فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۳، شماره ۶۰، خرداد و تیرماه ۱۴۰۳ صفحه: ۱۴۷-۱۶۵
https://doi.org/10.22034/13.60.147

مقاله پژوهشی

مطالعه تأثیر کاربرد بیوچار و سلنیوم در کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از کادمیوم در گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum* L.)

فاطمه رفیق‌زاده، مرضیه قنبری جهرمی* و مرجان دیانت

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

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹)

چکیده

به منظور بررسی تأثیر بیوچار و سلنیوم بر خصوصیات کمی و کیفی گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) تحت تنش کادمیوم آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای در طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۰ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل استفاده از کلرید کادمیوم در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، بیوچار در دو سطح (صفر و ۵ درصد حجمی) و محلول‌پاشی برگی با سلنات سدیم در دو سطح (صفر و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بودند. نتایج این تحقیق نشان داد تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سبب کاهش صفات وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، کلروفیل a، b و کل، محتوای نسبی آب برگ و افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و قند محلول شد. فنل تا سطح کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش پیدا کرد اما در سطوح بالاتر کادمیوم (۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) کاهش پیدا کردند. تیمارهای سلنیوم و بیوچار با کاهش اثر تنش کادمیوم سبب افزایش صفات وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی، محتوای کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و عملکرد اسانس و کاهش صفات فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، قند محلول، تجمع کادمیوم ریشه و اندام هوایی شدند. بیشترین مقدار عملکرد اسانس (۱۶/۹۳ میلی‌گرم در بوته) و درصد اسانس (۰/۴۴ درصد) در تیمار ترکیب بیوچار ۵ درصد حجمی و سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. بیوچار و سلنیوم با تعدیل اثر تنش کادمیوم سبب بهبود صفات گشنیز شدند.

واژه‌های کلیدی: درصد اسانس، سمیت، فعالیت آنزیم، محلول‌پاشی

مقدمه

عناصر سنگین از مهم‌ترین منابع آلودگی‌های غیرنقطه‌ای منابع طبیعی و کشاورزی هستند (Rai *et al.*, 2019). سالانه هزاران تن از این عناصر وارد خاک و آب می‌شوند. از آنجایی که آلوده شدن محصولات کشاورزی با فلزات سنگین از یک طرف منجر به کاهش کیفیت محصولات کشاورزی و از طرف دیگر تهدید جدی برای سلامت انسان است، لذا از جنبه‌های محیط زیستی بسیار حائز اهمیت هستند (Zheng *et al.*, 2020). در بین فلزات سنگین برخی از آن‌ها همچون روی، مس و کبالت در مقادیر مناسب برای بیشتر سیستم‌های بیولوژیکی از جمله انسان ضروری است، درحالی‌که برخی دیگر از این فلزات از جمله کادمیوم، سرب و آرسنیک برای گیاهان، حیوانات و انسان بسیار سمی است (Memari-Tabrizi *et al.*, 2021). کادمیوم به عنوان ماده‌ای سرطان‌زا در ایجاد اغلب سرطان‌ها

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: ghanbari@srbiau.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

شناخته شده است. کادمیوم یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در ایجاد بیماری‌های قلبی و فشار خون است. یکی از سازوکارهای سمیت کادمیوم جلوگیری از متابولیسم تنفسی کربوهیدرات‌ها است، که ممکن است به‌دلیل جانشین شدن عناصر ضروری با کادمیوم در آنزیم‌های تنفسی باشد. همچنین کادمیوم اثر آنتاگونیستی با جذب بعضی از عناصر ضروری مانند مس و روی دارد و به‌طور غیرقابل برگشتی در محل‌های فعال آنزیم‌های مورد نیاز DNA، RNA و پروتئین‌ها جایگزین می‌شود. جذب کادمیوم فقط از طریق ریشه صورت نمی‌گیرد بلکه شاخه‌ها و برگ‌ها نیز قادرند کادمیوم را جذب نمایند. طولانی‌شدن مدت خزان گیاهان خطر مهم دیگری است که در نتیجه آلودگی به کادمیوم ایجاد می‌شود (Manzoor *et al*., 2019).

در سیستم‌های کشاورزی پایدار، استفاده از منابع تجدیدپذیری که حداکثر محاسن اکولوژیکی و حداقل مضرات زیست‌محیطی را دارا باشد، امری ضروری است (Bakhtiari *et al*., 2020). بیوچار (Biochar) نوعی اصلاح‌کننده خاک است که سبب تحول عظیمی در افزایش مقاومت گیاه به تنش شده است (Ali *et al*., 2017). بیوچار، ماده کربنی است که از گرمادهی بقایای گیاهی و ضایعات در محیط حاوی اکسیژن محدود یا بدون اکسیژن به دست می‌آید (Razzaghi *et al*., 2020). تجزیه گرمایی زیست‌توده در محیط فاقد اکسیژن را گرماکافت می‌نامند (Ali *et al*., 2017). بیوچار پایداری بالایی داشته و به منظور مدیریت ضایعات، کاهش تغییرات اقلیمی، تولید انرژی و بهبود خصوصیات خاک تولید می‌شود (Razzaghi *et al*., 2020). خصوصیات منحصر به فرد بیوچار آن را به عنوان گزینه مناسبی برای مصرف در خاک مطرح ساخته است (Ali *et al*., 2017). بیوچار خصوصیات مختلف فیزیکی (از جمله ساختمان خاک، جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی)، شیمیایی (اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی، میزان مواد آلی) و زیستی خاک (فعالیت، تنوع و جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیمی) را تحت تأثیر قرار داده و موجب بهبود حاصلخیزی خاک می‌شود (Ali *et al*., 2017; Razzaghi *et al*., 2020).

از بین عناصر ریزمغذی موجود، سلنیوم عنصری است که در فیزیولوژی و متابولیسم گیاهان نقش مهمی داشته (Broadley *et al*., 2010) و موجب افزایش رشد گیاهان تحت تنش‌های محیطی از جمله شوری می‌گردد و مشخص گردیده که سلنیوم این توانایی را دارد که وضعیت آب و جذب املاح در گیاهان را در شرایط شور و خشک تنظیم کند (Gupta and Gupta, 2017). بررسی‌های متعدد، اثر مفید سلنیوم را بر روی رشد و عملکرد گیاهان اثبات کرده است. نقش مفید این عنصر در بهبود رشد در شرایط تنش خشکی (Ikram *et al*., 2020; El-Saadony *et al*., 2021) و شوری (Zahedi *et al*., 2019; Ghasemian *et al*., 2021) بررسی شده است. اثر مفید سلنیوم به‌طور عمده به افزایش ترکیبات و فعالیت آنزیم‌های دفاع آنتی‌اکسیدان نسبت داده شده است (Balakhnina and Nadezhkina, 2017). با این حال، سازوکارهای دیگر اثر سلنیوم روی تخفیف تنش‌های محیطی، بررسی‌های زیادی را به خود اختصاص نداده است.

از آنجایی که کادمیوم به عنوان عنصر اصلی در ایجاد انواع سرطان‌ها به‌ویژه سرطان گوارش شناخته شده‌اند، بررسی اثرات این فلزات بر خواص کمی و کیفی محصول پرمصرف گشنیز ضروری و مهم است. استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک و عناصر تغذیه‌ای می‌تواند راهکاری مناسب برای کاهش اثرات نامطلوب این عنصر باشد. با توجه به صنعتی‌شدن و افزایش ضایعات شیمیایی در جهان، بحران آلاینده‌ها به خصوص کادمیوم در گیاهان دارویی توجه زیادی به خود جلب کرده است (Babashpour-Asl *et al*., 2022).

گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) گیاهی علفی از خانواده Apiaceae است. این گیاه به ارتفاع ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر، دارای ساقه راست، شفاف و کم و بیش شیاردار است. گشنیز به میزان فراوان به عنوان سبزی و در تهیه غذاها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این گیاه که بومی جنوب غرب آسیا و غرب تا شمال آفریقاست به‌طور گسترده‌ای در خاورمیانه، منطقه مدیترانه، هند، آسیای جنوبی، آمریکای لاتین، چین و آفریقا مورد مصرف

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

قرار می‌گیرد (Nourzad *et al.*, 2015). گشنیز علاوه بر دادن طعم و بوی مطبوع به غذا، دارای ارزش غذایی بالایی نیز است (Afshari *et al.*, 2021). بنابراین تغذیه محصول گشنیز با سلنیوم و بهبود بستر خاک با بیوچار به منظور کاهش جذب فلزات سنگین و در نهایت حفظ کمیت و کیفیت گشنیز ضروری است.

مواد و روش‌ها

طرح و تیمارهای آزمایش: این تحقیق به منظور بررسی تأثیر بیوچار و سلنیوم بر خصوصیات کمی و کیفی گشنیز در شرایط تنش کادمیوم در گلخانه‌ای واقع در وردآورد کرج در طی سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل کادمیوم با استفاده از کلرید کادمیوم در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و بیوچار در دو سطح (صفر و ۵ درصد حجمی) به صورت مخلوط با خاک و محلول‌پاشی برگی با سلنیوم در دو سطح (صفر و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) از منبع سلنات سدیم اعمال شد.

روش انجام تحقیق: بذرهای گشنیز تهیه‌شده (از شرکت پاکان بذر اصفهان) پس از ضدعفونی در گلدان‌های ۳ لیتری (۲ کیلوگرم خاک) حاوی خاک کشاورزی، خاک‌برگ و ماسه (به نسبت ۵۰:۳۰:۲۰) کشت شدند. بذرهای گشنیز در تاریخ ۱۵ اسفندماه ۱۴۰۰ در گلدان‌های پلاستیکی حاوی بستر کشت (خاک زراعی و خاکبرگ) کشت شدند (جدول ۱). کادمیوم و بیوچار (جدول ۲) با مقادیر مشخص با خاک مخلوط گردید. پس از سبز شدن گیاه و در مرحله چهار برگی محلول‌پاشی برگی با سلنیوم سه بار با فواصل ۱۵ روزه انجام شد. آبیاری گیاهان براساس ظرفیت زراعی خاک به صورت نرمال هر دو روز یکبار انجام شد. پس از پایان دوره رشد گیاه (تاریخ ۲۰ الی ۲۲ خردادماه ۱۴۰۱)، متغیرهای مورد بررسی در گیاه اندازه‌گیری شدند.

متغیرهای مورد بررسی: 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 گلدان 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 (دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت)، وزن خشک آن‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم به‌دست آمد (Inbar *et al.*, 1994).

اندازه‌گیری میزان محتوای کلروفیل با روش Arnon (۱۹۴۹) انجام شد. بدین ترتیب که میزان جذب عصاره استخراج‌شده در طول‌موج‌های ۶۴۵، ۶۶۳، ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV-160، ساخت ژاپن) خوانده شد. سپس با استفاده از رابطه‌های زیر کلروفیل a (رابطه ۱)، کلروفیل b (رابطه ۲) و کلروفیل کل (رابطه ۳) برحسب میلی‌گرم کلروفیل در هر گرم برگ تر محاسبه شد.

(رابطه ۱)

$$Chl\ a = [(12.7\times A663) - (2.69\times A645)]\times V / 1000\times W$$

(رابطه ۲)

$$Chl\ b = [(22.9\times A645) - (4.69\times A663)]\times V / 1000\times W$$

(رابطه۳)

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

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 اندازه‌گیری محتوی نسبی آب برگ (RWC) جوان‌ترین برگ تکامل‌یافته گیاه جدا و به سرعت با ترازوی دقیق آزمایشگاهی LiBROR AEL مدل 40SM با دقت ۰/۰۰۰۱ وزن گردید. سپس برگ‌های هر تیمار به طور جداگانه در لوله آزمایش درب‌دار حاوی آب‌مقطر برای مدت چهار تا پنج ساعت غوطه‌ور شدند و برگ‌ها را پس از گذشت این مدت، از لوله آزمایش خارج و با استفاده از کاغذ صافی خشک و مجدداً توزین شدند. تا وزن آن‌ها در حالت تورژسانس کامل به‌دست آید. برای محاسبه وزن خشک، برگ‌ها به مدت ۴۸

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها

پارامتر	مقدار
نیتروژن کل (درصد)	۰/۱۲
فسفر قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۱۴/۴
پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۲۵۸
کربن آلی (درصد)	۰/۶۷
لای (درصد)	۴۷
رس (درصد)	۲۷
شن (درصد)	۲۶
هدایت الکتریکی (میلی‌موس بر سانتی‌متر)	۱/۲
pH	۶/۸

جدول ۲- ترکیبات بیوچار

پارامتر	واحد	بیوچار
ماده آلی	درصد	۹۱/۶
کربن آلی	درصد	۷۵/۸
نیتروژن	درصد	۰/۴۵
نیترات	میلی‌گرم در کیلوگرم	۶۴
سولفور	میلی‌گرم در کیلوگرم	۹۴۰
سدیم	درصد	۰/۵۲۰
پتاسیم	درصد	۲۰
فسفر	درصد	۰/۳۷۰
هدایت الکتریکی	میلی‌زیمنس بر متر	۳۷/۵
pH	-	۹/۵
خاکستر کل	درصد	۸/۴
چگالی ظاهری	گرم بر سانتی‌متر مکعب	۰/۲۰۷

ساعت در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و سپس وزن شدند. محتوای نسبی آب برگ از رابطه زیر که در آن FW وزن تر برگ؛ DW وزن خشک برگ و TW وزن اشباع برگ است، محاسبه شد (Ritchie *et al.*, 1990).

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

اندازه‌گیری ترکیب‌های فنلی به وسیله روش‌هایی که از Folin-Ciocalteu به‌عنوان معرف و اسید گالیک به عنوان استاندارد استفاده می‌نمایند، انجام شد. محتوای فنلی به وسیله اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV-160، ساخت ژاپن)، با روش Ouchikh و همکاران (۲۰۱۱) اندازه‌گیری شد. برای سنجش قند محلول برگ از روش فنل- سولفوریک (Kochert, 1978) استفاده شد. فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاتالاز بر اساس روش Giannopolitis و Ries (۱۹۷۷) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری کادمیوم ریشه و اندام هوایی از روش Reeves و همکاران (۱۹۹۹) استفاده شد.

تجزیه واریانس با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

۹/۳ و مقایسه میانگین داده‌ها در سطح معنی‌دار ۱ و ۵ درصد با آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

صفات رشدی: براساس نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی کادمیوم، بیوچار و سلنیوم بر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه در سطح ۱ درصد ($P\leq0.01$) و اثر متقابل کادمیوم و بیوچار و سلنیوم بر وزن خشک اندام هوایی در سطح ۵ درصد ($P\leq0.05$) معنی‌دار شد (جدول ۳).

بیشترین مقدار وزن تر اندام هوایی نیز با ۱۳/۵۰ گرم در تیمار شاهد مشاهده شد. تیمارهای کادمیوم ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، وزن تر اندام هوایی را به ترتیب ۴/۰۳ و ۲۹/۸۵ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش دادند. بیوچار سبب افزایش معنی‌دار وزن تر اندام هوایی نسبت به تیمار شاهد شد.

مقدار وزن تر اندام هوایی در نتیجه تیمار بیوچار به میزان ۵/۹ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش پیدا کرد (جدول ۴). سلنیوم سبب افزایش معنی‌دار وزن تر اندام هوایی نسبت به تیمار شاهد شد. براساس نتایج مقایسه میانگین مقدار وزن تر اندام هوایی در تیمار شاهد برابر ۱۱/۴۱ گرم بود که این مقدار در تیمار سلنیوم به ۱۱/۷۷ گرم رسید. مطابق با نتایج این تحقیق، چندین مطالعه نشان داده‌اند که سلنیوم می‌تواند باعث افزایش زیست‌توده گیاهی شود. تحقیقات نشان داده است که غلظت مناسب سلنیوم باعث بهبود رشد گیاهان می‌شود (Reis *et al.*, 2018). کاهش تجمع زیست‌توده (عمدتاً وزن تر) تحت تنش کادمیوم ممکن است به دلیل تخریب کلروفیل باشد. تنش کادمیوم که بر ساختار کلروپلاست و غشای کلروپلاست تأثیر می‌گذارد، تبادل یونی را در کلروپلاست‌ها افزایش می‌دهد و آنزیم‌های ضروری چرخه کالوین را مهار می‌کند، محتوای کلروفیل را کاهش می‌دهد و در نهایت رشد گیاه را مهار می‌کند (Alyemeni *et al.*, 2018).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد کادمیوم سبب کاهش وزن خشک اندام هوایی شد اما تیمارهای بیوچار و سلنیوم با کاهش اثر کادمیوم، سبب بهبود وزن خشک اندام هوایی شدند. بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی با ۴/۵ گرم در تیمار کادمیوم صفر (شاهد) بیوچار ۵ درصد حجمی و سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، تیمار بیوچار ۵ درصد حجمی و سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سبب افزایش ۱۴/۱۰ درصدی وزن خشک اندام هوایی نسبت به تیمار کادمیوم صفر (شاهد) و بیوچار صفر (شاهد) و سلنیوم (شاهد) شد (شکل ۱). کاربرد بیوچار به عنوان اصلاح‌کننده خاک به ترکیب فیزیکی و شیمیایی آن از جمله نوع ماده اولیه مصرفی، سطح ویژه و تخلخل بستگی دارد (Afshar *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020). 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 و ظرفیت تبادل کاتیونی آب و همچنین بسیاری از جنبه‌های شیمیایی و بیولوژیکی دیگر تأثیر می‌گذارد. افزایش حاصلخیزی خاک، رشد و استقرار گیاه را در شرایط تنش افزایش می‌دهد (Durukan *et al.*, 2020). بیوچار مواد مغذی را مستقیماً در خاک جذب کرده و حفظ می‌کند و ریشه گیاه متعاقباً آن‌ها را جذب می‌کند، بدون اینکه برای جذب آب نیاز به رشد بیشتر در زمین باشد. مطالعات بهبود قابل توجهی را در نرخ فتوسنتزی گیاه، پتانسیل آب آوند چوبی، محتوای کلروفیل، تولید هورمون گیاهی و زیست‌توده و رشد کلی با استفاده از بیوچار گزارش کرده‌اند (Semida *et al.*, 2019).

مطابق با یافته‌های این تحقیق، رشد چندین گیاه با استفاده از بیوچار در شرایط تنش فلزات سنگین (Younis *et al.*, 2016) یا تنش کادمیوم (Abbas *et al.*, 2017) افزایش یافت. با توجه به خواص جذبی بیوچار با کاهش مواجهه گیاه با عوامل تنش یا با افزایش واکنش‌های تنش گونه‌های گیاهی، بیوچار برای کاهش اثرات مضر تنش گیاهی عمل می‌کند (Khan *et al.*, 2020). بنابراین ظرفیت بیوچار برای افزایش دسترسی به آب می‌تواند اثرات مضر کادمیوم را کاهش دهد. بیوچار مقادیر قابل توجهی یون مانند کادمیوم را در خاک جذب می‌کند. از سوی دیگر، ویژگی‌های بیوچار مانند تخلخل

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

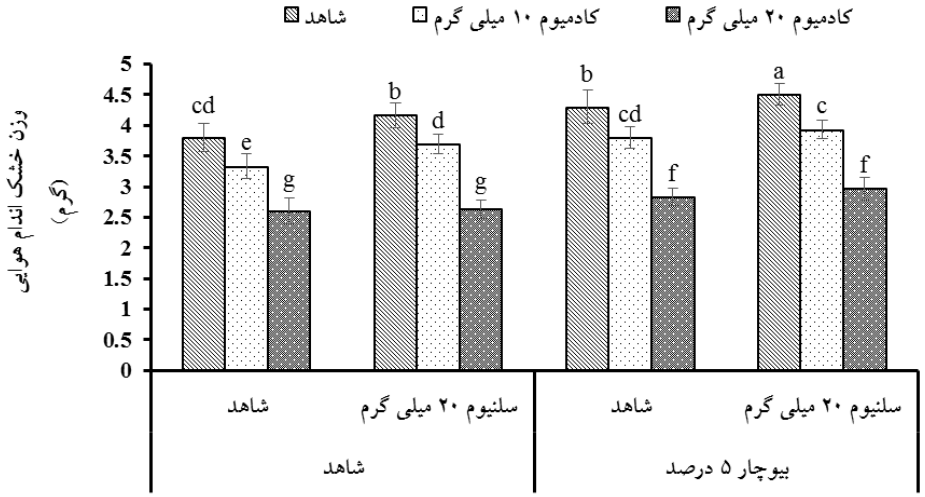
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیوم، بیوچار و سلنیوم بر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه گشنیز

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه
کادمیوم	۲	۴۹/۱۶ **	۶/۳۵ **	۱۱/۴ **	۱/۴۵ **
بیوچار	۱	۴/۰۶ **	۱/۱۰ **	۱/۶۴ **	۰/۵۱۳ **
سلنیوم	۱	۱/۱۷ **	۰/۳۸ **	۰/۲۶۶ **	۰/۲۰۲ **
کادمیوم × بیوچار	۲	۰/۰۰۴ ns	۰/۰۱۳ ns	۰/۰۳۰ ns	۰/۰۰۱۹ ns
کادمیوم × سلنیوم	۲	۰/۰۳۴ ns	۰/۰۳۴ *	۰/۰۰۵۲ ns	۰/۰۱۶ ns
بیوچار × سلنیوم	۱	۰/۰۲۲ ns	۰/۰۲۲ *	۰/۰۴۷ ns	۰/۰۱۳ ns
کادمیوم × بیوچار × سلنیوم	۲	۰/۰۸۳ ns	۰/۰۲۳ *	۰/۰۲۷ ns	۰/۰۰۳۶ ns
خطا	۲۲	۰/۰۶۶	۰/۰۰۶۹	۰/۰۲۱	۰/۰۰۹۳
ضریب تغییرات (٪)	–	۲/۲۲	۲/۳۴	۲/۸۷	۴/۹۹

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

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین اثرات کادمیوم، بیوچار و سلنیوم بر وزن تر اندام هوایی و وزن تر و خشک ریشه گشنیز

تیمار	سطوح	وزن تر اندام هوایی (گرم)	وزن تر ریشه (گرم)	وزن خشک ریشه (گرم)
کادمیوم	شاهد	۱۳/۵۰ a	۶/۰۰ a	۲/۲۲ a
	۱۰ میلی‌گرم	۱۱/۷۹ b	۵/۱۰ b	۲/۰۳ b
	۲۰ میلی‌گرم	۹/۴۷ c	۴/۱۱ c	۱/۵۵ c
بیوچار	شاهد	۱۱/۲۵ b	۴/۸۸ b	۱/۸۱ b
	۵ درصد	۱۱/۹۲ a	۵/۳۱ a	۲/۰۵ a
سلنیوم	شاهد	۱۱/۴۱ b	۵/۰۱ b	۱/۸۶ b
	۲۰ میلی‌گرم	۱۱/۷۷ a	۵/۱۸ a	۲/۰۱ a



شکل ۱- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم، بیوچار و سلنیوم بر وزن خشک اندام هوایی گشنیز

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

و مساحت سطح خاص که تحت تأثیر شرایط پیرولیز و انواع مواد خام است که بر کیفیت بیوچار تأثیر می‌گذارد تا اتصال آب خاک و گیاه را افزایش دهد (Khan *et al*., 2020). کادمیوم وزن تر ریشه را به طور معنی‌داری کاهش داد به‌طوری‌که در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک کمترین مقدار وزن تر ریشه (۴/۱۱ گرم) مشاهده شد. براساس نتایج مقایسه میانگین، بیوچار سبب افزایش معنی‌دار وزن تر ریشه نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۴). گزارش شده است که بیوچار می‌تواند رشد گیاه را عمدتاً به دلیل افزایش در دسترس‌بودن مواد مغذی و بهبود خواص فیزیکی خاک از جمله کاهش چگالی ظاهری افزایش دهد (Windeatt *et al*., 2014). بیوچار با گروه‌های عاملی فعال خواص شیمیایی خاک مانند ظرفیت تبادل کاتیونی را بهبود می‌بخشد و دسترسی گیاه به مواد مغذی و در نتیجه رشد بهتر گیاه را افزایش می‌دهد (Keabetswe *et al*., 2019). تیمار سلنیوم سبب افزایش معنی‌دار وزن تر ریشه نسبت به تیمار شاهد شد. مقدار وزن تر ریشه در تیمار شاهد برابر ۵/۰۱ گرم بود درحالی‌که این مقدار در تیمار سلنیوم برابر ۵/۱۸ درصد بود. کادمیوم سبب کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه شد. در تحقیقات پیشین نشان داده شد که محلول‌پاشی برگی سلنیوم به خصوص در فرم نانو نه تنها سبب بهبود رشد و وزن تر گیاه و رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود، بلکه متابولیسم، عناصر مغذی و میزان آنزیم آنتی‌اکسیدانی پراکسیداز و میزان مالون دی‌آلدئید را بهبود می‌بخشد و سبب کاهش آسیب‌های تنش شوری می‌گردد (Munoz-Munoz *et al*., 2009). با افزایش سطح کادمیوم، مقدار وزن خشک ریشه روند کاهشی معنی‌داری پیدا کرد به‌طوری‌که در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، کمترین مقدار وزن خشک ریشه (۱/۵ گرم) مشاهده شد. بیوچار وزن خشک ریشه را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. مقدار وزن خشک ریشه در تیمار شاهد برابر ۱/۸۱ گرم بود که این مقدار در تیمار بیوچار با افزایش ۱۳/۱۵ درصدی به ۲/۰۵ گرم رسید (جدول ۴). ریشه‌های گیاه روی بسترهای حاوی بیوچار به خوبی رشد می‌کنند. با بهبود شرایط فیزیکوشیمیایی ریزوسفر، کاهش مقاومت خاک در برابر رشد ریشه مشاهده می‌شود (Altland and Locke, 2013). همچنین می‌تواند نفوذپذیری آب خاک را بهبود بخشد و نفوذ ریشه را تسهیل کند و کلونیزاسیون ریشه در حجم بزرگتر خاک را افزایش دهد (Atkinson *et al*., 2010). سلنیوم وزن خشک ریشه را به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. مقدار وزن خشک ریشه در تیمار شاهد برابر ۱/۸۶ گرم بود درحالی‌که این مقدار در تیمار سلنیوم برابر ۲/۰۱۱ گرم بود. تیمار سلنیوم، وزن خشک ریشه را به میزان ۸/۰۶ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (جدول ۴). در تحقیقی که بر روی گیاه گوجه گیلاسی جهت بررسی اثر نانوذره سلنیوم بر برخی خصوصیات مورفولوژیک و فیتوشیمی گیاه گوجه گیلاسی (*Solanum lycopersicum* L. var. *cerasiforme*) انجام شد، محلول‌پاشی برگی با غلظت ۴ میلی‌گرم بر لیتر نانوسلنیوم بیشترین تأثیر را در بهبود وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، طول بخش هوایی، محتوای کلروفیل برگ و میزان برخی عناصر در برگ داشت (Neysanian *et al*., 2021).

رنگدانه‌های فتوسنتزی و محتوی آب نسبی برگ: بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی کادمیوم، بیوچار و سلنیوم بر کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و محتوای نسبی آب برگ در سطح ۱ درصد ($P\leq0.01$) معنی‌دار شد. اثر متقابل بیوچار و سلنیوم بر کلروفیل a در سطح ۱ درصد ($P\leq0.01$) و بر کلروفیل کل در سطح ۵ درصد ($P\leq0.05$) معنی‌دار شد (جدول ۵).

تیمار بیوچار ۵ درصد حجمی و سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، مقدار کلروفیل a را نسبت به تیمار شاهد (عدم استفاده بیوچار و سلنیوم) به میزان ۱۶ درصد افزایش دادند (شکل ۲a). کاربرد بیوچار مقدار کلروفیل a و b را عمدتاً به‌دلیل بهبود جذب منیزیم و نیتروژن به‌عنوان درشت مغذی‌های ضروری برای بیوسنتز کلروفیل افزایش داد (Zargar Shooshtari *et al*., 2020).

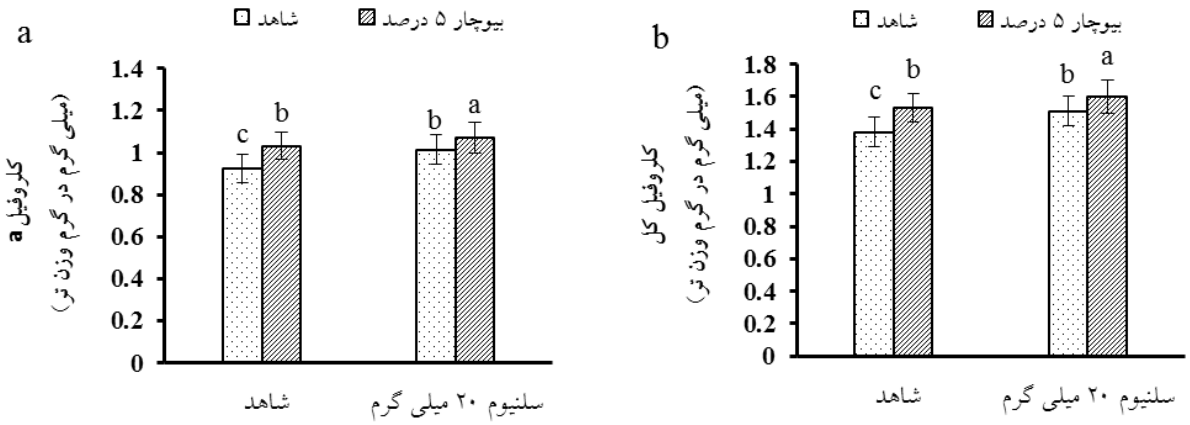
کادمیوم، مقدار کلروفیل b را به طور معنی‌داری کاهش داد. تیمارهای کادمیوم ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، مقدار کلروفیل b را به ترتیب ۱۰/۳۱ و ۲۳/۲۹ درصد نسبت به تیمار

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیوم، بیوچار و سلنیوم بر کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ گشنیز

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	محتوای نسبی آب برگ
کادمیوم	۲	۰/۲۷۶ **	۰/۰۳۷ **	۰/۴۷ **	۸۵۵/۷۵ **
بیوچار	۱	۰/۰۶۲ **	۰/۰۱۱ **	۰/۱۲۶ **	۱۰۳/۳۶ **
سلنیوم	۱	۰/۰۳۷ **	۰/۰۰۷۸ **	۰/۰۸۹ **	۶۶/۶۹ **
کادمیوم × بیوچار	۲	۰/۰۰۰۰۸ ns	۰/۰۰۰۰۵ ns	۰/۰۰۰۱ ns	۲/۵۲ ns
کادمیوم × سلنیوم	۲	۰/۰۰۰۵ ns	۰/۰۰۰۰۰۳ ns	۰/۰۰۱۲ ns	۶/۸۶ ns
بیوچار × سلنیوم	۱	۰/۰۰۵۸ **	۰/۰۰۰۳۳ ns	۰/۰۰۷۸ *	۲/۲۵ ns
کادمیوم × بیوچار × سلنیوم	۲	۰/۰۰۰۲۸ ns	۰/۰۰۰۲۲ ns	۰/۰۰۲۵ ns	۳/۰۸ ns
خطا	۲۲	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۳	۲/۷۱
ضریب تغییرات (٪)	–	۲/۰۷	۳/۸۱	۲/۴۴	۲/۰۳

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



شکل ۲- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار و سلنیوم بر کلروفیل a گشنیز (a) و کلروفیل کل (b)

شاهد کاهش دادند (جدول ۶). اثرات نامطلوب بر رنگدانه فتوسنتزی در گیاهان تحت تنش کادمیوم نیز نتیجه انواع برهمکنش‌های کادمیوم در متابولیسم گیاه است. یکی از عوامل ممکن است افزایش تولید کلروفیلاز باشد که اعتقاد بر این است که فرآیند بیوسنتز کلروفیل و کاروتنوئیدها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث تخریب کلروفیل می‌شود (Saini and Dhania, 2020; Saleh *et al.*, 2020). بیوچار سبب افزایش معنی‌دار کلروفیل b نسبت به تیمار شاهد شد. سلنیوم سبب افزایش معنی‌دار کلروفیل b نسبت به تیمار شاهد شد. مقدار کلروفیل b در تیمار شاهد برابر ۰/۳۵۱ میلی‌گرم در گرم بود درحالی‌که این مقدار در تیمار سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر به ۰/۳۸۱ میلی‌گرم در گرم رسید. تیمار سلنیوم ۲۰میلی‌گرم در لیتر، مقدار کلروفیل b را به میزان ۸/۳۶ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (جدول ۶). بیوچار و سلنیوم هردو سبب افزایش معنی‌دار کلروفیل کل نسبت به تیمار شاهد شدند.

بیشترین مقدار کلروفیل کل با ۱/۶ میلی‌گرم در گرم در تیمار بیوچار ۵ درصد حجمی و سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. کمترین مقدار کلروفیل کل نیز با ۱/۳۸ میلی‌گرم در گرم در تیمار شاهد (عدم کاربرد بیوچار و سلنیوم) مشاهده شد. تیمار بیوچار ۵ درصد حجم و سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین اثرات کادمیوم، بیوچار و سلنیوم بر کلروفیل b و محتوی آب نسبی برگ گشنیز

تیمار	سطوح	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	محتوی آب نسبی برگ (درصد)
کادمیوم	شاهد	۰/۴۱۰ a	۹۰/۰۸ a
	۱۰ میلی‌گرم	۰/۳۷۰ b	۷۹/۸۳ b
	۲۰ میلی‌گرم	۰/۳۰۰ c	۷۳/۳۳ c
بیوچار	شاهد	۰/۳۴۷ b	۷۹/۳۸ b
	۵ درصد	۰/۳۸۳ a	۸۲/۷۷ a
سلنیوم	شاهد	۰/۳۵۱ b	۸۲/۴۴ b
	۲۰ میلی‌گرم	۰/۳۸۱ a	۷۹/۷۲ a

لیتر، مقدار کلروفیل کلر به میزان ۱۵/۷۵ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد بیوچار و سلنیوم) افزایش دادند (شکل ۲b). بیوچار به عنوان منبع غذایی و همچنین یک مبدل کاتیونی مناسب به دلیل سطح وسیعی که دارد و در نتیجه در دسترس بودن مواد مغذی و جذب بیشتر آن‌ها توسط ریشه گیاه عمل می‌کند. علاوه‌براین، افزایش pH خاک اصلاح‌شده توسط بیوچار پیامدهایی بر کانی‌سازی و در دسترس بودن مواد مغذی عمدتاً در رابطه با کاتیون‌های پایه مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم دارد. استفاده از بیوچار و ورمی‌کمپوست باعث افزایش محتوای کلروفیل، فتوسنتز برگ و تولید زیست‌توده در مطالعات دیگر شده است (Wang *et al*., 2017). سلنیوم باعث جلوگیری از تخریب کلروفیل در گیاهان در معرض تنش‌های محیطی می‌شود (Oraghi Ardebili *et al*., 2019). نقش تنظیم‌کنندگی سلنیوم در وضعیت آبی گیاه تحت شرایط تنش خشکی نیز بررسی و اثرات حفاظتی آن به اثبات رسیده است (Elemike *et al*., 2019).

کمترین مقدار محتوای نسبی آب برگ نیز با ۷۳/۳۳ درصد در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد. تیمارهای کادمیوم ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، مقدار محتوای نسبی آب برگ را به ترتیب ۱۱/۳۷ و ۱۸/۵۹ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش دادند (جدول ۶). محتوای نسبی آب نشانگر وضعیت آب در گیاهان است. محتوای نسبی آب برگ رابطه بین تأمین آب به بافت برگ و میزان تعرق است (Lugojan and Ciulca, 2011). آب در تمام فرآیندهای متابولیک سلول گیاهی نقش اساسی دارد. توانایی گیاه برای بازیابی از تنش و عملکرد متعاقب آن به محتوای نسبی آب بستگی دارد. کاهش سطح آب باعث می‌شود سلول‌های گیاهی کاهش فشار تورژسانس را تجربه کنند که منجر به آسیب سلولی و پژمردگی کلی و کاهش رشد گیاهان می‌شود. محتوای نسبی بالای آب به گیاه کمک می‌کند تا گونه‌های فعال اکسیژن و تنش‌های اسمزی ناشی از خشکی را خنثی کند و به‌طور بالقوه به بازده بیشتر کمک کند. هدایت هیدرولیکی گیاه میزان جذب آب توسط ریشه و حرکت آن از طریق ساقه است. گیاهان تحت شرایط تنش معمولاً کاهش در هدایت هیدرولیکی را تجربه می‌کنند که به نوبه خود بر محتوای نسبی آب تأثیر می‌گذارد (Garcia *et al*., 2017; Ngumbi and Kloepper, 2016). در پی استفاده از سلنیوم در خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداری آب در خاک و جذب و انتقال آب و عناصر در گیاه افزایش می‌یابد (Shahid *et al*., 2019).

بیوچار سبب افزایش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ نسبت به تیمار شاهد شد. مقدار محتوای نسبی آب برگ در تیمار شاهد برابر ۷۹/۳۸ درصد بود که این مقدار در تیمار بیوچار ۵ درصد حجمی به ۸۲/۷۷ درصد رسید. سلنیوم، محتوای نسبی آب برگ را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. بیشترین مقدار محتوای نسبی آب برگ با ۸۲/۴۴ درصد در تیمار سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. مقدار محتوای

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیوم، بیوچار و سلنیوم بر صفات شیمیایی و بیوشیمیایی گشنیز

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		کادمیوم ریشه	کادمیوم اندام هوایی	قند محلول	فنل کل (میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن خشک)	سوپراکسید دیسموتاز (واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین)
		(میلی‌گرم در گرم)				
کادمیوم	۲	۱۰۰/۵۹ **	۲۴/۹۵ **	۳۱/۷۶ **	۱/۹۶ **	۴۳/۵۵ **
بیوچار	۱	۴/۶۹ **	۱/۱۴ **	۲/۳۵ **	۰/۳۸۰ ns	۱/۸۴ **
سلنیوم	۱	۳/۰۰۴ **	۱/۰۶۷ **	۳/۸۶ **	۵/۲۱ **	۱/۹۸ **
کادمیوم × بیوچار	۲	۱/۹۷ **	۰/۳۲۵ **	۰/۲۸۷ *	۰/۲۲۸ ns	۱/۰۹ **
کادمیوم × سلنیوم	۲	۱/۰۸۴ **	۰/۳۵۰ **	۰/۸۰ **	۰/۱۰۰ ns	۰/۹۴۴ **
بیوچار × سلنیوم	۱	۰/۴۴۸ *	۰/۴۰۰ **	۲/۳۵ **	۳/۶۷ **	۰/۵۷۲ **
کادمیوم × بیوچار × سلنیوم	۲	۰/۲۲۸ *	۰/۱۳۰ *	۰/۵۴ ns	۰/۱۱۶ ns	۰/۰۹۶ ns
خطا	۲۲	۰/۰۸۵	۰/۰۳۲	۰/۰۷۱	۰/۲۸۰	۰/۰۶۷
ضریب تغییرات (٪)	–	۱۰/۳۱	۱۱/۵۴	۳/۱۷	۳/۱۸	۴/۸۲

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

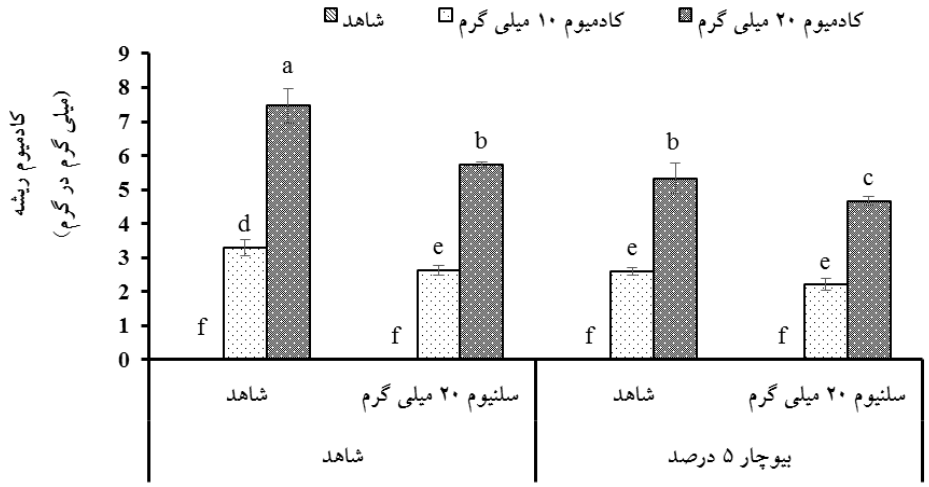
نسبی آب برگ در تیمار شاهد نیز برابر ۷۹/۷۲ درصد بود (جدول ۶).

صفات شیمیایی و بیوشیمیایی: براساس نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی کادمیوم، بیوچار و سلنیوم بر کادمیوم ریشه و اندام هوایی، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و قند محلول در سطح ۱ درصد ($P\leq0.01$) معنی‌دار شد. اثر متقابل کادمیوم و بیوچار و کادمیوم و سلنیوم بر کادمیوم ریشه و اندام هوایی، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و قند محلول در سطح ۱ درصد ($P\leq0.01$) معنی‌دار شد. اثر متقابل بیوچار و سلنیوم بر کادمیوم ریشه در سطح ۵ درصد ($P\leq0.05$)، کادمیوم اندام هوایی، فنل کل، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و قند محلول و کادمیوم اندام هوایی در سطح یک درصد ($P\leq0.01$) معنی‌دار شد. اثر متقابل کادمیوم و بیوچار و سلنیوم بر کادمیوم ریشه و اندام هوایی در سطح ۵ درصد ($P\leq0.05$) معنی‌دار شد (جدول ۷).

کادمیوم سبب افزایش مقدار کادمیوم ریشه شد اما استفاده از تیمارهای بیوچار و سلنیوم سبب کاهش مقدار کادمیوم ریشه شد. بیشترین مقدار کادمیوم ریشه با ۷/۴۶ میلی‌گرم در گرم در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و بیوچار صفر (شاهد) و سلنیوم صفر (شاهد) مشاهده شد. در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، تیمارهای بیوچار ۵ درصد حجمی و سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار کادمیوم ریشه را به میزان ۳۷/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد بیوچار و سلنیوم) کاهش داد (شکل ۳). در خاک‌های آلوده به کادمیوم، کلید تولید غذای ایمن، کاهش محتوای کادمیوم در قسمت‌های خوراکی گیاهان است (Rizwan *et al.*, 2016). مطابق با یافته‌های این تحقیق، غلظت کادمیوم با استفاده از بیوچار در برخی از گیاهان مانند اسفناج (Khan *et al.*, 2020) کاهش یافت. گزارش شده است که نوع کادمیوم در خاک توسط بیوچار اصلاح می‌شود که ممکن است جذب آن توسط گونه‌های گیاهی را کاهش دهد (Rizwan *et al.*, 2016; Qiu *et al.*, 2020). کاهش غلظت کادمیوم پس از استفاده از بیوچار ممکن است در نتیجه کاهش غلظت کادمیوم آب منفذی یا افزایش سطوح کادمیوم متصل به ماده آلی خاک باشد (Lu *et al.*, 2017).

بیوچار و سلنیوم با کاهش اثر کادمیوم، میزان کادمیوم اندام هوایی را به‌طور معنی‌داری کاهش دادند. بیشترین مقدار

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]



شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم و بیوچار و سلنیوم بر کادمیوم ریشه گشنیز

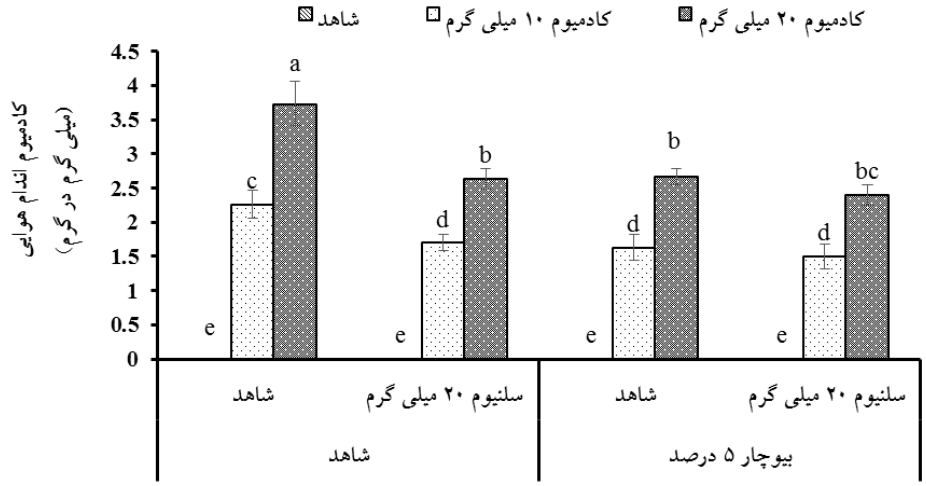
کادمیوم اندام هوایی با ۳/۷۳ میلی‌گرم در گرم در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم و بیوچار صفر (شاهد) و سلنیوم صفر (شاهد) مشاهده شد. در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم، تیمارهای بیوچار ۵ درصد و سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم، مقدار کادمیوم اندام هوایی را به میزان ۳۵/۷۱ درصد کاهش دادند (شکل ۴). ارزیابی تحقیقات قبلی نشان داده است که بیوچار می‌تواند تأثیر مضر فلزات سنگین را کاهش دهد، که ممکن است به دلیل مکانیسم‌های مختلف از جمله افزایش جذب یون‌های مضر با استفاده از بیوچار، افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک و در دسترس بودن رطوبت باشد. خاکی که می‌تواند یون‌های موجود در محلول خاک را رقیق کند که منجر به کاهش سمیت یونی برای محصولات می‌شود (Jing *et al.*, 2020; Qiu *et al.*, 2020; Khan *et al.*, 2020).

کمترین مقدار فنل کل در تیمارهای بیوچار صفر (شاهد) و سلنیوم صفر (شاهد) مشاهده شد. بیشترین مقدار فنل کل نیز در تیمارهای بیوچار ۵ درصد حجمی و سلنیوم صفر (شاهد)، بیوچار ۵ درصد حجمی و سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد (شکل ۵).

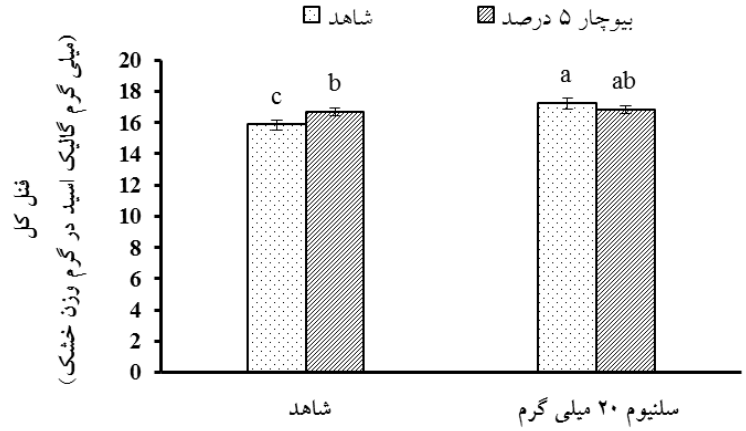
فنل و فلاونوئید که دارای خواص آنتی‌اکسیدانی هستند در پاسخ به افزایش گونه‌های فعال اکسیژن تحت تنش‌های زنده و غیرزنده تحریک می‌شود. آن‌ها در بافت‌های گیاهی به وفور وجود دارند. این ترکیبات مستقیماً گونه‌های مولکولی اکسیژن فعال را از بین ببرند و ممکن است با به دام انداختن رادیکال لیپیدی آلکوکسیل، پراکسیداسیون لیپیدی را متوقف کنند. علاوه‌براین، فلاونوئیدها توسط پراکسیداز اکسید می‌شوند و به عنوان مهارکننده H_2O_2 عمل می‌کنند (Bartwal *et al.*, 2013).

کادمیوم سبب افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز شد اما بیوچار با تعدیل اثر کادمیوم سبب کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین مقدار آنزیم سوپراکسید دیسموتاز ۸/۰۳ واحد آنزیمی در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و بیوچار صفر (شاهد) مشاهده شد. در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، بیوچار ۵ درصد حجمی سبب کاهش ۱۳/۱۵ درصدی فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد بیوچار) شد (شکل ۶a). تنش کادمیوم در گیاهان همچنین منجر به تغییرات شدید در فعالیت آنزیم به دلیل استرس اکسیداتیو در سلول‌های گیاهی می‌شود (Gupta *et al.*, 2019). مطالعات نشان داده‌اند که کادمیوم اضافی باعث تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن مانند H_2O_2، O_2 و OH در سلول‌ها می‌شود. تشکیل رادیکال‌های آزاد باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های مختلف از جمله سوپراکسید دیسموتاز می‌شود (Pandey and Dubey, 2016). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان خط مقدم حفاظت گیاه در برابر گونه‌های فعال اکسیژن در هر دو شرایط زیستی و غیرزنده هستند. شرایط استرس‌زا اغلب منجر

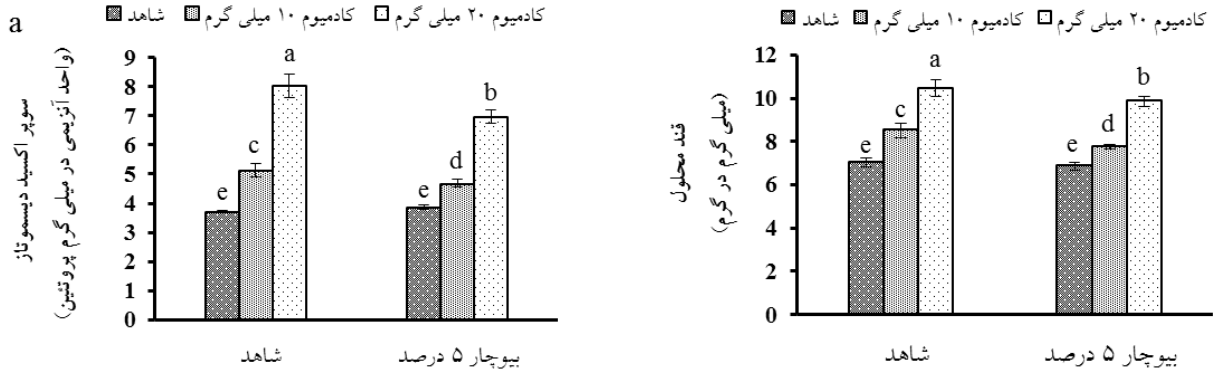
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]



شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم و بیوچار و سلنیوم بر کادمیوم اندام هوایی گشنیز



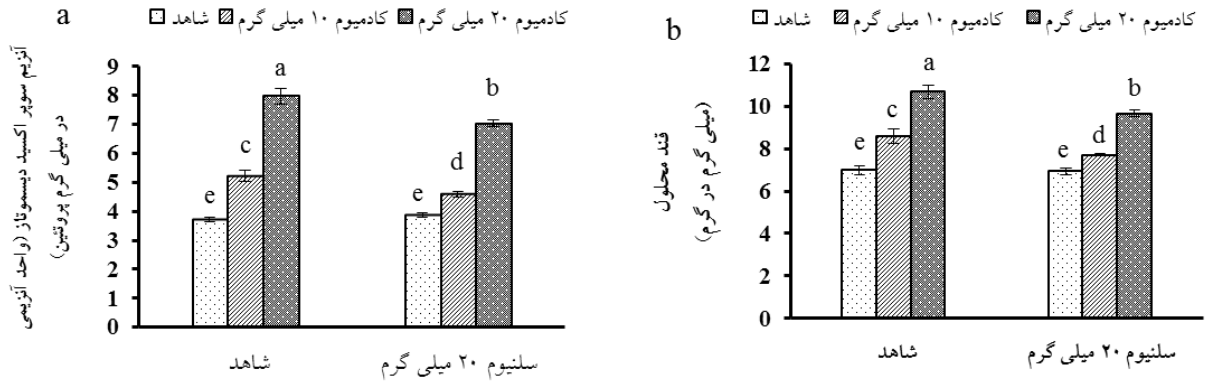
شکل ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار و سلنیوم بر فنل کل گشنیز



شکل ۶- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم و بیوچار بر سوپراکسید دیسموتاز (a) و قند محلول (b)

به تجمع بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود که باعث استرس اکسیداتیو می‌شود. از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن به‌طور مستقیم با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز مرتبط است. فعالیت این

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]



شکل ۷- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیوم و سلنیوم بر سوپراکسید دیسموتاز (a) و قند محلول (b)

آنزیم‌ها به‌طورکلی با افزایش شدت تنش افزایش می‌یابد (Scherer *et al*., 2013).

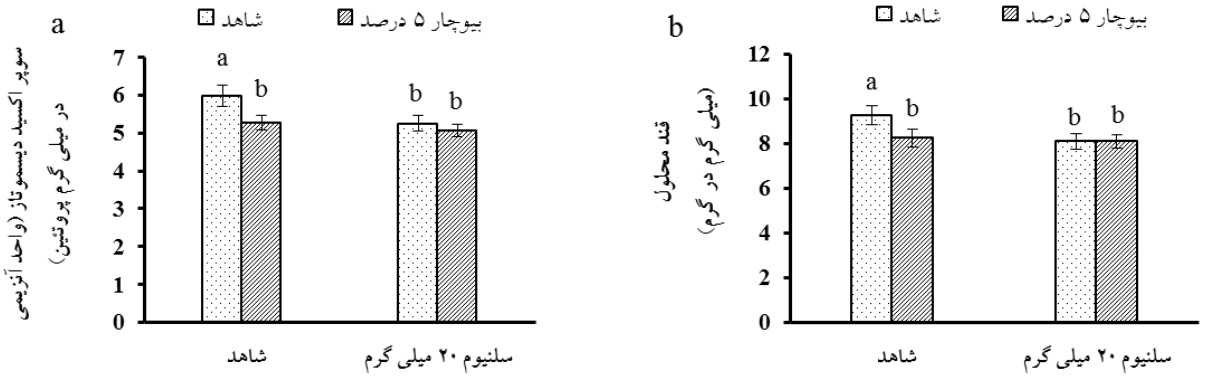
سلنیوم با تعدیل اثر کادمیوم سبب کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین مقدار آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با ۷/۹۷ واحد آنزیمی در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم و بیوچار صفر (شاهد) مشاهده شد. در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سبب کاهش ۱۱/۸۲ درصدی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد بیوچار) شد (شکل ۷a).

تیمارهای بیوچار و سلنیوم هردو سبب کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نسبت به تیمار شاهد شدند. بیشترین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با ۵/۹۸ واحد آنزیمی در تیمار شاهد (عدم کاربرد بیوچار و سلنیوم) مشاهده شد. مقدار آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند (شکل ۷b).

کادمیوم مقدار قند محلول را به‌طور معنی‌داری افزایش داد اما بیوچار با تعدیل اثر کادمیوم سبب کاهش قند محلول شد. بیشترین مقدار قند محلول با ۱۰/۴۶ میلی‌گرم در گرم در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و بیوچار صفر (شاهد) مشاهده شد. در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، بیوچار ۵ درصد حجمی مقدار قند محلول را به میزان ۵/۷۳ درصد کاهش داد این مقدار در تیمار کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم برابر ۹ درصد بود (شکل ۶b). در شرایط تنش، افزایش کل قندهای محلول، غشاهای مختلف و ساختارهای سلولی مختلف را از تأثیرات مضر استرس حفظ می‌کند. با افزایش قندهای محلول در شرایط تنش، ذخیره کربوهیدرات گیاهان در سطح مطلوب برای حمایت از متابولیسم پایه حفظ می‌شود. علاوه‌براین، افزایش غلظت قند در گیاهان مرتبط با کاهش آب در سلول‌ها عامل مهمی در کاهش رشد گیاه است (Rohani *et al*., 2019). تحقیقات نشان داده است کاربرد بیوچار باعث افزایش فتوسنتز، محتوای کلروفیل، سرعت تعرق، فلاونوئید کل، قند و گلوکز در گیاهان مختلف مانند بادام‌زمینی، گوجه‌فرنگی، کاهو و ذرت شده است (Agegnehu *et al*., 2015; Petruccelli *et al*., 2015; Speratti *et al*., 2018). در تحقیقات دیگر کاربرد بیوچار به‌طور قابل‌توجهی قند کل ریحان را در مقایسه با شاهد افزایش داد (Petruccelli *et al*., 2015).

بیشترین مقدار قند محلول با ۱۰/۶۸ میلی‌گرم در گرم در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و سلنیوم صفر (شاهد) مشاهده شد. در تیمارهای کادمیوم ۲۰ و ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار قند محلول را به ترتیب ۹/۶ و ۱۰/۱۱ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد سلنیوم) کاهش دادند (شکل ۷b). احتمالاً اثر سلنیوم در فراتنظیمی متابولیسم کربوهیدرات می‌تواند به اثر تحریک‌کنندگی فتوسنتز آن کمک کند (Feng *et al*., 2013). تیمارهای بیوچار و سلنیوم سبب کاهش معنی‌داری قند محلول نسبت به تیمار شاهد شدند. بیشترین مقدار قند محلول با ۹/۲۵

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]



شکل ۸- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل بیوچار و سلنیوم بر سوپراکسید دیسموتاز (a) و قند محلول (b)

میلی‌گرم در گرم در تیمار بیوچار صفر (شاهد) و سلنیوم صفر (شاهد) مشاهده شد. مقدار قند محلول در سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند (شکل ۸b).

بیوچار به‌عنوان تهویه‌کننده خاک، حاوی مواد مغذی گیاهی است با این حال، بهتر است از بیوچار همراه با مواد مغذی اضافی برای بهبود عملکرد آن استفاده شود. مطالعات دیگر نشان داده است که بیوچار مواد مغذی را در برابر شستشو حفظ می‌کند که به‌طور بالقوه باعث بهبود کارایی مواد مغذی به کار رفته در کنار بیوچار می‌شود (Agegnehu *et al*., 2015). منبع مواد بیوچار به شدت بر محتوا و در دسترس‌بودن عناصر غذایی در خاک پس از اصلاح تأثیر می‌گذارد. خواص شیمیایی خاک پس از اصلاح به شدت تحت تأثیر منبع بیوچار اعمال شده قرار خواهد گرفت (Major *et al*., 2010). Pandey و همکاران (۲۰۱۶) دریافتند که بیوچار باعث افزایش عملکرد اسانس ریحان شد.

فنل کل گشنیز در نتیجه تنش کادمیوم تا سطح ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش پیدا کرد اما در تیمار کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. محلول‌پاشی سلنیوم سبب افزایش صفات وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و فنل کل و کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و قند محلول شد. بیوچار نیز با بهبود وضعیت خاک سبب افزایش صفات وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و فنل کل و کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و قند محلول شد. شناخت منابع خاک در یک منطقه و اتخاذ گزینه‌های مدیریتی برای بهبود بهره‌وری خاک برای استفاده پایدار ضروری است. استفاده از بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک با کود معدنی و سایر اصلاحات آلی با بهبود خواص خاک مانند pH خاک، هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر موجود و کاتیون‌های قابل تعویض، بهره‌وری کشاورزی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

منابع

Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Abbas, F., & Ok, Y. S. (2017). Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *140*, 37-47. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.028

Afshari, M., Pazoki, A., & Sadeghipour, O. (2021). Foliar-applied silicon and its nanoparticles stimulates physio-chemical changes to improve growth, yield and active constituents of coriander (*Coriandrum Sativum* L.) essential oil under different irrigation regimes. *Silicon*, *13*, 4177-4188. https://doi.org/10.1007/s12633-021-01101-8

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

North Queensland, Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 213*, 72-85. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.027

Ali, S., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Ibrahim, M., Riaz, M., & Shahzad, A. N. (2017). Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(14), 12700-12712. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8904-x

Altland, J. E. & Locke, J. C. (2013). Effect of biochar type on macronutrient retention and release from soilless substrate. *Hort Science*, *48*(11), 1397-1402. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.11.1397

Alyemeni, M. N., Ahanger, M. A., Wijaya, L., Alam, P., Bhardwaj, R., & 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. https://doi.org/10.1007/s00709-017-1162-4

Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, *24*(1), 1-15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1

Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., & Hipps, N. A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil*, *337*(1), 1-18. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5

Babashpour-Asl, M., Farajzadeh-Memari-Tabrizi, E., & 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*(53): 80021-80031. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19941-1

Bakhtiari, M., Mozafari, H., Asl, K. K., Sani, B., & Mirza, M. (2020). Bio-organic and inorganic fertilizers modify leaf nutrients, essential oil properties, and antioxidant capacity in medic savory (*Satureja macrantha* L.). *Journal of Biological Research-Bollettino della Societa Italiana di Biologia Sperimentale*, *93*(1). https://doi.org/10.4081/jbr.2020.8477

Balakhnina, T. I. & Nadezhkina, E. S. (2017). Effect of selenium on growth and antioxidant capacity of *Triticum aestivum* L. during development of lead-induced oxidative stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, *64*(2), 215-223. https://doi.org/10.1134/S1021443717010022

Bartwal, A., Mall, R., Lohani, P., Guru, S. K., & Arora, S. (2013). Role of secondary metabolites and brassinosteroids in plant defense against environmental stresses. *Journal of Plant Growth Regulation*, *32*(1), 216–232. https://doi.org/10.1007/s00344-012-9272-x

Broadley, M. R., Alcock, J., Alford, J., Cartwright, P., Foot, I., Fairweather-Tait, S. J., Hart, D. J., Hurst, R., Knott, P., Mcgrath, S. P., *et al.*, (2010). Selenium biofortification of high-yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilization. *Plant and Soil*, *332*, 5-18. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0234-4

Durukan, H., Demirbas, A., & Turkekul, I. (2020). Effects of biochar rates on yield and nutrient uptake of sugar beet plants grown under drought stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *51*(21), 2735-2745. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1849257

Elemike, E. E., Uzoh, I. M., Onwudiwe, D. C., & Babalola, O. O. (2019). The role of nanotechnology in the fortification of plant nutrients and improvement of crop production. *Applied Sciences*, *9*, 499. https://doi.org/10.3390/app9030499

El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Najjar, A. A., Alzahrani, S. O., Alkhatib, F. M., Shafi, M. E., & Hassan, M. A. (2021). The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by *Fusarium* species and improve yield under drought and heat stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *28*, 4461-4471. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.043

Feng, R., Wei, C., & Tu, S. (2013). The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and Experimental Botany*, *87*, 58-68. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.09.002

Garcia, J. E., Maroniche, G., Creus, C., Suarez-Rodriguez, R., Ramirez-Trujillo, J. A., & Groppa, M. D. (2017). *In vitro* PGPR properties and osmotic tolerance of different Azospirillum native strains and their effects on growth of maize under drought stress. *Microbiological Research*, *202*, 21-29. https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.04.007

Ghasemian, S., Masoudian, N., Saeid Nematpour, F., & Safipour Afshar, A. (2021). Selenium nanoparticles stimulate growth, physiology, and gene expression to alleviate salt stress in *Melissa officinalis*. *Biologia*, *76*(10), 2879-2888. https://doi.org/10.1007/s11756-021-00854-2

Giannopolitis, C. N. & Ries, S. K. (1977) Superoxide dismutases I. occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, *59*, 309-314. http://dx.doi.org/10.1104/pp.59.2.309

Gupta, M. & Gupta, S. (2017). An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 2074. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074

Gupta, N., Yadav, K. K., Kumar, V., Kumar, S., Chadd, R. P., & Kumar, A. (2019). Trace elements in soil-vegetables interface: Translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration-a review. *Science of the Total Environment*, *651*, 2927-2942. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.047

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

Ikram, M., Raja, N. I., Javed, B., Hussain, M., Hussain, M., Ehsan, M., & Akram, A. (2020). Foliar applications of bio-fabricated selenium nanoparticles to improve the growth of wheat plants under drought stress. *Green Processing and Synthesis*, *9*(1), 706-714. https://doi.org/10.1515/gps-2020-0067

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

Jing, F., Chen, C., Chen, X., Liu, W., Wen, X., Hu, S., & Yu, Q. (2020). Effects of wheat straw derived biochar on cadmium availability in a paddy soil and its accumulation in rice. *Environmental Pollution*, *257*, 113592. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113592

Keabetswe, L., Shao, G. C., Cui, J., Lu, J., & Stimela, T. (2019). A combination of biochar and regulated deficit irrigation improves tomato fruit quality: A comprehensive quality analysis. *Folia Horticulturae*, *31*(1), 181-193. https://doi.org/10.2478/fhort-2019-0013

Khan, A. Z., Ding, X., Khan, S., Ayaz, T., Fidel, R., & Khan, M. A. (2020). Biochar efficacy for reducing heavy metals uptake by Cilantro (*Coriandrum sativum*) and spinach (*Spinaccia oleracea*) to minimize human health risk. *Chemosphere*, *244*, 125543. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125543

Kochert, G. (1978). Carbohydrate determination by the phenol-sulfuric acid method. *Handbook of Phycological Methods, Phycological and Biochemical Methods*, *95*-97. https://doi.org/10.1016/j.ab.2004.12.001

Lu, K., Yang, X., Gielen, G., Bolan, N., Ok, Y. S., Niazi, N. K., & Wang, H. (2017). Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, *186*, 285-292. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.068

Lugojan, C. & Ciulca, S. (2011). Evaluation of relative water content in winter wheat. *Forest Biotechnology 15*, 173-177.

Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a *Colombian savanna* oxisol. *Plant and Soil*, *333*(1), 117-128. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0

Manzoor, F., Wei, L., Nurunnabi, M., Subhan, Q. A., Shah, S. I. A., & Fallatah, S. (2019). The impact of transformational leadership on job performance and CSR as mediator in SMEs. *Sustainability*, *11*, 436. https://doi.org/10.3390/su11020436

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

Munoz-Munoz, J. L., Garcia-Molina, F., Garcia-Ruiz, P. A., Arribas, E., Tudela, J., Garcia-Canovas, F., & Rodriguez-Lopez, J. N. (2009). Enzymatic and chemical oxidation of trihydroxylated phenols. *Food Chemistry*, *113*, 435-444. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.076

Neysanian, M., Ahmadvand, R., Oraghi Ardebili, Z., & Ebadi, M. (2021). The effect of Selenium nanoparticles on some morphological and anatomical features of cherry tomato plants (*Solanum lycopersicum* L. var. *cerasiforme*). *Developmental Biology*, *13*(3), 39-54. https://doi.org/10.30495/jdb.2021.686361

Ngumbi, E. & Kloepper, J. (2016). Bacterial-mediated drought tolerance: Current and future prospects. *Applied Soil Ecology*, *105*, 109-125. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.009

Nourzad, S., Ahmadian, A., & Moghaddam, M. (2015). Proline, total chlorophyll, carbohydrate amount and nutrients uptake in coriander (*Coriandrum sativum* L.) under drought stress and fertilizers application. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *13*(1), 131-139. https://doi.org/10.22067/gsc.v13i1.26013

Oraghi Ardebili, N., Iranbakhsh, A., & Oraghi Ardebili, Z. (2019). Efficiency of selenium and salicylic acid protection against salinity in soybean. *Plant Physiol*ogy, *9*, 2727-2738.

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. https://doi.org/10.1071/CP14247

Qiu, Z., Tang, J., Chen, J., & Zhang, Q. (2020). Remediation of cadmium-contaminated soil with biochar simultaneously improves biochar's recalcitrance. *Environmental Pollution*, *256*, 113436. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113436

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, *125*, 365-385. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067

Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, *361*, 114055. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055

Reeves, R. D., Baker, A. J. M., Borhidi, A., & Berazain, R. (1999). Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. *Annals of Botany*, *83*(1), 29-38. https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0786

Reis, J., Amorim, M., Melao, N., & Matos, P. (2018). Digital transformation: A literature review and guidelines for future research. In: Trends and Advances in Information Systems and Technologies. (eds. Rocha, A., Adeli, H., Reis, L. P. and Costanzo, S.) WorldCIST'18 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, 745. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77703-0_41.

Ritchie, S. W., Nguyen, H. T., & 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. https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x

Rizwan, M., Ali, S., Abbas, T., Zia-ur-Rehman, M., Hannan, F., Keller, C., & Ok, Y. S. (2016). Cadmium minimization in wheat: A critical review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *130*, 43-53. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.04.001

Rohani, N., Daneshmand, F., Vaziri, A., Mahmoudi, M., & Saber-Mahani, F. (2019). Growth and some physiological characteristics of *Pistacia vera* L. cv Ahmad Aghaei in response to cadmium stress and *Glomus mosseae* symbiosis. *South African Journal of Botany*, *124*, 499-507. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.06.001

Saini, S. & Dhania, G. (2020). Cadmium as an environmental pollutant: ecotoxicological effects, health hazards, and bioremediation approaches for its detoxification from contaminated sites. In: Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety. Pp. 357-387. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3426-9_15

Saleh, S. R., Kandeel, M. M., Ghareeb, D., Ghoneim, T. M., Talha, N. I., Alaoui-Sosse, B., & Abdel-Daim, M. M. (2020). Wheat biological responses to stress caused by cadmium, nickel and lead. *Science of The Total Environment*, *706*, 136013. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136013

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. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.007

Semida, W. M., Beheiry, H. R., Setamou, M., Simpson, C. R., Abd El-Mageed, T. A., Rady, M. M., & Nelson, S. D. (2019). Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. *South African Journal of Botany*, *127*, 333-347. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.015

Shahid, M. A., Balal, R. M., Khan, N., Zotarelli, L., Liu, G. D., Sarkhosh, A., Fernandez-Zapata, J. C., Nicolas, J. J., & Garcia-Sanchez, F. (2019). Selenium impedes cadmium and arsenic toxicity in potato by modulating carbohydrate and nitrogen metabolism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *180*, 588-599.

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

Wang, X. X., Zhao, F., Zhang, G., Zhang, Y., & Yang, L. (2017). Vermicompost improves tomato yield and quality and the biochemical properties of soils with different tomato planting history in a greenhouse study. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 1978. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01978

Windeatt, J. H., Ross, A. B., Williams, P. T., Forster, P. M., Nahil, M. A., & Singh, S. (2014). Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbon sequestration and soil amendment. *Journal of Environmental Management*, *146*, 189-197. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.003

Younis, U., Malik, S. A., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Shah, M. H. R., & Ahmad, N. (2016). Biochar enhances the cadmium tolerance in spinach (*Spinacia oleracea*) through modification of Cd uptake and physiological and biochemical attributes. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(21), 21385-21394. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7344-3

Zahedi, S. M., Abdelrahman, M., Hosseini, M. S., Hoveizeh, N. F., & Tran, L. S. P. (2019). Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium-nanoparticles. *Environmental Pollution*, *253*, 246-258. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.078

Zargar Shooshtari, F., Souri, M. K., Hasandokht, M. R., & 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. https://doi.org/10.1186/s40538-020-00185-5

Zhang, Y., Ding, J., Wang, H., Su, L., & 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. https://doi.org/10.1186/s12870-020-02493-2

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

Zheng, S., Wang, Q., Yuan, Y., & Sun, W. (2020). Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China. *Food Chemistry*, *316*, 126213. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126213

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]

Effect of biochar and selenium on alleviating oxidative stressed induced by cadmium on coriander (*Coriandrum sativum* L.)

Fatemeh Rafighzadeh, Marzieh Ghanbari Jahromi*, Marjan Diyanat

Department of Horticultural Science and Agronomy, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 2023/08/06, Accepted: 2023/11/20)

Abstract

In order to investigate the effect of biochar and selenium on the quantitative and qualitative characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) under cadmium stress, a factorial experiment was conducted in the form of a completely randomized design with three replications in greenhouse conditions during the years 2022. The experimental treatments include the use of cadmium chloride at three levels (0, 10 and 20 mg/kg), biochar at two levels (0 and 5% of soil) and foliar spraying with sodium selenate at two levels (0 and 20 mg/l). The results of this research showed that cadmium treatment of 20 mg/kg caused a decrease in fresh and dry weight of shoot and root, chlorophyll a, b and total, relative leaf water content and increased activity of superoxide dismutase enzyme and soluble sugar. Phenol increased up to the cadmium level of 10 mg/kg, but decreased at higher cadmium levels (20 mg/kg). By reducing the effect of cadmium stress, selenium and biochar treatments increased the fresh and dry weight of roots and shoots, chlorophyll content, relative leaf water content, and essential oil yield, and decreased the characteristics of superoxide dismutase enzyme activity, soluble sugar, and cadmium accumulation in roots and shoots. The highest amount of essential oil yield (16.93 mg/plant) and percentage of essential oil (0.44%) was observed in the combination treatment of biochar 5% by volume and selenium 20 mg/l. Biochar and selenium improved coriander traits by modulating the effect of cadmium stress.

Keywords: Percentage of essential oil, Toxicity, Enzyme activity, Foliar spraying

Corresponding author, Email: feizian.m@lu.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-08-16]