

Effects of Inoculation with Arbuscular Mycorrhiza Fungi on Growth, Photosynthetic Pigments Biosynthesis and Essential Oil Content in *Dracocephalum moldavica* L. (Moldavian Balm) under Lead and Cadmium Stress

M. Moradi^{1*}, H. Nastari Nasrabadi¹, M.N. Modoodi¹, V. Shamsabadi²

- 1- Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture and Animal Science, University of Torbat-e Jam, Torbat-e Jam, Iran
2- Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Animal Science, University of Torbat-e Jam, Torbat-e Jam, Khorasan Razavi, Iran
(*- Corresponding author's Email: moradi@tjamcaas.ac.ir)

Received: 18 August 2024
Revised: 23 October 2024
Accepted: 24 October 2024
Available Online: 24 October 2024

How to cite this article:

Moradi, M., Nastari Nasrabadi, H., Modoodi, M.N., & Shamsabadi, V. (2025). Effects of inoculation with arbuscular mycorrhiza fungi on growth, photosynthetic pigments biosynthesis and essential oil content in *Dracocephalum moldavica* L. (Moldavian Balm) under lead and cadmium stress. *Journal of Horticultural Science*, 39(2), 269-281. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89455.1371>

Introduction

Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) is an annual herbaceous plant that belongs to the Lamiaceae family. It is known for its production of essential oils and its medicinal-aromatic properties. Moldavian balm's essential oil is used for food, cosmetics, flavorings, and pharmaceutical purposes. Abiotic stresses include drought, soil salinity, flooding, extremes of temperature, and contamination with organic pollutants and heavy metals hamper plant growth and productivity. In recent decades, heavy metal (HM) pollution has spread across the natural and anthropic ecosystems posing inevitable, serious health risks. Soil microbiota plays an important role in the sustainable production of the different types of agrosystems. Mycorrhizae (a combination of mycelium of the fungus and the roots of the plant) form networks that capture water and nutrients from the soil, which facilitate the acquisition of the plant. Arbuscular Mycorrhizal (AM) fungi play a crucial role in mitigating the oxidative damage caused by heavy metal stress in different plant species. Thus, interaction between mycorrhizae, and plants can be an excellent strategy for sustainable agricultural production. The aim of this study was to determine the effects of mycorrhizal arbuscular on improving heavy metal tolerance in moldavian balm, a medicinal and aromatic plant.

Materials and Methods

An experiment was conducted to study the effect of AM fungi on growth characteristics and quantitative and qualitative yield of Moldavian Balm, under heavy metals stress at Research Greenhouses of College of Agriculture, University of Torbat-e Jam. Treatments included mycorrhiza (inoculated and non-inoculated) and heavy metals including lead (0, 150 and 300 mg.kg⁻¹) and cadmium (0, 40 and 80 mg.kg⁻¹) which were arranged in factorial based on completely randomized design with 4 replication. Growth criteria, yield components, essential oil content and photosynthetic pigments were evaluated. In this study, different morphological traits (plant height, root length, root volume, stem diameter, leaf length, leaf width, leaf area, stem diameter, number of branches), vegetative parameters (fresh and dry weight biomass, root fresh and dry weight), photosynthetic pigment concentrations and essential oil content were measured. Data analysis of variance (ANOVA) was



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89455.1371>

performed using IBM SAS software (Version 9.1) and the differences between the means were assessed using Duncan's multiple range tests at $p \leq 0.05$.

Results and Discussion

Results showed that with increasing the concentration of heavy metals in the soil especially Cd, most of the growth characteristics and yield components of the study plant were significantly reduced as compared to those of controls. Mycorrhizal inoculation improved these traits where plants were grown under heavy metals stress. The highest biomass fresh and dry weight was observed in mycorrhizal plants grown in non-contaminated medium, which was significantly higher than those of the other treatments. The highest biomass fresh weight was recorded in non-stressed mycorrhizal plants. Biomass of fresh weight in non-mycorrhizal plants of Pb150 did not differ significantly from that of mycorrhizal plants of Pb150. Fresh weight biomass in mycorrhizal and non-mycorrhizal plants stressed by Cd40 or Cd80 was lower compared to mycorrhizal and non-mycorrhizal plants grown in non-contaminated media or contaminated media with Pb150 or Pb300. Furthermore, the lowest Fresh weight biomass was observed in non-mycorrhizal plants stressed by Cd80. Root fresh and dry weight of mycorrhizal plants was significantly higher than that of non-mycorrhizal plants. With increasing Cd or Pb concentration in soil, root fresh and dry weight decreased as compared to that of the controls. Inoculation with mycorrhizal improved the photosynthetic pigment concentrations under heavy metals stress. The highest percentage of essential oil content (1.3% v/w) was observed in mycorrhizal plants stressed by Pb150, while the lowest percentage (0.53% v/w) was evident in non-mycorrhizal plants polluted with Cd80. With increasing concentration of the heavy metals, essential oil of moldavian balm was significantly decreased, but the essential oil content in mycorrhizal plants was significantly higher than that measured in non-mycorrhizals.

Conclusions

AM fungi are widely believed to support plant establishment in soils contaminated with heavy metals, because of their potential to strengthen defense system of the AM mediated plants to promote growth and development. Mycorrhizal inoculation of moldavian balm promoted plant growth and, in addition, mycorrhization enhanced yield as well as active substances in this plant grown in the heavy metals stress condition. However, these approaches show promise in mitigating the adverse effects of heavy metals stress and improve the overall health and productivity of plants. Based on the enhanced physiological and biochemical responses, as well as increased essential oil content, it is recommended to use arbuscular mycorrhizal fungi fertilization under heavy metals stress.

Keywords: Chlorophyll, Environmental stresses, Medicinal plant, Sustainable agriculture

تأثیر مایه‌زنی قارچ مایکوریزا آربوسکولار بر رشد، رنگدانه‌های فتوسنتزی و میزان اسانس گیاه بادرشبویه (*Dracocephalum moldavica* L.) در شرایط تنش سرب و کادمیم

مهدی مرادی^{۱*} - حسین نستری نصرآبادی^۱ - محمدناصر مودودی^۱ - وحید شمس‌آبادی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۳

چکیده

گیاهان همواره در معرض تنش‌های زنده و غیرزنده محیطی قرار می‌گیرند که اثرات منفی بر رشد، متابولیسم و عملکرد آن‌ها می‌گذارد. آلودگی خاک با عناصر سنگین سرب و کادمیم یکی از مهم‌ترین آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌باشد. استفاده از کودهای زیستی از جمله قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار یک راهکار مناسب جهت کاهش اثرات نامطلوب تنش فلزات سنگین می‌باشد. بادرشبویه (*Dracocephalum moldavica* L.) از گیاهان دارویی مهم می‌باشد که کاربرد وسیعی در صنایع دارویی، غذایی، بهداشتی و آرایشی دارد. تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر قارچ مایکوریزا آربوسکولار بر خصوصیات رشدی، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان اسانس گیاه بادرشبویه تحت تنش فلزات سنگین سرب و کادمیم به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار در شرایط گلخانه انجام گرفت. عامل اول شامل فلزات سنگین در پنج سطح (شاهد (بدون آلودگی)، سرب ۱۵۰، سرب ۳۰۰، کادمیم ۴۰ و کادمیم ۸۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک) و عامل دوم قارچ مایکوریزا در دو سطح (بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی با قارچ مایکوریزا) بود. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت فلزات سنگین به‌ویژه کادمیم در خاک، اغلب صفات رشدی، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش پیدا کرد. مایه‌زنی گیاهان با قارچ مایکوریزا، صفات مذکور را در شرایط تنش فلزات سنگین بهبود بخشید. بیشترین میزان اسانس در گیاهان مایکوریزای آلوده به سرب ۳۰۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک حاصل گردید. گیاهان تلقیح‌شده با مایکوریزا درصد اسانس بیشتری را نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده نشان دادند. با توجه به افزایش پاسخ‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و همچنین افزایش مواد مؤثره گیاه که از اهداف دارویی در این گیاه محسوب می‌شود، استفاده از قارچ مایکوریزا برای کشت و کار تجاری گیاه بادرشبویه در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین سرب و کادمیم توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تنش‌های محیطی، کشاورزی پایدار، کلروفیل، گیاهان دارویی

مقدمه

کاهش کیفیت محصولات غذایی و برهم خوردن تعادل زیستی در محیط خاک اشاره کرد. آلودگی خاک به فلزات سنگین، یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در بسیاری از نقاط جهان می‌باشد. آلودگی خاک با عناصر سرب و کادمیم یکی از مهم‌ترین آلودگی‌های زیست‌محیطی در بسیاری از کشورها محسوب می‌شود که باعث بروز خطرات جدی در محیط‌زیست می‌شود. همچنین آلودگی بیش از حد سرب و کادمیم منجر به بروز بیماری‌های صعب‌العلاج برای انسان می‌گردد (Garbisu & Alkorta, 2001). فلزات سنگین باعث ایجاد تنش اکسیداتیو و تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌گردد و منجر به اثرات سمی مختلف در گیاهان نظیر کاهش رشد، کاهش محتوای کلروفیل و فتوسنتز، مهار فعالیت‌های آنزیمی، پراکسیداسیون غشاء

آلودگی خاک همچنان یک مشکل جهانی است (FAO & UNEP, 2021). در چند دهه اخیر، تولید و مصرف بی‌رویه نهاده‌های شیمیایی در کشاورزی رایج، مشکلات زیست‌محیطی بسیاری را سبب گردیده است که در این میان می‌توان به آلودگی منابع آب و خاک،

۱- گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی و دامپروری، مجتمع آموزش عالی تربت جام، تربت جام، ایران

۲- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و دامپروری، مجتمع آموزش عالی تربت جام، تربت جام، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: moradi@tjamcaas.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jhs.2024.89455.1371>

سلولی که از دست دادن یون‌ها و آسیب به اندامک‌های مهم سلولی نظیر کلروپلاست‌ها و میتوکندری‌ها را به دنبال دارد و سبب آسیب به مولکول‌های زیستی نظیر لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌شوند (Mishra et al., 2006). راه‌حل اساسی این مشکلات، حرکت به سوی کشاورزی پایدار بر پایه استفاده هر چه بیشتر از نهاده‌های طبیعی می‌باشد. یکی از ارکان اصلی در نظام‌های مبتنی بر کشاورزی پایدار، استفاده از کودهای زیستی در بوم‌نظام‌های کشاورزی با هدف کاهش قابل ملاحظه در مصرف نهاده‌های شیمیایی می‌باشد. کودهای زیستی شامل مواد نگهدارنده‌ای با جمعیت متراکم یک یا چند موجود مفید خاکزی و یا به صورت فرآورده‌های متابولیکی از این موجودات می‌باشند (Malik et al., 2011). از انواع کودهای زیستی می‌توان به ریزموجودات مفید خاکزی مانند قارچ‌های میکوریزا اشاره کرد که امروزه کاربرد فراوانی در نظام‌های کشاورزی پایدار به منظور دستیابی به افزایش کیفیت و پایداری عملکرد کمی و کیفی محصولات زراعی و باغی به‌ویژه در گیاهان دارویی دارند (Tabrizi et al., 2015). قارچ‌های میکوریزا، از با اهمیت‌ترین ریزموجودات موجود در اغلب خاک‌های تخریب نشده می‌باشند. به‌طوری‌که بر طبق تخمین‌های موجود، حدود ۷۰ درصد از توده زنده جامعه میکروبی خاک‌ها را میسیلیوم این قارچ‌ها تشکیل می‌دهد (Mukerji & Chamola, 2003). میکوریزا یکی از مجموعه عوامل زیستی است که بخش مهمی از موجودات خاکزی را شامل می‌شود. قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار از مهم‌ترین قارچ‌های اندومایکوریز هستند که با بیش از ۹۰ درصد گیاهان زراعی ارتباط همزیستی برقرار می‌نمایند (Smith & Read, 2008). میکوریزا در افزایش توانایی گیاه میزبان برای جذب عناصر غذایی غیرمتحرک، خصوصاً فسفر و چندین عنصر کم‌مصرف دیگر تأثیر مفیدی دارد، بنابراین قارچ‌های میکوریزا دارای کارکرد چند منظوره‌ای در بوم‌نظام‌های زراعی هستند، به‌طوری‌که بالقوه سبب بهبود کیفیت فیزیک خاک (از طریق گسترش ریشه‌های قارچ)، کیفیت شیمیایی خاک (از طریق جذب عناصر غذایی) و کیفیت زیستی خاک می‌گردند (Veresoglou et al., 2012). ویتفیلد و همکاران (Whitfield et al., 2004) مشاهده کردند که قارچ میکوریزا باعث افزایش جذب فلز روی و بهبود رشد گیاه آویشن (*Thymus polytrichus*) تحت تنش فلزات سنگین شد. نتایج تحقیقی که در آن واکنش قارچ میکوریزا گونه *Glomus fasciculatum* روی ریحان (*Ocimum basilicum*)، پروان‌ش (*Catharanthus roseus*) و علف لیمو (*Cymbopogon winterianus*) مورد مطالعه قرار گرفت، نشان داد که در تولید ماده خشک، میزان پروتئین و میزان کلروفیل کل در گیاهان تلقیح‌شده با میکوریزا افزایش یافت (Karthikeyan et al., 2009). تلقیح

میکوریزایی نه تنها رشد گیاهان دارویی را تسریع می‌کنند، بلکه در تولید و کیفیت مواد مؤثره نیز تأثیرگذار است. بنابراین امکان تحقیقات فزاینده‌ای در زمینه بهبود کیفیت فرآورده‌های گیاهان دارویی در زمان نسبتاً کوتاه، با کاربرد قارچ میکوریزا وجود دارد (Karthikeyan et al., 2008).

بادرشویه با نام علمی *Dracocephalum moldavica* L. گیاهی علفی، یک‌ساله متعلق به تیره نعنای (Lamiaceae) می‌باشد. منشأ این گیاه، جنوب سیبری و سرایشب‌های هیمالیا گزارش شده است و به‌طور طبیعی در مناطق معتدل اروپا و آسیا رشد می‌کند (Galambosi et al., 1989; Domokos et al., 1994). ماده مؤثره این گیاه اسانس می‌باشد که کاربردهای مختلفی در صنایع دارویی، غذایی، بهداشتی و آرایشی دارد (Borna et al., 2007). با توجه به اینکه آلودگی خاک‌های کشاورزی به فلزات سنگین در حال افزایش می‌باشد، در نظام‌های مبتنی بر کشاورزی پایدار، ارزیابی تأثیر ترکیباتی نظیر کاربرد قارچ میکوریزا جهت تعدیل آثار سوء فلزات سنگین ضروری است. براساس مستندات، اطلاعاتی در مورد تأثیر قارچ میکوریزا در کاهش اثرات نامطلوب تنش فلزات سنگین در این گونه وجود ندارد. بنابراین، در این پژوهش با توجه به کارکردهای مختلف قارچ میکوریزا، نقش آن بر تعدیل آثار منفی تنش فلزات سنگین بر شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیکی و میزان اسانس گیاه بادرشویه مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و شرایط رشدی

به‌منظور بررسی تأثیر مایه‌زنی قارچ میکوریزا بر شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیکی و میزان اسانس گیاه بادرشویه، آزمایشی به‌صورت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی تربت جام به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۱۰ تیمار و چهار تکرار اجرا شد. عامل اول فلزات سنگین در پنج سطح شامل شاهد (بدون آلودگی)، سرب ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به‌شکل $Pb(NO_3)_2$ ، کادمیم ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به‌شکل $CdCl_2$ و عامل دوم قارچ میکوریزا در دو سطح بدون مایه‌زنی و با مایه‌زنی بودند. مقادیر نیترات سرب و کادمیم کلرید براساس مقدار خاک یکسان برای هر گلدان (پنج کیلوگرم) براساس تیمارهای مورد آزمایش محاسبه و به‌صورت محلول‌پاشی به خاک گلدان‌ها به‌صورت لایه لایه اضافه شد و پس از سه ماه نگهداری خاک در نایلون‌های مخصوص به‌منظور قابل جذب شدن فلزات سنگین (دوره انکوباسیون^۱)، کاشت بذرها صورت گرفت. در طول دوره

برای تعیین مقدار اسانس از سیستم تقطیر با آب استفاده شد. بدین منظور برای هر تکرار، ۱۵ گرم از برگ‌های خشک‌شده گیاه توزین و اسانس‌گیری با استفاده از دستگاه کلونجر^۱ (مدل فارماکوپه بریتانیا) به مدت چهار ساعت انجام گرفت و میزان اسانس براساس درصد حجمی-وزنی (%v/w) محاسبه گردید (British Pharmacopoeia, 1980).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

آنالیز داده‌های آماری حاصل از این آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.1 انجام گرفت و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

شاخص‌های رشدی گیاه

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس (جدول ۱ و ۲) نشان می‌دهد که اثر مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزا و سطوح مختلف فلزات سنگین سرب و کادمیم و اثر متقابل آن‌ها بر شاخص‌های رشدی نظیر ارتفاع گیاه، قطر ساقه، سطح برگ، طول و عرض برگ، طول و حجم ریشه، وزن تر و خشک ریشه و شاخساره معنی‌دار گردید، ولی اثر متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر تعداد ساقه‌های جانبی نداشت. بیشترین و کمترین ارتفاع گیاه به ترتیب در گیاهان مایه‌زنی‌شده با قارچ میکوریزا بدون کاربرد فلزات سنگین و گیاهان غیرمیکوریزای آلوده به فلز سنگین کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. در سطوح مختلف فلزات سنگین سرب و کادمیم، ارتفاع گیاهان میکوریزایی نسبت به گیاهان غیرمیکوریزای به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. ضمن اینکه ارتفاع گیاه در گیاهان میکوریزایی و غیرمیکوریزایی آلوده به فلز سنگین کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. کمترین سطح برگ در گیاهان غیرمیکوریزای آلوده به فلز کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. در تمام سطوح فلزات سنگین سرب و کادمیم، گیاهان مایه‌زنی‌شده با قارچ میکوریزا نسبت به گیاهان غیرمیکوریزای از سطح برگ بیشتری برخوردار بودند (جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین و کمترین وزن تر و خشک شاخساره و ریشه به ترتیب در گیاهان مایه‌زنی‌شده با قارچ میکوریزا و بدون فلزهای سنگین و گیاهان عدم مایه‌زنی با قارچ میکوریزا و آلوده به فلز سنگین کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. در تمام سطوح فلزهای سنگین سرب و

انکوباسیون، رطوبت گلدان‌ها در حدود ظرفیت زراعی حفظ شد، بدین ترتیب که با انجام عمل آبیاری فلزات سنگین مورد استفاده، به‌عمق خاک رفته و با عمل تبخیر به سطح خاک انتقال یابند و در کل خاک به‌طور یکنواخت توزیع شوند. در داخل هر گلدان (سطح شماره ۳/۵) به‌میزان ۳۰ گرم قارچ میکوریزا مورد استفاده قرار گرفت و سپس بذرها در عمق حدود یک سانتی‌متری سطح خاک کشت شدند. پس از خروج گیاهچه‌ها درون هر گلدان در مرحله چهار برگی سه بوته نگهداری شد. قارچ میکوریزا از مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور که شامل سه گونه *Glomus mosseae*, *G. intraradice* و *G. etunicatum* به‌نسبت مساوی بودند، تهیه شد. در پایان آزمایش، براساس دستورالعمل ایمنی، سلامت و محیط زیست (HSE) در آزمایشگاه، خاک‌های آلوده از محیط آزمایشگاه خارج و دفن شدند.

سنجش شاخص‌های ریخت‌شناسی و رشدی

در پایان آزمایش، مشخصه‌های ریخت‌شناسی و رشدی نظیر ارتفاع، قطر ساقه، طول و عرض برگ، سطح برگ، طول و حجم ریشه، وزن تر و وزن خشک ریشه و شاخساره اندازه‌گیری شد. ارتفاع گیاه و طول ریشه با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری و قطر ساقه با استفاده از کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. حجم ریشه با استفاده از استوانه مدرج محاسبه شد. برای محاسبه طول، عرض و سطح برگ هر گیاه از دستگاه سطح‌برگ‌سنج استفاده شد. به‌منظور اندازه‌گیری وزن تر و خشک، گیاه از گلدان بیرون آورده شد و به دو قسمت بخش هوایی و ریشه تقسیم و وزن تر ریشه و شاخساره با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم توزین گردید. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها در خشک‌کن برقی (آون) با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. وزن ماده خشک هم به‌وسیله ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم ثبت گردید.

سنجش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی

برای اندازه‌گیری کلروفیل و کاروتنوئید، ۱۲۵ میلی‌گرم از بافت تازه گیاهی با ۲/۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد ساییده شد، سپس به مدت شش دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. میزان جذب محلول رویی در طول موج‌های ۴۷۰ و ۶۴۶ و ۶۶۳ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر خوانده شد و میزان کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید براساس میلی‌گرم در گرم وزن تازه محاسبه شد (Lichtenthaler & Wellburn, 1983).

استخراج و تعیین درصد اسانس

کادمیم (به جز کادمیم ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، گیاهان مایه زنی نشده با قارچ‌های میکوریزا، وزن تر و خشک شاخساره و ریشه کمتری نسبت به گیاهان مایه زنی شده با قارچ میکوریزا بودند و در گیاهان میکوریزی و عدم میکوریزی آلوده به فلز سنگین کادمیم با غلظت ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم اختلاف معنی داری مشاهده نشد (جدول ۴). با افزایش غلظت سرب و کادمیوم، تعداد ساقه جانبی در گیاه کاهش پیدا کرد و کمترین تعداد آن در تیمار کادمیم با غلظت ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم مشاهده شد (شکل ۱). تعداد ساقه‌های جانبی در گیاهان میکوریزی به طور معنی داری بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزی بود (شکل ۲). به طور کلی، سطوح مختلف فلزات سنگین و مایه زنی قارچ میکوریزا نشان داد که با افزایش غلظت فلز سنگین در خاک، صفات رشدی گیاه بادرشوبیه کاهش یافت. همچنین اثرات منفی فلز کادمیم بر رشد گیاه بسیار بیشتر از فلز سرب بود، به طوری که گیاهان غیرمیکوریزی آلوده به کادمیوم با غلظت ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم، دارای کمترین شاخص‌های رشدی بودند. تأثیر مثبت این قارچ بر گیاهان مختلف در تحقیقات متعدد گزارش شده است (Moradi et al., 2012; Karagiannidis et al., 2011; al., 2011). فایده اصلی میکوریزا برای گیاهان میزبان، گسترش منطقه نفوذ ریشه است. شبکه داخلی مرتبط از هیف‌های خارجی به عنوان اتصال اضافی و سطح جاذب در خاک عمل می‌کنند (Sharma & Adholey, 2004). میسلیوم ریشه خارجی می‌تواند به طور مؤثری جذب عناصر غذایی و در نتیجه رشد و نمو گیاه را افزایش دهد (Lehmann & Rillig, 2015). تغییرات مشاهده شده در صفات ریخت‌شناسی گیاه ممکن است از علائم اثرات سمی فلزات سنگین بر غشاء پلاسمایی و غلظت فلزات سنگین باشد که می‌تواند کاهش عملکرد را در این شرایط توجیه کند. کاهش جذب عناصر غذایی و کاهش رشد گیاه ممکن است به دلیل ممانعت از فعالیت آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز در نتیجه تنش فلزات سنگین باشد که ممکن است سیستم فعالیتی آنتی‌اکسیدانی را تضعیف نموده و در نهایت رشد گیاه را کاهش دهد (Deef, 2007). همچنین تأثیر مستقیم فلزات در متابولیسم سلولی اندام هوایی، ممکن است منجر به کاهش ارتفاع بوته و سایر صفات رشدی در گیاهان تحت تأثیر تنش فلزات سنگین گردد. مطابق با نتایج این مطالعه، زیلاکوف و همکاران (Zheljazkov et al., 2008) مشاهده کردند که عملکرد اندام هوایی بادرشوبیه رشد یافته در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین سرب و کادمیم کاهش یافت. شاه و همکاران (Shah et al., 2011) نیز نتیجه گرفتند که استفاده از کادمیم، شدیداً رشد گیاه را تحت تأثیر قرا می‌دهد. کاهش زیست‌توده در نتیجه تأثیر کادمیم و سرب ممکن است به دلیل اختلال در جذب و انتقال عناصر غذایی و آب در بخش‌های هوایی گیاه باشد (Sudova & Vosatka, 2007).

در این پژوهش، با افزایش سطح کادمیم و سرب، برخی شاخص‌های رشدی گیاه به طور معنی داری کاهش یافت، اما مایه زنی با قارچ میکوریزا در شرایط تنش فلزات سنگین سرب و کادمیوم، منجر به افزایش این شاخص‌ها گردید. بناویدس و همکاران (Benavides et al., 2005) اظهار داشتند که کاهش رشد گیاهان در معرض سرب و کادمیم احتمالاً به دلیل مهار فعالیت‌های متابولیکی مهم نظیر تنش اکسیداتیو، فتوسنتز و تنفس می‌باشد. افزایش وزن خشک اندام هوایی و دیگر صفات رشدی، در ارتباط با جذب بالای فسفر در گیاه و پتانسیل کلونیزاسیون مطلوب ریشه و به تبع آن رشد میسلیوم‌های خارجی و گسترش سیستم ریشه‌ای گیاه می‌باشد. همچنین قارچ میکوریزا، رشد، عملکرد اندام هوایی و عملکرد ریشه ریحان را در غلظت کم کادمیم، سرب و نیکل در مقایسه با شاهد افزایش داد (Prasad et al., 2017). قارچ‌های میکوریزا در ناحیه ریشه گیاهان، تشکیل کلونی داده و به کمک هیف‌های خارجی خود به جذب عناصر از خاک کمک کرده و بدین طریق موجب افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌گردند (Ochoa-Velasco, 2016). در واقع مطابق نتایج حاصل از این تحقیق، قارچ‌های میکوریزایی، با فراهم کردن سطح جذب وسیع‌تری برای انتقال عناصر غذایی موجود در خاک برای ریشه گیاهان، سبب بهبود رشد و تولید و تجمع ماده خشک بیشتری در گیاهان می‌شوند. همچنین با تولید انواع هورمون‌های محرک رشد (اکسین و سایتوکینین) باعث افزایش مقاومت گیاه به عوامل بیماری‌زا و کمک به کاهش تنش‌های محیطی و بهبود رشد گیاه می‌شوند (Kirchner et al., 1993). قارچ‌های میکوریزا رابطه همزیستی با ریشه اغلب گیاهان دارند و از طریق افزایش جذب عناصر غذایی مثل فسفر و برخی عناصر کم‌مصرف، افزایش جذب آب، کاهش تأثیر منفی تنش‌های محیطی و افزایش مقاومت در برابر عوامل بیماری‌زا، سبب بهبود رشد و عملکرد گیاهان میزبان در سیستم‌های کشاورزی پایدار می‌شوند (Sharma, 2002).

محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۵) نشان داد که اثرات ساده و متقابل فلزات سنگین و قارچ میکوریزا بر رنگدانه‌های فتوسنتزی کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل در سطح یک درصد معنی دار بود. اثرات ساده قارچ میکوریزا و فلزات سنگین بر میزان کاروتنوئید در سطح یک درصد معنی دار، ولی اثر متقابل بین آن‌ها بر میزان کاروتنوئید تأثیری نداشت. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۶) بیانگر کمترین میزان کلروفیل a در گیاهان غیرمیکوریزای آلوده به فلز سنگین کادمیم با غلظت ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم بود. همچنین اثر متقابل قارچ میکوریزا و فلزات سنگین نشان داد که در تمام سطوح فلزات سنگین، میزان کلروفیل گیاهان میکوریزی نسبت به گیاهان

بدون میکوریزی اختلاف معنی‌داری داشتند، به‌طوری‌که در تمامی سطوح فلزات سنگین، گیاهان میکوریزی نسبت به گیاهان بدون میکوریزی، دارای میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی بیشتری بودند. با افزایش غلظت سرب و کادمیم، میزان کاروتنوئید کاهش پیدا کرد و کمترین مقدار آن در تیمار کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد (شکل ۳). میزان کاروتنوئید در گیاهان میکوریزی به‌طور معنی‌داری بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزی بود (شکل ۴).
براساس نتایج، با افزایش غلظت فلزات سنگین به‌خصوص کادمیم، مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ کاهش پیدا کرد.

سنتز کلروفیل در گیاهان رشدیافته در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین ثابت شده است (Miransari, 2011). ری و همکاران (Rai et al., 2004)، کاهش کلروفیل a, b و کل را در گیاه ریحان در شرایط تنش فلز کروم گزارش کردند و دلیل اصلی آن اثر سمیت این فلز در بیوسنتز کلروفیل بود. براساس تحقیقی در گیاه شوید، میزان کلروفیل در تیمار کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در گیاهان میکوریزی دو برابر گیاهان غیرمیکوریزی بود (Kapoor & Bhatnagar, 2007).

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر قارچ میکوریزا بر خصوصیات ریخت‌شناسی گیاه بادرشوبیه تحت تنش فلزات سنگین

Table 1- ANOVA for the effects of mycorrhiza on some morphological traits of *Dracocephalum moldavica* under heavy metals stress

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares						
		ارتفاع گیاه Plant height	قطر ساقه Stem diameter	سطح برگ Leaf surface	طول برگ Leaf length	عرض برگ Leaf width	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume
فلزات سنگین Heavy metals (HM)	4	91.52**	2.82**	6895.4**	86.12**	66.17**	52.98*	1.51**
قارچ میکوریزا Mycorrhiza (M)	1	31.51**	6.83**	11584.1**	144.72**	76.73**	19.2**	1.47**
HM×M	4	4.23*	2.02**	1831.6**	22.86**	8.28*	3.06**	0.08**
خطای آزمایشی Error	20							
ضریب تغییرات C.V. (%)		3.41	7.96	3.24	3.22	8.46	4.48	8.33

^{ns}: عدم تفاوت معنی‌دار و * و **: به‌ترتیب نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد
^{ns}: non- significant, * and **: significant at 5% and 1% of probability levels, respectively

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر قارچ میکوریزا بر خصوصیات رویشی گیاه بادرشوبیه تحت تنش فلزات سنگین

Table 2- ANOVA for the effects of mycorrhiza on some growth characteristics of *Dracocephalum moldavica* under heavy metals stress

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares				
		وزن تر شاخساره Biomass fresh weight	وزن خشک شاخساره Biomass dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	تعداد ساقه‌های جانبی Number of branches
فلزات سنگین Heavy metals (HM)	4	25.5**	3.93*	1.23**	0.04**	17.04**
قارچ میکوریزا Mycorrhiza (M)	1	104.2**	1.54**	1.16**	0.03**	7.16*
HM × M	4	3.27**	0.31**	0.07**	0.0028*	0.5ns
خطای آزمایشی Error	20					
ضریب تغییرات C.V. (%)		5.45	9.78	9.07	9.42	5.70

^{ns}: عدم تفاوت معنی‌دار و * و **: به‌ترتیب نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد
^{ns}: non- significant, * and **: significant at 5% and 1% of probability levels, respectively

جدول ۳- اثر متقابل قارچ میکوریزا بر خصوصیات ریخت‌شناسی گیاه بادرشوبیه تحت تنش فلزات سنگین

Table 3- The Interaction effect of mycorrhiza on some morphological traits of *Dracocephalum moldavica* under heavy metals stress (HM0: control; HM1: Pb 150 mg.kg⁻¹; HM2: Pb 300 mg.kg⁻¹; HM3: Cd 40 mg.kg⁻¹; HM4: Cd 80 mg.kg⁻¹)

قارچ میکوریزا Mycorrhiza fungus	فلزات سنگین Heavy metals (mg.kg ⁻¹)	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	قطر ساقه Stem diameter (mm)	سطح برگ Leaf surface (cm ²)	طول برگ Leaf length (mm)	عرض برگ Leaf width (mm)	طول ریشه Root length (cm)	حجم ریشه Root volume (ml)
عدم مایه‌زنی با قارچ مایکوریزا Non mycorrhiza	H0	34.4b*	4.67ab	345.17b	38.64b	22.45bc	16.56b	1.72b
	HM1	32.83c	4.32b	309.14d	34.61d	20.56bcd	17.5ab	1.47c
	HM2	28.67d	1.67d	293.37d	26.91e	15.52ef	14.28c	1.27c
	HM3	26.65e	4.23b	240.15e	32.83d	17.69de	13.1d	1.03d
	HM4	25.5e	3.45c	189.59f	26.84e	12.91f	10.67e	0.68e
مایه‌زنی با قارچ مایکوریزا Mycorrhiza	H0	35.94a	5.21a	362.62a	40.58a	23.8a	18.67a	2.26a
	HM1	34.05bc	4.43b	338.4b	36.89c	22.89ab	18.17a	2.14a
	HM2	33.16c	4.66ab	329.53c	37.52bc	22.76ab	17.82ab	1.86b
	HM3	29.75d	4.54ab	307.53d	34.43d	19.63cd	13.83cd	1.35c
	HM4	26.12e	4.1b	221.12e	32.69d	16.04e	11.17e	0.78e

* اعداد دارای حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نیستند.

* Numbers with the same letters in each column are not significant at the 5% of probability level based on Duncan's multiple range test.

جدول ۴- برهم‌کنش اثر قارچ میکوریزا بر خصوصیات رویشی گیاه بادرشوبیه تحت تنش فلزات سنگین

Table 4- The interaction effect of mycorrhiza on some growth characteristics of *Dracocephalum moldavica* under heavy metals stress (HM0: control; HM1: Pb 150 mg.kg⁻¹; HM2: Pb 300 mg.kg⁻¹; HM3: Cd 40 mg.kg⁻¹; HM4: Cd 80 mg.kg⁻¹)

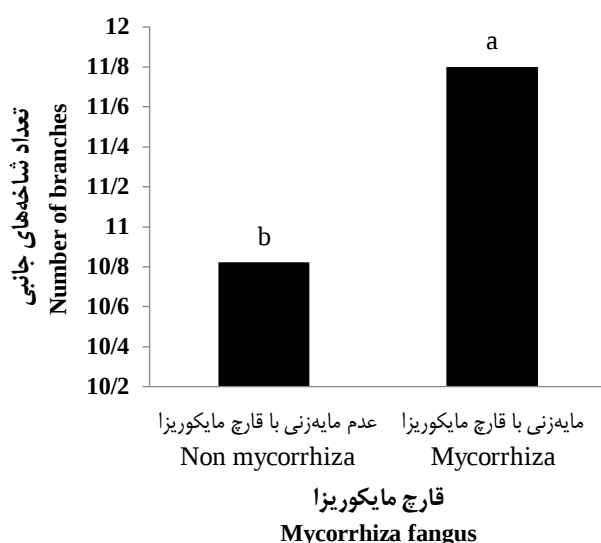
قارچ میکوریزا Mycorrhiza fungus	فلزات سنگین Heavy metals (mg.kg ⁻¹)	وزن تر شاخساره Shoot fresh weight (g)	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight (g)	وزن تر ریشه Root fresh weight (g)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g)
عدم مایه‌زنی با قارچ مایکوریزا Non mycorrhiza	H0	15.32b*	2.6c	1.54b	0.29b
	HM1	13.43cd	2.58c	1.32c	0.22c
	HM2	14.03c	2.29cd	1.14c	0.24c
	HM3	8.52e	1.71e	0.92d	0.16d
	HM4	4.53g	1.08f	0.61e	0.12e
مایه‌زنی با قارچ میکوریزا Mycorrhiza	H0	16.72a	3.82a	2.02a	0.36a
	HM1	13.73cd	3.01b	1.91a	0.37a
	HM2	15.3b	2.42cd	1.67b	0.28b
	HM3	12.75d	2.11d	1.21c	0.23c
	HM4	6.53f	1.16f	0.7e	0.13de

* اعداد دارای حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نیستند.

* Numbers with the same letters in each column are not significant at the 5% of probability level based on Duncan's multiple range test.

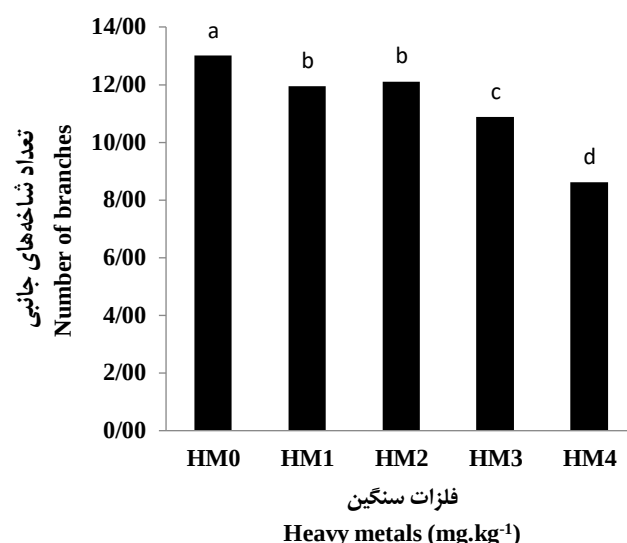
هیدروکسیل و ترکیبات حاوی نیتروژن دارد، در نتیجه این عنصر، بسیاری از آنزیم‌های مهم را غیرفعال کرده که منجر به اختلال در فتوسنتز، تنفس و سایر فرآیندهای متابولیک در گیاه می‌گردد (Testiati et al., 2012). افزایش سطح کادمیم، تولید رادیکال‌های سوپراکسید را افزایش و در نتیجه فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نیز افزایش می‌یابد (Khan, 2001). فلزات سنگین به‌عنوان یک عنصر سمی در سیتوپلاسم، می‌تواند مانع فعالیت اندامک‌های درون سلولی شود و با اختلال در سنتز رنگیزه‌های حفاظتی (کاروتنوئیدها)، سیستم فتوسنتزی به‌خوبی محافظت نمی‌شود (Guo et al., 2007).

کاهش محتوای کلروفیل ممکن است در نتیجه کاهش سنتز کلروفیل، با افزایش احتمالی آنزیم کلروفیلاز، اختلال در غشاء کلروپلاست و غیرفعال‌سازی انتقال الکترون فتوسیستم II باشد. منیزیم از عناصر کلیدی در بیوسنتز کلروفیل می‌باشد که فلزات سنگین مانند کادمیم در جذب این عنصر مهم اختلال ایجاد کند. همچنین فلزات سنگین ممکن است باعث اختلال در سنتز زیستی کلروفیل گردند. مرکز واکنش فتوسیستم II توسط کادمیم تحت تأثیر قرار می‌گیرد و فعالیت آنزیمی و ساختار پروتئینی توسط برهم‌کنش با گروه عاملی SH پروتئین مختل می‌گردد (Carrenho et al., 2007). کادمیم میل ترکیبی شدیدی با گروه‌های سولفیدریل،



شکل ۲- اثر ساده قارچ میکوریزا بر تعداد شاخه‌های جانبی بادرشوبیه
Figure 2- The effect of mycorrhiza on the number of branches in *Dracocephalum moldavica* (DMRT, $p \leq 0.05$)

بدون میکوریزی، دارای میزان اسانس بیشتری بودند. بیشترین میزان اسانس بادرشوبیه در گیاهان میکوریزی آلوده به سرب ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک حاصل گردید که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. کمترین میزان اسانس نیز در گیاهان غیرمیکوریزی آلوده به کادمیم ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده گردید (شکل ۵).



شکل ۱- اثر ساده فلزهای سنگین بر تعداد شاخه‌های جانبی بادرشوبیه
Figure 1- The effect of heavy metals on the number of branches in *Dracocephalum moldavica* (DMRT, $p \leq 0.05$)

درصد اسانس

اثر متقابل قارچ میکوریزا و فلزات سنگین نشان داد که در تمام سطوح فلزهای سنگین، میزان اسانس گیاهان میکوریزی نسبت به گیاهان بدون میکوریزی اختلاف معنی‌داری داشتند، به‌طوری‌که در تمامی سطوح فلزهای سنگین، گیاهان میکوریزی نسبت به گیاهان

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر قارچ میکوریزا و فلزهای سنگین بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه بادرشوبیه

Table 5- ANOVA for the effects of mycorrhiza on the photosynthetic pigments of *Dracocephalum moldavica* under heavy metals stress

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares			
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid
فلزات سنگین Heavy metals (HM)	4	45.25**	9.43**	98.12**	13.53**
قارچ میکوریزا Mycorrhiza (M)	1	36.37**	9.25**	92.64**	6.8**
HM × M	4	0.89**	0.39**	1.41**	0.14ns
خطای آزمایشی Error	20				
ضریب تغییرات C.V. (%)		3.83	4.23	2.07	3.96

^{ns}: عدم تفاوت معنی‌دار و * و **: به‌ترتیب نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد
^{ns}: non- significant, * and **: significant at 5% and 1% of probability levels, respectively

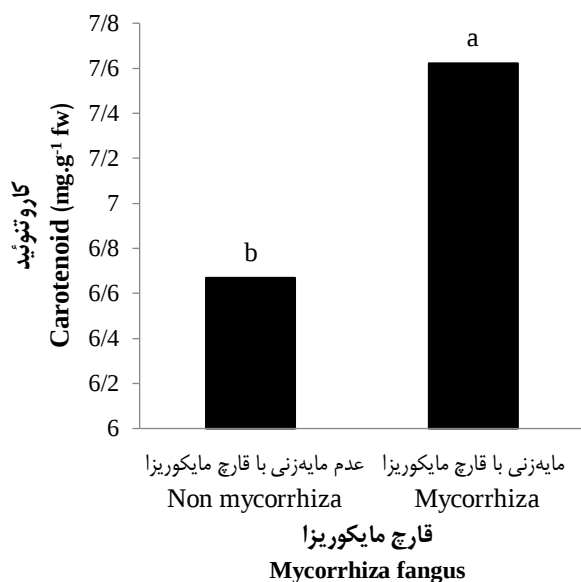
جدول ۶- برهم‌کنش اثر قارچ میکوریزا بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه بادرشوبیه تحت تنش فلزهای سنگین

Table 6- The interaction effect of mycorrhiza on photosynthetic pigments of *Dracocephalum moldavica* under heavy metals stress (HM0: control; HM1: Pb 150 mg.kg⁻¹; HM2: Pb 300 mg.kg⁻¹; HM3: Cd 40 mg.kg⁻¹; HM4: Cd 80 mg.kg⁻¹)

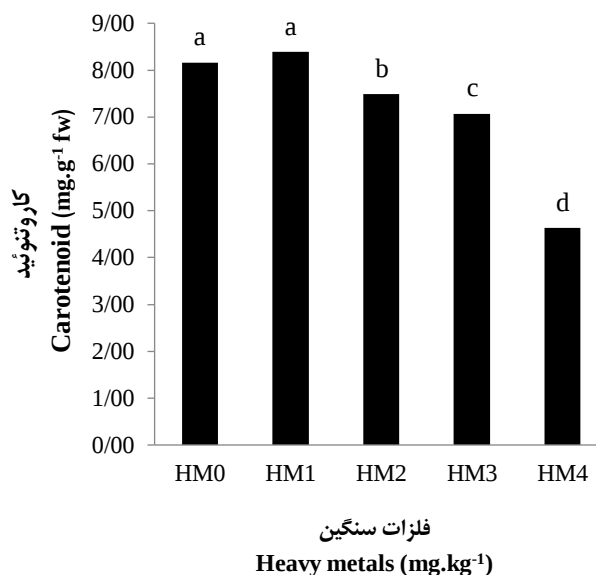
قارچ میکوریزا Mycorrhiza fungus	فلزات سنگین Heavy metals (mg.kg ⁻¹)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.g ⁻¹ fw)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.g ⁻¹ fw)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg.g ⁻¹ fw)
عدم مایه‌زنی با قارچ میکوریزا Non mycorrhiza	HM0	11.7cd*	4.9e	16.76d
	HM1	12.23cd	5.47d	17.69c
	HM2	11.53d	5.16d	17.06d
	HM3	9.41e	4.27f	13.53e
	HM4	5.62g	2.34h	8.42g
مایه‌زنی با قارچ میکوریزا Mycorrhiza	HM0	14.7a	6.78a	21.39a
	HM1	13.43b	6.36b	21.27a
	HM2	13.53b	5.93c	19.53b
	HM3	12.36c	5.39d	17.82c
	HM4	7.48f	3.54g	11.02f

* اعداد دارای حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نیستند.

* Numbers with the same letters in each column are not significant at the 5% of probability level based on Duncan's multiple range test.



شکل ۴- اثر ساده قارچ میکوریزا بر مقدار کاروتنوئید بادرشوبیه
Figure 4- The effect of mycorrhiza on the carotenoid content in *Dracocephalum moldavica* (DMRT, $p \leq 0.05$)



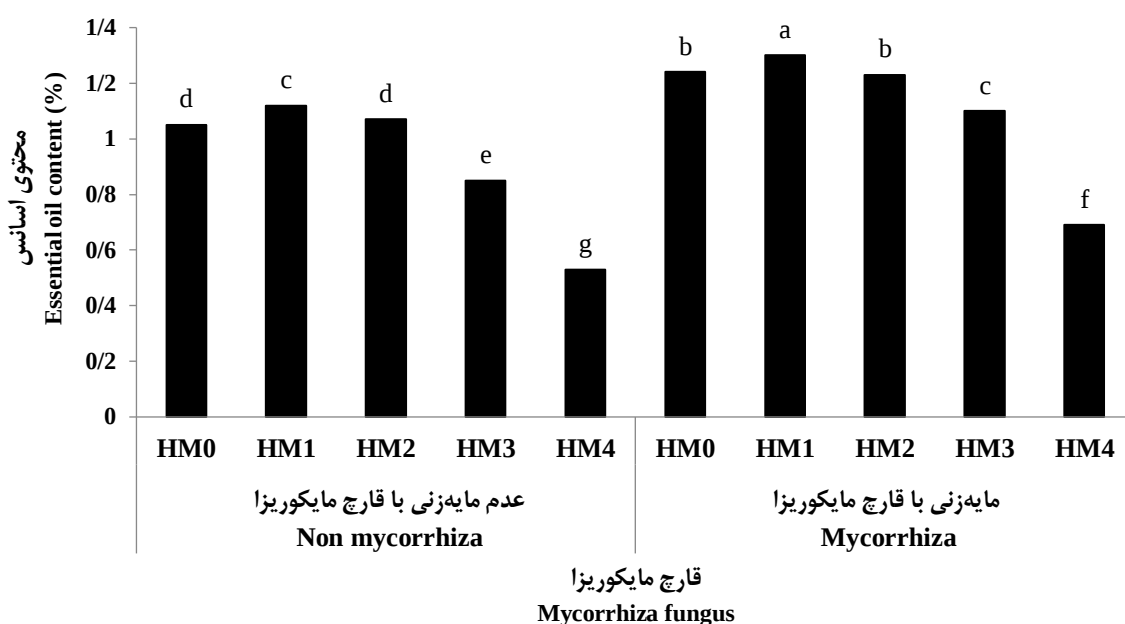
شکل ۳- اثر ساده فلزهای سنگین بر مقدار کاروتنوئید بادرشوبیه
Figure 3- The effect of heavy metals on the carotenoid content in *Dracocephalum moldavica* (DMRT, $p \leq 0.05$)

اثر دو گونه قارچ میکوریزا بر گیاهان دارویی شوید و زنیان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که هر دو گونه میکوریزا، رشد گیاهان را افزایش داد و گیاهان میکوریزی میزان فسفر و غلظت اسانس بیشتری نسبت به گیاهان غیرمیکوریزی داشتند. از این رو، به نظر می‌رسد که میکوریزا از طریق زیست‌فراهمی عناصر، برقراری تعادل سطوح و مواد غذایی خاک و بهبود تغذیه معدنی گیاه، تأثیر مثبتی بر مسیرهای بیوسنتزی متابولیت‌های ثانویه داشته و از این طریق در میزان مواد مؤثره تأثیرگذار بوده است.

سنتز اسانس در غده‌های اپیدرمی تابع تأمین مداوم کربن فتوسنتزی است و اختلال در فتوسنتز و تغذیه کربن توسط فلزهای سنگین می‌تواند باعث کاهش مقدار اسانس شود. کاربرد قارچ میکوریزا باعث افزایش فتوسنتز گیاه بادرشوبیه در شرایط تنش فلزات سنگین شد و منجر به افزایش متابولیت‌های اولیه و محتوای ترکیبات ثانویه مانند اسانس در این شرایط گردید. اثرات مثبت قارچ میکوریزا بر اسانس گونه‌های مختلف گیاهان تیره نعناع گزارش شده است (Gupta et al., 2010). کاپور و همکاران (Kapoor et al., 2002)

دارویی است. کاپور و بهاتناگار (Kapoor & Bhatnagar, 2007) در مطالعات خود، فسفر را عامل تأثیرگذار در رشد رویشی گیاه عنوان نمودند، همچنین از فسفر معدنی به‌عنوان عامل تأثیرگذار در بیوسنتز اسانس یاد می‌کنند. بنابراین به نظر می‌رسد که میکوریزا تأثیر مثبتی بر مسیرهای بیوسنتزی متابولیت‌های ثانویه داشته است و از این طریق در میزان مواد موثره تولیدی، تأثیرگذار بوده است و احتمال دارد که فراهمی و تعادل عناصر غذایی موجود، واکنش‌های آنزیمی و عوامل دخیل در هدایت این مسیرهای بیوسنتزی را در گیاه تحت تأثیر قرار دهد.

طبق نتایج حاصل از این تحقیق پیشنهاد شد که در خاک‌های فقیر، با استفاده از قارچ میکوریزا، می‌توان با کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی، عملکرد مناسبی نیز داشت. همچنین بیان کردند که میکوریزا ممکن است که باعث بهبود کیفیت اسانس نیز گردد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که درصد اسانس بادرشوبیه در گیاهان میکوریزی افزایش یافت. همزیستی قارچ‌های میکوریزا با گیاهان دارویی نه تنها رشد آن‌ها را بهبود می‌بخشد، بلکه تولید ترکیبات دارویی را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین تحقیقات در زمینه بهبود کیفیت و کمیت داروهای تولیدشده از گیاهان دارویی، در زمان نسبتاً کوتاه با هزینه پایین توسط قارچ میکوریزا، نیاز امروز تولیدکنندگان گیاهان



شکل ۵- برهم‌کنش اثر قارچ میکوریزا بر محتوای اسانس گیاه بادرشوبیه تحت تنش فلزهای سنگین (HM0: شاهد، HM1: سرب ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، HM2: سرب ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، HM3: کادمیوم ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، HM4: کادمیوم ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Figure 5- The interaction effect of mycorrhiza on the essential oil content of *Dracocephalum moldavica* under heavy metals stress

(HM0: control; HM1: Pb 150 mg.kg⁻¹; HM2: Pb 300 mg.kg⁻¹; HM3: Cd 40 mg.kg⁻¹; HM4: Cd 80 mg.kg⁻¹) (DMRT, p≤0.05)

مانند قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار به‌منظور تأمین بخشی از نیازهای تغذیه‌ای گیاهان و بهبود شرایط فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌ها در زمینه تولید گیاهان دارویی، اقدامات مهم و مؤثری می‌باشد. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک، میزان رشد و عملکرد گیاه بادرشوبیه کاهش یافت، اما مایه‌زنی گیاهان با قارچ میکوریزا باعث افزایش تحمل این گیاه در شرایط تنش فلزات سنگین (به‌جز کادمیوم ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) گردید و رشد

نتیجه‌گیری

پایداری در تولید گیاهان دارویی و بهره‌گیری از سیستم‌های کشاورزی پایدار تا حد زیادی به استفاده مجدد از نهاده‌های طبیعی در سیستم تولید و متعاقباً آن افزایش کارایی نهاده‌ها بستگی دارد. بنابراین شناسایی راهبرد عملی و مؤثر در افزایش بازده کودهای شیمیایی و کاهش تلفات آن‌ها به‌منظور مهار آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌ویژه آلودگی فلزات سنگین، بهره‌گیری از ریزجانداران و موجودات خاکزی

نقش بسیار مهمی در تحریک رشد گیاه در شرایط تنش‌های محیطی از جمله تنش فلزات سنگین سرب و کادمیم داشته باشد و استفاده از این عوامل می‌تواند به‌عنوان راهکاری مدیریتی، در چنین شرایطی در نظر گرفته شود. قارچ میکوریزا علاوه بر افزایش میزان رشد و زیست‌توده گیاه، باعث افزایش ماده مؤثره این گیاه نیز گردید که از اهداف اصلی در تولید گیاهان دارویی می‌باشند.

و عملکرد را در چنین شرایطی بهبود بخشید. کاربرد غلظت بالای کادمیم (۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم) اثر منفی روی عملکرد گیاه داشت، به‌طوری که در این غلظت در گیاهان میکوریزی و عدم میکوریزی شاخص‌های رشدی، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و اسانس گیاه شدیداً کاهش پیدا کرد و کاربرد قارچ میکوریزا در این تیمار بی‌تأثیر بود. استفاده از ریزموجودات مفید خاک مانند قارچ میکوریزا می‌تواند

References

- Benavides, M.P., Gallego, S.M., & Tomaro, M.L. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 21-34.
- Borna, F., Omidbaigi, R., & Sefidkon, F. (2007). The effect of sowing dates on growth, yield and essential oil content of *Dracocephalum moldavica* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 23(3), 307-314. (in Persian with English abstract)
- British Pharmacopoeia. (1980). H.M.S. Office. 2, London, 109-110 pp.
- Carrenho, R., Trufem, S.F.B., Bononi, V.L.R., & Silva, E.S. (2007). The effect of different soil properties on arbuscular mycorrhizal of peanuts, sorghum and maize. *Acta Botanica Brasiliica*, 21, 723-730. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062007000300018>
- Deef, H.E. (2007). Copper treatments and their effects on growth, carbohydrates, minerals and essential oils contents of *Rosmarinus officinalis* L. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(3), 322-328.
- Domokos, J., Peredi, J., & Halasz-Zelnik, K. (1994). Characterization of seed oils of dragonhead (*Dracocephalum moldavica*) and catnip (*Nepeta cataria* var. *citriodora* Balb.). *Industrial Crops and Products*, 3, 91-94. [https://doi.org/10.1016/0926-6690\(94\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0926-6690(94)90081-7)
- FAO & UNEP, (2021). Global Assessment of Soil Pollution: Report. Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>.
- Galambosi, B., Holm, Y., & Hiltunen, R. (1989). The effect of some agrotechnical factors on the herb yield and volatile oil of dragonhead. *Journal of Essential Oil Research*, 1, 287-292. <https://doi.org/10.1080/10412905.1989.9697800>
- Garbisu, C., & Alkorta, I. (2001). Phytoextraction: A costeffective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology Journal*, 77, 229-236. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(00\)00108-5](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00108-5)
- Guo, T.R., Zhang, G.P., & Zhang, Y.H. (2007). Physiological changes in barely plants under combined toxicity of aluminium, copper and cadmium. *Coloids and Surface. B: Biointerfaces*, 57, 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.01.013>
- Gupta, A.P., Dhar, J.K., Sharma, G., Ram, G., & Bedi, Y.S. (2010). Volatile (As and Hg) and non-volatile (Pb and Cd) toxic heavy metals analysis in rhizome of *Zingiber officinale* collected from different locations of North Western Himalayas by Atomic Absorption Spectroscopy. *Food Chemical Toxicology Journal*, 48(10), 2966-2971. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.07.034>
- Kapoor, R., & Bhatnagar, A.K. (2007). Attenuation of cadmium toxicity in mycorrhizal celery (*Apium graveolens* L.). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(8), 1083-1089. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9337-8>
- Kapoor, R., Giri, B., & Mukerji, K.G. (2002). *Glomus macrocarpum*: A potential bioinoculant to improve essential oil quality and concentration in dill (*Anethum graveolens* L.) and carum (*Trachyspermum ammi* Sprague). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 18(5), 459-463. <https://doi.org/10.1023/A:1015522100497>
- Karagiannidis, N., Thomidis, T., & Filotheou, E.P. (2012). Effects of *Glomus lamellosum* on growth, essential oil production and nutrients uptake in selected medicinal plants. *Journal of Agricultural Science*, 4(3), 137-144. <http://doi.org/10.5539/jas.v4n3p137>
- Karthikeyan, B., Jaleel, C.A., Changxing, Z., Joe, M.M., Srimannarayan, J., & Deiveekasundaram, M. (2008). The effect of AM fungi and phosphorous level on the biomass yield and ajmalicine production in *Catharanthus roseus*. *EurAsian Journal of BioSciences*, 2(1), 26-33.
- Karthikeyan, B., Joe, M.M., & Cheruth, A.J. (2009). Response of some medicinal plants to vesicular arbuscular mycorrhizal inoculations. *Journal of Scientific Research*, 1(2), 381-386.
- Khan, A.G. (2001). Relationships between chromium biomagnification ratio, accumulation factor and mycorrhizae in plants growing on tannery effluent- polluted soil. *Environment International*, 26, 417-423. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00022-8)

18. Kirchner, M.J., Wollum, A.G., & King, L.D. (1993). Soil microbial population and activities in reduced chemical input agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 1289-1295. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700050021x>
19. Lehmann, A., & Rillig, M.C. (2015). Arbuscular mycorrhizal contribution to copper, manganese and iron nutrient concentrations in crops a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 81, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.013>
20. Lichtenthaler, H.K., & Wellburn, A.R. (1983). *Determinations of Total Carotenoids and Chlorophylls a and b of Leaf Extracts in Different Solvents*. Portland Press Limited, London. 603, 591-592.
21. Malik, A.A., Suryapani, S., & Ahmad, J. (2011). Chemical vs. organic cultivation of medicinal and aromatic plants: The choice is clear. *International Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 1(1), 5-13.
22. Miransari, M. (2011). Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals. *Biotechnology Advances*, 29(6), 645-653. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.04.006>
23. Mishra, S., Srivastava, S., & Tripathi, P.D. (2006). Phytochelatin synthesis and response of antioxidant during cadmium stress in *Baccopa monnieri* L. *Plant Physiology*, 44, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2006.01.007>
24. Moradi, R., Rezvani Moghaddam, P., Nassiri Mahallati, M., & Nezhadali, A. (2011). Effects of organic and biological fertilizers on fruit yield and essential oil of sweet fennel (*Foeniculum vulgare* var. Duice). *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(2), 546-553. <http://doi.org/10.5424/sjar/20110902-190-10>
25. Mukerji, K.G., & Chamola, B.P. (2003). *Compendium of Mycorrhizal Research*. A.P.H. Publisher, New Delhi, 310.
26. Smith, S.E., & Read, D.J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*, 3rd ed. Academic Press, San Diego, USA.
27. Ochoa-Velasco, C.E., Valadez-Blanco, R., SalasCoronado, R., Sustaita-Rivera, F., HernándezCarlos, B., García-Ortega, S., & Santos-Sánchez, N.F. (2016). Effect of nitrogen fertilization and *Bacillus licheniformis* biofertilizer addition on the antioxidants compounds and antioxidant activity of greenhouse cultivated tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L. var. Sheva). *Scientia Horticulturae*, 201, 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.02.015>
28. Prasad, R., Bhola, D., Akdi, K., Cruz, C., KVSS, S., Tuteja, N., & Varma, A. (2017). *Introduction to mycorrhiza: Historical development*. In *Mycorrhiza - Function, Diversity, State of the Art: Fourth Edition*. pp. 1-7. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53064-2_1
29. Rai, V., Vajpayee, P., Singh, S.N., & Mehrotra, S. (2004). Effect of chromium accumulation on photosynthetic pigments, oxidative stress defense system, nitrate reduction, proline level and eugenol content of *Ocimum tenuiflorum* L. *Plant Science*, 167(5), 1159-1169. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.06.016>
30. Shah, F.R., Ahmad, N., Masood, K.R., Zahid, D.M., & Zubair, M. (2011). Response of *Eucalyptus camaldulensis* to exogenous application of cadmium and chromium. *Pakistan Journal of Botany*, 43(1), 181-189.
31. Sharma, A.K. (2002). Biofertilizers for sustainable agriculture. *India Agrobios*, 12, 319-324
32. Sharma, M.P., & Adholey, A. (2004). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization on the post vitro growth and yield of micropropagated strawberry grown in a sandy loam soil. *Canadian Journal of Botany*, 82(3), 322-328. <https://doi.org/10.1139/b04-007>
33. Sudova, R., & Vosatka, M. (2007). Differences in the effects of three arbuscular mycorrhizal fungal strains on P and Pb accumulation by maize plants. *Plant Soil*, 296, 77-83. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9291-8>
34. Tabrizi, L., Mohammadi, S., Delshad, M., & Moteshare Zadeh, B. (2015). The effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and yield of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) under lead and cadmium stress. *Environmental Sciences*, 13(2), 37-48. (in Persian with English abstract)
35. Testiati, E., Parinet, J., Massiani, C., Laffont-Schwob, I., Rabier, J., Pfeifer, H.R., & Prudent, P. (2012). Trace metal and metalloid contamination levels in soils and in two native plant species of a former industrial site: Evaluation of the phytostabilization potential. *Journal of Hazardous Materials*, 249, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.12.039>
36. Veresoglou, S.D., Chen, B., & Rillig, M.C. (2012). Arbuscular mycorrhiza and soil nitrogen cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 46, 53-62. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.018>
37. Whitfield, L., Richards A.J., & Rimmer, D.L. (2004). Relationships between soil heavy metal concentration and mycorrhizal colonisation in *Thymus polytrichus* in northern England. *Mycorrhiza Journal*, 14(1), 55-62. <https://doi.org/10.1007/s00572-003-0268-z>
38. Zheljaskov, V.D., Jeliaskova, E.A., Kovacheva, N., & Dzhurmanski, A. (2008). Metal uptake by medicinal plant species grown in soils contaminated by a smelter. *Environmental and Experimental Botany*, 64(3), 207-216. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.07.003>