Research Paper

Improving Growth, Phosphorus Nutrition, and Biomass Production in *Thymus vulgaris* and *Zataria Multiflora* by Mycorrhizal Inoculation under Drought Stress Conditions

Sakineh Sheikhpoor[1], Enayatollah Tohidi-Nejad[2*], Jalal Ghanbari[3,4]

[1] MSc Student in Agronomy- Crop Ecology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
[2] Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
[3] Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
[4] Seed and Plant Certification and Registration Institute (SPCRI), Agricultural Research, Education & Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran.

10.22125/IWE.2023.405514.1730

Received:
July 4, 2023
Accepted:
November 9, 2023
Available online:
May 5, 2024

Keywords:
Limited irrigation, mycorrhizal inoculation, phosphorus uptake, water use efficiency.

Abstract

The response of *Thymus vulgaris* and *Zataria multiflora* to mycorrhiza fungus inoculation (inoculation and non-inoculation with *Funneliformis mosseae*) at different irrigation levels (irrigation 100% of field capacity (100% FC, control or no stress); 75% FC (moderate stress); and 50% FC (severe stress); was investigated in greenhouse conditions. The results showed that inoculation with mycorrhiza led to improvement of root volume by 100%, root dry weight by 159%, shoot fresh and dry weight by 77% and 96%, and water use efficiency by 98% under 100% FC and in some cases under 75% FC. The results of evaluating the mycorrhizal inoculation effect in different irrigation conditions, also showed that the effectiveness of mycorrhizal inoculation decreased dramatically with increase in stress intensity. Phosphorus (P) content of the shoot of *T. vulgaris* and *Z. multiflora* decreased with drought stress application. In addition, mycorrhizae inoculation increased root P content by 14% in *T. vulgaris*. In *Z. multiflora*, inoculation with mycorrhizal improved P content by 63% compared with non-inoculation under severe stress. While in *T. vulgaris*, root P uptake was improved (170%) by mycorrhizal inoculation under normal and mild stress conditions, mycorrhizal inoculation did not show the efficiency to improve P uptake under severe stress condition. Meanwhile, in *Z. multiflora*, P uptake was improved by 75% and 215%, respectively in mycorrhizal inoculation under 75% and 50% FC. This can be one of the most important reasons for reducing the shoot to root ratio by mycorrhizal inoculation under severe stress conditions.

[*] **Corresponding Author:** Enayatollah Tohidi-Nejad
Address: Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
Email: e_tohidi@uk.ac.ir
Tel: +989131968732

1. Introduction

Thymus vulgaris (noun as thyme) and Zataria multiflora (noun as Avishan-e-Shirazi), members of the Lamiaceae family, are valuable medicinal plants with unique medicinal properties (Tohidi et al., 2019; Sajed et al., 2013).

Drought stress is a major abiotic stress that causes a significant decline in the plants' growth and yield (Bardi and Malusà, 2012). Root microbial symbionts including arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), protect host plants from inhibitory and destructive effects of environmental stresses including drought, by improving plant resistance by different mechanisms (Arpanahi and Feizian, 2019; Amani Machiani et al., 2021; Ahanger et al., 2014).

The main objective of this work was to evaluate the effect of mycorrhizal inoculation under different levels of drought stress on the growth, phosphorous nutrition, and biomass production of Thymus vulgaris and Zataria multiflora.

2. Materials and Methods

In order to investigate the effect of mycorrhizae on the response of Thymus vulgaris and Zataria multiflora to drought stress, a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design in greenhouse conditions during the 2022 year. Response of thyme plants to mycorrhiza fungus inoculation (inoculation and non-inoculation with Funneliformis mosseae) at different irrigation levels (irrigation 100% of field capacity (100% FC, control or no stress); 75% FC (moderate stress); and 50% FC (severe stress); was investigated.

The plants of each pot were completely harvested and different root and shoot parameters including root volume, root dry weight, plant height, shoot fresh and dry weight, shoot to root ratio, and root and shoot phosphorus (P) content, P uptake, and P use efficiency and biomass production, and water use efficiency were examined at the end of the experiment.

3. Results

The results showed that in most parameters measured in two types of thyme, inoculation with mycorrhiza only under 100% FC and in some cases under 75% FC led to improvement of root volume, root dry weight, shoot fresh and dry weight, and water use efficiency while, in severe drought stress (50% FC), mycorrhiza inoculation showed no significant effect on the mentioned traits compared to non-inoculation. The results of evaluating the mycorrhizal inoculation effect in different irrigation conditions, also showed that the effectiveness of mycorrhizal inoculation decreased dramatically with increase in stress intensity. The shoot to root ratio under normal conditions was not affected by mycorrhiza inoculation, which shows that the plant showed a balanced distribution of photosynthetic products between root and shoot under this condition. But under severe stress condition, mycorrhiza inoculation reduced the shoot to root ratio compared with no inoculation. This shows that symbiosis with mycorrhiza has a greater effect on increasing the root to shoot ratio under severe drought stress conditions. Phosphorus (P) content of the shoot of T. vulgaris and Z. multiflora decreased with drought stress application. In addition, mycorrhizae inoculation increased root P content in T. vulgaris. In Z. multiflora, drought stress reduced the root P content in non-inoculated plants while P content was improved significantly under severe stress and mycorrhizal inoculation. Shoot P uptake showed a similar pattern to biomass production. Root P uptake showed a different pattern in T. vulgaris and Z. multiflora. While in T. vulgaris, P uptake was improved by mycorrhizal inoculation under normal and mild stress conditions, mycorrhizal inoculation did not showed the efficiency to improve P uptake under severe stress condition. Meanwhile, in Z. multiflora, P uptake was improved by mycorrhizal inoculation under 75 and 50% FC. This can be one of the most important reasons for reducing the shoot to root ratio by mycorrhizal inoculation under severe stress conditions.

4. Discussion and Conclusion

The results showed that the studied plants, to some extent, showed different responses to the investigated treatments in different measured characteristics, which was due to their different morphological characteristics.

In addition, inoculation with mycorrhiza in mild stress conditions showed a significant increase in measured traits in many cases, and in some traits, it did not show a significant difference compared with normal irrigation and no inoculation. On the other hand, these results show that studied species are largely resistant to low irrigation conditions and can produce a significant yield in such conditions, showing the significant potential of mycorrhiza fungus in improving yield in limited irrigation conditions that can be used to improve the productivity of the studied plants.

5. Six important references

1) Ahanger, M.A., A. Hashem, E.F. Abd-Allah and P.Ahmad. 2014. Arbuscular Mycorrhiza in Crop Improvement under Environmental Stress. In P. Ahmad and S. Rasool (Eds.), Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance (pp. 69–95). San Diego: Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800875-1.00003-X

2) Amani Machiani, M., A. Javanmard, M.R. Morshedloo, A. Aghaee and F. Maggi. 2021. Funneliformis mosseae inoculation under water deficit stress improves the yield and phytochemical characteristics of thyme in intercropping with soybean. Scientific Reports, 11(1): 15279. https://doi.org/10.1038/s41598-021-94681-9

3) Arpanahi, A.A. and M. Feizian. 2019. Arbuscular mycorrhizae alleviate mild to moderate water stress and improve essential oil yield in thyme. Rhizosphere, 9: 93–96. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2018.10.003

4) Bardi, L. and E. Malusà. 2012. Drought and nutritional stresses in plant: alleviating role of rhizospheric microorganisms. In Abiotic stress: New research (pp. 1–57). Nova Science Publishers Inc, Hauppauge.

5) Sajed, H., A. Sahebkar and M. Iranshahi. 2013. Zataria multiflora Boiss. (Shirazi thyme)—An ancient condiment with modern pharmaceutical uses. Journal of Ethnopharmacology, 145(3): 686–698. https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.12.018

6) Tohidi, B., M. Rahimmalek and H. Trindade. 2019. Review on essential oil, extracts composition, molecular and phytochemical properties of Thymus species in Iran. Industrial Crops and Products, 134: 89–99. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.038.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

بررسی اثر میکوریزا بر رشد، تغذیه فسفر و تولید زیست‌توده در آویشن باغی و آویشن شیرازی در شرایط تنش خشکی

سکینه شیخ پور[۱]، عنایت الله توحیدی نژاد[۲] و جلال قنبری[۳،۴]

تاریخ ارسال:۱۴۰۲/۰۴/۱۳
تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۰۸/۱۸

مقاله پژوهشی

چکیده

پاسخ گیاهان آویشن باغی و شیرازی به تلقیح با قارچ میکوریزا (تلقیح و عدم تلقیح با *Funneliformis mosseae*) در سطوح آبیاری مختلف (آبیاری ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی (نرمال بدون تنش)؛ آبیاری ۷۵٪ ظرفیت زراعی (تنش متوسط)؛ آبیاری ٪۵۰ ظرفیت زراعی (تنش شدید)؛ در شرایط گلخانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تلقیح با میکوریزا منجر به بهبود ۱۰۰ درصدی حجم ریشه، ۱۵۹ درصدی وزن خشک ریشه، ۷۷ و ۹۶ درصدی وزن تر و خشک اندام هوایی و ۹۸ درصدی کارایی مصرف آب در شرایط نرمال آبیاری و در برخی موارد در شرایط تنش ملایم شد. نتایج حاصل از ارزیابی کارایی تلقیح میکوریزا در شرایط آبیاری مختلف نیز نشان داد که اثربخشی تلقیح میکوریزا با افزایش شدت تنش به طور چشم‌گیری کاهش یافت. محتوای فسفر اندام هوایی آویشن باغی و شیرازی با اعمال تنش خشکی کاهش یافت. علاوه براین، تلقیح با میکوریزا محتوای فسفر ریشه را ۱۴ درصد در آویشن باغی افزایش داد. در آویشن شیرازی، درصد فسفر در شرایط تنش شدید و تلقیح با میکوریزا ۶۳ درصد نسبت به عدم تلقیح افزایش یافت. در حالی که در آویشن باغی جذب فسفر ریشه ۱۷۰ درصد در شرایط نرمال و تنش ملایم توسط تلقیح میکوریزایی بهبود یافت، در شرایط تنش شدید، تلقیح با میکوریزا کارایی لازم را جهت بهبود جذب فسفر نداشت. این در حالی بود که در آویشن شیرازی، در شرایط اعمال ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، به‌ترتیب جذب فسفر ۷۵ و ۲۱۵ درصد توسط تلقیح میکوریزا بهبود یافت. همین عامل می‌تواند یکی از دلایل مهم در کاهش نسبت اندام هوایی به ریشه توسط تلقیح میکوریزایی در شرایط تنش شدید باشد.

واژه‌های کلیدی: تلقیح میکوریزایی، جذب فسفر، کارایی مصرف آب، کم‌آبیاری.

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. ۰۹۱۳۳۸۷۷۵۳۵، s.sheikhpoor216@gmail.com

[۲] دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. ۰۹۱۳۱۹۶۸۷۳۲؛ e_tohidi@uk.ac.ir؛ (نویسنده مسئول)

[۳] گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. ۰۹۱۳۹۹۸۵۶۲۶؛ jalalghanbari@agr.uk.ac.ir

[۴] موسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران.

مقدمه

جنس Thymus با حدود ۲۱۵ گونه که در فارسی به آن «آزوربه یا آویشن» نیز می‌گویند، گیاهی معطر و چندساله از خانواده نعناع (Labiate یا Lamiaceae) است. آویشن به دلیل داشتن مواد شیمیایی مختلف در طول تاریخ همواره به عنوان یک گیاه دارویی مورد توجه بوده است (Kuete, 2017; Tohidi et al., 2019). یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین گونه‌های این جنس، Thymus vulgaris L. (آویشن معمولی، آویشن باغی) است. از نظر خصوصیات معطر و دارویی، T. vulgaris در واقع مهمترین گونه این جنس است و به طور گسترده به عنوان طعم دهنده در آشپزی و به عنوان یک داروی گیاهی استفاده می‌شود (Tohidi et al., 2019).

آویشن شیرازی (Zataria multiflora Boiss.) گیاهی شبیه آویشن متعلق به خانواده Lamiaceae است که از نظر جغرافیایی فقط در مرکز و جنوب ایران، پاکستان و افغانستان به صورت وحشی می‌روید. این گیاه شباهت‌های شیمیایی و دارویی به Thymus vulgaris دارد. علاوه بر کاربرد آویشن شیرازی به عنوان داروی محلی، مطالعات فارماکولوژیک مدرن نشان می‌دهد که این گیاه دارای خواص بیولوژیکی گسترده‌ای از جمله اثرات ضد درد، ضد میکروبی، تسکین دهنده‌ی اسپاسم عضلات و ضد التهابی است. در حال حاضر برخی از اشکال دارویی این گیاه مانند شربت‌ها، قطره‌های خوراکی و کپسول‌ها برای درمان بیماری های مختلف به فروش می‌رسد (Sajed et al., 2013).

با وجود سازگاری اکثر گیاهان دارویی از جمله گونه‌های مختلف آویشن در برابر شرایط نامساعد محیطی (Alavi-Samani et al., 2015)، ارزیابی پتانسیل تولید تحت شرایط محدودیت آبیاری ضروری به نظر می‌رسد. امروزه هدف بسیاری از مطالعات، به‌کارگیری رویکردهای زراعی، بیولوژیکی و بیوتکنولوژیکی در جهت بهبود تحمل به خشکی در گیاهان است که در نهایت به بهبود تولید و عملکرد گیاهان و افزایش بهره‌وری مصرف آب در مناطق خشک جهان منجر شود (Bardi and Malusà, 2012). در این ارتباط، بهره‌گیری از ابزارهای زیستی برای افزایش تحمل تنش برای بهره‌وری پایدار محصول، یکی از رویکردهای امیدوارکننده است. قارچ‌های آربوسکولار میکوریزا (AMF) با اکثر گیاهان ارتباط همزیستی ایجاد می‌کنند و مورفولوژی و فیزیولوژی ریشه را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. گیاهان تلقیح شده با AMF آب و عناصر غذایی را بهتر جذب می‌کنند و فعالیت آنزیمی را افزایش می‌دهند (Ahanger et al., 2014). قارچ‌های میکوریزا با برقراری ارتباط هم‌زیستی با ریشه اکثر گیاهان، تبادل آب، کربن، فسفر و سایر عناصر غذایی را بهبود می‌دهند (Kim et al., 2012).

قارچ‌های آربوسکولار میکوریزا می‌توانند به گیاهان کمک کنند تا تغییرات مضر ناشی از تنش آبی را کاهش دهند. در شرایط تنش آبی، ارتباط هم‌زیستی میکوریزا به گیاهان کمک می‌کند تا پتانسیل آب برگ را حفظ کنند به طوری که از هرگونه افت تورژسانس جلوگیری شود. علاوه بر این، پس از وقوع تنش، گیاهان میکوریزایی در مقایسه با گیاهان غیر میکوریزایی به سرعت به شرایط عادی باز می‌گردند. گیاهان میکوریزایی میزان تعرق و هدایت روزنه‌ای متفاوتی را در مقایسه با گیاهان غیر میکوریزایی نشان می دهند. تغییر هدایت روزنه‌ای و تعرق در نتیجه همزیستی میکوریزایی در گیاهان مختلفی گزارش شده است (Ahanger et al., 2014; Kim et al., 2012). به طور مثال، در شیرین بیان، تلقیح با میکوریزا ارتفاع بوته و طول ریشه را افزایش داد. علاوه بر این، تلقیح با میکوریزا موجب بهبود محتوای کلروفیل، وزن خشک اندام هوایی، میزان فتوسنتز و کارایی مصرف آب فتوسنتزی در شرایط نرمال آبیاری (۱۰۰ درصد FC) و کم‌آبیاری ۳۰ درصد FC شد (زرین ترنج و همکاران، ۱۴۰۲).

پیرزاد و محمدزاده (۲۰۱۸) پاسخ فیزیولوژیکی اسطوخودوس، رزماری و آویشن باغی را به تلقیح با دو گونه قارچ میکوریزا تحت رژیم‌های آبیاری مختلف (آبیاری در ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و شرایط دیم) ارزیابی کردند. این مطالعه نشان داد که تلقیح با قارچ در کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی مؤثر است (Pirzad and Mohammadzadeh, 2018). همچنین، در بررسی نقش میکوریزا (دو تیمار *Rhizophagus intraradices*، Funneliformis mosseae) در چهار سطح آبیاری (نرمال؛

آبیاری پس از تخلیه ۲۰-۲۵ درصد ظرفیت زراعی؛ آبیاری پس از تخلیه ۳۵-۴۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش متوسط) و آبیاری پس از تخلیه ۵۵-۶۰ درصد FC: تنش شدید) بر گیاه آویشن باغی (.Thymus vulgaris L)، نتایج نشان داد که تنش آبی باعث کاهش پارامترهای رشد .T vulgaris شد اما تلقیح با میکوریزا اثرات نامطلوب تنش آبی را کاهش داد (Arpanahi and Feizian, 2019).

بر اساس موارد ذکر شده، هدف این پژوهش بررسی واکنش دو نوع آویشن - با توجه به خصوصیات مورفولوژیک متفاوت آن‌ها (شکل ۱)- به تنش خشکی و تلقیح با میکوریزا بود. از طرف دیگر تاکنون مطالعه‌ای در زمینه بهبود رشد و تولید با تکیه بر رویکردهای به‌زراعی در آویشن شیرازی به خصوص تحت تنش خشکی انجام نشده است. بنابراین این مطالعه می‌تواند اطلاعات مفیدی را در جهت بهبود فرایند تولید این گونه ارزشمند بومی کشور فراهم کند.

شکل (۱): ویژگی‌های موفولوژیک آویشن باغی (سمت راست) و شیرازی (سمت چپ) در مراحل انتقال نشا (بالا) و پس از برداشت (پایین).

مواد و روش‌ها

شرایط آزمایش و تیمارهای مورد بررسی

به منظور بررسی تأثیر میکوریزا بر پاسخ انواع مختلف آویشن به تنش خشکی، این پژوهش در آزمایشگاه و گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان در طول بهار و تابستان سال ۱۴۰۱ انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تکرار (۴۸ گلدان) اجرا شد. سطوح عوامل مورد ارزیابی به شرح زیر اعمال شد.

۱- سطوح آبیاری مختلف (شرایط آبیاری ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی (شاهد یا بدون تنش)؛ شرایط آبیاری ۷۵٪ ظرفیت زراعی (تنش متوسط)؛ شرایط آبیاری ۵۰٪ ظرفیت زراعی (تنش شدید))؛

۲- دو نوع آویشن (آویشن باغی و آویشن شیرازی)؛

۳- تلقیح با قارچ میکوریزا (تلقیح و عدم تلقیح با *Funneliformis mosseae*).

تلقیح با میکوریزا به صورت کاربرد مایه تلقیح به میزان ۵۰ گرم در بستر کشت در هر گلدان اعمال شد. گلدان‌های مورد استفاده از نوع پلاستیکی با قطر دهانهٔ ۳۰ سانتی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بود. پس از پر کردن گلدان‌ها با خاک مورد استفاده (به نسبت ۱:۳ خاک مزرعه و شن)، ظرفیت زراعی خاک تعیین شد. به این منظور ابتدا آبیاری گلدان‌ها در حد اشباع انجام شد و پس از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌هایی از خاک بین فواصل ۲۴ تا ۷۲ ساعت برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. پس از تعیین وزن تر هر نمونه، نمونه‌ها در آون قرار گرفت و وزن خشک خاک تعیین شد. پس از محاسبه ظرفیت زراعی، مقدار رطوبتی که در دو اندازه‌گیری متوالی تقریبا ثابت بود به عنوان ظرفیت زراعی خاک در نظر گرفته شد (علیزاده، ۱۳۹۰).

نشاهای آویشن باغی و شیرازی با طول حدود ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر در بستر کشت تلقیح شده/ تلقیح نشده با میکوریزا کشت شد. تا زمان استقرار کامل، آبیاری برای همه گلدان‌ها در حد ظرفیت زراعی انجام شد. پس از اطمینان از استقرار گیاهان (۴۰ روز پس از کاشت نشاها)، تیمارهای آبیاری براساس ظرفیت زراعی مورد نظر برای هر تیمار اعمال شد. بر این اساس، پس از توزین منظم گلدان‌ها و براساس میزان از دست رفتن رطوبت، مقدار آب آبیاری تا رساندن به ظرفیت زراعی مورد نظر در سطوح مختلف آبیاری تنظیم شد.

صفات مورد بررسی

در انتهای آزمایش (۱۵۵ روز پس از کاشت)، گیاهان هر گلدان به‌طور کامل برداشت شد و صفات مورفولوژیک شامل ارتفاع بوته، وزن تر و خشک اندام هوایی، طول ریشه، حجم ریشه و وزن خشک ریشه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

محتوای فسفر در ریشه و اندام هوایی پس از هضم مواد گیاهی با اسید سولفوریک براساس روش رنگ سنجی وانادیوم مولیبدات تعیین شد (Mills et al., 1996).

جذب فسفر (PU) از حاصل‌ضرب غلظت فسفر (P) (درصد) در محتوای ماده خشک ریشه/ اندام هوایی (DM) ($g\ plant^{-1}$) حاصل می‌شود (رابطه ۱).

$$PU\ (g\ plant^{-1}) = (DM \times P)/\ 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

کارایی بهره‌برداری فسفر[1] (PUtE) (گرم بر گرم) براساس محتوای ماده خشک (DM) و میزان جذب فسفر در ماده خشک اندام هوایی و ریشه (PU)، براساس رابطه ۲ محاسبه شد (Ghanbari and Khajoei-Nejad, 2022).

$$PUtE\ (g\ g^{-1}) = DM/\ PU \quad \text{رابطه (۲)}$$

همچنین کارایی مصرف آب (WUE) پس از تعیین عملکرد خشک اندام هوایی و میزان آب مصرفی برای هر تیمار براساس معادله زیر محاسبه شد:

$$WUE = DW / WC \quad \text{رابطه (۳)}$$

DW: عملکرد خشک اندام هوایی (گرم) و WC: میزان آب مصرفی برای هر تیمار (لیتر).

آنالیزهای آماری

تجزیه‌های آماری برای هر نوع آویشن براساس طرح فاکتوریل در قالب کاملا تصادفی با استفاده از نرم افزار SAS ver. 9.0 انجام شد. میانگین‌ها توسط آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد (LSD، $P< ۰/۰۵$) مورد مقایسه قرار گرفت.

[1] P utilisation efficiency

نتایج و بحث

ویژگی‌های مورفولوژیک و تولید زیست‌توده

نتایج تجزیه واریانس برای ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه نشان داد که طول ریشه در آویشن باغی تحت تأثیر عوامل آزمایش قرار نگرفت در حالی که در آویشن شیرازی به طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح آبیاری و تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۱). همان‌طور که نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد، کاهش سطح آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۷۵ درصد تغییر معنی‌داری در طول ریشه ایجاد نکرد اما افزایش شدت تنش به ۵۰ درصد FC منجر به کاهش ۱۳ درصدی طول ریشه آویشن شیرازی شد (جدول ۲). تلقیح با میکوریزا منجر به افزایش ۲۱ درصدی طول ریشه آویشن شیرازی نسبت به عدم تلقیح شد (جدول ۳). این در حالی بود که اثر متقابل معنی‌داری برای طول ریشه بین سطوح تنش و تلقیح با میکوریزا در انواع مختلف آویشن مشاهده نشد (جدول ۱).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که حجم و وزن خشک ریشه آویشن باغی تحت تأثیر سطوح آبیاری، تلقیح با میکوریزا و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تلقیح با میکوریزا تنها در شرایط نرمال آبیاری حجم ریشه را ۱۰۰ درصد نسبت به عدم تلقیح افزایش داد و در سایر سطوح آبیاری اثر معنی‌داری بر افزایش حجم ریشه نداشت (جدول ۴). همچنین نتایج نشان داد در حالی که بیشترین وزن خشک ریشه از تلقیح با میکوریزا در شرایط نرمال آبیاری حاصل شد، تأثیر تلقیح با میکوریزا تنها در شرایط نرمال و تنش ملایم به ترتیب منجر به افزایش ۱۵۹ و ۱۲۸ درصد وزن خشک ریشه در مقایسه با عدم تلقیح شد و با اعمال تنش شدید (۵۰ درصد FC) نقش معنی‌داری در افزایش وزن خشک ریشه نداشت (جدول ۴). این در حالی بود که در آویشن شیرازی خصوصیات ریشه تحت تأثیر اثر متقابل سطوح آبیاری در تلقیح با میکوریزا قرار نگرفت. با این وجود اثر سطوح آبیاری و تلقیح با میکوریزا بر خصوصیات ریشه معنی‌دار بود (جدول ۱). اعمال سطوح کم‌آبیاری ۷۵ درصد و ۵۰ درصد FC بین ۳۳ تا ۶۴ درصد حجم و وزن خشک ریشه آویشن شیرازی را نسبت به سطح آبیاری نرمال کاهش داد (جدول ۲). همچنین تلقیح با میکوریزا حجم و وزن خشک ریشه آویشن شیرازی را نسبت به عدم تلقیح به‌ترتیب ۲۵/۶ و ۳۲ درصد افزایش داد (جدول ۳).

جدول (۱): نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر سطوح مختلف تنش آبی، تلقیح با میکوریزا و اثر متقابل آن‌ها بر خصوصیات مورفولوژیک ریشه و اندام هوایی انواع مختلف آویشن

نوع آویشن	منابع تغییر	درجه آزادی	طول ریشه	حجم ریشه	وزن خشک ریشه	ارتفاع بوته	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	نسبت اندام هوایی به ریشه	کارایی مصرف آب
باغی	تنش خشکی	۲	۹/۱ ns	۲۶۴۸ **	۳/۶۲ **	۲/۰۷ ns	۴۵/۵ **	۵/۲۵ **	۰/۹۱۹ *	۰/۰۰۱۹ ns
	میکوریزا	۱	۱۰/۰ ns	۴۵۰۱ **	۱۰/۲ **	۱۵/۰ ns	۵۹/۲ **	۹/۶۷ **	۱/۰۶۶ *	۰/۰۱۴۲ **
	تنش × میکوریزا	۲	۵/۱ ns	۱۳۷۴ *	۲/۱۰ **	۷/۸۹ ns	۱۷/۵ **	۳/۳۳ **	۰/۲۰۵ ns	۰/۰۰۴۸ *
	خطا	۱۸	۱۳/۰	۳۲۷	۰/۳۴	۱۳/۲	۲/۹۱	۰/۴۵	۰/۱۹۹	۰/۰۰۰۹
	ضریب تغییرات	٪	۱۲/۸	۲۷/۵	۳۱/۳	۱۱/۵	۲۰/۰	۲۱/۶	۲۲/۹	۲۲/۶
شیرازی	تنش خشکی	۲	۳۸/۴ *	۶۱۰۱ **	۴/۹۳ **	۹۷۹ **	۱۱۶ **	۱۱/۱ **	۷/۴۵ **	۰/۰۰۹۵ **
	میکوریزا	۱	۱۶۲ **	۱۷۶۲ *	۱/۲۱ **	۸۴/۵ ns	۴۹/۱ **	۱۰/۳ **	۲/۹۴ *	۰/۰۱۶۷ **
	تنش × میکوریزا	۲	۲۹/۶ ns	۳۳۶ ns	۰/۱۵ ns	۱۱۷۱ **	۱۳/۰ ns	۴/۹۳ **	۴/۸۳ **	۰/۰۰۷۴ *
	خطا	۱۲	۸/۳۳	۲۹۶	۰/۱۱	۷۸/۱	۴/۸۸	۰/۵۸	۰/۴۴	۰/۰۰۱۳
	ضریب تغییرات	٪	۹/۱۲	۱۹/۷	۱۷/۳	۱۵/۹	۱۳/۵	۱۴/۳	۱۹/۹	۱۵/۱

**: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، *: معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و ns: غیر معنی‌دار

جدول (۲): اثر رژیم‌های مختلف آبیاری بر خصوصیات موفولوژیک ریشه و اندام هوایی در انواع مختلف آویشن

نوع آویشن	رژیم آبیاری	طول ریشه (سانتی‌متر)	حجم ریشه (سانتی‌متر مکعب در بوته)	وزن خشک ریشه (گرم در بوته)	وزن تر اندام هوایی (گرم در بوته)	نسبت اندام هوایی به ریشه
باغی	۱۰۰ درصد FC	۲۹/۵	۸۴/۷	۲/۴۳	۱۱/۱	۱/۹۱ ab
	۷۵ درصد FC	۲۷/۷	۶۴/۵	۲/۰۵	۸/۲۵	۱/۶۳ b
	۵۰ درصد FC	۲۷/۶	۴۸/۴	۱/۱۲	۶/۳۱	۲/۳۰ a
شیرازی	۱۰۰ درصد FC	۳۳/۳ a	۱۲۱/۷ a	۲/۸۳ a	۱۸/۳ a	۲/۱۲
	۷۵ درصد FC	۳۳/۰ a	۸۱/۷ b	۱/۸۰ b	۱۹/۵ a	۳/۶۹
	۵۰ درصد FC	۲۸/۸ b	۵۸/۷ c	۱/۰۲ c	۱۱/۴ b	۴/۲۷

مقایسه میانگین‌ها برای هر نوع آویشن به طور جداگانه انجام شده است. برای هر نوع آویشن، میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

جدول (۳): اثر تلقیح با میکوریزا بر خصوصیات موفولوژیک ریشه و اندام هوایی در انواع مختلف آویشن

نوع آویشن	تلقیح با میکوریزا	طول ریشه (سانتی‌متر)	حجم ریشه (سانتی‌متر مکعب در بوته)	وزن خشک ریشه (گرم در بوته)	وزن تر اندام هوایی (گرم در بوته)	نسبت اندام هوایی به ریشه
باغی	عدم تلقیح	۲۷/۶	۵۲/۲	۱/۲۱	۶/۹۷	۲/۱۶a
	تلقیح	۲۸/۹	۷۹/۵	۲/۵۲	۱۰/۱	۱/۷۳ b
شیرازی	عدم تلقیح	۲۸/۷ b	۷۷/۴ b	۱/۶۲ b	۱۴/۷ b	۳/۷۶
	تلقیح	۳۴/۷ a	۹۷/۲ a	۲/۱۴ a	۱۸/۱ a	۲/۹۵

مقایسه میانگین‌ها برای هر نوع آویشن به طور جداگانه انجام شده است. برای هر نوع آویشن، میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

ارتفاع بوته آویشن باغی تحت تأثیر تیمارهای آزمایش و اثر متقابل آن‌ها قرار نگرفت اما ارتفاع بوته آویشن شیرازی تحت تأثیر سطوح آبیاری و اثر متقابل آن با تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۱). بیشترین ارتفاع بوته از شرایط نرمال آبیاری و تلقیح با میکوریزا و اعمال ۷۵ درصد ظرفیت زراعی و عدم تلقیح حاصل شد. سایر سطوح تیمارهای کاربردی تفاوت معنی‌داری نشان ندادند (جدول ۴).

نتایج بیانگر این بود که وزن تر و خشک اندام هوایی آویشن باغی و همچنین وزن خشک اندام هوایی آویشن شیرازی تحت تأثیر اثر متقابل سطوح آبیاری و تلقیح با میکوریزا قرار گرفتند (جدول ۱). در آویشن باغی، تلقیح

میکوریزایی به‌ترتیب وزن تر اندام هوایی را ۷۷ و ۴۴ درصد و وزن خشک اندام هوایی را به ترتیب ۹۶ و ۵۱ درصد در شرایط نرمال آبیاری و ۷۵ درصد FC افزایش داد اما در شرایط تنش شدید (۵۰ درصد FC)، تلقیح با میکوریزا از کارایی لازم برای بهبود وزن تر و خشک اندام هوایی برخوردار نبود (جدول ۴). در آویشن شیرازی، بیشترین وزن خشک اندام هوایی از تلقیح با میکوریزا در شرایط نرمال آبیاری حاصل شد و تنها در شرایط نرمال بود که تلقیح منجر به افزایش ۸۳ درصدی وزن خشک در مقایسه با عدم تلقیح شد. در شرایط اعمال تنش ملایم و شدید، تلقیح با میکوریزا اثر معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی نداشت (جدول ۴). با این وجود، وزن تر اندام هوایی در آویشن شیرازی تحت تأثیر سطوح آبیاری و همچنین تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۱). نتایج نشان داد که تنها اعمال سطح شدید تنش منجر به کاهش ۳۸ درصدی وزن تر اندام هوایی نسبت به سطح نرمال آبیاری در آویشن شیرازی شد (جدول ۲). تلقیح با میکوریزا وزن تر اندام هوایی را ۲۳ درصد نسبت به عدم تلقیح در آویشن شیرازی بهبود داد (جدول ۳).

نسبت اندام هوایی به ریشه در آویشن باغی تحت تأثیر سطوح آبیاری و تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۱). اعمال تنش شدید در آویشن باغی منجر به بیشترین نسبت اندام هوایی به ریشه شد که تفاوت معنی‌داری با شرایط نرمال نشان نداد اما در مقایسه با تنش ملایم تفاوت معنی‌داری (۴۱ درصد) نشان داد (جدول ۲). همچنین تلقیح با میکوریزا نیز نسبت اندام هوایی به ریشه آویشن باغی را ۲۰ درصد در مقایسه با عدم تلقیح کاهش داد (جدول ۳). در آویشن شیرازی، نتایج تجزیه واریانس نشان از اثر معنی‌دار سطوح آبیاری، تلقیح با میکوریزا و اثر متقابل آن‌ها بر نسبت اندام هوایی به ریشه داشت (جدول ۱). در آویشن شیرازی ضمن اینکه بیشترین نسبت اندام هوایی به ریشه از تنش شدید و عدم تلقیح با میکوریزا حاصل شد، تلقیح با میکوریزا در این سطح آبیاری منجر به کاهش ۴۴ درصدی نسبت اندام هوایی به ریشه شد اما در سایر سطوح، تلقیح منجر به تغییر معنی‌داری در این نسبت نشد (جدول ۴).

جدول (۴): مقایسه خصوصیات موفولوژیک ریشه و اندام هوایی تحت تأثیر اثر متقابل رژیم‌های مختلف آبیاری و تلقیح با میکوریزا در انواع مختلف آویشن

نوع آویشن	رژیم آبیاری	تلقیح با میکوریزا	حجم ریشه (سانتی‌متر مکعب در بوته)	وزن خشک ریشه (گرم در بوته)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	وزن تر اندام هوایی (گرم در بوته)	وزن خشک اندام هوایی (گرم در بوته)	نسبت اندام هوایی به ریشه	کارایی مصرف آب (گرم در لیتر)
باغی	۱۰۰ درصد FC	عدم تلقیح	۵۶/۳ bc	۱/۳۵ b	۲۹/۵	۷/۹۶ bc	۲/۶۸ c	۲/۲۱	۰/۰۹۹ c
		تلقیح	۱۱۳ a	۳/۵۰ a	۳۳/۴	۱۴/۱ a	۵/۲۵ a	۱/۶۰	۰/۱۹۶ a
	۷۵ درصد FC	عدم تلقیح	۵۵/۲ bc	۱/۲۵ b	۳۱/۱	۶/۷۷ c	۲/۴۴ c	۱/۹۳	۰/۱۰۳ c
		تلقیح	۷۳/۸ b	۲/۸۵ a	۳۱/۵	۹/۷۳ b	۳/۶۹ b	۱/۳۳	۰/۱۵۵ ab
	۵۰ درصد FC	عدم تلقیح	۴۵/۰ c	۱/۰۴ b	۳۲/۰	۶/۱۷ c	۲/۳۵ c	۲/۳۳	۰/۱۱۸ bc
		تلقیح	۵۱/۸ bc	۱/۲۰ b	۳۲/۵	۶/۴۵ c	۲/۳۴ c	۲/۲۸	۰/۱۱۶ bc
شیرازی	۱۰۰ درصد FC	عدم تلقیح	۱۲۰	۲/۷۵	۴۵/۰ b	۱۵/۰	۴/۲۶ c	۱/۵۵ d	۰/۱۶۶ c
		تلقیح	۱۲۳	۲/۹۱	۷۹/۷ a	۲۱/۷	۷/۷۹ a	۲/۶۸ cd	۰/۳۰۵ a
	۷۵ درصد FC	عدم تلقیح	۷۰/۰	۱/۴۳	۷۴/۰ a	۱۸/۹	۵/۷۱ b	۴/۲۶ b	۰/۲۵۳ ab
		تلقیح	۹۳/۳	۲/۱۸	۵۳/۷ b	۲۰/۰	۶/۶۷ ab	۳/۱۱ bc	۰/۲۹۶ a
	۵۰ درصد FC	عدم تلقیح	۴۲/۳	۰/۷۰	۴۱/۷ b	۱۰/۳	۳/۷۴ c	۵/۴۷ a	۰/۱۹۴ bc
		تلقیح	۷۵/۰	۱/۳۴	۴۰/۳ b	۱۲/۵	۳/۷۷ c	۳/۰۷ c	۰/۱۹۶ bc

مقایسه میانگین‌ها برای هر نوع آویشن به طور جداگانه انجام شده است. برای هر نوع آویشن، میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

کارایی مصرف آب در هر دو نوع آویشن تحت تأثیر اثر متقابل سطوح آبیاری در تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۱). بیشترین کارایی مصرف آب آویشن باغی از تلقیح در شرایط نرمال آبیاری حاصل شد که تفاوت معنی‌داری با تلقیح در شرایط اعمال ۷۵ درصد FC نشان نداد اما نسبت به شاهد (عدم تلقیح با میکوریزا و سطح نرمال آبیاری) ۹۸ درصد کارایی مصرف آب را بهبود داد. کمترین کارایی مصرف آب از اعمال سطوح ۱۰۰ درصد و ۷۵ درصد آبیاری در شرایط عدم تلقیح با میکوریزا به دست آمد (جدول ۴). نتایج مشابهی در مورد آویشن شیرازی مشاهده شد با این تفاوت که اعمال سطح متوسط کم‌آبیاری در شرایط عدم تلقیح نیز تفاوت معنی‌داری با تیمارهای تلقیح نشان نداد اما تفاوت معنی‌داری با شرایط نرمال آبیاری و عدم تلقیح با میکوریزا نشان دادند (جدول ۴).

پارامترهای مرتبط با تغذیه فسفر

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که محتوای فسفر اندام هوایی و ریشه آویشن باغی تحت تأثیر سطوح آبیاری قرار گرفت (جدول ۵). اعمال سطوح کم‌آبیاری، محتوای فسفر اندام هوایی را ۲۳ درصد و محتوای فسفر ریشه آویشن باغی را به‌ترتیب ۱۵ و ۱۷ درصد کاهش داد (جدول ۶). همچنین محتوای فسفر اندام هوایی آویشن شیرازی نیز تحت تأثیر سطوح آبیاری قرار گرفت (جدول ۵). بیشترین محتوای فسفر اندام هوایی در آویشن شیرازی از اعمال سطح شدید تنش خشکی حاصل شد که تفاوت معنی‌داری با شرایط نرمال نشان نداد اما نسبت به شرایط تنش ملایم (۷۵ درصد FC)، محتوای فسفر را ۲۳ درصد افزایش داد (جدول ۶). محتوای فسفر ریشه در آویشن شیرازی تحت تأثیر سطوح آبیاری، تلقیح با میکوریزا و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۵). در شرایط نرمال آبیاری، بیشترین محتوای فسفر ریشه از تلقیح و عدم تلقیح میکوریزا حاصل شد. در شرایط تنش ملایم، تلقیح با میکوریزا تفاوت معنی داری در محتوای فسفر ریشه نسبت به عدم تلقیح ایجاد نکرد. این در حالی بود که در شرایط تنش شدید، تلقیح با میکوریزا محتوای فسفر ریشه آویشن شیرازی را ۶۳ درصد نسبت به عدم تلقیح بهبود داد. به طور کلی، بیشترین محتوای فسفر از همین تیمار به همراه شرایط نرمال آبیاری حاصل شد که با شرایط تنش ملایم و تلقیح با میکوریزا تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۸).

جدول (۵): نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر سطوح مختلف تنش آبی، تلقیح با میکوریزا و اثر متقابل آن‌ها بر پارامترهای مرتبط با تغذیه فسفر در انواع مختلف آویشن

نوع آویشن	منابع تغییر	درجه آزادی	محتوای فسفر (درصد)		جذب فسفر (میلی‌گرم در بوته)			کارایی بهره برداری فسفر (گرم بر میلی گرم)		
			اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	کل بوته	اندام هوایی	ریشه	کل بوته
باغی	تنش خشکی	۲	۰/۰۰۶۲**	۰/۰۰۳۹*	۴۲/۰**	۲۶/۱**	۱۳۰**	۰/۰۳۳**	۰/۰۱۳*	۰/۰۸۶۲**
	میکوریزا	۱	۰/۰۰۰۳^{ns}	۰/۰۰۴۵*	۳۳/۰**	۶۶/۱**	۱۹۳**	۰/۰۰۲۳^{ns}	۰/۰۲۰*	۰/۰۰۸۸^{ns}
	تنش × میکوریزا	۲	۰/۰۰۱۰^{ns}	۰/۰۰۰۵^{ns}	۱۸/۶**	۱۰/۸**	۵۷/۱*	۰/۰۰۸۷^{ns}	۰/۰۰۳۶^{ns}	۰/۰۰۸۸^{ns}
	خطا	۱۲	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۲/۵۹	۱/۰۵	۸/۴۹	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۷۶
	ضریب تغییرات	٪	۱۳/۱	۱۱/۱	۲۵/۰	۲۱/۹	۲۶/۲	۱۱/۰	۱۱/۹	۹/۲۹
شیرازی	تنش خشکی	۲	۰/۰۰۴۳*	۰/۰۰۳۲*	۴۳/۰**	۳۱/۶**	۱۴۰**	۰/۰۰۹۱*	۰/۰۱۸*	۰/۰۲۵*
	میکوریزا	۱	۰/۰۰۰۴^{ns}	۰/۰۰۳۶*	۸۱/۱**	۶/۶۶*	۱۳۴**	۰/۰۰۱۰^{ns}	۰/۰۳۵**	۰/۰۴۹*
	تنش × میکوریزا	۲	۰/۰۰۰۵^{ns}	۰/۰۰۶۵**	۲۴/۴*	۳/۷۲*	۹/۰۹^{ns}	۰/۰۰۰۴^{ns}	۰/۰۳۹**	۰/۰۴۷**
	خطا	۱۲	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۸	۴/۹۷	۰/۷۷۸	۷/۱۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶
	ضریب تغییرات	٪	۱۲/۹	۱۳/۲	۱۶/۴	۲۱/۴	۱۵/۰	۱۱/۵	۱۰/۵	۸/۵۱

**: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، *: معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و ^{ns}: غیر معنی‌دار

جدول (۶): اثر رژیم‌های مختلف آبیاری بر پارامترهای مرتبط با تغذیه فسفر در انواع مختلف آویشن

نوع آویشن	رژیم آبیاری	محتوای فسفر (درصد)		جذب فسفر (میلی‌گرم در بوته)			کارایی بهره برداری فسفر (گرم بر میلی گرم)		
		اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	کل بوته	اندام هوایی	ریشه	کل بوته
باغی	۱۰۰ درصد FC	۰/۲۳۸ a	۰/۲۷۰ a	۹/۳۹	۶/۶۵	۱۶/۰	۰/۴۲۶ b	۰/۳۷۳ b	۰/۸۰ b
	۷۵ درصد FC	۰/۱۸۳ b	۰/۲۳۰ b	۵/۶۵	۴/۹۲	۱۰/۶	۰/۵۵۴ a	۰/۴۴۸ a	۱/۰۰ a
	۵۰ درصد FC	۰/۱۸۳ b	۰/۲۲۳ b	۴/۲۸	۲/۵۰	۶/۷۸	۰/۵۵۵ a	۰/۴۵۶ a	۱/۰۱ a
شیرازی	۱۰۰ درصد FC	۰/۲۶۳ ab	۰/۲۳۵	۱۵/۸	۶/۶۷	۲۲/۵ a	۰/۳۸۸ ab	۰/۴۳۷	۰/۸۲
	۷۵ درصد FC	۰/۲۳۲ b	۰/۱۹۳	۱۴/۴	۳/۵۲	۱۷/۹ b	۰/۴۳۲ a	۰/۵۲۰	۰/۹۵
	۵۰ درصد FC	۰/۲۸۵ a	۰/۱۹۸	۱۰/۶	۲/۲۰	۱۲/۸ c	۰/۳۵۵ b	۰/۵۴۰	۰/۸۹

مقایسه میانگین‌ها برای هر نوع آویشن به طور جداگانه انجام شده است. برای هر نوع آویشن، میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

جذب فسفر در اندام هوایی، ریشه و کل بوته آویشن باغی تحت تأثیر عوامل آزمایش و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت. بالاترین جذب فسفر در اندام هوایی، ریشه و کل بوته از تلقیح با میکوریزا در شرایط نرمال آبیاری حاصل شد. تلقیح با میکوریزا در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد FC منجر به افزایش ۹۸ درصدی جذب فسفر نسبت به عدم تلقیح شد. در شرایط آبیاری ۷۵ درصد FC، جذب فسفر ریشه و کل بوته به‌ترتیب ۱۷۰ و ۱۰۵ درصد توسط تلقیح با میکوریزا نسبت به عدم تلقیح بهبود یافت. در شرایط تنش شدید، تلقیح با میکوریزا اثر معنی‌داری بر جذب فسفر نشان نداد (جدول ۸).

در آویشن شیرازی جذب فسفر اندام هوایی و ریشه تحت تأثیر اثر تنش خشکی، تلقیح با میکوریزا و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ۵). مشابه با نتایج قبل، بیشترین جذب فسفر اندام هوایی آویشن شیرازی از تلقیح با میکوریزا در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد FC حاصل و در این شرایط تلقیح منجر به افزایش ۷۷ درصدی جذب فسفر نسبت به عدم تلقیح شد. در سایر سطوح آبیاری تلقیح از کارایی لازم برای افزایش جذب فسفر برخوردار نبود (جدول ۸). نتایج همچنین نشان داد که ضمن اینکه بیشترین جذب فسفر ریشه در شرایط نرمال آبیاری رخ داد، جذب فسفر ریشه تنها در شرایط اعمال سطوح تنش (به ترتیب ۷۷ و ۲۱۵ درصد در سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد FC) توسط تلقیح میکوریزا بهبود یافت و در شرایط نرمال، تلقیح با میکوریزا اثری بر آن نداشت (جدول ۸). همچنین نتایج نشان داد که جذب فسفر کل بوته در آویشن شیرازی تحت تأثیر اثر سطوح آبیاری و تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۵).

اعمال سطوح مختلف کم‌آبیاری به ترتیب منجر به کاهش ۲۰ و ۴۳ درصدی جذب فسفر نسبت به شرایط نرمال آبیاری شد (جدول ۶). علاوه بر این، نتایج نشان داد که تلقیح با میکوریزا جذب فسفر را در آویشن شیرازی ۳۶ درصد نسبت به عدم تلقیح افزایش داد (جدول ۷).

جدول(۷): اثر تلقیح با میکوریزا بر پارامترهای مرتبط با تغذیه فسفر در انواع مختلف آویشن

نوع آویشن	تلقیح با میکوریزا	محتوای فسفر ریشه (درصد)	جذب فسفر کل بوته (میلی‌گرم در بوته)	کارایی بهره برداری فسفر ریشه (گرم بر میلی گرم)
باغی	عدم تلقیح	۰/۲۲۵ b	۷/۸۶	۰/۴۵۹ a
	تلقیح	۰/۲۵۷ a	۱۴/۴	۰/۳۹۲ b
شیرازی	عدم تلقیح	۰/۱۹۴	۱۴/۹۹ b	۰/۵۴۳
	تلقیح	۰/۲۲۳	۲۰/۴۵ a	۰/۴۵۵

مقایسه میانگین‌ها برای هر نوع آویشن به طور جداگانه انجام شده است. برای هر نوع آویشن، میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

جدول (۸): مقایسه پارامترهای مرتبط با تغذیه فسفر تحت تأثیر اثر متقابل رژیم‌های مختلف آبیاری و تلقیح با میکوریزا در انواع مختلف آویشن

نوع آویشن	رژیم آبیاری	تلقیح با میکوریزا	محتوای فسفر (درصد)		جذب فسفر (میلی‌گرم در بوته)			کارایی بهره برداری فسفر (گرم بر میلی گرم)		
			اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	کل بوته	اندام هوایی	ریشه	کل بوته
باغی	۱۰۰ درصد FC	عدم تلقیح	۰/۲۴۰	۰/۲۶۵	۶/۲۹ bc	۳/۶۰ c	۹/۸۸ bc	۰/۴۲۹	۰/۳۷۷	۰/۸۰۶
		تلقیح	۰/۲۳۷	۰/۲۷۵	۱۲/۵ a	۹/۷۱ a	۲۲/۲ a	۰/۴۲۴	۰/۳۶۸	۰/۷۹۱
	۷۵ درصد FC	عدم تلقیح	۰/۱۷۵	۰/۲۱۰	۴/۲۸ bc	۲/۶۷ c	۶/۹۴ c	۰/۵۷۲	۰/۴۹۵	۱/۰۷
		تلقیح	۰/۱۹۰	۰/۲۵۰	۷/۰۲ b	۷/۱۸ b	۱۴/۲ b	۰/۵۳۵	۰/۴۰۰	۰/۹۳۶
	۵۰ درصد FC	عدم تلقیح	۰/۲۰۰	۰/۲۰۰	۴/۷۰ bc	۲/۰۶ c	۶/۷۶ c	۰/۵۰۱	۰/۵۰۳	۱/۰۰
		تلقیح	۰/۱۶۵	۰/۲۴۵	۳/۸۶ c	۲/۹۴ c	۶/۸۰ c	۰/۶۰۹	۰/۴۰۸	۱/۰۲
شیرازی	۱۰۰ درصد FC	عدم تلقیح	۰/۲۶۷	۰/۲۵۳ a	۱۱/۴ c	۶/۹۶ a	۱۸/۳	۰/۳۹۰	۰/۴۰۵ c	۰/۷۹۵ bc
		تلقیح	۰/۲۶۰	۰/۲۱۷ ab	۲۰/۲ a	۶/۳۷ a	۲۶/۶	۰/۳۸۵	۰/۴۶۹ bc	۰/۸۵۴ bc
	۷۵ درصد FC	عدم تلقیح	۰/۲۳۰	۰/۱۸۰ bc	۱۳/۱ bc	۲/۵۴ cd	۱۵/۶	۰/۴۳۵	۰/۵۵۷ b	۰/۹۹۲ a
		تلقیح	۰/۲۳۳	۰/۲۰۷ ab	۱۵/۶ b	۴/۵۰ b	۲۰/۱	۰/۴۲۹	۰/۴۸۴ bc	۰/۹۱۳ ab
	۵۰ درصد FC	عدم تلقیح	۰/۲۷۰	۰/۱۵۰ c	۹/۹۳ c	۱/۰۶ d	۱۱/۰	۰/۳۷۲	۰/۶۶۹ a	۱/۰۴ a
		تلقیح	۰/۳۰۰	۰/۲۴۵ a	۱۱/۳ c	۳/۳۴ bc	۱۴/۶	۰/۳۳۷	۰/۴۱۱ c	۰/۷۴۸ c

مقایسه میانگین‌ها برای هر نوع آویشن به طور جداگانه انجام شده است. برای هر نوع آویشن، میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

کارایی بهره‌برداری فسفر ریشه، اندام هوایی و کل بوته آویشن باغی تحت تأثیر سطوح آبیاری قرار گرفت. علاوه بر این، کارایی بهره‌برداری فسفر ریشه تحت تأثیر تلقیح با میکوریزا نیز قرار گرفت (جدول ۵). اعمال تنش خشکی کارایی بهره‌برداری فسفر اندام هوایی، ریشه و کل بوته آویشن باغی را نسبت به شرایط نرمال ابیاری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش داد (جدول ۶). تلقیح با میکوریزا کارایی بهره‌برداری فسفر ریشه را ۱۴/۶ درصد نسبت به عدم تلقیح کاهش داد (جدول ۷).

نتایج همچنین نشان داد که کارایی بهره‌برداری فسفر اندام هوایی آویشن شیرازی نیز تحت تأثیر سطوح آبیاری قرار گرفت و اثر تلقیح میکوریزا و اثر متقابل آن با سطوح آبیاری معنی‌دار نبود (جدول ۵). بیشترین کارایی بهره‌برداری فسفر اندام هوایی از اعمال سطح ۷۵ درصد FC حاصل شد که با شرایط نرمال آبیاری تفاوت معنی‌داری

نداشت اما نسبت به سطح کم‌آبیاری شدید (۵۰ درصد FC)، افزایش معنی‌داری (۲۶ درصد) نشان داد (جدول ۶). بر خلاف روند مشاهده شده برای جذب فسفر، بیشترین کارایی بهره‌برداری فسفر ریشه و کل بوته آویشن شیرازی از شرایط اعمال تنش خشکی و عدم تلقیح حاصل شد. در مقایسه با عدم تلقیح، تلقیح با میکوریزا در شرایط نرمال اثری بر کارایی بهره‌برداری فسفر ریشه و کل بوته نداشت اما در شرایط تنش شدید، تلقیح با میکوریزا کارایی بهره‌برداری فسفر در ریشه و کل بوته را به‌ترتیب ۲۸ و ۳۹ درصد نسبت به عدم تلقیح کاهش داد (جدول ۸).

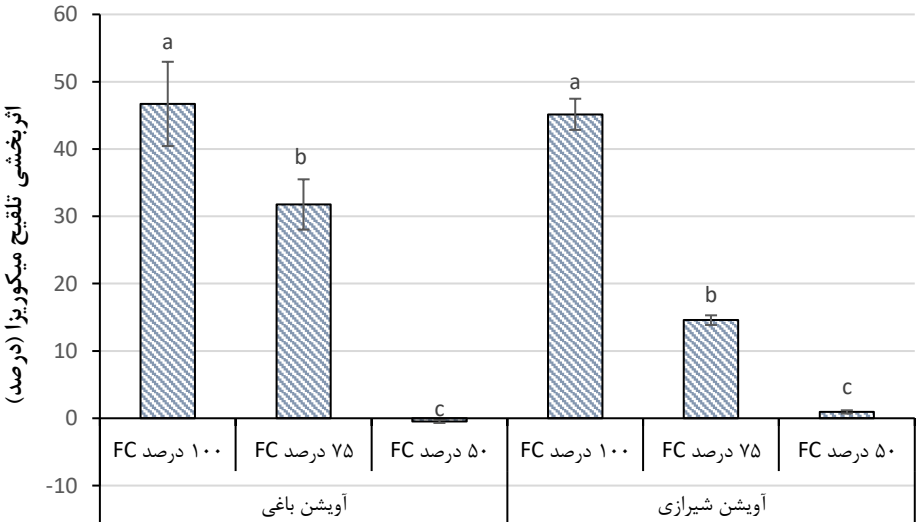
اثربخشی تلقیح میکوریزا

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اعمال سطوح مختلف آبیاری اثر معنی‌داری بر اثربخشی تلقیح میکوریزا در هر دو نوع آویشن داشت (جدول ۹). با افزایش تنش خشکی اثربخشی تلقیح میکوریزا به طور معنی‌داری کاهش نشان داد. در آویشن باغی نسبت به شرایط نرمال آبیاری با اعمال ۷۵ درصد FC، ۳۲ درصد کاهش یافت و در شرایط اعمال تنش شدید کارایی تلقیح منفی بود (شکل ۴-۱). در آویشن شیرازی اثربخشی تلقیح میکوریزا با اعمال سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد FC به‌ترتیب ۶۸ و ۹۸ درصد نسبت به شرایط نرمال آبیاری کاهش یافت (شکل ۲).

جدول (۹): نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر سطوح مختلف آبیاری بر اثربخشی تلقیح میکوریزا در انواع مختلف آویشن

منابع تغییر	آویشن باغی		آویشن شیرازی	
	درجه آزادی	میانگین مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات
سطوح آبیاری	۲	۲۳۲۷**	۲	۱۵۳۸**
خطا	۹	۷۰/۹	۶	۵/۹۴
ضریب تغییرات	٪	۳۲/۴	٪	۱۲/۰

**: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد



شکل (۲): مقایسه میانگین اثربخشی تلقیح میکوریزا تحت تأثیر سطوح آبیاری در انواع مختلف آویشن.

بحث

اثر تنش خشکی

کاهش در خصوصیات موفولوژیک ریشه از قبیل طول ریشه، حجم ریشه و وزن خشک ریشه و همچنین ارتفاع بوته و وزن اندام هوایی آویشن شیرازی با اعمال سطوح کم‌آبیاری ممکن است از طرفی به دلیل کاهش اسیمیلاسیون CO_2 (Gheisari Zardak et al., 2017)، کاهش جذب آب، هدایت روزنه‌ای و ظرفیت فتوسنتزی گیاه باشد (Ghanbarzadeh et al., 2020). تنش کم‌آبی رشد را کاهش داده و فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی

گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Amani Machiani et al., 2021; Bahreininejad et al., 2013). اعمال تنش خشکی در آویشن دنایی طول و وزن خشک ریشه را در مقایسه با شاهد کاهش داد (Bahreininejad et al., 2013). به طور مشابه، با افزایش تنش خشکی، صفات رویشی مانند ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، وزن تر و خشک اندام هوایی و خصوصیات مختلف ریشه از قبیل حجم، طول و وزن تر و خشک ریشه در آویشن کاهش یافت (بابایی و همکاران، ۱۳۸۹). همچنین ارتفاع بوته رازیانه تحت تنش کاهش نشان داده است (Gheisari Zardak et al., 2017). آزمایشات مختلف نیز نشان داده که تنش خشکی به طور قابل توجهی پارامترهای رشد را در آویشن باغی (بابایی و همکاران، ۱۳۸۹؛ Amani Machiani et al., 2021)، آویشن دنایی (Bahreininejad et al., 2013)، بادرشبو (Ghanbarzadeh et al., 2020) کاهش داده است. از طرف دیگر، کاهش در خصوصیات رشد می‌تواند با کاهش در تغذیه عناصر معدنی در شرایط تنش خشکی مرتبط باشد (Amani Machiani et al., 2021). در مطالعه‌ای روی گیاه آویشن نتایج نشان داد که محتوای نیتروژن و فسفر و سایر عناصر درشت مغذی و ریز مغذی با اعمال تنش کم آبی شدید کاهش یافت. در این مطالعه بیشترین غلظت عناصر ریزمغذی و درشت مغذی در گیاهان بدون تنش به دست آمد (Amani Machiani et al., 2021) که با نتایج حاصل از تغذیه فسفر در آویشن باغی در این مطالعه هم‌خوانی داشت (جدول ۶). گزارش شده که سطوح تنش خشکی به طور قابل توجهی محتوای فسفر گیاهان همیشه بهار را در مقایسه با آبیاری نرمال کاهش داد (Asrar and Elhindi, 2011). همچنین، اعمال تیمارهای کم‌آبیاری اثر معنی‌داری بر غلظت فسفر برگ نشان داده و غلظت فسفر برگ رازیانه با افزایش شدت تنش خشکی کاهش یافت (Gheisari Zardak et al., 2017). کاهش انتقال عناصر غذایی به سطوح ریشه عمدتاً به دلیل تحرک محدود و فراهمی این عناصر آن‌ها در شرایط خشکی است (Ghanbarzadeh et al., 2020).

اثر تلقیح با میکوریزا

بهبود طول، حجم و وزن تر و خشک ریشه و همچنین تر و خشک اندام هوایی در آویشن شیرازی تحت تأثیر میکوریزا به بهبود جذب عناصر غذایی و جذب آب بیشتر توسط هیف‌ها[1] نسبت داده می‌شود (Gheisari Zardak et al., 2017). دو مکانیسم مهم برای اثرگذاری تلقیح با قارچ‌های میکوریزا برای افزایش دسترسی و جذب فسفر گزارش شده است: اول، افزایش جذب فسفر که توسط هیف‌های گسترده قارچ تسهیل شده و به آن‌ها اجازه می‌دهد تا حجم بیشتری از خاک را نسبت به ریشه‌های تلقیح نشده اشغال کنند (Ahanger et al., 2014; Begum et al., 2019). ثانیاً، افزایش زیست توده میکروبی در خاک میکوریزی منجر به افزایش محتوای CO_2 خاک می شود که در محلول خاک به H_2CO_3 تبدیل می‌شود. این اسید ضعیف می‌تواند مواد معدنی حاوی فسفر را حل کند و در نتیجه قابلیت دسترسی فسفر را افزایش دهد (Gholamhoseini et al., 2013). بنابراین، بهبود پارامترهای رشد گیاه و بهبود زیست توده آویشن با تلقیح میکوریزا می تواند به دلیل افزایش جذب عناصر درشت‌مغذی و ریزمغذی مانند N، P، K، Ca، Fe و Mg از طریق گسترش و توسعه میسلیوم‌های قارچ باشد. علاوه بر این، تولید بیشتر هورمون‌های رشد گیاهی مانند جیبرلین (متاثیر بر رشد طولی سلولی و عمدتاً میانگره‌های ساقه)، اکسین و سیتوکینین (موثر بر تقسیم سلولی) با تلقیح میکوریزایی مشاهده شده است که نقش مثبتی در بهبود عملکرد گیاه دارد (Begum et al., 2019). مطالعات نشان دادند که تلقیح با میکوریزا باعث افزایش زیست توده و عملکرد ماده خشک گونه‌های مختلف خانواده نعناع شد (Tarraf et al., 2015). گزارش شده که ارتفاع بوته و وزن اندام هوایی رازیانه توسط تلقیح با گونه‌های مختلف میکوریزا بهبود یافته است (Gheisari Zardak et al., 2017). همچنین، غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و آهن با کاربرد میکوریزا در مقایسه با شاهد افزایش یافته است (Amani Machiani et al., 2021). نتایج ما با نتایج دیگر مطالعات که گزارش کردند درصد کلونیزاسیون ریشه در آویشن تلقیح شده با میکوریزا به طور قابل توجهی در مقایسه با گیاهان غیر تلقیح شده بالاتر بود

[1] Hyphae

که منجر به رشد بیشتر گیاهان میکوریزایی شد، مطابقت دارد (Arpanahi and Feizian, 2019).

برهم‌کنش میکوریزا و تنش خشکی

در اکثر پارامترهای مورد اندازه‌گیری در آویشن باغی، تلقیح با میکوریزا تنها در شرایط نرمال آبیاری و بعضا در شرایط تنش ملایم منجر به بهبود حجم ریشه، وزن خشک ریشه، وزن تر و خشک اندام هوایی و کارایی مصرف آب شد و در شرایط تنش شدید (۵۰ درصد FC) اثر معنی‌داری بر افزایش صفات مذکور نسبت به عدم تلقیح نشد (جدول ۴). نتایج حاصل از ارزیابی کارایی تلقیح میکوریزا در شرایط آبیاری مختلف نیز نشان داد که اثربخشی تلقیح میکوریزا با افزایش شدت تنش به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد (شکل ۲). حتی این اثربخشی در شرایط تنش شدید در آویشن باغی منفی بود که نشان دهنده افت کارایی میکوریزا در شرایط محدودیت شدید آبیاری است. نتایج مطالعات نیز نشان داده است که محدودیت آبیاری باعث کاهش میزان کلونیزاسیون ریشه با قارچ میکوریزا می‌شود (Ghanbarzadeh et al., 2020). یکی از دلایل احتمالی می‌تواند محدودیت دسترسی به آب و ذخایر کربن برای رشد در این شرایط و در نتیجه محدودیت جوانه‌زنی اسپورهای قارچ در گیاهان میزبان باشد (Amiri et al., 2015). بنابراین تنش آبی می‌تواند موجب کاهش کارایی تلقیح میکوریزایی شده و در نتیجه اثربخشی آن را در شرایط تنش شدید خشکی کاهش دهد همان طور که در نتایج حاصله از مطالعه حاضر مشاهده شد.

در آویشن شیرازی نیز الگوی تقریبا مشابهی در روند تاثیر پذیری وزن خشک اندام هوایی مشاهده شد (جدول ۴). تلقیح با میکوریزا در شرایط نرمال با افزایش ارتفاع بوته و تعداد شاخه منجر به تولید زیست‌توده بالاتر شد. در شرایط تنش شدید نیز کاهش در تولید زیست‌توده می‌تواند به دلیل کاهش در پارامترهای رشد رویشی گیاه باشد. از طرف دیگر، بهبود خصوصیات ریشه در این شرایط می‌تواند تا حد زیادی با افزایش جذب عناصر غذایی منجر به بهبود رشد اندام هوایی شده و تولید زیست توده و کارایی مصرف آب را بهبود دهد (جدول ۴).

نسبت اندام هوایی به ریشه در شرایط نرمال تحت تأثیر تلقیح با میکوریزا قرار نگرفت که نشان می‌دهد در این شرایط گیاه توزیع مواد فتوسنتزی را به صورت متعادل بین ریشه و اندام هوایی انجام می‌دهد. اما در شرایط تنش شدید، تلقیح با میکوریزا نسبت اندام هوایی به ریشه را نسبت به عدم تلقیح کاهش داد. این نشان می‌دهد که هم‌زیستی با میکوریزا اثر بیشتری بر افزایش نسبت ریشه نسبت به ساقه در شرایط تنش شدید خشکی دارد. در شرایط عدم تلقیح، نسبت وزن ریشه نسبت به ساقه شدیدا کاهش یافت (جدول ۴). در همین زمینه گزارش شده که تنش رطوبتی باعث کاهش پارامترهای رشد آویشن باغی شد که این اثرات منفی توسط تلقیح با میکوریزا تا حدودی تخفیف داده شد و در صفات ریشه این نتایج آشکارتر بود (Arpanahi and Feizian, 2019).

گزارش شده که در مقایسه با عدم تلقیح، تلقیح با میکوریزا پارامترهای ریشه و اندام هوایی را تحت تنش آبی افزایش داده است. میکوریزا می تواند به طور مثبت در مکانیسم‌های حفاظتی مختلف برای مقابله با تنش خشکی استفاده شود. در مطالعه‌ای، گیاهان کاسنی تلقیح شده، مورفولوژی و فعالیت ریشه را در پاسخ به تنش خشکی توسعه دادند. علاوه بر این، قارچ میکوریزا باعث افزایش تحمل گیاه کاسنی به تنش خشکی شد که نتیجه جذب عناصر غذایی و تنظیم اسمزی، فعالیت‌های هورمونی و سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی است (Langeroodi et al., 2020). همچنین، گزارش شده که اگرچه تنش رطوبتی باعث کاهش پارامترهای رشد آویشن باغی شد، اما تلقیح با میکوریزا تا حدودی اثرات نامطلوب تنش آبی را کاهش داد (Arpanahi and Feizian, 2019). از طرفی، اثرات تلقیح میکروبی در این شرایط می‌تواند به دلیل افزایش محتوای کلروفیل و بهبود فعالیت فتوسنتزی باشد. با گسترش هیف‌ها و توسعه سیستم ریشه، میکوریزا می‌تواند آب بیشتری را برای گیاه فراهم کند که منجر به تولید و تجمع ماده خشک بیشتری در گیاه شده (Amiri et al., 2017) و از طرف دیگر می‌تواند کارایی مصرف آب را بهبود دهد همان‌طور که در نتایج مطالعه حاضر مشاهده شد (جدول ۴).

نتیجه افزایش قابل توجه زیست‌توده در انواع مختلف آویشن منجر به افزایش کارایی مصرف آب در شرایط نرمال و تلقیح با میکوریزا شد. همچنین در شرایط تنش ملایم، کارایی مصرف آب مشابهی با شرایط مذکور، مشاهده شد (جدول ۴) که عمدتا به دلیل کاهش میزان آب مصرفی و استفاده بهینه تر از آب موجود برای تولید زیست‌توده توسط

تلقیح میکوریزا بود. در مقابل، در شرایط عدم تلقیح، کمترین کارایی مصرف آب در هر دو نوع آویشن مشاهده شد که نشان می‌دهد در شرایط تلقیح با میکوریزا، آب با کارایی بالاتری مصرف شده است. با وجود کاهش آب مصرفی در شرایط آبیاری ۵۰ درصد FC (تنش شدید)، کارایی مصرف آب کاهش نشان داد که نشان می‌دهد در این شرایط تولید زیست‌توده تحت تأثیر کمبود آب قرار گرفته است (جدول ۴). در پژوهشی در آویشن دنایی، کارایی مصرف آب در سطوح متوسط تنش تفاوتی با شرایط نرمال نشان نداده است در حالی‌که با اعمال تنش شدید کاهش معنی‌داری را نشان داد (Bahreininejad et al., 2013). همچنین در مطالعه‌ای با بررسی سطوح مختلف آبیاری بر گونه‌های مختلف گیاهان خانواده نعناع، گزارش شد که کارایی مصرف آب در رزماری و آویشن با اعمال تنش کاهش یافت در حالی‌که در اسطوخدوس در بین تیمارهای مختلف تغییر معنی‌داری نشان نداد (Pirzad and Mohammadzadeh, 2018).

نتایج نشان داد که تلقیح با میکرویزا در شرایط تنش ملایم در بسیاری موارد با افزایش قابل توجه صفات مورد اندازه‌گیری نسبت به شرایط نرمال و عدم تلقیح برتری نشان داد و در برخی موارد تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۴). این نتایج از طرفی نشان می‌دهد که گونه‌های مختلف آویشن تا حد زیادی به شرایط کم آبیاری مقاوم بوده و می‌تواند در این شرایط عملکرد قابل توجهی تولید کند. از طرف دیگر نشان از پتانسیل قابل توجه قارچ میکوریزا در بهبود عملکرد در شرایط محدودیت آبیاری دارد و می‌توان از آن در بهبود بهره‌وری این گیاه استفاده کرد. در تایید این نتایج، در مطالعه‌ای گزارش شد که تلقیح گیاهان رازیانه با میکوریزا در شرایط تنش خشکی منجر به تولید عملکرد مشابه یا حتی بالاتر از رازیانه غیرمیکوریزایی آبیاری شده در شرایط نرمال شد (Gheisari Zardak et al., 2017). این نتایج نشان می‌دهد که با ارتباط بهینه هم‌زیستی قارچ‌های میکوریزا، گیاهان دارویی ظرفیت قابل‌توجهی برای تولید عملکردهای بالا، حتی در شرایط محدودیت آبی خواهند داشت.

به نظر می‌رسد اثر بهبود دهندگی میکوریزا تحت شرایط نرمال آبیاری و تنش خشکی بسته به گونه قارچ و گونه گیاهی، متفاوت باشد (Tarraf et al., 2015). به طور مشابه نتایج مطالعه حاضر نیز نشان داد که در برخی پارامترها، واکنش متفاوتی از دو نوع آویشن باغی و شیرازی مشاهده شد که مربوط به خصوصیات مختلف مورفولوژیکی این گیاهان از قبیل خصوصیات ریشه و اندام هوایی این گیاهان است که موجب تفاوت در جذب عناصر و تولید زیست‌توده خواهد شد (جداول ۴ و ۸). این مطالعه برای اولین بار به بررسی واکنش دو گونه آویشن با خصوصیات موروفولوژیکی متفاوت پرداخته است. به خصوص در آویشن شیرازی پژوهشی در زمینه به زراعی این گیاه مشاهده نشده است. بنابراین نتایج این پژوهش می‌تواند تا حدی دانش اولیه در بهبود کشت و کار این گیاه فراهم کرده و به تولید این گیاه ارزشمند بومی کشور کمک کند.

تغذیه فسفر

محتوای فسفر اندام هوایی آویشن باغی و شیرازی با اعمال تنش خشکی کاهش یافت (جدول ۶). در تایید این نتایج گزارش شد که جذب درشت مغذی‌هایی نظیرP، Ca و K در برگ‌های بادرشبو در شرایط کمبود آب کاهش یافته است (Ghanbarzadeh et al., 2020). کاهش انتقال عناصر غذایی به سطوح ریشه عمدتاً به دلیل تحرک محدود و فراهمی کمتر آن‌ها در شرایط خشکی است (Ghanbarzadeh et al., 2020).

علاوه براین، تلقیح با میکوریزا محتوای فسفر ریشه را در آویشن باغی افزایش داد (جدول ۷). افزایش جذب فسفر در گیاهان میکوریزایی نسبت به گیاهان تلقیح نشده می‌تواند به دلیل نقش هیف‌های میکوریز در گسترش ناحیه جذب در ریزوسفر باشد که انتقال عناصر خاک به سطوح ریشه گیاه را تسهیل می‌کند (Attarzadeh et al., 2019). در آویشن شیرازی، اعمال تنش در شرایط عدم تلقیح با میکوریزا محتوای فسفر ریشه را کاهش داد. به خصوص، درصد فسفر در شرایط تنش شدید و تلقیح با میکوریزابه طور قابل توجهی بهبود یافت (جدول ۸). در تایید این نتایج، گزارش شده که محتوای فسفر در گیاهان کاسنی تلقیح شده با میکوریزا بیشتر از گیاهان تلقیح نشده بود (Langeroodi et al., 2020). محتوای فسفر بیشتر در گیاه برای بهبود مستقیم تحمل به خشکی از طریق بهبود هدایت روزنه‌ای و افزایش تعرق پیشنهاد شده است (Gheisari Zardak et al., 2017). در تایید این نتایج، نشان داده شده است که ارتباط هم‌زیستی بین ریشه و قارچ میکوریزا باعث افزایش مقدار فسفر جذب شده توسط ریشه

گیاه در شرایط خشکی می‌شود (Ruiz-Lozano et al., 1995). در نتیجه افزایش جذب فسفر، گیاهان تلقیح شده با میکوریزا اغلب ماده خشک و عملکرد بیشتری نسبت به گیاهان تلقیح نشده تولید می‌کنند. علاوه بر این، بهبود جذب فسفر به دلیل حضور قارچ های میکوریزا در طول دوره کمبود آب به عنوان یک مکانیسم اولیه برای افزایش تحمل به خشکی گیاهان گزارش شده است (Bethlenfalvay et al., 1988). از طرف دیگر، این احتمال وجود دارد که هم‌زیستی میکوریزا بتواند منجر به افزایش انشعابات ریشه، جذب فسفر در واحد وزن ریشه و/یا انتقال فسفر به اندام هوایی گیاه را حتی در شرایط تنش خشکی بسیار شدید افزایش دهد. گزارش شده که غلظت بالاتر فسفر برگ در گیاهان میکوریزی در مقایسه با گیاهان غیر میکوریزی پس از تنش خشکی، نشان دهنده‌ی حفظ ظرفیت فتوسنتزی است که به مقاومت بیشتر گیاهان میکوریزی به خشکی نسبت داده می‌شود (Gheisari Zardak et al., 2017).

جذب فسفر اندام هوایی هر دو نوع آویشن در شرایط نرمال توسط تلقیح میکوریزایی بهبود یافت و در شرایط تنش میکوریزا اثری بر جذب فسفر نداشت. جذب فسفر ریشه اما الگوی متفاوتی نشان داد. در حالی که در آویشن باغی جذب فسفر در شرایط نرمال و تنش ملایم توسط تلقیح میکوریزایی بهبود یافت، در شرایط تنش شدید، تلقیح با میکوریزا از کارایی لازم جهت بهبود جذب فسفر برخوردار نبود. این در حالی بود که در آویشن شیرازی، در شرایط اعمال کم‌آبیاری (۷۵ و ۵۰ درصد FC) جذب فسفر توسط تلقیح میکوریزا بهبود یافت (جدول ۸). همین عامل می‌تواند یکی از عوامل مهم در کاهش نسبت اندام هوایی به ریشه (افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی) توسط تلقیح میکوریزایی باشد (جدول ۴). تفاوت بین انواع مختلف آویشن در جذب فسفر نیز مشاهده شد (جدول ۸). این تفاوت ممکن است به دلیل سیستم ریشه متفاوت در انواع مختلف آویشن باشد (جدول ۴).

نقش هم‌زیستی میکوریزا در جذب بیشتر آب و عناصر غذایی به احتمال زیاد این نتایج را توجیه می‌کند. در مطالعه‌ای گیاهان تلقیح شده با Glomus mosseae نسبت به گیاهان تلقیح شده با Glomus intraradices برای تولید زیست‌توده و عملکرد دانه در طول افزایش تنش خشکی (مخصوصاً تحت تیمارهای تنش خشکی متوسط و بسیار شدید) به طور موثرتری آب و مواد غذایی را جذب و مورد استفاده قرار می‌دهند (Gheisari Zardak et al., 2017). بنابراین، بهبود پارامترهای رشد گیاه و بهره‌وری آویشن پس از کاربرد میکوریزا در شرایط نرمال آبیاری و تنش ملایم می‌تواند به دلیل افزایش جذب فسفر از سیستم ریشه باشد. این نتایج با نتایج سایر محققان در مورد گیاه آویشن (Amani Machiani et al., 2021)، رازیانه (Gheisari Zardak et al., 2017) و بادرشبو (Ghanbarzadeh et al., 2020) مطابقت دارد.

در آویشن باغی کارایی بهره‌برداری فسفر در شرایط تنش افزایش و در شرایط تلقیح با میکوریزا کاهش یافت (جدول ۶ و ۷). در آویشن شیرازی، کارایی بهره‌برداری فسفر در شرایط تنش شدید خشکی و عدم تلقیح با میکوریزا افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که درصد بالاتری از فسفر جذب شده در این شرایط تبدیل به زیست‌توده می‌شود، اما در شرایط نرمال و تلقیح با میکوریزا به دلیل جذب بالای فسفر (جدول ۸)، درصد پایین تری به زیست‌توده تبدیل شده است. با وجود محتوای فسفر پایین‌تر در شرایط تنش شدید و عدم تلقیح، اما گیاه در این شرایط استفاده مؤثرتری از فسفر جذب شده داشته و همین عامل منجر به عدم مشاهده تفاوت معنی‌دار تولید زیست‌توده در شرایط تنش شدید بین گیاهان تلقیح شده و تلقیح نشده، شده است (جدول ۸).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که دو نوع گیاه آویشن در خصوصیات مختلف مورد اندازه‌گیری پاسخ نسبتاً متفاوتی به تیمارهای مورد بررسی نشان دادند که به واسطه خصوصیات مختلف مورفولوژیک آن‌ها بود. براساس خصوصیات مختلف ریشه و اندام هوایی، بهترین نتایج از شرایط نرمال و آبیاری ۷۵ درصد FC در تلقیح با میکوریزا حاصل شد که به دلیل بهبود جذب فسفر اندام هوایی هر دو نوع آویشن در شرایط نرمال توسط تلقیح میکوریزایی بود و در نهایت منجر به افزایش کارایی مصرف آب در این شرایط شد. با این وجود، در شرایط تنش، میکوریزا اثری بر جذب فسفر اندام هوایی نداشت. جذب فسفر ریشه در شرایط نرمال و تنش ملایم توسط تلقیح میکوریزایی بهبود یافت اما در شرایط تنش شدید، تلقیح با میکوریزا از کارایی لازم جهت بهبود جذب

فسفر برخوردار نبود. با این وجود، تلقیح با میکوریزا در شرایط تنش ملایم در بسیاری موارد با افزایش قابل توجه صفات مورد اندازه‌گیری نسبت به شرایط نرمال و عدم تلقیح برتری نشان داد و در برخی موارد تفاوت معنی‌داری نشان نداد. این نتایج از طرفی نشان می‌دهد که گونه‌های مختلف آویشن تا حد زیادی به شرایط کم‌آبیاری مقاوم بوده و می‌تواند در این شرایط عملکرد قابل توجهی تولید کند. از طرف دیگر نشان از پتانسیل قابل توجه قارچ میکوریزا در بهبود عملکرد در شرایط محدودیت آبیاری دارد و می‌توان از آن در بهبود بهره‌وری این گیاه استفاده کرد.

منابع

بابایی، ک.، م. امینی دهقی، س. ع. مدرس ثانوی و ر. جباری. ۱۳۸۹. اثر تنش خشکی بر صفات مورفولوژیک، میزان پرولین و درصد تیمول در آویشن (*Thymus vulgaris* L.). تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، ۲۶(۲): ۲۳۹-۲۵۱.

زرین ترنج، ع. ا.، غ. خواجویی نژاد و ج. قنبری. ۱۴۰۲. بررسی فتوسنتز، رشد و کارایی مصرف آب گیاه شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra* L.) تحت تأثیر پرایمینگ با جیبرلیک اسید و تلقیح با میکوریزا در شرایط کم‌آبیاری. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۵۲: ۳۴۷-۳۶۷.

علیزاده، ا. ۱۳۹۰. رابطه آب و خاک و گیاه (ویرایش سوم). انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). چاپ سیزدهم. ۶۱۶ ص.

Ahanger, M.A., A. Hashem, E.F. Abd-Allah and P.Ahmad. 2014. Arbuscular Mycorrhiza in Crop Improvement under Environmental Stress. In P. Ahmad and S. Rasool (Eds.), Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance (pp. 69–95). San Diego: Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800875-1.00003-X

Alavi-Samani, S.M., M.A. Kachouei and A.G. Pirbalouti. 2015. Growth, yield, chemical composition, and antioxidant activity of essential oils from two thyme species under foliar application of jasmonic acid and water deficit conditions. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 56: 411–420. https://doi.org/10.1007/s13580-015-0117-y

Amani Machiani, M., A. Javanmard, M.R. Morshedloo, A. Aghaee and F. Maggi. 2021. Funneliformis mosseae inoculation under water deficit stress improves the yield and phytochemical characteristics of thyme in intercropping with soybean. Scientific Reports, 11(1): 15279. https://doi.org/10.1038/s41598-021-94681-9

Amiri, R., A. Nikbakht and N. Etemadi. 2015. Alleviation of drought stress on rose geranium [Pelargonium graveolens (L.) Herit.] in terms of antioxidant activity and secondary metabolites by mycorrhizal inoculation. Scientia Horticulturae, 197: 373–380. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.062

Arpanahi, A.A. and M. Feizian. 2019. Arbuscular mycorrhizae alleviate mild to moderate water stress and improve essential oil yield in thyme. Rhizosphere, 9: 93–96. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2018.10.003

Asrar, A.-W.A. and K. M. Elhindi. 2011. Alleviation of drought stress of marigold (Tagetes erecta) plants by using arbuscular mycorrhizal fungi. Saudi Journal of Biological Sciences, 18(1): 93–98. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2010.06.007

Attarzadeh, M., H. Balouchi, M. Rajaie, M. Movahhedi Dehnavi and A. Salehi. 2019. Improvement of Echinacea purpurea performance by integration of phosphorus with soil microorganisms under different irrigation regimes. Agricultural Water Management, 221: 238–247. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.022

Bahreininejad, B., J. Razmjou and M. Mirza. 2013. Influence of water stress on morpho-physiological and phytochemical traits in Thymus daenensis. International Journal of Plant Production, 7(1): 151-166. https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.927

Bardi, L. and E. Malusà. 2012. Drought and nutritional stresses in plant: alleviating role of rhizospheric microorganisms. In Abiotic stress: New research (pp. 1–57). Nova Science Publishers Inc, Hauppauge.

Begum, N., C. Qin, M.A. Ahanger, S. Raza, M.I. Khan, M. Ashraf, … L. Zhang. 2019. Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance.

Frontiers in Plant Science, 10: 1–15. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068
Bethlenfalvay, G.J., M.S. Brown, R.N. Ames and R. S. Thomas. 1988. Effects of drought on host and endophyte development in mycorrhizal soybeans in relation to water use and phosphate uptake. Physiologia Plantarum, 72(3): 565–571.
Ghanbari, J. and G. Khajoei-Nejad. 2022. Relationships between growth indices, dry matter production, and nutrient use efficiency in saffron: Integrative effect of mycorrhizal inoculation and nutrient resources. Journal of Plant Nutrition, 45(14): 2077–2095. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2063138
Ghanbarzadeh, Z., S. Mohsenzadeh, V. Rowshan and M. Zarei. 2020. Mitigation of water deficit stress in Dracocephalum moldavica by symbiotic association with soil microorganisms. Scientia Horticulturae, 272: 109549.
Gheisari Zardak, S., M. Movahhedi Dehnavi, A. Salehi and M. Gholamhoseini. 2017. Responses of field grown fennel (Foeniculum vulgare Mill.) to different mycorrhiza species under varying intensities of drought stress. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 5: 16–25. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2016.09.004
Gholamhoseini, M., A. Ghalavand, A. Dolatabadian, E. Jamshidi and A. Khodaei-Joghan. 2013. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on growth, yield, nutrient uptake and irrigation water productivity of sunflowers grown under drought stress. Agricultural Water Management, 117: 106–114. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.007
Kim, Y.-C., B.R. Glick, Y. Bashan and C.-M. Ryu. 2012. Enhancement of plant drought tolerance by microbes. In Plant responses to drought stress (pp. 383–413). Springer.
Kuete, V. 2017. Thymus vulgaris. Medicinal spices and vegetables from Africa, pp. 599-609.
Langeroodi, A. R. S., Osipitan, O. A., Radicetti, E., and Mancinelli, R. 2020. To what extent arbuscular mycorrhiza can protect chicory (Cichorium intybus L.) against drought stress. Scientia Horticulturae, 263: 109109. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109109
Mills, H.A., J.B. Jones and J. Benton. 1996. Plant analysis handbook II.
Pirzad, A. and S. Mohammadzadeh. 2018. Water use efficiency of three mycorrhizal Lamiaceae species (Lavandula officinalis, Rosmarinus officinalis and Thymus vulgaris). Agricultural Water Management, 204: 1–10. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.020
Ruiz-Lozano, J.M., M. Gómez and R. Azcón. 1995. Influence of different Glomus species on the time-course of physiological plant responses of lettuce to progressive drought stress periods. Plant Science, 110(1): 37–44.
Sajed, H., A. Sahebkar and M. Iranshahi. 2013. Zataria multiflora Boiss. (Shirazi thyme)—An ancient condiment with modern pharmaceutical uses. Journal of Ethnopharmacology, 145(3): 686–698. https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.12.018
Tarraf, W., C. Ruta, F. De Cillis, A. Tagarelli, L. Tedone and G. De Mastro. 2015. Effects of mycorrhiza on growth and essential oil production in selected aromatic plants. Italian Journal of Agronomy, 10(3): 160–162.
Tohidi, B., M. Rahimmalek and H. Trindade. 2019. Review on essential oil, extracts composition, molecular and phytochemical properties of Thymus species in Iran. Industrial Crops and Products, 134: 89–99. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.038