فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۴، شماره ۶۵، خرداد و تیرماه ۱۴۰۴ صفحه: ۱۳۷-۱۵۵
https://doi.org/10.22034/14.66.137

مقاله پژوهشی

بهبود خصوصیات فیزیولوژیک و وزن خشک اندام هوایی بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) با تلقیح مایکوریزا تحت سمیت کادمیوم

خاطره دستک‌زن، محسن موحدی دهنوی*، هوشنگ فرجی، امین صالحی و حمید اله‌دادی

گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴)

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر کاربرد قارچ مایکوریزا بر بهبود صفات فیزیولوژیک و وزن خشک اندام هوایی گیاه دارویی بادرنجبویه تحت سمیت کادمیوم، در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار طراحی شد. عوامل آزمایشی شامل سطوح مختلف نیترات کادمیوم در شش غلظت (صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک) و قارچ مایکوریزا آربوسکولار گونه *Funneliformis mosseae* در دو سطح (عدم کاربرد و کاربرد) بود. نتایج نشان داد کاربرد حداکثر غلظت کادمیوم موجب کاهش ۲۷/۴۵ درصدی محتوای آب نسبی و افزایش ۱/۶۵ برابری محتوای مالون دی‌آلدهید شد. قارچ مایکوریزا نیز محتوای قندهای محلول و پروتئین محلول برگ را به میزان ۱۱/۶۸ و ۲۱/۲۵ درصد بهبود بخشید. برهم‌کنش دوگانه قارچ و فلز سنگین نشان داد، کمترین میزان کلروفیل a، b و کل در تیمار ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک + عدم کاربرد قارچ به ترتیب به میزان ۰/۳۰۸، ۰/۱۸۹ و ۰/۶۳۸ میلی‌گرم بر گرم برگ مشاهده شد. همچنین بیشترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز تحت تیمار کاربرد مایکوریزا + ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک حاصل شد. به‌طورکلی افزایش غلظت سطوح کادمیوم تأثیر منفی بر صفات فیزیولوژیک بادرنجبویه داشت و وزن خشک اندام هوایی را در حداکثر غلظت خود به میزان ۷۶/۷۱ درصد کاهش داد. بیشترین میزان این صفت نیز با قارچ مایکوریزا در سطح بدون تنش به‌دست آمد. بنابراین استفاده از این کود زیستی جهت افزایش تحمل بادرنجبویه در خاک‌های آلوده به کادمیوم پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: قندهای محلول، کادمیوم، کود زیستی، مالون دی‌آلدهید، محتوای کلروفیل

مقدمه

نعناعیان (Lamiaceae) دارای بیشترین گونه‌های گیاهان دارویی هستند. بادرنجبویه با نام علمی *Melissa officinalis* L.، گیاه دارویی چندساله‌ای از این تیره است که به‌علت داشتن اسانس و ترکیب‌های دارویی ارزشمند، کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارد. از مواد مؤثره این گیاه جهت رفع برونشیت‌های مزمن، کاهش تب و لرز و میگرن، تقویت حافظه و تحریک سامانه ایمنی در مقابل بیماری ایدز استفاده می‌شود (Adamiak *et al.*, 2021).

امروزه فلزات سنگین از مهم‌ترین منابع آلودگی محیط زیست هستند؛ زیرا مقاومت و پایداری عناصر سنگین در خاک نسبت به سایر آلاینده‌ها طولانی‌تر و آلودگی خاک توسط آن‌ها

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: movahhedi1354@yu.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

تقریباً دائمی است (Fazekasova and Fazekas, 2020). در دهه‌های اخیر، بهره‌گیری از پساب‌ها و فاضلاب‌های خانگی و استفاده بی‌رویه از برخی کودهای شیمیایی منجر به افزایش سال به سال محتوای فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی و دیگر مشکلات جدی آلودگی زیست‌محیطی شده است (Tauqeer *et al*., 2022). فلزات سنگین می‌توانند باعث مهار فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان شده و حتی منجر به زوال ساختار خاک و از بین رفتن پوشش گیاهی و تنوع میکروبی شوند (Ju *et al*., 2020). در میان آلاینده‌های مختلف فلزات سنگین، کادمیوم به عنوان خطرناک‌ترین آلاینده فلزی برای رشد گیاه و سلامت انسان معرفی شده است (Pramanik *et al*., 2021). سمیت کادمیوم تا ۲۰ برابر بیشتر از سایر فلزات سنگین است و به علت تحرک‌پذیری بالای آن، در غلظت‌های کم نیز با ایجاد تنش اکسیداتیو برای گیاهان مضر است (Wang *et al*., 2019). اگر چه این فلز سنگین برای رشد گیاه ضروری نیست، اما به راحتی از طریق ریشه جذب می‌شود و سبب کلروز و نکروز شدن برگ‌ها، کاهش رشد و همچنین سبب کاهش مقدار کلروفیل کل و کاروتنوئیدها در گیاهان عالی می‌شود. در این راستا پژوهشی بر ریحان نشان داد با افزایش غلظت کادمیم از سطح صفر تا ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، محتوای کلروفیل a و b به ترتیب به میزان ۵۵/۸۹ و ۶۲/۳۴ درصد کاهش می‌یابد (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی کلروفیل a در مرزه تابستانی (Azizollahi *et al*., 2019)، کلروفیل b در ماریتیغال (پورتبریزی و همکاران، ۱۳۹۷)، کلروفیل کل در دو گونه نعناع (Song *et al*., 2019) و محتوای کاروتنوئید در بادرنجبویه (سادات موسوی و رضوی‌زاده، ۱۴۰۰) متأثر از سطوح مختلف تنش کادمیوم گزارش شده است. تجمع کادمیوم در منطقه ریزوسفر به سبب کاهش جذب آب و مواد غذایی، با برهم‌خوردن تعادل آب و کاهش فرآیند انتقال آب همراه است. الهه‌بخش و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای بر خرفه ابراز داشتند کاربرد ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک کم‌ترین محتوای نسبی آب برگ را در مقایسه با تیمار شاهد بروز داد. غلظت بالای کادمیوم همچنین منجر به افزایش نشت یونی می‌شود که به دنبال آن تخریب غشای سلولی گیاهان را درپی خواهد داشت (فضلی و مدن‌دوست، ۱۴۰۲). گیاهان برای مقابله با پیامدهای ناشی از سمیت کادمیوم، سازوکارهای دفاعی غیرآنزیمی و آنزیمی را توسعه داده‌اند. در رابطه با واکنش غیرآنزیمی گیاهان دارویی به تجمع کادمیوم، محققان افزایش غلظت قندهای محلول در ریشه و اندام هوایی ریحان (آقایی و همکاران، ۱۳۹۸) و افزایش تولید پرولین در گاوزبان اروپایی (محمودی و همکاران، ۱۳۹۸) را مورد اشاره قرار داده‌اند. همچنین افزایش فعالیت آنزیمی آنتی‌اکسیدان‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز در *Mentha piperita* و *M. spicata* برای جاروب‌کردن ROS ناشی از تنش کادمیوم مطرح شده است (Keunen *et al*., 2016).

یکی از اصول مهم در کشاورزی پایدار، استفاده از نهاده‌های درون مزرعه‌ای از جمله کودهای زیستی در سامانه‌های زراعی و حذف یا کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی است. قارچ‌های مایکوریزا به عنوان یکی از کودهای زیستی علاوه بر بهبود جذب عناصر غذایی، موجب بهبود ساختار خاک و افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی می‌شوند (Rivero *et al*., 2018). علاوه بر این نقش مایکوریزا در بهبود صفات فیزیولوژیکی چون محتوای کلروفیل a و b در گل همیشه‌بهار (کوچک‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲) و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در نخودفرنگی (Ghasembaghlou *et al*., 2022) و محتوای پرولین برگ (ثابتی و همکاران، ۱۴۰۳) در گاوزبان مثبت ارزیابی شده است.

با درنظر گرفتن وجود زمین‌های آلوده به فلزات سنگین در کنار محدودیت زمین‌های زراعی قابل کشت و از سوی دیگر مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف کودهای شیمیایی، لزوم مطالعه تأثیر عملکرد کودهای زیستی در بهبود واکنش گیاهان به تنش فلزات سنگین امری ضروری می‌نماید. لذا هدف از این پژوهش، ارزیابی تأثیر کاربرد قارچ مایکوریزا بر بهبود صفات فیزیولوژیک و وزن خشک اندام هوایی گیاه

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

دارویی بادرنجبویه تحت سمیت کادمیوم است.

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج در سال ۱۴۰۱ به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عوامل آزمایشی شامل سطوح مختلف کادمیوم در شش غلظت (صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک کادمیوم از منبع نیترات کادمیوم) و قارچ مایکوریزا آربوسکولار گونه *Funneliformis mosseae* در دو سطح (عدم کاربرد و کاربرد) بود. برای هر واحد آزمایشی دو گلدان در نظر گرفته و در نهایت آزمایش با ۷۲ گلدان انجام شد.

نشاءهای یک ماهه در مرحله دو تا سه برگی بادرنجبویه از شرکت زرگیاه فیروزآباد و قارچ وزیکولار آربوسکولار گونه *F. mosseae* از کلینیک گیاه‌پزشکی همدان تهیه شد. گلدان‌های پلاستیکی به ابعاد ۲۰×۱۳×۱۰ سانتی‌متر به نحوی از خاک (نسبت دو به یک، خاک مزرعه به ماسه نرم) پر شدند که سطح خاک هر گلدان تا دهانه آن ۵ سانتی‌متر فاصله داشت. در مرحله آماده‌سازی خاک، نمونه‌گیری جهت ارزیابی خصوصیات خاک تهیه گردید (جدول ۱). جهت آلوده‌سازی خاک به کادمیم، محلول نمک $Cd(NO_3)_2$ تهیه و به خاک اسپری شد و با دستگاه اتوکلاو به مدت ۱ تا ۲ ساعت ضدعفونی گردید (به خاک مربوط به گلدان‌های شاهد آب‌مقطر اسپری شد). گلدان‌ها به مدت ۴۵ روز به صورت متناوب تا حد ظرفیت زراعی آبیاری شدند تا در اثر خشک و تر شدن خاک، کادمیوم با خاک به تعادل برسد. سپس در مرحله انتقال نشاء (۶-۴ برگی)، ابتدا قارچ مایکوریزا به‌میزان ۵۰ گرم برای هر گلدان (گلدان‌های حاوی مایکوریزا) در زیر منطقه رشد ریشه اضافه شد و نشاءها (۳ بوته) به گلدان‌های اصلی انتقال داده شد. سه هفته بعد از انتقال نشاءها سرزنی بادرنجبویه (جهت شاخه‌زنی بهتر) انجام شد و بعد از دو ماه رشد، قبل از مرحله گل‌دهی، نمونه‌گیری برای صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک و نهایتاً برداشت بوته‌ها انجام گرفت.

اندازه‌گیری محتوای کلروفیل و کاروتنوئید برگ: ابتدا ۰/۵ گرم برگ تازه با ۲۰ سی‌سی استون ۸۰ درصد ساییده شد و سپس جذب محلول رویی در طول‌موج‌های ۶۴۵، ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل و ۴۸۰ نانومتر برای کاروتنوئید به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) اندازه‌گیری شد (Arnon, 1949; Lichenthaler, 1987).

اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ: قطعاتی تقریباً هم‌اندازه از نمونه تازه برگ‌های جوان و توسعه‌یافته، توزین گردید. سپس وزن آماس نمونه‌ها پس از قرار گرفتن در ظرف حاوی آب‌مقطر در تاریکی به مدت ۲۴ ساعت و وزن خشک آن بعد از قرار گرفتن در آون (۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد) اندازه گرفته شد. در نهایت مقدار محتوای نسبی آب برگ‌ها بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (Mishra and choudhuri, 1999).

$$RWC\ (\%) = ((FW - DW) / (TW - DW)) \times 100$$

در این رابطه RWC = محتوای نسبی آب (درصد)، FW = وزن تر، DW = وزن خشک و TW = وزن آماس.

اندازه‌گیری میزان نشت الکترولیت‌ها: از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته نمونه‌هایی به شکل دیسک دایره‌ای به اندازه یکسان تهیه شد. سپس نمونه‌ها در ۳۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر و در دمای اتاق در جای تاریک قرار داده شد. بعد از گذشت ۲۴ ساعت هدایت الکتریکی هر نمونه با استفاده از EC متر اندازه‌گیری شد (EC1). لوله‌های آزمایش سپس در حمام آبجوش با دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۵ دقیقه قرار گرفت. پس از سرد شدن در دمای اتاق بعد از ۲۴ ساعت مجدداً هدایت الکتریکی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (EC2). درصد نشت الکترولیت کل با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد (McKay, 1992).

$$\text{درصد نشت الکترولیت} = (EC1/EC2) \times 100$$

اندازه‌گیری محتوای پرولین برگ: به عصاره الکلی برگ‌های جوان و توسعه‌یافته، آب دوبار تقطیر، نین‌هیدرین و اسید استیک گلاسیال اضافه و سپس نمونه‌ها داخل حمام آب جوش قرار داده شد. در مرحله بعد نمونه‌ها در دمای محیط

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

هدایت الکتریکی (ds/m)	pH	کادمیوم	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	ماده آلی	آهک	شن	سیلت	رس	بافت خاک
		($mg.kg^{-1}$)			(٪)						
۰/۵۹	۷/۸۷	۰/۵	۱۶۴	۳/۸	۰/۰۲	۰/۴۳	۴۲/۸	۴۵/۲	۴۳/۴	۱۱/۴	لوم سیلتی

خنک شدند. بعد از آن به هـر نمونه بنزن اضافه شد تا پرولین وارد فاز بنزن شود. سپس بعـد از استراحت میزان جذب نمونه‌ها در طول‌مـوج ۵۱۵ نانومتر با اسـتفاده از اسپکتروفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) خوانده شد (Paquine and Lechasseur, 1979).

اندازه‌گیری محتوای قندهای محلول برگ: به عصاره الکلی برگ‌های جوان و توسعه‌یافته آنترون تازه تهیه‌شده اضافه گردید. سپس بعد از قرارگرفتن در بن‌ماری، به منظور خنک شدن، به نمونه‌ها استراحت داده شد. میزان جذب نمونه‌ها در طول‌موج ۶۲۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) خوانده شد (Irigoyen *et al.*, 1992).

اندازه‌گیری محتوای مالون دی‌آلدهید برگ: نمونـه برگ‌های جوان در TCA (تری‌کلرو استیک اسید) عصاره‌گیری و پس از سانتریفیوژ یک میلی‌لیتر از سوسپانسیون جـدا شده و به آن TBA (تیوباربیتوریک اسید)، محلول در TCA ۲۰ درصد اضافه شد. محلول سنجش ۳۰ دقیقه در بن‌ماری با دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد و بعـد از آن ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. میزان مالون دی‌آلدهید بر اساس جذب ماده رویی در طول‌موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر محاسبه شد (Heath and Pacher, 1968).

اندازه‌گیری پروتئین محلول برگ: ۰/۱ گرم نمونه برگ در بافر فسفات (۵۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۷/۲) ساییده شده و به مدت ۱۵ دقیقه در سانتریفیوژ با دور ۱۴۰۰۰ دور در دقیقه قرار داده شد. سپس محلول رویی جدا شده و از این عصاره برای سنجش پروتئین استفاده شد. معرف برادفورد با عصاره پروتئین و آب‌مقطر مخلوط شد و بعد از ۵ دقیقه جذب در طول‌موج ۵۹۵ نانومتر توسط اسپکتوفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) خوانده شد (Bradford, 1976).

سنجش فعالیت کاتالاز: محلول واکنش حاوی ۰/۵ میلی‌لیتر H_2O_2 ۱۰ میلی‌مولار، ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی‌مولار با pH= ۶/۸ و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. با شروع تجزیه H_2O_2 در محیط، واکنش آغاز شد و میزان کاهش جذب در طول زمان در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر و توسط اسپکتروفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) خوانده شد (Aebi, 1984).

سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز: به ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره آنزیمی، ۲ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۶۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۱، ۰/۵ میلی‌لیتر گایاکول ۲۸ میلی‌مولار (به عنوان معرف) و ۰/۵ میلی‌لیتر H_2O_2 ۵ میلی‌مولار اضافه شد و جذب محلول در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر خوانده شد (Mac-Adam *et al.*, 1992).

سنجش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز: مخلوط واکنش شامل، ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار با pH= ۷/۵ حاوی NaEDTA ۰/۱ میلی‌مولار، متیونین ۱۳ میلی‌مولار، نیتروبلوتترازولیوم ۷۵ میکرومولار، ریبوفلاوین ۴ میکرومولار و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی به مدت ۱۵ دقیقه در شدت نور تقریباً ۸۰۰۰ لوکس قرار گرفت و پس از این مدت جذب در طول‌موج ۵۶۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) خوانده شد (Beauchamp and Fridovich, 1971).

وزن خشک اندام هوایی: اندام هوایی ۳ بوته موجود در گلدان مختص به صفات مورفولوژیک جدا و پس از شستشو با آب‌مقطر و خشک‌شدن در آون، در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، با ترازو وزن شدند و میانگین آن‌ها یادداشت شد.

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

شد. مقایسه میانگین اثرات اصلی و یا برهم‌کنش‌ها به‌روش LSD در سطح ۵ درصد انجام گرفت. رسم نمودارها نیز به کمک Excel صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

محتوای کلروفیل a برگ: برهمکنش دوگانه تنش کادمیوم در کود زیستی مایکوریزا در سطح احتمال یک درصد بر محتوای کلروفیل a معنی‌دار بود (جدول ۲). به‌طورکلی نتایج نشان داد که با افزایش کادمیوم محتوای کلروفیل a کاهش می‌یابد و کاربرد مایکوریزا تأثیر مثبت و معنی‌داری بر محتوای آن داشته است. بیشترین محتوای کلروفیل a مربوط به عدم کاربرد کادمیوم+کاربرد مایکوریزا (۰/۷۶۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) بود که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم+کاربرد مایکوریزا نشان نداد. همچنین کم‌ترین میزان آن با میانگین ۰/۳۰۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در سطح ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم + عدم کاربرد مایکوریزا حاصل شد (شکل ۱- A).

محتوای کلروفیل b برگ: برهم‌کنش دوگانه کادمیوم × مایکوریزا بر محتوای کلروفیل b در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). براساس شکل ۱- B بیشترین محتوای کلروفیل b برگ‌ها در تیمار عدم کاربرد کادمیوم + کاربرد مایکوریزا (با میانگین ۰/۴۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) بود که تفاوت معنی‌داری با سایر سطوح آماری نشان داد. همچنین کمترین آن در غلظت ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک + عدم کاربرد مایکوریزا با میانگین ۰/۱۸۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ مشاهده شد.

محتوای کلروفیل کل برگ: برهمکنش دوگانه کادمیوم در مایکوریزا بر کلروفیل کل در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها (شکل ۱- C) نشان داد با افزایش تنش وارد شده به گیاه بادرنجبویه از محتوای کلروفیل کل برگ کاسته شد و در هر سطح تنش کادمیوم کاربرد مایکوریزا موجب افزایش محتوای کلروفیل کل برگ گشت؛ به‌طوریکه بیشترین محتوای کلروفیل کل برگ در تیمار عدم کاربرد کادمیوم + کاربرد مایکوریزا با میانگین ۱/۲۱ میلی‌گرم بر گرم برگ تازه ثبت گردید و کمترین آن در تیمار عدم کاربرد مایکوریزا + ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم با میانگین ۰/۶۳۸ میلی‌گرم بر گرم برگ تازه مشاهده شد که اختلاف بین آن‌ها ۴۷/۲۷ درصد برآورد شد.

تحقیقات نشان می‌دهد اولین اثر کادمیم بر گیاه، کلروز برگ‌ها و کاهش فتوسنتز است (Ivanov and Kosobryukhov, 2020). فلزات سنگین از عملکرد فتوسیستم‌های I و II ممانعت می‌کنند (Grajek *et al*., 2020). درواقع کادمیوم با اثرگذاری بر ناقلان الکترون و از طریق جایگزینی با اتم منیزیم مرکزی، مولکول کلروفیل را غیرفعال می‌کند. علاوه بر این کادمیوم آنزیم کلروفیلاز را که تجزیه‌کننده کلروفیل است، فعال می‌کند و ساخت آنزیم‌های گروه سولفیدریل دخیل در بیوسنتز کلروفیل (از جمله ۵-آمینولاولینیک اسید) و ترکیب پروتوکلروفیلاید ردوکتاز را کاهش می‌دهد (شیخ‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱). حمله رادیکال‌های آزاد ناشی از تنش اکسیدکننده نیز عامل دیگری بر کاهش میزان کلروفیل تحت این شرایط است (Khorasaninejad *et al*., 2018). مطابق با یافته‌های حاضر، سادات موسوی و رضوی‌زاده (۱۴۰۰) در بادرنجبویه تأیید نمودند غلظت بالای کادمیوم (۱۵۰ و ۳۰۰ میکرومولار) با کاهش محتوای کلروفیل a، b و کل همراه است. نتایج پژوهش پورتبریزی و همکاران (۱۳۹۷) بر ماریتیغال نشان داد کادمیوم در غلظت ۳۰۰ میکرومولار، گرچه اثر چندانی بر کلروفیل a نداشته اما توانسته است میزان کلروفیل b را همچون غلظت ۶۰۰ و ۹۰۰ میکرومولار کاهش دهد. پژوهشگران تأثیر مایکوریزا بر افزایش محتوای کلروفیل را به بهبود دسترسی عناصر نیتروژن و فسفر به عنوان جزئی از ساختار کلروفیل نسبت داده‌اند که در پی آن سبزینگی، توانایی جذب نور خورشید و تولید مواد فتوسنتزی افزایش می‌یابد (Begum *et al*., 2019). قارچ مایکوریزا نیز با حفظ رطوبت خاک و با در دسترس قرار دادن حجم بیشتری از خاک در اختیار ریشه گیاه، به عنوان یک حامل انرژی باعث جذب بیشتر عناصر غذایی نیتروژن در مرزه (بستامی و امیرنیا، ۱۴۰۱)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر کادمیوم و مایکوریزا بر صفات فیزیولوژیک و وزن خشک اندام هوایی در بادرنجبویه

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید	نشت الکترولیت	محتوای نسبی آب برگ	محتوای قندهای محلول کل
کادمیوم	۵	۰/۴۰۵**	۰/۰۲**	۰/۰۹۴**	۰/۳۲۸**	۶۶۶/۷۳**	۵۲۷/۱۸**	۶۲۵/۷۸**
مایکوریزا	۱	۰/۳۰۴**	۰/۰۲۴**	۰/۵**	۲/۲۶**	۳۵۳/۳۸**	۱۴۹/۷۴**	۶۹/۶۴**
کادمیوم × مایکوریزا	۵	۰/۰۲۹**	۰/۰۰۵*	۰/۰۴۳*	۰/۰۹۴*	۱۶/۸۶**	۰/۸۴۷^{ns}	۲/۸۱۵^{ns}
خطا	۲۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۱۵	۰/۰۳۱	۳/۸۲۳	۶/۸۲	۲/۰۱
ضریب تغییرات (٪)	-	۱۳/۰۸	۱۹/۰۳	۱۳/۲۵	۸/۳۴	۸/۰۰۵	۳/۵۴	۵/۶۲۸

^{ns}، ** و * به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد را نشان می‌دهد.

ادامه جدول ۲- تجزیه واریانس اثر کادمیوم و مایکوریزا بر صفات فیزیولوژیک و وزن خشک اندام هوایی در بادرنجبویه

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		پرولین برگ	پروتئین محلول برگ	مالون دی‌آلدهید	کاتالاز	پراکسیداز	سوپراکسید دیسموتاز	وزن خشک اندام هوایی
کادمیوم	۵	۲/۳۹**	۴۵/۸۶**	۶۷/۹۱**	۶۹۵۷/۳**	۱۵/۳۶**	۲/۶۲۵**	۳/۳۲۹**
مایکوریزا	۱	۳/۶۵**	۴۶/۰۸**	۶/۶۴**	۱۶۶۴/۹**	۳/۵۱**	۰/۵۷۵**	۱۴/۶۹**
کادمیوم × مایکوریزا	۵	۰/۲۲۹**	۱/۱۶۰^{ns}	۰/۰۲۹ ^{ns}	۲۳۶/۹**	۰/۲۲۱*	۰/۰۳۵^{ns}	۰/۴۴۴*
خطا	۲۴	۰/۰۵۶	۰/۸۶۳	۰/۴۱۳	۳۰/۹۶	۰/۰۷۴	۰/۰۲۱	۰/۱۴۰
ضریب تغییرات (٪)	-	۹/۷۸	۸/۰۰۱	۶/۶۴	۱۱/۵۸	۱۳/۲۴	۵/۸۳۷	۱۵/۰۶

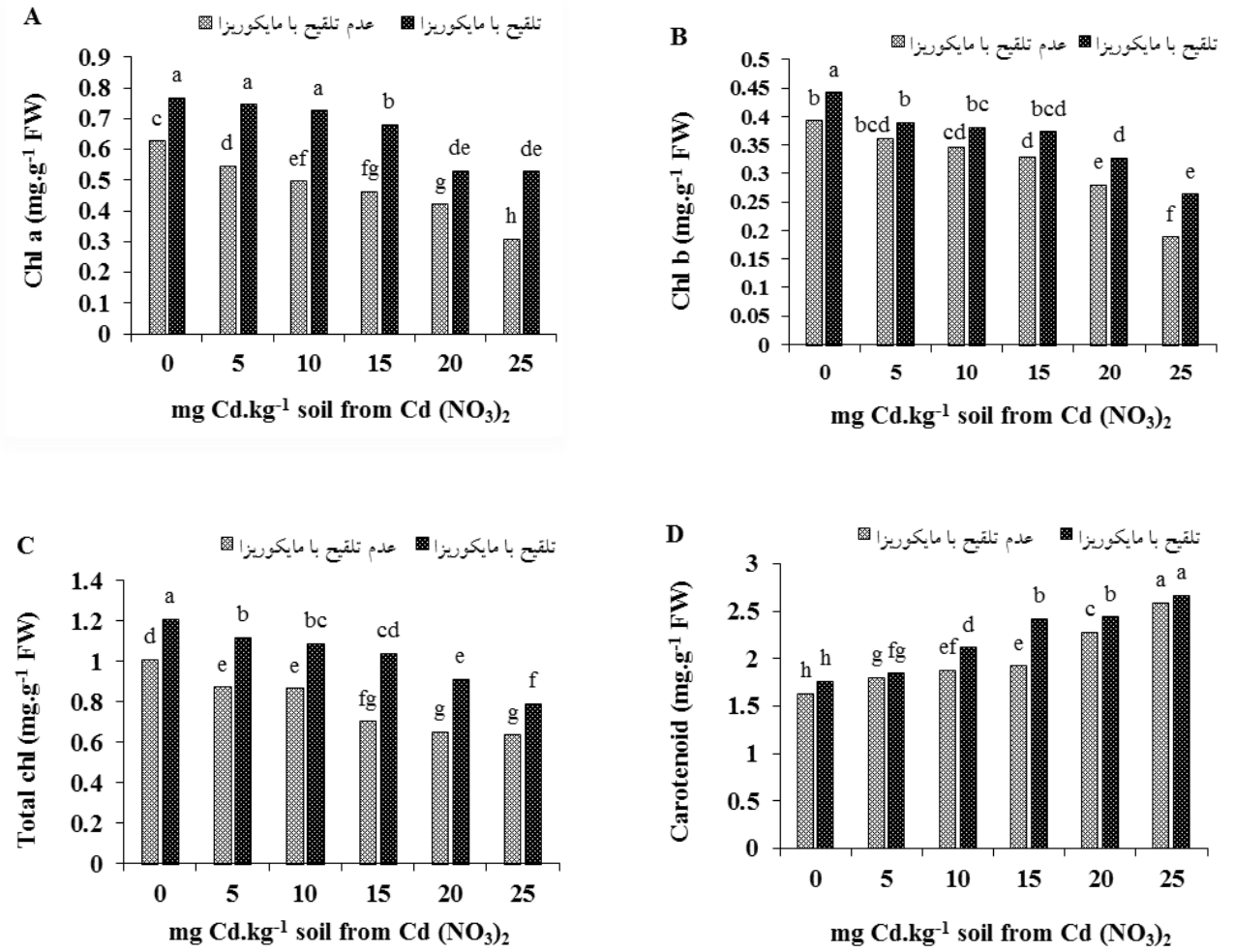
^{ns}، ** و * به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد را نشان می‌دهد.

و فسفر در خارمریم (مزارعی و همکاران، ۱۳۹۶) می‌شود. با توجه به ارتباط مستقیم بین این عناصر و ساختار کلروفیل، میزان رنگیزه‌های کلروفیل a، b و کل افزایش می‌یابد.

محتوای کاروتنوئید برگ: برهم‌کنش دوگانه کادمیوم در قارچ مایکوریزا بر محتوای کاروتنوئید برگ در سطح احتمال خطای پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین برهم‌کنش قارچ مایکوریزا و کادمیوم نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم کاروتنوئید برگ افزایش و کاربرد قارچ مایکوریزا این روند افزایشی را تسریع کرده است؛ به‌طوری‌که کم‌ترین محتوای کاروتنوئید برگ در تیمار عدم کاربرد کادمیوم و عدم کاربرد مایکوریزا با میانگین ۱/۶۳۷ میلی‌گرم در گرم برگ تازه و بیشترین آن با میانگین ۲/۶۶۶ در تیمار ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و کاربرد مایکوریزا بود. اختلاف بین آن‌ها ۵۸/۹۹ درصد برآورد شد (شکل ۱- D).

کاروتنوئیدها علاوه بر نقش ساختمانی و جذب نور به‌عنوان یکی از مولکول‌های دخیل در سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی، نقش حفاظتی در برابر تنش اکسیداتیو دارند؛ به همین دلیل در جریان مواجهه با تنش فلزهای سنگین افزایش می‌یابند. این رنگیزه‌ها در سمیت‌زدایی کلروفیل نقش دارند و به صورت مستقیم اکسیژن آزاد را غیرفعال می‌کنند و یا از طریق فرونشاندن کلروفیل برانگیخته شده، به‌صورت غیرمستقیم از تشکیل اکسیژن یکتایی جلوگیری می‌کنند؛ در نتیجه دستگاه فتوسنتزی را از شروع پراکسیداسیون لیپیدی محافظت می‌کنند (Dogan, 2019). در پژوهش حاضر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]



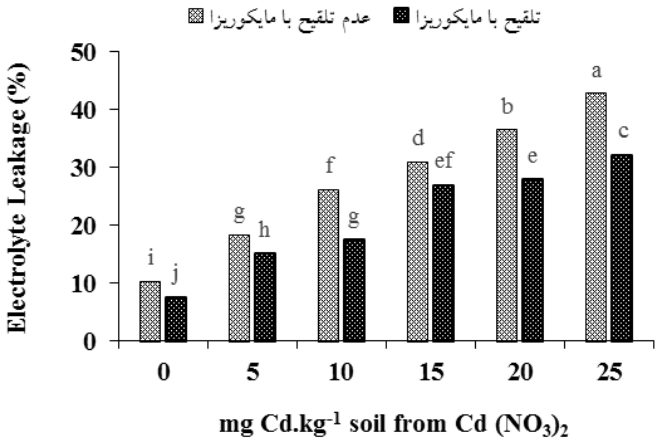
شکل ۱- مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا آربوسکولار و کادمیوم برای محتوای کلروفیل a (A)، b (B)، کل (C) و محتوای کاروتنوئید برگ (D) در بادرنجبویه. حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال خطای پنج درصد بر اساس آزمون LSD است.

نیز به‌نظر می‌رسد بالابودن کاروتنوئید برگ موجب حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی گردیده است و کاربرد قارچ مایکوریزا با حفظ رطوبت و همچنین با افزایش دسترسی به عناصر غذایی توانسته است در روند افزایش کاروتنوئید نقش مثبتی داشته باشد. بر خلاف این نتایج، آقایی و همکاران (۱۳۹۸) بر ریحان بیان کردند، با افزایش کادمیوم محتوای کاروتنوئید کاهش پیدا می‌کند.

درصد نشت الکترولیت‌ها: برهم‌کنش دوگانه کادمیوم × قارچ مایکوریزا بر نشت الکترولیت‌ها در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). با افزایش سطح کادمیوم خاک، نشت الکترولیت به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین میزان نشت الکترولیت (۴۲/۸۸ درصد) مربوط به تیمار آلودگی با ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در هر کیلوگرم خاک و بدون کاربرد قارچ مایکوریزا بود. درحالی‌که کم‌ترین مقدار (۷/۶۹ درصد) در عدم آلودگی و کاربرد قارچ مایکوریزا مشاهده شد. قارچ مایکوریزا تأثیری مثبت در بهبود این صفت تحت سطوح بالای تنش داشته است (شکل ۲).

از جمله آسیب‌های فلزات سنگین به گیاه، تخریب ساختار غشاء سلولی به علت پراکسیداسیون لیپیدی است. غلظت بالای کادمیوم منجر به افزایش نشت یونی می‌شود و دلیلی بر کاهش شاخص پایداری غشاء است. این امر نشانگر آن است که ساختار و عملکرد غشای پلاسمایی به سرعت توسط فلزات

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]



شکل ۲- مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا آربوسکولار و کادمیوم برای درصد نشت الکترولیت در بادرنجبویه. حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال خطای پنج درصد بر اساس آزمون LSD است.

سنگین تحت تأثیر قرار می‌گیرد. چنین آسیبی ناشی از سازوکارهای مختلف شامل اکسیداسیون توسط گونه‌های فعال شده اکسیژن و یا تغییرات در نفوذپذیری است که ممکن است در مهار فعالیت H^+-ATP_{ase} غشای پلاسمایی شرکت کند و تغییر در ترکیب و سیالیت چربی‌ها را در پی داشته باشد (Hatata and Adel Abdel-Aal, 2008). نتایج مقصودی و همکاران (۱۳۹۹) بر گیاه اسفناج نشانگر افزایش درصد نشت الکترولیت با افزایش میزان کادمیوم است. به‌گونه‌ای که کمترین درصد نشت الکترولیت مربوط به تیمار شاهد و بیشترین آن نیز مربوط به تیمار ۶۰۰ میکرومولار کادمیوم بود. در پژوهشی که بر روی گیاه نعناع فلفلی صورت گرفت، نتایج حاکی از این بود که همزیستی با قارچ باعث بهبود پایداری غشاء در این گیاه شد (پیردشتی و همکاران، ۱۳۹۶). محققان این پژوهش بیان داشتند قارچ‌های مایکوریزا از طریق کلات‌کردن فلزات سنگین در میسلیوم‌های خارجی باعث افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش فلزات سنگین و کاهش درصد نشت الکترولیت‌ها می‌شوند.

محتوای نسبی آب برگ: اطلاعات جدول ۲ بیانگر معنی‌داری اثرات اصلی تنش کادمیوم و قارچ مایکوریزا در سطح احتمال خطای یک درصد بر محتوای نسبی آب برگ بادرنجبویه دارد. مقایسه میانگین نشان داد که حداکثر غلظت کادمیوم (۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم خاک) در مقایسه با تیمار شاهد به میزان ۲۷/۴۵ درصد محتوای نسبی آب برگ را کاهش می‌دهد. همچنین کاربرد مایکوریزا نیز به میزان ۵/۶۷ درصد محتوای این صفت را بهبود بخشید (جدول ۳).

محتوای نسبی آب برگ وضعیت مناسبی از تعادل بین میزان عرضه نسبی آب و میزان تعرق در برگ را نشان می‌دهد و مقدار بالاتر آن، با حفظ آماس سلولی عامل تداوم رشد در شرایط تنش است. در سلول‌های برگ سمیت فلزات سنگین می‌تواند نفوذپذیری غشا پلاسمایی را تحت تأثیر قرار دهد و سبب کاهش در محتوای آب بافت شود. به‌ویژه در مورد کادمیوم که تأثیر آن در برهم‌کنش با تعادل آبی گزارش شده است (رفیق‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳). قارچ‌های مایکوریزا از طریق ارتباط همزیستی با ریشه‌های گیاهان، شبکه‌ای از هیف‌ها را ایجاد می‌کنند که با کاهش تولید اتیلن و توسعه سامانه ریشه‌ای گیاه، قادر به جذب آب و مواد مغذی از خاک است. این عمل به بهبود ساختار خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین کمک می‌کند (محمدی‌فر و مقدم، ۱۳۹۹). همچنین مایکوریزا به‌طور وسیعی هدایت روزنه‌ای را کاهش داده و باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌گردد؛ بنابراین تحمل تنش‌های محیطی برای گیاه آسان‌تر می‌شود (Ye *et al.*, 2022). هم‌سو با این نتایج در پژوهشی رستمی و همکاران (۱۴۰۱) بر گیاه آویشن بیان کردند با افزایش فلزات سنگین محتوای نسبی آب بافت کاهش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر اصلی سطوح تنش کادمیوم و قارچ مایکوریزا بر برخی صفات فیزیولوژیک در بادرنجبویه

تیمارهای آزمایشی		محتوای نسبی آب برگ (درصد)	قندهای محلول برگ (میلی‌گرم بر گرم)	پروتئین محلول برگ (میلی‌گرم بر گرم برگ تازه)	مالون دی‌آلدهید (میکرومول بر گرم)	سوپراکسید دیسموتاز (واحد بر گرم در دقیقه)
غلظت کادمیوم (میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک)	۰	۸۸/۰۲۵^{a}	۱۴/۱۸^{e}	۱۴/۷۳^{a}	۵/۳۱^{f}	۱/۶۷^{e}
	۵	۸۰/۳۰۷^{b}	۱۴/۶۸^{e}	۱۴/۵۲^{a}	۷/۱۶^{e}	۱/۹۴^{e}
	۱۰	۷۵/۶۸۷^{c}	۲۰/۳۴^{d}	۱۲/۵۶^{b}	۸/۴۹^{d}	۲/۳۰^{d}
	۱۵	۷۰/۲۱۸^{d}	۲۹/۸۳^{c}	۱۱/۰۱۳^{c}	۱۰/۰۹^{c}	۲/۶۵^{c}
	۲۰	۶۵/۹۲۷^{e}	۳۳/۹۹^{b}	۱۰/۰^{d}	۱۲/۸۴^{b}	۳/۰۳^{b}
	۲۵	۶۳/۸۶۰^{f}	۳۸/۱۳^{a}	۷/۶۹^{e}	۱۴/۱۱^{a}	۳/۴۲^{a}
قارچ مایکوریزا	عدم کاربرد	۷۱/۸۲۴^{b}	۲۳/۸۰^{b}	۱۰/۶۸^{b}	۱۰/۲۸^{a}	۲/۳۷^{b}
	کاربرد	۷۵/۹۰۳^{a}	۲۶/۵۸^{a}	۱۲/۹۵^{a}	۷/۰۵^{b}	۲/۶۳^{a}

در هر ستون حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

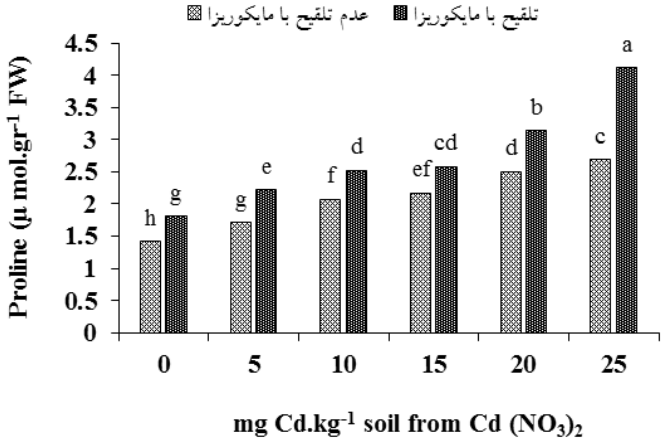
می‌یابد و تلقیح با مایکوریزا بیشترین مقدار این صفت را (در مقایسه با عدم تلقیح) بروز می‌دهد.

محتوای قندهای محلول برگ: اثرات اصلی کادمیوم و مایکوریزا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). تنش کادمیوم موجب افزایش محتوای قندهای محلول برگ در بادرنجبویه شد و کاربرد قارچ مایکوریزا نیز اثر مثبتی بر آن داشته و به روند افزایشی آن کمک نموده است (جدول ۳). با توجه به جدول ۳، میانگین بیشترین محتوای قندهای محلول برگ (۳۸/۱۳ میلی‌گرم بر گرم بافت تر برگ) از تیمار کاربرد ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در هر کیلوگرم خاک حاصل شد که به نسبت تیمار شاهد (کادمیوم صفر) به میزان ۱/۶۸ برابر افزایش یافته است. کاربرد مایکوریزا نیز نسبت به عدم کاربرد، ۱۱/۶۸ درصد محتوای قندهای محلول را افزایش بخشید (جدول ۳).

به‌نظر می‌رسد گیاه بادرنجبویه با افزایش میزان قندهای محلول در شرایط تنش کادمیوم تا حدودی توانسته است به بهبود تنظیم اسمزی کمک کند. تجمع قندهای محلول در حفظ سازوکارهایی مانند ترمیم و جبران حجم از دست رفته سلول و آماس آن، کاهش صدمات ناشی از رادیکال‌های آزاد به سلول، حفاظت و ثبات آنزیم‌ها و ساختمان غشا مهم است (Mohammadi *et al.*, 2016). مطابق با یافته‌های این تحقیق، در پژوهشی بر گیاه ریحان آقایی و همکاران (۱۳۹۸) بیان داشتند کادمیوم در غلظت‌های ۴ و ۸ میلی‌مولار محتوای قندهای محلول اندام‌های هوایی را به‌ترتیب ۴/۲۳ و ۵/۳۸ برابر تیمار شاهد افزایش داد. مایکوریزا با افزایش سطح هورمون‌های گیاهی مانند سیتوکنین و جیبرلین در گیاهان تلقیحی موجب افزایش قندهای محلول و بهبود رشد می‌شوند. همچنین نقش این قارچ‌ها در بهبود وضعیت آبی و تسهیل جذب عناصر ضروری حائز اهمیت است. در تحقیقی بر روی گلرنگ، مصرف کودهای زیستی باعث روند افزایشی در مقدار قندهای محلول گردید (رضایی چیانه و همکاران، ۱۳۹۶).

محتوای پرولین برگ: تجزیه واریانس حاکی از معنی‌داری برهم‌کنش دوگانه کادمیوم در مایکوریزا در سطح احتمال خطای یک درصد بر محتوای پرولین برگ دارد (جدول ۲). مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم، محتوای پرولین برگ به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. کاربرد قارچ مایکوریزا نیز در مقایسه با شاهد (عدم کاربرد مایکوریزا) تأثیر معنی‌داری در افزایش این صفت در هر یک از سطوح کادمیوم دارد. در تیمار ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک + کاربرد قارچ مایکوریزا بیشترین محتوای پرولین برگ (۴/۱۱ میکرومول بر گرم بافت تر برگ) و از تیمار

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]



شکل ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا آربوسکولار و کادمیوم برای محتوای پرولین برگ در بادرنجبویه. حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال خطای پنج درصد بر اساس آزمون LSD است.

شاهد کمترین آن (۱/۴۲ میکرومول بر گرم بافت تر برگ) حاصل گردید (شکل ۳).

اسیدآمینه پرولین به‌عنوان یک ماده اسمزی جاروب‌کننده گونه‌های اکسیژن واکنشگر و یک محافظ مولکولی برای حفظ ساختار پروتئین و خنثی‌کردن اثر تنش فلزات سنگین در گیاه، مطرح است (Zhang *et al.*, 2019). تجمع پرولین به عنوان تثبیت‌کننده پروتئین، پاسخ فیزیولوژیکی رایج گیاهان تحت تنش فلزات سنگین است. نتایج نشان داد همبستگی مثبت و معنی‌داری بین پرولین با نشت الکترولیت (**r=۰/۸۸) وجود دارد (جدول ۴). هم‌سو با این نتایج در آزمایشی بر گیاه گاوزبان اروپایی مشخص شد بیشترین میانگین محتوای پرولین گیاهچه‌ها در شرایط تنش ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از شرایط بدون تنش بود (محمودی و همکاران، ۱۳۹۸). اعمال کودهای زیستی به جهت تأمین عناصر مورد نیاز گیاه (از جمله نیتروژن) و با ایجاد شرایط مطلوب رشد می‌تواند منجر به افزایش محتوای پرولین برگ‌ها شود. برخی از محققان بر این باورند که تأثیر مایکوریزا در بهبود محتوای پرولین ناشی از تجمع در سلول و در نتیجه کاهش پتانسیل آب برگ است که گیاه را از صدمات تنش محافظت می‌کند (Khalafallah and Abo-ghalia, 2008). در پژوهشی بر آویشن باغی بیشترین محتوای پرولین (۰/۵۱ میکروگرم بر گرم وزن تر) در تلقیح با قارچ *F. mosseae* بدست آمد و کمترین محتوای پرولین نیز از عدم تلقیح با قارچ مشاهده شد (رستمی و همکاران، ۱۴۰۱).

محتوای پروتئین محلول برگ: تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات اصلی قارچ مایکوریزا و کادمیوم بر مقدار پروتئین محلول برگ بادرنجبویه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). با افزایش غلظت کادمیوم در خاک از غلظت پروتئین محلول برگ در گیاه کاسته شد، به‌گونه‌ای که تیمار ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم به میزان ۹۱/۵۴ درصد محتوای این صفت را کاهش داد. در جهت مقابل اعمال قارچ *Funnetiformis mosseae* به میزان ۲۱/۲۵ درصد محتوای پروتئین‌های محلول برگ را (در مقایسه با عدم کاربرد قارچ) افزایش داد (جدول ۳).

کادمیوم با اختلال در متابولیسم نیتروژن از طریق مهار فعالیت آنزیم‌هایی مانند گلوتامین سینتاز، گلوتامات سینتاز و نیترات ردوکتاز و همچنین به واسطه فرآیند احیاء نیترات سبب کاهش تولید پروتئین شده و رشد گیاه را متوقف می‌کند (Khan *et al.*, 2016). علاوه بر این کادمیوم با تولید رادیکال‌های آزاد سبب تخریب ساختار پروتئین‌ها و اکسید شدن آنها می‌شود. کاربرد کودهای زیستی، با تثبیت زیستی بیشتر نیتروژن، سنتز اسیدهای آمینه در برگ‌ها را افزایش داده و به انباشتگی پروتئین در برگ‌ها یاری می‌دهد (نصری و قادری، ۱۳۹۳). از طرف دیگر اعمال قارچ مایکوریزا با افزایش تولید

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

پرولین که یکی از سازوکارهای مهم سمیت‌زدایی فلزات سنگین در بیشتر گیاهان است، موجب کاهش آسیب به غشا و پروتئین‌ها می‌شود. در پژوهشی بر گیاه دارویی گشنیز بیان شد با افزایش غلظت کادمیوم میزان پروتئین محلول برگ کاهش و با کاربرد قارچ مایکوریزا پروتئین محلول برگ افزایش پیدا می‌کند ولی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین دو گونه قارچ مایکوریزا مشاهده نشد (محمدی‌فر ومقدم، ۱۳۹۹). پژوهش حاضر با نتایج ذکرشده مطابقت دارد.

محتوای مالون دی‌آلدهید برگ: نتایج جدول ۲ حاکی از معنی‌داری اثرات اصلی کادمیوم و قارچ مایکوریزا در سطح احتمال خطای یک درصد بر محتوای مالون دی‌آلدهید برگ دارد. در جدول ۳ مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد محتوای مالون دی‌آلدهید برگ با افزایش سطوح غلظت کادمیوم افزایش پیدا کرد به گونه‌ای که کاربرد حداکثر غلظت کادمیوم در این آزمایش محتوای مالون دی‌آلدهید را به میزان ۱/۶۵ برابر شاهد افزایش داد. کاربرد قارچ مایکوریزا نیز به نسبت تیمار عدم کاربرد قارچ موجب کاهش ۳۱/۴۲ درصدی محتوای این صفت گردید (جدول ۳).

کادمیوم از طریق آسیب به سیستم‌های آنتی‌اکسیدان سلول و افزایش تولید و تجمع رادیکال‌های آزاد اکسیژن یکپارچگی غشا را برهم زده و منجر به افزایش سطح مالون دی‌آلدئید و نفوذپذیری غشا می‌شود (Gallego *et al*., 2012). نتایج حاکی از آن است که، با کاهش محتوای آب نسبی، میزان مالون دی‌آلدهید در اثر آسیب وارده به سلول افزایش یافت. همچنین با کاهش آب برگ، میزان پرولین و قند محلول برگ افزایش پیدا کرد. همبستگی بین مالون دی‌آلدهید با اسمولیت‌های سازگار پرولین (r=۰/۸۹**) و قند محلول (r=۰/۷۶**) مثبت و با محتوای نسبی آب برگ (r=-۰/۹۰**) منفی و معنی‌دار بود (جدول ۴). تجمع این اسمولیت‌های سازگار باعث تنظیم اسمزی درون سلولی، حفظ تورژسانس سلولی، کاهش خسارت به غشای سلولی و در نتیجه افزایش پایداری غشای سلولی می‌گردد. قارچ مایکوریزا نیز از طریق فراهمی عناصر غذایی و افزایش پرولین باعث پایداری بیشتر غشاهای سلولی در گیاه می‌شود؛ در نتیجه از این طریق کاهش نشت یونی و کاهش میزان مالون دی‌آلدهید را درپی خواهد داشت. نتایج مشابهی توسط باقری‌فرد و همکاران (۱۴۰۳) در گل‌راعی نیز گزارش شد.

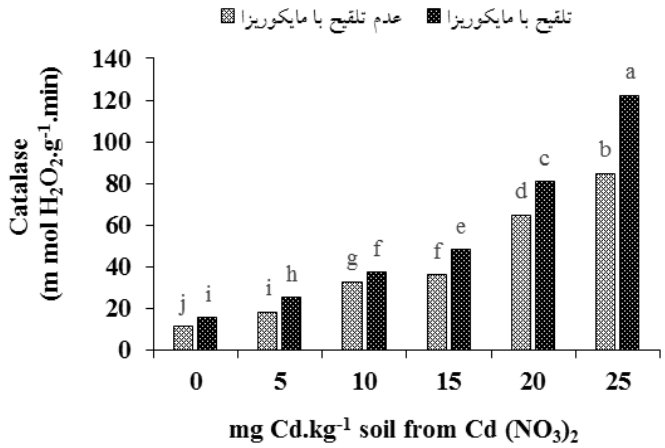
فعالیت آنزیم کاتالاز: برهم‌کنش دوگانه کادمیوم در قارچ مایکوریزا در سطح احتمال یک درصد بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار شد (جدول ۲). با توجه به مقایسه میانگین داده‌ها فعالیت آنزیم کاتالاز همراه با افزایش سطوح تنش کادمیوم افزایش یافت و کاربرد قارچ مایکوریزا به عنوان یک کودزیستی نیز این روند افزایشی را تسریع کرد. بیشترین و کم‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز به ترتیب به میزان ۱۲۲/۲۲ و ۱۱/۰۸۳ میکرومول بر میلی‌گرم وزن تر برگ در دقیقه از تیمار ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک + کاربرد مایکوریزا و تیمار شاهد (عدم‌کاربرد کادمیوم و قارچ) حاصل شد که تفاوت آماری معنی‌داری را بروز دادند (شکل ۴).

فعالیت آنزیم پراکسیداز: نتایج حاکی از معنی‌داری برهم‌کنش دوگانه تنش کادمیوم در قارچ مایکوریزا در سطح احتمال خطای ۵ درصد بر فعالیت آنزیم پراکسیداز بود (جدول ۲). مقایسه میانگین نشان داد بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز با میانگین ۴/۸۵ جذب در دقیقه به گرم وزن تر از تیمار کاربرد ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک + کاربرد مایکوریزا حاصل شد و کمترین مقدار در تیمار شاهد (بدون کاربرد کادمیوم و مایکوریزا) با میانگین ۰/۳۸۵ جذب در دقیقه به گرم وزن تر مشاهده شد (شکل ۵).

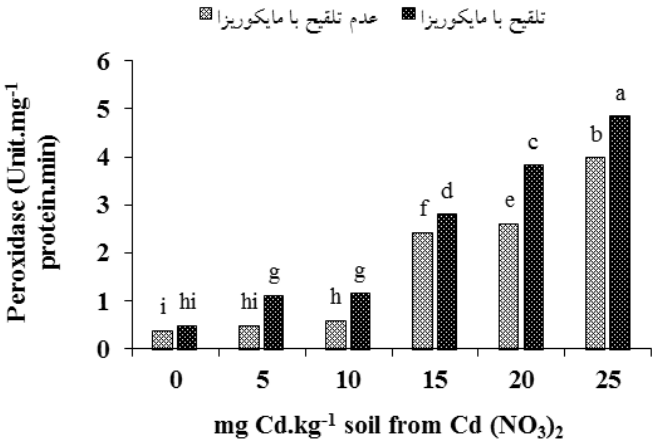
محتوای آنزیم سوپراکسید دیسموتاز: اثرات اصلی کادمیوم و مایکوریزا در سطح احتمال یک درصد بر محتوای آنزیم سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار شد (جدول ۲). مطابق با مقایسه میانگین‌ها، در سطوح تنش بیشترین فعالیت این آنزیم از تیمار ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک با میانگین ۳/۴۲ واحد بر گرم در دقیقه مشاهده شده که نسبت به سطح بدون کادمیوم اختلاف افزایشی ۱/۰۴ برابری داشت. کاربرد قارچ مایکوریزا نیز در مقایسه با عدم کاربرد به میزان ۱۰/۹۷ درصد فعالیت این آنزیم را افزایش داد (جدول ۳).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]



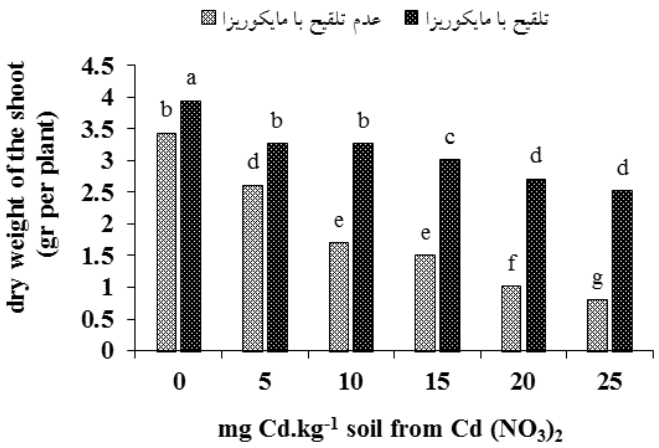
شکل ۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا آربوسکولار و کادمیوم برای فعالیت آنزیم کاتالاز در بادرنجبویه. حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال خطای پنج درصد بر اساس آزمون LSD است.



شکل ۵- مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا آربوسکولار و کادمیوم برای فعالیت آنزیم پراکسیداز در بادرنجبویه. حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال خطای پنج درصد بر اساس آزمون LSD است.

افزایش غلظت کادمیوم موجب تغییر در میزان فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی به جهت بروز تنش اکسیداتیو در یاخته‌های گیاه می‌شود (Gupta *et al.*, 2019). یافته‌های محققان نشان می‌دهد وجود کادمیوم اضافی با تولید بیشتر گونه‌های فعال اکسیژن OH^-، O_2 و H_2O_2 همراه است. ایجاد این رادیکال‌های آزاد موجب فعالیت بیشتر آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز می‌شود. در واقع این آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از خطوط اولیه تدافعی گیاهان در برابر گونه‌های اکسیژن فعال هستند و فعالیت‌شان مستقیماً با تجمع این گونه‌های فعال در ارتباط است. به‌طورکلی ظهور این آنزیم‌ها در ساختار سلولی با افزایش شدت تنش، بیشتر می‌شود (Pandey and Dubey, 2016). پژوهش حاضر نشان داد که با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن در گیاه بادرنجبویه تحت تنش کادمیوم، سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به‌صورت معنی‌داری افزایش پیدا کرد. نتایج نشان از همبستگی مثبت و معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز ($r= ۰/۷۳^{**}$)، پراکسیداز ($r= ۰/۷۷^{**}$) و سوپراکسید دیسموتاز ($r= ۰/۷۹^{**}$) با درصد نشت الکترولیت داشت (جدول ۴). کاربرد قارچ مایکوریزا با افزایش فعالیت این آنزیم‌ها و از بین رفتن گونه‌های فعال اکسیژن و H_2O_2 اثرات سمی کادمیوم را کاهش داده و از این

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]



شکل ۶- مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا آربوسکولار و کادمیوم برای وزن خشک اندام هوایی در بادرنجبویه. حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال خطای پنج درصد بر اساس آزمون LSD است.

جدول ۴- همبستگی بین برخی صفات فیزیولوژیک در بادرنجبویه تحت کاربرد مایکوریزا و سمیت کادمیوم

	(۱) محتوای نسبی آب برگ	(۲) درصد نشت الکترولیت	(۳) کلروفیل کل	(۴) مالون دی‌آلدهید	(۵) پرولین	(۶) قندمحلول برگ	(۷) کاتالاز	(۸) پراکسیداز	(۹) سوپراکسید دیسموتاز	(۱۰) وزن خشک اندام هوایی
(۱)	۱									
(۲)	-۰/۹۳**	۱								
(۳)	۰/۸۱**	-۰/۸۱**	۱							
(۴)	-۰/۹۳**	۰/۹۴**	-۰/۷۶**	۱						
(۵)	-۰/۶۱**	۰/۵۶**	-۰/۳۲*	۰/۶۷**	۱					
(۶)	-۰/۸۵**	۰/۸۲**	-۰/۵۵**	۰/۸۹**	۰/۸۲**	۱				
(۷)	-۰/۷۷**	۰/۷۳**	-۰/۵۰**	۰/۸۴**	۰/۹۰**	۰/۹۲**	۱			
(۸)	-۰/۷۸**	۰/۷۶**	-۰/۵۰**	۰/۸۵**	۰/۸۴**	۰/۹۵**	۰/۹۳**	۱		
(۹)	-۰/۸۲**	۰/۷۹**	-۰/۵۶**	۰/۸۸**	۰/۸۶**	۰/۹۵**	۰/۹۳**	۰/۹۴**	۱	
(۱۰)	۰/۷۴**	-۰/۸۴**	۰/۸۱**	-۰/۷۶**	-۰/۲۰ns	-۰/۵۱**	-۰/۴۱*	-۰/۴۳**	-۰/۴۶**	۱

طریق از تخریب بیشتر اجزای سلولی جلوگیری می‌کند. به نظر می‌رسد قارچ مایکوریزا با کاهش فشار ناشی از تنش و حفظ سلول و غشای سلولی در شرایط طبیعی، باعث افزایش مقاومت به تنش می‌گردد. قارچ‌های مایکوریزا با تغییر در مسیرهای بیوشیمیایی گیاه، موجب افزایش بیان ژن‌های مرتبط با آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شوند. همچنین از طریق تنظیم هورمون‌های گیاهی (مانند اسید آبسیزیک و اتیلن) نیز به فعال‌سازی سامانه‌های دفاعی گیاه کمک می‌کند (Evelin *et al.*, 2009). در راستای این نتایج، مشاهده گردید همزیستی مایکوریزایی قارچ‌های آربوسکولار با گندم باعث بهبود فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش با فلز کادمیوم شد (Guo *et al.*, 2022). در پژوهشی بر گیاه دارویی آویشن باغی فعالیت آنزیم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

پراکسیداز با تنش فلزات سنگین افزایش یافت و تلقیح با قارچ *F. mosseae* نیز موجب افزایش فعالیت این آنزیم شد (رستمی و همکاران، ۱۴۰۱). تواضعی و همکاران (۱۴۰۳) نیز بیان کردند که کاربرد کود زیستی مایکوریزا در نخود باعث افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز شد به‌صورتی‌که بیشترین فعالیت آنزیم در تیمارهای کاربرد مایکوریزا و کمترین را در تیمار عدم کاربرد مایکوریزا مشاهده کردند.

وزن خشک اندام هوایی در بوته: نتایج تجزیه واریانس نشان از معنی‌داری برهمکنش دوگانه کادمیوم در قارچ مایکوریزا در سطح احتمال خطای پنج درصد دارد (جدول ۲). نتایج حاصل از مقایسه میانگین نشان داد که تنش کادمیوم موجب کاهش وزن خشک اندام هوایی در بادرنجبویه شد و کاربرد قارچ مایکوریزا اثر مثبتی بر آن داشت و موجب افزایش آن شد. بیشترین وزن خشک اندام هوایی با میانگین ۳/۹۵ گرم در بوته از تیمار عدم کاربرد کادمیوم + کاربرد قارچ مایکوریزا حاصل شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها دارد و از تیمار کاربرد ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در هر کیلوگرم خاک + عدم کاربرد قارچ مایکوریزا کمترین آن با میانگین ۰/۸۰ گرم در بوته حاصل گردید (شکل ۶).

کادمیوم موجود در خاک از طریق مسیرهای آپوپلاستی یا سیمپلاستی وارد گیاه شده و پس از آن در بافت‌های آلوده به کادمیوم تغییراتی در ساختارهای سلولی، فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی و در نهایت مهار رشد و نمو ایجاد می‌کند (Sheikhzadeh *et al.*, 2020). در پژوهشی بر گیاه ریحان کاربرد تیمار کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک موجب کاهش ۶۲/۸۲ درصدی وزن خشک بوته نسبت به شاهد شد (اصغری و همکاران، ۱۳۹۹). نورعلی و همکاران (۱۳۹۷) نیز نتیجه گرفتند با افزایش مقدار کادمیوم به ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، وزن خشک اندام هوایی گیاه گشنیز نسبت به شاهد ۳۹/۹۷ و ۵۴/۱۸ درصد کاهش یافت. پژوهشگران اظهار داشتند که افزایش ماده خشک گیاهان تلقیح شده با قارچ‌های مایکوریزا احتمالاً ناشی از افزایش جذب آب و مواد مغذی، انتقال کارا و بهتر این مواد در اندام‌های مختلف گیاهی و افزایش فتوسنتز است که منجر به سنتز مواد فتوسنتزی در گیاهان می‌شود. در این راستا، گزارش شده است که قارچ‌های میکوریزا با داشتن شبکه هیفی گسترده موجب افزایش سطح ریشه و سرعت جذب آب و مواد غذایی شده، کارایی گیاهان را در جذب آب و عناصر غذایی بالا برده و باعث افزایش رشد آن‌ها می‌شود (رسولی و همکاران، ۱۴۰۲). در این آزمایش نیز نتایج نشان داد که محتوای نسبی آب برگ ($r= ۰/۷۴^{**}$) و کلروفیل کل ($r= ۰/۸۱^{**}$) همبستگی مثبت و معنی‌داری و نشت الکترولیت‌ها ($r= -۰/۸۴^{**}$) و مالون دی‌آلدهید ($r= -۰/۷۶^{**}$) همبستگی منفی و معنی‌داری با وزن خشک اندام هوایی بروز دادند (جدول ۴).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تنش کادمیوم با اثرگذاری منفی بر فرآیند جذب آب، موجب کاهش محتوای نسبی آب برگ‌ها شده و علاوه بر افزایش ناپایداری غشای سلولی، با کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی منجر به کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی در گیاه دارویی بادرنجبویه شده است. تیمار تنش شدید (۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک) بیشترین تأثیر را بر صفات مورد اندازه‌گیری در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد. کاربرد کود زیستی مایکوریزا ضمن جلوگیری از پیامدهای استفاده از کودهای شیمیایی، اثرات منفی تنش فلز سنگین را به طور معمول در هر یک از سطوح کادمیوم تعدیل کرده است. این کود زیستی با بهبود جذب آب و مواد مغذی و همچنین با افزایش فعالیت آنزیمی و غیرآنزیمی گیاه به مقابله با شرایط تنش پرداخته است. کاربرد مایکوریزا در شرایط بدون کادمیوم بیشترین وزن خشک بوته را نشان داد. بنابراین مطابق با یافته‌های تحقیق حاضر می‌توان بیان داشت که در خاک‌های تحت سمیت کادمیوم، استفاده از قارچ مایکوریزا آربوسکولار گونه *Funneliformis mosseae* می‌تواند موجب بهبود میزان تحمل گیاه بادرنجبویه به شرایط تنش شود و حتی در حالت بدون تنش نیز محتوای صفات را بهبود بخشد.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

منابع

اصغری، محسن، معصومی زواریان، ابوالفضل، و یوسفی‌راد، مجتبی (۱۳۹۹). بررسی اثر سدیم نیتروپروساید در کاهش سمیت ناشی از کادمیوم در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.). *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، *۱۳*(۳)، ۱۰۱۸-۱۰۰۹. DOI: 10.22077/escs.2020.2272.1582

آقایی، کیوان، راه‌خسروانی، بهاره، مغانلو، لیلا، و قطبی، علی اکبر (۱۳۹۸). بررسی اثر تجمع کادمیوم بر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، *۸*(۳۳)، ۱۲۲-۱۰۷. DOR: 20.1001.1.23222727.1398.8.33.23.3

باقری‌فرد، گودرز، صالحی، امین، موحدی دهنوی، محسن، صدقی اصل، محمد، و یدوی، علیرضا (۱۴۰۳). ارزیابی اثر قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی سولفات روی بر برخی صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد اقتصادی گیاه گل‌راعی (*Hypericum perforatum* L.) تحت رژیم‌های آبیاری متفاوت. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، *۱۳* (۶۰)، ۳۸-۱۷. DOI: 10.22034/13.60.17

بستامی، اسما، و رضا، امیرنیا (۱۴۰۱). تأثیرکودهای زیستی و آلی بر خصوصیات رشدی، اسانس و جذب عناصر دو گونه مرزه. *دانش کشاورزی وتولید پایدار*، ۳۲(۳)، ۳۲-۱۷. DOI: 10.22034/saps.2022.48858.2766

پورتبریزی، ثریا، پورسیدی، شهرام، عبدالشاهی، روح‌اله، و نادرنژاد، نازی (۱۳۹۷). تأثیر تنش فلز کادمیوم بر برخی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی ماریتیغال. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، *۷*(۲۶)، ۱۸۷-۱۹۷. DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.26.1.0

پیردشتی، همت‌اله، خالوندی، معصومه، عامریان، محمدرضا، برادران فیروزآبادی، مهدی، و غلامی، احمد (۱۳۹۶). برهمکنش قارچ (*Piriformospora indica*) با گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) بر کمیت وکیفیت اسانس و برخی پارامترهای فیزیولوژیک تحت تنش شوری. *فرایند و کارکرد گیاهی*، *۲۱*(۶)، ۱۶۹-۱۸۴. DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.16.8

تواضعی، صبا، جلالی هنرمند، سعید، و رسایی، علی (۱۴۰۳). برهمکنش باکتری ریزوبیوم، قارچ مایکوریزا و محلول دودآب بر صفات ریشه و خصوصیات اگروفیزیولوژیک نخود. *مجله مدیریت خاک و تولید پایدار*، *۱۴*(۲)، ۶۵-۴۷. DOI: 10.22069/ejsms.2024.21501.2109

ثابتی، پریسا، یدوی، علیرضا، صالحی، امین، نقی‌ها، رضا، و ابراهیمی، فاطمه (۱۴۰۳). تأثیر تلقیح قارچ مایکوریزا آربوسکولار و باکتری‌های محرک رشد بر میزان تحمل گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis* L.) به سمیت کادمیوم. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، *۱۳* (۶۰)، ۲۰۴-۱۸۵. DOI: 10.22034/13.60.185

رستمی، رویا، اسماعیل‌پور، بهروز، حسینی، احمد، سلیمی، قباد، و اطمینان، علیرضا (۱۴۰۱). تأثیر قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار بر رشد و شاخص‌های بیوشیمیایی و عملکرد اسانس (*Thymus vulgaris* L.) در شرایط تنش عنصر سنگین سرب. *نشریه علمی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران*، *۱*(۳۸)، ۱۱۴-۱۳۲. DOR: 20.1001.1.17350905.1401.38.1.7.5

رسولی، فرزاد، محمدی، نسیم، بهتاش، فرهاد، اعظمی، محمد علی، و پناهی تجرق، رعنا (۱۴۰۲). تأثیر کاربرد مایکوریزا و عصاره جلبک دریایی بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیکی و محتوای عناصر نشاء بامیه (*Abelmoschus esculentus* L.). *دو فصلنامه علوم سبزی‌ها*، *۷*(۱)، ۴۴-۶۰. DOI: 10.22034/iuvs.2022.559507.1228

رضایی چیانه، اسماعیل، خرم‌دل، سرور، مولودی، آرزو، و رحیمی، امیر، (۱۳۹۶). اثر کود نانو کلات روی و تلقیح با قارچ میکوریزا بر برخی خصوصیات زراعی و فیزیولوژیک گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در شرایط تنش خشکی. *نشریه پژوهش‌های زراعی ایران*، *۱۵*(۱)، ۱۶۸-۱۸۴. DOI:10.22067/gsc.v15i1.49876

رفیق‌زاده، فاطمه، قنبری جهرمی، مرضیه، و دیانت، مرجان (۱۴۰۳). مطالعه تأثیر کاربرد بیوچار و سلنیوم در کاهش تنش اکسیداتیو

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

ناشی از کادمیوم در گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum* L.). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۳(۶۰)، ۱۴۷-۱۶۶. DOI: 10.22034/13.60.147

سادات موسوی، نسیم، و رضوی‌زاده، رویا (۱۴۰۰). بررسی تغییرات ترکیبات فنلی و متابولیت‌های ثانویه کالوس‌ها و گیاهچه‌های بادرنجبویه (*Mellissa officinal* L.) تحت تنش فلز سنگین کادمیوم. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۰(۴۱)، ۳۳-۱۷. DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.41.17.7

شیخ‌زاده، پریسا، زارع، ناصر، و ابوطالبی، شهربانو (۱۴۰۱). تأثیر تنش کادمیوم بر رنگیزه‌های فتوسنتزی و متابولیت‌های ثانویه گاوزبان اروپایی (*Brago officinalis* L.). *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۵(۴)، ۱۱۶۰-۱۱۴۵. DOI: 10.22077/escs.2021.4245.1996

فتاحی، بهمن، ارزانی، کاظم، سوری، محمد کاظم، و برزگر، محسن (۱۳۹۸). تأثیر کادمیوم و سرب بر صفات مورفوفیزیولوژیک و شاخص‌های فتوسنتزی ریحان (*Ocimum basilicum* L.). *علوم باغبانی ایران*، ۵۰(۴)، ۸۴۹-۸۳۹. DOI: 10.22059/ijhs.2019.239379.1303

فضلی، عبدالرضا، و مدن‌دوست، مهدی (۱۴۰۲). بهبود رشد و صفات فیزیولوژیکی زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) با بسترهای مختلف کاشت تحت تنش عناصر سنگین در مرحله زایشی. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۲(۵۷)، ۳۶۹-۳۸۴. DOI: 10.22034/12.57.369

کوچک‌زاده، احمد، سیاهپوش، عبدالرضا، مرادی تلاوت، محمدرضا، و شفیعی، مریم (۱۴۰۲). اثر تلقیح مایکوریزایی و اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های رشدی، عملکرد وکیفیت گیاه همیشه‌بهار تحت تنش شوری. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۵(۴)، ۱۱۵۶-۱۱۴۱. DOI: 10.22059/jci.2023.344308.2719

محمدی‌فر، فریبا، و مقدم، محمد (۱۳۹۹). تأثیر مایه‌زنی قارچ‌های مایکوریزا بر ویژگی‌های رشدی، پایداری غشاء، محتوای نسبی آب برگ و جذب عناصر گشنیز تحت تنش کادمیوم. *نشریه زیست‌شناسی خاک*، ۸(۱)، ۲۵-۴۰. DOI: 10.22092/sbj.2020.121882

محمودی، فاطمه، شیخ‌زاده مصدق، پریسا، زارع، ناصر، و اسماعیل‌پور، بهروز (۱۳۹۸). بهبود جوانه‌زنی بذر، رشد و ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاهچه‌های گاوزبان اروپایی (*Brago officinalis* L.). در شرایط تنش کادمیوم با استفاده از پیش‌تیمار بذر. *زیست‌شناسی گیاهی ایران*، ۱۱(۳۹)، ۲۳-۴۲. DOI: 10.22108/ijpb.2019.111889.1104

مزارعی، ایوب، سیروس‌مهر، علیرضا، و بابایی، زهرا (۱۳۹۶). تأثیر قارچ میکوریزا بر برخی خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی خارمریم (*Silybum marianum* (L.) Gaertn.) تحت تنش خشکی. *تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران*، ۳۳(۴)، ۶۳۵-۶۳۰. DOI: 10.22092/ijmapr.2017.107860.1877

مقصودی، کبری، اشرفی دهکردی، الهام، و مظلومی، سید محمد (۱۳۹۹). نقش براسینواستروئید و سالیسیلیک اسید بر رشد و تجمع کادمیوم در اسفناج تحت شرایط تنش کادمیوم. *دو فصلنامه علوم سبزی‌ها*، ۴(۲)، ۱۵-۳۳. DOI: 10.22034/iuvs.2021.139084.1125

نصری، فردین، و قادری، ناصر (۱۳۹۳). اثر سالیسیلیک اسید بر جوانه‌زنی و رشد چمن فستوکا و لولیوم تحت شرایط تنش شوری. *نشریه فنآوری و تولیدات گیاهی*، ۲(۶)، ۱۳۹-۱۴۸.

نورعلی، الهلم، نادیان، حبیب‌اله جعفری، سیروی، و حیدری، مختار (۱۳۹۷). تأثیر شوری و کادمیوم بر برخی مؤلفه‌های رشد و جذب عناصر ریزمغذی توسط گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum* L.). *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۱(۳)، ۷۴۷-۷۳۷. DOI: 10.22077/escs.2018.875.1172

الهه‌بخش، الهام، سیروس‌مهر، علیرضا، ابراهیمی، ام‌البنین، و شهرکی، نرجس (۱۳۹۷). اندوزش و تحمل آلودگی کادمیومی و تأثیر تیمار سیلیسیم بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک در گیاه خرفه (*Portulaca oleracea*). *مجله پژوهش‌های گیاهی* (مجله زیست شناسی ایران)، ۳۱(۲)، ۲۴۷-۲۳۵. DOR: 20.1001.1.23832592.1397.31.2.3.1

Adamiak, K., Kurzawa, M., & Sionkowska, A. (2021). Physicochemical performance of collagen modified by *Melissa*

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

officinalis extract. *Cosmetics*, *8*(4), 95. DOI: 10.3390/cosmetics8040095
Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology, 105*, 121-126. DOI: 10.1016/S0076-6879(84)05016-3
Arnon, D. E. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenol oxidase (*Beta vulgaris*). *Plant Physiology, 24*, 1-15. DOI: 10.1104/pp.24.1.1
Azizollahi, Z., Ghaderian, M., & Ghotbi-Ravandi, A. A. (2019). Cadmium accumulation and its effects on physiological and biochemical characters of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *International Journal of Phytoremediation 21*, 1241-1253. DOI: 10.1080/15226514.2019.1619163
Beauchamp, C, & Fridovich, J. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry, 44*, 276-278. DOI: 10.1016/0003-2697(71)90370-8
Begum, N., Ahanger, M. A., Su, Y., Lei, Y., Mustafa, N. S. A., Ahmad, P., & Zhang, L. (2019). Improved drought tolerance by AMF inoculation in maize (*Zea mays*) involves physiological and biochemical implications. *Plants, 8*(12), 579. DOI: 10.3390/plants8120579
Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dyebinding. *Analytical Biochemistry, 38*, 248-252. DOI: 10.1016/0003-2697(76)90527-3
Dogan, M. (2019). Effect of cadmium, chromium, and lead on micropropagation and physio-biochemical parameters of *Bacopa monnieri* (L.) Wettst. cultured in vitro. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali, 30*(3), 351-366. DOI: 10.1007/s12210-019-00796-7
Evelin, H., Kapoor, R., & Giri, B. (2009). Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. *Annals of Botany, 104*(7), 1263-1280. DOI: 10.1093/aob/mcp251
Fazekasova, D, & Fazekas, J. (2020). Soil quality and heavy metal pollution assessment of iron ore mines in Nizna Slana (Slovakia). *Sustainability, 12*(6), 2549. DOI: 10.3390/su12062549
Gallego, S. M., Pena, L. B., Barcia, R. A., Azpilicueta, C. E., Iannone, M. F., Rosales, E. P., & Benavides, M. P. (2012). Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms. *Environmental and Experimental Botany, 83*, 33-46. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.04.006
Ghasembaghlou, M., Sedghi, M., Seid Sharifi, R., & Farzaneh, S. (2022). Effect of nitrogen-fixing bacteria and mycorrhiza on biochemical properties and absorption of essential elements in green pea (*Pisum sativum* L.) under water deficit stress. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, *12*(2), 59-70. DOI: 10.22034/jppb.2022.16324
Grajek, H., Rydzynski, D., Piotrowicz-Cieslak, A., Herman, A., Maciejczyk, M., & Wieczorek, Z. (2020). Cadmium ion-chlorophyll interaction–Examination of spectral properties and structure of the cadmium-chlorophyll complex and their relevance to photosynthesis inhibition. *Chemosphere, 261*, 127434. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127434
Guo, H., Zhou, H., Zhuang, J., & Wang, X. (2022). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat physiological characteristics and rhizosphere soil enzyme activities under cadmium stress. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, *51*(8), 20-27. DOI：10. 15933/j. cnki. 1004-3268. 2022. 08. 003
Gupta, N., Yadav, K. K., Kumar, V., Kumar, S., Chadd, R. P., & Kumar, A. (2019). Trace elements in soil-vegetables interface: Translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration-a review. *Science of the Total Environment, 651*, 2927-2942. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.047
Hatata, M, & Adel Abdel-Aal, E. (2008). Oxidative stress and antioxidant defense mechanisms in response to cadmium treatments. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science, 4*(6), 655-669. http://www.idosi.org/aejaes/jaes4(6)/1.pdf
Heath, R. L, & Pacher, L. (1968). Photo peroxidation in isolated chloroplast. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid per oxidation. *Archives of Biochemical Biophysics, 125*(1), 189-198. DOI: 10.1016/0003-9861(68)90654-1
Irigoyen, J. J., Emerich, D. W., & Sanchez-Diaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa* L.) plants. *Physiologia Plantarum, 84*, 55-60. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x
Ivanov, A. A, & Kosobryukhov, A. A. (2020). Ecophysiology of plants under cadmium toxicity: Photosynthetic and physiological responses. Plant ecophysiology and adaptation under climate change: Mechanisms and perspectives I. *General Consequences and Plant Responses*, 429-484. DOI:10.1007/978-981-15-2156-0_15
Ju, W., Jin, X., Liu, L., Shen, G., Zhao, W., Duan, C., & Fang, L. (2020). Rhizobacteria inoculation benefits nutrient availability for phytostabilization in copper contaminated soil: drivers from bacterial community structures in rhizosphere. *Applied Soil Ecology, 150*, 103450. DOI: 10.1016/j.apsoil.2019.103450
Keunen, E., Schellingen, K., Vangronsveld, J., & Cuypers, A. (2016). Ethylene and metal stress: small molecule, big impact. *Frontiers in Plant Science, 7*, 23. DOI:10.3389/fpls.2016.00023
Khalafallah, A. A, & Abo-Ghalia, H. H. (2008). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the metabolic products and activity of antioxidant system in wheat plants subjected to short-term water stress, followed by recovery at different growth stages. *Journal of Applied Sciences Research, 4*(5), 559-569.
Khan, M. I. R., Iqbal, N., Masood, A., Mobin, M., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2016). Modulation and significance of

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

nitrogen and sulfur metabolism in cadmium challenged plants. *Plant Growth Regulation, 78*, 1-11. DOI: 10.1007/s10725-015-0071-9

Khorasaninejad, S., Alizadeh Ahmadabadi, A., & Hemmati, K. (2018). The effect of humic acid on leaf morphophysiological and phytochemical properties of *Echinacea purpurea* L. under water deficit stress. *Scientia Horticulturae, 239*, 314-323. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.03.015

Lichenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology, 148*, 350-382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1

Mac- Adam, J. W., Nelson, C. J., & Sharp, R. E. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue I. Spatial distribution of ionically bound peroxidase activity in genotypes differing in length of of the elongation zone. *Plant Physiolagy, 99*, 872-878. DOI: 10.1104/pp.99.3.872

McKay, H. M. (1992). Electrolyte leakage from fine roots of conifer seedlings: a rapid index of plant vitality following cold storage. *Canadian Journal of Forest Research. 22*, 1371-1377. DOI: 10.1139/x92-182

Mishra, A, & Choudhuri, M. A. (1999). Effrcts of salicylic acid on heavy metalinduced membrans deterioration mediated by lipoxygenase in rice. *Biologia Plantarum, 42*, 409-415. DOI: 10.1023/A:1002469303670

Mohammadi, M., Ghassemi Golezani, K., ZehtabSalmasi, S., & Nasrollahzade, S. (2016). Assessment of some physiological traits in spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under water stress. *International Journal of Life Sciences*, *10*(1), 58-64. DOI: 10.3126/ijls.v10i1.14512

Pandey, V., Patel, A., & Patra, D. D. (2016). Biochar ameliorates crop productivity, soil fertility, essential oil yield andaroma profiling in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Ecological Engineering, 90*, 361-366. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.020

Paquine, R, & Lechasseur, P. (1979). Observations sur one method dosage la Libra dans les de planets. *Canadian Journal of Botany, 57*, 1851-1854. DOI: 10.1139/b79-233

Pramanik, K., Mandal, S., Banerjee, S., Ghosh, A., Maiti, T. K., & Mandal, N. C. (2021). Unraveling the heavy metal resistance and biocontrol potential of *Pseudomonas* sp. K32 strain facilitating rice seedling growth under Cd stress. *Chemosphere, 274*, 129819. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129819

Rivero, J., Alvarez, D., Flors, V., Azcon-Aguilar, C., & Pozo, M. J. (2018). Root metabolic plasticity underlies functional diversity in mycorrhiza-enhanced stress tolerance in tomato. *New Phytoloist, 220*, 1322-1336. DOI: 10.1111/nph.15295

Sheikhzadeh, P., Zare, N., & Mahmoudi, F. (2020). The synergistic effects of hydro and hormone priming on seed germination, antioxidant activity and cadmium tolerance in borage. *Acta Botanica Croatica, 80*(1), 18-28. DOI: 10.37427/botcro-2021-007

Song, X., Yue, X., Chen, W. Jiang, H., Han, Y., & Li, X. (2019). Detection of cadmium risk to the photosynthetic performance of hybrid *Pennisetum*. *Frontiers in Plant Science, 10*, 798. DOI: 10.3389/fpls.2019.00798

Tauqeer, H. M., Basharat, Z., Ramzani, P. M. A., Farhad, M., Lewinska, K., Turan, V., Karczewska, A., Khan, S. A., & Faran, G. E. (2022). *Aspergillus niger*-mediated release of phosphates from fish bone char reduces Pb phytoavailability in Pb-acid batteries polluted soil, and accumulation in fenugreek. *Environmental Pollution, 313*, 120064. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120064

Wang, P., Chen, H., Kopittke, P. M., & Zhao, F. J. (2019). Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety. *Environmental Pollution, 249*, 1038-1048. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.063

Ye, Q., Wang, H., & Li, H. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi improve growth, photosynthetic activity, and chlorophyll fluorescence of *Vitis vinifera* L. cv. ecolly under drought stress. *Agronomy, 12*(7), 1563. DOI: 10.3390/agronomy12071563

Zhang, X. F., Hu, Z. H., Yan, T. X., Lu, R. R., Peng, C. L., Li, S. S., & Jing, Y. X. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate Cd phytotoxicity by altering Cd subcellular distribution and chemical forms in *Zea mays* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 171*, 352-360. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.12.097

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]

Improving the physiological characteristics and shoot dry weight of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) by mycorrhiza under cadmium toxicity

Khatereh Dastakzan, Mohsen Movahhedi Dehnavi*, Hooshang Farajee, Amin Salehi and Hamid Alahdadi

Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran
(Received: 2024/11/14, Accepted: 2024/12/24)

Abstract

This research aimed to evaluate the effect of mycorrhizal fungi application on the physiological traits and shoot dry weight of the *Melissa officinalis* under cadmium toxicity in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Yasouj University, in 2022. The experiment was designed as a factorial in a completely randomized design with three replications. Experimental factors included different cadmium levels (0, 5, 10, 15, 20, and 25 mg kg^{-1} $_{soil}$) and the arbuscular mycorrhizal fungus *Funneliformis moseae* (non-application and application). Results showed that the maximum cadmium concentration led to a 27.45% reduction in relative water content and a 1.65-fold increase in MDA content. Mycorrhizal fungi also improved soluble sugars and leaf soluble protein content by 11.68% and 21.25%, respectively. Interaction of fungi and heavy metal showed that the lowest levels of chlorophyll a, b, and total were observed in the treatment with 25 mg kg^{-1} $_{soil}$ cadmium+without fungi application, measuring 0.308, 0.189, and 0.638 mg g^{-1} $_{leaf}$, respectively. Furthermore, the highest activity of the catalase and peroxidase was observed under the treatment with mycorrhizal application + 25 mg kg^{-1} $_{soil}$ cadmium. In general, increasing cadmium levels negatively impacted the physiological traits of lemon balm, reducing shoot dry weight by 76.71% at the highest concentration. The highest level of this trait was achieved with mycorrhizal fungi in non-stress conditions. Therefore, the use of this biofertilizer is recommended to increase lemon balm tolerance in cadmium-contaminated soils.

Keywords: Soluble sugars, Cadmium, Bio-fertilizer, MDA, Chlorophyll content

Corresponding author, Email: movahhedi1354@yu.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-23]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.137]