

Original article

The effect of different levels of acacia (*Robinia pseudoacacia*) biochar on growth, essential oil content and nutrient uptake of sage (*Salvia officinalis* L.) under cadmium stress**Masoumeh Mahdavi¹, Mohammad Moghaddam^{2*}** ¹. M.Sc Student, Department of Horticultural Sciences and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran². Professor: Department of Horticultural Sciences and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received 27 February 2025; Revised 21 April 2025; Accepted 23 April 2025

Extended abstract**Introduction**

Plant growth is one of the most complex and environmentally sensitive physiological processes in plants. (Al-Khayri et al., 2023). Heavy metals are among the major limiting factors for crop cultivation in many regions worldwide, particularly in arid and semi-arid areas such as Iran (Saini and Dhanial, 2020). Cadmium (Cd) is a non-essential and highly toxic environmental pollutant that causes serious environmental and agricultural problems. High doses of cadmium are carcinogenic to humans. (Bakhtiari et al., 2023). Biochar is widely used as a soil conditioner because it improves soil physicochemical properties and nutrient availability (Muhammad et al., 2020). *Salvia officinalis* L., a perennial herbaceous species in the Lamiaceae family, is well known for its valuable essential oil. Accordingly, this study was conducted to evaluate the effects of biochar on selected growth traits, essential oil content, and nutrient uptake in *Salvia officinalis* L. under cadmium stress.

Materials and methods

The experiment was conducted as a factorial study in a completely randomized design with four replications in the research greenhouse of the Department of Horticultural Sciences and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. The treatments consisted of three levels of biochar (0, 1, and 2% w/w) derived from acacia wood and three levels of cadmium stress (0, 30, and 60 mg kg⁻¹ soil). Plants were harvested at the flowering stage, and several traits were measured. The studied traits included growth characteristics, essential oil content, and nutrient elements including N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, B, and Cd.

Results and discussion

The results indicated that increasing cadmium stress significantly decreased plant height, stem diameter, the number of sub-branches and leaves, fresh and dry weights of aerial parts, and root length and volume. Cadmium stress also significantly reduced essential oil content. The interaction between biochar application and cadmium levels showed that applying 2% w/w biochar increased plant height, leaf area, fresh and dry weights of aerial parts, and root length under different cadmium levels. The highest plant height (22 cm), leaf area (709.84 cm²), fresh (36.63 g per plant) and dry (20.44 g per plant) weights of aerial parts, root length (30.75 cm), and essential oil content (0.8% v/w) were observed in plants treated with 2% (w/w) biochar in the absence of cadmium. Essential oil content increased in response to biochar application. Essential oil content was approximately 12.33% higher in plants treated with 2% (w/w) biochar than in untreated plants. Biochar application improved growth traits and

* Corresponding author: Mohammad Moghaddam; E-Mail: m.moghaddam@um.ac.ir

increased nutrient concentrations, with the maximum increases observed in plants treated with 2% (w/w) biochar.

Conclusion

Cadmium, as a toxic heavy metal, negatively affects plant growth. The results indicate that higher cadmium levels caused severe damage to plant growth, essential oil content, and nutrient uptake. The greatest cadmium-induced damage was observed at a soil concentration of 60 mg kg⁻¹. Biochar application also improved growth traits, essential oil content, and nutrient uptake, with the greatest improvements observed in plants treated with 2% (w/w) biochar. The greatest improvements in morphological traits, essential oil content, and nutrient concentrations were observed in plants treated with 2% (w/w) biochar under severe cadmium stress. Biochar application reduced the harmful effects of cadmium by decreasing its translocation from roots to aerial parts and enhancing nutrient absorption.

Keywords: Essential oil content, Heavy metal pollution, Nutrient elements, Soil amendment

تأثیر سطوح مختلف بیوچار اقاچیا (*Robinia pseudoacacia*) بر رشد، محتوای اسانس و جذب عناصر غذایی گیاه مریم گلی (*Salvia officinalis* L.) تحت تنش کادمیوم

معصومه مهدوی^۱، محمد مقدم^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
۲. استاد، گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده خاک خصوصیات رشدی عناصر سنگین مواد مؤثره	تنش فلزات سنگین یکی از عوامل محیطی محدودکننده رشد گیاهان است. بیوچار ماده آلی کربنی اصلاح‌کننده خاک است که می‌تواند دسترسی زیستی مواد آلاینده را کاهش دهد و به‌ویژه برای فلزات سنگین بسیار کارآمد است. این مطالعه با هدف بررسی اثر سطوح مختلف بیوچار حاصل از چوب اقاچیا (<i>Robinia pseudoacacia</i>) بر برخی خصوصیات رشدی، محتوای اسانس و جذب عناصر غذایی گیاه مریم‌گلی تحت تنش کادمیوم انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سطوح مختلف بیوچار (صفر، ۱ و ۲ درصد وزنی) و تنش کادمیوم در سه سطح صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود که به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تکرار در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گردید. نتایج حاصل از بر همکنش کاربرد بیوچار در سطوح مختلف کادمیوم نشان داد که کاربرد بیوچار در سطح ۲ درصد وزنی سبب افزایش ارتفاع گیاه، سطح برگ، وزن تر و خشک اندام هوایی و طول ریشه در سطوح مختلف کادمیوم گردید. بالا رفتن سطح کادمیوم سبب کاهش این صفات گردید به‌طوری که بیشترین ارتفاع گیاه (۲۲ سانتی‌متر)، سطح برگ (۷۰۹/۸۴ سانتی‌متر مربع)، وزن تر (۳۶/۶۳ گرم در بوته) و خشک (۲۰/۴۴ گرم در بوته) اندام هوایی، طول ریشه (۳۰/۷۵ سانتی‌متر) و محتوای اسانس (۰/۸ درصد حجمی/وزنی) در تیمار ۲ درصد وزنی بیوچار بدون کادمیوم مشاهده شد. استفاده از بیوچار با کاهش انتقال کادمیوم از ریشه به اندام‌های هوایی و بهبود جذب عناصر غذایی، اثرات مضر کادمیوم روی رشد را کاهش داد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳ تاریخ انتشار: پائیز ۱۴۰۵ ۴۹۵-۵۱۱ (۳)	

مقدمه

گوارش انسان جذب شده و در کلیه و کبد تجمع می‌یابد (Lindsay and Norvell, 1978). به خاطر سمیت کادمیوم برای موجودات پاکسازی محیط‌زیست از این فلز اهمیت بسزایی دارد (Saini and Dhania, 2020).

افزودن مواد آلی باعث تشکیل خاکدانه پایدار و افزایش گردش هوا مورد نیاز برای رشد گیاه و میکروارگانیسم‌ها می‌شود. مواد آلی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه برای افزایش رشد و بهبود خاک را به تدریج در اختیار گیاه قرار می‌دهد (Liu et al., 2016). بیوچار (اصلاح‌کننده)، ترکیب پایداری از ذغال تولید شده گیاهی است که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است که در شرایط کمبود یا عدم

فلزات سنگین از مهم‌ترین آلوده‌کننده‌های محیط زیست محسوب می‌شوند و کادمیوم از جمله مهم‌ترین فلزات سنگین موجود در خاک است که به علت سمیت بالا و حلالیت زیاد به‌عنوان آلاینده قوی شناخته شده است (Al-Khayri et al., 2023). ریشه گیاهان این عنصر را به آسانی جذب می‌کند و از جمله مشکلاتی که جذب کادمیوم در گیاهان منجر می‌شود می‌توان به کاهش رشد ریشه و ساقه، کاهش جذب آب و عناصر غذایی نام برد که سرانجام موجب مرگ گیاه می‌شود (Bakhtiari et al., 2023). منابع گوناگونی شامل صنایع، فاضلاب شهری و مواد سوختی باعث افزایش آلودگی کادمیوم می‌شوند. فلز کادمیوم به آسانی توسط دستگاه

مواد و روش‌ها

این مطالعه به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تکرار در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۴۰۰ اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل بیوپار تهیه شده از چوب اقاچیا در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ درصد وزنی) و کادمیوم در سه سطح (صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) بود (Mehdizadeh et al., 2021). برای تهیه بیوپار مورد نیاز، چوب‌های هم اندازه از درختان اقاچیا انتخاب و در کوره الکتریکی آزمایشگاه حرارتی دانشکده فنی مهندسی دانشگاه فردوسی با دمای ۵۳۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۴ ساعت در شرایط بدون اکسیژن قرار داده شدند (Rajkovich et al., 2011; Mehdizadeh et al., 2021). سپس بیوپار حاصل خرد و از الک ۲ میلی متر عبور داده شد. مخلوط خاک مورد استفاده شامل خاک زراعی، خاک برگ و ماسه به نسبت ۲:۱:۲ بود. مخلوط خاکی و بیوپار مورد استفاده در گلدان پیش از شروع آزمایش در آزمایشگاه خاک مورد آنالیز قرار گرفت و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد (جدول ۱). جهت اعمال تیمارهای آزمایش، ابتدا نمونه‌های خاک با مقادیر تعیین شده از نیترات کادمیم (صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) مخلوط شد. برای انجام این آزمایش، ابتدا مقادیر مورد نظر کادمیم در حجم مشخصی از آب مقطر حل و سپس به صورت یکنواخت به نمونه‌های خاک اسپری شد و سپس خاک به خوبی به هم زده شد تا یکنواختی کامل در خاک حاصل شود. در مرحله بعد خاک را درون کیسه‌های پلاستیکی قرار داده و رطوبت آن با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج در حد ۷۰ درصد ظرفیت زراعی به مدت یک ماه در دمای ۲۵-۲۳ درجه سانتی گراد نگه داشته شد تا فلز کادمیم در خاک به حالت شبه تعادل برسد. پس از گذشت یک ماه به نمونه‌های خاک مقادیر مختلف بیوپار مطابق طرح آزمایش اضافه گردید و به مدت ۲ هفته در شرایط قبلی قرار داده شد. پس از مخلوط کردن خاک با بیوپار و گذشت زمان ذکر شده، خاک روی پلاستیک در گلخانه به مدت دو هفته پخش شد تا خاک هوا خشک گردد و سپس در گلدان‌های کشت ریخته شد (Diaconu et al., 2012). پس از اعمال تیمار بیوپار و آماده‌سازی خاک، ابتدا بذره‌های مریم‌گلی تهیه شده از شرکت پاکان بذر اصفهان، لابه‌لای پارچه نخی و مرطوب خیس‌انده شد و سپس به ژرمیناتور با دمای ۴ درجه سانتی گراد به مدت دو هفته قرار

اکسیژن طی فرایند پیرولیز تولید می‌شود (Pariyar et al., 2020). بیوپار دارای بار منفی بر روی سطح خود است که در طول زمان این بار منفی افزایش می‌یابد. کربوکسیل، فنولیک هیدروکسیل و دیگر گروه‌های عاملی در بیوپار قادرند آلاینده‌های را در خاک کاهش دهند (Chen et al., 2011). بیوپار می‌تواند دسترسی زیستی آلاینده‌ها را کاهش دهد، مخصوصاً برای فلزات سنگین بسیار کارآمد است (Ng et al., 2022). افزون بر این، این ترکیب می‌تواند برای کاهش نگرانی کمبود غذا و تنوع کشت‌ها در خاک‌های فرسوده، مهم باشد. بیوپار فعالیت اکثر میکروارگانیسم‌های خاک را افزایش می‌دهد و از این طریق باعث حفظ، جذب و انتقال مواد غذایی خاک می‌گردد. بنابراین نیاز کودی خاکی که دارای بیوپار است کمتر از خاک فاقد بیوپار می‌باشد (Bashir et al., 2018). در پژوهش حاضر چوب اقاچیا به دلیل داشتن درصد بالای سلولز و میزان بالای ترکیبات لیگنینی برای تهیه بیوپار انتخاب شد.

جنس مریم‌گلی یکی از بزرگترین و مهم‌ترین جنس‌های معطر و دارویی خانواده نعنائیان (Lamiaceae) و شامل ۹۰۰ گونه است که در سراسر جهان گسترده است. مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) گیاهی چندساله و علفی و دارای ریشه راست است و منشأ آن نواحی شمالی مدیترانه و شمال آفریقا می‌باشد (Harizia et al., 2021). 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). پیکره رویشی مریم‌گلی سرشار از اسانس بوده که منجر به خاصیت میکروب‌کشی، ویروس‌کشی و ضدقارچی این گیاه شده است که از فعالیت‌های جهش‌زای سلول‌ها جلوگیری می‌کند (Cutillas et al., 2017).

تحقیق حاضر به منظور مطالعه تأثیر سطوح مختلف بیوپار اقاچیا بر خصوصیات رشدی، میزان اسانس و جذب عناصر پرمصرف و کم‌مصرف گیاه مریم‌گلی تحت تنش کادمیوم صورت گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند منجر به کاربرد صحیح ماده آلی بیوپار به عنوان یک راهکار مناسب زیستی برای کاهش تنش عنصر کادمیوم در گیاهان به‌ویژه مریم‌گلی گردد.

شد. کلیه اعمال زراعی از قبیل تنک کردن، آبیاری، حذف علفهای هرز و مبارزه با آفات در طول حدود چهار ماه و نیم دوره رشد گیاهان به صورت یکنواخت در همه گلدان‌ها انجام شد. اندازه‌گیری صفات مورد بررسی (صفات رشدی، میزان اسانس و غلظت عناصر غذایی) در مرحله گلدهی صورت گرفت.

داده شد. جهت تهیه بستر کشت، پرلیت و کوکوپیت خیسانده و سپس خانه‌های سینی نشاء با بستر تهیه شده پر گردید. در هر یک از این خانه‌ها دو عدد بذر سرمادهی شده قرار داده شد (Bakhtiari et al., 2023). نشاءها بعد از مرحله چهاربرگی به گلدان‌های (قطردهانه و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر) پر شده با خاک آلوده به کادمیوم و تیمار بیوچار انتقال داده

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و بیوچار مورد استفاده در این آزمایش

Table 1. Physico-chemical characteristics of the used soil and biochar in this experiment

Texture بافت	Organic carbon کربن آلی %	EC هدایت الکتریکی dS.m ⁻¹	pH اسیدیته	CEC ظرفیت تبادل کاتیونی meq.100 gr ⁻¹ soil	N نیتروژن mg.kg ⁻¹	P فسفر mg.kg ⁻¹	K پتاسیم mg.kg ⁻¹
Soil خاک	Sandy loamy	0.83	7.7	7.9	0.2	51	194
Biochar بیوچار		4.5	8.8	5.5	0.77	43	123

(2017). بعد از اتمام زمان اسانس‌گیری، میزان اسانس به‌دست‌آمده قرائت شد و در نهایت محتوای اسانس هر نمونه بر اساس درصد حجمی-وزنی محاسبه گردید.

اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی

جهت اندازه‌گیری نیتروژن، ۰/۳ گرم از بافت برگ را با ۱/۱ گرم از کاتالیزور (۱۰ گرم سولفات مس + ۱۰۰ گرم سولفات پتاسیم + ۱ گرم پودر سلیوم) و ۵ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک غلیظ مخلوط کرده و ۱/۵ تا ۲ ساعت آن را در کوره الکتریکی با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده تا عمل هضم صورت گیرد. بعد از این مدت و سرد شدن ماده هضم شده، آن را با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده و با استفاده از کج‌دال مقدار نیتروژن در ۲۰ میلی‌لیتر از محلول اندازه‌گیری شد (Lindsay and Norvell, 1978).

به‌منظور اندازه‌گیری فسفر گیاه، ۰/۳ گرم از بافت برگ را داخل کروزه چینی قرار داده و به مدت ۴ ساعت در کوره با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد گذاشته تا خاکستر گردد. سپس خاکستر گیاه را با ۱۰ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک یک نرمال داخل بشر ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و ۱۰ دقیقه روی هیتر با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس محتویات بشر را با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانیده و جهت اندازه‌گیری فسفر، ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره فوق را با آب مقطر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده و میزان جذب آن با دستگاه

خصوصیات رشدی

ارتفاع گیاه، قطر ساقه، تعداد شاخه فرعی، تعداد و سطح برگ، وزن تر و خشک اندام هوایی، طول و حجم ریشه، وزن تر و خشک ریشه به‌عنوان ویژگی‌های رشدی گیاهان اندازه‌گیری شدند. جهت اندازه‌گیری ارتفاع بوته و طول ریشه از خط کش و قطر ساقه از کولیس دیجیتال استفاده گردید. اندازه‌گیری سطح برگ در هر بوته با استفاده از دستگاه سطح برگ سنج (مدل USALI-3100c) انجام شد.

در پایان مرحله گلدهی، بوته‌ها به طور کامل از بستر کشت خارج کرده و وزن تر اندام‌های هوایی و ریشه‌ها (پس از شستشو) با استفاده از ترازو بادقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن خشک، اندام‌های برداشت شده به مدت یک هفته در سایه و دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) خشک و سپس وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری گردید (Dobrikova et al., 2021).

محتوای اسانس

اندازه‌گیری محتوای اسانس گیاه مریم‌گلی در مرحله گلدهی انجام شد. برای این منظور، سرشاخه‌های گل‌دار برداشت شده در سایه خشک گردید و اسانس‌گیری در ۲۵ گرم نمونه گیاهی خشک شده حاصل از دو گلدان در هر تکرار همراه با ۶۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به روش تقطیر با آب توسط دستگاه کلونجر به مدت ۳ ساعت انجام گرفت (Cutillas et al.,

نتایج و بحث

ارتفاع گیاه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل تیمارهای مورد بررسی بر ارتفاع گیاه مریم‌گلی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین اثر بیوچار بر بهبود ارتفاع گیاه تحت تنش شدید کادمیوم (۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، در گیاهان تیمار شده با بالاترین غلظت بیوچار (۲ درصد وزنی) مشاهده گردید (جدول ۳).

اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۶۰ نانومتر قرائت شد (Emami, 1996).

تعیین غلظت فرم معدنی سایر عناصر شامل پتاسیم، منیزیم، کلسیم، آهن، منگنز، مس، بور، روی و کادمیوم در برگ گیاه مریم‌گلی با دستگاه ICP-OES ساخت کشور آلمان مستقر در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد (Dobrikova et al., 2021).

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده نرم‌افزار آماری SPSS انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت.

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر بیوچار بر خصوصیات رشدی گیاه مریم‌گلی تحت سطوح مختلف تنش کادمیوم

Table 2. Analysis of variance (Mean squares) of the effect of biochar on growth characteristics of *S. officinalis* under different levels of cadmium stress

S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع گیاه Plant height	قطر ساقه Stem diameter	شاخه فرعی Number of branches	تعداد برگ Number of leaves	سطح برگ Leaf area	وزن تازه اندام هوایی
							Fresh weight of aerial parts
Biochar (B)	2	58.737**	26.805**	38.083**	80.111 ^{ns}	54192.73**	148.812**
Cadmium stress (C)	2	5.922**	2.023**	9.25**	473.361 ^{ns}	17840.75**	50.181**
Biochar × تنش کادمیوم B × C	4	1.563*	0.036 ^{ns}	0.583 ^{ns}	305.111 ^{ns}	1178.226*	0.794*
Error	27	0.550	0.078	0.778	284.676	423.286	0.321
ضریب تغییرات	-	2.35	1.65	3.77	2.09	4.81	5.01
CV %							

Table 2. Continued

S.O.V	درجه آزادی df	وزن تازه اندام هوایی Fresh weight of aerial parts	وزن خشک اندام هوایی Dry weight of aerial parts	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه
							Root dry weight
Biochar (B)	2	148.812**	312.226**	576.333**	2008.333**	59.379**	14.845**
Cadmium stress (C)	2	50.181**	53.42**	45.187**	700.00**	120.164**	30.041**
Biochar × تنش کادمیوم B × C	4	0.794*	1.855**	3.521**	33.333 ^{ns}	1.866 ^{ns}	0.467 ^{ns}
Error	27	0.321	0.359	0.847	40.741	1.085	0.271
ضریب تغییرات	-	5.01	2.11	2.90	3.64	1.74	5.09
CV %							

ns, * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد
ns, * and ** indicate no significant difference, significant difference at 5% and 1% probability level, respectively

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار و کادمیوم بر برخی صفات رشدی مریم‌گلی تحت سطوح مختلف تنش کادمیوم

Table 3. Mean comparison of the interaction effect of biochar and cadmium on some growth characteristics of *S. officinalis* under different levels of cadmium stress

بیوچار	تنش کادمیوم	ارتفاع گیاه	سطح برگ	وزن خشک اندام هوایی	وزن تازه اندام هوایی	طول ریشه
Biochar	Cadmium stress	Plant height	Leaf area	Dry weight of aerial parts	Fresh weight of aerial parts	Root length
% w/w	mg.kg ⁻¹ soil	cm	cm ²	g.plant ⁻¹		cm
0	0	20.75 ^b	652.04 ^b	15.45 ^c	32.34 ^b	28.5 ^b
	30	18.75 ^c	581.91 ^e	11.66 ^e	26.93 ^e	21.25 ^e
	60	15.46 ^e	492.38 ^g	9.14 ^f	21.94 ^f	14.12 ^h
1	0	21 ^{ab}	667.94 ^b	18.05 ^b	32.63 ^b	30.25 ^a
	30	18.75 ^c	619.9 ^{cd}	12.99 ^d	28.87 ^d	23 ^d
	60	16.87 ^e	530.46 ^f	11.06 ^e	22.71 ^f	15.8 ^g
2	0	22 ^a	709.84 ^a	20.44 ^a	36.63 ^a	30.75 ^a
	30	19 ^c	642.15 ^{bc}	14.95 ^c	30.39 ^c	26.75 ^c
	60	18.15 ^c	604.17 ^{de}	13.14 ^d	26.34 ^e	18 ^f

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

Different letters in each column for each factor represent a significant difference at the 5% probability level according to Duncan test

جدول ۴. اثر ساده بیوچار و کادمیوم بر برخی صفات رشدی مریم‌گلی

Table 4. The main effect of biochar and cadmium on some growth characteristics of *S. officinalis*

تعداد شاخه فرعی در						
تیمار	غلظت	قطر ساقه	هر بوته	حجم ریشه	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه
Treatment	Concentration	Stem diameter	Number of branches per plant	Root volume	Root fresh weight	Root dry weight
		mm		cm ³	gr.plant ⁻¹	
بیوچار Biochar (%w/w)	0	5.45 ^c	5.75 ^c	36.66 ^b	16.63 ^c	7.23 ^c
	1	5.85 ^b	6.75 ^b	41.66 ^b	18.69 ^b	8.26 ^b
	2	6.28 ^a	7.50 ^a	51.66 ^a	22.85 ^a	10.34 ^a
کادمیوم Cadmium (mg kg ⁻¹ soil)	0	7.48 ^a	8.08 ^a	55.83 ^a	21.57 ^a	9.70 ^a
	30	5.56 ^b	7.25 ^b	44.16 ^b	19.47 ^b	8.65 ^b
	60	4.53 ^c	4.66 ^c	30.00 ^c	17.13 ^c	7.48 ^c

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

Different letters in each column for each factor represent a significant difference at the 5% probability level according to Duncan test.

قطر ساقه

بیوچار در غلظت ۲ درصد وزنی-وزنی مشاهده گردید که ۱۵/۰۳ درصد بیشتر از گیاهان تیمار نشده بود (جدول ۴).

تعداد شاخه فرعی

اثر متقابل تیمارها بر تعداد شاخه فرعی معنی‌دار نشد؛ ولی اثر ساده تیمارها در سطح احتمال یک درصد بر این صفت معنی‌دار شد (جدول ۲). تنش کادمیوم با کاهش معنی‌داری در تعداد شاخه فرعی همراه بود؛ به‌طوری‌که تعداد شاخه فرعی از ۸ به ۵ عدد در هر گیاه کاهش یافت (جدول ۴). با افزایش غلظت بیوچار تعداد شاخه فرعی نیز روند افزایشی

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل بیوچار و کادمیوم بر قطر ساقه مریم‌گلی معنی‌دار نشد؛ ولی اثر ساده تیمارها در سطح احتمال یک درصد بر این صفت معنی‌دار شد (جدول ۲). تنش کادمیوم موجب کاهش معنی‌دار قطر ساقه گردید و کمترین قطر ساقه (۴/۵۳ میلی‌متر) در غلظت ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد (جدول ۴).

استفاده از بیوچار موجب افزایش قطر ساقه گیاهان تیمار شده گردید و بیشترین قطر ساقه در گیاهان تیمار شده با

رشد ریشه

اثر تیمارهای مورد مطالعه بر رشد ریشه گیاه مریم‌گلی از نظر طول، حجم، وزن تر و خشک ریشه مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج تجزیه آماری داده‌ها، اثر متقابل کادمیوم و بیوچار تنها بر طول ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد؛ ولی بر حجم، وزن تر و خشک ریشه معنی‌دار نشد. اثرات ساده بیوچار و کادمیوم در سطح احتمال یک درصد بر صفات حجم و وزن تر و خشک ریشه معنی‌دار شد (جدول ۲). افزودن بیوچار به محیط رشد گیاه مریم‌گلی طول ریشه را در شرایط بدون تنش و تنش شدید کادمیوم به ترتیب ۷/۹۰ و ۲۷/۴۳ درصد افزایش داد (جدول ۳). استفاده از بیوچار در محیط کشت نیز سبب افزایش حجم، وزن تر و خشک ریشه شد که این افزایش در تیمار ۲ درصد وزنی بیوچار به ترتیب ۴۰/۹۱، ۳۷/۳۴ و ۴۲/۹۱ درصد بود (جدول ۴).

محتوای اسانس

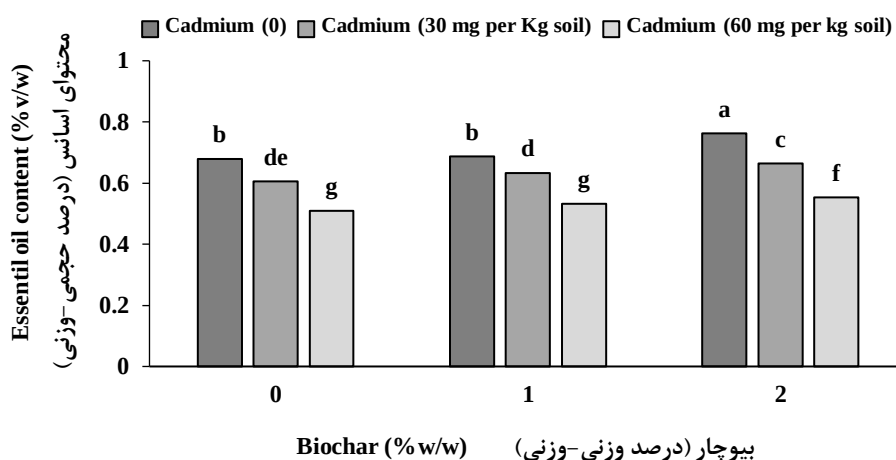
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل بیوچار و کادمیوم بر محتوای اسانس گیاه مریم‌گلی معنی‌دار شد (جدول ۲). محتوای اسانس مریم‌گلی در هر دو شرایط بدون تنش و سطوح مختلف تنش کادمیوم در واکنش به تیمار بیوچار افزایش معنی‌داری نشان داد و بیشترین افزایش در گیاهان رشد یافته در شرایط بدون تنش مشاهده شد. میزان اسانس در گیاهان تیمار شده با غلظت ۲ درصد وزنی بیوچار ۱۲/۳۳ درصد بیشتر از گیاهان تیمار نشده بود (شکل ۱).

نشان داد. در گیاهان تیمار شده با ۲ درصد وزنی بیوچار، تعداد شاخه از ۵/۷۵ به ۷/۵ شاخه افزایش یافت (جدول ۴).

اثر متقابل تنش کادمیوم و بیوچار بر سطح برگ مریم‌گلی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). تعداد برگ در گیاه مریم‌گلی تحت تأثیر تیمارها قرار نگرفت و معنی‌دار نشد (جدول ۲). بررسی اثر متقابل تنش کادمیوم و بیوچار بر سطح برگ بیانگر کاهش معنی‌دار سطح برگ در واکنش به تیمار فلز سنگین کادمیوم می‌باشد و در مقابل بیوچار به‌ویژه در بالاترین غلظت موجب افزایش سطح برگ در گیاهان رشد یافته در شرایط بدون تنش و سطوح مختلف تنش کادمیوم گردید (جدول ۳). بیشترین افزایش سطح برگ در شرایط بدون تنش کادمیوم و کاربرد ۲ درصد وزنی بیوچار مشاهده شد که سطح برگ را ۲۲/۷۰ درصد نسبت به گیاهان همان سطح تنش و بدون کاربرد بیوچار افزایش داد (جدول ۳).

وزن تر و خشک اندام هوایی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر متقابل بیوچار و کادمیوم بر وزن تر و خشک اندام‌های هوایی گیاه مریم‌گلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). در شرایط تنش کادمیوم، تیمار بیوچار در هر دو غلظت به‌ویژه غلظت ۲ درصد وزنی موجب کاهش ۱۳/۵۹ و ۲۵/۸۴ درصدی اثر منفی تنش به ترتیب بر وزن تر و خشک اندام هوایی گیاه مریم‌گلی گردید (جدول ۳).



شکل ۱. اثر بیوچار بر محتوای اسانس گیاه مریم‌گلی تحت سطوح مختلف تنش کادمیوم

Fig. 1. The effect of biochar on essential oil content of *S. officinalis* under different levels of cadmium stress

عناصر غذایی

عناصر پرمصرف

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که مقدار عناصر پرمصرف (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، کلسیم) در برگ گیاه مریم‌گلی به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمار بیوچار و کادمیوم قرار گرفت. به‌طوری که اثر متقابل بیوچار و کادمیوم

بر مقدار عناصر مورد مطالعه معنی‌دار شد (جدول ۵). اعمال تنش کادمیوم موجب کاهش معنی‌دار مقدار عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم و کلسیم شد و تنش شدید کادمیوم (۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) موجب کاهش ۳۲/۲۷، ۲۴/۹۶، ۱۷/۳۶، ۲۴/۸۷ و ۲۰/۰۷ درصدی به ترتیب در عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم و کلسیم مریم‌گلی در مقایسه با شرایط بدون تنش گردید (جدول ۶).

جدول ۵. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر بیوچار بر غلظت عناصر غذایی گیاه مریم‌گلی تحت سطوح مختلف تنش کادمیوم

Table 5. Analysis of variance (mean squares) of the effect of biochar on the concentration of nutritional elements of *S. officinalis* under different levels of cadmium stress

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Df	نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	منیزیم Mg	کلسیم Ca
بیوچار Biochar (B)	2	0.200**	58.723**	1680.995**	187.174**	1414.804**
تنش کادمیوم Cadmium stress (C)	2	0.035**	8.888**	423.344**	65.637**	156.729**
بیوچار × تنش کادمیوم B × C	4	0.002**	0.428**	137.955**	1.363*	1.8*
خطا Error	27	0.0001	0.038	1.005	0.406	0.555
ضریب تغییرات CV %	-	1.32	2.45	1.97	3.09	4.20

Table 5. Continued

جدول ۵. ادامه

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	آهن Fe	منگنز Mn	مس Cu	روی Zn	بر B	کادمیوم Cd
بیوچار Biochar (B)	2	3.308**	0.003**	0.131**	0.031**	0.021**	0.00006**
تنش کادمیوم Cadmium stress (C)	2	0.383**	0.0001 ^{ns}	0.077**	0.009**	0.009**	0.00002**
بیوچار × تنش کادمیوم B × C	4	0.143**	0.001**	0.004**	0.0002 ^{ns}	0.001**	0.00004**
خطا Error	27	0.003	0.00005	0.001	0.0002	0.00005	0.000004
ضریب تغییرات CV %	-	1.47	2.63	2.17	1.66	1.09	2.13

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

ns, * and ** indicate no significant difference, significant difference at 5% and 1% level, respectively.

(۱۱۰/۵۳۰ میلی‌گرم در لیتر)، منیزیم (۳۵/۱۰۶ میلی‌گرم در لیتر) و کلسیم (۱۰۷/۰۲۰ میلی‌گرم در لیتر) در گیاهان تیمار شده با ۲ درصد وزنی بیوچار و رشد یافته در شرایط بدون تنش گزارش گردید. در شرایط تنش ملایم کادمیوم (۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) میزان افزایش عناصر نیتروژن،

در همه سطوح تنش استفاده از بیوچار موجب افزایش مقدار عناصر غذایی مورد مطالعه گردید و بیشترین افزایش در گیاهان تیمار شده با غلظت ۲ درصد وزنی بیوچار به‌دست آمد. براساس نتایج به‌دست آمده بیشترین مقدار نیتروژن (۰/۹۴۱ درصد)، فسفر (۱۹/۸۰۲ میلی‌گرم در لیتر)، پتاسیم

فسفر، پتاسیم، منیزیم و کلسیم در واکنش به تیمار ۲ درصد وزنی بیوچار به ترتیب ۱۰/۱۱، ۱۶/۴۳، ۶/۳۴، ۱۳/۷۵ و ۷/۰۷ درصد بود و این افزایش در گیاهان رشد یافته در محیط دارای

۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک به ترتیب ۲۶/۷۰، ۱۹/۶۲، ۱۱/۳۸، ۲۴/۱۱ و ۹/۵۱ درصد بود (جدول ۶).

جدول ۶. اثر بیوچار بر غلظت عناصر غذایی گیاه مریم‌گلی تحت سطوح مختلف تنش کادمیوم

Table 6. The effect of biochar on the concentration of nutrients elements of *S. officinalis* L under different levels of cadmium stress

بیوچار Biochar	کادمیوم Cadmium	نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	منیزیم Mg	کلسیم Ca
% w/w	mg.kg ⁻¹ soil	%	mg.kg ⁻¹ dry leaf			
0	0	0.846 ^c	16.484 ^c	85.285 ^c	30.719 ^d	98.830 ^c
	30	0.752 ^f	499.14 ^e	500.80 ^e	341.29 ^e	322.82 ^g
	60	0.573 ⁱ	370.12 ^g	480.70 ^h	079.23 ^g	997.78 ^h
1	0	0.915 ^b	18.131 ^b	96.652 ^b	33.800 ^b	101.730 ^b
	30	0.789 ^e	15.211 ^d	82.033 ^d	31.965 ^c	84.471 ^f
	60	0.632 ^h	13.116 ^f	74.920 ^g	25.359 ^f	82.520 ^g
2	0	0.941 ^a	19.802 ^a	110.530 ^a	35.106 ^a	107.020 ^a
	30	0.828 ^d	16.881 ^c	85.603 ^c	33.375 ^b	88.146 ^d
	60	0.726 ^g	14.786 ^d	78.489 ^f	28.644 ^e	86.513 ^e

Table 6. Continued

جدول ۶. ادامه

بیوچار Biochar	کادمیوم Cadmium	آهن Fe	منگنز Mn	مس Cu	بر B	کادمیوم Cd
% w/w	mg.kg ⁻¹ soil	mg.kg ⁻¹ dry leaf				
0	0	1.748 ^g	0.403 ^d	1.728 ^d	0.416 ^b	0.0012 ^e
	30	2.695 ^c	0.425 ^c	1.683 ^e	0.375 ^d	0.0057 ^b
	60	3.157 ^a	0.466 ^a	1.519 ^g	0.304 ^f	0.0075 ^a
1	0	1.818 ^g	0.418 ^c	1.833 ^b	0.421 ^b	0.0006 ^e
	30	2.390 ^e	0.417 ^c	1.699 ^{de}	0.391 ^c	0.0034 ^c
	60	2.809 ^b	0.446 ^b	1.643 ^f	0.344 ^e	0.0050 ^b
2	0	1.822 ^g	0.426 ^c	1.926 ^a	0.449 ^a	0.0004 ^e
	30	2.149 ^f	0.419 ^c	1.786 ^c	0.422 ^b	0.0021 ^d
	60	2.557 ^d	0.429 ^c	1.697 ^{de}	0.386 ^c	0.0030 ^c

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

Different letters in each column for each factor represent a significant difference at the five percent probability level according to Duncan test.

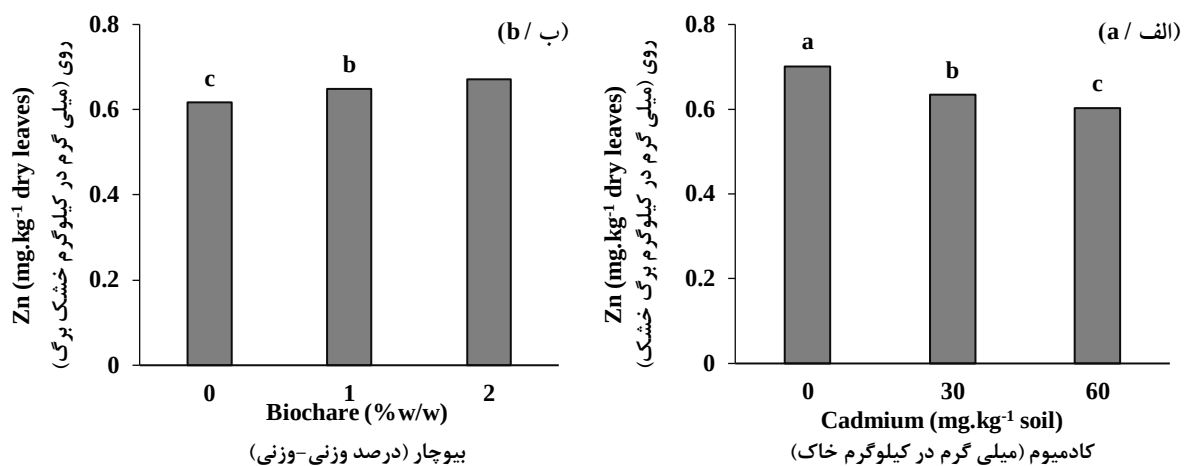
عناصر کم‌مصرف

تیمار بیوچار موجب افزایش مقدار آهن و منگنز در شرایط بدون تنش گردید، درحالی‌که در گیاهان تحت تنش، بیوچار موجب کاهش مقدار عناصر آهن و منگنز شد. اگر چه مقدار عنصر کادمیوم تحت تنش افزایش یافت؛ ولی استفاده از بیوچار موجب کاهش معنی‌دار کادمیوم در شرایط بدون تنش و سطوح مختلف تنش گردید. کمترین مقدار کادمیوم (۰/۰۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار دو درصد وزنی بیوچار و بدون تنش حاصل گردید. تحت شرایط تنش شدید (۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) میزان کاهش عنصر کادمیوم در تیمار بیوچار ۶۰ درصد بود (جدول ۶). مقدار عناصر مس و بور در واکنش به تیمار بیوچار در هر دو شرایط

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر متقابل بیوچار و کادمیوم بر مقدار عناصر کم‌مصرف اندازه‌گیری شده در برگ گیاه مریم‌گلی شامل آهن، منگنز، مس، بور به جز عنصر روی و همچنین کادمیوم معنی‌دار بود (جدول ۵). تحت تنش کادمیوم، مقدار عناصر آهن، منگنز و کادمیوم افزایش معنی‌داری داشتند و بیشترین مقدار آهن، منگنز و کادمیوم در گیاهان رشد یافته در غلظت ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک حاصل شد (جدول ۶). در مقابل، تنش کادمیوم اثر منفی بر مقدار عناصر مس و بور داشت و تحت تنش شدید کادمیوم کمترین مقدار این عناصر ثبت گردید (جدول ۶).

تنش کادمیوم کاهش معنی‌دار داشت (شکل ۲-الف) ولی در واکنش به تیمار بیوچار (شکل ۲-ب) مقدار عنصر روی افزایش یافت و این افزایش در گیاهان تیمار شده با غلظت دو درصد وزنی بیوچار ۸/۹۲ درصد بود.

بدون تنش و تنش کادمیوم به‌طور معنی‌داری افزایش یافتند. تیمار بیوچار در غلظت ۲ درصد وزنی مقدار عنصر مس را در شرایط بدون تنش و تنش کادمیوم به‌ترتیب ۱۱/۴۶ و ۱۱/۷۲ درصد افزایش داد و این افزایش در مقدار عنصر بور به‌ترتیب ۷/۳۵ و ۲۶/۹۷ درصد بود (جدول ۶). مقدار عنصر روی تحت



شکل ۲. اثر ساده کادمیوم (الف) و بیوچار (ب) بر مقدار روی برگ گیاه مریم‌گلی

Fig. 2. The main effect of biochar (a) and cadmium (b) on Zn content of *S. officinalis* leaves

کادمیوم ناشی از کاهش تقسیم و گسترش سلولی می‌باشد که به دلیل تأثیر منفی کادمیوم بر فعالیت هورمون سیتوکینین است (Ekinici et al., 2023). این هورمون مهم‌ترین هورمون تنظیم‌کننده تقسیم سلولی است (Yasin et al., 2022). از طرف دیگر گزارش شده است که فلز کادمیوم، پمپ‌های پروتون در غشاءهای سلولی را به‌طور برگشت‌ناپذیری مهار می‌کند. این پمپ‌ها نقش کلیدی در طویل شدن سلول‌ها دارد (Farooq et al., 2020). همچنین کادمیوم در سلول‌های گیاهی می‌تواند دیواره سلولی و به‌خصوص دیواره میانی را که در طویل شدن سلول نقش دارد، تحت تأثیر قرار دهد (Fang et al., 2017).

بعد از قرار گرفتن گیاه در غلظت‌های بالای کادمیوم، تغییرات پیچیده‌ای در سطح بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مولکولی رخ می‌دهد که این تغییرات به‌صورت زرد شدن برگ‌ها، کوتاه شدن ارتفاع گیاه، کاهش سطح برگ، کاهش رشد ریشه، تغییرات روزه‌ها، و در نهایت کاهش رشد عمومی گیاه بروز پیدا می‌کند (Xin et al., 2019; Mehdi-zadeh et al., 2021). کاهش در سطح برگ به‌دلیل اثر کادمیوم بر ممانعت از گسترش سطح برگ و اثر محرکی آن بر پیری برگ

بحث

خصوصیات رشدی

در پژوهش حاضر تنش کادمیوم موجب کاهش ارتفاع گیاه، قطر ساقه، تعداد شاخه فرعی، سطح برگ، وزن تر و خشک اندام‌های هوایی به‌ویژه در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک شد. وجود فلزات سنگین در خاک سبب ایجاد اختلال در چرخه حیات گیاه و فعال شدن برخی از واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی می‌گردند که به‌صورت تغییر در رشد و صفات مرفولوژیکی بروز پیدا می‌کنند.

رشد یکی از حساس‌ترین فرآیندهای گیاهی است، بنابراین کاهش رشد اولین واکنش گیاهان نسبت به شرایط نامطلوب محیطی در بسیاری از گونه‌های گیاهی می‌باشد. تنش کادمیوم به‌عنوان یک عامل نامساعد محیطی در گیاهانی نظیر همیشه بهار (Farooq et al., 2020; Rogowska et al., 2022)، سیب زمینی (Hassan et al., 2016)، کاهو (Monteiro et al., 2009)، سورگوم (Jawad Hassan et al., 2020) و خردل (Chen et al., 2011) باعث کاهش رشد و زیست‌توده آنها شد. رشد گیاهان به‌شدت به محیط وابسته است و کاهش صفات رشدی گیاه در واکنش به تنش

بیوچار، گونه گیاهی و مرحله رشد در زمان تیمار متفاوت است (Liu et al., 2016; Muhammad et al., 2020).

محتوای اسانس

در شرایط نامساعد محیطی، تخصیص منابع کربن برای متابولیسم ثانویه بیشتر از متابولیسم اولیه گیاه است که در این تغییرات به صورت کاهش زیست‌توده گیاهی و افزایش محتوای اسانس تظاهر پیدا می‌کند. ترپنوئیدها به عنوان ترکیبات اصلی اسانس دارای خواص آنتی‌اکسیدانی و مهار رادیکال‌های آزاد هستند، بنابراین افزایش تجمع اسانس یک مکانیسم دفاعی برای اطمینان از بقای گیاه در شرایط نامساعد محیطی است (Ghassemi-Golezani and Rahimzadeh, 2022). با این حال، در پژوهش حاضر اعمال تنش کادمیوم، میزان اسانس را کاهش داد که احتمالاً به دلیل آسیب‌های ناشی از تنش بر برگ‌های جوان است که دارای ظرفیت بیوژنتیکی بالایی برای بیوسنتز اسانس هستند (Al-Khayri et al., 2023). بر اساس نتایج حاصل در این پژوهش، بیوچار تولید اسانس گیاه مریم‌گلی را از طریق افزایش رشد و بیوماس اندام‌های هوایی بهبود بخشید. افزایش میزان اسانس گیاهان به دلیل تیمار بیوچار را می‌توان به افزایش جذب مواد مغذی، فتوسنتز، غدد ترشحی و همچنین بیوسنتز مونوترپن‌ها نسبت داد (Mehdizadeh et al., 2021). تأثیر مثبت بیوچار بر تولید اسانس نیز ممکن است در ارتباط با بهبود سطح هورمون‌های درگیر در مسیرهای بیوسنتز ترپنوئیدها مانند اکسین‌ها و جیبرلین‌ها باشد (Rogowska et al., 2022).

عناصر غذایی

بررسی نتایج به‌دست آمده از این مطالعه نشان داده است که افزایش شدت تنش کادمیوم موجب کاهش قابل توجه در مقدار عناصر ضروری شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم و کلسیم در برگ‌های گیاه مریم‌گلی شده است. کاهش مقدار عناصر غذایی تحت تنش کادمیوم در گونه‌های مختلف مریم‌گلی (Dobrikova et al., 2021; Dobrikova et al., 2022; Bakhtiari et al., 2023) گزارش شده است. به نظر می‌رسد فلزات سنگین مانند کادمیوم با جذب عناصر غذایی توسط ناقلین غشاء رقابت می‌کند، بنابراین موجب کمبود این عناصر ضروری در گیاه شده و سبب کاهش رشد گیاه می‌گردد (Soleimani et al., 2020). تحقیقات متعدد نشان داده

می‌باشد. بنابراین کاهش زیست‌توده گیاه، پیامد مستقیم مسمومیت ناشی از کادمیوم است که به واسطه اختلال در جذب عناصر غذایی، سنتز کلروفیل (Shirkhani et al., 2020) و کاهش میزان فتوسنتز (Shahid et al., 2017) رخ می‌دهد.

یکی از بارزترین علامت سمیت کادمیوم، کاهش رشد طولی ریشه است که اصلی‌ترین اثر بازدارندگی کادمیوم بر رشد گیاهان محسوب می‌شود. از آنجائی که ریشه‌ها اولین قسمتی از گیاه هستند که در معرض آلودگی فلز سنگین کادمیوم قرار می‌گیرند، بنابراین رشد ریشه شدیداً تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد (Soleimani et al., 2020). در پژوهش حاضر نیز کاهش رشد ریشه گیاه مریم‌گلی از نظر طول، حجم، وزن تر و خشک ریشه با افزایش شدت تنش کادمیوم به‌طور معنی‌داری افزایش داشت. کاهش معنی‌دار رشد ریشه در واکنش به تنش ناشی از کادمیوم توسط ال-خیری و همکاران (Al-Khayri et al., 2023) نیز در مطالعه خود بر روی گیاهان دارویی گزارش شده است. کاهش رشد ریشه به دلیل تجمع مقادیر بالای کادمیوم در ریشه‌ها می‌باشد که از تقسیم سلولی در منطقه مریستمی ریشه و رشد سلول‌ها جلوگیری می‌کند (Tian et al., 2017). از طرف دیگر کادمیوم منجر به تمایز زودرس و چوبی شدن دیواره سلولی شده و مانع از رشد طولی سلول‌ها می‌گردد (Soleimani et al., 2020).

بررسی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از بیوچار به میزان ۲ درصد وزنی می‌تواند به‌طور معنی‌داری رشد گیاه مریم‌گلی را تحت تنش کادمیوم بهبود بخشد. مقایسه نتایج به‌دست آمده بیانگر کارایی بیشتر بیوچار در تعدیل اثرات منفی غلظت کادمیوم بر رشد مریم‌گلی می‌باشد. اثر اصلاح کنندگی بیوچار در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین پیشتر توسط لیو و همکاران (Liu et al., 2016)، بشیر و همکاران (Bashir et al., 2018) و تیان و همکاران (Tian et al., 2017) گزارش شده است. بهبود رشد گیاهان با استفاده از بیوچار در نتیجه کاهش انتقال کادمیوم به اندام‌های هوایی و افزایش جذب کاتیون‌های ضروری، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان فتوسنتز می‌باشد. همچنین افزایش رشد گیاه در واکنش به بیوچار می‌تواند با تغییر در تعادل هورمونی گیاه و افزایش سطح ایندول استیک اسید و سیتوکینین مرتبط باشد (Bashir et al., 2018). با این وجود، واکنش‌های رشدی گیاهان به کاربرد بیوچار به توجه به غلظت

تحت تنش کادمیوم دستجات آوندی کمتر و با قطر کوچکتري تولید می‌شوند که این شرایط میزان جذب و تجمع عناصر کم مصرف را در گیاهان تحت تأثیر قرار می‌دهد (Monteiro et al., 2009). در پژوهش حاضر با افزایش شدت تنش کادمیوم، غلظت عناصر کم مصرف شامل آهن، منگنز و کادمیوم افزایش قابل توجهی داشته‌اند در حالی که غلظت مس، بور کاهش معنی‌داری داشتند.

آهن و منگنز از دیگر عناصر مهم درگیر در واکنش‌های اکسایش-احیا می‌باشند، به نظر می‌رسد افزایش مقدار این عناصر در رابطه با افزایش فعالیت سیستم دفاعی گیاه جهت مقابله با تنش اکسیداتیو و حفظ رشد و عملکرد گیاه در این شرایط باشد (Marschner, 2011). اثر کادمیوم بر غلظت آهن و منگنز بخش هوایی بسته به نوع رقم متفاوت می‌باشد، به‌طوری که غلظت آهن بخش هوایی در برخی رقم‌ها کاهش و در برخی رقم‌ها افزایش یافته و در برخی رقم‌ها تغییر معنی‌داری نداشته است (Monteiro et al., 2009). افزایش جذب آهن و منگنز توسط ریشه و انتقال آن به بخش هوایی می‌تواند از مکانیسم‌های دفاعی گیاه جهت مقابله با آثار منفی تجمع کادمیوم باشد. غلظت کادمیوم در گیاه وابسته به غلظت کادمیوم و مدت زمان تیمار می‌باشد که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. در پژوهش حاضر مقدار کادمیوم اندازه‌گیری شده در برگ گیاه مریم‌گلی با افزایش غلظت کادمیوم خاک روند صعودی داشت. کادمیوم اگرچه برای گیاهان ضروری نمی‌باشد، اما به راحتی از طریق پوست ریشه جذب شده و از مسیر سیم‌پلاستی و آپوپلاستی وارد بافت‌های گیاهی می‌گردد (Bakhtiari et al., 2023). عناصر روی، مس و بور از عناصر ضروری کم مصرف برای گیاهان است که روی و مس به‌صورت کاتیون دو ظرفیتی و بور به‌صورت کاتیون سه ظرفیتی جذب می‌شود. این عناصر عامل اساسی در سنتز پروتئین‌ها، DNA و RNA است. اگرچه نیاز گیاهان به این عناصر اندک است، اما اگر مقدار کافی از این عنصر در دسترس نباشد، گیاهان از تنش‌های فیزیولوژیکی ناشی از ناکارایی سیستم‌های متعدد آنزیمی و مکانیسم‌های متابولیکی مرتبط آسیب خواهند دید (Marschner, 2011). کادمیوم با محدود کردن جذب یا انتقال روی، مس و بور به داخل گیاه، مقدار این عناصر را کاهش دهد (Dubey et al., 2018). بیوجار می‌تواند منبع تغذیه مستقیم برای گیاه باشد و بسیاری از عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم را برای گیاه فراهم کند و سبب افزایش غلظت این عناصر در گیاه شود

است که کادمیوم نقش مهمی در جابجایی مواد غذایی از ریشه به اندام‌های گیاهی دارد و مانع انتقال شعاعی عناصر و بارگیری آن‌ها در آوندهای چوبی می‌گردد (Rogowska et al., 2022). کاهش نیتروژن در سطوح بالای کادمیوم می‌تواند به علت کاهش تراوایی ریشه گیاه، کاهش فعالیت میکروبی خاک، کاهش جذب نیترات و کاهش فعالیت نیتراتی شدن در خاک باشد. کاهش نیتروژن در برگ گیاهان تحت تنش کادمیومی، ممکن است ناشی از کاهش متابولیسم نیتروژن در اثر کاهش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز برگ و کاهش مصرف آب به دلیل کاهش جذب توسط گیاه باشد (Pandey et al., 2019). از طرف دیگر انباشته شدن فلزات سنگین از جمله کادمیوم در محیط ریشه از طریق کاهش جذب آب و مواد غذایی و برهم خوردن تعادل آب و عناصر غذایی، منجر به کمبود نیتروژن و فسفر و در نتیجه تسریع پیری و کاهش رشد می‌شود (Shanying et al., 2017). از آنجایی که کادمیوم دو ظرفیتی است با منیزیم در هنگام جذب از ریشه رقابت می‌کند. این امر به کاهش سایر عناصر ضروری دو ظرفیتی دیگر مانند کلسیم هم منجر می‌شود که اثرات سمیت ناشی از کادمیوم را تشدید می‌کند (Marschner, 2011). کادمیوم با ورود به فضای آپوپلاستی و جایگزینی با کلسیم، غشای سلول را غیرقطبی کرده و جذب انتخابی یون‌ها را نیز کاهش می‌دهد، بنابراین جذب کلسیم و انتقال آن به اندام‌های هوایی کاهش می‌یابد (Ghori et al., 2019).

تحت غلظت‌های بالای کادمیوم، علی‌رغم وجود مواد معدنی در خاک، گیاه ممکن است دچار کمبود برخی مواد ضروری شود. قابلیت استفاده اغلب عناصر کم مصرف به pH و هدایت الکتریکی محلول خاک و ماهیت محل‌های پیوند روی سطوح ذرات آلی و معدنی خاک بستگی دارد (Monteiro et al., 2009). به همین دلیل رابطه بین کادمیوم و عناصر کم مصرف بسیار پیچیده است. تحت تنش کادمیوم، حلالیت عناصر کم مصرف به ویژه آهن، روی، مس، بور و منگنز کم است و گیاهان در این خاک‌ها غالباً با کمبود این عناصر مواجه خواهند بود. با این وجود ممکن است، بسته به نوع گیاه و میزان تحمل آن به کادمیوم، بافت خاک، میزان کادمیوم، و شرایط محیطی، غلظت عناصر کم مصرف در اندام‌های هوایی گیاه افزایش یا کاهش یابد (Hu et al., 2021). از طرف دیگر کادمیوم موجب تغییرات ساختمانی در ساقه، ریشه و برگ گیاهان شده به نحوی که

نتیجه‌گیری نهایی

در پژوهش حاضر، تحت تنش عنصر کادمیوم، کاهش ارتفاع، قطر ساقه، سطح برگ و تعداد شاخه فرعی گیاه مریم‌گلی منجر به کاهش رشد و زیست‌توده آن شد که همراه با کاهش محتوای اسانس بود. افزایش میزان آلودگی محیط رشد گیاه مریم‌گلی موجب کاهش رشد ریشه از نظر طول و حجم ریشه و وزن تر ریشه نیز گردید که منجر به کاهش جذب عناصر غذایی پرمصرف (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم و کلسیم) و کم‌مصرف (مس، روی و بور) شد. با این‌وجود با افزایش شدت تنش کادمیوم، میزان جذب آهن، منگنز و کادمیوم افزایش معنی‌داری یافت. افزودن بیوچار با کاهش جذب کادمیوم و افزایش محتوای اسانس، اثرات منفی آلودگی کادمیوم را بر جذب عناصر غذایی و رشد گیاه مریم‌گلی کاهش داد. بیشترین اثر بیوچار در بالاترین غلظت استفاده شده (۲ درصد وزنی) و در گیاهان تحت تنش شدید کادمیوم مشاهده گردید. نتایج به‌دست آمده بیانگر کارایی بالای بیوچار در تعدیل اثر تنش کادمیوم، بهبود رشد و میزان اسانس گیاه مریم‌گلی می‌باشد.

(Mehdizadeh et al., 2020; Prapagdee et al., 2014).

کاربرد بیوچار ممکن است باعث افزایش و قابلیت دسترسی عناصر غذایی در خاک شود. به عنوان مثال کاربرد بیوچار حاصل از چوب و مواد زائد سبز می‌تواند نیتروژن کل، فسفر قابل استفاده، کاتیون تبادلی، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم در خاک را افزایش داده (Major et al., 2010) و در نتیجه جذب بسیاری از عناصر غذایی در گیاه پس از کاربرد بیوچار را افزایش دهد (Mehdizadeh et al., 2020; Prapagdee et al., 2014). مطالعات نشان داد که بسیاری از بیوچارها به دلیل داشتن سطوح تبادلی زیاد می‌توانند منجر به افزایش نگهداری عناصر غذایی و افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی شوند (Yao et al., 2013). همچنین کاربرد بیوچار سبب افزایش غلظت نیتروژن و فسفر می‌شود که شاید دلیل آن را بتوان به مقدار نسبتاً مناسب نیتروژن و فسفر موجود در بیوچار نسبت داد (Mehdizadeh et al., 2020).

منابع

- Al-Khayri, J.M., Banadka, A., Rashmi, R., Nagella, P., Alessa, F.M., Almaghasla, M.I., 2023. Cadmium toxicity in medicinal plants: An overview of the tolerance strategies, biotechnological and omics approaches to alleviate metal stress. *Frontiers in Plant Science*. 13, 5301. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1047410>
- Bakhtiar, 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, 54223-54233. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25959-w>
- Bashir, S., Zhu, J., Fu, Q., Hu, H., 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>
- Bu, X., Xue, J., Wu, Y., Ma, W., 2020. Effect of biochar on seed germination and seedling growth of *Robinia pseudoacacia* L. in karst calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 51, 352-363. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1709484>
- Chen, X., Wang, J., Shi, Y., Zhao, M.Q., Chi, G.Y., 2011. Effects of cadmium on growth and photosynthetic activities in pakchoi and mustard. *Botanical Studies*. 52, 41-46.
- Cutillas, A.B., Carrasco, A., Martinez-Gutierrez, R., Tomas, V., Tudela, J., 2017. *Salvia officinalis* L. essential oils from Spain: determination of composition, antioxidant capacity, antienzymatic, and antimicrobial bioactivities. *Chemistry and Biodiversity*. 14(8), e1700102. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201700102>
- Diaconu, D., Diaconu, R., Navrotescu, T., 2012. Estimation of heavy metals in medicinal plants and their infusions. *Ovidius University Annals of Chemistry*. 23, 115-120. <https://doi.org/10.2478/v10310-012-0019-0>

- Dobrikova, A., Apostolova, E., Adamakis, I.D.S., Hanć, A., Sperdouli, I., Moustakas, M., 2022. Combined impact of excess zinc and cadmium on elemental uptake, leaf anatomy and pigments, antioxidant capacity, and function of photosynthetic apparatus in clary sage (*Salvia sclarea* L.). *Plants*. 11, 2407. <https://doi.org/10.3390/plants11182407>
- Dobrikova, A.G., Apostolova, E.L., Hanć, A., Yotsova, E., Borisova, P., Sperdouli, I., Adamakis, I.D.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>
- Dubey, S., Shri, M., Gupta, A., Rani, V., Chakrabarty, D., 2018. Toxicity and detoxification of heavy metals during plant growth and metabolism. *Environmental Chemistry Letters*. 16, 1169-1192. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0741-8>
- Ekinci, M., Yildirim, E., Agar, G., Yuksel, E.A., Aydin, M., Örs, S., Kul, R., 2023. Determination of cadmium and drought stress effects on some plant phytohormone contents and hormone gene expressions in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 47, 402-411. <https://doi.org/10.55730.1300-011X.3096>
- Emami, A., 1996. *Plant Decomposition Methods*. Soil and Water Research Institute Publications, Tehran [In Persian].
- Fang, Z., Lou, L., Tai, Z., Wang, Y., Yang, L., Hu, Z., Cai, Q., 2017. Comparative study of Cd uptake and tolerance of two Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) cultivars. *Peer J*, 5, e3621. <https://doi.org/10.7717/peerj.3621>
- Farooq, A., Nadeem, M., Abbas, G., Shabbir, A., Khalid, M.S., Javeed, H.M.R., Saeed, M.F., Akram, A., Younis, A., Akhtar, G., 2020. Cadmium partitioning, physiological and oxidative stress responses in marigold (*Calendula calypso*) grown on contaminated soil: Implications for phytoremediation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 105, 270-276. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02934-6>
- Ghassemi-Golezani, K., Rahimzadeh, S., 2022. The biochar-based nanocomposites influence the quantity, quality and antioxidant activity of essential oil in dill seeds under salt stress. *Scientific Reports*. 12, 21903. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26578-0>
- Gh Ghor, N.H., Ghor, T., Hayat, M.Q., Imadi, S.R., Gul, A., Altay, V., Ozturk, M., 2019. Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 16, 1807-1828. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02215-8>
- Harizia, A., Benguerai, A., Elouissi, A., 2021. Chemical composition and biological activity of *Salvia officinalis* L. essential oil against *Aphis fabae* Scopoli (Hemiptera: Aphididae). *Plant Disease*. 128, 1547-1556. <https://doi.org/10.1007/s41348-021-00525-z>
- Hassan, W., Bano, R., Bashir, S., Aslam, Z., 2016. Cadmium toxicity and soil biological index under potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivation. *Soil Research*. 54, 460-468. <https://doi.org/10.1071.SR14360>
- Hu, X., Li, T., Xu, W., Chai, Y., 2021. Distribution of cadmium in subcellular fraction and expression difference of its transport genes among three cultivars of pepper. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 216, 112182. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112182>
- Jawad Hassan, M., Ali Raza, M., Ur Rehman, S., Ansar, M., Gitari, H., Khan, I., 2020. Effect of cadmium toxicity on growth, oxidative damage, antioxidant defense system and cadmium accumulation in two sorghum cultivars. *Plants (Basel)*. 9, 1575. <https://doi.org/10.3390/plants9111575>
- 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/s11356-023-28716-1>
- Kumar, S., Sharma, A., 2019. Cadmium toxicity: effects on human reproduction and fertility. *Reviews on Environmental Health*. 34, 327-338. <https://doi.org/10.1515/reveh-2019-0016>
- Lindsay, W.L., Norvell, W., 1987. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*. 42, 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- 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. *Plant Biology and Soil Health Journal*. 3, 1-6.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J., Lehmann, J., 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*. 333, 117-128.
- Marschner, H., 2011. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic press.
- Mehdizadeh, L., Moghaddam, M., Lakzian, A., 2020. Amelioration of soil properties, growth and leaf mineral elements of summer savory under salt stress and biochar application in alkaline soil. *Scientia Horticulturae*, 267, 109319-109330.
- 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>
- Monteiro, M.S., Santos, C., Soares, A.M.V.M., Mann, R.M., 2009. Assessment of biomarkers of cadmium stress in lettuce. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 72, 811-818. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.08.002>
- Muhammad, N., Nafees, M., Khan, M.H., Ge, L., Lisak, G., 2020. Effect of biochar on bioaccumulation and human health risks of potentially toxic elements in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivated on industrially contaminated soil. *Environmental Pollution*. 260, 113887. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113887>
- Ng, C.W.W., Wang, Y.C., Ni, J.J., So, P.S., 2022. Effects of phosphorus-modified biochar as a soil amendment on the growth and quality of *Pseudostellaria heterophylla*. *Scientific Reports*. 12, 7268. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11170-3>
- Pandey, J., Verma, R.K., Singh, S., 2019. Suitability of aromatic plants for phytoremediation of heavy metal contaminated areas: A review. *International Journal of Phytoremediation*. 21, 405-418. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1540546>
- Pariyar, P., Kumari, K., Jain, M.K., Jadhao, P.S., 2020. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. *Science of The Total Environment*. 713, 136433. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136433>
- Prapagdee, S., Piyatiratitivorakul, S., Petsom, A., Tawinteung, N., 2014. Application of biochar for enhancing cadmium and zinc phytostabilization in *Vigna radiata* L. cultivation. *Water, Air and Soil Pollution*. 225, 2233.
- Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A., Lehmann, J., 2011. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*. 48, 271-284.
- Rogowska, A., Pączkowski, C., Szakiel, A., 2022. Modulation of steroid and triterpenoid metabolism in *Calendula officinalis* plants and hairy root cultures exposed to cadmium stress. *International Journal of Molecular Science*. 23, 5640. <https://doi.org/10.3390.ijms23105640>
- Saini, S., Dhanial, G., 2020. Cadmium as an environmental pollutant: ecotoxicological effects, health hazards, and bioremediation approaches for its detoxification from contaminated sites. In: Bharagava, R., Saxena, G. (eds.). *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety*. Springer, Singapore. pp.357-387. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3426-9_15
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., Niazi, N.K., 2017. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*. 325, 36-58. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>
- Shanying, H.E., Xiaoe, Y.A.N.G., Zhenli, H.E., Baligar, V.C., 2017. Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity: a review. *Pedosphere*. 27, 421-438. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60339-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60339-4)
- Shirkhani, Z., Chehregani Rad, A., Gholami, M., 2020. Effects of cadmium on perianth and anther formation in *Datura stramonium* L. *Brazilian Journal of Botany*. 43, 239-246. <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00595-7>
- Soleimani, S.H., Bernard, F., Amini, M., Khavari-nezhad, R.A., 2020. Cadmium accumulation and alkaloid production of *Narcissus tazetta* plants grown under in vitro condition with cadmium stress. *Plant*

- Physiology Reports. 25, 51-57.
<https://doi.org/10.1007/s40502-019-00476-6>
- 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*) In: Huang, W.J. (ed.), Engineering Applications of Biochar. IntechOpen Publisher. pp. 49-69.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.68251>
- Xi 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, 963-973.
<https://doi.org/10.32615/ps.2019.076>
- Yao, Y., Gao, B., Chen, J.J., Yang, L.Y., 2013. Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer. Environmental Science and Technology, 47, 8700–8708.
- Yasin, N.A., Shah, A.A., Ahmad, A., Shahzadi, I., 2022. Cross talk between brassinosteroids and cytokinins in relation to plant growth and developments. In: Khan, M.T.A., Yusuf, M., Qazi, F., Ahmad, A. (eds.), Brassinosteroids Signalling. Springer, Singapore. Pp. 171–178.
https://doi.org/10.1007/978-981-16-5743-6_10