

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

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.

Material and Methods

An experiment was conducted to study the effect of AM fungi on growth characteristics, 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) and cadmium (0, 40 and 80 mg/kg) which were arranged in factorial based on completely randomized design with 4 replications. 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 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 that of 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 nonmycorrhizal 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.

Conclusion

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, Medicinal plant, Sustainable agriculture, Environmental stresses.

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

مهدی مرادی^{۱*}، حسین نستری نصرآبادی^۲، محمدناصر مودودی^۳ و وحید شمس‌آبادی^۴

^{۱،۲} استادیاران، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی تربت جام، خراسان رضوی، ایران

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

^۴ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی تربت جام

چکیده

گیاهان همواره در معرض تنش‌های زنده و غیر زنده محیطی قرار می‌گیرند که اثرات منفی بر روی 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. بادرشوبیه از گیاهان دارویی مهم می‌باشد که کاربرد وسیعی در صنایع دارویی، غذایی، بهداشتی و آرایشی دارد. تحقیق حاضر با هدف بررسی تاثیر قارچ *مایکوریزا آربوسکولار* بر خصوصیات رشدی، محتوی رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان اسانس گیاه بادرشوبیه تحت تنش فلزات سنگین سرب و کادمیم به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار در شرایط گلخانه انجام گرفت. فاکتور اول شامل فلزات سنگین در پنج سطح (شاهد (بدون آلودگی)، سرب ۱۵۰، سرب ۳۰۰، کادمیم ۴۰ و کادمیم ۸۰ میلی‌گرم 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 به ویژه کادمیم در خاک، اغلب صفات رشدی، محتوی رنگیزه‌های فتوسنتزی به طور 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 *مایکوریزا* آلوده به سرب ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک حاصل گردید. گیاهان *مایکوریزا* درصد اسانس بیشتری را نسبت به گیاهان غیر *مایکوریزا* نشان دادند. با توجه به افزایش پاسخ‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و همچنین افزایش موادموثره گیاه که از اهداف دارویی در این گیاه محسوب می‌شود، استفاده از قارچ *مایکوریزا* برای کشت و کار تجاری گیاه بادرشوبیه در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین سرب و کادمیم توصیه می‌شود.

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

مقدمه

آلودگی خاک همچنان یک مشکل جهانی است (FAO & UNEP, 2021). تولید و مصرف بی‌رویه نهاده‌های شیمیایی در کشاورزی رایج در چند دهه اخیر مشکلات زیست‌محیطی بسیاری را سبب گردیده است که در این میان به آلودگی منابع آب و خاک، کاهش کیفیت محصولات غذایی و برهم خوردن تعادل زیستی در محیط خاک می‌توان 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 است که باعث بروز خطرات جدی در محیط زیست 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 باعث ایجاد اثرات سمی مختلف در گیاهان نظیر کاهش رشد، کاهش

محتوی کلروفیل و فتوستنتز، مهار فعالیت‌های آنزیمی، پراکسیداسیون غشای 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 بوم نظام‌های کشاورزی با هدف کاهش قابل‌ملاحظه 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 بویژه در گیاهان دارویی دارند (Tabrizi et al., 2015). قارچ‌های میکوریزا، از با اهمیت‌ترین میکروارگانیسم‌های موجود در اغلب خاک‌های تخریب‌نشده می‌باشند. به‌طوری‌که بر طبق تخمین‌های موجود حدود ۷۰ درصد از توده زنده جامعه میکروبی خاک‌ها را میسلیوم 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, 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 بوم نظام‌های زراعی هستند، به‌طوری‌که بالقوه سبب بهبود کیفیت فیزیکی 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 آوبشن (*Thymus polytrichus*) تحت تنش فلزات سنگین شد. در تحقیقی واکنش قارچ میکوریزا گونه *Glomus fasciculatum* روی ریحان (*Ocimum basilicum*)، پروانوش (*Catharanthus roseus*) و علف لیمو (*Cymbopogon winterianus*) انجام شد، نشان داد که در تولید ماده خشک، میزان پروتئین و میزان کلروفیل کل در گیاهان تلقیح شده با میکوریزا افزایش صورت گرفته است (Karthikeyan, 2009). تلقیح میکوریزایی نه تنها رشد گیاهان دارویی را تسریع می‌کنند بلکه در تولید و کیفیت مواد موثره 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, 2008).

بادرشبویه با نام علمی (*Dracocephalum moldavica* L.) گیاهی علفی، یکساله متعلق به تیره نعناع (Lamiaceae) می‌باشد. منشأ این گیاه، جنوب سبیری و سرایشب‌های هیمالیا گزارش شده است و به طور طبیعی در مناطق معتدل اروپا و آسیا رشد می‌کند (Galambosi et al., 1989; Domokos et al., 1994). ماده موثره 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. بر اساس 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 *مایکوریزا*، نقش آن بر تعدیل آثار منفی تنش فلزات سنگین بر شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیکی و میزان اسانس گیاه بادرشوبیه مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و شرایط رشدی

به منظور بررسی تاثیر مایه‌زنی قارچ *مایکوریزا* بر شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیکی و میزان اسانس گیاه بادرشوبیه آزمایشی به صورت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی تربیت جام به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۱۰ تیمار و ۴ تکرار اجرا شد. عامل اول فلزات سنگین در پنج سطح شامل شاهد (بدون آلودگی)، سرب ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به شکل $Pb(NO_3)_2$ ، کادمیم ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به شکل $CdCl_2$ و عامل دوم قارچ *مایکوریزا* در دو سطح بدون مایه‌زنی و با مایه‌زنی بودند. مقادیر نیترات سرب و کادمیم کلرید بر اساس مقدار خاک یکسان برای هر گلدان (۵ کیلوگرم) بر اساس تیمارهای مورد آزمایش محاسبه و به صورت محلول‌پاشی به خاک گلدان‌ها به صورت لایه لایه اضافه شد و پس از سه ماه نگهداری خاک در نایلون‌های مخصوص به منظور قابل جذب شدن فلزات سنگین (دوره انکوباسیون^۱) کاشت بذرها صورت گرفت. در طول دوره انکوباسیون رطوبت گلدان‌ها در حدود ظرفیت زراعی حفظ شد بدین ترتیب که با انجام عمل آبیاری فلزات سنگین مورد استفاده، به عمق خاک رفته و با عمل تبخیر به سطح خاک انتقال یابند و در کل خاک به طور یکنواخت توزیع شوند. در داخل هر گلدان (سطح شماره ۳/۵) به میزان ۳۰ گرم قارچ *مایکوریزا* مورد استفاده قرار گرفت و سپس بذرها در عمق حدود ۱ سانتی‌متری سطح خاک کشت شدند. پس از خروج گیاهچه‌ها درون هر گلدان در مرحله چهار برگی ۳ بوته نگهداری شد. قارچ *مایکوریزا* از موسسه‌ی تحقیقات خاک و آب کشور که شامل سه گونه *Glomus mosseae*، *G. intraradice* و *G. etunicatum* به نسبت مساوی بودند تهیه شد. در پایان آزمایش بر اساس 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، پارامترهای 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 سطح برگ استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری وزن تر و خشک، گیاه از گلدان بیرون آورده شد و به دو قسمت بخش هوایی و ریشه تقسیم شد و وزن تر ریشه و شاخساره با

¹ Incubation

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 بوسیله ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم ثبت گردید.

سنجش محتوی رنگیزه‌های فتوسنتزی

برای اندازه‌گیری کلروفیل و کاروتنوئید ۱۲۵ میلی‌گرم از بافت تازه گیاهی با ۲/۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ در صد ساییده شد، سپس به مدت ۶ 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 بر اساس میلی‌گرم در گرم وزن تازه محاسبه شد (Lichtenthaler and Wellburn, 1983).

استخراج و تعیین درصد اسانس

برای تعیین مقدار اسانس از سیستم تقطیر با آب استفاده شد. بدین منظور برای هر تکرار ۱۵ گرم از برگ‌های خشک شده گیاه توزین و اسانس‌گیری با استفاده از دستگاه کلونجر^۲ (مدل فارماکوپه بریتانیا) به مدت ۴ ساعت انجام گرفت و میزان اسانس بر اساس 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 ۵ 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 تاثیر معنی‌داری بر تعداد ساقه‌های جانبی نداشت. بیشترین و کمترین ارتفاع گیاه به ترتیب در گیاهان مایه‌زنی شده 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 غیرمیکوریزایی به طور 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 غیرمیکوریزایی آلوده به فلز کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. در تمام سطوح فلزات

² - Clevenger-type apparatus

سنگین سرب و کادمیم گیاهان مایه‌زنی شده با قارچ *مایکوریزا* نسبت به گیاهان غیر *مایکوریزا* از سطح برگ بیشتری برخوردار بودند (جدول ۳). بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیشترین و کمترین وزن تر و خشک شاخساره و ریشه به ترتیب در گیاهان مایه‌زنی شده با قارچ *مایکوریزا* و بدون فلزهای سنگین و گیاهان عدم مایه‌زنی با قارچ *مایکوریزا* و آلوده به فلز سنگین کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. در تمام سطوح فلزهای سنگین سرب و کادمیم (به جز کادمیم ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) گیاهان مایه‌زنی نشده با قارچ‌های *مایکوریزا* وزن تر و خشک شاخساره و ریشه کمتری نسبت به گیاهان مایه‌زنی شده با قارچ *مایکوریزا* بودند و در گیاهان *مایکوریزا* و عدم *مایکوریزا* آلوده به فلز سنگین کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۴). با افزایش غلظت سرب و کادمیم تعداد ساقه‌های جانبی در گیاه کاهش پیدا کرد و کمترین تعداد آن در تیمار کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد (شکل ۱). تعداد ساقه‌های جانبی در گیاهان *مایکوریزا* به‌طور معنی‌داری بیشتر از گیاهان غیر *مایکوریزا* بود (شکل ۲). به‌طور کلی در سطوح مختلف فلزات سنگین و مایه‌زنی قارچ *مایکوریزا* نشان داد که با افزایش غلظت فلز سنگین در خاک، صفات رشدی در گیاه بادرشجویه کاهش یافت. همچنین اثرات منفی فلز کادمیم بر رشد گیاه بسیار بیشتر از فلز سرب بود به‌طوری که گیاهان غیر *مایکوریزا* آلوده به کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، دارای کمترین شاخص‌های رشدی بودند. تأثیر مثبت این قارچ بر گیاهان مختلف در تحقیقات متعدد گزارش شده است (Moradi et al., 2011; Karagiannidis et al., 2012). فایده اصلی *مایکوریزا* برای گیاهان میزبان، گسترش منطقه نفوذ ریشه است. شبکه داخلی مرتبط از هیف‌های خارجی به‌عنوان اتصال اضافی و سطح جاذب در خاک عمل می‌کنند (Sharma & Adholey, 2004). می‌سیلیوم ریشه خارجی می‌تواند به‌طور 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 غشای 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 تاثیر مستقیم فلزات در متابولیسم سلولی اندام هوایی، ممکن است منجر به کاهش ارتفاع بوته و سایر صفات رشدی در گیاهان تحت تاثیر تنش فلزات سنگین گردد. مطابق با نتایج این مطالعه، زیلاکوف و همکاران (Zheljazkov et al., 2008) مشاهده کردند که عملکرد اندام هوایی بادرشجویه 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 تاثیر قرا می‌دهد. کاهش زیست توده در نتیجه تاثیر 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 به‌طور معنی‌داری کاهش یافت اما مایه‌زنی با قارچ *مایکوریزا* در شرایط تنش فلزات سنگین سرب و کادمیم، 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، فتوستتر و تنفس می‌باشد. افزایش وزن خشک اندام هوایی و دیگر صفات رشدی، در ارتباط با جذب بالای فسفر در گیاه و پتانسل کلونیزاسیون مطلوب ریشه و به تبع آن رشد می‌سیلیوم‌های خارجی و گسترش سیستم ریشه‌ای گیاه می‌باشد.

همچنین قارچ مایکوریزا/ رشد، عملکرد اندام‌هوایی و عملکرد ریشه ریحان را در غلظت کم کادمیم، سرب و نیکل در مقایسه با شاهد افزایش داد (Prasad, 2017). قارچ‌های مایکوریزا/ 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 میزبان می‌گردند (Ochoa-Velasco, 2016). در واقع مطابق نتایج حاصل از این تحقیق، قارچ‌های مایکوریزایی، 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، سیتوکنین) باعث افزایش مقاومت گیاه به عوامل بیماری‌زا و کمک به کاهش تنش‌های محیطی و بهبود رشد گیاه می‌شوند (Kirchner et al., 1993). قارچ‌های مایکوریزا/ رابطه همزیستی با ریشه اغلب گیاهان دارند و از طریق افزایش جذب عناصر غذایی مثل فسفر و برخی عناصر کم مصرف، 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).

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر قارچ مایکوریزا 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 (HM) Heavy metals	4	91.52**	2.82**	6895.4**	86.12**	66.17**	52.98*	1.51**
قارچ مایکوریزا (M) Mycorrhiza	1	31.51**	6.83**	11584.1**	144.72**	76.73**	19.2**	1.47**
فلزات سنگین * قارچ مایکوریزا 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 ** به ترتیب نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns: non- significant, * and **: significant at 5% and 1% of probability level, respective

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر قارچ مایکوریزا 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

میانگین مربعات Mean squares	
--------------------------------	--

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	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 (HM) Heavy metals	4	25.5**	3.93*	1.23**	0.04**	17.04**
قارچ مایکوریزا (M) Mycorrhiza	1	104.2**	1.54**	1.16**	0.03**	7.16*
فلزات سنگین * قارچ مایکوریزا HM×M	4	3.27**	0.31**	0.07**	0.002*8	0.5ns
خطای آزمایشی Error	20					
ضریب تغییرات C.V. (%)		5.45	9.78	9.07	9.42	5.70

جدول ۳- اثر متقابل قارچ مایکوریزا 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; HM2: Pb 300 mg/kg; HM3: Cd 40 mg/kg; HM4: Cd 80 mg/kg)

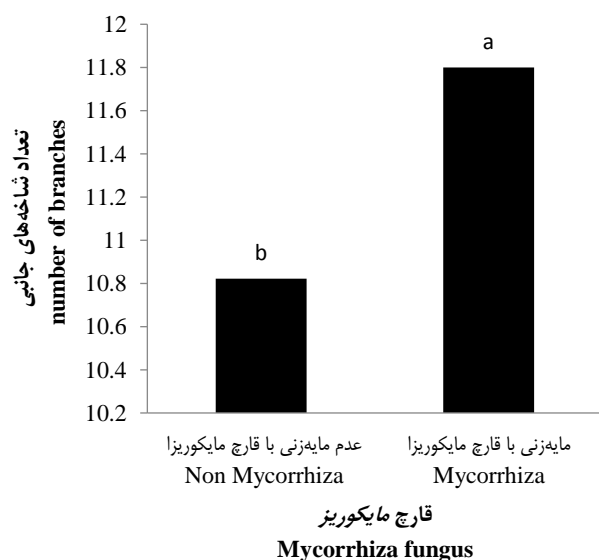
قارچ مایکوریزا Mycorrhiza fungus	فلزات سنگین (میلی گرم بر کیلوگرم) Heavy metals (mg.kg ⁻¹)	ارتفاع گیاه Plant height	قطر ساقه Stem diameter	سطح برگ Leaf surface	طول برگ Leaf length	عرض برگ Leaf width	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume
	H0	34.4b	4.67ab	345.17b	38.64b	22.45bc	16.56b	1.72b
عدم مایه‌زنی با قارچ مایکوریزا Non Mycorrhiza	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

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

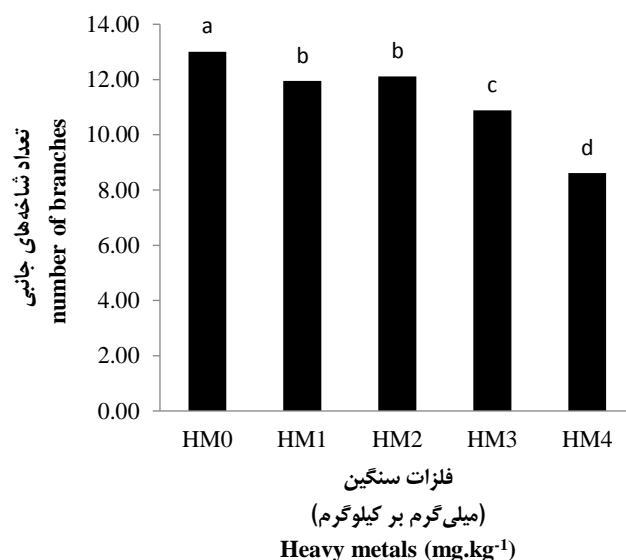
Table 4- The Interaction effect of mycorrhiza on some growth characteristics of *Dracocephalum moldavica* under heavy metals stress (HM0: control; HM1: Pb 150 mg/kg; HM2: Pb 300 mg/kg; HM3: Cd 40 mg/kg; HM4: Cd 80 mg/kg)

قارچ مایکوریزا Mycorrhiza fungus	فلزات سنگین (میلی گرم بر کیلوگرم) Heavy metals (mg.kg ⁻¹)	وزن تر شاخساره Biomass fresh weight	وزن خشک شاخساره Biomass dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight
	H0	15.32b	2.6c	1.54b	0.29b

عدم مایه‌زنی با قارچ مایکوریزا Non Mycorrhiza	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 مایکوریزا 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



شکل ۲- اثر ساده قارچ مایکوریزا بر تعداد شاخه‌های جانبی بادرشبویه
Figure 6- Effect of mycorrhiza on number of branches in *Dracocephalum moldavica*



شکل ۱- اثر ساده فلزهای سنگین بر تعداد شاخه‌های جانبی بادرشبویه
Figure 6- Effect of heavy metals on number of branches in *Dracocephalum moldavica*

محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۵) نشان داد که اثرات ساده و متقابل فلزات سنگین و قارچ مایکوریزا بر رنگدانه‌های فتوسنتزی کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. اثرات ساده قارچ مایکوریزا و فلزات سنگین بر میزان کاروتنوئید در سطح ۱ درصد معنی‌دار ولی اثر متقابل بین آنها بر میزان کاروتنوئید تأثیری نداشت. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۶) بیانگر کمترین میزان کلروفیل a در گیاهان غیرمایکوریزای آلوده به فلز سنگین کادمیم با غلظت ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم بود. همچنین اثر متقابل قارچ مایکوریزا و فلزات سنگین نشان داد که در تمام سطوح فلزات

سنگین میزان کلروفیل گیاهان مایکوریزی نسبت به گیاهان بدون مایکوریزی اختلاف معنی داری داشتند. به طوریکه در تمامی سطوح فلزات سنگین، گیاهان مایکوریزی نسبت به گیاهان بدون مایکوریزی، 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 مایکوریزی به‌طور معنی‌داری بیشتر از گیاهان غیرمایکوریزی بود (شکل ۴).

بر اساس نتایج با افزایش غلظت فلزات سنگین به خصوص کادمیم، مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ کاهش پیدا کرد. کاهش 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. بر اساس تحقیقی در گیاه شوید، میزان کلروفیل در تیمار کادمیم با غلظت ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در گیاهان مایکوریزی دو برابر گیاهان غیرمایکوریزی بود (Kapoor & Bhatnagar, 2007). کاهش محتوی کلروفیل ممکن است در نتیجه کاهش سنتز کلروفیل، با افزایش احتمالی آنزیم کلروفیلاز، اختلال در غشای کلروپلاست و غیر فعال سازی 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 تاثیر 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، 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 فرایندهای 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 به عنوان یک عنصر سمی در سیتوپلاسم، می‌تواند مانع فعالیت اندامک‌های درون سلولی شود و با اختلال در سنتز رنگیزه‌های حفاظتی (کاروتنوئیدها)، سیستم فتوسنتزی به خوبی محافظت نمی‌شود (Guo et al., 2007).

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر قارچ مایکوریزا و فلزهای سنگین بر محتوی رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه بادرنشویه

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

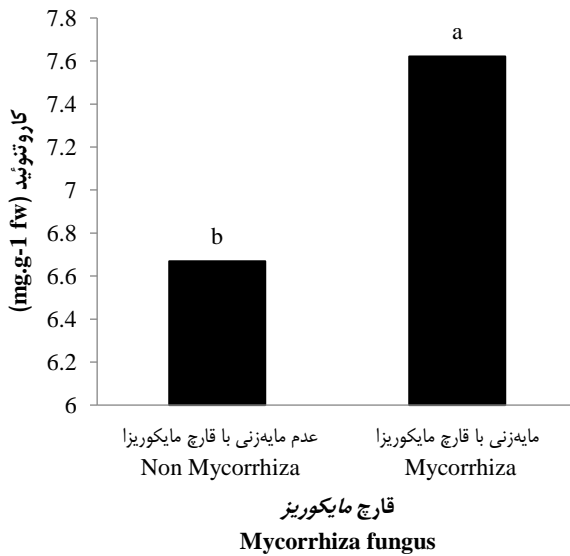
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares			
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid
فلزات سنگین (HM) Heavy metals	4	45.25**	9.43**	98.12**	13.53**

قارچ مایکوریزا (M) Mycorrhiza	1	36.37**	9.25**	92.64**	6.8**
فلزات سنگین* قارچ مایکوریزا 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

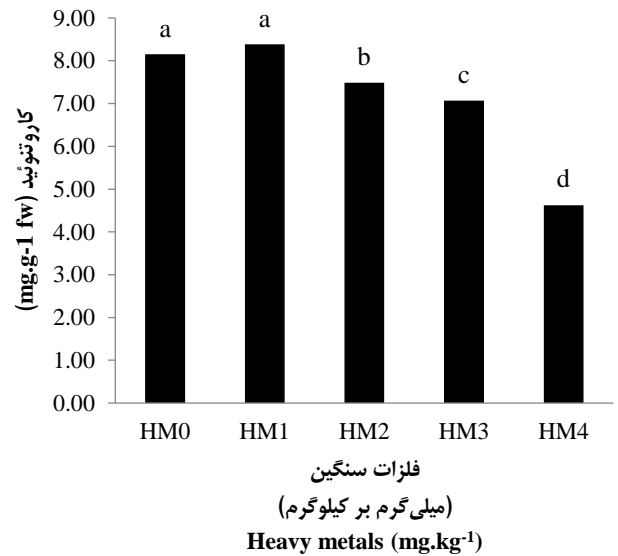
جدول ۶- بر همکنش اثر قارچ مایکوریزا بر محتوی رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه بادرشبوپه تحت تنش فلزهای سنگین

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

قارچ مایکوریزا Mycorrhiza fungus	فلزات سنگین (میلی گرم بر کیلوگرم) Heavy metals (mg.kg ⁻¹)	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll
عدم مایه‌زنی با قارچ مایکوریزا 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
مایه‌زنی با قارچ مایکوریزا Mycorrhiza	HM4	5.62g	2.34h	8.42g
	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



شکل ۴- اثر ساده قارچ میکوریزا بر مقدار کاروتنوئید بادرشوبیه
Figure 6- Effect of mycorrhiza on carotenoid content in *Dracocephalum moldavica*

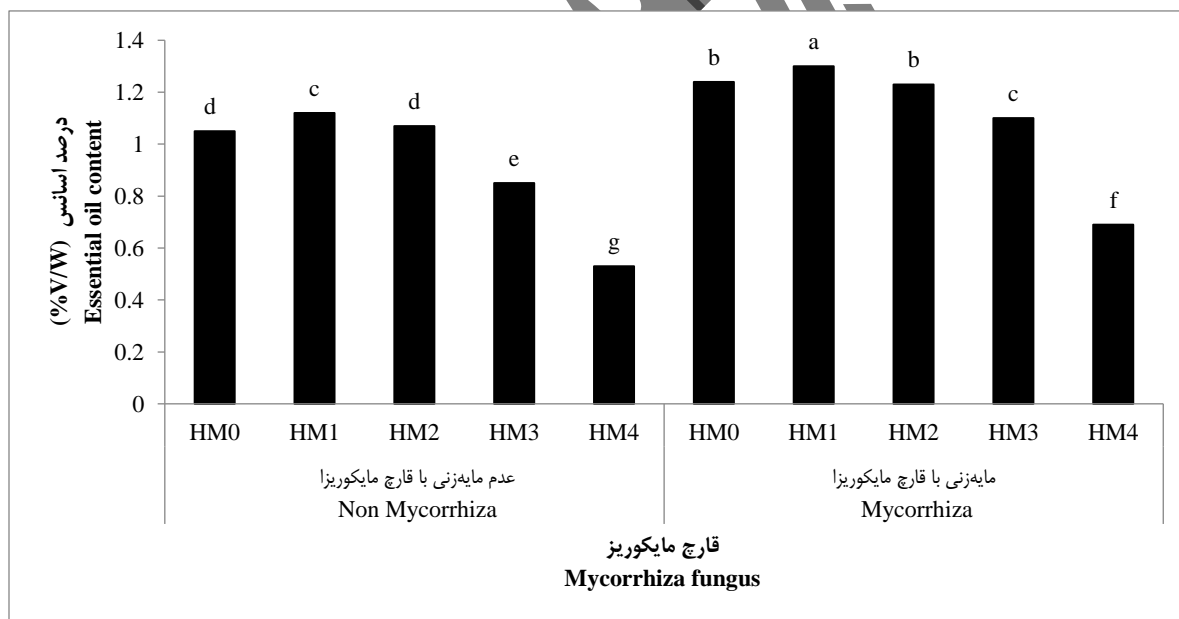


شکل ۳- اثر ساده فلزهای سنگین بر مقدار کاروتنوئید بادرشوبیه
Figure 6- Effect of heavy metals on carotenoid content in *Dracocephalum moldavica*

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 معنی داری داشتند. به طوریکه در تمامی سطوح فلزهای سنگین، گیاهان میکوریزی نسبت به گیاهان بدون میکوریزی، دارای میزان اسانس بیشتری بودند. بیشترین میزان اسانس بادرشوبیه در گیاهان میکوریزی آلوده به سرب ۳۰۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک حاصل گردید که به طور معنی داری بیشتر از سایر تیمارها بود. کمترین میزان اسانس نیز در گیاهان غیرمیکوریزی آلوده به کادمیم ۸۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک مشاهده گردید (شکل ۵). 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 محتوی 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](#)) اثر دو گونه قارچ میکوریزا بر گیاهان دارویی شوید، 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. ازاینرو، 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 موثره تأثیرگذار بوده است.

طبق نتایج حاصل از این تحقیق پیشنهاد شده که در خاک‌های فقیر، با استفاده از قارچ *مایکوریزا*، می‌توان با کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی، عملکرد مناسبی نیز داشت. همچنین بیان کردند که *مایکوریزا* ممکن است باعث بهبود کیفیت اسانس نیز گردد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که درصد اسانس بادرشبویه در گیاهان *مایکوریزی* افزایش یافت. همزیستی قارچ‌های *مایکوریزا* 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 تولید شده از گیاهان دارویی، در زمان نسبتاً کوتاه با هزینه پایین توسط قارچ *مایکوریزا*، نیاز امروز تولیدکنندگان گیاهان دارویی است. کاپور و بهاتناگار (Kapoor & Bhatnagar, 2007) در مطالعات خود، فسفر را عامل تاثیر گذار در رشد رویشی گیاه عنوان نمودند، همچنین از فسفر معدنی به عنوان عامل تاثیر گذار در بیوسنتز اسانس یاد می‌کنند. بنابراین به نظر می‌رسد که *مایکوریزا* تاثیر مثبتی بر مسیرهای بیوسنتزی متابولیت‌های ثانویه داشته است و از این طریق در میزان مواد موثره تولیدی، تاثیر گذار بوده است و احتمال دارد فراهمی و تعادل عناصر غذایی موجود، واکنش‌های آنزیمی و عوامل دخیل در هدایت این مسیرهای بیوسنتزی را در گیاه، تحت تاثیر قرار دهد.



شکل ۵- برهمکنش اثر قارچ *مایکوریزا* بر درصد اسانس گیاه بادرشبویه تحت تنش فلزهای سنگین

Figure 5- The interaction effect of mycorrhiza on essential oil content of *Dracocephalum moldavica* under heavy metals stress (HM0: control; HM1: Pb 150 mg/kg; HM2: Pb 300 mg/kg; HM3: Cd 40 mg/kg; HM4: Cd 80 mg/kg)

نتیجه گیری

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 افزایش کارایی نهاده‌ها بستگی دارد. بنابراین شناسایی راهبرد عملی و موثر در افزایش بازده کودهای شیمیایی و کاهش تلفات آنها به منظور کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی به ویژه آلودگی فلزات سنگین، بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌ها و موجودات خاکزی مانند قارچ‌های *مایکوریزا/آربوسکولار* به منظور تامین بخشی از نیازهای تغذیه‌ای گیاهان و بهبود شرایط فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌ها در زمینه تولید گیاهان دارویی، اقدامات مهم و موثری می‌باشد. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیم در خاک میزان رشد و عملکرد گیاه بادرشوبیه کاهش یافت اما مایه‌زنی گیاهان با قارچ *مایکوریزا* باعث افزایش تحمل این گیاه در شرایط تنش فلزات سنگین (به جز کادمیم ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم) گردید و رشد و عملکرد را در چنین شرایطی بهبود بخشید. کاربرد غلظت بالای کادمیم (۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) اثر منفی روی عملکرد گیاه داشت، به‌طوری‌که در این غلظت در گیاهان *مایکوریزی* و عدم *مایکوریزی* شاخص‌های رشدی، محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی و اسانس گیاه شدیداً کاهش پیدا کرد و کاربرد قارچ *مایکوریزا* در این تیمار بی‌تاثیر بود. استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید خاک مانند قارچ *مایکوریزا* می‌تواند 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 به عنوان راهکاری مدیریتی، در چنین شرایطی در نظر گرفته شود. قارچ *مایکوریزا* علاوه بر افزایش میزان رشد و زیست‌توده گیاه، باعث افزایش ماده موثره این گیاه نیز گردید که از اهداف اصلی در تولید گیاهان دارویی می‌باشند.

References

- 1- Benavides, M.P., Gallego, S.M., & Tomaro, M.L. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 21-34.
- 2- 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.
- 3- British Pharmacopoeia. (1980). H. M. S. Office. 2, London, 109-110 pp.
- 4- 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 bot. bras*, 21, 723-730.
- 5- 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.
- 6- 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.
- 7- FAO & UNEP, 2021. Global Assessment of Soil Pollution: Report. Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>.
- 8- 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.

- 9- 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.
- 10- Guo, T. R., Zhang, G. P., Zhang, Y. H. Physiological changes in barely plants under combined toxicity of aluminium, copper and cadmium. (2007). *Coloids and surface. B: Biointerfaces*, 57, 182-188.
- 11- Gupta, AP., Dhar, JK., Sharma, G., Ram, G., Bedi, YS. (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*, 2010, 48(10), 2966-2971.
- 12- 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.
- 13- 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.
- 14- Karagiannidis, N., Thomidis, T., and 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.
- 15- 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.
- 16- 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.
- 17- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 24- Moradi, R., Rezvani Moghaddam, P., Nasiri 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.

- 25- Mukerji, K.G., & Chamola, B.P. (2003). Compendium of mycorrhizal research. A.P.H. Poblsher, New Delhi, 310.
- 26- Smith, S.E., & Read, D.J. (2008). Mycorrhizal Symbiosis, 3nded. Academic Pres, 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.
- 28- Prasad, R., Bhola, D., Akdi, K., Cruz, C., Sairam, K.V.S.S., Tuteja, N., & Varma, A. (2017). Introduction to mycorrhiza: historical development. *Mycorrhiza-Function, Diversity, State of the Art*, 1-7.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 36- Veresoglou, S.D., Chen, B., & Rillig, M.C. (2012). Arbuscular mycorrhiza and soil nitrogen cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 46, 53-62.
- 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.
- 38- Zheljazkov, 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.

نسخہ حللہ پیش کشی انتشار