Crop Science Research in Arid Regions

homepage: https://cropscience.uoz.ac.ir/

Research Article
Volume 7, Issue 4, 2025, P. 847-865

Investigating the growth and physiological response of marjoram to the application of mycorrhiza and salicylic acid under drought stress conditions

Babak Modara [a], Mohammad Mehdi Rahimi [*b], Moslem Abdipur [c], Mehdi Hosseinifarahi [d]

[a] Ph.D. Student of Agronomy, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran
[b] Department of Agrotechnology, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran
[c] Kohgiluyeh and Boyerahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gachsaran, Iran
[d] Department of Horticultural Science, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran

[*]Corresponding Author: mm.rahimi@iau.ac.ir

Received: 15 December 2024 Accepted: 28 March 2025 **DOI: 10.22034/CSRAR.2025.493403.1458**

How to cite this article:
Modara, B., Rahimi, M. M., Abdipur, M. and Hosseinifarahi, M., 2025. Investigating the growth and physiological response of marjoram to the application of mycorrhiza and salicylic acid under drought stress conditions. *Crop Science Research in Arid Regions*, *7*(4), 847-865. https://doi.org/10.22034/csrar.2025.493403.1458

Abstract

Introduction: Marjoram, with its scientific name (*Origanum majorana* L.), is considered one of the most important and best-selling medicinal and spice plants in Iran and the world. Environmental stresses are one of the important factors in reducing the production of agricultural products in the world. Under natural and agricultural conditions, plants are constantly exposed to various stresses, which is one of the obstacles to the potential production of water deficit, which has a negative effect on the growth and physiological traits of plants. Therefore, one of the possible ways to increase tolerance to drought stress is inoculation with useful microorganisms. These organisms form a colony in the rhizosphere of the plant and increase the growth of the plant through direct and indirect mechanisms. Arbuscular mycorrhizal fungi increase host plant drought tolerance through physiological mechanisms of nutrient uptake and biochemical mechanisms related to hormone synthesis, osmotic regulation, and antioxidant systems. Salicylic acid is a phenolic compound and an essential plant hormone that plays an important role in stress defense and growth regulation. Several studies have investigated the effect of using salicylic acid in plants and have come to the conclusion that salicylic acid causes resistance to a variety of non-biological stresses. The increase in salicylic acid production, along with the decrease in auxin biosynthesis, coordinates plant defense responses, reduces the adverse effects of drought and salinity stress by improving physiological parameters, membrane integrity, and photosynthetic efficiency. For this purpose, an experiment was conducted with the aim of investigating the growth and physiological response of marjoram to the application of mycorrhiza and salicylic acid under drought stress conditions.

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

Materials and Methods: This experiment was carried out as a split-factorial design in the form of a basic randomized complete block design with three replications. The experimental factors include the main plot of different levels of drought stress (35, 70, and 90% of the field capacity) and the secondary plot with two factors, the first factor including mycorrhizal fungus with two levels (without inoculation and inoculation with Glomus hoi species) and the second factor of concentrations Salicylic acid was different at three levels (zero, 100 and 300 mg/L). One month after planting, salicylic acid treatment was done as foliar spraying. The foliar spraying was repeated twice on the aerial parts of marjoram plants before flowering. The control treatment was considered without foliar spraying and with distilled water.

Results and Discussion: In this study, the traits of plant height, shoot dry weight, shoot fresh weight, number of lateral branches, ion leakage, relative leaf water content, proline, and soluble sugar were investigated. In the 70% field capacity treatment, the application of mycorrhizal fungus and foliar spraying with 300 mg/L salicylic acid increased shoot dry weight by 25.2% and the shoot fresh weight by 6.1% compared to the control (no application). The results showed that ion leakage decreased by 25.5% in the treatment with mycorrhizal fungus application and foliar spraying with 100 mg/L salicylic acid compared to the control. The highest amount of proline was obtained in the 35% field capacity treatment, measuring 2.15 mg/g, which showed an increase of 29.15% compared to the 90% field capacity treatment.

Conclusion: In general, the results of this study indicate that the application of mycorrhiza and foliar spraying with salicylic acid can help improve the growth and performance of marjoram under drought stress conditions. Therefore, it is recommended to use inoculation with the mycorrhizal fungus *G. hoi* and foliar spraying with a concentration of 300 mg/L salicylic acid for marjoram production in areas with water scarcity.

Keywords: Ion leakage, Proline, Relative water content, Shoot, Water deficit

تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک/ جلد هفتم، شماره چهارم، زمستان۱۴۰۴، ص ۸۶۵-۸۴۷

مقاله پژوهشی

بررسی پاسخ رشدی و فیزیولوژیکی مرزنجوش به کاربرد میکوریزا و سالیسیلیک اسید تحت شرایط تنش خشکی

بابک مدارا[۱]، محمد مهدی رحیمی[*۲]، مسلم عبدی پور[۳]، مهدی حسینی فرهی[۴]

۱- دانشجوی دکتری زراعت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج ، یاسوج، ایران
۲- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج، یاسوج، ایران
۳- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کهگیلویه و بویراحمد، ایستگاه تحقیقاتی گچساران، گچساران، ایران
۴- گروه علوم باغبانی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

* مسئول مکاتبه: mm.rahimi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۷ **DOI: 10.22034/CSRAR.2025.493403.1458**

چکیده

مرزنجوش با نام علمی (*Origanum majorana* L.) به‌عنوان یکی از مهمترین گیاهان ادویه‌ای و دارویی در ایران و جهان به‌شمار می‌رود. آزمایشی با هدف بررسی پاسخ رشدی و فیزیولوژیکی مرزنجوش به کاربرد میکوریزا و سالیسیلیک‌اسید تحت شرایط تنش خشکی انجام گرفت. این آزمایش به‌صورت اسپلیت- فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه‌ای در شهرستان کازرون از توابع استان فارس انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل سطوح مختلف تنش خشکی (۳۵، ۷۰ و ۹۰ درصد ظرفیت زراعی) در کرت اصلی و کرت فرعی با دو فاکتور، فاکتور اول شامل قارچ میکوریزا با دو سطح (بدون تلقیح و تلقیح با گونه *Glomus hoi*) و فاکتور دوم غلظت‌های مختلف سالیسیلیک‌اسید در سه سطح (صفر، ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. نتایج نشان داد که نشت یونی در شرایط کاربرد قارچ میکوریزا و محلول‌پاشی ۱۰۰ میلی‌گرم سالیسیلیک‌اسید نسبت به عدم کاربرد ۲۵/۵ درصد کاهش نشان داد. بیشترین میزان پرولین در تیمار ۳۵ درصد ظرفیت زراعی به‌میزان ۲/۱۵ میلی‌گرم در گرم به‌دست آمد که نسبت به تیمار ۹۰ درصد ظرفیت زراعی ۲۹/۱۵ درصد افزایش نشان داد. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد میکوریزا و محلول‌پاشی با سالیسیلیک‌اسید می‌تواند به بهبود رشد و عملکرد مرزنجوش تحت شرایط تنش خشکی کمک کند. بنابراین، برای تولید مرزنجوش در مناطق با محدودیت آب، از تلقیح با قارچ میکوریزا *G. hoi* و محلول‌پاشی با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سالیسیلیک‌اسید استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: اندام هوایی، پرولین، کم‌آبی، محتوای نسبی آب، نشت یونی

مقدمه

مرزنجوش از خانواده نعناییان (Labiatae) و بومی جنوب‌شرقی ناحیه مدیترانه به‌شمار می‌رود. این گیاه در کشورهای مختلفی ازجمله نواحی شمالی ایران کشت می‌شود و از اهمیت اقتصادی و صنعتی بالایی بهره‌مند است (Cala *et al.*, 2021; Farsi *et al.*, 2020). مرزنجوش در سراسر جهان به‌عنوان یک گیاه دارویی و طعم‌دهنده محبوب شناخته شده است، حاوی طیف گسترده‌ای از اجزای فعال دارویی از جمله گلوکوزیدهای فنلی، فلاونوئیدها، تانن‌ها، استرول‌ها و مقادیر زیادی ترپنوئید است (Elfiky *et al.*, 2022). تنش‌های محیطی از عوامل اصلی کاهش تولید محصولات کشاورزی در سراسر جهان به‌شمار می‌روند. شرایطی چون خشکی و شوری خاک، به‌همراه آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، به‌طور نامطلوبی روی جوانه‌زنی، رشد گیاه و در نهایت تولید محصول تأثیر می‌گذارند (Hafeez *et al.*, 2023). گیاهان در شرایط طبیعی و زراعی به‌طور مداوم با تنش‌های مختلفی روبه‌رو هستند. یکی از مهم‌ترین موانع برای دستیابی به عملکرد بالقوه، کم‌آبی است که تأثیر منفی بر صفات رشدی و فیزیولوژیکی گیاهان دارد (Ghadirnezhad Shiade *et al.*, 2023). با اینکه تحقیقات متعددی در زمینه تأثیر تنش‌های محیطی بر ویژگی‌های کمی و کیفی گیاهان دارویی صورت گرفته است. اما شواهد نشان می‌دهد تحقیقات اندکی بر روی گیاه مرزنجوش انجام شده است. پژوهشگران به بررسی تأثیر تنش خشکی بر ویژگی‌های کمی و کیفی مرزنجوش پرداختند که نتایج آنها نشان داد، تنش

خشکی در سطوح متوسط و شدید به‌طور معنی‌داری باعث کاهش وزن خشک این گیاه می‌شود (Morshedloo *et al.*, 2017). همچنین مطالعات نشان داده است که تلقیح با ریزجانداران خاک، رشد گیاهان را در شرایط تنش بهبود می‌بخشد. از این‌رو یکی از راه‌های ممکن برای افزایش تحمل تنش خشکی تلقیح با ریزجانداران مفید می‌باشد (Ansari *et al.*, 2023; Fathi *et al.*, 2024). این جانداران در ریزوسفر گیاه کلونی تشکیل داده و از طریق سازوکارهای مستقیم و غیرمستقیم رشد گیاه را افزایش می‌دهند (De Andrade *et al.*, 2023). قارچ‌های میکوریز آربوسکولار تقریباً با ۸۰ درصد گونه‌های گیاهی همزیست شده و در تمامی اکوسیستم‌های خشکی وجود دارند. توسعه میکوریزایی و کلونیزاسیون ریشه به‌میزان زیادی سبب بهبود رشد و افزایش بقای گیاه در تنش خشکی می‌شود (Lee *et al.*, 2013; Shi *et al.*, 2023). قارچ‌های میکوریز آربوسکولار تحمل خشکی گیاه میزبان را از طریق سازوکارهای فیزیولوژیکی جذب مواد غذایی و سازوکارهای بیوشیمیایی مرتبط با سنتز هورمون‌ها، تنظیم اسمزی و سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش می‌دهند (Nadeem *et al.*, 2014). در دو دهه گذشته، شواهد فزاینده نشان داده است که سالیسیلیک‌اسید با تأثیر بر تقسیم سلولی و گسترش سلولی، نقش اساسی در تنظیم رشد گیاه ایفا می‌کند (Fujikura *et al.*, 2020). سالیسیلیک‌اسید یک ترکیب فنلی و هورمون گیاهی ضروری است که نقش مهمی در دفاع از تنش و تنظیم رشد ایفا می‌کند (Zhang and Li, 2019). پژوهش‌های متعددی تاثیر کاربرد سالیسیلیک‌اسید را در گیاهان، مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که سالیسیلیک‌اسید سبب مقاومت به انواع تنش‌های غیرزیستی می‌شود (Ghadirnezhad Shiade *et al.*, 2023). افزایش تولید سالیسیلیک‌اسید، همراه با کاهش بیوسنتز اکسین، پاسخ‌های دفاعی گیاه را هماهنگ می‌کند، اثرات نامطلوب تنش خشکی و شوری را با بهبود پارامترهای فیزیولوژیکی، یکپارچگی غشاء و کارایی فتوسنتزی کاهش می‌دهد (Ahmad *et al.*, 2021). تأثیر سالیسیلیک‌اسید بر گیاهان بسته به گونه‌های گیاهی و شرایط آزمایشی متفاوت است (Moustakas *et al.*, 2022). نتایج نشان داده است که محلول‌پاشی یک میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید با کاهش محتوای کلروفیل و محافظت از فتوسیستم II، تنش را کاهش می‌دهد و در نتیجه عملکرد فتوسنتزی را بهبود می‌بخشد (Moustakas *et al.*, 2022).

گزارش شده است کاربرد خارجی سالیسیلیک‌اسید در غلظت‌های کم اثر تعیین‌کننده‌ای بر القای تحمل در گیاهان در معرض تنش آبی دارد، زیرا سالیسیلیک‌اسید به تنظیم رشد، جوانه‌زنی، تعرق، بسته شدن روزنه، گلیکولیز و تولید گل و میوه کمک می‌کند (Nassef *et al.*, 2017).از آنجا که تنش خشکی از بزرگترین چالش‌های تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد، شناخت واکنش‌های گیاهان به‌ویژه گیاهان دارویی به کمبود آب اهمیت زیادی دارد. با توجه به نیاز کشت مرزنجوش در ایران و خلاء تحقیقاتی در مورد اثرات سالیسیلیک‌اسید و کاربرد قارچ میکوریزا در رابطه با واکنش این گیاه دارویی در شرایط تنش خشکی، این پژوهش با هدف ارزیابی اثر کاربرد سالیسیلیک‌اسید و قارچ میکوریزا بر ویژگی‌های رویشی و فیزیولوژیکی مرزنجوش در شرایط تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش، در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی در شهرستان کازرون از توابع استان فارس با مختصات عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی، با ارتفاع ۸۶۰ متر از سطح دریا، انجام شد. جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از اجرا، نمونه‌گیری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Results of physical and chemical analysis of soil at the test site

بافت خاک Soil texture	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	پتاسیم K(mg kg^{-1})	فسفر P(mg kg^{-1})	نیتروژن کل N (%)	کربن آلی OC(%)	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	واکنش خاک pH
سیلتی Silty	26	45	29	213	18	0.15	1.46	0.79	7.04

این آزمایش به‌صورت اسپلیت- فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل کرت اصلی سطوح مختلف تنش خشکی (۳۵، ۷۰ و ۹۰ درصد ظرفیت زراعی) و کرت‌های فرعی با دو فاکتور، فاکتور اول شامل قارچ میکوریزا با دو سطح (بدون تلقیح و تلقیح با گونه *Glomus hoi*) و فاکتور دوم غلظت‌های مختلف سالیسیلیک‌اسید در سه سطح (صفر، ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بودند. بلافاصله پس از آماده‌سازی زمین، اقدام به کاشت نشاءهای مرزنجوش شد. کاشت نشاءهای مرزنجوش در چهارم آبان‌ماه ۱۴۰۱ و برداشت در ۲۰ فروردین ۱۴۰۲ انجام شد. در تمام کرت‌ها، نشاء گیاه مرزنجوش در مساحت ۹ مترمربع (۳ در ۳ متر) به‌طور همزمان کشت شدند. هر کرت شامل ۸ خط کاشت با فاصله روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر و بین ردیف ۶۰ سانتی‌متر بود. فاصله هر کرت با کرت مجاور ۱ متر و بین هر تکرار ۳ متر در نظر گرفته شد. مراقبت‌های پس از کاشت شامل وجین، آبیاری و سله‌شکنی به‌طور منظم انجام داده و در طول دوره رشد از هیچ نوع علف‌کشی استفاده نشد. قارچ میکوریزا (۱۰۰ اندام فعال در گرم به‌صورت پودر و مخلوطی از اسپورها، ریسه‌ها، ماسه) مصرف شد و روی هر ردیف کاشت در عمق ۱۰- ۵ سانتی‌متری توزیع گردید، سپس اولین آبیاری انجام گردید. در مرحله ۸ برگی، نشاءها به زمین اصلی انتقال یافت و پس از استقرار کامل نشاءها (یک هفته بعد) سطوح تنش اعمال شد. یک ماه پس از کاشت، تیمار سالیسیلیک‌اسید به‌صورت محلول‌پاشی انجام شد. محلول‌پاشی به‌صورت اسپری بر بخش‌های هوایی بوته‌های مرزنجوش، تا قبل از گلدهی دوبار تکرار شد. تیمار شاهد بدون محلول‌پاشی و با آب مقطر در نظر گرفته شد. ظرفیت زراعی خاک با استفاده از دستگاه دیسک صفحه فشاری مشخص شد، و سطوح تنش ۳۵، ۷۰ و ۹۰ درصد این مقدار تعیین شد. به‌منظور تعیین دقیق زمان آبیاری از دستگاه رطوبت‌سنج خاک (TDR) که درصد حجمی رطوبت خاک را در عمق مورد نظر (۴۰ سانتی‌متر) تعیین می‌کند، استفاده شد. آبیاری به‌صورت نوار تیپ بود. تمامی کرت‌ها تا استقرار کامل گیاه در وضعیت یکنواخت آبیاری قرار داشت و بعد از آن تیمارهای متفاوت آبیاری براساس نقشه کاشت تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه اعمال شد. با توجه به مساحت هر کرت حجم مورد نیاز برای هر تیمار محاسبه و با نصب کنتور حجمی میزان آب مورد نیاز به‌دست آمد. جهت اعمال تیمار آبیاری با داشتن ظرفیت زراعی منطقه (FC) و نقطه پژمردگی (PWP) میزان آب قابل استفاده خاک (AW) مشخص شد. جهت اعمال تیمار آبیاری از رابطه ۱ استفاده شد:

$$V= (FC – Mt) \times pb \times Droot \times AEi \quad (۱)$$

V: حجم آب آبیاری بر حسب مترمکعب

FC: درصد رطوبت ظرفیت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی

Mt: درصد رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری

pb: وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

Droot: عمق توسعه ریشه بر حسب متر

AEi: راندمان آبیاری

در مرحله گلدهی بوته‌های مربوط به هر تیمار از سطح خاک برداشت، بسته‌بندی و درون محفظه‌ای خنک و مملو از یخ به آزمایشگاه انتقال یافتند. در آزمایشگاه نمونه‌های جمع‌آوری شده به‌منظور بررسی صفات فیزیولوژیک به تعداد یکسان و به‌صورت تصادفی به دو نمونه گیاهی تر و خشک تقسیم‌بندی شد. نمونه‌های تر را درون زیپ‌کیپ بسته‌بندی و در دمای ۲۰- درجه سیلسیوس نگهداری شدند. ارتفاع بوته با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. به‌منظور اندازه‌گیری وزن تر اندام هوایی، بوته‌ها از سطح خاک قطع شد و اندام کل شامل طوقه، شاخه‌های فرعی و برگ مورد ارزیابی قرار گرفت. توزین اندام هوایی توسط ترازو با دقت ۰/۰۰۱ انجام شد. پس از اندازه‌گیری وزن تر اندام هوایی، نمونه‌ها در آون به‌مدت ۴۸ ساعت و دمای ۷۵ درجه سیلسیوس قرار گرفت.

از معادله ۲ محتوای نسبی آب برگ ارزیابی شد:

(۲)

$$\text{محتوای نسبی آب (٪)} = \frac{\text{وزن تر برگ} - \text{وزن خشک برگ}}{\text{وزن خشک برگ} - \text{وزن تورژسانس برگ}} \times ۱۰۰$$

برای تعیین نشت یونی (Kumar and Dey, 2011) ۰/۱ گرم از بافت برگی تازه گیاه را پس از شستشو درون لوله‌های آزمایش در پیچدار قرار داده و ۱۵ میلی‌لیتر آب مقطر به آنها اضافه شد. بعد از ۲۴ ساعت میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها (EC_1) با استفاده از EC متر ارزیابی شد. سپس نمونه‌ها به‌مدت

۴۸ ساعت در فریزر قرار خواهد گرفت و بعد از آن، نمونه‌ها در دمای معمولی آزمایشگاه قرار گرفت و میزان هدایت الکتریکی (EC_2) دوباره اندازه‌گیری شد و درصد نشت یونی از رابطه ۳ محاسبه شد (Kumar and Dey, 2011):

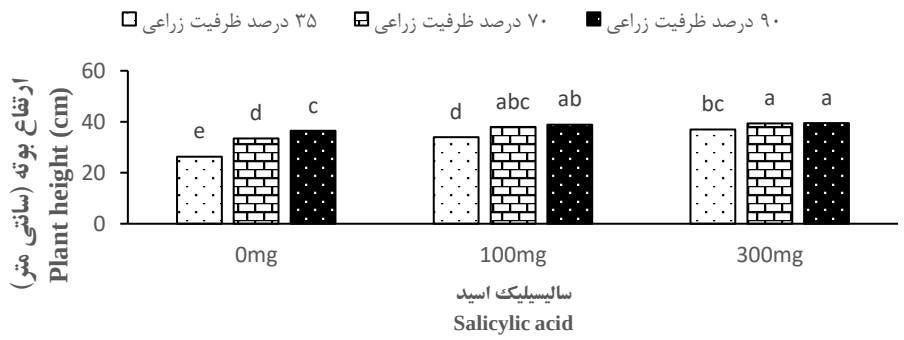
$$EC\ (\%) = (EC_1 / EC_2) \times 100 \qquad (۳)$$

برای استخراج پرولین پس از برداشت بوته، بلافاصله در داخل فویل آلومینیومی پیچیده شد و درون ظرف پر از یخ به آزمایشگاه منتقل شد و تا زمان اندازه‌گیری در دمای ۲۰- درجه سیلسیوس قرار گرفت. محتوای پرولین در بخش هوایی با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر با طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری و بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر محاسبه گردید (Bates *et al.*, 1973). برای اندازه‌گیری قند محلول به نمونه‌های خشک برگ، الکل ۸۰ درصد افزوده شد، سپس یک میلی‌لیتر از محلول رویی برداشته، یک میلی‌لیتر فنل پنج درصد و پنج میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ به نمونه‌ها اضافه گردید و جذب نوری آنها در طول موج ۴۸۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. رسم منحنی استاندارد با استفاده از گلوکز و تعیین میزان قند بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن خشک انجام شد (Kochert, 1978). اطلاعات به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS V9.1 تجزیه‌وتحلیل آماری شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه آماری داده‌ها نشان داد اثرات ساده تنش خشکی، میکوریزا و محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید بر ارتفاع بوته در سطح یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثرمتقابل تنش خشکی× سالیسیلیک‌اسید در سطح یک درصد بر ارتفاع بوته معنی‌داری بود (جدول ۲). بیشترین ارتفاع بوته (۳۹ سانتی‌متر) در تیمار ۹۰ درصد ظرفیت زراعی با کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم سالیسیلیک‌اسید مشاهده شد. محلول‌پاشی با سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش ارتفاع بوته در تیمارهای مصرف سالیسیلیک‌اسید گردید و با افزایش تنش خشکی و کاهش مصرف سالیسیلیک‌اسید ارتفاع بوته مرزنجوش کاهش پیدا کرد (شکل ۱). استفاده از سالیسیلیک‌اسید در شرایط تنش خشکی، می‌تواند موجب بهبود وضعیت رشد و نمو گیاهان گردد. گزارش‌ها نشان می‌دهد، مصرف سالیسیلیک‌اسید با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بیشترین تأثیر را بر نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) داشته است که می‌تولند باعث افزایش توان فتوسنتزی در گیاه شود (Abpaykar *et al.*, 2021). همچنین محققان بیان کردند که تنش خشکی با کاهش رشد و تقسیم سلولی باعث کاهش ارتفاع بوته می‌شود. کاهش رطوبت خاک را می‌توان به اختلال در فتوسنتز ناشی از تنش کم‌آبی و کاهش تولید مواد فتوسنتزی برای تأمین قسمت‌های در حال رشد گیاه و در نهایت عدم دستیابی گیاه به پتانسیل ژنتیکی از نظر ارتفاع دانست (Shahghasi *et al.*, 2023). از طرفی سالیسیلیک‌اسید، به‌عنوان یک مولکول سیگنال‌دهنده مهم، بر رشد گیاه و افزایش مقاومت در برابر تنش خشکی تأثیر می‌گذارد و منجر به افزایش تقسیم سلولی در نواحی مریستمی و رشد سلولی می‌شود (Barjas *et al.*, 2022).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثرمتقابل تنش خشکی و سالیسیلیک‌اسید بر ارتفاع بوته مرزنجوش

Figure 1- Comparison of the average interaction effect of drought stress and salicylic acid on plant height of Marjoram

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی مرزنجوش با کاربرد میکوریزا و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید تحت شرایط خشکی

Table 2- Analysis of variance of studied traits of marjoram with mycorrhiza application and salicylic acid foliar spraying under drought conditions

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی DF	میانگین مربعات M.S							
		ارتفاع بوته Plant height	وزن خشک اندام هوایی Dry weight of shoot	وزن تر اندام هوایی Fresh weight of shoot	تعداد شاخه جانبی Number of lateral branches	نشت یونی Ion leakage	محتوای نسبی آب برگ Relative leaf water content	پرولین Proline	قند محلول Soluble sugar
تکرار R	2	1.89 ns	4392 ns	785624.7 ns	12.96 ns	0.16 ns	34.91 ns	0.007 ns	0.0000007 ns
تنش خشکی (D)	2	192.31**	3672944**	55086404**	793.4**	281.07**	3443.41**	1.09**	0.000011**
خطای تنش خشکی Error D	4	1.66	6413.89	947790	6.82	33.66	45.65	0.014	0.000000039
میکوریزا (M)	1	48.17**	448084**	14760356**	66.67 ns	468.7 ns	982.41**	0.296**	0.00000006*
D*M	2	0.43 ns	37078.3 ns	2411372 ns	14.22 ns	51.04*	101.52 ns	0.001 ns	0.000000001 ns
سالیسیلیسک اسید (S)	2	145.57**	2382736**	31722766**	467.55**	227.6**	1320.69**	0.33**	0.0000002**
D× S	4	31.89**	42637.5*	5343778 ns	50.19**	69.26*	149.34*	0.009 ns	0.0000012**
M× S	2	1.06 ns	8293.41 ns	516343 ns	41.72 ns	101.01*	33.28 ns	0.023 ns	0.000000002 ns
D× M× S	4	0.55 ns	63700**	6751169**	25.11*	46.21 ns	35.34 ns	0.035 ns	0.000000007 ns
خطای آزمایشی Error	30	2.64	13371.2	1346209	8.11	17.19	46.3	0.018	0.000000021
ضریب تغییرات (درصد) C.V (%)		4.9	13.3	9.9	6.7	16.4	8.7	6.4	6.6

ns، *،** به‌ترتیب نشانگر عدم وجود اثر معنی‌دار، و اثر معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد می‌باشد.

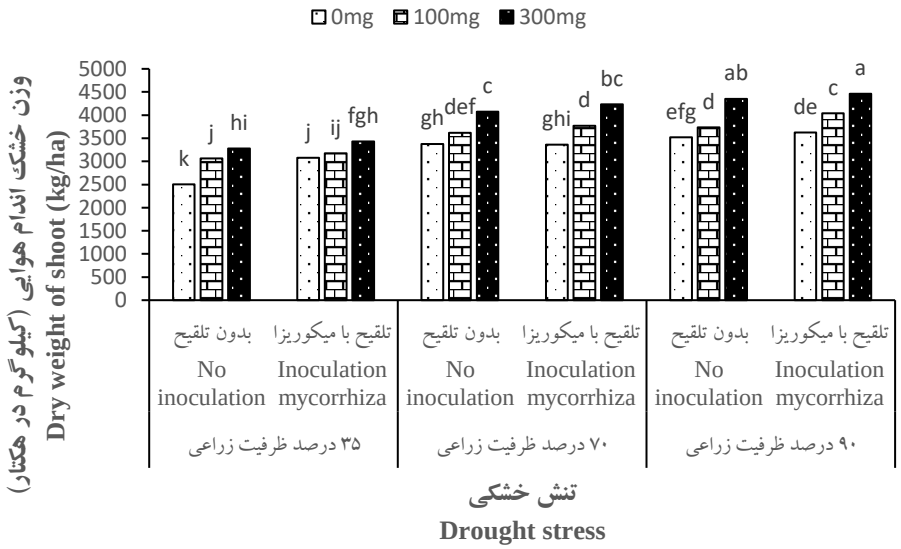
ns, ** and * represent not significant and significant at the 5 and 1% probability levels, respectively

وزن خشک اندام هوایی

اثرات ساده تنش خشکی، میکوریزا و محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید در سطح احتمال یک درصد بر وزن خشک اندام هوایی مرزنجوش معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد اثرمتقابل میکوریزا و سالیسیلیک‌اسید معنی‌دار نبود ولی سایر اثرات دوگانه و سه‌گانه بر وزن خشک اندام هوایی معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین وزن خشک اندام هوایی در تیمار ۹۰ درصد ظرفیت زراعی به‌همراه تلقیح میکوریزا و محلول‌پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم سالیسیلیک‌اسید به‌میزان ۴۴۵۹/۳ کیلوگرم در هکتار مشاهده گردید که نسبت به تیمار ۳۵ درصد ظرفیت زراعی و عدم تلقیح میکوریزا و عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید ۴۳/۸ درصد افزایش نشان داد (شکل ۲).

محققان اظهار داشتند عملکرد خشک آویشن (*Thymus vulgaris* L.) تحت تنش کم‌آبی متوسط (۶۰ درصد ظرفیت زراعی) و شدید (۴۰ درصد ظرفیت زراعی) به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (Amani Machiani *et al.*, 2023). آنها بیان داشتند که کاهش در عملکرد خشک آویشن به‌دلیل کمبود رطوبت کافی در اطراف ناحیه ریشه است. این موضوع منجر به کاهش در توسعه زیست‌توده ریشه شده و به‌دنبال آن، جذب مواد مغذی و آب نیز کاهش می‌یابد. این اثرات منفی فتوسنتز، تمایز و تقسیم سلولی را مختل کرده و در نهایت باعث کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شوند (Amani Machiani *et al.*, 2023). بنابراین، رشد گیاهی نتیجه‌ای از تلفیق و تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی است (Shiade *et al.*, 2024). احتمالاً

میکوریزا با جذب فسفر و تولید مواد افزاینده رشد باعث بهبود رشد ریشه و در نتیجه بهبود سرعت جذب عناصر غذایی و آب شده باعث افزایش ارتفاع بوته شده است. گزارش شده است کاربرد میکوریزا منجر به افزایش رشد و نمو گیاهانی مانند آویشن (Amani Machiani *et al.*, 2023)، بالنگو (Paravar *et al.*, 2021)، بادرنجبویه (Eshaghi Gorgi *et al.*, 2022) در شرایط تنش خشکی گردیده است. علت بهبود در رشد را نمی‌توان به توانایی این قارچ در جذب فسفر محدود نمود بلکه سایر اثرات این قارچ مانند افزایش جذب آب و عناصر غذایی ماکرو و ریزمغذی‌ها توسط گیاه که ناشی از گسترش سیستم ریشه گیاه توسط این قارچ است را می‌توان نام برد (Mirzaei *et al.*, 2024).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثرمتقابل تنش خشکی، میکوریزا و محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید بر وزن خشک اندام هوایی مرزنجوش

Figure 2- Comparison of mean interactions of drought stress, mycorrhiza, and salicylic acid foliar application on the dry weight of marjoram shoots

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

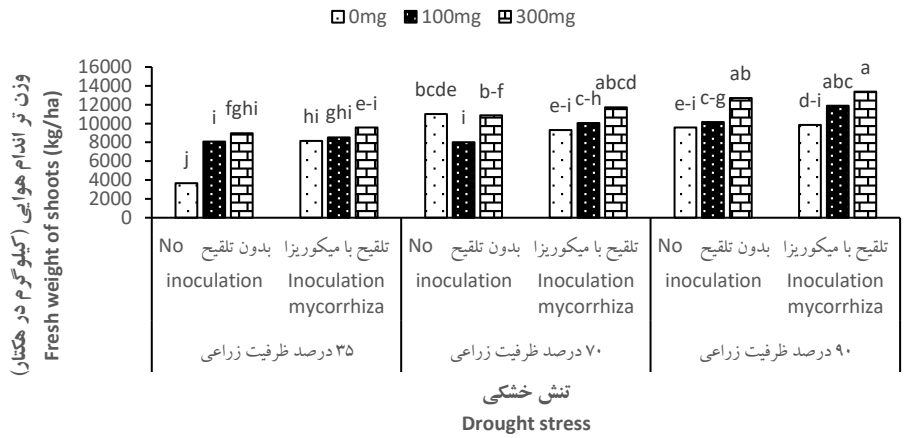
Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level

وزن تر اندام هوایی

نتایج نشان داد اثرات ساده تنش خشکی، میکوریزا و سالیسیلیک‌اسید بر وزن تر اندام هوایی در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثرمتقابل تنش خشکی، میکوریزا و سالیسیلیک‌اسید در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین وزن تر اندام هوایی در تیمار ۹۰ درصد ظرفیت زراعی به‌همراه تلقیح میکوریزا و محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید به‌میزان ۱۳۳۶۹/۴ کیلوگرم در هکتار مشاهده گردید. کمترین وزن تر لندام هوایی در تیمار ۳۵ درصد ظرفیت زراعی و عدم تلقیح با میکوریزا و عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید به‌میزان ۳۶۷۵/۱ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد (شکل ۳). مهمترین دلایل کاهش در وزن گیاه در طول دوره کم‌آبی را می‌توان به اثرات سوء تنش بر رشد و فیزیولوژی گیاه شامل رشد رویشی، سیستم فتوسنتزی، جذب عناصر غذایی و متابولیسم نیتروژن دانست. رشد و نمو یک گیاه به تقسیم سلولی، رشد و تمایز سلول‌ها وابسته است (Fathi *et al.*, 2024).

رشد سلولی یکی از حساس‌ترین واکنش‌های گیاهی در برابر کم‌آبی می‌باشد. نتیجه کاهش اندازه سلول در رابطه با الگوی رشد گیاه به زمان وقوع تنش خشکی از نظر فنولوژی گیاه بستگی دارد. اگر کم‌آبی در ابتدای چرخه رشد گیاه اتفاق افتد، سطح برگ کاهش یافته و در نتیجه فتوسنتز در فصل رشد کاهش خواهد یافت (Fathi *et al.*, 2024).

در شرایط تنش خشکی و کاربرد قارچ میکوریزا نسبت به عدم کاربرد قارچ میکوریزا زیست توده رازیانه افزایش داشت و دلیل افزایش را سیستم ریشه قوی در شرایط کاربرد قارچ میکوریزا بیان کردند (Zardak *et al.*, 2017).



شکل ۳- مقایسه میانگین اثرمتقابل تنش خشکی، میکوریزا و محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید بر وزن تر اندام هوایی مرزنجوش

Figure 3- Comparison of mean effects of drought stress, mycorrhiza, and salicylic acid foliar application on fresh weight of marjoram shoots

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

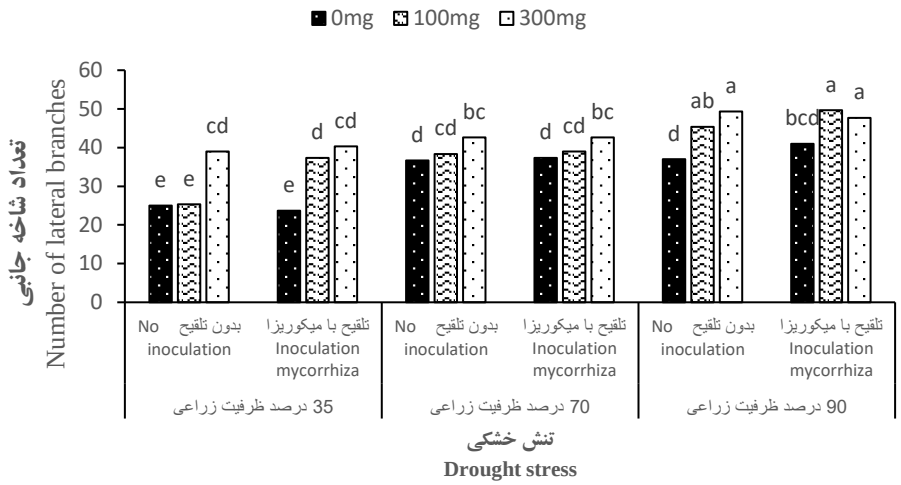
Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.

تعداد شاخه جانبی

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تنش خشکی، میکوریزا و سالیسیلیک‌اسید در سطح احتمال یک درصد و اثرات دوگانه تنش خشکی× سالیسیلیک‌اسید و سالیسیلیک‌اسید × میکوریزا در سطح احتمال یک درصد و اثرسه‌گانه تنش خشکی× میکوریزا× سالیسیلیک‌اسید در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد شاخه جانبی مرزنجوش معنی‌دار بودند (جدول ۲). بیشترین تعداد شاخه جانبی در تیمار ۹۰ درصد ظرفیت زراعی بود که در شرایط محلول‌پاشی با سالیسیلیک‌اسید و تلقیح یا عدم تلقیح میکوریزا اختلاف معنی‌داری نداشت. همچنین نتایج نشان داد با تلقیح میکوریزا و محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید در همه سطوح افزایش در تعداد شاخه جانبی مشاهده شد. کمترین شاخه جانبی در ۳۵ درصد ظرفیت زراعی و بدون تلقیح میکوریزا و عدم استفاده از سالیسیلیک‌اسید به‌دست آمد (شکل ۴). در شرایط تنش خشکی، محدودیت در رشد شاخساره به احتمال زیاد به‌دلیل تخصیص مجدد کربوهیدرات به نفع رشد ریشه یا کاهش بازده فتوسنتز می‌توان باشد (Guo *et al.*, 2020; Plouznikoff *et al.*, 2016). محققان اظهار داشتند که تنش رطوبتی با کاهش طول دوره رشد گیاه و همچنین تسریع در ورود به فاز زایشی، مانع رشد جوانه‌های جانبی شده و تعداد شاخه‌های جانبی را تحت تاثیر قرار می دهد (Nuñez Barrios *et al.*, 2005).

نشت یونی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد، اثرات ساده تیمار تنش خشکی، میکوریزا و سالیسیلیک‌اسید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثرمتقابل دوگانه تنش خشکی× سالیسیلیک‌اسید و میکوریزا× سالیسیلیک‌اسید و تنش خشکی× میکوریزا بر نشت یونی با سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد بیشترین میزان نشت یونی در تیمار ۳۵ درصد ظرفیت زراعی و عدم تلقیح میکوریزا به‌میزان ۴۸/۸ درصد و کمترین میزان در تیمار ۹۰ درصد ظرفیت زراعی و تلقیح با میکوریزا به‌میزان ۱۸/۷ درصد به‌دست آمد (شکل ۵). نتایج به‌دست‌آمده با نتایج پژوهش‌های پیشین مبنی بر افزایش نشت یونی با افزایش تنش خشکی هم‌خوانی داشتند (Ramzan *et al.*, 2023). تنش خشکی سبب اختلال در فعالیت غشای سلول می‌شود و به‌دنبال آن، شاخص‌های پایداری غشای سلول در گیاهان کاهش می‌یابد که باعث نشت یونی از داخل سلول به بیرون آن می‌شود (Sun *et al.*, 2020). تنش خشکی با القای تنش اکسیداتیو و تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن، پراکسیداسیون اسیدهای چرب غشاهای سلولی را تولید می‌کند و نفوذپذیری غشا و نشت یونی را افزایش می‌دهد (Ansari *et al.*, 2019; Shiade *et al.*, 2024).

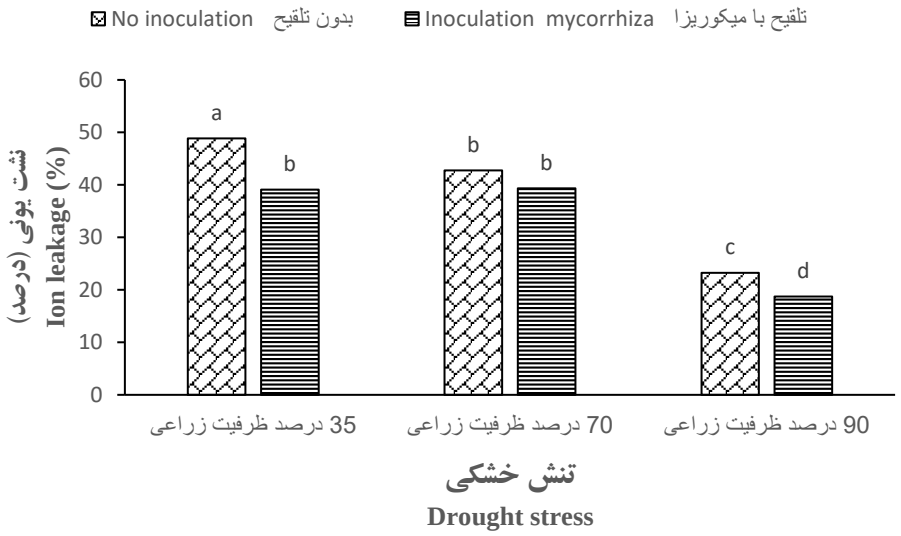


شکل ۴- مقایسه میانگین اثرمتقابل تنش خشکی، میکوریزا و محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید بر تعداد شاخه جانبی مرزنجوش

Figure 4- Comparison of mean interactions of drought stress, mycorrhiza, and salicylic acid foliar application on the number of lateral branches of marjoram

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.



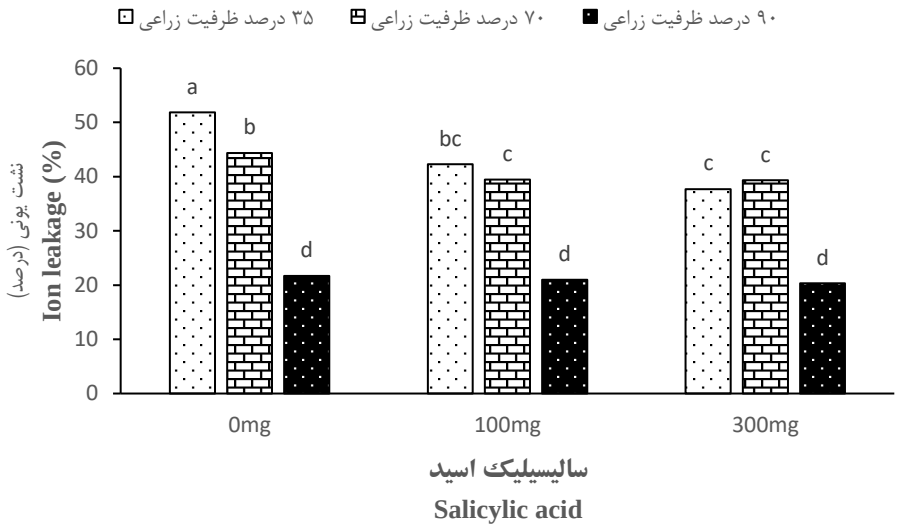
شکل ۵- مقایسه میانگین اثرمتقابل تنش خشکی و میکوریزا بر درصد نشت یونی مرزنجوش

Figure 5- Comparison of the average interaction effect of drought stress and mycorrhiza on the percentage of ion leakage of marjoram

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.

نتایج نشان داد بیشترین نشت یونی در تیمار ۳۵ درصد ظرفیت زراعی و عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید به‌میزان ۵۱/۸ درصد به‌دست آمد و کمترین میزان نشت یونی در همه سطوح با مصرف سالیسیلیک‌اسید به‌دست آمد (شکل ۶). به نظر می‌رسد سالیسیلیک‌اسید با تأثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیک باعث افزایش مقاومت به تنش خشکی می‌شود. در همین راستا، محققان اظهار داشتند محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید به‌طور قابل‌توجهی باعث وضعیت بهتر آب گیاه، هموستاز یونی و کاهش آسیب اکسیداتیو و معکوس کردن مهار رشد ناشی از تنش می‌شود. بنابراین کاربرد سالیسیلیک‌اسید سبب فعال کردن سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و مقاومت گیاه به تنش خشکی می‌شود (Pai and Sharma, 2024).



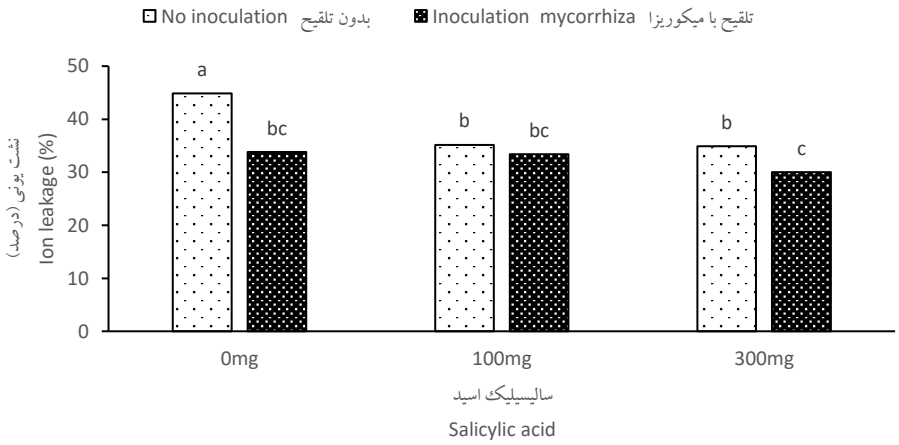
شکل ۶- مقایسه میانگین اثرمتقابل تنش خشکی و سالیسیلیک‌اسید بر درصد نشت یونی مرزنجوش

Figure 6- Comparison of the average interaction effect of drought stress and salicylic acid on the percentage of ion leakage of marjoram

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.

نتایج مقایسه میانگین نشان داد بیشترین نشت یونی در تیمار بدون تلقیح میکوریزا و عدم مصرف سالیسیلیک‌اسید به‌میزان ۴۸/۸ درصد و کمترین میزان در تیمار تلقیح میکوریزا و مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم سالیسیلیک‌اسید به‌میزان ۳۰ درصد به‌دست آمد (شکل ۷). به نظر می‌رسد میکوریزا با افزایش سیستم ریشه‌ای در گیاه و جذب عناصر در خاک سبب افزایش توان گیاه به شرایط تنش خشکی می‌شود. محققان اظهار داشتند که نشت یونی گیاهان تحت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد و کاربرد قارچ میکوریزا باعث کاهش نشت یونی در شرایط تنش نسبت به شرایط عدم تلقیح شد. این پژوهشگران بیان کردند که علت کاهش نشت یونی به‌وسیله تیمار کردن گیاه با قارچ می‌توان به‌دلیل بهبود جذب عناصر غذایی و در نتیجه تنظیم فشار اسمزی سلول مرتبط دانست (Asrar *et al*., 2012).



شکل ۷- مقایسه میانگین اثرمتقابل سالیسیلیک‌اسید و میکوریزا بردرصد نشت یونی مرزنجوش

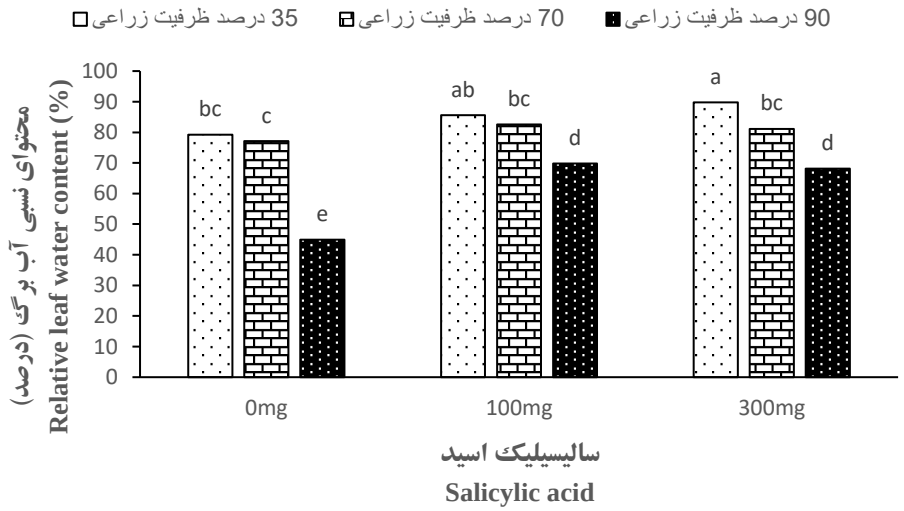
Figure 7- Comparison of mean interactions of salicylic acid*mycorrhiza on the percentage of ion leakage of marjoram

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.

محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشـــان داد اثرات ســـاده تیمار تنش خشـکی، میکوریزا و سـالیسـیلیک‌اسـید در سـطح احتمال یک درصـــد معنی‌دار بود. همچنین اثر دوگانه تنش خشـــکی× سـالیسـیلیک‌اسـید بر محتوای نسـبی آب برگ با سـطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۸۹/۸ درصد) در تیمار ۳۵ درصد ظرفیت زراعی با کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم سـالیسـیلیک‌اسـید مشـاهده شـد. محلول‌پاشـی با سـالیسـیلیک‌اسـید باعث افزایش محتوای نسـبی آب برگ در تیمارهای مصـرف سـالیسـیلیک‌اسـید گردید (شـکل ۸). یکی از پارامترهای فیزیولوژیکی پاسخ‌دهنده به کم‌آبی، محتوای نسبی آب برگ اسـت که همبسـتگی خوبی با تحمل به خشـکی نشـان می‌دهـد (Ghadirnezhad Shiade *et al.*, 2023). محققـان اظهار داشـتند که کاربرد سـالیسـیلیک‌اسـید بر میزان محتوای نسبی آب برگ افزوده است که علت آن را به افزایش توان جذب آب توسـط ریشـه و در نهایت افزایش در آن می‌شـود (Yan *et al.*, 2023). محتوای آب نسـبی برگ ممکن اسـت نشـان‌دهنده تأثیر متفاوت تیمارها برای جذب آب از خاک و یا توانایی کنترل هدر روی آب از طریق روزنه‌ها و یا اختلاف در توانایی گیاهان برای تجمع و تنظیم اســـمزی برای حفظ تورژســـانس بافت و افزایش فعالیت‌های فیزیولوژیکی باشـــد. یکی از اثرات گزارش شـــده ســـالیســـیلیک‌اســـید افزایش طول ریشـــه و افزایش توان اســـتخراج آب اســـت. این اثرات مثبت، ممکن اســـت با بهبود و افزایش سرعت رشد ریشه‌ها در ابتدای زندگی گیاه، دلیلی برای افزایش محتوای نسبی آب گیاهان باشد (Altaf *et al.*, 2021).



شکل ۸- مقایسه میانگین اثرمتقابل تنش خشکی و سالیسیلیک‌اسید بر محتوای نسبی آب برگ مرزنجوش

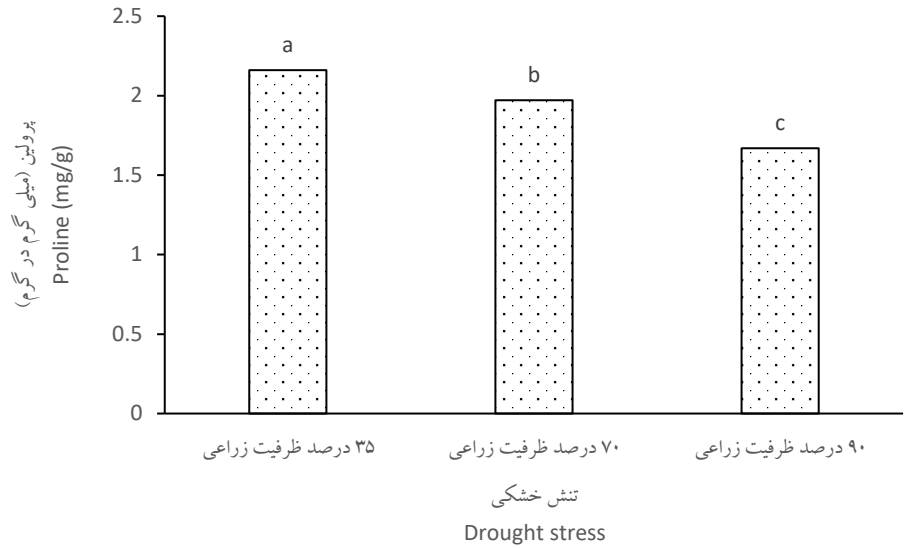
Figure 8- Comparison of the average interaction effect of drought stress and salicylic acid on relative water content of marjoram leaves

میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.

پرولین

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشـــان داد اثرات ســـاده تیمار تنش خشـکی، میکوریزا و سـالیسـیلیک‌اسـید در سـطح احتمال یک درصـد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشـان داد بیشـترین میزان پرولین در تیمار ۳۵ درصـد ظرفیت زراعی به‌میزان ۲/۱۵ میلی‌گرم در گرم به‌دسـت آمد که نسـبت به تیمار ۹۰ درصـد ظرفیت زراعی ۲۹/۱۵ درصـد افزایش نشـان داد (شـکل ۹). افزایش سـطح پرولین در شـرایط تنش به این علت اسـت که پرولین، اسـمولیت سـازگاری اسـت که اکسـیژن‌های آزاد تولید شـده در تنش‌های محیطی را حذف و از مولکول‌های بزرگ حفاظت می‌کند (Parvaneh *et al.*, 2012). پرولین علاوه‌بر تنظیم اسـمزی به‌طور مسـتقیم و غیرمسـتقیم با ماکرومولکول‌ها اثرمتقابل داشـته و به حفظ شـکل و سـاختار طبیعی آنها در شرایط تنش کمک می‌کند (Koç *et al.*, 2010).



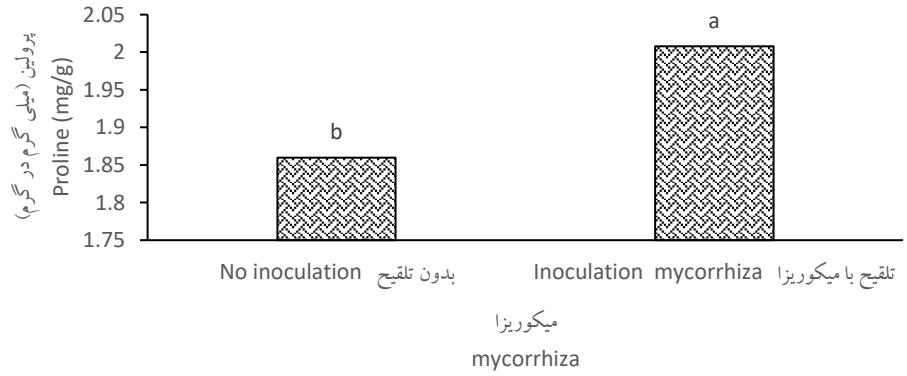
شکل ۹- مقایسه میانگین اثر تنش خشکی بر میزان پرولین مرزنجوش

Figure 9- Comparison of the average effect of drought stress on the proline content of marjoram

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.

نتایج نشـــان داد بیشـــترین میزان پرولین در تیمار تلقیح میکوریزا به‌میزان ۲ میلی‌گرم در گرم به‌دست آمد که نسبت به حالت عدم تلقیح ۸/۱ درصـــد افزایش نشـــان داد (شـــکل ۱۰). پرولین نقش محافظت‌کنندگی آنزیم‌های سیتوزولی (حفاظت از آنزیم کربوکسیلاز) و ساختار سلولی را بر عهده دارد؛ از این‌رو، پرولین طی شرایط تنش در سلول انباشت می‌شود (Fang and Xiong, 2015). معمولاً گیاهان میکوریزایی با استفاده از روابط آبی و تغذیهٔ بهتر نسبت به گیاهان بدون میکوریز می‌توانند به‌طور موقت از شـرایط تنش خشـکی فرار کنند و کمتر دچار آسیب شوند و درنتیجه، میزان پرولین نسبت به گیاهان بدون میکوریز افزایش کمتری نشـــان می‌دهد (Porcel and Ruiz-Lozano, 2004).



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثر میکوریزا بر میزان پرولین مرزنجوش

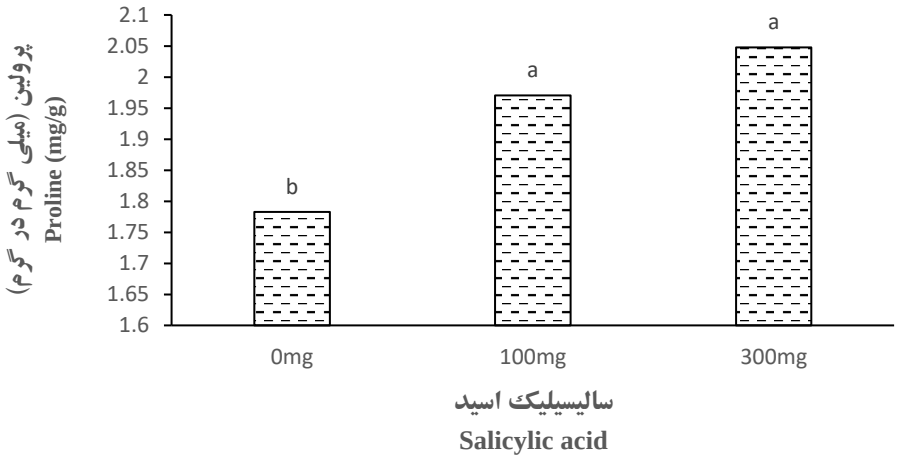
Figure 10- Comparison of the average effect of mycorrhiza on the proline content of marjoram

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.

نتـایج نشـــان داد بـا افزایش مصـــرف ۳۰۰ میلی‌گرم سـالیسـیلیک‌اسـید ۲/۰۴ میلی‌گرم پرولین افزایش پیدا کرد و با عدم محلول‌پاشی کمترین میزان ۱/۷۸ میلی‌گرم در گرم پرولین به‌دسـت آمد (شـکل ۱۱). پرولین به‌عنوان تنظیم‌کننده اسـمزی

باعث حفاظت از اندامک‌های سلولی مانند میتوکندری و کلروپلاست است که از تخریب اکسیداتیو آن جلوگیری می‌کند. محققان اظهار داشتند سالیسیلیک‌اسید با تجمع املاح سازگار (مانند پرولین)، کاهش سطوح رادیکال سمی گونه‌های اکسیژن فعال و افزایش فعالیت، آسیب به دستگاه فتوسنتزی را تحت شرایط تنش کاهش می‌دهد (Nazar *et al.*, 2015; Shemi *et al.*, 2021).



شکل ۱۱- مقایسه میانگین اثر سالیسیلیک‌اسید بر میزان پرولین مرزنجوش

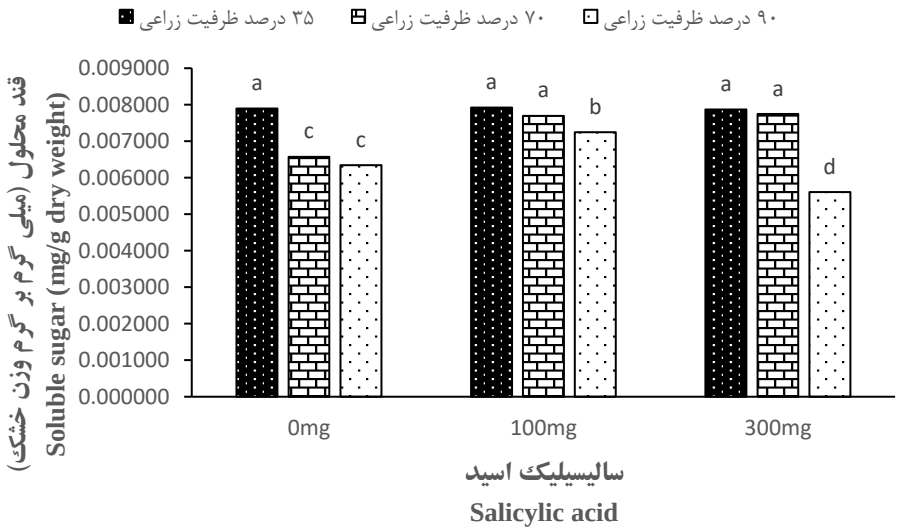
Figure 11- Comparison of the average effect of salicylic acid on the proline content of marjoram

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.

قند محلول

نتایج نشان داد قند محلول تحت تأثیر تیمارهای تنش خشکی ($P< 0.01$)، میکوریزا ($P< 0.05$)، محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید ($P< 0.01$) و اثرمتقابل تنش خشکی× محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۲). بیشترین قند محلول (۰/۰۰۷۹۲۵ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) در تیمار ۳۵ درصد ظرفیت زراعی با کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم سالیسیلیک‌اسید مشاهده شد. اما بین محلول‌پاشی و عدم محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید اختلاف معنی‌دار وجود نداشت که به نظر این اختلاف مربوط به محلول‌پاشی نیست و مربوط به تنش است. در تیمار ۷۰ و ۹۰ درصد زراعی محلول‌پاشی در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم توانست میزان قند محلول را افزایش دهد (شکل ۱۲). در شرایط تنش، سالیسیلیک با تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدان فنولی و آنتوسانین‌ها به‌طور مستقیم موجب حذف رادیکال‌های آزاد می‌شود، به‌همین علت تجمع موادی مانند پرولین و قند محلول را کاهش می‌دهد (Nouri *et al.*, 2017). گزارش شده است کاربرد ۲ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید در شرایط تنش ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، موجب کاهش قند محلول به‌میزان ۱۱/۶۹درصد نسبت به شاهد در عروسک پشت پرده (*Physalis peruviana* L.) شد (Siahmansour *et al.*, 2022). اما برخی محققان گزارش کردند، محلول‌پاشی سالیسیلک‌اسید در شرایط تنش کم‌آبی در غلظت ۲ میلی‌مولار به‌طور معنی‌داری باعث افزایش قند محلول در گیاه همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) شد (Erfani *et al.*, 2022). یکی از سازوکارهای کاهش اثرات تنش خشکی تجمع اسمولیت‌های حل‌شونده مانند قند محلول در سلول می‌باشد که باعث ثبات غشاء سلولی و حفظ تورژسانس سلول‌ها می‌شود (Shiade *et al.*, 2024). ثابت شده است که گیاهان در شرایط تنش، سنتز ترکیباتی مانند کربوهیدرات‌ها را برای حفظ تعادل اسمزی و بهبود جذب آب از محیط ریشه تقویت می‌کنند (Abdalla and El-Khoshiban, 2007). تنش خشکی همچنین باعث افزایش فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز می‌شود که منجر به افزایش هیدرولیز نشاسته و در نتیجه غلظت بالاتر قندهای محلول می‌شود (Ghadirnezhad *et al.*, 2024; Setter *et al.*, 2001).



شکل ۱۲- مقایسه میانگین اثرمتقابل تنش خشکی و سالیسیلیک‌اسید بر میزان قند محلول مرزنجوش

Figure 12- Comparison of the average interaction effect of drought stress and salicylic acid on the soluble sugar content of marjoram

میانگین‌های دارای حروف یکسان براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means followed by similar letters show non- significant difference according to LSD tests at 5% level.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این پژوهش، گیاه دارویی مرزنجوش نسبت به سطوح مختلف تنش خشکی واکنش متفاوتی را نشان داد. با افزایش تنش خشکی در تیمار ۳۵ درصد ظرفیت زراعی، کمترین ارتفاع بوته، وزن خشک اندام هوایی، وزن تر اندام هوایی و تعداد شاخه جانبی مشاهده گردید. در شرایط آبیاری در ۷۰ درصد ظرفیت زراعی، کاربرد قارچ میکوریزا خسارت ناشی از تنش خشکی را جبران نمود و عملکرد گیاه را تا سطح آبیاری ۹۰ درصد ظرفیت زراعی افزایش داد. در تیمار ۳۵ درصد ظرفیت زراعی کارایی قارچ میکوریزا مشهود بود. براساس نتایج حاصل از این پژوهش، در تیمار ۷۰ درصد ظرفیت زراعی کاربرد قارچ میکوریزا و محلول پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم سالیسیلیک‌اسید نسبت به عدم مصرف توانست به‌میزان ۲۵/۲ درصد وزن خشک اندام هوایی را افزایش دهد. بنابراین، برای تولید مرزنجوش در مناطق با محدودیت آب، از تلقیح با قارچ میکوریزا *G. hoi* و محلول‌پاشی با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سالیسیلیک‌اسید استفاده شود.

References

Abdalla, M.M. and El-Khoshiban, N.H., 2007. The influence of water stress on growth, relative water content, photosynthetic pigments, some metabolic and hormonal contents of two *Triticium aestivum* cultivars. *Journal of Applied Sciences Research*, *3*(12), pp.2062- 2074.

Abpaykar, M., Ganjali, S., Fahmideh, L. and Heidari, F., 2021. Effect of different levels of salicylic acid foliar application on phenols, flavonoids, antioxidant activity, and photosynthetic pigments of peppermint. *Crop Science Research in Arid Regions*, *3*(1), pp.97-110. https://doi.org/10.22034/csrar.2021.288792.1095

Ahmad, A., Aslam, Z., Naz, M., Hussain, S., Javed, T., Aslam, S. and Jamal, M.A., 2021. Exogenous salicylic acid-induced drought stress tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown under hydroponic culture. *Plos One*, *16*(12), e0260556. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260556

Altaf, A., Gull, S., Zhu, X., Zhu, M., Rasool, G., Ibrahim, M.E.H. and Chen, L., 2021. Study of the effect of peg-6000 imposed drought stress on wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars using relative water content (RWC) and proline content analysis. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, *58*(1), pp.357-367. https://doi.org/10.21162/PAKJAS/21.953

Amani Machiani, M., Javanmard, A., Ostadi, A. and Alizadeh, K., 2023. Improvement in essential oil quantity and quality of thyme (*Thymus vulgaris* L.) by integrative application of chitosan nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi under water stress conditions. *Plants*, *12*(7), 1422. https://doi.org/10.3390/plants12071422

Ansari, W.A., Atri, N., Pandey, M., Singh, A.K., Singh, B. and Pandey, S., 2019. Influence of drought stress on morphological, physiological and biochemical attributes of plants: A review. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, *16*(4), pp.697-709. https://doi.org/10.13005/bbra/2785

Asrar, A.A., Abdel-Fattah, G.M. and Elhindi, K.M., 2012. Improving growth, flower yield, and water relations of snapdragon (*Antirhinum majus* L.) plants grown under well-watered and water-stress conditions using arbuscular mycorrhizal fungi. *Photosynthetica*, *50*, pp.305-316. https://doi.org/10.1007/s11099-012-0024-8

Barjas, M., Mehravaran, L., Allahdou, M. and Ganjali, S., 2022. Effects of application of salicylic acid under the drought stress on morphophisiological and biochemical traits of two varieties of mung bean. *Crop Science Research in Arid Regions*, *4*(1), pp.153-171. https://doi.org/10.22034/csrar.2022.309460.1139

Bates, L.S., Waldren, R.P.A. and Teare, I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, *39*, pp.205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Cala, A., Salcedo, J.R., Torres, A., Varela, R.M., Molinillo, J.M. and Macías, F.A., 2021. A study on the phytotoxic potential of the seasoning herb marjoram (*Origanum majorana* L.) leaves. *Molecules*, *26*(11), 3356. https://doi.org/10.3390/molecules26113356

De Andrade, L.A., Santos, C.H.B., Frezarin, E.T., Sales, L.R. and Rigobelo, E.C., 2023. Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, *11*(4), 1088. https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088

Elfiky, A.M., Shawky, E., Khattab, A.R. and Ibrahim, R.S., 2022. Integration of NIR spectroscopy and chemometrics for authentication and quantitation of adulteration in sweet marjoram (*Origanum majorana* L.). *Microchemical Journal*, *183*, 108125. https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.108125

Erfani, S., Rezaei, M., Farahvash, F. and Mahmoudjanlo, M., 2022. The effect of nano potassium fertilizer, potassium sulfate and salicylic acid on physiological characteristics of *Calendula officinalis* L. under water stress. *Journal of Plant Environmental Physiology*, *17*(65), pp.66-85. https://doi.org/10.30495/iper.2021.679554

Eshaghi Gorgi, O., Fallah, H., Niknejad, Y. and 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), pp.11-20. https://doi.org/10.1007/s11756-021-00919-2

Fang, Y. and Xiong, L., 2015. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, *72*, pp.673-689. https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0

Farsi, M., Abdollahi, F., Salehi, A. and Ghasemi, S., 2020. Effect of methyl jasmonate on growth and essential oil content of marjoram (*Origanum majorana* L.) under drought stress conditions. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, *33*(3), pp.698-712. https://doi.org/20.1001.1.23832592.1399.33.3.14.8

Fathi, A., Shiade, S.R.G., Kianersi, F., Altaf, M.A., Amiri, E. and Nabati, E., 2024. Photosynthesis in cereals under drought stress. In Handbook of Photosynthesis (4th ed.). Taylor & Francis, Boca Raton, USA. 826p. https://doi.org/10.1201/b22922

Fujikura, U., Ezaki, K., Horiguchi, G., Seo, M., Kanno, Y., Kamiya, Y. and Tsukaya, H., 2020. Suppression of class I compensated cell enlargement by xs2 mutation is mediated by salicylic acid signaling. *PLoS Genetics*, *16*(6), e1008873. https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1010775

Ghadirnezhad Shiade, S.R., Fathi, A., Taghavi Ghasemkheili, F., Amiri, E. and Pessarakli, M.2023. Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches—A review. *Journal of Plant Nutrition*, *46*(9), pp.2198-2230. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2105720

Ghadirnezhad Shiade, S.R., Rahimi, R., Zand-Silakhoor, A., Fathi, A., Fazeli, A., Radicetti, E. and Mancinelli, R., 2024. Enhancing seed germination under abiotic stress: exploring the potential of nano-fertilization. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, pp.1-23. https://doi.org/10.1007/s42729-024-01910-x

Guo, T., Tian, C., Chen, C., Duan, Z., Zhu, Q. and Sun, L.Z., 2020. Growth and carbohydrate dynamic of perennial ryegrass seedlings during PEG-simulated drought and subsequent recovery. *Plant Physiology and Biochemistry*, *154*, pp.85-93. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.06.008

Hafeez, A., Ali, B., Javed, M.A., Saleem, A., Fatima, M., Fathi, A. and Soudy, F.A., 2023. Plant breeding for harmony between sustainable agriculture, the environment, and global food security: an era of genomics-assisted breeding. *Planta*, *258*(5), 97. https://doi.org/10.1007/s00425-023-04252-7

Koç, E., İşlek, C. and Üstün, A.S., 2010. Effect of cold on protein, proline, phenolic compounds and chlorophyll content of two pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties. *Gazi University Journal of Science*, *23*(1), pp.1-6.

Kochert, G. 1978. Carbohydrate determination by the phenol-sulfuric acid method. *Handbook Of Phycological Methods, Physiological And Biochemical Methods.*, 95.

Kumar, S. and Dey, P., 2011. Effects of different mulches and irrigation methods on root growth, nutrient uptake, water-use efficiency and yield of strawberry. *Scientia Horticulturae*, *127*(3), pp.318-324. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.10.023

Lee, E.H., Eo, J.K., Ka, K.H. and Eom, A.H., 2013. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and their roles in ecosystems. *Mycobiology*, *41*(3), pp.121-125. https://doi.org/10.5941/myco.2013.41.3.121

Li, A., Sun, X. and Liu, L., 2022. Action of salicylic acid on plant growth. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 878076. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.878076

Mirzaei Heydari, M., Brook, R.M. and Jones, D.L., 2024. Barley growth and phosphorus uptake in response to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus solubilizing bacteria. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *55*(6), pp.846-861. https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2282996

Morshedloo, M.R., Craker, L.E., Salami, A., Nazeri, V., Sang, H. and Maggi, F., 2017. Effect of prolonged water stress on essential oil content, compositions and gene expression patterns of mono-and sesquiterpene synthesis in two oreganos (*Origanum vulgare* L.) subspecies. *Plant physiology and biochemistry*, *111*, pp.119-128. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.023

Moustakas, M., Sperdouli, I., Adamakis, I.D.S., Moustaka, J., İşgören, S. and Şaş, B., 2022. Harnessing the role of foliar applied salicylic acid in decreasing chlorophyll content to reassess photosystem II photoprotection in crop plants. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(13), 7038. https://doi.org/10.3390/ijms23137038

Nadeem, S.M., Ahmad, M., Zahir, Z.A., Javaid, A. and Ashraf, M., 2014. The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances*, *32*(2), pp.429-448. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005

Nassef, D.M., 2017. Impact of irrigation water deficit and foliar application with salicylic acid on the productivity of two cowpea cultivars. *Egyptian Journal of Horticulture*, *44*(1), pp.75-90. https://doi.org/10.21608/ejoh.2017.1170.1010

Nazar, R., Umar, S. and Khan, N.A., 2015. Exogenous salicylic acid improves photosynthesis and growth through increase in ascorbate-glutathione metabolism and S assimilation in mustard under salt stress. *Plant Signaling & Behavior*, *10*(3), e1003751. https://doi.org/10.1080/15592324.2014.1003751

Nouri, A., Nezami, A., Kafi, M. and Hassanpanah, D., 2017. Evaluation of water deficit tolerance of 10 potatoes (*Solanum tuberosum* L.) cultivars based on some physiological traits and tuber yield in Ardabil region. *Journal of Crop Ecophysiology*, *10*(1), pp.234-268. https://doi.org/10.55006/biolsciences.2022.2305

Nuñez Barrios, A., Hoogenboom, G. and Nesmith, D.S., 2005. Drought sress and the distribution of vegetative and reproductive traits of a bean cultivar. *Scientia Agricola*, *62*, pp.18-22.

Pai, R. and Sharma, P.K., 2024. Exogenous supplementation of salicylic acid ameliorates salt-induced membrane leakage, ion homeostasis and oxidative damage in Sorghum seedlings. *Biologia*, *79*(1), pp.23-43. https://doi.org/10.1007/s11756-023-01554-9

Paravar, A., Farahani, S.M. and Rezazadeh, A., 2021. Lallemantia species response to drought stress and Arbuscular mycorrhizal fungi application. *Industrial Crops and Products*, *172*, 114002. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114002

Parvaneh, R., Shahrokh, T. and Meysam, H.S., 2012. Studying of salinity stress effect on germination, proline, sugar, protein, lipid and chlorophyll content in purslane (*Portulaca oleracea* L.) leaves. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, *8*(1), pp.182-193.

Plouznikoff, K., Declerck, S. and Calonne-Salmon, M., 2016. Mitigating abiotic stresses in crop plants by arbuscular mycorrhizal fungi. *Belowground Defence Strategies in Plants*, pp.341-400. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42319-7_15

Porcel, R. and Ruiz-Lozano, J.M., 2004. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. *Journal of Experimental Botany*, *55*(403), pp.1743-1750. https://doi.org/10.1093/jxb/erh188

Ramzan, T., Shahbaz, M., Maqsood, M.F., Zulfiqar, U., Saman, R.U., Lili, N. and Haider, F.U., 2023. Phenylalanine supply alleviates the drought stress in mustard (*Brassica campestris*) by modulating plant growth, photosynthesis, and antioxidant defense system. *Plant Physiology and Biochemistry*, *201*, 107828. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107828

Setter, T.L., Flannigan, B.A. and Melkonian, J., 2001. Loss of kernel set due to water deficit and shade in maize: carbohydrate supplies, abscisic acid, and cytokinins. *Crop Science*, *41*(5), pp.1530-1540. https://doi.org/10.2135/cropsci2001.4151530x

Shahghasi, M., Seghatoleslami, M., Mousavi, S.G. and Nakhaei, F., 2023. To study the effect of irrigation, plant density and salicylic acid on yield and yield components of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Crop Science Research in Arid Regions*, *4*(2), pp.487-502. https://doi.org/10.22034/csrar.2023.326353.1184

Shemi, R., Wang, R., Gheith, E.S.M., Hussain, H.A., Hussain, S., Irfan, M. and Wang, L., 2021. Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. *Scientific Reports*, *11*(1), 3195. https://doi.org/10.1038/s41598-021-82264-7

Shi, J., Wang, X. and Wang, E., 2023. Mycorrhizal symbiosis in plant growth and stress adaptation: from genes to ecosystems. *Annual review of plant biology*, *74*(1), pp.569-607. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-061722-090342

Shiade, S.R.G., Zand-Silakhoor, A., Fathi, A., Rahimi, R., Minkina, T., Rajput, V.D. and Chaudhary, T., 2024. Plant metabolites and signaling pathways in response to biotic and abiotic stresses: Exploring bio stimulant applications. *Plant Stress*, 100454. https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100454

Siahmansour, S., Ehtesham Nia, A. and Rezaei Nejad, A., 2022. Effect of salicylic acid application on morphophysiological traits of *Physalis peruviana* L. under deficit water stress. *Journal of Horticultural Science*, 36(3), pp.643-655. https://doi.org/10.22067/jhs.2022.72985.1096

Sun, M., Peng, F., Xiao, Y., Yu, W., Zhang, Y. and Gao, H., 2020. Exogenous phosphatidylcholine treatment alleviates drought stress and maintains the integrity of root cell membranes in peach. *Scientia Horticulturae*, *259*, 108821. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108821

Yan, S., Weng, B., Jing, L. and Bi, W., 2023. Effects of drought stress on water content and biomass distribution in summer maize (*Zea mays* L.). *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1118131. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118131

Zardak, S.G., Dehnavi, M.M., Salehi, A. and Gholamhoseini, M., 2017. Responses of field grown fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) to different mycorrhiza species under varying intensities of drought stress. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, *5*, 16-25. https://doi.org/1016/j.jarmap.2016.09.004

Zhang, Y. and Li, X., 2019. Salicylic acid: biosynthesis, perception, and contributions to plant immunity. *Current Opinion in Plant Biology*, *50*, 29-36. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.02.004