

مقاله پژوهشی

بهبود خصوصیات فیزیولوژیک و وزن خشک اندام هوایی بادرنبویه (*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 بادرنبویه 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. برهم کنش 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. به‌طور کلی افزایش غلظت سطوح کادمیوم تأثیر منفی بر صفات فیزیولوژیک بادرنبویه 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 بادرنبویه 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. بادرنبویه 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

مزم، 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 مسؤول، نشانی پست الکترونیکی: movahhedi1354@yu.ac.ir

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 (پورتبیزی و همکاران، ۱۳۹۷)، کلروفیل کل در دو گونه نعنای (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 برهم خوردن 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 در پی 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 *M. spicata* و *Mentha piperita* 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 میکوریزا 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 میکوریزا 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 در نظر 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 میکوریزا بر بهبود صفات فیزیولوژیک و وزن خشک اندام هوایی گیاه

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 میلی گرم 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 گیاه پزشکی همدان تهیه شد. گلدان‌های پلاستیکی به ابعاد ۱۰×۱۳×۲۰ سانتی متر به نحوی از خاک (نسبت دو به یک، خاک مزرعه به ماسه نرم) پر شدند که سطح خاک هر گلدان تا دهانه آن ۵ سانتی متر فاصله داشت. در مرحله آماده سازی خاک، نمونه گیری جهت ارزیابی خصوصیات خاک تهیه گردید (جدول ۱). جهت آلوده سازی 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 ضد عفونی گردید (به خاک مربوط به گلدان‌های شاهد آب مقطر 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 به میزان 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 شاخه زنی بهتر) انجام شد و بعد از دو ماه رشد، قبل از مرحله گل دهی، نمونه گیری برای صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک و نهایتاً برداشت بوته‌ها انجام گرفت.

اندازه گیری محتوای کلروفیل و کاروتنوئید برگ: ابتدا

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

اندازه گیری محتوای نسبی آب برگ: قطعاتی تقریباً

هم‌اندازه از نمونه تازه برگ‌های جوان و توسعه یافته، توزین گردید. سپس وزن آماس نمونه‌ها پس از قرار گرفتن در ظرف حاوی آب مقطر در تاریکی به مدت ۲۴ ساعت و وزن خشک آن بعد از قرار گرفتن در آون (۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد) 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.

اندازه گیری میزان نشت الکترولیت‌ها: از برگ‌های جوان

کاملاً توسعه یافته نمونه‌هایی به شکل دیسک دایره‌ای به اندازه یکسان تهیه شد. سپس نمونه‌ها در ۳۰ میلی لیتر آب مقطر و در دمای اتاق در جای تاریک قرار داده شد. بعد از گذشت ۲۴ ساعت هدایت الکتریکی هر نمونه با استفاده از EC متر اندازه گیری شد ($EC1$). لوله‌های آزمایش سپس در حمام آبخوش با دمای ۹۵ درجه سانتی گراد به مدت ۴۵ دقیقه قرار گرفت. پس از سرد شدن در دمای اتاق بعد از ۲۴ ساعت مجدداً هدایت الکتریکی نمونه‌ها اندازه گیری شد ($EC2$). درصد نشت الکترولیت کل با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد (McKay, 1992).

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

اندازه گیری محتوای پروتئین برگ: به عصاره الکلی

برگ‌های جوان و توسعه یافته، آب دوبار تقطیر، نین هیدرین و اسید استیک گلاسیال اضافه و سپس نمونه‌ها داخل حمام آب جوش قرار داده شد. در مرحله بعد نمونه‌ها در دمای محیط

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

هدایت الکتریکی (ds/m)	pH	کادمیوم	پتاسیم	فسفر	نیترژن	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 هر نمونه بنزن اضافه شد تا پرولین وارد فاز بنزن شود. سپس بعد از استراحت میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۱۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) خوانده شد (Paquine and Lechasseur, 1979).

اندازه‌گیری محتوای قندهای محلول برگ: به عصاره الکلی برگ‌های جوان و توسعه یافته آنترون تازه تهیه شده اضافه گردید. سپس بعد از قرار گرفتن در بن‌ماری، به منظور خنک شدن، به نمونه‌ها استراحت داده شد. میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) خوانده شد (Irigoyen et al., 1992).

اندازه‌گیری محتوای مالون دی‌آلدهید برگ: نمونه برگ‌های جوان در TCA (تری کلرو استیک اسید) عصاره‌گیری و پس از سانتریفیوژ یک میلی‌لیتر از سوسپانسیون جدا 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 بعد از آن ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. میزان مالون دی‌آلدهید بر اساس جذب ماده رویی در طول موج 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 آب مقطر مخلوط شد و بعد از ۵ دقیقه جذب در طول موج ۵۹۵ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) خوانده شد (Bradford, 1976).

سنجش فعالیت کاتالاز: محلول واکنش حاوی ۰/۵ میلی‌لیتر H₂O₂ ۱۰ میلی‌مولار، ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی‌مولار با pH= ۶/۸ و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. با شروع تجزیه H₂O₂ در محیط، واکنش آغاز شد و میزان کاهش جذب در طول زمان در طول موج 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 H₂O₂ ۵ میلی‌مولار اضافه شد و جذب محلول در طول موج 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، نیتروبلوترازولیوم ۷۵ میکرومولار، ربوفلاوین 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 طول موج 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 آب مقطر و خشک شدن 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

کاربرد کادمیوم + کاربرد مایکوریزا با میانگین ۱/۲۱ میلی گرم بر گرم برگ تازه ثبت گردید و کمترین آن در تیمار عدم کاربرد مایکوریزا + ۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیوم با میانگین ۰/۶۳۸ میلی گرم 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-آمینولولینیک 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 پورتربیزی 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)

شد. مقایسه میانگین اثرات اصلی و یا برهم‌کنش‌ها به روش 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 میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) بود که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای ۵ و ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیوم+کاربرد مایکوریزا نشان نداد. همچنین کم‌ترین میزان آن با میانگین ۰/۳۰۸ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ در سطح ۲۵ میلی گرم 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 میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) بود که تفاوت معنی‌داری با سایر سطوح آماری نشان داد. همچنین کمترین آن در غلظت ۲۵ میلی گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک + عدم کاربرد مایکوریزا با میانگین ۰/۱۸۹ میلی گرم 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

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

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

^{ns}، ** و * به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی دار و معنی داری در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد را نشان می دهد.

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

منابع تغییرات	درجه آزادی	پرولین برگ	پروتئین محلول برگ	مالون دی آلدئید	کاتالاز	پراکسیداز	میانگین مربعات	
							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

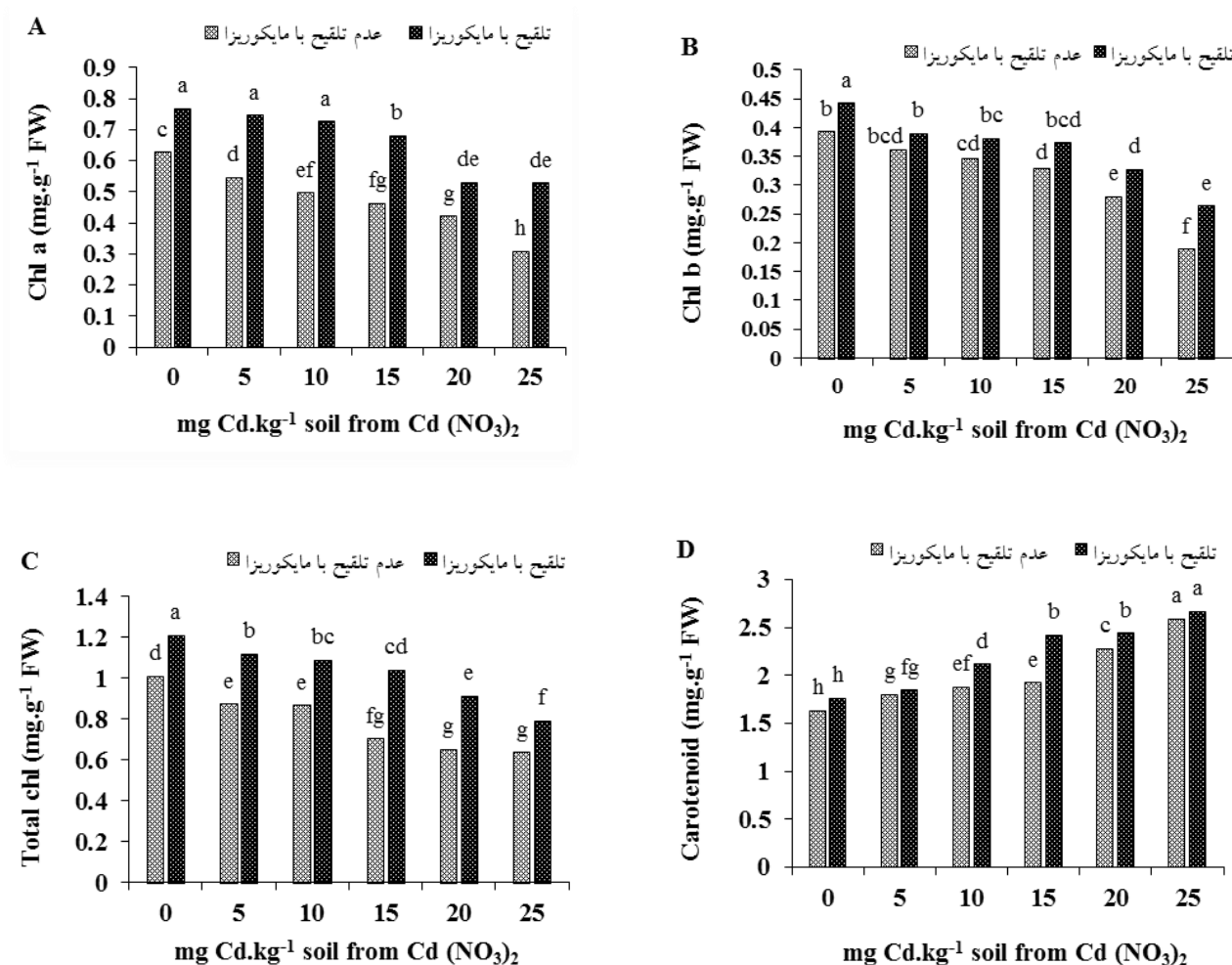
^{ns}، ** و * به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی دار و معنی داری در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد را نشان می دهد.

میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و کاربرد مایکوریزا بود. اختلاف بین آن ها ۵۸/۹۹ درصد برآورد شد (شکل ۱- D).

کاروتنوئیدها علاوه بر نقش ساختمانی و جذب نور به عنوان یکی از مولکول های دخیل در سامانه دفاع آنتی اکسیدانی غیر آنزیمی، نقش حفاظتی در برابر تنش اکسیداتیو دارند؛ به همین دلیل در جریان مواجهه با تنش فلزهای سنگین افزایش می یابند. این رنگزه ها در سمیت زدایی کلروفیل نقش دارند و به صورت مستقیم اکسیژن آزاد را غیرفعال می کنند و یا از طریق فرونشاندن کلروفیل برانگیخته شده، به صورت غیرمستقیم از تشکیل اکسیژن یکتایی جلوگیری می کنند؛ در نتیجه دستگاه فتوسنتزی را از شروع پراکسیداسیون لیپیدی محافظت می کنند (Dogan, 2019). در پژوهش حاضر

و فسفر در خارمریم (مزارعی و همکاران، ۱۳۹۶) می شود. با توجه به ارتباط مستقیم بین این عناصر و ساختار کلروفیل، میزان رنگزه های کلروفیل a، b و کل افزایش می یابد.

محتوای کاروتنوئید برگ: برهم کنش دوگانه کادمیوم در قارچ مایکوریزا بر محتوای کاروتنوئید برگ در سطح احتمال خطای پنج درصد معنی دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین برهم کنش 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؛ به طوری که کمترین محتوای کاروتنوئید برگ در تیمار عدم کاربرد کادمیوم و عدم کاربرد مایکوریزا با میانگین ۱/۶۳۷ میلی گرم در گرم برگ تازه و بیشترین آن با میانگین ۲/۶۶۶ در تیمار ۲۵



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

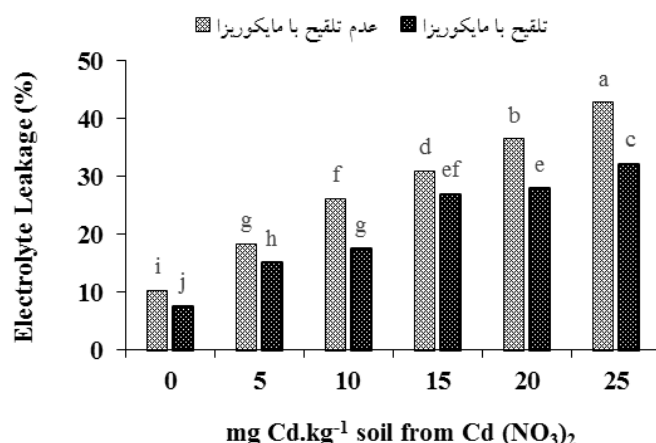
بیشترین میزان نشت الکترولیت (۴۲/۸۸ درصد) مربوط به تیمار آلودگی با ۲۵ میلی گرم کادمیوم در هر کیلوگرم خاک و بدون کاربرد قارچ مایکوریزا بود. درحالی که کمترین مقدار (۷/۶۹ درصد) در عدم آلودگی و کاربرد قارچ مایکوریزا مشاهده شد. قارچ مایکوریزا تأثیری مثبت در بهبود این صفت تحت سطوح بالای تنش داشته است (شکل ۲).

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

نیز به نظر می رسد بالا بودن کاروتنوئید برگ موجب حفظ رنگیزه های 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 می کند.

درصد نشت الکترولیت ها: برهم کنش دوگانه کادمیوم ×

قارچ مایکوریزا بر نشت الکترولیت ها در سطح احتمال خطای یک درصد معنی دار گردید (جدول ۲). با افزایش سطح کادمیوم خاک، نشت الکترولیت به طور معنی داری افزایش یافت.



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

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

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 $H^+-ATPase$ 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 نعنای 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 کلات کردن فلزات سنگین در میسلیم‌های 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

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

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

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

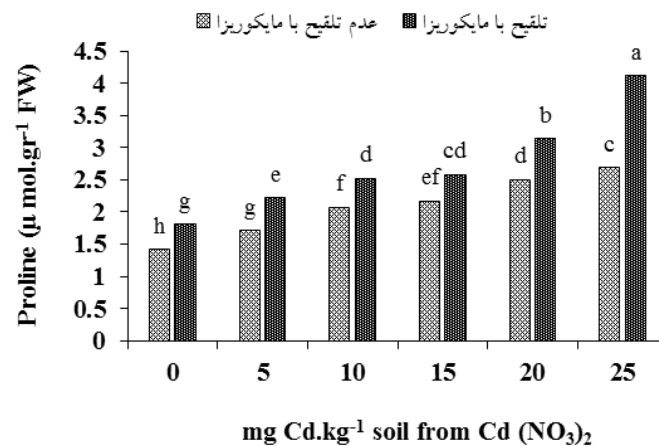
می‌یابد و تلقیح با مایکوریزا بیشترین مقدار این صفت را (در مقایسه با عدم تلقیح) بروز می‌دهد.

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).

به نظر 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 به ترتیب 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 چپانه 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



شکل ۳- مقایسه میانگین برهم کنش 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.

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، به گونه‌ای 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 سنتتاز، گلوتامات سنتتاز 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

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

اسیدآمینه پرولین به عنوان یک ماده اسمزی جاروب‌کننده گونه‌های اکسیژن واکنشگر و یک محافظ مولکولی برای حفظ ساختار پروتئین و خنثی کردن 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 ($r=0.88^{**}$) 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 به طور 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*

در گیاه می شود؛ در نتیجه از این طریق کاهش نشت یونی و کاهش میزان مالون دی آلدئید را در پی خواهد داشت. نتایج مشابهی توسط باقری فرد و همکاران (۱۴۰۳) در گل راعی نیز گزارش شد.

فعالیت آنزیم کاتالاز: برهم کنش دوگانه کادمیوم در قارچ مایکوریزا در سطح احتمال یک درصد بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی دار شد (جدول ۲). با توجه به مقایسه میانگین داده ها 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 میلی گرم وزن تر برگ در دقیقه از تیمار ۲۵ میلی گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک + کاربرد مایکوریزا و تیمار شاهد (عدم کاربرد کادمیوم و قارچ) حاصل شد که تفاوت آماری معنی داری را بروز دادند (شکل ۴).

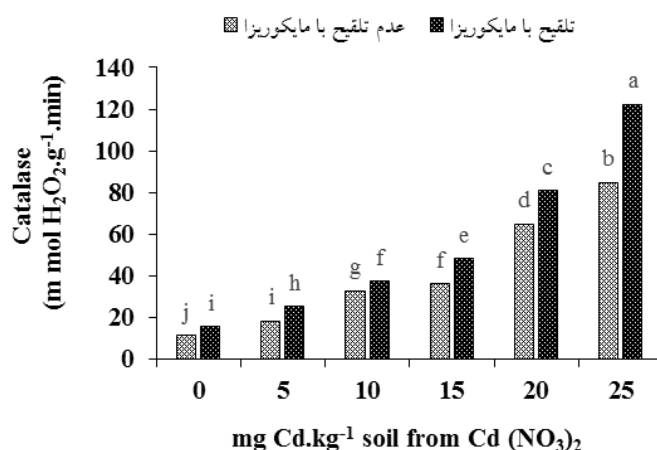
فعالیت آنزیم پراکسیداز: نتایج حاکی از معنی داری برهم کنش دوگانه تنش کادمیوم در قارچ مایکوریزا در سطح احتمال خطای ۵ درصد بر فعالیت آنزیم پراکسیداز بود (جدول ۲). مقایسه میانگین نشان داد بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز با میانگین ۴/۸۵ جذب در دقیقه به گرم وزن تر از تیمار کاربرد ۲۵ میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم 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 معنی دار شد (جدول ۲). مطابق با مقایسه میانگین ها، در سطوح تنش بیشترین فعالیت این آنزیم از تیمار ۲۵ میلی گرم 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).

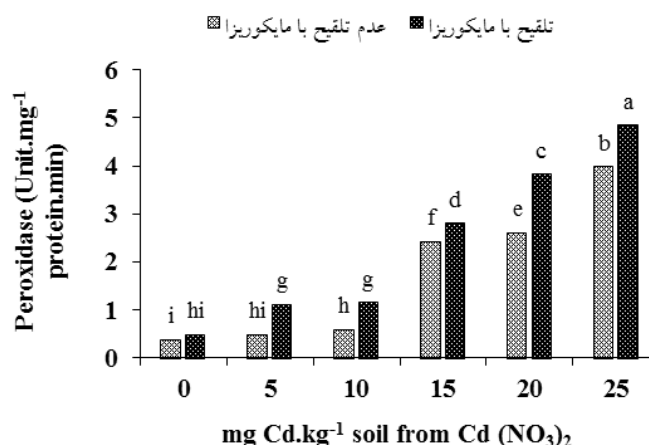
پروکلین که یکی از سازوکارهای مهم سمیت زدایی فلزات سنگین در بیشتر گیاهان است، موجب کاهش آسیب به غشا و پروتئین ها می شود. در پژوهشی بر گیاه دارویی گشنیز بیان شد با افزایش غلظت کادمیوم میزان پروتئین محلول برگ کاهش و با کاربرد قارچ مایکوریزا پروتئین محلول برگ افزایش پیدا می کند ولی از نظر آماری تفاوت معنی داری بین دو گونه قارچ مایکوریزا مشاهده نشد (محمدی فر و مقدم، ۱۳۹۹). پژوهش حاضر با نتایج ذکر شده مطابقت دارد.

محتوای مالون دی آلدئید برگ: نتایج جدول ۲ حاکی از معنی داری اثرات اصلی کادمیوم و قارچ مایکوریزا در سطح احتمال خطای یک درصد بر محتوای مالون دی آلدئید برگ دارد. در جدول ۳ مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد محتوای مالون دی آلدئید برگ با افزایش سطوح غلظت کادمیوم افزایش پیدا کرد به گونه ای که کاربرد حداکثر غلظت کادمیوم در این آزمایش محتوای مالون دی آلدئید 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 سیستم های آنتی اکسیدان سلول و افزایش تولید و تجمع رادیکال های آزاد اکسیژن یکپارچگی غشا را برهم زده و منجر به افزایش سطح مالون دی آلدئید و نفوذپذیری غشا می شود (Gallego et al., 2012). نتایج حاکی از آن است که، با کاهش محتوای آب نسبی، میزان مالون دی آلدئید در اثر آسیب وارده به سلول افزایش یافت. همچنین با کاهش آب برگ، میزان پروکلین و قند محلول برگ افزایش پیدا کرد. همبستگی بین مالون دی آلدئید با اسمولیت های سازگار پروکلین ($r=0/89^{**}$) و قند محلول ($r=0/76^{**}$) مثبت و با محتوای نسبی آب برگ ($r=-0/90^{**}$) منفی و معنی دار بود (جدول ۴). تجمع این اسمولیت های سازگار باعث تنظیم اسمزی درون سلولی، حفظ تورژسانس سلولی، کاهش خسارت به غشای سلولی و در نتیجه افزایش پایداری غشای سلولی می گردد. قارچ مایکوریزا نیز از طریق فراهمی عناصر غذایی و افزایش پروکلین باعث پایداری بیشتر غشاهای سلولی



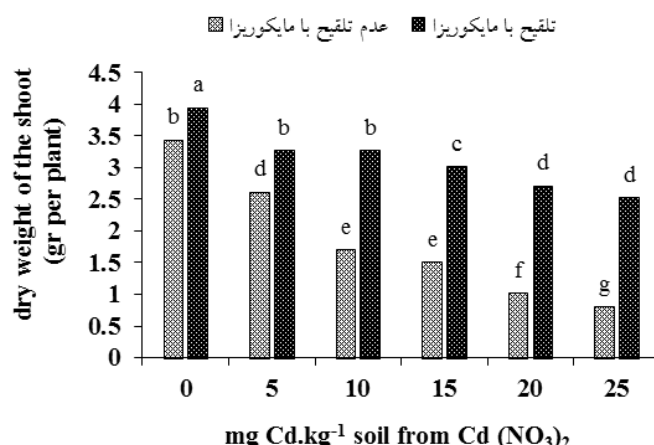
شکل ۴- مقایسه میانگین برهم کنش مایکوریزا آربوسکولار و کادمیوم برای فعالیت آنزیم کاتالاز در بادرنجبویه. حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال خطای پنج درصد بر اساس آزمون LSD است.



شکل ۵- مقایسه میانگین برهم کنش 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.

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 به صورت معنی‌داری افزایش پیدا کرد. نتایج نشان از همبستگی مثبت و معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز ($r=0.73^{**}$)، پراکسیداز ($r=0.77^{**}$) و سوپراکسید دیسموتاز ($r=0.79^{**}$) 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

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 $OH^\cdot$ ، 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. به‌طور کلی ظهور این



شکل ۶- مقایسه میانگین برهم کنش مایکوریزا آربوسکولار و کادمیوم برای وزن خشک اندام هوایی در بادرنجبویه. حداقل یک حرف مشترک نشان دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین ها 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 بزرگ	(۲) درصد نشت الکترولیت	(۳) کلروفیل کل	(۴) ملون دی آلدلید	(۵) پروتئین	(۶) قند محلول برگ	(۷) کاتالاز	(۸) پراکسیداز	(۹) سوپراکسید دیسموتاز	(۱۰) وزن خشک اندام هوایی
۱									
۰/۹۳**	۱								
۰/۸۱**	۰/۸۱**	۱							
۰/۹۳**	۰/۹۲**	۰/۷۶**	۱						
۰/۶۱**	۰/۵۶**	۰/۳۲*	۰/۶۷**	۱					
۰/۸۵**	۰/۸۲**	۰/۵۵**	۰/۸۹**	۰/۸۲**	۱				
۰/۷۷**	۰/۷۳**	۰/۵۰**	۰/۸۴**	۰/۹۰**	۰/۹۲**	۱			
۰/۷۸**	۰/۷۶**	۰/۵۰**	۰/۸۵**	۰/۸۴**	۰/۹۵**	۰/۹۳**	۱		
۰/۸۲**	۰/۷۹**	۰/۵۶**	۰/۸۸**	۰/۸۶**	۰/۹۵**	۰/۹۳**	۰/۹۴**	۱	
۰/۷۲**	۰/۸۴**	۰/۸۱**	۰/۷۶**	۰/۲۰ ^{ns}	۰/۵۱**	۰/۴۱*	۰/۴۳**	۰/۴۶**	۱

هورمون های گیاهی (مانند اسید آبسزیک و اتیلن) نیز به فعال سازی سامانه های دفاعی گیاه کمک می کند (Evelin et al., 2009). در راستای این نتایج، مشاهده گردید همزیستی مایکوریزایی قارچ های 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

طریق از تخریب بیشتر اجزای سلولی جلوگیری می کند. به نظر می رسد قارچ مایکوریزا با کاهش فشار ناشی از تنش و حفظ سلول و غشای سلولی در شرایط طبیعی، باعث افزایش مقاومت به تنش می گردد. قارچ های مایکوریزا با تغییر در مسیرهای بیوشیمیایی گیاه، موجب افزایش بیان ژن های مرتبط با آنزیم های آنتی اکسیدانی می شوند. همچنین از طریق تنظیم

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 ($r = 0.74^{**}$) و کلروفیل کل ($r = 0.81^{**}$) همبستگی مثبت و معنی‌داری و نشت الکترولیت‌ها ($r = -0.84^{**}$) و مالون دی‌آلدهید ($r = -0.76^{**}$) 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 میکوریزا 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 میکوریزا 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 میکوریزا 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.

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 میکوریزا در نخود باعث افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز شد به‌صورتی‌که بیشترین فعالیت آنزیم در تیمارهای کاربرد میکوریزا و کمترین را در تیمار عدم کاربرد میکوریزا مشاهده کردند.

وزن خشک اندام هوایی در بوته: نتایج تجزیه واریانس

نشان از معنی‌داری برهمکنش دوگانه کادمیوم در قارچ میکوریزا 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 میکوریزا 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 میکوریزا حاصل شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها دارد و از تیمار کاربرد ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم در هر کیلوگرم خاک + عدم کاربرد قارچ میکوریزا 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 میکوریزا احتمالاً ناشی از افزایش جذب آب و مواد مغذی، انتقال کارا و بهتر این مواد در اندام‌های مختلف

منابع

- اصغری، محسن، معصومی زواریان، ابوالفضل، و یوسفی راد، مجتبی (۱۳۹۹). بررسی اثر سدیم نیتروپروپوساید در کاهش سمیت ناشی از کادمیوم در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.). *تنش های محیطی در علوم زراعی*، ۱۳ (۳)، ۱۰۱۸-۱۰۰۹. DOI: 10.22077/escs.2020.2272.1582
- آقای، کیوان، راه خسروانی، بهاره، مغاللو، لیلا، و قطبی، علی اکبر (۱۳۹۸). بررسی اثر تجمع کادمیوم بر برخی ویژگی های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.). *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۸ (۳۳)، ۱۰۷-۱۲۲. DOR: 20.1001.1.23222727.1398.8.33.23.3
- باقری فرد، گودرز، صالحی، امین، موحدی دهنوی، محسن، صدقی اصل، محمد، و یدوی، علیرضا (۱۴۰۳). ارزیابی اثر قارچ میکوریزا و محلول پاشی سولفات روی بر برخی صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکرد اقتصادی گیاه گل راعی (*Hypericum perforatum* L.) تحت رژیم های آبیاری متفاوت. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۳ (۶۰)، ۳۸-۱۷. DOI: 10.22034/13.60.17
- بستامی، اسما، و رضا، امیرنیا (۱۴۰۱). تأثیر کودهای زیستی و آلی بر خصوصیات رشدی، اسانس و جذب عناصر دو گونه مرزه. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۲ (۳)، ۳۲-۱۷. DOI: 10.22034/saps.2022.48858.2766
- پور تبریزی، ثریا، پورسیدی، شهرام، عبدالشاهی، روح اله، و نادرزاد، 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، همت اله، خالوندی، معصومه، عامریان، محمدرضا، برادران فیروزآبادی، مهدی، و غلامی، احمد (۱۳۹۶). برهمکنش قارچ (*Piriformospora indica*) با گیاه نعنای فلفلی (*Mentha piperita*) بر کمیت و کیفیت اسانس و برخی پارامترهای فیزیولوژیک تحت تنش شوری. *فرآیند 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 میکوریزا و محلول دودآب بر صفات ریشه و خصوصیات آگروفیزیولوژیک نخود. *مجله مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۴ (۲)، ۴۷-۶۵. DOI: 10.22069/ejsms.2024.21501.2109
- ثابتی، پریسا، یدوی، علیرضا، صالحی، امین، نقی ها، رضا، و ابراهیمی، فاطمه (۱۴۰۳). تأثیر تلقیح قارچ میکوریزا آربوسکولار و باکتری های محرک رشد بر میزان تحمل گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis* L.) به سمیت کادمیوم. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۳ (۶۰)، ۱۸۵-۲۰۴. DOI: 10.22034/13.60.185
- رستمی، رویا، اسماعیل پور، بهروز، حسینی، احمد، سلیمی، قباد، و اطمینان، علیرضا (۱۴۰۱). تأثیر قارچ های میکوریزا آربوسکولار بر رشد و شاخص های 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 میکوریزا و عصاره جلبک دریایی بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیکی و محتوای عناصر نشاء بامیه (*Abelmoschus esculentus* L.). *دوفصلنامه علوم سبزی ها*، ۷ (۱)، ۴۴-۶۰. DOI: 10.22034/iuvs.2022.559507.1228
- رضایی چیا، اسماعیل، خرم دل، 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 پژوهش های زراعی ایران*، ۱۵ (۱)، ۱۶۸-۱۸۴. DOI: 10.22067/gsc.v15i1.49876
- رفیق زاده، فاطمه، قنبری جهرمی، مرضیه، و دیانت، مرجان (۱۴۰۳). مطالعه تأثیر کاربرد بیوجار و سلنیوم در کاهش تنش اکسیداتیو

- 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 (*Melissa officinalis* 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، پریرسا، 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)، ۱۱۴۵-۱۱۶۰.
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)، ۳۸۴-۳۶۹.
DOI: 10.22034/12.57.369
- کوچک‌زاده، احمد، سیاهپوش، عبدالرضا، مرادی تلاوت، محمدرضا، و شفیع، مریم (۱۴۰۲). اثر تلقیح مایکوریزایی و اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های رشدی، عملکرد و کیفیت گیاه همیشه‌بهار تحت تنش شوری. به‌زراعی کشاورزی، ۲۵(۴)، ۱۱۵۶-۱۱۴۱.
DOI: 10.22059/jci.2023.344308.2719
- محمودی‌فر، 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، پریرسا، 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 فناوری 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
- اله‌بخش، 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*

- 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
- Ghasemabaghlu, 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](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-Ghaila, 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

- 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 the elongation zone. *Plant Physiology*, 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). Effects of salicylic acid on heavy metal-induced membrane 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 and aroma profiling in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Ecological Engineering*, 90, 361-366. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.020
- Paquin, R., & Lechasseur, P. (1979). Observations sur une méthode 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 Phytologist*, 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

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 mosseae* (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