



Effects of Irrigation Regimes, Titanium Dioxide Nanoparticles, and Mycorrhizal Fungi on the Quantitative and Qualitative Yield and Physiological Traits of Sage (*Salvia officinalis* L.) in Intercropping with Peppermint (*Mentha piperita* L.)

Abdollah Javanmard^{1*}, Ali Ostadi¹ and Haniyeh Shabkhiz¹

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran
(*- Corresponding author's Email: a.javanmard@maragheh.ac.ir)

How to cite this article:

Received: 29-09-2025
Revised: 09-12-2025
Accepted: 14-12-2025
Available Online: 04-04-2026

Javanmard, A., Ostadi, A., & Shabkhiz, H. (2026). Effects of irrigation regimes, titanium dioxide nanoparticles, and mycorrhizal fungi on the quantitative and qualitative yield and physiological traits of sage (*Salvia officinalis* L.) in intercropping with peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Agroecology*, 17(4), 1–37. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.95607.1254>

Introduction

Currently, due to the adverse effects of climate change and rising global temperatures, agricultural yields are declining, with the most severe impacts in arid and semi-arid regions. Drought stress is one of the most critical abiotic factors limiting plant growth and productivity in many areas, including Iran. With limited water resources and an average annual rainfall of only 250 mm, approximately two-thirds less than the global average (Biglari et al., 2019). Iran is particularly vulnerable. The severity and duration of drought stress significantly alter the ecophysiological, biochemical, and molecular characteristics of plants, adversely affecting both the quantity and quality of growth and yield (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2020). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), as biofertilizers, enhance plant tolerance to various biotic and abiotic stresses, including drought, nutrient deficiency, heavy metal toxicity, and salinity. In medicinal plants, the application of AMF has been shown to improve photosynthesis, enhance water uptake, increase chlorophyll and carotenoid levels, and boost antioxidant enzyme activity under stressful conditions (Varma et al., 2018). Within the framework of sustainable agriculture, the use of nanotechnology-based alternatives to conventional fertilizers is considered a promising strategy to increase crop productivity and help meet the food demands of the rapidly growing global population (Liu et al., 2015). Among nanomaterials, titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) have been recognized as effective plant growth stimulant (Ingle, 2021). Additionally, intercropping one of the most important sustainable agricultural practices plays a crucial role in enhancing biodiversity and improving overall productivity.

Materials and Methods

This study was carried out at the Research Farm of the Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh. The experiment followed a split-split plot design within a randomized complete block design (RCBD) with three replications, conducted over two consecutive years. The main factor



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/agry.2026.94366.1245>

consisted of three irrigation regimes: 25% (MAD₂₅), 50% (MAD₅₀), and 75% (MAD₇₅) maximum allowable depletion (MAD) of soil available water (SAW), representing normal irrigation, mild water stress, and severe water stress, respectively. The sub-factor was planting pattern, including peppermint monoculture, sage monoculture, and peppermint-sage intercropping. The sub-sub factor involved fertilizer treatments, including: (i) no fertilizer (control), (ii) TiO₂ nanoparticles (100 mg.L⁻¹), (iii) arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation, and (iv) combined application of AMF and TiO₂ (AMF + TiO₂). Each plot consisted of five planting rows, with inter-row and intra-row spacings of 40 and 25 cm, respectively, for peppermint and sage. The AMF inoculum (*Funneliformis mosseae*) was obtained from Varian Biotechnological Company, Karaj, Iran. At planting, 80 g of soil containing fungal hyphae (equivalent to 1000 spores per 10 g of soil) was applied to each row. Peppermint and sage seedlings were established at a density of 10 plants.m⁻². The first irrigation was applied immediately after transplanting. To facilitate seedling adaptation and optimal establishment, drought stress treatments were initiated one month after planting. Soil moisture content was monitored using a moisture meter to ensure accurate application of drought stress. At full flowering, dry matter yield, essential oil (EO) content and yield, EO composition, and photosynthetic pigments were measured. Data were tested for normality before analysis. A combined analysis of variance was performed using a two-way split-split plot design in SAS (version 9.4). Mean comparisons were conducted using the least significant difference (LSD) test at the 5% probability level, and graphical illustrations were generated in Microsoft Excel.

Results and Discussion

The results indicated that sage dry matter yield decreased by 27% and 64.1% under mild and severe drought stress, respectively. Considering the interaction effect of cropping pattern and fertilizer sources, the highest sage dry matter yield (172.7 g m⁻²) was observed in monoculture with the combined application of AMF + TiO₂. The combined application of AMF + TiO₂ increased sage dry matter yield by 36.1% compared to the control (absence of fertilizer). The highest essential oil (EO) content in sage (1.33%) was obtained under intercropping with the integrated application of AMF + TiO₂. Notably, EO content under mild drought stress was 41.2% higher than that under normal irrigation. Chemical analysis of EO compounds revealed that the maximum levels of dominant compounds, namely *cis*-thujone and 1, 8-cineole, were achieved in intercropping with AMF + TiO₂ under both mild and severe stress conditions. Enhanced secondary metabolite production serves as an effective defense mechanism in medicinal and aromatic plants, mitigating the adverse effects of drought stress. Typically, EO formation and accumulation increase under environmental stress, protecting the plant against excessive light and water deficiency. The observed increase in sage EO with AMF + TiO₂ application is associated with improved photosynthetic activity, enhanced absorption and availability of key EO-forming nutrients such as nitrogen and phosphorus, and the development of additional EO-secreting glands.

Conclusion

In summary, the integrative application of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) combining TiO₂ in the intercropping system of sage with peppermint is highly recommended as a sustainable and effective approach to improve both the yield and quality of essential oils, particularly under drought stress conditions. This strategy not only enhances plant resilience against water deficit but also promotes more efficient nutrient uptake, leading to healthier growth and higher production of valuable secondary metabolites. Implementing this combined approach can be a practical, eco-friendly solution for farmers seeking to optimize essential oil production while maintaining soil health and long-term agricultural sustainability.

Keywords: Bio-fertilizer, Drought stress, Essential oil, Medicinal plants, Sustainable agriculture

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۳۷-۱

اثر رژیم‌های آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا بر عملکرد کمی و کیفی و خصوصیات فیزیولوژیکی مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) در کشت مخلوط با نعناع‌فلفلی (*Mentha piperita* L.)

عبدالله جوانمرد^{۱*}، علی استادی^۱ و حانیه شب‌خیز^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

چکیده

به منظور بررسی اثر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا بر کمیت و کیفیت اسانس مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) در کشت مخلوط با نعناع‌فلفلی (*Mentha piperita* L.)، آزمایشی به صورت کرت‌های دو بار خردشده برپایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ اجرا شد. عامل اول رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح، آبیاری پس از ۲۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی به عنوان آبیاری نرمال، آبیاری پس از ۵۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی به عنوان تنش ملایم و آبیاری پس از ۷۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی به عنوان تنش شدید بود. عامل فرعی الگوهای مختلف کشت (کشت خالص نعناع‌فلفلی، کشت خالص مریم‌گلی، کشت مخلوط نعناع‌فلفلی و مریم‌گلی) و عامل فرعی شامل منابع مختلف کودی (عدم مصرف نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا به عنوان شاهد، نانو دی‌اکسید تیتانیوم، قارچ مایکوریزا و کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم) بود. نتایج نشان داد که عملکرد ماده خشک مریم‌گلی در تنش ملایم و شدید نسبت به حالت نرمال آبیاری به ترتیب ۲۷ و ۶۴/۱ درصد کاهش یافت. بیشترین عملکرد ماده خشک مریم‌گلی (۱۷۲/۷ گرم در مترمربع) در کشت خالص با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، عملکرد ماده خشک مریم‌گلی ۳۶/۱ درصد نسبت به عدم مصرف کود افزایش یافت. همچنین بیشترین درصد اسانس مریم‌گلی (۱/۳۳ درصد) در کشت مخلوط و با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم حاصل شد. علاوه بر این، درصد اسانس مریم‌گلی در تنش ملایم ۴۱/۲ درصد بیشتر از آبیاری نرمال بود. براساس تجزیه شیمیایی ترکیب‌های اسانس، بیشترین میزان ترکیب (سیس-توجن و ۸۱ سینئول) غالب مریم‌گلی در کشت مخلوط و با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم در تنش ملایم حاصل شد. نتایج این تحقیق می‌تواند به بهینه‌سازی مدیریت آبیاری و استفاده از تکنولوژی‌های نوین کشاورزی برای افزایش بهره‌وری و کیفیت گیاهان دارویی در کشاورزی پایدار کمک کند.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، کشاورزی پایدار، کود زیستی، گیاهان دارویی، میزان اسانس

مقدمه

محصولات در شرایط اکولوژیک رو به افزایش می‌باشد. زیرا این سیستم‌های کشاورزی براساس اصول اکولوژیکی بوده و در آن کیفیت محصولات مهم‌تر از کمیت آن‌ها می‌باشد. مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) جزء گیاهان چندساله دارویی و متعلق به خانواده نعنائیان^۲ و بومی منطقه مدیترانه است، اما در حال حاضر در سراسر

تمایل به تولید گیاهان دارویی و معطر و تقاضا برای این

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: a.javanmard@maragheh.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2025.95607.1254>

جهان کشت می‌شود (Farruggia et al., 2024). اندام‌های هوایی گیاه و به‌ویژه برگ‌ها دارای محتوای قابل توجه اسانس هستند. مقدار اسانس بسته به شرایط اقلیمی متفاوت است و معمولاً بین ۱ تا ۲/۵ درصد گزارش می‌شود. مهم‌ترین ترکیب‌های تشکیل‌دهنده اسانس مریم‌گلی شامل سیس‌توجن، کامفور، ترنس‌توجن و ۸۱-سینئول می‌باشند (Farahpour et al., 2020). مریم‌گلی در طب سنتی به عنوان داروی مؤثر برای معالجه عوارض نیش حشرات، ضدسم، ضد میکروب، ضد روماتیسم، ضدنفخ و ضدسرطان مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین خصوصیات ضدالتهابی بارز ترپنوئیدهای مریم‌گلی سبب شده است که با استفاده از عصاره این گیاه، مولکول‌های دارویی قدرتمندی برای درمان بیماری‌های التهابی مزمن مانند روماتیسم، آسم، التهابات روده‌ای و تصلب شرائین و غیره طراحی و ساخته می‌شود (Govahi et al., 2015). برگ‌های مریم‌گلی حاوی انواع مختلفی از فلاونوئیدها و ترکیبات فنلی می‌باشند و دارای خواص دارویی مهمی همچون فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی هستند (El-Haddad et al., 2020).

امروزه به واسطه اثرات منفی تغییرات اقلیمی و افزایش دمای جهانی، عملکرد محصولات کشاورزی رو به کاهش است، به‌طوری‌که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، این کاهش عملکرد بیشتر می‌باشد. تنش خشکی از مهم‌ترین عوامل غیرزیستی محدودکننده رشد و عملکرد در بسیاری از نواحی جهان از جمله ایران می‌باشد. ایران از لحاظ ذخایر منابع آبی دارای محدودیت بوده و متوسط بارندگی سالانه در ایران ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد که حدود دو سوم کمتر از میانگین جهانی است (Biglari et al., 2019). در طی مراحل رشدی گیاه، بروز تنش خشکی باعث کاهش رشد ریشه، افت جذب آب و مواد غذایی، بزرگ شدن سلول‌ها، سنتز کلروفیل، گسترش برگ، فتوسنتز، ارتفاع بوته و سطح برگ می‌شود (Gao et al., 2020). تنش خشکی با توجه به مدت زمان، دوام و اندازه کمبود آن منجر به تغییر در صفات فیزیولوژیکی، ریخت‌شناختی، بوم‌شناختی، بیوشیمیایی و مولکولی گیاهان شده و می‌تواند بر کمیت و کیفیت رشد و عملکرد گیاهان تأثیر منفی داشته باشد (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2020). افزون‌بر این، تنش کم‌آبی به دلیل کاهش هدایت روزنه‌ای باعث کاهش جذب CO_2 ، اندازه برگ، ارتفاع ساقه و توسعه ریشه می‌شود. همچنین تنش خشکی، روابط آبی گیاه را مختل نموده، کارایی مصرف آب را کاهش داده و باعث ایجاد

اختلال در تولید رنگدانه‌های فتوسنتزی شده و همچنین تبادل گازی با محیط را کاهش می‌دهد که این عوامل در نهایت منجر به کاهش رشد و بهره‌وری گیاه می‌گردد (Anjum et al., 2011). نتایج پژوهش‌های قبلی نشان‌دهنده این است که تولید اسانس در اغلب گیاهان دارویی تحت تنش خشکی ملایم افزایش می‌یابد. در شرایط تنش ملایم، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز رخ نمی‌دهد و پیش‌ماده‌های لازم برای سنتز اسانس‌ها در گیاه به‌میزان کافی وجود دارد. در نتیجه تولید ترپنوئیدها و ترکیب‌های فرار گیاه به‌دلیل نقش محافظتی این ترکیب‌ها در برابر دما و نور بالا، افزایش می‌یابد (Llusia et al., 2006). در مطالعه‌ای روی گیاه مرزنجوش (*Origanum vulgare* L.)، مشاهده شد که با افزایش سطوح تنش خشکی، وزن تر و عملکرد اسانس به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد (Said-Al Ahl & Hussein, 2010). در پژوهشی دیگری روی مریم‌گلی گزارش شد که تنش خشکی متوسط منجر به افزایش درصد و عملکرد اسانس گیاه نسبت به شاهد شد. همچنین بیشترین میزان آلفا توجن ۸۱-سینئول و کامفور در تنش خشکی متوسط حاصل گردید (Govahi et al., 2015).

کودهای زیستی حاوی قارچ‌ها و باکتری‌های مفید حل‌کننده عناصر غذایی هستند که معمولاً با اسیدی کردن خاک و یا ترشح آنزیم‌ها باعث آزادسازی این عناصر از ترکیب‌های پیچیده معدنی و آلی شده و در نتیجه منجر به افزایش جذب آن‌ها توسط گیاه می‌شوند. قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار، یکی از عوامل بیولوژیک خاک‌های زراعی می‌باشند که به‌دلیل افزایش سطح مؤثر ریشه و به‌دنبال آن سطح جذب و توانایی افزایش جذب فسفر و سایر عناصر غذایی به واسطه فعالیت آنزیم فسفاتاز و ترکیب‌های آلی حل‌کننده فسفات نامحلول موجب استفاده تجاری از این قارچ‌ها به‌عنوان کودهای زیستی شده است (Willmann et al., 2013). همچنین قارچ میکوریزا، مقاومت گیاه در برابر تعدادی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی از قبیل خشکی، کمبود مواد غذایی، رسوب فلز سمی و شوری را بهبود می‌بخشد. علاوه‌بر این نتایج پژوهش‌های قبلی نشان داده است که کاربرد قارچ میکوریزا به‌ویژه در گیاهان دارویی منجر به افزایش فتوسنتز، جذب رطوبت بیشتر از خاک، افزایش کلروفیل و کاروتنوئید و فعالیت بیشتر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش شده است (Varma et al., 2018). تاراف و همکاران (Tarraf et al., 2017) با کاربرد قارچ میکوریزا روی مریم‌گلی گزارش کردند که

کاربرد قارچ میکوریزا منجر به افزایش تعداد برگ، وزن خشک برگ، تراکم غده‌های ترشح‌کننده اسانس، درصد و ترکیب‌های اسانس نسبت به عدم مصرف کود گردید. در مطالعه دیگری با بررسی اثر انواع قارچ‌های میکوریزا در بهبود رشد، زیست‌توده و متابولیت‌های ثانویه گونه‌ای از مریم‌گلی (*Salvia miltiorrhiza* Bge) گزارش شد که همزیستی با قارچ‌های میکوریزا سبب افزایش رشد ریشه و متابولیت‌های ثانویه گردید (Wu et al., 2021). عبدالهی ارپناهی و فیضیان (Abdollahi Arpanahi & Feizian, 2020) با کاربرد قارچ میکوریزا (*Rhizophagus intraradices*, *Funneliformis mosseae*) روی آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) مشاهده کردند که تلقیح با قارچ میکوریزا، اثرات سوء تنش خشکی را کاهش داد، به‌طوری‌که در شرایط تنش، تلقیح با قارچ میکوریزا به افزایش وزن خشک ریشه، ساقه، درصد و عملکرد اسانس منجر گردید، همچنین بیشترین میزان تیمول در شرایط بدون تنش و تلقیح با قارچ میکوریزا به دست آمد. در تحقیقی دیگر که روی دو ژنوتیپ ریحان (*Ocimum gratissimum* L.) و IC599368 و IC589192 مشخص شد که کاربرد قارچ میکوریزا (*Rhizophagus intraradices*) باعث افزایش وزن خشک برگ‌ها و درصد اسانس در هر دو ژنوتیپ نسبت به گیاهانی شد که قارچ دریافت نکرده بودند. دلیل آن است که قارچ میکوریزا با تشکیل ارتباط همزیستی با ریشه‌های گیاه، توانایی جذب آب و عناصر غذایی مانند فسفر و نیتروژن را افزایش می‌دهد. این افزایش دسترسی به مواد مغذی باعث رشد برگ‌ها و تولید بیشتر متابولیت‌های ثانویه مانند اسانس می‌شود. همچنین بیشترین میزان ترکیبات ارزشمند بتا- کاربوفیلین و بتا- الیمین نیز در گیاهان همزیست با قارچ میکوریزا مشاهده شد که نشان می‌دهد این قارچ نه تنها رشد گیاه را بهبود می‌بخشد، بلکه کیفیت شیمیایی اسانس‌ها را نیز افزایش می‌دهد (Thokchom et al., 2020).

فناوری نانو به‌عنوان نوعی فناوری مدرن، پیشتاز در رفع مشکلات و کمبودها در بسیاری از عرصه‌های علمی، به‌خوبی جایگاه خود را در علوم کشاورزی به اثبات رسانده است. نانو تکنولوژی نوعی راهبرد جدید می‌باشد که نشان داده است می‌تواند مقاومت محصولات را در برابر تنش خشکی افزایش دهد. نانوذره‌ها موادی با اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر تعریف می‌شوند که به راحتی جذب گیاه می‌شوند. نانوذره‌ها دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد از جمله مساحت سطح بالا، حداکثر جذب، واکنش پذیری بالا، پایداری و آلودگی کمتر

می‌باشند (Toksha et al., 2021). در کشاورزی پایدار، استفاده از تکنولوژی جدید نانو برای ساخت کودها به‌عنوان یک روش امیدبخش در افزایش تولید و تأمین نیاز غذایی جمعیت رو به رشد جهان در نظر گرفته می‌شود (Liu et al., 2015). پاسخ گیاه به نانوذره‌ها برحسب نوع گونه، مرحله رویشی و ماهیت نانوذره متفاوت می‌باشد. افزایش مقاومت در برابر تنش‌های غیرزیستی از جمله تنش خشکی با کاربرد نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم در برخی از گیاهان به اثبات رسیده است (Manzer et al., 2015). نانو دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان محرک رشد گیاه شناخته می‌شود. واکنش گیاهان به این نانوذره در سطوح مختلف رخ می‌دهد (Ingle, 2021). به طوری که، نانو دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش و از تجمع انواع گونه‌های فعال اکسیژن و آسیب به بخش‌های حیاتی سلول ممانعت نماید. همچنین نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش جذب عناصر غذایی (فسفر و نیتروژن)، محتوای کلروفیل (a و b)، فتوسنتز و رشد گیاه می‌گردد (Chaudhary & Singh, 2020). همچنین تأثیر نانو دی‌اکسید تیتانیوم در افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاهان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Khater et al., 2021; Shabbir et al., 2019). نانو دی‌اکسید تیتانیوم دارای خاصیت فتوکاتالیستی می‌باشد و جذب نور را بهبود می‌بخشد و باعث انتقال انرژی نورانی به الکترون‌ها و تبدیل آن‌ها به انرژی شیمیایی و در نهایت افزایش تثبیت کربن دی‌اکسید می‌گردد. همچنین نانو دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند با افزایش فعالیت آنزیم‌های نیترات ردوکتاز و فسفاتاز، جذب نیتروژن و فسفر را بهبود بخشیده و باعث افزایش فعالیت آنزیمی، فتوسنتز و تولید متابولیت‌های ثانویه گردد (Ingle, 2021; Ahmad et al., 2018). در پژوهشی با ارزیابی سطوح مختلف نانو دی‌اکسید تیتانیوم (صفر، ۱۰ و ۴۰ پی‌پی‌ام) در شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی روی بادرشبی (*Dracocephalum moldavica* L.) گزارش کردند که بیشترین عملکرد اسانس با محلول پاشی ۱۰ پی‌پی‌ام نانو دی‌اکسید تیتانیوم تحت شرایط تنش خشکی به دست آمد (Mohammadi et al., 2016). غلامی و همکاران (Golami et al., 2018) گزارش کردند که کاربرد ۲۰ پی‌پی‌ام نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش عملکرد و ترکیب‌های اسانس (۸۱ سینئول، اندو ویرنئول، کاربوفیلین و آلفا- هیومولین) رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) گردید.

هرچند کشت خالص دارای عملکرد بالایی است و در تأمین

رازیانه بیشتر بود. علاوه بر این، بیشترین میزان اسیدهای چرب غیراشباع (اسید اولئیک و لینولئیک) در الگوی کشت مخلوط دو ردیف رازیانه + دو ردیف لوبیا و با کاربرد باکتری‌های محرک رشد به دست آمد (Rezaei-Chiyaneh et al., 2020). بر این اساس، با توجه به اهمیت موارد ذکرشده، این پژوهش با هدف بررسی اثرات رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا بر کمیت و کیفیت اسانس مریم‌گلی در کشت مخلوط با نعنای فلفلی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال‌های زراعی ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و عرض ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی و با ارتفاع ۱۴۸۵ متر از سطح دریا اجرا شد. قبل از اجرای آزمایش، سه نمونه خاک به‌صورت تصادفی از قسمت‌های مختلف محل اجرای آزمایش برداشته و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری شد (جدول ۱). علاوه بر این، مجموع بارش و میانگین دمای ماهانه سال‌های مورد آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

نیازهای غذایی جمعیت رو به رشد نقش مهمی ایفا می‌کند، ولی به هزینه و انرژی بالایی نیاز داشته و از نظر بوم‌شناختی باعث بروز مشکلاتی از جمله آلودگی آب‌های زیرزمینی، افزایش آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، از بین رفتن منابع طبیعی و کاهش تنوع زیستی می‌شود. بنابراین، بازنگری در روش‌های متداول کشاورزی و راهکارهای مربوط به استفاده بیشتر و بهتر از منابع و افزایش کارایی تولید ضروری است (Nasiri Mahallati et al., 2015). کشت مخلوط به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سیستم‌های کشاورزی پایدار، می‌تواند برای افزایش تنوع و سود حاصل از آن‌ها در واحد سطح و زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. افزایش تولید در کشت مخلوط را می‌توان به کاهش رشد علف‌های هرز، کاهش خسارت آفات و بیماری‌ها، سرعت رشد بیشتر و استفاده بهتر از منابع در دسترس نسبت داد. نظام کشت مخلوط، با افزایش تعداد گونه‌ها در واحد سطح، به‌عنوان یک راه حل برای افزایش تولید در کشاورزی پیشرفته پیشنهاد شده است (Monti et al., 2016). نتایج پژوهشی نشان داد که درصد اسانس رازیانه (*Foeniculum vulgare* L.) در کلیه الگوهای کشت مخلوط با لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) بیشتر از کشت خالص آن بود. همچنین بیشترین میزان درصد اسانس در الگوی کشت مخلوط ۲ ردیف رازیانه + ۲ ردیف لوبیا به دست آمد و ۲۱ درصد نسبت به کشت خالص

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil where the experiment was conducted

بافت Texture	ظرفیت زراعی Field capacity y (%)	نقطه پژمردگی دائم Permanent wilting point (%)	نیتروژن کل Total nitrogen (g.kg ⁻¹)	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium (mg.kg ⁻¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity (cmol.kg ⁻¹)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	ماده آلی Organic matter (g.kg ⁻¹)
Sandy clay loam لوم رسی شنی	27.1	13.7	0.87	9.7	563.85	26.5	7.73	1.17	8.1

جدول ۲- میانگین دما و مجموع بارش ماهانه در طول دوره رشد

Table 2- Mean temperature and cumulative monthly precipitation throughout the growth period

میانگین دمای ماهانه (درجه سانتیگراد)	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
Monthly mean temperature (°C)	April	May	June	July	August	September
2019	10.4	18.5	25.7	27.6	27.8	22.1
2020	11.8	19.1	24.2	28	25.1	23.8
بارش ماهانه (میلیمتر)						
Monthly precipitation (mm)						
2019	51.3	37.8	4.2	0	0	0
2020	63.3	12	2.6	0.1	1.2	0

دانشگاه تبریز انجام پذیرفت (شکل ۳). قبل از محلول‌پاشی، نانو دی‌اکسید تیتانیوم با آب مقطر (۱۰۰ میلی گرم در لیتر) مخلوط و به مدت دو ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد به وسیله همزن مکانیکی هم زده شد. سپس محلول به دست آمده به مدت یک ساعت در داخل دستگاه التراسونیک پروب‌دار قرار داده شد تا محلول پایدار تشکیل گردد. در نهایت محلول به دست آمده در مرحله قبل از گل‌دهی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر روی بوته‌های مریم‌گلی و نعناع‌فللی محلول‌پاشی شد.

به منظور آماده‌سازی زمین برای کاشت، شخم نیمه عمیق در اوایل پاییز توسط گاواهن برگردان‌دار انجام و در بهار پس از شخم سطحی، برای نرم کردن خاک از دو نوبت دیسک عمود بر هم استفاده شد. هر کرت شامل شش خط کاشت به طول سه متر با فواصل بین و روی ردیف به ترتیب ۴۰ و ۲۵ سانتی متر برای نعناع‌فللی و مریم‌گلی بود. مساحت کرت ۴/۸ مترمربع در نظر گرفته شد. قارچ مایکوریزای مورد استفاده در این پژوهش (*Funneliformis mosseae*) از شرکت زیست‌فناور پیش‌تاز واریان کرج تهیه شد. هنگام کاشت، ۸۰ گرم از خاک حاوی هیف‌های قارچ مایکوریزا، بقایای ریشه و اسپور (۱۰۰۰ اسپور در هر ۱۰ گرم خاک)، در هر خط کاشت استفاده گردید. تلقیح مایکوریزا در شرایط محیطی کاملاً کنترل شده انجام گردید تا از کلونیزاسیون مؤثر ریشه و یکنواختی تیمارها اطمینان حاصل شود. تلقیح در مرحله استقرار اولیه گیاه (کاشت/نشاکاری) و در خاکی با رطوبت مناسب برای فعالیت قارچ (۶۰-۷۰ درصد ظرفیت زراعی) صورت گرفت. دمای محیط رشد در محدوده بهینه فعالیت مایکوریزا (۲۲-۲۸ درجه سانتی‌گراد) حفظ شد و از کود فسفوری که می‌تواند کلونیزاسیون را کاهش دهد، استفاده نشد. نشاهای مریم‌گلی و نعناع‌فللی با تراکم ۱۰ بوته در مترمربع در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک به صورت همزمان کاشته شدند. بلافاصله اولین نوبت آبیاری پس از کاشت انجام پذیرفت. برای سازگاری بیشتر نشاهای منتقل شده به خاک و دستیابی به رشد بهینه، در ماه نخست هیچ گونه تنش اعمال نشد.

آزمایش به صورت کرت‌های دو بار خرد شده^۱ برپایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با سه تکرار اجرا شد. عامل اول رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح، آبیاری پس از ۲۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD_{25}) به عنوان آبیاری نرمال، آبیاری پس از ۵۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD_{50}) به عنوان تنش ملایم و آبیاری پس از ۷۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD_{75}) به عنوان تنش شدید می‌باشد. عامل فرعی الگوهای مختلف کشت (کشت خالص نعناع‌فللی، کشت خالص مریم‌گلی، کشت مخلوط یک ردیف نعناع‌فللی + یک ردیف مریم‌گلی) و عامل فرعی فرعی منابع مختلف کودی شامل عدم مصرف کود به عنوان شاهد، نانو دی‌اکسید تیتانیوم، قارچ مایکوریزا (*Funneliformis mosseae*) و کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم بود.

برای سنتز نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، ابتدا مقدار مورد نظر از تیتانیوم ایزوپروپوکساید^۲ در شرایط سرد (صفر درجه سانتی‌گراد) با سرعت به هم زده شد تا رسوب تیتانیوم هیدرواکسید^۳ تشکیل شود. رسوب تیتانیوم هیدرواکسید سه بار با آب مقطر شست‌وشو و سپس در اسید نیتریک حل شد تا محلول شفاف و همگن تیتانیل نیترات^۴ به دست آید. در ادامه برای تولید نانو دی‌اکسید تیتانیوم، تیتانیل نیترات را با محلول اوره به نسبت مولی ۱:۱ در بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری مخلوط و سپس در کوره الکتریکی با دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. بعد از دو ساعت، محصول جامد نانو دی‌اکسید تیتانیوم تولید و جمع‌آوری گردید. نانو دی‌اکسید تیتانیوم تولید شده تا زمان استفاده در آون خلاء نگهداری گردید (Nagaveni et al., 2004). عکس‌برداری TEM^۵ با دستگاه Zeiss EM-09 (شکل ۱) و بررسی توزیع اندازه ذرات به روش پراکندگی نور دینامیکی^۶ و با استفاده از دستگاه زتاسایزر^۷ و در مرکز تحقیقات کاربردی دارویی دانشگاه علوم پزشکی تبریز انجام پذیرفت. میانگین اندازه ذره‌ها مابین ۶۰ تا ۷۰ نانومتر بود (شکل ۲). همچنین عکس‌برداری SEM^۸ در آزمایشگاه مرکزی

1 - Split split plot

2 - Titanium isopropoxide

3 - $TiO(OH)_2$

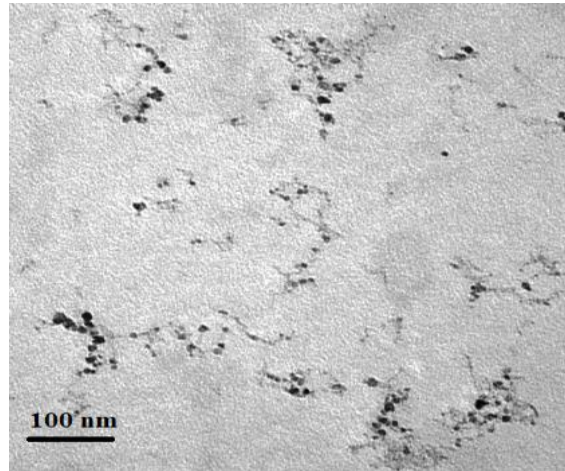
4 - Homogeneous titanyl nitrate [$TiO(NO_3)_2$] solution

5 - Transmission electron microscopy

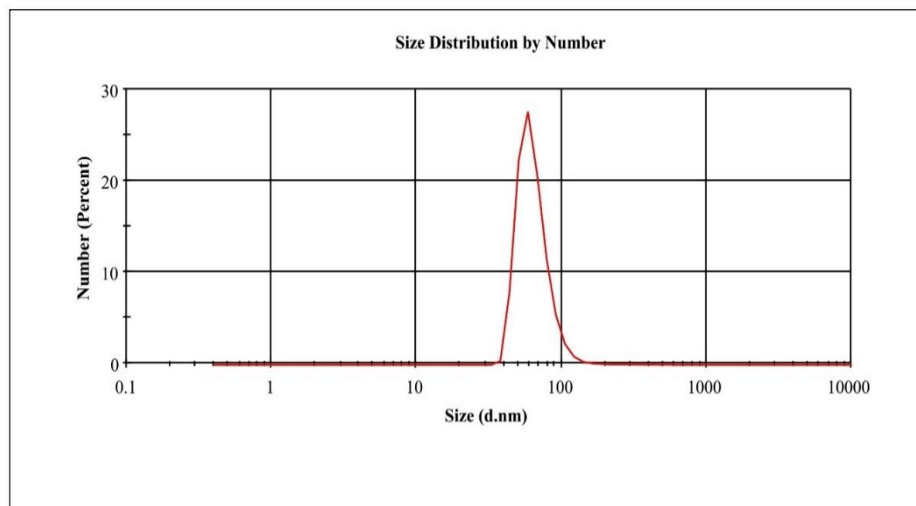
6 - Dynamic light scattering

7 - Zetasizer Nano ZS90- Malvern, ZEN3600

8 - Scanning electron microscopy



شکل ۱- عکس TEM از نانو دی اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این آزمایش
Fig. 1- TEM image of the titanium dioxide nanoparticles used in this experiment



شکل ۲- اندازه نانو دی اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این آزمایش
Fig. 2- Size of the titanium dioxide nanoparticles used in this experiment

که در آن، θ_{fc} ، d ، p ، I_d ، E_a و I_g به ترتیب ظرفیت زراعی خاک (۲۷/۱ درصد)، نقطه پژمردگی دائم (۱۳/۷ درصد)، عمق خاک (سانتی‌متر)، درصد تنش اعمال شده (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد)، عمق خالص آبیاری (۲۰ سانتی‌متر)، کارایی آبیاری (۶۵ درصد در نظر گرفته شده است) و عمق ناخالص آبیاری در تنش‌های مختلف می‌باشد. برای تعیین زمان آبیاری در مراحل مختلف رشد از معادله ۴ استفاده گردید (Gheysari et al., 2015).

$$MAD = \theta_{fc} - (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \times a \quad \text{معادله (۴)}$$

که در آن، a تنش‌های اعمال شده در تیمارهای آبیاری (۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵) می‌باشد. همچنین برای محاسبه حجم آبیاری، از

همچنین مبارزه با علف‌های هرز به صورت منظم و به طور دستی انجام شد. برای اعمال سطوح تنش خشکی از دستگاه رطوبت‌سنج^۱ استفاده گردید. تیمارهای آبیاری براساس بیشینه درصد تخلیه مجاز از آب در دسترس^۲ انجام شد. اعمال تنش‌ها با استفاده از معادله‌های زیر مورد محاسبه قرار گرفت (Bahreininejad et al., 2013).

$$SAW = (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \times d \quad \text{معادله (۱)}$$

$$I_d = SAW \times p \quad \text{معادله (۲)}$$

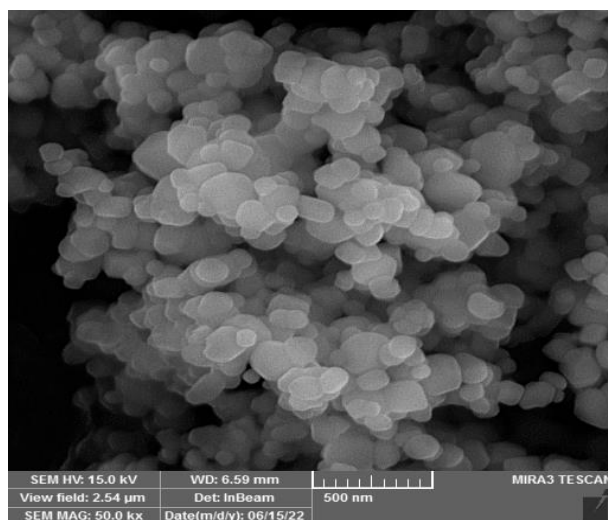
$$I_g = [I_d \times 100] / E_a \quad \text{معادله (۳)}$$

1- Time domain reflectometry

2- Soil available water

با توجه به اینکه نوع آبیاری مورد استفاده در این آزمایش قطره‌ای بود، برای محاسبه میزان زمان مورد نیاز برای رسیدن به حجم مطلوب هر کرت، نیاز به تعیین میزان سطح خیس‌شوندگی خاک (P_w) بود.

حاصل ضرب مقدار عمق ناخالص آبیاری محاسبه‌شده در مساحت هر کرت استفاده شد. براساس میانگین دو سال، حجم آبیاری نهایی در طول فصل رشد در آبیاری نرمال، تنش ملایم و شدید به‌ترتیب ۱/۱۶، ۰/۸۷ و ۰/۵۸ مترمکعب (معادل ۱۱۶۰، ۸۷۰ و ۵۸۰ لیتر) بود.



شکل ۳- عکس SEM از نانو دی‌اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این آزمایش
Fig. 3- SEM image of the titanium dioxide nanoparticles used in this experiment

درصد کلونیزاسیون ریشه

به‌منظور تعیین درصد کلونیزاسیون ریشه، نمونه‌برداری در آخر فصل رشد از تیمارهای تلقیح‌شده با قارچ مایکوریزا صورت گرفت. ابتدا ریشه‌ها را داخل آب قرار داده تا خیس شوند، سپس به‌آرامی با آب شست‌وشو داده شدند. در ادامه برای حذف محتویات داخل سلول، ریشه‌ها در داخل محلول پتاسیم هیدرواکسید^۱ ده درصد به‌مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه روی چراغ بونزن حرارت داده شدند. سپس ریشه‌ها با آب مقطر شست‌وشو داده شد. پس از آن، ریشه‌ها در داخل محلول اسید هیدروکلریک^۲ دو درصد به‌مدت ۱۵ الی ۲۰ دقیقه اسیدی شدند. سپس برای رنگ‌آمیزی، ریشه‌ها در داخل لاکتوفنول کاتن بلو ۲۰ درصد به‌مدت ۱۰ دقیقه روی چراغ بونزن حرارت داده شد. بعد از رنگ آمیزی، ریشه‌ها با آب مقطر شست‌وشو داده شدند. سپس ریشه‌ها در یک محلول حاوی اسیدلاکتیک، گلیسرول و آب به نسبت ۱:۱:۱ (v:v:v) تا زمان سنجش نگه داشته شد (McGonigle et al., 1990; Koske & Gemm, 1989; Phillips & Hayman, 1970). نمونه‌های رنگ‌آمیزی‌شده توسط میکروسکوپ نوری الیمپوس مدل

$$P_w = \frac{W}{D} \quad \text{معادله (۵)}$$

که در آن، P_w ، W و D : به‌ترتیب درصد سطح خیس‌شده مزرعه، عرض خیس‌شده توسط قطره چکان و فاصله بین ردیف‌های کشت می‌باشد. برای اندازه‌گیری دبی از یک بشر با حجم مشخص استفاده گردید. مدت زمان لازم برای پر شدن بشر به‌وسیله کورنومتر اندازه‌گیری و دبی از طریق معادله ۶ محاسبه گردید.

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{معادله (۶)}$$

که در آن، Q ، V و t : به‌ترتیب دبی آب برحسب مترمکعب در ثانیه، حجم ظرف برحسب مترمکعب و مدت زمان لازم برای پر شدن ظرف برحسب ثانیه می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد قطره چکان موجود در هر کرت و همچنین دبی آب ورودی به سطح هر کرت مشخص می‌باشد، زمان مورد نیاز برای رسیدن به حجم آبیاری مورد نظر برای هر کرت از طریق معادله ۷ محاسبه گردید (Li et al., 2024).

$$\text{دبی آب ورودی} \times \text{تعداد قطره چکان در هر کرت} = \frac{\text{حجم آب مورد نیاز}}{\text{زمان مورد نیاز}} \quad \text{معادله (۷)}$$

BH-2 مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. درصد کلونیزاسیون به‌روش خطوط متقاطع محاسبه شد. بدین صورت که در مورد هر تیمار، ریشه‌های رنگ‌آمیزی‌شده به قطعات یک سانتی‌متری برش داده و به‌صورت تصادفی درون پلیت شیشه‌ای قرار داده شد. سپس یک صفحه شطرنجی به ابعاد 1×1 سانتی‌متر تهیه و زیر پلیت قرار گرفت، برای مشاهده و شمارش ریشه‌های آلوده و غیرآلوده از یک استیرو میکروسکوپ (بینوکولار) با بزرگنمایی $\times 40$ استفاده گردید. ریشه‌های آلوده و غیرآلوده که با خطوط عمودی و افقی صفحه شطرنجی تقاطعی را ایجاد کرده بودند، هرکدام جداگانه شمارش شدند و درصد کلونیزاسیون از معادله ۸ محاسبه شد (Giovannetti & Mosse, 1980).

معادله (۸) $\frac{\text{مجموع ریشه‌های آلوده}}{\text{مجموع کل ریشه‌های آلوده و غیرآلوده}} \times 100 = \text{درصد کلونیزاسیون}$

استخراج اسانس

برای استخراج اسانس از دستگاه کلونجر طرح آپاراتوس استفاده شد. در مرحله گل‌دهی کامل، سرشاخه‌های گلدار مریم‌گلی برداشت شد و به اتاق تاریک و خنک جهت خشک شدن انتقال یافت. سپس به هر نمونه خشک‌شده در بالن 400 میلی‌لیتر آب مقطر اضافه نموده و اسانس‌گیری به‌مدت سه ساعت صورت گرفت، اسانس‌های استخراج شده با سدیم سولفات خشک‌آگیری و سپس داخل ویال شیشه‌ای در دمای چهار درجه سانتی‌گراد تا زمان آنالیز نگهداری شدند. درصد عملکرد اسانس براساس معادله‌های ۹ و ۱۰ محاسبه شدند (Morshedloo et al., 2017).

معادله (۹)

$100 \times \frac{\text{وزن خشک نمونه (گرم)}}{\text{وزن اسانس}} = \text{درصد اسانس}$

معادله (۱۰) $\text{درصد اسانس} \times \text{عملکرد ماده خشک} = \text{عملکرد اسانس}$

شناسایی ترکیبات اسانس

برای شناسایی ترکیبات اسانس گیاه مریم‌گلی از دستگاه کروماتوگرافی گازی^۱ متصل‌شده به طیف‌سنجی جرمی^۲ مدل آجیلنت^۳ ساخت کشور آمریکا، با ستون HP-5 MS (پنج درصد فنیل

متیل پلی‌سیلوکسان، به‌طول 30 متر، قطر داخلی 0.25 میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب 0.25 میکرومتر) استفاده گردید. در برنامه‌ریزی دمایی آن، ابتدا دما در عرض 5 دقیقه به 60 درجه سانتی‌گراد رسیده، سپس به‌تدریج دما با سرعت 3 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش یافت تا به دمای 240 درجه سانتی‌گراد رسید. بعد از آن به‌مدت 20 دقیقه در این دما نگهداری شد. هلیوم به‌عنوان گاز حامل با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه استفاده شد. ولتاژ یونیزاسیون 70 الکترون ولت، روش یونیزاسیون EI و دمای یونیزاسیون 220 درجه سانتی‌گراد بود. محفظه تزریق در حالت تقسیم (نسبت تقسیم $1:30$) تنظیم شده بود و محدوده جذب جرمی از 40 تا 400 m/z بود. به‌منظور محاسبه شاخص بازدارندگی ترکیبات، مخلوطی از هیدروکربن-های آلیفاتیک^۴ تحت شرایط برنامه دمایی آنالیز نمونه اسانس به داخل سیستم جی‌سی تزریق شد. نرم‌افزار مورد استفاده Chemstation بود. محاسبه و شناسایی ترکیبات اسانس به کمک شاخص‌های بازدارندگی خطی آن‌ها و مقایسه آن با شاخص‌های موجود در کتاب مرجع (Adams, 2007) و با استفاده از طیف‌های جرمی ترکیبات استاندارد و استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه کامپیوتری صورت گرفت. برای جداسازی ترکیبات از دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent 7990B ساخت کشور آمریکا با آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای^۵ و ستون VF-5MS استفاده گردید. دمای تزریق و آشکارساز به‌ترتیب روی 230 و 240 سانتی‌گراد تنظیم شد. گاز هلیوم با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه و نسبت تقسیم $1:24$ استفاده شد. نمونه‌های اسانس به نسبت $1:100$ در هگزان رقیق‌سازی و به‌میزان یک میکرولیتر تزریق شدند. کمی‌کردن ترکیبات اسانس با استفاده از نرمال‌سازی سطح قله و بدون استفاده از ضرایب اصلاح انجام پذیرفت (Morshedloo et al., 2018).

سنجش رنگیزه‌های فتوسنتزی

کلروفیل و کاروتنوئید موجود در برگ‌های مریم‌گلی به‌روش لیشنتالر (Lichtenthaler, 1987) مشخص گردید. بدین منظور، 100 میلی‌گرم وزن تر برگ در داخل هاون چینی با 10 میلی‌لیتر استون 80 درصد خوب ساییده گردید. سپس فالكون‌ها به‌مدت 10 دقیقه در دور 6000 در دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. حجم محلول

4- C8-C40

5- Flame ionization detector

1- Chromatograph gas

2- Spectrometer mass

3- Agilent Co. USA

برای افزایش سازگاری با این شرایط نامطلوب، ایجاد رابطه همزیستی با میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. در پژوهش حاضر، درصد کلونیزاسیون ریشه گیاه مریم‌گلی با افزایش روند خشکی کاهش یافت که می‌تواند با تخریب فعالیت و جمعیت میکروبی خاک و همچنین با کاهش جوانه‌زنی اسپورها، تراکم اسپورها، ترشحات ریشه‌ای، تحرک و دسترسی به عناصر غذایی و تأمین کربوهیدرات توسط گیاه میزبان مرتبط باشد (Abdollahi Arpanahi et al., 2020). قنبرزاده و همکاران (Ghanbarzadeh et al., 2019) با بررسی سطوح مختلف تنش کم‌آبی و کاربرد قارچ مایکوریزا (*Claroideoglomus etunicatum*) روی بادربشی گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش درصد کلونیزاسیون ریشه گیاه گردید، به‌طوری‌که بیشترین کمترین درصد کلونیزاسیون ریشه به‌ترتیب در ۱۰۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد. همچنین این پژوهشگران اظهار داشتند که میزان رطوبت خاک و در دسترس بودن کربن برای گیاه میزبان از عوامل تأثیرگذار بر کلونیزاسیون ریشه می‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر با کاربرد قارچ مایکوریزا (*Glomus versiforme*) و اعمال تنش خشکی روی گیاه تنباکو (*Nicotiana tabacum* L. Variety Yunyan 87) مشاهده کردند که با افزایش تنش خشکی، درصد کلونیزاسیون ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طوری‌که درصد کلونیزاسیون در تنش‌های ملایم و شدید به‌ترتیب ۲۴/۱ و ۳۸/۶ کاهش یافت (Shukla et al., 2021). شوکلا و همکاران (Begum et al., 2021) (2013) مشاهده کردند که میزان رطوبت خاک یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان کلونیزاسیون ریشه می‌باشد. همچنین این پژوهشگران بیان کردند که بیشترین و کمترین درصد کلونیزاسیون ریشه در دو گیاه ماش سیاه (*Vigna mungo* (L.) Hepper) و گندم به‌ترتیب در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد. همچنین در پژوهشی دیگر با ارزیابی کشت مخلوط سویا (*Glycine max* L. با گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) و کاربرد قارچ مایکوریزا گزارش کردند که در بین الگوهای مختلف کشت، تفاوت معنی‌داری از لحاظ درصد کلونیزاسیون وجود نداشت (Weisany et al., 2021).

فوقانی توسط استون ۸۰ درصد به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد و مقدار کلروفیل و کاروتنوئید توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1800 Shimadzu, Japan) با میزان جذب در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۶۳/۲ و ۶۴۶/۸ تعیین و غلظت کلروفیل و کاروتنوئید با استفاده از معادله های ۱۱ تا ۱۴ محاسبه گردید.

$$\text{Chl a} = (12.25A_{663.2}) - (2.79A_{646.8}) \quad \text{معادله (۱۱)}$$

$$\text{Chl b} = (21.5A_{646.8}) - (5.1A_{663.2}) \quad \text{معادله (۱۲)}$$

$$\text{Chl a+b} = (7.15A_{663.2}) + (18.71A_{646.8}) \quad \text{معادله (۱۳)}$$

$$\text{Car} = [1000A_{470} - 1.82C_a - 85.02C_b] / 198 \quad \text{معادله (۱۴)}$$

آنالیز آماری

در نهایت، بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها با آزمون Shapiro-Wilk، تجزیه واریانس مرکب داده‌ها به‌صورت کرت‌های دو بار خردشده با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS ورژن ۹/۴ و رسم نمودارها توسط نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی

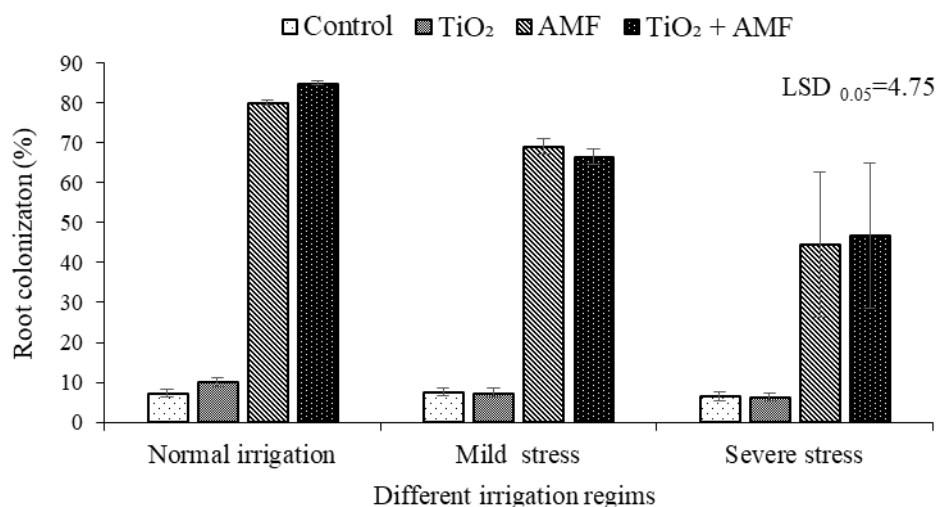
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده سال، رژیم‌های مختلف آبیاری، منابع کودی و اثر متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین میزان کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی (۸۵ درصد) در شرایط آبیاری نرمال با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. با افزایش شدت تنش خشکی از میزان کلونیزاسیون ریشه کاسته شد، به‌طوری‌که کلونیزاسیون ریشه در شرایط تنش ملایم و شدید به‌ترتیب ۱۷/۳ و ۴۲/۸ درصد کاهش یافت (شکل ۴). علاوه بر این، درصد کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی در سال اول ۴/۵ درصد نسبت به سال دوم بیشتر بود. (شکل ۵). تنش خشکی تأثیر منفی روی فیزیولوژی، رشد و بهره‌وری گیاهان دارد. یکی از راهکارها

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر درصد کلونیزاسیون، عملکرد ماده خشک، درصد و عملکرد اسانس مریم گلی
Table 3- Results of variance analysis of the effect of different treatments on colonization percentage, dry matter yield, EO content and yield of sage

منابع تغییر S.O.V	میانگین مربعات Mean of squares				
	درجه آزادی df	درصد کلونیزاسیون Colonization percentage	عملکرد ماده خشک Dry matter yield	درصد اسانس Essential oil content	عملکرد اسانس Essential oil yield
سال Year	1	93.61*	27.031 ^{n.s}	0.0001 ^{n.s}	0.20 ^{n.s}
خطای a Error a	4	9.64	474.94	0.02	0.04
رژیم های آبیاری Irrigation regimes	2	4635.65**	170478.55*	4.10**	47.03
سال × رژیم آبیاری Year × Irrigation regimes	2	43.18 ^{n.s}	733.58 ^{n.s}	0.04 ^{n.s}	0.15 ^{n.s}
خطای b Error b	8	18.17	183.35	0.01	0.05
الگوی کشت Planting patterns	1	94.58	49276.79*	0.52*	2.40**
الگوی کشت × رژیم آبیاری Irrigation regimes × Planting patterns	2	1.69 ^{n.s}	4129.75 ^{n.s}	0.04*	0.33 ^{n.s}
سال الگوی کشت Year × Planting patterns	1	1.54 ^{n.s}	44.00 ^{n.s}	0.0004 ^{n.s}	0.00001 ^{n.s}
سال × رژیم آبیاری × الگوی کشت Year × Irrigation regimes × Planting patterns	2	2.92 ^{n.s}	340.76 ^{n.s}	0.0005 ^{n.s}	0.10 ^{n.s}
خطای c Error c	12	0.81	102.38	0.003	0.03
(دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	40140.69	24978.84**	0.56**	4.42*
رژیم آبیاری × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi) × Irrigation regimes	6	1262.55**	7695.55*	0.12**	1.85**
الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) Planting patterns × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	10.86 ^{n.s}	1456.12*	0.007*	0.033 ^{n.s}
رژیم آبیاری × الگوی کشت × منابع کودی Irrigation × Planting patterns × Fertilizer sources	6	0.63 ^{n.s}	396.69 ^{n.s}	0.012 ^{n.s}	0.08 ^{n.s}
سال × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) Year × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	17.11 ^{n.s}	586.20 ^{n.s}	0.010 ^{n.s}	0.09 ^{n.s}
سال × رژیم آبیاری × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) Year × Irrigation regimes × (nano titanium dioxide + arbuscular mycorrhizal fungi)	6	22.70 ^{n.s}	345.60 ^{n.s}	0.014 ^{n.s}	0.06 ^{n.s}
سال × الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) Year × Planting patterns × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	1.30 ^{n.s}	116.21 ^{n.s}	0.001 ^{n.s}	0.01 ^{n.s}
سال × رژیم آبیاری × الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ مایکوریزا) Year × Irrigation regimes × Planting patterns × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	6	0.85 ^{n.s}	109.64 ^{n.s}	0.003 ^{n.s}	0.02 ^{n.s}
خطای کل Total error	72	11.11	304.17	0.01	0.05
ضریب تغییرات CV (%)		9.16	13.53	8.48	15.19

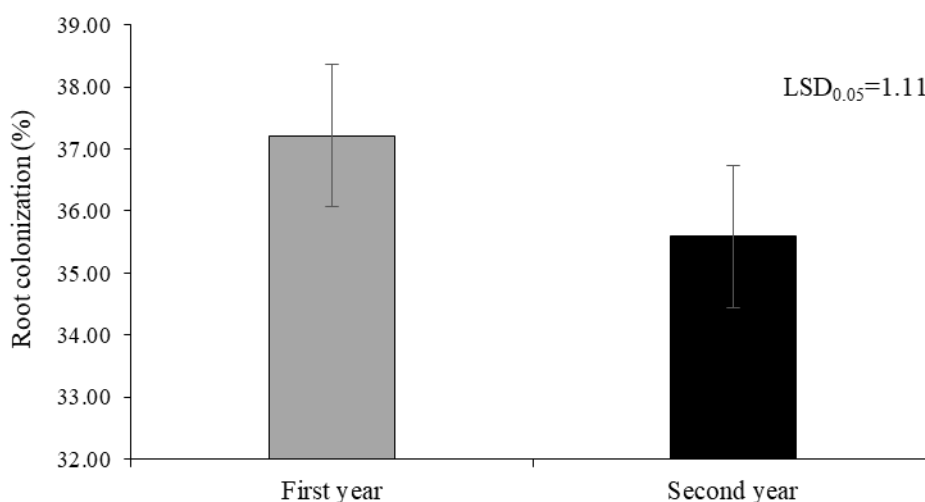
ns و *، **: به ترتیب معنی دار در سطح یک و پنج درصد و عدم تفاوت معنی دار.

ns, * and **: are significant at the 1 and 5 percent levels, respectively, and there is no significant difference.



شکل ۴- مقایسه میانگین کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا
Fig. 4- Mean comparison of sage roots colonization under the influence of different different irrigation regimes, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)

TiO₂: Nano titanium dioxide and AMF: Arbuscular mycorrhizal fungi



شکل ۵- مقایسه میانگین درصد کلونیزاسیون ریشه مریم‌گلی در سال‌های اول و دوم آزمایش
Fig. 5- Mean comparison of the sage root colonization in the first and second years of the experiment

عملکرد ماده خشک مریم‌گلی

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که عملکرد ماده خشک مریم‌گلی تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت، منابع کودی و اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی و الگوهای کشت × منابع کودی قرار گرفت. براساس ترکیب تیماری رژیم‌های آبیاری و منابع کودی، بیشترین (۲۳۳/۷ گرم در مترمربع) عملکرد ماده خشک مریم‌گلی در آبیاری نرمال با کاربرد

تلفیقی قارچ میکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. در تنش‌های ملایم و شدید، عملکرد ماده خشک مریم‌گلی به ترتیب ۲۷ و ۶۴/۱ درصد کاهش یافت (شکل ۶). همچنین براساس اثر متقابل الگوی کشت × منابع کودی، بیشترین (۱۷۲/۷ گرم در مترمربع) عملکرد ماده خشک مریم‌گلی در کشت خالص با کاربرد تلفیقی قارچ میکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. کاربرد تلفیقی قارچ میکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش ۳۶/۱ درصدی

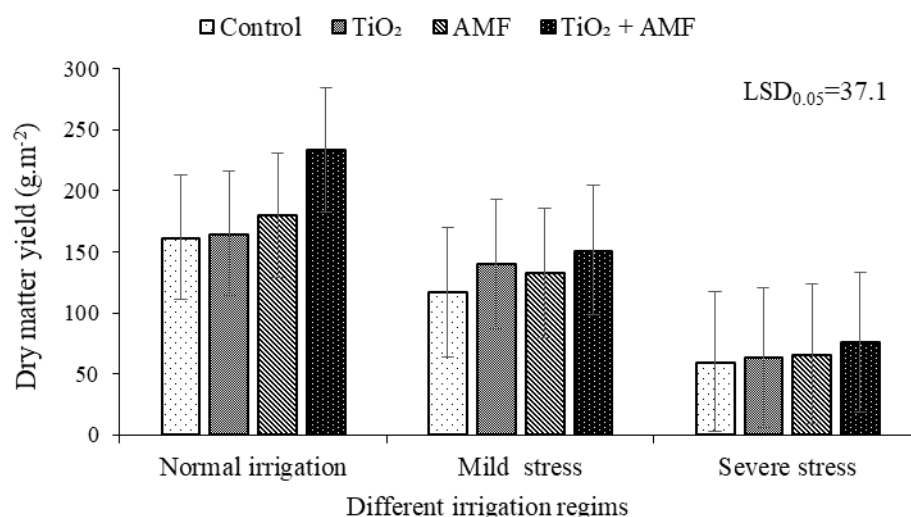
عملکرد ماده خشک نسبت به عدم مصرف کود گردید. علاوه بر این، کشت خالص منجر به افزایش ۳۳/۵۲ درصدی عملکرد ماده خشک نسبت به کشت مخلوط گردید (شکل ۷).

کاهش عملکرد ماده خشک با افزایش تنش خشکی را می‌توان به کاهش صفات رشدی از قبیل ارتفاع بوته نسبت داد. کاهش در عملکرد وزن تر و خشک با افزایش تنش خشکی ممکن است به دلیل تخصیص ترجیحی و بیشتر مواد به ریشه‌ها به دلیل محدود شدن رطوبت در خاک و یا کاهش محتوای کلروفیل و در نتیجه کاهش کارایی فتوسنتزی باشد (Govahi et al., 2015). بر اثر تنش خشکی، گیاه با بستن روزنه‌ها سعی در به حداقل رساندن تعرق داشته و همین امر باعث کاهش تبادلات گازی شده و دی‌اکسید کربن ورودی کاهش یافته، ولی اکسیژن افزایش می‌یابد که موجب کاهش فعالیت کربوکسیلاسیون آنزیم ریبولوز ۵-بی‌فسفات کربوکسیلاز/اکسیژناز (رابیسکو) می‌گردد و در نهایت باعث کاهش تولید ماده خشک خواهد شد (Madhava et al., 2006). همچنین افزایش ماده خشک تولیدی در شرایط آبیاری مطلوب می‌تواند به دلیل گسترش بیشتر سطح برگ و نیز دوام سطح برگ باشد که با ایجاد منبع بیولوژیکی کارآمد برای استفاده هرچه بیشتر از نور دریافتی باعث افزایش تولید ماده خشک خواهد شد (Gao et al., 2020). همچنین بیشترین عملکرد ماده خشک با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد که منجر به افزایش ۳۶/۱ درصدی عملکرد ماده خشک مریم‌گلی گردید. قارچ مایکوریزا با کاهش اسیدیت ریشه و ترشح آنزیم‌های حل‌کننده عناصر غذایی منجر به افزایش دسترسی ریشه گیاهان به عناصر غذایی می‌شود. همچنین قارچ مایکوریزا قادر به استفاده از نیتروژن معدنی مواد آلی و آمینو اسیدها نیز می‌باشد، ولی به یکسری عوامل از جمله گستردگی شبکه قارچی، آنزیم‌های تجزیه‌کننده مانند گزیلوگلوکاناز، پکتیناز و تعامل با سایر ریزجانداران خاک بستگی دارد که توانایی قارچ را در معدنی کردن مقادیر زیادی از نیتروژن آلی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Varma et al., 2018). در مطالعه‌ای با بررسی اثرات قارچ مایکوریزا (*Glomus intradices* و *Glomus mosseae*) در شرایط تنش خشکی و نرمال روی پونه معطر (*Mentha pulegium* L.) گزارش شد که تنش خشکی سبب کاهش وزن خشک گیاه گردید. اما این کاهش با کاربرد قارچ مایکوریزا کمتر بود. همچنین همزیستی با قارچ‌های مایکوریزا سبب بهبود عملکرد ماده خشک نسبت به عدم

مصرف کود گردید (Zare Hassanabdi et al., 2020). از آنجایی که عملکرد ماده خشک در گیاهان برآیندی از صفات رشدی مختلف و اجزای عملکرد می‌باشد، بنابراین می‌توان بیان کرد که کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به بهبود صفات رشدی مریم‌گلی از طریق بهبود جذب عناصر غذایی، جذب رطوبت و افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش خشکی شده است (Varma et al., 2018). یانگ و همکاران (Yang et al., 2006) گزارش کردند که نانو دی‌اکسید تیتانیوم با افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در متابولیسم نیتروژن از جمله نیترات ردوکتاز باعث تسریع در تبدیل نیتروژن معدنی به فرم‌های آلی آن مثل کلروفیل و پروتئین شده و باعث بهبود صفات رشدی گیاه از جمله عملکرد ماده خشک گیاه می‌گردد. زیرا نیتروژن با افزایش تقسیم و تورژسانس سلول‌های مرستمی باعث افزایش رشد رویشی و شاخه‌دهی در گیاهان می‌شود. علاوه بر این، زمانی که نیتروژن کافی در دسترس گیاه باشد، آسیمیلایون کربن فتوسنتزی از طریق افزایش فعالیت کربوکسیلاسیون آنزیم ریبولوز ۵-بی‌فسفات کربوکسیلاز/اکسیژناز (رابیسکو) افزایش یافته و فعالیت فتوسنتزی گیاه بیشتر شده که این امر منجر به افزایش رشد و زیست‌توده گیاه می‌گردد (Manzer et al., 2015). بنابراین افزایش عملکرد با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم قابل توجه می‌باشد. در پژوهشی با بررسی سطوح مختلف تنش خشکی و کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم (صفر، ۵۰۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) روی مریم‌گلی گزارش کردند که با افزایش تنش خشکی عملکرد ماده خشک کاهش یافت. کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به بهبود عملکرد ماده خشک گردید، به طوری که بیشترین میزان عملکرد ماده خشک در آبیاری نرمال با کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد (Mazarie et al., 2019). علاوه بر این نتایج نشان داد که عملکرد ماده خشک مریم‌گلی در کشت مخلوط با نعنای فلفلی کمتر از کشت خالص آن بود. از آنجایی که میزان تراکم گیاهان برداشت‌شده در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص کمتر می‌باشد، لذا کاهش میزان عملکرد تولیدشده در کشت مخلوط به کاهش میزان تراکم گیاهان در واحد سطح برداشت‌شده و افزایش رقابت برون گونه‌ای توسط اجزای کشت مخلوط نسبت داده می‌شود. به طور مشابه، امانی ماچیانی و همکاران (Amani Machiani et al., 2018) گزارش کردند که عملکرد دانه سویا و ماده خشک نعنای فلفلی در کلیه الگوهای کشت

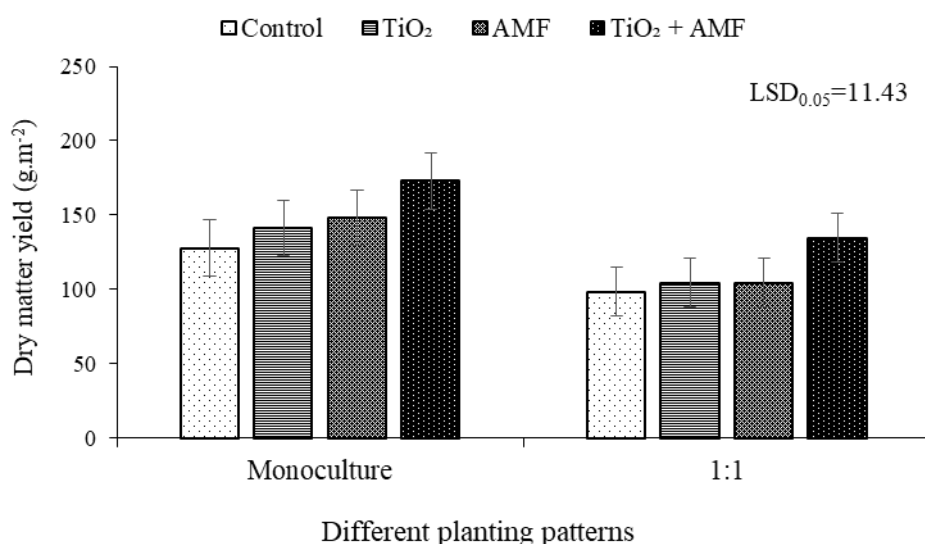
را افزایش رقابت برون گونه‌ای بین اجزای کشت مخلوط بیان نمودند. همچنین در پژوهشی دیگر، بیشترین عملکرد دانه در کشت مخلوط یولاف (*Avena sativa* L.) با نخود فرنگی (*Pisum sativum* L.) در کشت خالص دو گیاه به دست آمد (Jannoura et al., 2014).

مخلوط کمتر از کشت خالص دو گیاه بود. در تحقیقی دیگر، رضائی چپانه و همکاران (Rezaei-Chiyaneh et al., 2020) گزارش کردند که عملکرد ماده خشک رازیانه و عملکرد دانه لوبیا در الگوهای مختلف کشت مخلوط کمتر از کشت خالص دو گیاه بودند که دلیل آن



شکل ۶- مقایسه میانگین عملکرد ماده خشک مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا
Fig. 6- Mean comparison of sage dry matter yield under the influence of different irrigation regimes, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi

TiO₂: نانو دی‌اکسید تیتانیوم و AMF: قارچ آرباسکولار میکوریزا
TiO₂: Nano titanium dioxide and AMF: Arbuscular mycorrhizal fungus



شکل ۷- مقایسه میانگین عملکرد ماده خشک مریم‌گلی تحت تأثیر الگوهای مختلف کشت (کشت خالص و مخلوط با نعناع فلفلی)، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا

Fig. 7- Mean comparison of sage dry matter yield under the influence of different planting patterns (Monoculture and intercropping with peppermint), nano titanium dioxide (TiO₂), and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)

درصد اسانس مریم‌گلی

درصد اسانس مریم‌گلی تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت، منابع کودی و اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری $\times$ الگوی کشت، رژیم‌های آبیاری $\times$ منابع کودی و الگوی کشت $\times$ منابع کودی قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین (۱/۶۰ درصد) و کمترین (۲۳/۷۳ درصد) درصد اسانس مریم‌گلی به ترتیب در تنش ملایم با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم و آبیاری نرمال بدون مصرف کود به دست آمد. درصد اسانس در آبیاری نرمال و تنش شدید به ترتیب ۲۹/۲ و ۲۱/۹ درصد کاهش یافت. همچنین درصد اسانس با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم ۳۰/۲۰ درصد نسبت به عدم مصرف کود افزایش یافت (شکل ۸). براساس اثر متقابل رژیم‌های آبیاری $\times$ الگوی کشت، بیشترین (۱/۴۴ گرم در مترمربع) درصد اسانس مریم‌گلی در تنش ملایم در کشت مخلوط به دست آمد. درصد اسانس در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص ۱۱/۱ درصد افزایش یافت (شکل ۹). علاوه بر این براساس نتایج اثر متقابل الگوی کشت $\times$ منابع کودی، بیشترین (۱/۳۳ درصد) درصد اسانس مریم‌گلی در کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. همچنین درصد اسانس با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم ۳۰/۲۰ درصد نسبت به عدم مصرف کود افزایش یافت (شکل ۱۰). نتایج نشان داد که با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، درصد اسانس مریم‌گلی افزایش یافت.

افزایش اسانس مریم‌گلی با کاربرد قارچ مایکوریزا به بهبود فعالیت فتوسنتزی گیاه از طریق افزایش سطح جذب و فراهمی عناصر اصلی سازنده اسانس از جمله نیتروژن و فسفر (Sharifi-Rad et al., 2017) و تولید بیشتر غده‌های تشکیل‌دهنده اسانس مرتبط می‌باشد (Golubkina et al., 2020; Amani Machiani et al., 2021). رابطه مستقیمی بین قارچ مایکوریزا و عملکرد کمی و کیفی اسانس در بسیاری از گیاهان دارویی و معطر وجود دارد. به‌طوری‌که تغییرات کمی و کیفی اسانس در گشنیز و نعناع فلفلی با کاربرد قارچ مایکوریزا گزارش شده است (Mucciarelli et al., 2003). کاپور و همکاران (Kapoor et al., 2017) نتیجه گرفتند که قارچ‌های مایکوریزا باعث ایجاد تغییراتی در غلظت فیتوهورمون‌های گیاهی از جمله سیتوکینین، اسیدجیبرلیک و اسیدجاسمونیک می‌شوند که این فیتوهورمون‌ها،

تشکیل غده‌های ترشح‌کننده اسانس را بیشتر نموده و در نتیجه سبب تولید بیشتر متابولیت‌های ثانویه می‌شوند. همچنین کوپتا و همکاران (Copetta et al., 2006) نتیجه گرفتند که کاربرد قارچ مایکوریزا از طریق افزایش غده‌های ترشح‌کننده اسانس منجر به افزایش میزان اسانس تولیدشده در گیاه ریحان گردید. به نظر می‌رسد که نانو دی‌اکسید تیتانیوم از طریق افزایش فعالیت آنزیمی و دسترسی به عناصر غذایی (نیتروژن و فسفر)، ظرفیت فتوسنتزی برگ را بهبود بخشیده و از این طریق منجر به بیوستز بیشتر کربوهیدرات‌ها، توسعه غده‌های ترشح‌کننده اسانس، کانال‌ها و مجاری ترشحی اسانس می‌گردد (Šebesta et al., 2021; Shabbir et al., 2019). مقدم و همکاران (Moghadam et al., 2016) اظهار داشتند که رابطه مستقیمی بین فتوستنز و فرآورده‌های فتوستنتزی وجود دارد، به‌طوری‌که همبستگی بین فتوستنز و تولید اسانس نشان می‌دهد که گلوکز به‌عنوان پیش‌ماده مناسب در سنتز اسانس به‌ویژه مونوترپن‌ها عمل می‌کند. از این‌رو به نظر می‌رسد که گلوکز حاصل از فتوستنز پیش‌ماده لازم برای تأمین انرژی و سنتز ترکیب‌های مؤثر در اسانس را فراهم می‌کند. گیاهان دارویی در طول رویش برای تولید مناسب اسانس و مواد مؤثره به مقدار کافی عناصر غذایی نیاز دارند، به‌طوری‌که تأمین این عناصر غذایی، میزان و عملکرد اسانس را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. یکی از روش‌های افزایش غلظت عناصر غذایی در گیاهان، استفاده از نانو دی‌اکسید تیتانیوم می‌باشد (Šebesta et al., 2021). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، گوهری و همکاران (Gohari et al., 2020) با کاربرد غلظت‌های مختلف نانو دی‌اکسید تیتانیوم روی بادرشبی گزارش کردند که بیشترین درصد اسانس با کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. در پژوهشی دیگر با ارزیابی اثر سطوح مختلف نانو دی‌اکسید تیتانیوم و اسیدجاسمونیک روی مریم‌گلی گزارش کردند که درصد اسانس با کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم افزایش یافت و دلیل آن این‌طور بیان کردند که نانو دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند ظرفیت فتوستنتزی گیاه را افزایش داده که به‌تبع آن تولید پیش‌ماده سنتز اسانس به‌ویژه مونوترپن‌ها (گوکز) بیشتر شده و در نتیجه درصد اسانس افزایش پیدا خواهد کرد (Mazarie et al., 2019). علاوه بر این، میزان اسانس تولیدی مریم‌گلی در تنش ملایم نسبت به آبیاری نرمال و تنش شدید افزایش معنی‌داری پیدا کرد.

گیاهان دارویی برخلاف همه محصولات کشاورزی که در شرایط تنش خشکی از نظر تولید صدمه می‌بینند، ممکن است در این اوضاع تولید مواد شیمیایی بیشتر و در نتیجه بازدهی اقتصادی بالاتری پیدا کنند (Morshedloo et al., 2017). تولید متابولیت‌های ثانویه برای سازگاری گیاه نسبت به عوامل نامساعد و تنش‌های محیط زندگی صورت گرفته و به‌منزله به کار افتادن یک نوع جریان دفاعی به‌منظور استمرار تعادل فعالیت‌های حیاتی به حساب می‌آید. معمولاً تشکیل و تجمع اسانس در گیاهان دارویی در شرایط نامساعد محیطی افزایش می‌یابد که این امر گیاه را درمقابل آسیب‌های نوری زیاد و کمبود احتمالی آب محافظت می‌کند. در شرایط تنش خشکی با کاهش پتانسیل آب برگ، روزنه‌ها بسته شده و به‌دنبال آن تعرق کاهش می‌یابد. در نتیجه این اتفاق با کم شدن غلظت کربن دی‌اکسید، فتوسنتز کاهش می‌یابد. پایین بودن غلظت کربن دی‌اکسید درون سلولی باعث کاهش واکنش‌های چرخه کالوین می‌شود. با ادامه این روند، فرآیند اکسایش و کاهش اکسی‌والانت $NADP^+$ به‌عنوان پذیرنده الکترون در زنجیره انتقال، کاهش می‌یابد، در نتیجه مقادیر زیادی H^+ و $NADPH$ در سلول تجمع پیدا کرده و نسبت H^+ و $NADPH$ به $NADP^+$ افزایش می‌یابد؛ در این حالت، بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه از قبیل ترکیب‌های اسانس، فنیلی، آلکالوئیدی و ... با مصرف $NADPH + H^+$ تجمع‌یافته منجر به متعادل شدن نسبت $NADPH^+ / NADP^+$ می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تولید متابولیت‌های ثانویه به‌عنوان یک روش دفاعی مؤثر در گیاهان دارویی و معطر به‌منظور کاهش اثرات منفی ناشی از تنش شناخته می‌شود (Kleinwächter & Selmar, 2015). علی‌رغم اینکه میزان اسانس مریم‌گلی در دو تنش ملایم و شدید نسبت به شاهد افزایش یافته است، ولی میزان اسانس تولیدشده در تنش شدید نسبت به ملایم کاهش پیدا کرده است. زیرا در تنش‌های شدیدتر، گیاه بیشتر مواد فتوسنتزی تولیدشده را به‌جای رشد به تولید ترکیب‌های تنظیم‌کننده اسمزی از جمله پرولین، گلیسین بتائین و ترکیب‌های قندی مانند ساکارز و فروکتور تخصیص می‌دهد تا از این طریق شرایط لازم برای بقای حیات گیاه در تنش‌های شدیدتر فراهم شود. افزایش درصد اسانس در تنش ملایم را می‌توان این‌گونه توضیح داد که با کاهش سطح برگ، تراکم‌های غده‌های ترشح‌کننده اسانس و تجمع اسانس در واحد بافت برگ افزایش می‌یابد (Amani Machiani et al., 2021). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، گواهی و همکاران

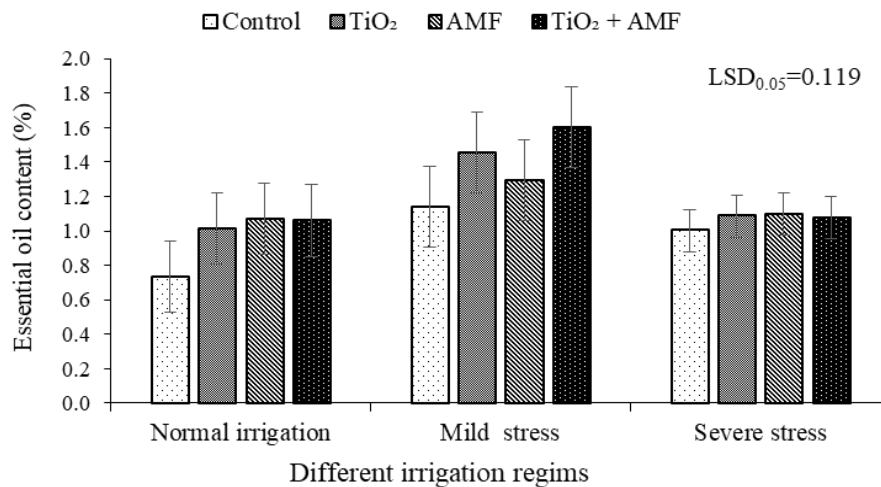
(Govahi et al., 2015) مشاهده کردند که میزان اسانس تولیدی مریم‌گلی در تنش ملایم و شدید به‌ترتیب ۱۰۸ و ۸۴ درصد نسبت به آبیاری نرمال افزایش پیدا کرد. در مطالعه‌ای دیگر روی مریم‌گلی تحت شرایط تنش خشکی مشخص گردید که بیشترین و کمترین میزان درصد اسانس به‌ترتیب در تنش متوسط و آبیاری نرمال به دست آمد (Bettaieb et al., 2009). در پژوهشی دیگر با ارزیابی الگوهای کشت مخلوط سنبليله (*Trigonella foenum-graceum* L.) و نعناع‌فللی گزارش شد که بیشترین درصد اسانس دو گیاه در الگوی کشت ۱:۱ به دست آمد (Ebrahimghochi et al., 2018). امانی ماچیانی و همکاران (Amani Machiani et al., 2019) گزارش کردند که بیشترین درصد و عملکرد اسانس گیاه رازیانه در کشت مخلوط دو ردیف رازیانه + چهار ردیف لوبیا + دو ردیف بادرشو به دست آمد. همچنین درصد و عملکرد اسانس رازیانه در این الگوی کشت مخلوط به‌ترتیب ۳۷ و ۲۴ درصد بیشتر از کشت خالص رازیانه بود. علاوه بر این، میانگین ترکیب‌های تشکیل‌دهنده اسانس رازیانه از قیل *(E)*-anethole, *limonene* و *methyleugenol*، *fenchone* و *chavicol* در الگوهای مختلف کشت مخلوط به‌ترتیب ۴/۹، ۳/۴، ۲۱/۲ و ۲/۱ درصد نسبت به کشت خالص رازیانه بیشتر بود.

عملکرد اسانس مریم‌گلی

اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت، منابع کودی و اثر متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی بر عملکرد اسانس مریم‌گلی معنی‌دار گردید (جدول ۳). براساس اثر متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی، بیشترین (۲/۴۵ گرم در مترمربع) عملکرد اسانس در آبیاری نرمال با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کاربرد جداگانه نانو دی‌اکسید تیتانیوم در تنش ملایم نداشت. عملکرد اسانس در آبیاری نرمال و تنش شدید به‌ترتیب ۳/۷ و ۶۲/۸ درصد نسبت به تنش ملایم کاهش یافت. همچنین کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کاربرد جداگانه نانو دی‌اکسید تیتانیوم به‌ترتیب منجر به افزایش ۸۳/۵ و ۴۲/۷ درصدی عملکرد اسانس نسبت به عدم مصرف کود گردید (شکل ۱۱). علاوه بر این کشت خالص منجر به افزایش ۱۹/۵ درصدی عملکرد اسانس نسبت به کشت مخلوط گردید (شکل ۱۲). نتایج نشان داد که عملکرد اسانس با کاربرد تلفیقی قارچ

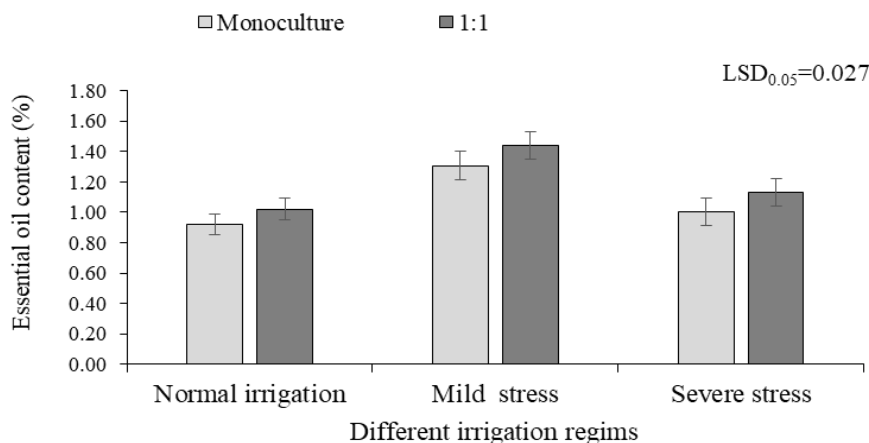
با کاربرد قارچ میکوریزا به دلیل افزایش عملکرد دانه و درصد اسانس افزایش یافت. در پژوهشی دیگر با بررسی سطوح مختلف تنش خشکی و نانو دی‌اکسید تیتانیوم روی گیاه *Vetiveria zizanioides* L. Nash گزارش شد که بیشترین عملکرد ماده خشک و اسانس با کاربرد ۹۰ میلی گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد (Shabbir et al., 2019).

میکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم افزایش یافت. عملکرد اسانس از حاصل ضرب عملکرد ماده خشک در میزان اسانس تولیدشده توسط گیاه به دست می‌آید. لذا هر عاملی که منجر به افزایش دو شاخص ذکر شده گردد منجر به افزایش عملکرد اسانس نیز خواهد شد. رضائی چپانه و همکاران (Rezaei-Chiyaneh et al., 2021) با ارزیابی منابع مختلف کودی و کشت مخلوط شنبلیله با بالنگو (*Lallemantia iberica* L. گزارش شد که عملکرد اسانس بالنگو در کشت خالص

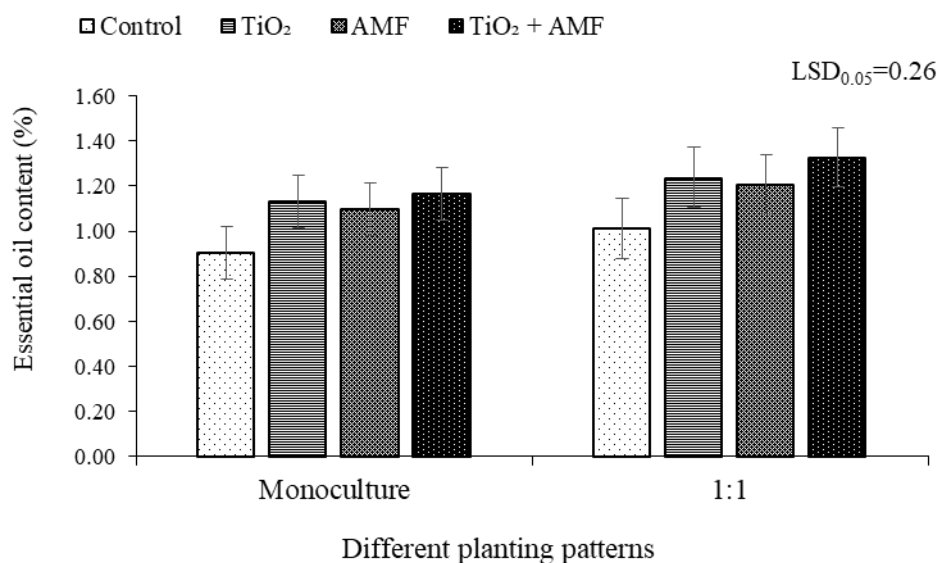


شکل ۸- مقایسه میانگین درصد اسانس مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا
Fig. 8- Mean comparison of the essential oil content of sage under the influence of different irrigation regimes, nano titanium dioxide, and arbuscular mycorrhizal fungi

TiO₂: نانو دی‌اکسید تیتانیوم و AMF: قارچ آرباسکولار میکوریزا
TiO₂: Nano titanium dioxide and AMF: Arbuscular mycorrhizal fungus

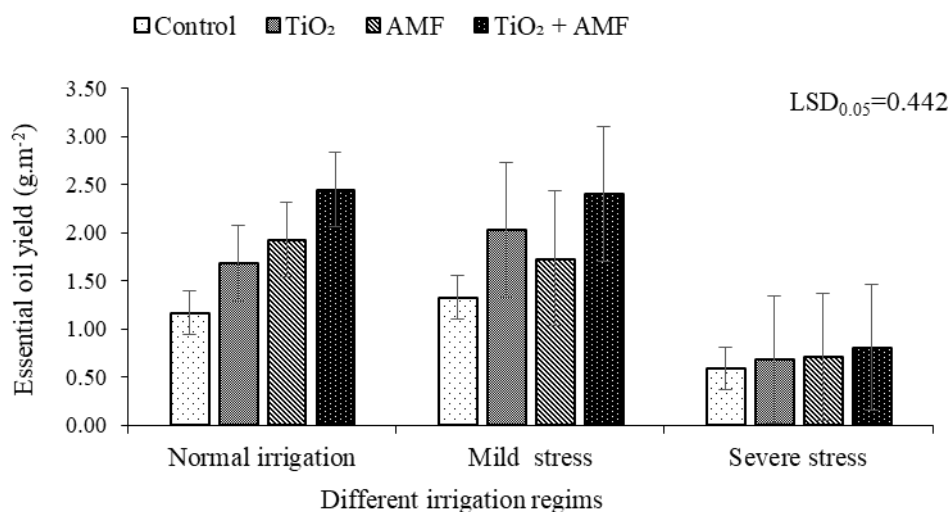


شکل ۹- مقایسه میانگین درصد اسانس مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری و الگوهای کشت (کشت خالص و مخلوط با نعناع فلفلی)
Fig. 9- Mean comparison of the sage essential oil content under the influence of different irrigation regimes and planting patterns (Monoculture and intercropping with peppermint)



شکل ۱۰- مقایسه میانگین درصد اسانس مریم‌گلی تحت تأثیر الگوهای مختلف کشت (کشت خالص و مخلوط با نعناع فلفلی)، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا

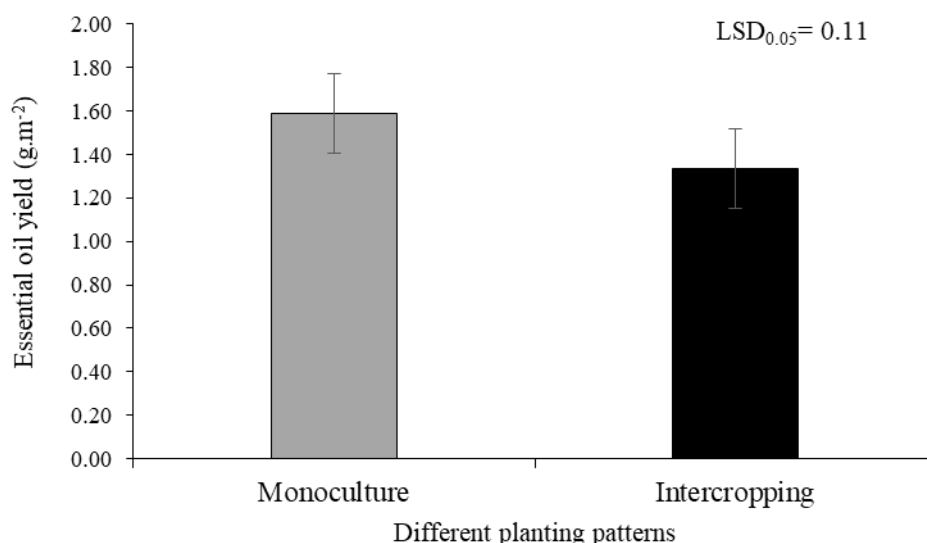
Fig. 10- Mean comparison of the sage essential oil content under the influence of different planting patterns (Monoculture and intercropping with peppermint), nano titanium dioxide (TiO₂) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)



شکل ۱۱- مقایسه میانگین عملکرد اسانس مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا

Fig. 11- Mean comparison of the sage essential oil yield under the effect of different irrigation regimes, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)

TiO₂: Nano titanium dioxide and AMF: Arbuscular mycorrhizal fungus



شکل ۱۲- مقایسه میانگین عملکرد اسانس مریم‌گلی در الگوهای کشت خالص و مخلوط با نعناع‌فللی

Fig. 12- Mean comparison of the sage essential oil yield in planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint

اجزای اسانس مریم‌گلی

با تجزیه اسانس مریم‌گلی، ۳۳ ترکیب شناسایی شد. در بین ترکیب‌های اسانس سیس-توجن (۳۰/۷۳ تا ۳۸/۳۵ درصد)، کامفور (۱۲/۹۷ تا ۱۹/۳۴ درصد)، ۸ و ۱۰ سینئول (۹/۱۷ تا ۱۰/۷۱ درصد)، ترنس-توجن (۴/۳۶ تا ۵/۷۸ درصد)، کامفن (۲/۷۴ تا ۴/۳۵ درصد) و ویریدیفلورول (۳/۱۶ تا ۴/۳۷ درصد)، ترکیب‌های غالب اسانس بودند (جدول ۴، ۵ و ۶). بیشترین میزان سیس-توجن (۳۸/۳۵ درصد) در تنش ملایم در کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. میزان سیس-توجن در کشت مخلوط ۶/۵۰ درصد بیشتر از کشت خالص مریم‌گلی بود. علاوه بر این، میزان سیس-توجن در تنش ملایم به ترتیب ۲/۲ و ۳ درصد بیشتر از تنش شدید و آبیاری نرمال بود. همچنین کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، کاربرد جداگانه قارچ مایکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم به ترتیب منجر به افزایش ۴/۸، ۳/۱ و ۳/۳ درصدی این ترکیب نسبت به عدم مصرف کود گردید. علاوه بر این، بیشترین میزان کامفور (۱۹/۳۴ درصد) در کشت مخلوط در آبیاری نرمال با کاربرد قارچ مایکوریزا به دست آمد. همچنین آبیاری نرمال به ترتیب منجر به افزایش ۳/۳ و ۴/۷ درصدی این ترکیب نسبت به تنش ملایم و تنش شدید گردید. کاربرد قارچ مایکوریزا منجر به افزایش ۳/۷ درصدی میزان کامفور نسبت به عدم مصرف کود شد. همچنین

بیشترین میزان ۸ و ۱۰ سینئول (۱۰/۷۱ درصد) در کشت خالص در تنش شدید و با کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. علاوه بر این، میزان ۸ و ۱۰ سینئول در آبیاری نرمال ۲/۷ درصد کمتر از تنش شدید بود. همچنین کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش ۵/۴ درصدی این ترکیب نسبت به عدم مصرف کود گردید. علاوه بر این، بیشترین میزان ترنس-توجن در تنش شدید در کشت مخلوط با کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش ۳/۲ درصدی ترنس-توجن نسبت به عدم مصرف کود گردید. کشت مخلوط منجر به افزایش ۲/۱ درصدی این ترکیب نسبت به کشت خالص شد. همچنین تنش شدید منجر به افزایش ۶/۶ درصدی ترنس-توجن نسبت به آبیاری نرمال گردید. علاوه بر این، بیشترین میزان کامفن (۴/۳۵ درصد) در تنش ملایم در کشت خالص با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش ۶/۱ درصدی کامفن نسبت به عدم مصرف کود گردید. علاوه بر این، بیشترین میزان ویریدیفلورول در تنش ملایم در کشت خالص با کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد. کشت خالص منجر به افزایش ۲/۴ درصدی ویریدیفلورول نسبت به کشت مخلوط گردید.

کیفیت اسانس گیاهان دارویی به درصد ترکیب‌های غالب تولید

تیمول افزایش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت اسانس این گیاه در تنش‌های ملایم و شدید و با کاربرد قارچ مایکوریزا بهبود یافته است. مطالعه‌ای روی گشنیز نشان داد که کاربرد چهار گرم در لیتر نانو دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش درصد لینالول نسبت به عدم مصرف کود گردید (Khater et al., 2021).

کلروفیل a

اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت و منابع کودی و اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی، الگوی کشت × منابع کودی و رژیم‌های آبیاری × الگوی کشت × منابع کودی بر غلظت کلروفیل a معنی‌دار گردید (جدول ۷). بیشترین (۵/۵۶ میلی گرم در گرم وزن تر) غلظت کلروفیل a در آبیاری نرمال و در کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد که در همان سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم در کشت خالص نداشت. تنش‌های ملایم و شدید به ترتیب منجر به کاهش ۳۴/۵ و ۵۵/۶ درصدی کلروفیل a شدند (جدول ۸). علاوه بر این، غلظت کلروفیل a مریم‌گلی با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، کاربرد جداگانه قارچ مایکوریزا و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به ترتیب ۶۸/۴، ۱۸/۲ و ۳۷/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. همچنین کلروفیل a در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص ۳۱/۴ درصد افزایش یافت (جدول ۸).

کلروفیل b

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت کلروفیل b مریم‌گلی تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت و منابع کودی و اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی، الگوی کشت × منابع کودی و رژیم‌های آبیاری × الگوی کشت × منابع کودی قرار گرفت (جدول ۷). بیشترین (۱/۳۳ میلی گرم در گرم وزن تر) غلظت کلروفیل b مریم‌گلی در آبیاری نرمال در الگوی کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد که در همان سطح آبیاری به ترتیب تفاوت معنی‌داری با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم در کشت خالص و کاربرد جداگانه نانو دی‌اکسید تیتانیوم در کشت مخلوط نداشت.

شده در اسانس این گیاهان وابسته است. افزایش درصد ترکیب‌های غالب در مریم‌گلی (سیس-توجن، کامفور و ۱۰۱ سینئول) منجر به افزایش کیفیت اسانس تولیدی خواهد شد. طبق نتایج این پژوهش مشاهده شد که اکثر ترکیب‌های غالب اسانس مریم‌گلی (سیس-توجن و ۱۰۱ سینئول) در تنش‌های ملایم و شدید افزایش پیدا کرد. دلیل افزایش ترکیب‌های اسانس مریم‌گلی در تنش‌های ملایم و شدید، تخصیص بیشتر کربن‌های تثبیت‌شده طی فرآیند فتوسنتز به تولید متابولیت‌های ثانویه می‌باشد که طی این فرآیند، میزان مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی از طریق کاهش خسارت‌های رادیکال‌های فعال اکسیژن افزایش می‌یابد (Farahani et al., 2009). بحرینی نژاد و همکاران (Bahreininejad et al., 2013) گزارش کردند که میزان تیمول در اسانس آویشن دناپی در تنش‌های ملایم و شدید نسبت به آبیاری نرمال افزایش پیدا کرد. در پژوهشی دیگر با بررسی سطوح مختلف تنش خشکی (۱۰۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) روی زوفا (*Hyssopus officinalis* L.) گزارش کردند که درصد اسانس در تنش ملایم به ترتیب ۳۶/۹ و ۱۵/۹ درصد بیشتر از آبیاری نرمال و تنش شدید بود. همچنین بیشترین میزان بتا-پینن، سیس-پینوکامفون و میرتینول در تنش ملایم به دست آمد (Khosheghbal Ghorabae et al., 2020). همچنین نتایج نشان داد که میزان ترکیب‌های غالب اسانس مریم‌گلی با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم و کاربرد جداگانه آن‌ها افزایش یافت. اسانس‌ها، ترکیب‌های ترپنوئیدی بوده و واحدهای سازنده آن‌ها (ایزوپرنوئیدها) مانند ایزوپنتیل پیروفسفات و دی متیل آلیل پیروفسفات نیاز به ترکیب‌هایی از قبیل استیل کوآنزیم A، ATP و NADPH دارند (Kapoor et al., 2017). با توجه به این موضوع که حضور عناصری نظیر نیتروژن و فسفر برای تشکیل ترکیب‌های نام برده ضروری می‌باشد، از این رو احتمالاً کاربرد قارچ مایکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم با تأمین فسفر و نیتروژن مورد نیاز گیاه می‌تواند باعث افزایش کلروفیل، فعالیت آنزیم روبیسکو و به دنبال آن فعالیت‌های فتوسنتزی و میزان و ترکیب‌های اسانس گردد (Rafique Kapoor et al., 2017; Tarraf et al., 2017et al., 2018). در پژوهشی با کاربرد قارچ مایکوریزا روی نعنای گزارش شد که قارچ مایکوریزا منجر به افزایش درصد کاروون نسبت به عدم مصرف گردید (Urcovic et al., 2015). توحیدی و همکاران (Tohidi et al., 2019) گزارش کردند که کیفیت اسانس آویشن با افزایش درصد

جدول ۴- ترکیب اسانس مریم گلی در الگوهای کشت خالص و مخلوط با نمناغ فلفلی، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا تحت آبیاری نرمال (میانگین دو سال)
Table 4- Identified compounds of sage essential oil in planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under normal irrigation (average of two years)

ردیف Row	ترکیبها Ingredients	شماره RI	MAD ₂₅ control		MAD ₂₅ TiO ₂		MAD ₂₅ AMF		MAD ₂₅ AMF+TiO ₂	
			کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping
1	cis-Salvene سیس - سالون	847	0.36	0.479	0.47	0.244	0.39	0.27	0.46	0.31
2	trans-Salvene ترنس - سالون	858	0.1	0.095	0.09	0	0.11	0.08	0.09	0.07
3	Tricyclene تریسیکلن	921	0.15	0.14	0.14	0.10	0.14	0.11	0.12	0.12
4	α -Thujene آلفا-توجن	924	0.15	0.17	0.16	0.10	0.18	0.16	0.21	0.15
5	α -Pinene پینن - آلفا	932	2.51	3.13	3.34	2.50	3.33	2.41	3.13	3.7
6	Camphene کامفن	946	3.11	3.22	3.44	2.74	3.32	2.9	3.58	3.5
7	β -Pinene پینن - بتا	974	1.26	1.33	1.29	1.06	1.47	1.02	1.28	0.99
8	Myrcene میرسن	988	0.94	0.963	0.96	0.747	1.07	0.891	0.94	0.96
9	n-Decane دکان - n	1000	0.13	0.119	0.12	0.15	0.14	0.11	0.14	0.1
10	α -Terpinene آلفا-ترپینن	1014	0.31	0.372	0.39	0.266	0.4	0.313	0.36	0.37
11	p-Cymene پ-سایمن	1022	1.44	1.39	1.41	1.20	1.5	1.2	1.35	1.44
12	1,8-Cineole آو سینئول	1026	9.17	9.53	10.49	10.23	10.37	9.23	9.89	10.02
13	γ -Terpinene گاما-ترپینن	1054	0.36	0.36	0.34	0.28	0.36	0.33	0.33	0.34
14	cis-Sabinene سیس - سابلینن هیدرات	1065	0.24	0.20	0.24	0.187	0.23	0.15	0.18	0.15
15	Terpinolene تریپنولن	1086	0.2	0.17	0.16	0.18	0.16	0.16	0.15	0.12
16	trans-Sabinene ترانس - سابلینن هیدرات	1098	0.66	0.42	0.44	0.3	0.41	0.34	0.45	0.23
17	cis-Thujone سیس - توجن	1101	30.73	34.29	33.63	33.79	34.7	34.61	33.89	35.29
18	trans-Thujone ترانس - توجن	1112	4.59	5.14	4.97	4.36	4.94	5.22	5.3	5.29

19	Camphor کامفور	1141	17.48	16.90	17.19	18.45	14.58	19.34	16.88	17.40
20	neo-iso-3- Thujanol تئو-ایزو-۳-توجانول	1147	0.84	0.53	0.51	0.58	0.46	0.52	0.57	0.4
21	trans- Pinocamphone ترانس-پینوکامفون	1158	0.12	0.14	0.12	0.07	0.05	0.08	0.11	0.05
22	Borneol بورنول	1165	3.64	2.34	2.16	3.54	2.06	2.72	3.23	2.61
23	cis- Pinocamphone سیس-پینوکامفون	1172	0.6	0.334	0.32	0.37	0.35	0.314	0.36	0.35
24	Terpinen-4-ol ترپینن-۴-ال	1174	0.06	0.08	0.1	0.07	0.1	0.06	0.06	0.06
25	α -Terpineol آلفا-ترپینئول	1186	0.15	0.17	0.19	0.09	0.15	0.16	0.14	0.11
26	Bornyl acetate بورنیل استات	1284	2.27	1.51	1.57	1.4	1.84	1.42	1.8	1.38
27	trans-Sabinyl acetate ترانس-سابینیل استات	1289	0	0.079	0.12	0.081	0.08	0.062	0.13	0.06
28	Caryophyllene (E)- ای-کاروفیلین	1417	2.16	2.11	2.32	3.23	2.3	2.57	2.13	2.26
29	α -Humulene آلفا-هومولن	1452	2.64	2.79	2.84	3.85	2.81	3.68	2.63	3.38
30	Caryophyllene oxide کاروفیلین اکساید	1582	0.38	0.321	0.36	0.32	0.35	0.37	0.36	0.3
31	Viridiflorol ویریدی فورول	1592	4.19	4.05	4.1	3.39	4.2	4.28	3.37	3.94
32	Humulene epoxide II هومولن اکساید II	1608	0.61	0.57	0.64	0.90	0.75	0.79	0.75	0.5
33	Manool مانول	2056	2.82	2.71	2.18	3.71	2.86	2.67	2.65	2.56
مجموع ترکیبها Total combinations			94.37	96.15	96.8	98.48	96.16	98.55	97.02	98.52

MAD₂₅: Irrigation after 25% of maximum allowable moisture discharge, Control: Control, TiO₂: Nano titanium dioxide, AMF: Avascular mycorrhizal fungus. Linear inhibition index was calculated on HP-5 MS column using C8-C40 normal alkanes.

جدول ۵- ترکیب اسانس مریم گلی در الگوهای کشت خالص و مخلوط با نعناع فلفلی، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا تحت تنش ملایم (میانگین دو سال)
Table 5- Identified compounds of sage essential oil in planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under mild stress (average of two years)

ردیف Row	ترکیب ها Ingredients	شاخص بازداری RI	MAD ₅₀ control			MAD ₅₀ TiO ₂			MAD ₅₀ AMF			MAD ₅₀ AMF+TiO ₂		
			کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping
1	<i>cis</i> -Salvene سیس - سالون	847	0.48	0.3	0.44	0.47	0.56	0.33	0.52	0.44				
2	<i>trans</i> -Salvene ترنس - سالون	858	0.12	0.09	0.12	0.09	0.13	0.08	0.11	0.05				
3	Tricyclene تریسیکلن	921	0.13	0.13	0.12	0.13	0.15	0.14	0.13	0.12				
4	α -Thujene آلفا-توجن	924	0.2	0.18	0.2	0.18	0.19	0.18	0.21	0.20				
5	α -Pinene پینن	932	3.65	3.17	3.46	2.82	3.49	2.86	3.88	3.48				
6	Camphene کامفن	946	3.71	3.35	3.64	3.51	4	2.83	4.35	3.25				
7	β -Pinene پینن	974	1.39	1.05	1.44	1.40	1.49	1.09	1.35	1.56				
8	Myrcene میرسن	988	0.98	0.95	0.95	0.98	1.01	0.97	1.03	1.07				
9	<i>n</i> -Decane دکان	1000	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	0.12	0				
10	α -Terpinene آلفا-ترپینن	1014	0.38	0.38	0.38	0.36	0.4	0.31	0.42	0.52				
11	<i>p</i> -Cymene پ-سیرسن	1022	1.55	1.3	1.35	1.44	1.52	1.05	1.4	1.36				
12	1,8-Cineole آو سینول	1026	9.25	9.66	9.87	10.05	10.57	10.11	9.56	10.64				
13	γ -Terpinene گاما-ترپینن	1054	0.34	0.35	0.31	0.36	0.34	0.34	0.37	0.37				
14	<i>cis</i> -Sabinene hydrate سیس-ساینین هیدرات	1065	0.19	0.2	0.21	0.19	0.21	0.21	0.24	0.20				
15	Terpinolene تریپنولن	1086	0.21	0.17	0.16	0.16	0.17	0.16	0.17	0.18				
16	<i>trans</i> -Sabinene hydrate ترانس-ساینین هیدرات	1098	0.45	0.35	0.41	0.40	0.38	0.29	0.23	0.32				

17	<i>cis</i> -Thujone سیس-توجون	1101	31.41	35.56	33.55	34.83	33.37	36.09	35.84	38.35
18	<i>trans</i> -Thujone ترانس-توجون	1112	5.04	5.12	5.53	5.04	4.91	4.87	5.68	5.69
19	Camphor کامفور	1141	17.02	18.18	16.02	17.49	17.95	18.60	15.54	12.97
20	<i>neo</i> - <i>iso</i> -3-Thujanol تئو-ایزو-۳-توجانول	1147	0.57	0.47	0.52	0.525	0.5	0.32	0.47	0.358
21	<i>trans</i> -Pinocamphone ترانس-پینوکامفون	1158	0.13	0.11	0.06	0.11	0.12	0.05	0.06	0.05
22	Borneol بورنول	1165	2.88	2.63	2.67	2.29	2.44	2.58	1.94	1.44
23	<i>cis</i> -Pinocamphone سیس-پینوکامفون	1172	0.34	0.34	0.37	0.33	0.36	0.30	0.34	0.36
24	Terpinen-4-ol ترپین-۴-ال	1172	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07
25	α -Terpineol آلفا-ترپینول	1186	0.14	0.13	0.14	0.15	0.17	0.15	0.13	0.16
26	Bornyl acetate بورنیل استات	1284	1.94	1.49	1.69	1.54	1.37	1.42	1.41	1.54
27	<i>trans</i> -Sabinyl acetate ترانس-ساینیل استات	1289	0.08	0.15	0.06	0.07	0.04	0.11	0.05	0.12
28	(<i>E</i>)-Caryophyllene ای-کاریوفیلین	1417	2.41	2.32	2.05	1.94	2.40	2.42	3.55	2.12
29	α -Humulene آلفا-هومولن	1452	3.04	2.68	2.65	2.49	3.48	3.35	2.62	3.13
30	Caryophyllene oxide کاریوفیلین اکساید	1582	0.42	0.35	0.43	0.33	0.32	0.4	0.4	0.38
31	Viridiflorol ویریدی فورول	1592	4.11	3.85	4.37	3.16	3.35	3.76	3.88	3.83
32	Humulene epoxide II هومولن اکساید II	1608	0.79	0.65	0.77	0.6	0.52	0.68	0.76	0.71
33	Manool مانول	2056	3.04	2.62	3.01	2.16	3.12	3.42	2.95	3.28
مجموع ترکیب‌ها			96.57	98.46	97.13	98.63	96.91	98.69	98.71	98.80
Total combinations										

MAD₅₀: Irrigation after 50% of maximum allowable moisture discharge, Control: Control, TiO₂: Nano titanium dioxide, AMF: Abovascular mycorrhizal fungus. Linear inhibition index was calculated on HP-5 MS column using C8-C40 normal alkanes.

شده. AMF: قارچ آبوسکولار مایکوریزا، شاخص بازدارنده خطی در ستون HP-5 MS یا استفاده از نرمال آلکان‌های C₈-C₄₀ محاسبه شد.

جدول ۶- ترکیب اسانس مریم‌گلی در الگوهای کشت خالص و مخلوط با نعنای فلفلی، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا تحت تنش شدید (میانگین دو سال)
Table 6- Identified compounds of sage essential oil in planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under severe stress (average of two years)

ردیف Row	ترکیب‌ها Ingredients	شاخص بارداری Ri	MAD ₇₅ control			MAD ₇₅ TiO ₂			MAD ₇₅ AMF			MAD ₇₅ AMF+TiO ₂		
			کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping	کشت خالص Monoculture	کشت مخلوط Intercropping
1	<i>cis</i> -Salvene سیس - سالون	847	0.54	0.49	0.44	0.4	0.5	0.35	0.44	0.32				
2	<i>trans</i> -Salvene ترنس - سالون	858	0.11	0.14	0.17	0.10	0	0.11	0.11	0.05				
3	Tricyclene تریسیکلن	921	0.14	0.14	0.12	0.13	0.14	0.12	0.13	0.15				
4	α -Thujene آلفا-توجن	924	0.18	0.16	0.17	0.20	0.2	0.28	0.14	0.18				
5	α -Pinene پتا-پینن	932	3.56	3.24	2.69	4.40	3.67	4.26	3.34	4.23				
6	Camphene کامفن	946	3.87	3.46	3.15	3.43	4.17	3.74	3.4	3.86				
7	β -Pinene بتا-پینن	974	1.51	1.39	1.29	1.45	1.49	1.38	1.24	1.1				
8	Myrcene میرسن	988	1.02	1.03	0.97	1.01	0.91	1.04	0.93	0.95				
9	<i>n</i> -Decane دکان	1000	0.12	0.16	0.13	0.14	0.12	0.12	0.13	0.123				
10	α -Terpinene آلفا-ترپینن	1014	0.37	0.46	0.4	0.44	0.38	0.45	0.4	0.34				
11	<i>p</i> -Cymene پ-ایمیرسن	1022	1.59	1.52	1.37	1.49	1.61	1.55	1.44	1.4				
12	1,8-Cineole او ۱ سینئول	1026	9.98	10.51	10.71	9.82	9.91	9.46	10.03	10.44				
13	γ -Terpinene گاما-ترپینن	1054	0.4	0.59	0.38	0.37	0.39	0.3	0.33	0.31				
14	<i>cis</i> -Sabinene hydrate سیس-سابینن هیدرات	1065	0.2	0.22	0.21	0.198	0.26	0.21	0.17	0.2				
15	Terpinolene تریپنولن	1086	0.2	0.14	0.17	0.182	0.19	0.16	0.14	0.22				
16	<i>trans</i> -Sabinene hydrate ترانس-سابینن هیدرات	1098	0.41	0.38	0.5	0.40	0.41	0.32	0.42	0.29				
17	<i>cis</i> -Thujone سیس-توجون	1101	33.01	35.16	33.99	36.97	32.32	35.19	32.08	34.29				

18	<i>trans</i> -Thujone ترانس-توجون	1112	4.97	5.36	5.52	5.78	4.87	5.44	5.07	5.50
19	Camphor کامفور	1141	15.77	16.16	15.07	14.96	18.36	16.43	18.61	16.62
20	<i>neo</i> -iso-3-Thujanol نیو-ایزو-۳-توجانول	1147	0.55	0.49	0.59	0.45	0.31	0.47	0.53	0.36
21	<i>trans</i> -Pinocampone ترانس-پینوکامفون	1158	0.1	0.104	0.15	0.11	0.05	0.10	0.12	0.06
22	Borneol بورنئول	1165	3.12	2.58	2.83	1.83	3.17	1.77	2.56	2.53
23	<i>cis</i> -Pinocamphone سیس-پینوکامفون	1172	0.35	0.35	0.36	0.34	0.38	0.34	0.34	0.30
24	Terpinen-4-ol ترپینن-۴-ال	1174	0.06	0.11	0.07	0.08	0.03	0.05	0.09	0.06
25	α -Terpineol آلفا-ترپینئول	1186	0.19	0.13	0.21	0.18	0.08	0.16	0.16	0.15
26	Bornyl acetate بورنیل استات	1284	2.21	1.44	2.25	1.68	2.5	1.35	1.41	1.40
27	<i>trans</i> -Sabinyl acetate ترانس-سابینیل استات	1289	0.08	0.06	0.09	0.06	0	0.05	0.1	0.04
28	(<i>E</i>)-Caryophyllene ای-کاریوفیلین	1417	1.92	2.05	2.07	2.32	1.95	2.32	2.32	2.92
29	α -Humulene آلفا-هومولن	1452	2.61	2.57	2.77	2.43	2.52	2.60	3.22	2.83
30	Caryophyllene oxide کاریوفیلین اکساید	1582	0.39	0.37	0.4	0.34	0.36	0.3	0.3	0.31
31	Viridiflorol ویریدی فورول	1592	3.69	3.21	3.87	3.57	3.73	3.92	4.02	4.23
32	Humulene epoxide II هومولن اکساید II	1608	0.75	0.63	0.74	0.47	0.64	0.65	0.68	0.41
33	Manool مانول	2056	2.78	2.92	2.53	2.68	2.68	2.72	2.34	2.15
مجموع ترکیبها Total combinations			96.75	97.72	96.38	98.43	98.3	97.71	97.01	98.32

MAD₇₅: Irrigation after 75% of maximum allowable moisture discharge, Control: Control, TiO₂: Nano titanium dioxide, AMF: Abovascular mycorrhizal fungus. Linear inhibition index was calculated on HP-5 MS column using C8-C40 normal alkanes.

جدول ۷- تجزیه واریانس اثر الگوهای کشت خالص و مخلوط با نعنای فلفلی، نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا بر کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید تحت رژیم های مختلف آبیاری

Table 7- The analysis of variance the effect of planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on chl a, b, total and carotenoids under different irrigation regimes

منابع تغییرات S.O. V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares			
		کلروفیل a Chlorophyll a (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	کاروتنوئید Carotenoid (mg. g ⁻¹ Fresh weight)
سال Year	1	0.03 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.005 ^{ns}
خطای a Error a	4	4.62	0.41	7.77	0.43
رژیم های آبیاری Irrigation regimes	2	66.30 ^{**}	3.84 ^{**}	99.31 ^{**}	9.84 ^{**}
سال × رژیم آبیاری Year × Irrigation regimes	2	0.07 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.01 ^{ns}
خطای b Error b	8	0.20	0.01	0.22	0.12
الگوی کشت Planting patterns	1	24.30 [*]	3.89 [*]	47.66 [*]	3.95 ^{ns}
الگوی کشت × رژیم آبیاری Irrigation regimes × Planting patterns	2	0.27 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.05 ^{ns}
سال × الگوی کشت Year × Planting patterns	1	0.02 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.09 ^{ns}
سال × رژیم آبیاری × الگوی کشت Year × Irrigation regimes × Planting patterns	2	0.04 ^{ns}	0.008 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.003 ^{ns}
خطای c Error c	12	0.37	0.008	0.39	0.06
(دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	16.55 ^{**}	1.08 ^{**}	25.59 ^{**}	1.19 ^{**}
رژیم آبیاری × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Irrigation regimes × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	6	3.14 ^{**}	0.29 ^{**}	4.88 ^{**}	0.16 ^{**}
الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Planting patterns × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	1.76 [*]	0.26 ^{**}	3.31 [*]	0.05 ^{ns}
رژیم آبیاری × الگوی کشت × منابع کودی Irrigation × Planting patterns × Fertilizer sources	6	1.49 ^{**}	0.08 ^{**}	1.72 ^{**}	0.01 ^{ns}
سال × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Year × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	3	0.02 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.008 ^{ns}
سال × رژیم آبیاری × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Year × Irrigation regimes × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	6	0.02 ^{ns}	0.015 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.007 ^{ns}
سال × الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Year × Planting patterns × (Nano titanium dioxide +Mycorrhizal fungi)	3	0.15 ^{ns}	0.008 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.008 ^{ns}
سال × رژیم آبیاری × الگوی کشت × (دی اکسید تیتانیوم + قارچ میکوریزا) Year × Irrigation regimes × Planting patterns × (Nano titanium dioxide + Arbuscular mycorrhizal fungi)	6	0.12 ^{ns}	0.006 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.003 ^{ns}
خطای کل Total error	72	0.24	0.02	0.25	0.07
ضریب تغییرات CV (%)		16.22	19.79	13.25	22.02

ns و *، **: به ترتیب معنی دار در سطح یک و پنج درصد و عدم تفاوت معنی دار.
**، * and ns: are significant at the 1 and 5 percent levels, respectively, and there is no significant difference.

جدول ۸- مقایسه میانگین‌های غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل مریم‌گلی در ترکیب تیماری رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوهای کشت خالص و مخلوط با نعناع فلفلی، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ میکوریزا

Table 8- Mean comparisons of the sage chl a, b, and total under treatment combination of irrigation regimes, planting patterns of monoculture and intercropping with peppermint, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi

تیما رها Treatments		کلروفیل a Chlorophyll a (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg. g ⁻¹ Fresh weight)	
آبیاری نرمال Normal irrigation	شاهد Control	2.10	0.35	2.45	
	نانو دی اکسید تیتانیوم Nano titanium dioxide	4.51	0.79	5.30	
	کشت خالص Monoculture	قارچ میکوریزا AMF	3.82	0.90	4.72
	قارچ میکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide	5.21	1.30	6.51	
	شاهد Control	3.89	0.92	4.81	
	کشت مخلوط Intercropping	نانو دی اکسید تیتانیوم Nano titanium dioxide and	4.51	1.26	5.77
	قارچ میکوریزا Arbuscular mycorrhizal fungi	5.00	0.99	5.99	
	قارچ میکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide	5.56	1.33	6.89	
	تنش ملایم Mild stress	شاهد Control	1.56	0.22	1.77
نانو دی اکسید تیتانیوم Nano titanium dioxide		2.43	0.75	3.18	
کشت خالص Monoculture		قارچ میکوریزا Arbuscular mycorrhizal fungi	2.49	0.72	3.21
قارچ میکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide		3.24	0.76	4.00	
شاهد Control		2.95	0.95	3.90	
کشت مخلوط Intercropping		نانو دی اکسید تیتانیوم TiO ₂	3.35	1.08	4.43
قارچ میکوریزا AMF		2.72	0.98	3.70	
قارچ میکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide		3.90	1.22	5.12	
تنش شدید Severe stress		شاهد Control	1.09	0.22	1.31
	نانو دی اکسید تیتانیوم Nano titanium dioxide	1.36	0.47	1.83	
	کشت خالص Monoculture	قارچ میکوریزا Arbuscular mycorrhizal fungi	1.15	0.22	1.37
	قارچ میکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide	2.40	0.30	2.70	
	شاهد Control	2.26	0.53	2.79	
	کشت مخلوط Intercropping	نانو دی اکسید تیتانیوم Nano titanium dioxide	2.84	0.79	3.63
	قارچ میکوریزا Arbuscular mycorrhizal fungi	1.18	0.30	1.48	
	قارچ میکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم Arbuscular mycorrhizal fungi + Nano titanium dioxide	3.05	0.58	3.63	
	LSD _{0.05}		0.4855	0.1085	0.5848

نانو دی‌اکسید تیتانیوم به‌ترتیب منجر به افزایش ۴۲/۶، ۱۸/۸ و ۱۰/۹ درصدی غلظت کاروتنوئید نسبت به عدم مصرف کود گردید (شکل ۳۱).

به‌طور کلی نتایج نشان داد که با افزایش تنش خشکی، میزان کلروفیل a، b و کل کاهش یافت. محتوای کلروفیل در گیاهان ارتباط نزدیکی با فتوسنتز، میزان عناصر غذایی و بهره‌وری محصول دارد (Varma et al., 2018). دلیل کاهش میزان کلروفیل با افزایش تنش خشکی را می‌توان به کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی، آسیب به ساختار کلروپلاست، تخریب پیش‌ساز کلروفیل و اکسیداسیون کلروفیل بر اثر افزایش میزان رادیکال‌های فعال اکسیژن نسبت داد که در نهایت منجر به مهار بیوسنتز کلروفیل خواهد شد (Mohammadi et al., 2019). شیواکریشنا و همکاران (Shivakrishna et al., 2018) گزارش کردند که قرار گرفتن گیاه در تنش خشکی منجر به افزایش میزان رادیکال‌های فعال اکسیژن شده که این امر به‌نوبه خود باعث پراکسیداسیون لیپیدها، آسیب به کلروپلاست و در نهایت تجزیه کلروفیل موجود در برگ گیاهان خواهد شد. همچنین یکی دیگر از دلایل کاهش میزان کلروفیل را می‌توان به کاهش جذب عناصر غذایی به‌منظور رشد و ساخت بیومولکول‌های حیاتی گیاه نسبت داد که این امر در نهایت منجر به کاهش تولید کلروفیل خواهد شد (Emami Bistgani et al., 2017). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، بحرینی‌نژاد و همکاران (Bahreininejad et al., 2013) گزارش کردند که میزان کلروفیل و کاروتنوئید آویشن دانی در شرایط خشکی نسبت به آبیاری نرمال کاهش معنی‌داری پیدا کرد. باین‌حال، نتایج نشان داد که میزان کاروتنوئید در تنش ملایم نسبت به شرایط آبیاری نرمال افزایش یافت. کاروتنوئیدها نوعی رنگدانه آنتی‌اکسیدانی می‌باشند که در افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. کاروتنوئیدها متابولیت‌های ایزوپرنوئیدی می‌باشند که در اندامک‌های فتوسنتزکننده سنتز می‌شوند. در شرایط نامساعد محیطی، گیاهان با تنظیم ژن‌های مربوط به متابولیسم کاروتنوئیدها، تجمع و تخریب کاروتنوئیدها را تنظیم می‌کنند. علاوه‌بر این، کاروتنوئیدها به‌عنوان پیش‌ساز برای سنتز هورمون‌های گیاهی از جمله اسیدآبسیزیک می‌باشند (Sun et al., 2022). آسیب اکسیدی تنش خشکی در بافت‌های گیاهی معمولاً توسط سیستم‌های ضداکسیدکنندگی آنزیمی و غیرآنزیمی فرونشاندن می‌شود. این

با افزایش روند خشکی، غلظت کلروفیل b مریم‌گلی کاهش یافت، به‌طوری‌که میزان صفت ذکرشده در تنش‌های ملایم و شدید به‌ترتیب ۱۵/۳ و ۵۶/۱ درصد کاهش یافت. همچنین غلظت کلروفیل b مریم‌گلی با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم ۷۱/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. علاوه‌بر این، کشت مخلوط منجر به افزایش ۵۶/۹ درصدی غلظت کلروفیل b نسبت به کشت خالص گردید (جدول ۸).

کلروفیل کل

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۷) نشان داد که غلظت کلروفیل کل مریم‌گلی تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری، الگوی کشت و منابع کودی و اثرات متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی، الگوی کشت × منابع کودی و رژیم‌های آبیاری × الگوی کشت × منابع کودی قرار گرفت. بیشترین (۶/۸۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر) غلظت کلروفیل کل در آبیاری نرمال در الگوی کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم به دست آمد که در همان سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم در کشت خالص نداشت. غلظت کلروفیل کل مریم‌گلی در تنش‌های ملایم و شدید به‌ترتیب ۳۰/۹ و ۵۵/۸ درصد کاهش یافت. همچنین غلظت کلروفیل کل مریم‌گلی با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، کاربرد جداگانه قارچ مایکوریزا و نانو دی‌اکسید تیتانیوم به‌ترتیب ۶۹، ۲۰/۱ و ۴۱/۵ درصد نسبت به عدم مصرف کود افزایش یافت. علاوه‌بر این، کشت مخلوط منجر به افزایش ۳۶/۱ درصدی غلظت کلروفیل b نسبت به کشت خالص گردید (جدول ۸).

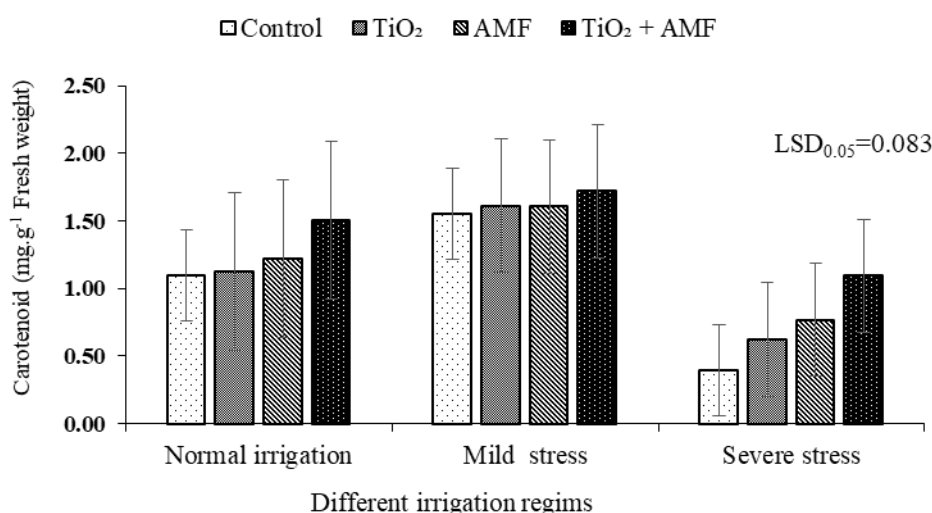
کاروتنوئید

اثرات ساده رژیم‌های مختلف آبیاری و منابع کودی و اثر متقابل رژیم‌های آبیاری × منابع کودی بر غلظت کاروتنوئید مریم‌گلی معنی‌دار گردید (جدول ۷). بیشترین (۱/۷۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و کمترین (۰/۳۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر) غلظت کاروتنوئید در تنش ملایم با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم و تنش شدید بدون مصرف کود به دست آمد. کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانودی‌اکسید تیتانیوم، کاربرد جداگانه قارچ مایکوریزا و

دی‌اکسید تیتانیوم افزایش یافت. مولکول کلروفیل از دو بخش (یک سر پورفیرین و یک هیدروکربن طولی با دنباله فیتول) تشکیل شده است. پورفیرین از چهار حلقه پیرول حاوی نیتروژن که به صورت حلقوی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. کامل‌کننده مولکول کلروفیل یک یون منیزیم است که با چهار اتم نیتروژن در مرکز حلقه تشکیل کلات می‌دهد. با توجه به اینکه هر مولکول کلروفیل دارای چهار اتم نیتروژن می‌باشد و با توجه به همبستگی مثبت محتوای کلروفیل با میزان نیتروژن در دسترس گیاه می‌توان بیان کرد که با افزایش جذب نیتروژن، میزان کلروفیل گیاه افزایش می‌یابد (Mao et al., 2020). بنابراین می‌توان بیان نمود که با افزایش غلظت عناصر از طریق کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی‌اکسید تیتانیوم، میزان فتوسنتز و به تبع آن غلظت کلروفیل و کاروتنوئید افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین بیشتر بودن غلظت کلروفیل و کاروتنوئید در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص به استفاده بهینه از منابع در دسترس نسبت داده می‌شود (Amani Machiani et al., 2021). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، سیلوا و همکاران (Silva et al., 2018) با ارزیابی کشت مخلوط بادرنجبویه با بومادران گزارش کردند که در هر دو گیاه، بیشترین میزان کلروفیل آ، کلروفیل ب و کلروفیل کل در کشت مخلوط دو گیاه به دست آمد.

ضد اکسیدکننده‌ها شامل کاروتنوئیدها، فنولیک‌ها، فلاونوئیدها، آسکوربات‌ها، آلفا-توکوفرول و آنزیم‌های آنتی اکسیدانی می‌باشند. این ترکیب‌ها نه تنها از اجزای سلول محافظت می‌کنند، بلکه منجر به افزایش طول سلول شده و مرگ سلول و پیری را با تأخیر می‌اندازند. افزایش غلظت کاروتنوئید در شرایط تنش خشکی احتمالاً به نقش آنتی‌اکسیدانی آن مرتبط باشد. بنابراین، افزایش میزان کاروتنوئید در تنش ملایم به عنوان یک ترکیب غیرآنزیمی برای کاهش میزان رادیکال‌های فعال اکسیژن و افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی توجیه‌پذیر می‌باشد (Zhang et al., 2021). در پژوهشی با ارزیابی سطوح مختلف تنش خشکی (۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) روی درسد و عملکرد موسیلاژ قدومه (*Alyssum homolocarpum*) گزارش کردند که با افزایش تنش خشکی، کلروفیل کل کاهش یافت، به طوری که بیشترین و کمترین میزان کلروفیل کل به ترتیب در ۸۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد. همچنین بیشترین و کمترین میزان کاروتنوئید به ترتیب در ۴۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی حاصل شد (Zaferanieh & Mahdavi, 2021).

همچنین نتایج نشان داد که میزان کلروفیل و کاروتنوئید مریم‌گلی در کشت مخلوط با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو



شکل ۱۳- مقایسه میانگین غلظت کاروتنوئید مریم‌گلی تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و قارچ مایکوریزا

Fig. 13- Mean comparison of sage carotenoid concentrations under the influence of different Irrigation regimes, nano titanium dioxide and arbuscular mycorrhizal fungi

در پژوهشی دیگر با بررسی سطوح مختلف تنش خشکی و کاربرد قارچ مایکوریزا روی ریحان گزارش کردند که بیشترین میزان کلروفیل کل در آبیاری نرمال با کاربرد قارچ میکوریزا به دست آمد (Hazzoumi et al., 2015). همچنین بیشترین میزان کلروفیل آ در آبیاری نرمال و با کاربرد دو میلی گرم در لیتر نانو دی اکسید تیتانیوم به دست آمد. کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانو دی اکسید تیتانیوم روی بادرشبی منجر به افزایش غلظت کاروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید نسبت به عدم مصرف آن گردید (Gohari et al., 2020). همچنین، کاربرد ۹۰ میلی گرم در لیتر نانو دی اکسید تیتانیوم منجر به افزایش غلظت کلروفیل کل گیاه *Vetiveria zizanioides* L. Nash به شاهد گردید (Shabbir et al., 2019).

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش عملکرد ماده خشک و محتوای کلروفیل مریم‌گلی گردید. اما کاربرد تلفیقی قارچ

مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم، بهره‌وری گیاه را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشید. بیشترین عملکرد ماده خشک، کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم در شرایط آبیاری نرمال به دست آمد. با افزایش روند تنش خشکی، درصد اسانس مریم‌گلی افزایش یافت، به‌طوری‌که بیشترین درصد اسانس در تنش ملایم به دست آمد که ۴۱/۲ درصد نسبت به آبیاری نرمال افزایش پیدا کرد. علاوه بر این، درصد اسانس مریم‌گلی در کشت مخلوط ۱۱/۱ درصد بیشتر از کشت خالص آن بود. همچنین در تنش ملایم، کشت مخلوط به همراه کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم موجب افزایش ترکیب اصلی اسانس مریم‌گلی یعنی سیس-توجن گردید. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا + نانو دی اکسید تیتانیوم در کشت مخلوط می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد پایدار برای بهبود کمیت و کیفیت اسانس مریم‌گلی در شرایط خشکی توصیه گردد.

References

1. Abdollahi Arpanahi, A., Feizian, M., Mehdipourian, G., & Khojasteh, D. N. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation improve essential oil and physiological parameters and nutritional values of *Thymus daenensis* Celak and *Thymus vulgaris* L. under normal and drought stress conditions. *European Journal of Soil Biology*, 100, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103217>.
2. Adams, R. P. (2007). Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry. Carol Stream: Allured Publishing Corporation.
3. Ahmad, B., Shabbir, A., Jaleel, H., Khan, M. M. A., & Sadiq, Y. (2018). Efficacy of titanium dioxide nanoparticles in modulating photosynthesis, peltate glandular trichomes and essential oil production and quality in *Mentha piperita* L. *Current Plant Biology*, 13, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2018.04.002>.
4. Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M. R., Aghaee, A., & Maggi, F. (2021). *Funneliformis mosseae* inoculation under water deficit stress improves the yield and phytochemical characteristics of thyme in intercropping with soybean. *Scientific Reports*, 11(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94681-9>.
5. Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M. R., & Maggi, F. (2018). Evaluation of competition, essential oil quality, and quantity of peppermint intercropped with soybean. *Industrial Crops and Products*, 111, 743-754. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.052>.
6. Amani Machiani, M., Rezaei-Chiyaneh, E., Javanmard, A., Maggi, F., & Morshedloo, M. R. (2019). Evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seed yield and quali-quantitative production of the essential oils from fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) and dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) in intercropping system under humic acid application. *Journal of Cleaner Production*, 235, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.241>.
7. Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6(9), 2026-2032. <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR10.027>.
8. Bahreininejad, B., Razmjou, J., & Mirza, M. (2013). Influence of water stress on morpho-physiological and phytochemical traits in *Thymus daenensis*. *International Journal of Plant Production*, 7(1), 151-166. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.927>.

9. Begum, N., Akhtar, K., Ahanger, M. A., Iqbal, M., Wang, P., Mustafa, N. S., & Zhang, L. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi improve growth, essential oil, secondary metabolism, and yield of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) under drought stress conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(33), 45276-45295. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13755-3>.
10. Bettaieb, I., Zakhama, N., Wannes, W. A., Kchouk, M. E., & Marzouk, B. (2009). Water deficit effects on *Salvia officinalis* fatty acids and essential oils composition. *Scientia Horticulturae*, 120(2), 271-275. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.10.016>.
11. Biglari, T., Maleksaeidi, H., Eskandari, F., & Jalali, M. (2019). Livestock insurance as a mechanism for household resilience of livestock herders to climate change: Evidence from Iran. *Land Use Policy*, 87, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104043>.
12. Chaudhary, I., & Singh, V. (2020). Titanium dioxide nanoparticles and its impact on growth, biomass and yield of agricultural crops under environmental stress: A Review. *Research Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10, 1-8. <http://dx.doi.org/10.3923/rjnn.2020.1.8>.
13. Copetta, A., Lingua, G., & Berta, G. (2006). Effects of three AM fungi on growth, distribution of glandular hairs and essential oil production in *Ocimum basilicum* L. var. *Genovese*. *Mycorrhiza*, 16, 485-494. <https://doi.org/10.1007/s00572-006-0065-6>.
14. Ebrahimghochi, Z., Mohsenabadi, G., & Majidian, M. (2018). Effect of planting date and intercropping with fenugreek (*Trigonella foenum-graceum* L.) on yield and essential oil content of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21(3), 759-768. <http://dx.doi.org/10.1080/0972060X.2018.1465857>.
15. El-Haddad, M. H., Zayed, M. S., El-Sayed, G. A. M., & Abd El-Satar, A. M. (2020). Efficiency of compost and vermicompost in supporting the growth and chemical constituents of *Salvia officinalis* L. cultivated in sand soil. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 9, 49-59. <https://doi.org/10.30486/ijrowa.2020.671209>.
16. Emami Bistgani, Z., Siadat, S. A., Bakhshandeh, A., Ghasemi Pirbalouti, A., & Hashemi, M. (2017). Interactive effects of drought stress and chitosan application on physiological characteristics and essential oil yield of *Thymus daenensis* Celak. *Crop Journal*, 5(5), 407-415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cj.2017.04.003>.
17. Farahani, H. A., Valadabadi, S. A., Daneshian, J., & Khalvati, M. A. (2009). Evaluation changing of essential oil of balm (*Melissa officinalis* L.) under water deficit stress conditions. *Journal of Medicinal Plant Research*, 3, 329-333. <https://www.researchgate.net/publication/237559464>.
18. Farahpour, M. R., Pirkhezr, E., Ashrafi, A., & Sonboli, A. (2020). Accelerated healing by topical administration of *Salvia officinalis* essential oil on *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* infected wound model. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 128, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110120>.
19. Farruggia, D., Di-Miceli, G., Licata, M., Leto, C., Salamone, F., & Novak, J. (2024). Foliar application of various biostimulants produces contrasting response on yield, essential oil and chemical properties of organically grown sage (*Salvia officinalis* L.). *Frontiers in Plant Science*, 15, 1397489. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1397489>.
20. Gao, S., Wang, Y., Yu, S., Huang, Y., Liu, H., Chen, W., & He, X. (2020). Effects of drought stress on growth, physiology, and secondary metabolites of two *Adonis* species in Northeast China. *Scientia Horticulturae*, 259, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108795>.
21. Ghanbarzadeh, Z., Mohsenzadeh, S., Rowshan, V., & Moradshahi, A. (2019). Evaluation of the growth, essential oil composition and antioxidant activity of *Dracocephalum moldavica* under water deficit stress and symbiosis with *Claroideoglossum etunicatum* and *Micrococcus yunnanensis*. *Scientia Horticulturae*, 256, 1-8. <https://www.researchgate.net/publication/338633410>.
22. Gheysari, M., Loescher, H. W., Sadeghi, S. H., Mirlatifi, S. M., Zareian, M. J., & Hoogenboom, G. (2015). Water-yield relations and water use efficiency of maize under nitrogen fertigation for semiarid environments: Experiment and synthesis. *Advances in Agronomy*, 130, 175-229. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.12.001>.
23. Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, 84(3), 489-500. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>.
24. Gohari, G., Mohammadi, A., Akbari, A., Panahirad, S., Dadpour, M. R., Fotopoulos, V., & Kimura, S. (2020). Titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil

- profile and biochemical attributes of *Dracocephalum moldavica*. *Scientific Reports*, 10(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57794-1>.
25. Golami, A., Abbaspour, H., Hashemi-Moghaddam, H., & Gerami, M. (2018). Photocatalytic effect of TiO₂ nanoparticles on essential oil of *Rosmarinus officinalis*. *Journal of Biochemical Technology*, 9(4), 50-56.
26. Golubkina, N., Logvinenko, L., Novitsky, M., Zamana, S., Sokolov, S., Molchanova, A., Shevchuk, O., Sekara, A., Tallarita, A., & Caruso, G. (2020). Yield, essential oil and quality performances of *Artemisia dracunculus*, *Hyssopus officinalis* and *Lavandula angustifolia* as affected by arbuscular mycorrhizal fungi under organic management. *Plants*, 9, 1-16. <https://doi.org/10.3390/plants9030375>.
27. Govahi, M., Ghalavand, A., Nadjafi, F., & Sorooshzadeh, A. (2015). Comparing different soil fertility systems in sage (*Salvia officinalis*) under water deficiency. *Industrial Crops and Products*, 74, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.053>.
28. Hazzoumi, Z., Moustakime, Y., & Joutei, K. A. (2015). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and water stress on growth, phenolic compounds, glandular hairs, and yield of essential oil in basil (*Ocimum gratissimum* L.). *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40538-015-0035-3>.
29. Ingle, A. P. (2021). Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection. Maharashtra India: John Wiley & Sons, Incorporated. <https://doi.org/10.1002/9781119745884>.
30. Jannoura, R., Joergensen, R. G., & Bruns, C. (2014). Organic fertilizer effects on growth, crop yield, and soil microbial biomass indices in sole and intercropped peas and oats under organic farming conditions. *European Journal of Agronomy*, 52, 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.001>.
31. Kapoor, R., Anand, G., Gupta, P., & Mandal, S. (2017). Insight into the mechanisms of enhanced production of valuable terpenoids by arbuscular mycorrhiza. *Phytochemistry Reviews*, 16(4): 677-692. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11101-016-9486-9>.
32. Khater, R. M., Sabry, R. M., Pistelli, L., Abd-ElGawad, A. M., Soufan, W., & El-Gendy, A. N. G. (2021). Effect of compost and titanium dioxide application on the vegetative yield and essential oil composition of Coriander. *Sustainability*, 14(1), 322, 1-11. <https://doi.org/10.3390/su14010322>.
33. Khosheghbal Ghorabae, F., Ghasemi Pirbalouti, A., Enteshari, S., & Davarpanah, S. J. (2020). Qualitative and quantitative effects of drought stress on essential oil compositions of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.). *Plant Research*, 33(2), 349-356. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0260-3>.
34. Kleinwächter, M., & Selmar, D. (2015). New insights explain that drought stress enhances the quality of spice and medicinal plants: Potential applications. *Agronomy Sustainable Developments*, 35, 121-131. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0260-3>.
35. Koske, R., & Gemma, J. (1989). A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycological Research*, 92(4), 486-488. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(89\)80195-9](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(89)80195-9).
36. Liu, R., & Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*, 514, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104>.
37. Li, H., Ma, Z., Zhang, G., Chen, J., Lu, Y., & Li, P. (2024). Performance of a drip irrigation system under the co-application of water, fertilizer, and air. *Horticulturae*, 10, 1-22. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010006>.
38. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
39. Llusia, J., Penuelas, J., Alessio, G. A., & Estiarte, M. (2006). Seasonal contrasting changes of foliar concentrations of terpenes and other volatile organic compound in four dominant species of a Mediterranean shrubland submitted to a field experimental drought and warming. *Physiologia Plantarum*, 127(4), 632-649. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00693.x>.
40. Madhava, K. V., Raghavendra, A. S., & Reddy, K. J. (2006). Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants. Springer Science & Business Media India. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4225-6>.
41. Manzer, H., Siddiqui, M. H., & Al-Whaibi, F. M. (2015). Nanotechnology and Plant Sciences, Nanoparticles and Their Impact on Plants. Springer, Cham. <http://10.1007/978-3-319-14502-0>.
42. Mao, Z. H., Deng, L., Duan, F. Z., Li, X. J., & Qiao, D. Y. (2020). Angle effects of vegetation indices and the influence on prediction of SPAD values in soybean and maize. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93, 1-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2020.102198>.

43. Mazarie, A., Mousavi-Nik, S. M., Ghanbari, A., & Fahmideh, L. (2019). Effect of different spraying concentrations of jasmonic acid and titanium dioxide nanoparticles on some physiological traits and antioxidant system activity of sage (*Salvia officinalis* L.). *Iranian Journal of Plant Biology*, 11(1), 1-22. <https://doi.org/10.22108/ijpb.2018.110510.1092>.
44. McGonigle, T., Miller, M., Evans, D., Fairchild, G., & Swan, J. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular—arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115(3), 495-501. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/authorised-by/EVANS/D.+G>.
45. 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, 561-574. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.046>.
46. Mohammadi, H., Esmailpour, M., & Gheranpaye, A. (2016). Effects of TiO₂ nanoparticles and water-deficit stress on morpho-physiological characteristics of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) plants. *Acta Agriculturae Slovenica*, 107(2), 385-396. <https://doi.org/10.14720/aas.2016.107.2.11>.
47. Moghadam, E., Mahmoodi Sourestani, M., Ramazani, Z., Farrokhian Firoozi, A., & Eskandari, F. (2016). Effects of iron foliar application on the number and size of glandular trichomes and essential oil content and composition of holy basil (*Ocimum sanctum* L.) at first and second harvests. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 32(1), 174-188. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2016.106146>.
48. Monti, M., Pellicanò, A., Santonoceto, C., Preiti, G., & Pristeri, A. (2016). Yield components and nitrogen use in cereal-pea intercrops in Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 196, 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.017>.
49. Morshedloo, M. R., Craker, L. E., Salami, A., Nazeri, V., Sang, H., & Maggi, F. (2017). Effect of prolonged water stress on essential oil content, compositions and gene expression patterns of mono-and sesquiterpene synthesis in two oregano (*Origanum vulgare* L.) subspecies. *Plant Physiology and Biochemistry*, 111, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.023>.
50. Morshedloo, M. R., Maggi, F., Neko, H. T., & Aghdam, M. S. (2018). Sumac (*Rhus coriaria* L.) fruit: Essential oil variability in iranian populations. *Industrial Crops and Products*, 111, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.002>.
51. Mucciarelli, M., Scannerini, S., Berteà, C., & Maffei, M. (2003). *In vitro* and *in vivo* peppermint (*Mentha piperita*) growth promotion by nonmycorrhizal fungal colonization. *New Phytologist*, 158, 591-597. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00762.x>.
52. Nasiri Mahallati, M. N., Koocheki, A., Mondani, F., Feizi, H., & Amirmoradi, S. (2015). Determination of optimal strip width in strip intercropping of maize (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Northeast Iran. *Journal of Cleaner Production*, 106, 343-350. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.099>.
53. Phillips, J. M., & Hayman, D. (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).
54. Rafique, R., Zahra, Z., Virk, N., Shahid, M., Pinelli, E., Park, T. J., Kallerhoff, J., & Arshad, M. (2018). Dose-dependent physiological responses of *Triticum aestivum* L. to soil applied TiO₂ nanoparticles: Alterations in chlorophyll content, H₂O₂ production, and genotoxicity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 255, 95-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.010>.
55. Rezaei-Chiyaneh, E., Mahdavia, H., Battaglia, M. L., Thomason, W. E., & Caruso, G. (2021). Intercropping and fertilizer type impact seed productivity and secondary metabolites of dragon's head and fenugreek. *Scientia Horticulturae*, 287, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110277>.
56. Rezaei-Chiyaneh, E., Amirnia, R., Amani Machiani, M., Javanmard, A., Maggi, F., & Morshedloo, M. R. (2020). Intercropping fennel (*Foeniculum vulgare* L.) with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by PGPR inoculation: A strategy for improving yield, essential oil and fatty acid composition. *Scientia Horticulturae*, 261, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108951>.
57. Said-Al Ahl, H. A. H., & Hussein, M. S. (2010). Effect of water stress and potassium humate on the productivity of oregano plant using saline and fresh water irrigation. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 3(1), 125-141.

- <https://www.researchgate.net/publication/266967908>.
58. Salehi-Lisar, S. Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2020). Agronomic crop responses and tolerance to drought stress. *Agronomic Crops*, 3, 63-91. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-0025-1_5.
 59. Šebesta, M., Ramakanth, I., Zvěřina, O., Šeda, M., Diviš, P., & Kolenčík, M. (2021). Effects of titanium dioxide nanomaterials on plants growth. *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection: Recent Advances and Impacts*. pp. 17-44. New York, United States: John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.3390/plants11131659>.
 60. Shabbir, A., Khan, M. M. A., Ahmad, B., Sadiq, Y., Jaleel, H., & Uddin, M. (2019). Efficacy of TiO₂ nanoparticles in enhancing the photosynthesis, essential oil and khusimol biosynthesis in *Vetiveria zizanioides* L. *Nash. Photosynthetica*, 57(2), 599-606. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.071>.
 61. Sharifi-Rad, J., Sureda, A., Tenore, G. C., Daglia, M., Sharifi-Rad, M., Valussi, M., Tundis, R., Sharifi-Rad, M., Loizzo, M. R., Ademiluyi, A. O., & Sharifi-Rad, R. (2017). Biological activities of essential oils: From plant chemoecology to traditional healing systems. *Molecules*, 22(1), 1-55. <https://doi.org/10.3390/molecules22010070>.
 62. Shivakrishna, P., Reddy, K. A., & Rao, D. M. (2018). Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(2), 285-289. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.04.008>.
 63. Shukla, A., Kumar, A., Jha, A., Salunkhe, O., & Vyas, D. (2013). Soil moisture levels affect mycorrhization during early stages of development of agroforestry plants. *Biology and Fertility of Soils*, 49(5), 545-554. <https://www.researchgate.net/journal/Biology-and-Fertility-of-Soils-1432-0789>.
 64. Silva, T. C., Pinto, J. E. B. P., Pacheco, F. V., Roza, H. L. H., Lordêllo, D. M. D. S., & Bertolucci, S. K. V. (2018). The growth, photosynthetic pigments and essential oil composition of monocropped and intercropped lemon balm with yarrow. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 40, 1-7. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.35506>.
 65. Sun, T., Rao, S., Zhou, X., & Li, L. (2022). Plant carotenoids: Recent advances and future perspectives. *Molecular Horticulture*, 2(1), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2>.
 66. Tarraf, W., Ruta, C., Tagarelli, A., De Cillis, F., & De Mastro, G. (2017). Influence of arbuscular mycorrhizae on plant growth, essential oil production and phosphorus uptake of *Salvia officinalis* L. *Industrial Crops and Products*, 102, 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.010>.
 67. Thokchom, S. D., Gupta, S., & Kapoor, R. (2020). Arbuscular mycorrhiza augments essential oil composition and antioxidant properties of *Ocimum tenuiflorum* L. A popular green tea additive. *Industrial Crops and Products*, 153, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112418>.
 68. Tohidi, B., Rahimmalek, M., & Trindade, H. (2019). Review on essential oil, extracts composition, molecular and phytochemical properties of *Thymus* species in Iran. *Industrial Crops and Products*, 134, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.038>.
 69. Toksha, B., Sonawale, V. A. M., Vanarase, A., Bornare, D., Tonde, S., Hazra, C., Kundu, D., Satdive, A., Tayde, S., & Chatterjee, A. (2021). Nanofertilizers: A review on synthesis and impact of their use on crop yield and environment. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101986>.
 70. Urcoviche, R. C., Gazim, Z. C., Dragunski, D. C., Barcellos, F. G., & Alberton, O. (2015). Plant growth and essential oil content of *Mentha crispa* inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under different levels of phosphorus. *Industrial Crops and Products*, 67, 103-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.016>.
 71. Varma, A., Prasad, R., & Tuteja, N. (2018). Mycorrhiza-Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration. Springer Nature, Cham. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-68867-1>.
 72. Weisany, W., Tahir, N. A. R., & Schenk, P. M. (2021). Coriander/soybean intercropping and mycorrhizae application lead to overyielding and changes in essential oil profiles. *European Journal of Agronomy*, 126, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2021.126283>.
 73. Willmann, M., Gerlach, N., Buer, B., Polatajko, A., Nagy, R., Koebeke, E., Jansa, J., Flisch, R., & Bucher, M. (2013). Mycorrhizal phosphate uptake pathway in maize: Vital for growth and cob development on nutrient poor agricultural and greenhouse soils. *Frontiers in Plant Science*, 4, 1-6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00533>.
 74. Wu, Y. H., Wang, H., Liu, M., Li, B., Chen, X., Ma, Y. T., & Yan, Z. Y. (2021). Effects of native arbuscular mycorrhizae isolated on root biomass and secondary metabolites of *Salvia miltiorrhiza* Bge. *Frontiers in Plant*

- Science*, 12, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.617892>.
75. Yang, F., Hong, F., You, W., Liu, C., Gao, F., Wu, C., & Yang, P. (2006). Influence of nano-anatase TiO₂ on the nitrogen metabolism of growing spinach. *Biological Trace Element Research*, 110(2), 179-190. <https://doi.org/10.1385/BTER:110:2:179>.
76. Yang, F., Huang, S., Gao, R., Liu, W., Yong, T., Wang, X., Wu, X., & Yang W. (2014). Growth of soybean seedling in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red: Far red ratio. *Field Crops Research*, 155, 245-253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.011>.
77. Zare Hassanabdi, 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, 83-99. <https://doi.org/10.22092/mpt.2020.127803.1049>.
78. Zhang, R. R., Wang, Y. H., Li, T., Tan, G. F., Tao, J. P., Su, X. J., Xu, Z. S., Tian, Y. S., & Xiong, A. S. (2021). Effects of simulated drought stress on carotenoid contents and expression of related genes in carrot taproots. *Protoplasma*, 258(2), 379-390. <https://doi.org/10.1007/s00709-020-01570-5>.
79. Zaferanieh, M., & Mahdavi, B. (2021). Effect of water stress on morphological traits, mucilage percentage and yield of *Alyssum homolocarpum*. *Desert*, 26(1), 99-113. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2020.305751.1006787>.