نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی
جلد بیست و دوم، شماره دوم، ۱۳۹٤
http://jopp.gau.ac.ir

اثر هم‌زیستی قارچ میکوریزای آربوسکولار بر برخی از خصوصیات زراعی بزرک (*Linum ussitatissimum* L.) تحت شرایط تنش خشکی در منطقه شهرکرد

***مریم سلطانیان[۱] و علی تدین[۲]**

[۱]دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران،

[۲]دانشیار گروه زراعت، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۵/۳۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۲۸

چکیده

سابقه و هدف: یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد گیاهان زراعی مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود آب است. قارچ‌های میکوریزایی یکی از مهم‌ترین ریز جانداران محیط ریشه محسوب می‌شوند. اثرات این قارچ‌ها از طریق ایجاد تغییرات روی برخی از خصوصیات ریشه و جذب عناصر غذایی در گیاهان میزبان در شرایط تنش خشکی اعمال می‌شود. با وجود این، هم‌زیستی قارچ‌های میکوریزایی با گیاه بزرک هنوز مورد بررسی و مطالعه قرار نگرفته است. از این‌رو، این آزمایش به منظور بررسی اثر هم‌زیستی قارچ میکوریزای آربوسکولار در شرایط تنش خشکی بر برخی خصوصیات کیفی و جذب عناصر غذایی توسط بزرک انجام شد.

مواد و روش‌ها: این آزمایش در سال زراعی ۱۳۹۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح آبیاری: ۱۰۰ (بدون تنش)، ۷۵ (تنش ملایم)، ۵۰ (تنش متوسط) و ۲۵ (تنش شدید) درصد نیاز آبی گیاه، به‌عنوان عامل اصلی و تلقیح بذر گیاه بزرک با دو میکوریزا در سه سطح شامل *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae* و یک تیمار بدون تلقیح میکوریزا به‌عنوان عامل فرعی، منظور گردید. صفات اندازه‌گیری

*مسؤل مکاتبه: msoltanian91@gmail.com

شده شامل درصد و عملکرد روغن، میزان پرولین برگ، غلظت و جذب عناصر فسفر، پتاسیم و کلسیم در اندام هوایی، غلظت و جذب گوگرد در دانه بودند.

یافته‌ها: بر اساس نتایج آزمایش، تنش خشکی بر تمام صفات به‌جز جذب پتاسیم و کلسیم معنی‌دار شد. تنش خشکی باعث کاهش درصد و عملکرد روغن، غلظت و جذب عناصر فسفر و گوگرد شد، ولی میزان پرولین، غلظت پتاسیم و کلسیم را افزایش داد. میکوریزا باعث افزایش معنی‌دار صفات مورد بررسی گردید. اثر متقابل میکوریزا و تنش خشکی به غیر از پرولین، غلظت و جذب گوگرد، بر سایر صفات مورد بررسی معنی‌دار بود. نتایج تجزیه رگرسیونی در صفات درصد روغن، عملکرد روغن، غلظت فسفر، جذب فسفر، غلظت پتاسیم و غلظت کلسیم رابطه رگرسیونی معنی‌داری را نشان داد و این رابطه به‌صورت خطی و یا درجه دو بود.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش هم‌زیستی بزرک با قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار توانست موجب افزایش صفات مورد بررسی در شرایط تنش خشکی گردد. کاربرد هر دو گونه قارچ تأثیر بیش‌تری نسبت به عدم کاربرد روی کلیه صفات اندازه‌گیری نشان داد. تأثیر کاربرد هر دو گونه قارچ *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae* تقریباً یکسان بود.

واژه‌های کلیدی: بزرک، پرولین، تنش خشکی، عناصر غذایی و هم‌زیستی میکوریزایی

مقدمه

کتان با نام علمی *Linum usitatissimum* و نام انگلیسی flax (کتان لیفی) و یا linseed (کتان روغنی)، گیاهی یک‌ساله از خانواده کتان (*Linaceae*) می‌باشد (٤٩). در بعضی از کشورهای آسیایی از روغن کتان (بزرک) با هدف خوراکی و به‌عنوان جایگزینی برای چربی‌های حیوانی در رژیم غذایی استفاده می‌کنند (٣٢). مصرف روغن بزرک مصونیت بدن را در برابر بیماری‌ها بالا برده و استفاده از این روغن از بروز سرطان پیشگیری می‌کند (٢٤).

استفاده از منابع زیستی در کشاورزی، دارای قدمت بسیار زیادی است و در گذشته نه چندان دور، تمام مواد غذایی مورد مصرف انسان با استفاده از چنین منابع ارزشمندی تولید می‌شدند. میکوریزا یکی از مجموعه عوامل زیستی است که بخش مهمی از موجودات خاکزی را شامل می‌شود (٨). قارچ‌های میکوریزای آربوسکولار از مهم‌ترین قارچ‌های اندومیکوریزا هستند که با بیش از ٩٠ درصد گیاهان زراعی ارتباط هم‌زیستی برقرار می‌نمایند (٤٦). میکوریزا در افزایش توانایی گیاه میزبان برای جذب عناصر غذایی غیرمتحرک، خصوصاً فسفر و چندین ریزمغذی دیگر تأثیر مفیدی دارد. بنابراین، قارچ‌های میکوریزا دارای کارکرد چند منظوره‌ای در بوم نظام‌های زراعی هستند، به طوری‌که بالقوه سبب بهبود کیفیت فیزیک خاک (از طریق گسترش ریسه‌های قارچ)، کیفیت شیمیایی خاک (از طریق افزایش جذب عناصر غذایی) و کیفیت زیستی خاک (از طریق شبکه غذایی خاک) می‌گردند (٥٢).

نقش اصلی قارچ‌های میکوریزی تأمین فسفر برای ریشه گیاه است، زیرا فسفر در خاک عنصری فوق‌العاده کم‌تحرک است. حتی در صورتی‌که فسفر به شکل محلول به خاک اضافه شود به سرعت در اشکال فسفات کلسیم یا دیگر شکل‌های تثبیت شده و به‌صورت غیرمتحرک در می‌آید. لذا قارچ‌های میکوریزی در افزایش جذب مواد معدنی به‌ویژه فسفر و تجمع زیست‌توده بسیاری از محصولات در خاک‌های با فسفر کم، تأثیر مثبت دارند (٥٠).

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی بر تولیدات کشاورزی در بسیاری از مناطق خشک جهان است. بسیاری از خصوصیات ریخت‌شناسی (٣٣)، فیزیولوژیکی (١٥)، آنزیمی گیاه (١٢) تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرد. همچنین تغذیه معدنی گیاه به‌ویژه تغذیه عناصرکم تحرک مانند فسفر توسط خشکی متأثر می‌شود (٥٣).

قارچ‌های میکوریزا قادر هستند که اثرات نامطلوب تنش خشکی را در گیاهان تعدیل نمایند و به میزان قابل توجهی رشد و جذب عناصر غذایی گیاه را افزایش دهند (٦). هم‌زیستی میکوریزا به موفقیت

استقرار گیاه و بقاء آن کمک می‌کند و غلظت آب و تنظیم اسمزی تحت تنش خشکی را افزایش می‌دهد (۲۷). مطالعات نشان می‌دهد تحت هم‌زیستی با قارچ‌های میکوریزا، محتوی پرولین تحت شرایط تنش، ممکن است کاهش (۳۹) یا افزایش (٥٤) پیدا کند.

نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده است که سرعت جریان فسفر به درون گیاه میکوریزایی ۳ الی ٦ مرتبه بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزایی است (۱۱). قارچ میکوریزا ارتباط آب با گیاه میزبان را به‌وسیله افزایش هدایت هیدرولیکی خاک، افزایش نسبت تعرق و کاهش مقاومت روزنه‌ها به‌وسیله تغییر در تعادل هورمون‌های گیاهی بهبود می‌بخشد. این تغییرات سبب بهبود تغذیه فسفر گیاهان میکوریزایی تحت تنش خشکی می‌شود (۱۳).

در مورد عناصر پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم در بعضی از خاک‌ها و در پاره‌ای از گیاهان و هم‌زیستی گونه‌های خاصی از میکوریزا افزایش جذب وجود دارد اما در پاره‌ای دیگر از موارد عکس‌العمل دقیقی وجود ندارد (۷). مطالعات گذشته نشان داده است که هیف‌های خارجی قارچ‌های میکوریزا قادر به تأمین ۱۰ درصد از نیاز گیاه هم‌زیست خود به پتاسیم هستند (۳۷). اسمیت و همکاران (۱۹۹٤) بیان داشتند که عناصر معدنی از قبیل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، مس، گوگرد و روی به‌وسیله قارچ‌های میکوریزا جذب و به گیاه میزبان انتقال پیدا می‌کنند (٤۷). این قارچ‌ها به‌دلیل افزایش مؤثر سطح جذب ریشه از طریق ایجاد هیف، سبب افزایش جذب آب و مواد غذایی به‌وسیلهٔ گیاهان می‌شوند (۳۷).

انصاری جوینی و همکاران (۲۰۱۱) گزارش نمودند افزایش ماده خشک اندام‌های هوایی و زیرزمینی در تلقیح با قارچ میکوریزا در مقایسه با عدم تلقیح به احتمال زیاد به‌دلیل افزایش جذب آب و مواد غذایی و انتقال بهتر این مواد در اندام گیاهی و هم‌چنین افزایش فتوسنتز گیاه است که منجربه ساخته شدن مواد فتوسنتزی بیشتری می‌شود (۵). همچنین، جمشیدی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که عملکرد دانه و روغن آفتابگردان با استفاده از قارچ میکوریزا در شرایط تنش خشکی نسبت به گیاه بدون تلقیح افزایش یافت (۲٦). از آن‌جایی که هم‌زیستی قارچ‌های میکوریزا با گیاه بزرک و جذب عناصر غذایی توسط آن تحت شرایط خشکی هنوز در کشور ایران مورد بررسی و مطالعه قرار نگرفته است، لذا اجرای این پژوهش می‌تواند حائز اهمیت باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و ارتفاع ۲۱۱۶ متر از سطح دریا به صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۳۹۲ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار سطح آبیاری: ۱۰۰ (بدون تنش)، ۷۵ (تنش ملایم)، ۵۰ (تنش متوسط) و ۲۵ (تنش شدید) درصد نیاز آبی گیاه، به‌عنوان عامل اصلی و تلقیح با میکوریزا در سه سطح شامل تلقیح با *Glomus intraradices* و تلقیح با *Glomus mosseae* و عدم تلقیح، به‌عنوان عامل فرعی بودند. قبل از اعمال تیمارها، از خاک مزرعه نمونه مرکب تهیه و در آزمایشگاه خصوصیات آن تعیین گردید (جدول ۱).

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی.

Table 1. Some physical and chemical properties of the soil in the experimental field.

بافت Soil texture	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر مترمربع) E.C. ($dS.m^{-1}$)	کربن آلی (درصد) O.C (%)	فسفر قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم) P ava. ($mg.Kg^{-1}$)	پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم) K ava. ($mg.Kg^{-1}$)	نیتروژن کل (درصد) N (%)
لوم رسی Clay loam	7.93	0.452	0.585	12.3	303	0.046

عملیات آماده‌سازی زمین برای اجرای آزمایش در اواسط اردیبهشت ماه ۱۳۹۲ آغاز گردید. نتایج آزمون خاک، کودهای نیتروژنی مورد نیاز در کرت‌های آزمایش به‌میزان ۱۱۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار در نظر گرفته شد. یک سوم کود نیتروژن به‌صورت پیش کاشت قبل از کشت بر اساس مساحت کرت‌ها اضافه شد. یک سوم دیگر کود اوره در مرحله به ساقه رفتن و یک سوم آخر در مرحله قبل از گل‌دهی همراه با آب آبیاری به کرت‌ها اضافه شد. ابعاد هر کرت آزمایشی ۲×۳ متر بود. به‌منظور جلوگیری از هر گونه خطا، فاصله بین کرت‌ها یک متر و بین بلوک‌ها دو متر در نظر گرفته شد. کشت به‌صورت ردیفی روی زمین صاف به فاصله ردیف ۱۵ سانتی‌متر و فاصله سه سانتی‌متر روی ردیف انجام شد. عمق کاشت به‌طور متوسط ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای کاشت از بذر اکوتیپ بزرک اصفهان که از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شده بود، استفاده گردید.

جهت تلقیح خاک از مایه تلقیح قارچ (*G .intraradices* و *G. mosseae*) استفاده گردید. مایه تلقیح مورد نظر از شرکت زیست فناور توران شاهرود تهیه شد. برای کلونیزاسیون بهتر گیاه، در تیمارهای میکوریزایی، پس از ایجاد ردیف‌ها، به ازای هر مترمربع، حداقل ۱۰۰ گرم قارچ میکوریزا، مورد استفاده قرار گرفت و لایه‌ای خاک به عمق ۵ سانتی‌متر روی آن ریخته و سپس بذرها در عمق سه سانتی‌متری کاشته شد.

پس از کاشت گیاه تا قبل از استقرار گیاه آبیاری مطابق نیاز منطقه هر هفت روز یک‌بار انجام شد و پس از آن مطابق مقدار تبخیر از طشتک براساس تیمارهای مشخص انجام شد. کنترل علف‌های هرز بدون استفاده از علف‌کش‌ها و به‌صورت وجین دستی در طی آزمایش انجام شد. برای به‌دست آوردن دور آبیاری، نیاز آبی گیاه با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT محاسبه شد و با استفاده از معادله‌های ۱-۳، دور آبیاری مشخص گردید:

$$TAW = \rho_b \times D_r \, (\Theta_{FC} - \Theta_{PWP}) \quad (۱)$$

$$RAW = f \times TAW \quad (۲)$$

$$N = \frac{RAW}{ETC} \quad (۳)$$

که در این فرمول‌ها N تعداد دور آبیاری، TAW کل آب قابل استفاده، PWP رطوبت خاک در نقطه پژمردگی، FC ظرفیت مزرعه، RAW آب سهل‌الوصول، ET_c نیاز آبی گیاه، D_r عمق توسعه ریشه، ρ_b جرم مخصوص ظاهری و f ضریب تخلیه مجاز می‌باشد (۳). دور آبیاری با استفاده نرم‌افزار تقریباً ۵، ۷، ۹ و ۱٤ روز به‌ترتیب در تیمارهای تنش خشکی بود.

برای اندازه‌گیری پرولین، از برگ‌های تازه در زمان آغاز گل‌دهی برداشت گردید و به سرعت داخل یخ قرار داده شد و سپس به فریزر با دمای ۲٤- درجه سانتی‌گراد منتقل تا زمان انجام آزمایش‌های لازم نگهداری شد. اندازه‌گیری میزان پرولین با استفاده از روش باتس و همکاران (۱۹۷۳) انجام گرفت (۹).

استخراج و اندازه‌گیری میزان روغن دانه با استفاده از دستگاه سوکسله انجام شد (٤۱). عملکرد روغن نیز از حاصل‌ضرب عملکرد دانه در درصد روغن دانه به‌دست آمد.

برای تعیین غلظت عناصرغذایی فسفر، پتاسیم و کلسیم موجود در بخش هوایی و گوگرد در دانه، نمونه گیاهی هر تیمار، به‌طور تصادفی از هر تکرار تهیه گردید. فسفر کل به روش کالریمتری با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ٤۷۰ نانومتر، پتاسیم کل به روش نورسنجی شعله با استفاده از دستگاه فیلم

فتومتر مدل Jenway، کلسیم و گوگرد توسط دستگاه جذب اتمی پرکین المر مدل ٤٠٠ اندازه‌گیری شد (۲۳). جذب عناصر در اندام هوایی از حاصلضرب غلظت عنصر در ماده خشک اندام هوائی و جذب در دانه از حاصلضرب غلظت عنصر در عملکرد دانه به‌دست آمد.

نرمال بودن داده‌های حاصل از این آزمایش قبل از تجزیه واریانس مورد آزمون قرار گرفت و با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. رسم نمودارها توسط نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

پرولین: همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود میزان پرولین پاسخ معنی‌داری به سطوح مختلف تنش خشکی و میکوریزا نشان داد. با این وجود، برهمکنش معنی‌داری بین تنش خشکی و میکوریز مشاهده نگردید. نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد میزان پرولین در تیمار تنش خشکی اختلاف معنی‌داری را نشان داد. با افزایش تنش خشکی میزان پرولین دانه به‌صورت درجه دو بود، به‌طوری که این پاسخ تا تنش متوسط افزایش و سپس تقلیل یافت (شکل ۱- الف)

نتایج آزمایش حاضر مبنی‌بر معنی‌دار بودن میزان پرولین تحت تنش خشکی با نتایج تحقیق موحدی دهنوی و همکاران (۲۰۱۱)، قربانلی و همکاران (۲۰۱۲)، کدخدایی و احسان‌زاده (۲۰۱۱) در کتان روغنی مطابقت دارد (۳۸، ١٦ و ۲۸). گیروس و همکاران (١٩٩٦) گزارش کردند در بزرک با تشدید تنش خشکی، میزان پرولین تا صد برابر میزان آن در گیاهان شاهد (آبیاری مناسب) افزایش یافت (۱۷). در شرایط تنش کمبود آب، گیاه به‌منظور ادامه جذب آب، از طریق تجمع ترکیبات اسمزی از جمله پرولین و کربوهیدرات‌های محلول برگ، پتانسیل اسمزی خود را کاهش می‌دهد و یا به‌عبارت دیگر تنظیم اسمزی صورت می‌گیرد. سطوح بالای پرولین، گیاه را قادر می‌سازد تا پتانسیل آبی خود را در حد پایین نگه دارد (۵۱).

گیاه تلقیح شده با *G. intraradices*، ١٦/١ درصد میزان پرولین بیشتری نسبت به گیاه بدون تلقیح داشت. (جدول ۳). در آزمایش حیدری و کرمی (۲۰۱۳) استفاده از گونه‌های میکوریزایی افزایش معنی-داری در میزان پرولین موجود در برگ گیاه آفتابگردان نشان داد (۲۱). در حالی‌که در آزمایش اسماعیل‌پور و همکاران (۲۰۱۳)، میکوریزا میزان پرولین گیاه دارویی مرزه را کاهش داد (١٤).

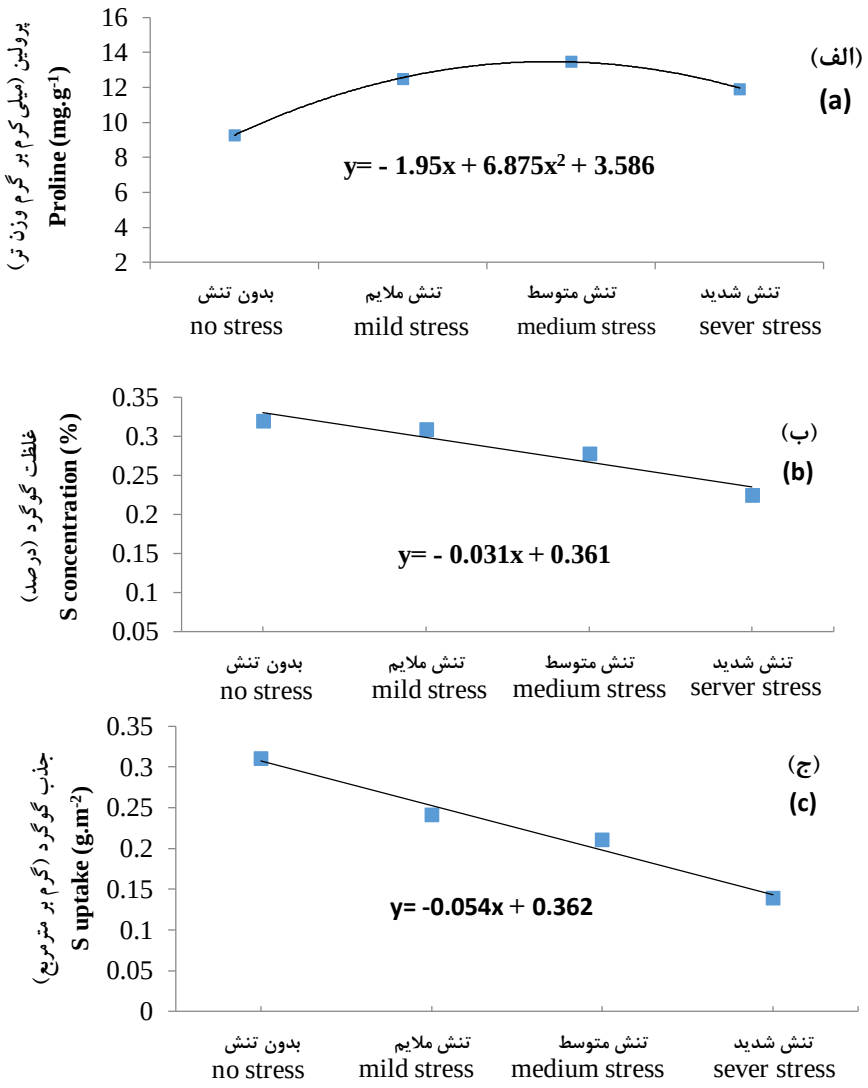
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (درجه آزادی و میانگین مربعات) صفات بررسی شده بزرگ در تیمارهای مختلف تنش خشکی و میکوریزا.

Table 2- Analysis of variance (degree of freedom, and mean square) for plant characteristics of linseed in drought stress and mycorrhiza different treatments.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	پرولین Proline	درصد روغن Oil content	عملکرد روغن Oil yield	غلظت گوگرد S concentration	جذب گوگرد S uptake	غلظت فسفر P concentration	جذب فسفر P uptake	غلظت پتاسیم K concentration	جذب پتاسیم K uptake	غلظت کلسیم Ca concentration	جذب کلسیم Ca uptake
بلوک Block	2	3.50 ^{ns}	1.48^{ns}	379.911 *	0.00013^{ns}	0.00005^{ns}	0.00032^{ns}	0.00012^{ns}	0.0024^{ns}	0.02^{ns}	0.001^{ns}	0.10^{ns}
تنش خشکی Drought stress (D)	3	50.67**	30.04**	48631.03**	0.00334**	0.04565**	0.00099**	0.1906**	0.2588**	4.85^{ns}	0.891**	1.64^{ns}
خطای a Error a	6	6.24	0.26	4224.06	0.00005	0.00333	0.000066	0.0001	0.0043	5.51	0.053	3.54
میکوریزا Mycorrhiza (M)	2	10.16*	17.10**	17626.50**	0.00215**	0.01683**	0.00017*	0.073**	0.0798**	9.62**	0.802**	18.66**
تنش خشکی × میکوریزا D*M	6	3.35^{ns}	1.98*	409.77**	0.00006^{ns}	0.00013^{ns}	0.00041**	0.0074*	0.307**	0.80**	0.227*	3.20**
خطای b Error b	16	1.426	0.51	57.07	0.000043	0.0001	0.00008	0.0019	0.0046	0.16	0.0571	0.60
ضریب تغییرات C.V(%)	-	9.52	2.3	3.2	2.20	4.0	3.09	5.2	2.34	5.0	9.23	10.44

ns، * و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده غیرمعنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, *, **, showed non-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۱- رابطه بین میزان پرولین (الف)، غلظت گوگرد (ب) و جذب گوگرد (ج) در گیاه بزرک در تیمارهای مختلف تنش خشکی. خطوط منحنی نشان‌دهنده مدل رگرسیون درجه دو (پرولین) و خطی (غلظت گوگرد و جذب گوگرد) برازش شده و علامت ■ میزان عددی پرولین، غلظت و جذب گوگرد مشاهده شده در تیمار تنش خشکی است.

Figure 1. Relationship between proline content (a), concentration of sulfur (b) and the uptake of sulfur (c) in the linseed plant in different drought stress treatments. Curved lines represent the quadratic regression model (Proline) and linear (concentration of sulfur and uptake of sulfur) fitted and symbols ■ are the number of proline, concentration and uptake of sulfur observed in the treatment of drought stress.

در ارتباط با نقش میکوریزا بر میزان پرولین در تنش خشکی، گزارش‌های متعددی وجود دارد. برخی از محققین بر این باورند که میکوریزا باعث افزایش پرولین در برگ گیاهان میزبان می‌شود و دلیل این امر را این‌گونه بیان می‌کنند که این ترکیبات با تجمع در سلول، باعث کاهش پتانسیل آبی برگ شده و گیاه را از صدمات تنش خشکی محافظت می‌کنند (۳۰). برخی از پژوهشگران نیز معتقدند که میکوریز میزان پرولین را در برگ گیاهان میزبان نسبت به گیاهان بدون میکوریزا در شرایط تنش خشکی کاهش می‌دهد. معمولاً گیاهان میکوریزایی با استفاده از روابط آبی و تغذیه بهتر نسبت به گیاهان بدون میکوریز، قادرند از شرایط تنش خشکی به‌طور موقت فرار کنند و کم‌تر دچار آسیب شوند و در نتیجه میزان پرولین نسبت به گیاهان بدون میکوریز، افزایش کم‌تری نشان می‌دهد (٤۳).

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات گیاه بزرک تحت تیمارهای مختلف قارچ میکوریزا.

Table 3. Mean Comparison of plant characteristics of linseed under different treatments of mycorrhiza fungi.

جذب گوگرد (گرم بر مترمربع) S uptake ($g.m^{-2}$)	غلظت گوگرد (درصد) S concentration (%)	پرولین (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Proline ($mg.g^{-1}$)	تیمار میکوریزا Mycorrhiza treatment
0.1822^{b}	0.2846^{b}	11.63^{b}	بدون تلقیح Without inoculation
0.2471^{a}	0.3067^{a}	13.5^{a}	*G. intraradices*
0.2470^{a}	0.3087^{a}	12.51^{ab}	*G. mosseae*

میانگین دارای حرف مشابه در هر ستون اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند (LSD).

Mean in each column followed by the same letter(s) are not significantly different at 5% (LSD).

درصد روغن: بر اساس جدول تجزیه واریانس، درصد روغن گیاه بزرک در تیمار تنش خشکی و میکوریزا در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل بین تنش خشکی و میکوریزا در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد که میزان درصد روغن در تیمارهای اثر متقابل تنش خشکی و قارچ میکوریزائی رابطه معنی‌داری نشان داد (جدول ٤). افزایش تنش خشکی باعث کاهش معنی‌داری به‌صورت درجه دو در تیمار بدون تلقیح و به‌صورت خطی در تیمارهای قارچی *G. intraradices* و *G. mosseae* بود (شکل ۲- الف). بیش‌ترین درصد روغن در تیمار بدون تنش و کم‌ترین آن در تیمار تنش شدید بود (شکل ۲- الف). روند کاهشی درصد روغن با تغییرات عددی متفاوت در تیمارهای مختلف تنش خشکی در سه نوع تیمار قارچی تقریباً مشابه بود.

جدول ٤- نتایج تجزیه رگرسیونی صفات درصد روغن، عملکرد روغن و غلظت و جذب فسفر گیاه بزرک تحت تیمارهای مختلف تنش خشکی و قارچ میکوریزا.

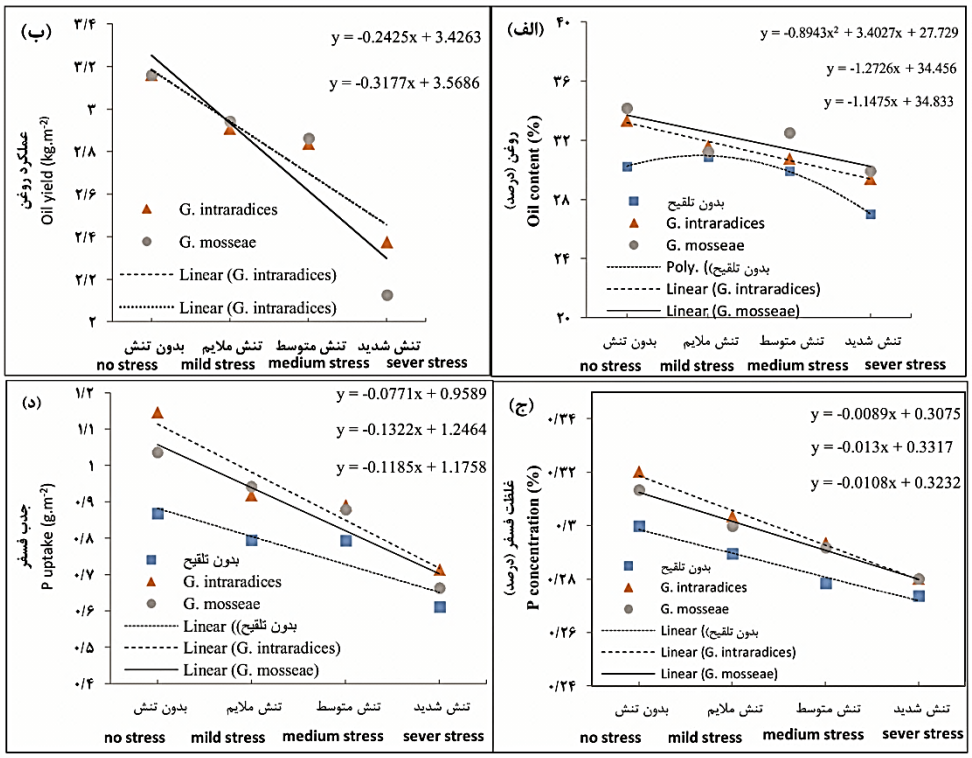
Table 4. Regression analysis of seed oil content and oil yield and concentration and uptake of phosphorus of linseed plant under drought stress and mycorrhiza treatments.

جذب فسفر P uptake		غلظت فسفر P concentration		عملکرد روغن Oil yield		درصد روغن Oil content		تیمار Treatment
درجه دو Quadratic	خطی Linear	درجه دو Quadratic	خطی Linear	درجه دو Quadratic	خطی Linear	درجه دو Quadratic	خطی Linear	
0.5629	0.1007	0.2148	0.3070	0.3225	0.2137	0.0324	0.0006*	بدون تلقیح Without inoculation
0.7080	0.0051	0.0515	0.0022	0.9483	0.0265	0.6480	< 0.0001	*G. intraradices*
0.5099	0.0226	1.000	0.0029	0.3973	0.0466	0.3488	< 0.0001	*G. mosseae*

* مقادیر جدول بیانگر سطح احتمال است.

*The values of the table show the probability level.

نتایج این آزمایش مبنی بر کاهش درصد روغن تحت تنش خشکی با نتایج حیدری و کرمی (۲۰۱٤) در آفتابگردان هم‌خوانی دارد (۲۲). بدنفالوی و همکاران (۱۹۸۸) در تحقیقات خود روی سویا به‌این نتیجه دست یافتند که در شرایط تنش، قارچ‌های میکوریزا با افزایش جذب آب سبب افزایش درصد روغن گردیدند (۱۰). نتایج جمشیدی و همکاران (۲۰۰۹) نیز نشان داد که تلقیح با میکوریزا باعث افزایش درصد روغن آفتابگردان شد (۲٦).



شکل ۲- رابطه بین درصد روغن (الف)، عملکرد روغن (ب)، غلظت فسفر (ج) و جذب فسفر (د) بزرک در تیمارهای مختلف تنش خشکی و قارچ میکوریزا. خطوط منحنی نشان‌دهنده مدل رگرسیون برازش شده و علائم میزان عددی مشاهده شده در تیمار تنش‌های خشکی و تیمارهای مختلف میکوریزائی است.

Figure 2. The relationship between oil content (a), oil yield (b), P concentration (C) and P uptake (d) in different treatment of drought stress and mycorrhiza. The curved lines represent the fitted regression model and signs are the observed number in the different treatments of drought stress and mycorrhiza.

عملکرد روغن: اثرات اصلی تیمار تنش خشکی و میکوریزا و همچنین اثر متقابل این دو عامل بر عملکرد روغن گیاه بزرک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد که میزان عملکرد روغن در تیمارهای اثر متقابل تنش خشکی و قارچ میکوریزائی رابطه معنی‌داری نشان داد (جدول ٤). افزایش تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد روغن به‌صورت خطی در تیمار قارچی *G. intraradices* و *G. mosseae* بود (شکل ۲-ب). بیش‌ترین درصد روغن در تیمار بدون تنش و کم‌ترین آن در تیمار تنش شدید بود (شکل ۲-ب). روند کاهش خطی

عملکرد روغن در تیمارهای مختلف تنش خشکی در دو نوع تیمار قارچی مشابه بود. به‌دلیل عدم رابطه معنی دار در تیمار قارچ بدون تلقیح در تنش‌های مختلف خشکی (جدول ٤) رابطه آن ارائه نشد. مطابق شکل ۲، عملکرد روغن با شیب بیش‌تری نسبت به درصد روغن با افزایش تنش کاهش یافت. نتایج جمشیدی و همکاران (۲۰۰۹) نشان داد که تحت شرایط کم‌آبی در آفتابگردان، عملکرد روغن در گیاهان تلقیح شده با میکوریزا از گیاهان تلقیح نشده بیشتر بود و آن‌ها، افزایش عملکرد روغن را ناشی از افزایش تعداد دانه‌ها، کاهش میزان پوکی و وزن هزار دانه گزارش کردند (٢٦).

غلظت گوگرد دانه: اثرات اصلی تیمار تنش خشکی و قارچ میکوریزا و همچنین اثر متقابل این دو عامل بر غلظت گوگرد گیاه بزرک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد میزان غلظت گوگرد در تیمار تنش خشکی اختلاف معنی‌داری را نشان داد. با افزایش تنش خشکی میزان غلظت گوگرد دانه به‌صورت خطی بود، به طوری‌که با افزایش تنش غلظت گوگرد را تقلیل داد (شکل ۱- ب).

با مقایسه میانگین اثر میکوریزا بر صفت غلظت گوگرد مشخص گردید که بیشترین غلظت گوگرد را گیاه تلقیح شده با قارچ میکوریزای *G. mosseae* و کم‌ترین میزان را گیاه تلقیح نشده به خود اختصاص دادند. گیاه تلقیح شده با میکوریزای *G. mosseae* غلظت گوگرد را ۸ درصد نسبت به گیاه بدون تلقیح افزایش داد. دو گونه قارچ میکوریزا از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۳).

جذب گوگرد دانه: جذب گوگرد پاسخ معنی‌داری به سطوح مختلف تنش خشکی، قارچ میکوریزا در سطح احتمال ۱ درصد بر جذب گوگرد معنی‌دار شد (جدول ۲). اثر متقابل بین تیمارهای تنش خشکی و قارچ میکوریزا روی صفت جذب گوگرد معنی‌دار نشد (جدول ۲). نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد میزان جذب گوگرد در تیمار تنش خشکی اختلاف معنی‌داری را نشان داد. با افزایش تنش خشکی میزان جذب گوگرد دانه به صورت خطی بود، به طوری‌که با افزایش تنش خشکی جذب گوگرد را تقلیل داد (شکل ۱-ج). مطابق شکل ۱، جذب گوگرد با شیب تندتری نسبت به غلظت گوگرد با افزایش تنش خشکی کاهش یافت.

میزان گوگرد در گیاه خردل در شرایط تنش خشکی به‌شدت کاهش یافت (٤٥). همچنین نصری و خلعتبری (۲۰۰۹) گزارش کردند که تنش خشکی کاهش معنی‌داری بر میزان گوگرد گیاه کلزا داشت (٤٠). با افزایش شدت تنش خشکی، به‌علت کاهش رطوبت موجود در خاک، اغلب عناصر، یا در خاک

تثبیت می‌شوند و یا قابل جذب برای گیاه نمی‌باشند. همچنین، با کاهش جذب آب به‌علت پایین آمدن سطح رطوبت در خاک، عناصر غذایی که همراه با آب وارد گیاه می‌شوند، توانایی ورود به گیاه را از دست داده و در نهایت مقدار آن‌ها در بافت‌ها و برگ‌ها کاهش می‌یابد. در شرایط تنش خشکی، به‌علت بسته بودن روزنه‌ها برای جلوگیری از تعرق، کاهش جذب CO_2 و تولید کم‌تر ماده خشک را در پی دارد و از عناصر غذایی با کارایی کم‌تری استفاده می‌شود. در این میان نقش عناصر کم مصرف بیشتر خودش را نشان می‌دهد.

می‌توان چنین استنباط کرد که در اثر تنش خشکی میزان گوگرد کاهش می‌یابد (٤٠ و ٤٥) و از آن‌جایی که گوگرد در اکسیداسیون و سنتز اسیدهای چرب در دانه‌های روغنی نقش مؤثری دارد (۳۵) و کاهش میزان گوگرد در ماده خشک برگ تأثیر زیادی بر میزان روغن دارد (۲۹)، لذا تلقیح با قارچ‌های میکوریزایی می‌تواند سبب افزایش جذب و انتقال این عناصر به گیاه شوند (٤٧). بنابراین در شرایط تنش خشکی در این آزمایش میزان و عملکرد روغن در گیاه تلقیح شده با میکوریزا بیشتر از گیاه بدون تلقیح بود.

با مقایسه میانگین اثر میکوریزا بر صفت جذب گوگرد مشخص گردید که بیشترین جذب گوگرد را گیاه تلقیح شده با میکوریزا و کم‌ترین میزان را گیاه تلقیح نشده به خود اختصاص دادند. گیاه تلقیح شده با میکوریزا جذب گوگرد را نسبت به گیاه بدون تلقیح به‌میزان ۳٦ درصد افزایش داد. دو گونه قارچ میکوریزا از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند (جدول ۳). اسمیت و همکاران (۱۹۹٤) نیز بیان داشتند که عناصرمعدنی از قبیل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، مس، گوگرد و روی به‌وسیله قارچ‌های میکوریزا جذب و به گیاه میزبان انتقال پیدا می‌کنند (٤٧).

غلظت فسفر اندام هوایی: براساس جدول تجزیه واریانس (جدول ۲)، غلظت فسفر اندام هوایی گیاه بزرک در تیمار تنش خشکی و میکوریزا در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل بین تنش خشکی و میکوریزا در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید. نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد که میزان غلظت فسفر در تیمارهای اثر متقابل تنش خشکی و قارچ میکوریزائی رابطه معنی‌داری نشان داد (جدول ٤). افزایش تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار غلظت فسفر به‌صورت خطی با شیب ملایم‌تری نسبت به جذب فسفر در هر سه تیمار قارچی بدون تلقیح، قارچ *G. intraradices* و *G. mosseae* بود (شکل ۲- ج). بیش‌ترین درصد فسفر در تیمار بدون تنش و کم‌ترین آن در تیمار تنش شدید بود (شکل ۲- ج). روند کاهش خطی غلظت فسفر در تیمارهای مختلف تنش خشکی در سه تیمار قارچی مشابه بود. میزان مقدار عددی تغییرات

غلظت فسفر در تیمار شاهد بدون تلقیح با قارچ میکوریزا در تمامی تیمارهای خشکی کمتر از دو قارچ *G. intraradices* و *G. mosseae* بود (شکل ۲- ج).

نتایج این آزمایش مبنی‌بر تقلیل میزان غلظت فسفر در تنش‌های مختلف خشکی با نتایج حیدری و کرمی (۲۰۱٤) در آفتابگردان، حقیقت‌نیا و همکاران (۲۰۱۲) در پایه مکزین لایم (*Citrus aurantifolia*) مطابقت دارد (۲۲، ۲۰).

وقتی گیاه با خشکی مواجه شود، روزنه‌هایش نیمه بسته یا بسته می‌گردد و این موضوع موجب کاهش جذب CO_2 می‌شود و از طرفی گیاه برای جذب آب، انرژی زیادی مصرف می‌نماید. همچنین گیاه در هنگام تنش، سطح برگ خود را کاهش داده و از شاخه‌های جانبی و ارتفاع خود می‌کاهد و این امر سبب کاهش تولید مواد فتوسنتزی می‌گردد. فسفر با تنظیم هورمون های گیاهی نقش مهمی در تقسیم سلولی دارد. از طرفی نقش مهمی در تولید مواد فتوسنتزی داشته و سبب تولید انرژی در گیاه نیز می‌شود. در شرایط تنش کاهش عملکرد اندام هوایی با کاهش شاخ و برگ و همچنین کاهش جذب عناصر به‌ویژه فسفر همراه می‌باشد و انتقال این مواد به سمت اندام‌ها و مخازن (بذرها) کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش مواد فتوسنتزی می‌شود. در گیاه گشنیز به‌دلیل کاهش مواد فتوسنتزی، عملکرد اندام هوایی، مقدار فسفر اندام هوایی، ارتفاع و وزن هزار دانه کاهش یافت (۲).

نتایج آزمایش علی‌آبادی فراهانی و ولدآبادی (۲۰۱۰) در گیاه گشنیز حاکی از آن است که کاربرد قارچ میکوریزا سبب افزایش مقدار فسفر اندام هوایی گردید که دلیل این امر ساز و کار عمل قارچ میکوریزا در جذب فسفر می‌باشد (۲). پس از رویش اسپورهای قارچی و گسترش آن‌ها در ریزوسفر بخشی از ریسه‌ها وارد سیستم ریشهٔ گیاه شده و سبب کاهش غلظت اسید آبسزیک گشته و میزان سیتوکنین را افزایش می‌دهند. این عمل باعث گسترش سیستم ریشه‌ای و افزایش جذب آب می‌گردد. ریسه‌های برون ریشه‌ای نیز با ترشح اسیدهای آلی حل‌کننده فسفات‌های نامحلول نظیر اسید مالیک، جذب فسفر توسط گیاه را افزایش می‌دهند (۳۱).

جذب فسفر اندام هوایی: کلیه عوامل آزمایشی بر مقدار جذب فسفر اندام هوایی گیاه بزرک معنی‌دار گردید (جدول ۲). نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد که میزان جذب فسفر در تیمارهای اثر متقابل تنش خشکی و قارچ میکوریزائی رابطه معنی‌داری نشان داد (جدول ٤). افزایش تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار جذب فسفر به‌صورت خطی با شیب تندتری نسبت به غلظت فسفر در هر سه تیمار قارچی بدون تلقیح، قارچ *G. intraradices* و *G. mosseae* بود (شکل ۲- د). بیش‌ترین میزان

جذب فسفر در تیمار بدون تنش و کم‌ترین آن در تیمار تنش شدید بود (شکل ۲- د). روند کاهش خطی جذب فسفر در تیمارهای مختلف تنش خشکی در سه تیمار قارچی مشابه بود. میزان مقدار عددی تغییرات جذب فسفر تیمار شاهد بدون تلقیح در تمامی تیمارهای خشکی کمتر از دو قارچ *G. intraradices* و *G. mosseae* بود (شکل ۲- د). در مجموع مطابق شکل ۲، جذب فسفر با شیب بیش‌تری نسبت به غلظت فسفر با افزایش تنش خشکی کاهش یافت.

نتایج این بررسی مبنی‌بر تقلیل جذب فسفر در شرایط تنش خشکی با نتایج آزمایش علیزاده و علیزاده (۲۰۰۷) و همچنین سوبرامانیان و همکاران (۱۹۹۷) در ذرت مطابقت دارد (٤، ٤٨). گیوپتا و همکاران (۲۰۰۲) نیز گزارش کردند که تلقیح گیاه نعناع با گونه G. *fasiculatum* به‌طور قابل ملاحظه‌ای میزان جذب فسفر را در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده، افزایش داد (۱۹). ساجدی و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که به‌علت تحرک کم عنصر فسفر، در شرایط تنش خشکی میزان جذب آن در ذرت به‌شدت کاهش یافت و کاربرد میکوریزا میزان جذب فسفر را ۹ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (٤٤).

به‌نظر می‌رسد که میسیلیوم‌های قارچ با گسترش مناسب در خاک، میزان جذب عنصر فسفر را افزایش داده‌اند. دلایل این امر متفاوت است. بعضی شواهد بیان می‌کند که میسیلیوم‌های گیاهان میکوریزایی از خود موادی ترشح می‌کنند که برای قابل حل کردن فسفر در خاک و جذب آن بسیار مؤثر است. افزایش سرعت جذب فسفر در مقایسه با گیاهان غیرمیکوریزایی از دلایل دیگر می‌باشد. به‌نظر می‌رسد که افزایش جذب عناصر غذایی عمدتاً به‌دلیل انتشار میسیلیوم‌های میکوریزایی مرتبط با بافت‌های درونی ریشه و تشکیل یک سیستم جذب اضافی به‌صورت مکمل سیستم ریشه‌ای گیاه باشد که بهره‌گیری از حجم بیشتری از خاک که ریشه‌های تغذیه کننده به آن دسترسی ندارد را ممکن می‌سازد (٤).

غلظت پتاسیم اندام هوایی: غلظت پتاسیم گیاه بزرک در تیمار تنش رطوبتی و میکوریزا و همچنین اثر متقابل این دو در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد که میزان غلظت پتاسیم در تیمارهای اثر متقابل تنش خشکی و قارچ میکوریزائی رابطه معنی‌داری نشان داد (جدول ٥). افزایش تنش خشکی باعث افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم به‌صورت خطی در تیمار قارچی بدون تلقیح و به‌صورت درجه دو محدب در تیمار قارچ *G. intraradices* و به‌صورت درجه دو مقعر در تیمار قارچ *G. mosseae* بود (شکل ۳- الف). بیش‌ترین میزان جذب پتاسیم در تیمار تنش شدید و کم‌ترین آن در تیمار بدون تنش بود (شکل ۳- الف). روند افزایشی خطی غلظت پتاسیم در تیمارهای مختلف تنش خشکی در سه تیمار قارچی مشابه بود. میزان

مقدار عددی تغییرات غلظت پتاسیم تیمار شاهد بدون تلقیح در تیمارهای بدون تنش، تنش ملایم و تنش متوسط کمتر از دو قارچ *G. intraradices* و *G. mosseae* بود (شکل ۳- الف). در مجموع مطابق شـکل ۳، افزایش غلظت پتاسـیم در تیمار بدون تلقیح با شیب زیادتری نسبت به دو تیمار قارچی *G. intraradices* و *G. mosseae* با افزایش تنش خشکی افزایش یافت.

جدول ۵- نتایج تجزیه رگرسیونی صفات غلظت و جذب پتاسیم، غلظت و جذب کلسیم گیاه بزرک تحت تیمارهای مختلف تنش خشکی و قارچ میکوریزا.

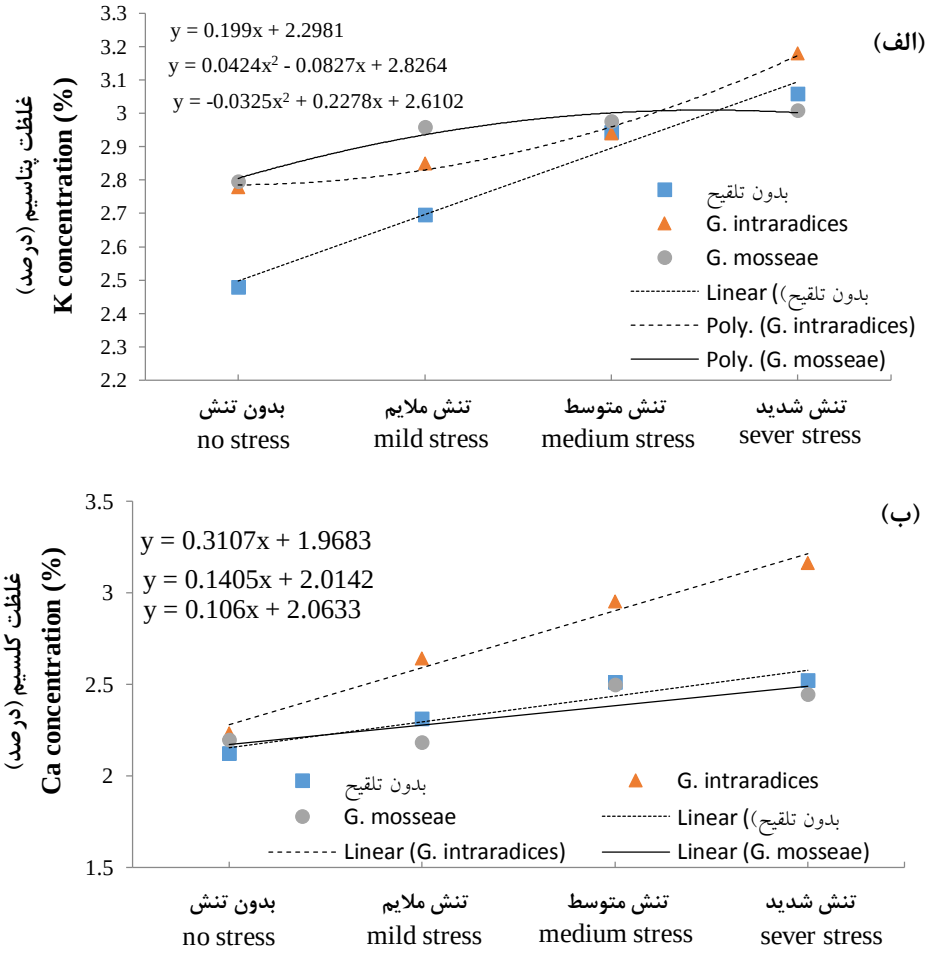
Table 5. Regression analysis of concentration and uptake of potassium, concentration and uptake of calcium in linseed plants under drought stress and mycorrhiza different treatments.

جذب کلسیم Ca uptake		غلظت کلسیم Ca concentration		جذب پتاسیم K uptake		غلظت پتاسیم K concentration		تیمار Treatment
درجه دو Quadratic	خطی Linear	درجه دو Quadratic	خطی Linear	درجه دو Quadratic	خطی Linear	درجه دو Quadratic	خطی Linear	
0.7527	0.7262	0.6764	0.0334*	0.5284	0.7080	0.4494	0.0004*	بدون تلقیح Without inoculation
0.3488	0.7228	0.3807	0.0005	0.9256	0.1444	0.0026	< 0.0001	*G. intraradices*
0.0697	0.4146	0.4390	0.0096	0.3333	0.1257	0.0255	0.0006	*G. mosseae*

* مقادیر جدول بیانگر سطح احتمال است.

*The values of the table show the probability level.

در آزمایش جباری اورنج و عبادی (۲۰۱۰) در گلرنگ، ساجدی و همکاران (۲۰۱۰) در ذرت، تنش خشکی موجب افزایش یون پتاسیم در اندام‌های هوایی شد (۲۵، ٤٤). آن‌ها علت این امر را ساز و کار جذب فعال این یون دانسته‌اند. در هنگام تنش خشکی گیاه جهت افزایش مقاومت به خشکی خود بر خلاف پدیده انتشار، با مصرف انرژی غلظت K^+ را در ریشه و اندام هوایی بالا می‌برد که افزایش جذب پتاسیم باعث تأثیر مثبت در فتوسنتز، افزایش رشد و شاخص سطح برگ، تقویت سنتز NADPH و ATP، افزایش سرعت انتقال موادفتوسنتزی، سنتز بیشتر پروتئین، تنظیم باز و بسته شدن روزنه، کاهش تعرق و مهم‌ترین مسئله در هنگام تنش خشکی یعنی افزایش جذب آب به‌وسیله گیاه می‌گردد (۱ و ۱۸). علت دیگری که محققین برای افزایش جذب پتاس در گیاه پیشنهاد نموده‌اند آن است که در شرایط تنش خشکی، تر و خشک شدن متوالی و طولانی در خاک باعث رها شدن K^+ از بین لایه‌های رسی شده و غلظت یون پتاسیم در خاک افزایش می‌یابد که این پدیده جذب پتاسیم را بیشتر می‌کند (۳٤).



شکل ۳- رابطه بین غلظت پتاسیم (الف) و غلظت کلسیم (ب) بزرک در تیمارهای مختلف تنش خشکی و قارچ میکوریزا. خطوط منحنی نشان‌دهنده مدل رگرسیون برازش شده و علائم میزان عددی غلظت‌های پتاسیم و کلسیم مشاهده شده در تیمار تنش‌های خشکی و تیمارهای مختلف میکوریزائی است.

Figure 3. The relationship between potassium (a) and the calcium concentration (b) in linseed plant in drought stress and mycorrhiza different treatments. The curved lines represents fitted regression model and signs are number observed of potassium and calcium concentrations in drought stress and mycorrhizal different treatments.

در آزمایش اسماعیل‌پور و همکاران (۲۰۱۳) در مرزه نیز، تیمار با قارچ میکوریزا آربوسکولار در افزایش میزان پتاسیم تحت شرایط تنش خشکی مؤثر بود (۱٤). در حالی‌که در آزمایش حیدری و کرمی (۲۰۱٤) اثر میکوریزا و اثر متقابل تنش آبی و میکوریزا بر پتاسیم معنی‌دار نشد، ولی با افزایش سطح

تنش خشکی غلظت پتاسیم کاهش یافت که دلیل آن را این طور بیان کردند که دسترسی گیاه به یون K^+ به‌علت کاهش تحرک K^+ با کاهش میزان رطوبت خاک کاهش می‌یابد (۲۲).

جذب پتاسیم اندام هوایی: جذب پتاسیم گیاه بزرک در تیمار تنش خشکی معنی‌دار نشد و بین سطوح مختلف تنش خشکی اختلاف معنی‌داری دیده نشد. میکوریزا و همچنین اثر متقابل تنش خشکی و میکوریزا در سطح احتمال ۱ درصد، بر صفت جذب پتاسیم معنی‌دار گردید (جدول ۲). نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد که میزان جذب پتاسیم در تیمارهای اثر متقابل تنش خشکی و قارچ میکوریزائی رابطه معنی‌داری نشان داد ولی به‌دلیل معنی‌دار نشدن روابط به‌صورت خطی یا درجه (جدول ۵) گرافی برای آن ارائه نشد.

گیوپتا و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند که تلقیح گیاه نعناع با گونه *G. fasiculatum* به‌طور قابل ملاحظه‌ای میزان جذب پتاسیم را در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده، افزایش داد (۱۹). در آزمایش علیزاده و علیزاده (۲۰۰۷) با افزایش شدت تنش درصد جذب پتاسیم در گیاه ذرت کاهش یافت و در بررسی اثرات متقابل دیده شد که تیمار بدون تنش و همراه با تلقیح میکوریزا بیشترین درصد جذب پتاسیم را داشت و کم‌ترین آن نیز در تیمار تنش شدید و بدون میکوریزا به‌دست آمد (٤).

غلظت کلسیم اندام هوایی: غلظت کلسیم در گیاه بزرک در تیمار تنش رطوبتی و میکوریزا در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل بین تنش رطوبتی و میکوریزا در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد که میزان غلظت کلسیم در تیمارهای اثر متقابل تنش خشکی و قارچ میکوریزا دارای رابطه معنی‌داری است (جدول ۵). افزایش تنش خشکی باعث افزایش معنی‌دار غلظت کلسیم به‌صورت خطی در تیمارهای قارچی بدون تلقیح، قارچ *G. intraradices* و قارچ *G. mosseae* شد (شکل ۳–ب). بیش‌ترین میزان کلسیم در تیمار تنش شدید و کم‌ترین آن در تیمار بدون تنش شد (شکل ۳–ب). روند افزایشی خطی غلظت کلسیم در تیمارهای مختلف تنش خشکی در سه تیمار قارچی مشابه بود ولی میزان مقدار عددی تغییرات غلظت کلسیم در تیمار *G. intraradices* بیش‌تر از دو تیمار شاهد بدون قارچ و قارچ *G. mosseae* بود (شکل ۳–ب) در مجموع، مطابق شکل ۳، افزایش غلظت کلسیم در تیمار *G. intraradices* با شیب زیادتری نسبت به دو تیمار شاهد بدون قارچ و قارچ *G. mosseae* بود. نتایج به‌دست آمده مبنی‌بر معنی‌دار بودن غلظت کلسیم

در تیمار تنش خشکی با آزمایش جباری اورنج و عبادی (۲۰۱۰) در گلرنگ مبنی‌بر عدم اختلاف معنی‌دار در تیمارهای آبیاری بر غلظت کلسیم برگ مطابقت ندارد (۲۵).

در رابطه با نقش قارچ‌های میکوریزا بر غلظت عناصرغذایی در اندام هوایی بیشتر تحقیقات انجام شده تاکید بر افزایش غلظت عناصر غذائی دارند. البته در موارد نادری کاهش نیز گزارش شده است، به‌عنوان مثال میزان کلسیم در گیاه پرسیمون (*Diospyros kaki*) تحت تأثیر قارچ‌های میکوریزا کاهش یافت (۳٦). در آزمایش پارسا مطلق و همکاران (۲۰۱۱)، تلقیح قارچ میکوریزا بر غلظت کلسیم در لوبیا تأثیر معنی‌داری نداشت (٤۲).

جذب کلسیم اندام هوایی: در این آزمایش، اثر تنش خشکی بر جذب کلسیم گیاه بزرک معنی‌دار نشد. میکوریزا و همچنین اثر متقابل این دو عامل بر جذب کلسیم گیاه بزرگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیونی نشان داد که میزان جذب کلسیم در تیمارهای اثر متقابل تنش خشکی و قارچ میکوریزایی رابطه معنی‌داری نشان داد ولی به‌دلیل معنی‌دار نشدن روابط به‌صورت خطی یا درجه (جدول ۵)، نموداری برای آن ارائه نشد. حقیقت‌نیا و همکاران (۲۰۱۲) در پایه مکزین لایم (*Citrus aurantifolia*) به بهبود جذب برخی عناصر غذایی نظیر پتاسیم و کلسیم که علاوه‌بر نقش تغذیه‌ای در تنظیم اسمزی نیز دخالت دارند، در گیاهان میکوریزایی شده در شرایط تنش خشکی اشاره کردند (۲۰).

بطور کلی نتیجه این پژوهش بیانگر آن است که کاربرد میکوریزا در شرایط تنش خشکی در بهبود خصوصیات گیاه بزرک تأثیر مثبتی داشته است. کاربرد هر دو گونه قارچ تأثیر بیش‌تری نسبت به عدم کاربرد روی کلیه صفات اندازه‌گیری نشان داد، هر چند تأثیر کاربرد هر دو گونه قارچ *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae* یکسان بود.

منابع

1. Abd-El-Moez, M.R. 1996. Dry matter yield and nutrient uptake of corn as affected by some organic wastes applied to a sandy soil. Ann. Agric. Sci. 34: 1319-1330.
2. Aliabadi Farahani, H., and Valadabadi, S.A.R. 2010. Effect of arbuscular-mycorrhizal fungi on Coriander (*Coriandrum sativum* L.) under drought stress conditions. Iranian J. Water Soil Sci. 24 (1): 69-80. (In Persian)
3. Alizadeh, A. 2009. Water, Soil and Plant Relations. Astan Ghods Razavi Press, 472p. (In Persian)

4.Alizadeh, A., and Alizadeh, A. 2007. The effect of Mycorrhizal in moisture different condition on uptake nutrition elements in Maize. Iranian J. Res. Agric. 3: 1.101-108. (In Persian)
5.Ansari Jovini, M., Chaichi, M.R., Keshavarz Afshar, R., and Ehteshami, M.R. 2011. Effect of biological and chemical phosphorous fertilizers on grain yield of two grain Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) cultivars under deficit irrigation conditions. Iranian J. Plant Seed Crops Improv. 27 (4): 471-490. (In Persian)
6.Auge, R.M. 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhiza symbiosis. Mycorrhiza. 11: 3-42.
7.Barea, J.M. 1992. VAM as modifier of soil fertility. Adv. Soil. Sci. 15: 1-40.
8.Barea, J.M., Pozo, M.J., Azcon, R., and Azcon-Aguilar, C. 2005. Microbial cooperation in the rhizosphere. J. Exp. Bot. 56(417): 1761-1778.
9.Bates, L.S., Waldren, R.P., and Teare, L.D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant Soil. 39: 205-207.
10.Bethenfalway, 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. Plant Physiol. 72: 565-571.
11.Bolan, N.S. 1991. A critical review on the role of Mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. Plant. Soil. 134: 187-207.
12.Contour-Ansel, D., Torres-Franklin, M.L., Carvalho, M.H.C., and Zully-Fodil, Y. 2006. Glutathione reductase in leaves of cowpea: cloning of two cDNAs, expression and enzymatic under progressive drought stress, desiccation and abscisic acid treatment. Ann. Bot. 98: 1279-1287.
13.Elwan, L.M. 2001. Effect of soil water regimes and inoculation with mycorrhizae on growth and nutrients content of maize plants. Z. Agric. Res. 28: 162-172.
14.Esmaeelpoor, B., Jalilvand, P., and Hadian, J. 2013. Effect of drought stress and arbuscular mycorrhizal fungi on some morphophysiological characteristics and yield on savory (*Satureja hortensis* L.). Iranian J. Agroecol. 5(2): 169-177. (In Persian)
15.Flexas, J., Barón, M., Bota, J., Ducruet, J.M., Gallé, A., Galmés, J., Jiménez, M., Pou, A., Ribas-Carbó, M., Sajnani, C., Tomàs, M., and Medrano, H. 2009. Photosynthesis limitations during water stress acclimation and recovery in the drought-adapted Vitis hybrid Richter-110 (*V.berlandierix V.rupestris*). J. Exp. Bot. 60: 2361-2377.
16.Ghorbanli, M., Bakhshi Khaniki, G.H., and Zakeri, A. 2012. Investigation on the effects of water stress on antioxidant compounds of *Linum usitatissimum* L. J. Res. Aroma. Plant Iran. 27(4): 647-658.
17.Girousse, C., Bournolille, R., and Bonnemain, J.L. 1996. Water deficit changes in concentrations of proline and some other amino acids in the phloem sap of flax. Plant. Physiol. 111: 109-115.

18. Gonzales, P.R., and Salas, M.L. 1995. Improvement of the growth, grain yield, and nitrogen, phosphorus and potassium nutrition of grain corn through weed control. J. Plant. Nutr. 18: 3313-3324.
19. Gupta, M.L., Prasad, A., Ram, M., and Kumar, S. 2002. Effect of the vesicular-arbuscular mycorrhizal (VAM) fungus *Glomus fasiculatum* on the essential oil yield related characters and nutrient acquisition in the crops of different cultivars of menthol mint (*Mentha arvensis*) under field conditions. Bioresour. Technol. 81: 77-79.
20. Haghighatnia, H., Nadian, H., Rejali, F., and Tavakoli, A.R. 2012. Effect of two species of arbuscular-mycorrhizal fungi on vegetative growth and phosphorous uptake of mexican lime rootstock (*Citrus aurantifolia*) under drought stress conditions. Iranian J. Plant Seed Crops Improv. 2(4): 403-417. (In Persian)
21. Heidari, M., and Karami, V. 2013. Evaluation of effect drought stress and species of arbuscular-mycorrhizal fungi on yield and grain yield components, chlorophyll contents and bioghmical compounds of sunflower. Iranian J. Environmental Stresses in Crop Sciences. 6: 1.17-26. (In Persian)
22. Heidari, M., and Karami, V. 2014. Effects of different mycorrhiza species on grain yield, nutrient uptake and oil content of sunflower under water stress. J. Saudi Soc. Agric. Sci. 13: 9-13.
23. Imami, A. 1996. Methods of plant analysis. Soil and Water Research Institute. Technical Publication No. 982. 202p. (In Persian)
24. Irannejad, H. 2007. Oilseed Crop Cultivation. Tehran Univ. Press, 128p. (In Persian)
25. Jabbary Orang, M., and Ebadi, A. 2010. Effect of supplemental irrigation on nutrient uptake, water relationship and assessment of drought stress tolerance in safflower in Ardebil climate conditions. Iranian J. Environmental Stresses in Crop Sciences. 3 (2): 115-127. (In Persian)
26. Jamshidi, E., Ghalavand, A., Salehi, A., Zare, M.J. and Jamshidi, A.R. 2009. Effect of Arbuscular mycorrhizal on yield, yield components and plant characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress conditions. Iranian J. Crop Sci. 11 (1): 136-150. (In Persian)
27. Jastrow, J.D., Miller, R.M., and Lussenhop, J. 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. Soil Biol. and Biochem. 30: 905-916.
28. Kadkhodaee, A., and Ehsanzadeh, P. 2011. Relationship between grain yield and oil contents with chlorophyll content, proline and soluble carbohydrates of leaves on linseed under different irrigation regimes. Iranian J. Crop Sci. 42: 1.125-131. (In Persian)
29. Kasraee, R. 2001. Abstract of about plant nutrition science. Tabriz University Press, 370p. (Translated In Persian)

30. 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. J. Appl. Sci. Res. 4: 5. 559-569.
31. Khalvati, M.A., Mozafar, A., and Schmidhalter, U. 2005. Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth, water relations, and gas exchange of barley subjected to drought stress. Plant. Biol. Stuttgart. 7: 6. 706-712.
32. Khan, M.L., Sharif, M., and Sarwar, M. 2010. Chemical Composition of Different Varieties of Linseed. Issues. Law. Med. 5: 273-318.
33. Kivimaenpae, M., Sutinin, S., Karlsson, P.E., and Sellde, G. 2003. Cell structural changes in the needles of Norway spruce exposed to long-term ozone and drought. Ann. Bot. 92: 779-793.
34. Logan, T.J., Goins, L.E., and Lindsay, B.J. 1997. Field assessment of trace element uptake by six vegetables from N-viro soil. Water. Environ. Res. 69: 28-33.
35. Malhi, S., and leach, D. 2002. Restore canola yield by contacting sulphar deficiently in the growing season. xth International colloquium por the optimization of plant Nutrition. Aprill 8-13, Cario. Sheraton, Cario-Egypt.
36. Marin, M., Mari, A., Ibarra, M., and Garcia-Ferriz, L. 2003. Arbuscular mycorrhizal inoculation of micropropagated persimmon plantlets. J. Hortic. Sci. Biotechnol. 78: 5. 734-738.
37. Marschner, H., and Dell, B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizai symbiosis. Plant. Soil. 159: 89-102.
38. Movahhedi Dehnavi, M., Yadavi, A.R., and Kavoosi, B. 2011. Effect of cycocel on proline contents, soluble sugars, protein, oil contents and fatty acids of linseed under drought stress in pot culture conditions. Iranian J. Environmental Stresses in Crop Science. 3: 2. 129-138. (In Persian)
39. Muller, I., and Hofner, W. 1991. Influence of the VA-mycorrhiza on p uptake and recovery potential of corn (*Zea mays* L.) under water stress conditions. Z. Pflanz. Bodenkunde. 154: 5. 321-323.
40. Nasri, M., and Khalatbari, M. 2009. The effect of water stress on changes in Micro elements (B, Zn, S) on physiological aspects of Rapeseed cultivars (*Brassica napus*). Iranian J. Dynamic Agric. 6: 1. 81-90. (In Persian)
41. Oomah, B.D., Mazza, G., and Przyblski, R. 1995. Comparison of flaxseed meal lipids extracted with different solvents. Agriculture and Agric-Food Canada. 29: 654-658.
42. Parsa Motlagh, B., Mahmodi, S., Sayari Zohan, M.H., and Naghizadeh, M. 2011. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate fertilizer on concentration of photosynthetic pigments and nutrient elements of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under salt stress conditions. Iranian J. Agroecology. 3: 2. 233-244. (In Persian)

43. Porcel, R., and Ruiz-Lozano, J.M. 2004. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. J. Exp. Bot. 55: 1743-1750.
44. Sajedi, N.A., Ardakani, M.R., Sajedi, A., and Bahrami, A.H. 2010. Uptake of some nutrient elements affected mycorrhizal symbiosis, zinc sulfate levels and drought stress on corn (*Zea mays* L.). Iranian J. Field Crops Res. 8: 5. 784-791.
45. Sharma, D.K, Khadar, V.K., Sharma, R.A., and Singh, D. 1991. Effect of different doses and Sources of Sulphur on the quality and yield of mustard. J.Indian Soc . Soil Sci. 39: 2000-2010.
46. Smith, S.E., and Read, D.J. 2008. Mycorrhizal Symbiosis .third ed. Academic Press, London, UK.
47. Smith, S.E., Koide, R., and Cairney, J.W.G. 1994. Nutrient transport in mycorrhizas: structure, physiology and consequences for efficiency of the symbiosis. Plant. Soil. 159: 103-113.
48. Subramanian, K.S., Charest, C., Dwyer, L.M., and Hamilton, R.I. 1997. Effect of arbuscular mycorrhizae on leaf water potential, sugar content and P content during drought and recovery of maize. Can. J. Bot. 75: 1583-1591.
49. Tadesse, T., Singh, H., and Weyessa, B. 2009. Correlation and Path Coefficient Analysis among Seed Yield Traitsand Oil Content in Ethiopian Linseed Germplasm. Int. J. Sustain. Crop protec. 4: 8-16.
50. Turk, M.A., Assaf, T.A., Hameed, K.M., and Al-Tawaha, A.M. 2006. Significance of mycorrhizae. World J. Agri. Sci. 2: 1. 16-20.
51. Valliyodan, B., and Nguyen, H.T. 2006. Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. Curr. Opin. Plant. Biol. 9: 1-7.
52. Veresoglou, S.D., Chen, B., and Rillig, M.C. 2012. Arbuscular mycorrhiza and soil nitrogen cycling. Soil Biol. and Biochem. 46: 53-62.
53. Volaire, V., and Thomas, H. 1995. Effect of drought on water relations, mineral uptake, water soluble carbohydrate accumulation and survival of two contrasting populations of cocksfoot *(Dactylis glomerata* L.*)*. Ann. Bot. 75: 513-524.
54. Wu, Q.S., and Xia, R.X. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions. J. Plant. Physiol. 163: 417-425.