نشریه فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۵، شماره ۷۱، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۵ صفحه: ۱۰۲-۸۹
https://doi.org/10.22034/15.71.89

مقاله پژوهشی

تأثیر سطوح مختلف ذغال بر صفات فیزیولوژیکی گیاه مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) تحت تنش کادمیوم

معصومه مهدوی، محمد مقدم* و فائزه بهشتی قله‌زو

گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

کادمیوم یکی از فلزات سنگین است که تأثیر منفی روی فرایندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی گیاه دارد. به منظور مطالعه تأثیر سطوح مختلف ذغال بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه مریم‌گلی تحت تنش کادمیوم آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار طراحی شد. تیمارهای آزمایش شامل سطوح مختلف ذغال (صفر، ۱ و ۲ درصد وزنی) و کادمیوم (صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بود. نتایج حاصل نشان داد کادمیوم سبب کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوای نسبی آب و افزایش ترکیبات فنولی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، نشت الکترولیت، کربوهیدرات محلول و میزان کادمیوم برگ گیاه گردید. از سوی دیگر، کاربرد ذغال در سطوح مختلف کادمیوم سبب بهبود صفات مورد مطالعه گردید بطوریکه گیاهان تیمارشده با ۲ درصد وزنی/ وزنی ذغال و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک کادمیوم بیشترین میزان فنول کل (۱۸۶/۸۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، فلاونویید کل (۸۸/۳۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۸۰/۴۶ درصد) را نشان دادند. همچنین کابرد ۲ درصد وزنی/ وزنی ذغال در بالاترین سطح تنش کادمیوم (۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) سبب کاهش ۵۸/۸۲ درصدی کادمیوم نسبت به عدم کاربرد ذغال در این سطح کادمیوم گردید. بیشترین اثر ذغال روی صفات فیزیولوژیکی در بالاترین غلظت استفاده‌شده (۲ درصد وزنی/ وزنی) و در گیاهان تحت تنش شدید کادمیوم مشاهده شد. بنابراین کاربرد صحیح ماده آلی ذغال به‌عنوان یک راهکار مناسب زیستی به منظور کاهش اثرات منفی تنش عنصر کادمیوم در گیاه مریم‌گلی و سایر گیاهان دارویی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آنزیم، فعالیت آنتی‌اکسیدان، فنل کل، گیاهان دارویی

مقدمه

مریم‌گلی (*Salvai officinalis* L.) گیاهی چند ساله و علفی متعلق به خانواده نعناعیان (Lamiaceae) و شامل ۹۰۰ گونه در سراسر جهان است (Harizia *et al.*, 2021). در حال حاضر

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷، اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲

* نویسنده مسئول، رایانامه: m.moghadam@um.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به انجمن فیزیولوژی گیاهی ایران است. ۱۴۰۳ ©

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:
Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

مریم‌گلی به‌عنوان چاشنی غذا و طعم‌دهنده در صنایع غذایی مورد توجه است و از گل‌های آن برای دمنوش استفاده می‌شود. این گیاه به دلیل خواص دارویی مهم از جمله ضداسپاسم، ضدقابض، ضدعفونی‌کننده، آنتی‌بیوتیک، آرامبخش، محرک کبد و... در صنایع دارویی کاربردهای فراوانی دارد (Koubaa *et al.*, 2021). علاوه بر وجود مقدار قابل توجه اسانس در گیاه مریم‌گلی، محققان متعددی مقادیر بالایی از ترکیبات مختلف فنولی به‌ویژه رزمارینیک اسید را در عصاره این گیاه گزارش کرده‌اند (Koubaa-Ghorbel *et al.*, 2020). وجود این ترکیبات سبب فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالای گیاه مریم‌گلی شده است که توسط محققان مختلف قدرت بالای این گیاه به عنوان ضدباکتری و ضدقارچ گزارش شده است (Henriquez *et al.*, 2023).

کادمیوم یک عنصر بسیار سمی است که تحرک بالایی در خاک دارد و به سرعت به وسیله گیاهان جذب شده و در قسمت‌های مختلف گیاه، نظیر برگ‌ها، میوه‌ها و دانه‌ها تجمع می‌یابد. غلظت بحرانی کادمیوم در خاک ۸-۳ پی‌پی‌ام گزارش شده است (Ullah *et al.*, 2020). تجمع کادمیوم در گیاهان با توجه به گونه، رقم و شرایط رشدی و حضور سایر عناصر متفاوت است (Dobrikova *et al.*, 2021). این عنصر فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی گیاه مانند تنفس نوری، فتوسنتز، روابط آبی گیاه، اجزای چرخه کالوین و واکنش‌های نوری فتوسنتز را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Sorrentino *et al.*, 2018). ریشه گیاهان کادمیوم را به آسانی جذب می‌کند و از جمله مشکلاتی که جذب کادمیوم در گیاهان منجر می‌شود می‌توان به کاهش رشد، کاهش جذب آب، سوختگی و زردی برگ‌ها، کاهش فعالیت بعضی آنزیم‌ها، جلوگیری از باز شدن روزنه‌ها و ... نام برد که سرانجام موجب مرگ گیاه می‌شود (Xin *et al.*, 2019). به خاطر سمیت کادمیوم برای موجودات پاکسازی محیط‌زیست از این فلز اهمیت بسزایی دارد (Clemens and Ma, 2016). یکی از روش‌های مناسب برای مقابله با آلودگی خاک، استفاده از مواد آلی است که دارای خصوصیات بازی هستند و جذب خوبی داشته باشند. ذغال به عنوان یک اصلاح‌کننده آلی خاک، جاذب مؤثر، ارزان قیمت و در دسترس مطرح است (مسعودی و شیروانی، ۱۳۹۶). ذغال حاصل یک ترکیب زیستی و آلی همانند چوب است که در اثر سوختن در شرایط با اکسیژن اندک به وجود می‌آید. استفاده از ذغال فعال به زمانی که بومیان آمریکایی مواد آلی را در شرایط با اکسیژن کم در گودال‌های حفر شده‌ای به‌منظور تولید ذغال و گاز می‌سوزاندند. تجزیه گرمایی زیست‌توده گیاهی در غیاب جزئی و یا کامل اکسیژن یا گرماکافت، علاوه بر دی‌اکسید کربن، گازهای سوختی و مواد تبخیرشونده یک جزء جامد غنی از کربن بنام بیوچار تولید می‌نماید. بیوچار یک ماده متخلخل، غنی از کربن و ریزدانه است که از گرمادهی بقایای آلی مانند ضایعات گیاهی، کودهای دامی و سایر ضایعات در دماهای ۲۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در یک محیط بدون اکسیژن یا با میزان اکسیژن محدود به‌دست می‌آید (Yaashikaa *et al.*, 2020). به‌عبارت دیگر می‌توان با کاهش مصرف کودهای شیمیایی و استفاده از نهاده‌های زیستی گام مهمی در راستای سیاست‌های کشاورزی پایدار و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی برداشت. ذغال زیستی نقش مهمی در بهبود افزایش میزان عناصر معدنی و رشد باکتری‌های موجود در خاک و نیز جلوگیری از آب‌شویی مود آلی و معدنی خاک دارد (Bashir *et al.*, 2018).

تحقیق حاضر به منظور مطالعه تأثیر سطوح مختلف ذغال بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه مریم‌گلی تحت تنش کادمیوم صورت گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند منجر به کاربرد صحیح ماده آلی ذغال به‌عنوان یک راهکار مناسب زیستی برای کاهش تنش عنصر کادمیوم در گیاهان به‌ویژه مریم‌گلی گردد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در چهار تکرار (۳×۳×٤) در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱٤۰۰ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل ذغال تهیه‌شده از

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

چوب اقاقیا در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ درصد وزنی) و کادمیوم در سه سطح (صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بود (Fattahi *et al*., 2019; Mehdizadeh *et al*., 2021). مقدار هر یک از تیمارهای مورد مطالعه براساس بررسی منابع مختلف و نتایج آزمایش اولیه بررسی واکنش گیاه مریم‌گلی به ذغال و تنش کادمیوم تعیین گردید (Fattahi *et al*., 2019; Mehdizadeh *et al*., 2021). ذغال مورد استفاده در این آزمایش به روش سنتی تهیه شد. برای تهیه ذغال مورد نیاز،ابتدا چوب‌های هم‌اندازه از درختان اقاقیا انتخاب و به قطعات مناسب برش داده شدند. یک گودال با عمق حدود ۱ تا ۱/۵ متر و قطر ۲ تا ۳ متر در زمین حفر گردید. دیواره‌های آن با گل پوشانده شد. چوب‌ها به صورت متراکم در گودال چیده شد. برای جلوگیری از ورود اکسیژن بیش از حد، چوب‌ها با خاک، برگ و گل پوشانده شد و ذغال تهیه شد. از یک نقطه مشخص، آتش از قسمت پایین گودال به به تدریج و یکنواخت به سراسر چوب‌ها رسانده شد. در این مرحله، باید فرآیند سوختن چوب‌ها به دقت کنترل شد. اگر اکسیژن بیش از حد وارد شود، چوب‌ها کاملاً می‌سوزند و ذغال تولید نمی‌شود. این فرآیند بین ۲۴ تا ۴۸ ساعت طول کشید (پرنیان و همکاران، ۱۴۰۱). در نهایت برای جلوگیری از سوختن و خاکسترشدن ذغال‌های کربنی، به منظور قطع‌کردن جریان هوا، آن‌ها در مخزن کاملاً پلمپ شدند تا خنک شوند. سپس ذغال حاصل خرد و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. جهت اعمال تیمارهای آزمایش، ابتدا نمونه‌های خاک با مقادیر تعیین‌شده از نیترات کادمیوم مخلوط شد. مخلوط خاک مورد استفاده شامل خاک زراعی، خاکبرگ و ماسه به نسبت ۲:۱:۲ تهیه شد (امیدبیگی، ۱۳۹۰). مخلوط خاکی مورد استفاده در گلدان پیش از شروع آزمایش در آزمایشگاه خاک مورد آنالیز قرار گرفت و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد. براساس نتایج حاصل از آنالیز خاک بافت خاک مورد استفاده لومی شنی و میزان پتاسیم، فسفر و نیتروژن موجود در خاک به ترتیب ۱۹۴، ۱۵ و ۰/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. همچنین ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) ۷/۹ میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خاک، اسیدیته (pH) خاک ۷/۷، هدایت الکتریکی (EC) ۳/۲۱ دسی‌زیمنس بر متر و کربن آلی ۰/۸۳٪ گزارش شد.

برای انجام این آزمایش، ابتدا مقادیر مورد نظر کادمیوم در حجم مشخصی از آب‌مقطر حل و سپس به صورت یکنواخت به نمونه‌های خاک اسپری شد و سپس خاک به خوبی به‌هم زده شد تا یکنواختی کامل در خاک حاصل شود. در مرحله بعد خاک را درون کیسه‌های پلاستیکی قرار داده و رطوبت آن در حد ۷۰ درصد ظرفیت زراعی به مدت یک ماه در دمای ۲۳-۲۵ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شد تا فلز کادمیوم در خاک به حالت شبه تعادل برسد. پس از گذشت یک ماه به نمونه‌های خاک مقادیر مختلف ذغال مطابق طرح آزمایش اضافه گردید و به مدت دو هفته در شرایط قبلی قرار داده شد. پس از مخلوط کردن خاک با ذغال و گذشت زمان ذکرشده، خاک روی پلاستیک در گلخانه به مدت دو هفته پخش شد تا خاک هوا خشک گردد. در نهایت خاک مجدداً از الک عبور داده و در گلدان‌های کشت ریخته شد (Diaconu *et al*., 2012).

پس از اعمال تیمار ذغال و آماده‌سازی خاک، ابتدا بذرهای تهیه‌شده از شرکت پاکان بذر اصفهان لابه‌لای پارچه نخی و مرطوب خیسانده شد و سپس به ژرمیناتور با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت دو هفته قرار داده شد. جهت تهیه بستر کشت، پرلیت و کوکوپیت خیسانده و سپس خانه‌های سینی نشاء با بستر تهیه‌شده پر گردید. در هر یک از این خانه‌ها دو عدد بذر سرمادهی‌شده قرار داده شد. نشاءها بعد از مرحله چهار برگی به گلدان‌های پرشده با خاک آلوده به کادمیوم و تیمار ذغال انتقال داده شد. کلیه اعمال زراعی در طول دوره رشد گیاهان به صورت یکنواخت در همه گلدان‌ها انجام شد. اندازه‌گیری صفات در مرحله گلدهی صورت گرفت. اندازه‌گیری میزان کلروفیل a، b، کارتنوئید و کلروفیل کل با روش Deres و همکاران (۱۹۹۸) انجام شد. بدین صورت که ۰/۵ گرم از نمونه تازه گیاهی با ۵ میلی‌لیتر متانول عصاره‌گیری شده و سپس به‌منظور اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی عصاره تهیه‌شده در دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UK Bio Quest C250) ریخته شد و مقدار جذب در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

طول‌موج‌های ٦٥٣، ٦٦٦ و ٤٧٠ نانومتر خوانده شد و میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی محاسبه شدند. محتوای نسبی آب برگ به روش Sanchez و همکاران (۱۹۹۸) اندازه‌گیری شد. جهت تعیین پایداری غشاء از شاخص نشت الکترولیت استفاده شد (Lutts *et al.*, 1996). محتوای فلاونوئید کل با استفاده از روش شکل‌گیری آلومینیوم – فلاونوئید با در طول‌موج ۵۱۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Menichini *et al.*, 2009). میزان فنل کل با اضافه‌کردن معرف فولین سیکالتو به عصاره متانولی تهیه‌شده از نمونه برگ و قراردادن نمونه‌ها در دستگاه اسپکتروفتومتر و در طول‌موج ٧٦٥ نانومتر اندازه‌گیری شد (Singleton *et al.*, 1965). اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول با استفاده از معرف آنترون در طول‌موج ٦٢٠ نانومتر اندازه‌گیری شد (Nanjo *et al.*, 1988). اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانتی با استفاده از DPPH (2,2- Diphenyl-1-Picril-hydrazol) در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Moon and Terao, 1998) داده‌ها پس از نرمال‌کردن، توسط نرم‌افزار Minitab 17 آنالیز شدند و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون Bonnferroni در سطح ۵ درصد انجام گرفت.

نتایج

رنگیزه‌های فتوسنتزی: نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به آزمایش بررسی اثر ذغال بر مقدار کلروفیل گیاه مریم‌گلی تحت تنش کادمیوم نشان داد که تنها اثر متقابل تیمارهای مورد بررسی بر مقدار کلروفیل b معنی‌دار شد (جدول ۱).

اعمال تنش کادمیوم موجب کاهش معنی‌دار مقدار کلروفیل گردید و کمترین مقدار کلروفیل a تحت تنش شدید کادمیوم به‌دست آمد. همچنین با افزایش مقدار ذغال استفاده‌شده در محیط رشد گیاه مریم‌گلی مقدار کلروفیل a به میزان ۱۲/٦۷ درصد نسبت به شرایط بدون تیمار ذغال افزایش داشت (جدول ۲). اثر تیمار ذغال در بهبود مقدار کلروفیل b در شرایط تنش بیشتر از شرایط بدون تنش بود، بطوریکه مقدار کلروفیل b در گیاهان تیمارشده با بالاترین غلظت ذغال (۲ درصد وزنی) در شرایط بدون تنش، تنش ملایم و تنش شدید به‌ترتیب ۵/۰۱، ۱٦/۰۷ و ۲٦/۳۲ درصد بیشتر از گیاهان تیمار نشده بود (جدول ۳).

در این آزمایش بررسی اثر ذغال بر مقدار کاروتنوئید گیاه مریم‌گلی تحت تنش کادمیوم نشان داد اثر متقابل تیمارها بر مقدار این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۲) و تنش کادمیوم موجب کاهش معنی‌دار کاروتنوئیدها به میزان ۳۵/۹۱ درصد شد. استفاده از بالاترین غلظت ذغال موجب افزایش مقدار کاروتنوئید گیاهان تیمارشده به ۱٦/۲۷ درصد گردید.

محتوای نسبی آب برگ: تجزیه واریانس داده‌ها در آزمایش نیز بیانگر معنی‌دار بودن اثر تیمار ذغال بر افزایش محتوای نسبی آب برگ در سطوح مختلف تنش کادمیوم است (جدول ۲). افزودن ذغال به محیط رشد گیاه مریم‌گلی موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ در گیاهان رشدیافته در هر دو شرایط تنش و سطوح مختلف تنش کادمیوم گردید. میزان افزایش محتوای نسبی آب برگ تحت شرایط بدون تنش، تنش ملایم و شدید کادمیوم در واکنش به تیمار ذغال به‌ترتیب ٦/۱٦، ۱۳/۹۷ و ۱٦/٤۲ درصد بود (جدول ۳).

نشت الکترولیت: نتایج آزمایش مربوط به بررسی اثر ذغال بر گیاه مریم‌گلی تحت تنش کادمیوم نشان داد اثر استفاده از ذغال بر کاهش مقدار نشت الکترولیت تحت سطوح مختلف تنش کادمیوم معنی‌دار بود (جدول ۲). در این آزمایش مقدار نشت الکترولیت با افزایش غلظت کادمیوم افزایش معنی‌داری داشت و تیمار ذغال موجب کاهش معنی‌دار مقدار نشت الکترولیت در گیاهان رشدیافته در شرایط تنش کادمیوم گردید. بیشترین میزان نشت الکترولیت (٦۲/۱٦٪) در تیمار فاقد ذغال و کادمیوم ٦۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد که نسبت به گیاهان شاهد ٤۳/۷۲٪ افزایش نشان دادند (جدول ۳). کمترین میزان نشت الکترولیت (٤۳/۲۵٪) در تیمار شاهد مشاهده شد، هر چند از نظر آماری بین این تیمار و تیمار فاقد کادمیوم و ذغال ۱ درصد وزنی/ وزنی تفاوت معناداری مشاهده نشد (جدول ۳).

کربوهیدرات محلول: براساس نتایج تجزیه واریانس مقدار

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر ذغال بر خصوصیات فیزیولوژیکی و محتوای نسبی آب برگ گیاه مریم‌گلی تحت سطوح مختلف تنش کادمیوم

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئیدها	محتوای نسبی آب برگ	نشت الکترولیت
ذغال	۲	۲/۳۷۵ **	۰/۲۰۵ **	۲/۰۴۹ **	۱۷۳۶/۲۳۷ **	۷۴۴/۳۳۳ **
تنش کادمیوم	۲	۰/۱ **	۰/۰۱۸ **	۰/۲۳۲ **	۱۵۹/۴۰۵ **	۲۶/۱۰۱ **
ذغال × تنش کادمیوم	۴	۰/۰۱۱ ns	۰/۰۰۲ *	۰/۰۰۴ ns	۶/۳۰۴ **	۹/۱۰۸ **
خطا	۲۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۸	۱/۷۳۰	۱/۷۲۶
ضریب تغییرات		۵/۷۶۹	۱/۷۲۷	۴/۷۹۹	۱/۹۸۶	۲/۶۱۶

ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ادامه جدول ۱-

منابع تغییرات	درجه آزادی	کربوهیدرات محلول	پرولین	فنول کل	فلاونوئیدها	فعالیت آنتی‌اکسیدانی
ذغال	۲	۲۰۶/۱۰۷ **	۴/۶۴۳ **	۱۰۲۷۱/۴۱ **	۳۵۰۹/۵۴۱ **	۴۳۲/۰۱۶ **
تنش کادمیوم	۲	۷/۴۹۴ **	۰/۱۱۷ **	۶۵۹/۱۸۶ **	۱۲/۶۵۹ ns	۳/۳۶۹ **
ذغال × تنش کادمیوم	۴	۳/۸۷۲ **	۰/۰۴۵ **	۳۵۲/۸۹۲ **	۲۱/۸۲۵ *	۸/۳۲۳ **
خطا	۲۷	۰/۷۱۲	۰/۰۰۸	۱۸/۱۲۴	۵/۹۶۴	۰/۲۹۸
ضریب تغییرات		۵/۱۰۵	۴/۴۳۲	۲/۵۴۶	۳/۴۷۱	۰/۷۰۹

ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول ۲- اثر ساده ذغال و کادمیوم بر برخی صفات فیزیولوژیکی مریم‌گلی

تیمار	غلظت	کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	کاروتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)
ذغال (درصد وزنی/ وزنی)	۰	۱/۴۴ c*	۱/۷۰ c
	۱	۱/۵۲ b	۱/۸۳ b
	۲	۱/۶۲ a	۱/۹۸ a
کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)	۰	۲/۰۰ a	۲/۲۷ a
	۳۰	۱/۴۵ b	۱/۸۰ b
	۶۰	۱/۱۳ c	۱/۴۵ c

حروف متفاوت در هر ستون برای هر عامل نمایانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن است.

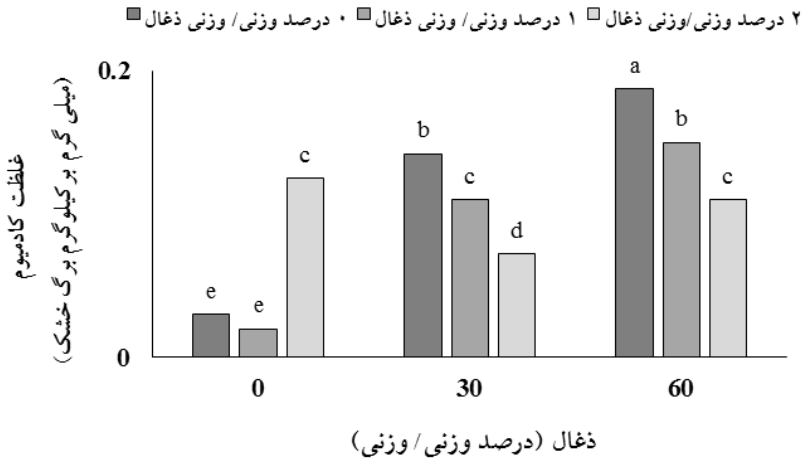
کربوهیدرات محلول برگ گیاه مریم‌گلی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل تیمار مورد بررسی (ذغال × کادمیوم) قرار گرفت (جدول ۲). در گیاه مریم‌گلی افزایش غلظت کادمیوم در محیط رشد همراه با افزایش مقدار کربوهیدرات محلول بود؛ بطوریکه در گیاهان تیمارشده با بالاترین غلظت کادمیوم (۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) مقدار کربوهیدرات محلول ۸۳/۹۲

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل ذغال و کادمیوم بر روی برخی خصوصیات فیزیولوژیکی مریم‌گلی تحت سطوح مختلف تنش کادمیوم

ذغال (درصد وزنی وزنی)	تنش کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)	کلروفیل b	کربوهیدرات محلول	فنول کل	پرولین	فلاونویید	محتوای نسبی آب برگ	نشت الکترولیت (درصد)	فعالیت آنتی اکسیدانی
		(میلی‌گرم بر گرم وزن تر)							
۰	۰	۰/٦٧ b*	۱۲/۳۹e	۱۳٤/۱۳f	۱/۳۹d	٥۲/۲٥e	۷۷/۸b	٤۳/۲٥e	٦۹/٦٥g
	۳۰	۰/٥۲d	۱۷/٥۱c	۱۸۲/۸٥d	۲/۲۲c	٦۹/٥٦c	٥۹/۱٥d	٥۱/٤۱c	۷۹/۸٦e
	٦۰	۰/٤۱f	۲۲/۷۹a	۲۱۳/۰۲b	۲/۸۳a	۸٥/۳٦b	٥۱/۱f	٦۲/۱٦a	۸۳/٦۰c
۱	۰	۰/۷۱ab	۱۲/۷٦e	۱۳۸/٦۸e	۱/۳٤d	٥۳/٥٤e	۷۹/۲٥b	٤۳/۷۲e	٦۹/۹۰g
	۳۰	۰/٥٤d	۱٥/۳۲d	۱٦۰/۰۷d	۲/۱۷c	۷۰/٦٥c	٦۰/۳۸d	٤۸/۱٤d	۷۹/۲۷d
	٦۰	۰/٤٤e	۱۹/۹۳b	۱۸۸/٥۱b	۲/٤۷b	۸٦/۰۱b	٥٥/٤۳e	٥۷/٦۰b	۸۲b
۲	۰	۰/۷۳a	۱۳/۳۲e	۱٤۰/٤٦e	۱/۳۳d	٥٤/۳۲d	۸۲/٥۹a	٤۳/٥۳e	۷۱/۷٦f
	۳۰	۰/٦۰c	۱٥/۸۸d	۱٦۳/٤۳c	۲/۱۲c	۷۱/۳۲c	٦۷/٤۱c	٤۷/۹٥d	۷۷/۷۳cd
	٦۰	۰/٥۲d	۲۰/٤۹b	۱۸٦/۸۷a	۲/٤۲b	۸۸/۳۲a	٥۹/٤۹d	٥۷/٤۱b	۸۰/٤٦a

ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد. حروف متفاوت برای هر عامل نمایانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن است.



شکل ۱- اثر ذغال بر غلظت کادمیوم برگ گیاه مریم‌گلی تحت سطوح مختلف تنش کادمیوم

درصد بالاتر از گیاهان رشدیافته در شرایط بدون تنش کادمیوم بود. اگر چه استفاده از ذغال در شرایط بدون تنش موجب افزایش مقدار کربوهیدرات‌های محلول گردید؛ ولی در شرایط تنش افزودن این ترکیبات به محیط رشد گیاه مریم‌گلی موجب کاهش مقدار کربوهیدرات محلول در برگ گیاهان تیمار شده گردید. مقدار کاهش کربوهیدرات محلول در واکنش به تیمار ذغال با افزایش غلظت و شدت تنش بیشتر از سایر تیمارها بود. در گیاهان تیمارشده با غلظت ۲ درصد وزنی ذغال تحت تنش شدید کادمیوم میزان کاهش کربوهیدرات محلول به‌ترتیب ۱۷/۳۷ و ۱۰/۰۸ درصد بیشتر از گیاهان تیمار نشده بود (جدول ۳).

پرولین: تجزیه واریانس داده‌ها بیانگر معنی‌دار بودن اثر تیمار ذغال بر کاهش مقدار پرولین در سطوح مختلف تنش کادمیوم است (جدول ۲). افزودن ذغال به محیط رشد گیاه مریم‌گلی موجب کاهش مقدار پرولین تنها در گیاهان رشدیافته تحت تنش کادمیوم گردید. میزان کاهش پرولین تحت تنش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

ملایم و شدید کادمیوم در واکنش به تیمار ذغال به‌ترتیب ٤/٢٨ و ١٤/٣١ درصد بود (جدول ٣).

فنول کل: نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به آزمایش بررسی اثر ذغال بر مقدار فنول کل گیاه مریم‌گلی تحت تنش کادمیوم بیانگر اثر معنی‌دار بودن اثر متقابل آن‌ها بر مقدار فنول کل بود (جدول ٢). تنش کادمیوم موجب افزایش معنی‌دار مقدار فنول کل گردید؛ بطوریکه کمترین (١٣٤/١٣ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و بیشترین مقدار آن (١٨٦/٨٧ میلی‌گرم در گرم وزن تر) به‌ترتیب تحت شرایط بدون تنش و تنش شدید کادمیوم حاصل شد. با افزایش مقدار ذغال استفاده‌شده در محیط رشد گیاه مریم‌گلی مقدار فنول کل افزایش معنی‌داری داشت. اثر تیمار ذغال در افزایش مقدار فنول کل در شرایط تنش بیشتر از شرایط بدون تنش بود، بطوریکه مقدار فنول کل در گیاهان تیمارشده با بالاترین غلظت ذغال (٢ درصد وزنی) در شرایط بدون تنش، تنش ملایم و تنش شدید به‌ترتیب ٤/٧٢، ١١/٨٨ و ١٣/٩٩ درصد بیشتر از گیاهان تیمار نشده بود (جدول ٣).

فلاونوئیدها: براساس نتایج تجزیه واریانس مقدار فلاونوئیدهای برگ گیاه مریم‌گلی در این آزمایش به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای ذغال، کادمیوم و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت (جدول ٢). افزایش غلظت کادمیوم در تیمارهای مختلف موجب افزایش مقدار فلاونوئیدها گردید بطوریکه در گیاهان تیمارشده با بالاترین غلظت کادمیوم (٦٠ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در تیمار فاقد ذغال مقدار فلاونوئیدها ٦٣/٣٦ درصد بیشتر از گیاهان رشدیافته در شرایط بدون تنش کادمیوم بود. از سوی دیگر، ذغال در شرایط بدون تنش و سطوح مختلف آلودگی کادمیوم موجب افزایش مقدار فلاونوئیدها گردید. مقدار افزایش فلاونوئیدها در واکنش به تیمار ذغال با افزایش غلظت این تیمارها و شدت تنش بیشتر از سایر تیمارها بود. بنابراین بیشترین مقدار فلاونوئیدها (٨٨/٣٢ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در تیمار ٢ درصد وزنی ذغال و ٦٠ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک حاصل شد. در گیاهان تیمارشده با غلظت ٢ درصد وزنی ذغال تحت تنش شدید کادمیوم میزان افزایش فلاونوئیدها ٦٢/٥٩ درصد بیشتر از گیاهان تیمار نشده بود (جدول ٣).

فعالیت آنتی‌اکسیدانی: نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به آزمایش بررسی اثر ذغال بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه مریم‌گلی تحت تنش کادمیوم بیانگر اثر معنی‌دار کادمیوم، ذغال و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار این صفت بود (جدول ٢). اعمال تنش کادمیوم موجب افزایش معنی‌دار فعالیت آنتی‌اکسیدانی شد و کمترین (٦٩/٦٥ درصد) و بیشترین مقدار آن (٨٠/٤٦ درصد) به ترتیب در شرایط بدون تنش و تنش شدید کادمیوم به‌دست آمد. با افزایش مقدار ذغال استفاده شده در محیط رشد گیاه مریم‌گلی فعالیت آنتی‌اکسیدانی افزایش معنی‌داری داشت. اثر تیمار ذغال در افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش بیشتر از شرایط بدون تنش بود. مقدار فعالیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تیمارشده با بالاترین غلظت ذغال (٢ درصد وزنی) در شرایط بدون تنش، تنش ملایم و تنش شدید به‌ترتیب ٣/٠٤، ٣/٧٤ و ٣/٨٩ درصد بیشتر از گیاهان تیمار نشده بود (جدول ٣).

غلظت کادمیوم برگ: بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر متقابل ذغال و کادمیوم بر مقدار کادمیوم برگ گیاه مریم‌گلی معنی‌دار بود (جدول ١). تحت تنش کادمیوم، مقدار عنصر کادمیوم افزایش معنی‌داری داشت و بیشترین مقدار کادمیوم در گیاهان رشدیافته در غلظت ٦٠ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک و فاقد ذغال حاصل شد (شکل ١). کابرد ٢ درصد وزنی/ وزنی ذغال در بالاترین سطح تنش کادمیوم (٦٠ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) سبب کاهش ٥٨/٨٢ درصدی کادمیوم نسبت به عدم کاربرد ذغال در این سطح کادمیوم گردید (شکل ١).

بحث

کادمیوم یکی از فلزات سنگین بسیار سمی است که تأثیر منفی روی سیستم آنزیمی سلول‌های زنده دارد. بعد از قرارگرفتن گیاه در معرض تنش کادمیم، گیاهان تغییرات پیچیده‌ای در سطح بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مولکولی از خود نشان

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

می‌دهند که همراه با تغییراتی مانند زردشدن برگ‌ها، کاهش رشد ریشه و اندام هوایی، تغییرات روزنه‌ها، ایجاد اثرات منفی روی غشاها و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان است (Sonali *et al*., 2018; Szopinski *et al*., 2019). میزان معمول کادمیوم در گیاه ۱-۰/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم است و مقدار زیادی از کادمیم جذب‌شده در مواضع تبادلی ریشه نگهداری می‌شود (Bakhtiari *et al*., 2023). تجمع کادمیوم در گیاهان با توجه به گونه، رقم و شرایط رشدی و حضور سایر عناصر متفاوت است (Dobrikova *et al*., 2021). اثر فلز کادمیوم بر کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی مانند کلروفیل a و b در بسیاری از گونه‌های گیاهی مانند ریحان (*Ocimum basilicum*) (آقایی و همکاران، ۱۳۹۸)، درمنه (*Artemisia annua*) (شیرخانی و همکاران، ۱٤۰۰) و ریحان (*Ocimum ciliatum*) (Mehdizadeh *et al*., 2021) گزارش شده است. فلزات سنگین از طریق آسیب به ساختار کلروپلاست‌ها، تغییر در فرایندهای دخیل در فتوسنتز، و جایگزینی با یون‌هایی مانند منیزیم و منگنز در کلروپلاست باعث کاهش مقدار فتوسنتز در گیاهان می‌گردند (Sorrentino *et al*., 2018). از سوی دیگر، اصلاح‌کننده‌های خاک از طریق کاهش میزان پراکسیداسیون لیپیدی، از رنگیزه‌ها در مقابل تنش اکسیداتیو محافظت نموده و در حفظ کلروفیل‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند (Mehdizadeh *et al*., 2021). در برخی بررسی‌ها گزارش شده است که با افزودن ذغال دسترسی گیاه به عناصر غذایی بیشتر شده و این می‌تواند یکی از نقش‌های این ترکیبات در حفظ محتوای کلروفیل گیاه باشد (Liu *et al*., 2016). همچنین مطابق با نتایج حاصل از مطالعات پیشین روی ریحان (*Ocimum basilicum*) (آقایی و همکاران، ۱۳۹۸)، اسفناج (معظمی و همکاران، ۱٤۰٤) و ریحان (*Ocimum ciliatum*) (Mehdizadeh *et al*., 2021)، با افزایش غلظت کادمیوم، میزان کادمیوم برگ مریم‌گلی افزایش یافت. دلیل دیگر کاهش میزان کلروفیل تحت تنش کادمیوم را می‌توان جایگزین شدن کادمیوم به جای منیزیوم در ساختار این رنگیزه‌ها دانست. در پژوهش حاضر میزان کاهش کاروتنوئیدها در واکنش به کادمیوم به ویژه غلظت پایین آن (۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) کمتر از میزان کلروفیل‌ها بود. یکی از دلایل کمتر بودن کاهش کاروتنوئیدها در غلظت‌های کمتر کادمیوم، می‌تواند مربوط به فعالیت آنتی‌اکسیدانی این رنگیزه‌ها باشد (Moustakas *et al*., 2019). در برخی بررسی‌ها گزارش شده است که با افزودن ذغال دسترسی گیاه به عناصر غذایی بیشتر شده و این می‌تواند یکی از نقش‌های این ترکیبات در حفظ محتوای کلروفیل گیاه باشد (Liu *et al*., 2016). علاوه بر این، فلزات سنگین از طریق وارد کردن تنش ثانوی بر گیاه می‌توانند بر فعالیت آن اثر بگذارند. مهم‌ترین تنش ثانوی ناشی از آلودگی کادمیومی، تنش اسمزی است. در این پژوهش افزایش نشت الکترولیت با افزایش غلظت کادمیوم گزارش شده است که با نتایج تحقیقات قبلی روی اسفناج (معظمی و همکاران، ۱٤۰٤) و ریحان (Mehdizadeh *et al*., 2021) مطابقت دارد. اندازه‌گیری میزان افزایش نشت الکترولیت، نشان‌دهنده میزان آسیب گونه‌های فعال اکسیژن تولیدشده ناشی از تنش کادمیوم، به غشای سلولی است که در گونه‌های مختلف گیاهی گزارش شده است (Haider *et al*., 2021). از سوی دیگر مطابق با نتایج پژوهش‌های قبلی روی اسفناج (معظمی و همکاران، ۱٤۰٤) و ریحان (Mehdizadeh *et al*., 2021)، با افزایش غلظت کادمیوم محتوای نسبی آب برگ گیاه کاهش نشان داد. کاهش محتوای نسبی آب برگ در واکنش به تنش کادمیوم که موجب بروز شرایط کمبود آب در بافت برگی می‌شود، ممکن است در نتیجه کاهش هدایت هیدرولیکی در ریشه و یا کاهش جریان آب از ریشه به بخش هوایی باشد (Sorrentino *et al*., 2018). در پژوهش حاضر استفاده از غلظت‌های بالای ذغال (۲ درصد وزنی) محتوای نسبی آب برگ گیاه مریم‌گلی را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. اندازه‌گیری مقدار نشت الکترولیت در گیاهان تحت تنش کادمیوم تیمارشده با ذغال نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار نشت الکترولیت در واکنش به تیمارهای اعمال‌شده می‌باشد که بیشترین کاهش در گیاهان تیمارشده با بیوچار ۲ درصد وزنی ثبت گردید. تیمار ذغال از طریق ایجاد تعادل اسمزی و کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن، استحکام

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

دیواره سلولی، سیالیت غشای پلاسمایی را افزایش داده که این تغییرات سبب کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و در نتیجه کاهش میزان نشت الکترولیت می‌شود (Abbas *et al*., 2018; Mehdizadeh *et al*., 2021). افزایش محتوای نسبی آب برگ در واکنش به تیمارهای ذغال در ارتباط با ایجاد تعادل اسمزی در سلول‌های گیاهی است که ریشه‌های گیاه را قادر می‌سازد تا بتواند آب را جذب و به اندام‌های هوایی انتقال دهد (Tian *et al*., 2017; Liu *et al*., 2016). بسیاری از شرایط تنش‌زای محیطی بر متابولیسم قندها و پخش مواد فتوسنتزی در گیاهان در حال رشد اثر می‌گذارند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افزایش غلظت کادمیوم در محیط رشد گیاه مریم‌گلی باعث افزایش میزان کربوهیدرات‌های محلول برگ شد که با یافته‌های پژوهش های قبلی روی ریحان (*Ocimum basilicum*) (آقایی و همکاران، ۱۳۹۸) و ریحان (Mehdizadeh *et al*., 2021) همسو است. افزایش میزان کادمیوم از فعالیت آنزیم روبیسکو که آنزیم کلیدی چرخه کالوین است، جلوگیری می‌کند. کاهش تولید و افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده قندهای محلول مانند اینورتاز و ساکارز سنتاز موجب کاهش مصرف قندها و افزایش تولید آن‌ها می‌شود (Jawad Hassan *et al*., 2020). کادمیوم با کاهش انتقال آب به برگ‌ها و در نتیجه اختلال در سرعت تعرق برگ منجر به تغییرات فراساختاری اندامک‌های سلول و تغییر در رفتار آنزیم‌های کلیدی چند مسیر متابولیسمی از جمله مسیر متابولیسم قند می‌شود. همچنین با کاهش انتقال آب به برگ‌ها و به‌دنبال آن انباشت کادمیوم در سلول‌ها، محتوای قندهای احیاکننده در گیاه افزایش می‌یابد. این پدیده احتمالاً مکانیسم سازشی گیاه برای حفظ پتانسیل اسمزی در شرایط سمیت کادمیوم است (Cheng *et al*., 2016). در مطالعه حاضر کاهش مقدار کربوهیدرات محلول در واکنش به تیمارهای ذغال احتمالاً در ارتباط با کاهش اثرات تنش از طریق مکانیسم‌های دیگر می‌باشد که موجب عدم نیاز گیاه به صرف انرژی بیشتر برای تولید کربوهیدرات برای تنظیم اسمزی می‌گردد (Abbas *et al*., 2018). علاوه بر این، یکی از مهم‌ترین اسیدهای آمینه در گیاهان پرولین است که در برابر انواع تنش‌ها از جمله تنش عناصر سنگین از گیاه محافظت می‌کند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم میزان پرولین افزایش نشان داد که با نتایج حاصل از پژوهش‌های قبلی روی ریحان (*Ocimum basilicum*) (آقایی و همکاران، ۱۳۹۸)، اسفناج (معظمی و همکاران، ۱۴۰۴) و ریحان (Mehdizadeh *et al*., 2021) مطابقت دارد. یکی از دلایل تجمع پرولین در گیاهان تحت تنش کادمیوم، به دلیل نقش پرولین در اتصال به کادمیوم و تشکیل یک کمپلکس غیرسمی پرولین-کادمیوم است (دژبان و همکاران، ۱۳۹۴). در پژوهش حاضر تیمار ذغال مقدار پرولین را در گیاهان رشدیافته در شرایط تنش کادمیوم کاهش داده است و اثری بر مقدار پرولین گیاهان رشدیافته در شرایط بدون تنش نداشت. به نظر می‌رسد ذغال با تعدیل سمیت کادمیوم و افزایش جذب آب، نیاز گیاه به تولید پرولین را در شرایط تنش کاهش داده است (Khan *et al*., 2017)، به همین دلیل در گیاهان تحت تنش کادمیوم و تیمارشده با ذغال، کاهش پرولین مشاهده می‌شود. ترکیبات فنولی از جمله فلاونوئیدها به‌عنوان یکی از متابولیت‌های ثانویه ارزشمند گیاهان، علاوه بر کاربردهای متعدد در صنایع غذایی و داروسازی، نقش بسیار مهمی در افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی دارند (Kabtni *et al*., 2020). با افزایش غلظت کادمیوم محتوای فنل کل و فلاونوئید و در نتیجه فعالیت آنتی‌اکسیدانی در این تحقیق افزایش یافت که با نتایج حاصل از پژوهش قبلی روی ریحان (Mehdizadeh *et al*., 2021) مطابقت دارد. بسیاری از ترکیبات فنولی، از پالاینده‌های بسیار کارآمد رادیکال‌های هیدروژن هستند و به همین دلیل باعث کاهش تولید پراکسید هیدروژن، ثبات غشاءها و توقف پراکسیداسیون لیپیدی می‌شوند. شرایط نامطلوب محیطی از جمله سیمت کادمیومی موجب فعال‌شدن سیستم‌های پیام‌رسانی متعددی توسط هورمون‌های گیاهی می‌گردد که سبب فعال‌شدن یا افزایش بیان آنزیم‌های درگیر در سنتز ترکیبات فنولی می‌شوند (Ge *et al*., 2019). در پژوهش حاضر تیمار گیاهان با ذغال موجب افزایش مقدار فنول کل و فلاونوئیدها در برگ گیاه مریم‌گلی گردید.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

پیش‌ساز اصلی برای سنتز ترکیبات فنلی در بافت‌های گیاهی کربوهیدرات‌ها هستند. به نظر می‌رسد که تیمار ترکیبات آلی به‌طور غیرمستقیم با تحت تأثیر قراردادن متابولیسم کربوهیدرات‌ها، این ترکیبات را به سمت سنتز ترکیبات فنلی هدایت می‌کند (Yaashikaa *et al.*, 2020). فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه مجموع سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی را شامل می‌شود. پراکسید هیدروژن تولیدشده در واکنش به فلزات سنگین در سلول انباشته شده و به عنوان پیغام‌رسان ثانویه در مسیرهای سیگنال‌دهی منجر به فعال‌شدن سیستم دفاعی گیاه و در نتیجه افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی می‌گردد (برقی و همکاران، ۱۴۰۰). استفاده از ذغال به‌ویژه در غلظت ۲ درصد وزنی فعالیت آنتی‌اکسیدانی مریم‌گلی را افزایش داد. به نظر می‌رسد ذغال از طریق افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی گیاه (ترکیبات فنولی) و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه را افزایش داده و از این طریق مقاومت گیاه را در برابر شرایط نامطلوب محیطی بهبود می‌بخشد (Yaashikaa *et al.*, 2020). در این تحقیق کاربرد ذغال سبب کاهش غلظت کادمیوم برگ به کمتر از میزان حداکثر کادمیوم مجاز (۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) (FAO, 2012) گردید. به نظر می‌رسد ذغال می‌تواند قابلیت انتقال، در دسترس بودن و در نتیجه جذب کادمیوم را در بخش‌های مختلف گیاه کاهش دهد. در مورد میزان کادمیوم اشکال قابل دسترس مهم‌تر از محتوای کادمیوم کل در خاک است (He *et al.*, 2019).

نتیجه‌گیری

براساس نتایج حاصل از این تحقیق کادمیوم به عنوان یک فلز سنگین بر صفات فیزیولوژیکی گیاه مریم‌گلی اثرات منفی دارد. تنش کادمیوم به ویژه در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سبب کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب برگ مریم‌گلی و افزایش پرولین، کربوهیدرات محلول ترکیبات فنولی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و نشت الکترولیت گردید. به نظر می‌رسد افزایش فنول، کربوهیدرات محلول، پرولین و فعالیت آنتی‌اکسیدانی نوعی روش دفاعی برای کاهش اثرات تنش و حفظ گیاه در شرایط تنش است. همچنین براساس نتایج بدست آمده از این پژوهش می‌توان استنباط کرد که ذغال باعث بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی مورد مطالعه شد. یافته‌های این مطالعه نشان داد بهترین نتیجه در گیاهان تیمارشده با غلظت ۲ درصد وزنی ذغال در سطوح مختلف کادمیوم به ویژه بالاترین سطح تنش (۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) حاصل شد. ذغال می‌تواند قابلیت انتقال، در دسترس بودن و در نتیجه جذب کادمیوم را در بخش‌های مختلف گیاه کاهش دهد و به این ترتیب اثرات مضر کادمیوم را کاهش دهد. به‌طورکلی با توجه نتایج حاصل از این پژوهش ذغال به عنوان اصلاح‌کننده آلی خاک می‌تواند در تعدیل اثر تنش کادمیوم و از طریق بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی گیاهان دارویی اثر گذار باشد.

منابع

آقایی، کیوان، راه خسروانی، بهاره، مغانلو، لیلا، و قطبی راوندی، 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)، ۱۲۱-۱۰۷.

امیدبیگی، رضا (۱۳۹۰). تولید و فرآوری گیاهان دارویی. چاپ ششم. انتشارات به نشر، مشهد.

برقی، علی، قلی‌پوری، عبدالقیوم، قویدل، اکبر، و صدقی، محمد (۱۴۰۰). اثر باکتری‌های محرک رشد، اسید سالیسیلیک و براسینواستروئید بر ویژگی‌های فیزیولوژیک خردل سیاه تحت تنش کادمیوم. *پژوهش‌های تولید گیاهی (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۸، ۱۵۳-۱۶۸.

پرنیان، امیر، حاتمی، حدیث، و مهبد، مهدی (۱۴۰۱). تولید زغال زیستی از ضایعات کشاورزی با کوره‌های مخروطی زمینی. چاپ

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

اول، نشر آموزش کشاورزی، تهران.

دژبان، عاطفه، شیروانی، انوشیروان، عطارد، پدرام، دلشاد، مجتبی، و متینی‌زاده، محمد (۱۳۹٤). اثر تنش کادمیوم بر فلورسانس کلروفیل، محتوای رنگدانه‌های کلروفیلی و پرولین برگ نهال‌های داغداغان (*Celtis caucasica* L.) و اقاقیا (*Robinia pseudoacacia* L.). *پژوهش‌های گیاهی (زیست‌شناسی ایران)*، ۲۸ (٤)، ٧٤٦-٧٥٨.

شیرخانی، زهره، چهرگانی راد، عبدالکریم، محسن‌زاده، فریبا، و غلامی، منصور (۱٤۰۰). اثر تیمار برگی کادمیوم بر ویژگی‌های ریخت‌شناسی، فیزیولوژیکی و تکوین گامتوفیت نر و ماده در درمنه خزری (*Artemisia annua*). *سلول و بافت*، ۱۲ (۱)،۷۲-۵۳.

مسعودی، فاطمه، و شیروانی، مهران (۱۳۹٦). سینتیک و همدمای جذب نیکل توسط زغال زیستی بقایای درخت خرما گرما کافت شده در دماهای مختلف. *نشریه علوم آب و خاک*، ۲۱، ۱-۱۳.

معظمی، به‌گل، فرامرزی،علی، پاک‌نژاد، فرزاد، اجلی، جلیل، و عبدی، مهرداد (۱٤۰٤). ارزیابی تأثیر بیوچار بر کیفیت و عملکرد اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) تحت شرایط تنش کادمیوم. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱٤ (٦٤)، ۱۱۳-۱۲۵.

Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Zia-Ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., & Murtaza, G. (2018). Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown on Cd-contaminated saline soil. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(26), 25668-25680. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8987-4

Bakhtiari, M., Raeisi Sadati, F., & Raeisi Sadati, S. Y. (2023). Foliar application of silicon, selenium, and zinc nanoparticles can modulate lead and cadmium toxicity in sage (*Salvia officinalis* L.) plants by optimizing growth and biochemical status. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(18), 54223-54233. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25959-w

Bashir, S., Zhu, J., Fu, Q. L., & Hu, H. Q. (2018). Cadmium mobility, uptake and anti-oxidative response of water spinach (*Ipomoea aquatic*) under rice straw biochar, zeolite and rock phosphate as amendments. *Chemosphere*, *194*, 579-587. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.162

Cheng, J., Qiu, H., & Chang, Z. (2016). The effect of cadmium on the growth and antioxidant response for freshwater algae *Chlorella vulgaris*. *Springer Plus*, *5*, 1290-1298.

Clemens, S, & Ma, J. F. (2016). Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. *Annual Review of Plant Biology*, *67*, 489-512. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043015-112301

Deres, S., Gunes, T., & Sivaci, R. (1998). Spectrophotometric determination of chlorophyll a,b and total carotenoid content of some algae species using different solvent. *Turkish Journal of Botany*, 2213-2217.

Diaconu, D., Diaconu, R., & Navrotescu, T. (2012). Estimation of heavy metals in medicinal plants and their infusions. *Ovidius University Annals of Chemistry*, *23*(1), 115-120. https: doi.org.10. 2478.v10310-012-0019-0

Dobrikova, A. G., Apostolova, E. L., Hanc, A., Yotsova, E., Borisova, P., Sperdouli, I., Adamakis, I. S., & Moustakas, M. (2021). Cadmium toxicity in *Salvia sclarea* L.: An integrative response of element uptake, oxidative stress markers, leaf structure and photosynthesis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *209*, 111851. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111851

Fattahi, B., Arzani, K., Souri, M. K., & Barzegar, M. (2019). Effects of cadmium and lead on seed germination, morphological traits, and essential oil composition of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products*, *138*, 111584-111594. https://doi.org/ 10.1016/j.indcrop.2019.111584

FAO (2012). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ge, Y. H., Chen, Y. R., Li, C. Y., Zhao, J., Wei, M., Li, X., Yang, S., & Mi, Y. (2019). Effect of sodium nitroprusside treatment on shikimate and phenylpropanoid pathways of apple fruit. *Food Chemistry*, *290*, 263-269. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.010

Haider, F. U., Liqun, C., Coulter, J. A., Cheema, S. A., Wu, J., & Zhang, R. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *211*, 111887. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887

Harizia, A., Benguerai, A., & Elouissi, A. (2021). Chemical composition and biological activity of *Salvia officinalis* L. essential oil against *Aphis fabae* Scopoli (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Plant Diseases and Protection*, *128*, 1547-1556. https://doi.org/10.1007/s41348-021-00525-z

He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P. C., & Xu, J. (2019). Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. *Environmental Pollution*. *225*, 846-855. https://doi.org/ 10.1016/j.envpol.2019.05.151

Henriquez, J. C., Duarte, L. V., Sierra, L. J., Fernandez-Alonso, J. L., Martinez, J. R., & Stashenko, E. E. (2023).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

Chemical composition and in vitro antioxidant activity of *Salvia aratocensis* (Lamiaceae) essential oils and extracts. *Molecules*, *28*(10), 4062. https: doi.org.10.3390.molecules28104062

Jawad Hassan, M., Ali Raza, M., Ur Rehman, S., Ansar, M., Gitari, H., Khan, I., Wajid, M., Ahmed, M., Abbas Shah, G., Peng, Y., & Li, Z. (2020). Effect of cadmium toxicity on growth, oxidative damage, antioxidant defense system and cadmium accumulation in two sorghum cultivars. *Plants* (Basel), *9*(11), 1575. https://doi.org/10.3390/plants9111575

Kabtni, S., Sdouga, D., Bettaib Rebey, I., Save, M., Trifi-Farah, N., Fauconnier, M. L., & Marghali, S. (2020). Influence of climate variation on phenolic composition and antioxidant capacity of *Medicago minima* populations. *Scientific Reports*, *10*, 8293. https://doi.org/10.1038/s41598-020-65160-4

Khan, M. A., Khan, S., Khan, A., & Alam, M. (2017). Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Science of the Total Environment*, *601-602*, 1591-1605. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.030

Koubaa-Ghorbel, F., Chaâbane, M., Turki, M., Makni-Ayadi, F., & El Feki, A. (2020). The protective effects of *Salvia officinalis* essential oil compared to simvastatin against hyperlipidemia, liver, and kidney injuries in mice submitted to a high-fat diet. *Food Biochemistr*y, *44*(4), e13160. https://doi.org/10.1111/jfbc.13160

Koubaa, F. G., Chaâbane, M., & Turki, M. (2021). Anti-oxidant and hepatoprotective effects of *Salvia officinalis* essential oil against vanadium-induced oxidative stress and histological changes in the rat liver. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 11001-11015. https://doi.org/ 10.1007/s11356-020-11303-z

Liu, A., Tian, D., Xiang, Y., & Mo, H. (2016). Biochar improved growth of an important medicinal plant (*Salvia miltiorrhiza* Bunge) and inhibited its cadmium uptake. *Journal of Plant Biology and Soil Health*, *3*(2), 1-6. https://doi.org/10.13188/2331-8996.1000011

Lutts, S., Kinet, J. M., & Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*, *78*(3), 389-398. https://doi.org/ 10.1006/anbo.1996.0134

Mehdizadeh, L., Farsaraei, S., & Moghaddam, M. (2021). Biochar application modified growth and physiological parameters of *Ocimum ciliatum* L. and reduced human risk assessment under cadmium stress. *Journal of Hazardous Materials,409*, 124954.https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124954

Menichini, F., Tundis, R., Bonesi, M., Loizzo, M. R., Conforti, F., Statti, G., De Cindio, B., Houghton, P. J., & Menichini, F. (2009). The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. cv Habanero. *Food Chemistry*, *114*(2), 553-560. https://doi.org/ 10.1016/j.foodchem.2008.09.086

Moon, J. H, & Terao, J. (1998). Antioxidant activity of caffeic acid and dihydrocaffeic acid in lard and human low-density lipoprotein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *46*(12), 5062-5065.

Moustakas, M., Hanc, A., Dobrikova, A., Sperdouli, I., Adamakis, I. D. S., & Apostolova, E. (2019). Spatial heterogeneity of cadmium effects on *Salvia sclarea* leaves revealed by chlorophyll fluorescence imaging analysis and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Materials*, *12*, 2953. https://doi.org/ 10.3390/ma12182953

Nanjo, T., Yoshiba, Y., Sanada, Y., Wada, K., & Tsukaya, H. K. (1988). Roles of proline in osmotic stress tolerance and morphogenesis of *Arabidopsis thaliana*. *Plant and Cell Physiology*, *39*, 104-108. https://doi.org/ 10.1046/j.1365-313x.1999.00438.x

Sánchez, F. J., Manzanares, M., de Andres, E. F., Tenorio, J. L., & Ayerbe, L. (1998). Turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water stress. *Field Crops Research*, *59*(3), 225-235. https://doi.org/ 10.1016/S0378-4290(98)00125-7

Singleton, V. L, & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, *16*(3), 144-158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

Sonali, D., Manju, S., Anubhuti, G., Vibha, R., & Debasis, C. (2018). Toxicity and detoxification of heavy metals during plant growth and metabolism. *Environmental Chemistry Letters*, *16*(4), 1169-1192. https://doi.org/10.1007/s10311-018-0741-8

Sorrentino, M. C., Capozzi, F., Amitrano, C., Giordano, S., Arena, C., & Spagnuolo, V. (2018). Performance of three cardoon cultivars in an industrial heavy metal-contaminated soil: Effects on morphology, cytology and photosynthesis. *Journal of Hazardous Materials, 351*, 131-137. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.02.044

Szopinski, M., Sitko, K., Gieron, Z., Rusinowski, S., Corso, M., Hermans, C., Verbruggen, N., & Malkowski, E. (2019). Toxic effects of Cd and Zn on the photosynthetic apparatus of the *Arabidopsis helleri* and *Arabidopsis arenosa* pseudo-metallophytes. *Frontiers in Plant Science, 10*, 748-760. https://doi.org/ 10.3389/fpls.2019.00748

Tian, D., Liu, A., & Xiang, Y. (2017). Effects of biochar on plant growth and cadmium uptake: Case studies on Asian Lotus (*Nelumbo nucifera*) and Chinese Sage (*Salvia miltiorrhiza*). *Intech Open*. https://doi.org/ 10.5772/intechopen.68251

Ullah, S., Khan, J., Hayat, K., & Abdelfattah Elateeq, A. (2020). Comparative study of growth, cadmium accumulation and tolerance of three chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Plants, 9*(3), 310. https://doi.org/

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

10.3390/plants9030310

Xin, J., Zhao, X. H., Tan, Q. L., Sun, X. C., Zhao, Y. Y., & Hu, C. X. (2019). Effects of cadmium exposure on the growth, photosynthesis, and antioxidant defense system in two radish *Raphanus sativus*, L. cultivars. *Photosynthetica*, *57*, 967-973. https://doi.org/10.32615/ps.2019.076

Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, *28*, e00570. https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

The effect of different charcoal levels on physiological traits of sage plant (*Salvia officinalis* L.) under cadmium stress

Mssome Mahdavi, Mohammad Moghaddam*, Faezeh Beheshti golezo

Department of Horticultural Sciences and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

Cadmium is one of the heavy metals that has a negative effect on the physiological and metabolic process of the plant. In order to study the effects of different charcoal levels on physiological traits of sage plant (*Salvia officinalis* L.) under cadmium stress**.** One factorial experiment on the basis of completely randomized design with four replications was designed. The experimental treatments included different levels of charcoal (0, 1 and 2% by weight) and cadmium (0, 30 and 60 mg/kg of soil). The results showed that cadmium cause to decrease photosynthetic pigments and relative water content and increased phenolic compounds, antioxidant activity, electrolyte leakage, soluble carbohydrate and cadmium content. On the other hand, charcoal application in different levels of cadmium cause to improve the studied traits as the treated plants with 2% w/w charcoal and 60 mg/kg soil cadmium showed the highest total phenol (186.87 mg/g FW), total flavonoids (88.32 mg/g FW) and antioxidant activity (80.46%). Also, application of 2% w/w charcoal at the highest cadmium stress level (60 mg/kg soil) cause to decrease by 58.82% cadmium compared with no charcoal usage at this cadmium level. The highest effect of charcoal on physiological traits was observed at the highest used concentration (2% w/w) and the plants under the severe cadmium stress. Therefore, correct application of charcoal organic matter is suggested as one of the suitable biological ways to decrease negative effects of cadmium stress in sage plant and other medicinal plants.

Keywords: Antioxidant activity, Enzyme, Medicinal plants, Total phenol

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.89]

Received: Jun. 02, 2025; Revised: Sep. 23, 2025; Accepted: Oct. 29, 2025; Published Online: May. 02, 2026
*Corresponding Author: m.moghadam@um.ac.ir

Copyright © 2025 Iranian Society of Plant Physiology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.