

The effect of symbiosis with mycorrhizal fungi on some biochemical and growth characteristics of tarragon plant under drought stress conditions

Leila Mansori¹, Mahmood Esna-Ashari^{2*} and Masoomeh Amerian³

1- Former Master's student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3- Associate Professor, Department of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

*Corresponding author: m.esnaashari@basu.ac.ir

(Received: 17 December 2023

Revised: 10 February 2024

Accepted: 19 February 2024)

Extended Abstract

1. Introduction:

Water deficit is one of the major abiotic stresses that adversely affects crop growth and yield. Drought stress occurs when the available soil-water becomes scanty and atmospheric conditions cause continuous loss of water by transpiration or evaporation. Arbuscular mycorrhizal fungi, the most important root endophytes, are extensively studied and well documented for their role in promoting resistance to drought stress, nutrient uptake, and improvement in plant development. Furthermore, drought stress adversely affects the physiology, biochemistry, growth, and development of plants worldwide. It leads to the accumulation of reactive oxygen species (ROS) in plants, destroys cell membranes, and disrupts the dynamic balance of active oxygen content. These physiological and biochemical responses of plants under drought stress cause growth inhibition and even death. Many studies have shown that the inoculation of mycorrhizal fungi initiates morphological, nutritional, and physiological changes in host plants to counter biotic and abiotic stresses and enhance plant growth. Approximately 72% of the known vascular plants can act as hosts for arbuscular mycorrhizal fungi, and such mutually beneficial mycorrhizal associations have key roles in maintaining plant productivity in natural and agricultural habitats.

2. Materials and Methods:

To investigate the symbiosis of mycorrhizal fungi and drought stress on the growth and biochemical characteristics of tarragon plant, a factorial pot experiment (with two factors) was conducted in the form of a completely randomized design in the research greenhouse of Razi University in 2021. The first factor was drought stress in two levels, including control (full irrigation) and irrigation up to 50% of the pot capacity, and the second factor included inoculation of tarragon rhizomes with mycorrhizal fungi from the genus *Glomus* in 5 levels (*G. hoi* + *G. mosseae*, *G. hoi* + *G. intraradices*, *G. mosseae* + *G. intraradices*, *G. hoi* + *G. mosseae* + *G. intraradices*, and the control (no inoculation). During the cultivation of rhizomes, fungi inoculation was done, and the amount of mycorrhizal fungi used for each pot was 100 g. After the rhizomes were cultivated and the plants were fully established, drought stress was applied. In order to prevent sudden stress and osmotic stress in plants, drought stress was applied gradually over a period of two months. Drought stress was applied by weight, and two months after the application of drought stress, some growth characteristics (leaf dry weight and root length) and physiological characteristics (relative water content, photosynthetic pigments, electrolyte leakage, proline, total soluble sugars, soluble protein, and antioxidant capacity) were measured.

3. Results and Discussion:

The results showed that in tarragon plants, drought stress caused a decrease in leaf dry weight, root length, photosynthetic pigments, relative water content, and soluble protein. While the amount of proline, total soluble sugars, and antioxidant capacity has increased. The use of mycorrhizal fungi improved the studied characteristics under drought stress conditions. In the conditions of drought stress, the application of mycorrhizal fungi led to a decrease in electrolyte leakage. In response to drought stress, osmotic regulation processes were activated in tarragon plants. Inoculation with mycorrhizal fungi significantly increased vegetative growth indicators, relative content of plant water, proline, and total soluble sugars of tarragon plants under drought stress conditions in comparison with non-inoculated plants. In general, the use of mycorrhizal fungi increased the resistance to drought stress in tarragon plants. The lowest

amount of leaf dry weight (0.65 g) and root length (14.65 cm) was observed in the treatment of 50% FC. Contrary to drought stress, the use of all three types of mycorrhizal fungi increased the dry weight of the leaf (0.83 g) and root length (17.57 cm). In the conditions of drought stress, the application of mycorrhiza improved the amount of photosynthetic pigments compared to the control. The highest amount of proline (18.33 $\mu\text{mol g}^{-1}$ FW) was in the treatment of drought stress with three species of mycorrhizal fungi. The highest amount of total soluble sugar (49.00 mg g^{-1} FW), soluble protein (0.352 mg g^{-1} FW), and antioxidant activity (96.06%) was observed in the full irrigation treatment with three species of mycorrhizal fungi.

4. Conclusion:

Under drought conditions, mycorrhizal fungi can enhance seedling survival, promote absorption and transportation of water by the host plant, change the root morphology, improve the gas exchange ability and water use efficiency, regulate the plant endogenous hormone levels, and accelerate reactive oxygen species removal, all of which are aimed at reducing the negative impact of drought on plants. The results showed that the application of *G. intraradices* + *G. hoi* + *G. mosseae* had a better effect on the growth, physiological, and biochemical characteristics of tarragon under drought stress. The above results showed the positive effect of mycorrhiza in increasing the drought tolerance of the tarragon plant and better inhibition of free radicals produced in the presence of this stress. Accumulation of organic molecules in the vacuoles of leaf cells under drought stress is more common in mycorrhizal plants and causes a decrease in the osmotic potential of leaf cells. All these changes change the ratio of water in mycorrhizal plants. In this study, the use of all three species of mycorrhizal fungi improved stress tolerance in tarragon plants more than the control.

Keywords: Antioxidant capacity, Proline, Relative water content, Total soluble sugars.

Citation: Mansori, L., Esna-Ashari, M. & Amerian, M. (2026). The effect of symbiosis with mycorrhizal fungi on some biochemical characteristics of tarragon plant under drought stress conditions. *Journal of Vegetables Sciences*, 18(2), 91-114 .doi: 10.22034/iuvs.2024.2018126.1338

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Vegetables Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





اثر هم‌زیستی با قارچ میکوریزا بر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و رشد گیاه ترخون تحت شرایط تنش خشکی

لیلا منصوری^۱، محمود اثنی‌عشری^{۲*} و معصومه عامریان^۳

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- استاد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

*نویسنده مسئول: m.esnaashari@basu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶

چکیده

تنش خشکی مهم‌ترین تنش غیرزیستی است که رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر هم‌زیستی قارچ‌های میکوریزا و تنش خشکی بر خصوصیات رشد و بیوشیمیایی گیاه ترخون، آزمایشی گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه رازی انجام شد. فاکتور اول تنش خشکی در دو سطح شامل شاهد (آبیاری کامل) و آبیاری در حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و فاکتور دوم شامل مایه‌زنی ریزوم‌های ترخون با قارچ‌های میکوریزا از جنس *Glomus* در ۵ سطح (*G. hoi + G. mosseae*، *G. hoi + G. intraradices*، *G. hoi + G. mosseae + G. intraradices* و *G. intraradices*) و شاهد بود. برخی از ویژگی‌های رشد (وزن خشک برگ و طول ریشه)، فیزیولوژیکی (محتوی نسبی آب برگ، رنگیزه‌های فتوسنتزی، نشت الکترولیت، پرولین، قندهای محلول کل، پروتئین محلول و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی برگ) اندازه‌گیری شدند. برای مایه‌زنی، ۱۰۰ گرم از مایه تلقیح که شامل خاک حاوی اسپور، ریشه‌های میکوریزا و هیف بود در زیر هر قطعه ریزوم استفاده شد. یک ماه پس از استقرار گیاه، تنش خشکی به روش وزنی اعمال شد. طبق نتایج به دست آمده، تنش خشکی سبب کاهش وزن خشک برگ و طول ریشه شد. بدین صورت که کم‌ترین میزان وزن خشک برگ (۰/۶۵ گرم) و طول ریشه (۱۴/۶۵ سانتی‌متر)، در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. برخلاف تنش خشکی، کاربرد هر سه گونه قارچ میکوریزا سبب افزایش وزن خشک برگ (۰/۸۳ گرم) و طول ریشه (۱۷/۵۷ سانتی‌متر) شد. در شرایط تنش خشکی، کاربرد میکوریزا سبب بهبود میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی نسبت به شاهد شد. بیش‌ترین میزان پرولین (۱۸/۳۳ میکرومول در گرم وزن تر) در تیمار تنش خشکی همراه با سه گونه قارچ میکوریزا حاصل شد، در حالی که بیش‌ترین میزان قند محلول کل (۴۹/۰۰ میلی‌گرم در گرم وزن تر)، پروتئین محلول (۰/۳۵۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۰/۹۶٪)، در تیمار آبیاری کامل همراه با سه گونه قارچ میکوریزا مشاهده گردید. نتایج نشان داد که کاربرد ۳ گونه از قارچ میکوریزا شامل *G. intraradices + G. hoi + G. mosseae*، بر ویژگی‌های رشد، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ترخون تأثیر بهتری داشت.

واژه‌های کلیدی: پرولین، قندهای محلول کل، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، محتوای نسبی آب برگ.

استناد: منصوری، ل.، اثنی‌عشری، م. و عامریان، م. (۱۴۰۴). اثر هم‌زیستی با قارچ میکوریزا بر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و رشد گیاه ترخون تحت شرایط تنش خشکی. علوم سبزی‌ها، ۱۸(۲)، ۹۱-۱۱۴.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این مجله به صورت آزاد در وب سایت مجله برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

تغییر دهد و اثرات آشکاری بر جوانه‌زنی بذر، ساختار مورفولوژیکی گیاه، توزیع زیست توده، در دسترس بودن عناصر غذایی خاک، فتوسنتز و متابولیسم دارد و در نتیجه رشد، نمو، بقا و عملکرد گیاهان را به‌طور جدی محدود می‌کند (Chen *et al.*, 2020 & Raeisi Sadati *et al.*, 2025). عکس‌العمل‌های گیاهان از طریق کاهش اندام‌های هوایی، کاهش سطح برگ، خردار شدن، افزایش رشد ریشه، تجمع آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی، بسته شدن روزنه‌ها، تجمع اسمولیت‌ها و بروز ژن‌های خاص نمود پیدا می‌کند (Raeisi Sadati *et al.*, 2025). طبق نتایج تحقیقات انجام شده، در گیاه ترخون تنش خشکی با کاهش خصوصیات رشدی و افزایش میزان پرولین و قندهای محلول کل در برگ همراه بوده است (Lotfi *et al.*, 2014; Aghaei Joubani *et al.*, 2018; Selahvarzi & Kamali, 2022).

در حال حاضر، تلاش‌هایی برای افزایش مقاومت به خشکی گیاهان و کاهش مصرف آب در حال انجام است. یکی از راهبردهای مورد استفاده برای افزایش مقاومت به خشکی گیاه، مایه‌زنی با قارچ میکوریزا است (Behrooz *et al.*, 2019). قارچ‌های میکوریزا می‌توانند اثرات مخرب تنش خشکی را کمتر کنند (Gupta, 2020). تنظیم مقاومت به خشکی گیاه توسط قارچ میکوریزا یک فرآیند بسیار پیچیده است که شامل انواع متابولیت‌ها و مسیرهای متابولیکی است (Santander *et al.*, 2017). در شرایط تنش خشکی، قارچ میکوریزا می‌تواند بقای گیاه (Wu & Zou, 2017)، جذب و انتقال آب توسط گیاه میزبان (Ren *et al.*, 2019)، مورفولوژی ریشه (Zhang *et al.*, 2019)، توانایی تبادل گاز و کارایی مصرف آب (Huang *et al.*, 2020)، سطح هورمون درون‌زا گیاه (Begum *et al.*, 2020) و حذف

ترخون با نام علمی *Artemisia dracunculus* L. متعلق به خانواده Asteraceae، به‌صورت علفی یک ساله و چندساله در طبیعت وجود دارد. منشاء اصلی این گیاه مرکز و جنوب غرب آمریکا و آسیای مرکزی است، اما امروزه در بسیاری از مناطق جهان کشت شده و لذا پراکنش جهانی دارد (Selahvarzi, 2022). از برگ‌های معطر ترخون در چاشنی، سالاد سوپ و انواع سس استفاده می‌شود. اسانس ترخون در صنایع کنسرو سازی و عطر سازی استفاده می‌شود (Mohammadi *et al.*, 2019). ترخون یک گیاه سبزی، دارویی و ادویه‌ای است که با سطح کشت بالا در ایران هم تولید می‌شود. ترخون معمولاً در نواحی مرطوب و در سواحل رودخانه‌ها و جاهای مرطوب می‌روید (Selahvarzi, 2022). (Kamali &

گیاهان در طول دوره رشد و نمو در معرض تنش‌های محیطی مختلف قرار می‌گیرند. در این میان، خشکی یکی از شدیدترین تنش‌های محیطی است که بر عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد (Rejae *et al.*, 2025). حدود ۸۰ تا ۹۵ درصد گیاه از آب تشکیل شده است که نقش حیاتی در فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف از جمله بسیاری از جنبه‌های رشد، نمو و متابولیسم گیاه دارد (Ahmadi *et al.*, 2020). در نتیجه، برخی خشکی را به‌عنوان تنش محیطی اصلی برای گیاهان مختلف و مهم‌ترین تهدید برای امنیت غذایی جهان در آینده می‌دانند (Brodersen *et al.*, 2019 & Fatemi *et al.*, 2025). اثرات خشکسالی در کشاورزی به‌دلیل کاهش منابع آب و افزایش تقاضای غذا با رشد نگران‌کننده جمعیت جهان تشدید می‌شود (Okorie *et al.*, 2019). تنش خشکی می‌تواند وضعیت آب گیاه را

محل و زمان اجرای پژوهش

این پژوهش در گلخانه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی در سال ۱۴۰۰ انجام گرفت. تحقیق به صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول میزان تنش خشکی در دو سطح شاهد (آبیاری کامل) و رطوبت در حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و فاکتور دوم نیز شامل تلقیح ریزوم‌های ترخون با قارچ‌های میکوریزا جنس گلوموس در ۵ سطح شامل شاهد و *G.hoi + G. G.mosseae*، *G.hoi + G. intraradices*، *G. mosseae + G. intraradices*، *G.hoi + G. mosseae + G. intraradices* بود که در مجموع تعداد کل تیمارها ۱۰ تیمار در ۳ تکرار و در مجموع ۳۰ واحد آزمایشی را شامل شدند. هر واحد آزمایشی به تعداد ۳ گلدان و در مجموع ۹۰ گلدان که برای هر گلدان یک بوته منظور شد. پنج گونه قارچ میکوریزا از آزمایشگاه بیولوژی خاک دانشگاه بوعلی سینا و ریزوم‌های توده بومی کرمانشاه از مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی استان کرمانشاه تهیه شدند.

ریزوم‌ها به گلدان‌های ۲ کیلویی به قطر دهانه ۱۹ و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر حاوی مخلوطی از خاک زراعی و ماسه با نسبت ۱:۱ انتقال یافتند. که قبلاً به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱/۲ اتمسفر اتوکلاو شده بودند (Esmailpour et al., 2013). به منظور تهویه و بهبود زهکشی، در کف هر گلدان به مقدار ۱۰۰ گرم پوکه معدنی ریخته شد و جمعاً وزن هر گلدان ۲۰۰۰ گرم شد. در ضمن ۵۰ گرم از مایه تلقیح که شامل خاک حاوی اسپور، ریشه‌های مایکوریزا و هیف بود در زیر هر قطعه ریزوم استفاده شد (Esmailpour et al., 2013).

گونه‌های اکسیژن فعال (Wu & Zou, 2017) را بهبود بخشید که منجر به کاهش تأثیر منفی تنش خشکی بر گیاهان می‌شود. در ضمن ترشحات قارچ‌های میکوریزا از جمله گلومالین بر مقدار آب قابل استفاده خاک مؤثر است (Madouh & Quoreshi, 2023). گلومالین به صورت پوششی روی هیف‌های قارچ قرار گرفته و از هدر رفت آب و عناصر غذایی پیش از رسیدن به گیاه جلوگیری می‌کند و نیز باعث بهبود دانه‌بندی و ساختمان خاک می‌شود (Rydlová & Püschel, 2020). در عوض، برای حفظ یک رابطه همزیستی، گیاهان ۴ تا ۲۰ درصد از کل مواد فتوسنتزی خود را (به شکل لیپیدها و قندها) برای رشد و تولید مثل قارچ میکوریزا صرف می‌کنند (MacLean et al., 2017). در شرایط تنش خشکی، قارچ میکوریزا سبب افزایش ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک برگ‌ها، کلروفیل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه مرزه (*Satureja hortensis* L.) شده است (Rasouli et al., 2023).

با توجه به عوارض ناشی از تنش خشکی در گیاهان و اثرات مثبت حاصل از همزیستی گیاهان با قارچ‌های میکوریزا در مواجهه با تنش خشکی و اینکه تا به حال مطالعه‌ای در خصوص استفاده از قارچ‌های میکوریزا روی گیاه ترخون تحت تنش خشکی در کشور انجام نشده است، پژوهش حاضر بر آن شد تا اثر همزیستی سه گونه قارچ از جنس *Glomus* شامل *G. intraradice*، *G. hoi* و *G. mosseae* با گیاه ترخون را روی برخی ویژگی‌های رشد، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی این گیاه تحت تنش خشکی مورد مطالعه قرار دهد.

مواد و روش‌ها

اِعمال تنش خشکی وقتی شروع شد که گیاهان به ارتفاع ۳ تا ۵ سانتی‌متر رسیده و دارای حداقل ۶ تا ۸ برگ بودند و زمانی پایان یافت که بلندی آن‌ها به ۱۸ تا ۲۵ سانتی‌متر رسید و در این مرحله دارای حدود ۲۰ تا ۲۲ برگ (قبل از مرحله گیدهی) بودند (Aghaei Joubani *et al.*, 2018).

مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. زمان کشت ۲۳ مهر ماه بود و پس از استقرار بوته‌ها، اعمال خشکی از ابتدای خرداد تا اواخر تیر انجام شد. به‌منظور جلوگیری از تنش ناگهانی و ایجاد شوک اسمزی در گیاهان، تنش خشکی به‌طور تدریجی اعمال شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده در آزمایش

Table 1- Physical and chemical characteristics of the soil used in the experiment

| هدایت الکتریکی Electrical Conductivity (dS/m) | pH | ماده آل Organic carbon (%) | نیتروژن Nitrogen (%) | پتاسیم Potassium (ppm) | فسفر Phosphorus (ppm) | بافت خاک Soil texture |
|--|-----|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 0.75 | 7.9 | 0.8 | 0.08 | 93.3 | 16 | Sandy, clay, silty |

برای اعمال سطوح مختلف تنش از روش وزنی استفاده گردید. بدین صورت که بعد از محاسبه‌ی ظرفیت زراعی سطح تنش به‌صورت درصدی از رطوبت زراعی در نظر گرفته شد و مقدار کاهش رطوبت تا رسیدن به مقدار رطوبت مدنظر بر حسب گرم آب محاسبه و به گلدان‌ها اضافه گردید. برای سطح تنش رطوبتی (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) وزن نهایی گلدان در سطح تنش مذکور محاسبه شد و جهت رسیدن وزن گلدان به مقدار مدنظر به آن آب اضافه شد و پس از رسیدن به سطح تنش مربوطه در همان روز در سطح آن تنش حفظ گردید. توزین و محاسبه میزان رطوبت مورد نظر در طول مدت تنش روزانه محاسبه گردید (Ardalani *et al.*, 2015).

در آذر ماه در پایان دوره اعمال تنش خشکی (پس از دو ماه) (Aghaei Joubani *et al.*, 2018)، برگ‌های بالغ و سالم هر گیاه انتخاب و جمع‌آوری شد و برای اندازه‌گیری صفات رشدی و بیوشیمیایی به آزمایشگاه انتقال یافتند.

به‌منظور اعمال تیمارهای رطوبتی، گلدان‌ها به‌صورت هم وزن با ترکیب خاکی مورد نظر پر شدند و جهت خروج کامل هوای موجود در خلل و فرج خاک با آب تیمار گردیدند. به‌منظور ممانعت از تبخیر رطوبت گلدان‌ها سطح فوقانی آن‌ها با فویل آلومینیومی پوشانده شد. گلدان‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت روی سطوح مشبک جهت زهکشی و رسیدن به ظرفیت زراعی قرار داده شدند. سپس گلدان‌ها وزن شدند و خاک آن‌ها جهت خشک‌شدن کامل در دمای ۱۰۴ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. در نهایت وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. رطوبت خاک طبق رابطه (۱) محاسبه شد (Schonfeld *et al.*, 1988).

$$(1) FC = \frac{FCW - DW}{DW} \times 100$$

FCW وزن خاک در ظرفیت زراعی، DW وزن خاک خشک شده در آون است.

گردید و در نهایت قسمت بالایی عصاره جدا گردید. جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۴۵ و ۶۶۳ نانو متر با استفاده از روش اسپکروفوتومتری (مدل کری ۱۰۰، واریان، امریکا) قرائت شد و با استفاده از روابط ۲ تا ۵ زیر میزان کلروفیل و کاروتنوئید بر حسب میلی گرم در یگ گرم وزن تر محاسبه گردید.

$$(2) \text{Chla (mg L}^{-1}\text{)} = (12.7 \times \text{A663}) - (2.69 \times \text{A645})$$

$$(3) \text{Chlb (mg L}^{-1}\text{)} = (25.8 \times \text{A645}) - (4.68 \times \text{A663})$$

$$(4) \text{Chltotal (mg L}^{-1}\text{)} = (20.21 \times \text{A645}) + (8.02 \times \text{A633})$$

$$(5) \text{Car (mg L}^{-1}\text{)} = \frac{(100 \times \text{A470} - 2.27 \times \text{Chla} - 81.4 \text{ Chlb})}{227}$$

محتوای نسبی آب برگ (RWC)

به‌منظور تعیین میزان محتوای نسبی آب برگ از هر تیمار پنج برگ به‌طور تصادفی انتخاب شد و در کیسه پلاستیکی قرار گرفت و بلافاصله جهت اندازه‌گیری رطوبت به آزمایشگاه انتقال یافت. در فاصله انتقال به آزمایشگاه نمونه‌ها در فلاسک یخ قرار گرفت. در آزمایشگاه پس از پانچ کردن برگ‌ها وزن تازه آن‌ها تعیین و سپس قطعات پانچ شده به مدت ۱۸-۱۶ ساعت در درجه حرارت اتاق (۲۰-۱۸ درجه سانتی‌گراد) و در تاریکی قرار گرفت و متعاقب آن وزن آماس پس از حذف رطوبت سطح نمونه‌ها با قرار دادن آن‌ها در بین کاغذ خشک کن، تعیین گردید. وزن خشک نیز پس از قرار گرفتن نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد و در نهایت محتوای نسبی آب برگ‌ها از رابطه‌ی (۶) زیر تعیین شد (Schonfeld *et al.*, 1988).

$$(6) \text{RWC}\% = \frac{(\text{FW} - \text{DW})}{(\text{TW} - \text{DW})} \times 100$$

ویژگی‌های رشد و کلونیزاسیون ریشه

خصوصیات رشد مورد بررسی شامل طول ریشه و وزن خشک برگ بود. وزن خشک با قرار دادن نمونه‌های برگ به مدت ۲۴ ساعت در آون ۷۲ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد.

رنگ‌آمیزی ریشه برای تعیین کلونیزاسیون قارچ میکوریزا با استفاده از روش (Phillips & Hayman, 1970) انجام شد. ریشه گیاهان نمونه‌برداری شده به مدت ۵ دقیقه در محلول پتاسیم هیدروکسید (KOH) ۱۰ درصد با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد و سه بار زیر آب جاری به مدت ۱۰ دقیقه شسته شد. نمونه‌های ریشه با هیدروکلراید یک درصد به مدت یک دقیقه اسیدی شدند و سپس در محلول رنگ‌آمیزی تریپان بلو ۲۰ درصد غوطه‌ور شدند و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق نگهداری شدند. از نمونه‌های رنگ‌آمیزی شده، ۳۰ قطعه ریشه (طول ۱ سانتی‌متر) از هر بوته بریده شد و با میکروسکوپ نوری مشاهده گردید. کلونیزاسیون ریشه با توجه به روش تقاطع خط شبکه توصیف شده تعیین شد (Giovannetti & Mosse, 1980). در این روش، درصد کلونیزاسیون ریشه در هر گیاه با تقسیم تعداد کل قطعات ریشه کلونیزه شده بر تعداد کل قطعات ریشه بررسی شده تعیین شد.

خصوصیات فیزیولوژیکی

رنگیزه‌های فتوسنتزی

مقدار کلروفیل برگ بر اساس روش Arnon (۱۹۶۷) اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب که ۰/۱ گرم از بافت تر برگ ترخون با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰٪ در داخل هاون همگن گردید. مخلوط همگن به‌دست آمده به مدت ۱۰ دقیقه در ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ

FW: وزن تر، DW: وزن خشک و TW وزن آماش می‌باشند.

نشت الکترولیت‌ها (EL)

برای اندازه‌گیری میزان نشت الکترولیت‌ها از روش Ben Hamed و همکاران (۲۰۰۷) استفاده گردید. ابتدا ۰/۲ گرم از بافت سالم و تازه‌ی برگ پس از شستشو با آب مقطر جهت شسته شدن یون‌های احتمالی از سطح گیاه، درون لوله آزمایش درب‌دار قرار داده شد و ۱۰ میلی‌لیتر آب یون‌گیری شده به آن اضافه گردید. لوله‌های آزمایش به مدت ۲ ساعت درون حمام آب‌گرم به‌دمای ۳۲ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده شدند و میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها (EC₁) با EC متر اندازه‌گیری شد. سپس در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه اتوکلاو گردیده و پس از رسیدن به‌دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها (EC₂) مجدداً اندازه‌گیری شد و از رابطه‌ی (۷) درصد نشت یونی محاسبه گردید.

$$(7) EL = \frac{EC_1}{EC_2} \times 100$$

پرویلین و قندهای محلول کل

نیم‌گرم از بافت برگ به‌همراه نیتروژن مایع در داخل هاون چینی سائیده و له گردید. سپس بلافاصله به آن ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۵٪ اضافه شد. قسمت بالایی محلول حاصل جدا و رسوبات آن دو بار با ۵ میلی‌لیتر اتانول ۷۰٪ شسته شد و فاز بالایی آن‌ها به قسمت روبی که قبلاً برداشت شده بود، اضافه گردید. محلول به‌دست آمده به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. پس از جدا شدن فاز مایع و جامد، قسمت مایع در داخل یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری گردید.

برای تعیین میزان پرویلین، یک میلی‌لیتر از عصاره الکلی فوق‌الذکر با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر رقیق شد و ۵ میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین به آن اضافه گردید. ترکیب معرف نین‌هیدرین برای هر نمونه شامل ۰/۱۲۵ گرم نین‌هیدرین + ۲ میلی‌لیتر اسیدفسفریک ۶ مولار + ۳ میلی‌لیتر اسیداستیک گلاسیال بود. پس از افزودن معرف نین‌هیدرین، ۵ میلی‌لیتر اسیداستیک گلاسیال به آن افزوده شد و مخلوط حاصله پس از به‌هم زدن به مدت ۴۵ دقیقه در حمام آب جوش ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از خارج کردن نمونه‌ها از حمام آب جوش و خنک شدن آن‌ها ۱۰ میلی‌لیتر بنزن به هر کدام از نمونه‌ها اضافه و به‌شدت تکان داده شدند تا پرویلین وارد فاز بنزن گردید. نمونه‌ها سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دمای آزمایشگاه به‌حال سکون رها شدند. محلول‌های استاندارد از پرویلین به غلظت‌های صفر تا ۰/۱ میکرومول بر میلی‌لیتر تهیه گردید و در نهایت میزان جذب نور محلول‌های استاندارد و نمونه‌ها در طول موج ۵۱۵ نانومتر با دستگاه اسپکتوفتومتر (مدل کری ۱۰۰، واریان، امریکا) اندازه‌گیری شد (Irigoyen *et al.*, 1992).

برای اندازه‌گیری قندهای محلول، ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره الکلی با ۳ میلی‌لیتر آنترن تازه تهیه شده (۱۵۰ میلی‌گرم آنترن + ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۷۲٪) واکنش داده، سپس به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده شد. در این هنگام ماده رنگی تشکیل گردید و استانداردهایی از گلوکز از غلظت صفر تا ۰/۱ میکرومول بر میلی‌لیتر تهیه شد و در نهایت میزان جذب نور محلول‌های استاندارد و نمونه‌ها با اسپکتوفتومتر (مدل کری ۱۰۰، واریان، امریکا) در طول موج ۶۲۵ نانومتر قرائت گردید (Paquin & Lechasseur, 2011).

پروتئین محلول

برای تعیین میزان پروتئین‌های محلول از روش Bradford (۱۹۷۶) استفاده گردید. بدین منظور مقدار نیم گرم برگ تازه با ۶/۲۵ میلی‌لیتر محلول بافر استخراج مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد. برای تهیه یک لیتر محلول بافر استخراج، ۱۲۱/۴ گرم تریس در یک لیتر آب مقطر حل گردید و اسیدیته محلول توسط اسیدکلریدریک نرمال به ۶/۸ تغییر داده شد تا محلول بافر مورد نظر به دست آمد. پس از سپری شدن مدت مذکور، برگ‌ها داخل هاون کاملاً ساییده شدند و سپس در دور ۶۰۰۰ و به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفوژ شدند. سپس مقدار ۰/۱ میلی‌لیتر از محلول بالای سانتریفوژ شده توسط سمپلر برداشته و به آن ۵ میلی‌لیتر معرف بیورد اضافه گردید. برای تهیه معرف، ۱۰۰ میلی‌گرم کوماسی بریلیانت بلو جی - ۲۵۰ با ۵۰ میلی‌لیتر اتانول خالص، مخلوط گردید و سپس با آب مقطر به حجم تقریبی ۸۰۰ میلی‌لیتر رسانده و از صافی عبور داده شد. نهایتاً حجم محلول صاف شده با ۱۰۰ میلی‌لیتر اسیدفسفریک خالص و آب مقطر به ۱۰۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. محلول حاصل به همراه محلول بافر استخراج در دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل کری ۱۰۰، واریان، امریکا) قرار داده شد و در طول موج ۵۹۵ نانومتر میزان جذب آن قرائت گردید. برای تهیه محلول استاندارد، مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم آلبومین گاوی در ۱ میلی‌لیتر بافر استخراج حل گردید و سپس توسط آب مقطر به حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس از محلول مقادیر ۱۰ تا ۹۰ میلی‌گرم بر لیتر

استاندارد تهیه و میزان جذب آن با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج مذکور قرائت شد.

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ترخون به روش DPPH اندازه‌گیری شد. در این روش فعالیت خنثی‌کنندگی رادیکال ۲ و ۲ دی فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل توسط عصاره‌ی متانولی با روش اسپکتروفتومتری در طول موج ۵۱۵ نانومتر تعیین شد که از قانون لامبرت پیروی می‌کند و کاهش جذب آن با میزان ماده آنتی‌اکسیدانی رابطه خطی دارد. (D'Abrosca *et al.*, 2007). میزان فعالیت خنثی‌کنندگی رادیکال DPPH بر اساس رابطه (۸) زیر محاسبه شد.

$$(8) \text{ DPPH} = \left[\frac{AC - AS}{AC} \right] \times 100$$

در این رابطه AC جذب رادیکال DPPH بدون هیچ آنتی‌اکسیدان به‌عنوان کنترل و AS جذب DPPH همراه عصاره بوده و از متانول به‌عنوان بلانک استفاده شد.

تجزیه آماری

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف با استفاده از نرم افزار SAS نسخه ۹/۴ (American company, USA) مورد تجزیه آماری قرار گرفتند. برای مقایسه میانگین در تیمارهای مختلف از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

میکوریزا آریسکولار مرتبط باشد که جذب آب از خاک را در گیاه میزبان افزایش می‌دهد (Sanches-Blanco et al., 2004). در کاهو (*Lactuca sativa*) مایه‌زنی با قارچ میکوریزا باعث بهبود کلروفیل و رشد رویشی گیاه شد (Badvi et al., 2015). مایه‌زنی رزماری (*Salvia rosmarinus* L.) با قارچ میکوریزا باعث افزایش طول ریشه، هدایت روزنه‌ای و محتوای نسبی آب برگ شده است (Sanches-Blanco et al., 2004). در خرما (*Phoenix dactylifera* L.) مایه‌زنی با قارچ میکوریزا سبب افزایش جذب عناصر غذایی شده که افزایش وزن خشک برگ و طول ریشه را به همراه داشته است (Mohebi, 2013). James و همکاران (۲۰۰۸) بیان کردند که میکوریزا احتمالاً از طریق تغییر در مورفولوژی ریشه و طول برگ ریشه گیاه میزبان و افزایش سطح جذب ریشه از طریق ریشه‌های قارچ، مقدار جذب آب و انتقال مواد غذایی به ریشه را افزایش می‌دهد. یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌هایی که قارچ میکوریزا بر رشد رویشی گیاهان دارد، تأثیر میکوریزا بر جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک است (Abdelhafez & Abdel-Monsief, 2006). تولید و ترشح آنزیم فسفاتاز توسط ریشه‌های میکوریزا باعث می‌شود که فسفات غیرمحلول و تثبیت شده در خاک به فرم محلول درآید و برای ریشه قابل جذب باشد (Song, 2005). هم‌زیستی قارچ میکوریزا با ریشه از طریق جذب آب و عناصر غذایی سبب افزایش فتوسنتز شده و این امر موجب تولید فرآورده بیشتر و بهبود رشد گیاه می‌شود (Khalvati et al., 2005). به طور کلی می‌توان گفت قارچ میکوریزا از یک طرف بر جذب عناصر غذایی پر مصرف مانند نیتروژن، پتاسیم و فسفر تأثیرگذار است و از طرف دیگر با تولید

براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۲)، تنش خشکی اثر منفی بر وزن خشک برگ و طول ریشه ترخون داشت. به طوری که بیش‌ترین وزن خشک برگ (۰/۷۷ گرم) و طول ریشه (۱۵/۶۶ سانتی‌متر) در تیمار آبیاری کامل و کم‌ترین میزان وزن خشک برگ (۰/۶۵ گرم) و طول ریشه (۱۴/۶۵ سانتی‌متر) در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد (جدول ۲). تلقیح با قارچ‌های *G. hoi* + *G. mosseae* + *G. intraradices* باعث افزایش وزن خشک برگ (۰/۸۳ گرم) و طول ریشه (۱۷/۵۷ سانتی‌متر) نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۲). با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها، تنش خشکی برخلاف قارچ میکوریزا سبب کاهش درصد کلونیزاسیون ریشه ترخون شد. به طوری که بیش‌ترین درصد کلونیزاسیون ریشه (۳۱/۰۱٪) در تیمار *G. intraradices*+*G. mosseae*+*G. hoi* همراه با آبیاری کامل مشاهده گردید (شکل ۱).

طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق تنش خشکی باعث کاهش وزن خشک برگ و طول ریشه ترخون شد (جدول ۲). کاهش رشد در گیاهان تحت تنش خشکی را می‌توان به افزایش پتانسیل اسمزی محلول خاک، به دلیل کاهش قدرت جذب آب گیاه نسبت داد (Selahvarzi & Kamali, 2022). طبق تحقیقات انجام شده، کاهش رشد یک حالت سازگاری برای زنده ماندن گیاه در شرایط تنش خشکی است، در واقع گیاه انرژی و مواد غذایی را به جای استفاده برای رشد شاخساره به سمت اسمولیت‌های سازگار در برابر تنش هدایت می‌کند. کمبود آب در هر مرحله از رشد گیاه با کاهش جذب، انتقال و مصرف عناصر غذایی همراه است که منجر به کاهش ذخیره کربن و در نهایت رشد گیاه می‌شود (Hu & Schmidhalter, 2005). افزایش وزن خشک برگ و طول ریشه ترخون می‌تواند به نقش مطلوب قارچ

و توسعه هاگ قارچ کاهش می‌یابد که منجر به کاهش درصد کلونیزاسیون ریشه می‌شود (Püschel *et al.*, 2021). درصد کلونیزاسیون ریشه‌ی شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) توسط قارچ *G. intraradices* با کاهش میزان رطوبت خاک کاهش یافت (Siavash Moghaddam *et al.*, 2017).

هورمون‌های محرک رشد گیاه مانند جیبرلین، اکسین و سیتوکنین سبب افزایش خصوصیات رشدی گیاه از جمله وزن خشک برگ و طول ریشه می‌شود. علاوه بر این قارچ میکوریزا سرعت رشد گیاه را افزایش داده و بر تخصیص بیوماس بین ریشه و ساقه گیاه و نیز طول ریشه اثر می‌گذارد (Fan *et al.*, 2011).

طبق تحقیقات انجام شده، کلونیزاسیون ریشه توسط قارچ‌های میکوریزا و رشد هیف تحت شرایط تنش خشکی کاهش یافته است (Zou *et al.*, 2019) که تأیید کننده نتایج به‌دست آمده از این تحقیق می‌باشد (شکل ۱). در شرایط تنش خشکی، جوانه‌زنی

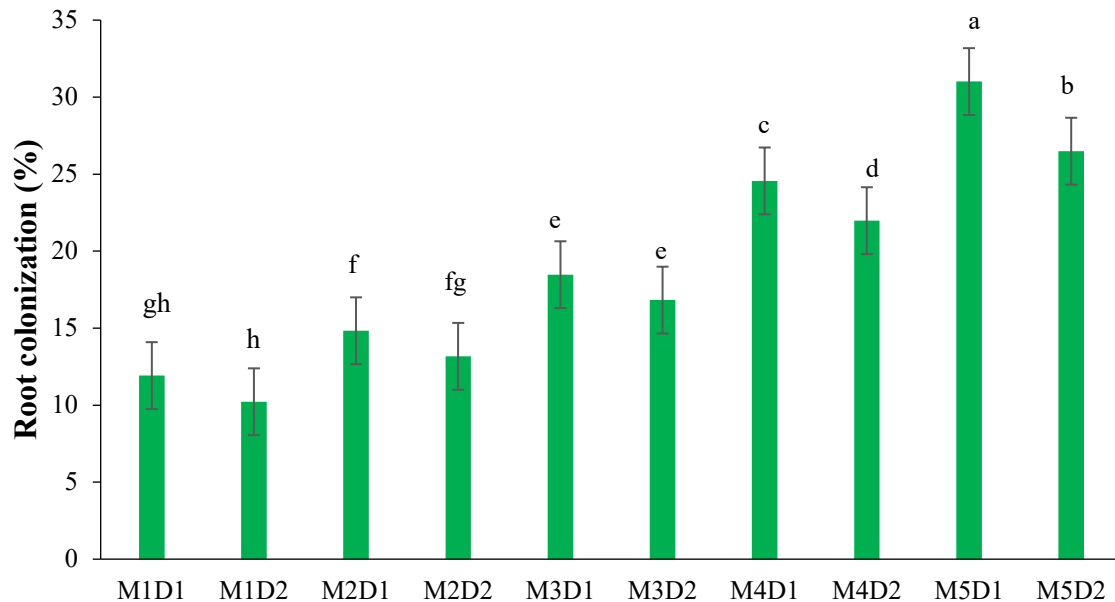
جدول ۲ - مقایسه میانگین اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر وزن خشک برگ و طول ریشه *Artemisia dracunculus*

Table 2 - Comparison of the average effect of mycorrhizal fungus and drought stress on leaf dry weight and *Artemisia dracunculus* root length

| تیمارها Treatment | | وزن خشک برگ Leaf dry weight (g) | طول ریشه Root length (cm) |
|--|--|------------------------------------|------------------------------|
| | Control | 0.78 ^b | 12.30 ^c |
| قارچ میکوریزا Mycorrhizae fungi | <i>G. hoi</i> + <i>G. mosseae</i> | 0.67 ^d | 14.71 ^b |
| | <i>G. hoi</i> + <i>G. intraradices</i> | 0.48 ^c | 15.78 ^b |
| | <i>G. mosseae</i> + <i>G. intraradices</i> | 0.78 ^b | 15.41 ^b |
| | <i>G. hoi</i> + <i>G. mosseae</i> + <i>G. intraradices</i> | 0.83 ^a | 17.57 ^a |
| تنش خشکی (درصد ظرفیت زراعی) Drought stress (FC%) | 100 | 0.77 ^a | 15.66 ^a |
| | 50 | 0.65 ^b | 14.65 ^b |

حروف همسان در هر ستون و در هر تیمار بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

The numbers with the same letters in each column are not statistically different at 5 % probability levels



Mycorrhizal fungus and drought stress

شکل ۱- اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر کلونیزاسیون ریشه *Artemisia dracuncululus*

Fig 1- Effect of mycorrhizal fungus and drought stress on root colonization of *Artemisia dracuncululus*
 M1= Control, M2= *G. mosseae*+*G. hoi*, M3= *G. intraradices*+*G. hoi*, M4= *G. intraradices*+*G. mosseae* and M5= *G. intraradices*+*G. mosseae*+*G. hoi*. D1= Control and D2= 50% FC

حروف همسان در هر ستون و در هر تیمار بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

The numbers with the same letters in each column are not statistically different at 5 % probability levels

2023). اگرچه افزایش یا کاهش میزان کلروفیل به شدت تنش بستگی دارد اما نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که تحت تنش خشکی، مقدار کلروفیل a, b و کل و نیز کاروتنوئید کاهش یافت و کاربرد قارچ میکوریزا باعث بهبود این صفت شد (جدول ۵) که مطابق نتایج به‌دست در هلو (*Prunus persica* L. (Wang et al., 2023a) و گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) (Alam et al., 2023) بود. دیگر دلیل کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش خشکی تبدیل گلوتامات (پیش ساز کلروفیل و پرولین) به پرولین و افزایش سنتز پرولین است (Yang et al., 2023). تنش خشکی تولید اتیلن و اسید آبسزیک را افزایش می‌دهد که با سنتز

رنگیزه‌های فتوسنتزی

براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳)، تنش خشکی ۵۰٪ ظرفیت زراعی اثر منفی بر میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ ترخون داشت، هرچند تفاوت معنی‌داری بین سطوح تنش خشکی و نوع قارچ مشاهده نشد. در گیاه ترخون تنش خشکی میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی را نسبت به تیمار شاهد کاهش داد (جدول ۳). کاهش کلروفیل تحت تنش خشکی می‌تواند به دلیل افزایش تخریب بیوسنتز رنگیزه‌ها توسط رادیکال‌های آزاد، ممانعت از سنتز آنزیم‌های سازنده رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش غلظت عناصر کلیدی تشکیل دهنده ساختمان کلروفیل مانند نیترژن، منیزیم، آهن و منگنز باشد (Ali et al.,

آزیم کلروفیلز همراه است، در نتیجه میزان کلروفیل کاهش می‌یابد (Wang *et al.*, 2023b). قارچ میکوریزا با جذب کارآمد برخی عناصر از جمله فسفر (به‌عنوان عنصر کلیدی در انتقال انرژی طی فرایند فتوسنتز) باعث افزایش میزان کلروفیل شده که افزایش فتوسنتز را به دنبال دارد. میکوریزا با تسهیل جذب عناصری مانند نیتروژن و منیزیم به افزایش میزان کلروفیل در شرایط تنش خشکی کمک می‌کند. قارچ‌های میکوریزا به جذب منیزیم توسط گیاه کمک می‌کنند لذا سنتز کلروفیل را افزایش می‌دهند (Rasouli *et al.*, 2023). در گیاه نیشکر

ماده‌زنی با قارچ میکوریزا باعث افزایش غلظت نیتروژن در برگ شده که با افزایش رشد و نمو و کلروفیل برگ همراه است که افزایش میزان فتوسنتز را منجر شده و در نهایت عملکرد گیاه افزایش می‌یابد (Spinoso-Castillo *et al.*, 2023). هر مولکول کاروتنوئید یک زنجیره بلند هیدروکربنی اشباع نشده است که نیتروژن نقش مهمی در ساختار آن دارد (Alam *et al.*, 2023) و با تأثیری که قارچ میکوریزا بر جذب نیتروژن توسط گیاه دارد در نتیجه ماده‌زنی ترخون با قارچ میکوریزا میزان کاروتنوئید افزایش یافت.

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ *Artemisia dracunculus*

Table 3 -Results of comparing the average effect of mycorrhizal fungus and drought stress on photosynthetic pigments of *Artemisia dracunculus* leaf

| قارچ میکوریزا | تنش خشکی | کلروفیل a | کلروفیل b | کلروفیل کل | کاروتنوئید |
|--|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|------------------------------------|
| Mycorrhizae fungi | Drought stress (FC%) | Chlorophyll a (mg g ⁻¹ FW) | Chlorophyll b (mg g ⁻¹ FW) | Total Chlorophyll (mg g ⁻¹ FW) | Carotenoid (mg g ⁻¹ FW) |
| شاهد | 100 | 2.74 ^a | 1.40 ^a | 3.87 ^a | 0.443 ^a |
| Control | 50 | 2.67 ^{ab} | 1.37 ^a | 3.77 ^{ab} | 0.429 ^a |
| <i>G. mosseae</i> + <i>G. hoi</i> | 100 | 2.22 ^{bc} | 1.25 ^a | 3.22 ^c | 0.372 ^{ab} |
| | 50 | 0.92 ^c | 0.37 ^b | 1.22 ^c | 0.122 ^c |
| <i>G. intraradices</i> + <i>G. hoi</i> | 100 | 2.43 ^{abc} | 1.31 ^a | 3.48 ^{abc} | 0.391 ^{ab} |
| | 50 | 2.12 ^{cd} | 1.21 ^a | 3.10 ^c | 0.364 ^{ab} |
| <i>G. intraradices</i> + <i>G. mosseae</i> | 100 | 2.26 ^{bc} | 1.31 ^a | 3.30 ^c | 0.421 ^a |
| | 50 | 1.74 ^d | 0.92 ^a | 2.48 ^d | 0.295 ^b |
| <i>G. intraradices</i> + <i>G. mosseae</i> + <i>G. hoi</i> | 100 | 2.64 ^{ab} | 1.39 ^a | 3.76 ^{ab} | 0.449 ^a |
| | 50 | 2.36 ^{abc} | 1.31 ^a | 3.42 ^{bc} | 0.385 ^{ab} |

حروف همسان در هر ستون و در هر تیمار بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

The numbers with the same letters in each column are not statistically different at 5 % probability levels

نشت الکترولیت و محتوای نسبی آب برگ
طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، تنش خشکی باعث افزایش میزان نشت الکترولیت و کاهش محتوای نسبی آب برگ ترخون شد. بیش‌ترین میزان نشت الکترولیت در تیمار *G. hoi* + *G. mosseae* همراه با تیمار تنش ۵۰٪ ظرفیت زراعی بود و کم‌ترین میزان نشت الکترولیت در تیمارهای قارچی همراه با آبیاری کامل (شاهد) مشاهده شد. بیش‌ترین میزان محتوای نسبی آب برگ در تیمارهای بدون تلقیح قارچ و آبیاری کامل بود که تفاوت معنی‌داری با تنش ۵۰٪ ظرفیت زراعی نداشت اما در شرایط تنش خشکی تلقیح قارچ باعث افزایش میزان محتوای نسبی آب برگ شد (شکل ۲). با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، تنش خشکی باعث افزایش نشت الکترولیت برگ ترخون شد. در شرایط تنش خشکی غشا از پایداری کمی برخوردار است و در نتیجه میزان نشت مواد درون سلولی در آن‌ها افزایش می‌یابد. قارچ میکوریزا توانست در شرایط تنش خشکی میزان نشت الکترولیت را کاهش دهد (شکل ۲).

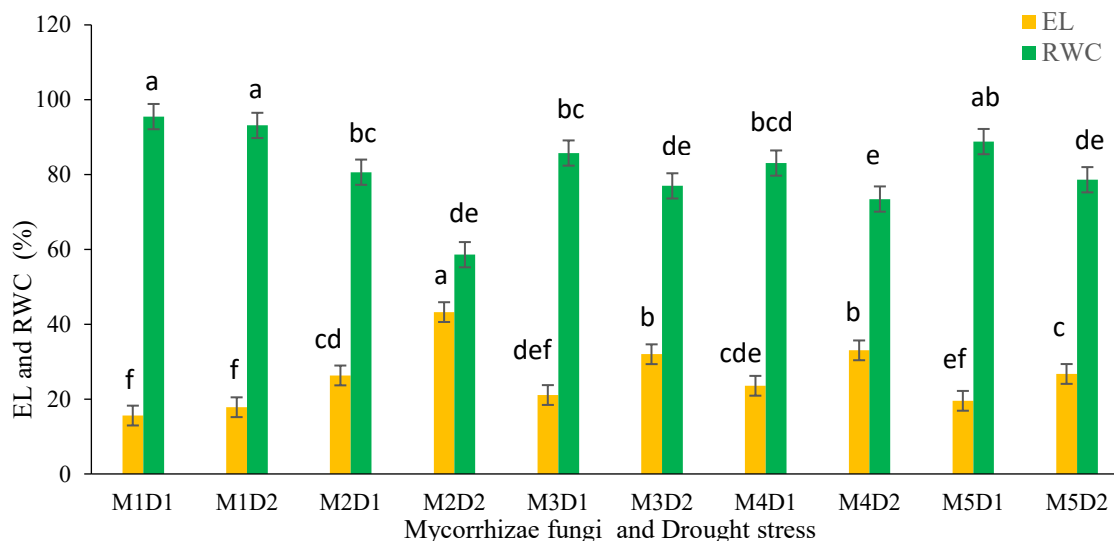
در گیاه همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) مایه‌زنی با قارچ میکوریزا در شرایط تنش خشکی سبب پایداری غشا و کاهش نشت الکترولیت شده است (Asrar & Elhindi, 2011). علاوه بر این کاهش نشت الکترولیت توسط قارچ میکوریزا در تنش خشکی می‌تواند به دلیل بهبود جذب عناصر غذایی و در نتیجه تنظیم فشار اسمزی سلول باشد (Rani et al., 2023). محتوای نسبی آب برگ شاخص مناسبی از وضعیت آب در برگ است و در شرایط تنش خشکی کاهش می‌یابد. مایه‌زنی با قارچ میکوریزا باعث جبران محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش خشکی می‌شود (Rasouli et al.,

2023). قارچ میکوریزا سبب افزایش طول ریشه و تغییر مورفولوژی ریشه برای جستجوی آب بیشتر شده که با افزایش میزان محتوای نسبی آب برگ همراه است (Prabhu et al., 2013). میسلیم قارچ میکوریزا در خاک نقش مهمی در تأثیر قارچ بر رابطه آبی گیاه میزبان دارد و باعث جذب آب از منافذ بسیار ریز خاک می‌شود. هیف‌های قارچ میکوریزا می‌توانند موجب افزایش سطح جذب کننده ریشه شده و با افزایش جذب آب اثرات تنش خشکی را کاهش دهند (Wang et al., 2023b). هم‌زیستی با قارچ میکوریزا در شرایط تنش خشکی به دلیل رشد ریشه‌های موئین افزایش حجم ریشه امری طبیعی خواهد بود که دسترسی به آب را برای گیاه مساعدتر می‌کند (Ksouri et al., 2016) در نتیجه تأثیر مثبتی بر میزان رطوبت نسبی آب برگ ترخون داشته است.

پرولین، قندهای محلول کل و پروتئین محلول
طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیش‌ترین میزان پرولین برگ (۱۸/۳۳ میکرومول بر گرم وزن تر) در تیمار *G. intraradices*+*G. mosseae*+*G. hoi* همراه با تنش ۵۰٪ ظرفیت زراعی مشاهده شد و کم‌ترین میزان پرولین برگ در تیمارهای بدون تلقیح قارچ همراه با تنش ۵۰٪ و آبیاری کامل بود (جدول ۴). تنش خشکی باعث کاهش میزان قند محلول کل برگ ترخون شد، به طوری که بیش‌ترین میزان قند محلول کل (۴۹/۰۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در تیمار *G. intraradices*+*G. mosseae*+*G. hoi* همراه با آبیاری کامل مشاهده شد و کم‌ترین میزان قند محلول کل برگ در تیمارهای بدون تلقیح قارچ همراه با تنش ۵۰٪ و آبیاری کامل بود (جدول ۴). طبق نتایج به‌دست آمده تفاوت معنی‌داری از نظر میزان پروتئین محلول برگ ترخون در شرایط آبیاری

کامل و تنش خشکی مشاهده نشد. بیش‌ترین میزان پروتئین محلول و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی برگ در تیمارهای *G. intraradices*+*G. mosseae*+*G. hoi* همراه با آبیاری کامل بود (جدول ۴). تنش خشکی اثر منفی بر میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی برگ داشت (جدول ۴).

کامل و تنش خشکی مشاهده نشد. بیش‌ترین میزان پروتئین محلول و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی برگ در تیمارهای *G. intraradices*+*G. mosseae*+*G. hoi* همراه با آبیاری کامل بود (جدول ۴). تنش خشکی اثر منفی بر میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی برگ داشت (جدول ۴).



شکل ۲- اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر نشت یونی و محتوای نسبی آب برگ *Artemisia dracunculus*

Fig 2- Effect of mycorrhizal fungus and drought stress on EL and RWC of *Artemisia dracunculus* leaf
M1= Control, M2= *G. mosseae*+*G. hoi*, M3= *G. intraradices*+*G. hoi*, M4= *G. intraradices*+*G. mosseae* and
M5= *G. intraradices*+*G. mosseae*+*G. hoi*. D1= Control and D2= 50% FC

حروف همسان در هر ستون و در هر تیمار بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

The numbers with the same letters in each column are not statistically different at 5 % probability levels

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر برخی از خصوصیات بیوشیمیایی برگ *Artemisia dracunculus*
 Table 4- Results of comparing the average effect of mycorrhizal fungus and drought stress on some biochemical properties of *Artemisia dracunculus* leaf

| قارچ میکوریزا Mycorrhizae fungi | تنش خشکی Drought stress (FC) | پرولین Proline ($\mu\text{m g}^{-1}$ FW) | قند محلول کل Total soluble sugar (mg g^{-1} FW) | پروتئین محلول Soluble protein (mg g^{-1} FW) | ظرفیت آنتی‌اکسیدانی Antioxidant capacity (%) |
|--|------------------------------------|---|---|--|--|
| شاهد Control | 100 | 5.86 ^f | 17.26 ^{ef} | 0.33 ^{ab} | 41.89 ^c |
| <i>G. mosseae</i> + <i>G. hoi</i> | 50 | 6.43 ^f | 16.60 ^f | 0.329 ^{ab} | 40.58 ^c |
| | 100 | 7.92 ^c | 38.67 ^b | 0.283 ^{ab} | 76.40 ^c |
| <i>G. intraradices</i> + <i>G. hoi</i> | 50 | 11.45 ^c | 22.75 ^{de} | 0.110 ^c | 48.44 ^c |
| | 100 | 10.39 ^{cd} | 42.93 ^b | 0.310 ^{ab} | 90.38 ^{ab} |
| <i>G. intraradices</i> + <i>G. mosseae</i> | 50 | 14.74 ^b | 30.47 ^c | 0.290 ^{ab} | 78.15 ^c |
| | 100 | 9.09 ^{de} | 40.14 ^b | 0.293 ^{ab} | 79.46 ^{bc} |
| <i>G. intraradices</i> + <i>G. mosseae</i> + <i>G. hoi</i> | 50 | 13.66 ^b | 26.20 ^{cd} | 0.262 ^b | 64.17 ^d |
| | 100 | 14.42 ^b | 49.00 ^a | 0.352 ^a | 96.06 ^a |
| | 50 | 18.33 ^a | 38.99 ^b | 0.345 ^a | 89.07 ^b |

حروف همسان در هر ستون و در هر تیمار بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

The numbers with the same letters in each column are not statistically different at 5 % probability levels

میزان قندهای محلول کل می‌شود (Omid, 2010). انباشت قندهای محلول تحت شرایط خشکی می‌تواند به جابه‌جایی کم‌تر آن‌ها از برگ مصرف کم‌تر آن‌ها در اثر کاهش رشد و تغییرات دیگری چون هیدرولیز نشاسته نسبت داده شود (Hu et al., 2023). تجمع قندهای محلول سبب تنظیم اسمزی شده که یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های سازگاری در شرایط کم آبی می‌باشد (Huang et al., 2023). قارچ میکوریزا سبب افزایش جذب فسفر توسط ریشه می‌شود که فسفر نیز بر پارامترهای فیزیولوژیک مانند فتوسنتز تأثیرگذار است. چراکه فسفر نقش مهمی در انتقال انرژی در طول چرخه فتوسنتز دارد. بنابراین قارچ میکوریزا محرکی برای افزایش میزان فتوسنتز است (Tekaya et al., 2022). از سوی دیگر قارچ میکوریزا بر سطح هورمون‌های گیاهی مانند سایتوکینین و جیبرلین تأثیر می‌گذارد. این هورمون‌ها به‌خصوص سایتوکینین می‌توانند با انتقال یون‌های مؤثر در باز شدن روزنه‌ها و تنظیم سطح کلروفیل موجب افزایش و بالا رفتن سرعت فتوسنتز و در نهایت افزایش میزان کربوهیدرات‌ها در گیاهان شوند (Selvaraj & Chellappan., 2006).

نتایج نشان داد که میزان قندهای محلول کل در شرایط تنش خشکی و در حضور قارچ‌های میکوریزا نسبت به گیاهانی که آب کافی دریافت کرده بودند، کاهش یافت، در حالی که این روند برای پرولین مشاهده نشد و میزان پرولین در شرایط ذکر شده افزایش نشان داد. به‌طور معمول، هم میزان قند و هم میزان پرولین در شرایط مواجهه گیاهان با تنش خشکی افزایش می‌یابد، زیرا هر دو ترکیب تحمل گیاه در مقابل تنش را بالا می‌برند، اما وقتی قارچ‌های میکوریزا با ریشه گیاهان کلنی تشکیل داده و با آن‌ها همزیستی برقرار می‌کنند، بخشی از مواد ذخیره ای و فتوسنتزی گیاه را به شکل لپیدها و قندها برای رشد و تولید مثل خود مصرف می‌کنند (MacLean et al., 2017). طبق نتایج حاصل از این تحقیق تنش خشکی باعث کاهش میزان پروتئین محلول شده است (جدول ۸). کاهش میزان

طبق نتایج به‌دست آمده تنش خشکی و قارچ میکوریزا سبب افزایش میزان پرولین برگ ترخون شده است (جدول ۸) که مطابق نتایج به‌دست آمده در پونه Zare Hassaabadi et al. (Mentha pulegium L.) Idris (Sorghum bicolor) و سورگوم (al., 2020) و بادرنجبویه (et al., 2022) است. در Eshaghi Gorgi et al., 2022) (officinalis L. و زیتون (Tekaya et al.,) (Olea europaea L.) (2022) مایه‌زنی با قارچ میکوریزا سبب افزایش میزان پرولین در شرایط تنش خشکی شده است. اسید آمینه پرولین از ترکیبات تنظیم کننده اسمزی است که غلظت آن تحت شرایط تنش‌های محیطی مانند خشکی و شوری افزایش می‌یابد. پرولین مانند یک آنتی‌اکسیدان قوی از مرگ سول‌ها در شرایط تنش جلوگیری می‌کند (Rasouli et al., 2023). پرولین از طریق تنظیم اسمزی، جلوگیری از تخریب آنزیم‌ها و جاروب کردن رادیکال‌های هیدروکسیل، تحمل گیاه را در برابر تنش‌های محیطی افزایش می‌دهد. پرولین اسید آمینه ذخیره شده در سیتوپلاسم است و احتمالاً در حفاظت از ساختمان ماکرومولکول‌های درون سلول در طی تنش خشکی نقش مؤثری دارد (Tao et al., 2022). در گیاهان مایه‌زنی شده با قارچ میکوریزا با استفاده از روابط آبی و تغذیه‌ای بهتر در شرایط تنش خشکی به‌طور موقت از تنش فرار کرده و کمتر آسیب می‌بینند در نتیجه میزان پرولین و قندهای محلول کل نسبت به شاهد افزایش می‌یابد.

تنظیم اسمزی یکی از سازوکارهای گیاه در مواجهه با تنش خشکی است که طی این پدیده پتانسیل اسمزی بافت‌های تحت تنش در اثر انباشت مواد اسمزی در سلول‌ها کاهش می‌یابد در نتیجه فشار آماس سلول در حد مطلوب نگه‌داری می‌شود (Omid, 2010). این مواد اسمزی شامل برخی عناصر مانند پتاسیم، سدیم و کلسیم و متابولیت‌ها مانند قندها، اسیدهای آمینه (پرولین) و اسیدهای آلی است. در شرایط تنش خشکی تجزیه نشاسته توسط آنزیم آلفا آمیلاز منجر به افزایش

ترخون را افزایش داده و می‌تواند روی مکانیزم‌هایی که برای غلبه بر خشکی استفاده می‌کنند، تأثیرگذار باشد. بنابراین مکانیزم‌هایی که منجر به افزایش تحمل گیاه به خشکی در صورت همزیستی با میکوریزا می‌شود شامل: بهبود روابط آبی گیاه، تنظیم اسمزی بهتر، دفاع آنتی‌اکسیدانی و تولید مولکول‌های محافظ بیشتر می‌باشد و در نهایت میسلیم‌های خارج ریشه‌ای میکوریزا باعث پایداری خاکدانه‌ها می‌شود که این امر به نوبه خود منجر به افزایش حفظ رطوبت و بهبود جذب آب می‌شود. استفاده از قارچ‌های میکوریزا سبب تعدیل خسارات ناشی از تنش خشکی در گیاه ترخون شد. طبق نتایج به‌دست آمده، کاربرد سه گونه قارچ *G. intraradices* + *G. hoi* + *G. mosseae* بر صفات رشد، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ترخون تحت تنش خشکی تأثیر بهتری داشت.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه بوعلی سینا و دانشگاه رازی به‌خاطر مساعدت و همکاری در اجرای این پژوهش صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

پروتئین محلول می‌تواند به‌دلیل کاهش تعداد پلی‌زوم‌های سلولی باشد. البته افزایش میزان پروتئین در شرایط تنش خشکی نیز می‌تواند دلیل دیگری برای کاهش میزان پروتئین محلول در شرایط تنش خشکی باشد که با کاهش رشد نیز همراه است (Yang *et al.*, 2023). قارچ میکوریزا می‌تواند بر سنتز اسیدهای آمینه و نیز جذب نیتروژن تأثیرگذار باشد و میزان پروتئین‌های محلول برگ را افزایش دهد (Tian *et al.*, 2023). در گیاه یولاف (*Avena sativa* L.) قارچ میکوریزا سبب افزایش میزان پروتئین، قندهای محلول، پروتئین محلول و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش خشکی شد (Tian *et al.*, 2023). افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی یکی از سازوکارهای افزایش مقاومت در برابر تنش‌های محیطی است و در گیاه ترخون نیز تنش خشکی باعث افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی شد (جدول ۸). در گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی مایه‌زنی با قارچ میکوریزا سبب افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی شد (Alam *et al.*, 2023).

نتیجه‌گیری کلی

قارچ میکوریزا تغییراتی معنی‌دار در وزن خشک برگ و طول ریشه گیاه ترخون داشت. مایه‌زنی با قارچ میکوریزا میزان رنگبره‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب گیاه

References

- Abdelhafez, A. A. & Abdel-Monsief, R. A. (2006). Effects of VA mycorrhizal inoculation on growth, yield and nutrient content of cantaloupe and cucumber under different water regimes. *Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2(6), 503-508. <https://www.researchgate.net/publication/278026852>
- Aghaei Joubani, K., Barzoli, M., Jafarian, V. & Shekari, F. (2018). Some physiological and biochemical responses of *Artemisia dracunculus* to water deficit stress. *Plant Process and Function*, 6(19), 15-24. (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.23222727.1396.6.19.13.1>
- Ahmadi, H., Babalar, M., Ali Askary Sarcheshmeh, M., Morshedloo, M. R. & Shokrpour, M. (2020). Effects of exogenous application of citrulline on prolonged water stress damages in hyssop (*Hyssopus officinalis* L.): Antioxidant activity, biochemical indices, and essential oils profile. *Food Chemistry*, 333, 127433. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127433>

- Alam, M. Z., Choudhury, T. R. & Mridha, M. A. U. (2023). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Enhance Biomass Growth, Mineral Content, and Antioxidant Activity in Tomato Plants under Drought Stress. *Journal of Food Quality*, 20(23), 1-14. <https://doi.org/10.1155/2023/2581608>
- Ali, J., Jan, I., Ullah, H., Fahad, S., Saud, S., Adnan, M., Ali, B., Liu, k., Harrison, M. T., Hassan, S., Kumar, S., Amjad Khan, M., Kamran, M., Alwahibi, M.S. & S Elshikh, M. (2023). Biochemical response of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) to Selenium (Se) under drought stress. *Sustainability*, 15(7), 1-15. <https://doi.org/10.3390/su15075694>
- Ardalani, Sh., Saeidi, M., Jalali Honarmand, S., Ghobadi, M. E. & Abdoli, M. (2015). Effect of post-anthesis drought stress on some agronomic and physiological traits related to source strength in four bread wheat genotypes. *Cereal Research*, 5(1), 45-65. (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.22520163.1394.5.1.4.5>
- Arnon, A. N. (1976). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, 112-121.
- Asrar, A. & Elhindi, K. M (2011). Alleviation of drought stress of marigold (*Tagetes erecta*) plants by using arbuscular mycorrhizal fungi. *Saudi Journal of Biological Science*, 18(1), 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2010.06.007>
- Badvi, H., Alemzadeh Ansari, M., Mahmoodi Soresani, M. & Eskandari, F. (2015). Effect of drought stress and mycorrhizal fungi on some morphophysiological characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *The plant production (Scientific Journal of Agriculture)*, 38(3), 27-39. (In Persian). <https://doi.org/10.22055/ppd.2015.11444>
- Begum, N., Ahanger, M. A., Zhang, L., (2020). Inoculation and phosphorus supplementation alleviates drought induced growth and photosynthetic decline in *Nicotiana tabacum* by up-regulating antioxidant metabolism and osmolyte accumulation. *Environmental and Experimental Botany*, 176(9), 104088. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104088>
- Behrooz, A., Vahdati, K., Rejali, F., Lotfi, M., Sarikhani, S. & Leslie, C. A. (2019). Arbuscular mycorrhiza and plant growth-promoting bacteria alleviate drought stress in walnut. *Hortscience*, 54(6), 1087-1092. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13961-19>
- Ben Hamed, K., Castagna, A., Salem, E. A., Ranieri, A. & Abdelly, C. (2007). Sea fennel (*Crithmum maritimum* L.) under salinity conditions: a comparison of leaf and root antioxidant responses. *Plant Growth Regul*, 53(3), 185-194. <https://doi.org/10.1007/s10725-007-9217-8>
- Bradford, M. M. (1976). Rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1-2), 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Brodersen, C. R., Roddy, A. B., Wason, J. W. & McElrone, A. J. (2019). Functional status of xylem through time. *Annual Review of Plant Biology*, 70(1), 407-433. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100455>
- Chen, W., Meng, P., Feng, H. & Wang, C. (2020). Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth and Physiological Performance of *Catalpa bungei* C.A. Mey. under Drought Stress. *Forests*, 11(10), 1-29. <https://doi.org/10.3390/f11101117>
- D'Abrosca, B., Fiorentino, A., Monaco, P., Oriano, P. & Pacifico, S. (2006).

- Annurcoic acid: A new antioxidant ursane triterpene from fruits of cv. Annurca apple. *Food Chemistry*, 98(2), 285-290.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.072>
- Eshaghi Gorgi, O., Fallah, H., Niknejad, Y., & Barari Tari, D. (2022). Effect of Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and mycorrhizal fungi inoculations on essential oil in *Melissa officinalis* L. under drought stress. *Biologia*, 77(1), 11-20.
<https://doi.org/10.1007/s11756-021-00919-2>
- Esmailpour, B., Jalilvand, P., Hadian, J. (2013). Effects of drought stress and arbuscular mycorrhizal fungi on some morphophysiological traits and yield of savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Agroecology*, 5(2), 169-177.
<https://doi:10.22067/jag.v5i2.24496>
- Fan, L., Dalpe, Y., Fang, Ch., Dube, C., & Khanizadeh, Sh. (2011). Influence of arbuscular Mycorrhizale on biomass and root morphology of selected strawberry cultivars under salt stress. *Botany*, 89(6), 397-403.
- Fatemi, H., Azizi, M., Ravanbakhsh, M. (2025). Influence of drought stress on the growth of African basil (*Ocimum gratissimum*). *Journal of Vegetables Sciences*, 9(17), 169-178. (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/iuvs.2023.2001866.1285>
- Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular *Arbuscular Mycorrhizal* infection in roots. *New Philologists*, 84, 489-500.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>
- Gupta, M. M. (2020). *Arbuscular Mycorrhizal* Fungi: The Potential Soil Health Indicators. *Soil Health*, 59, 183-195. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_11
- Hu, W., Gao, M., Du, K., Liu, Y., Xu, B., Wang, Y., Zhou, Z. & Zhao, W. (2023). Combined effect of elevated temperature and drought stress on carbohydrate metabolism of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) subtending leaves. *Physiologia Plantarum*, 175(1), e13866.
<https://doi.org/10.1111/ppl.13866>
- Huang, D., Ma, M., Wang, Q., Zhang, M., Jing, G., Li, C. & Ma, F. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced drought resistance in apple by regulating genes in the MAPK pathway. *Plant Physiology and Biochemistry*, 149(1), 245-255.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.020>
- Huang, X., Guo, W., Yang, L., Zou, Z., Zhang, X., Addo-Danso, S. D., Zhou, L. & Li, S. (2023). Effects of drought stress on non-structural carbohydrates in different organs of *Cunninghamia lanceolata*. *Plants*, 12(13), 1-15.
<https://doi.org/10.3390/plants12132477>
- Idris, I., Fefirenta, A. D., Sari, V. K. & Sudiana, I. M. (2022). *Arbuscular mycorrhizal* fungi induced different proline accumulations in two sorghum accessions in a response to drought stress. *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*, 68(3), 127-142.
<https://doi.org/10.2478/agri-2022-0012>
- Irigoyen, J. J., Einerich, D. W. & Sánchez-Díaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa* L.) plants. *Physiologia Plantarum*, 84(1), 55-60.
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x>
- James, B., Rodel, D., Loretto, U., Reynaldo, E. & Tariq, H. (2008). Effect of vesicular arbuscular mycorrhiza (VAM) fungi inoculation on coppicing ability and drought resistance of Senna Spectabilis. *Pakistan Journal of Botany*, 40(5), 2217-2224. :
<https://www.researchgate.net/publication/n/228495970>
- Khalvati, M. A., Mzafar, A. & Schmidhalter, U. (2005). Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hypha and its signification

- for leaf growth, water relations and gas exchange of barley subjected to drought stress. *Plant Biology Stuttgart*, 7(6), 706-712. <https://doi.org/10.1055/s-2005-872893>
- Ksouri, N., Jiménez, S., Wells, C. E., Contreras-Moreira, B. & Gogorcena, Y. (2016). Transcriptional Responses in Root and Leaf of *Prunus persica* under Drought Stress Using RNA Sequencing. *Frontiers in Plant Science*, 7(1), 1-19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01715>
- Lotfi, M., Abbaszadeh, B. & Mirza, M. (2014). The effect of drought stress on morphology, proline content and soluble carbohydrates of tarragon (*Artemisia dracuncululus* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 30(1), 19-29. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2014.5266>
- MacLean, A. M., Bravo, A. & Harrison, M. J. (2017). Plant signaling and metabolic pathways enabling arbuscular mycorrhizal symbiosis. *The Plant Cell*, 29(10), 2319-2335. <https://doi.org/10.1105/tpc.17.00555>
- Madouh, T. A. & Quoreshi, A. M. (2023). The Function of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associated with Drought Stress Resistance in Native Plants of Arid Desert Ecosystems: A Review. *Diversity*, 15(3), 1-17. <https://doi.org/10.3390/d15030391>
- Mohammadi, H., Amirikia, F., Ghorbanpour, M., Fatehi, F. & Hashempour, H. (2019). Salicylic acid induced changes in physiological traits and essential oil constituents in different ecotypes of *Thymus kotschyianus* and *Thymus vulgaris* under well-watered and water stress conditions. *Industrial Crops and Products*, 129(1), 561-574, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.046>
- Mohebi, A. H. (2013). Influence of Mycorrhizal Symbiosis on the Uptake of Nutrients and Vegetative Characteristics of Barhee Date Palm (*Phoenix dactylifera*). *Journal of Horticultural Science*, 27(2), 110-116. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.24805>
- Okorie, V. O., Mphambukeli, T. N. & Amusan, S. O. (2019). Exploring the political economy of the water and food security nexus in BRICS. *Africa Insight*, 48(4), 21-38. <https://www.researchgate.net/publication/335030505>
- Omidi, H. (2010). Changes of proline content and activity of antioxidative enzymes in two canola genotypes under drought stress. *American Journal of Plant Physiology*, 5(6), 338-349. <https://doi.org/10.3923/ajpp.2010.338.349>
- Paquin, R. & Lechasseur, P. (2011). Observation sur une méthode de dosage de la proline libre dans les extraits de plants. *Canadian Journal of Botany*, 57(18), 1851-1854. <https://doi.org/10.1139/b79-233>
- Phillips, J.M., & Hayman, D.S. (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. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Prabhu, D., Shankar, T., Sathyavathe, V. & Sankaralingam, S. (2013). Influence of Arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of green gram (*Vigna radiata* L.) grown under water stress conditions. *World Applied Sciences Journal*, 25(4), 561-567. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.25.04.13124>
- Püschel, D., Bitterlich, M., Rydlová, J., & Jansa, J. (2021). Drought accentuates the role of mycorrhiza in phosphorus uptake. *Soil Biology and Biochemistry*, 157, 108243. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108243>

- Raeisi Sadati, F., Chamani, E., Sartip, A., Pazhoji, M., Sartip, H. (2023). The Effect of Silicon Foliar Application on Some Physiological Traits of Summer Savory (*Satureja hortensis* L.) under Drought Stress, *Journal of Vegetables Sciences*, 7(14), 178-194. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iuvs.2023.1986684.1268>
- Rani, B., Jatttan, M., Dhansu, P., Madan, S., Kumari, N., Sharma, K. D., Parshad, J., & Kumar, A. (2023). Mycorrhizal symbiosis improved drought resistance in wheat using physiological traits. *Cereal Research Communications*, 51(1), 115-124. <https://doi.org/10.1007/s42976-022-00281-2>
- Rasouli, F., Amini, T., Skrovankova, S., Asadi, M., Hassanpouraghdam, M. B., Ercisli, S., Buckova, M., Mrazkova, M. & Mlcek, J. (2023). Influence of drought stress and mycorrhizal (*Funneliformis mosseae*) symbiosis on growth parameters, chlorophyll fluorescence, antioxidant activity, and essential oil composition of summer savory (*Satureja hortensis* L.) plants. *Frontiers in Plant Science*, 14(1), 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1151467>
- Rejae, F., Mohsenzadeh Golfazani, M., Moharramnejad, S., Samizadeh Lahiji, H. (2025). Investigation of superoxide dismutase profile & its gene expression in two sweet corn hybrids under drought stress, *Journal of Vegetables Sciences*, 9(17), 71-84. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iuvs.2023.2015045.1332>
- Ren, A. T., Zhu, Y., Chen, Y. L., Ren, H. X., Li, J. Y., Abbott, L. K. & Xiong, Y. C. (2019). *Arbuscular mycorrhizal* fungus alters root-sourced signal (abscisic acid) for better drought acclimation in *Zea mays* L. seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 167, 103824. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103824>
- Rydlová, J. & Püschel, D. (2020). *Arbuscular mycorrhiza*, but not hydrogel, alleviates drought stress of ornamental plants in peat-based substrate. *Applied Soil Ecology*, 146, 103394. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103394>
- Sanches-blanco, M., Ferrandez, M., Morales, A., Morte, A. & Alarcón, J. (2004). Variations in water status, gas exchange, and growth in *Rosmarinus officinalis* plant infected with *Glomus deserticola* under drought conditions. *Journal of Plant Physiology*, 161(6), 675-682. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01191>
- Santander, C., Aroca, R., Ruiz-Lozano, J. M., Olave, J., Cartes, P., Borie, F. & Cornejo, P. (2017). *Arbuscular mycorrhiza* effects on plant performance under osmotic stress. *Mycorrhiza*, 27(7), 639-657. <https://doi.org/10.1007/s00572-017-0784-x>
- Schonfeld, M. A., Johnson, R. C., Carver, B. F. & Mornhinweg, D. W. (1988). Water relations in winter wheat as drought resistance indicators. *Crop Science*, 28(3), 526-531. <https://doi.org/10.2135/cropsci1988.00111X002800030021x>
- Selahvarzi, Y. & Kamali, M. (2022). Investigation of drought resistance of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.) under different levels of titanium nanoparticles. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 15(1), 173-184. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.3571.1876>
- Selvaraj, T. & Chellappan, P., (2006). *Arbuscular mycorrhizae*: Adiverse personality. *Journal of Central European Agriculture*, 7(2), 349-358.
- Siavash Moghaddam, S., Rahimi, A., Heydarzadeh, S., Moradzadeh, S., & Hasanloo, M. (2017). The effect of mycorrhizal symbiosis on the yield and

- biochemical traits of fenugreek under water deficit stress. *Journal of Medicinal Plants Biotechnology*, 3(1), 39-52. (In Persian).
- Song, H. (2005). Effects of VAM on host plant in the condition of drought stress and its Mechanisms. *Electronic Journal of Biology*, 1(3): 44-48.
- Spinoso-Castillo, J. L., Moreno-Hernández, M. D. R., Mancilla-Álvarez, E., Sánchez-Segura, L., Sánchez-Páez, R., & Bello-Bello, J. J. (2023). *Arbuscular Mycorrhizal* Symbiosis improves ex vitro acclimatization of sugarcane plantlets (*Saccharum* Spp.) under drought stress conditions. *Plants*, 12(3), 1-16.
<https://doi.org/10.3390/plants12030687>
- Tao, J., Dong, F., Wang, Y., Chen, H. & Tang, M. (2022). *Arbuscular mycorrhizal* fungi enhance photosynthesis and drought tolerance by regulating MAPK gene expression of *Populus simonii* × *P. nigra*. *Physiologia Plantarum*, 174(6), e13829.
<https://doi.org/10.1111/ppl.13829>
- Tekaya, M., Dabbaghi, O., Guesmi, A., Attia, F., Chehab, H., Khezami, L., Alghami, F. K., Ben Hamadi, N., Hammami, M., Prinsen, E. & Mechri, B. (2022). Arbuscular mycorrhizas modulate carbohydrate, phenolic compounds and hormonal metabolism to enhance water deficit tolerance of olive trees (*Olea europaea*). *Agricultural Water Management*, 274, 107947.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107947>
- Tian, H., Jia, Z., Liu, W., Wei, X., Wang, H., Bao, G., Li, B. & Zhou, Q. (2023). Effects of *Arbuscular Mycorrhizal* Fungi on Growth and Nutrient Accumulation of Oat under Drought Conditions. *Agronomy*, 13(10), 1-13.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13102580>
- Wang, L., Wei, J., Shi, X., Qian, W., Mehmood, J., Yin, Y. & Jia, H. (2023a). Identification of the Light-Harvesting Chlorophyll a/b Binding Protein Gene Family in Peach (*Prunus persica* L.) and Their Expression under Drought Stress. *Genes*, 14(7), 1-15.
<https://doi.org/10.3390/genes14071475>
- Wang, S., Ren, Y., Han, L., Nie, Y., Zhang, S., Xie, X., Hu, W., Chen, H. & Tang, M. (2023b). Insights on the Impact of *Arbuscular Mycorrhizal* Symbiosis on Eucalyptus grandis Tolerance to Drought Stress. *Microbiology Spectrum*, 11(2), e04381-22.
<https://doi.org/10.1104/pp.16.00307>
- Wu, Q. S. & Zou, Y. N. (2017). *Arbuscular mycorrhizal* fungi and tolerance of drought stress in plants. In *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants*, 25–41.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_2
- Yang, Q., Li, P., Zhang, D., Lin, W., Hao, X. & Zong, Y. (2023). Effects of Elevated CO₂ on the Photosynthesis, Chlorophyll Fluorescence and Yield of Two Wheat Cultivars (*Triticum aestivum* L.) under Persistent Drought Stress. *Sustainability*, 15(2), 1-13.
<https://doi.org/10.3390/su15021593>
- Zare Gassanabadi, M., Dashti, M., & Akhondi, M. (2020). The Effect of Two Species of *Arbuscular Mycorrhiza* Fungi on the Activity of Antioxidant Enzymes and Morphophysiological Characteristics of *Mentha pulegium* L. in Drought Stress. *Iranian Medicinal Plants Technology*, 2(3), 83-99.
<https://doi.org/10.22092/mpt.2020.127803.1049>
- Zhang, F., Wang, P., Zou, Y. N., Wu, Q. S. & Kuča, K. (2019). Effects of mycorrhizal fungi on root-hair growth and hormone levels of taproot and lateral roots in trifoliate orange under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(9), 1316–1330.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1563780>
- Zou, Y.N., Wu, H.H., Giri, B., Wu, Q.S., & Kuča, K. (2019). Mycorrhizal symbiosis

down-regulates or does not change root aquaporin expression in trifoliolate orange under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 144, 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.10.001>