Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 1, March-April 2022, p. 81-94

The Effect of Mychorhizae Symbiosis on Nutrient Concentration in Common Almond (*Prunus dulcis* Mill.) Rootstocks in Drought Stress Condition

M. Mohammadi[1*]

Received: 11-11-2021
Revised: 22-11-2021
Accepted: 07-03-2022
Available Online: 20-05-2022

How to cite this article:
Mohammadi M. 2022. The Effect of Mychorhizae Symbiosis on Nutrient Concentration in Common Almond (*Prunus dulcis* Mill.) Rootstocks in Drought Stress Condition. Journal of Water and Soil 36(1): 81-94. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/jsw.2022.73354.1110

Introduction

Almond (*Prunusdulcis* Mill.), native to West Asia to the Mediterranean. Iran after the United States and Spain has been ranked third among this plant production across the world. Drought stress is one of the most important factors limiting the yield and production of agricultural products. Many morphological, physiological, enzymatic, nutritional, quantitative and qualitative characteristics of almonds can be impaired by drought stress. There are a lot of micro-organisms in soil which can help the plant nutrition and uptake of nutrient elements through different ways and can be mentioned by the dual symbiotic relation between micro-organism and plant. Mycorrhizae fungi are one of these microorganisms. The most important beneficial effects of mycorrhizal symbiosis is increasing the nutrient uptake, leaf gas exchange, photosynthesis, water use efficiency, productivity, improve plant nutrition and resistance to environmental stresses. It also helps the plant to absorb more water and nutrients by modification of rhizosphere environment, improvement of soil structure through formation of stable aggregates, expansion of external filaments and change of root morphology. The results of mycorrhizae symbiosis research in different plants show that the higher uptake of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), iron (Fe), zinc (Zn), copper (Cu) and manganese (Mn). The aim of this study was to evaluate the ability of mycorrhizal fungi, a symbiotic and environmentally friendly agent, under drought stress condition on increasing growth and absorption of water and nutrients on almond rootstocks commonly consumed in Chaharmahal-va-Bakhtiari province.

Material and Methods

This field experiment was carried out as a factorial based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The treatments consist of two level of mycorrhizal fungus (M_0: without and M_1 with using of mycorrhizal fungus), four kinds of rootstock (bitter, local Shorab 2, GF and GN) and four levels of drought stress (without stress as a control, slight, moderate and severe water stress which based on ratio of depletion of plant available water). Inoculation of mycorrhizal fungi at the rate of 100 g of a mixture of three species of mycorrhizal fungi (*Clariodeoglumus etunicatum*, *Rhizophagus intraradices* and *Funneliformiss mosseae*) was placed under the roots for each rootstock with a population of at least 100 active fungal organs including spores, vesicles, and hyphae per gram. The plants were exposed to drought stress for six weeks. Leaf samples were taken to measure the amount of nutrient elements. Nitrogen by Kjeldahl method, P by spectrophotometer, K by flame method with flame photometer and nutrients of iron, zinc, manganese, boron and copper were measured by atomic absorption spectrophotometry with an atomic absorption spectrometer (PerkinElmer Analyst 400, Waltham, United States of America). Statistical analysis was done with SAS 9.3 statistical software. Duncan's multiple range test was used to separate means.

Results and Discussion

1- Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shahrekord, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.mohamadi@areo.ac.ir)

The results revealed that there were significant differences between four cultivars in terms of nutrient concentrations except B. The maximum amounts of the studied characteristics were obtained from GF rootstock. The GN rootstock was in the second ranking. Water deficient treatment showed a significant effect on the examined nutrient elements except Mn and Cu concentrations. The maximum amounts of measured nutrient elements, except K, were obtained from I_1 treatment. The highest rate of K was obtained from I_3 and I_4 treatments. With increasing drought stress the decreasing trend of nutrient elements, except K was observed. Mycorrhizae fungi treatment increased nutrient elements except B. The maximum amounts of N, P, Fe and Zn were obtained from GF +I_1. Using of mycorrhizae fungi in drought treatments caused significant increase in N, K, Fe, Mn and B. The maximum amount of nutrients was obtained from GF + M_1 treatment. The maximum amounts of N, Fe and B were obtained from I_1 + M_1 + GN. Inoculation of mycorrhizae fungi caused higher rootstock growth under drought stress. The change in the shape, volume and number of root branches of the root caused by the consumption of mycorrhizae fungi was due to increased nutrient uptake and changes in the amount of plant hormones such as auxin. Growth and absorption of water and nutrients decreased under water deficient stress. Therefore, the effect of symbiosis with mycorrhizae fungi under water deficient stress conditions was more important than non-stress conditions. This has been reported in the research of various researchers.

Conclusion

The results of this study showed that with increasing water deficient stress, the amount of nutrient elements decreased except K. The importance of GF rootstock to mycorrhizae fungi inoculation was higher due to higher growth potential and root velocity. Nutrients that were measured in inoculated rootstocks were higher than those without inoculation. Under drought stress conditions, the amount of nutrients measured was higher in inoculated rootstocks. Inoculation of mycorrhizal fungi can lead to increase nutrients absorption with some mechanisms such as effective increase in root uptake, root length, number of lateral roots, proton production, and secretion of organic acids, siderophores, chelating compounds, and acid phosphates. Consumption of mycorrhizae fungi increased nutrient uptake and improved almond rootstock resistance to drought stress.

Keywords: Almond (*Prunus amygdalus)*, GF rootstock, Nitrogen, Phosphorus, Zinc

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۱، ص ۸۱-۹۴

تأثیر همزیستی میکوریزی بر میزان عناصرغذایی پایه‌های متداول بادام در شرایط تنش خشکی

محمود محمدی[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

چکیده

تنش خشکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده عملکرد و تولید محصولات کشاورزی می‌باشد. قارچ‌های میکوریز آربسکولار در فراهم کردن جذب آب و مواد غذایی و افزایش تحمل گیاهان به خشکی به نفع میزبان خود عمل می‌کنند. به منظور بررسی تأثیر قارچ‌های میکوریزی بر میزان عناصر غذایی اندام هوایی پایه‌های متداول بادام در شرایط تنش خشکی آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی شهرکرد اجرا شد. فاکتورهای این آزمایش شامل فاکتور اول، قارچ میکوریز در دو سطح M_0:شاهد بدون مصرف و M_1: مصرف قارچ میکوریزی، فاکتور دوم پایه‌های بادام درچهار سطح (GN، GF، محلی شوراب ۲ و تلخ) و فاکتور سوم تنش خشکی در چهار سطح (I_1: بدون تنش، I_2: ۲۰، I_3: ۴۰ و I_4: ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل استفاده گیاه بودند. نتایج نشان داد حداکثر مقادیر عناصر غذایی از پایه GF حاصل شد. با افزایش تنش خشکی روند کاهشی در میزان عناصر غذایی به جز پتاسیم مشاهده شد. تلقیح قارچ‌های میکوریزی باعث افزایش میزان عناصر غذایی به غیر از بور شد. حداکثر میزان نیتروژن، فسفر، آهن، روی و بور از تیمار $GF+I_1$ حاصل شد. کاربرد قارچ‌های میکوریزی در تیمارهای تنش در پایه‌های مورد بررسی باعث افزایش معنی‌دار نیتروژن، پتاسیم، آهن، منگنز و بور شد. حداکثر میزان این عناصر غذایی از تیمار $GF+M_1$ حاصل شد. حداکثر میزان نیتروژن، آهن و بور از تیمارI_1+M_1+GN حاصل شد. تلقیح قارچ‌های میکوریزی باعث افزایش میزان عناصر غذایی در شرایط تنش خشکی شد.

واژه‌های کلیدی: بادام، پایه GF، تنش خشکی، فسفر، نیتروژن

مقدمه

بادام (*Prunus dalcis* (Miller) D. webb)، بومی مناطق غرب آسیا تا حوزه دریای مدیترانه بوده و کشور ایران دارای رتبه سوم سطح زیر کشت درختان سردسیری پس از آمریکا و اسپانیا در جهان می‌باشد (Tehranifar *et al*., 2004). تعدادی از ریز جانداران در خاک وجود دارند که برآیند اثرات متقابلشان با محیط خاک و ریشه موجب افزایش جذب عناصر غذائی، افزایش عملکرد، تعدیل اثرات نامطلوب انواع تنش‌ها، بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش مقاومت در برابر آفات و بیماری‌ها می‌گردند. از جمله این ریز جانداران قارچ‌های میکوریزا و همزیستی این قارچ‌های خاکزی با ریشه گیاهان است (Rejali, 2017؛ Smith and Read, 2010). در تمامی گیاهان و به‌ویژه درختان میوه که از تراکم ریشه‌ای کمتری برخوردار می‌باشند سیستم ریشه‌ای به‌عنوان اصلی‌ترین کانال جذب آب و عناصر غذایی در بخش تغذیه گیاهان محسوب می‌گردد. در این میان استفاده از قارچ‌های میکوریزی همزیست با ریشه گیاهان از راه‌کارهای علمی و عملی برای رسیدن به تغذیه مطلوب می‌باشد (Rejali, 2017 ؛ Mishra *et al*., 2010). استفاده از همزیستی میکوریزی، افزایش رشد بالاخص در مراحل اولیه رشد در نهالستان‌ها و متعاقب آن در باغ‌ها را به‌دنبال خواهد داشت (Brundrett *et al*., 1996). از مهمترین اثرات مثبت همزیستی میکوریزی می‌توان به افزایش جذب عناصر غذایی، بهبود تغذیه گیاه، افزایش کارآیی و بهره‌وری مصرف آب و مقاومت گیاه در مقابل تنش‌های محیطی مانند خشکی و شوری اشاره نمود (Artusson *et al*., 2006؛ Amirabadi *et al*., 2009؛ Smith and Read, 2010). همچنین قارچ‌های میکوریزی با ایجاد

۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات،آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email:m.mohamadi@areeo.ac.ir
DOI: 10.22067/jsw.2022.73354.1110

تعادل نسبی در جذب فسفر و نیتروژن می‌توانند از اثرات بازدارندگی و رقابتی آنها در جذب عناصر کم مصرف کاسته و به ایجاد تغذیه متعادل گیاهی کمک کنند (Mishra *et al.*, 2010 ؛ Chen *et al.*, 2005).

تنش خشکی باعث کاهش تعداد تارهای کشنده ریشه شده و بر مورفولوژی ریشه و انشعابات ریشه صدمه وارد می‌نماید که در نتیجه آن جذب عناصر غذایی بوسیله سیستم ریشه‌ای کاهش می‌یابد. در این زمان هیف‌های قارچ‌های میکوریز می‌توانند به عنوان ادامه سیستم ریشه‌ای گیاه میزبان به جذب عناصر غذایی کمک نمایند (Tehranifar *et al.*, 2004؛Ortas *et al.*, 2015). بررسی‌های وو و زو (Wu and Zou, 2011) نشان می‌دهد که در شرایط تنش خشکی نقش قارچ‌های میکوریزی مهمتر از شرایط بدون تنش است. بررسی‌های آقابابایی و همکاران (Aghababaei *et al.*, 2011) بر روی رقم‌های مختلف بادام نشان داد که همزیستی میکوریزی منجر به افزایش غلظت و جذب فسفر و روی شده است. اما غلظت نیتروژن، آهن و منگنز در اندام هوایی کاهش یافته و بر جذب پتاسیم و مس اثر مثبتی نداشته است. پژوهش‌های وو و همکاران (Wu *et al.*, 2009) نشان داد تلقیح قارچ‌های میکوریزی *Glomus versiforme* ،*Glomus mosseae* و *Paraglomus occultum* در هلو منجر به افزایش جذب عناصر غذایی فسفر، آهن، روی، کلسیم و منیزیم در اندام هوایی شده است ولی جذب عناصر مس و منگنز روند کاهشی را نشان داده است. نتایج تحقیقات کالوت و همکاران (Calvert *et al.*, 2004) نشان داد تلقیح پایه دورگ هلو- بادام (GF677) با قارچ‌های میکوریزی تأثیری بر غلظت نیتروژن گیاه نداشته ولی غلظت پتاسیم را در شرایط تنش آلودگی‌های نماتدی افزایش داد. زارعی و همکاران (Zarei *et al.*, 2013) گزارش نمودند میزان وزن خشک ریشه و اندام هوایی، جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز، مس و روی در اندام هوایی و درصد کلنیزاسیون ریشه پایه نارنج تلقیح شده با قارچ میکوریزی نسبت به پایه غیرمیکوریزی در شرایط تنش کم‌آبی، بالاتر بود. ژیامینگ و همکاران (Xueming *et al.*, 2007) به بررسی همزیستی قارچ‌های میکوریزی بر روی قلمه‌های آلو پرداخت و گزارش نمود جذب عناصر غذایی فسفر، پتاسیم، منگنز و روی افزایش یافت و گونه‌های *Glomus mosseae* و *Glomus etunicatum* بیشترین تأثیر را داشتند. تحقیقات رازوک و کاجی (Razouk and Kajji, 2015) در خصوص تلقیح قارچ‌های میکوریزی گونه *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae* بر روی چهار رقم آلو (*Prunus domestica*) در شرایط تنش خشکی نشان داد که تلقیح باعث افزایش جذب فسفر، پتاسیم، روی و آهن شده است. بررسی‌های کفکاس و ابراهیم (Kafkas and Ibrahim, 2009) نشان داد تلقیح هشت گونه متفاوت از میکوریزا با چهار گونه پسته باعث افزایش رشد رویشی و جذب عناصر فسفر و روی در گیاهان همزیست با میکوریزا نسبت به شاهد غیرمیکوریزی می‌شود. نتایج تحقیقات حقیقت‌نیا و همکاران (Haghighatnia *et al.*, 2011) نشان داد تلقیح قارچ‌های میکوریزی با پایه مرکبات ولکامرانیا به‌ویژه تلقیح گیاه با گونه *Rhizophagus intraradices* به‌واسطه تأثیر مثبت بر پارامترهای مورفولوژیک، جذب عناصر غذایی (پتاسیم، فسفر و کلسیم)، مقدارکلروفیل و رطوبت نسبی آب برگ تحت شرایط تنش خشکی، سبب اصلاح مقاومت به تنش خشکی شده است.با عنایت به تأثیر الگوی سیستم ریشه‌ای و صفات رشدی بر میزان جذب آب و مواد غذایی این پژوهش با هدف بررسی توانایی قارچ‌های میکوریزی به عنوان عامل همزیست و سازگار با طبیعت در افزایش رشد، جذب آب و مواد غذایی و افزایش مقاومت به خشکی بر روی پایه‌های بادام متداول مصرفی در استان چهارمحال و بختیاری با خصوصیات رشدی وریشه‌ای متفاوت انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری بلوک‌ها کامل تصادفی در سه تکرار و سه گیاه در هر واحد آزمایشی در سال ۱۳۹۷ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی شهرکرد انجام شد. فاکتورهای آزمایشی عبارت بودند از فاکتور اول، قارچ میکوریزا در دو سطح شامل M_0: بدون مصرف قارچ میکوریزی به‌عنوان شاهد و M_1: مصرف قارچ میکوریزی، فاکتور دوم پایه بادام در چهار سطح (GN، GF، محلی شوراب ۲ و تلخ) و فاکتور سوم تنش خشکی در چهار سطح (I_1: بدون تنش به‌عنوان شاهد، I_2: تنش ۲۰ درصد، I_3: تنش ۴۰ درصد و I_4: تنش ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل استفاده گیاه). در این بررسی بعد از نمونه‌برداری مقدماتی ابتدا مقدار خاک کافی با میزان فسفر قابل جذب پائین به محل آزمایش انتقال داده شد و مراحل آماده‌سازی بر روی آن اعمال و خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن اندازه‌گیری شد (جدول ۱) (Emami, 1996). برای تهیه پایه‌های بادام تلخ ابتدا تعداد کافی بذر بادام تلخ تهیه و پس از اعمال سرمادهی در اسفند ماه ۹۶ با مساعد شدن هوا، بذرهای جوانه‌دار شده به گلدان‌های پلاستیکی دو کیلوگرمی انتقال داده شدند و مراقبت لازم از آنها به مدت سه ماه تا مرحله استقرار ریشه و رشد نهال و انتقال پایه‌های بذری بادام به گلدان‌های ۱۳ لیتری انجام شد. برای تهیه پایه‌های رویشیGF و GN نیز از طریق ریشه‌دار نمودن قلمه‌های آنها در بستر کشت استریل ترکیب پرلیت + ماسه (۱:۱) که محیط خنثی و فاقد خاک می باشد انجام شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 1- Soil chemical and physical characteristics of the research site

رطوبت PWP	رطوبت FC	شن	سیلت	رس	مواد خنثی شونده	کربن آلی	نیتروژن	مس	منگنز	روی	آهن	پتاسیم	فسفر	pH	هدایت الکتریکی
PWP	FC	Silt	Sand	Clay	TNV	OC	N	Cu	Mn	Zn	Fe	K	P		EC
					(%)			(mg kg^{-1})							(dS m^{-1})
15.6	33.5	20	54	26	24.5	0.92	0.07	0.9	8.9	0.58	4.1	311	6	7.8	0.88

پس از ریشه‌دار شدن، نسبت به تلقیح آنها با قارچ‌های میکوریز اقدام شد. در ادامه قلمه‌های سه ماهه پایه‌های GF677 (هیبرید هلو و بادام)، GN 15 (هیبرید هلو و بادام) و پایه بومی شوراب ۲ (هیبرید دیر گل هلو و بادام شاهرود ۱۶) از نهالستان‌های سطح منطقه به گلخانه انتقال داده شد. سپس مراحل پر کردن خاک در گلدان‌های ۱۳ لیتری انجام شد و پایه‌های مورد آزمایش به گلدان‌ها انتقال و آبیاری تا مرحله استقرار پایه‌ها به‌طور یکسان انجام شد. تلقیح قارچ میکوریزی به میزان۱۰۰ گرم از مخلوط سه گونه قارچ میکوریزایی *Rhizophagus intraradices*، *Clariodeoglumus etunicatum* و *Funneliformiss mosseae* برای هر پایه با جمعیت حداقل ۱۰۰ اندام فعال قارچ شامل اسپور، وزیکول، هیف در هر گرم در زیر ریشه قرار داده شد. قارچ‌های میکوریزی از بخش بیولوژی خاک موسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شد. بعد از مرحله استقرار، گلدان‌ها به فضای باز انتقال داده شده و تیمارهای تنش آبی اعمال شدند. افزایش آب به گلدان‌ها ازطریق اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج TDR[1] و جبران آب کاهش یافته در هر یک از سطوح رطوبتی فوق انجام شد. جهت تعیین مقدار آب مورد نیاز تیمارهای تنش، ابتدا میزان رطوبت خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم با استفاده از دستگاه صفحه فشاری[2] تعیین شد و با اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک در عمق توسعه ریشه با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج و با استفاده از فرمول عمق آب آبیاری محاسبه و به گلدان‌ها اضافه شد. در این مرحله پس از محاسبه میزان رطوبت در تیمارهای تنش آبیاری و محاسبه میزان آب در هر تیمار، روزانه رطوبت خاک در گلدان‌ها اندازه‌گیری و به محض رسیدن رطوبت گلدان به نقطه رطوبتی مورد نظر آبیاری گلدان‌ها انجام شد. اضافه کردن آب به گلدان‌ها در تیمارهای رطوبتی با استفاده از پیمانه‌های حجمی با توجه به میزان آب محاسبه شده برای هر تیمار و وزن کردن گلدان‌های اضافی برای هر تیمار در طول مرحله رشد انجام شد. طول دوره رشد گیاه از ابتدای انتقال نهال به گلدان‌ها تا مرحله برداشت گیاه ۵ ماه بود. گیاهان به مدت چهار ماه تحت تنش خشکی قرار داده شدند. نمونه اندام هوایی برای اندازه‌گیری میزان عناصر غذایی برداشت شد و پس از آسیاب کردن آن‌ها و انجام مرحله هضم تر در لوله‌های مخصوص با سولفوریک اسید، سالیسیک اسید، آب اکسیژنه، نیتروژن به روش تیتراسیون بعد از تقطیر با استفاده از دستگاه کجلدال (Gerhardt, Germany)، فسفر به روش فسفر در محلول به‌طریق رنگ‌سنجی (رنگ زرد آمونیم مولیبدات وانادات) با دستگاه اسپکتروفتومتر (3100, Tokyo, JapanUVShimadzu) در طول موج ۴۷۰ نانومتر، پتاسیم به روش شعله‌سنجی با دستگاه فلیم‌فتومتر (Jenway PFP7, Sherwood Scientific, Cambridge, United Kingdom)و عناصر غذایی آهن، روی، منگنز و مس با روش هضم خشک با کلریدریک اسید در حرارت ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با دستگاه جذب اتمی (PerkinElmer Analyst 400, Waltham, United States of America) اندازه‌گیری شد (Emami, 1996). داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS 9.3 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

تأثیر تیمارهای آزمایش بر میزان عناصر غذایی اندام هوایی

عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد اثر پایه، تنش خشکی و قارچ میکوریزا بر میزان این عناصر غذایی معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم به ترتیب به میزان ۳/۱، ۰/۲۶ و ۱/۵۳ درصد از پایه GF حاصل شد. در خصوص تیمارهای تنش خشکی با افزایش شدت تنش میزان عناصر غذایی نیتروژن و فسفر اندام هوایی روند کاهشی را نشان دادند.

حداکثر میزان نیتروژن و فسفر از تیمار I1 حاصل شد که در مقایسه با تیمار I4 به ترتیب افزایش ۱۰ و ۲۶ درصدی نشان داد. در خصوص پتاسیم با افزایش شدت تنش خشکی میزان این عنصر غذایی افزایش نشان داد. به گونه‌ای‌که حداکثر میزان پتاسیم اندام هوایی ازتیمار I4 حاصل شد که نسبت به تیمار I1 افزایش ۱۸

1- Time Domain Reflectometry (TDR)
2- Pressure plate

درصدی نشان داد (جدول ۳). صرف نظر از نوع پایه و سطح تنش کم‌آبی با مصرف قارچ‌های میکوریزی میزان این عنصرهای غذایی در اندام هوایی افزایش پیدا کرد (جدول ۳). از بین اثرات متقابل تیمارهای مورد بررسی اثر متقابل دو گانه پایه در تنش خشکی بر میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم، اثر متقابل پایه در قارچ میکوریز بر میزان نیتروژن و پتاسیم، اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز و اثر متقابل سه گانه پایه در تنش خشکی در قارچ میکوریز بر میزان نیتروژن و پتاسیم معنی‌دار شد (جدول ۲). در خصوص اثر متقابل معنی‌دار پایه در تنش خشکی حداکثر میزان نیتروژن و فسفر به‌ترتیب به میزان ۳/۱ و ۰/۲۷ درصد از تیمار I1+ GF حاصل شد که نسبت به تیمار حداقل (I4 + تلخ)، به‌ترتیب ۳۷ و ۵۰ درصد افزایش نشان داد. اما در خصوص پتاسیم حداکثر و حداقل میزان پتاسیم به‌ترتیب به میزان ۱/۷۵ و ۱/۱۲ درصد از تیمارهای I4+ GF و I1 + تلخ حاصل شد (جدول ۴).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای پایه، سطوح تنش آبی و قارچ میکوریزابر میزان عناصر غذایی اندام هوایی

Table 2- Anova table for the effects of rootstock, drought stress and mycorrhizae fungi on nutrient elements

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Degree of freedom	بور B	مس Cu	منگنز Mn	روی Zn	آهن Fe	پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن N
پایه(Rootstock)	3	1473**	410**	357*	628**	1113**	0.5**	0.01**	1.3**
آبیاری(Irrigation)	3	۱۰*	64^{ns}	66^{ns}	63**	56**	0.36**	0.009**	0.5**
میکوریزا(Mycorrhizae)	1	٤,٣ ^{ns}	520**	492*	900**	950**	0.26**	0.01**	0.3**
آبیاری×پایه(Rootstock × Irrigation)	3	٢٢,٥**	32.5^{ns}	64^{ns}	21*	32**	0.07**	0.0004**	0.3**
میکوریزا×پایه (Rootstock × Mycorrhizae)	3	18**	35**	191^{ns}	17.5^{ns}	21.6*	0.15**	0.0006^{ns}	0.1*
میکوریزا×آبیاری(Irrigation × Mycorrhizae)	3	42.8**	145^{ns}	352*	10.6^{ns}	25.3**	0.03*	.0003^{ns}0	0.09*
میکوریزا×آبیاری×پایه(Rootstock×Irrigation×Mycorrhizae)	9	26.3**	32^{ns}	57^{ns}	10^{ns}	22.3**	0.04*	0.0008^{ns}	0.09*
خطا (Error)	62	1.8	4.3	95	7.5	3.7	0.01	0.0001	0.02
کل (Total)	95								
ضریب تغییرات (C.V)		3.1	4.5	14	10	3	8.5	5.8	5.6

^{ns}و* و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد.

^{ns}, * and **: Non significant and significant $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$ respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات تأثیر پایه، سطوح تنش خشکی و قارچ میکوریزابر میزان عناصر غذایی

Table 3- Mean comparison of simple effects of rootstock, drought stress and mycorrhizae fungi on nutrient elements concentration

پایه Rootstock	بور (B)	مس (Cu)	منگنز (Mn)	روی (Zn)	آهن (Fe)	پتاسیم (K)	فسفر (P)	نیتروژن (N)
	میلی‌گرم بر کیلوگرم(mg kg^{-1})					درصد(%)		
GF	47.9^{a}	32.3^{a}	69.8^{a}	32^{a}	72^{a}	1.53^{a}	0.26^{a}	3.1^{a}
GN	31.9^{a}	29.7 ^{b}	69.5^{a}	31.8^{a}	71^{a}	1.5^{a}	0.23^{b}	3^{a}
Shorab2	47.5^{a}	23.2 ^{c}	63.4^{b}	24^{b}	60.3^{b}	1.3^{b}	0.2^{c}	2.74^{b}
Talkh	31.9^{b}	21.4 ^{c}	62.7^{b}	22.3^{b}	59.8^{b}	1.22^{c}	0.2^{c}	2.57^{c}
I_1	44.5^{a}	33.7^{a}	68.6^{a}	29.3^{a}	68.2^{a}	1.27^{b}	0.24^{a}	2.96^{a}
I_2	44^{ab}	31.8^{a}	66.2^{a}	28.5^{a}	66 ^{b}	1.29^{b}	0.23^{b}	2.91^{ab}
I_3	43.4^{bc}	28.4^{a}	65.8^{a}	26.3^{b}	65.2^{bc}	1.48^{a}	0.22^{c}	2.84^{b}
I_4	43^{c}	26.3^{a}	64.7^{a}	26^{b}	64.7^{c}	1.5^{a}	0.19^{d}	2.67^{c}
M_1	43.9^{a}	35.5^{a}	68.6^{a}	30.6^{a}	69.2^{a}	1.44^{a}	0.23^{a}	2.9 ^{a}
M_0	43.4^{a}	31.3^{b}	64.2 ^{b}	24.5^{b}	62.9^{b}	1.33^{b}	0.21^{b}	2.78 ^{b}

حروف مشابه در هر ستون و هر قسمت نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Means in an each column by a different letter are significantly different ($P \leq 0.05$) by Duncan's Multiple range test.

در خصوص اثر متقابل معنی‌دار رقم در قارچ میکوریز بر میزان نیتروژن و پتاسیم حداکثر میزان نیتروژن و پتاسیم به ترتیب به میزان ۳/۷ و ۱/۶۳ درصد از تیمارGF +M1 به بر میزان نیتروژن و پتاسیم حداکثر میزان نیتروژن و پتاسیم به‌ترتیب به میزان ۳/۷ و ۱/۶۳ درصد از تیمار GF +M1 به دست آمد (جدول ۵). در خصوص اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز، بیشترین میزان نیتروژن به میزان سه درصد از تیمار I1 + M1 که نسبت به تیمار حداقل (I4 + M0) افزایش ۱۸ درصدی را نشان داد، اما بیشترین میزان پتاسیم ازتیمار I4 +M1به میزان ۱/۵۷ درصد حاصل شد که نسبت به تیمار حداقل (I1+M0) با ۱/۲۴ درصد پتاسیم، ۲۶/۶ درصد افزایش نشان داد (جدول ۶).

در خصوص اثر متقابل سه‌گانه رقم در تنش خشکی در قارچ میکوریز حداکثر میزان نیتروژن به میزان ۳/۴۸ درصد از تیمار GF+I1+M1 و حداقل به میزان ۲/۰۲ درصد از تیمار I4+M0+ تلخ به دست آمد. همچنین حداکثر میزان پتاسیم به میزان ۱/۸ درصد از تیمارهای GN+I4+M1 و GF+I4+M1 و حداقل به میزان ۱/۱۹ درصد از تیمار I4 +M0 تلخ، حاصل شد (جدول ۷).

اغلب گزارش‌ها حاکی از آن است که همزیستی گیاهان با قارچ‌های میکوریزا در بیشتر موارد باعث افزایش جذب عناصر غذایی به‌خصوص عناصر غذایی با تحرک پائین در خاک مانند فسفر و روی توسط گیاه میزبان می‌گردد. میزان بیشتر فسفر در گیاهان تلقیح شده با میکوریزا تحت شرایط مدیریت آبیاری کامل و شرایط کم‌آبیاری در گیاهان مختلف گزارش‌شده است (Mohammadi and Rejali, 2021; Rejali, 2017;Kafkas and Ibrahim, 2009). یکی از مکانیسم‌های اصلی برای مقاومت به تنش آبی توسط قارچ‌های میکوریز بهبود جذب عناصر غذایی از قبیل فسفر می‌باشد. گیاهان میکوریزایی با مکانیسم‌های مختلفی از قبیل دسترسی به حجم بیشتری از خاک به‌واسطه تولید ریسه‌های برون ریشه‌ای توسط قارچ و افزایش طول ریشه گیاه، بالا بردن سرعت جذب فسفر توسط هیف قارچ، انتقال فسفر از فواصل دور از ریشه، افزایش ناحیه تخلیه فسفر، افزایش انحلال فسفر به‌واسطه رهاسازی اسیدهای آلی و آنزیم فسفاتاز و فیتاز و کاهش pH ریزوسفر به‌واسطه ترشح یونهای H^+ موجب افزایش جذب فسفر می‌گردند (Ortas *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2011; Smith and Read, 2010). هیف‌های قارچی در مقایسه با ریشه‌های گیاه به طور طبیعی عناصر غذایی را از فواصل دور دست مناطق تخلیه شده انتقال می‌دهند. این هیف‌ها توانایی نفوذ داخل حفرات خاک و تماس با ذرات خاک و جذب عناصر غذایی را دارند. همچنین ریشه‌های میکوریزایی شده موادی ترشح می‌کنند که فراهمی مواد غذایی برای جذب ریشه‌ای یا هیفی را افزایش می‌دهند (Wu *et al.*, 2011Marschner and Dell, 1994 ;). با توجه به متحرک بودن نیتروژن در خاک، جذب این عنصر نیاز به شبکه گسترده ریشه‌ای ندارد (Marschner and Dell, 1994). بررسی‌های مارشنر و دل (Marschner and Dell, 1994) نشان می‌دهد که گیاه میزبان می‌تواند تا ۲۵ درصد از نیاز نیتروژنی و روی و ۱۰ درصد از نیاز پتاسیمی خود را از طریق رابطه همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربسکولار تأمین نماید.

در این تحقیق در تیمارهای میکوریزی استفاده‌شده میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم اندام هوایی بیشتر است. بهبود مولفه‌های رشد در این مطالعه از قبیل طول و قطر ساقه، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، کلروفیل و کلونیزاسیون ریشه (Mishra *et al.*, 2010) منجر به افزایش رشد و جذب عناصر غذایی شد (اطلاعات آورده نشده است). افزایش جذب فسفر و نیتروژن به جذب پتاسیم نیز کمک می‌کند. با افزایش تنش خشکی میزان عناصر نیتروژن و فسفر کاهش ولی میزان پتاسیم افزایش نشان داد. این نتایج با نتایج تحقیقات حقیقت‌نیا و همکاران (Haghighatnia *et al.*,2012)، علی اصغرزاد و همکاران (Alisgharzade *et al.*, 2006)، ردریش و همکاران (Rudresh *et al.*, 2005) و میشرا و همکاران (Mishra *et al.*, 2010) مطابقت دارد.

در اثر تنش خشکی میزان جذب پتاسیم در گیاه افزایش می‌یابد و آن به دلیل تنظیم فشار اسمزی و نقش یون پتاسیم در کنترل روزنه است. در مواردی نیز مشاهده‌شده است که درصد پتاسیم در گیاهان تحت تنش کمتر بوده و دلیل آن می‌تواند کاهش قابلیت دسترسی این عنصر در شرایط کمبود رطوبت است. به این صورت که در اثر وجود آب زیادتر، یون‌های یک ظرفیتی مانند پتاسیم در محلول خاک به‌طور نسبی بیشتر از یون‌های دو ظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم افزایش می‌یابند.

با خشک شدن تدریجی خاک، کلوئیدهای رس با قدرت بیشتری یون پتاسیم تک ظرفیتی را به سطح خود جذب کرده و مانع از جدا شدن این یون می‌شود (Kafi, 2009). مکانیسم‌های جذب و انتقال عناصر غذایی در گیاهان، نظیر جریان توده‌ای، انتشار و یا جذب و انتقال بوسیله پدیده‌ی اسمز همگی،کم و بیش تابعی از مقدار رطوبت موجود در خاک و ریشه می‌باشد و در صورت کاهش رطوبت، رشد گیاه کاهش می‌یابد و شدت و مقدار جذب عناصر غذایی دستخوش تغییر و تحول می‌گردد (Marschner, 1995). با افزایش شدت کم آبی از جذب نیتروژن در اندام هوایی گیاه کاسته شده و مصرف قارچ میکوریزی باعث افزایش مولفه‌های رشدی گیاه (Mohammadi and Rejali, 2021) شده از این رو غلظت و جذب نیتروژن نسبت به گیاهان بدون مصرف قارچ میکوریزی، افزایش می‌یابد. تنش خشکی باعث افزایش مقاومت مکانیکی خاک شده و منجر به کاهش رشد ریشه می‌شود.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل معنی‌دار پایه در سطوح تنش کم آبی بر میزان عناصر غذایی

Table 4- Mean comparison of the significant interaction effect of rootstock and drought stress on nutrient elements concentration

پایه Rootstock	تنش Stress	بور (B)	روی (Zn)	آهن (Fe)	پتاسیم (K)	فسفر (P)	نیتروژن (N)
		میلی‌گرم در کیلوگرم ($mg\ Kg^{-1}$)			درصد (%)		
GF	I1	49.8^{a}	34.5^{a}	74.5^{a}	1.41^{cd}	0.28^{a}	3.34^{a}
	I2	46.7^{a}	32^{a}	72^{a}	1.47^{bc}	0.27^{ab}	2.68^{efg}
	I3	46.6^{a}	28.5^{b}	68.5^{b}	1.48^{bc}	0.26^{bc}	3.10^{abcd}
	I4	48.7^{a}	33^{a}	73^{a}	1.75^{a}	0.23^{ef}	3.18^{ab}
GN	I1	49^{a}	32.2^{a}	72.2^{a}	1.3^{cdefg}	0.25^{cd}	3.18^{ab}
	I2	46.4^{a}	34.2^{a}	74.2^{a}	1.34^{cdef}	0.24^{cde}	3.14^{abc}
	I3	46.2^{a}	33.1^{a}	73.1^{a}	1.64^{ab}	0.23^{ef}	2.84^{def}
	I4	47.9^{a}	2.2^{b}	68.2^{b}	1.68^{a}	0.19^{hi}	2.80^{ef}
Shorab2	I1	48.4^{a}	26.2^{bc}	64.2^{c}	1.15^{fg}	0.23^{de}	2.94^{bcde}
	I2	49.6^{a}	25.6^{bcd}	60.8^{cde}	1.22^{defg}	0.21^{fg}	2.88^{cdef}
	I3	46.1^{a}	21.6^{e}	58.2^{ef}	1.38^{cde}	0.19^{hi}	2.72^{ef}
	I4	46.1^{a}	22.3^{de}	58.3^{ef}	1.44^{bc}	0.18^{i}	2.43^{hi}
Talkh	I1	30.6^{c}	24.5^{ced}	62^{cd}	1.12^{efg}	0.22^{ef}	2.63^{fgh}
	I2	33.3^{bc}	22.3^{ed}	57.3^{f}	1.20^{g}	0.19^{hi}	2.92^{abc}
	I3	34.5^{b}	21.8^{e}	61^{cde}	1.32^{cd}	0.2^{i}	2.45^{cdef}
	I4	29.3^{c}	30.8^{e}	59.5^{def}	1.42^{g}	0.18^{i}	2.26^{i}

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Means in an each column by a different letter are significantly different ($P \leq 0.05$) by Duncan's Multiple range test.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل معنی‌دار پایه درقارچ میکوریزا بر میزان عناصر غذایی

Table 5- Mean comparison of the significant interaction effect of rootstock and Mycorrhizae fungi on nutrient elements concentration

پایه Rootstock	میکوریزا Mycorrhizae	بور (B)	مس (Cu)	آهن (Fe)	پتاسیم (K)	نیتروژن (N)
		میلی‌گرم در کیلوگرم ($mg\ Kg^{-1}$)			درصد (%)	
GF	M_1	48.5^{a}	36.3^{a}	76.4^{a}	1.63^{a}	3.13^{a}
	M_0	48.4^{b}	31.4^{c}	67.7^{d}	1.44^{b}	3.07^{ab}
GN	M_1	46.8^{e}	34.7^{b}	74.5^{b}	1.62^{a}	3.08^{ab}
	M_0	48^{c}	30.3^{d}	69.3^{c}	1.35^{bc}	2.85^{ab}
Shorab2	M_1	47.5^{d}	31.2^{c}	62.5^{f}	1.25^{cd}	2.75^{ab}
	M_0	46.6^{f}	28.6^{e}	58.2^{g}	1.24^{cd}	2.73^{bc}
Talkh	M_1	32.94^{g}	30.6^{c}	63.4^{e}	1.25^{cd}	2.66^{bc}
	M_0	30.95^{h}	27.5^{e}	56.5^{h}	1.2^{c}	2.48^{d}

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Means in an each column by a different letter are significantly different ($P \leq 0.05$) by Duncan's Multiple range test.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریزا بر میزان عناصر غذایی اندام هوایی

Table 6- Mean comparison of the significant interaction effect of drought stress and Mycorrhizae fungi on nutrient elements concentration

تنش Stress	میکوریزا Mycorrhizae	بور (B)	منگنز (Mn)	آهن (Fe)	پتاسیم (K)	نیتروژن (N)
		میلی‌گرم در کیلوگرم (mg Kg^{-1})			درصد(%)	
I1	M_1	44.1^{abc}	71^{a}	71.8^{a}	1.3^{cd}	3^{a}
	M_0	44.8^{ab}	70.2^{a}	64.6^{c}	1.24^{d}	2.92^{ab}
I2	M_1	46^{a}	70.9^{a}	97.8^{b}	1.40^{bc}	2.90^{ab}
	M_0	42^{c}	61.5^{bc}	64.5^{cd}	1.19^{d}	2.93^{ab}
I3	M_1	43.8^{abc}	65.5^{abc}	68.5^{b}	1.50^{ab}	2.94^{ab}
	M_0	42.9^{c}	66.2^{abc}	62d^{e}	1.47^{ab}	2.73^{bc}
I4	M_1	41.8^{c}	67.1^{ab}	68.7^{b}	1.57^{a}	2.78^{abc}
	M_0	44.2^{abc}	58.4^{c}	60.8^{e}	1.43^{abc}	2.55^{c}

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Means in an each column by a different letter are significantly different ($P \leq 0.05$) by Duncan's Multiple range test.

کاهش رشد ریشه موجب کاهش توانایی گیاه برای جذب عناصر غذایی می‌شود (Marschner and Dell, Marschner, 1995 ; 1994). قارچ‌های میکوریزی دارای توانایی تغییر در شکل و حجم ریشه می‌باشند. این تغییر شکل از جنبه تغییر در وضعیت تغذیه‌ای گیاه و تغییر در سطح ترکیبات هورمونی گیاه می‌باشد (Perez-Perez, 2007 ;Rejali, 2017). تغییر در تعداد انشعابات ریشه بادام همزیست با قارچ میکوریز عمدتاً به دلیل جذب عناصر غذایی است زیرا بادام دارای ریشه‌های ضخیم با انشعاب کم می‌باشد و ریشه‌های با انشعاب ریزتر که دارای توانایی جذب عناصر غذایی هستند در آن کمتر است (Ortas *et al*., 2015Calvert *et al*., 2004 ;). در شرایط تنش خشکی مولفه‌های رشدی، کلروفیل، وزن خشک ریشه و کلنیزاسیون (Mohammadi and Rejali, 2021) کاهش پیدا نمود. این کاهش منجر به کاهش رشد گیاه و متعاقب آن فتوسنتز و جذب آب و مواد غذایی کاهش می‌یابد. این موضوع در نتایج تحقیقات محققین مختلف گزارش شده است (Calvert *et al*., 2004; ، Wu an Zou, 2009; Xueming *et*Haghighatnia *et al*., 2012; *al*., 2007).

عناصر غذایی آهن، روی و منگنز

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد اثر پایه، تنش خشکی (به غیر از میزان منگنز) و قارچ میکوریزا بر میزان این عنصرهای غذایی معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین میزان آهن، روی و منگنز به ترتیب به میزان ۷۲، ۳۲ و ۶۹/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم از پایه GF حاصل شد که با پایه GN اختلاف معنی‌داری نداشت. علت افزایش بیشتر این عناصر غذایی در پایه‌های GF و GN می‌تواند مربوط به رشد و توسعه بیشتر ریشه‌های این دوپایه و دسترسی بیشتر به حجم و منافذ بیشتر خاک و جذب آب و مواد غذایی بیشتر باشد (Mishra *et al*., 2010 ; Rejali, 2017;Wu *et al*., 2011). در خصوص تیمارهای تنش خشکی با افزایش شدت تنش میزان آهن و روی اندام هوایی روند کاهشی را نشان دادند. بیشترین میزان آهن و روی از تیمار I1 حاصل شد که در مقایسه با تیمار I4 به ترتیب افزایش ۶ و ۱۲ درصدی نشان داد (جدول ۳). با توجه به معنی‌دار نشدن اثر تیمار آبیاری بر میزان منگنز اندام هوایی، اما بیشترین میزان منگنز از تیمار آبیاری I1 به میزان ۶۸/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم حاصل شد. با مصرف قارچ‌های میکوریز میزان این عناصر غذایی در اندام هوایی افزایش پیدا کرد. حداکثر میزان آهن، روی و منگنز به ترتیب به میزان ۶۹/۲، ۳۰/۶ و ۶۸/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم از مصرف قارچ‌های میکوریزی حاصل شد (جدول ۳). از بین اثرات متقابل تیمارهای مورد بررسی اثر متقابل دو گانه پایه در تنش خشکی بر میزان آهن و روی، اثر متقابل پایه در قارچ میکوریز بر میزان آهن، اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز بر میزان آهن و منگنز و اثر متقابل سه گانه پایه در تنش خشکی در قارچ میکوریز بر میزان آهن معنی‌دار شدند (جدول ۲).

در خصوص اثر متقابل پایه در تنش خشکی حداکثر میزان آهن و روی به ترتیب به میزان ۷۴/۵، ۳۴/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار I1+ GF حاصل شد که نسبت به تیمار حداقل (Talkh + I4)، ۲۵ و ۶۶ درصد افزایش نشان داد (جدول ۴).

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل معنی‌دار پایه در تنش در آبیاری بر میزان برخی از عناصر غذایی

Table 7- Mean comparison of the significant interaction effect of rootstock and drought stress on nutrient elements concentration

پایه Rootstock	تنش Stress	میکوریزا Mycorrhizae	بور (B)	آهن (Fe)	پتاسیم (K)	نیتروژن (N)
			میلی‌گرم در کیلوگرم ($mg\ Kg^{-1}$)		درصد (%)	
GF	I1	M_1	52^{a}	81 ^{a}	1.4 ^{efghij}	3.4 ^{a}
		M_0	51.2 ^{defghi}	68 ^{ghi}	1.43 ^{defghi}	3.15 ^{bdc}
	I2	M_1	46.6 ^{ghij}	74^{cd}	1.61^{abcde}	3.32 ^{ab}
		M_0	46.8 ^{fghij}	70 ^{fgh}	1.33^{fghijkl}	2.64 ^{ijk}
	I3	M_1	49.3 ^{bcdef}	72.3 ^{e}	1.65 ^{abcd}	3.20 ^{abcd}
		M_0	44 ^{kl}	64.7 ^{ijkl}	1.32^{fghijkl}	3.02^{bcdef}
	I4	M_1	45.8 ^{ijkl}	78 ^{ab}	1.81 ^{a}	3.06^{bcdef}
		M_0	51.6 ^{ab}	68 ^{ghi}	1.70 ^{abc}	2.73^{fghijk}
GN	I1	M_1	45.9 ^{Jhijkl}	73.6 ^{cde}	1.47 ^{defgh}	3.30 ^{ab}
		M_0	48.3^{defghi}	70.6 ^{defg}	1.13 ^{lm}	3.06 ^{bcde}
	I2	M_1	48.9^{cdefg}	77.7 ^{b}	1.53 ^{bcdefg}	3.23 ^{abc}
		M_0	43.8 ^{fghij}	70.7 ^{defg}	1.16 ^{klm}	3.05 ^{bcdef}
	I3	M_1	46.4^{ghijk}	76 ^{bc}	1.73 ^{ab}	3.03^{bcdef}
		M_0	46 ^{hijkl}	70.3 ^{efg}	1.55 ^{bcdefg}	2.66^{jhik}
	I4	M_1	45.7 ^{ijkl}	70.7 ^{defg}	1.80 ^{a}	2.97^{cdefgh}
		M_0	50 ^{abcde}	65.7^{ijk}	1.56 ^{bcdef}	2.63^{Ijk}
Shorab2	I1	M_1	48.9 ^{cdefg}	66.6 ^{jhi}	1.12 ^{lm}	3 ^{bcdefg}
		M_0	47.8^{efghi}	61.6 ^{lmn}	1.19 ^{jklm}	2.89 ^{defghi}
	I2	M_1	50.8 ^{abcd}	58.4 ^{nop}	1.28 ^{hijklm}	3.14 ^{bcd}
		M_0	48.5^{defgh}	63.4 ^{jklm}	1.16 ^{kjm}	2.62 ^{ijk}
	I3	M_1	47 ^{fghij}	62 ^{nop}	1.12 ^{lm}	2.78 ^{efghij}
		M_0	45.2 ^{jkl}	54.3 ^{q}	1.64 ^{abcd}	2.66 ^{hijk}
	I4	M_1	47 ^{fhghi}	63.3 ^{jklm}	1.50 ^{cdefgh}	2.62 ^{ijk}
		M_0	45.1 ^{jkl}	53.3 ^{q}	1.40 ^{efghij}	2.24 ^{lm}
Talkh	I1	M_1	33.1 ^{n}	66 ^{ijk}	1.22 ^{ijklm}	2.68 ^{ghijk}
		M_0	28.3 ^{o}	58 ^{op}	1.19 ^{jklm}	2.60 ^{ijk}
	I2	M_1	37.5 ^{m}	61 ^{mno}	l1.13^{m}	2.96 ^{cdefgh}
		M_0	29 ^{o}	53.6 ^{def}	1.12 ^{lm}	2.90 ^{defghi}
	I3	M_1	32.4 ^{n}	63.6 ^{jklm}	1.46^{defgh}	2.50 ^{jkl}
		M_0	36.7 ^{m}	58.3 ^{nop}	1.40 ^{efghij}	2.42 ^{lm}
	I4	M_1	29.8 ^{o}	63 ^{klm}	1.18 ^{jklm}	2.50^{jkl}
		M_0	28.7 ^{o}	56 ^{q}	1.10 ^{m}	2.02 ^{m}

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Means in an each column by a different letter are significantly different ($P \leq 0.05$) by Duncan's Multiple range test.

در خصوص اثر متقابل معنی‌دار پایه در قارچ میکوریز حداکثر میزان آهن به‌میزان ۷۶/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار GF + M1 به دست آمد (جدول ۵). در خصوص اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز، بیشترین میزان آهن و منگنز به میزان ۷۱/۸ و ۷۱ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار I1 + M1 و حداقل از تیمار I4 + M0 به دست آمد (جدول ۶). در خصوص اثر متقابل سه‌گانه پایه در تنش خشکی در قارچ میکوریز حداکثر میزان آهن به میزان ۸۱ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار GN+I1+M1 و حداقل به ترتیب به میزان ۵۶ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار I4 + M0 تلخ، به دست آمد (جدول ۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد که همزیستی میکوریزی دارای اثرهای متفاوتی در

جذب عناصر کم مصرف در گیاه میزبان دارد. از این رو نوع گیاه میزبان و ویژگی‌های ژنتیکی آن باعث جذب متغیر عناصر کم مصرف در گیاهان مختلف می‌شود. به‌عنوان مثال همزیستی میکوریزی در جذب آهن تحت تأثیر نوع گیاه میزبان، نوع گونه قارچ میکوریزی، pH خاک، درجه حرارت و میزان فسفر اضافه شده به خاک قرار می‌گیرد (Marschner, Balakrishnan and Subramanian, 2012 ; 1995; Rejali, 2017; Subramanian et al., 2011). در خصوص منگنز دسترسی گیاهان به این عنصر تحت کنترل واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء در خاک می‌باشد که در این میان نقش ترشحات ریشه و فعالیت ریز جانداران به خوبی مشخص نشده است. گیاهان میکوریزی معمولاً توانایی کمتری برای جذب منگنز نسبت به گیاهان غیر میکوریزی دارند (Rejali, 2017). اگر چه در مواردی افزایش جذب منگنز در گیاهان میزبان قارچ‌های میکوریز آربسکولار نیز دیده شده است (Zarei *et al.*, 2013Xueming *et al.*, 2007 ;). با این وجود افزایش جذب منگنز در برخی از گیاهان دارای همزیستی با قارچ‌های میکوریزی مشاهده شده است (Xueming *et al.*, 2007 ; Zarei *et al.*, 2013). علت افزایش میزان جذب عناصر کم‌مصرف می‌تواند ناشی از گسترش ریشه و دسترسی به حجم خاک بیشتر، افزایش سطح جذب ریشه‌ای، انتقال توسط هیف قارچی پتانسیل ریدکس پایین‌تر در ریزوسفر، افزایش ترشحات کلات کننده و کاهش بیشتر pH در ریزوسفر گیاهان همزیست با قارچ میکوریزا نسبت به گیاهان بدون قارچ می‌باشد (Subramanian *et al.*, 2011 ; Balakrishnan and Subramanian, 2012;Vafadar Et al., 2014). یکی دیگر از عوامل افزایش‌دهنده فراهمی عناصر غذایی ریزمغذی توسط همزیستی میکوریزی بخصوص در خاک‌های آهکی، تولید و ترشح موجنئیک اسید می‌باشد (Balakrishnan and Subramanian, 2012;). سابرامانیان و همکاران (Subramanian *et al.*, 2011) جذب بیشتر روی در گیاهان میکوریزی را به فعالیت بالای آنزیم‌های کربنیک انهیدراتاز و سوپراکسید دیسموتاز نسبت دادند. لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2000) گزارش نمودند گیاهان همزیست با قارچ‌های میکوریزی عناصر غذایی فلزی بیشتری را از طریق هیف‌های خارجی خود جذب می‌کنند که این امر به علت افزایش سطح تماس بیشتر نسبت به ریشه‌های گیاه و کاهش فاصلهٔ انتشار یون‌های فلزی نظیر روی، منگنز و مس تا محل جذب می‌باشد. افزایش جذب عناصر غذایی کم مصرف در این تحقیق با نتایج تحقیقات آقابابائی و همکاران (Aghababaei *et al.*, 2011)، زارعی و همکاران (Zarei *et al.*, 2013)، وفادار و همکاران (Vafadar *et al.*, 2014)، وو و همکاران (Wu *et al.*, 2011)، بالاکریشنان و سابرامانیان (Balakrishnan and Subramanian, 2012) و مادر و همکاران (Mader *et al.*, 2011) مطابقت دارد. با افزاش تنش خشکی میزان این عناصر کاهش یافت. تیمارهای بدون تنش خشکی دارای میزان بیشتر عناصر غذایی مطالعه شده بودند. در واقع کم آبی باعث کاهش تعداد انشعابات ریشه و تغییر و آسیب به شکل ریشه شده که نتیجه آن کاهش جذب عناصر غذایی توسط ریشه می‌باشد.

عناصر غذایی مس و بور

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد اثر پایه، تنش خشکی (به غیر از میزان مس) و قارچ میکوریزا (به غیر از میزان بور) بر میزان این عنصرهای غذایی معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین میزان مس و بور از پایه GF حاصل شد. با افزایش شدت تنش خشکی روند کاهشی عناصر مس و بور مشاهده شد. بیشترین میزان این دو عنصر غذایی از تیمار I1 حاصل شد (جدول ۳). مصرف قارچ‌های میکوریزی باعث افزایش معنی‌دار میزان مس اندام هوایی شد. حداکثر میزان مس به میزان ۴۳/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم حاصل شد که نسبت به تیمار عدم مصرف ۱۳/۵ درصد افزایش نشان داد (جدول ۳). از بین اثرات متقابل تیمارهای مورد بررسی اثر متقابل دو گانه پایه در تنش خشکی بر میزان بور، اثر متقابل پایه در قارچ میکوریز بر میزان مس و بور، اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز بر میزان بور و اثر متقابل سه گانه پایه در تنش خشکی در قارچ میکوریز بر میزان بور معنی‌دار شدند (جدول ۲). در خصوص اثر متقابل پایه در تنش خشکی حداکثر میزان بور به مقدار ۴۹/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار GF+ I1 حاصل شد که نسبت به تیمار حداقل (Talkh + I4)، ۱۷ درصد افزایش نشان داد (جدول۴). در خصوص اثر متقابل معنی‌دار پایه در قارچ میکوریز حداکثر میزان مس و بور به‌میزان ۳۶/۳ و ۴۸/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار GF + M1 به دست آمد (جدول ۵). در خصوص اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز، بیشترین میزان بور به میزان ۴۴/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار I1 + M1 و حداقل از تیمار I4 + M0 به دست آمد (جدول ۶). در خصوص اثر متقابل سه‌گانه پایه در تنش خشکی در قارچ میکوریز حداکثر میزان بور به میزان ۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار GN+I1+M1 به دست آمد (جدول ۷). تنش رطوبتی اغلب جذب عناصر غذایی توسط گیاه را محدود می‌سازد. جذب مواد غذایی به وسیله گیاهان تحت شرایط کمبود آب، به دلیل کاهش کارآیی سیستم ریشه‌ای ناشی از کاهش تعداد انشعابات ریشه، آسیب به ریشه، کاهش تعرق، اختلال در سیستم انتقال فعال و نفوذپذیری غشاء و در نتیجه کاهش نیروی جذب کنندگی ریشه، کاهش می‌یابد (Kafi *et al.*, 2009). بررسی‌های لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2000) نشان داد گیاهان همزیست با قارچ‌های میکوریزی عناصر غذایی فلزی بیشتری را از طریق هیف‌های خارجی خود جذب می‌کنند که این امر به علت افزایش سطح تماس بیشتر نسبت به ریشه‌های گیاه و کاهش فاصلهٔ انتشار یون‌های فلزی نظیر

منگنز و مس تا محل جذب می‌باشد. میزان مس موجود در محلول خاک مانند عنصر روی، بسیار اندک بوده و از طرف دیگر ضریب پخش شدن این عنصر در خاک نیز بسیار کم می‌باشد. این دو عامل باعث شده تا در گیاهان میکوریزی میزان مس جذب شده بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزی باشد. میزان جذب مس در گیاه تا حدودی وابسته به میزان فسفر موجود در گیاه می‌باشد. با افزایش میزان فسفر در گیاه مقدار مس بیشتری به سمت اندام هوایی حرکت کرده و غلظت فسفر و مس در اندام هوایی افزایش می‌یابد (Rejali, 2017; Smith and Marschner and Dell, 1994 ; Read, 2010). قارچ‌های میکوریزی در همزیستی با گیاهان و از طریق فعالیت فسفاتازی خود می‌توانند ترکیبات آلی فسفره را هیدرولیز کرده و بدین صورت جذب هم زمان فسفر و مس را در گیاه افزایش دهند. لیو و همکاران (Liu *et al*., 2000) گزارش نمودند با حضور قارچ میکوریزآربوسکولار، جذب روی، مس، منگنز و آهن بوسیله ذرت در سطوح فسفر و عناصر غذایی ریزمغذی تحت تأثیر قرار گرفته است به‌طوری‌که غلظت منگنز با کاربرد قارچ میکوریزی کاهش پیدا می‌کند. اما امیر آبادی و همکاران (Amirabadi *et al*., 2009) و مادر و همکاران (Mader *et al*., 2011) افزایش جذب منگنز را در اثر استفاده ترکیبی گونه‌های مایکوریزا گزارش نمودند. اثر قارچ‌های میکوریزی بیانگر پتانسیل قارچ بر رشد پایه‌ها است (Al-Karaki and Al-Raddad, 1997). قارچ‌های میکوریزی با داشتن هیف‌هایی با قطر کوچکتر از ریشه وارد منافذ ریز خاک شده و رطوبت و عناصر غذایی را جذب می‌کنند (Smith and Read, 2010). تغییری که در شکل و حجم ریشه در اثر مصرف قارچ‌های میکوریزی ایجاد می‌شود از دو جنبه تغییر در وظیفت تغذیه‌ای گیاه و تغییر در سطح ترکیبات هورمونی گیاه است. تغییر در تعداد انشعابات ریشه در اثر همزیستی قارچ میکوریزی بیشتر به علت افزایش جذب عناصر غذایی و تغییر در میزان هورمون‌های گیاهی از قبیل اکسین می‌باشد (Perez-Perez, 2007).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش تنش خشکی میزان عناصر غذایی به غیر از میزان پتاسیم موجود در اندام هوایی روند کاهشی داشتند. تأثیرپذیری پایه GF نسبت به تلقیح قارچ‌های میکوریزی به دلیل برقراری همزیستی بیشتر با قارچ‌های میکوریزی و پتانسیل گسترش و سرعت ریشه بالاتر، بیشتر بود. عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در پایه‌های تلقیح شده بیشتر از پایه‌های بدون تلقیح بود. در شرایط تنش خشکی میزان عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در پایه‌های تلقیح شده بیشتر بود. همزیستی میکوریزی می‌تواند از طریق افزایش مولفه‌های رشدی، کلروفیل و کلنیزاسیون ریشه و با مکانیسم‌هایی از قبیل افزایش مؤثر سطح جذب ریشه، طول ریشه، تعداد ریشه‌های جانبی، تولید پروتون، ترشح اسیدهای آلی، سیدروفورها، ترکیبات کلات‌کننده، فسفاتاز اسیدی منجر به افزایش جذب عناصر غذایی شود. همزیستی میکوریزی ایجاد شده باعث افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود مقاومت پایه‌های بادام به تنش خشکی شد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت و کمک مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فن‌آوران کشور با کد ۹۴۰۰۳۱۳۹ انجام شده است که بدین‌وسیله از همکاری صندوق تشکر به‌عمل می‌آید.

منابع

1. Aghababaei F., Reisi F., and Nadian H.A. 2011. Influence of mycorrhizal symbiosis on the uptake of nutrients in some commercial genotypes of Almond in a sandy loam soil. Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences) 25(20): 138-147. (In Persian with English abstract)
2. Aliasgharzad N., Neyshabouri M.R., and Salimi G.H. 2006. Effects of *arbuscular mycorrhizal* fungi and *Bradyrhizobium japonicum* on drought stress of soybean. Biologia, Bratislava 19: 324-328. DOI: 10.2478/s11756-006-0182-x.
3. AL-Karaki G.N., and Al-Raddad A. 1997. Effects of arbuscularmycorrhizal fungi and drought stress on growth and nutrient uptake of two wheat genotypes differing in drought resistance. Journal of Mycorrhiza 7: 83–88. DOI: 10.1007/s005720050166.
4. Amirabadi M., Rejali F., Ardakani M., and Borji M. 2009.The effect of using Azetobacter inoculant and mycorrhizae fungi on uptake of some mineral nutrients in different levels of phosphorus in corn (*Zea mays* var 704). Journal of Soil Research 23(1): 107-115. (In Persian with English abstract)
5. Artusson V., Finlay R.D., and Jansson J.K. 2006. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria and their potential for stimulating plant growth. Journal of Environment Microbiology 8: 1–10. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2005.00942.x.
6. Balakrishnan N., and Subramanian K. 2012. Mycorrhizal symbiosis and bioavailability of micronutrients in maize grain. Mydica Journal 57: 129-138.
7. Brundrett M., Bougher N., Dell B., Grove T., and Malajczuk N. 1996. Working withmycorrhizas in forestry and

agriculture. Australian Centre for International AgriculturalResearch, Canberra. Pp 374
8. Calvet C., Estan V., Camprub A., Hernandez-Dorrego A., Pinochet J., and Moreno M.A. 2004. Aptitude for mycorrhizal root colonization in Prunus rootstocks. Scientia Horticulturae 100: 39–49. DOI 10.1016/j.scienta.2003.08.001.
9. Chen X., Chunhua W.U., Jianjun T. and Shuijin H. 2005. Arbuscular mycorrhiza enhances metal lead uptake and growth of host plant under a sand culture experiment. Chemospher 60: 665-671. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.01.029.
10. Emami A. 1996. Plant analysis methods. Soil and water research Institute. First Volume Technical Bulletin No.982. (In Persian)
11. 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. Seed and Plant Production Journal 2(28): 403-417. (In Persian with English abstract)
12. Kafi M., Borzoei M., Salehi M., Kamandi A., Masomi A., and Nabati J. 2009. Physiology of environmental stresses in plants. Mashhad Jihad University Press, Mashhad 502 page. (In Persian)
13. Kafkas S., and Ibrahim O. 2009. Various mycorrhizal fungi enhance dry weights, P and Zn uptake of four Pistacia species. Plant Nutrition 32: 146-159. DOI: 10.1080/01904160802609005.
14. Liu A., Hamel C., Hamilton R.I., Ma B.L., and Smith D.L. 2000. Acquisition of Cu, Zn, Mn, and Fe by mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) grown in soil at different P and micronutrient levels. Mycorrhiza Journal 9: 331–336. DOI: 10.1007/s005720050277.
15. Mader P., Kaiser F., Adholeya A., Singh R., Uppal H.S., Sharma A. K., Srivastava R., Sahai V., Aragno M., Wiemken A., Johri B.N., and Fried P.M. 2011. Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat rice and wheat black gram rotations in India. Journal of Soil Biology and Biochemistry 43: 609-619. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.11.031.
16. Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plant. Second Ed., Academic Press. Harcourt Brace Company, Pub. Co. New York. 890 Pages.
17. Marschner H., and Dell B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. Plant and Soil 159: 89–102. DOI: 10.1007/bf00000098.
18. Mishra A., Prasad K., and Geeta R. 2010. Effect of biofertilizer inoculation on growth yield of dwarf field Pea (*Pisumsativum* L.) in conjuncton with different doses of chemical fertilizers. Agronomy Journal 9: 163-168. DOI: 10.3923/ja.2010.163.168.
19. Mohammadi M., and Rejali F. 2021.Effect of mychorhizal symbiosis on growth properties and colonization of common Almond rootstockt water deficit conditions. Journal of Soil Biology 9(1): 14-29. DOI: 10.22092/sbj.2020.343209.197.
20. Ortas I., Akpinar C., and Demirbas A. 2015. Effect of mycorrhizal species on growth and nutrient uptake byseedlingss of citrus (*Citrus sinensis*) under three soil growth conditions. Current Horticulture 3(2): 61–64.
21. Perez-Perez, J. M., 2007. Hormone signaling and root development: an update on the latestArabidopsis thaliana research. Funct. Plant Biolology 34: 163–171. DOI: 10.1071/fp06341.
22. Razouk R., and Kajji A. 2015. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on water relationsand growth of young *Plum* trees under severe water stress conditions. Plant Soil Science 5: 300-312. DOI: 10.9734/ijpss/2015/15408.
23. Rejali F. 2017. Familiarity with mycorrhizal fungi and their application in different ecosystems**.** Agricultural Research, Education and Extension Organization, Deputy for Extension, Agricultural Education Publication. 154 pages. (In Persian with English abstract)
24. Rudresh D.L., Shivaprakash M.K., and Prasad R.D. 2005. Effect of combined application of Rhizobium, phosphate solubilizing bacterium and *Trichoderma* spp. On growth, nutrient uptake and yield of chickpea (*Cicer aritenium* L.). Applied Soil Ecology 28: 139-146. DOI: 10.1016/j.apsoil.2004.07.005.
25. Smith S.E., Facelli E., Pope S., and Smith F.A. 2010. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. Journal of Plant and Soil 326: 3–20. DOI: 10.1007/s11104-009-9981-5.
26. Smith S.E., and Read D.J. 2010. Mycorrhizal Symbiosis (San Diego, CA, USA: Academic Press).
27. Subramanian K.S., Tenshia J.V., Jayalakshmi K., and Ramachandran V. 2011. Antioxidant enzyme activities in arbuscular mycorrhizal (*Glomus intraradices*) fungusinoculated and non-inoculated maize plants under zinc deficiency. Ind. Journal Microbiology 51(1): 37-43. DOI: 10.1007/s12088-011-0078-5.
28. Tehranifar A., Kafi M., and Adli M. 2004. Almond cultivation Mashhad Jihad University Press, Mashhad 31 page. (In Persian)
29. Vafadar F., Amooaghaie R., and Otroshy M. 2014. Effects of plant-growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungus on plant growth, stevioside, NPK andchlorophyll content of Stevia rebaudiana. Journal Plant Interaction 9(1): 128-136. DOI: 10.1080/17429145.2013.779035.
30. Wu Q.S., Li G.H., and Zou Y.N. 2011. Roles of Arbuscular mycorrhizal fungi ongrowth and nutrient acquisition

of peach (*Prunus persica* L.) seedlings. Animal Plant Science 4: 746-750. DOI: 10.15835/nbha3926232.
31. Wu Q.S., and Zou Y.N. 2009. Mycorrhiza has a direct effect on reactive oxygen metabolism of drought-stressed citrus, Plant Soil Environment 55(10): 436–442. DOI: 10.17221/61/2009-pse.
32. Xueming Z., Pei Q., Shuwen W., Fugeng Z., Guang W., and Daoliang Y. 2007. Effectof arbuscular mycorrhizal fungi on the rooting and growth of beach plum (*Prunus maritime*) cutting. Journal Horticulture Science Biotechnology 82: 863-866. DOI: 10.1080/14620316.2007.11512319.
33. Zarei M., Paymaneh Z., Ronaghi A., Kamgar Haghighi A.A., and Shahsavar A. 2013. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungus on growth and Physiological parameters of rough Lemon rootstock under drought stress conditions. Journal of Water and Soil 27(3): 485-494. (In Persian with English abstract)