Research Paper

Investigation of Photosynthesis, Growth, and Water Use Efficiency of Licorice (Glycyrrhiza glabra L.) Plant Affected by Gibberellic Acid Priming and Mycorrhiza Inoculation under Water-Limited Conditions

Ali Asghar Zarrin-Torang [1], Gholamreza Khajoei-Nejad [2*], Jalal Ghanbari [3]

[1] MSc Student in Agronomy- Crop Ecology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
[2] Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
[3] Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.

10.22125/IWE.2023.173324

Received:
October 8, 2022
Accepted:
March 2, 2023
Available online:
June 25, 2023

Keywords:
Hormone, irrigation regime, licorice, root yield, symbiotic fungus, water productivity.

Abstract

Licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) is an important medicinal plant as it accumulates active ingredients, glycyrrhizin and liquiritin, in its roots. In the present study, mycorrhizal fungus inoculation (no inoculation and inoculation with *Funneliformis mosseae*) and gibberellic acid (GA) priming (no priming and priming with 1000 mg L^{-1}) effects on growth, photosynthesis, and different characteristics of licorice root under different water regimes (100% of field capacity (FC), 65% FC, and 30% FC) were investigated. The results showed that among different irrigation levels, only the application of 30% FC led to a significant decrease in the shoot morphological characteristics, leaf chlorophyll content (SPAD), shoot dry weight, transpiration rate, net photosynthesis rate, and root length. While the application of 65% FC not only showed no significant decrease in most of the mentioned characteristics compared with 100% FC but also improved the photosynthesis parameters. Priming with GA at the 30% FC led to an improvement in photosynthetic water use efficiency compared to no pre-treatment. Also, GA increased plant height and root length, especially in combination with mycorrhizal inoculation. Inoculation with mycorrhiza improved chlorophyll content, shoot dry weight, and photosynthesis rate. Also, inoculation with mycorrhiza under 100% FC and 30% FC improved photosynthesis and photosynthetic water use efficiency. Inoculation with mycorrhiza also under 100% irrigation, and the integrated application of mycorrhiza inoculation and GA priming in 60% FC caused a significant increase in leaf area, root volume, root

* **Corresponding Author:** Gholamreza Khajoei-Nejad
Address: Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
Email: khajoei@uk.ac.ir
Tel: +989131406512

yield, and agricultural water use efficiency. Such results can be used in developing and promoting licorice cultivation based on water availability.

1. Introduction

Licorice (Glycyrrhiza glabra L.), Fabaceae family, is an important medicinal plant as it accumulates active ingredients, glycyrrhizin and liquiritin, in its roots. This drought-tolerant native crop grows well under harsh environments and shows excellent adaptation potential in desert areas.

Abiotic stress such as drought is one of the major environmental factors affecting the survival rate and inhibits plant growth and development rendering a drastic decline in crop yield (Liu et al., 2022). To some extent, pretreatment with gibberellic acid (GA) has been reported to enhance licorice early growth (Ghanbari et al., 2021) and the plants' tolerance capability (Ulfat et al., 2017). Arbuscular mycorrhizal (AM) symbiosis could also potentially alleviates harmful consequences of drought stress in plants through different mechanisms (Hao et al., 2019; Xie et al., 2018).

2. Materials and Methods

In the present study, mycorrhizal inoculation (no inoculation and inoculation with Funneliformis mosseae) and gibberellic acid (GA) pretreatment (no pretreatment and pretreatment with 1000 mg L-1) effects on growth, photosynthesis, and different characteristics of licorice root under different water regimes (normal; 100% of field capacity (FC), moderately limited irrigation; 65% FC and severely limited irrigation; 30% FC) were investigated.

Before harvesting, different photosynthesis parameters were measured in 2 leaves of each plant using a portable photosynthesis system (LCi-T, ADC BioScientific LTD., UK) and the photosynthetic water use efficiency (WUEP) was calculated. Then the plants of each pot were completely harvested and plant height, leaf area, shoot dry weight, root volume, and root yield were evaluated.

3. Results

The results showed that among different irrigation levels, only the application of 30% FC led to a significant decrease in the shoot morphological characteristics, leaf chlorophyll content (SPAD), shoot dry weight, transpiration rate, net photosynthesis rate, and root length. While the application of moderately limited irrigation not only showed no significant decrease in most of the mentioned characteristics compared with 100% FC but also improved the photosynthesis parameters. Pre-treatment with GA at the severely limited irrigation led to an improvement in photosynthetic water use efficiency compared to no pre-treatment. Also, GA increased plant height and root length, especially in combination with AM inoculation. Inoculation with AM improved chlorophyll content, shoot dry weight, and photosynthesis rate. Also, inoculation with AM under normal irrigation and severely limited irrigation improved photosynthesis and photosynthetic water use efficiency. Inoculation with AM also under normal irrigation conditions and the integrated application of AM inoculation and GA pretreatment in moderately limited irrigation conditions caused a significant increase in leaf area, root volume, root yield, and agricultural water use efficiency.

4. Discussion and Conclusion

It seems that the effective roles of GA and AM in improving the plant's growth under water deficit conditions are related to the role of each treatment in improving photosynthesis and leaf area. For example, it has been reported that the application of GA has improved the early growth of seedlings, the number of leaves, the number of compound leaves, and the leaf area of licorice plants compared to the untreated plants (Ghanbari et al., 2021). AM-inoculation has been reported to improve photosynthesis and growth of licorice under drought stress (Akhzari, 2015; Hao et al., 2019; Xie et al., 2018). The positive effect of integrated treatment of AM and GA in limited irrigation, in addition to the above-mentioned reasons, can be due to increasing root length and root volume which in turn leads to more root yield.

From the obtained results it can be concluded that seeds pretreatment with GA and AM-inoculation might be used as possible practices to improve the growth and production of licorice in water-limited conditions. Field studies should test the effectiveness of different sustainable strategies in combination with proper water management in promoting licorice cultivation in arid and semi-arid regions.

5. Six important references

1) Akhzari, D. 2015. Response of Glycyrrhiza glabra L. to arbuscular mycorrhizal fungi and water stress. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 18(4): 992–1002.
2) Ghanbari, J., M. Besharati-Far, G. Khajoei-Nejad. 2021. Response of seed germination and seedling growth of licorice to chemical scarification and gibberellic acid levels. Journal of Crops Improvement. 24 (4): 1311-1324. https://doi.org/10.22059/jci.2021.328615.2595
3) Hao, Z., W. Xie, X. Jiang, Z. Wu, X. Zhang and B. Chen. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungus improves rhizobium–glycyrrhiza seedling symbiosis under drought stress. Agronomy, 9(10): 572.
4) Liu, X., W. Quan and D. Bartels. 2022. Stress memory responses and seed priming correlate with drought tolerance in plants: an overview. Planta, 255: 45.
5) Ulfat, A., S.A. Majid, A. Hameed. 2017. Hormonal seed priming improves wheat (Triticum aestivum L.) field performance under drought and non-stress conditions. Pakistan Journal of Botany, 49: 1239–1253.
6) Xie, W., Z. Hao, X. Zhou, X. Jiang, L. Xu, S. Wu, A. Zhao, X. Zhang and B. Chen, 2018. Arbuscular mycorrhiza facilitates the accumulation of glycyrrhizin and liquiritin in Glycyrrhiza uralensis under drought stress. Mycorrhiza, 28: 285–300.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال سیزدهم. شماره پنجاه و دو . تابستان 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

علی اصغر زرین‌ترنج[۱]، غلامرضا خواجویی نژاد[۲] و جلال قنبری[۳]

تاریخ ارسال:۱۴۰۱/۰۷/۱۶
تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۱۲/۱۱

مقاله پژوهشی

چکیده

شیرین بیان (Glycyrrhiza glabra L.) به دلیل تجمع گلیسیریزین و لیکویریتین در ریشه، یکی از مهم‌ترین گیاهان دارویی است. در مطالعه حاضر، اثر سطوح تلقیح قارچ میکوریزا (عدم تلقیح و تلقیح با Funneliformis mosseae) و پرایمینگ بذر با هورمون جیبرلیک اسید (عدم پرایمینگ و پرایمینگ با غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بر رشد، فتوسنتز و خصوصیات مختلف ریشه شیرین بیان تحت رژیم‌های آبی مختلف (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (FC)، ۶۵ درصد FC و ۳۰ درصد FC) بررسی شد. نتایج نشان داد که تنها اعمال سطح کم‌آبیاری ۳۰ درصد FC منجر به کاهش ویژگی‌های موفولوژیک اندام هوایی، محتوای کلروفیل برگ، وزن خشک اندام هوایی، سرعت تعرق و میزان فتوسنتز خالص و طول ریشه شد. این در حالی بود که اعمال ۶۵ درصد ظرفیت زراعی نه تنها در بسیاری از این ویژگی‌ها نسبت به آبیاری ۱۰۰ درصد کاهش معنی‌داری نشان نداد بلکه پارامترهای فتوسنتز را نیز بهبود داد. پرایمینگ با جیبرلیک اسید در سطح کم‌ابیاری ۳۰ درصد منجر به بهبود کارایی مصرف آب فتوسنتزی در مقایسه با عدم پرایمینگ شد. همچنین، ارتفاع بوته و طول ریشه را به خصوص در شرایط تلقیح با میکوریزا افزایش داد. تلقیح با میکوریزا موجب بهبود محتوای کلروفیل، وزن خشک اندام هوایی و میزان فتوسنتز شد. همچنین تلقیح با میکوریزا در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد FC و کم‌آبیاری ۳۰ درصد موجب بهبود فتوسنتز و کارایی مصرف آب فتوسنتزی شد. در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد، تلقیح با میکوریزا و در شرایط کم‌آبیاری ۶۵ درصد کاربرد همزمان میکوریزا و جیبرلیک اسید موجب افزایش معنی‌دار سطح برگ، حجم ریشه، عملکرد ریشه و کارایی زراعی مصرف آب شد که می‌تواند در فرایند توسعه و ترویج کشت شیرین بیان با توجه به شرایط مختلف دسترسی به آب مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری مصرف آب، رژیم آبیاری، شیرین بیان، عملکرد ریشه، قارچ همزیست، هورمون

.

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۰۹۱۳۱۹۹۰۷۲۸، mr.a.zarrin60@gmail.com

[۲] دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۰۹۱۳۱۴۰۶۵۱۲، khajoei@uk.ac.ir (نویسنده مسئول)

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

مقدمه

شیرین بیان (Glycyrrhiza glabra L.) یکی از رایج‌ترین گیاهان دارویی است که کاربرد آن به‌عنوان دارو در طب سنتی سابقه طولانی دارد. شیرین بیان خلط آور، ملین و مقوی است و ریشه آن در درمان بیماری آدیسون[1]، آسم، برونشیت، سرفه، زخم معده، آرتریت و حساسیت مصرف می‌شود (Lim, 2016). ریشه شیرین بیان حاوی گلیسیریزین است، ماده ای که ۵۰ برابر شیرین تر از ساکارز است (Hayashi and Sudo, 2009). علاوه بر کاربردهای دارویی، شیرین بیان به واسطه مقاومت به خشکی و داشتن ریشه‌های عمیق به‌عنوان بادشکن عمل کرده و برای تثبیت ماسه و تشکیل خاک بسیار حائز اهمیت است. از این جهات آن را هدیه طبیعت برای اکوسیستم‌های نیمه‌خشک می‌دانند (Öztürk et al., 2017).

با اینکه شیرین بیان به صورت خودرو در بسیاری مناطق ایران یافت می‌شود، اما برداشت ریشه آن به‌طور عمده از چهار استان فارس، کرمان، کهکیلویه و بویراحمد و کرمانشاه صورت می‌گیرد (خان‌احمدی و همکاران، ۱۳۹۲). با این حال، افزایش تقاضا برای شیرین بیان در بازار جهانی و برداشت بیش از حد این گیاه در بسیاری کشورها از جمله ایران منجر به فرسایش ذخایر وحشی و همچنین تسریع فرآیند بیابان‌زایی شده است (Liu et al., 2007). بنابراین، پرداختن به روش‌های بوم سازگار جهت تولید این گیاه ارزشمند در این مناطق می‌تواند تا حدی در رفع مشکلات ذکر شده مؤثر باشد.

کمبود آب به‌عنوان یک معضل زیست‌محیطی و اجتماعی، عملکرد محصولات را محدود کرده است. مطالعات بسیاری به بررسی راه‌کارهایی برای کاهش میزان آب آبیاری بدون افت معنی‌دار عملکرد در مناطق خشک جهان پرداخته‌اند. امروزه این مشکل در کشورهای دارای اقلیم معتدل نیز در حال افزایش است و توجه بیشتری را به روش‌های بیوتکنولوژیکی یا زراعی جهت افزایش بهره‌وری مصرف آب در گیاهان، جلب کرده است (Bardi and Malusà, 2012). به‌نظر می‌رسد شیرین بیان گیاهی است که تا حدی به کم‌آبی مقاوم باشد. مشاهدات بیانگر این است که کم‌آبی خفیف باعث تحریک رشد و عملکرد ریشه شده اما تشدید سطح تنش خشکی کاهش شدید عملکرد را در پی داشته است (Khaitov et al., 2022).

بقا و رشد گیاهان در خاک‌های خشک و نیمه خشک تا حد زیادی به فعالیت جمعیت‌های میکروبی بستگی دارد (Liu et al., 2007; Öztürk et al., 2017). جمعیت‌های میکروبی فعال در کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه به‌طور عمده شامل قارچ‌های آربوسکولار میکوریزا و ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه هستند (Bardi and Malusà, 2012). هیف‌های میکوریزا می‌توانند به منافذی از خاک نفوذ کنند که به دلیل قطر بسیار کوچک برای ریشه‌های مویین غیرقابل دسترسی است. بنابراین، گیاهان میکوریزایی قادر به جذب حجم بیشتری آب از خاک نسبت به گیاهان غیر میکوریزایی هستند (Bardi and Malusà, 2012). علاوه بر افزایش جذب آب، گیاهان میکوریزایی به واسطه ایجاد پتانسیل اسمزی و فعالیت آنزیمی بالاتر، تحمل بالاتری نسبت به تنش خشکی نشان می‌دهند (Bardi and Malusà, 2012; Ruiz-Lozano, 2003). اخضری (Akhzari, 2015) اثر سطوح مختلف آبیاری (۱۰۰ ، ۸۰ ، ۶۰ ، ۴۰ و ۲۰ درصد ظرفیت زراعی(FC)) و قارچ میکوریزا را در یک آزمایش گلدانی روی گیاه شیرین بیان بررسی و گزارش کرد که بیشترین سطح برگ، ارتفاع بوته و وزن خشک اندام هوایی در تیمار قارچ میکوریزا در ۱۰۰ درصد FC و بیشترین طول و وزن خشک ریشه در تیمار میکوریزا در سطح ۸۰ درصد FC مشاهده شد. همچنین، گیاهان میکوریزایی به‌طور کلی رشد، هدایت روزنه‌ای، سرعت فتوسنتز و کارایی مصرف آب بالاتری در مقایسه با گیاهان غیرمیکوریزایی در شرایط مختلف تنش خشکی نشان دادند (Xie et al., 2018). به طور مشابه، تلقیح با قارچ میکوریزا در بهبود رشد و افزایش تحمل به خشکی شیرین بیان موثر گزارش شده است (Hao et al., 2019).

امروزه پرایمینگ بذر به‌عنوان یک روش ساده، ارزان، مؤثر و عملی برای بهبود رشد و عملکرد گیاهان در شرایط

[1] Addison’s disease

تنش‌های غیرزیستی مطرح شده است که منجر به بهبود جوانه‌زنی بذر و افزایش رشد گیاهچه و تولید محصول (Sahoo et al., 2019) و همچنین کاهش اثرات منفی تنش کم آبی (Liu et al., 2022) می‌شود. اسید جیبرلیک (GA_3) به صورت پرایمینگ به‌طور گسترده برای بهبود سرعت جوانه‌زنی، رشد گیاهچه و در نتیجه عملکرد گیاهان استفاده شده است. همچنین، علاوه بر بهبود جوانه‌زنی بذر، موجب گسترش برگ، افزایش طول ساقه و گل‌دهی در گیاهان می‌شود (Ulfat et al., 2017).

در مطالعات مختلف غلظت‌های مختلف جیبرلیک اسید منجر به بهبود رشد و عملکرد گیاهان مختلف در شرایط تنش خشکی شده است (Khan et al., 2020; Shariatmadari et al., 2017; Zhu et al., 2021). تیمار با جیبرلیک اسید با غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث بهبود جوانه‌زنی و افزایش سرعت رشد اولیه و وزن ریشه شیرین بیان در مقایسه با عدم پیش تیمار شده است (قنبری و همکاران، ۱۴۰۱). در پژوهشی، پرایمینگ بذر کلزا با جیبرلیک اسید در شرایط تنش خشکی در مزرعه و گلخانه بررسی و نتایج بیانگر این بود که گیاهان پرایم شده با GA_3 کاهش کمتری در صفات مورفولوژیکی، عملکرد و اجزای عملکرد دانه تحت تنش خشکی در مقایسه با گیاهان پرایم نشده نشان دادند (Khan et al., 2020). همچنین، پرایمینگ بذر نخود با اسید جیبرلیک به‌طور چشم‌گیری اثرات نامطلوب خشکی را کاهش داد. البته این اثر مثبت در سطوح بالاتر تنش نسبت به شرایط نرمال بارزتر بود. به‌طور کلی با افزایش غلظت هورمون، شاخص‌های سبز شدن و رشد گیاه نیز بهبود یافت (Shariatmadari et al., 2017).

نتایج مطالعات مختلف نشان دهنده‌ی اثر بهبود دهندگی پرایمینگ با جیبرلیک اسید و کاربرد میکوریزا در شرایط کم‌آبی است. با این وجود، اثر کاربرد تلفیقی آن‌ها بر عملکرد و صفات مختلف رشد به‌خصوص در شیرین بیان مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به کمبود منابع آب در کشور، بررسی اثر همزمان آن‌ها در شرایط تنش خشکی می‌تواند برای تولید شیرین بیان در این شرایط مؤثر باشد.

مواد و روش‌ها

شرایط آزمایش و تیمارهای مورد بررسی

این تحقیق در آزمایشگاه و گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان در طول بهار و تابستان ۱۴۰۰ انجام شد. تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با ۴ تکرار اجرا شد. تیمارهای مورد بررسی شامل، سطوح مختلف آبیاری (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی ، ۶۵ درصد ظرفیت زراعی و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی)، و تیمار قارچ میکوریزا در دو سطح تلقیح و عدم تلقیح خاک هر گلدان با قارچ مایکوریزا (Funneliformis mosseae) و کاربرد سطوح جیبرلیک اسید در دو سطح پرایمینگ با جیبرلیک اسید ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و عدم پرایمینگ (آب مقطر) بود. غلظت مورد بررسی بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش اولیه از بین غلظت‌های مختلف پرایمینگ با جیبرلیک اسید در این زمینه انتخاب و به منظور تحقیق بیشتر در مورد اثر بر رشد گیاه شیرین بیان تحت شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار گرفت (قنبری و همکاران، ۱۴۰۱).

به منظور حذف پوسته سخت، بذرهای شیرین بیان به مدت ۵۰ دقیقه با سولفوریک اسید غلیظ (Merck, 95-97%) پرایمینگ و پس از شستشو، بذرها با آب مقطر و جیبرلیک اسید به مدت ۲۴ ساعت تیمار شد (قنبری و همکاران، ۱۴۰۱). تعداد ۴۸ گلدان (سایز ۷) با مخلوط خاک الک شده مزرعه و شن به نسبت ۱:۳ پر شده و بذرهای تیمار نشده و پرایمینگ شده با جیبرلیک اسید در عمق ۲ سانتی‌متری کشت شدند.

تیمار میکوریزا برای هر گلدان میزان ۵۰ گرم مایه تلقیح (۱۲۰ اسپور در گرم) در بستر کشت بذر اعمال شد. گلدان‌ها در محیط گلخانه قرار گرفته و به‌طور منظم تا اطمینان از استقرار کامل گیاه (مرحله ۴ برگ انشعاب یافته از ساقه اصلی) در حد ظرفیت زراعی آبیاری شد. پس از استقرار کامل گیاه، اعمال سطوح آبیاری براساس توزین منظم گلدان‌ها انجام و براساس از دست رفتن رطوبت، مقدار آب آبیاری تا رساندن به ظرفیت زراعی مورد نظر در سطوح ۱۰۰، ۶۵ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی تنظیم شد.

صفات مورد بررسی

قبل از برداشت، میزان فتوسنتز خالص (Pn)، سرعت تعرق برگ (Tr) و CO_2 بین سلولی در ۲ برگ هر بوته با استفاده از سیستم فتوسنتز قابل حمل (LC*i-T*, ADC BioScientific LTD., UK) اندازه‌گیری شد. اندازه گیری ها در ساعت بین ۱۰ تا ۱۲ انجام شد. در نهایت، راندمان مصرف آب فتوسنتزی (WUE_P) با توجه به معادله زیر محاسبه شد:

$$WUE_P = Pn / Tr$$

همچنین کارایی زراعی مصرف آب (WUE_A) نیز پس از تعیین عملکرد ریشه و میزان آب مصرفی برای هر تیمار براساس معادله زیر محاسبه شد:

$$WUE_A = RY / WC$$

RY: عملکرد ریشه (میلی‌گرم) و WC: میزان آب مصرفی برای هر تیمار (لیتر).

به منظور ارزیابی پارامترهای رشد ریشه و اندام هوایی، گیاهان هر گلدان به طور کامل برداشت شد و ارتفاع بوته، تعداد و سطح برگ، وزن خشک ساقه، حجم ریشه و عملکرد ریشه مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور تعیین وزن خشک، بوته‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شد. حجم ریشه با توجه به جابجایی سطح آب در یک استوانه مدرج حاوی حجم معینی از آب اندازه‌گیری شد. سپس ریشه‌ها آب‌گیری شده و توسط ترازو جهت تعیین عملکرد ریشه، وزن شدند.

آنالیزهای آماری

به منظور بررسی اختلاف آماری بین تیمارهای مورد بررسی، تجزیه واریانس با استفاده از نرم افزار SAS ver. 9.0 انجام و میانگین‌ها توسط آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد (LSD، $P< ۰/۰۵$) مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

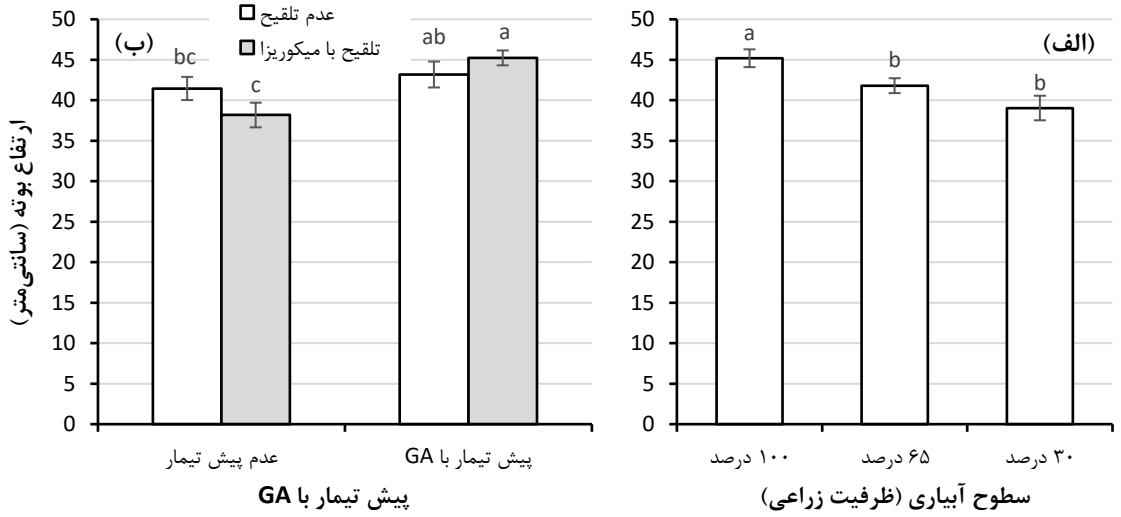
ویژگی‌های مورفولوژیک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از ویژگی‌های مورفولوژیک اندام هوایی نشان داد که ارتفاع بوته تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری، کاربرد جیبرلیک اسید و برهم‌کنش جیبرلیک اسید و میکوریزا قرار گرفت (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اعمال کم‌آبیاری منجر به کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته شد در حالی‌که بین سطوح کم‌آبیاری (۶۵ و ۳۰ درصد FC) تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۱-الف). همچنین نتایج نشان داد که کاربرد همزمان جیبرلیک اسید و میکوریزا اثرات منفی تلقیح با میکوریزا را بر ارتفاع بوته در شرایط عدم پرایمینگ با جیبرلیک اسید جبران نمود (شکل ۱-ب). به طور کلی، کاربرد جیبرلیک اسید به‌خصوص در شرایط تلقیح با میکوریزا، اثر مثبتی بر ارتفاع بوته شیرین بیان داشت و ارتفاع بوته را افزایش داد (شکل ۱-ب).

جدول (۱): نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف آبیاری، پرایمینگ با جیبرلیک اسید و تلقیح میکوریزایی و برهم‌کنش آن‌ها بر خصوصیات مورفولوژیک اندام هوایی و محتوای کلروفیل برگ شیرین بیان

منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع ساقه	سطح برگ	شاخص کلروفیل	وزن خشک اندام هوایی
رژیم آبیاری	۲	۱۵۱/۸**	۱۷۴۱۶**	۵۲/۴۲*	۲/۷۰**
جیبرلیک اسید	۱	۲۳۱/۳**	۱۹۳۸*	۲۳۶/۶**	۰/۲۰۴^{ns}
میکوریزا	۱	۴/۵۲^{ns}	۱۳۴۶۶**	۴۳۱/۶**	۰/۹۳۹*
رژیم آبیاری×جیبرلیک اسید	۲	۴۱/۲^{ns}	۱۳۱۵^{ns}	۸/۸۸^{ns}	۰/۱۵۷^{ns}
رژیم آبیاری×میکوریزا	۲	۱/۹۶^{ns}	۱۳/۵۳^{ns}	۳/۹۵^{ns}	۰/۲۴۶^{ns}
جیبرلیک اسید×میکوریزا	۱	۸۵/۰*	۳/۴۱^{ns}	۴۴/۲۸^{ns}	۰/۰۸۱^{ns}
رژیم آبیاری×جیبرلیک اسید×میکوریزا	۲	۹/۴۳^{ns}	۱۳۶۷*	۴/۳۵^{ns}	۰/۱۵۴^{ns}
خطا	۳۶	۱۷/۱۹	۴۱۷/۵	۱۳/۰۴	۰/۱۵۳
ضریب تغییرات (درصد)	-	۹/۸۷	۱۵/۲	۸/۵۴	۲۶/۷

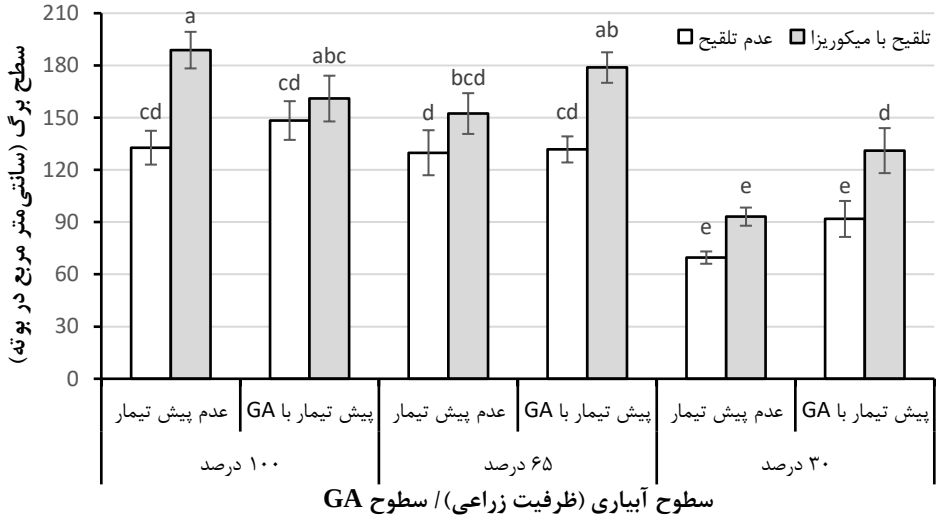
**: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، *: معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، ^{ns}: غیر معنی‌دار



شکل (۱): مقایسه میانگین ارتفاع بوته شیرین بیان در سطوح مختلف آبیاری (الف) و تحت تأثیر برهمکنش پرایمینگ با جیبرلیک اسید (GA) و تلقیح با میکوریزا (ب).

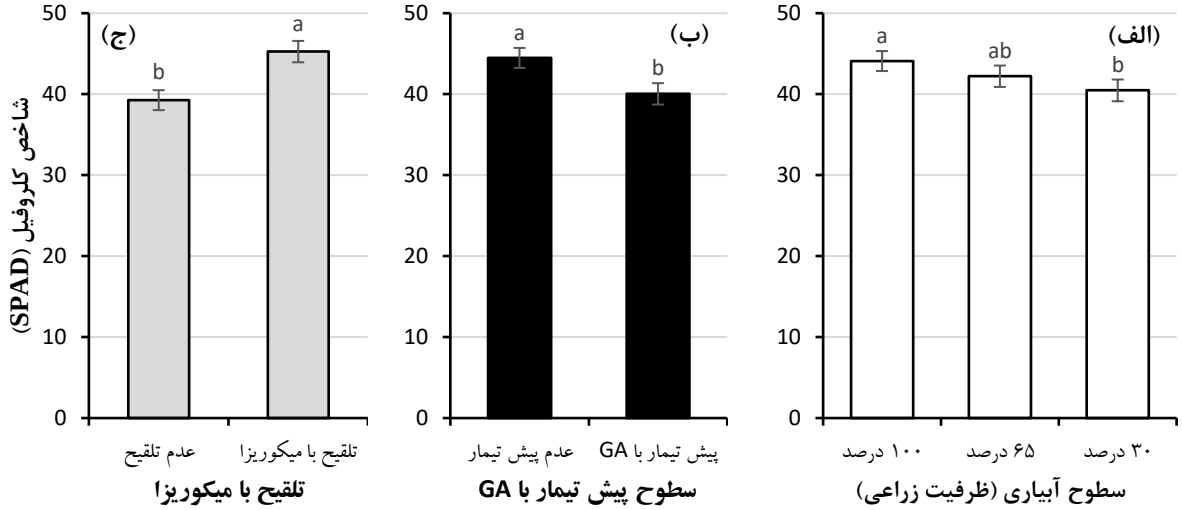
سطح برگ در بوته تحت تأثیر کم‌آبیاری، پرایمینگ با جیبرلیک اسید و تلقیح با میکوریزا و برهم‌کنش این سه عامل قرار گرفت (جدول ۱). همان‌طور که مشاهده می‌شود (شکل ۲)، در شرایط نرمال آبیاری (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، تلقیح با میکوریزا در شرایط عدم پرایمینگ با جیبرلیک اسید منجر به بیشترین سطح برگ در بوته شد. در این شرایط، تلقیح با میکوریزا ۴۲ درصد سطح برگ را نسبت به عدم تلقیح افزایش داد. این در حالی بود که تلقیح با میکوریزا در شرایط پرایمینگ با جیبرلیک اسید اثر معنی داری بر افزایش سطح برگ در بوته نداشت. در مقابل، در شرایط کم‌آبیاری (۶۵ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی)، تلقیح هم‌زمان میکوریزا و کاربرد جیبرلیک اسید منجر به افزایش معنی‌دار در مقایسه با عدم کاربرد شد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در شرایط آبیاری ۶۵ درصد FC، کاربرد تلفیقی جیبرلیک اسید و مایکوریزا ضمن تولید سطح برگ معادل سطح برگ حداکثری در شرایط نرمال، منجر به افزایش معنی‌دار نسبت به شاهد (آبیاری نرمال و عدم کاربرد مایکوریزا و جیبرلیک اسید) شد. کاربرد تلفیقی همچنین

اثر تنش شدید بر کاهش سطح برگ را تقلیل داده به طوری که تفاوت معنی‌داری با شاهد نشان نداد (شکل ۲).



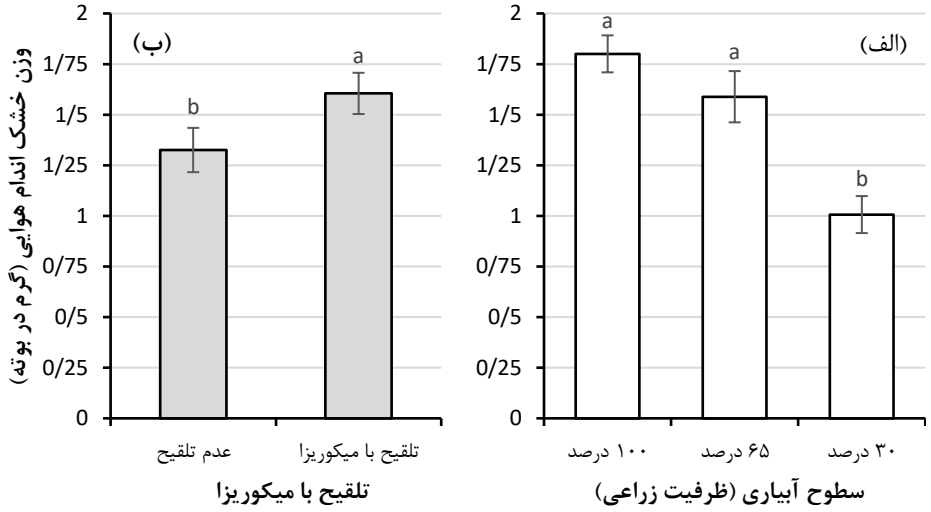
شکل (۲): مقایسه میانگین سطح برگ در بوته شیرین بیان تحت تأثیر برهمکنش سطوح آبیاری، پرایمینگ با جیبرلیک اسید (GA) و تلقیح با میکوریزا.

شاخص کلروفیل تحت تأثیر سطوح کم‌آبیاری، پرایمینگ با جیبرلیک اسید و تلقیح با میکوریزا قرار گرفت در حالی که برهم‌کنش معنی‌داری بین عوامل مورد بررسی بر این ویژگی مشاهده نشد (جدول ۱). اعمال کم‌آبیاری ۳۰ درصد منجر به کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل نسبت به سطح ۱۰۰ درصد آبیاری شد اما بین سطح کم‌آبیاری ۶۵ درصد با سایر سطوح تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۳-الف). پرایمینگ با جیبرلیک اسید محتوای کلروفیل را ۱۰ درصد نسبت به عدم پرایمینگ کاهش داد (شکل ۳-ب). این در حالی بود که تلقیح با میکوریزا نسبت به عدم تلقیح افزایش ۱۵/۳ درصدی در محتوای کلروفیل را به همراه داشت (شکل ۳-ج).



شکل (۳): مقایسه میانگین شاخص کلروفیل برگ شیرین بیان در سطوح مختلف آبیاری (الف)، پرایمینگ با جیبرلیک اسید (GA) (ب) و تلقیح با میکوریزا (ج).

نتایج تجزیه واریانس نشان از اثر معنی‌دار سطوح آبیاری و تلقیح با میکوریزا بر وزن خشک اندام هوایی شیرین بیان داشت در حالی که اثر جیبرلیک اسید و برهم‌کنش بین عوامل بر این ویژگی معنی‌دار نبود (جدول ۱). اعمال تیمار ۳۰ درصد آبیاری منجر به کاهش ۴۴ درصدی وزن خشک اندام هوایی شد در حالی که اعمال ۶۵ درصد FC منجر به کاهش معنی‌دار در وزن خشک در مقایسه با سطح آبیاری ۱۰۰ درصد FC نشد (شکل ۴-الف). تلقیح با میکوریزا منجر به افزایش ۲۱ درصدی در وزن خشک بوته نسبت به عدم تلقیح شد (شکل ۴-ب
).



شکل (۴): مقایسه میانگین وزن خشک اندام هوایی شیرین بیان در سطوح مختلف آبیاری (الف) و تلقیح با میکوریزا (ب).

ویژگی‌های فتوسنتزی

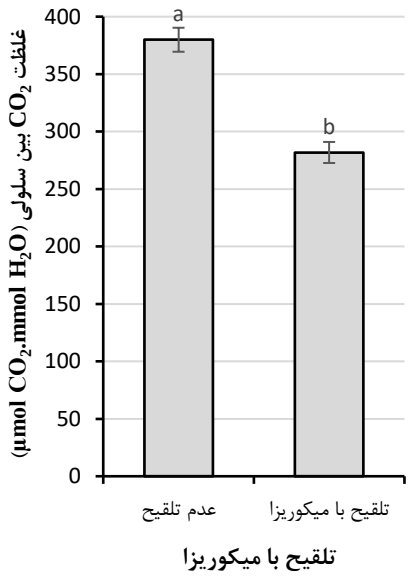
نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از فتوسنتز نشان داد که میزان CO_2 بین سلولی از میان عوامل مورد بررسی تنها تحت تأثیر تلقیح با میکوریزا قرار گرفت (جدول ۲). تلقیح با میکوریزا منجر به کاهش ۲۶ درصدی غلظت CO_2 بین سلولی نسبت به شرایط عدم تلقیح شد (شکل ۵).

سرعت تعرق برگ از بین عوامل آزمایش تنها تحت تأثیر رژیم‌های آبیاری قرار گرفت و اثر سایر عوامل و برهم‌کنش آن‌ها بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۲). نتایج نشان داد که با اعمال سطح ۶۵ درصد FC، سرعت تعرق افزایش غیر معنی‌داری نسبت به شرایط ۱۰۰ درصد FC نشان داد اما با افزایش شدت تنش خشکی (اعمال ۳۰ درصد FC)، سرعت تعرق به طور معنی‌داری (به ترتیب ۳۲ و ۲۴ درصد نسبت به سطوح ۶۵ درصد FC و ۱۰۰ درصد FC) کاهش نشان داد (شکل ۶). جدول (۲): نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف آبیاری، پرایمینگ با جیبرلیک اسید و تلقیح میکوریزایی و برهم‌کنش آن‌ها بر پارامترهای فتوسنتز، تبادل گازی و کارایی مصرف آب فتوسنتزی شیرین بیان

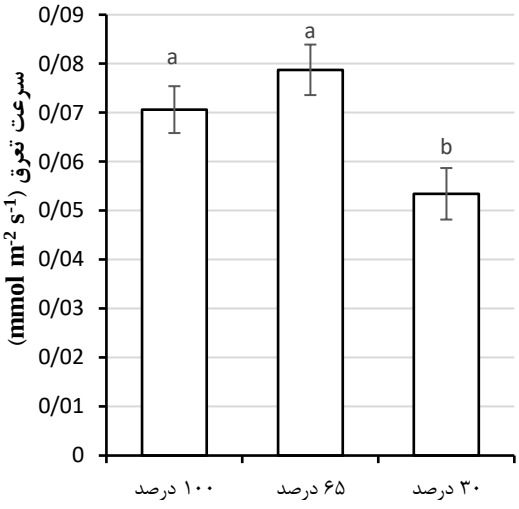
جدول (۲): نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف آبیاری، پرایمینگ با جیبرلیک اسید و تلقیح میکوریزایی و برهم‌کنش آن‌ها بر پارامترهای فتوسنتز، تبادل گازی و کارایی مصرف آب فتوسنتزی شیرین بیان

منابع تغییر	درجه آزادی	میزان CO_2 بین سلولی	سرعت تعرق	میزان فتوسنتز خالص	کارایی مصرف آب فتوسنتزی
رژیم آبیاری	۲	۲۴۳۰ ^{ns}	۰/۰۰۲۶۷ **	۰/۰۰۸۷۴ **	۰/۴۴۰ **
جیبرلیک اسید	۱	۸۶۲/۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۴۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۱۳۳ ^{ns}
میکوریزا	۱	۱۱۵۴۹۳ **	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۱۰۸۹ **	۲/۰۷ **
رژیم آبیاری×جیبرلیک اسید	۲	۲۹۵۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۱۶ ^{ns}	۰/۰۰۱۳۸ ^{ns}	۰/۳۸۷ **
رژیم آبیاری×میکوریزا	۲	۶۲۴/۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۳۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۳۶ ^{ns}	۰/۱۸۰ *
جیبرلیک اسید×میکوریزا	۱	۹۶۷/۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۱۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۸ ^{ns}	۰/۱۲۰ ^{ns}
رژیم آبیاری×جیبرلیک اسید×میکوریزا	۲	۶۵۴/۶ ^{ns}	۰/۰۰۰۴۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۹۶ ^{ns}	۰/۰۲۶ ^{ns}
خطا	۳۶	۲۵۴۱	۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۳۹
ضریب تغییرات (درصد)		۱۵/۲	۳۱/۳	۳۷/۵	۲۰/۴

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



شکل (۵): مقایسه میانگین میزان CO2 بین سلولی برگ شیرین بیان در تلقیح با میکوریزا.

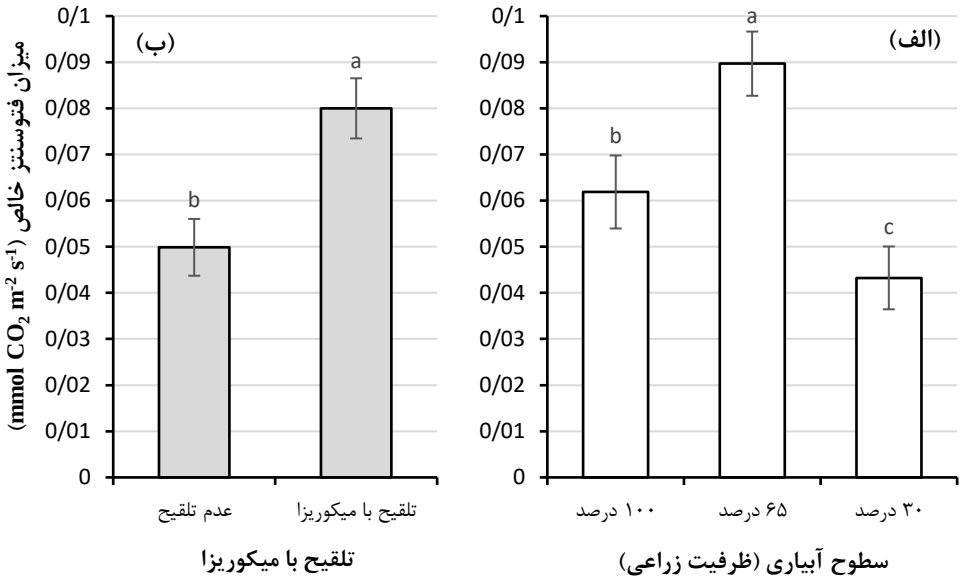


شکل(۶): مقایسه میانگین سرعت تعرق برگ شیرین بیان در سطوح مختلف آبیاری.

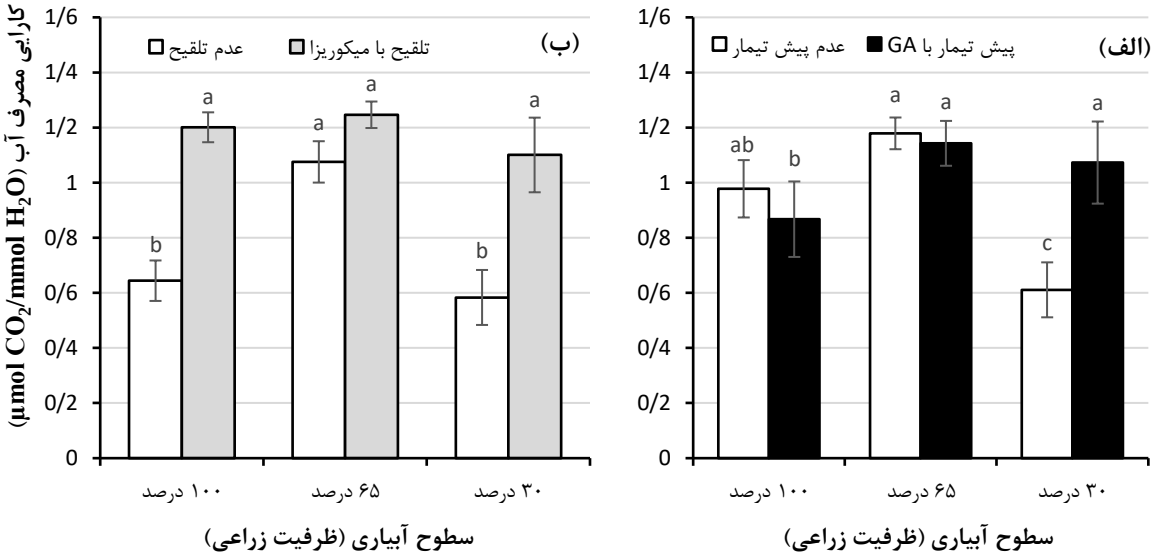
به همین ترتیب، رژیم‌های آبیاری و تلقیح با میکوریزا اثر معنی‌داری بر میزان فتوسنتز خالص گیاه شیرین بیان داشتند، در حالی که فتوسنتز تحت تأثیر سایر عوامل و برهم‌کنش آن‌ها قرار نگرفت (جدول ۲). همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد (شکل ۷-الف)، اعمال سطح آبیاری ۶۵ درصد FC میزان فتوسنتز خالص برگ را ۴۵ درصد نسبت به سطح ۱۰۰ درصد FC بهبود داد. با این حال، اعمال سطح آبیاری ۳۰ درصد FC، نسبت به شرایط ۶۵ درصد FC ، ۵۲ درصد و نسبت به شرایط ۱۰۰ درصد FC، ۳۰ درصد میزان فتوسنتز خالص را کاهش داد (شکل ۷-الف).

کارایی مصرف آب فتوسنتزی تحت تأثیر سطوح آبیاری، تلقیح با میکوریزا و برهم‌کنش سطوح آبیاری در جیبرلیک اسید و سطوح آبیاری در میکوریزا قرار گرفت (جدول ۲).

در حالی که بیشترین کارایی مصرف آب در هر دو سطح جیبرلیک اسید از تیمار ۶۵ درصد FC حاصل شد، پرایمینگ با جیبرلیک اسید تنها در شرایط اعمال تیمار ۳۵ درصد ظرفیت زراعی منجر به بهبود کارایی مصرف آب فتوسنتزی شد (شکل ۸-الف). به طور مشابه، در شرایط عدم تلقیح با میکوریزا، بیشترین کارایی مصرف آب از اعمال سطح آبیاری ۶۵ درصد FC حاصل شد. در حالی که، تلقیح با میکوریزا منجر به بهبود کارایی مصرف آب در سایر تیمارهای آبیاری شد و منجر به عدم اختلاف معنی دار بین سطوح آبیاری گردید. بنابراین، تلقیح در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد FC و ۳۰ درصد FC کارایی مصرف آب فتوسنتزی را نسبت به شرایط عدم تلقیح، بهبود داد (شکل ۸-ب).



شکل (۷): مقایسه میانگین میزان فتوسنتز خالص برگ شیرین بیان در سطوح مختلف آبیاری (الف) و تلقیح با میکوریزا (ب).



شکل(۸): مقایسه میانگین کارایی مصرف آب فتوسنتزی شیرین بیان تحت تأثیر برهمکنش سطوح آبیاری در جیبرلیک اسید (الف) سطوح آبیاری در تلقیح با میکوریزا (ب).

ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه

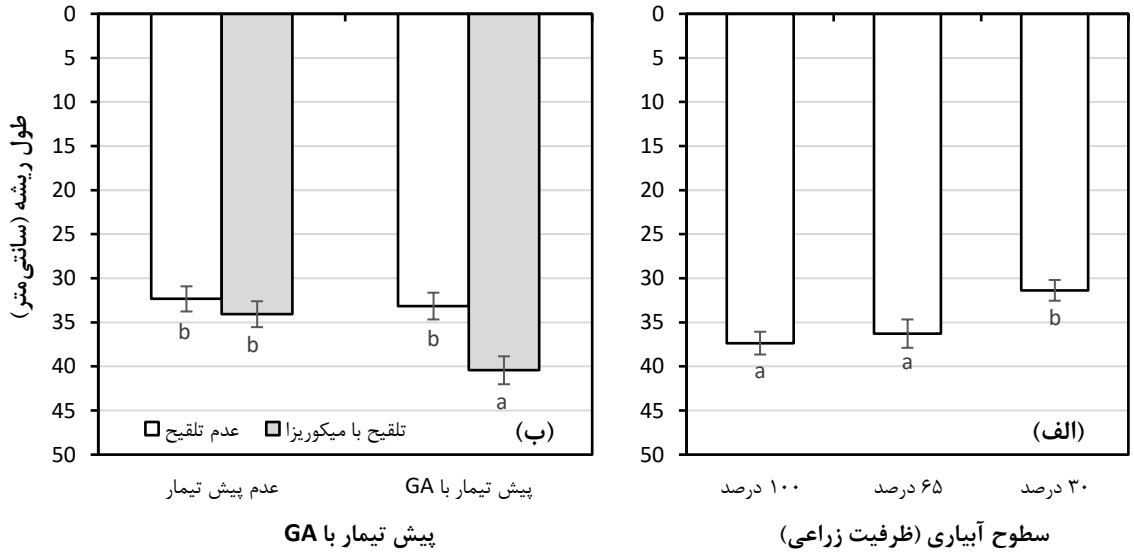
نتایج بررسی طول ریشه نشان داد که اثر سطوح آبیاری، پرایمینگ با جیبرلیک اسید، تلقیح با میکوریزا و برهم‌کنش میکوریزا در جیبرلیک اسید بر طول ریشه معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که طول ریشه تنها در صورت اعمال تنش شدید (۳۰ درصد FC) کاهش یافت در حالی که تنش ملایم (۶۵ درصد FC) منجر به کاهش معنی‌داری طول ریشه نسبت به شرایط ۱۰۰ درصد FC نشد (شکل ۹- الف). نتایج همچنین نشان داد که در شرایط عدم کاربرد جیبرلیک اسید، تلقیح با میکوریزا اثری بر طول ریشه نداشت در حالی که در شرایط کاربرد جیبرلیک اسید، تلقیح

با میکوریزا طول ریشه را نسبت به عدم تلقیح ۲۲ درصد بهبود داد (شکل ۹-ب).

جدول (۳): نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف آبیاری، پرایمینگ با جیبرلیک اسید و تلقیح میکوریزایی و برهم‌کنش آن‌ها بر خصوصیات ریشه و کارایی زراعی مصرف آب شیرین بیان

منابع تغییر	درجه آزادی	طول ریشه	حجم ریشه	عملکرد ریشه	کارایی زراعی مصرف آب
رژیم آبیاری	۲	۱۶۳/۱**	۲۱۹۹**	۲۸/۸۵**	۰/۳۱۵۰*
جیبرلیک اسید	۱	۱۵۴/۴*	۰/۳۵^{ns}	۰/۰۴^{ns}	۰/۰۰۰۴^{ns}
میکوریزا	۱	۲۴۴/۰**	۶/۵۸^{ns}	۱/۰۹^{ns}	۰/۰۱۱۹^{ns}
رژیم آبیاری×جیبرلیک اسید	۲	۹/۴۳^{ns}	۳۰۲/۵**	۳/۳۹**	۰/۰۳۷۰**
رژیم آبیاری×میکوریزا	۲	۳۰/۰۲^{ns}	۲۱/۳۹^{ns}	۰/۰۶^{ns}	۰/۰۰۰۷^{ns}
جیبرلیک اسید×میکوریزا	۱	۹۲/۳۸*	۲۶/۶۵^{ns}	۰/۱۲^{ns}	۰/۰۰۱۳^{ns}
رژیم آبیاری×جیبرلیک اسید×میکوریزا	۲	۰/۳۰^{ns}	۱۷۷/۰*	۱/۶۰*	۰/۰۱۷۵*
خطا	۳۶	۲۱/۷۵	۴۲/۶۲	۰/۳۹	۰/۰۰۴۳
ضریب تغییرات (درصد)	_	۱۳/۳	۲۳/۶	۱۹/۹	۱۹/۹

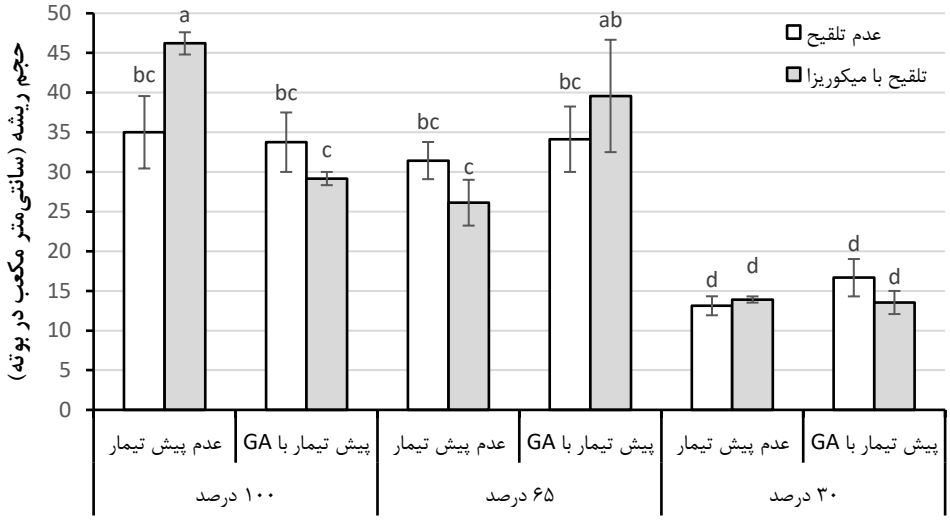
****: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، *: معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و ns: غیر معنی‌دار**



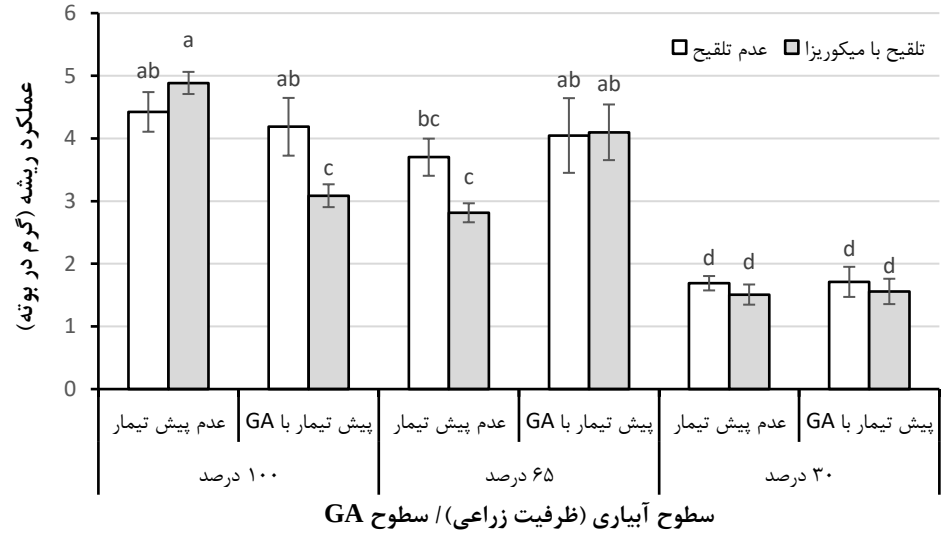
شکل (۹): مقایسه میانگین طول ریشه شیرین بیان تحت تأثیر سطوح آبیاری (الف) و برهم‌کنش جیبرلیک اسید در تلقیح با میکوریزا (ب).

حجم ریشه، عملکرد ریشه و کارایی زراعی مصرف آب تحت تأثیر اثر سطوح آبیاری، برهم‌کنش سطوح آبیاری در جیبرلیک اسید و اثر مقابل سطوح آبیاری، جیبرلیک اسید و میکوریزا قرار گرفتند (جدول ۳). با روند مشابه، نتایج مقایسه میانگین‌های حجم ریشه، عملکرد ریشه و کارایی زراعی مصرف آب نشان داد که در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد FC، کاربرد منفرد مایکوریزا منجر به افزایش معنی‌دار صفات مذکور شد در حالی که در شرایط کاربرد همزمان مایکوریزا و جیبرلیک اسید، ویژگی‌های ذکر شده کاهش نشان دادند (شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲). این در حالی بود که در شرایط

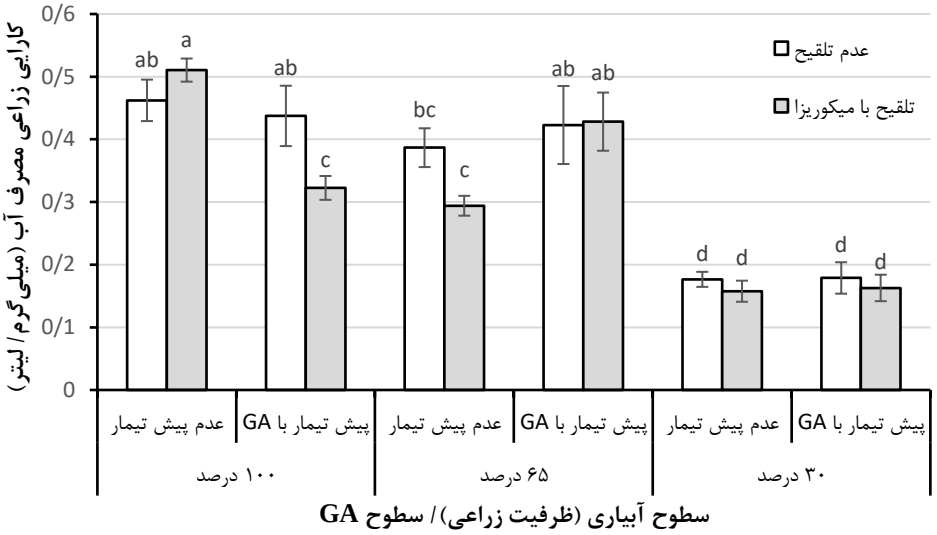
۶۵ درصد FC، تلقیح با میکوریزا و کاربرد جیبرلیک اسید منجر به بهبود این ویژگی‌ها شد. با این حال، در شرایط آبیاری ۳۰ درصد FC، تیمارهای مذکور از کارایی لازم برای افزایش ویژگی‌های مرتبط با ریشه برخوردار نبودند (شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲).



شکل (۱۰): مقایسه میانگین حجم ریشه شیرین بیان تحت تأثیر برهم‌کنش سطوح آبیاری، جیبرلیک اسید و میکوریزا.



شکل (۱۱): مقایسه میانگین عملکرد ریشه شیرین بیان تحت تأثیر برهم‌کنش سطوح آبیاری، جیبرلیک اسید و میکوریزا.



شکل ۱(۱۲): مقایسه میانگین کارایی مصرف آب زراعی شیرین بیان تحت تأثیر برهم‌کنش سطوح آبیاری، جیبرلیک اسید و میکوریزا.

بحث

اثر تنش خشکی

تنش خشکی باعث کاهش پارامترهای رشد و عملکرد شیرین بیان (Akhzari, 2015; Hao et al., 2019; Xie et al., 2018) و گیاهان دیگر (دانشور و خواجویی نژاد، ۱۳۹۳؛ صادقی زاده و همکاران، ۱۴۰۰) شده است. کاهش فشار آماس در شرایط کمبود آب معمولاً منجر به کاهش انبساط سلولی شده، که منجر به کاهش پارامترهای رشد گیاه مانند سطح برگ، ارتفاع گیاه، وزن خشک و عملکرد می‌شود (Taiz and Zeiger, 2012). وقوع تنش خشکی باعث افزایش غلظت پرولین برگ و محتوای آبسیزیک اسید (ABA) ریشه می‌شود که شاخصه‌های فیزیولوژیکی وقوع تنش خشکی هستند. در نتیجه، سرعت تعرق و هدایت روزنه‌ای محدود شده که منجر به کاهش میزان فتوسنتز خالص می‌شود. محدودیت در سرعت تعرق و هدایت روزنه‌ای نشان‌دهنده بسته شدن روزنه‌ها است که در نهایت ممکن است دسترسی کلروپلاست به CO_2 را کاهش داده و در نتیجه فتوسنتز خالص را کاهش دهد و منجر به مهار رشد گیاه می‌شود (Khan et al., 2020; Xie et al., 2018). با این وجود، اعمال سطح ۶۵ درصد FC در اکثر ویژگی‌های مذکور تفاوت معنی‌داری با سطح آبیاری ۱۰۰ درصد FC نشان نداد. در مقایسات مربوط به میزان فتوسنتز خالص اعمال سطح ۶۵ درصد FC حتی منجر به افزایش معنی‌دار نسبت به سطح آبیاری ۱۰۰ درصد FC شد (شکل ۷-الف). گزارش شده که اعمال سطح شدید تنش خشکی، وزن خشک اندام هوایی و ریشه شیرین بیان را کاهش داد. این در حالی بود که در همین مطالعه اعمال تنش متوسط تفاوت معنی‌داری در ویژگی‌های مختلف رشد و فتوسنتز خالص ایجاد نکرد (Xie et al., 2018).

اثر جیبرلیک اسید در شرایط تنش خشکی

یکی از دلایل عدم تأثیر جیبرلیک اسید بر پارامترهای فتوسنتز می‌تواند به دلیل کاهش میزان کلروفیل در شرایط پرایمینگ باشد. قنبری و همکاران (۱۴۰۱) با بررسی اثر پرایمینگ با غلظت‌های مختلف جیبرلیک اسید گزارش کردند که جیبرلیک اسید موجب کاهش محتوای کلروفیل برگ شیرین بیان شد و آن را به تأثیر قابل توجه جیبرلیک اسید در توسعه برگ، افزایش تعداد و توسعه برگ‌های مرکب در شیرین بیان مرتبط دانستند. در تایید این نتایج گزارش شد که جیبرلیک اسید سطح برگ را نسبت به مقدار کلروفیل بیشتر تحت تأثیر قرار داد به طوری که کلروفیل در واحد سطح برگ کاهش یافت و برگ‌های حاصل از گیاهان تیمار شده رنگ پریدگی بیشتری نسبت به برگ‌های گیاهان تیمار نشده نشان دادند (Wheeler and Humphries, 1963).

به طور کلی، نتایج نشان داد که پرایمینگ با جیبرلیک اسید بر خصوصیات مورفولوژیکی اثر بیشتری داشته باشد. در همین راستا گزارش شد که گیاهان پرایمینگ نشده با

جیبرلیک اسید حساسیت بیشتری به شرایط تنش خشکی نشان دادند (Khan et al., 2020). در سایر گیاهان نیز پرایمینگ بذر با جیبرلیک اسید هم در شرایط گلخانه و هم در شرایط مزرعه، بر رشد و خصوصیات مختلف فیزیولوژیک اثر مثبت داشته و منجر به بهبود شرایط رشد گیاه نخود تحت شرایط تنش خشکی شده است (Shariatmadari et al., 2017).

گزارش شده که جیبرلین‌ها از جمله تنظیم کننده‌های رشد گیاه برای فرایندهای رشد و نمو گیاهان مختلف، از جمله جوانه‌زنی بذر، افزایش طول ساقه، گسترش برگ، رسیدگی دانه گرده و القای گل‌دهی هستند (Cornea-Cipcigan et al., 2020). در ارتباط با افزایش طول ریشه و ارتفاع بوته با کاربرد جیبرلیک اسید (شکل ۹)، گزارش شده که پرایمینگ با GA_3 باعث افزایش ارتفاع بوته، قطر ریشه، قطر ساقه و زیست‌توده اندام هوایی، اجزای عملکرد و عملکرد کلزا در شرایط گلخانه و مزرعه شد (Khan et al., 2020). اثر جیبرلیک اسید بر افزایش ارتفاع بوته و طول ریشه همچنین می‌تواند به دلیل اثر تحریک کنندگی این هورمون در افزایش جوانه‌زنی و طول ریشه‌چه و ساقه‌چه باشد (قنبری و همکاران، ۱۴۰۱). همچنین گزارش شده که جیبرلیک اسید جوانه‌زنی بذر و رشد بعدی گیاه را افزایش داد (Ma et al., 2018).

برهم‌کنش میکوریزا و تنش خشکی

تلقیح با میکوریزا کارایی مصرف آب فتوسنتزی را در شرایط نرمال و اعمال سطح ۳۰ درصد FC افزایش داد (شکل ۸-ب). در همین رابطه گزارش شده که تنش خشکی باعث افزایش غلظت پرولین برگ و محتوای آبسیزیک اسید (ABA) ریشه می‌شود که واکنش‌های فیزیولوژیکی حاصل از تنش خشکی هستند (Hong et al., 2013; Szabados and Savouré, 2010). در مقابل، تلقیح میکوریزا باعث کاهش غلظت پرولین برگ و ABA ریشه تحت تنش خشکی در مقایسه با عدم تلقیح شد (Xie et al., 2018). این می‌تواند یکی از دلایل اثر بهبود دهندگی کارایی مصرف آب فتوسنتزی توسط تلقیح با مایکوریزا تحت شرایط تنش خشکی باشد. لی و همکاران (Li et al., 2016) گزارش کردند که هم‌زیستی میکوریزایی می‌تواند غلظت ABA ریشه را برای تنظیم بیان ژن سیستم آنتی‌اکسیدانی و تنظیم ژن مرتبط با آکواپورین، کاهش داده که مکانیسم مهمی برای تنظیم جذب آب و مقابله با تنش خشکی است (Javot and Maurel, 2002). در همین رابطه گزارش شد که هم‌زیستی میکوریزایی به طور قابل توجهی کارایی مصرف آب فتوسنتزی در شیرین بیان را تحت رژیم‌های مختلف آبیاری افزایش داد (Xie et al., 2018).

برهم‌کنش میکوریزا، جیبرلیک اسید و تنش خشکی

نتایج نشان داد که بیشترین سطح برگ در بوته از تلقیح با میکوریزا در شرایط نرمال آبیاری حاصل شد. با وجود عدم تأثیرگذاری کاربرد هم‌زمان میکوریزا و جیبرلیک اسید در شرایط نرمال آبیاری، در شرایط آبیاری ۶۵ درصد FC ، کاربرد تلفیقی میکوریزا و جیبرلیک اسید تفاوت معنی‌داری با حداکثر سطح برگ به دست آمده، نشان نداد. در شرایط آبیاری ۳۰ درصد FC، کاربرد همزمان میکوریزا و جیبرلیک اسید ضمن افزایش معنی‌دار سطح برگ نسبت به سایر تیمارها در این سطح آبیاری، تفاوت معنی‌داری با شاهد (شرایط آبیاری نرمال و بدون تلقیح با میکوریزا و عدم پرایمینگ با جیبرلیک اسید) نشان نداد (شکل ۲). گیاهان شیرین‌بیان می‌توانند به طور موثر با قارچ های میکوریزا هم‌زیستی ایجاد کنند و این تلقیح می‌تواند به طور قابل توجهی رشد شیرین بیان را بهبود بخشد (Akhzari, 2015; Hao et al., 2019; Xie et al., 2019, 2018). همچنین، نتایج مطالعه هائو و همکاران (Hao et al., 2019) نشان داد که تلقیح با قارچ میکوریزا (R. irregularis) رشد گیاه شیرین بیان را به خصوص در شرایط تنش خشکی تحریک کرد. تاکنون اثر کاربرد تلفیقی جیبرلیک اسید و میکوریزا به خصوص در شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار نگرفته است. اما به نظر می‌رسد نقش مؤثر آن‌ها در بهبود سطح برگ گیاه در شرایط کم‌آبیاری به ویژگی هرکدام از این تیمارها در بهبود رشد مرتبط باشد. به عنوان مثال، گزارش شده که پرایمینگ بذر با جیبرلیک اسید رشد اولیه گیاهچه، تعداد برگ، تعداد برگ مرکب و سطح برگ گیاه شیرین بیان را نسبت به عدم

کاربرد، بهبود داده است (قنبری و همکاران، ۱۴۰۱). بهبود در سطح برگ با افزایش میزان فتوسنتز می‌تواند به بهبود رشد و افزایش زیست توده گیاه منجر شود.

مشابه با نتایج مشاهده شده برای سطح برگ، بیشترین حجم ریشه، عملکرد ریشه و کارایی زراعی مصرف آب از تلقیح میکوریزا در شرایط ۱۰۰ درصد FC حاصل شد. این در حالی بود که در شرایط ۶۵ درصد FC ، اثر تلفیقی میکوریزا و جیبرلیک اسید و پرایمینگ با جیبرلیک اسید به تنهایی از بیشترین کارایی برخوردار بودند. در شرایط ۳۰ درصد FC اما هیچکدام از تیمارهای به کار رفته کارایی لازم را نشان ندادند. افزایش در سطح برگ با افزایش در فتوسنتز خالص در بوته می‌تواند منجر به افزایش تولید مواد فتوسنتزی و ارسال آن به ریشه شده که خود می‌تواند منجر به افزایش رشد ریشه و عملکرد ریشه شود. بر همین اساس، بهبود حجم ریشه، عملکرد و کارایی زراعی مصرف آب در تیمار با میکوریزا و شرایط تنش می‌تواند به دلیل اثر تیمار میکوریزا بر بهبود سطح برگ (شکل ۲)، محتوای کلروفیل (شکل ۳-ج) و افزایش فتوسنتز خالص (شکل ۷-ب) باشد.

همچنین، افزایش ویژگی‌های مختلف اندام هوایی و ریشه در تیمار تلفیقی میکوریزا و جیبرلیک اسید در شرایط تنش ملایم نشان از کارایی این تیمارهای در بهبود شرایط رشد و سازگاری گیاه شیرین بیان به تنش ملایم دارد. در تأیید این نتایج، اخضری (۲۰۱۵) گزارش کرد که در رژیم آبیاری ۸۰ درصد FC، تلقیح با میکوریزا بهترین نتایج را در بر داشت (Akhzari, 2015). این نتایج می‌تواند به دلیل حداکثر فتوسنتز و کارایی مصرف آب فتوسنتزی در شرایط تنش ملایم باشد که در نهایت منجر به حداکثر تولید و کارایی مصرف آب زراعی به خصوص در شرایط تلقیح با میکوریزا و اعمال تیمار تلفیقی میکوریزا و جیبرلیک اسید شده است. هم‌زیستی میکوریزایی به‌طور قابل توجهی هدایت روزنه‌ای و میزان فتوسنتز خالص را در رژیم‌های مختلف آبیاری افزایش داد. بهبود فتوسنتز در گیاه شیرین بیان در تلقیح با میکوریزا می‌تواند به دلیل بهبود تغذیه فسفر توسط میکوریزا باشد (Xie et al., 2019). همچنین اعمال تنش متوسط در این مطالعه تفاوت معنی‌داری در میزان فتوسنتز خالص ایجاد نکرد و تنها تنش شدید آن را کاهش داد. همچنین کارایی مصرف آب را در سطوح مختلف آبیاری بهبود داد. در تایید نتایج این مطالعه گزارش شده که بیشترین کارایی مصرف آب فتوسنتزی در تلقیح با میکوریزا و از سطح متوسط تنش خشکی حاصل شد (Xie et al., 2018). همچنین گزارش شده که تیمار با جیبرلیک اسید نسبت به عدم تیمار، منجر به تخفیف اثر تنش خشکی بر میزان فتوسنتز خالص شده و حفظ پتانسیل عملکرد گیاه را به دنبال داشت (Khan et al., 2020).

اثر بهبود دهندگی تیمار تلفیقی میکوریزا و جیبرلیک اسید در شرایط کم‌آبیاری علاوه بر موارد فوق الذکر، می‌تواند در اثر افزایش طول ریشه و حجم ریشه باشد (شکل‌های ۹-ب و ۱۰)، همانطور که افزایش ارتفاع بوته، وزن شاخه، طول ریشه و عملکرد ریشه (Akhzari, 2015)، وزن اندام هوایی و عملکرد ریشه (Xie et al., 2018) شیرین بیان در تیمار با میکوریزا تحت تنش خشکی و بهبود رشد اولیه، سطح برگ و تولید وزن خشک گیاه و ریشه شیرین بیان در پرایمینگ با جیبرلیک اسید (قنبری و همکاران، ۱۴۰۱) گزارش شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که تنها اعمال سطح شدید کم‌آبیاری (۳۰ درصد FC) در این مطالعه منجر به کاهش معنی‌دار ویژگی‌های موفولوژیک اندام هوایی، محتوای کلروفیل برگ، وزن خشک اندام هوایی، سرعت تعرق و میزان فتوسنتز خالص و طول ریشه شد. این در حالی بود که اعمال سطح ۶۵ درصد FC نه تنها در بسیاری از این ویژگی‌ها نسبت به آبیاری ۱۰۰ درصد کاهش معنی‌داری نشان نداد بلکه پارامترهای فتوسنتز را نیز بهبود داد. در شرایط اعمال سطح کم‌آبیاری ۳۰ درصد، پرایمینگ با جیبرلیک اسید منجر به بهبود کارایی مصرف آب فتوسنتزی در مقایسه با عدم پرایمینگ شد. همچنین ارتفاع بوته و طول ریشه را به خصوص در شرایط تلقیح با میکوریزا افزایش داد. تلقیح با میکوریزا موجب بهبود محتوای کلروفیل، وزن خشک اندام هوایی و میزان فتوسنتز شد. همچنین تلقیح با میکوریزا در شرایط نرمال آبیاری و اعمال ۳۰ درصد FC موجب بهبود شرایط فتوسنتزی و کارایی مصرف آب فتوسنتزی شد.

تلقیح با میکوریزا همچنین در شرایط ۱۰۰ درصد FC و کاربرد همزمان تلقیح با میکوریزا و پرایمینگ با جیبرلیک اسید در شرایط تنش ملایم موجب بهبود ویژگی‌های سطح برگ، حجم ریشه، عملکرد ریشه و کارایی زراعی مصرف آب شد.

منابع

خان‌احمدی، م.، ح. نقدی‌بادی، ش. آخوندزاده، ف. خلیقی سیگارودی، ع. مهرآفرین، س. شهریاری و ر. حاجی آقایی. ۱۳۹۲. مروری بر گیاه دارویی شیرین‌بیان (*Glycyrrhiza glabra* L.). فصلنامه گیاهان دارویی، سال دوازدهم، شماره ۴۶، ص ۱۲-۱.

دانشور، ف. و غ. خواجوئی نژاد. ۱۳۹۳. بررسی اثر کاربرد کودهای زیستی بر پتانسیل عملکرد و اجزای عملکرد ارقام گلرنگ (*Cartahamus tinctorius* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، سال چهارم، شماره ۴، ص ۶۹-۵۹.

صادقی زاده، ح.، غ. خواجویی نژاد و ج. قنبری. ۱۴۰۰. کارایی مصرف آب و پاسخ کمی و کیفی کینوا به کاربرد غلظت‌های مختلف سالیسیلیک اسید تحت شرایط کم‌آبیاری. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، سال یازدهم، شماره ۳، ص ۳۴۵-۳۵۹.

قنبری، ج.، م. بشارتی‌فر، و غ. خواجویی نژاد. ۱۴۰۱. پاسخ جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه شیرین بیان به خراش‌دهی شیمیایی و سطوح جیبرلیک اسید. به زراعی کشاورزی، سال بیست و چهارم، شماره ۴، ص ۱۳۱۱-۱۳۲۴.

Akhzari, D. 2015. Response of Glycyrrhiza glabra L. to arbuscular mycorrhizal fungi and water stress. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 18(4): 992–1002.

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

Cornea-Cipcigan, M., D. Pamfil, C.R. Sisea and R. Mărgăoan. 2020. Gibberellic acid can improve seed germination and ornamental quality of selected cyclamen species grown under short and long days. Agronomy, 10(4): 516. https://doi.org/10.3390/agronomy10040516

Hao, Z., W. Xie, X. Jiang, Z. Wu, X. Zhang and B. Chen. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungus improves rhizobium–glycyrrhiza seedling symbiosis under drought stress. Agronomy, 9(10): 572.

Hayashi, H. and H. Sudo. 2009. Economic importance of licorice. Plant Biotechnology, 26: 101–104. https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.26.101

Hong, J.H., S.W. Seah and J. Xu. 2013. The root of ABA action in environmental stress response. Plant Cell Reports, 32(7): 971–983. https://doi.org/10.1007/s00299-013-1439-9

Javot, H. and C. Maurel. 2002. The role of aquaporins in root water uptake. Annals of Botany, 90(3), 301–313. https://doi.org/10.1093/aob/mcf199

Khaitov, B., A. Karimov, J. Khaitbaeva, O. Sindarov, A. Karimov and Y. Li. 2022. Perspectives of Licorice Production in Harsh Environments of the Aral Sea Regions. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19. https://doi.org/10.3390/ijerph191811770

Khan, M.N., Z. Khan, T. Luo, J. Liu, M. Rizwan, J. Zhang, Z. Xu, H. Wu and L. Hu. 2020. Seed priming with gibberellic acid and melatonin in rapeseed: Consequences for improving yield and seed quality under drought and non-stress conditions. Industrial Crops and Products, 156, 112850. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112850

Li, T., Y. Sun, Y. Ruan, L. Xu, Y. Hu, Z. Hao, X. Zhang, H. Li, Y. Wang, L. Yang and B. Chen. 2016. Potential role of D-myo-inositol-3-phosphate synthase and 14-3-3 genes in the crosstalk between Zea mays and Rhizophagus intraradices under drought stress. Mycorrhiza, 26: 879–893. https://doi.org/10.1007/s00572-016-0723-2

Lim, T.K. 2016. Glycyrrhiza glabra, In: Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants. Springer, pp. 354–457.

Liu, J., L. Wu, S. Wei, X. Xiao, C. Su, P. Jiang, Z. Song, T. Wang and Z. Yu. 2007. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, nutrient uptake and glycyrrhizin production of licorice (Glycyrrhiza uralensis Fisch). Plant Growth Regulation, 52: 29–39.

Liu, X., W. Quan and D. Bartels. 2022. Stress memory responses and seed priming correlate with drought tolerance in plants: an overview. Planta, 255: 45. https://doi.org/10.1007/s00425-022-03828-z

Ma, H.-Y., D.-D. Zhao, Q.-R. Ning, J.-P. Wei, Y. Li, M.-M. Wang, X.-L. Liu, C.-J. Jiang and Z.-W. Liang. 2018. A Multi-year Beneficial Effect of Seed Priming with Gibberellic Acid-3 (GA3) on Plant Growth and Production in a Perennial Grass, Leymus chinensis. Scientific Reports, 8: 13214. https://doi.org/10.1038/s41598-018-31471-w

Öztürk, M., V. Altay, K.R. Hakeem and E. Akçiçek. 2017. Liquorice–Mycorrhiza Interactions, in: Liquorice. Springer, pp. 31–40.

Ruiz-Lozano, J.M. 2003. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. New perspectives for molecular studies. Mycorrhiza, 13: 309–317. https://doi.org/10.1007/s00572-003-0237-6

Sahoo, S., P. Borgohain, B. Saha, D. Moulick, B. Tanti, S.K. Panda. 2019. Seed Priming and Seedling Pre-treatment Induced Tolerance to Drought and Salt Stress: Recent Advances, in: Hasanuzzaman, M., Fotopoulos, V. (Eds.), Priming and Pretreatment of Seeds and Seedlings: Implication in Plant Stress Tolerance and Enhancing Productivity in Crop Plants. Springer Singapore, Singapore, pp. 253–263. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8625-1_12

Shariatmadari, M.H., M. Parsa, A. Nezami and M. Kafi. 2017. Effects of hormonal priming with gibberellic acid on emergence, growth and yield of chickpea under drought stress. Bioscience Research,14: 34–41.

Szabados, L. and A. Savouré. 2010. Proline: a multifunctional amino acid. Trends in Plant Science, 15: 89–97. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009

Taiz, L. and E. Zeiger. 2012. Plant Physiology. Sinauer Associates Inc., Publishers, Sunderland, MA, pp. 769.

Ulfat, A., S.A. Majid, A. Hameed. 2017. Hormonal seed priming improves wheat (Triticum aestivum L.) field performance under drought and non-stress conditions. Pakistan Journal of Botany, 49: 1239–1253.

Wheeler, A.W. and E.C. Humphries. 1963. Effect of gibberellic acid on growth, gibberellin content, and chlorophyll content of leaves of potato (Solanum tuberosum). Journal of Experimental Botany, 14: 132–136. https://doi.org/10.1093/jxb/14.1.132

Xie, W., Z. Hao, M. Yu, Z. Wu, A. Zhao, J. Li, X. Zhang and B. Chen. 2019. Improved phosphorus nutrition by arbuscular mycorrhizal symbiosis as a key factor facilitating glycyrrhizin and liquiritin accumulation in Glycyrrhiza uralensis. Plant and Soil, 439: 243–257.

Xie, W., Z. Hao, X. Zhou, X. Jiang, L. Xu, S. Wu, A. Zhao, X. Zhang and B. Chen, 2018. Arbuscular mycorrhiza facilitates the accumulation of glycyrrhizin and liquiritin in Glycyrrhiza uralensis under drought stress. Mycorrhiza, 28: 285–300.

Zhu, Z.H., A. Sami, Q.Q. Xu, L.L. Wu, W.Y. Zheng, Z.P. Chen, X.Z. Jin, H. Zhang, Y. Li, Y. Yu, K.J. Zhou. 2021. Effects of seed priming treatments on the germination and development of two rapeseed (Brassica napus L.) varieties under the co-influence of low temperature and drought. PLoS One, 16: e0257236. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257236

Investigation of Photosynthesis, Growth, and Water Use Efficiency of Licorice (Glycyrrhiza glabra L.) Plant Affected by Gibberellic Acid Priming and Mycorrhiza Inoculation under Water-Limited Conditions

Ali Asghar Zarrin-Torang[1], Gholamreza Khajoei-Nejad[2] and Jalal Ghanbari[3]

Abstract

Licorice (Glycyrrhiza glabra L.) is an important medicinal plant as it accumulates active ingredients, glycyrrhizin and liquiritin, in its roots. In the present study, mycorrhizal fungus inoculation (no inoculation and inoculation with Funneliformis mosseae) and gibberellic acid (GA) priming (no priming and priming with 1000 mg L-1) effects on growth, photosynthesis, and different characteristics of licorice root under different water regimes (100% of field capacity (FC), 65% FC, and 30% FC) were investigated. The results showed that among different irrigation levels, only the application of 30% FC led to a significant decrease in the shoot morphological characteristics, leaf chlorophyll content (SPAD), shoot dry weight, transpiration rate, net photosynthesis rate, and root length. While the application of 65% FC not only showed no significant decrease in most of the mentioned characteristics compared with 100% FC but also improved the photosynthesis parameters. Priming with GA at the 30% FC led to an improvement in photosynthetic water use efficiency compared to no pre-treatment. Also, GA increased plant height and root length, especially in combination with mycorrhizal inoculation. Inoculation with mycorrhiza improved chlorophyll content, shoot dry weight, and photosynthesis rate. Also, inoculation with mycorrhiza under 100% FC and 30% FC improved photosynthesis and photosynthetic water use efficiency. Inoculation with mycorrhiza also under 100% irrigation, and the integrated application of mycorrhiza inoculation and GA priming in 60% FC caused a significant increase in leaf area, root volume, root yield, and agricultural water use efficiency. Such results can be used in developing and promoting licorice cultivation based on water availability.

Keywords: Hormone, irrigation regime, licorice, root yield, symbiotic fungus, water productivity.

[1] MSc Student in Agronomy- Crop Ecology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. mr.a.zarrin60@gmail.com
[2] Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. khajoei@uk.ac.ir
[3] Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. jalalghanbari@agr.uk.ac.ir