

تأثیر سلنیوم و بیوچار بر رشد و ویژگی‌های بیوشیمیایی مرزه (*Satureja hortensis* L.) تحت تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیم

ساجده سادات طباطبایی^۱، مرضیه قنبری جهرمی^{۱*} و وریا ویسانی^۲

^۱ گروه علوم باغبانی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ گروه علوم زراعت، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

آلودگی خاک با فلزات سنگین از مهم‌ترین معضلات کشاورزی است و ارائه راهکارهایی جهت کاهش جذب فلزات سنگین توسط گیاهان امری ضروری است. بدین منظور این آزمایش جهت ارزیابی سلنیوم و کاربرد بیوچار بر کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیم در گیاه مرزه (*Satureja hortensis* L.) در سال ۱۴۰۱ به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. تیمارهای پژوهش شامل کادمیم در سه سطح (صفر (شاهد)، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، بیوچار در دو سطح (صفر و ۵ درصد حجم گلدان) و محلول‌پاشی سلنیوم در سه سطح (صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. نتایج مطالعه حاضر بیانگر آن است که کاربرد بیوچار و سلنیوم سبب افزایش فنول کل شد و کادمیم در سطح متوسط بیشترین تأثیر بر افزایش فنول کل داشت. اثر سه‌گانه تیمارهای بیوچار، سلنیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و کادمیم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و همچنین اثر متقابل تیمارهای بیوچار، سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر و کادمیم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب سبب افزایش ۴۹/۲۳ و ۴۹/۵۳ درصدی فنول کل نسبت به شاهد شدند. همچنین، اثر متقابل تیمارهای کادمیم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلنیوم و تیمارهای شاهد کادمیم و سلنیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش فلانوتیید با مقادیر ۵۰/۲۱ درصد و ۴۸/۶۶ درصد نسبت به تیمار کادمیم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلنیوم شد. بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با ۹ واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین در تیمار کادمیم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بدون کاربرد بیوچار و سلنیوم به دست آمد. سلنیوم و بیوچار سبب کاهش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در تیمارهای تحت تنش کادمیم شدند. به‌طورکلی کاربرد همزمان بیوچار ۵ درصد حجمی همراه با سلنیوم ۵-۱۰ میلی‌گرم در لیتر از تعدیل‌کننده‌های مهم تنش کادمیم (تنش متوسط) در گیاه مرزه تابستانه بود.

واژه‌های کلیدی: آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، آنزیم کاتالاز، درصد فنول، عملکرد اسانس، فلزات سنگین

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷، اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲

* نویسنده مسئول، رایانامه: ghanbari@iau.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/>

مقدمه

گیاهان دارویی به دلیل وجود ترکیبات طبیعی، خواص بسیار فراوانی برای سلامت انسان‌ها دارند. تحقیقات نشان دادند که عوامل متعددی از جمله آب و هوا، نوع خاک، مدیریت زراعی، تغذیه گیاهان، نحوه برداشت، تنش‌های محیطی و غیره بر میزان ماده مؤثره گیاهان دارویی تأثیرگذارند که یکی از فاکتورهای زراعی مؤثر در رشد و عملکرد کمی و کیفی گیاهان دارویی، تغذیه گیاهان است (Yusupova et al., 2023). مرزه تابستانه (*Satureja Hortensis*) گیاهی یک ساله و علفی از خانواده Lamiaceae است که به دلیل داشتن ترکیبات فنلی با ارزش بالا، مانند کارواکرول و تیمول تولید می‌شود (Memari Tabrizi et al., 2021). مرزه به عنوان منبع بالقوه مواد مغذی ارزشمند است، بنابراین می‌تواند برای کنترل برخی بیماری‌ها از اثرات مفید آنتی‌اکسیدانی، ضدقارچی، ضدباکتری، ضدانگل، ضدویروس، ضدالتهاب، ضددیابت، محافظ کبد، ضدسرطان و سمیت سلولی آن استفاده کرد (Sefidkon and Emami, 2021). (Bistgani, 2021).

سلنیوم یکی از عنصرهای شیمیایی غیرفلزی و کمیاب است که برای بسیاری از موجودات زنده ضروری است. غلظت پایین سلنیوم اثر مفیدی روی رشد، مقاومت به تنش در گیاهان، با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها دارد. سلنیوم مقاومت گیاهان را در شرایط تنش افزایش داده و موجب افزایش رشد گیاهان تحت تنش احتمالاً از طریق حفظ آنزیم‌های کلروپلاست می‌شود. مکانیسم‌های محافظتی احتمالی سلنیوم در گیاهان در برابر تنش‌ها شامل افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی پراکسیداز (POD)، کاتالاز (CAT) و سایر آنزیم‌ها است و افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی آنتوسیانین‌ها، فلاونوئیدها، ترکیبات فنلی است. این سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی موقعیت‌های اکسیداتیو ناشی از استرس را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، سلنیوم می‌تواند فتوسنتز گیاهان را با افزایش کارایی فتوسیستم II (PSII)، افزایش محتوای کلروفیل و کاهش تخریب غلظت کلروفیل بهبود بخشد (Pirselova et al., 2016). علاوه بر این، سلنیوم به تنظیم وضعیت آب در

گیاهان با ارتقای راندمان جذب آب از ریشه و کاهش از دست دادن آب از بافت‌ها کمک می‌کند و باعث تحریک رشد گیاه با ارتقای یکپارچگی سیستم غشایی می‌شود که منجر به ازدیاد طول ریشه و ساقه و تجمع زیست‌توده می‌شود (Diao et al., 2014; Mona et al., 2017).

مسئله تأمین امنیت غذایی جمعیت در حال رشد، با توجه به منابع طبیعی محدود، یکی از مباحث مهم در جهان به شمار می‌رود. عناصر سنگین از مهم‌ترین منابع آلودگی‌های غیرنقطه‌ای منابع طبیعی است. از آنجایی که آلوده شدن محصولات کشاورزی با فلزات سنگین از یک طرف منجر به کاهش کیفیت محصولات کشاورزی و از طرفی تهدیدی جدی برای سلامت انسان است، لذا از جنبه‌های محیط زیستی بسیار حائز اهمیت هستند (Yang et al., 2018).

غلظت بالای کادمیوم در خاک اثرات نامطلوبی بر گیاهان دارویی دارد و سبب کاهش رشد گیاهان و اختلال در تولید اسانس آنان می‌شود. نکته مهم در تولید گیاهان دارویی حفظ خواص کیفی و کمی آنها از طریق حفظ کیفیت خاک، حذف عوامل بازدارنده رشد از جمله فلزات سنگین و در نهایت ایجاد بستری مناسب برای رشد گیاه است. اما در شرایط تنش کادمیوم، جنبه‌های مختلف فیزیولوژیکی، رشدی و نموی گیاهان دارویی تحت تأثیر قرار گرفته و در نهایت بازده تولید و کیفیت آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد و مواد تجمع یافته خود را در زنجیره غذایی ما وارد می‌نمایند (Rashwan et al., 2021; Landi et al., 2025). بیوجار با بهبود شرایط خاک تحمل گیاه به تنش کادمیم را افزایش می‌دهد (Jahantigh et al., 2024). مطالعه‌ای در رابطه با اهمیت بیوجار و سلنیوم در تعدیل تنش کادمیم روی گیاه مرزه تابستانه انجام نشده است، بنابراین لازم است این تعدیل‌کننده‌های تنش در کاهش اثرات تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیم روی گیاه مرزه تابستانه بررسی شود. به همین منظور پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر بیوجار به عنوان یک اصلاح‌کننده خاک و کاربرد سلنیوم به عنوان یک عنصر مهم در مقابله با تنش‌های محیطی بر گیاه مرزه تحت تنش کادمیم اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به منظور بررسی اثر بیوچار و سلنیوم در شرایط تنش کادمیم در سال ۱۴۰۱ در مجتمع گلخانه‌ای واقع در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در شهر کرج با رطوبت نسبی ۶۵ تا ۸۰ درصد، حداکثر دما ۲۹ و حداقل دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. در طول کشت از نور طبیعی (نور خورشید) استفاده شد و هیچ نور مصنوعی به گیاهان داده نشد. در ۲۰ فروردین ۱۴۰۱ بذرهای مرزه تابستانه کشت و پس از ۱۰۰ روز برداشت شدند. بذرهای مرزه توده اصفهان از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد. این بذر از درصد خلوص ۹۵ درصد و قوه نامیه بالایی (۹۹ درصد) برخوردار است و نسبت به بیماری‌ها و آفات مقاومت خوبی دارد. ابتدا بذرهای ضد عفونی و در گلدان‌های ۳ لیتری حاوی خاک کشاورزی، خاک برگ و ماسه به ترتیب با نسبت (۲:۱:۱) کشت شدند. آزمایش حاضر به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل کادمیم در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) که با خاک بستر کشت مخلوط شد. همچنین بیوچار در دو سطح (صفر و ۵ درصد حجم گلدان) اعمال شد. سلنیوم به صورت سلنات سدیم (Na_2SeO_4) در سه سطح (صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر) در مرحله چهارم برگری به صورت محلول‌پاشی با فواصل ۱۵ روزه در سه نوبت استفاده شد. محلول‌پاشی به صورت اسپری بر گیاهان طبق غلظت‌های مشخص انجام شد، به طوری که کل گیاه خیس شود. گیاهان شاهد با آب مقطر محلول‌پاشی شدند. بیوچار از شرکت فصل پنجم شیراز تهیه شد. قبل از کشت نمونه‌ای خاک (جدول ۱) و بیوچار (جدول ۲) جهت بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه ارسال شد. برای آلوده‌سازی خاک با کادمیم از نمک سولفات کادمیم (CdSO_4) از شرکت مرک آلمان استفاده شد. خاک با محلول نمکی فلز مورد نظر به‌طور مصنوعی آلوده و سپس خاک آلوده تا حد ظرفیت زراعی مرطوب گردید که تا حد امکان برهمکنش‌های آلاینده و خاک تکوین یافته و شرایط آلودگی طبیعی‌تر شود و به منظور

اطمینان از تعادل فلز با خاک، یک ماه در این حالت نگهداری شد (Yizong *et al.*, 2009).

در پایان دوره رویشی گیاه، صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری اندام هوایی، گیاه کشت‌شده در هر گلدان از یقه توسط قیچی قطع و وزن اندام هوایی گیاه (ساقه، گل و برگ) اندازه‌گیری شد. وزن تر اندام هوایی پس از برداشت با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شد. پس از خشک‌کردن اندام هوایی در دستگاه آون در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، وزن خشک آن‌ها با دقت ۰/۰۱ گرم به دست آمد (Inbar *et al.*, 1994).

اندازه‌گیری میزان محتوای کلروفیل با روش Arnon (۱۹۴۹) انجام شد. بدین ترتیب که ابتدا ۰/۱ گرم نمونه برگ گیاهان را در هاون چینی با ۳ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد کاملاً ساییده و حجم نهایی عصاره به ۱۵ میلی‌لیتر رسید. سپس عصاره با استفاده از سانتریفیوژ به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت $5000 \times g$ صاف شد. از دستگاه اسپکتروفوتومتر (Shimadzu UV-160) برای اندازه‌گیری میزان جذب نمونه‌ها استفاده شد. میزان جذب عصاره استخراج‌شده در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر خوانده گردید و با استفاده از رابطه (۱) و بر حسب میلی‌گرم کلروفیل کل در هر گرم برگ تر محاسبه شد.

رابطه ۱

$$\text{Chl a} = [(20.2 \times A_{645}) + (8.02 \times A_{663})] \times V / 1000 \times W$$

در رابطه‌های بالا، A میزان جذب در طول موج مورد نظر، V حجم نهایی استون ۸۰ درصد بر حسب میلی‌لیتر و W اندازه برگ تازه بر حسب گرم است.

برای استخراج آنزیم‌ها ۳ گرم از نمونه‌های گیاهی در هاون چینی با ازت مایع خرد و به صورت پودر درآمد. سپس ۰/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم با pH معادل ۶ به آن اضافه و با دور ۱۳۰۰۰ سانتریفیوژ گردید. جهت اندازه‌گیری پروتئین کل و فعالیت آنزیم‌های نمونه‌ها، از محلول رویی برداشت شد. برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از دستگاه

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها

کادمیوم	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	نیتروژن کل		بافت خاک	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته
			کربن آلی	(درصد)			
۰/۰۵۷	۱۵/۳	۲۲۵	۰/۱۱	۰/۶۷	لومی-رسی	۱/۲	۶/۸

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی بیوجار استفاده‌شده

ماده آلی	کربن آلی	نیتروژن	سدیم	پتاسیم	فسفر	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته
۹۱/۶	۷۵/۸	۰/۴۵	۰/۵۲۰	۲۰	۰/۳۷۰	۳۷/۵	۹/۵

اسپکتروفوتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر در مدت ۳۰ ثانیه استفاده شد. بافر فسفات سدیم ۲۰ میلی‌مولار با pH معادل ۷ و ۲۰ میکرولیتر هیدروژن پراکساید (H_2O_2) ۳۰ درصد به‌عنوان پذیرنده الکترون مورد استفاده قرار گرفت. میزان فعالیت کاتالاز بر حسب واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین بیان گردید (Macadam et al., 1992). فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز براساس روش Giannopolitis و Ries (۱۹۷۷) اندازه‌گیری شد. فعالیت این آنزیم با قابلیت آن در بازدارندگی واکنش احیایی فتوشیمیایی نیتروبلوتترازولیوم (NBT) تعیین شد. مخلوط واکنش محتوی بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با (pH=۷)، متیونین ۱۳ میلی‌مولار، Na-EDTA ۰/۱ میلی‌مولار، نیتروبلوتترازولیوم (NBT) ۷۵ میکرومول، ریبولوآلین ۷۵ میکرومول و مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره است. در دو لوله آزمایش ۳ میلی‌لیتر از محلول فوق بدون عصاره آنزیمی ریخته، یکی در دستگاه دور از نور و دیگری در حضور نور فلوتورسنت به‌عنوان شاهد قرار داده شد. هر دو دقیقه یک بار جذب محلول در حالت Photometric و طول موج ۵۶۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر خوانده شد.

اندازه‌گیری ترکیب‌های فنلی به‌وسیله روش‌هایی که از Folin-Ciocalteu به‌عنوان معرف و اسید گالیک به‌عنوان استاندارد استفاده می‌نمایند انجام شد. محتوای فنلی به‌وسیله اسپکتروفوتومتر، با روش Ouchikh و همکاران (۲۰۱۱) اندازه‌گیری شد. در این آزمایش ۲ گرم از نمونه به همراه ۸

میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد هموزن شده و در دور ۱۲۰۰۰ به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. جذب نمونه‌ها نیز در طول موج ۷۲۵ نانومتر با اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد. میزان فلاونوئید به روش رنگ‌سنجی آلومینیوم کلرید اندازه‌گیری شد. بعد از نگهداری نمونه‌ها در دمای اتاق به مدت ۳۰ دقیقه، جذب مخلوط در طول موج ۴۱۵ نانومتر خوانده شد (Chang et al., 2002). کلیه داده‌های به‌دست آمده حاصل از اندازه‌گیری متغیرها با نرم‌افزار آماری SAS (Ver 9.3) آنالیز شد. مقایسه میانگین داده‌ها در سطح معنی‌دار ۱ و ۵ درصد با آزمون LSD بررسی شد. رسم شکل‌ها در نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

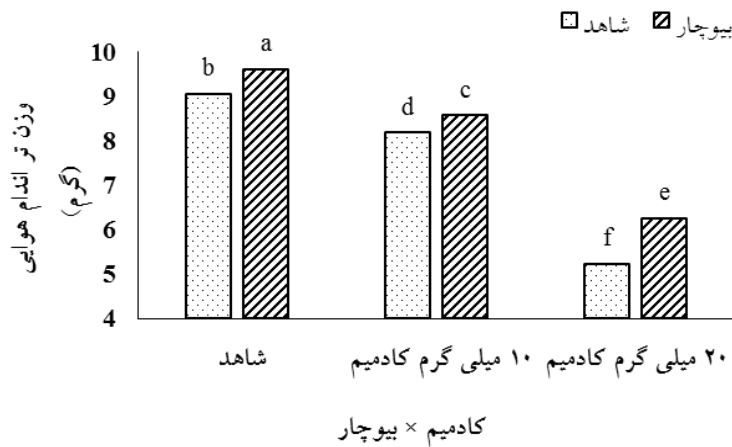
نتایج و بحث

وزن تر و خشک اندام هوایی: نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که اثر اصلی کادمیم، بیوجار، سلنیوم و اثر متقابل کادمیوم در بیوجار در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر و خشک اندام هوایی معنی‌دار شد. اثر متقابل و کادمیوم در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر و در سطح احتمال پنج درصد بر وزن خشک اندام هوایی گیاه معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد بیوجار سبب تعدیل تنش کادمیم شد به‌طوری‌که در تیمار کادمیم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و بدون بیوجار کمترین مقدار وزن تر اندام هوایی (۵/۲۴ گرم) را نشان داد. کاربرد بیوجار سبب افزایش وزن تر اندام هوایی (۹/۶۲ گرم) در گیاهان بدون تنش کادمیم شدند

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات وزن تر و خشک اندام هوایی، اسانس و عملکرد اسانس مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*) تحت تأثیر کادمیم، بیوچار و سلنیوم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	مقدار اسانس
تکرار	۲	۱/۶۲**	۰/۶۸**	۰/۰۱۹۴**
کادمیم	۲	۶۲/۱۲**	۶/۹۴**	۰/۱۷۰۶**
بیوچار	۱	۵/۸۰**	۱/۷۴**	۰/۰۲۲۴**
سلنیوم	۲	۰/۳۹**	۰/۴۱**	۰/۰۰۳۱**
کادمیم × بیوچار	۲	۰/۴۸**	۰/۰۴**	۰/۰۰۰۶ ^{ns}
کادمیم × سلنیوم	۴	۰/۱۱**	۰/۰۲*	۰/۰۰۰۷ ^{ns}
بیوچار × سلنیوم	۲	۰/۰۷ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۱**
کادمیم × بیوچار × سلنیوم	۴	۰/۰۳ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۲۴**
خطا	۳۴	۰/۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱۹
ضریب تغییرات	-	۶/۲۶	۸/۲۲	۵/۶۱
		۴/۶۳		

** بیانگر معنی داری در سطح ۱ درصد، * بیانگر معنی داری در سطح ۵ درصد و ^{ns} بیانگر عدم معنی داری

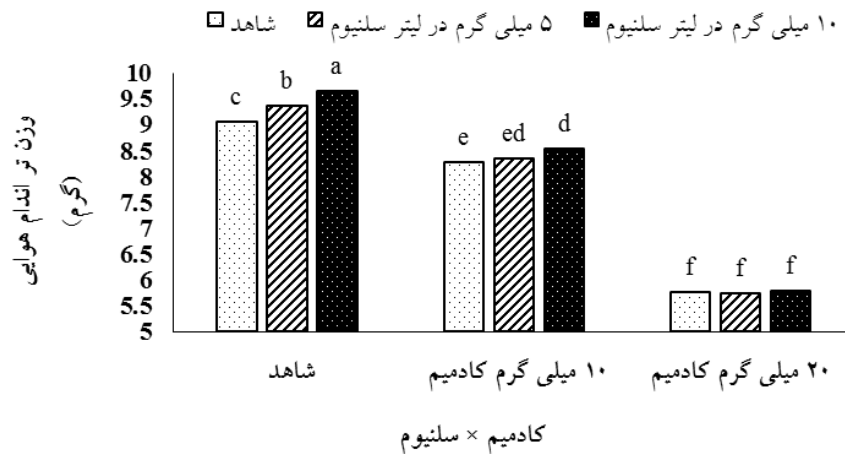


شکل ۱- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و بیوچار بر وزن تر اندام هوایی مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی دار بین تیمارهاست.

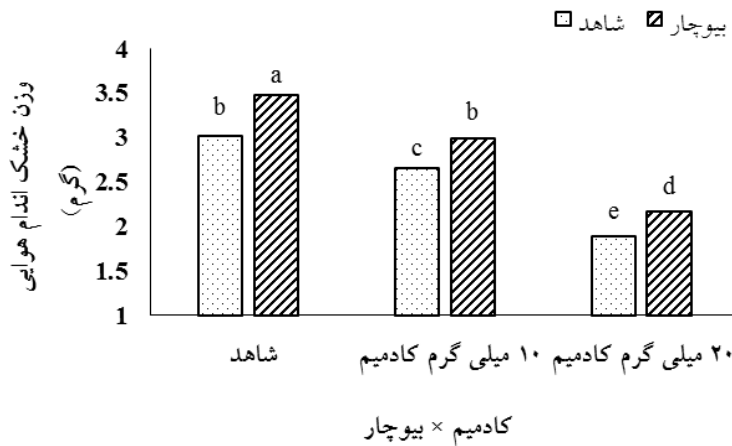
کادمیم وزن خشک اندام هوایی را کاهش داد. به طوری که کمترین مقدار وزن خشک اندام هوایی (۱/۸ گرم) در گیاهان شاهد بیوچار و کادمیم ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم مشاهده شد. بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی (۳/۴۷) مربوط به تیمار شاهد کادمیم و بیوچار بود (شکل ۳). نتایج اثر متقابل کادمیم و سلنیوم نشان داد که بیشترین مقادیر وزن خشک اندام هوایی (۳/۳۱ گرم) و (۳/۳۰ گرم)، به ترتیب مربوط به سلنیوم ۱۰ و ۵

(شکل ۱). نتایج اثرات متقابل کادمیم در سلنیوم نیز نشان داد که بیشترین مقدار وزن تر اندام هوایی (۹/۶۳ گرم)، در تیمار ۱۰ میلی گرم سلنیوم و شاهد کادمیم مشاهده شد و کمترین مقدار این شاخص نیز در تیمارهای ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم کادمیم تمامی سطوح سلنیوم مشاهده شد (شکل ۲).

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیم در بیوچار نشان داد که کاربرد بیوچار سبب تعدیل تنش کادمیم شد و کاربرد



شکل ۲- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و سلیوم بر وزن تر اندام هوایی مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارهاست.



شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و بیوجار بر وزن خشک اندام هوایی مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارهاست.

وزن دانه رازیانه شد به طوری که کاربرد بیوجار با تعدیل تنش کادمیم سبب بهبود رشد گیاه شد. تنش اکسیداتیو ناشی از فلزات سنگین رشد گیاه و تجمع زیست‌توده را با مهار انبساط برگ و روزنه و کاهش سرعت فتوسنتز، تحت تأثیر قرار می‌دهد و سبب کاهش وزن گیاه می‌شود (Nawaz *et al.*, 2024). محققان مهم‌ترین دلایل کاهش در وزن گیاه در طول دوره تنش را اثرات سوء تنش بر رشد و فیزیولوژی گیاه شامل رشد رویشی، سیستم فتوسنتزی و جذب عناصر غذایی اعلام کردند. تجمع کادمیم در بافت‌های گیاهی سبب کمبود عناصر غذایی می‌شود و سنتز کلروفیل را متوقف می‌کند (Nadjama

میلی‌گرم در لیتر در تیمار شاهد کادمیم بود. همچنین کمترین مقدار وزن خشک اندام هوایی (۱/۸۵ گرم) مربوط به تیمار کادمیم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلیوم بود (شکل ۳). مهم‌ترین دلایل کاهش در وزن گیاه در طول دوره تنش را اثرات سوء تنش بر رشد و فیزیولوژی گیاه شامل رشد رویشی، سیستم فتوسنتزی و جذب عناصر غذایی اعلام کردند. تجمع کادمیم در بافت‌های گیاهی سبب کمبود آهن، منیزیم و کلسیم می‌شود و سنتز کلروفیل را متوقف می‌کند (Shanmugaraj *et al.*, 2019). در تحقیقی مشابه Jahantigh و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیم سبب کاهش معنی‌دار

نشان داد که بیوجار توانست اثرات منفی ناشی از تنش کادمیوم متوسط (۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) را کاهش دهد. بیشترین عملکرد اسانس (۲۹/۱۵ میلی‌گرم در بوته) و (۲۸/۲۲ میلی‌گرم در بوته) مربوط به بیوجار و کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و همچنین تیمار بیوجار و شاهد کادمیوم بود (شکل ۵).

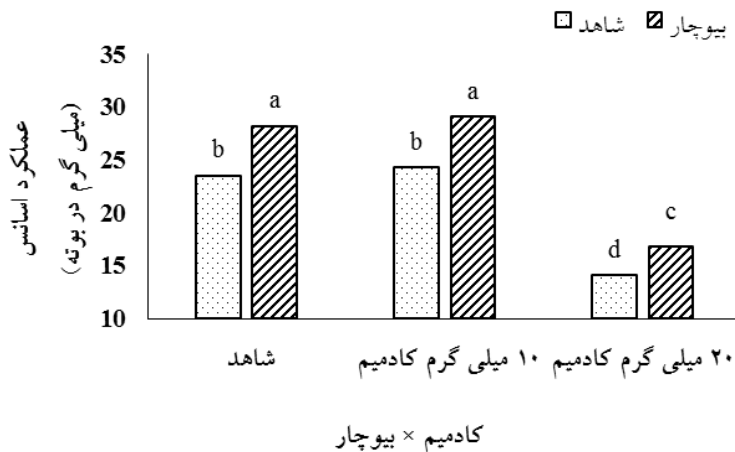
اسانس ترکیباتی بدون رنگ و بو بوده که در صورت قرار گرفتن در مقابل نور خورشید و یا مجاورت هوا، ممکن است رنگشان تغییر کند (Ghadimi et al., 2020). غده‌های تولید اسانس تحت شرایط تنش و کوددهی تغییر می‌کنند و سبب تغییر در مقدار اسانس می‌شوند (Shahpari et al., 2025). گیاهان دارویی بسته به نوع تنش و مقدار آن واکنش‌های متفاوتی در مقدار تولید اسانس دارند. مشابه تحقیق حاضر، افزایش مقدار اسانس در تنش ملایم کادمیم در رازیانه گزارش شده است (Jahantigh et al., 2024). همچنین افزایش درصد اسانس تحت تیمارهای بیوجار به دلیل نقش مهم این اصلاح‌کننده خاک در تغییر خصوصیات بیوشیمیایی خاک مانند pH و هدایت الکتریکی است که نتایج آن روی افزایش اسانس روی گیاهان سیر (Ghassemi and Raei, 2021) و ریحان (Najafian and Zahedifar, 2018) گزارش شد. تنش شدید باعث کاهش رشد و کاهش سطح اندام هوایی و مورفولوژیکی می‌شود که ممکن است به دلیل تلاش گیاه برای بقا و رسیدن به رطوبت باشد. متابولیت‌های ثانویه به دلیل تنش شدید کاهش و با کاهش شدت تنش به دلیل افزایش اندام هوایی و افزایش تولید متابولیت بهبود می‌یابند. کاهش عملکرد اسانس افزایش عملکرد اسانس در ۱۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک کاهش آن در تنش ۲۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک توسط Jahantigh و همکاران (۲۰۲۴) روی گیاه رازیانه با کاربرد کادمیم و نانوذرات سلنیوم گزارش شد. سلنیوم با ایجاد چندین تغییر رونویسی نقش مهمی در تولید متابولیت ثانویه شتاب‌دهنده دارد (Jahantigh et al., 2024). سلنیوم و بیوجار ممکن است از طریق بهبود رشد سلول، جذب یون و تراکم و اندازه غده، اسانس و عملکرد اسانس را افزایش دهد (Pandey et al., 2016).

(et al., 2022). کادمیوم اثرات منفی بر جذب آب دارد که نتیجه آن کاهش فشار تورگر است. این کاهش همراه با کاهش قابلیت ارتجاعی دیواره سلولی باعث کوچک‌شدن سلول‌ها و کاهش فضای بین‌سلولی در گیاهان تحت تنش می‌شود که در نهایت موجب کاهش وزن تر گیاهان می‌گردد (Nawaz et al., 2024). اهمیت بیوجار به عنوان یک کاهش‌دهنده تنش گیاهی در چند سال گذشته به دلیل توانایی آن در افزایش حاصلخیزی خاک، جذب و رشد مواد مغذی و بهبود ظرفیت نگهداری آب در گیاهان تحت تنش افزایش یافته است. هنگامی که بیوجار به خاک اضافه می‌شود، به دلیل سطح بار منفی، مساحت سطح بالا و خاصیت ترسیب کربن، به‌طور قابل توجهی بر سطح خاک، تخلخل، توزیع اندازه منافذ و ظرفیت نگهداری آب و همچنین بسیاری از جنبه‌های شیمیایی و بیولوژیکی دیگر تأثیر می‌گذارد. افزایش حاصلخیزی خاک، رشد و استقرار گیاه را در شرایط کادمیم افزایش می‌دهد (Shiyu et al., 2020; Khan et al., 2024). نتایج پژوهش حاضر با نتایج سایر محققان مطابقت داشت. آنان بیان داشتند که کاربرد کادمیوم موجب کاهش وزن تر و وزن خشک ریحان شد (Nadjama et al., 2022).

مقدار و عملکرد اسانس: طبق نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیوم، بیوجار و سلنیوم در سطح احتمال یک درصد در مقدار و عملکرد اسانس معنی‌دار شد. اثر بیوجار و سلنیوم و همچنین اثر سه‌گانه کادمیم، بیوجار و سلنیوم بر درصد اسانس معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل کادمیوم و بیوجار نیز بر عملکرد اسانس در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. نتایج اثر متقابل سه‌گانه تیمارها نشان داد که بیوجار و سلنیوم سبب افزایش درصد اسانس شدند و سبب کاهش اثرات منفی ناشی از تنش کادمیوم شدند. بیشترین مقدار اسانس (۰/۹۸ درصد) و (۰/۹۷ درصد) به ترتیب مربوط به تیمار بیوجار + سلنیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر + کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و بیوجار + سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر + کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. کمترین مقدار این شاخص نیز (۰/۶۹ درصد) در تیمار شاهد سلنیوم و بیوجار در کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد (شکل ۴). نتایج اثر متقابل کادمیوم در بیوجار



شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم، بیوچار و سلنیوم بر درصد اسانس مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی دار بین تیمارهاست.



شکل ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و بیوچار بر عملکرد اسانس مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی دار بین تیمارهاست.

حفاظت گیاه در برابر ROS در هر دو شرایط زیستی و غیرزنده هستند. شرایط استرس‌زا اغلب منجر به تجمع بیش از حد ROS می‌شود که باعث استرس اکسیداتیو می‌شود. از بین بردن ROS به‌طور مستقیم با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز مرتبط است. فعالیت این آنزیم‌ها به‌طور کلی با افزایش شدت تنش افزایش می‌یابد (Scherer et al., 2013). در شرایط سخت تنش‌های محیطی مانند خشکی، استفاده از سیستم‌های محرک‌های رشد با القای ژن‌های مسئول در تنش خشکی موجب کاهش خسارات ناشی از شرایط نامساعد گیاهی می‌گردد (Nasirzadeh et al., 2021).

کاتالاز: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر بیوچار، کادمیم و سلنیوم و همچنین اثرات دوگانه و سه‌گانه تیمارها بر فعالیت آنزیم کاتالاز برگ معنی دار شد (جدول ۴). بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز با ۰/۴۹ واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین در تیمار ۲۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم بدون کاربرد بیوچار و سلنیوم بدست آمد. سلنیوم و بیوچار سبب کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمارهای تحت تنش کادمیم شدند. در تیمار تنش شدید کادمیم بدون کاربرد بیوچار، سلنیوم ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر منجر به کاهش ۲۵ و ۳۱ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز شد (شکل ۶). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان خط مقدم

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات فعالیت کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز، فنول و فلاونوئید کل مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*) تحت تأثیر کادمیم، بیوچار و سلنیوم

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		کاتالاز	سوپراکسید دیسموتاز	فنول
تکرار	۲	۰/۰۱۵**	۰/۷۱**	۵۵/۸۱**
کادمیم	۲	۰/۱۸۳**	۲۶/۵۲**	۱۱۵/۶۳**
بیوچار	۱	۰/۰۳۷**	۶/۵۵**	۱۲۱/۲**
سلنیوم	۲	۰/۰۰۸**	۱/۸۸**	۷۰/۲۲**
کادمیم × بیوچار	۲	۰/۰۱۱**	۱/۹۳**	۶/۶۹**
کادمیم × سلنیوم	۴	۰/۰۰۳**	۱/۱۶**	۳/۹۱**
بیوچار × سلنیوم	۲	۰/۰۰۶**	۰/۷۴**	۰/۳۸**
کادمیم × بیوچار × سلنیوم	۴	۰/۰۰۲**	۰/۳۴**	۳/۸۳**
خطا	۳۴	۰/۰۰۰۱	۰/۰۲۵	۰/۳۱
ضریب تغییرات	-	۵/۷۳	۸/۲۸	۸/۱۴

** بیانگر معنی داری در سطح ۱ درصد، * بیانگر معنی داری در سطح ۵ درصد و ns بیانگر عدم معنی داری

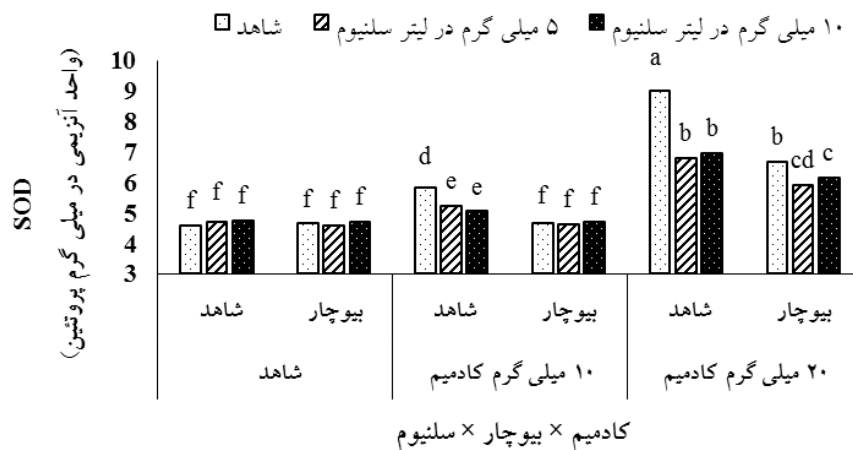


شکل ۶- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم، بیوچار و سلنیوم بر کاتالاز مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی دار بین تیمارها است.

شاهد کاهش می‌یابد. همچنین بیوچار با بهبود شرایط خاک، تحمل گیاه به تنش کادمیم با کاهش آنزیم کاتالاز می‌شود (Jahantighet *et al.*, 2024).

سوپراکسید دیسموتاز: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر بیوچار، کادمیم و سلنیوم و همچنین اثرات دوگانه و سه‌گانه تیمارها بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز برگ

تنش کادمیم سبب افزایش کاتالاز می‌شود که به دلیل افزایش این آنزیم اکسیداسیون دامنه وسیعی از ترکیبات آلی و معدنی در حضور پراکسیداسیون تولید شده در تنش است. کاهش فعالیت کاتالاز تحت تأثیر سلنیوم و بیوچار نسبت به کادمیم به این دلیل است که شرایط گیاه با این مواد بهتر شده و نزدیک به شرایط نرمال می‌باشد که فعالیت این آنزیمی نیز به سمت



شکل ۷- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم، بیوچار و سلینیوم بر فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی دار بین تیمارها است.

تحقیقی مشابه روی گیاه کتان افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز تحت تنش کادمیم و کاربرد بیوچار گزارش شده است.

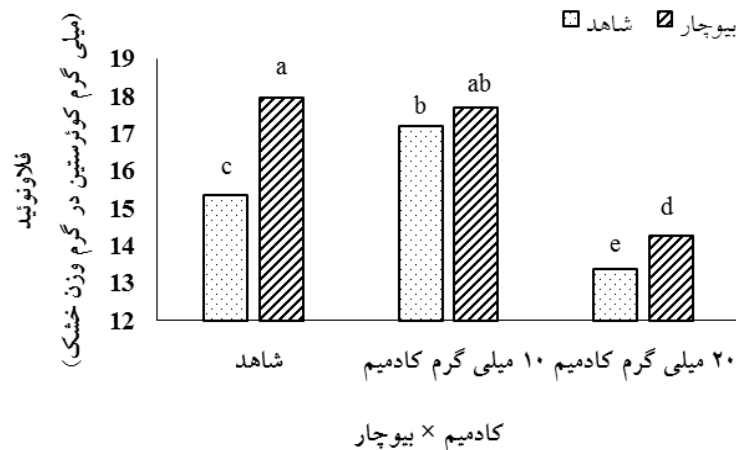
فنول و فلاونوئید کل: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کادمیم، بیوچار و سلینیوم و همچنین اثرات دوگانه و سه‌گانه تیمارها بر فنول معنی دار شد. اثر اصلی کادمیم، بیوچار و سلینیوم و اثر متقابل کادمیم و بیوچار و همچنین کادمیم و سلینیوم بر فلاونوئید کل معنی دار شد (جدول ۴). نتایج اثر متقابل سه‌گانه تیمارها بر فنول کل نشان داد که در کل بیوچار و سلینیوم سبب افزایش فنول کل شدند و کادمیم در سطح متوسط بیشترین تأثیر بر افزایش فنول کل داشت. تیمارهای کاربرد بیوچار و سلینیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و کادمیم ۱۰ میلی‌گرم و همچنین بیوچار و سلینیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر و کادمیم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب سبب افزایش ۴۹/۲۳ و ۴۹/۵۳ درصدی فنول کل نسبت به شاهد شدند. در شرایط عدم تنش کادمیم و بدون کاربرد بیوچار، سلینیوم ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب سبب افزایش ۱۶ و ۲۰ درصدی فنول کل شدند (شکل ۸).

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیم و بیوچار نشان داد که بیشترین مقدار کادمیم ۱۰ میلی‌گرم و بیوچار و همچنین شاهد کادمیم و بیوچار به ترتیب سبب افزایش ۳۲/۲۳ درصدی و ۳۴/۱۸ درصدی فلاونوئید کل نسبت به تیمار کادمیم ۲۰

معنی دار شد (جدول ۴). بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با ۹ واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین در تیمار ۲۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بدون کاربرد بیوچار و سلینیوم بدست آمد. سلینیوم و بیوچار سبب کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تیمارهای تحت تنش کادمیم شدند. در تیمار تنش شدید کادمیم بدون کاربرد سلینیوم، بیوچار سبب کاهش ۲۶ درصدی فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز شد (شکل ۷). سوپراکسید دیسموتاز اولین خط دفاعی گیاه برابر تنش است. تخریب کارآمد O_2^- و H_2O_2 در سلول‌های گیاهی به عملکرد هماهنگ آنتی‌اکسیدان‌ها نیاز دارد. O_2^- می‌تواند توسط سوپراکسید دیسموتاز (SOD) در کلروپلاست، میتوکندری، سیتوپلاسم و پراکسیزوم به H_2O_2 تبدیل شود تا از آسیب سلول جلوگیری کند. همچنین H_2O_2 باید با تبدیل به H_2O در واکنش‌های بعدی شامل پراکسیداز (POD) که سطح H_2O_2 را در گیاهان تنظیم می‌کنند، حذف شود. مطالعات قبلی در گونه‌های مختلف نشان داده است که تنش کادمیم مقدار و فعالیت آنزیم‌های دخیل در حذف ROS را تغییر داده است (Azizi et al., 2020). Hafez و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیق خود گزارش کردند که بیوچار سبب افزایش کلروفیل، هدایت روزنه‌ای، محتوای پتاسیم، نیتروژن و فسفر برگ و کاهش تنش اکسیداتیو با کاهش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز شد. Zhu و همکاران (۲۰۲۰) در



شکل ۸- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم، بیوچار و سلنیوم بر فنول کل مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی دار بین تیمارها است.



شکل ۹- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و سلنیوم بر فلاونوئید کل مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی دار بین تیمارها است.

(Chrysargyris et al., 2018). محتوای فنولی گیاه با نقش آنتی‌اکسیدانی سبب محافظت گیاه شده و ارتباط مستقیمی با سلامت انسان می‌تواند داشته باشد (Bakhshi et al., 2025). نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که در شرایط تنش شدید تولید متابولیت‌های ثانویه مانند فنول کل نسبت به تنش متوسط کمتر می‌شود چون انرژی گیاه از یه مرحله به بعد بیشتر برای حفظ و زنده‌مانی است و کمتر تمرکز روی تولید متابولیت‌های ثانویه است. همچنین اثر سلنیوم بر افزایش معنی‌دار فنول کل در گیاه پنیرک (Tousi et al., 2020) گزارش شده است که در راستای تحقیق حاضر است. فلاونوئیدها ترکیبات پلی‌فنلی

میلی‌گرم در کیلوگرم شدند (شکل ۹). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیم و سلنیوم نشان داد که کادمیم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلنیوم و همچنین شاهد کادمیم و سلنیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش فلاونوئید با مقادیر ۵۰/۲۱ درصد و ۴۸/۶۶ درصد نسبت به تیمار کادمیم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلنیوم شدند (شکل ۱۰).

فنل کل با توسعه سیستم‌های مهار گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) در گیاهان مرتبط است و بنابراین می‌تواند با از بین بردن رادیکال‌های آزاد که ممکن است باعث پراکسیداسیون لیپیدی شود از اکسیداسیون بافت گیاه محافظت کند



شکل ۱۰- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و سلینیوم بر فلاونوئید کل مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی دار بین تیمارها است.

هستند که به‌طور عمده در گیاهان یافت می‌شوند و به عنوان ترکیبات آنتی‌اکسیدان و ضدرادیکال قوی ظاهر می‌شوند. قدرت آنتی‌اکسیدانی این ترکیبات وابسته به موقعیت گروه‌های هیدروکسیل بر روی اسکلت فلاونوئید است و عوامل متفاوتی بر روی خاصیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها مؤثر است. از جمله تعداد گروه‌های هیدروکسیل و حضور پیوند دوگانه ۲ و ۳ و ساختار ارتودی فنلیک است که خصوصیت آنتی‌اکسیدانی و ضدرادیکالی را افزایش می‌دهد (Petruccelli et al., 2015). تحقیقات نشان داده است کاربرد بیوچار باعث افزایش فتوسنتز و فلاونوئید کل شده است (Agegnehu et al., 2015;) و فلاونوئید کل را در مقایسه با شاهد افزایش داد (Pandey et al., 2016). گزارش شده است که بیوچار به‌طور قابل توجهی محتوای فلاونوئید، ساکارز و گلوکز گوجه‌فرنگی را بهبود بخشید (Petruccelli et al., 2015).

سطح ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک سبب کاهش معنی‌دار عملکرد گیاه از نظر وزن گیاه و صفات کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ گیاه مرزه تابستانه شد. هر چند اختلاف معنی‌داری بین سلینیوم ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر بین اکثر صفات مشاهده نشد، ولی هر دو سطح به‌طور معنی‌داری سبب بهبود شرایط رشد گیاه و خصوصیات بیوشیمیایی آن شدند. بیوچار با غلظت ۵ درصد حجم گلدان سبب تعدیل تنش کادمیم با بهبود شرایط رشد گیاه شد. بیشترین عملکرد گیاه با کاربرد بیوچار و دامنه ۵-۱۰ میلی‌گرم در لیتر سلینیوم به‌دست آمد. بیوچار و سلینیوم اثرات منفی ناشی از تنش متوسط کادمیم را بهبود بخشیدند. بر این اساس، کاربرد توأم تیمارهای بیوچار، سلینیوم ۱۰ و ۵ میلی‌گرم در لیتر و کادمیم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ۴۹ درصد فنول کل را نسبت به شاهد افزایش دادند. اثر متقابل کادمیم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلینیوم و همچنین تیمارهای شاهد کادمیم و سلینیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش فلاونوئید با مقادیر ۵۰/۲۱ درصد و ۴۸/۶۶ درصد نسبت به تیمار کادمیم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلینیوم شدند. بنابراین می‌توان برای کاهش اثرات منفی ناشی از تنش کادمیم کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی سلینیوم را توصیه کرد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که کادمیم به ویژه در

منابع

- Agegehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., Muirhead, B., Wright, G., & Bird, M. I. (2015). Biochar and biochar-compost as soil amendments: effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 213, 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.027>
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15.
- Azizi, I., Esmailpour, B., & Fatemi, H. (2020). Effect of foliar application of selenium on morphological and physiological indices of savory (*Satureja hortensis*) under cadmium stress. *Food Science and Nutrition*, 8(12), 6539-6549. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1943>
- Bakhshi, A., Abdossi, V., & Ghanbari Jahromi, M. (2025). Effects of seaweed extract on the growth and biochemical characteristics of Tarragon (*Artemisia dracuncululus* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 41(1), 145-163. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2024.364983.3425>
- Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., & Chern, J. C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178-182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>
- Chrysargyris, A., Antoniou, O., Tzionis, A., Prasad, M., & Tzortzakis, N. (2018). Alternative soilless media using olive-mill and paper waste for growing ornamental plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(36), 35915-35927. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1187-4>
- Diao, M., Ma, L., Wang, J., Cui, J., Fu, A., & Liu, H. Y. (2014). Selenium promotes the growth and photosynthesis of tomato seedlings under salt stress by enhancing chloroplast antioxidant defense system. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33, 671-682. <https://doi.org/10.1007/s00344-014-9416-2>
- Giannopolitis, C. N., & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59(2), 309-314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
- Ghadimi, S. N., Sharifi, N., & Osanloo, M. (2020). The leishmanicidal activity of essential oils: A systematic review. *Journal of Herbmmed Pharmacology*, 9(4), 300-308.
- Ghassemi, S., & Raei, Y. (2021). Evaluation of ion content, productivity and essential oil quality of garlic under saline conditions and biochar and polyamine treatments. *Journal of Food Composition and Analysis*, 96, 103720. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103720>
- Hafez, E. M., Omara, A. E. D., Alhumaydhi, F. A., & El-Esawi, M. A. (2021). Minimizing hazard impacts of soil salinity and water stress on wheat plants by soil application of vermicompost and biochar. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 587-602. <https://doi.org/10.1111/pp1.13261>
- Inbar, J., Abramsky, M., Cohen, D., & Chet, I. (1994). Plant growth enhancement and disease control by *Trichoderma harzianum* in vegetable seedlings grown under commercial conditions. *European Journal of Plant Pathology*, 100(5), 337-346. <https://doi.org/10.1007/BF01876444>
- Jahantigh, M., Ghanbari Jahromi, M., Sefidkon, F., Diyanat, M., & Weisany, W. (2024). Co-application of biochar and selenium nanoparticles improves yield and modifies fatty acid profile and essential oil composition of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) under cadmium toxicity. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(21), 31331-31342. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33270-5>
- Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M. A., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Ibrar, D. (2024). Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: A review. *Plants*, 13, 166. <https://doi.org/10.3390/plants13020166>
- Landi, S., Polito, F., Esposito, S., Sorbo, S., Cianciullo, P., Postiglione, A., De Feo, V., Basile, A., & Maresca, V. (2025). Protective effect of *Ocimum basilicum* L. essential oil on *Lactuca sativa* L. treated with cadmium. *Plant Physiology and Biochemistry*, 219, 109437. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109437>
- MacAdam, J. W., Sharp, R. E., & Nelson, C. J. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue 1: II. spatial distribution of apoplastic peroxidase activity in genotypes differing in length of the elongation zone. *Plant Physiology*, 99(3), 879-885.
- Memari-Tabrizi, E. F., Yousefpour-Dokhanieh, A., & Babashpour-Asl, M. (2021). Foliar-applied silicon nanoparticles mitigate cadmium stress through physio-chemical changes to improve growth, antioxidant capacity, and essential oil profile of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 165, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.040>
- Mona, I. N., Gawish, S. M., Taha, T. A., & Mubarak, M. (2017). Response of wheat plants to application of selenium and humic acid under salt stress conditions. *Egyptian Journal of Soil Science*, 57, 175-187. Doi: 10.21608/ejss.2017.3715
- Nadjama Do Prado, B., Claudia B. D., Cyndi S. P., Manoel M. N., Junior, M. D., Silva, M. E., Maria, F. S., & Fabio de S. D. (2022). Application of multivariate analysis to assess stress by Cd, Pb and Al in basil (*Ocimum basilicum* L.)

- using caffeic acid, rosmarinic acid, total phenolics, total flavonoids and total dry mass in response. *Food Chemistry*, 367, 130682. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130682>
- Nasirzadeh, L., Sorkhilaleloo, B., Majidi Hervan, E., & Fatehi, F. (2021). Changes in antioxidant enzyme activities and gene expression profiles under drought stress in tolerant, intermediate, and susceptible wheat genotypes. *Cereal Research Communications*, 49(1), 83-89. <https://doi.org/10.1007/s42976>
- Najafian, S., & Zahedifar, M. (2018). Productivity, essential oil components and herbage yield of sweet basil as a function of biochar and potassium-nano chelate. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 21(4), 886-894. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1491323>
- Nawaz, M., Saleem, M. H., Khalid, M. R., Ali, B., & Fahad, S. (2024). Nitric oxide reduces cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) by modulating growth, mineral uptake, yield attributes, and antioxidant profile. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 9844-9856. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31875-4020-00085-2>
- Ouchikh, O., Chahed, T., Ksouri, R., Taarit, M. B., Faleh, H., Abdelly, C., & Marzouk, B. (2011). The effects of extraction method on the measured tocopherol level and antioxidant activity of *L. nobilis* vegetative organs. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(1), 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.04.006>
- Pandey, V., Patel, A., & Patra, D. D. (2016). Biochar ameliorates crop productivity, soil fertility, essential oil yield and aroma profiling in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Ecological Engineering*, 90, 361-366. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.020>
- Petrucelli, R., Bonetti, A., Traversi, M. L., Faraloni, C., Valagussa, M., & Pozzi, A. (2015). Influence of biochar application on nutritional quality of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Crop and Pasture Science*, 66(7), 747-755.
- Pirselova, B., Bolecek, P., & Galusova, T. (2016). Effect of cadmium and arsenic on chlorophyll fluorescence of selected soybean cultivars. *Russian Journal of Plant Physiology*, 63(4), 469-473.
- Rashwan, M., Mohammed, H. E., El-Nekeety, A. A., Hamza, Z. K., Abdel-Aziem, S. H., Hassan, N. S., & Abdel-Wahhab, M. A. (2021). Bioactive phytochemicals from *Salvia officinalis* attenuate cadmium-induced oxidative damage and genotoxicity in rats. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 68498-68512. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15407-y>
- Scherer, R., Lemos, M. F., Lemos, M. F., Martinelli, G. C., Martins, J. D. L., & da Silva, A. G. (2013). Antioxidant and antibacterial activities and composition of Brazilian spearmint (*Mentha spicata* L.). *Industrial Crops and Products*, 50, 408-413.
- Sefidkon, F., & Emami Bistgani, Z. (2021). Integrative review on ethno botany, essential oil, phytochemical, agronomy, molecular and pharmacological properties of *Satureja* species. *Journal of Essential Oil Research*, 33(2), 114-132. <https://doi.org/10.1080/10412905.2021.1885512>
- Shahpari, M., Mohammadi Torkashvand, A., & Ghanbari Jahromi, M. (2025). Silicon nanoparticles-modulated salinity stress in sage (*Salvia officinalis* L.) plants through optimizing biochemical status and essential oil yield. *Journal of Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/01904167.2025.2558891>
- Shanmugaraj, B. M., Malla, A., & Ramalingam, S. (2019). Cadmium stress and toxicity in plants: An overview. *Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants*, 1-17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00001-2>
- Shiyu, Q. I. N., Hongen, L. I. U., Zhaojun, N. I. E., Rengel, Z., Wei, G. A. O., Chang, L. I., & Peng, Z. H. A. O. (2020). Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: A review. *Pedosphere*, 30(2), 168-180.
- Speratti, A. B., Johnson, M. S., Sousa, H. M., Dalmagro, H. J., & Couto, E. G. (2018). Biochars from local agricultural waste residues contribute to soil quality and plant growth in a Cerrado region (Brazil) Arenosol. *GCB Bioenergy*, 10(4), 272-286. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12489>
- Tousi, S., Zoufan, P., & Ghahfarrokhi, A. R. (2020). Alleviation of cadmium-induced phytotoxicity and growth improvement by exogenous melatonin pretreatment in mallow (*Malva parviflora*) plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206, 111403. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111403>
- Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L., & Bi, J. (2018). A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 642, 690-700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.068>
- Yizong, H., Ying, H., & Yunxia, L. (2009). Combined toxicity of copper and cadmium to six rice genotypes (*Oryza sativa* L.). *Environmental Sciences*, 21, 647-653.
- Yusupova, Z. A., Baratjon ogli, S. F., & Abduqunduzovna, M. Z. (2023). Medicinal plants growing in our republic medicinal properties. *Periodica Journal of Modern Philosophy, Social Sciences and Humanities*, 15, 5-7.
- Zhu, Y., Wang, H., Lv, X., Zhang, Y., & Wang, W. (2020). Effects of biochar and biofertilizer on cadmium-contaminated cotton growth and the anti-oxidative defense system. *Scientific Reports*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77142-7>

The effect of selenium and biochar on the growth and biochemical characteristics of savory (*Satureja hortensis* L.) under oxidative stress induced by cadmium

Sajedah-Saddat Tabatabaie¹, Marzieh Ghanbari Jahromi^{1*}, Weria Weisany²

¹ Department of Horticultural Science, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Agricultural Science, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

This experiment was conducted in 2022 to evaluate selenium and biochar application on reducing oxidative stress caused by cadmium in savory (*Satureja hortensis* L.) as a factorial experiment in a completely randomized design with three replications. The research treatments included cadmium at three levels (0 (control), 10, and 20 mg.kg⁻¹ soil), biochar at two levels (0 and 5% of pot v/v), and selenium at three levels (0, 5, and 10 mg.l⁻¹). The results of the present study indicated that biochar and selenium interaction increased total phenol, and cadmium at medium levels had the greatest effect on increasing total phenol. The interaction application of biochar and selenium 10 mg.l⁻¹ and cadmium 10 mg.kg⁻¹ as well as biochar and selenium 5 mg.l⁻¹ and cadmium 10 mg.kg⁻¹ increased total phenols by 49.23 and 49.53%, respectively, compared to the control. Based on the results of the comparison of the average interaction effect of cadmium and selenium, cadmium 10 mg.kg⁻¹ and selenium control, as well as cadmium control and selenium 10 mg.l⁻¹ increased flavonoids by 50.21% and 48.66% compared to the cadmium 20 mg.kg⁻¹ and selenium control treatments. The highest superoxide dismutase enzyme activity, with 9 enzyme units per mg protein, was obtained in the treatment of 20 mg.kg⁻¹ cadmium without biochar and selenium application. Selenium and biochar reduced the activity of the superoxide dismutase enzyme in cadmium-stressed treatments. In general, simultaneous application of 5% v/v biochar with 5-10 mg.l⁻¹ selenium was an important modifier of cadmium stress (moderate stress) in summer savory.

Keywords: Superoxide dismutase enzyme, Catalase enzyme, Essential oil yield, Cadmium, Summer savory

Received: Jan. 29, 2025; Revised: Jul. 11, 2025; Accepted: Sep. 08, 2025; Published Online: May. 02, 2026

*Corresponding Author: ghanbari@iau.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.