

اثر سلنیوم و بیوچار بر برخی صفات عملکرد کمی و کیفی مرزه (*Satureja hortensis* L.) در

شرایط تنش کادمیم

ساجده سادات طباطبائی^۱، مرضیه قنبری جهرمی^۲، وریا ویسانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی و زراعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه علوم باغبانی و زراعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استاد، گروه علوم باغبانی و زراعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: ghanbari_mz@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱۹ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹)

چکیده

تنش فلزات سنگین از جمله کادمیم یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان می‌باشد. بدین منظور آزمایشی جهت بررسی تاثیر تغذیه سلنیوم و کاربرد بیوچار بر کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیم در گیاه مرزه (*Satureja hortensis* L.) در سال ۱۴۰۱ انجام شد. مطالعه حاضر به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. تیمارهای پژوهش شامل کادمیم در سه سطح (۰ (شاهد)، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک)، بیوچار در دو سطح (۰ و ۵ درصد حجم گلدان) و سلنیوم در سه سطح (۰، ۵ و ۱۰ میلی گرم در لیتر) بود. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که تنش کادمیم به ویژه ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک سبب کاهش معنی دار وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، محتوای نسبی آب برگ و محتوای کلروفیل شد. از طرفی دیگر، تنش کادمیم سبب کاهش کلروفیل *a* نسبت به شاهد شد به طویکه کادمیم ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر به ترتیب سبب کاهش ۷ و ۲۹ درصدی کلروفیل *a* را نسبت به شاهد به همراه داشت. نتایج کلی نشان داد که کاربرد همزمان بیوچار ۵ درصد حجمی همراه با سلنیوم ۵-۱۰ میلی گرم در لیتر از تعدیل کننده‌های مهم تنش کادمیم در گیاه مرزه تابستانه بود.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، سلنیوم، عملکرد اسانس، کادمیم، مرزه تابستانه

مقدمه

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین مسائل محیط‌زیست در سرتاسر جهان محسوب می‌شود و از آنجایی که آلودگی فلزات سنگین منجر به کاهش کیفیت محصولات کشاورزی و از طرفی تهدیدی جدی برای سلامت انسان به شمار می‌رود، لذا از جنبه‌های زیست-محیطی آن بسیار حائز اهمیت است (Awa et al., 2021; Yang et al., 2018). کادمیم به عنوان یک عنصر غیرضروری و یک آلاینده بسیار متحرک در نظر گرفته می‌شود که به راحتی وارد سبزیجات می‌شود و می‌تواند وارد چندین فرآیند حیاتی گیاه شده و در نتیجه منجر به رشد ضعیف، عملکرد اقتصادی پایین گیاهان و تهدید سلامتی انسان‌ها می‌شود. کادمیم به عنوان ماده‌ای سرطان‌زا در ایجاد اغلب سرطان‌ها شناخته شده‌است و یکی از عوامل مهم تاثیرگذار در ایجاد بیماری‌های قلبی و فشار خون است (Rezania et al., 2016). در شرایط سخت تنش‌های محیطی مانند آلاینده‌ها، استفاده از سیستم‌های محرک‌های رشد با القای ژن‌های مسئول در تنش خشکی موجب کاهش خسارات ناشی از شرایط نامساعد گیاهی می‌گردد (Nasirzadeh et al., 2020).

بیوپچار یک اصلاح کننده مهم خاک است که از دو واژه بیو به مفهوم زیستی و چار، به معنی زغال مشتق شده است و به‌عنوان یک ماده با منشاء آلی در سال‌های اخیر متداول گردیده و در ارتباط با مدیریت پایدار خاک و نیز توقف کربن خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sohi et al., 2009). بیوپچار به خنثی کردن اسیدیته خاک‌های اسیدی و آماده کردن شرایط برای فعالیت بیشتر ریزجانداران و جلوگیری از آبشویی عناصر غذایی نیز کمک می‌کند. یکی دیگر از مزایای بیوپچار این است که

توانایی کاهش اثر منفی آلودگی‌های آلی و معدنی خاک را داراست (Karami et al., 2011). اهمیت بیوپچار به عنوان یک کاهش دهنده 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 (Shiyu et al., 2020). محققان نشان دادند ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیم سبب کاهش معنی‌دار وزن گیاه زرشک شد، به طوریکه کاربرد بیوپچار با تعدیل تنش کادمیم سبب بهبود رشد گیاه گردید (Khosropour et al., 2021). کاربرد بیوپچار به عنوان اصلاح کننده خاک به ترکیب فیزیکی و شیمیایی آن از جمله نوع ماده اولیه مصرفی، سطح ویژه و تخلخل بستگی دارد (Zhang et al., 2020).

سلنیوم از عناصر کمیاب سطح این سیاره است و از نقره نادرتر است که به عنوان مشتقات متیل در جو وجود دارد. نقش مهم سلنیوم در کاهش اثرات تنش کادمیم و تغییر در غلظت کادمیم برگ و ریشه گزارش شده است (Nasirzadeh et al., 2022). سلنیوم نقش محافظتی و آنتی اکسیدانی در کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از دما، خشکسالی، شوری، استرس مکانیکی، اشعه ماوراء بنفش، عوامل بیماری‌زا و فلزات سنگین دارد. همچنین، سلنیوم با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه از طریق افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و آنتی اکسیدان‌های غیرآنزیمی، تنش را بهبود می‌بخشد (Ahangarnezhad et al., 2019; Azarmdel et al., 2020; Momeny et al., 2020; Pandey & Gupta, 2015). سلنیوم احتمالاً از طریق افزایش میزان نشاسته در کلروپلاست‌ها، رشد گیاه را افزایش داده و به دلیل خاصیت آنتی‌اکسیدانی از غشای سلول گیاهی در برابر

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌منظور بررسی اثر بیوچار و سلنیوم در شرایط تنش کادمیم در سال ۱۴۰۱ در مجتمع گلخانه‌ای دانشگاه تهران با فتوپریود ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی، رطوبت نسبی ۶۵ تا ۸۰ درصد، حداکثر دما ۲۹ و حداقل دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد در شهرستان کرج انجام گرفت. در ۲۰ فروردین ۱۴۰۱ بذرهای مرزه تابستانه کشت و پس از ۱۰۰ روز برداشت شدند. بذرهای مرزه (تهیه شده از شرکت پاکان بذر) ضد عفونی و در گلدان‌های ۳ لیتری حاوی خاک کشاورزی، خاک برگ و ماسه کشت شدند. مطالعه حاضر به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار صورت گرفت. تیمارها پژوهش شامل کادمیم در سه سطح (۰، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) که با خاک بستر کشت مخلوط شد. همچنین بیوچار در دو سطح (۰ و ۵ درصد حجم گلدان) اعمال شد. سلنیوم به صورت سلنات سدیم (Na_2SeO_4) در سه سطح (۰، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر) در مرحله ۴ برگ‌ریزی به صورت محلول‌پاشی با فواصل ۱۵ روزه در سه نوبت استفاده شد. قبل از کشت نمونه‌ای خاک (جدول ۱) و نمونه‌ای از بیوچار (جدول ۲) جهت بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه ارسال شد.

تنش اکسیداتیو حفاظت می‌کند. افزایش عملکرد گیاه با کاربرد سلنیوم در تعدیل تنش کادمیم توسط (Babashpour et al. 2022) روی گیاه گشنیز گزارش شد.

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). مهدی-زاده و همکاران (۱۳۹۷)، گزارش دادند که تنش شوری با اختلال در میزان جذب پتاسیم و کاهش نسبت پتاسیم به سدیم گیاه سبب کاهش صفات رشدی مرزه شد و بیوچار با جذب یون‌های نمک سبب بهبود صفات رشدی مرزه تابستانه در تیمارهای شوری گردید. تاکنون 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 کادمیم اجرا شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها

نیترژن کل (%)	فسفر قابل جذب (mg/kg)	پتاسیم قابل جذب (mg/kg)	کربن آلی (%)	بافت خاک	هدایت الکتریکی (ds/m)	pH
۰/۱۱	۱۵/۳	۲۲۵	۰/۶۷	لومی-رسی	۱/۲	۶/۸

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی بیوچار استفاده شده

ماده آلی (%)	کربن آلی (%)	نیترژن (%)	سدیم (%)	پتاسیم (%)	فسفر (%)	هدایت الکتریکی	pH
--------------	--------------	------------	----------	------------	----------	----------------	----

(ds/m)							
۹/۵	۳۷/۵	۰/۳۷۰	۲۰	۰/۵۲۰	۰/۴۵	۷۵/۸	۹۱/۶

وزن LiBROR AEL مدل 40SM با دقت ۰/۰۰۰۱ وزن گردید. سپس برگ‌های هر تیمار به طور جداگانه در لوله آزمایش درب دار حاوی آب مقطر برای مدت ۴ تا ۵ ساعت غوطه‌ور گردیدند و برگ‌ها را پس از گذشت این مدت، از لوله آزمایش خارج و با استفاده از کاغذ صافی خشک گردیدند، و مجدداً توزین شدند. تا وزن آن‌ها در حالت تورژسانس کامل به‌دست آید. برای محاسبه وزن خشک، برگ‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و سپس وزن گردیدند. محتوای نسبی آب برگ از رابطه زیر محاسبه شد، که در آن FW، وزن تر برگ؛ DW، وزن خشک برگ و TW وزن اشباع برگ می‌باشد (Ritchie et al., 1990).

$$RWC = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100$$

کلیه داده‌های به‌دست آمده حاصل از اندازه‌گیری متغیرها با نرم‌افزار آماری SAS (Ver 9.3) آنالیز شد. مقایسه میانگین داده‌ها در سطح معنی‌دار ۱ درصد با آزمون LSD بررسی شد. رسم شکل‌ها در نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

صفات وزنی

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که اثر اصلی کادمیم، اثر بیوچار در سطح احتمال ۱ درصد بر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل کادمیم و بیوچار روی تمامی صفات به جز وزن خشک ریشه معنی‌دار شد. اثر متقابل کادمیم و سلتیوم بر

در پایان دوره رویشی گیاه، صفات مورفولوژیکی و محتوای کلروفیل اندازه‌گیری شدند. وزن تر اندام هوایی و ریشه پس از برداشت با ترازوی دیجیتال Digital scale با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شد. برای اندازه‌گیری اندام هوایی، گیاه کشت‌شده در هر گلدن از یقه توسط قیچی قطع شد و تمام قسمت‌های هوایی گیاه (ساقه، گل و برگ) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ریشه، ریشه‌ها به آرامی از خاک جدا شده و با ترازوی دیجیتال وزن شدند. پس از خشک کردن اندام هوایی و ریشه گیاه در دستگاه آون در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، وزن خشک آنها با ترازوی دیجیتال Digital scale با دقت ۰/۰۱ گرم به‌دست آمد (Inbar et al., 1994). اندازه‌گیری میزان محتوای کلروفیل با روش Arnon (1949) انجام شد. بدین ترتیب که ابتدا ۰/۱ گرم نمونه برگی گیاهان را در هاون چینی با ۳ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد کاملاً ساییده شد و حجم نهایی عصاره به ۱۵ میلی‌لیتر رسید. سپس عصاره با استفاده از سانتریفیوژ به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت $g \times 5000$ صاف شد. از دستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV-160) برای اندازه‌گیری میزان جذب نمونه‌ها استفاده شد. ابتدا دستگاه با استون ۸۰ درصد صفر شده و سپس میزان جذب عصاره استخراج شده در طول موج‌های ۶۴۵ نانومتر و ۶۶۳ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید.

برای اندازه‌گیری این پارامتر جواترین برگ تکامل یافته گیاه جدا و به سرعت با ترازوی دقیق آزمایشگاهی

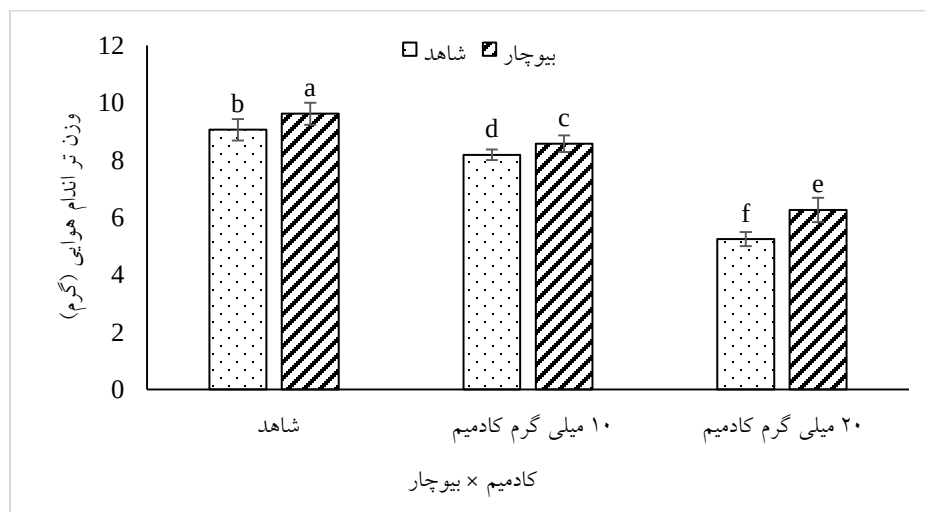
کاربرد بیوچار سبب افزایش وزن تر اندام هوایی در گیاهان تحت تنش شدید کادمیم (۹/۶۲ گرم) شدند (شکل ۱). برای اثر متقابل کادمیم و سلیوم، بیشترین مقدار وزن تر اندام هوایی (۹/۶۳ گرم) در تیمار عدم تنش کادمیم با کاربرد سلیوم ۱۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد (شکل ۲).

وزن تر و خشک اندام هوایی گیاه معنی دار شد در حالی- که اثر متقابل بیوچار و سلیوم فقط بر وزن خشک ریشه معنی دار شد. اثرات سه گانه نیز فقط بر وزن تر ریشه معنی دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد بیوچار سبب تعدیل تنش کادمیم شد به طوری که در گیاهان بدون تیمار با بیوچار کادمیم کمترین مقدار (۵/۲۴ گرم) وزن تر اندام هوایی را نشان داد ولی

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*) تحت تاثیر کادمیم، بیوچار و سلیوم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه
تکرار	۲	۱/۶۲**	۰/۶۸**	۰/۵۳۷**	۰/۰۴۹**
کادمیم	۲	۶۲/۱۲**	۶/۹۴**	۵/۲۴**	۰/۷۵**
بیوچار	۱	۵/۸۰**	۱/۷۴**	۱/۵۳**	۰/۱۴۶**
سلیوم	۲	۰/۳۹**	۰/۴۱**	۰/۰۲۷**	۰/۰۰۱ ^{NS}
کادمیم × بیوچار	۲	۰/۴۸**	۰/۰۴**	۰/۰۴۸**	۰/۰۰۴ ^{NS}
کادمیم × سلیوم	۴	۰/۱۱**	۰/۰۲*	۰/۰۰۵ ^{NS}	۰/۰۰۱ ^{NS}
بیوچار × سلیوم	۲	۰/۰۷ ^{NS}	۰/۰۰۱ ^{NS}	۰/۰۱۴ ^{NS}	۰/۰۰۹**
کادمیم × بیوچار × سلیوم	۴	۰/۰۲ ^{NS}	۰/۰۱ ^{NS}	۰/۰۱۸*	۰/۰۰۲ ^{NS}
خطا	۳۴	۰/۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳
ضریب تغییرات	-	۲/۲۶	۲/۸۲	۳/۰۱	۵/۹۳

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



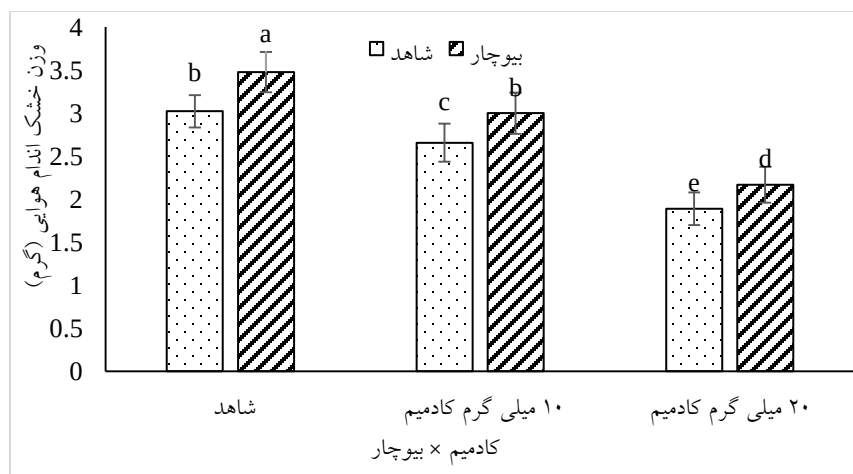
شکل ۱- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و بیوچار بر وزن تر اندام هوایی مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*)



شکل ۲- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم، بیوچار و سلیوم بر وزن تر اندام هوایی مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*).

برای اثر متقابل کادمیم و سلیوم، بیشترین مقدار وزن خشک اندام از ۱/۸۵ گرم در تیمار ۲۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بدون سلیوم تا ۳/۳۱ گرم در تیمار عدم تنش کادمیم با کاربرد سلیوم ۱۰ میلی گرم در لیتر بدست آمد (شکل ۴).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد بیوچار سبب تعدیل تنش کادمیم شد به طوریکه در گیاهان بدون تیمار با بیوچار کادمیم سبب کاهش وزن تر اندام هوایی شد (۱/۸ گرم) ولی کاربرد بیوچار سبب افزایش (۳/۴۷ گرم) وزن تر اندام هوایی در گیاهان تحت تنش شدید کادمیم (۲۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) شدند (شکل ۳).



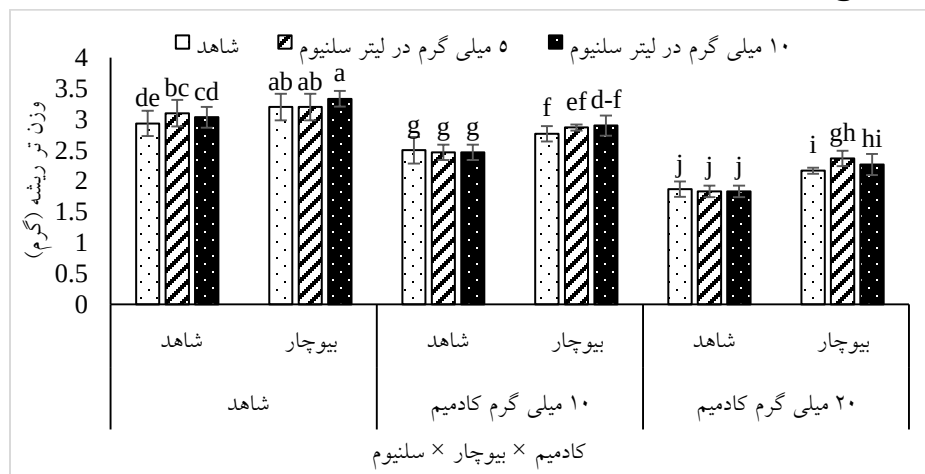
شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و بیوچار بر وزن خشک اندام هوایی مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*).



شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و سلیوم بر وزن خشک اندام هوایی مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*).

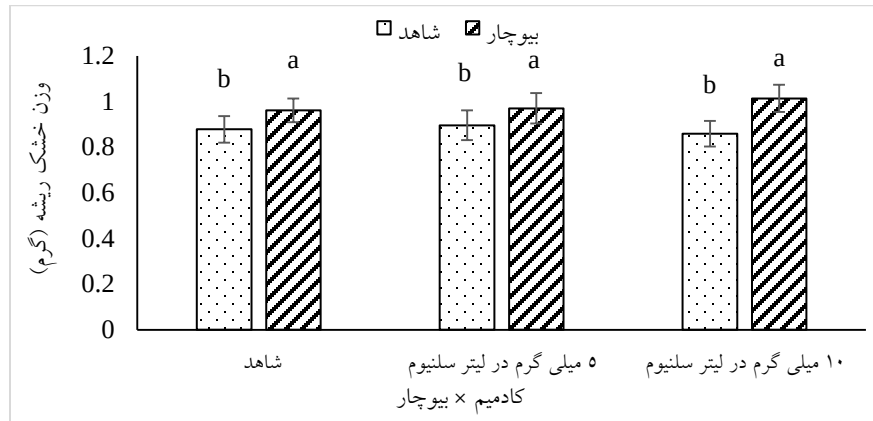
در تیمارهای بدون کاربرد بیوچار و سلیوم، وزن تر ریشه تحت تنش شدید کادمیم موجب کاهش (۱/۸۳ گرم) شد. اما بیوچار با نقش مثبت سبب کاهش تنش شد به طوریکه وزن تر ریشه در گیاهان تحت بیوچار افزایش ۱۶ درصدی (۳/۳۳ گرم) نسبت به عدم بیوچار در شرایط تنش شدید کادمیم و بدون سلیوم نشان دادند. برای سلیوم، افزایش ۹ و ۵ درصدی وزن تر ریشه با کاربرد ۵ و ۱۰ میلی گرم در لیتر سلیوم در گیاهان تحت تنش شدید کادمیم و تیمار با بیوچار مشاهده شد (شکل ۵).

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 Khosropour *et al.* (2022) نشان دادند ۲۰ میلی گرم در لیتر کادمیم سبب کاهش معنی‌دار وزن گیاه زرشک شد به طوریکه کاربرد بیوچار با تعدیل تنش کادمیم سبب بهبود رشد گیاه شد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که



شکل ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم، بیوچار و سلیوم بر وزن تر ریشه مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*).

نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیوم و سلنیوم نشان داد که تنش کادمیم سبب کاهش وزن خشک ریشه شد که کادمیم ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر به ترتیب سبب کاهش ۱۴ و ۳۶ درصدی وزن خشک ریشه گیاه شد (شکل ۶).



شکل ۶- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و بیوچار بر وزن خشک ریشه مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*).

ریشه گشنیز با کاربرد نانوذرات سلنیوم تحت تنش کادمیم گزارش شده است (Babashpour-Asl et al., 2022) که همسو با تحقیق حاضر است.

کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کادمیم، بیوچار و سلنیوم بر کلروفیل *a*، کلروفیل *b* و محتوای نسبی آب برگ معنی دار شد. اثر متقابل کادمیم و سلنیوم بر کلروفیل *b* معنی دار شد در حالیکه اثر متقابل بیوچار و سلنیوم بر کلروفیل *a* و محتوای نسبی آب برگ معنی دار شد (جدول ۴).

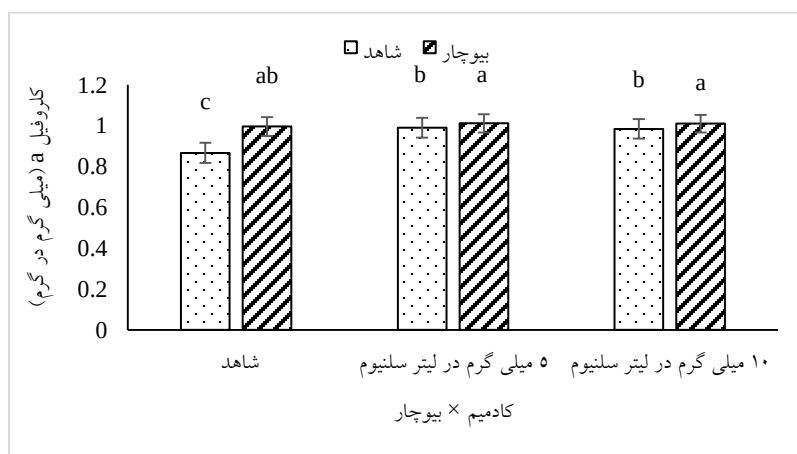
اثر متقابل بیوچار و سلنیوم نشان داد که وزن خشک ریشه از ۰/۸۷ گرم در تیمار شاهد تا ۱/۰۱ گرم در تیمار سلنیوم ۱۰ میلی گرم در لیتر و بیوچار بدست آمد (شکل ۷). بیوچار می تواند رشد گیاه را عمدتاً به دلیل افزایش در دسترس بودن مواد مغذی و بهبود خواص فیزیکی خاک از جمله کاهش چگالی ظاهری افزایش دهد (Windeatt et al., 2014). در تحقیقی مشابه، بهبود بیوماس ریشه گیاه زرشک با کاربرد بیوچار تحت تنش خشکی گزارش شد (Khosropour et al., 2022). سلنیوم با محافظت از آنزیم‌های کلروپلاستی و فراهم کردن شرایط مناسب برای فتوسنتز سبب افزایش رشد گیاه در ریشه و اندام هوایی می شود. افزایش بیوماس

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و قندهای محلول مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*) تحت تاثیر کادمیم، بیوچار و سلیوم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		کلروفیل <i>a</i>	کلروفیل <i>b</i>
تکرار	۲	۰/۰۱۲۴**	۰/۰۱۱۶۴**
کادمیم	۲	۰/۰۵۱۱۹**	۰/۰۱۶۱۸۹**
بیوچار	۱	۰/۰۴۶۲**	۰/۰۰۵۰۱**
سلیوم	۲	۰/۰۲۷۶**	۰/۰۰۰۵۸**
کادمیم × بیوچار	۲	۰/۰۰۰۶ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۸ ^{ns}
کادمیم × سلیوم	۴	۰/۰۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۳*
بیوچار × سلیوم	۲	۰/۰۱۶۷**	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}
کادمیم × بیوچار × سلیوم	۴	۰/۰۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۴ ^{ns}
خطا	۳۴	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱
ضریب تغییرات	–	۱/۸۸	۲/۷۱

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

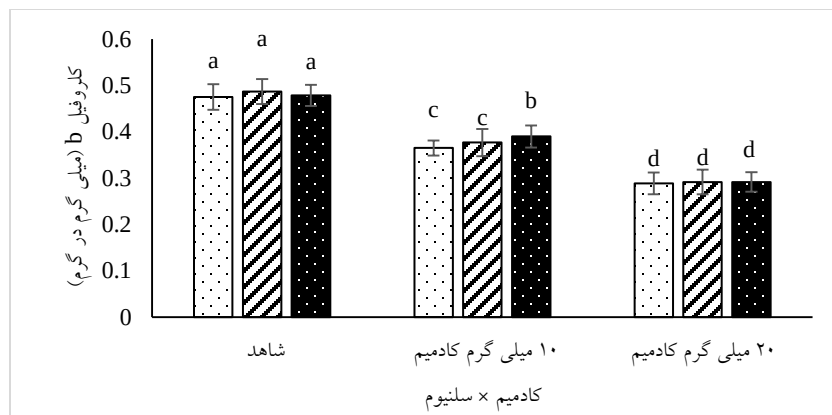
اثر متقابل بیوچار و سلیوم نشان داد که کلروفیل *a* از ۰/۸۶ میلی گرم در گرم وزن تر در تیمار شاهد تا ۱/۱ گرم در گرم وزن تر در تیمار کادمیم × بیوچار بدست آمد (شکل ۸).



شکل ۸- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و سلیوم بر کلروفیل *a* مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*).

افزایش ۷ درصدی آن را در سطح ۱۰ میلی گرم در لیتر کلروفیل *b* در تحت تنش متوسط کادمیم شد (شکل ۹).

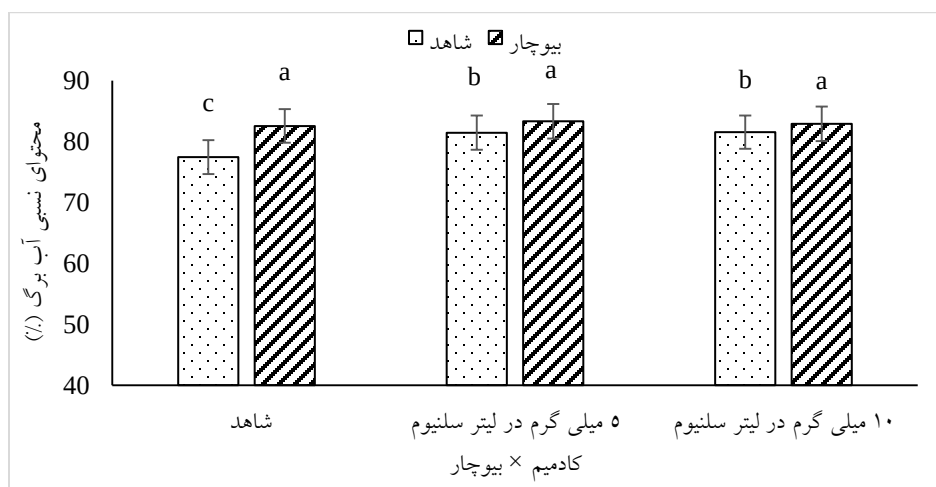
اثر متقابل کادمیم و سلیوم نشان داد که در تیمارهای عدم کاربرد سلیوم، تنش شدید کادمیم سبب کاهش ۳۹ درصدی کلروفیل *b* شد، اما سلیوم سبب تعدیل تنش شد به طوریکه



شکل ۹- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و سلنیوم بر کلروفیل b مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*).

سلنیوم توسط محققین پیشین گزارش شده است (Alyemeni et al., 2018; Azizi et al., 2020; Sardar et al., 2022) که همسو با نتایج تحقیق حاضر است. اثر متقابل بیوچار و سلنیوم نشان داد محتوای نسبی آب برگ از ۷۷/۴ درصد در تیمار شاهد تا ۸۳/۳ درصد در تیمار بیوچار و ۵ میلی گرم در لیتر سلنیوم مشاهده شد (شکل ۱۰).

بیوچار مقدار کلروفیل a و b را عمدتاً به دلیل بهبود جذب منیزیم و نیتروژن به عنوان درشت مغذی‌های ضروری برای بیوسنتز کلروفیل افزایش می‌دهد (Zargar et al., 2020). همچنین سلنیوم با تاثیر مهمی در حفاظت آنزیم‌های کلروپلاستی و فراهم کردن عناصر ضروری برای فتوسنتز سبب افزایش فتوسنتز می‌شود. افزایش کلروفیل گیاه با تعدیل تنش کادمیم توسط



شکل ۱۰- نتایج مقایسه میانگین اثر کادمیم و سلنیوم بر محتوای نسبی آب برگ مرزه تابستانه (*Satureja hortensis*).

نتیجه گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که کادمیم به ویژه در سطح ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک سبب کاهش معنی دار عملکرد گیاه از نظر وزن گیاه و صفات کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ گیاه مرزه تابستانه شد. هرچند اختلاف معنی داری بین سلینیوم ۵ و ۱۰ میلی گرم در لیتر بین اکثر صفات مشاهده نشد، ولی هر دو سطح به طور معنی داری 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 میلی گرم در لیتر سلینیوم بدست آمد.

محتوای نسبی آب برگ، پتانسیل آب برگ، مقاومت روزنه ای و سرعت تعرق از عوامل مهم در روابط آب گیاه هستند. کاهش محتوای نسبی آب برگ از اثرات اولیه تنش فلزات سنگین بر گیاهان است. پایین بودن محتوای نسبی آب برگ پتانسیل آب برگ را کاهش می دهد و منجر به بسته شدن روزنه می شود (Sapeta et al., 2013; Arbona et al., 2013). Nasirzadeh et al. و Elkelish et al. (2019) (2022) کاهش محتوای نسبی آب برگ را تحت تنش کادمیم گزارش کردند و همچنین نشان دادند که سلینیوم سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش می شود.

REFERENCES

- Aprajeeta, J., Gopirajah, R., and Anandharamakrishnan, C. 2015. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering* 144, 119-128.
- Bishnoi, R., and Aharwal, K. 2020. Experimental investigation of air flow field and cooling heterogeneity in a refrigerated room. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 23, 1434-1443.
- Chen, Y. M., Song, H. Y., Chen, Z. S., Zhao, R., Su, Q., Jin, P. Y., Sun, Y. S., and Wang, H. 2020. Sensitivity analysis of heat and mass transfer characteristics during forced-air cooling process of peaches on different air-inflow velocities. *Food Science & Nutrition* 8, 6592-6602.
- Chourasia, M., and Goswami, T. 2006^a. Simulation of transport phenomena during natural convection cooling of bagged potatoes in cold storage, Part I: Fluid flow and heat transfer. *Biosystems engineering* 94, 33-45.
- Chourasia, M., and Goswami, T. 2006^b. Simulation of transport phenomena during natural convection cooling of bagged potatoes in cold storage, Part II: Mass transfer. *Biosystems engineering* 94, 207-219.
- Dadmohammadi, Y., Kantzas, A., Yu, X., and Datta, A. K. 2020. Estimating permeability and porosity of plant tissues: Evolution from raw to the processed states of potato. *Journal of Food Engineering* 277, 109912.

- Datta, A. 2007^a. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. *Journal of food engineering* 80, 80-95.
- Datta, A. 2007^b. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results. *Journal of food engineering* 80, 96-110.
- Gancarz, M., and Konstankiewicz, K. 2007. Changes of cellular structure of potato tuber parenchyma tissues during storage. *Research in Agricultural Engineering* 53, 75.
- Gulati, T., and Datta, A. K. 2013. Enabling computer-aided food process engineering: property estimation equations for transport phenomena-based models. *Journal of Food Engineering* 116, 483-504.
- Joardder, M. U., Karim, A., Kumar, C., and Brown, R. J. 2016. Effect of porosity on drying kinetics and food properties. In "Porosity", pp. 47-64. Springer.
- Karunasena, H., Gu, Y., Brown, R., and Senadeera, W. 2015. Numerical investigation of case hardening of plant tissue during drying and its influence on the cellular-level shrinkage. *Drying Technology* 33, 713-734.
- Khan, M. I. H., Joardder, M., Kumar, C., and Karim, M. 2018. Multiphase porous media modelling: A novel approach to predicting food processing performance. *Critical reviews in food science and nutrition* 58, 528-546.
- Khan, M. I. H., Kumar, C., Joardder, M. U. H., and Karim, M. 2017. Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials. *Drying Technology* 35, 335-346.
- Kumar, C., Joardder, M., Farrell, T. W., and Karim, M. 2016. Multiphase porous media model for intermittent microwave convective drying (IMCD) of food. *International Journal of Thermal Sciences* 104, 304-314.
- Kumar, C., Joardder, M. U., Farrell, T. W., Millar, G. J., and Karim, A. 2018. A porous media transport model for apple drying. *Biosystems engineering* 176, 12-25.
- Mehdizadeh, L., Moghadam, M., Lakzian, A., 2018. The effect of biochar on growth characteristics and potassium to sodium ratio of summer savory (*Satureja hortensis* L) under sodium chloride stress. *Journal of Environmental Stresses in Agricultural Sciences*. Volume 12 (2). 606-595
- Mudiyansele, C. R., Karunasena, H., Gu, Y., Guan, L., and Senadeera, W. 2017. Novel trends in numerical modelling of plant food tissues and their morphological changes during drying—a review. *Journal of Food Engineering* 194, 24-39.
- Ni, H., Datta, A., and Torrance, K. 1999. Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42, 1501-1512.
- Pham, N. D., Khan, M., and Karim, M. 2020. A mathematical model for predicting the transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying. *Food chemistry* 325, 126932.
- Srikatden, J., and Roberts, J. S. 2007. Moisture transfer in solid food materials: A review of mechanisms, models, and measurements. *International Journal of Food Properties* 10, 739-777.

- Tegenaw, P. D., Verboven, P., and Vanierschot, M. 2022. Numerical and experimental study of airflow resistance across an array of sliced food items during drying. *Journal of Food Engineering* 312, 110739.
- Turkan, B., Canbolat, A. S., and Etemoglu, A. B. 2019. Numerical investigation of multiphase transport model for hot-air drying of food. *Journal of Agricultural Sciences* 25, 518-529.
- Yadav, A. K., and Singh, S. V. 2014. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology* 51, 1654-16.
- Ahangarnezhad, N., Najafi, G., and Jahanbakhshi, A. 2019. Determination of the physical and mechanical properties of a potato (the Agria variety) in order to mechanise the harvesting and post-harvesting operations. *Research in Agricultural Engineering*, 65(2), 33-39.
- Alyemeni, M. N., Ahanger, M. A., Wijaya, L., Alam, P., Bhardwaj, R., and Ahmad, P. 2018. Selenium mitigates cadmium-induced oxidative stress in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants by modulating chlorophyll fluorescence, osmolyte accumulation, and antioxidant system. *Protoplasma*, 255(2), 459-469.
- Arbona, V., Manzi, M., de Ollas, C., and Gómez-Cadenas, A. 2013. Metabolomics as a tool to investigate abiotic stress tolerance in plants. *International journal of molecular sciences*, 14(3), 4885-4911.
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant physiology*, 24(1), 1.
- Awa, S. H., and Hadibarata, T. 2020. Removal of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation mechanism: a review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(2), 1-15.
- Azarmdel, H., Jahanbakhshi, A., Mohtasebi, S. S., and Muñoz, A. R. 2020. Evaluation of image processing technique as an expert system in mulberry fruit grading based on ripeness level using artificial neural networks (ANNs) and support vector machine (SVM). *Postharvest Biology and Technology*, 166, 111201.
- Azizi, I., Esmailpour, B., and Fatemi, H. 2020. Effect of foliar application of selenium on morphological and physiological indices of savory (*Satureja hortensis*) under cadmium stress. *Food Science & Nutrition*, 8(12), 6539-6549.
- Babashpour, M., Farajzadeh-Memari-Tabrizi, E., and Yousefpour-Dokhanieh, A. 2022. Foliar-applied selenium nanoparticles alleviate cadmium stress through changes in physio-biochemical status and essential oil profile of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 80021-80031.
- Elkelish, A. A., Soliman, M. H., Alhaithloul, H. A., and El-Esawi, M. A. 2019. Selenium protects wheat seedlings against salt stress-mediated oxidative damage by up-regulating antioxidants and osmolytes metabolism. *Plant Physiology and Biochemistry*, 137, 144-153.
- Inbar, J., Abramsky, M., Cohen, D., and 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.

- Karami, N., Clemente, R., Moreno-Jiménez, E., Lepp, N. W., and Beesley, L. (2011). Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. *Journal of hazardous materials*, 191(1-3), 41-48.
- Khosropour, E., Weisany, W., Razzak-Tahir, N. A., and Hakimi, L. 2022. Vermicompost and biochar can alleviate cadmium stress through minimizing its uptake and optimizing biochemical properties in *Berberis integerrima bunge*. *Environmental Science and Pollution Research*, doi.org/10.1007/s11356-021-17073-6.
- Memari-Tabrizi, E. F., Yousefpour-Dokhanieh, A., and 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.
- Momeny, M., Jahanbakhshi, A., Jafarnejad, K., and Zhang, Y. D. 2020. Accurate classification of cherry fruit using deep CNN based on hybrid pooling approach. *Postharvest Biology and Technology*, 166, 111204.
- Nasirzadeh, L., Kvarnheden, A., Sorkhilaleloo, B., Hervan, E. M., and Fatehi, F. 2022. Foliar-Applied Selenium Nanoparticles Can Alleviate Soil-Cadmium Stress Through Physio-chemical and Stomatal Changes to Optimize Yield, Antioxidant Capacity, and Fatty Acid Profile of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-12.
- Nasirzadeh, L., Sorkhilaleloo, B., Majidi Hervan, E., and 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.
- Pandey, C., and Gupta, M. 2015. Selenium and auxin mitigates arsenic stress in rice (*Oryza sativa* L.) by combining the role of stress indicators, modulators and genotoxicity assay. *Journal of Hazardous Materials*, 287, 384–391.
- Rezania, S., Taib, S. M., Din, M. F. M., Dahalan, F. A., and Kamyab, H. 2016. Comprehensive review on phytotechnology: heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of hazardous materials*, 318, 587-599.
- Ritchie, S. W., Nguyen, H. T., and Holaday, A. S. 1990. Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop science*, 30(1), 105-111.
- Sapeta, H., Costa, J. M., Lourenco, T., Maroco, J., van der Linde, P., and Oliveira, M. M. 2013. Drought stress response in *Jatropha curcas*: growth and physiology. *Environmental and Experimental Botany*, 85, 76-84.
- Sardar, R., Ahmed, S., Shah, A. A., and Yasin, N. A. 2022. Selenium nanoparticles reduced cadmium uptake, regulated nutritional homeostasis and antioxidative system in *Coriandrum sativum* grown in cadmium toxic conditions. *Chemosphere*, 287, 132332.
- Shanmugaraj, B. M., Malla, A., and Ramalingam, S. 2019. Cadmium stress and toxicity in plants: an overview. *Cadmium toxicity and tolerance in plants*, 1-17.
- Shiyu, Q. I. N., Hongen, L. I. U., Zhaojun, N. I. E., Rengel, Z., Wei, G. A. O., Chang, L. I., and 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.

- Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., and Bol, R. 2009. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. *CSIRO Land and Water Science Report*, 5(09), 17-31.
- Windeatt, J. H., Ross, A. B., Williams, P. T., Forster, P. M., Nahil, M. A., and Singh, S. 2014. Characteristics of biochars from crop residues: potential for carbon sequestration and soil amendment. *Journal of environmental management*, 146, 189-197.
- Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L., and 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.
- Zargar Shooshtari, F., Souri, M. K., Hasandokht, M. R., and Jari, S. K. 2020. Glycine mitigates fertilizer requirements of agricultural crops: case study with cucumber as a high fertilizer demanding crop. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 7(1), 1-10.
- Zhang, Y., Ding, J., Wang, H., Su, L., and Zhao, C. 2020. Biochar addition alleviate the negative effects of drought and salinity stress on soybean productivity and water use efficiency. *BMC Plant Biology*, 20(1), 1-11.73.
- .



The Effect of Selenium and Biochar on Some Quantitative and Qualitative Yield Traits of Savory (*Satureja hortensis* L.) Under Cadmium Stress Conditions

Sajedeh-Saddat Tabatabaie¹, Marzieh Ghanbari Jahromi^{2*} and Weria Weisany³

¹ MSc student, Department of Horticultural Science and Agronomy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Assistant Professor, Department of Horticultural Science and Agronomy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

³ Associate Professor, Department of Horticultural Science and Agronomy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* Corresponding Author's Email: ghanbari_mz@yahoo.com
(Received: December. 9, 2024 – Accepted: January. 18, 2025)

ABSTRACT

Heavy metal stress, including cadmium, is one of the most important factors limiting plant growth. For this purpose, an experiment was conducted to investigate the effect of selenium nutrition and biochar application on reducing oxidative stress caused by cadmium in savory (*Satureja hortensis* L.) in 2022. The present study was conducted as a factorial in a completely randomized design with three replications. The research treatments included cadmium at three levels (0 (control), 10 and 20 mg/kg soil), biochar at two levels (0 and 5% of pot volume), and selenium at three levels (0, 5 and 10 mg/l). The results of the present study showed that cadmium stress, especially 20 mg/kg soil, significantly reduced the fresh and dry weight of shoots and roots, relative leaf water content, and chlorophyll content. On the other hand, cadmium stress caused a decrease in chlorophyll a compared to the control, while cadmium 10 and 20 mg/L caused a 7 and 29% decrease in chlorophyll a compared to the control, respectively. The overall results showed that the simultaneous application of 5% by volume biochar with 5-10 mg/l selenium was an important modifier of cadmium stress in summer savory.

Keywords: Biochar, Selenium, Essential Oil Yield, Cadmium, Summer Sag