Effect of Three Species of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth and Nutrients Uptake in Zinnia Plant under Drought Stress Conditions

Vahed Bagheri[1], Mohammad Hossein Shamshiri[2]*, Hossein Alaei[3] and Hassan Salehi[4]

1- Ph.D. Student of Horticultural Science, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran
2- ***Corresponding Author:** Associate Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran (shamshiri88@gmail.com)
3- Associate Professor, Department of Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran
4- Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Iran

Received: 5 July, 2017 Accepted: 7 March, 2018

Abstract

Background and Objectives

Drought is one of the major environmental constraints that limit plant growth and productivity more than any other environmental factor. Drought stress reduces normal growth, disturbs water relations and nutrition uptake in plants. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can increase plant tolerance to drought via direct water uptake and transport through fungal hyphae to the host plants, enhance nutrient uptake, improve osmotic adjustment and antioxidant activity. This study was conducted to evaluate the influence of three AMF species (singly or in combination) on DS alleviation of zinnia seedlings (as a potentially drought-tolerant flower crop) grown under different DS levels.

Materials and Methods

To study the effects of three identified isolates of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on growth and elements concentration (P, K, Fe, Zn, Cu and Mn) of zinnia plants (*Zinnia elegans* L. var. Magellan Red) under drought stress condition, a greenhouse experiment was conducted with two factors including mycorrhiza at five levels (no mycorrhizae as control, *Rhizophagus irregularis*, *Rhizophagus intraradisces*, *Funneliformis mosseae*, Mix) and four levels of drought stress (100% FC as control, 80% FC, 60% FC and 40% FC) with six replicates based on a completely randomized design (CRD). Seedlings with four true leaves were transplanted into 1 L pot and immediately inoculated with 210 spores per pot of the each of above symbionts. Control plants received the same amount of autoclaved inocula. The plants were irrigated with distilled water for 50 days to obtain certain amount of infection; then four irrigation regimes were achieved for four weeks.

Results

According to the results, vegetative growth traits like fresh and dry weight of shoot, root and flower leaf area and flower diameter were reduced significantly with increasing drought stress levels. Drought stress reduced uptake and transport of elements. The utilized AMF improved growth and nutrients uptake under drought stress considerably in 40% FC where *R. irregularis*, *R. intraradisces*, *F. mosseae* and mix increased dry weight of shoot by 20, 22, 20, 11 percent respectively in comparison with control.

Discussion

In conclusion, it is suggested that AMF inoculation improves drought tolerance of zinnia plants at least in part through the enhanced uptake of slowly diffusing mineral ions such as PO_4^{2-} and Zn^{2+}. Moreover, arbuscular mycorrhizal colonization provides better osmotic adjustment which can be correlated with K^+ accumulation in top portions of inoculated plants. The results of this study showed that zinnia plants exhibited a better symbiotic relation with three identified isolates of arbuscular mycorrhizal fungi especially with mixed treatment.

Keywords: Colonization, Mycorrhiza, Nutrition, Phosphorus

تأثیر سه گونه از قارچ‌های ریشه‌ای آربسکولار بر رشد و جذب برخی از عناصر غذایی در گیاه آهار در شرایط تنش خشکی

واحد باقری[۱]، محمدحسین شمشیری[۲]*، حسین علایی[۳] و حسن صالحی[۴]

۱- دانشجوی دکتری علوم باغبانی، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر(عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

۲- ***نویسنده مسئول**: دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان رفسنجان، ایران (shamshiri88@gmail.com)

۳- دانشیار، گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر(عج) رفسنجان ، رفسنجان، ایران

۴- استاد، گلکاری و گیاهان زینتی گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۶

چکیده

خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده محیطی می‌باشد که رشد و بهره‌وری گیاه را بیشتر از فاکتورهای محیطی دیگر محدود می‌کند. به منظور بررسی اثر سه ایزوله شناسایی‌شده از قارچ های ریشه‌ای آربسکولار بر رشد و غلظت عناصر غذایی فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز گیاه آهار در شرایط تنش خشکی، آزمایش گلخانه‌ای با دو فاکتور شامل پنج سطح میکوریز (بدون میکوریز به‌عنوان شاهد، *Rhizophagus irregularis*، *Rhizophagus intraradisces*، *Funneliformis mosseae* و ترکیب سه ایزوله) و چهار سطح تنش خشکی (آبیاری بر حد ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه به‌عنوان شاهد، ۸۰، ٦٠ و ٤٠ درصد ظرفیت زراعی) با شش تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت. دانهال‌ها در مرحله چهار برگ حقیقی به گلدان‌های پلاستیکی ۱/۲ کیلوگرمی انتقال داده شدند و بلافاصله با گونه‌های میکوریز تلقیح شدند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، خصوصیات رویشی با افزایش خشکی به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. همچنین تنش خشکی موجب کاهش جذب و انتقال عناصر گردید. کاربرد میکوریز به طور قابل ملاحظه‌ای رشد رویشی و غلظت عناصر را تحت تنش خشکی بهبود بخشید به‌طوری‌که ایزوله‌های *R. irregularis*، *R. intraradisces*، *F. mosseae* و ترکیب آن‌ها وزن خشک شاخساره را در سطح ٤٠٪ ظرفیت مزرعه به‌ترتیب ۲۰، ۲۲، ۲۰ و ۱۱ درصد نسبت به گیاهان بدون میکوریزی افزایش داد. در مجموع نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که تلقیح گیاه آهار با قارچ‌های میکوریز سبب افزایش مقاومت به خشکی در آن‌ها می‌گردد که حداقل بخشی از آن به افزایش در جذب برخی از یون‌های معدنی کم‌تحرک از قبیل فسفات و روی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: تغذیه، فسفر، کلونیزاسیون، میکوریز

مقدمه

گیاه آهار از خانواده کلاهپرک‌سانان (*Asteraceae*) گیاهی است یک‌ساله و یا چندساله که ۱۷ گونه مختلف دارد که به دلیل تنوع بسیار بالای رنگ و اندازه گل‌ها مورد استفاده قرارمی‌گیرند. از محبوب‌ترین گونه‌های این جنس می‌توان به *Zinnia elegans* L. اشاره کرد. گیاه آهار هر چند به‌عنوان یک گیاه مقاوم به دمای بالا و کم‌آبی شناخته شده است اما از دست رفتن رطوبت خاک باعث کاهش کیفیت و تعداد گل‌ها می‌شود (Dole and Wilkins, 2005). استفاده از گل آهار در چند سال اخیر در شهرستان رفسنجان به‌عنوان یک منطقه نیمه‌خشک اهمیت فراوانی پیدا کرده است.

گیاهان معمولاً در معرض تنش‌های مختلف محیطی قرار دارند که همه آن‌ها بر روی رشد و نمو گیاه تأثیر گذاشته و در نتیجه مانع بهره‌وری مناسب می‌شوند (Farooq *et al*., 2011). تنش خشکی به‌عنوان تنها تنش محیطی است که بیشترین اثرات مخرب را دارد به‌طوری‌که نسبت به سایر تنش‌ها باعث کاهش عملکرد و زیست‌توده گیاهان می‌شود. تنش خشکی در حقیقت کاهش پتانسیل آب خاک است. کاهش آب در بافت‌های گیاهی سبب کاهش تقسیم و رشد سلول، کوچک شدن اندازه برگ، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز و بهم‌خوردن بالانس هورمونی می‌گردد (Li *et a*l., 2009). تأثیر تنش خشکی بر کاهش ماده خشک گیاهان را می‌توان این‌گونه بیان داشت که کمبود آب در هر مرحله از رشد گیاه جذب، انتقال و مصرف عناصر غذایی را کاهش می‌دهد. از آنجایی‌که آب برای بسیاری از مواد از جمله نمک‌های معدنی، قندها و یون‌های آلی یک حلال است، بنابراین برای انتقال عناصر غذایی در گیاه، بین سلول‌ها، بافت‌ها و اندام‌ها ضروری است (Goicoechea *et al*., 2004). در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند اکثر نقاط ایران برنامه‌ریزی در جهت استفاده بهینه از منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

امروزه استفاده از قارچ‌های همزیست ریشه (میکوریز) برای مقابله باکم‌آبی وتنش خشکی در بسیاری ازگیاهان مورد مطالعه قرار گرفته است (Song, 2005). مشخص شده است که قارچ‌های میکوریز قادر به افزایش رشد و عملکرد گیاهان تحت تنش خشکی می‌باشند. بر همین اساس، اکثر گیاهان مناطق خشک و نیمه خشک یک همزیستی مناسبی با قارچ‌های میکوریز برقرار می‌کنند و از این‌رو این گیاهان قادر می‌باشند که تنش خشکی را بهتر تحمل نمایند (Pagano and Dhar., 2014). در یک آزمایش اثر چهار قارچ ریشه‌ای آربسکولار (*Gigaspora margarita*، *Gigaspora rosea*، *Glomus intraradices*، *Glomus mosseae* و تیمار مخلوط آن‌ها) بر گیاه آهار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایش نشان داد Glomus به‌طور معنی‌داری اندازه برگ و وزن خشک شاخساره را افزایش داد به‌طوری‌که *G. mosseae* مؤثرتر از *G. intraradices* تشخیص داده شد و قطر و اندازه گل را افزایش داد. همچنین ترکیب مخلوط آن‌ها نسبت به اثرات جداگانه گونه‌ها اختلافی را نشان نداد (Long *et al*., 2010). یکی از مهم‌ترین نقش‌های همزیستی میکوریز، جذب عناصر غذایی به‌ویژه فسفر تحت تنش خشکی می‌باشد که مقاومت گیاهان را در برابر خشکی افزایش می‌دهد (Al-Karaki, 2006). فسفر یکی از عناصر پر مصرف می‌باشد و نیاز گیاهان به این عنصر بالا گزارش شده است. فسفر جزء اصلی اسیدهای نوکلئیک، فسفولیپیدها و فسفوپروتئین‌ها می‌باشد. فسفر همچنین در فرایند ذخیره و انتقال انرژی، فتوسنتز، تنظیم بعضی از آنزیم‌ها و انتقال کربوهیدرات‌ها نقش ایفا می‌کند (Yuncai and Schmidhalter., 2005). پتاسیم عنصر مهم دیگری می‌باشد که مقاومت به خشکی را در گیاهان از طریق تنظیم روزنه‌ها، تنظیم اسمزی و سنتز پروتئین افزایش می‌دهد (Marschner, 2012) و معمولاً تحت تأثیر قارچ‌های میکوریز نیز قرار می‌گیرد. در یک آزمایش که بر روی گل‌میمون انجام شد در شرایط تنش خشکی جذب عناصر فسفر، نیتروژن، پتاسیم، کلسیم و منیزیوم برگ گیاه توسط میکوریز افزایش یافت (Asrar *et al*., 2012). در پژوهشی که بر روی گل‌محمدی انجام شد نقش میکوریز در مقاومت به خشکی از طریق جذب عناصر نشان داده شد (Abdel-Salam *et al*., 2018). در این پژوهش میزان تجمع نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیوم و کلسیم در شاخساره و ریشه گیاهان میکوریزی تحت تنش خشکی نسبت به گیاهان غیرمیکوریزی افزایش بیشتری نشان داد. ثابت شده است که قارچ‌های میکوریز جذب عناصر کم‌تحرک در خاک مانند روی، مس و آهن را افزایش می‌دهند و میزان مقاومت به خشکی را در گیاهان میزبان از طریق بهبود تغذیه‌ای عناصر بالا می‌برند (Auge, 2001).

با توجه به اهمیت فضای سبز به‌عنوان یکی از

مؤثرترین عوامل محیط‌زیست و همچنین آب زیادی که صرف آبیاری فضاهای سبز می‌گردد و با وجود کمبودهای جدی آب به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، لزوم استفاده بهینه و با راندمان بالای آب در این بخش اهمیت بسیاری دارد. به همین منظور پژوهش زیر با هدف بررسی اثرات سه ایزوله شناسایی‌شده بومی منطقه به‌صورت جداگانه و ترکیب آن‌ها بر میزان رشد و غلظت عناصر غذایی در قسمت‌های مختلف گیاه آهار در شرایط تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

آماده کردن مایه تلقیح

نمونه‌های خاک از ناحیه ریزوسفر ریشه گیاه آهار از چندین پارک واقع در شهرستان رفسنجان تهیه و جهت بررسی و شناسایی گروه‌های قارچ میکوریز مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به پایین بودن اسپورها از نظر کمی و کیفی از کشت تله و گیاه میزبان سورگوم (*Sorghum bocolor*) جهت به دست آوردن اسپورهای سالم و کافی استفاده گردید. در مرحله بعد اسپورهای سالم زیر بینوکولار جدا و داخل تیوب‌های ۰/۵ میلی‌لیتری حاوی آب مقطر با دستگاه حمام اولتراسونیک (۳۰-۱۰ ثانیه با قدرت ۳۵ کیلوهرتز) ضدعفونی شدند. تک اسپورهای ضدعفونی‌شده با استفاده از پیپتور (Samper) بر روی ریشه گیاه سورگوم به‌عنوان میزبان قرار داده شدند و گیاهان داخل گلدان‌های پلاستیکی کوچک با خاک اتوکلاوه‌شده کشت گردیدند. بعد از گذشت دو ماه از تلقیح، نمونه‌های تلقیح‌شده به‌عنوان ایزوله خالص برای شناسایی مولکولی مورد استفاده قرار گرفتند. DNA تک اسپورهای هر ایزوله استخراج و ناحیه 18sDNA ریبوزومی با شیوه PCR آشیانه‌ای و با کمک پرایمرهای اختصاصی AML1/AML2 تکثیر گردید (Lee *et al.*, 2008). از مجموع توالی‌های آنالیزشده قارچ‌های میکوریز از طریق مورفولوژیکی و مولکولی سه گروه *Rhizophagus irregularis* (A.N.MF679647), *Rhizophagus intraradices* (A.N. MF679648), *Funneliformis mosseae* (A.N. MF679649) شناسایی گردید (داده‌ها نشان داده نشده است).

تهیه خاک و جوانه‌زنی بذور و تلقیح گیاهان

خاک مورد استفاده به نسبت ۳:۲ به‌ترتیب از خاک الک‌شده (دو میلی‌متر) مزرعه و ماسه تهیه شد (پی‌اچ؛۷/۶ و هدایت الکتریکی؛ ۱/۷ دسی زیمنس بر متر). مقدار یک کیلوگرم از خاک اتوکلاوشده درون گلدان‌های پلاستیکی ۱/۲ کیلوگرمی (ارتفاع ۱۷ سانتی‌متر و قطر ۱۴ سانتی‌متر) ریخته شد. بذور F1 گیاه آهار (*Zinnia elegans* L.var.Magellan Red) در سینی‌های کشت با نسبت ۱:۱ کوکوپیت و پرلایت ضدعفونی‌شده کشت گردید. دانهال‌های سالم و یکنواخت بعد از گذشت چهار هفته و در مرحله چهار برگ حقیقی به گلدان‌ها منتقل شدند. در این آزمایش قارچ میکوریز در پنج سطح [بدون میکوریز (شاهد)، *R. irregularis*، *R. intraradisces*، *F. mosseae* و ترکیب سه ایزوله] استفاده شد. مایه تلقیح به مقدار ۲۰ گرم شامل اسپور (۲۱۰ اسپور به ازای هر گلدان برای سه ایزوله به‌صورت جداگانه و از هر ایزوله ۷۰ اسپور برای تیمار ترکیبی)، قطعات ریشه آلوده، میسلیوم و خاک به ازای هر گلدان مورد استفاده قرار گرفت. برای تیمارهای بدون میکوریز همان مقدار مایه تلقیح اتوکلاوشده استفاده گردید. پس از کشت، گلدان‌ها ۵۰ روز تا سطح ظرفیت زراعی آبیاری شدند. در تمام طول دوره آزمایش، به منظور آبیاری از آب‌مقطر استفاده گردید. گیاهان در گلخانه‌ای با ۱۳ ساعت نور طبیعی (با دمای °C ۲±۲۸) و ۱۱ ساعت تاریکی (با دمای °C ۲±۱۸) و رطوبت نسبی ۵±۵۵ درصد رشد کردند. همچنین گیاهان به فاصله زمانی ۱۲ روز و برای چهار مرتبه با محلول غذایی هوگلند تغیر یافته بدون فسفر تغذیه شدند.

تیمارهای خشکی

قبل از اعمال تیمارهای خشکی برای اطمینان از تلقیح شدن ریشه‌ها، نمونه‌گیری از ریشه گیاهان انجام گردید و در

آزمایشگاه میزان تلقیح *R. irregularis*، ۸۰؛ *R. intraradices*، ۷۰؛ *F. mosseae*، ۷۰ و ترکیب آن‌ها ۷۵ درصد در تیمارهای میکوریزی تشخیص داده شد. چهار سطح آبیاری شامل ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه (Field Capacity) به‌عنوان شاهد (FC_{100})، ۸۰ درصد (FC_{80})، ۶۰ درصد (FC_{60}) و ۴۰ درصد (FC_{40}) رطوبت ظرفیت زراعی اعمال گردید. ظرفیت زراعی در آزمایشگاه با دستگاه صفحه فشاری و با رسم منحنی رطوبتی خاک محاسبه و بقیه تیمارهای خشکی بر مبنای آن محاسبه گردید. تعیین مقدار آب مورد نیاز برای هر تیمار تنش خشکی، از طریق وزن نمودن گلدان‌ها روزانه انجام گرفت و آب مقطر تا حدی که گلدان به وزن مورد نظر (با توجه به نوع تیمار خشکی) برسد، اضافه می‌شد. گیاهان در این آزمایش به‌مدت چهار هفته تحت تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی قرار گرفتند.

ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری

پارامترهای رویشی و زایشی که در این آزمایش اندازه‌گیری شد شامل وزن تر شاخساره، ریشه و گل، وزن خشک شاخساره، ریشه و گل، سطح برگ و قطر گل بود. برای اندازه‌گیری سطح برگ، با استفاده از دستگاه سنجش سطح برگ (Leaf Area meter مدل CI 202) برگ اسکن و سطح برگ بر اساس سانتی‌متر مربع به‌دست آمد. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها را به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و سپس وزن شدند.

عناصر غذایی

عناصر غذایی که در این آزمایش اندازه‌گیری شد شامل فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز در شاخساره و ریشه بود. برای تهیه عصاره ابتدا ۰/۵ گرم از نمونه خشک آسیاب‌شده برای شاخساره و ۰/۲۵ گرم برای ریشه، وزن و در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت سه ساعت قرار داده شد تا نمونه‌ها تبدیل به خاکستر شوند و سپس با استفاده از اسید کلریدریک دو نرمال پنج میلی‌لیتر به ازای هر نمونه اضافه گردید و در نهایت توسط آب مقطر به‌ترتیب به حجم ۵۰ و ۲۵ میلی‌لیتر رسانیده شد. اندازه‌گیری فسفر به روش آمونیوم مولیبدات و آمونیوم وانادات (زرد) (Chapman and Pratt, 1982) عناصر مس، روی، منگنز و آهن با استفاده از دستگاه جذب اتمیک و پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر اندازه‌گیری شد. جهت تعیین درصد کلونیزاسیون از روش (Phillips and Hayman., 1970) استفاده شد.

این پژوهش به‌صورت فاکتوریل با دو فاکتور شامل قارچ میکوریز (پنج سطح) و فاکتور تنش خشکی (چهار سطح) در قالب طرح کاملاً تصادفی و در شش تکرار انجام گرفت. از نرم‌افزار آماری SAS (9.1) برای تجزیه-تحلیل داده‌ها و محاسبه ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید. داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد توسط آزمون LSD انجام شد.

نتایج و بحث

پارامترهای رویشی و زایشی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که نوع قارچ، تنش خشکی و برهمکنش آن‌ها (به استثنای قطر گل) بر صفات رشدی اندازه‌گیری‌شده در این پژوهش از لحاظ آماری در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). طبق نتایج به‌دست آمده تنش خشکی باعث کاهش رشد گیاهان گردید، هر چند که بین FC_{100} و FC_{80} اختلاف معنی‌دار نبود اما در FC_{40} کمترین رشد مشاهده گردید (جدول ۱). به‌طور مثال وزن خشک شاخساره در FC_{40} به مقدار ۱۴ درصد نسبت به FC_{100} کاهش نشان داد. بر اساس نتایج موجود در جدول (۱)، کاربرد قارچ میکوریزا موجب افزایش قابل ملاحظهٔ رشد گیاهان در مقایسه با شاهد گردید، به‌طوری که در اکثر موارد گیاهان میکوریزی رشد کرده در تنش خشکی رشدی بیش از گیاهان غیرمیکوریز داشتند که این اختلاف از لحاظ آماری در سطح پنج درصد معنی‌دار بود.

جدول ۱- مقایسه میانگین برهمکنش میکوریز- تنش خشکی بر بعضی صفات رویشی و زایشی گیاه آهار

Table 1- Mean comparison of the interaction mycorrhiza and drought stress on some growth and reproductive traits of zinnia plant

قطر گل (میلی‌متر) Flower diameter (mm)	سطح برگ (سانتی‌مترمربع) Leaf area (cm^2)	وزن خشک گل (گرم) Flower dry weight (g)	وزن خشک ریشه (گرم) Root dry weight (g)	وزن خشک شاخساره (گرم) Shoot dry weight (g)	وزن تر گل (گرم) Flower fresh weight (g)	وزن تر ریشه (گرم) Root fresh weight (g)	وزن تر شاخساره (گرم) shoot fresh weight (g)	سطوح خشکی Water status	نوع قارچ AMF status
49.48±0.88^{g}	62.93±2.15^{ghi}	0.36±0.01^{i}	0.38±0.01^{fgh}	0.71±0.03^{i}	1.68±0.05^{hi}	4.93±0.23^{abc}	3.20±0.12^{j†}	100%FC	شاهد (Control)
46.72±1.17^{gh}	45.33±2.32^{ij}	0.34±0.01^{i}	0.41±0.02^{e-h}	0.76±0.05^{gi}	1.43±0.07^{i}	4.58±0.26^{bcd}	3.17±0.16^{j}	80%FC	
46.66±1.64^{gh}	46.57±4.78^{ij}	0.33±0.01^{i}	0.41±0.01^{e-h}	0.75±0.04^{hi}	1.61±0.06^{i}	3.48±0.14^{f}	3.32±0.15^{ij}	60%FC	
43.54±1.23^{h}	37.84±4.85^{j}	0.36±0.04^{i}	0.42±0.01^{d-g}	0.73±0.02^{i}	1.35±0.11^{i}	3.75±0.12^{ef}	3.12±0.22^{j}	40%FC	
68.58±1.50^{a}	127.66±8.69^{a}	1.08±0.06^{ab}	0.47±0.03^{b-e}	1.07±0.07^{ab}	4.46±0.50^{ab}	4.86±0.39^{a-d}	5.50±0.48^{ab}	100%FC	*R.irregularis*
63.72±0.98^{b-e}	118.03±11.86^{ab}	1.05±0.03^{a-d}	0.52±0.03^{ab}	1.12±0.04^{a}	4.47±0.36^{ab}	5.13±0.27^{ab}	5.81±0.26^{a}	80%FC	
63.80±1.65^{b-e}	109.00±10.48^{abc}	1.05±0.04^{abc}	0.51±0.00^{abc}	1.04±0.03^{abc}	4.16±0.32^{abc}	5.14±0.22^{ab}	5.31±0.32^{a-e}	60%FC	
60.86±1.61^{def}	76.61±7.02^{fgh}	0.86±0.05^{fgh}	0.41±0.02^{e-h}	0.88±0.05^{d-h}	2.88±0.17^{ef}	3.48±0.32^{f}	4.40±0.27^{fgh}	40%FC	
63.85±0.77^{b-e}	118.43±8.21^{ab}	1.04±0.04^{a-d}	0.48±0.01^{a-d}	0.98±0.04^{bcd}	4.67±0.20^{ab}	4.35±0.20^{cde}	5.50±0.26^{abc}	100%FC	*R.intrarardises*
66.45±3.39^{abc}	87.35±4.79^{def}	0.94±0.04^{c-f}	0.47±0.03^{b-e}	0.93±0.05^{cde}	4.38±0.36^{abc}	4.49±0.23^{bcd}	4.79±0.31^{b-f}	80%FC	
63.33±1.55^{b-f}	87.94±6.81^{def}	1.00±0.05^{b-e}	0.48±0.01^{a-d}	0.94±0.04^{bcd}	4.42±0.49^{abc}	4.24±0.15^{de}	4.71±0.23^{d-g}	60%FC	
64.34±0.49^{a-e}	76.82±5.88^{e-h}	0.90±0.03^{efg}	0.47±0.01^{b-e}	0.89±0.02^{d-g}	3.71±0.16^{cd}	3.77±0.13^{ef}	4.51±0.14^{fg}	40%FC	
67.27±1.52^{ab}	82.17±5.75^{d-g}	1.03±0.05^{b-d}	0.49±0.03^{a-c}	0.89±0.03^{d-g}	4.16±0.19^{a-c}	4.54±0.20^{b-d}	4.78±0.13^{b-g}	100%FC	*F.mosseae*
66.50±1.27^{abc}	101.52±5.35^{bcd}	1.15±0.02^{a}	0.49±0.01^{a-d}	0.98±0.04^{b-d}	4.83±0.25^{a}	4.69±0.33^{b-d}	5.38±0.43^{a-d}	80%FC	
61.21±2.06^{def}	74.56±7.61^{fgh}	0.93±0.01^{d-f}	0.38±0.01^{f-h}	0.92±0.04^{c-f}	2.59±0.12^{e-g}	4.47±0.26^{b-d}	4.57±0.36^{e-g}	60%FC	
60.07±1.44^{ef}	68.51±6.69^{fgh}	0.81±0.02^{gh}	0.40±0.01^{f-h}	0.88±0.02^{d-h}	2.41±0.15^{f-h}	4.21±0.15^{de}	4.02±0.16^{g-i}	40%FC	
64.76±1.23^{a-d}	115.72±10.20^{abc}	1.03±0.06^{b-d}	0.55±0.04^{a}	1.13±0.07^{a}	3.98±0.32^{bc}	5.37±0.27^{a}	5.74±0.33^{a}	100%FC	Mix
62.98±1.90^{b-f}	96.74±8.04^{cde}	1.02±0.04^{b-e}	0.45±0.01^{c-f}	0.89±0.05^{d-g}	4.08±0.23^{bc}	4.59±0.16^{b-d}	4.74±0.27^{c-g}	80%FC	
62.40±0.78^{c-f}	60.32±5.94^{hi}	0.95±0.04^{c-f}	0.35±0.03^{gh}	0.79±0.05^{f-i}	3.23±0.21^{de}	3.17±0.30^{f}	3.72±0.20^{h-j}	60%FC	
58.97±2.20^{f}	58.29±6.62^{hi}	0.76±0.02^{h}	0.35±0.02^{h}	0.81±0.05^{e-i}	2.05±0.26^{g-i}	3.26±0.19^{f}	3.67±0.18^{h-j}	40%FC	
**	**	**	**	**	**	**	**		میکوریز (Mycorrhiza)
**	**	**	**	**	**	**	**		خشکی (Drought)
ns	**	**	**	**	**	**	**		میکوریز × خشکی (M × D)

†حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد آزمون LSD می‌باشد.

†Different letters on the columns show significant difference at 5% level of probability (LSD).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها در جدول (۱) بیشترین میزان سطح برگ بدون در نظر گرفتن اثر خشکی با ۱۰۷/۸۲ سانتی‌متر مربع مربوط به *R. irregularis* و کمترین با ۴۸/۱۶ سانتی‌متر مربع در گیاهان شاهد مشاهده گردید. رشد سریع و مناسب گیاهان به‌طورکلی با تبادلات گازی (CO_2 و H_2O) و با افزایش همزمان فتوسنتز و تعرق همراه می‌باشد (Flexas *et al*., 2009). این ویژگی باعث می‌شود تا گیاهان به‌خصوص در شرایط تنش کم‌آبی آسیب‌پذیرتر باشند. تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که سرعت رشد و عملکرد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Karimi *et al*., 2013). گیاهان برای مقابله با تنش خشکی و جلوگیری از تعرق بیش از حد روزنه‌های خود را می‌بندندکه این امر منجر به کاهش ورود CO_2 و جلوگیری از فتوسنتز در گیاه می‌شود. از طرفی با کاهش تعرق میزان جذب و انتقال آب از طریق ریشه‌های گیاه کمتر می‌شود به‌طوری‌که رشد و عملکرد گیاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Grassi and Magnani, 2005). معمولاً در شرایط بدون تنش جذب و انتقال آب و عناصر غذایی با سرعت بیشتری انجام می‌شود اما با کاهش میزان رطوب خاک و با بسته شدن روزنه‌ها میزان جذب عناصر کاهش می‌باید که خود تأثیر قابل توجهی بر رشد گیاهان دارد (Marschner, 2012). در بسیاری از مطالعاتی که انجام شده است نقش قارچ‌های میکوریز بر رشد رویشی بسیاری از گیاهان همزیست خود غیرقابل انکار می‌باشد (James *et al*., 2008). در پژوهشی که انجام پذیرفت میکوریز تمام پارامترهای رشد رویشی و زایشی گیاه آهار را نسبت به شاهد افزایش داد و این موضوع زمانی اهمیت پیدا می‌کند که این افزایش‌ها در گیاهان تحت تنش نیز مشاهده گردید. میکوریزها قادرند که با استفاده از گسترش ریسه‌های خارجی و تغییر مورفولوژی ریشه گیاهان و افزایش سطح جذب ریشه فاصله بین مواد غذایی و ریشه را کاهش دهند و باعث افزایش عملکرد گیاهان گردد (James *et al*., 2008).

در یک آزمایش نشان داده شد که گیاهچه‌های میکوریزایی گیاه کندر در مقایسه با گیاهان کنترل در تنش خشکی از میزان بیوماس و سطح برگ بیشتری برخوردار بود (Birhane *et al*., 2012).

این محققین همچنین بیان داشتند که اثر مثبت میکوریز بر روی این صفات به دلیل بهبود جذب فسفر به‌عنوان عنصر مهم و ضروری می‌باشد. در همین راستا داده‌های ما یک همبستگی مثبتی بین کلونیزاسیون گیاهان میکوریزی با جذب کل فسفر گیاه نشان دادند (r=۰/۳۱۶، p<۰/۰۱).

فسفر

بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۲) صرف نظر از اثر نوع میکوریز غلظت فسفر شاخساره تحت تأثیر تنش خشکی کاهش یافت به طوری که این روند کاهشی در تیمارهای میکوریزی مشهودتر بود. بیشترین میزان فسفر در FC_{100} آبیاری با ۰/۹۱ درصد و کمترین در FC_{40} با ۰/۷۴ درصد مشاهده شد. با کاربرد سه گونه میکوریز و تیمار ترکیبی غلظت فسفر به‌طور قابل توجهی در شاخساره گیاهان افزایش یافت. در تمام سطوح خشکی غلظت فسفر شاخساره گیاهان میکوریزی نسبت به گیاهان شاهد بیشتر بود. به‌طور مثال، در FC_{40} غلظت فسفر ۸۱، ۳۸، ۷۷ و ۵۳ درصد به‌ترتیب در *R. irregularis*، *R. intraradisces*، *F. mosseae* و ترکیبی نسبت به گیاهان شاهد افزایش نشان داد. روند تغییرات مشابهی در ریشه نیز به‌دست آمد (جدول ۳).

خشکی در گیاهان میکوریز و شاهد تأثیر قابل توجهی در میزان فسفر ریشه گیاهان نداشت و اختلافات بین سطوح خشکی تنها در گونه *F. mosseae* و ترکیبی مشاهده گردید. خشکی ممکن است که بر روی ارتباطات تغذیه‌ای گیاهان تأثیر داشته باشد و جذب عناصر راتحت تأثیر قرار دهد. محققین دو عامل را در کاهش جذب عناصر در شرایط خشکی ذکر کردند. اولاً زمانی که گیاهان تحت تنش خشکی قرار می‌گیرند هدایت روزنه‌ای کاهش‌یافته و در نتیجه از میزان تعرق نیز کاسته می‌شود و

جدول ۲- نتایج مقایسه میانگین‌های برهمکنش میکوریز- تنش خشکی بر غلظت عناصر (فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز) در شاخساره گیاه آهار

Table 2. Mean comparison of the interaction mycorrhiza and drought stress on elements concentration (P, K, Fe, Zn, Cu and Mn) in shoot of zinnia plant

منگنز (میکروگرم بر گرم) Mn (μg g^{-1})	مس (میکروگرم بر گرم) Cu (μg g^{-1})	روی (میکروگرم بر گرم) Zn (μg g^{-1})	آهن (میکروگرم بر گرم) Fe (μg g^{-1})	پتاسیم (درصد) K (%)	فسفر (درصد) P (%)	سطوح خشکی Water status	نوع قارچ AMF status
101.35±2.08^{a}	13.23±1.27^{ij}	51.25±4.01^{abc}	53.80±3.55^{bc}	2.49±0.09^{d-g}	0.52±0.02^{k†}	100%FC	شاهد (Control)
95.90±6.78^{ab}	15.21±2.20^{g-j}	50.71±4.07^{abc}	32.25±3.77^{hi}	2.38±0.06^{fg}	0.50±0.02^{jk}	80%FC	
78.01±5.74^{def}	11.13±0.73^{j}	33.71±2.19^{fg}	30.88±3.80^{hi}	2.52±0.13^{g}	0.41±0.03^{hij}	60%FC	
81.58±4.11^{cde}	13.25±1.09^{ij}	30.05±0.62^{g}	26.00±3.06^{i}	2.33±0.10^{fg}	0.49±0.01^{ijk}	40%FC	
78.16±3.69^{def}	22.88±1.63^{bcd}	49.75±2.55^{bc}	51.75±9.55^{b-e}	2.37±0.06^{fg}	1.07±0.06^{fgh}	100%FC	*R.irregularis*
77.06±2.63^{def}	24.78±1.62^{abc}	59.00±3.64^{a}	57.78±2.55^{ab}	2.76±0.07^{b-e}	0.95±0.03^{c-f}	80%FC	
77.23±3.25^{def}	19.91±2.36^{c-g}	40.51±1.16^{def}	37.18±2.25^{f-i}	2.82±0.19^{bcd}	0.87±0.03^{b-f}	60%FC	
85.00±5.24^{b-e}	19.78±1.53^{c-h}	38.36±1.40^{efg}	39.63±2.33^{fgh}	2.83±0.09^{bc}	0.89±0.04^{a}	40%FC	
92.15±2.48^{abc}	28.86±3.56^{a}	49.46±5.13^{bcd}	52.51±2.92^{b-e}	2.65±0.13^{b-f}	0.86±0.02^{fgh}	100%FC	*R.intrarardises*
76.91±8.54^{def}	25.61±2.25^{ab}	44.37±2.55^{b-e}	41.76±2.52^{d-h}	2.54±0.05^{c-g}	0.72±0.05^{ghi}	80%FC	
75.71±2.00^{def}	16.06±1.01^{f-j}	43.73±5.35^{b-e}	34.80±3.27^{ghi}	2.38±0.19^{fg}	0.74±0.02^{ghi}	60%FC	
73.81±3.36^{ef}	14.30±0.68^{hij}	44.61±2.43^{b-e}	48.13±2.45^{b-f}	2.49±0.05^{-g}	0.68±0.03^{fgh}	40%FC	
82.70±4.13^{b-e}	21.10±0.93^{b-f}	43.91±2.68^{b-e}	44.23±5.15^{c-g}	2.45±0.06^{efg}	0.98±0.06^{d-g}	100%FC	*F.mosseae*
77.60±4.86^{def}	25.21±4.62^{abc}	44.56±1.43^{b-e}	37.76±2.06^{f-i}	2.81±0.12^{bcd}	1.00±0.08^{ab}	80%FC	
84.26±7.75^{b-e}	18.06±1.34^{d-i}	52.70±3.15^{ab}	53.80±3.34^{bcd}	2.84±0.17^{bc}	0.95±0.11^{abc}	60%FC	
83.88±6.54^{b-e}	14.50±0.98^{g-j}	18.43±4.16^{cde}	42.35±6.62^{c-h}	3.47±0.06^{a}	0.87±0.05^{a-d}	40%FC	
87.46±2.38^{bcd}	22.01±3.26^{b-e}	50.15±3.71^{abc}	66.95±4.46^{a}	2.55±0.11^{c-g}	1.10±0.02^{c-g}	100%FC	Mix
77.65±4.43^{def}	18.50±1.22^{d-i}	44.66±3.23^{b-e}	41.21±6.31^{e-h}	2.74±0.14^{b-e}	1.06±0.06^{a-d}	80%FC	
67.86±3.42^{f}	17.00±1.08^{e-i}	44.08±2.83^{b-e}	38.76±3.11^{fgh}	2.78±0.10^{b-e}	0.94±0.08^{a-e}	60%FC	
77.93±4.84^{def}	16.00±0.58^{f-j}	34.03±2.63^{fg}	33.98±3.32^{ghi}	4.96±0.10^{b}	0.75±0.09^{efg}	40%FC	
**	**	ns	**	**	**		میکوریز (Mycorrhiza)
**	**	**	**	**	**		خشکی (Drought)
ns	*	**	**	**	ns		میکوریز × خشکی (M × D)

†حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد آزمون LSD می‌باشد.

†Different letters on the columns show significant difference at 5% level of probability (LSD).

جدول۳- نتایج مقایسه میانگین‌های برهمکنش میکوریز-تنش خشکی بر غلظت عناصر (فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز) در ریشه گیاه آهار

Table 3. Mean comparison of the interaction mycorrhiza and drought stress on elements concentration (P, K, Fe, Zn, Cu and Mn) in root of zinnia plant

منگنز (میکروگرم بر گرم) Mn (μg g^{-1})	مس (میکروگرم بر گرم) Cu (μg g^{-1})	روی (میکروگرم بر گرم) Zn (μg g^{-1})	آهن (میکروگرم بر گرم) Fe (μg g^{-1})	پتاسیم (درصد) K (%)	فسفر (درصد) P (%)	سطوح خشکی Water status	نوع قارچ AMF status
50.53±4.58^{g-j}	16.65±0.27^{g}	16.78±0.66^{ghi}	123.58±11.40^{f-i}	2.14±0.24^{de}	0.48±0.04^{ijk†}	100%FC	شاهد (Control)
63.13±3.37^{d-g}	16.80±0.60^{g}	25.25±3.58^{cde}	151.15±15.93^{c-g}	2.14±0.09^{de}	0.48±0.04^{ik}	80%FC	
41.93±3.19^{j}	16.88±0.62^{g}	12.33±1.58^{ij}	109.35±10.56^{hi}	2.14±0.16^{de}	0.41±0.04^{k}	60%FC	
54.63±3.99^{f-j}	16.61±0.46^{g}	10.35±0.61^{j}	145.52±13.26^{e-h}	2.29±0.08^{cde}	0.50±0.05^{h-k}	40%FC	
103.21±4.77^{a}	102.86±6.29^{a}	29.10b±2.59^{c}	211.57±10.39^{a}	2.56±0.11^{bc}	0.95±0.05^{cde}	100%FC	*R.irregularis*
73.96±3.53^{cde}	92.30±10.01^{ab}	22.13±2.24^{d-g}	215.62±15.18^{a}	2.64±0.13^{b}	0.86±0.05^{def}	80%FC	
66.31±8.39^{def}	82.75±2.37^{b}	25.12±0.72^{cde}	176.82±17.68^{a-e}	2.43±0.11^{bcd}	0.87±0.08^{def}	60%FC	
67.93±3.67^{def}	52.11±3.65^{cd}	27.00±4.23^{b-e}	185.68±18.80^{a-d}	2.05±0.05^{e}	0.68±0.04^{fgh}	40%FC	
93.38±8.52^{ab}	26.45±1.11^{fg}	32.00±3.16^{ab}	203.03±19.28^{ab}	2.59±0.09^{bc}	0.82±0.04^{d-g}	100%FC	*R.intrarardises*
75.30±5.81^{cd}	24.66±1.12^{fg}	28.08±2.53^{bcd}	172.15±11.74^{b-e}	2.56±0.06^{bc}	0.78±0.03^{efg}	80%FC	
61.15±3.36^{e-h}	23.08±0.51^{g}	27.00±2.28^{b-e}	189.17±12.95^{abc}	2.37±0.06^{b-e}	0.71±0.04^{fg}	60%FC	
44.38±4.19^{ij}	21.45±1.38^{g}	18.52±1.05^{f-i}	156.32±24.78^{c-f}	2.29±0.13^{cde}	0.65±0.04^{g-j}	40%FC	
90.81±3.44^{ab}	60.93±7.99^{c}	20.83±2.07^{e-h}	177.88±15.14^{a-e}	2.21±0.08^{de}	0.68±0.02^{f-i}	100%FC	*F.mosseae*
70.73±6.50^{de}	50.38±2.42^{cde}	16.36±1.55^{g-j}	198.57±14.62^{ab}	2.16±0.19^{de}	1.15±0.11^{abc}	80%FC	
65.43±2.91^{def}	57.03±3.68^{cd}	15.56±0.54^{hij}	153.65±7.77^{c-g}	2.11±0.06^{de}	1.15±0.04^{abc}	60%FC	
54.25±4.64^{f-j}	46.23±2.41^{de}	21.03±2.07^{e-h}	147.88±11.97^{d-h}	2.17±0.08^{de}	1.21±0.08^{ab}	40%FC	
87.06±6.67^{bc}	61.30±8.15^{c}	23.20±1.99^{c-f}	185.37±6.79^{a-d}	3.33±0.07^{a}	1.24±0.15^{a}	100%FC	Mix
56.61±5.85^{f-i}	59.88±9.57^{c}	22.27±0.27^{d-g}	115.05±11.00^{ghi}	3.38±0.04^{a}	0.98±0.11^{cde}	80%FC	
48.43±3.11^{hij}	57.16±4.37^{cd}	36.20±2.37^{a}	90.35±4.99^{ij}	3.35±0.05^{a}	0.97±0.06^{cde}	60%FC	
46.03±2.98^{ij}	37.58±1.57^{ef}	35.56±2.80^{a}	69.50±6.94^{j}	3.09±0.09^{a}	1.01±0.07^{bcd}	40%FC	
**	**	**	**	**	**		میکوریز (Mycorrhiza)
**	**	ns	**	*	ns		خشکی (Drought)
**	**	**	**	ns	**		میکوریز × خشکی (M × D)

†حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد آزمون LSD می‌باشد.

†Different letters on the columns show significant difference at 5% level of probability (LSD).

از آنجایی که یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های جذب عناصر و املاح تعرق می‌باشد نهایتاً جذب مواد غذایی به‌وسیله ریشه و انتقال از ریشه به شاخساره کاهش می‌یابد (Alam, 1999). ثانیاً با افزایش تنش خشکی از میزان رطوبت خاک کاسته می‌شود و از آنجایی که عناصر محلول در آب به‌صورت انتشار به سطح ریشه نزدیک می‌شوند تا جذب شوند تحت تنش خشکی از میزان انتشار آن‌ها کم‌شده و در نتیجه میزان جذب آن‌ها توسط ریشه گیاهان کاهش می‌یابد (Yuncai and Schmidhalter., 2005). یکی از مهم‌ترین نقش‌های میکوریز در ارتباط با همزیستی، جذب فسفر تحت تنش خشکی می‌باشد که مقاومت گیاهان را در برابر خشکی افزایش می‌دهند. میکوریز از طریق افزایش سطح جذب و همچنین با تولید و ترشح آنزیم فسفاتاز باعث می‌شود که فسفات غیر محلول و تثبیت‌شده در خاک به فرم محلول در آید و برای ریشه قابل جذب گردد (Huixing, 2005). نتایج به‌دست آمده این پژوهش با نتایج Ahmed and Abo-Ghalia (2008) همخوانی دارد. در این آزمایش همبستگی مثبتی بین وزن خشک شاخساره و جذب فسفر کل گیاه به‌دست آمد (r=۰/۷۲۹ ،p<۰/۰۱).

پتاسیم

با افزایش خشکی صرف نظر از نوع میکوریز میزان پتاسیم شاخساره افزایش یافت به‌طوری‌که کمترین مقدار پتاسیم مربوط به FC_{40} (با میانگین ۲/۵ درصد) نسبت به FC_{100} (با میانگین ۲/۸۱ درصد) مشاهده شد (جدول ۲). هر چند که از لحاظ آماری اختلاف بین FC_{40}، FC_{80} و FC_{60} معنی‌دار نشد. در تمام سطوح خشکی نقش میکوریز در افزایش غلظت پتاسیم قابل مشاهده می‌باشد به‌طوری‌که در گونه *F. mosseae* بیشترین غلظت پتاسیم در شاخساره گیاهان مشاهده گردید. نتایج تجزیه واریانس در ریشه نشان داد (جدول ۳) که برهمکنش میکوریز-خشکی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نگردید. پتاسیم یک فاکتور ضروری در سنتز پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و فتوسنتز است. پتاسیم مقاومت به خشکی را در گیاهان از طریق تنظیم روزنه‌ها، تنظیم اسمزی و سنتز پروتئین افزایش می‌دهد (Marschner, 2012). زمانی که گیاهان با کم‌آبی مواجه می‌شوند با افزایش ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی از جمله یون پتاسیم اثرات تنش را تعدیل می‌کنند (Wang *et al.*, 2013). تحقیقات انجام‌شده در ارتباط با میکوریز نشان می‌دهند که گیاهان تلقیح‌شده تحت تنش خشکی میزان پتاسیم بیشتری نسبت به گیاهان شاهد جذب می‌کنند. مهم‌ترین دلیل افزایش پتاسیم در گیاهان میکوریز این‌گونه ذکر شده است که یکی از مکانیسم‌های مقاومت به خشکی در گیاهان میکوریز تجمع ترکیبات محلول سازگار می‌باشد. یکی از این ترکیبات غیر آلی یون پتاسیم می‌باشد که گیاهان میکوریز در برابر تنش خشکی این یون را در گیاه میزبان تجمع می‌دهند تا از طریق تنظیم اسمزی گیاه در برابر خشکی کمتر دچار خسارت شود (Shamshiri *et al.*, 2015).

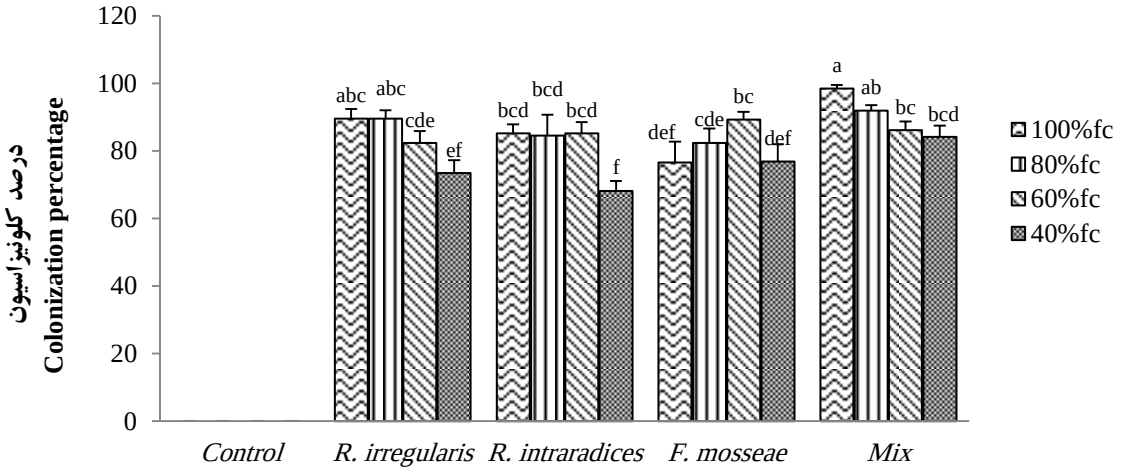
عناصر کم مصرف

نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول‌های ۲ و ۳) که در ارتباط با عناصر آهن و مس سطوح خشکی و میکوریز و برهمکنش آن‌ها در ریشه و شاخساره در سطح پنج درصد معنی‌دار گردید. در ارتباط با عنصر روی اثر میکوریز و سطوح خشکی به‌ترتیب در شاخساره و ریشه در سطح پنج درصد معنی‌دار نشد. همچنین نتایج تجزیه واریانس نشان داد که میزان عنصر مس در شاخساره در سطوح مختلف میکوریز و برهمکنش میکوریز-خشکی در سطح پنج درصد معنی‌دار شد. نتایج آورده‌شده در جدول‌های (۲) و (۳) نشان می‌دهد که صرف نظر از اثر میکوریز تنش خشکی باعث کاهش غلظت عناصر آهن، مس (در ریشه و شاخساره) و روی (شاخساره) گردید. بر اساس نتایج حاصل‌شده کمترین غلظت در FC_{60} و FC_{40} خشکی مشاهده شد اما بین FC_{100} و FC_{80} اختلافات معنی‌دار نبود. عنصر آهن در سطح FC_{60}، ۳۹ درصد غلظت آهن نسبت به شاهد کاهش نشان داد. با اضافه کردن میکوریز غلظت تمام عناصر کم‌مصرف (به

استثنای عنصر روی در شاخساره که معنی‌دار نبود و غلظت منگنز که در شاخساره گیاهان شاهد بیشتر بود) در اکثر سطوح مختلف خشکی افزایش قابل ملاحظه‌ای به‌خصوص در ریشه‌های گیاهان میکوریزی مشاهده شد. به‌طور مثال، در FC_{60} غلظت آهن ۲۳، ۱۳، ۷۶ و ۴۶ درصد به‌ترتیب در *R. irregularis*، *R. intraradisces*، *F. mosseae* و ترکیبی نسبت به گیاهان شاهد در شاخساره افزایش نشان داد. در ارتباط با نقش تنش خشکی بر عناصر کم‌مصرف نتایج متفاوتی گزارش شده است. ثابت شده است که قارچ‌های میکوریز جذب عناصر کم تحرک در خاک مانند روی (سنتز سیتوکروم)، مس (شرکت در زنجیره انتقال الکترون) و آهن (سنتز کلروفیل) را افزایش می‌دهند و میزان مقاومت به خشکی را در گیاهان میزبان از طریق بهبود تغذیه‌ای عناصر افزایش می‌دهند (Auge, 2001). دلایل متعددی نحوه جذب این عناصر را توضیح می‌دهد. Barea (1991) اظهار داشت که این ریسه‌های قارچی هستند که گسترش ریشه را برای جستجوی عناصر کم تحرک افزایش می‌دهند. میکوریز همچنین قادر است که مواد معدنی قابل حل در خاک را از طریق آزاد کردن اسیدها و یا با اسیدی کردن محیط ریزوسفر از طریق افزایش میزان CO_2 در اثر تنفس سلول‌های ریشه که ممکن است با آب تولید اسید کربونیک کند به مقدار کم حل کند و در دسترس گیاه میزبان قرار دهند. به‌علاوه، ریسه‌های میکوریز می‌توانند دسترسی به منابع غذایی غیرمحلول را از طریق فعالیت آنزیمی یا بعضی تغییرات فیزیکی و شیمیایی ریزوسفر مانند تغییر فیزیولوژی ریشه و ترشحات آن بر محیط ریزوسفر و یا ارتباط با ارگانیسم‌های دیگر خاک، فراهم کنند (Kumar *et al*., 2017).

کلونیزاسیون میکوریزایی ریشه

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که افزایش شدت خشکی صرف نظر از نوع میکوریز به کار رفته سبب کاهش کلونیزاسیون ریشه گیاهان گردید (شکل ۱). البته بین FC_{100}، FC_{80} و FC_{60} از لحاظ آماری اختلافی مشاهده نشد. گیاهانی که تحت تیمار ترکیبی بودند بیشترین کلونیزاسیون را نشان دادند هر چند که بین سه ایزوله از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار نبود. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با نتایج دیگر محققین مطابقت دارد (Kaya *et al*., 2003). کاهش در کلونیزاسیون میکوریز به‌وسیله تنش خشکی این طور بیان شده است که تحت تنش خشکی ترشحات ریشه به دلیل کاهش در میزان فتوسنتز گیاه و بسته شدن روزنه‌ها، کاهش می‌یابد (Graham *et al*., 1997).



شکل ۱- اثر سطوح مختلف خشکی بر میزان کلونیزاسیون ریشه گیاه آهار

Figure 1. Effect of different water stress levels on mycorrhizal colonization percentage

نتیجه‌گیری

با توجه به بالا بودن کارایی قارچ‌های میکوریز بومی هر منطقه، در این پژوهش استفاده از هر سه میکوریز شناسایی‌شده (*R. irregularis*، *R. intraradisces*، *F. mosseae*) و ترکیب آن‌ها نسبت به شاهد (بدون میکوریز) مثبت ارزیابی شد، هر چند که گونه *R. irregularis* و تیمار ترکیبی از عملکرد بهتری برخوردار بودند. نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌کند که گیاهان میکوریزی آهار از طریق حداقل افزایش جذب عناصری مانند فسفر، پتاسیم، آهن، مس و روی که در انتقال انرژی، تنظیم اسمزی، سنتز رنگیزه‌ها و در دستگاه فتوسنتزی نقش دارند باعث افزایش مقاومت تحت تنش خشکی می‌گردند.

سپاس‌گذاری

بدین‌وسیله از دانشگاه ولی عصر رفسنجان عج برای حمایت مالی این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

Abdel-Salam, E., Alatar, A. and El-Sheikh, M. A. (2018). Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi alleviates harmful effects of drought stress on damask Rose. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(8), 1772-1780.

Ahmed, A. K. and Abo-Ghalia, H. H. (2008). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the metabolic products and activity of antioxidant system in wheat plants subjected to short-term water stress, followed by recovery at different growth stages. *Journal* of Advanced Scientific Research, 4(5), 559-569.

Alam, S. M. (1999). Nutrient uptake by plants under stress conditions. In M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of plant and crop stres*s (pp. 285-314). New York: Marcel Dekker.

Al-Karaki, G. N. (2006). Nursery inoculation of tomato with arbuscular mycorrhizal fungi and subsequent performance under irrigation with saline water. *Scientia Horticulturae*, 109(1), 1-7.

Asrar, A. A., Abdel-Fattah, G. M. and Elhindi, K. M. (2012). Improving growth, flower yield, and water relations of snapdragon (*Antirhinum majus* L.) plants grown under well-watered and water stress conditions using arbuscular mycorrhizal fungi. *Photosynthetica*, 50(2), 305-316.

Auge, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular-arbuscular myocrrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1), 3-42.

Barea, J. M. (1991). Vesicular-arbuscular mycorrhizae as modifiers of soil fertility. *Advances in soil science* (pp. 1-40). New York: Springer.

Birhane, E., Sterck, F. J., Fetene, M., Bongers, F. and Kuyper, T. W. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance photosynthesis, water use efficiency, and growth of frankincense seedlings under pulsed water availability conditions. *Oecologia*, 169(4), 895-904.

Chapman, H. D. and Pratt P. F. (1982). *Methods of analysis for soils, plants and waters*. University of California, Citrus Express.

Dole, J. M. and Wilkins, H. F. (2005). *Floriculture: principles and species* (2nd ed. pp. 907-911). USA: Prentice hall Publication.

Farooq, M., Bramley, H. J., Palta, A. and Siddique, K. M. (2011). Heat stress in wheat during reproductive and grain filling phases. *Critical* Reviews in *Plant* Sciences, 30(6), 491-507.

Flexas, J., Baron, M., Bota, J., Ducruet, J. M., Galle, A., Galmes, J., Jimenez, M., Pou, A., Ribas-Carbo, Sajnani, M. C., Tomas, M. and Medrano, H. (2009). Photosynthesis limitations during water stressacclimation and recovery in the drought-adapted vitis hybrid Richter-110 (V. berlandierixV. rupestris). *Journal* of Experimental *Botany*, 60(8), 2361-2377.

Goicoechea, N., Merino, S. and Sanchez-Diaz, M. (2004). Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) to the adaptations exhibited by the deciduous shrub *Anthyllis cytisoides* under water deficit. *Plant Physiology*, 122(4), 453-464.

Graham, J. H., Duncan, L. W. and Eissenstat, D. M. (1997). Carbohydrate allocation patterns in citrus

genotypes as affected by phosphorus nutrition, mycorrhizal colonization and mycorrhizal dependency. *New Phytologist*, 135(2), 335-343.

Grassi, G. and Magnani, F. (2005). Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees. *Plant Cell Environment*, 28(7), 834-849.

Huixing, S. (2005). Effects of VAM on host plant in the condition of drought stress and its Mechanisms. *Electronic Journal of Biology*, 1(3), 44-48.

James, B., Rodel, D., Lorettu, U., Reynaldo, E. and Tariq, H. (2008). Effect of vesicular arbescular mycorrhiza (VAM) fungi inoculation on coppicing ability and drought resistance of Senna Spectabilis. *Pakistan Journal* of *Botany*, 40(5), 2217-2224.

Karimi, A., Roshanfekr, H. and Meskarbashee, M. (2013). Effect of irrigation regimes on content oil, proline content and some physiological characteristics of two safflower cultivars (*Carthamus tinctorius* L.) under climatic conditions in Ahvaz. *Journal of Plant Productions (Scientific Journal of Agriculture)*, 36(3), 105-117. [In Farsi]

Kaya, C., Higgs, D., Kirnak, H. and Tas, I. (2003). Mycorrhizal colonisation improves fruit yield and water use efficiency in watermelon (*Citrullus lanatus* Thunb.) grown under well-watered and water-stressed conditions. *Plant* and *Soil*, 253(2), 287-292.

Kumar, V., Kumar, M., Sharma, S. and Prasad, R. (2017). *Probiotics and plant health (Chapter 14).* (pp. 337-352). Noida, India: Springer.

Lee, J., Lee, S. and Young, J. P. W. (2008). Improved PCR primers for the detection and identification of arbuscular mycorrhizal fungi. *FEMS Microbiology Ecology*, 65(2), 339-349.

Li, Y. Z., Sun, C. B., Huang, Z. B., Pan, J. L., Wang, L. and Fan, X. W. (2009). Mechanisms of progressive water deficit tolerance and growth recovery of Chinese maize foundation genotypes Huangzao 4 and Chang 7–2, which are proposed on the basis of comparison of physiological and transcriptomic responses. *Plant* and *Cell Physiology*, 50(12), 2092-2111.

Long, L. K., Yao, Q., Huang, Y. H., Yang, R. H., Guo, J. and Zhu, H. H. (2010). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on zinnia and the different colonization between *Gigaspora* and *Glomus*. *World Journal of Microbiol Biotechnol*, 26(8), 1527-1531.

Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutritionmineral nutrition of higher plants*. London: Academic.

Pagano, M. C. and Dhar, P. P. (2014). Mycorrhizas associated with forests under climate change. In S. Lac, and M. Lucas-Borja (Eds.), *Climate change and forest ecosystems* (pp. 291-316). New York: Nova Science.

Phillips, J. and Hayman, D. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *British Mycological Society*, 55(1), 158-161.

Shamshiri, M. H., Hasani, M. R., Karimi, H. R. and Esmaail Zadeh, M. (2015). Effect of arbuscular mycorrhizae and salicylic acid on nutrient elements content of abareqi pistachio seedling under drought stress. *Journal of Plant Productions (Scientific Journal of Agriculture)*, 38(1), 75-89. [In Farsi]

Song, H. (2005). Effects of VAM on host plant in the condition of drought stress and its Mechanisms. *Electronic Journal of Biology*, 1(3), 44-48.

Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q. and Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular* Sciences, 14(4), 7370-7390.

Yuncai, H. and Schmidhalter, U. (2005). Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Plant Nutrition*, 168(4), 541-549.

© 2019 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).