J. Crop Prod. Process. 2025, 15(3), 21-43; DOI: 10.47176/jcpp.15.3.38621

Journal of Crop Production and Processing

Journal homepage: https://jcpp.iut.ac.ir/

Original Article

Investigating the Role of Mycorrhizal Fungi and Phosphorus in Improving Gas Exchange and Increasing Fruit Weight of Bitter Melon (*Momordica charantia*) under Different Irrigation Stresses

Narges Dolatmand-Shahri[1], Seyed Ali Mohammad Modarres-Sanavy*[2], Mohammad Hossein Mirjalili[3], Ali Mokhtassi-Bidgoli[4]

1, 2 and 4. PhD Graduate of Crop Physiology, Professor and Associate Professor, Respectively, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3. Professor, Department of Agriculture, Research Institute of Medicinal Plants and Raw Materials, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction: Drought stress is one of the most important factors limiting plant growth worldwide, which causes yield reduction by disrupting physiological processes, including photosynthesis and water relations. The use of arbuscular mycorrhizal fungi along with phosphorus fertilizer can increase plant tolerance to drought by improving water and nutrient absorption, regulating metabolic activities, and strengthening the antioxidant defense system. This study aims to investigate the regulatory effects of mycorrhizal fungi and phosphorus fertilizer on improving gas exchange and their role in increasing the weight of the bitter melon fruit.

Materials and Methods: To investigate the role of mycorrhizal fungi and phosphorus in improving gas exchange and increasing fruit weight of bitter melon (*Momordica charantia*) under different irrigation stresses, a split factorial experiment was conducted at the research farm of the Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, in a randomized complete block design with three replications in 2021. The experimental factors included three irrigation regimes (optimal irrigation, moderate, and severe irrigation deficit) in the main plots and a factorial combination of two fungal species *Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*, along with a control (non-inoculation) and phosphorus fertilizer (with and without phosphorus) in the subplots. The evaluated traits included total fruit weight/m^2, total chlorophyll and carotenoids concentrations, catalase enzyme activity, electrolyte leakage, anthocyanins concentration, gas exchange parameters (net photosynthesis rate, stomatal conductance, substomatal CO_2 concentration, and transpiration rate), and water use efficiency.

Results: The results showed that by reducing irrigation to a severe irrigation deficit, fruit weight, gas exchange parameters, water use efficiency, and total chlorophyll concentration significantly decreased, and electrolyte leakage, carotenoids and anthocyanins concentrations, and catalase activity increased. The results showed that inoculation of two species of mycorrhizal fungi and phosphorus fertilizer in different irrigation regimes increased catalase enzyme activity and reduced electrolyte leakage, protecting the photosynthetic apparatus against oxidative stress caused by irrigation deficiency, which led to increases in chlorophyll concentration and fruit weight. According to the results of the triple interaction of irrigation × phosphorus × mycorrhizae, the highest fruit weight was observed in plants inoculated with *Funneliformis mosseae* (2858 g m^{-2}) and *Rhizophagus intraradices* (2863 g m^{-2}) along with phosphorus fertilizer under

Received: Dec. 28, 2024; Revised: Apr. 06, 2025; Accepted: Apr. 13, 2025; Published Online: Sep 03, 2025.
* Corresponding Author: modaresa@modares.ac.ir

Journal of Crop Production and Processing

Journal homepage: https://jcpp.iut.ac.ir/

optimal irrigation conditions. The highest total chlorophyll concentration (0.374 mg g^{-1} fresh weight) was also observed in plants inoculated with *Rhizophagus intraradices* under optimal irrigation conditions and phosphorus fertilizer application. The results showed that at all three irrigation levels and in both conditions with and without phosphorus fertilizer, fruit weight and total chlorophyll concentration under inoculation with both mycorrhizal fungi species significantly increased compared to non-inoculation. The highest substomatal CO_2 concentration (263.7 µmol CO_2 mol^{-1}) was observed in plants inoculated with *Rhizophagus intraradices* under optimal irrigation conditions and phosphorus fertilizer application, which was not significantly different from those with *Funneliformis mosseae* at the same irrigation level. The results showed that with the reduction of irrigation to severe deficit irrigation, anthocyanins production increased as a plant strategy to response to water stress. At all irrigation levels, anthocyanins concentration increased in response to both mycorrhizal fungi species. The highest anthocyanin concentration was observed in plants under severe irrigation deficit and inoculated with *Funneliformis mosseae* in conditions without phosphorus fertilizer (0.34 mg g^{-1} fresh weight) and inoculated with *Rhizophagus intraradices* under phosphorus fertilizer application (0.35 mg.g^{-1} fresh weight). The correlation results showed that fruit weight had a positive and significant relationship with total chlorophyll, gas exchange parameters, and water use efficiency, and it showed a negative correlation with electrolyte leakage. Also, the positive correlation of total chlorophyll concentration with gas exchange and water use efficiency indicates that an enhanced chlorophyll concentration leads to improved physiological status and better productivity of water resources, perhaps by improving light absorption, photosynthesis efficiency, and effective gas exchange.

Conclusions: The results presented, taken together, showed that drought stress led to a decrease in fruit weight by reducing gas exchange and photosynthetic efficiency. However, application of phosphorus fertilizer and inoculation of mycorrhizal fungi, particularly *Rhizophagus intraradices*, under optimum irrigation conditions protected the photosynthetic apparatus and increased chlorophyll concentration and fruit weight by increasing catalase enzyme activity and reducing electrolyte leakage. Although the effect of the combination of phosphorus and mycorrhizae on gas exchange was limited, but it led to the improvement of total chlorophyll concentration and an increase in fruit weight. Thus, this combination can be suggested as an effective solution to enhance drought resistance and increase the yield of bitter melon.

Keywords: Bitter Melon, Fruit Yield, Net Photosynthesis Rate, Total Chlorophyll, Transpiration.

How to Cite: Dolatmand-Shahri N., Mohammad Modarres-Sanavy S. A., Mirjalili M. H., Mokhtassi-Bidgoli A. investigating the role of mycorrhizal fungi and phosphorus in improving gas exchange and increasing fruit weight of bitter melon (*Momordica charantia*) under different irrigation stresses. *J. Crop Prod. Process*. 2025, 15(3), 21-43. (*In Persian*). DOI: 10.47176/jcpp.15.3.38621.

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۱۴۰۴، دوره ۱۵، شماره ۳، صص. ۴۳-۲۱، DOI: 10.47176/jcpp.15.3.38621

نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی
صفحه خانگی نشریه: https://jcpp.iut.ac.ir/

مقاله پژوهشی

بررسی نقش قارچ مایکوریزا و فسفر در بهبود تبادلات گازی و افزایش وزن میوه خیار تلخ (*Momordica charantia*) تحت تنش‌های مختلف آبیاری

نرگس دولتمند شهری[۱]، سید علی محمد مدرس ثانوی*[۲]، محمد حسین میرجلیلی[۳] و علی مختصی بیدگلی[۴]

چکیده– تنش خشکی با اختلال در فتوسنتز و تعادل آبی، رشد گیاه را کاهش می‌دهد، اما قارچ‌های مایکوریزا با افزایش تحمل گیاه، اثرهای نامطلوب کم‌آبی را کاهش می‌دهند. در این راستا، آزمایشی بر گیاه خیار تلخ *(Momordica charantia)* در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۰ انجام شد. عوامل آزمایش شامل سه رژیم آبیاری (آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری متوسط و شدید) در کرت‌های اصلی و ترکیب فاکتوریل دو گونه قارچ *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* همراه با شاهد (عدم قارچ) و کود فسفر (با و بدون فسفر) در کرت‌های فرعی بودند. نتایج نشان داد با کاهش آبیاری تا سطح کم‌آبیاری شدید، وزن میوه، پارامترهای تبادل گازی (سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای، تعرق، غلظت CO_2 زیرروزنه‌ای)، کارایی مصرف آب و کلروفیل کل به‌طور معنی‌داری کاهش و نشت الکترولیت، کاروتنوئید، آنتوسیانین و کاتالاز افزایش داشتند. نتایج نشان داد تلقیح دو گونه قارچ مایکوریزا و کود فسفر در رژیم‌های مختلف آبیاری با افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و کاهش نشت الکترولیت، از دستگاه فتوسنتزی در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از کم‌آبیاری محافظت کرده که به افزایش کلروفیل و وزن میوه منجر شد. بیشترین وزن میوه در بوته‌هایی تحت تلقیح با دو گونه قارچ مایکوریزا و کاربرد فسفر در شرایط آبیاری مطلوب مشاهده شد. همبستگی مثبت بین وزن میوه و پارامترهای تبادل گاز نشان‌دهنده ارتباط مستقیم این پارامترها با بهبود عملکرد است. طبق نتایج کلی، اگرچه تاثیر ترکیب فسفر و مایکوریزا بر تبادلات گازی محدود بود، اما به‌دلیل بهبود کلروفیل کل و افزایش وزن میوه، این ترکیب می‌تواند راهکاری موثر برای تقویت مقاومت به خشکی و افزایش عملکرد خیار تلخ پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: تعرق، سرعت فتوسنتز خالص، عملکرد میوه، کلروفیل کل، موموردیکا.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴، اولین انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

۱، ۲ و ۴– به‌ترتیب دانش‌آموخته دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، استاد و دانشیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استاد، گروه کشاورزی، پژوهشکده گیاهان و مواد اولیه دارویی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

*: نویسنده مسئول، رایانامه: modaresa@modares.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

تنش خشکی به‌عنوان یک عامل تنش حیاتی در سطح جهانی شناخته شده است که به‌طور قابل‌توجهی، بهره‌وری گیاهان را در مناطق مختلف جهان محدود می‌کند. تنش خشکی با تاثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مختلف مانند یکپارچگی غشا، محتوای رنگدانه‌ها، تنظیم اسمزی، روابط آبی، متابولیسم ثانویه (١٦)، بسته شدن روزنه‌ها و به‌تبع آن فعالیت فتوسنتزی، باعث کاهش رشد گیاه می‌شود (٣٥). فتوسنتز، بنیادی‌ترین و پیچیده‌ترین فرآیند فیزیولوژیکی در گیاهان سبز است، که به‌شدت نسبت به بسیاری از عوامل محیطی مانند دما، شدت نور، غلظت CO_2، رطوبت و رطوبت خاک حساس است (٤). کاهش فتوسنتز در شرایط تنش محیطی عمدتا به تنظیمات روزنه‌ای ناشی از بسته شدن روزنه‌ها و اختلال در تأمین CO_2 مربوط می‌شود. علاوه بر این، کاهش فعالیت آنزیم روبیسکو، دسترسی CO_2 به کلروپلاست و کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II نیز نقش مهمی در این فرآیند دارند (٤٧). در پژوهشی با افزایش تنش خشکی، فتوسنتز خالص، کارایی مصرف آب، تعرق، هدایت روزنه‌ای و غلظت CO_2 بین سلولی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (٢٧). محتوای کلروفیل، به‌عنوان یکی از اجزای اصلی کلروپلاست، ارتباط مثبتی با سرعت فتوسنتز دارد. بررسی‌های متعدد نشان داده‌اند که تنش خشکی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل) را کاهش دهد (٢٠). در شرایط تنش خشکی، کاهش محتوای کلروفیل معمولا به‌عنوان یکی از نشانه‌های تنش اکسیداتیو در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه فتواکسیداسیون رنگدانه‌ها و تخریب کلروفیل رخ می‌دهد. تنش خشکی با اختلال در تعادل میان تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) و سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه، منجر به تنش اکسیداتیو می‌شود که تاثیر منفی بر مراحل رشد و فعالیت گیاه دارد. این وضعیت می‌تواند ظرفیت فتوسنتزی برگ‌ها را، به‌ویژه تحت شرایط نور زیاد و خشکی شدید، محدود کرده و موجب افزایش غلظت CO_2 بین سلولی در مقایسه با گیاهان به خوبی آبیاری شده شود (٣٦). سلول‌ها سیستم مهم و پیچیده‌ای از دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیر آنزیمی را برای مقابله با اثرهای منفی گونه‌های اکسیژن فعال ایجاد کرده‌اند. آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی، ازجمله کاتالاز (CAT)، سوپراکسید دیسموتازها (SODs) و پراکسیدازها (POXs)، از مهم‌ترین عوامل دفاعی گیاه در برابر تنش اکسیداتیو به شمار می‌روند. همچنین آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی نظیر اسید آسکوربیک، گلوتاتیون، فلاونوئیدها، ترکیبات فنولی و کاروتنوئیدها نیز نقش موثری در خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن دارند و به‌طور گسترده‌تری در گیاهان وجود دارند (٢٣). علاوه بر سیستم‌های داخلی که گیاهان را از تنش‌های زیستی و غیر زیستی محافظت می‌کنند، گیاهان قادرند با برخی از میکروارگانیسم‌های موجود در ریزوسفر رابطه‌ای مفید برقرار کنند و خسارات ناشی از تنش خشکی را کاهش دهند. قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار یک گروه گسترده از میکروارگانیسم‌های موجود در خاک و اندوفیت‌های ریشه هستند که روابط همزیستی متقابلی را با ٨٠ درصد گیاهان عالی برقرار می‌کنند. هیف‌های مایکوریزا می‌توانند به‌طور چشمگیری جذب آب و مواد مغذی را افزایش دهند (٤٦). این هیف‌ها با افزایش فتوسنتز، تنظیم متابولیسم و تقویت سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی و تعادل هورمونی به بهبود تحمل گیاهان میزبان به خشکی کمک می‌کنند (٢٥). در یک تحقیق، تلقیح قارچ مایکوریزا آربسکولار باعث افزایش ویژگی‌های فیزیولوژیکی و فتوسنتزی خربزه (*Cucumis melo* L.) تحت تنش خشکی شد (١٢). گزارش شده است که تلقیح قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار با افزایش محتویات کاروتنوئید، از دستگاه فتوسنتزی در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از خشکسالی محافظت کرده و فتوسنتز بهینه را تحت تنش خشکی تضمین می‌کنند (١). در یک پژوهش، هدایت روزنه‌ای گیاهان مایکوریزایی باعث افزایش سرعت تعرق در مقایسه با گیاهان غیرمایکوریزایی شد، که نشان‌دهنده مقاومت کمتر این گیاهان در برابر انتقال بخار آب از داخل برگ‌ها به جو تحت شرایط آبی مشابه است (٨). همزیستی قارچ مایکوریزا می‌تواند روابط آبی گیاه را از طریق اثرگذاری بر عملکرد روزنه‌ها، فتوسنتز و پاسخ‌های متابولیکی به تنش خشکی تعدیل کند (٤٠).

در پژوهشی، گونه‌های *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus irregularis* به‌عنوان موثرترین قارچ‌ها در کاهش اثرات منفی تنش خشکی معرفی شدند. این یافته‌ها بیانگر آن بود که افزایش کارایی مصرف آب در گیاهان تلقیح‌شده، با بهبود انتقال آب به برگ‌ها و حفظ باز ماندن روزنه‌ها، موجب تقویت عملکرد فتوسنتزی و در نهایت بهبود پاسخ‌های فیزیولوژیکی تحت شرایط کم‌آبی می‌شود (۱۵). بهبود در روابط آب گیاه با واسطه قارچ مایکوریزا ممکن است به بهبود تغذیه فسفر مرتبط باشد، زیرا فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی تنظیم‌کننده روابط آب گیاه به وضعیت تغذیه فسفر بستگی دارد (۴۳). فسفر به‌عنوان اثرگذارترین عنصر در رشد و کارایی مایکوریزا نقش دارد (۳۸). متاسفانه بیش از ۸۰ درصد از کودهای فسفر استفاده‌شده در خاک از طریق فرآیندهای جذب و تثبیت ناپدید می‌شوند (۴۴) یا به اشکال آلی تبدیل می‌شوند و حدود ۰/۱ درصد از کل فسفر در دسترس گیاه است. در این میان، توانایی قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار در ارتقای رشد و عملکرد گیاه و افزایش جذب فسفر به خوبی ثابت شده است (۲۲). خیار تلخ (*Momordica charantia*) گیاهی گرمسیری از خانواده کدوییان است که در خاک‌های لومی شنی با زهکشی مناسب و در مناطق گرم و مرطوب بهترین رشد را دارد. با این حال، این گیاه نسبت به کمبود طولانی‌مدت آب بسیار حساس است (۱۰). خیار تلخ در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، به‌ویژه در مناطق آسیایی، شرق آفریقا و آمریکای جنوبی، کشت می‌شود و به‌عنوان سبزی یا گیاه دارویی مورداستفاده قرار می‌گیرد (۴۲). ازنظر ارزش غذایی، این گیاه منبعی غنی از کربوهیدرات، پروتئین، عناصر معدنی مانند آهن و کلسیم، ویتامین‌ها به‌ویژه ویتامین ث (که حدود ۵۵ درصد از کل ویتامین‌های میوه را تشکیل می‌دهد) و فیبر است (۱۹). این مطالعه با هدف بررسی نقش قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار و کود فسفر در مواجهه با تنش کم‌آبی بر پارامترهای تبادلات گازی خیار تلخ انجام شد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثرهای تنظیمی قارچ‌های مایکوریزا به‌همراه کود فسفر بر بهبود تبادلات گازی و نقش آن‌ها در افزایش وزن میوه گیاه است.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل آزمایش

به‌منظور بررسی نقش دو نوع قارچ مایکوریزا آربسکولار و کود فسفر بر وزن میوه و تبادلات گازی خیار تلخ تحت سطوح مختلف آبیاری، آزمایشی در سال زراعی ۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس اجرا شد. محل آزمایش در ارتفاع ۱۲۱۵ متری از سطح دریا قرار دارد و موقعیت جغرافیایی آن ۵۱ درجه و ۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه عرض شمالی است. میانگین بارندگی سالانه و دمای متوسط سالانه بر اساس آمار ۳۰ سال گذشته به‌ترتیب ۲۳۲ میلی‌متر و ۲۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. اطلاعات بیشتر در این زمینه در شکل ۱ ارائه شده است.

پیش از شروع آزمایش، به‌منظور بررسی ویژگی فیزیکوشیمیایی خاک، نمونه‌برداری از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری زمین انجام شد. نمونه‌ها به‌صورت زیگزاگی از چندین نقطه جمع‌آوری و پس از ترکیب، یک نمونه مرکب تهیه شد. این نمونه برای ارزیابی ویژگی‌های خاک به آزمایشگاه خاک‌شناسی ارسال شد. نتایج تحلیل خاک در جدول ۱ ارائه شده است. بافت خاک منطقه آزمایش لومی شنی تشخیص داده شد.

طرح آزمایشی

این تحقیق به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عوامل آزمایش شامل سه رژیم آبیاری: آبیاری مطلوب (قطع آبیاری تا تخلیه ۲۰ درصد آب قابل استفاده موجود در منطقه ریشه و سپس آبیاری تا حد ظرفیت زراعی)، کم آبیاری متوسط (قطع آبیاری تا تخلیه ۵۰ درصد آب قابل استفاده موجود در منطقه ریشه و سپس آبیاری تا حد ظرفیت زراعی) و کم آبیاری شدید (قطع آبیاری تا تخلیه ۸۰ درصد آب

شکل ۱. میانگین دمای روزانه و میانگین بارندگی روزانه ثبت شده در طول فصل رشد در سال ۱٤۰۰

جدول ۱. ویژگی فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش

عمق خاک (سانتی‌متر)	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	نیتروژن (درصد)	فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	کربن آلی (درصد)	EC (دسی‌زیمنس بر متر)
۳۰–۰	۱/٤٤	۰/۰٦۲	۱۷/۲	۳۹۱	۰/٦٦	۰/۷۳
عمق خاک (سانتی‌متر)	pH	ظرفیت زراعی(درصد)	نقطه پژمردگی (درصد)	آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	
۳۰–۰	۷/۸۱	۱۸/۲	۷/٦	۳/۲۱	۸/۰٤	

قابل استفاده موجود در منطقه ریشه و سپس آبیاری تا حد ظرفیت زراعی) در کرت‌های اصلی و ترکیب فاکتوریل دو گونه قارچ مایکوریزا *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* همراه با تیمار شاهد (عدم تلقیح) و دو سطح کود فسفر (کاربرد و عدم کاربرد) در کرت‌های فرعی به‌صورت تصادفی قرار گرفتند. مقدار کود فسفره مصرفی بر اساس نتایج آزمون خاک و نیاز غذایی گیاه خیار تلخ در مراحل مختلف رشد محاسبه و اعمال شد. در این تحقیق، مقدار فسفر قابل جذب در خاک ۱۷/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. با توجه به چگالی خاک برابر با ۱/٤٤ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب و حجم خاک در عمق ۳۰ سانتی‌متر (٤۳۲۰ تن در هکتار)، مقدار فسفر موجود در خاک به میزان ۷٤/۳ کیلوگرم در هکتار محاسبه شد. این مقدار فسفر موجود در خاک نسبت به نیاز فسفر گیاه خیار تلخ که ۱۱۲ کیلوگرم فسفر در هکتار است، حدود ۳۷/۷ کیلوگرم

کمبود دارد. بنابراین، برای تامین نیاز فسفر گیاه، ضروری است که مقدار کافی کود فسفره به خاک اضافه شود.

اعمال تیمارها

برای تولید نشا خیار تلخ جهت کشت در زمین اصلی، ابتدا بذرهای تهیه شده از شرکت پاکان بذر اصفهان با منشا پاکستانی به مدت ٢٤ ساعت در آب مقطر خیسانده شدند. سپس این بذرها در سینی‌های نشا ٤٥ حفره‌ای حاوی ترکیب کوکوپیت و پرلیت کاشته شده و به‌صورت روزانه آبیاری شدند. پس از گذشت ۱۰ تا ۱۵ روز از کاشت و در مرحله ۳ تا ٤ برگی حقیقی، نشاها به زمین اصلی منتقل شدند. در طول دوره رشد نشا و پس از سبز شدن اولین برگ، برای تقویت گیاهچه‌ها، از کود NPK با نسبت ۲۰:۲۰:۲۰ و غلظت ۲ گرم در لیتر همراه با آب آبیاری استفاده شد. قطعه زمین مورد نظر در پاییز سال قبل با گاوآهن برگردان‌دار شخم زده و برای نرم کردن کلوخه‌ها، دو بار دیسک‌زنی انجام شد. سپس زمین تسطیح شد. در بهار سال بعد و پیش از کشت، زمین با فاصله‌های یک متری فاروبندی شد. نشاءها زمانی که حداقل دمای هوا به بالاتر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد رسید (۲۰ اردیبهشت)، به زمین اصلی منتقل شدند. کرت‌های آزمایشی به مساحت ۱۲ مترمربع (۳ × ٤ متر) طراحی شدند که شامل چهار خط کشت با فاصله یک متر از یکدیگر و فاصله ٦۰ سانتی‌متر بین بوته‌ها روی هر ردیف بودند. برای خاک‌های سبک با درصد رس کم، میزان توصیه شده کود برای خیار تلخ شامل ۱۸٤ کیلوگرم نیتروژن خالص، ۱۱۲ کیلوگرم فسفر خالص و ۱۲٤ کیلوگرم پتاسیم خالص در هر هکتار است. با توجه به نتایج تجزیه خاک و نیاز تغذیه‌ای خیار تلخ، مقدار ۳۷۰ کیلوگرم کود اوره در هر هکتار (معادل ۲۲/۲ گرم برای هر بوته) استفاده شد. روش مصرف به این صورت بود که نیمی از کود اوره به‌صورت زیر نشایی هنگام کاشت در گودال‌های کاشت افزوده شد و نیمه باقی‌مانده در زمان گلدهی به خاک اضافه شد (٢٦). براساس نتایج آزمون خاک و نیاز خیار تلخ به کود فسفر، مقدار ۱۷۹ کیلوگرم در هکتار (۳۷/۷ کیلوگرم در هکتار فسفر خالص) از منبع سوپرفسفات تریپل (P_2O_5) براساس تیمارهای مورد نظر به خاک اضافه شد. تمامی کود فسفر قبل از کشت و همراه با کود نیتروژن به چاله‌های کشت اضافه و سپس مقداری خاک روی کودها ریخته شد. مقدار کود فسفر طبق تیمارهای کودی برای هر بوته ۱۰/۷ گرم در نظر گرفته شد. با توجه به غنی بودن خاک از پتاس هیچ‌گونه کود پتاسی به خاک اضافه نشد.

قارچ مایکوریزا تهیه شده در این بررسی به‌صورت سوسپانسیون با منشا تجاری از شرکت زیست فناور پیشتاز واریان در استان کرج تهیه شد. این سوسپانسیون حاوی تعداد مشخصی قارچ مایکوریزا (۵۰ اسپور زنده در هر گرم خاک) بود. جهت تلقیح با قارچ، ریشه نشاها در خاک حاوی اسپور قارچ مایکوریزایی آغشته شده و برای اطمینان از آغشته شدن خاک با ریشه مقدار ۱۰ گرم خاک حاوی اسپور قارچ نیز در داخل هر چاله بر اساس تیمار مورد نظر قرار داده شد. موفقیت تلقیح از طریق بررسی درصد کلونیزاسیون ریشه با روش رنگ‌آمیزی روش فیلیپس و هایمن (۳۹) انجام شد. کنترل علف‌های هرز بدون استفاده از علف‌کش‌ها و به‌صورت وجین دستی در طی فصل رشد انجام شد. پس از کاشت گیاه تا بعد از استقرار کامل (۷ روز)، آبیاری روزانه و به‌صورت قطره‌ای (توسط تیپ‌های با فواصل منفذ ۲۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ١٦/٥ میلی‌متر) در تمامی کرت‌ها تا ۲۰ درصد ظرفیت زراعی انجام شد. و پس از ۷ روز آبیاری بوسیله اعداد قرائت شده از TDR طبق تیمارهای آبیاری تا آخر فصل رشد انجام شد. در آزمایشگاه میزان رطوبت وزنی و درصد رطوبت حجمی اندازه‌گیری و درصد آب قابل استفاده (D) بر اساس معادله (۱) تعیین (۳۱) و سپس با استفاده از معادله (۲) درصد تخلیه آب قابل استفاده محاسبه شد.

$$D\ (\%) = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} \frac{FCi-\theta i}{FCi-Wp} \times 100 \qquad \text{معادله (۱)}$$

$$\text{تخلیه آب قابل استفاده (٪)} = ۱۰۰ - D \qquad \text{معادله (۲)}$$

N: تعداد نمونه خاک گرفته شده از عمق مؤثر توسعه ریشه، FCi: رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه (پتانسیل رطوبتی معادل ١٦ درصد وزنی و ۲۲/٥ درصد حجمی قرائت شده توسط دستگاه TDR) در نمونه i ام؛ θi: رطوبت خاک در نمونه i ام؛ و Wp:

رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم (پتانسیل رطوبتی معادل ٦/٧٨ درصد وزنی و ٩/٥٦ درصد حجمی قرائت شده توسط دستگاه TDR) است. از مقایسه رطوبت‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله حسگرها با روش نمونه‌برداری و توزین، اعتبارسنجی صورت گرفت (٤٥). حجم آب مصرفی در این بررسی در طول فصل رشد خیار تلخ برای هر کرت (١٢ مترمربع) در شرایط آبیاری کامل با تعداد ٣٩ دفعه آبیاری ٢٢/٦ مترمکعب، در شرایط کم آبیاری متوسط با ٢٦ دفعه آبیاری ١٢/١ مترمکعب و در شرایط کم آبیاری شدید با ١٣ دفعه آبیاری ٤/٥٥ مترمکعب به‌ترتیب معادل ١٨٩٠٧، ١٠١٠١ و ٣٧٩٨ مترمکعب در هکتار بود.

اندازه‌گیری صفات مورد بررسی

به‌منظور اندازه‌گیری صفات کلروفیل، کاروتنوئید، آنتوسیانین و فعالیت آنزیم کاتالاز، نمونه‌برداری در زمان شروع میوه‌دهی گیاه، که تقریباً ٦٠ روز پس از کاشت بود، انجام گرفت. بلافاصله پس از نمونه‌برداری، نمونه‌ها در نیتروژن مایع فریز شده و تا زمان انجام آزمایش در دمای ٨٠- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

وزن میوه در مترمربع

به‌منظور تعیین وزن میوه در مترمربع، در طول آزمایش وزن میوه هر بوته، هر بار پس از برداشت توسط ترازوی دیجیتالی مدل A&D ساخت کشور ژاپن با دقت ٠/٠١ گرم توزین و ثبت شد. در نهایت وزن هر مرحله با هم جمع و به عنوان وزن نهایی میوه در بوته ثبت و سپس نسبت به مترمربع محاسبه شدند.

کلروفیل کل و کاروتنوئید

کلروفیل کل و کاروتنوئید بر اساس روش آرنون (٣) با استفاده از عصاره استونی برگ تازه اندازه‌گیری شد. برای این منظور، ٠/٢ گرم برگ تازه فریز شده با ١٥ میلی‌لیتر استون (Acetone) ٨٠ درصد ساییده و سپس سانتریفوژ شد. عصاره به‌دست‌آمده در طول موج‌های ٤٧٠، ٦٤٦/٨ و ٦٦٣/٢ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر مدل Varian Cary Win UV 6000i (ساخت استرالیا) قرائت شده و مقدار کلروفیل کل و کاروتنوئید بر اساس معادلات ٣ و ٤ محاسبه شد.

معادله (٣)

$$\text{کلروفیل کل} = (7.15\ A663.2 + 18.71\ A646.8)V/100\ (W)$$

معادله (٤)

$$\text{کاروتنوئید} = ((1000A470 - 1.8\ chla - 85.02\ chlb)/198)V/100\ (W)$$

V= حجم نهایی ساخته شده، W = گرم نمونه برگ تازه فریز شده

نشت الکترولیت برگ

برای تعیین نشت الکترولیت برگ، در زمان شروع میوه‌دهی، ٠/٣ گرم از بافت تازه برگ برداشت و در دو مرحله با آب دوبار تقطیر شستشو داده شد. سپس نمونه‌ها خرد شده و در داخل فالکون حاوی ٢٠ میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفتند. این نمونه‌ها به مدت ٢٤ ساعت روی شیکر قرار داده شدند و پس از آن نشت الکترولیت محلول (L_1) با استفاده از دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، به نمونه‌ها ٢٠ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شده و به مدت ٢٠ دقیقه در دمای ١٢٠ درجه سانتی‌گراد اتوکلاو شدند. در نهایت، نشت الکترولیت محلول (L_2) پس از رسیدن به دمای محیط اندازه‌گیری و مقدار نشت یونی از معادله (٥) محاسبه شد (٢٩).

معادله (٥)

$$\text{نشت الکترولیت (\%)} = (L_1/L_2) \times 100$$

کاتالاز

برای استخراج عصاره آنزیمی، ٠/٢ گرم بافت گیاهی تازه منجمد شده در نیتروژن مایع در بافر پتاسیم فسفات ٠/٠٥ مولار (pH=7) در دمای ٤-٠ درجه سانتی‌گراد ساییده و سپس به مدت ١٥ دقیقه با سرعت ١٢٠٠٠ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. محلول رویی برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز استفاده شد. فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از روش چکماک و هورست (١١) سنجیده شد. محلول واکنش شامل عصاره آنزیمی، بافر و پراکسید هیدروژن (غلظت ١٠ میلی‌مولار) بود و تجزیه آب اکسیژنه با کاهش جذب در طول موج ٢٤٠ نانومتر اندازه‌گیری شد.

آنتوسیانین

برای اندازه‌گیری آنتوسیانین برگ، ۰/۲ گرم از برگ در ۳ میلی‌لیتر متانول اسیدی (ترکیب متانول و کلریدریک اسید به نسبت ۹۹ به ۱) کاملاً ساییده شده و سپس عصاره حاصل سانتریفیوژ شد. محلول رویی به مدت یک شب در تاریکی قرار گرفت و میزان جذب آن در طول موج ۵۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. برای تعیین غلظت آنتوسیانین، از ضریب خاموشی (ε= ۳۳۰۰۰ mol-2 cm-1) استفاده شد (۲۸). از معادله (٦) برای محاسبه غلظت استفاده شد.

$$A= \varepsilon bc$$ معادله (٦)

که در آن A میزان جذب، b عرض سل (محفظه نوری) به سانتی‌متر و c غلظت محلول بر حسب میلی‌لیتر هستند.

پارامترهای تبادلات گازی

هنگامی که گیاهان هر کرت به مرحله شروع میوه‌دهی رسیدند (تقریباً ٦۰ روز پس از کاشت)، سرعت فتوسنتز خالص برگ (میکرومول دی‌اکسیدکربن بر مترمربع در ثانیه)، هدایت روزنه‌ای (میلی‌مول دی‌اکسیدکربن بر مترمربع در ثانیه)، سرعت تعرق (میلی‌مول آب بر مترمربع در ثانیه) و غلظت دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای (میکرومول بر مول) به‌طور همزمان در ساعت ۱۲-۱۰ صبح با شدت نور متوسط ۱٤۰۰-۱۲۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع در ثانیه، داخل محفظه دستگاه تحلیل کننده فتوسنتز (using a Photosynthesis meter, Licor-6400, Lambda Instrument Corporation, Nebraska, USA) محاسبه و ثبت شد. کارایی مصرف آب (WUE) نیز از نسبت سرعت فتوسنتز خالص بر سرعت تعرق به‌دست آمد.

محاسبات آماری

از نرم افزار SAS 9.4 برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، تست نرمال بودن داده‌ها انجام شد و پس از اطمینان از حالت توزیع نرمال، نسبت به تجزیه و تحلیل آن‌ها اقدام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن (۵ درصد) انجام شد. همچنین رسم نمودارها با استفاده از نرم افزار Microsoft Office 2013 انجام شد.

نتایج و بحث

وزن میوه در مترمربع

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها، وزن میوه در مترمربع به‌طور معنی‌داری ($P<0.01$) تحت اثرهای اصلی آبیاری، کود فسفر، قارچ مایکوریزا و برهم‌کنش این عوامل قرار گرفت (جدول ۲). طبق نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه بین تیمارها، بیشترین وزن میوه در بوته‌های مشاهده شد که تحت تلقیح هر دو گونه *Funneliformis mosseae* (۲۸۵۸ گرم در مترمربع) و *Rhizophagus intraradices* (۲۸٦۳ گرم در مترمربع) همراه با کاربرد کود فسفر در شرایط آبیاری مطلوب قرار داشتند که دارای اختلاف معنی‌داری با سایر ترکیبات تیماری بودند. در تمامی سطوح آبیاری و در هر دو شرایط با و بدون کاربرد کود فسفر، تلقیح مایکوریزا (هر دو گونه) منجر به افزایش معنی‌دار وزن میوه در مقایسه با تیمارهای فاقد تلقیح شد. همچنین، گونه *Rhizophagus intraradices* در هر دو شرایط کود فسفر (با و بدون کاربرد) اثر بیشتری بر وزن میوه نسبت به گونه *Funneliformis mosseae* داشت. علاوه بر این، کاهش آبیاری از شرایط آبیاری کامل منجر به کاهش معنی‌دار وزن میوه شد و این کاهش در شرایط کم آبیاری شدید، بیشتر بود (شکل ۲)، که بیانگر حساسیت تولید میوه به تامین آب است. این نتایج نشان می‌دهند که ترکیب آبیاری کامل، کود فسفر و تلقیح مایکوریزا به‌ویژه گونه *Rhizophagus intraradices* می‌تواند بهینه‌ترین شرایط را برای تولید بیشتر میوه فراهم کند. طبق نتایج این بررسی وزن میوه خیار تلخ در واکنش به تنش کم‌آبی، کاربرد کود فسفر و همچنین قارچ‌های مایکوریزا تغییرات قابل‌توجهی نشان داد. در پژوهشی کاهش آبیاری از سطح ۸۰ به ٤۰ درصد ظرفیت زراعی منجر به کاهش معنی‌دار وزن میوه شد (۳٤)، که با نتایج پژوهش حاضر مبنی بر کاهش وزن میوه تحت تنش کم‌آبی همخوانی داشت. با این حال، تلقیح قارچ‌های *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* در تمامی سطوح آبیاری باعث

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر آبیاری، کود فسفر و قارچ مایکوریزا بر وزن میوه، کلروفیل کل، کاروتنویید، نشت الکترولیت، کاتالاز، آنتوسیانین، پارامترهای تبادلات گازی (سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق، غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای) و کارایی مصرف آب خیار تلخ

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات											
		وزن میوه در مترمربع	کلروفیل کل	کاروتنویید	نشت الکترولیت	کاتالاز	آنتوسیانین	غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای	سرعت تعرق	سرعت فتوسنتز خالص	هدایت روزنه‌ای	کارایی مصرف آب
بلوک (تکرار)	۲	۵۵۵/۲۶ ns	۰/۰۰۰۲ ns	۰/۰۰۰۰۳ ns	۰/۹۷٤ ns	۰/۱۱ ns	۰/۰۰۰۰۰٤ ns	۱٦۷/۳۱ ns	۰/۷۱۸ ns	۰/۱۹ ns	۰/۰۰۰۰۱۸ ns	۰/۰۸۸ ns
آبیاری (I)	۲	۳۰۱٦۳۵۵/۵۵**	۰/۰۲۸**	۰/۰۰۳۷**	۱۵۱/۱٤**	٤/۳۳**	۰/۰۰۰٤۵**	٦۹٤۵۷/۳۷**	۱۲/۱٦**	۱۹۱/٦٦**	۰/۰۰۲**	٤/۰۲**
خطای a	٤	۳۰۲۱/۵٦	۰/۰۰۰۰٤	۰/۰۰۰۰۱	۱/۲۰	۰/۰۹۹	۰/۰۰۰۰۰۱	۲۷۰/۸٤	۰/۸۲۳	۰/٤۷۳	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۲٦
کود فسفر (P)	۱	۱۲۹۸۵۲۱/۸۰**	۰/۰۰٤٦**	۰/۰۰٤۱**	٤٦/۱۱**	۱۱/۰۱**	۰/۰۰۰۱۹**	۸۰۰/۷۳**	۱/۲۹ ns	۵/۸۹*	۰/۰۰۰۱۹ ns	۰/۰۲۱ ns
I × P	۲	۲۱۹۳۲۸/٦۰**	۰/۰۰۰۵*	۰/۰۰۰۲٦**	۲٤/٤۵**	۲/۳۷**	۰/۰۰۰۰۱٦*	۱۵۱/۰۸ ns	۱/٤٦*	۰/۲۸ ns	۰/۰۰۰۰۰۷ ns	۰/۰۵۱ ns
قارچ مایکوریزا (G)	۲	٤٦۰٤۳۲٤/٦۰**	۰/۰٤۳**	۰/۰۰۰٦٦**	۳۹٤/۲۰**	۳/٤۷**	۰/۰۰۰٦٤**	۱٦۷۱۹/۷٤**	٤/۰۰۸**	۵۸/۵۲**	۰/۰۰۰۳۷ ns	۰/۹۸**
I × G	٤	۸۰۵٦۵/۰۵**	۰/۰۰۰٤*	۰/۰۰۰۱۲*	۱۲/۳۱*	۱/۷۰**	۰/۰۰۰۱۲**	۲۱/۰۹ ns	۰/۳۱۲ ns	۰/۷٦٦ ns	۰/۰۰۰۰۸ ns	۰/۰٤٤ ns
P × G	۲	٦۱۳۰۰/۹۸**	۰/۰۰۰٦**	۰/۰۰۰۰٤ ns	۵۰/٦۰**	۰/۰۰۷ ns	۰/۰۰۰۰۰۹ns	۱۱٦/۸۷ ns	۰/۰۲۱ ns	۰/۵۵۵ ns	۰/۰۰۰۰۲۳ ns	۰/۰۲٦ ns
I × P × G	٤	۳۹۷۳۵/۳۰**	۰/۰۰۰٤**	۰/۰۰۰۰۳ ns	٦/۲۸ ns	۰/۰۲۲ ns	۰/۰۰۰۰۲۳**	۳۲۰/٤۷**	۰/۰٤۱ ns	۱/۳۱ ns	۰/۰۰۰۰۲۲ ns	۰/۰٤ ns
خطای b	۳۰	٤۷٦٤/۷٦	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۳	٤/۲٦	۰/۰۹۵	۰/۰۰۰۰۰۵	٦۳/۷۳	۰/۳۳۲	۰/۷۸۱	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۵۰
ضریب تغییرات (٪)		۳/٦۱	۳/۹۲	۷/۸۸	۳/۳۷	٦/۹۳	۹/۰۸	٤/۸٤	۹/۹٦	۱۱/۲٤	۱۱/٤۲	۱٦/۸۱

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد

شکل ۲. مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه آبیاری در کود فسفر در قارچ مایکوریزا بر وزن میوه و کلروفیل کل

M0: عدم تلقیح، M1: *Funneliformis mosseae*، M2: *Rhizophagus intraradices*

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد می‌باشند.

افزایش معنی‌دار وزن میوه نسبت به عدم تلقیح قارچ شد. در بررسی‌هایی کاربرد قارچ مایکوریزا، عملکرد میوه هندوانه را در شرایط تنش خشکی در سطحی برابر شرایط آبیاری مطلوب افزایش داد (٤٨). تحلیل همبستگی‌های حاصل از این پژوهش نشان داد که وزن میوه به‌طور مثبت و معنی‌داری با عوامل فیزیولوژیکی مهمی نظیر کلروفیل کل (r = ۰/۹۵**)، سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق، غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای و کارایی مصرف آب ارتباط دارد (جدول ٦). این نتایج بیانگر آن است که شرایط بهینه فتوسنتزی و هدایت روزنه‌ای نقش کلیدی در بهبود وزن میوه ایفا می‌کند. از سوی دیگر، همبستگی منفی و معنی‌دار بین وزن میوه و نشت الکترولیت (r = −۰/۸۷**)، حاکی از آن است که کاهش آسیب غشایی و کاهش نشت الکترولیت می‌تواند عاملی کلیدی در حفظ و افزایش وزن میوه باشد (جدول ٦). این یافته‌ها بر اهمیت حفظ تعادل فیزیولوژیک و کاهش آسیب اکسیداتیو برای بهبود وزن میوه تاکید می‌کند.

کلروفیل کل و کاروتنوئید

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس، کلروفیل کل به‌طور معنی‌داری (P<0.01) تحت اثرهای اصلی آبیاری، کود فسفر و قارچ مایکوریزا و همچنین برهم‌کنش‌های این عوامل قرار گرفت (جدول ۲). محتوای کاروتنوئید نیز در واکنش به آبیاری، کود فسفر، قارچ مایکوریزا و برهم‌کنش‌های آبیاری در کود فسفر (P<0.01) و آبیاری در قارچ مایکوریزا (P<0.05) معنی‌دار شد (جدول ۲). براساس نتایج برهم‌کنش آبیاری در کود فسفر در قارچ مایکوریزا، بیشترین مقدار کلروفیل کل (۰/۳۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در بوته‌های تلقیح شده توسط گونه *Rhizophagus intraradices* در شرایط آبیاری کامل و کاربرد کود فسفر مشاهده شد. نتایج نشان در تمامی سطوح آبیاری و در هر دو شرایط با و بدون کود فسفر مقدار کلروفیل کل تحت تلقیح هر دو گونه قارچ مایکوریزا افزایش معنی‌داری نسبت به عدم تلقیح داشت و در بیشتر ترکیبات تیماری آبیاری در کود فسفر، بین دو گونه اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، فقط در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری متوسط بوته‌های تحت گونه *Rhizophagus intraradices* مقدار کلروفیل کل بیشتری در شرایط کاربرد کود فسفر نسبت به گونه *Funneliformis mosseae* نشان دادند. نتایج همچنین نشان داد با کاهش آبیاری مقدار کلروفیل از روندی کاهشی قابل‌توجهی برخوردار بود (شکل ۲).

محتوای کاروتنوئید برگ تحت برهم‌کنش آبیاری در کود

جدول ۳: مقایسه میانگین برهم‌کنش آبیاری در کود فسفر بر کاروتنوئید، فعالیت کاتالاز و نشت الکترولیت خیار تلخ

تیمارها		کاروتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	کاتالاز (میکرومول بر میلی‌گرم پروتیین نمونه برگ)	نشت الکترولیت (درصد)
آبیاری	کود فسفر			
آبیاری مطلوب	بدون فسفر	۰/۰۵٤ e	۳/۸۹ c	۵۸/٦۹ b
	با فسفر	۰/۰٦۵ d	٤/۱۵ c	۵۷/۸۲ b
کم آبیاری متوسط	بدون فسفر	۰/۰٦۱ d	۳/٤۹ d	٦۳/۵۵ a
	با فسفر	۰/۰۸۷ b	۵/۱۸ a	۵۹/۰۵ b
کم آبیاری شدید	بدون فسفر	۰/۰۸۱ c	٤/٦۰ b	٦٤/۱۳ a
	با فسفر	۰/۰۹٦ a	۵/۳٦ a	٦۳/۹۷ a

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

فسفر، در هر سه سطح آبیاری با کاربرد کود فسفر افزایش معنی‌داری نسبت به عدم کاربرد فسفر داشت. در هر دو شرایط با و بدون کاربرد کود فسفر، مقدار کاروتنوئید برگ با کاهش آبیاری دارای روند افزایشی معنی‌داری بود به‌طوری‌که بیشترین مقدار کاروتنوئید مربوط به بوته‌های تحت کم آبیاری شدید در شرایط کاربرد کود فسفر مربوط بود که نسبت به آبیاری کامل و کم آبیاری متوسط در همین سطح کود فسفر به ترتیب افزایش ۸/۹٤ و ۳۱/۹ درصدی نشان داد (جدول ۳). محتوای کاروتنوئید همچنین طبق برهم‌کنش آبیاری در قارچ مایکوریزا نیز با کاهش آبیاری روند افزایشی معنی‌داری داشت به‌طوری‌که بیشترین مقدار کاروتنوئید برگ مربوط به بوته‌ها تحت کم آبیاری شدید بود. نتایج نشان داد در شرایط کم آبیاری شدید تلقیح قارچ مایکوریزا اثر قابل‌توجهی بر مقدار این رنگیزه نداشت، اما در شرایط کم آبیاری متوسط مقدار کاروتنوئید تحت گونه *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* به‌ترتیب افزایش ۲۰/۳ و ۲۵/٦ درصدی معنی‌داری نسبت به عدم تلقیح داشت. در شرایط آبیاری کامل نیز مقدار کاروتنوئید فقط تحت گونه *Rhizophagus intraradices* افزایش ۱٤/۱ درصدی قابل‌توجهی نسبت به عدم تلقیح نشان داد (جدول ٤).

طی بررسی‌هایی مقدار کلروفیل خیار تحت کم آبیاری شدید کاهش قابل‌توجهی نسبت به کم آبیاری متوسط و آبیاری مطلوب نشان داد که با نتایج حاصل از این بررسی مطابقت دارد (۳۰). تنش خشکی با القای تولید گونه‌های اکسیژن فعال باعث آسیب اکسیداتیو و تخریب غشای سلولی می‌شود که نتیجه در کاهش مقدار کلروفیل برگ دارد. همبستگی منفی بین کلروفیل کل با نشت یونی ($r = -۰/۹۰^{**}$) گواه بر این مطلب می‌باشد (جدول ٦). نتایج بررسی حاضر نشان داد در هر سطح آبیاری کاربرد کود فسفر و تلقیح توسط قارچ‌های مایکوریزا اثر افزایشی بر مقدار کلروفیل برگ داشت (شکل ۲). به‌نظر می‌رسد قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و در نتیجه کاهش گونه‌های اکسیژن فعال از تخریب غشای سلول و تجزیه کلروفیل جلوگیری کرده‌اند (٦). در بررسی‌هایی بر کدو پوست کاغذی مقدار کلروفیل کل برگ با کاهش آبیاری کاهش و تحت تلقیح توسط قارچ‌های مایکوریزا در هر سطح آبیاری افزایش داشت، اما این افزایش در شرایط کم آبیاری متوسط و شدید نسبت به عدم تلقیح معنی‌دار بود (۳۷). نتایج همبستگی بین صفات نشان داد که کلروفیل کل با صفات فیزیولوژیکی از جمله سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای، تعرق، غلظت CO_2زیر روزنه‌ای و کارایی مصرف آب همبستگی مثبت و معنی‌داری دارد (جدول ٦). این یافته‌ها نشان می‌دهد که کلروفیل کل، به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی سلامت فتوسنتزی، نقش محوری در بهبود وضعیت فیزیولوژیکی گیاه ایفا می‌کند. افزایش میزان کلروفیل منجر به ارتقای ظرفیت جذب نور و درنتیجه افزایش تولید ATP و NADPH در مرحله نوری فتوسنتز می‌شود

جدول ٤: مقایسه میانگین برهم‌کنش آبیاری در قارچ مایکوریزا بر صفات کاروتنوئید، فعالیت کاتالاز و نشت الکترولیت خیار تلخ

تیمارها		کاروتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	کاتالاز (میکرومول بر میلی‌گرم پروتیین نمونه برگ)	نشت الکترولیت (درصد)
آبیاری	قارچ مایکوریزا			
آبیاری مطلوب	شاهد (عدم تلقیح)	۰/۰۵۵ d	۳/۵۱ d	٦۳/۵۱ b
	Funneliformis mosseae	۰/۰۵۹ cd	۳/۷۳ d	٥٤/٤۷ d
	Rhizophagus intraradices	۰/۰٦٥ c	٤/۸۱ b	٥٦/۷۸ cd
کم آبیاری متوسط	شاهد (عدم تلقیح)	۰/۰٦۲ cd	۳/۸۳ d	٦۸/۰۸ a
	Funneliformis mosseae	۰/۰۷۸ b	٥/۰۰ b	٥۸/۳۲ c
	Rhizophagus intraradices	۰/۰۸۳ ab	٤/۱۹ c	٥۷/٥۰ c
کم آبیاری شدید	شاهد (عدم تلقیح)	۰/۰۸٥ a	٤/٦٤ b	٦۸/۱۲ a
	Funneliformis mosseae	۰/۰۸۹ a	٤/٦۹ b	٦۱/۲۱ b
	Rhizophagus intraradices	۰/۰۹۱ a	٥/٦۱ a	٦۲/۸۱ b

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

که انرژی موردنیاز برای تثبیت کربن در چرخه کلوین را تامین می‌کند. همچنین افزایش کلروفیل باعث بهبود بازدهی فتوسنتز می‌شود که این امر با افزایش بازشدگی روزنه‌ها همراه است؛ زیرا افزایش فتوسنتز موجب کاهش غلظت داخلی CO_2 شده و سیگنالی برای باز شدن روزنه‌ها فراهم می‌آورد. درنتیجه، هدایت روزنه‌ای و تعرق نیز افزایش می‌یابد و تبادل گازی موثرتری صورت می‌گیرد. همبستگی مثبت بین کلروفیل کل و غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای بیانگر آن است که با افزایش کلروفیل، گیاه قادر به جذب مؤثرتر CO_2 از طریق روزنه‌ها بوده و تثبیت آن در فرآیند فتوسنتز به‌صورت بهینه‌تری انجام می‌شود. از سوی دیگر، افزایش بازده فتوسنتزی و بهبود مدیریت تبادل گازی، منجر به استفاده موثرتر از منابع آبی می‌شود؛ به‌طوری‌که گیاه قادر است با کاهش تلفات آبی و افزایش بهره‌وری از آب جذب‌شده، کارایی مصرف آب خود را بهبود بخشد. این موضوع از نظر فیزیولوژیکی اهمیت زیادی دارد، زیرا حفظ تعادل بین جذب کربن و مصرف آب برای تولید زیست‌توده بیشتر در شرایط تنش‌کم‌آبی، یک مزیت تطبیقی محسوب می‌شود.

کاروتنوئیدها ترکیبات رنگدانه‌ای هستند که در غشای تیلاکوئید کلروپلاست‌ها در طول فتوسنتز نور را برداشت کرده و انرژی جذب شده را به مرکز واکنش فتوسیستم‌ها منتقل می‌کنند. کاروتنوئیدها همچنین با اتلاف انرژی اضافی و خاموش کردن گونه‌های اکسیژن فعال تولید شده در زیر نور اضافی از کلروفیل در برابر آسیب ناشی از نور محافظت می‌کنند (۱۸). در نتایج بررسی حاضر با کاهش آبیاری تا سطح کم آبیاری شدید مقدار کاروتنوئید برگ روند افزایش معنی‌داری داشت و تحت تلقیح دو گونه قارچ مایکوریزا این افزایش بیشتر بود. در بررسی‌هایی محققین نشان دادند که با کاربرد قارچ مایکوریزا محتوای کاروتنوئید برگ خیار افزایش قابل‌توجهی نسبت به عدم تلقیح داشت (۳۳). در بررسی دیگری تلقیح قارچ مایکوریزا آربسکولار باعث افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در برگ‌های چغندرقند شد (۱۷). طبق نتایج همبستگی بین صفات، کاروتنوئید برگ دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با کاتالاز، آنتوسیانین و همبستگی منفی و معنی‌داری با غلظت CO_2 زیرروزنه‌ای بود (جدول ٦). همبستگی مثبت با کاتالاز نشان‌دهنده ارتباط عملکردی این دو در کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و پایداری غشای سلولی است. ارتباط مثبت با آنتوسیانین نیز به نقش مکمل

این رنگدانه‌ها در محافظت گیاه در برابر تنش‌های محیطی اشاره دارد. همبستگی منفی با غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای می‌تواند به نقش کاروتنوئیدها در بهبود کارایی سرعت فتوسنتز خالص و کاهش تنش‌های وابسته به تبادل گازی اشاره داشته باشد.

آنزیم کاتالاز

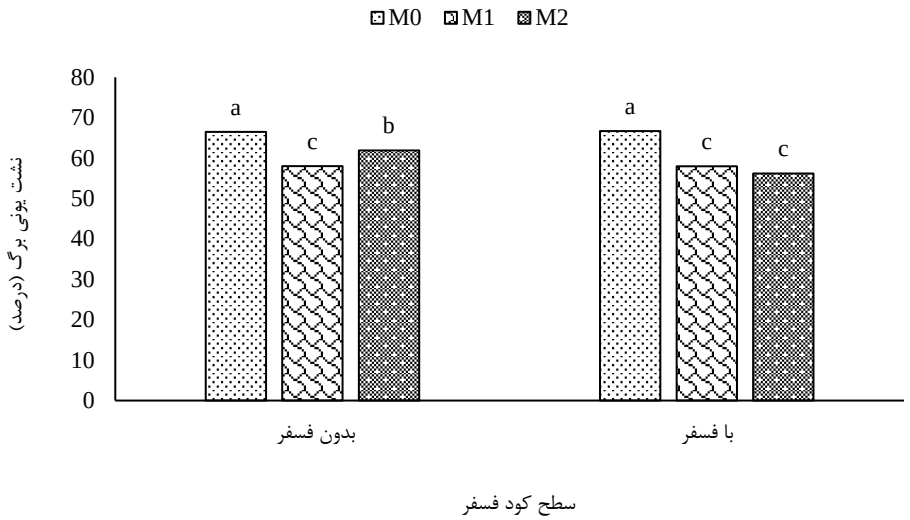
نتایج نشان داد که آبیاری، کود فسفر، قارچ مایکوریزا و برهم‌کنش‌های آبیاری در کود فسفر و آبیاری در قارچ مایکوریزا، اثر معنی‌داری ($P<0.01$) بر فعالیت آنزیم کاتالاز داشتند (جدول ۲). نتایج برهم‌کنش آبیاری در کود فسفر نشان داد که با کاهش آبیاری و کاربرد همزمان کود فسفر فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش قابل‌توجهی در مقایسه با آبیاری مطلوب داشت. طبق نتایج به‌دست آمده در شرایط کم ابیاری متوسط و شدید فعالیت آنزیم کاتالاز با کاربرد کود فسفر به‌ترتیب افزایش ۳۲/٦ و ١٤/٢ درصدی معنی‌داری نسبت به عدم کاربرد فسفر نشان داد (جدول ۳). براساس نتایج برهم‌کنش آبیاری در قارچ مایکوریزا، بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در بوته‌های تحت کم آبیاری شدید و تلقیح توسط *Rhizophagus intraradices* مشاهده شد که دارای اختلاف قابل‌توجهی با سایر ترکیبات تیماری بود. در تمامی سطوح آبیاری فعالیت آنزیم کاتالاز تحت هر دو گونه قارچ مایکوریزا افزایش داشت اما این افزایش در کم آبیاری متوسط تحت هر دو گونه و در دو سطح دیگر آبیاری تحت گونه *Rhizophagus intraradices* معنی‌دار بود. در کم آبیاری متوسط گونه *Funneliformis mosseae* اثر بیشتر و قابل‌توجه‌تری نسبت به گونه *Rhizophagus intraradices* بر فعالیت این آنزیم داشت (جدول ٤). با توجه به نتایج بررسی حاضر با کاهش آبیاری فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش یافت و در هر سطح آبیاری، تلقیح دوگونه قارچ مایکوریزا و مصرف کود فسفره اثری افزایشی بر آنزیم مذکور داشتند. طبق بررسی‌های محققین، فعالیت آنزیم کاتالاز تنباکو (*Nicotiana tabacum* L.) تحت تنش خشکی (۳۰ درصد ظرفیت زراعی) و تلقیح توسط قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت (۷).

نشت الکترولیت

نشت الکترولیت به‌طور معنی‌داری در واکنش به آبیاری، کود فسفر، قارچ مایکوریزا و برهم‌کنش‌های آبیاری در کود فسفر، کود فسفر در قارچ مایکوریزا ($P<0.01$) و آبیاری در قارچ مایکوریزا ($P<0.05$) قرار گرفت (جدول ۲). طبق نتایج برهم‌کنش آبیاری در کود فسفر، در تمامی سطوح آبیاری درصد نشت الکترولیت برگ با کاربرد کود فسفر کاهش معنی‌داری نسبت به عدم کاربرد کود فسفر داشت. در شرایط بدون کود فسفر با کاهش آبیاری از سطح آبیاری مطلوب مقدار نشت یونی افزایش معنی‌داری نشان داد اما بین دو سطح کم آبیاری متوسط و شدید اختلاف قابل‌توجهی مشاهده نشد. در شرایط کاربرد کود فسفر نیز مقدار نشت الکترولیت با کاهش آبیاری تا سطح کم آبیاری متوسط افزایش غیر معنی‌داری داشت اما با کاهش بیشتر آبیاری تا سطح کم آبیاری شدید افزایش معنی‌داری نسبت به دو سطح دیگر آبیاری نشان داد (جدول ۳).

طبق نتایج برهم‌کنش آبیاری در قارچ مایکوریزا، کم‌ترین میزان نشت الکترولیت در بوته‌هایی مشاهده شد که تحت شرایط کم‌آبیاری متوسط قرار داشتند و با هر دو گونه قارچ مایکوریزا تلقیح شده بودند. با کاهش آبیاری تا سطح کم‌آبیاری شدید، پایداری غشای سلولی کاهش و نشت الکترولیت برگ به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. همچنین، تلقیح هر دو گونه قارچ مایکوریزا در تمامی سطوح آبیاری به کاهش قابل‌توجه نشت الکترولیت منجر شد، درحالی‌که بیشترین میزان نشت الکترولیت مربوط به بوته‌های عدم تلقیح قارچ تحت شرایط کم‌آبیاری شدید و متوسط بود (جدول ٤).

نتایج برهم‌کنش کود فسفر در قارچ مایکوریزا نشان داد که در هر سطح کود فسفر تلقیح دو گونه قارچ مایکوریزا باعث کاهش قابل‌توجه نشت الکترولیت نسبت به عدم تلقیح شد و در شرایط بدون کود فسفر گونه *Funneliformis mosseae* تاثیر بیشتری نسبت به گونه *Rhizophagus intraradices* بر پایداری غشا و کاهش نشت الکترولیت داشت. در شرایط عدم تلقیح و تلقیح توسط *Funneliformis mosseae* با کاربرد کود فسفر نشت



شکل ۳. مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه کود فسفر در قارچ مایکوریزا بر نشت یونی برگ خیار تلخ

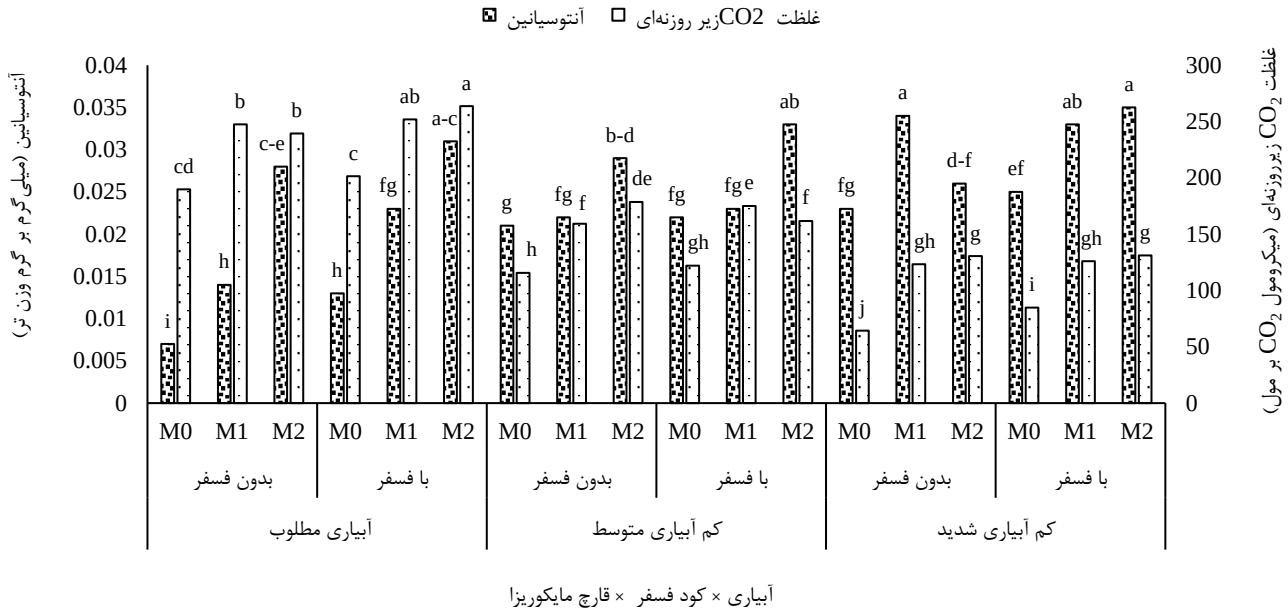
M0: عدم تلقیح، M1: *Funneliformis mosseae*، M2: *Rhizophagus intraradices*

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

الکترولیت تغییر معنی‌داری نسبت به شرایط بدون فسفر نداشت، اما تحت گونه *Rhizophagus intraradices* مقدار نشت الکترولیت با مصرف فسفر کاهش ۹/۲٤ درصدی معنی‌داری نسبت به عدم فسفر داشت (شکل ۳). این نشان‌دهنده تعامل مثبت فسفر با این گونه خاص از مایکوریزا در حفظ یکپارچگی غشای سلولی است. به‌نظر می‌رسد *Rhizophagus intraradices* در حضور فسفر توانایی بیشتری در تقویت سیستم دفاعی گیاه دارد، درحالی‌که *Funneliformis mosseae* حتی بدون فسفر نیز می‌تواند عملکرد پایدارتری ارائه دهد. در یک بررسی محققین نشان دادند که تحت تلقیح توسط قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار، نشت الکترولیت برگ کاهش قابل‌توجهی نسبت به عدم تلقیح داشت (۱٤). در بررسی دیگری بر سویا گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا آربسکولار کاهش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش نشت الکترولیت را تحت تنش خشکی نشان دادند (۹). نتایج جدول همبستگی نشان داد نشت الکترولیت دارای همبستگی منفی و معنی‌داری با سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق، غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای، کارایی مصرف آب و وزن میوه بود (جدول ٦). این همبستگی منفی نشان می‌دهد هرچه نشت یونی بیشتر باشد تخریب کلروپلاست‌ها، ساختارهای سلولی که در فرایند فتوسنتز نقش دارند، بیشتر شده که این موضوع می‌تواند به کاهش فعالیت فتوسنتزی و کاهش تولید کلروفیل منجر شود. کلروفیل نیز دارای رابطه مستقیمی با پارامترهای رشدی و عملکرد گیاه است.

آنتوسیانین

محتوای آنتوسیانین به‌طور معنی‌داری در واکنش به آبیاری، کود فسفر، قارچ مایکوریزا ($P<0.01$) و برهم‌کنش دوگانه (به جز کود فسفر در قارچ مایکوریزا) و سه‌گانه این عوامل قرار گرفت (جدول ۲). طبق نتایج برهم‌کنش آبیاری در کود فسفر در قارچ مایکوریزا، کاهش آبیاری تا سطح کم آبیاری شدید باعث افزایش تولید آنتوسیانین به‌عنوان واکنشی به تنش آبی شد. در تمامی سطوح آبیاری، مقدار آنتوسیانین در واکنش به هر دو گونه قارچ مایکوریزا افزایش یافت. بیشترین مقدار آنتوسیانین مربوط به بوته‌های تحت کم آبیاری شدید و تلقیح توسط *Funneliformis mosseae* در شرایط بدون کود فسفر (۰/۰۳٤ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و تلقیح توسط *Rhizophagus intraradices* در شرایط کاربرد کود فسفر (۰/۰۳۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) اختصاص



شکل ٤. مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه آبیاری در کود فسفر در قارچ مایکوریزا بر محتوای آنتوسیانین و غلظت CO_2 زیرروزنه‌ای برگ خیار تلخ

M0: عدم تلقیح، M1: *Funneliformis mosseae*، M2: *Rhizophagus intraradices*

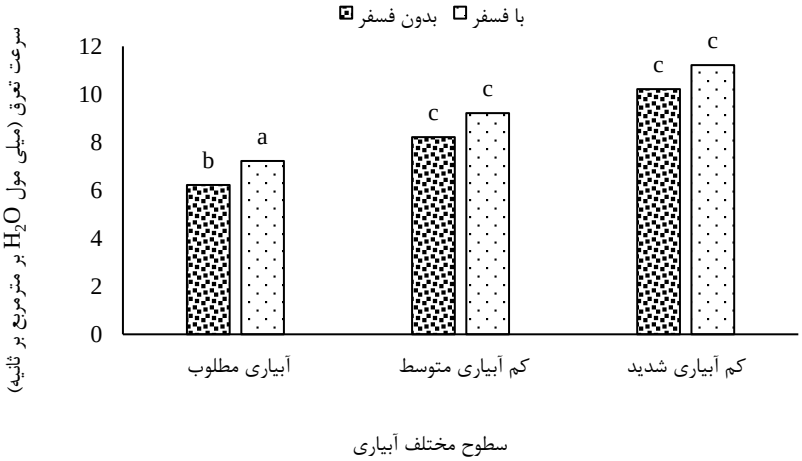
میانگین‌هایی دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

داشت. نتایج نشان داد در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری متوسط در شرایط با و بدون کود فسفر بیشترین مقدار آنتوسیانین در بوته‌های تحت تلقیح با گونه *Rhizophagus intraradices* مشاهده شد که نشان‌دهنده اثر مثبت تیمار قارچ مایکوریزا در این شرایط است (شکل ٤). آنتوسیانین‌ها متعلق به خانواده بزرگ ترکیبات فنلی هستند که در مجموع به‌عنوان فلاونوئیدها شناخته می‌شوند. با توجه به نتایج این بررسی مقدار آنتوسیانین برگ با کاهش آبیاری افزایش و تحت تلقیح دو گونه قارچ مایکوریزا و کود فسفر نیز افزایش نشان داد. اثر مثبت قارچ مایکوریزا بر سطوح آنتوسیانین در گیاهان میزبان در محصولاتی همچون توت‌فرنگی تلقیح شده با *G. intraradices* (١٣) گزارش شده است.

پارامترهای تبادلات گازی (غلظت CO_2 زیرروزنه‌ای، سرعت تعرق، سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای)

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها، غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای تحت عوامل رژیم آبیاری، کود فسفر، قارچ مایکوریزا و برهم‌کنش سه‌گانه آبیاری در کود فسفر در قارچ مایکوریزا دارای تغییر معنی‌داری ($P<0.01$) بود (جدول ٢). سرعت تعرق برگ نیز به‌طور معنی‌داری در واکنش به رژیم آبیاری، قارچ مایکوریزا ($P<0.01$) و برهم‌کنش آبیاری در کود فسفر ($P<0.05$) قرار گرفت (جدول ٢). نتایج نشان داد که سرعت فتوسنتز خالص به‌طور معنی‌داری در واکنش به آبیاری، قارچ مایکوریزا ($P<0.01$) و کود فسفر ($P<0.05$) قرار گرفت اما تغییر معنی‌داری نسبت به برهم‌کنش این عوامل نشان نداد (جدول ٢). هدایت روزنه‌ای برگ نیز فقط در واکنش به رژیم آبیاری واکنش قابل‌توجهی ($P<0.01$) داشت (جدول ٢).

طبق نتایج اثر متقابل آبیاری در کود فسفر در قارچ مایکوریزا، بیشترین غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای (٢٦٣ میکرومول CO_2 بر مول)، به بوته‌های تحت تلقیح با *Rhizophagus intraradices* در شرایط آبیاری مطلوب و کاربرد کود فسفر اختصاص داشت



شکل ۵. مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه آبیاری در کود فسفر بر سرعت تعرق برگ خیار تلخ

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند

که تفاوت معنی‌داری با گونه *Funneliformis mosseae* در همین سطح آبیاری نداشت. نتایج نشان داد در تمامی سطوح آبیاری مقدار این پارامتر فتوسنتزی تحت تلقیح هر دو گونه قارچ مایکوریزا افزایش معنی‌داری نسبت به عدم تلقیح داشت و در هر سطح کود فسفر و هر تیمار از قارچ مایکوریزا با کاهش آبیاری تا سطح کم ابیاری متوسط و شدید غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای کاهش معنی‌داری نسبت به آبیاری مطلوب نشان داد (شکل ٤).

سرعت تعرق طبق نتایج برهم‌کنش آبیاری در کود فسفر، در شرایط آبیاری کامل با کاربرد کود فسفر افزایش ۱۳/٤ درصدی معنی‌داری نسبت به عدم کاربرد فسفر داشت. اما در شرایط کم آبیاری متوسط و شدید سرعت تعرق تحت کاربرد کود فسفر تغییر قابل‌توجهی نداشت. نتایج همچنین نشان داد که در هر دو سطح با و بدون کود فسفر، سرعت تعرق با کاهش آبیاری از سطح آبیاری مطلوب کاهش معنی‌داری داشت اما بین دو سطح کم آبیاری متوسط و شدید تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۵).

طبق نتایج اثرهای اصلی، سرعت تعرق برگ با تلقیح هر دو گونه *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* به‌ترتیب افزایش ۱۲/۹ و ۱۳/۹ درصدی معنی‌داری نسبت به عدم تلقیح داشت اما بین اثر این دو گونه بر تعرق برگ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۵).

طبق نتایج مقایسه میانگین اثرهای اصلی، سرعت فتوسنتز خالص برگ با کاربرد کود فسفر افزایش ۸/۰٦ درصدی معنی‌داری نسبت به عدم مصرف فسفر داشت (جدول ۵). نتایج نشان داد که سرعت فتوسنتز خالص برگ با کاهش میزان آبیاری تا سطح کم آبیاری متوسط و شدید به ترتیب کاهش ۱۰/۹ و ۵۹/٦ درصدی معنی‌داری نسبت به آبیاری مطلوب داشت (جدول ٦). براساس نتایج به‌دست آمده سرعت فتوسنتز خالص تحت تلقیح هر دو گونه *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* به‌ترتیب افزایش ۳٤/٤ و ۳۵/٦ درصدی معنی‌داری در مقایسه با عدم تلقیح نشان داد، اما بین دو گونه تفاوت قابل‌توجهی بر مقدار این پارامتر فتوسنتزی مشاهد نشد (جدول ۵).

نتایج نشان داد که مقدار هدایت روزنه‌ای برگ با کاهش میزان آبیاری روندی کاهشی داشت به‌طوری‌که در سطح کم آبیاری شدید با کم‌ترین مقدار دارای کاهش ۱۹/۷ درصدی معنی‌داری نسبت به آبیاری مطلوب بود. مقدار هدایت روزنه‌ای در شرایط کم‌آبیاری متوسط در حدی بین آبیاری مطلوب و کم‌آبیاری شدید قرار داشت (جدول ۵).

پارامترهای تبادل گاز (سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای، تعرق) شاخص‌های مهم عملکرد فیزیولوژیکی گیاهان در شرایط تنش هستند. کاهش تبادل گاز تحت تنش خشکی

جدول ۵. مقایسه میانگین تغییرات سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای، تعرق و کارایی مصرف آب برگ خیار تلخ در واکنش به آبیاری، کود فسفر و قارچ مایکوریزا

	تیمارها	سرعت فتوسنتز خالص (میکرومول CO_2 بر مترمربع بر ثانیه)	هدایت روزنه‌ای (میلی‌مول H_2O بر مترمربع بر ثانیه)	سرعت تعرق (میلی‌مول H_2O بر مترمربع بر ثانیه)	کارایی مصرف آب (میکرومول CO_2 بر مول H_2O)
رژیم آبیاری	آبیاری مطلوب	۱۰/۳ a	۰/۱۱ a	٦/۷۰ a	۱/٥٤ a
	کم آبیاری متوسط	۹/۱٦ b	۰/۰۹٤ ab	٥/٥۲ ab	۱/٦۷ a
	کم آبیاری شدید	٤/۱٥ c	۰/۰۸۸ b	٥/۱۲ b	۰/۷۹ b
کود فسفر	عدم کاربرد فسفر	۷/٥۳ b	۰/۰۹٥ a	٥/٦۳ a	۱/۳۱ a
	کاربرد فسفر	۸/۱۹ a	۰/۰۹۹ a	٥/۹٤ a	۱/۳٥ a
قارچ مایکوریزا	شاهد (عدم تلقیح)	٥/۷۸ b	۰/۰۹ a	٥/۲٤ b	۱/۰۷ b
	Funneliformis mosseae	۸/۸۲ a	۰/۰۹۹ a	٦/۰۲ a	۱/٤٥ a
	Rhizophagus intraradices	۸/۹۹ a	۰/۱۰ a	٦/۰۹ a	۱/٤۹ a

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

به‌صورت کاهش تعرق درنتیجه بسته شدن روزنه‌ها برای جلوگیری از هدر رفت آب و استفاده بهتر از آب موجود است که کاهش سرعت فتوسنتز خالص (به‌دلیل جلوگیری از ورود CO_2) را در پی دارد. در مطالعه‌ای، میر و همکاران (۳۲) بیان داشتند که تنش خشکی باعث کاهش قابل‌توجهی در سرعت سرعت فتوسنتز خالص، سرعت تعرق و هدایت روزنه‌ای برگ‌های کلزا شد که نتایج مطالعه حاضر را تایید می‌کند. در بررسی‌هایی نشان داده شد که محدودیت‌های سرعت فتوسنتز به‌دلیل تنش خشکی بر اساس کاهش قابل‌توجه هدایت روزنه‌ای و غلظت CO_2 بین سلولی است (٤۱). نتایج همبستگی بین صفات نظر دیگر محققین را در ارتباط مستقیم بین سرعت فتوسنتز خالص و باز بودن روزنه تایید می‌کند. طبق نتایج همبستگی بین صفات، سرعت فتوسنتز خالص برگ دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با هدایت روزنه‌ای، تعرق، غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای و کارایی مصرف آب (r = ۰/۹٥**) بود (جدول ٦). علاوه بر بسته شدن روزنه‌ها در شرایط تنش خشکی، کاهش محتوای کلروفیل برگ نیز می‌تواند دلیل دیگری برای کاهش فتوسنتز در شرایط تنش باشد (٤۹). همبستگی مثبت و بالای کلروفیل کل با سرعت فتوسنتز خالص (r= ۰/۸٥**) (جدول ٦) می‌تواند ارتباط این دو صفت را تایید کند. به‌طوری‌که هر گونه اثر منفی همچون تنش خشکی و یا اثر مثبت همچون کاربرد قارچ‌های مایکوریزا و کود فسفر بر مقدار کلروفیل برگ می‌تواند به‌طور مستقیم بر فتوسنتز گیاه اثر داشته باشد. قارچ مایکوریزا آربسکولار به‌طور قابل‌توجهی ویژگی‌های تبادل گاز و پارامترهای فلورسانس، جذب مواد مغذی و آب و فعالیت‌های آنزیم روبیسکو را افزایش داده و فتوسنتز بهتر را تحت تنش خشکی تضمین می‌کند (٥). در تحقیق حاضر افزایش تبادل گاز در گیاهان تلقیح شده توسط قارچ‌های میکوریز و مصرف کود فسفر در شرایط تنش خشکی اثر این تیمارها را به‌عنوان کاهش دهنده تنش نشان می‌دهد. در مطالعه‌های انجام شده بر روی لوبیا، فتوسنتز، تعرق و هدایت روزنه‌ای برگ در رژیم‌های مختلف

جدول ٦. نتایج همبستگی بین صفات مورد بررسی خیار تلخ تحت رژیم‌های مختلف آبیاری، کود فسفر و دو گونه قارچ مایکوریزا

	وزن میوه در مترمربع (۱)	کلروفیل کل (۲)	کاروتنویید (۳)	نشت الکترولیت (٤)	کاتالاز (٥)	آنتوسیانین (٦)	سرعت فتوسنتز خالص (۷)	هدایت روزنه‌ای (۸)	سرعت تعرق (۹)	غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای (۱۰)	کارایی مصرف آب (۱۱)
(۱)	۱										
(۲)	۰/۹۵ **	۱									
(۳)	−۰/۰٦۳	−۰/۱۰۷	۱								
(٤)	−۰/۸۷ **	−۰/۹۰ **	−۰/۰٥٤	۱							
(٥)	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۸۳ **	−۰/۱۷۸	۱						
(٦)	۰/۲٤۳	۰/۱۸۱	۰/۷۰ **	−۰/۱۹٥	۰/٦۰ **	۱					
(۷)	۰/۸۳ **	۰/۸٥ **	−۰/۳۹	−۰/۷٥ **	−۰/۱۹	−۰/۱۰۷	۱				
(۸)	۰/۸۳ **	۰/۷۹ **	−۰/٤٤	−۰/٦۸ **	−۰/۰۹۲	−۰/۱٥	۰/۸۰ **	۱			
(۹)	۰/۸٦ **	۰/۸۷ **	−۰/۳۷	−۰/۷۰٥ **	−۰/۱۰٥	−۰/۱۰٤	۰/۷۹ **	۰/۹۰ **	۱		
(۱۰)	۰/۸٥ **	۰/۸۷ **	−۰/٤۸ *	−۰/۷٤ **	−۰/۲۰۲	−۰/۲۱	۰/۸۷ **	۰/۹٤ **	۰/۹۲ **	۱	
(۱۱)	۰/٦۸ **	۰/۷۲ **	−۰/۳٤	−۰/٦٥ **	−۰/۲۰	−۰/۰۸	۰/۹٥ **	۰/٦۲ **	۰/٥۷ *	۰/۷۱ **	۱

*و ** به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ٥ و ۱ درصد

آبیاری تحت تلقیح با قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد (عدم تلقیح) داشت (۲) که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد. هدایت روزنه‌ای با تعرق (r= ۰/۹۰**) و غلظت CO_2 زیر روزنه‌ای (r= ۰/۹٤**) همبستگی مثبت و قوی نشان داد (جدول ٦). این یافته نشان می‌دهد که باز بودن روزنه‌ها نه تنها ورود CO_2 قابل تبادل به داخل برگ را تسهیل می‌کند، بلکه با افزایش سرعت تعرق نیز همراه است. این ارتباط بیانگر نقش کلیدی روزنه‌ها در تنظیم تبادل گازها و آب در گیاه است. در این بررسی تنش خشکی با اثر منفی و قارچ مایکوریزا و کود فسفر با اثر مثبت بر پارامترهای تبادلات گازی نقش مهمی در رشد و توسعه گیاه داشتند.

کارایی مصرف آب

بر اساس نتایج به‌دست آمده کارایی مصرف آب به‌طور معنی‌داری در واکنش به آبیاری و قارچ مایکوریزا ($P<0.01$) قرار گرفت اما تغییر معنی‌داری نسبت به کود فسفر و برهم‌کنش این عوامل نشان نداد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثرهای اصلی نشان داد که کارایی مصرف آب با کاهش آبیاری روندی کاهشی داشت به‌طوری‌که در شرایط کم آبیاری شدید نسبت به آبیاری مطلوب و کم آبیاری متوسط به ترتیب کاهش ٤٨/٥ و ٥٢/٤ درصدی معنی‌داری نشان داد، اما بین دو سطح آبیاری مطلوب و کم آبیاری متوسط تفاوت قابل‌توجهی مشاهده نشد (جدول ٥). نتایج نشان داد کارایی مصرف آب تحت دو گونه *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* به‌ترتیب افزایش ٢٦/٥ و ٢٨/٣ درصدی معنی‌داری نسبت به عدم تلقیح داشت. با این حال، بین دو گونه ذکر شده تفاوت معنی‌داری بر این صفت مشاهده نشد (جدول ٥).

کارایی مصرف آب تابع تعادل بین سرعت فتوسنتز خالص و سرعت تعرق است. عواملی که باعث بهبود جذب CO_2 و افزایش فتوسنتز می‌شوند، بدون اینکه سرعت تعرق بیش از حد افزایش یابد، به افزایش کارایی مصرف آب منجر می‌شوند. گزارش شده است که گیاهان مایکوریزایی از رشد، هدایت روزنه‌ای، سرعت فتوسنتز و کارایی مصرف آب بالاتری در مقایسه با گیاهان غیرمایکوریزایی در شرایط مختلف تنش خشکی برخوردار بودند (۲۱). قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار با افزایش هدایت روزنه‌ای برگ کارایی مصرف آب گیاه را بهبود می‌بخشند. هیف‌های قارچ مایکوریزا آربسکولار مسیرهای مفیدی را در خاک، برای جذب بهتر مواد مغذی و آب ایجاد می‌کنند که منجر به افزایش قابل‌توجه کارایی مصرف آب تحت تنش خشکی می‌شود (٢٤).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش خشکی با کاهش پارامترهای تبادلات گازی (شامل سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق و غلظت CO_2 زیرروزنه‌ای)، کارایی دستگاه فتوسنتزی را مختل کرده و در نهایت منجر به کاهش وزن میوه شد. اما تلقیح دو گونه قارچ مایکوریزا و کود فسفر در رژیم‌های مختلف آبیاری با افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و کاهش نشت الکترولیت، از دستگاه فتوسنتزی در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از کم‌آبیاری محافظت کرده که به افزایش کلروفیل و وزن میوه منجر شد. ترکیب آبیاری کامل، کود فسفر و تلقیح مایکوریزا به‌ویژه گونه *Rhizophagus intraradices* در مجموع، بیشترین افزایش در وزن میوه را به همراه داشت و به‌عنوان بهینه‌ترین شرایط برای تولید بیشتر پیشنهاد می‌شود. نوآوری این پژوهش که بر ترکیب فسفر و مایکوریزا متمرکز است، اگرچه در بهبود مستقیم تبادلات گازی محدود بود، اما به‌دلیل تاثیر مثبت آن بر مقدار کلروفیل کل و وزن نهایی میوه، می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مدیریتی موثر برای بهبود مقاومت به خشکی و افزایش عملکرد خیار تلخ در شرایط تنش آبی توصیه شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه نویسنده در مقطع دکتری در دانشگاه تربیت مدرس است. بدین‌وسیله از حمایت‌ها و همکاری‌های ارائه‌شده در طول انجام پژوهش صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Abd_Allah, E. F., A. Hashem, A. A. Alqarawi and S. Al-Arifi. 2015. Alleviation of adverse impact of cadmium stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by arbuscular mycorrhizal fungi. *Pakistan Journal of Botany* 47(2): 785-795.
2. Al-Amri, S. M. 2021. Application of bio-fertilizers for enhancing growth and yield of common bean plants grown under water stress conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences* 28(7): 3901-3908.
3. Arnon, D. I. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal* 23(1): 112-121.
4. Ashrafi, M., M. R. Azimi-Moqadam, E. Mohseni-Fard, F. Shekari, H. Jafari, P. Moradi, M. Pucci, G. Abate and A. Mastinu. 2022. Physiological and molecular aspects of two *Thymus* species differently sensitive to drought stress. *BioTechnology* 11(2): 1-11.
5. Begum, N., C. Qin, M. A. Ahanger, S. Raza, M. I. Khan, M. Ashraf, N. Ahmed and L. Zhang. 2019. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science* 10: 1-15.
6. Begum, N., M. A. Ahanger, Y. Su, Y. Lei, N. S. A. Mustafa, P. Ahmad and L. Zhang. 2019. Improved drought tolerance by AMF inoculation in maize (*Zea mays*) involves physiological and biochemical implications. *Plants* 8(12): 579.
7. Begum, N., K. Akhtar, M. A. Ahanger, M. Iqbal, P. Wang, N. S. Mustafa and L. Zhang. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi improve growth, essential oil, secondary metabolism, and yield of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) under drought stress conditions. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 45276-45295.
8. Begum, N., L. Wang, H. Ahmad, K. Akhtar, R. Roy, M. I. Khan and T. Zhao. 2022. Co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and the plant growth-promoting rhizobacteria improve growth and photosynthesis in tobacco under drought stress by up-regulating antioxidant and mineral nutrition metabolism. *Microbial Ecology* 88: 1-18.
9. Begum, N., Y. Xiao., L. Wang., D. Li., A. Irshad and T. Zhao. 2023. Arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* alleviates drought stress in soybean with overexpressing the *GmSPL9d* gene by promoting photosynthetic apparatus and regulating the antioxidant system. *Microbiological Research* 273: 1-14.
10. Behera, T. K., S. Behera, L. K. Bharathi, K. J. John, P. W. Simon and J. E. Staub. 2010. Bitter gourd: botany, horticulture, breeding. *Horticultural Reviews* 37: 101-141.
11. Cakmak, I. and W. J. Horst. 1991. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiologia Plantarum* 83(3): 463-468.
12. Cakmakci, O., T. Cakmakci, E. D. Durak, S. Demir and S. Sensoy. 2017. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi in melon (*Cucumis melo* L.) seedling under deficit irrigation. *Fresenius Environmental Bulletin* 26(12): 7513-7520.
13. Castellanos-Morales, V., J. Villegas, S. Wendelin, H. Vierheilig, R. Eder and R. Cárdenas-Navarro. 2010. Root colonisation by the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus intraradices* alters the quality of strawberry fruits (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) at different nitrogen levels. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 90(11): 1774-1782.
14. Chandrasekaran, M. 2022. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated alleviation of drought stress via non-enzymatic antioxidants: A meta-analysis. *Plants* 11(19): 2448.
15. Chandrasekaran, M. 2024. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in refining plant photosynthesis and water status under drought stress: a meta-analysis. *Plant, Soil & Environment*. 70(8): 502-508.
16. Chiappero, J., L. del Rosario Cappellari, L. G. S. Alderete, T. B. Palermo and E. Banchio. 2019. Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. *Industrial Crops and Products* 139: 111553.
17. Cui, Z., R. Chen, T. Li, B. Zou, G. Geng, Y. Xu, P. Stevanato, L. Yu, V. N. Nurminsky, J. Liu and Y. Wang. 2024. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance tolerance to drought stress by altering the physiological and biochemical characteristics of sugar beet. *Sugar Technology* 26(5): 1377-1392.
18. Demmig-Adams, B. and W. I. Adams. 1996. Chlorophyll and carotenoid composition in leaves of *Euonymus kiautschovicus* acclimated to different degrees of light stress in the field. *Functional Plant Biology* 23(5): 649-659.
19. Devi, S., D. K. Mahato, S. Singh and S. P. Singh. 2019. Optimization of process variables for retention of functional properties of bitter melon (*Momordica Charantia* L.) and its shelf-life extension. *Current Agriculture Research Journal* 7(1): 74-89.
20. Dolatmand Shahri, N. and M. Haghshenas. 2017. Effect of different amounts of soil moisture in different salicylic acid levels on enzymes activity and morphophysiological characteristics of alfalfa. *Crop Physiology Journal* 9(33): 99-118. (In Farsi).
21. Duan, H. X., C. L. Luo, Y. Zhu, L. Zhao, J. Wang, W, Wang and Y. C. Xiong. 2024. Arbuscular mycorrhizal fungus activates wheat physiology for higher reproductive allocation under drought stress in primitive and modern wheat. *European Journal of Agronomy* 161: 127376.

22. Etesami, H. 2020. Enhanced phosphorus fertilizer use efficiency with microorganisms. *Nutrient Dynamics for Sustainable Crop Production* 215-245.
23. Halliwell, B. and J. M. Gutteridge. 2015. Free Radicals in Biology and Medicine. Oxford University Press, USA.
24. Hamedani, N. G., M. Gholamhoseini, F. Bazrafshan, F. Habibzadeh and B. Amiri. 2022. Yield, irrigation water productivity and nutrient uptake of arbuscular mycorrhiza inoculated sesame under drought stress conditions. *Agricultural Water Management* 266: 107569.
25. He, J. D., Y. N. Zou, Q. S. Wu and K. Kuča. 2020. Mycorrhizas enhance drought tolerance of trifoliate orange by enhancing activities and gene expression of antioxidant enzymes. *Scientia Horticulturae* 262: 108745.
26. Joseph, J., L. Bharathi and K. Peter. 2008. Sweet gourd (*Momordica cochinchinensis* (Lour) Spreng.). *Underutilized and Underexploited Horticultural Crops* 4: 185-191.
27. Kebede, T. G., E. Birhane, K.M. Ayimut and Y. G. Egziabher. 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi improve biomass, photosynthesis, and water use efficiency of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller under different water levels. *Journal of Arid Land* 15(8): 975-988.
28. Krizek, D. T., G. F. Kramer, A. Upadhyaya and R. M. Mirecki. 1993. UV-B response of cucumber seedlings grown under metal halide and high pressure sodium/deluxe lamps. *Physiologia Plantarum* 88(2): 350-358.
29. Lutts, S., J. Kinet and J. Bouharmont. 1996. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany* 78(3): 389-398.
30. Maluleke, M. K. 2022. Metabolite profile of African horned cucumber (*Cucumis metuliferus* E. May. Ex Naudin) fruit grown under differing environmental conditions. *Scientific Reports* 12(1): 3722.
31. Martin, D., E. Stegman and E. Fereres. 1990. Irrigation scheduling principles. Management of Farm Irrigation Systems. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI.
32. Mir, Y., M. Daneshvar and A. Esmaili. 2021. Effect of foliar application of salicylic acid and micronutrients on photosynthetic activities and rapeseed grain yield under water deficit tension. *Crop Physiology Journal* 13(50): 119-134. (In Farsi).
33. Mohammed, N. T., H. S. Halshoy, N. F. Saed, S. M. Ahmed, H. R. H. Amen, H. W. R. Ali, S. M. Ali and A. S. Ibrahim. 2025. Mycorrhizal fungi and chicken manure: a sustainable strategy for cucumber plant productivity and quality. *Vegetos* 1-16.
34. Mohasseli, V. and F. Farbood. 2022. Effect of compost on growth characteristics and macronutrient concentration in *Momordica charantia* L. under moisture stress. *Iranian Journal of Soil Research* 35(4): 353-366.
35. Moualeu-Ngangue, D. P., T. W. Chen and H. Stützel. 2017. A new method to estimate photosynthetic parameters through net assimilation rate–intercellular space CO_2 concentration (A–Ci) curve and chlorophyll fluorescence measurements. *New Phytologist* 213(3): 1543-1554.
36. Naghizadeh, M., R. Kabiri, A. Hatami, H. Oloumi, F. Nasibi and Z. Tahmasei. 2019. Exogenous application of melatonin mitigates the adverse effects of drought stress on morpho-physiological traits and secondary metabolites in Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica*). *Physiology and Molecular Biology of Plants* 25: 881-894.
37. Nazari-Nasi, H., R. Amirnia and M. R. Zardashti. 2018. Effect of drought stress and biofertilizers on some physiological characteristics and grain yield of medicinal pumpkin plants. *Crops Improvement* 20(1): 205-217. (In Farsi).
38. Ortas, I. 2012. The effect of mycorrhizal fungal inoculation on plant yield, nutrient uptake and inoculation effectiveness under long-term field conditions. *Field Crops Research* 125: 35-48.
39. Phillips, J. M. and D. S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British mycological Society* 55(1): 158-161.
40. Rapparini, F. and J. Peñuelas. 2014. Mycorrhizal fungi to alleviate drought stress on plant growth. *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses* 1: 21-42.
41. Salmon, Y., A. Lintunen, A. Dayet, T. Chan, R. Dewar, T. Vesala and T. Hölttä. 2020. Leaf carbon and water status control stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis in trees. *New Phytologist* 226(3): 690-703.
42. Tan, S. P., T. C. Kha, S. E. Parks and P. D. Roach. 2016. Bitter melon (*Momordica charantia* L.) bioactive composition and health benefits: A review. *Food Reviews International* 32(2): 181-202.
43. Tariq, A., K. Pan, O. A. Olatunji, C. Graciano, Z. Li, F. Sun, L. Zhang, X. Wu, W. Chen and D. Song. 2018. Phosphorous fertilization alleviates drought effects on *Alnus cremastogyne* by regulating its antioxidant and osmotic potential. *Scientific Reports* 8(1): 5644.
44. Vance, C. P., C. Uhde-Stone and D. L. Allan. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist* 157(3): 423-447.
45. Vanclooster, M. 1996. WAVE: A Mathematical Model for Simulating Water and Agrochemicals in the Soil and Vadose Environment. Reference and user's manual. Institute for Land and Water Management. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

46. Verbruggen, E., M. G. Van der Heijden, M. C. Rillig and E. T. Kiers. 2013. Mycorrhizal fungal establishment in agricultural soils: factors determining inoculation success. *New Phytologist* 197(4): 1104-1109.
47. Wang, X. M., X. K. Wang, Y. B. Su and H. X. Zhang. 2019. Land pavement depresses photosynthesis in urban trees especially under drought stress. *Science of the Total Environment* 653: 120-130.
48. Yang, P. M. and S. T. He. 2022. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi and deficit irrigation on the yield and sugar content of watermelons (*Citrullus lanatus*). *Horticultural Science* 49(4): 225-233.
49. Zahedi, S. M., M. S. Hosseini, N. D. H. Meybodi, J. Abadía, M. Germ, R. Gholami and M. Abdelrahman. 2022. Evaluation of drought tolerance in three commercial pomegranate cultivars using photosynthetic pigments, yield parameters and biochemical traits as biomarkers. *Agricultural Water Management* 261: 107357.