فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۲، شماره ۵۷، آذر و دی‌ماه ۱۴۰۲ صفحه: ۳۶۹-۳۸۴
https://doi.org/10.22034/12.57.369

مقاله پژوهشی

بهبود رشد و صفات فیزیولوژیکی زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) با بسترهای مختلف کاشت تحت تنش عناصر سنگین در مرحله زایشی

عبدالرضا فضلی و مهدی مدن‌دوست*

گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۲/۲۷)

چکیده

آلودگی عناصر سنگین در خاک یک مشکل گسترده جهانی است، بنابراین جهت کاهش تجمع و اثرات منفی فلزات سنگین در گیاهان استفاده از بسترهای مختلف کاشت راهکاری مؤثر و اقتصادی است. به منظور بررسی بهبود رشد و صفات فیزیولوژیکی زیره سبز با بسترهای مختلف کاشت تحت تنش عناصر سنگین، آزمایشی در قالب فاکتوریل و بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ انجام گردید. عامل اول آزمایش شامل عناصر سنگین در چهار سطح (شاهد، کادمیوم، سرب و نیکل) با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و عامل دوم شامل بسترهای مختلف کاشت در چهار سطح (شاهد، کود دامی، کمپوست، ورمی‌کمپوست) بود. نتایج نشان داد که عناصر سنگین در خاک سبب جذب و انتقال به اندام‌های هوایی شده است. از سوی دیگر مصرف کودهای آلی سبب کاهش معنی‌دار کادمیوم، سرب و نیکل اندام هوایی نسبت به شاهد گردید. عناصر سنگین با افزایش نشت یونی و کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، وزن خشک اندام هوایی و عملکرد دانه را کاهش دادند. کود دامی و ورمی‌کمپوست محتوای کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ را به طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش دادند. همچنین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز تحت تنش عناصر سنگین افزایش معنی‌داری نشان داد. در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد ورمی‌کمپوست و کود دامی بهترین شرایط را برای رشد زیره سبز تحت تنش عناصر سنگین را فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: آنتی‌اکسیدان آنزیمی، رنگیزه‌های فتوسنتزی، فلزت سنگین، کود آلی، مرحله گل‌دهی

مقدمه

زیره سبز با نام علمی *Cuminum cyminum* L. از خانواده چتریان (Apiaceae) گیاهی یک‌ساله و از مهم‌ترین و اقتصادی‌ترین گیاهان دارویی است که می‌تواند در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران در شرایط کمبود آب و با حاصلخیزی کم خاک کاشته شود (قنبری و همکاران، ۱۳۸۴). به همین دلیل در سال‌های اخیر توجه بیشتری به کاشت زیره سبز شده است و سطح زیرکشت آن افزایش پیدا کرده است (Moghaddam and Pirbalouti, 2017). از آنجا که تحقیقات کمی در زمینه افزایش تولید گیاهان دارویی انجام شده است، ارائه روش‌های مناسب تولید جهت افزایش کمیت و کیفیت گیاهان دارویی حائز اهمیت است (Li *et al.*, 2020). از سوی دیگر ارزیابی پاسخ‌های مختلف در گیاهان دارویی به‌ویژه با استفاده از عناصر سنگین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است،

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: mehdi.madandoust@iau.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

زیرا به دلیل تجمع عناصر سنگین علاوه بر کاهش رشد این گیاهان ممکن است ترکیبات ماده مؤثره آنها کاهش پیدا کند (Karahan *et al*., 2020). بنابراین گیاهان دارویی ممکن است در صورت رشد در شرایط تنش عناصر سنگین، بخشی از خواص دارویی آنها از بین رفته و حتی به دلیل آلودگی اندام‌های مختلف این گیاهان خطراتی برای سلامتی داشته باشند (Tripathi *et al*., 2021).

عناصر سنگین به عناصری گفته می‌شود که عدد اتمی آنها بیشتر از ۲۰ و یا عناصری که دارای چگالی زیاد (۳/۵ تا ۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) باشند. با این تعریف ۵۳ عنصر از ۹۰ عنصر طبیعی شناخته شده، عناصر سنگین محسوب می‌شوند (فاتحی و همکاران، ۱۳۹۷). منابع طبیعی و انسانی بسیاری وجود دارند که می‌توانند باعث تجمع غلظت‌های بالایی از عناصر سنگین شوند، که می‌توان آنها را به منابع طبیعی، کشاورزی، صنعتی، شهری و حمل و نقل تقسیم کرد (Sall *et al*., 2020). عناصر سنگین شامل عناصر نیکل (وزن مولکولی ۵۸/۶۹)، سرب (وزن مولکولی ۲۰۷/۲)، جیوه (وزن مولکولی ۲۰۰/۵۹)، مس (وزن مولکولی ۶۳/۵۵)، کروم (وزن مولکولی ۵۱/۹۹) و کادمیوم (وزن مولکولی ۱۱۲/۴۱) هستند (Gjorgieva Ackova, 2018). میزان سمیت عناصر سنگین کادمیوم، سرب و نیکل در برگ‌ها به‌ترتیب بین ۳۰-۵، ۳۰۰-۳۰ و ۱۰۰- ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک است (Gautam and Agrawal, 2017; Khalilzadeh *et al*., 2021). هنگامی که یون عناصر سنگین در سطوح بالا در محیط وجود داشته باشند، بیش از اندازه توسط ریشه گیاه جذب و به اندام‌های هوایی منتقل گشته و انباشته می‌شوند که منجر به صدمات متابولیسمی و کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌گردند (Sterckeman and Thomine, 2020). به‌نظر می‌رسد سازوکارهای زیستی رفع آلودگی گیاه هنوز به طور کامل مورد شناسایی قرار نگرفته‌اند و هنوز اطلاعات بسیاری در مورد فرآیندهای مؤثر در نحوه رفع آلودگی عناصر سنگین ناشناخته باقی مانده است (Sarwar *et al*., 2017; Vardhan *et al*., 2019). صرف‌نظر از نوع گیاه مورد استفاده، به‌کارگیری مواد اصلاحی آلی و معدنی در خاک سبب تغییر در حلالیت عناصر سنگین، میزان جذب و تجمع آنها در گیاه می‌گردد (Bahrami *et al*., 2021).

کودهای آلی به دلیل بالا بودن مقدار ماده آلی، با عناصر سنگین پیوند یافته و قادر است برای مدت زمان طولانی آلاینده‌ها را در خود نگهداری کند. کودهای آلی می‌تواند سطوح زیادی از فلزات محلول را از خاک حذف کرده و سمیت آن‌ها را کاهش دهد (Tufail *et al*., 2022). مطالعات متعددی وجود دارد که تأیید می‌کند کودهای آلی می‌توانند به عنوان اصلاح‌کننده خاک تجمع عناصر سنگین را در گیاهان کاهش دهند (Alam *et al*., 2020; Wan *et al*., 2020). بنابراین روش‌های نوین کاهش اثرات عناصر سنگین بر رشد گیاهان، کاربرد ترکیبات اصلاح‌کننده در خاک مانند کودهای آلی است. در سالیان اخیر استفاده از کودهای آلی برای اصلاح کیفیت خاک مورد توجه قرار گرفته است که فراهمی زیستی آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد (Guo *et al*., 2019). کودهای آلی با تأثیر بر شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک (Attarzadeh *et al*., 2019)، کاهش فراهمی زیستی عناصر سنگین و تغییر در فعالیت ریزجانداران مفید خاکزی در زمین‌های کشاورزی آلوده به عناصر سنگین، راندمان پاکسازی بالایی را ایجاد می‌کنند (Hong *et al*., 2022). با توجه به اهمیت ترکیبات آلی بستر کاشت در کاهش آلودگی ناشی از عناصر سنگین در خاک و خطرات ناشی از این آلودگی برای گیاهان و در نتیجه سلامت انسان و ضرورت استفاده از راه‌کارهایی برای مقابله با این تنش‌ها، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر ترکیبات مختلف بستر کاشت بر کاهش سمیت و انباشتگی عناصر سنگین در زیره سبز است.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش و تیمارها: این پژوهش در قالب فاکتوریل و بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ به صورت گلدانی در در هوای آزاد در شهر شیراز با عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۳ دقیقه شرقی و ارتفاع حدود ۱۵۰۰ متر از سطح

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

دریا انجام گردید. فاکتورهای آزمایش شامل عناصر سنگین در چهار سطح به‌طور مجزا (شاهد، نیترات کادمیوم، نیترات سرب و نیترات نیکل) با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (بلوچی و همکاران، ۱۳۹۶) و فاکتور بسترهای مختلف کاشت در چهار سطح شاهد (خاک معمولی)، کود دامی گوسفندی، کمپوست شیرین‌بیان (*Glycyrizha glabra*) و ورمی‌کمپوست بود. عناصر سنگین نیترات کادمیوم، نیترات سرب و نیترات نیکل شرکت مرک آلمان استفاده شد.

اجرای آزمایش: ابتدا گلدان‌ها با خاک مزرعه پر شدند. گلدان‌های استفاده‌شده از جنس پلاستیک، با ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر و وزن یکسان (۶ کیلوگرم) بود. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش به شرح جدول ۱ است. همچنین نتایج آنالیز کودهای آلی استفاده‌شده در جدول ۲ گزارش شده است. غلظت عناصر سنگین در خاک و ترکیبات آلی قبل از اعمال تیمارهای فلزات سنگین در جدول ۳ آورده شده است. برای تیمارهای ترکیب‌های آلی خاک بر طبق برخی پیشنهادهای قبلی محققان با نسبت ۵ درصد وزنی خاک گلدان (در حدود ۳۰۰ گرم کود آلی در هر گلدان) به طور دستی با خاک هر گلدان قبل از کاشت مخلوط شد (Angelova *et al.*, 2010؛ بلوچی و همکاران، ۱۳۹۶). در مرحله بعد عناصر سنگین نیترات کادمیوم، نیترات سرب و نیترات نیکل با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک توسط افشانه به خاک‌های تقویت شده (با کودها) اضافه شد (Jadia and Fulekar, 2008). بعد از گذشت یک ماه (با یکنواخت شدن فلز سنگین با خاک) کاشت صورت گرفت. در هر گلدان ده بذر زیره سبز کاشته شد و پس از سبز شدن به چهار بوته تنک شد. لازم به ذکر است که قبل از کاشت ۰/۳ گرم کود فسفات آمونیوم در لایه یک سانتی‌متری زیر بذر قرار داده شد و ۰/۵ گرم کود اوره همراه با اولین آب آبیاری و ۰/۵ گرم دیگر کود اوره نیز به صورت سرک طی مرحله گلدهی همراه با آب آبیاری اضافه شد.

آبیاری به صورت ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک انجام شد. جهت محاسبه درصد وزنی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی، چهار گلدان به صورت تصادفی انتخاب و به حد اشباع از آب رسانده شدند، سپس سطح گلدان‌ها را پس از پوشاندن به وسیله فویل آلومینیومی (جهت جلوگیری از تبخیر از سطح گلدان‌ها) به روی سطوح مشبک جهت زهکشی آب اضافی تا ظرفیت زراعی قرار داده شدند. پس از سپری شدن ۴۸ ساعت، گلدان‌ها دوباره وزن شدند و در ادامه خاک آنها در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت کاملاً خشک شده و وزن خشک آنها اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب میانگین اعداد به دست آمده، معادل ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد، به‌طوری که وزن گلدان طبق معادله ۱ در شرایط ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. در این معادله، FCW وزن خاک در ظرفیت زراعی، DW وزن خاک خشک شده در آون است.

$$FC = \frac{FCW - DW}{DW} \times 100$$ معادله ۱

اندازه‌گیری صفات، غلظت کادمیوم، سرب و نیکل اندام هوایی: اندازه‌گیری عناصر سنگین در حدود سه ماه پس از رشد در مرحله گلدهی انجام گرفت. ۰/۵ گرم از بافت گیاهی خشک شده در آون (در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت) کوچکتر از ۰/۸۴ میلی‌متر (عبور کرده از الک ۲۰ مش) درون بشر یا لوله هضم ریخته شد و ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ به آن اضافه شد. در دهانه بشر شیشه ساعتی یا قیف قرار داده و اجازه داده شد یک شب بماند. بشر در پوشیده را روی اجاق بشقابی قرار داده تا عمل هضم در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس برای یک ساعت انجام شود، سپس بشر را از روی اجاق بشقابی برداشته و اجازه داده شد تا خنک شود. پس از آن ۳ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد به بشر اضافه گردید و عمل هضم در دمای ۱۲۵ درجه سلسیوس انجام شد. اضافه نمودن پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد را تکرار نموده تا ماده هضم شده شفاف شود و در هنگام نیاز اسید نیتریک اضافه گردید تا از خشک شدن جلوگیری شود. هنگامی که مخلوط هضم شفاف شد، شیشه ساعت یا قیف را برداشته و دمای هات‌پلیت به ۸۰ درجه سلسیوس کاهش داده شد، در غیر این صورت مجدداً ۳ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد به بشر اضافه نموده و عمل هضم در دمای ۱۲۵ درجه سلسیوس انجام

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی و فیزیکی خاک مورد استفاده در مطالعه

کربن آلی	N	P	K	Mn	Zn	Fe	Cu	pH	هدایت الکتریکی	بافت
(درصد)		(میلی‌گرم بر کیلوگرم)							(دسی‌زیمنس بر متر)	
۰/۴۳	۰/۱	۵/۰	۱۷۸	۳/۹	۱/۵	۸/۱	۰/۴۶	۷/۱۱	۱/۸۹	لوم

جدول ۲- نتایج تجزیه کودهای آلی استفاده‌شده

نوع کود	هدایت الکتریکی	pH	نیتروژن	فسفر	پتاسیم
	(دسی‌زیمنس بر متر)		(درصد)	(میلی‌گرم بر کیلوگرم)	
کود دامی	۳/۱	۷/۹	۱/۱۰	۰/۵۲	۱/۰۱
ورمی‌کمپوست	۲/۵	۷/۲	۱/۶۷	۰/۸۱	۱/۳۴
کمپوست	۱/۱	۶/۴	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۲۵

جدول ۳- غلظت فلزات سنگین در خاک و ترکیبات بستر کاشت مورد آزمایش قبل از اعمال تیمارهای عناصر سنگین

ترکیبات بستر کاشت	کادمیوم	سرب	نیکل
	(میلی‌گرم در کیلوگرم)		
خاک	۱/۱۱	۰/۵۶	۲/۱۲
کود دامی	۱/۳۲	۲/۰۴	۲/۲۱
ورمی‌کمپوست	۱/۲۱	۲/۳۲	۱/۱۹
کمپوست	۰/۳۵	۱/۲۵	۰/۵۶

گردید. محلول‌های هضم‌شده با ۲۵ میلی‌لیتر آب دو بار تقطیر رقیق شدند و با کاغذ واتمن شماره ۴۲ صاف گردیدند. در نهایت غلظت فلزات کادمیوم، سرب و نیکل در محلول هضم شده با دستگاه جذب اتمی مدل VARIAN AAS-240 تعیین شد (Mench *et al*., 1994).

صفات فیزیولوژیک: اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک در مرحله گلدهی از برگ‌های بالغ و کاملاً توسعه‌یافته وسط ساقه انجام گرفت.

برای سنجش میزان نشت یونی برگ‌ها از روش Sairam و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شد. جهت اندازه‌گیری مقدار نسبی آب برگ‌ها، اول صبح و قبل از طلوع آفتاب از هر تیمار سه برگ کامل، جوان و شاداب انتخاب و توسط قیچی قطعاتی تقریباً به یک اندازه از برگ جدا و وزن تر آن‌ها با ترازو (دقت ۰/۰۰۰۱ گرم) اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن آماس‌یافته برگ، برگ‌ها در ظروف پتری سربسته و حاوی آب‌مقطر در محلی تاریک با دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت قرار گرفتند. سپس رطوبت سطحی برگ‌ها با کاغذ واتمن شماره یک گرفته می‌شود و وزن آماس محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری وزن خشک، برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده و سپس وزن شدند. مقدار آب نسبی برگ‌ها با استفاده از معادله ۲ محاسبه گردید (Weatherely, 1950).

معادله ۲

مقدار نسبی آب برگ = ((FW - DW) / (TW - DW)) × ۱۰۰

که در آن FW وزن تازه بافت برگ، DW وزن خشک بافت برگ، TW وزن آماس‌یافته بافت برگ است.

میزان کلروفیل a، b و کلروفیل کل با استفاده از روش Arnon (۱۹۴۹) با نمونه‌گیری تصادفی از برگ‌های بالغ و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

عصاره‌گیری با استون اندازه‌گیری شد. جذب نور با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Vis 2100 ساخت کشور آمریکا در طول‌موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر خوانده شد. در نهایت میزان آن‌ها با استفاده از معادله‌های ۳ تا ۵ محاسبه شد. در این معادلات V حجم نمونه، OD میزان جذب، W وزن تر نمونه است.

معادله ۳

$$Chl\ a\ (mgg^{-1}) = (12.7\times OD.663) - (2.69\times OD.645) \times V/1000 \times W$$

معادله ۴

$$Chl\ b\ (mgg^{-1}) = (22.9\times OD.645) - (4.68OD.663) \times V/1000 \times W$$

معادله ۵

$$Chl\ T\ (mgg^{-1}) = (8.02\times OD.663) + (20.2\times OD645) \times V/1000 \times W$$

میزان ۰/۱ گرم نمونه منجمد برگ در ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸ عصاره‌گیری گردید. همگن‌های حاصل با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند. مخلوط واکنش شامل ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸ همچنین ۰/۵ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۱۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی است، سپس آنزیم کاتالاز در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر و توسط اسپکتروفتومتر مدل Vis 2100 خوانده شد. در نهایت میزان فعالیت آنزیم کاتالاز براساس واحد میکرومول بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه گزارش شد. برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی، دو میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۶۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۱، هم‌چنین ۰/۵ میلی‌لیتر گایاکول ۲۸ میلی‌مولار و ۰/۵ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۵ میلی‌مولار اضافه نموده و جذب محلول در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Vis 2100 خوانده شد. میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز براساس واحد میکرومول بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه گزارش شد (Cakmak and Horst, 1991; Ghanati *et al.*, 2002).

وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه: جهت اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی نیز پس از شست‌و شو با آب‌مقطر و خشک شدن در آون در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شد. همچنین در پایان دوره رشد میزان بذر تولیدی در هر بوته وزن گردید، به‌طوری‌که پس از اندازه‌گیری وزن دانه چهار بوته به‌طور مجزا در هر گلدان، میانگین وزن دانه برای هر تیمار گزارش شد.

تجزیه واریانس داده‌ها برای صفات مختلف با نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ صورت گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت. در صورت معنی‌دار بودن اثر متقابل، برش‌دهی (مقایسه میانگین در هر سطح از فاکتور اول برای سطوح مختلف فاکتور دوم به طور جداگانه انجام می‌شود) انجام و مقایسه میانگین براساس آزمون Least Squares Means (L.S.Means) انجام شد.

نتایج

غلظت کادمیوم، سرب و نیکل اندام هوایی: عناصر سنگین و کودهای آلی، غلظت کادمیوم، سرب و نیکل اندام هوایی زیره سبز را تحت تأثیر قرار داد، همچنین کادمیوم، سرب و نیکل اندام هوایی تحت تأثیر برهمکنش عناصر سنگین و کودهای آلی قرار گرفت (جدول ۴). بیشترین غلظت کادمیوم اندام هوایی در مصرف نیترات کادمیوم مشاهده شد (جدول ۵). در شرایط مصرف نیترات سرب، نیترات نیکل و شاهد تفاوت معنی‌داری در تجمع کادمیوم اندام هوایی در کودهای آلی وجود نداشت، اما تحت اعمال تیمار نیترات کادمیوم استفاده از کودهای آلی ورمی‌کمپوست سبب کاهش ۴۲ درصدی کادمیوم نسبت به شرایط خاک معمولی شد. همچنین بین کودهای آلی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۵).

غلظت سرب اندام هوایی در تیمار نیترات سرب نسبت به شاهد، نیترات نیکل و نیترات کادمیوم افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵). همچنین تحت اعمال تیمار نیترات سرب کمترین میزان سرب اندام هوایی به میزان ۱/۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم در ورمی‌کمپوست مشاهده شد که نسبت به کود دامی و کمپوست تفاوت معنی‌داری نشان نداد. همچنین کمترین

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای صفات کادمیوم، سرب و نیکل اندام هوایی، نشت یونی و محتوای نسبی آب برگ

منابع تغییرات	درجه آزادی	کادمیوم اندام هوایی	سرب اندام هوایی	نیکل اندام هوایی	نشت یونی	محتوای نسبی آب برگ
عناصر سنگین	۳	۱/۴۲ **	۴/۴۰ **	۷/۵۷ **	۲۸۲۴/۷ **	۴۱۱/۴ **
کودهای آلی	۳	۰/۰۳۴ **	۰/۰۹۴ **	۰/۱۱۰ **	۴۸۶/۵ **	۳۰۲/۳ **
عناصر سنگین × کودهای آلی	۹	۰/۰۲۷ **	۰/۰۸۴ **	۰/۱۱۳ **	۱۹/۵ ns	۱۴/۵ ns
خطا	۳۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳	۱۹/۶	۲۸/۶
ضریب تغییرات (درصد)	_	۱۷/۱	۱۲/۴	۲۰/۳	۹/۲	۹/۳

***، ** به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ns عدم تفاوت معنی‌دار**

جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش عناصر سنگین و کودهای آلی روی غلظت کادمیوم، سرب و نیکل اندام هوایی در زیره سبز

عناصر سنگین	کودهای آلی	کادمیوم اندام هوایی	سرب اندام هوایی	نیکل اندام هوایی
		(میلی‌گرم در کیلوگرم)		
شاهد (صفر)	خاک معمولی	۰/۰۳۲ a	۰/۱۲۹ a	۰/۱۳۱ a
	کود دامی	۰/۰۲۹ a	۰/۱۲۲ a	۰/۱۲۵ a
	کمپوست	۰/۰۳۰ a	۰/۱۱۸ a	۰/۱۷۲ a
	ورمی‌کمپوست	۰/۰۲۸ a	۰/۱۲۴ a	۰/۱۱۸ a
نیترات کادمیوم	خاک معمولی	۱/۰۳ a	۰/۱۳۱ a	۰/۱۲۵ a
	کود دامی	۰/۶۹۷ b	۰/۱۱۷ ab	۰/۱۲۲ a
	کمپوست	۰/۶۶۱ b	۰/۱۱۷ b	۰/۱۱۴ a
	ورمی‌کمپوست	۰/۵۹۱ b	۰/۱۲۳ ab	۰/۱۱۷ a
نیترات سرب	خاک معمولی	۰/۰۸۴ a	۱/۸۴ a	۰/۱۵۲ a
	کود دامی	۰/۰۶۲ a	۱/۱۸ b	۰/۱۴۵ a
	کمپوست	۰/۰۶۸ a	۱/۱۶ b	۰/۱۴۱ a
	ورمی‌کمپوست	۰/۰۶۱ a	۱/۱۳ b	۰/۱۸۲ a
نیترات نیکل	خاک معمولی	۰/۰۸۲ a	۰/۱۲۵ a	۲/۲۹ a
	کود دامی	۰/۰۷۱ a	۰/۱۱۷ a	۱/۶۱ b
	کمپوست	۰/۰۶۵ a	۰/۱۱۸ a	۱/۵۱ b
	ورمی‌کمپوست	۰/۰۶۹ a	۰/۱۱۴ a	۱/۴۷ b

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک در هر ستون و هر عناصر سنگین اختلاف معنی‌داری با رویه L.S. Means در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

غلظت سرب اندام هوایی در مصرف نیترات کادمیوم تحت تیمار کمپوست بود (جدول ۵).

نیترات نیکل سبب افزایش غلظت نیکل اندام هوایی نسبت به شاهد، نیترات سرب و نیترات کادمیوم گردید (جدول ۵). از سوی دیگر مصرف تیمارهای کودهای آلی ورمی‌کمپوست، کمپوست و کود دامی سبب کاهش معنی‌دار نیکل اندام هوایی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر عناصر سنگین روی نشت یونی، محتوای نسبی آب برگ، وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه در زیره سبز

عناصر سنگین	نشت یونی (درصد)	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	وزن خشک اندام هوایی (میلی‌گرم در بوته)	وزن دانه (میلی‌گرم در بوته)
شاهد (صفر)	۲۵/۶۵ c	۶۶/۲۹ a	۵۵۶/۱ a	۰/۳۲۴ a
نیترات کادمیوم	۵۱/۴۴ b	۵۶/۲۷ b	۳۹۵/۱ b	۰/۱۹۹ b
نیترات سرب	۶۰/۷۳ a	۵۲/۸۸ b	۳۹۶/۹ b	۰/۱۹۶ b
نیترات نیکل	۵۳/۷۲ b	۵۵/۷۴ b	۴۰۴/۵ b	۰/۲۲۰ b

براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، حروف مختلف هر ستون نمایانگر تفاوت معنی‌دار هستند.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر کودهای آلی روی نشت یونی، محتوای نسبی آب برگ، وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه در زیره سبز

کودهای آلی	نشت یونی (درصد)	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	وزن خشک اندام هوایی (میلی‌گرم در بوته)	وزن دانه (میلی‌گرم در بوته)
خاک معمولی	۵۷/۲ a	۵۰/۹ b	۳۵۸/۶ c	۰/۲۰۸ c
کود دامی	۴۶/۲ b	۵۸/۷ a	۴۶۸/۵ ab	۰/۲۴۲ ab
کمپوست	۴۴/۷ b	۵۸/۴ a	۴۴۱/۱ b	۰/۲۲۶ bc
ورمی‌کمپوست	۴۳/۳ b	۶۳/۰ a	۴۸۴/۰ a	۰/۲۶۳ a

براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، حروف مختلف هر ستون نمایانگر تفاوت معنی‌دار هستند.

به ترتیب به میزان ۳۶، ۳۴ و ۳۰ درصد نسبت به خاک معمولی گردید (جدول ۵). اما تحت اعمال تیمارهای نیترات سرب، نیترات کادمیوم و شاهد اختلاف معنی‌داری بین کودهای آلی نسبت به خاک معمولی مشاهده نشد.

نشت یونی و محتوای نسبی آب برگ: عناصر سنگین و کودهای آلی، نشت یونی و محتوای نسبی آب برگ زیره سبز را تحت تأثیر قرار داد، اما نشت یونی و محتوای نسبی آب برگ تحت تأثیر برهمکنش عناصر سنگین و کودهای آلی قرار نگرفت (جدول ۴). بیشترین نشت یونی در تیمار ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات سرب مشاهده شد، همچنین پس از آن تیمارهای نیترات کادمیوم و نیترات نیکل سبب افزایش معنی‌دار نشت یونی شد (جدول ۶). تیمارهای کودهای آلی کود دامی، کمپوست و ورمی‌کمپوست میزان نشت یونی را به طور معنی‌داری نسبت به خاک معمولی کاهش دادند (جدول ۷).

محتوای نسبی آب برگ با مصرف عناصر سنگین روند کاهشی را نشان داد، به‌طوری‌که مصرف نیترات کادمیوم، نیترات سرب و نیترات نیکل سبب کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ شد (جدول ۶). از سوی دیگر کودهای آلی ورمی‌کمپوست، کمپوست و کود دامی محتوای نسبی آب برگ را به‌طور معنی‌داری نسبت به خاک معمولی افزایش دادند (جدول ۷).

مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی: محتوای کلروفیل a، b و کل برگ زیره سبز تحت تأثیر عناصر سنگین و کودهای آلی قرار گرفت، همچنین برهمکنش عناصر سنگین و کودهای آلی بر محتوای کلروفیل a، b و کل برگ زیره سبز معنی‌دار بود (جدول ۸). مصرف عناصر سنگین کادمیوم، سرب و نیکل سبب کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل a برگ شد (جدول ۹). در سطح شاهد محتوای کلروفیل a برگ زیره سبز در کود دامی و ورمی‌کمپوست نسبت به خاک معمولی افزایش معنی‌داری نشان داد، اما نسبت به کمپوست اختلاف معنی‌داری نداشتند

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای محتوای کلروفیل a، b و کل، **آنزیم کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز، وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه**

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	وزن خشک اندام هوایی	وزن دانه
عناصر سنگین	۳	۱/۳۶ **	۰/۳۵۸ **	۲/۸۶ **	۰/۱۵۶ **	۰/۳۰۳ **	۷۴۴۰۹ **	۰/۰۴۳ **
کودهای آلی	۳	۰/۶۶۴ **	۰/۱۹۹ **	۱/۵۸ **	۰/۰۲۴ **	۰/۰۸۸ *	۳۷۴۴۱ **	۰/۰۰۶ **
عناصر سنگین × کودهای آلی	۹	۰/۱۵۵ *	۰/۰۱۴ *	۰/۱۷۳ *	۰/۰۲۱ *	۰/۰۷۲ *	۶۶۶ ns	۰/۰۰۰۱ ns
خطا	۳۲	۰/۰۵۲	۰/۰۰۷	۰/۰۵۸	۰/۰۰۲	۰/۰۳۱	۱۶۲۸	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات (درصد)	_	۹/۵	۱۰/۲	۷/۵	۱۱/۰	۱۶/۷	۹/۲	۱۳/۶

***، ** به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ns عدم تفاوت معنی‌دار**

جدول ۹- مقایسه میانگین برهمکنش عناصر سنگین و کودهای آلی روی کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز در زیره سبز

عناصر سنگین	کودهای آلی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز
		(میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ)			(میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین)	
شاهد (صفر)	خاک معمولی	۲/۵۳ b	۰/۹۴ b	۳/۴۸ b	۰/۲۶ a	۰/۸۲ a
	کود دامی	۳/۰۸ a	۱/۱۵ a	۴/۲۳ a	۰/۲۵ a	۰/۸۱ a
	کمپوست	۲/۸۴ ab	۰/۹۸ b	۳/۸۳ ab	۰/۲۵ a	۰/۸۳ a
	ورمی‌کمپوست	۳/۰۳ a	۱/۲۰ a	۴/۲۳ a	۰/۲۴ a	۰/۸۴ a
نیترات کادمیوم	خاک معمولی	۲/۲۶ a	۰/۵۵ c	۲/۸۱ b	۰/۵۸ a	۱/۳۰ a
	کود دامی	۲/۵۱ a	۰/۷۴ ab	۳/۲۶ ab	۰/۴۶ b	۱/۰۳ b
	کمپوست	۲/۳۷ a	۰/۶۶ bc	۳/۰۴ ab	۰/۵۱ b	۱/۰۴ b
	ورمی‌کمپوست	۲/۵۳ a	۰/۸۴ a	۳/۳۷ a	۰/۴۴ b	۱/۰۲ b
نیترات سرب	خاک معمولی	۱/۹۶ c	۰/۵۱ b	۲/۴۷ c	۰/۵۴ a	۱/۳۴ a
	کود دامی	۲/۳۳ ab	۰/۷۶ a	۳/۱۰ ab	۰/۴۵ b	۱/۰۴ b
	کمپوست	۲/۱۳ bc	۰/۷۴ a	۲/۸۷ b	۰/۴۷ b	۱/۱۹ ab
	ورمی‌کمپوست	۲/۴۵ a	۰/۸۲ a	۳/۲۸ a	۰/۴۲ b	۱/۰۱ b
نیترات نیکل	خاک معمولی	۱/۵۹ b	۰/۶۱ b	۲/۲۰ b	۰/۵۵ a	۱/۲۵ a
	کود دامی	۲/۲۶ a	۰/۸۴ a	۳/۱۱ a	۰/۴۳ b	۱/۰۳ ab
	کمپوست	۲/۱۵ ab	۰/۸۰ ab	۲/۹۵ a	۰/۴۷ ab	۱/۱۰ ab
	ورمی‌کمپوست	۲/۴۴ a	۰/۹۵ a	۳/۳۹ a	۰/۴۰ b	۰/۹۸ b

میانگین‌هایی دارای حروف مشترک در هر ستون و هر عناصر سنگین اختلاف معنی‌داری با رویه L.S. Means در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

(جدول ۹). تحت اعمال تیمار نیترات سرب، کود دامی و ورمی‌کمپوست سبب افزایش ۱۹ و ۲۵ درصدی محتوای کلروفیل a برگ زیره سبز نسبت به خاک معمولی شدند. همچنین تحت اعمال تیمار نیترات نیکل، بیشترین محتوای کلروفیل a برگ زیره سبز در کود دامی و ورمی‌کمپوست مشاهده شد. در نیترات کادمیوم اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف کودهای آلی در محتوای کلروفیل a برگ وجود نداشت (جدول ۹) مصرف عناصر سنگین به ویژه نیترات سرب و نیترات نیکل سبب کاهش محتوای کلروفیل b برگ شد (جدول ۹). افزایش ۲۲ و ۲۸ درصدی در محتوای کلروفیل b برگ زیره سبز نسبت به خاک معمولی در شاهد مشاهده شد. همچنین تحت اعمال تیمار نیترات کادمیوم، کود دامی و ورمی‌کمپوست سبب افزایش ۳۴ و ۵۳ درصدی محتوای کلروفیل b برگ نسبت به خاک معمولی شدند. تحت اعمال تیمارهای سطح نیترات سرب و نیکل، کود دامی و ورمی‌کمپوست سبب افزایش معنی‌دار محتوای کلروفیل b برگ نسبت به شاهد شدند، اما اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف کودهای آلی وجود نداشت (جدول ۹).

افزایش محتوای کلروفیل کل برگ زیره سبز در کود دامی و ورمی‌کمپوست در سطح شاهد مشاهده شد (جدول ۹). همچنین تحت اعمال تیمار نیترات کادمیوم، استفاده از کود ورمی‌کمپوست سبب افزایش محتوای کلروفیل کل به میزان ۲۰ درصد نسبت به خاک معمولی گردید. نتایج دیگر نشان می‌دهد که محتوای کلروفیل کل برگ با مصرف نیترات سرب و نیکل روند کاهش نشان داد، اما ورمی‌کمپوست و کود دامی و پس از آن کمپوست میزان محتوای کلروفیل کل برگ را به‌طور معنی‌داری نسبت به خاک معمولی افزایش دادند (جدول ۹).

فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز: فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز برگ زیره سبز تحت تأثیر عناصر سنگین و کودهای آلی قرار گرفت، همچنین برهمکنش عناصر سنگین و کودهای آلی روی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز برگ زیره سبز معنی‌دار بود (جدول ۸). مصرف عناصر سنگین سبب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز برگ زیره سبز شد (جدول ۹). همچنین در شاهد تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف کودهای آلی مشاهده نگردید. از سوی دیگر در مصرف عناصر سنگین کادمیوم، سرب و نیکل، بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در خاک معمولی مشاهده شد و کودهای آلی فعالیت آنزیم کاتالاز را به‌طور معنی‌داری نسبت به بدون کودهای آلی کاهش دادند (جدول ۹).

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز برگ با استفاده از عناصر سنگین روند افزایشی نشان داد (جدول ۹). از سوی دیگر بیشترین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در سطح بدون کودهای آلی مشاهده شد و کود دامی، کمپوست و ورمی‌کمپوست فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز را به‌طور معنی‌داری نسبت به بدون کودهای آلی کاهش دادند (جدول ۹). همچنین در شاهد تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف کودهای آلی مشاهده نگردید. در شرایط استفاده از نیترات نیکل، ورمی‌کمپوست توانست سبب کاهش ۲۲ درصدی فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز برگ نسبت به خاک معمولی شود (جدول ۹).

وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه: وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه زیره سبز تحت تأثیر عناصر سنگین و کودهای آلی قرار گرفت، اما برهمکنش عناصر سنگین و کودهای آلی روی وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه زیره سبز معنی‌دار نبود (جدول ۸). بیشترین وزن خشک اندام هوایی در سطح شاهد (بدون عناصر سنگین) مشاهده شد و با مصرف عناصر سنگین کادمیوم، سرب و نیکل، وزن خشک اندام هوایی روند کاهشی نشان داد (جدول ۶). از سوی دیگر کود دامی و ورمی‌کمپوست سبب افزایش ۳۱ و ۳۵ درصدی و پس از آن کمپوست سبب افزایش ۲۳ درصدی وزن خشک اندام هوایی نسبت به خاک معمولی شدند (جدول ۷).

بیشترین وزن دانه در سطح شاهد (بدون عناصر سنگین) مشاهده شد و مصرف عناصر سنگین، وزن دانه زیره سبز را به طور معنی‌داری کاهش داد (جدول ۶). از سوی دیگر کود دامی و ورمی‌کمپوست وزن دانه را به میزان ۱۶ و ۲۶ درصد نسبت

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

به خاک معمولی افزایش داد، هر چند که کمپوست نسبت به خاک معمولی تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۷).

بحث

میزان قابلیت دسترسی گیاهی به کادمیم و جذب توسط گیاه به‌طور معنی‌داری با افزایش غلظت کادمیم خاک افزایش می‌یابد (Ubeynarayana *et al*., 2021). بنابراین هنگامی که یون‌های عناصر سنگین در سطوح بالا در محیط وجود داشته باشند، بیش از اندازه توسط ریشه گیاه جذب و به اندام‌های هوایی منتقل گشته و انباشته می‌شوند که منجر به اختلالات (آشفتگی‌های) متابولیسمی و کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌گردند (Bharti and Sharma, 2022). همچنین قابلیت جذب سرب و نیکل توسط گیاه به‌طور معنی‌داری با افزایش غلظت آنها در خاک افزایش می‌یابد (Silva *et al*., 2020). از سوی دیگر کودهای آلی با بی‌تحرک کردن عناصر سنگین در خاک‌های آلوده، قابلیت دسترسی و جذب و انتقال آن‌ها توسط گیاهان را کاهش می‌دهد (Zhou *et al*., 2019). در نتیجه کودهای آلی می‌تواند محتوای مواد آلی خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش داده و سپس کمپلکس یون‌های عناصر سنگین خاک را افزایش دهد، در نتیجه می‌تواند محتوای عناصر سنگین قابل تعویض را نیز کاهش دهد (Dai *et al*., 2018). بنابراین احتمالاً پیوند قوی فلزات سنگین با کودهای آلی و ایجاد فرم‌های پایدار تا حدودی سبب کاهش معنی‌دار غلظت عناصر سنگین در شرایط استفاده از کودهای آلی نسبت به خاک معمولی می‌گردد (Cheng *et al*., 2021). ضرایب همبستگی کادمیوم و سرب اندام هوایی نشان می‌دهد که همبستگی مثبت با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز و همبستگی منفی با محتوای کلروفیل، وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه وجود دارد (جدول ۱۰). بنابراین یون‌های عناصر سنگین از طریق تغییر در صفات فیزیولوژیک سبب کاهش رشد و عملکرد شده است.

به‌طورکلی تمام سطوح عناصر سنگین میزان نشت الکترولیت‌ها را نسبت به سطح شاهد (بدون عناصر سنگین) افزایش دادند. افزایش نشت‌پذیری غشاهای زیستی و آسیب به غشاهای زیستی در تنش‌های مختلف محیطی به دلیل افزایش پراکسیداسیون لیپیدها است (Goyal *et al*., 2020). همچنین تنش عناصر سنگین سبب کمبود آب شده و اختلال در تعادل آبی گیاه رخ می‌دهد (Kumar *et al*., 2019). به نظر می‌رسد کودهای آلی در شرایط تنش عناصر سنگین قابلیت نگهداری آب خاک را افزایش داده و در نتیجه آب بیشتری برای جذب در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. محققان ساختار مولکولی ترکیبات آلی، عامل اصلی حفظ بهتر رطوبت در خاک گزارش کردند (Wang *et al*., 2019). گزارش شده است که استفاده از کودهای آلی با افزایش ظرفیت تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سبب افزایش پایداری و کاهش نفوذپذیری غشای پلاسمایی گیاهان میزبان می‌شود و کمک شایانی به حفظ آب در سلول‌های گیاهی دارد (Awad *et al*., 2022). همچنین برخی منابع اصلاح‌کننده مثل کودهای آلی با بهبود شرایط مناسب و تسهیل در جذب آب و عناصر غذایی سبب کاهش نشت یونی در شرایط تنش عناصر سنگین می‌شود (بلوچی و همکاران، ۱۳۹۶). ضرایب همبستگی نشت یونی نشان می‌دهد که همبستگی منفی و معنی‌داری با تمامی صفات بجز فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز وجود دارد. از سوی دیگر محتوای نسبی آب برگ همبستگی مثبت و معنی‌داری با محتوای کلروفیل، وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه نشان داد (جدول ۱۰). از این رو، نشت یونی و محتوای نسبی آب برگ به عنوان یکی از معیارهای تحمل به تنش‌های محیطی، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تنش‌های محیطی به‌ویژه عناصر سنگین به بیوسنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی و همچنین زنجیره انتقال الکترون آسیب می‌رسانند (Sharma *et al*., 2020). همچنین عناصر سنگین با جایگزین کردن یون منیزیم در کلروفیل و تأثیر بر آنزیم‌های دخیل در بیوسنتز کلروفیل روی رنگدانه‌های فتوسنتزی تأثیر می‌گذارند (Rai *et al*., 2016). به‌طوری‌که عناصر سنگین در ساخت کلروفیل، هیدرولیز آب در مراحل ابتدایی واکنش‌های نوری، تنفس نوری غیرچرخه‌ای و تثبیت کربن در چرخه

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

جدول ۱۰- ضرایب همبستگی بین صفات مورد بررسی در آزمایش

صفات	(۱) کادمیوم اندام هوایی	(۲) سرب اندام هوایی	(۳) نیکل اندام هوایی	(۴) نشت یونی	(۵) محتوای نسبی آب برگ	(۶) کلروفیل a	(۷) کلروفیل b	(۸) کلروفیل کل	(۹) کاتالاز	(۱۰) آسکوربات پراکسیداز	(۱۱) وزن خشک اندام هوایی	(۱۲) وزن دانه
۱	۱											
۲	-۰/۲۷^{ns}	۱										
۳	-۰/۲۸^{ns}	-۰/۲۹^{ns}	۱									
۴	۰/۲۴ ^{ns}	۰/۵۳ **	۰/۲۸ ^{ns}	۱								
۵	-۰/۲۳ ^{ns}	-۰/۴۲**	-۰/۲۰^{ns}	-۰/۷۵**	۱							
۶	-۰/۰۸ ^{ns}	-۰/۳۰ *	-۰/۴۷**	-۰/۶۹**	۰/۷۳ **	۱						
۷	-۰/۴۴**	-۰/۳۸**	-۰/۱۳^{ns}	-۰/۸۴**	۰/۸۳ **	۰/۷۰ **	۱					
۸	-۰/۲۱ ^{ns}	-۰/۳۵**	-۰/۳۸**	-۰/۷۹**	۰/۸۲ **	۰/۹۶ **	۰/۸۵ **	۱				
۹	۰/۴۵ **	۰/۳۸ **	۰/۲۴ ^{ns}	۰/۸۴ **	-۰/۶۸**	-۰/۶۹**	-۰/۷۹**	-۰/۷۸**	۱			
۱۰	۰/۳۲ *	۰/۴۰ **	۰/۱۹ ^{ns}	۰/۷۷ **	-۰/۷۲**	-۰/۷۹**	-۰/۷۴**	-۰/۸۳**	۰/۸۰**	۱		
۱۱	-۰/۴۰**	-۰/۳۲ *	-۰/۲۶^{ns}	-۰/۸۳**	۰/۸۲ **	۰/۸۵ **	۰/۸۸ **	۰/۹۲**	-۰/۷۶**	-۰/۸۱**	۱	
۱۲	-۰/۴۱**	-۰/۳۷**	-۰/۱۵^{ns}	-۰/۸۰**	۰/۶۹ **	۰/۶۸ **	۰/۸۰ **	۰/۷۷**	-۰/۷۵**	-۰/۶۸**	۰/۸۷**	۱

**** و * به‌ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ است. ns از لحاظ آماری معنی‌دار نیست.**

کالوین اختلال ایجاد می‌کنند (Dobrikova and Apostolova, 2019). از سوی دیگر با توجه به اینکه ترکیبات آلی بالاخص کود دامی و ورمی‌کمپوست، به تدریج عناصر غذایی آزاد می‌کنند و نقش زیادی در حفظ رطوبت خاک دارند، در نتیجه سبب افزایش کلروفیل شده است (Landorfa-Svalbe *et al.*, 2022). همچنین کودهای آلی به‌طور قابل توجهی به دلیل درگیرکردن مکانیسم‌های دفاعی مولکولی بر عملکرد دستگاه فتوسنتزی تأثیر می‌گذارد (Yotsova *et al.*, 2018). گزارش شده است که کودهای آلی با تأثیر بر جذب آب و عناصر غذایی سبب بهبود سنتز کلروفیل تحت تنش عناصر سنگین می‌شود (بلوچی و همکاران، ۱۳۹۶). همبستگی منفی و معنی‌دار محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و آسکوربات و همبستگی مثبت و معنی‌داری با وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه نشان داد (جدول ۱۰).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های درون سلولی در گیاهان است که با افزایش تنش‌های زیستی افزایش می‌یابد و همچنین تحمل به تنش در گیاهان توسط آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی حفظ می‌شود (Taie *et al.*, 2019). در واقع میزان سمیت‌زدایی عناصر سنگین با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بسته به مدت و میزان تنش عناصر سنگین، گونه گیاهی و بخش‌های مختلف گیاه متفاوت است و کاتالاز و پراکسیداز می‌توانند به عنوان نشانگر زیستی مؤثر برای شناسایی سمیت عناصر سنگین استفاده شوند (Somasundaram *et al.*, 2019). بنابراین چنین استدلال می‌شود که افزایش سطوح آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت تنش یک تأثیر بسیار مهم برای تحمل به تنش در گیاهان حساس است. بنابراین تیمارهای عناصر سنگین، میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز نسبت به شاهد را افزایش داد. محققان بیان کردند که افزایش در فعالیت

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش عناصر سنگین در رابطه با فعال شدن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از دیواره‌های سلولی است (Guo *et al*., 2019). از سوی دیگر کودهای آلی احتمالاً با جلوگیری از جذب و انتقال عناصر سنگین و یا کاهش اثرات سمی آن میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را کاهش می‌دهد (بلوچی و امینی، ۱۳۹۶). همچنین گزارش شده است که کودهای آلی به دلیل گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل و کربونیل موجود در آنها می‌توانند عناصر سنگین را کلات کنند و دسترسی گیاهان را به عناصر سنگین را کاهش دهند و در نهایت موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شوند (Nigam *et al*., 2019). ضرایب همبستگی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز با وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه منفی و معنی‌دار بود (جدول ۱۰). بنابراین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برای محافظت از گیاه در برابر اثرات مضر عناصر سنگین وارد عمل می‌شود. در نتیجه با بالا رفتن سطوح فعالیت این آنزیم‌ها، گیاه کم‌تر مورد تهاجم رادیکال‌های آزاد قرار می‌گیرد و اثرهای مخرب تنش عناصر سنگین را تا حدودی مهار می‌کند (Anjum, 2015).

فلزات سنگین با تجمع در دیواره سلول، ورود به سیتوپلاسم و ایجاد اختلال در متابولیسم طبیعی سلول منجر به کاهش رشد می‌شوند. همچنین فلزات سنگین با کاهش تورژسانس سلول موجبات کاهش تقسیم سلولی و مهار رشد سلول‌ها را فراهم می‌آورند (Ghori *et al*., 2019). کاهش وزن خشک اندام هوایی تحت سمیت عناصر سنگین از جمله کادمیوم توسط دیگر محققان گزارش شده است (Zeshan *et al*., 2022). از سوی دیگر کودهای آلی با تغییر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک موجب بهبود حاصلخیزی خاک شده و در نهایت موجب افزایش رشد و عملکرد دانه گیاه در شرایط تنش عناصر سنگین می‌گردد (Zeeshan *et al*., 2020). می‌توان گفت که کاربرد کود دامی و ورمی‌کمپوست، به عنوان یک کودهای آلی با حفاظت از فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها و تأثیر بر ساختار و نفوذپذیری غشا می‌تواند باعث افزایش تحمل و حفاظت از گیاه در برابر تنش عناصر سنگین شود و افزایش رشد و عملکرد را به همراه داشته باشد (بلوچی و امینی، ۱۳۹۶). همبستگی مثبت وزن خشک اندام هوایی با وزن دانه نشان داد که با افزایش رشد و انتقال مجدد مواد فتوسنتزی به دانه عملکرد دانه افزایش یافته است (جدول ۱۰).

نتیجه‌گیری

در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد که به دلیل وجود یون‌های عناصر سنگین در خاک، بیش از اندازه توسط ریشه گیاه جذب و به اندام‌های هوایی منتقل گشته است که منجر به صدمات متابولیسمی و کاهش رشد و عملکرد گیاه گردیده است. از سوی دیگر استفاده از کودهای آلی با بهبود وضعیت و ساختار خاک می‌تواند نقش مثبتی را در تعدیل اثرات منفی عناصر سنگین بر این صفات ایفا کند. در نتیجه کودهای آلی با افزایش کربن آلی موجود در خاک با عناصر سنگین، ساختار پیچیده‌ای را تشکیل می‌دهد که سبب کاهش سمیت می‌شود. وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه زیره سبز تحت تنش سمیت عناصر سنگین کاهش یافت، اما استفاده از کود آلی ورمی‌کمپوست و پس از آن کود دامی تا حدودی توانست عملکرد دانه زیره سبز را بهبود دهد. براساس نتایج این پژوهش، کاربرد ورمی‌کمپوست و کود دامی بهترین شرایط را برای رشد زیر سبز تحت تنش عناصر سنگین را فراهم می‌کند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا که صمیمانه ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند، تشکر می‌نماییم.

منابع

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

بلوچی، حمیدرضا، و امینی، فاطمه (۱۳۹۶). تأثیر عناصر سنگین و ترکیبات مختلف بستر کاشت بر آنزیم‌های پاداکساینده و عملکرد لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Sadri). مجله پژوهش‌های گیاهی ۳۳ (۳)، ۶۹۴-۶۸۳. DOR: 20.1001.1.23832592.1396.30.3.3.6

بلوچی، حمیدرضا، امینی، فاطمه موحدی دهنوی، محسن، و عطارزاده، محمود (۱۳۹۶). تأثیر بسترهای مختلف کاشت بر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgar*is L.) تحت تنش عناصر سنگین. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی، ۶ (۲۱)، ۴۰-۲۷. DOR: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.14.6

فاتحی، محمدحسین، شایگان، جلال، و ذبیحی، محمد (۱۳۹۷). مروری بر روش‌های حذف فلزات سنگین از محیط‌های آبی. مجله اکوهیدرولوژی، ۵(۳)، ۸۷۴-۸۵۵. DOR: 10.22059/ije.2018.249854.804

قنبری، احمد، احمدیان، احمد، و گلوی، محمد (۱۳۸۴). بررسی اثر دفعات آبیاری و کود دامی بر عملکرد و اجزاء عملکرد زیره سبز. مجله پژوهش‌های زراعی ایران، ۳ (۲)،۲۶۲-۲۵۵. DOR: 10.22067/gsc.v3i2.1309

Alam, M., Hussain, Z., Khan, A., Khan, M. A., Rab, A., Asif, M., Shah, M. A., & Muhammad, A. (2020). The effects of organic amendments on heavy metals bioavailability in mine impacted soil and associated human health risk. *Scientia Horticulturae, 262*, 109067. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109067

Angelova, V., Ivanova, R., Pevicharova, G., & Ivanov, K. (2010). Effect of organic amendments on heavy metals uptake by potato plants. World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1-6 August, Brisbane, Australia.

Anjum, N. A. (2015). Book review: Oxidative damage to plants-antioxidant networks and signaling. *Frontiers in Plant Science, 6*, 452. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00452

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

Attarzadeh, M., Balouchi, H. R., Rajaie, M., Movahhedi Dehnavi, M., & Salehi, A. (2019). Improvement of *Echinacea purpurea* performance by integration of phosphorus with soil microorganisms under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management, 221*, 238-47. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.022

Awad, M., Moustafa-Farag, M., Liu, Z., & El-Shazoly, R. M. (2022). Combined effect of biochar and salicylic acid in alleviating heavy metal stress, antioxidant enhancement, and chinese mustard growth in a contaminated soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-13. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01018-0

Bahrami, M., Jahantab, E., & Mahmoudi, M. R. (2021). Clustering the organic soil amendments in combination with phytoremediation of heavy metals contaminated soil. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-15. https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1961228

Bharti, R. & Sharma, R. (2022). Effect of heavy metals: An overview. *Materials Today*: *Proceedings, 51*, 880-885. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.278

Cakmak, I. & Horst, J. H. (1991). Effects of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiologia Plantarum, 83*, 463-468. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00121.x

Cheng, S., Liu, Y., Xing, B., Qin, X., Zhang, C., & Xia, H. (2021). Lead and cadmium clean removal from wastewater by sustainable biochar derived from poplar saw dust. *Journal of Cleaner Production, 314*, 128074. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128074

Dai, S., Li, H., Yang, Z., Dai, M., Dong, X., Ge, X., Sun, M., & Shi, L. (2018). Effects of biochar amendments on speciation and bioavailability of heavy metals in coal-mine-contaminated soil. *Human Ecological Risk Assess, 24*, 1887-1900. https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1429250

Dobrikova, A. G. & Apostolova, E. L. (2019). Damage and protection of the photosynthetic apparatus under cadmium stress. Cadmium toxicity and tolerance in plants. *Elsevier*, 275-298. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00011-5

Gautam, M. & Agrawal, M. (2017). Influence of metals on essential oil content and composition of lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC) Stapf.) grown under different levels of red mud in sewage sludge amended soil. *Chemosphere, 175*, 315-322. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.065

Ghanati, F., Morita, A., & Yokota, H. (2002). Induction of suberin and increase of lignin content by excess boron in tabacco cell. *Soil Science and Plant Nutrition, 48*, 357-364. https://doi.org/10.1080/00380768.2002.10409212

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

Ghori, N. H., Ghori, T., Hayat, M., Imadi, S., Gul, A., Altay, V., & Ozturk, M. (2019). Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology, 16*, 1807-1828. https://doi.org/10.1007/s13762-019-02215-8

Gjorgieva Ackova, D. (2018). Heavy metals and their general toxicity on plants. *Plant Science Today, 5*, 15-19.

Goyal, D., Yadav, A., Prasad, M., Singh, T. B., Shrivastav, P., Ali, A., Dantu, P. K., & Mishra, S. (2020). Effect of heavy metals on plant growth: An overview. *Contaminants in Agriculture*, 79-101. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_4

Guo, D., Ren, C., Ali, A., Li, R., Du, J., Liu, X., Guan, W., & Zhang, Z. (2019). Streptomyces pactum combined with manure compost alters soil fertility and enzymatic activities, enhancing phytoextraction of potentially toxic metals (PTMs) in a smelter-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 181*, 312-320. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.06.024

Hong, Y., Li, D., Xie, C., Zheng, X., Yin, J., Li, Z., Zhang, K., Jiao, Y., Wang, B., & Hu, Y. (2022). Combined apatite, biochar, and organic fertilizer application for heavy metal co-contaminated soil remediation reduces heavy metal transport and alters soil microbial community structure. *Science of the Total Environment, 851*, 158033. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158033

Jadia, C. D. & Fulekar, M. H. (2008). Phytoremediation: The application of vermicompost to remove zinc, cadmium, copper, nickel and lead by sunflower plant. *Environmental Engineering and Management, 7*(5), 547-558.

Karahan, F., Ozyigit, I. I., Saracoglu, I. A., Yalcin, I. E., Ozyigit, A. H., & Ilcim, A. (2020). Heavy metal levels and mineral nutrient status in different parts of various medicinal plants collected from eastern Mediterranean region of Turkey. *Biological Trace Element Research, 197*, 316-329. https://doi.org/10.1007/s12011-019-01974-2

Khalilzadeh, R., Pirzad, A., Sepehr, E., Khan, S., & Anwar, S. (2021). The Salicornia europaea potential for phytoremediation of heavy metals in the soils under different times of wastewater irrigation in northwestern Iran. *Environmental Science and Pollution Research, 28*, 47605-47618. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14073-4

Kumar, V., Singh, J., & Kumar, P. (2019). Heavy metals accumulation in crop plants: Sources, response mechanisms, stress tolerance and their effects. *Contaminants in Agriculture and Environment: Health Risks and Remediation, 1*, 38.

Landorfa-Svalbe, Z., Vikmane, M., & Ievinsh, G. (2022). Vermicompost amendment in soil affects growth and physiology of *Zea mays* plants and decreases Pb accumulation in tissues. *Agriculture, 12*, 2098. https://doi.org/10.3390/agriculture12122098

Li, Y., Kong, D., Fu, Y., Sussman, M. R., & Wu, H. (2020). The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry, 148*, 80-89. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.006

Mench, M. J., Didier, V. L., Loffler, M., Gomez, A., & Masson, P. (1994). A mimicked 1n-situremediation study of metal contaminated soils with emphasis on cadmium and lead. *Environmental Quality, 23*, 58-63. https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300010010x

Moghaddam, M. & Pirbalouti, A. G. (2017). Agro-morphological and phytochemical diversity of Iranian Cuminum cyminum accessions. *Industrial Crops and Products, 99*, 205-213. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.003

Nigam, N., Yadav, V., Khare, P., Singh, R. P., Das, P., Shanker, K., & Sharma, R. S. (2019). Exploring the benefits of biochar over other organic amendments for reducing of metal toxicity in *Withania somnifera*. *Biochar, 1*, 293-307. https://doi.org/10.1007/s42773-019-00023-4

Rai, R., Agrawal, M., & Agrawal, S. (2016). Impact of heavy metals on physiological processes of plants: With special reference to photosynthetic system. *Plant Responses to Xenobiotics*, 127-140. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2860-1_6

Sairam, R. K., Dharmar, K., Chinnusamy, V., & Meena, R. C. (2009). Water logging-induced increase in sugar mobilization, fermentation, and related gene expression in the roots of mug bean (*Vigna radiata*). *Journal of Plant Physiology, 6*, 602-616. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.09.005

Sall, M. L., Diaw, A. K. D., Gningue-Sall, D., Efremova Aaron, S., & Aaron, J. J. (2020). Toxic heavy metals: Impact on the environment and human health, and treatment with conducting organic polymers, a review. *Environmental Science and Pollution Research, 27*, 29927-29942. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09354-3

Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., Rehim, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere, 171*, 710-721. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116

Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Singh Sidhu, G. P., Bali, A. S., Handa, N., Kapoor, D., Yadav, P., & Khanna, K. (2020). Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: A review. *Journal of Plant Growth Regulation, 39*, 509-531. https://doi.org/10.1007/s00344-019-10018-x

Silva, E., Alves, I., Alleoni, L. R. F., Grazziotti, P., Farnezi, M., Santos, L., Prochnow, J., & Fontan, I. (2020). Availability and toxic level of cadmium, lead and nickel in contaminated soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 51*, 1341-1356. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1763396

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

Somasundaram, S., Abraham, J. S., Maurya, S., Toteja, R., Gupta, R., & Makhija, S. (2019). Expression and molecular characterization of stress-responsive genes (hsp70 and Mn-sod) and evaluation of antioxidant enzymes (CAT and GPx) in heavy metal exposed freshwater ciliate, *Tetmemena* sp. *Molecular Biology Reports, 46*, 4921-4931. https://doi.org/10.1007/s11033-019-04942-0

Sterckeman, T. & Thomine, S. (2020). Mechanisms of cadmium accumulation in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences, 39*, 322-359. https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1792179

Taie, H. A., Seif El-Yazal, M. A., Ahmed, S., & Rady, M. M. (2019). Polyamines modulate growth, antioxidant activity, and genomic DNA in heavy metal–stressed wheat plant. *Environmental Science and Pollution Research, 26*, 22338-22350. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05555-7

Tripathi, S., Sharma, P., Singh, K., Purchase, D., & Chandra, R. (2021). Translocation of heavy metals in medicinally important herbal plants growing on complex organometallic sludge of sugarcane molasses-based distillery waste. *Environmental Technology and Innovation, 22*, 101434. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101434

Tufail, M. A., Iltaf, J., Zaheer, T., Tariq, L., Amir, M. B., Fatima, R., Asbat, A., Kabeer, T., Fahad, M., & Naeem, H. (2022). Recent advances in bioremediation of heavy metals and persistent organic pollutants: A review. *Science of The Total Environment*, 157961. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157961

Ubeynarayana, N., Jeyakumar, P., Bishop, P., Pereira, R. C., & Anderson, C. W. (2021). Effect of soil cadmium on root organic acid secretion by forage crops. *Environmental Pollution, 268*, 115839. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115839

Vardhan, K. H., Kumar, P. S., & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids, 290*, 111197. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197

Wan, Y., Huang, Q., Wang, Q., Yu, Y., Su, D., Qiao, Y., & Li, H. (2020). Accumulation and bioavailability of heavy metals in an acid soil and their uptake by paddy rice under continuous application of chicken and swine manure. *Journal of Hazardous Materials, 384*, 121293. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121293

Wang, D., Li, C., Parikh, S. J., & Scow, K. M. (2019). Impact of biochar on water retention of two agricultural soils–A multi-scale analysis. *Geoderma, 340*, 185-191. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.012

Weatherely, P. E. (1950). Studies in water relation on cotton plants, the field measurement of water deficit in leaves. *New Phytologist, 49*, 81-87.

Yotsova, E. K., Dobrikova, A. G., Stefanov, M. A., Kouzmanova, M., & Apostolova, E. L. (2018). Improvement of the rice photosynthetic apparatus defence under cadmium stress modulated by salicylic acid supply to roots. *Theoretical and Experimental Plant Physiology, 30*, 57-70. https://doi.org/10.1007/s40626-018-0102-9

Zeeshan, M., Ahmad, W., Hussain, F., Ahamd, W., Numan, M., Shah, M., & Ahmad, I. (2020). Phytostabalization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield. *Journal of Cleaner Production, 255*, 120318. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120318

Zeshan, A., Abdullah, M., Adil, M. F., Wei, D., Noman, M., Ahmed, T., Sehar, S., Ouyang, Y., & Shamsi, I. H. (2022). Improvement of morpho-physiological, ultrastructural and nutritional profiles in wheat seedlings through astaxanthin nanoparticles alleviating the cadmium toxicity. *Journal of Hazardous Materials, 424*, 126511. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126511

Zhou, N., Wang, Y., Yao, D., Li, S., Tang, J., Shen, D., Zhu, X., Huang, L., Zhong, M., & Zhou, Z. (2019). Novel wet pyrolysis providing simultaneous conversion and activation to produce surface-functionalized biochars for cadmium remediation. *Journal of Cleaner Production, 221*, 63-72. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.176

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]

Improving growth and physiological indices of cumin (*Cuminum Cuminum* L.) by different growing substrates under stress heavy metals in the reproductive stage

Abdolreza Fazli, Mehdi Madandoust*

Agronomy Department, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran
(Received: 2023/01/23, Accepted: 2023/05/17)

Abstract

Heavy metal contamination in the soil is a widespread global problem, and to reduce the accumulation and negative effects of heavy metals in plants, using different growing substrates is an effective and economical solution. In order to investigate the improvement of the growth and physiological characteristics of cumin with different growing substrates under the stress of heavy metals, a factorial experiment was carried out in the form of a completely randomized design with three replications in 2020–2021. The first factor includes four levels of heavy metals (control, cadmium, lead, and nickel) with a concentration of 50 mg/kg of soil, and the second factor includes different growing substrates at four levels (control, animal manure, compost and vermicompost). The results showed that heavy metals in the soil caused absorption and transfer to aerial organs. On the other hand, the use of organic fertilizer treatments caused a significant reduction of cadmium, lead and nickel in aerial parts compared to control. Heavy metals decreased shoot dry weight and seed yield by increasing ion leakage and decreasing the content of photosynthetic pigments. Animal manure and vermicompost significantly increased the chlorophyll content and the relative water content of leaves compared to the absence of organic fertilizers. Also, the enzyme catalase and ascorbate peroxidase of cumin leaves showed an increasing trend with the use of heavy metals. In total, the results of this research showed that the application of vermicompost and animal manure provides the best conditions for the growth of cumin under the stress of heavy metals.

Keywords: Antioxidant enzyme, Flowering stage, Heavy metals, Organic fertilizer, Photosynthetic pigments

Corresponding author, Email: mehdimadandoust@yahoo.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-14]