Markarian, Sh., Najafi, N., Aliasgharzad, N. and Oustan, Sh. 2015. Interactive effects of Ensifer meliloti (*Sinorhizobium meliloti*) and phosphorus on some growth characteristics of alfalfa under soil water deficit conditions. *Journal of Soil Biology*, 3(2): 163-178. (In Persian).

Mobasser, H., Mehraban, A., Kohkan, S. and Moradgholi, A. 2012. Mycorrhiza (*Glomus mossea*) effects on protein percent and agronomic traits of four varieties of corn in the Sistan region. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 103: 105-114. (In Persian).

Morandi, D. and Gianinazzi-Pearson, V. 1986. Influence of mycorrhizal and phosphate nutrition on secondary metabolite contents of soybean roots. In: Gianinazzi- Pearson V, Gianinazzi S (eds) Physiological and genetical aspects of mycorrhizae. INRA, Paris, pp 787–791.

Mostajeran, A., Emtiazi, G. and Amouaghaei, R. 2005. The effect of *azospirillum brasilense* and pH of irrigation water on yield, protein content and sedimentation rate of protein in different wheat cultivars. *Iranian Journal of Biology*, 7(2): 127-140. (In Persian).

Mozaffari, A., Asgharzadeh, A. and Mashhadi Akbarbojar, M. 2017. Evaluation of drought tolerance of two wheat cultivars inoculated with Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) of under greenhouse conditions. *Crop Physiology Journal*, 8(31): 21-39. (In Persian).

Naseri, R., Barary, M., Zarea, M.J., Khavazi, K. and Tahmasebi, Z. 2017. Effect of Phosphate Solubilizing Bacteria and Mycorrhizal fungi on some activities of antioxidative enzymes, physiological characteristics of wheat under dry land conditions. *Iranian Journal of Dryland Agriculture*, 6(1): 1-34. (In Persian).

Naseri, R., Barary, M., Zarea, M.J., Khavazi, K. and Tahmasebi, Z. 2019a. Wheat- root system influenced by application of phosphate solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi under different levels of phosphorous chemical fertilizer. *Journal of Soil Biology*, 6(2): 137-155. (In Persian).

Naseri, R., Barary, M., Zarea, M.J., Khavazi, K. and Tahmasebi, Z. 2019b. Evaluation of root and grain yield of wheat cultivars affected by phosphate solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi under dry land conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 17(1): 83-98. (In Persian).

Naseri, R., Mirzaei, A. and Abbasi, A. 2021a. Effect of application of different fertilizer sources on physiological and biochemical traits of new cultivars of barley under dryland conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 19(2): 121-140. (In Persian).

Naseri, R., Mirzeai, A. and Abbasi, A. 2021b. Root system of different barley cultivars influenced by applications of different fertilizer sources under dryland farming. *Water and Soil*, 35(2): 267-284. (In Persian).

Naserirad, H., Naseri, R., Mirzeai, A. and Zarei, B. 2021. Study of the effects of phosphorous and mycorrhiza on yield and yield components of durum wheat under rainfed condition. *Applied Field Crops Research*, 34(3): 43-68. (In Persian).

Nemat-Alla, M.M., Badawi, A.M., Hassan, N.M., El-Bastawisy, Z.M. and Badran, E.G. 2008. Effect of metribuzin, butachlor and chlorimuronethyl on amino acid and protein formation in wheat and maize seedlings. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 90: 8-18.

Paquin, R. and Lechasseur, P. 1979. Observationssur une methode de dosage de la proline libre dans les extraits de plantes. *Canadian Journal of Botany*, 57: 1851-1854.

Paula, S. and Pausas, J.G. 2011. Root traits explain different foraging strategies between resprouting life histories. *Oecologia*, 165: 321-331.

Perry, T.W., Rhykerd, C.L., Holt, D.A. and Mayo, H.H. 2011. Effect of potassium fertilization on chemical characteristics, yield and nutritive value of corn silage. *Journal of Animal Science*, 34: 642-646.

Remans, T., Nacry, P., Pervent, M., Filleur, S., Diatloff, E., Mounier, E., Tillard, P., Forde, B.G. and Gojon, A. 2006. The arabidopsis NRT1.1 transporter participates in the signaling pathway triggering root colonization of nitraterich patches. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103: 19206-19211.

Rostami, H., Nakhzari Moghaddam, A., Mollashahi, M. and Salahi Farahi, M. 2017. Investigation of wheat cultivars response to combination of biologic and phosphorus fertilizers. *Journal of Applied Research of Plant Ecophysiology*, 4(1): 187-206. (In Persian).

Ruiz-Lozano, M., Porcel, R. and Aroca, R. 2008. Evaluation of the possible participation of drought-induced genes in the enhanced tolerance of *Arbuscular Mycorrhizal* plants to water deficit. *Mycorrhiza, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 185-205.

Saia, S., Ruisi, P., Fileccia, V., Miceli, G.D., Amato, G. and Martinelli, F. 2015. Metabolomics suggests that soil inoculation with *arbuscular mycorrhizal* fungi decreased free amino acid content in roots of durum wheat grown under n-limited, p-rich field conditions. *PLoS ONE*, 10(6): e0129591.

Sharma, A.K. 2002. Biofertilizers for sustainable agriculture. *Agrbis India*, pp.407.

Sharma, R.A. and Parma, B.B. 2004. Influence of biofertilizers and indigenous sources of nutrients on nutrient uptake and productivity of rain fed barley. *Crop Research Hisar*, 13: 11-18.

Smart, R.E. and Bingham, G.E. 1974. Rapid estimates of relative water content. *Plant Physiology*, 53: 258-260.

Smith, S.E. and Read, D.J. 2008. Mycorrhiza symbiosis. 3 rd Ed., Academic Press, London.

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.

Tawaraya, K., Sasai, K. and Wagatsuma, T. 1994. Effect of phosphorus application on the contents of amino acids and reducing sugars in the rhizosphere and VA mycorrhizal infection of white clover. *Soil Science and Plant Nutrition*, 40: 539-543.

Wahid, A., Gelani, A.M. and Foolad, M.R. 2007. Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61: 199-223.

Yan, Z., Ma, T., Guo, S., Liu, R. and Li, M. 2021. Leaf anatomy, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of lettuce as influenced by arbuscular mycorrhizal fungi under high temperature stress. *Scientia Horticulturae*, 280: 109933.

Yarmahmoodi, Z., Aryana, L. and Alizadeh, O. 2012. The study of interaction chemical and biological fertilizer on morphological characteristics of corn in sustainable agriculture. *Crop Production in Environmental Stress*, 2: 15-20. (In Persian).

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.

Yordanov, I., Velikova, V. and Tsonev, T. 2003. Plant responses to drought and stress tolerance. *Plant Physiology*, 187-206.

Zebhi, H., Abbaspour, A., Peyvandi, M. and Majd, A. 2021. Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis improves growth, physiological, and biochemical properties of wheat under different irrigation regimes in a semiarid area. *Russian Journal of Plant Physiology*, 68: 1135-1142.

Zhang, B., Chang, S.X. and Anyia, A.O. 2016. Mycorrhizal inoculation and nitrogen fertilization affect the physiology and growth of spring wheat under two contrasting water regimes. *Plant Soil*, 398: 47-57.

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.

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.

Journal of Crop Science Research in Arid Regions/ Volume 5, Issue 1, Spring and Summer 2023, P. 287-309

Effects of phosphorous fertilizer and mycorrhizal fungi on root growth characteristics and physiological traits of different cultivars of durum wheat (*Triticum turgidum* var. *durum*) under rainfed condition

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

[1]Department of Agriculture, Pyame Noor University, Tehran, Iran

[2]Department of Plant Production Technology, Dehloran Faculty of Agriculture and Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

[*]Corresponding Author: hgnaseri@pnu.ac.ir

Received: 13 March 2022 Accepted: 27 May 2022 **DOI: 10.22034/CSRAR.2023.333877.1210**

Abstract

Introduction: Water scarcity due to limited rainfall, high temperatures, and high evapotranspiration is one of the important factors in reducing crops and reducing the efficiency of using dry areas. Iran is one of the arid regions of the world, with an average annual rainfall of 220 mm. wheat cultivation is at serious risk of drought stress. Mycorrhizal fungi, by creating a symbiotic relationship with the roots of most crops, increase the absorption of nutrients such as phosphorus, zinc, and copper, increase water absorption, reduce the negative impact of environmental stresses, and improve the growth and yield of host plants. Therefore, considering the importance of mycorrhiza inoculation in reducing the negative effects of drought stress and improving crop yield, as well as the need to optimize the use of chemical fertilizers for sustainable agriculture, the purpose of this study was to investigate the root growth characteristics and physiological traits of different durum wheat cultivars affected by the combined application of phosphorus fertilizer and mycorrhiza under dryland conditions.

Materials and Methods: In order to evaluate the effect of mycorrhizal fungi and phosphorous fertilizer on some of the root growth characteristics and physiological traits of durum wheat in rainfed conditions, an experiment was carried out as a factorial based on a randomized complete block design with three replications at Sarableh Agricultural Research station during the growing season 2018–2019. Experiment factors consisted of four cultivars of durum wheat (Dehdasht, Zahab, Saverz, and Saji) and five levels of fertilizer source (control, 25 and 50 $kgha^{-1}$ P, mycorrhizal fungi, and 25 $kgha^{-1}$ P). The seeds were sown in rows four meters long and at intervals of 20 cm. The dimensions of each experimental plot were eight square meters, in which eight rows were considered, and the distance between the experimental blocks was considered one meter. Also, the amount of seed used was 120 kg/ha. To measure root-related traits in the field after pollination from a metal cylinder that was manually designed and patterned Was used. To measure the amount of photosynthetic pigment, the leaves of the five-plant flag were randomly sampled. The Analysis of variance and comparison of mean data were performed by a Duncan multi-range test using SAS 9.1 software and the drawing of figures by Excel software.

Results and Discussion: The results indicated that the application of fertilizer sources significantly improved the traits. The results also showed that the interaction of cultivars and fertilizer sources on root growth characteristics and physiological traits was significant. So that, the highest root area (61.7% increased to control treatment), root special volume (91% increased to control treatment), root tissue density (47.5% increased to control treatment), root volume density (87.1% increased to control treatment), chlorophyll a and b (86.7 and 89.04% increased to control treatment, respectively), and proline (81.9% increased to control treatment) were obtained at Saji cultivar along with application of mycorrhizal fungi + 25 $kgha^{-1}$ P. The relative water content of leaves also increased in different cultivars with fertilizer application. The application of treatment mycorrhizal fungi + 25 $kgha^{-1}$ P in Saverz and Saji cultivars increased the relative water content by 84% and 71%, respectively, compared to the control treatment.

Conclusion: According to the results, it was found that the combined application of mycorrhizal fungi with 25 $kgha^{-1}$ phosphorus fertilizer compared to the control treatment had the most effect on

improving and increasing the studied traits. Mycorrhizal fungi seem to increase the root system of crops, and the secretion of phosphorus-soluble organic acids causes more phosphorus uptake, which together increases the surface area and root volume and consequently increases the uptake of water and elements, Which ultimately leads to improved relative leaf water content and photosynthetic pigments. The findings of this study also showed that Saji cultivars showed a better response to mycorrhizal fungi compared to other cultivars. Therefore, according to the obtained results, the Saji cultivar with Mycorrhizal fungi + 25 $kgha^{-1}$ can be recommended for cultivation under dry land conditions.

Key words: Photosynthetic pigments, Proline, Root surface, Root volume density, Soluble sugars