

The Effect of Two Mycorrhiza Fungi Species on Biochemical Characteristic and Aerial Dry Biomass of Coriander (*Coriandrum sativum* L.) Under Cadmium Stress

Fariba Mohammadifard¹, Mohammad Moghaddam^{2*} 

- 1- M.Sc. Student of Horticultural Science, Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
- 2- Associate Professor, Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Citation: Mohammadifard, F., & Moghaddam, M. (2022). The effect of two mycorrhiza fungi species on biochemical characteristic and aerial dry biomass of coriander (*Coriandrum sativum* L.) under cadmium stress. *Plant Productions*, 45(1), 81-94.

Abstract

Introduction

Nowadays, soil pollution to various heavy metals is one of the most important environmental issues in human societies, which has adverse effects on soil and soil flora and groundwater contamination. Among the heavy metals, cadmium with a half-life of about 20 years, its high mobility in the soil and absorption by the plant, has a significant toxicity that its presence in the food chain seriously threatens human health. A wide range of studies have shown that inoculation with mycorrhizal fungi increases the resistance of many plants against heavy metals.

Materials and Methods

In order to investigate the effect of mycorrhizal fungi on biochemical properties of coriander under heavy metal stress, a pot experiment was conducted in the greenhouses at Ferdowsi University of Mashhad. A factorial experiment based on completely randomized design with 2 factors and 3 replications was conducted. The first factor was heavy metal in 4 levels of 0, 20, 40, 80 mg/kg nitrate cadmium soil and the second factor was mycorrhiza fungi in 3 levels without fungi and *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices* application. The soil mixture included soil, leafy soil and sand in a ratio of 1: 1: 1. All traits were measured at flowering stage. The studied traits include aerial parts dry biomass, chlorophyll, b, a, electrolyte leakage, soluble carbohydrate,

* Corresponding Author: Mohammad Moghaddam
E-mail: m.moghadam@um.ac.ir

antioxidant activity, total phenol, total flavonoids and proline .Data analysis using Minitab 17 software was done.

Results and Discussion

The results were showed that by increasing the concentration of cadmium, the amount of electrolyte leakage, soluble carbohydrate, antioxidant activity, total phenol, total flavonoids and proline increased. However, with increasing cadmium concentration, the amount of dry biomass of aerial parts, chlorophyll, a, b and carotenoids decreased. So, with increasing cadmium concentration, the amount of aerial parts dry biomass of coriander decreased by 40% compared with the control. Based on this study, using of mycorrhizal fungi under cadmium pollution reduced the stress influence, so that the highest amount of aerial parts dry biomass was found in plants treated with mycorrhizal and without cadmium application. The lowest amount dry biomass of aerial parts was found in without mycorrhizal with highest nitrate cadmium concentration (80 mg/kg soil). The highest amount of proline, soluble carbohydrate, phenol, antioxidant activity, and total flavonoids was observed in plants which treated with the highest nitrate cadmium concentration (80 mg/kg soil) and *Glomus intraradices* application.

Conclusion

So that inoculated plants with mycorrhizal fungi had drier biomass of aerial parts than plants without mycorrhiza .According to the results of this study, in the conditions of environmental stresses such as cadmium stress, the use of mycorrhizal fungi reduces its destructive effects, which can be used as a management solution in heavy metal contaminated areas. In general, the results of this study showed that application of *Glomus mosseae* fungus in cadmium stress has a better effect on the traits and its application is recommended in this condition.

Keywords: Antioxidant activity, Heavy metal, Proline, Soluble carbohydrates, Total phenol



تأثیر دو گونه قارچ میکوریزا بر خصوصیات بیوشیمیایی و زیست توده خشک اندام هوایی گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) تحت تنش کادمیوم

فریبا محمدی فرد^۱، محمد مقدم^{۲*} 

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم باغبانی، گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- دانشیار، گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

فلزات سنگین باعث کاهش رشد گیاهان می‌شوند و بر پتانسیل عملکردی آن‌ها تأثیر می‌گذارند. کادمیوم (Cd) یکی از فلزات سنگین است که باعث ایجاد تنش در گیاهان می‌شود. قارچ‌های میکوریزا می‌توانند گیاهان را در برابر تنش‌های محیطی محافظت کنند. به منظور بررسی تأثیر قارچ‌های میکوریزا بر زیست توده خشک اندام هوایی و خصوصیات بیوشیمیایی گشنیز تحت تنش کادمیوم آزمایشی گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور و در ۳ تکرار در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۷ اجرا شد. فاکتور اول نیترات کادمیوم در ۴ سطح صفر، ۲۰، ۴۰، ۸۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک و فاکتور دوم قارچ میکوریزا در ۳ سطح بدون کاربرد قارچ، قارچ‌های *Glomus mosseae* و *Glomus intraradices* بود. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم مقادیر نشت الکترولیت، کربوهیدرات محلول، فعالیت آنتی اکسیدانی، فنول کل، فلاونوئید کل و پرولین برگ گشنیز افزایش پیدا کردند؛ ولی مقدار زیست توده خشک اندام هوایی، کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید کاهش یافتند. به طوری که با افزایش غلظت کادمیوم مقدار وزن خشک اندام هوایی گشنیز ۴۰ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش پیدا کرد. بر اساس نتایج این پژوهش کاربرد قارچ‌های میکوریزا در شرایط تنش فلز سنگین کادمیوم باعث کاهش اثر تنش شد. به طوری که بیشترین مقدار زیست توده خشک اندام هوایی در گیاهان میکوریزی و عدم کاربرد کادمیوم و کمترین مقدار در گیاهان غیرمیکوریزی رشد یافته در خاک آلوده به کادمیوم در بالاترین غلظت آن مشاهده شد. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد قارچ *Glomus mosseae* تأثیر بهتری بر صفات مورد بررسی داشت و کاربرد آن توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: پرولین، فعالیت آنتی اکسیدانی، فلز سنگین، فنول کل، کربوهیدرات محلول

* نویسنده مسئول: محمد مقدم

رایانامه: m.moghadam@um.ac.ir



مقدمه

امروزه آلودگی خاک به انواع مختلف فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی در جوامع انسانی است که تأثیرات نامطلوبی بر خاک و فلور آن و آلودگی آب‌های زیرزمینی دارد. علاوه بر کاهش رشد و عملکرد گیاه، با وارد شدن این فلزات به زنجیره غذایی، سلامت انسان و سایر موجودات زنده به خطر می‌افتد (Nicolic et al., 2008). در بین فلزات سنگین، کادمیوم با نیمه‌عمر زیستی حدوداً ۲۰ سال، قابلیت تحرک بالای آن در خاک و جذب توسط گیاه دارای سمیت قابل توجهی می‌باشد (Gill et al., 2011). هنگامی که فلزات سنگین به صورت عنصر یا مواد آلی فلزی حضور دارند، می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر سلامت جوامع انسانی داشته باشند. تماس با فلزات سنگین باعث اختلالات عصبی، پیری سلولی، نارسایی کلیه، کبد و سرطان‌زایی می‌شود (Lefebvre and Edwards, 2010). کادمیوم از طریق معدن کاوی، آب‌کاری فلزات، سوخت‌های فسیلی، فاضلاب‌های شهری و صنعتی و استفاده از حشره‌کش‌ها و کودهای فسفاته در بخش کشاورزی وارد خاک می‌شود (Robinson et al., 2000). تجمع کادمیوم در زمین‌های کشاورزی باعث ایجاد مشکلات فراوانی می‌شود (Mani et al., 2015). از جمله آن‌ها می‌توان به مهار رشد، کاهش فعالیت آنزیم‌ها، اختلال در روابط آب-گیاه، متابولیسم یون‌ها و تشکیل رادیکال‌های آزاد اشاره کرد (Valentoviova et al., 2010). کادمیوم جذب و انتقال آب و کاتیون‌ها را با تأثیر بر قابلیت دسترس بودن آن‌ها یا کاهش جمعیت میکروبی خاک، در گیاهان تغییر می‌دهد (Benavides et al., 2005). قارچ‌های میکوریزای آربوسکولار از مهم‌ترین ریزجانداران خاک هستند که در همزیستی با گیاهان، رشد آن‌ها را از طریق افزایش جذب آب و عناصر غذایی به‌ویژه عناصر کم‌تحرک مانند فسفر یا افزایش مقاومت در برابر تنش‌های محیطی بهبود می‌بخشند (Karimi et al., 2015; Zolfaghari et al., 2011). در پژوهشی که بر روی گیاه گشنیز در شرایط تلقیح با قارچ‌های میکوریزا صورت گرفت نتایج نشان دادند که میزان کلروفیل کل برگ در گیاهان تلقیح شده در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده صد درصد بیشتر بود (Bastami and Majidian, 2016). تلقیح با قارچ‌های میکوریزا مقاومت بسیاری از گیاهان را به فلزات سنگین افزایش می‌دهد

(Jiang et al., 2014). در آزمایشی که بر روی گیاه دارویی همیشه‌بهار در شرایط همزیستی با قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و تنش فلزهای سنگین سرب و کادمیوم انجام گرفت مشاهده شد که تلقیح با قارچ‌های میکوریزا توانست تحمل این گیاه را در برخورد با تنش‌های فلز سنگین سرب و کادمیوم بالا ببرد؛ به‌طوری‌که گیاهان تلقیح شده با این قارچ‌ها رشد و عملکرد بالاتری نسبت به گیاهان غیرمیکوریزای در تمام سطوح فلزات سرب و کادمیوم داشتند (Mohammadi et al., 2013).

گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) گیاهی یک‌ساله و یک سبزی و دارویی متعلق به خانواده چتریان (Apiaceae) است که از مواد مؤثره آن در صنایع داروسازی به‌عنوان ضد نفخ و هضم‌کننده غذا و همچنین به‌عنوان یک طعم‌دهنده در صنایع غذایی استفاده می‌شود (Omidbaigi, 2006). با توجه به موارد فوق و اینکه تاکنون تحقیقی مبنی بر بررسی اثر قارچ‌های میکوریزا تحت سمیت کادمیوم بر روی گیاه گشنیز انجام نشده است؛ این تحقیق با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف فلز سنگین کادمیوم و همچنین کاربرد دو نوع قارچ میکوریزا در این شرایط بر زیست‌توده خشک اندام هوایی و ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه گشنیز انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در گلخانه گروه علوم باغبانی دانشگاه فردوسی مشهد بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با ۲ فاکتور و در ۳ تکرار در سال ۱۳۹۷ انجام شد. فاکتور اول کاربرد نیترات کادمیوم در ۴ سطح صفر، ۲۰، ۴۰، ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک (به‌ترتیب معادل ۰، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۸ درصد می‌باشد) و فاکتور دوم قارچ میکوریزا (تهیه شده از شرکت زیست فناوران توران) در ۳ سطح بدون تلقیح قارچ و کاربرد قارچ‌های *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae* (۲۰۰ گرم در هر گلدان) بود. مخلوط خاک مورد استفاده شامل خاک زراعی، خاک‌برگ و ماسه به نسبت ۱:۱:۱ بود. سطوح مختلف نیترات کادمیوم و قارچ میکوریزا به خاک مورد نظر قبل از کاشت اضافه شد. نحوه‌ی آماده‌سازی تیمارهای حاوی فلز سنگین نیترات کادمیوم به این شرح بود که غلظت‌های مشخص را در یک لیتر آب برای حجم خاک یک گلدان (۱۵ کیلوگرم) در آب‌مقطر حل کرده و بر روی خاکی که بر روی پلاستیک به ضخامت ۱ یا ۲

$$(2) \quad b = 27.05 A_{663} - 11.21 A_{666} \quad \text{کلروفیل}$$

$$(3) \quad a = 15.65 A_{666} - 7.340 A_{653} \quad \text{کلروفیل}$$

$$(4) \quad a+b = \text{کلروفیل کل}$$

$$(6) \quad Cx+c = [1000 A_{470} - 2.860 Ca 12.92 Cb / 245]$$

برای تعیین مقدار کربوهیدرات محلول از روش Paquin et al. استفاده شد. به این منظور ۰/۲ میلی لیتر از عصاره متانولی با ۳ میلی لیتر معرف آنترون (۰/۱۵ گرم در ۱۰۰ میلی لیتر اسید سولفوریک ۷۲ درصد) مخلوط گردید. مخلوط فوق به مدت ۱۰ دقیقه درون حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد به منظور انجام واکنش قرار گرفت. سپس میزان جذب پس از سرد شدن نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر اندازه‌گیری شد (Paquin et al., 1979).

جهت تعیین میزان فنل کل موجود در عصاره متانولی تهیه شده از برگ گیاه از معرف فولین سیکالتو برای اندازه‌گیری استفاده شد و مقدار جذب محلول با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۶۵ نانومتر به وسیله کالیبره کردن منحنی استاندارد با گالیک اسید اندازه‌گیری شد (Singleton and Rossi, 1965).

تعیین فعالیت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از آزمون 2,2-Diphenyl-Picryl-Hydrazyl انجام شد. برای این منظور ابتدا عصاره متانولی به نسبت ۱ به ۱۰ رقیق شد. سپس به منظور غیرفعال کردن رادیکال‌های آزاد به هر نمونه ۴ میلی لیتر ماده DPPH (2,2- Diphenyl-1-Picryl-hydrazol) اضافه شد. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی قرار داده شدند و سپس جذب محلول‌های حاصل و همچنین جذب نمونه شاهد (کلیه مواد بدون عصاره نمونه گیاهی) در طول موج ۵۱۷ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. درصد بازداري از DPPH با مقایسه عصاره نمونه‌ها و نمونه شاهد و استفاده از رابطه زیر به دست آمد (Moon and Terao, 1998).

$$\text{AA} \% = \left[\frac{\text{نمونه شاهد} - \text{نمونه}}{\text{نمونه شاهد}} \right] \times 100$$

برای تعیین مقدار فلاونوئید کل از روش رنگ‌سنجی کلرید آلومینیوم استفاده شد. بدین منظور ۰/۱ گرم از نمونه‌های گیاهی را به صورت جداگانه با ۱۰ میلی لیتر متانول عصاره‌گیری شد و به محصول حاصل ۰/۳ میلی لیتر از نیترات سدیم ۵ درصد اضافه گردید. سپس ۰/۶ میلی لیتر کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد، ۲

سانتی متر پهن شده بود اسپری شد. به منظور این که شرایط آلودگی تا حدی شبیه به شرایط طبیعی باشد نمونه‌های تیمار شده تا حد ظرفیت زراعی، مرطوب و به مدت ۱۵ روز در این شرایط نگهداشته شدند. نیتروژن اضافه شده به خاک توسط نمک نیترات کادمیوم، با اضافه کردن مقادیر محاسبه شده با استفاده از اوره به تیمارهای مختلف اصلاح شد (Asadi et al., 2018). پس از اعمال تیمارها (برای هر تیمار یک گلدان و در سه تکرار) و آماده‌سازی خاک، بذرها به طور مستقیم در گلدان‌ها (در گلدان‌های با قطر دهانه ۳۰ و ارتفاع ۴۰) کشت شدند. پس از استقرار گیاهان، تنک کردن در مرحله ۴-۶ برگی انجام و تعداد بوته‌ها به ۸ عدد در سطح هر گلدان رسانده شد. در طول دوره رشد گیاهان کلیه اعمال زراعی شامل آبیاری (بر اساس نیاز گیاه و هر ۲ روز یک بار انجام شد) و دفع علف‌های هرز به طور یکنواخت در بین تیمارها انجام شد. اندازه‌گیری صفات در مرحله گلدهی (Nourzad et al., 2015; Fatemi et al., 2017) صورت گرفت. صفات مورد ارزیابی شامل زیست‌توده خشک اندام هوایی، نشت الکترولیت، کلروفیل a، b، کلروفیل کل، کارتنوئید، کربوهیدرات محلول، فنول کل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، فلاونوئید کل و پرولین بودند. در پایان دوره رشد (مرحله گلدهی) بخش هوایی به طور جداگانه از هر گلدان برداشت شد و در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون قرار داده شد. سپس وزن خشک آن‌ها با ترازو (با دقت ۰/۰۰۱ گرم) اندازه‌گیری شد. میزان پایداری غشاء از طریق اندازه‌گیری میزان نشت الکترولیتی برگ با استفاده از رابطه زیر ارزیابی شد (Teutonica et al., 1993).

$$EC = EC_1/EC_2 \times 100 \quad (1)$$

برای اندازه‌گیری میزان رنگی‌های فتوسنتزی، ۰/۲ گرم برگ تازه را خرد کرده و آن را در یک هاون چینی با ۱۰ میلی لیتر متانول ۹۶ درصد ساییده تا به صورت توده یکنواختی درآید (در محیطی خنک و در نور کم) و مخلوط حاصل سانتریفوژ شد (۲۵۰۰ دور به مدت ۱۰ دقیقه). پس از سانتریفوژ کردن، محلول رویی را برداشته و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر، میزان جذب آن در طول موج ۶۵۳، ۶۶۶ و ۴۷۰ نانومتر قرائت شد. با استفاده از روابط زیر میزان رنگی‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b، کارتنوئید و کلروفیل کل) محاسبه شد (Dere et al., 1998).

تنفس، جذب نیتروژن و رشد طولی سلول‌ها می‌شود که کاهش رشد و وزن خشک اندام هوایی گیاه را به دنبال دارد (Krpata et al., 2009). همچنین فلزات سنگین با ایجاد ناهنجاری‌های کروموزومی موجب کاهش رشد گیاه می‌شوند (Michaelis et al., 1986). علت افزایش مقادیر زیست‌توده در تیمارهای همزیست با قارچ‌های میکوریزا در این پژوهش می‌تواند به این دلیل باشد که همزیستی ریشه با قارچ‌های میکوریزا باعث جذب بهتر آب و عناصر غذایی می‌شود که افزایش فتوسنتز را در پی خواهد داشت و در نتیجه رشد گیاه را بهبود می‌بخشد (Khalvati et al., 2005). علاوه بر این قارچ‌های میکوریزا از طریق افزایش هورمون آبسزیک اسید (ABA) بر روی فعالیت روزنه‌ها اثر گذاشته و باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شوند که این امر از کمبود آب در گیاه جلوگیری و منجر به رشد بهتر گیاه در شرایط تنش می‌شود (Shahabivand et al., 2012).

نشت الکترولیت

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که اثرات متقابل کادمیوم و قارچ‌های میکوریزا بر نشت الکترولیت برگ گشنیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. کمترین مقدار نشت الکترولیت در تیمار شاهد (بدون تنش و کاربرد قارچ میکوریزا) مشاهده شد. در آزمایشی که در شرایط تنش فلز سنگین بر روی گیاهان ریحان (Davoodi et al., 2017) و گشنیز (Fatemi et al., 2017) صورت گرفت، نتایج نشان داد که با افزایش سطح فلز سنگین مقدار نشت الکترولیت به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد. فلزات سنگین باعث بهم ریختگی غشاء شده که خود باعث افزایش نشت الکترولیت می‌شود (Iqbal et al., 2010). همزیستی گیاهان با قارچ‌های میکوریزا در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین باعث افزایش مقاومت گیاه به این فلزات می‌شود (Gohr and Paszkowski, 2006).

رنگیزه‌های فتوسنتزی

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که اثرات ساده و متقابل کادمیوم و میکوریزا بر مقدار کلروفیل a، b، کارتنوئید و کلروفیل کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم و میکوریزا کمترین مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی در بالاترین سطح نیترات کادمیوم

میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم و ۲ میلی‌لیتر آب مقطر ترکیب شدند. آنگاه جذب هر ترکیب واکنشی در طول موج ۵۱۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر از طریق فرمول زیر اندازه‌گیری شد (Toor and Savage, 2005).

$$Y = 0.0494x - 0.0026 \quad (7)$$

به منظور اندازه‌گیری پرولین از روش (Bates et al., 1973) استفاده و سپس میزان جذب در طول موج ۵۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار Minitab 17 استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون Bonferroni انجام شد. همچنین برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel 2016 استفاده شد.

نتایج و بحث

زیست‌توده خشک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس اثرات ساده و متقابل تیمارها نشان داد که تأثیر قارچ‌های میکوریزا و فلز سنگین بر زیست‌توده خشک اندام هوایی گیاه دارویی گشنیز معنی‌دار بود (جدول ۱). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح کادمیوم خاک، زیست‌توده خشک اندام هوایی گشنیز به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. به‌طوری‌که کاهش آن در گیاهان تلقیح نشده با قارچ بیشتر از گیاهان تلقیح شده با قارچ بود. بیشترین زیست‌توده خشک اندام هوایی (۲/۵۸ گرم در بوته) در تیمار شاهد (بدون کاربرد کادمیوم) و کاربرد قارچ *Glomus intraradices* بود در حالی که کمترین زیست‌توده خشک اندام هوایی (۰/۶۶ گرم در بوته) در تیمار ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم و بدون اعمال قارچ میکوریزا مشاهده شد (شکل ۱-ا). در تحقیقاتی که بر روی تأثیر قارچ میکوریزا بر رشد و عملکرد گیاه دارویی رزماری (Tabrizi et al., 2015) و سیاهدانه (Sadat Shamshirgan et al., 2015) در شرایط تنش فلزات سنگین (به ترتیب سرب و کادمیوم، کادمیوم) انجام گرفت مشاهده شد، که با افزایش غلظت فلزات سنگین میزان رشد و زیست‌توده خشک اندام هوایی کاهش پیدا کرد؛ اما تلقیح گیاهان با قارچ میکوریزا باعث افزایش رشد و زیست‌توده خشک اندام هوایی در این شرایط شد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. از دلایل کاهش زیست‌توده خشک می‌توان به این مورد اشاره نمود که فلز کادمیوم چه به‌صورت مستقیم و چه غیرمستقیم موجب مهار فرایندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز،

Table 1. Analysis variance of mycorrhizal fungi on aerial parts dry biomass and biochemical characteristics of coriander under cadmium stress

Sources of variation	df	Aerial parts dry biomass	Electrolyte leakage	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid	Total chlorophyll	Soluble carbohydrate	Total phenol	Antioxidant activity	Proline	Total flavonoids
Cadmium	3	1.22556*	1140.25**	326.455**	198.453**	0.67629**	1025.96**	696.020**	9.91713**	0.024175**	79.1641**	40.5584**
Mycorrhiza	2	1.16984**	25.11**	14.970**	8.046**	2.39075**	36.55**	37.035**	8.02100**	0.000232**	66.8647**	0.3238*
Cd × M	6	0.18492*	68.56**	33.973**	18.783**	1.36059**	38.89**	45.916**	2.29693**	0.000775**	33.9855**	2.7271**
Error	24	0.06023	0.09	0.247	0.767	0.07122	0.29	0.859	0.03466	0.000015	0.0044	0.0954
CV (%)		14.23	0.88	1.35	3.92	8.34	0.86	2.71	1.32	1.34	1.03	2.03

ns, * and **: None significant and significant at 5 and 1%, respectively.

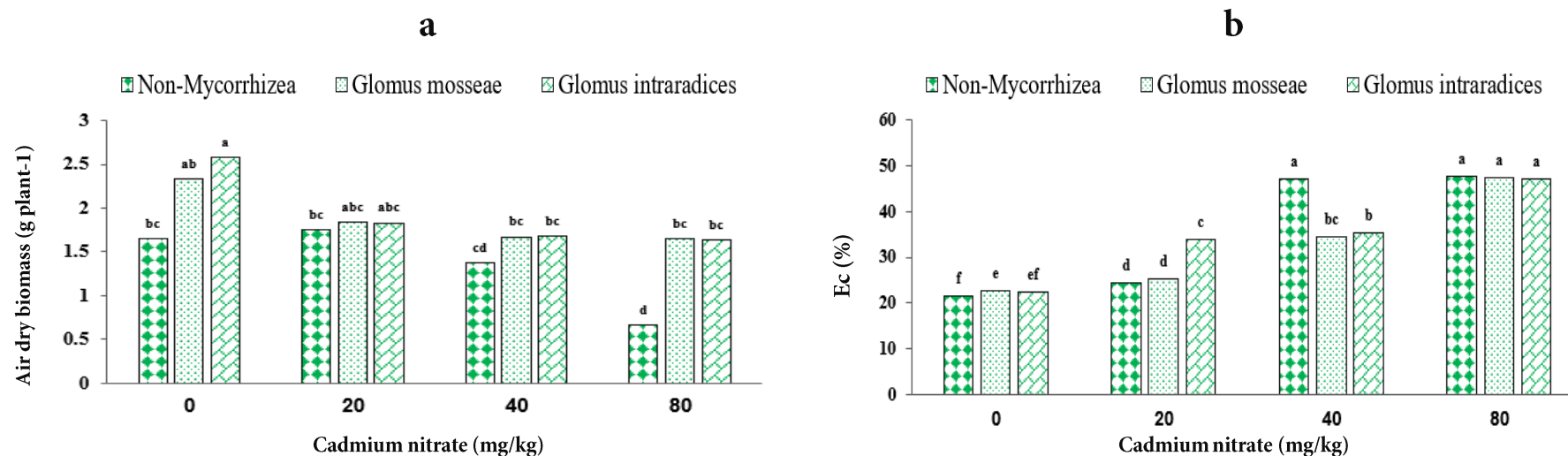


Figure 1. The amount of aerial parts dry biomass (a), EL (b), chlorophyll a (c), chlorophyll b (d), carotenoid (e), total chlorophyll (f) in coriander under cadmium stress and mycorrhizal application

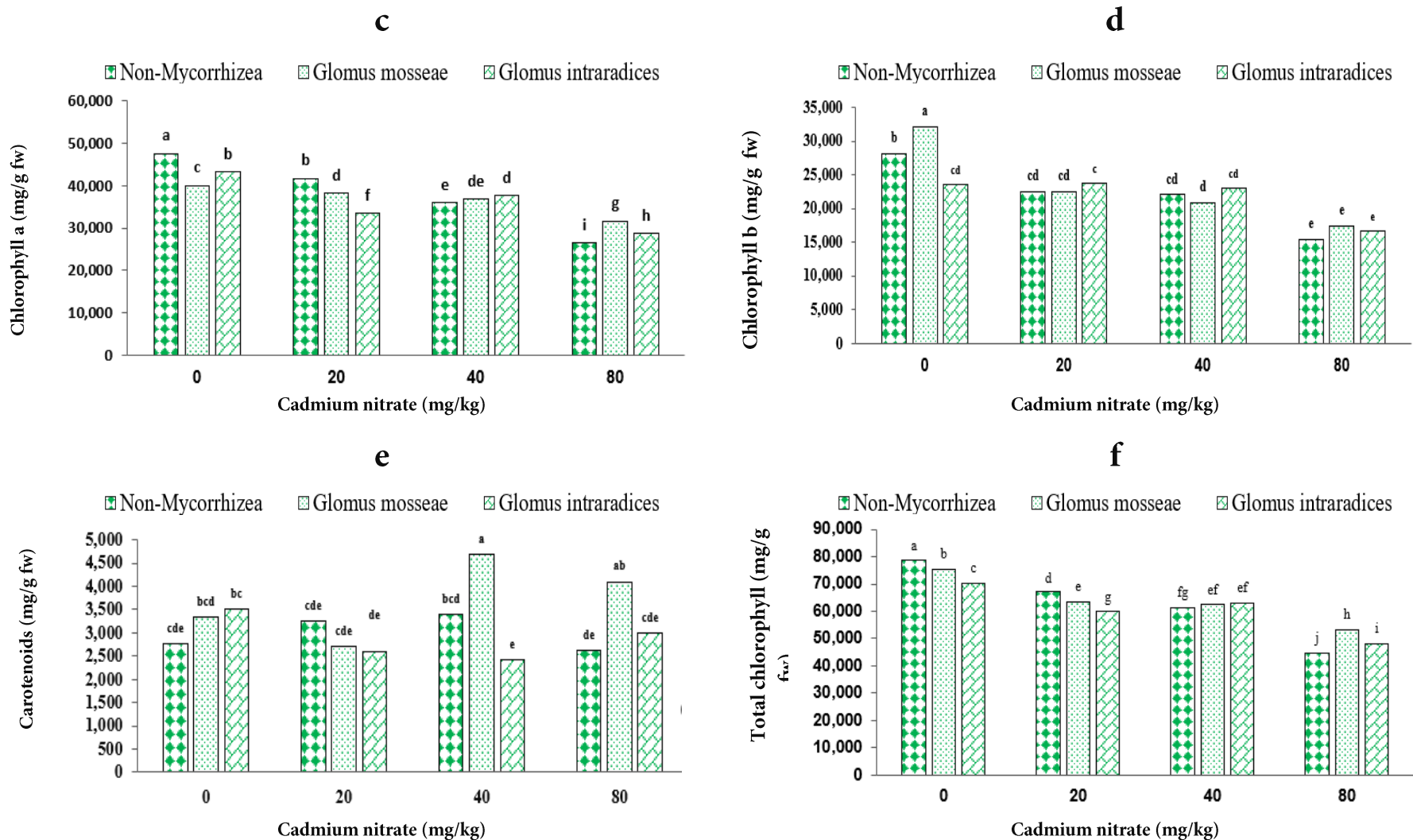


Figure 1. (Continuation) The amount of aerial parts dry biomass (a), EL (b), chlorophyll a (c), chlorophyll b (d), carotenoid (e), total chlorophyll (f) in coriander under cadmium stress and mycorrhizal application

صورت گرفت، مشاهده شد که با افزایش غلظت کادمیوم مقدار کربوهیدرات محلول نیز افزایش پیدا کرد، که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. تنظیم پتانسیل آب سلول در سیتوزل برای مقابله با غلظت بالا فلزات سنگین و انباشته شدن یون‌ها در واکوئل، باعث افزایش کربوهیدرات‌های محلول در شرایط تنش می‌شود که در حقیقت مکانیسمی برای مقابله با استرس است (Kameli and Losel, 1993) و همین امر می‌تواند دلیل افزایش مقدار کربوهیدرات محلول در برگ گشنیز در این تحقیق باشد.

فنول کل

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات متقابل کادمیوم و قارچ‌های مایکوریزا بر میزان فنول کل برگ گشنیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم میزان فنول کل برگ گشنیز روند صعودی داشت. بیشترین مقدار فنول کل در تیمار ۴۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک نیترا کادمیوم و کاربرد قارچ مایکوریزا *Glomus mosseae* مشاهده شد. کمترین مقدار آن در تیمار شاهد (بدون فلزسنگین و کاربرد قارچ مایکوریزا) بود (شکل ۲-۲h). با افزایش غلظت سرب میزان فنول گیاه گشنیز افزایش پیدا کرد (Fatemi et al., 2017) که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. نتایج آزمایش بر روی گیاه گوجه‌فرنگی نشان داد که قارچ‌های مایکوریزا باعث افزایش ترکیبات فنولی می‌شوند (Kapoor, 2008) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. ترکیبات فنولی یک گروه متابولیت‌های ثانویه با ساختار متنوع و گسترده شیمیایی در گیاهان هستند (Harborne, 1980). این ترکیبات با دارا بودن خاصیت آنتی‌اکسیدانی، قادر به جمع‌آوری و بازبایی گونه‌های فعال اکسیژن هستند که از اکسیداسیون ملکول‌های زیستی جلوگیری کرده و مانع استرس اکسیداتیو و یا کاهش اثرات سوء آن بر سلول‌های گیاهی می‌شوند (Myung-Min et al., 2009). علت افزایش ترکیبات فنولی در این تحقیق را می‌توان به این دلیل توجیه کرد که این ترکیبات باعث افزایش استقامت در دیواره سلولی و تثبیت غشاء شده و موجب ایجاد موانع فیزیکی در برابر تماس فلزات سنگین و ورود رادیکال آزاد می‌شود (Rajesh et al., 2008).

فعالیت آنتی‌اکسیدانی

آنالیز آماری نشان داد که اثرات متقابل و ساده کادمیوم بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی برگ گشنیز در سطح

(۸۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک) مشاهده شد و کاربرد قارچ‌های مایکوریزا به ویژه قارچ *Glomus mosseae* سبب بهبود این رنگیزه‌ها شدند. به‌طوری‌که کاربرد این قارچ به ترتیب موجب افزایش ۱۹/۱۳، ۱۲/۸۳، ۵۵/۷۴ و ۱۹/۱۰ درصدی کلروفیل a، b، کارتنوئید و کلروفیل کل نسبت به شاهد شد. همراستا با نتایج حاصل از این تحقیق، نتایج محققین دیگر بر روی گیاه گل گندم نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم در خاک مقدار کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید در گیاهان تلقیح شده و هم تلقیح نشده کاهش معنی‌داری داشت (Barin et al., 2016). هم‌چنین نتایج تحقیق بر روی گیاه گشنیز در شرایط تنش فلز سنگین آلومینیوم نشان داد که با افزایش غلظت آلومینیوم در محیط کشت میزان کلروفیل a، b و کل کاهش پیدا کرد (Ganjeali et al., 2015) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. فلزات سنگین اثرات منفی بر فعالیت فرایندهای مهمی مثل انتقال آب، فسفریلاسون اکسیداتیو میتوکندری، فتوسنتز و مقدار کلروفیل دارند (Vitoria et al., 2005). این فلزات با جایگزین شدن به‌جای منیزیم مرکزی کلروفیل بر بیوسنتز کلروفیل اثر گذاشته و باعث کاهش جذب نور شده و در نتیجه منجر به کاهش فتوسنتز می‌شوند (Sharma and Dubey, 2005) که علت کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی در این تحقیق می‌تواند ناشی از همین امر باشد. افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی از جمله کارتنوئیدها یکی از مکانیسم‌های دفاعی گیاهان در برابر تنش فلزات سنگین می‌باشد (Smeet et al., 2005).

کربوهیدرات محلول

تجزیه واریانس داده‌ها نشان‌دهنده‌ی این بود که اثرات ساده و متقابل کادمیوم و مایکوریزا بر مقدار کربوهیدرات محلول برگ گشنیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم میزان کربوهیدرات‌های محلول در بخش هوایی گیاهان غیرمایکوریزایی و هم مایکوریزایی افزایش پیدا کرد و بیشترین مقدار آن (۴۹/۲۶۸ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) در تیمار ۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک نیترا کادمیوم و بدون کاربرد قارچ مایکوریزا بود. کمترین میزان کربوهیدرات محلول در تیمار شاهد (بدون کاربرد کادمیوم و قارچ مایکوریزا) مشاهده شد (شکل ۲-۲g). در تحقیقاتی که بر روی گیاهان دارویی نظیر فلفل (Abdel Latef, 2013) و سیاهدانه (Sadat Shamshirgan et al., 2015) تحت تنش کادمیوم و همزیستی قارچ‌های مایکوریزا

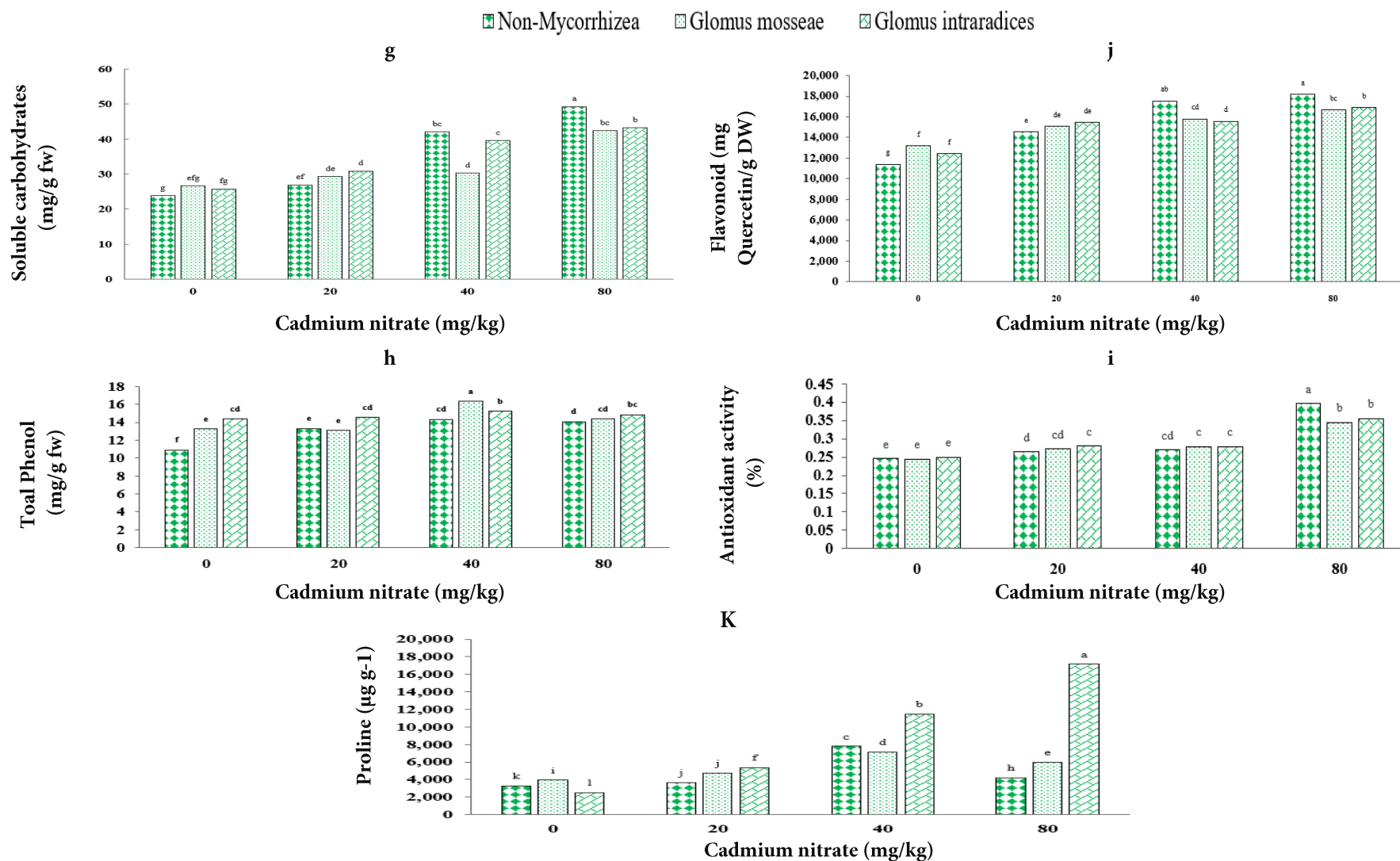


Figure 2. The amount of soluble carbohydrate (g), total phenol (h), antioxidant activity (i), total flavonoids (j), and proline (k) in coriander under cadmium stress and mycorrhizal application

تیمارها بر میزان پرولین برگ گشنیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار پرولین در تیمار ۸۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک نیترا کادمیوم و کاربرد قارچ *Glomus intraradices* و کمترین آن در تیمار عدم استفاده نیترا کادمیوم و کاربرد قارچ *Glomus intraradices* (شکل ۲-ک) بود. پژوهشی که بر روی گیاهان دارویی سیاهدانه (Sadathamshirgan et al., 2015)، بنگدانه (Kazemalilou and Rasouli-Sadaghiani, 2012) و کتان (Amna Masood et al., 2015) در شرایط تنش فلز سنگین و هم‌زیستی قارچ‌های مایکوریزا صورت گرفت نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم مقدار پرولین به‌صورت معنی‌دار در گیاهان هم‌زیست نسبت به گیاهان غیر هم‌زیست افزایش پیدا کرد که با نتایج این پژوهش کاملاً هم‌خوانی دارد. با افزایش غلظت فلز سنگین، میزان تجمع پرولین نیز در ماش سیاه (Singh et al., 2012) و نخودفرنگی (Al-Hakimi, 2007) افزایش یافت. از پاسخ‌های عمومی سلول به تغییرات فشار اسمزی خارجی، تجمع متابولیت‌هایی است که قابلیت انحلال داشته، ولی در روند متابولیسم‌های طبیعی گیاه اختلالی ایجاد نمی‌کنند (Orcutt and Nilsen, 2000). پرولین با چندین عمل مثل تنظیم اسمزی، جاروب کردن هیدروکسیل، جلوگیری از دناتوره شدن آنزیم‌ها و حفظ سنتز پروتئین مقاومت گیاهان را در برابر تنش‌ها افزایش می‌دهد (Sharma and Dubey, 2005). علت افزایش میزان پرولین در گیاهان هم‌زیست در مقایسه با گیاهان غیر هم‌زیست این است که قارچ‌های مایکوریزا خیلی سریع‌تر علائم تنش را دریافت کرده، در نتیجه باعث فعال شدن سریع واکنش‌های بیوشیمیایی در گیاهان هم‌زیست شده، که باعث کاهش اثرات شدید تنش می‌شود (Rodriguez et al., 2004).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش فلز سنگین کادمیوم باعث کاهش زیست‌توده خشک اندام هوایی گشنیز شد. به‌طوری‌که تیمار حاوی ۸۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک نیترا کادمیوم در شرایط بدون کاربرد قارچ‌های مایکوریزا، کمترین زیست‌توده خشک اندام هوایی را تولید کرد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان اظهار کرد که تلقیح گیاهان با قارچ‌های میکوریزا تا حدی توانست تحمل گیاه گشنیز را در مواجه با تنش فلزهای سنگین با بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی، کربوهیدرات محلول، فنول کل،

احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). بیشترین مقدار فعالیت آنتی‌اکسیدانی در تیمار ۸۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک نیترا کادمیوم و بدون حضور قارچ مایکوریزا بود. کمترین مقدار فعالیت آنتی‌اکسیدانی در شرایط بدون کادمیوم و کاربرد قارچ *Glomus mosseae* حاصل شد (شکل ۲-ی). در پژوهشی که بر روی گیاه نعنای فلفلی انجام گرفت نتایج حاکی از افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تلقیح شده با قارچ‌های مایکوریزا نسبت به گیاهان شاهد بود (Mohammadi Sardoueiye et al., 2018). واکنش آنتی‌اکسیدانی یک پروسه مهم برای محافظت از گیاهان از آسیب‌های اکسیداتیو است که در اثر طیف وسیعی از تنش‌های محیطی از جمله تنش شوری، خشکی، کمبود عناصر غذایی در خاک، سرما و فلزات سنگین پدیدار می‌شود (Mittler et al., 2004) که خود دلیل افزایش این ترکیبات در این پژوهش می‌باشد.

فلاونوئید کل

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۱ نشان داد که اثرات ساده و متقابل تیمارها بر میزان فلاونوئید کل برگ گشنیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کمترین مقدار آن در تیمار شاهد (بدون تنش کادمیوم و کاربرد قارچ) و بیشترین آن در تیمار ۸۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک نیترا کادمیوم و بدون کاربرد قارچ‌های مایکوریزا مشاهده شد (شکل ۲-ج). با افزایش غلظت فلز سنگین میزان فلاونوئید در گل‌انگشته (Bota and Deliu, 2011) و خرفه (Ghorbanli and Kiapour, 2012) افزایش پیدا کرد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. نتایج تحقیق بر روی ریشه گیاه شیرین‌بیان در شرایط هم‌زیستی با قارچ‌های مایکوریزا نشان داد، که مقدار فلاونوئید ریشه‌های تیمار شده در مقایسه با شاهد افزایش قابل توجهی داشتند (Orujei et al., 2013). فلاونوئیدها با دارا بودن گروه‌های هیدروکسیلی و کربوکسیلی قادرند به‌طور اختصاصی با فلزات سنگین پیوند برقرار کنند (Jung et al., 2003). دلیل افزایش فلاونوئیدها در این پژوهش را می‌توان اینگونه بیان کرد که این ترکیبات نقش مهمی در ایجاد مقاومت گیاهان در برابر فلزات سنگین هم به‌عنوان ترکیبات کلات‌کننده و هم آنتی‌اکسیدان بر عهده دارند (Matsouka et al., 2011).

پرولین

براساس نتایج این آزمایش، اثرات ساده و متقابل

فلز سنگین از آن استفاده کرد. در نهایت طبق نتایج این پژوهش کاربرد قارچ *Glomus mosseae* در شرایط تنش نیترات کادمیوم تأثیر بهتری بر صفات داشته و کاربرد آن در این شرایط توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های مالی دانشگاه فردوسی مشهد دانشکده کشاورزی قدردانی می‌گردد.

پرو لین، نشت الکترولیت و فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی بالا ببرد. به‌طوری‌که گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریزا رشد و زیست‌توده خشک اندام هوایی بالاتری نسبت به گیاهان بدون میکوریزا داشتند. بر اساس دستاوردهای این پژوهش در شرایط تنش فلز سنگین کادمیوم استفاده از قارچ‌های میکوریزا باعث کاهش اثرات مخرب آن می‌شود که می‌توان به‌عنوان راهکاری مدیریتی در مناطق آلوده به این

References

- Abdel Latef, A. A. (2013). Growth and some physiological activities of pepper (*Capsicum annum* L.) in response to cadmium stress and mycorrhizal symbiosis. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15, 1437-1448.
- Al-Hakimi, A. M. A. (2007). Modification of cadmium toxicity in pea seedlings by kinetin. *Plant Soil and Environment*, 53(3), 129-135.
- Amna Masood, S., Mukhtar, T., Kamran, M. A., Rafique, M., Munis, M. F. H., & Chaudhary, H. J. (2015). Differential effects of cadmium and chromium on growth, photosynthetic activity, and metal uptake of *Linum usitatissimum* in association with *Glomus intraradices*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187-311.
- Asadi, S., Moghaddam, M., Pirbalouti, A. Gh., & Fotovat, A. (2018). Evaluation of physiological characteristics and antioxidant activity of sweet basil (*Ocimum basilicum* cv. *Keshkeni luvelou*) under different levels of methyl jasmonate and lead toxicity. *Journal of Iranian Plant Ecophysiology Research*, 13(51), 1-16. [In Farsi]
- Barin, M., Rsadaghiani, M., & Khodaverdiloo, H. (2016). The effect of microbial inoculation on quantitative and qualitative properties of wheat grass (*Centaurea cyanus*) in a soil contaminated with cadmium. *Iranian Journal Biology of Soil*, 3(2), 137-149. [In Farsi]
- Bastami, A., & Majidian, M. (2016). Effects of Mycorrhiza, Phosphatic Biofertilizer on Photosynthetic Pigments and Yield in Coriander (*Coriandrum Sativum* L.). *Plant Productions*, 38(4), 49-60. [In Farsi].
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205-207.
- Benavides, M. P., Gallego, S. M., & Tomaro, M. L. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 21-34.
- Bota, C., & Deliu, C., (2011). The effect of copper sulphate on the production of flavonoids in *Digitalis lanata* cell cultures. *Farmacia*, 59(1), 113-118.
- Davoodi, M., Esmailpour, B., Fatemi, H., & Maleki Lajayer, H. (2017). Effect of silicon nutrition on alleviation of detrimental effects of nickel stress in *Ocimum basilicum* L. *Plant Process and Function*, 7(24), 25-38. [In Farsi]
- Dere, S., Gunes, T., & Sivaci, R. (1998). Spectrophotometric determination of chlorophyll -a, b and total carotenoid contents of some algae species using different solvents. *Turkish Journal of Botany*, 22(1), 13-18.
- Fatemi, H., Esmailpour, B., Soltani-Toolarood, A., & Nematollah Zadeh, A. (2017). Effects of silicon nano-particle nutrition on growth and physiological characteristics of *Coriandrum sativum* L. under lead stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 33(5), 853-870. [In Farsi]
- Ganjeali, A., Saffar Yazdi, A., Chenyani, M., Lahouti, M., & Rezaei, Z. (2015). The effects of boron on improving aluminum tolerance in coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Iranian Journal of Plant Biology*, 7(23), 63-74. [In Farsi]
- Ghorbanli, M., & Kiapour, A. (2012). Copper-induced changes on pigments and activity of non-enzymatic and enzymatic defense systems in *Portulaca oleracea* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 28(2), 235-247. [In Farsi]
- Gill, S.S., Khana, N.A., & Tutejab, N. (2011). Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidant machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.). *Plant Science*, 182, 112-120.

- Gohre, V., & Paszkowski, U. (2006). Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. *Planta*, 223(6), 1115-1122.
- Harborne, J. B. (1980). Plant phenolics. In E. A. Bell & B. V. Charlwood (Eds). *Encyclopedia of plant physiology, vol 8, Secondary plant products* (pp. 329-402). Berlin: Springer.
- Iqbal, N., Masood, A., Nazar, R., Syeed, S., & Khan, N. A. (2010). Photosynthesis, growth and antioxidant metabolism in mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars differing in cadmium tolerance. *Agricultural Sciences in China*, 9(4), 519-527.
- Jiang L., Yang, Y., Xu, W. H., Wang, C. L., Chen, R., Xiong, S. J. & Xie, D. T. (2014). Effects of ryegrass and arbuscular mycorrhiza on activities of antioxidant enzymes, accumulation and chemical farms of cadmium in different varieties of tomato. *Huanjing Kexue/Environmental Science*, 35(6), 2349-2357.
- Jung, C.H., Maeder, V., Funk, F., & Frey, B. (2003). Release of phenols from *Lupinus albus* L. roots exposed to Cu and their possible role in Cu detoxification. *Plant and Soil*, 252(2), 301-312.
- Kameli, A., & Losel, D. M. (1993). Carbohydrates and water stress in wheat plants under water stress. *New Phytologist*, 125(3), 609-614.
- Kapoor, R., (2008). Induced resistance in mycorrhizal tomato is correlated to concentration of jasmonic acid. *Journal of Biological Sciences*, 8(3), 49-56.
- Karimi, A., Khodaverdiloo, H., Sepehri, M., & Rasouli Sadaghiani, M. H. (2011). Arbuscular mycorrhizal fungi and metal contaminated soils. *African Journal of Microbiology Research*, 5(13), 1571-1576.
- Kazemalilou1, S., & Rasouli-Sadaghiani, M. H. (2012). Effect of soil cadmium pollution on some physiological parameters of Hyoscyamus plant in presence/absence of growth-promoting microorganisms. *Journal of Water and Soil Science*, 22(4), 17-30. [In Farsi]
- KHhalvati, M. A., Hu, Y., Mozafar, A., & Schmidhalter, U. (2005). Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth, water relations, and gas exchange of barley subjected to drought stress. *Plant Biology*, 7(06), 706-712.
- Krpata, D., Fitz, W., Peintner, U., Langer, I., & Schweiger, P. (2009). Bioconcentration of zinc and cadmium in ectomycorrhizal fungi and associated aspen trees as affected by level of pollution. *Environmental Pollution*, 157(1), 280-286.
- Lefebvre, D. D., & Edwards, C. D. (2010). Decontaminating heavy metals using photosynthetic microbes. *Emerging Environmental Technologies*, 2, 57-73.
- Main, D., Kumar, C., & Patel, N. K. (2015). Integrated micro-biochemical approach for phytoremediation of cadmium and zinc contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 111, 86-89.
- Matsouka, I., Beri, D., Chinou, I., Haralampidis, K. G., & Spyropoulos, C. (2011). Metals and selenium induce medicarpin accumulation and excretion from the roots of fenugreek seedlings: A potential detoxification mechanism. *Plant and Soil*, 343(1), 235-245.
- Matsouka, I., Beri, D., Chinou, I., Haralampidis, K., & Spyropoulos, C.G. (2011). Metals and selenium induce medicarpin accumulation and excretion from the roots of fenugreek seedlings: A potential detoxification mechanism. *Plant and Soil*, 343(1), 235-245.
- Michaelis, A., Takehisa, R., & Aurich, O. (1986). Ammonium chloride and zinc sulfate pretreatments reduce the yield of chromatid aberrations induced by TEM and maleic hydrazide in *Vicia faba*. *Mutation Research*, 173(3), 187-191.
- Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M., & Vanbreusegem, F. (2004). Reactive oxygen network of plants. *Trends Plant Science*, 9(10), 490-498.
- Mohammadi Sardoueiye, S., Boroomand, N., & Moghbeli, E. (2018). Effect of different mycorrhizal species inoculation on concentration of nutrient elements, yield per plant and antioxidant activity in peppermint (*Mentha piperita*) under salt stress. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(4), 127-142. [In Farsi]
- Mohammadi, S., Tabrizi, L., Delshad, M., & Moteshare Zadeh, B. (2013). Investigation of growth and yield of pot marigold (*Calendula officinalis* L.) under arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis and heavy metal stress conditions. *Ecological Agriculture Magazine*, 3(2), 48-59. [In Farsi]
- Moon, J.H., & Terao, J. (1998). Antioxidant activity of caffeic acid and dihydrocaffeic acid in lard and human low-density lipoprotein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(12), 5062-5065.

- Myung-Min, H., Trick, H.N., & Rajasheka, E.B., (2009). Secondary metabolism and antioxidant are involved in environmental adaptation and stress tolerance in lettuce. *Journal of Plant Physiology*, 166(2), 180-191.
- Nikolic, N., Kogic, D., Pilipovic, A., Pajivic, S., Krstic, B., Borisev, M., & Orlovic, S. (2008). Responses of hybrid poplar to cadmium stress photosynthetic characteristics, cadmium and proline accumulation and antioxidant enzyme activity. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 50(2), 95-103.
- Nourzad, S., Ahmadian, A., & Moghaddam, M. (2015). Proline, total chlorophyll, carbohydrate amount and nutrients uptake in coriander (*Coriandrum sativum* L.) under drought stress and fertilizers application. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 13(1), 131-139.
- Omidbaigi, R. (2006). Production and processing of medicinal plants (Vol. 3). Mashhad: Astan Ghods Razavi Publication. [In Farsi]
- Orcutt, D. M. & Nilsen, E. T. (2000). The physiology of plants under stress, soil and biotic factors (Vol. 2). USA: John Wiley.
- Orujei, Y., Shabani, L., Sharifi Tehrani, M., Aghababaei, F., & Enteshari, S. H. (2013). Dual effects of two mycorrhizal fungi on production of glycyrrhizin total phenolic and total flavonoids compounds in roots of *Glycyrrhiza glabra* L. *Iranian Journal of Plant Biology*, 5(17), 75-88. [In Farsi]
- Paquin, R., & Lechasseur, P. (1979). Observation sur la method de dosage de laproline libredans les extraits de plantes. *Canadian Journal Botany*, 57(18), 1851-1854.
- Rajesh, M., Nagarajan, A., Perumal, S., & Sellamuthu, M. (2008). The antioxidant activity and free radical scavenging potential of two different solvent extracts of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntz, *Ficus bengalensis* L. and *Ficus racemosa* L. *Food Chemistry*, 107(3), 1000-1007.
- Robinson, B. H., Mills, T. M., Petit, D., Fung, L. E., Green, S. R., & Clothier, B. E., (2000). Natural and induced cadmium accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation. *Plant and Soil*, 227(1), 301-306.
- Rodriguez, R., Redman, R., & Henson, J. M. (2004). The role of fungal symbioses in the adaptation of plants to high stress environments. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 9(3), 261-272.
- Sadat Shamshirgan, Z., Saeid Nematpour, F., & Safipour Afshar, A. (2015). Effect of mycorrhizal symbiosis on growth, some physiological parameters and cadmium accumulation in black seed (*Nigella sativa* L.). *Plant Process and Function*, 5(17), 133-144. [In Farsi]
- Shahabivand, S., Maivan, H. Z., Goltapeh, E. M., Sharifi, M., & Aliloo, A. A., (2012). The effects of root endophyte and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and cadmium accumulation in wheat under cadmium toxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 60, 53-58.
- Sharma, P., & Dubey, R. (2005). Lead toxicity in Plants. *Plant Physiology*, 17, 35-52.
- Singh, G., Reshma, R. K., & Ahmad, M. (2012). Effect of lead and nickel toxicity on chlorophyll and proline content of Urd (*Vigna mungo* L.) seedlings. *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 4(6), 136-41.
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.
- Smeet, K., Cuypers, A., Lambrechts, A., Semane, B., Hoet, P., Laere, A. V., & Vangronsveld, J., (2005). Induction of oxidative stress and antioxidative mechanisms in *Phaseolus vulgaris* after Cd application. *Plant Physiology and Biochemistry*, 43(5), 437-444.
- 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. *Quarterly Journal of Environmental Science*, 13(2), 37-48. [In Farsi]
- Teutonica, R. A., Palta, J. P., & Osborn, T. C. (1993). *In vitro* freezing tolerance in relation to winter survival of rapeseed cultivars. *Crop Science*, 33(1), 103-107.
- Toor, R. K., & Savage, G. P. (2005). Antioxidant activity in different fractions of tomatoes. *Food Research International*, 38(5), 487-494.
- Valentoviova, K., Haluskova, L., Huttova, J., Mistrik, I., & Tamas, L. (2010). Effect of cadmium on diaphorase activity and nitric oxide production in barley root tips. *Journal of Plant Physiology*, 167(1), 10-14.
- Vitoria, A., Cunha, P., Da, M., & Azevedo, R. A. (2005). Ultra structural changes of radish leaf exposed to cadmium. *Environmental and Experimental Botany*, 58(1-3), 47-52.
- Zolfaghari, M., Nazeri, V., Sefidkon, F., & Rejali, F. (2015). The effect of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and essential oil content of *Ocimum basilicum* l. *Plant Productions*, 37(4), 47-56. [In Farsi]