مقاله پژوهشی

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 به‌صورت 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 به‌ترتیب 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 کادمیوم و سلنیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش فلانوئید با مقادیر ۵۰/۲۱ درصد و ۴۸/۶۶ درصد نسبت به تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلنیوم شد. بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با ۹ واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بدون کاربرد بیوچار و سلنیوم به دست آمد. سلینوم 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/

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

مقدمه

گیاهان دارویی به‌دلیل 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 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. علاوه‌براین، 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). علاوه‌براین، 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 آلوده‌شدن 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 به‌شدت کاهش می‌یابد و مواد تجمع یافته خود را در زنجیره غذایی ما وارد می‌نمایند (Rashwan *et al*., 2021; Landi *et al*., 2025). بیوچار با بهبود شرایط خاک تحمل گیاه به تنش کادمیم را افزایش می‌دهد (Jahantigh *et al*., 2024). مطالعه‌ای در رابطه با اهمیت بیوچار 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 بیوچار به عنوان یک اصلاح‌کننده خاک و کاربرد سلنیوم به عنوان یک عنصر مهم در مقابله با تنش‌های محیطی بر گیاه مرزه تحت تنش کادمیوم اجرا شد.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌منظور 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 بذرها ضدعفونی و در گلدان‌های ۳ لیتری حاوی خاک کشاورزی، خاک‌برگ 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 چهار برگی به صورت محلول‌پاشی با فواصل ۱۵ روزه در سه نوبت استفاده شد. محلول‌پاشی به صورت اسپری بر گیاهان طبق غلظت‌های مشخص انجام شد، به‌طوری‌که کل گیاه خیس شود. گیاهان شاهد با آب‌مقطر 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 کادمیوم از نمک سولفات کادمیوم ($CdSO_4$) 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 حدامکان 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 به‌دست آمد (Inbar *et al.*, 1994).

اندازه‌گیری میزان محتوای کلروفیل با روش Arnon (۱۹۴۹) انجام شد. بدین ترتیب که ابتدا ۰/۱ گرم نمونه برگی 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 به‌مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۵۰۰۰ × g صاف شد. از دستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV-160) برای اندازه‌گیری میزان جذب نمونه‌ها استفاده شد. میزان جذب عصاره استخراج‌شده در طول‌موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر با دستگاه اسپکتوفتومتر خوانده گردید و با استفاده از (رابطه ۱) و بر حسب میلی‌گرم کلروفیل کل در هر گرم برگ تر محاسبه شد.

رابطه ۱

$$Chl\ a = [(20.2\times A645) + (8.02\times A663)]\times V / 1000\times W$$

در رابطه‌های بالا، A میزان جذب در طول‌موج موردنظر، V حجم نهایی استون ۸۰ درصد برحسب میلی‌لیتر و W اندازه برگ تازه برحسب گرم است.

برای استخراج آنزیم‌ها ۳ گرم از نمونه‌های گیاهی در هاون چینی با ازت مایع خرد و به‌صورت 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها

کادمیوم	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	نیتروژن کل	کربن آلی	بافت خاک	هدایت الکتریکی	اسیدیته
	(میلی‌گرم بر کیلوگرم)		(درصد)			(دسی‌زیمنس بر متر)	
۰/۰۵۷	۱۵/۳	۲۲۵	۰/۱۱	۰/٦۷	لومی- رسی	۱/۲	٦/۸

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی بیوچار استفاده‌شده

ماده آلی	کربن آلی	نیتروژن	سدیم	پتاسیم	فسفر	هدایت الکتریکی	اسیدیته
(درصد)						(دسی‌زیمنس بر متر)	
۹۱/٦	۷۵/۸	۰/٤۵	۰/۵۲۰	۲۰	۰/۳۷۰	۳۷/۵	۹/۵

اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۲٤۰ 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، ریبوفلاوین 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 فلوئورسنت به‌عنوان شاهد قرار داده شد. هر دو دقیقه یک بار جذب محلول در حالت Photometric و طول‌موج ۵٦۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر 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 اسپکتروفتومتر، با روش Ouchikh و همکاران (۲۰۱۱) اندازه‌گیری شد. در این آزمایش ۲ گرم از نمونه به همراه ۸ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد هموژن شده و در دور ۱۲۰۰۰ به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. جذب نمونه‌ها نیز در طول‌موج ۷۲۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر 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 طول‌موج ٤۱۵ 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، بیوچار، سلنیوم و اثر متقابل کادمیوم در بیوچار 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 بیوچار سبب تعدیل تنش کادمیم شد به‌طوری‌که در تیمار کادمیم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و بدون بیوچار کمترین مقدار وزن تر اندام هوایی (۵/۲٤ گرم) را نشان داد. کاربرد بیوچار سبب افزایش وزن تر اندام هوایی (۹/٦۲ گرم) در گیاهان بدون تنش کادمیم شدند

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات وزن تر و خشک اندم 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	عملکرد اسانس
تکرار	۲	۱/۶۲**	۰/۶۸**	۰/۰۱۹۴**	۱۱۷/۱**
کادمیم	۲	۶۲/۱۲**	۶/۹۴**	۰/۱۷۰۶**	۷۰۳/۰۲**
بیوچار	۱	۵/۸۰**	۱/۷۴**	۰/۰۲۲۴**	۲۲۴/۹**
سلنیوم	۲	۰/۳۹**	۰/۴۱**	۰/۰۰۳۱**	۴۵/۰۱**
کادمیم × بیوچار	۲	۰/۴۸**	۰/۰۴**	۰/۰۰۰۶^{ns}	۶/۲**
کادمیم × سلنیوم	۴	۰/۱۱**	۰/۰۲*	۰/۰۰۰۷^{ns}	۱/۷^{ns}
بیوچار × سلینیوم	۲	۰/۰۷^{ns}	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۱**	۰/۲^{ns}
کادمیم ×بیوچار× سلنیوم	۴	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۰۲۴**	۱/۱^{ns}
خطا	۳۴	۰/۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱۹	۱/۱۱
ضریب تغییرات	-	۶/۲۶	۸/۲۲	۵/۶۱	۴/۶۳

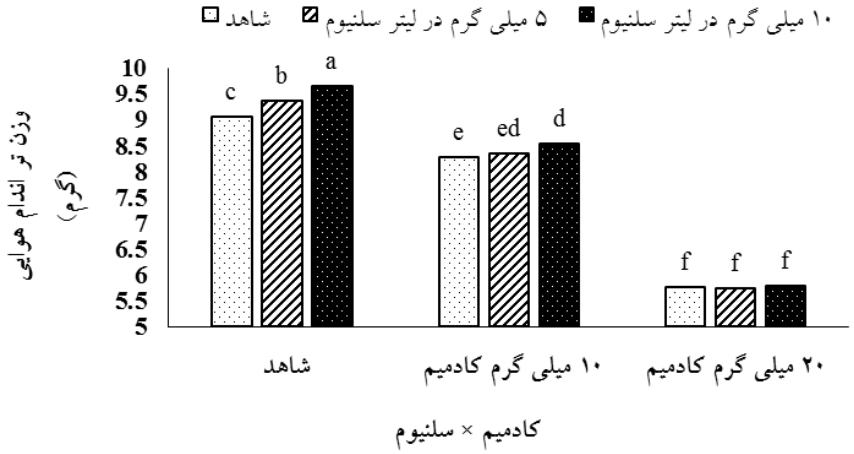
** بیانگر معنی‌داری در سطح ۱ درصد، * بیانگر معنی‌داری در سطح ۵ درصد و ns بیانگر عدم معنی‌داری

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

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

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم در بیوچار نشان داد که کاربرد بیوچار سبب تعدیل تنش کادمیم شد و کاربرد کادمیوم وزن خشک اندام هوایی را کاهش داد. به‌طوری‌که کمترین مقدار وزن خشک اندام هوایی (۱/۸ گرم) در گیاهان شاهد بیوچار و کادمیم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد. بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی (۳/۴۷) مربوط به تیمار شاهد کادمیوم 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]



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

میلی‌گرم در لیتر در تیمار شاهد کادمیوم بود. همچنین کمترین مقدار وزن خشک اندام هوایی (۱/۸۵ گرم) مربوط به تیمار کادمیم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلنیوم 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 همکارن (۲۰۲٤) نشان دادند ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیم سبب کاهش معنی‌دار وزن دانه رازیانه شد به‌طوری‌که کاربرد بیوچار 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

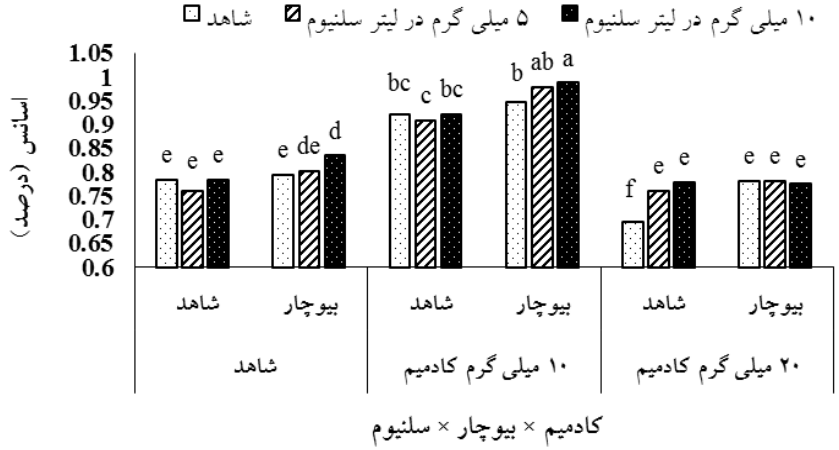
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

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 بیوچار 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 بیوچار 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).

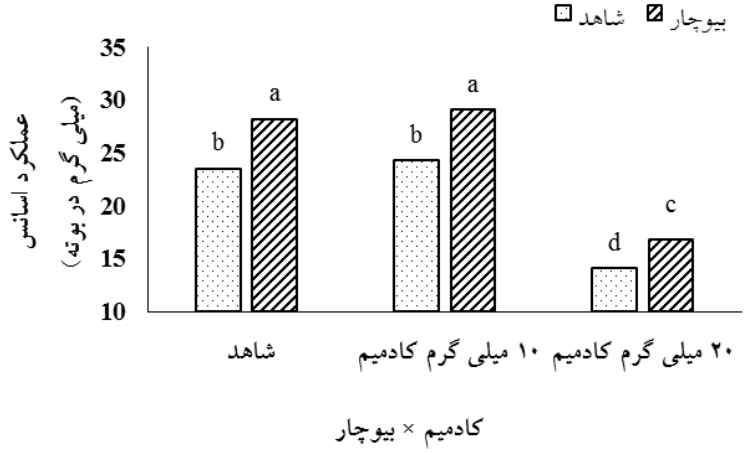
مقدار و عملکرد اسانس: طبق نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیوم، بیوچار و سلنیوم در سطح احتمال یک درصد در مقدار و عملکرد اسانس معنی‌دار شد. اثر بیوچار و سلنیوم و همچنین اثر سه‌گانه کادمیم، بیوچار و سلنیوم بر درصد اسانس معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل کادمیوم و بیوچار نیز بر عملکرد اسانس در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. نتایج اثر متقابل سه‌گانه تیمارها نشان داد که بیوچار 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 بیوچار + سلنیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر+ کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و بیوچار + سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر+ کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. کمترین مقدار این شاخص نیز (۰/٦۹ درصد) در تیمار شاهد سلنیوم و بیوچار در کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد (شکل ٤). نتایج اثر متقابل کادمیوم در بیوچار نشان داد که بیوچار 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 بیوچار و کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و همچنین تیمار بیوچار 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 بیوچار 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 (۲۰۲٤) 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 بیوچار 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).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]



شکل ٤- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم، بیوچار و سلنیوم بر درصد اسانس مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارهاست.



شکل ٥- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و بیوچار بر عملکرد اسانس مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است.

کاتالاز: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر بیوچار، کادمیوم و سلنیوم و همچنین اثرات دوگانه و سه‌گانه تیمارها بر فعالیت آنزیم کاتالاز برگ معنی‌دار شد (جدول ٤). بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز با ۰/٤۹ واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین در تیمار ۲۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم بدون کاربرد بیوچار و سلنیوم بدست آمد. سلنوم 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 ٦). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان خط مقدم 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 به‌طورکلی 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).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

جدول ٤- 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	فلاونوئید
تکرار	۲	۰/۰۱۵**	۰/۷۱**	۵۵/۸۱**	۱۸/٦۸**
کادمیم	۲	۰/۱۸۳**	۲٦/۵۲**	۱۱۵/٦۳**	٦۵/۲٤**
بیوچار	۱	۰/۰۳۷**	٦/۵۵**	۱۲۱/۲**	۲۳/٦**
سلنیوم	۲	۰/۰۰۸**	۱/۸۸**	۷۰/۲۲**	۹/۳۹**
کادمیم × بیوچار	۲	۰/۰۱۱**	۱/۹۳**	٦/٦۹**	۵/٦**
کادمیم × سلنیوم	٤	۰/۰۰۳**	۱/۱٦**	۳/۹۱**	۱۲/٤۳**
بیوچار × سلینیوم	۲	۰/۰۰٦**	۰/۷٤**	۰/۳۸**	۰/۳٤ns
کادمیم ×بیوچار× سلنیوم	٤	۰/۰۰۲**	۰/۳٤**	۳/۸۳**	۰/۷۵ns
خطا	۳٤	۰/۰۰۰۱	۰/۰۲۵	۰/۳۱	۰/۳۵
ضریب تغییرات	-	۵/۷۳	۸/۲۸	۸/۱٤	۳/۷٦

** بیانگر معنی‌داری در سطح ۱ درصد، * بیانگر معنی‌داری در سطح ۵ درصد و ns بیانگر عدم معنی‌داری

شکل ٦- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم، بیوچار و سلنیوم بر کاتالاز مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است.

تنش کادمیم سبب افزایش کاتالاز می‌شود که به دلیل افزایش این آنزیم اکسیداسیون دامنه وسیعی از ترکیبات آلی و معدنی در حضور پراکسیداسیون تولیدشده 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 شاهد کاهش می‌یابد. همچنین بیوچار با بهبود شرایط خاک، تحمل گیاه به تنش کادمیم با کاهش آنزیم کاتالاز می‌شود (Jahantigh*et al*., 2024).

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

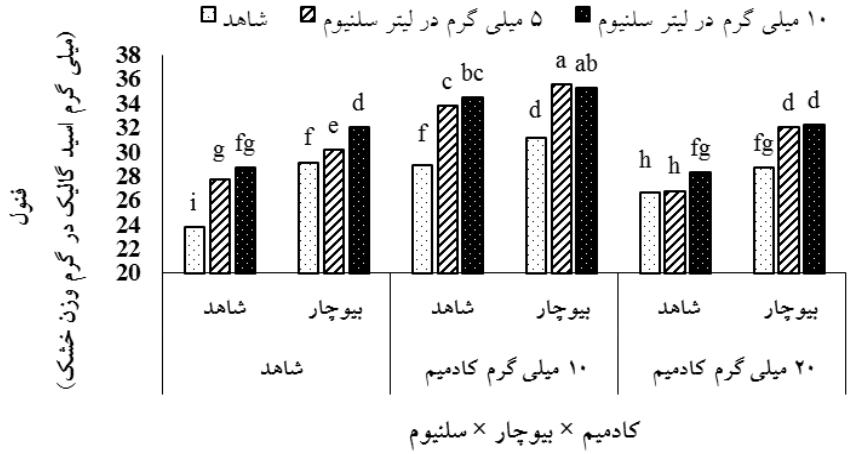
شکل ۷- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم، بیوچار و سلنیوم بر فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است.

معنی‌دار شد (جدول ٤). بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با ۹ واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین در تیمار ۲۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بدون کاربرد بیوچار و سلنیوم بدست آمد. سلینوم و بیوچار سبب کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تیمارهای تحت تنش کادمیم شدند. در تیمار تنش شدید کادمیم بدون کاربرد سلنیوم، بیوچار سبب کاهش ۲٦ درصدی فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز شد (شکل ۷). سوپراکسید دیسموتاز اولین خط دفاعی گیاه در 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 تحقیقی مشابه روی گیاه کتان افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز تحت تنش کادمیم و کاربرد بیوچار گزارش شده است.

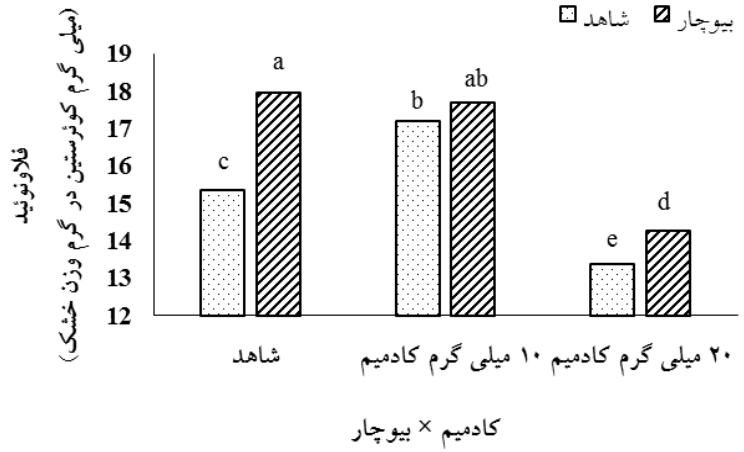
فنول و فلاونوئید کل: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کادمیم، بیوچار و سلنیوم و همچنین اثرات دوگانه و سه‌گانه تیمارها بر فنول معنی‌دار شد. اثر اصلی کادمیم، بیوچار و سلنیوم و اثر متقابل کادمیم و بیوچار و همچنین کادمیم و سلنیوم بر فلاونوئید کل معنی‌دار شد (جدول ٤). نتایج اثر متقابل سه‌گانه تیمارها بر فنول کل نشان داد که در کل بیوچار و سلنیوم سبب افزایش فنول کل شدند و کادمیم در سطح متوسط بیشترین تأثیر بر افزایش فنول کل داشت. تیمارهای کاربرد بیوچار و سلنیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و کادمیم ۱۰ میلی‌گرم و همچنین بیوچار و سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر و کادمیم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب سبب افزایش ٤۹/۲۳ و ٤۹/۵۳ درصدی فنول کل نسبت به شاهد شدند. در شرایط عدم تنش کادمیم و بدون کاربرد بیوچار، سلنیوم ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب سبب افزایش ۱٦ و ۲۰ درصدی فنول کل شدند (شکل ۸).

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیم و بیوچار نشان داد که بیشترین مقدار کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم و بیوچار و همچنین شاهد کادمیوم و بیچار به ترتیب سبب افزایش ۳۲/۲۳ درصدی و ۳٤/۱۸ درصدی فلاونوئید کل نسبت به تیمار کادمیوم ۲۰

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]



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



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

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 کادمیوم و سلنیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش فلانوئید با مقادیر ۵۰/۲۱ درصد و ٤٨/٦٦ درصد نسبت به تیمار کادمیوم 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 (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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

شکل ۱۰- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و سلنیوم بر فلاونوئید کل مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*). حروف مشابه بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار 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; Petruccelli *et al.*, 2015; Speratti *et al.*, 2018). در تحقیقات دیگر گزارش شده است که کاربرد بیوچار به‌طور قابل توجهی فلاونوئیدهای کل و قند کل ریحان 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).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که کادمیم به ویژه در 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 سلنیوم ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر بین اکثر صفات مشاهده نشد، ولی هر دو سطح به طور 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 سلنیوم به‌دست آمد. بیوچار و سلنیوم اثرات منفی ناشی از تنش متوسط کادمیوم را بهبود بخشیدند. بر این اساس، کاربرد توأم تیمارهای بیوچار، سلنیوم ۱۰ و ۵ میلی‌گرم در لیتر و کادمیم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ٤٩ درصد فنول کل را نسبت به شاهد افزایش دادند. اثر متقابل کادمیم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلنیوم و همچنین تیمارهای شاهد کادمیوم و سلنیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش فلانوئید با مقادیر ۵۰/۲۱ درصد و ٤٨/٦٦ درصد نسبت به تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و شاهد سلنیوم شدند. بنابراین می‌توان برای کاهش اثرات منفی ناشی از تنش کادمیوم کاربرد بیوچار و محلول‌پاشی سلنیوم را توصیه کرد.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

منابع

Agegnehu, 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., Esmaielpour, 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 dracunculus* 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 Herbmed 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/ppl.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.)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

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

Petruccelli, 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., & Ghahfarrokhie, 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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]

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

Sajedeh-Saddat Tabatabaie[1], Marzieh Ghanbari Jahromi[1*], Weria Weisany[2]

[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 $mg.1^{-1}$). 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 $mg.1^{-1}$ and cadmium 10 $mg.kg^{-1}$ as well as biochar and selenium 5 $mg.1^{-1}$ 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 $mg.1^{-1}$ 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.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-05-27]