مقاله پژوهشی

اثر سرب و کادمیوم در مرحله جوانه‌زنی و کاربرد ورمی‌کمپوست در پالایش آلودگی همزمان توسط آفتابگردان زینتی (*Helianthus annuus* cv. Sungold)

فاطمه مژدهی[۱]، مینا تقی‌زاده[۲]*، امیر حسین بقائی[۳]، مهدی چنگیزی[۴] و شهاب خاقانی [۴]

[۱] گروه باغبانی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

[۲] گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، ایران

[۳] گروه خاک‌شناسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

[۴] گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱)

چکیده

یکی از روش‌های اصلاح و پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، کاربرد ترکیبات آلی مانند ورمی‌کمپوست به‌منظور پالایش و یا تثبیت آلودگی است. در این پژوهش اثر ورمی‌کمپوست بر قابلیت جذب فلزات سنگین سرب و کادمیوم توسط گیاه آفتابگردان زینتی و اثر این فلزات بر شاخص‌های جوانه‌زنی و استقرار گیاه مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه در دو آزمایش جوانه‌زنی و گلخانه‌ای درسال ۹۸-۱۳۹۷ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. در آزمایش اول از غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات سرب و کلرید کادمیوم استفاده شد و سپس شاخص‌های جوانه‌زنی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در آزمایش دوم غلظت‌های صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم فلز سرب، غلظت‌های صفر، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم و سطوح صفر، ۱ و ۲ درصد وزنی ورمی‌کمپوست به‌منظور قابلیت جذب فلزات سنگین توسط گیاه آفتابگران زینتی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش اول نشان داد افزایش غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم سبب کاهش طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و نیز شاخص‌های جوانه-زنی مانند شاخص بنیه بذر، شاخص میزان جوانه‌زنی و میانگین سرعت جوانه‌زنی گردید. نتایج آزمایش دوم نشان داد که با افزایش غلظت سرب و کادمیوم در خاک، رشد رویشی گیاه آفتابگردان زینتی تحت تأثیر قرار نگرفت ولی میزان سرب و کادمیوم خاک، سرب و کادمیوم ریشه و سرب و کادمیوم اندام هوایی افزایش یافت. با افزایش غلظت فلزات سنگین، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز ۵۰-۳۰ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. ورمی‌کمپوست سبب کاهش میزان این فلزات در خاک، ریشه و ساقه گیاه آفتابگردان زینتی شد و این گیاه زینتی را می‌توان به‌عنوان پالایشگر مناطق آلوده به سرب و کادمیوم معرفی کرد.

کلید واژه‌ها: آنتی‌اکسیدان، تنش، جوانه‌زنی، فلزات سنگین، گیاه زینتی، ورمی‌کمپوست

مقدمه

در بین تنش‌های غیرزنده، سمیت فلزات سنگین بسیار اهمیت دارد. سمیت فلزات سنگین و تجمع آن‌ها در زنجیره‌های غذایی یکی از اصلی‌ترین معضلات زیست‌محیطی و بهداشتی

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: m-taghizadeh@araku.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

جوامع امروزی است (Adriano, 2001). آلودگی خاک به‌وسیله فلزات سنگین با آلودگی آب‌وهوا متفاوت است، چرا که فلزات سنگین در داخل خاک به‌مدت طولانی‌تری نسبت به بیوسفر باقی می‌مانند و در خاک دوام و بقای بیشتری دارند (Lasat, 2002). معضل اصلی مربوط به فلزات سنگین آن است که این آلاینده‌های غیرآلی برخلاف آلاینده‌های آلی تجزیه‌پذیر نیستند. این واقعیت، فلزات سنگین را به یکی از خطرناک‌ترین گروه آلاینده‌های محیط‌زیستی مبدل ساخته است (Kabata-Pendias, 2001). از فلزات سنگین می‌توان به سرب، کادمیوم، نیکل، کبالت، آهن، روی، کروم، آرسنیک، نقره و پلاتین اشاره نمود. کادمیوم یک فلز بسیار سمی است که تنش اکسیداتیو در گیاهان القا می‌کند (Hasan *et al*., 2009). کادمیوم برای رشد گیاه ضروری نبوده و می‌تواند سبب علائم سمیت شامل کلروز برگ، پوسیدگی ریشه و بازدارندگی رشد شود (Valentovi_ova *et al*., 2010). گیاهان به برخی فلزات سنگین در غلظت‌های بسیار پایین نیاز دارند، اما زمانی‌که غلظت این فلزات از حد نیاز گیاه بالاتر می‌رود منجر به بروز اختلالات متابولیکی و بازدارندگی رشد اغلب گونه‌های گیاهی می‌گردد (Kabata-Pendias, 2001). مرحله دانهالی و جوانه‌زنی گیاه به عوامل محیطی مانند آلودگی فلزات سنگین حساس هستند (Abedin and Mehrag, 2002) و جلوگیری از جوانه‌زنی از مهم‌ترین اثرات شناخته‌شده تأثیر سمیت فلزات سنگین است (Ghani, 2010). جوانه‌زنی بذر یکی از مهم‌ترین مراحل مؤثر بر عملکرد و کیفیت در تولید محصول است (Almansouri *et al*., 2001). پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در حال حاضر به یکی از موضوعات اساسی در احیا و اصلاح اکوسیستم‌های طبیعی تبدیل شده است (Jieng-feng *et al*., 2009). پیشرفت‌های اخیر در این زمینه منجر به کشف روش گیاه‌پالایی گردیده است (Tlustos *et al*., 2006). استفاده از گیاهانی که فلزات سنگین را از خاک جذب می‌کنند، به‌عنوان روشی متفاوت و کم‌هزینه برای حذف مستقیم فلزات سنگین از خاک پیشنهاد می‌شود (Yang *et al*., 2005). تاکنون مطالعاتی در زمینه پالایش گیاهی فلزات سنگینی مانند سرب، کادمیوم و نیکل توسط آفتابگردان زراعی صورت گرفته است (Jarrah *et al*., 2019; Sadat Piroz and Manochehri, 2010; Moslehi *et al*., 2019; Sarhadi *et al*., 2010). گزارش شده است که گیاه آفتابگردان می‌تواند به‌عنوان یک گیاه بیش‌اندوز در خاک‌های آلوده مورد استفاده قرار گیرد و تأثیر تیمارها بر افزایش مقدار فاکتور انتقال بیان‌گر تأثیر مثبت آن‌ها بر افزایش کارایی گیاه‌پالایی است (Khosravi, 2010). Motesharezadeh و همکاران (۲۰۱۰) نیز گزارش کردند که با افزایش سطوح کادمیوم و سرب در خاک، غلظت این عناصر در اندام‌های گیاه آفتابگردان (ساقه و ریشه) به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد.

یکی دیگر از زمینه‌های پژوهشی در زمینه روش‌های اصلاح و پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، کاربرد ترکیبات آلی و معدنی برای پالایش و یا تثبیت آلودگی است. کمپوست ها معروف به احیاکننده خاک علاوه بر بهبود ظرفیت نگهداری آب‌ومواد غذایی، تهویه و پایداری pH، موجب تثبیت فلزات سنگین به سبب از بین‌بردن مسیرهای جذب آلاینده‌ها می‌شوند. به این ترتیب، ضمن تثبیت فلزات سنگین، جذب آن‌ها توسط ریشه کاهش می‌یابد (Van Herwijnen *et al*., 2007). در طی یک آزمایش گلخانه‌ای مشاهده شد کاربرد ۵۰ درصد ورمی‌کمپوست در بستر آلوده به فلزات سرب، مس و روی سبب کاهش سمیت این فلزات در رشد کلم زینتی شد. در بستر دارای ورمی‌کمپوست جذب سرب نسبت به بستر فاقد ورمی‌کمپوست کمتر صورت گرفت که این ویژگی باعث سمیت کمتر در گیاه کلم زینتی شد (تقی‌زاده و صادقی، ۱۳۹۶). عبدوسی (۱۳۹۷) در بررسی اثرات کادمیوم و ورمی‌کمپوست بر برخی ویژگی‌های رشدی گیاه اسفناج گزارش کرد که اختلاط ورمی‌کمپوست با خاک، سبب تعدیل اثرات منفی کاربرد کادمیوم بر تعداد برگ، ارتفاع بوته و سطح برگ اسفناج گردید و این صفات را بهبود بخشید و عنوان کرد که کادمیوم باعث کاهش رشد اندام‌های هوایی اسفناج شده و از سویی دیگر مصرف ورمی‌کمپوست به‌دلیل اثرات تغذیه‌ای باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی شده و اثرات سوء این فلز سنگین را کاهش داد. در بررسی تأثیر کود آلی مایع

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

(ورمی‌واش) بر رشد و جذب عناصر پرمصرف توسط اسفناج در خاک آلوده به فلز سنگین کادمیوم مشخص شد که در خاک آلوده به کادمیوم، کاربرد ورمی‌واش سبب افزایش عملکرد و جذب عناصر پرمصرف در گیاه اسفناج شد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۶). در بررسی تأثیر فلزات سنگین بر آنزیم‌های پامساینده در لوبیا چیتی تحت ترکیبات مختلف بستر کاشت، مشخص شد که افزودن کمپوست و ورمی‌کمپوست سبب کاهش فعالیت دو آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در شرایط ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک فلزات سنگین سرب، نیکل، مس و کادمیوم شد (امینی و بلوچی، ۱۳۹۶).

تا کنون اکثر پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه گیاه‌پالایی بر محور گیاهان علوفه‌ای و خوراکی بوده است که خطر واردشدن فلزات سنگین در چرخه غذایی را دارد. آفتابگردان زینتی با نام علمی *Helianthus annuus* از خانواده کلاپرک سانان، برای کاشت در فضای سبز و کاربرد گلدان به‌عنوان گل بریدنی استفاده می‌شود. استفاده از گیاه زینتی آفتابگردان علاوه بر زیباسازی منظر، می‌تواند به‌عنوان شاخص و یک پالاینده گیاهی برای مناطق آلوده به‌کار رود. بنابراین در این پژوهش اثر ورمی‌کمپوست بر قابلیت جذب فلزات سنگین (سرب و کادمیوم) توسط گیاه آفتابگردان زینتی و اثر آلودگی فلزات سرب و کادمیوم در مرحله جوانه‌زنی و در شاخص‌های گیاه پالایی در مرحله استقرار گیاه مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر فلزات سنگین سرب و کادمیوم در مرحله جوانه‌زنی و استقرار آفتابگردان زینتی رقم *Helianthus annuus* cv. Sungold در طی دو آزمایش جوانه‌زنی و گلخانه‌ای و در سال‌های ۱۳۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد.

آزمایش اول- اثر غلظت‌های مختلف سرب و کادمیوم در مرحله جوانه‌زنی آفتابگردان زینتی: قبل از اجرای آزمایش گلخانه‌ای، به‌منظور بررسی چگونگی تحمل آفتابگردان زینتی به حضور غلظت‌های مختلف سرب و کادمیوم آزمایشی در شرایط جوانه‌زنی به‌صورت طرح کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل در سه تکرار طراحی و اجرا گردید. در این آزمایش به‌منظور بررسی تأثیر فلزات سنگین بر جوانه‌زنی بذور آفتابگردان زینتی از غلظت‌های صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر دو فلز سنگین با استفاده از نمک نیترات سرب ($CdCl_2$) و کلرید کادمیوم ($Pb(NO_3)_2$) استفاده شد. جهت ضدعفونی بذرها، ابتدا با قارچ‌کش کاپتان ۰/۰۱ به‌مدت یک دقیقه آغشته شدند و سپس با هیپوکلرید سدیم ۲۰ درصد به‌مدت ۱۰ دقیقه ضدعفونی گردیدند. بذرهای استریل‌شده در پتری‌دیش‌های استریل‌شده با اتوکلاو (دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۰ دقیقه) روی کاغذ صافی قرار داده شدند. پس از قراردادن ۱۰ عدد بذر روی کاغذ صافی مجدد روی آن‌ها کاغذ صافی دیگری قرار داده و درب پتری‌دیش‌ها توسط نوارهای پارافیلمی جهت حفظ رطوبت کاغذ صافی، بسته شدند. پتری‌دیش‌ها تا پایان آزمایش در داخل ژرمیناتور با دمای ۱±۲۴ درجه‌سانتی‌گراد و رطوبت ۶۰ درصد نگهداری شدند. زمان اولین جوانه‌زنی براساس خروج ریشه‌چه ثبت گردید. در روز نهم پس از اجرای آزمایش اولین جوانه‌زنی مشاهده شد و از روز دهم ارزیابی صفات آغاز و ثبت گردید. پس از ۱۰ روز از تاریخ کشت صفاتی مانند درصد جوانه‌زنی نهایی، شاخص جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، متوسط زمان جوانه‌زدن بذور، میانگین سرعت جوانه‌زنی بذور، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، طول برگ‌های لپه‌ای، عرض برگ‌های لپه‌ای، مساحت برگ و نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه، شاخص بنیه گیاهچه (Ghani, 2010) و شاخص تحمل گیاهچه (Hamidi *et al.*, 2009) محاسبه شد. بنیه بذر از مجموع طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه ضرب در درصد جوانه‌زنی محاسبه شد. همچنین بنیه شاخص تحمل گیاهچه از ضرب شاخص بنیه گیاهچه در قابلیت جوانه‌زنی محاسبه گردید.

آزمایش دوم- اثر ورمی کمپوست در پالایش سرب و کادمیوم در آفتابگردان زینتی: در این آزمایش از ترکیب کلرید کادمیوم در غلظت‌های صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، ترکیب نیترات سرب در غلظت‌های صفر، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و سه سطح صفر، ۱ و ۲ درصد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و ورمی‌کمپوست مورد آزمایش

ویژگی‌های خاک		ویژگی‌های ورمی‌کمپوست	
pH	۷/۳	pH	۸
EC (dS^{-1})	۱/۱	EC (dS^{-1})	۶/۹
کربن آلی (%)	۰/۱	کربن آلی (%)	۲۱/۴
بافت خاک	لومی	نیتروژن کل (%)	۱/۵
آهک (%)	۸	روی قابل دسترس ($mg\ kg^{-1}$)	۱۲/۵۱۷
سرب ($mg\ kg^{-1}$)	ND†	فسفر قابل دسترس ($mg\ kg^{-1}$)	۱/۲۳
کادمیوم ($mg\ kg^{-1}$)	ND†	سرب ($mg\ kg^{-1}$)	۳/۴
CEC (c mol/ 100 g soil)	۱۳/۳	کادمیوم ($mg\ kg^{-1}$)	۱/۱

† :**None-detected**

وزنی ورمی‌کمپوست به‌منظور بررسی تأثیر ورمی‌کمپوست، بر قابلیت جذب فلزات سنگین کادمیوم و سرب توسط گیاه آفتابگران زینتی در خاک آلوده به فلزات سنگین استفاده شد. این تحقیق به‌صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور آماده‌سازی خاک آلوده، پس از اضافه‌کردن محلول فلزات سنگین و ورمی‌کمپوست به خاک زراعی یک دوره یک ماهه استراحت جهت به تعادل‌رسیدن خاک با فلزات سنگین و ماده آلی خاک داده شد. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و ورمی‌کمپوست در جدول ۱ ارائه شده است. سپس خاک آلوده در گلدان‌هایی به حجم ۵ کیلوگرم ریخته شده و ۴-۳ عدد بذر آفتابگردان زینتی در گلدان‌ها تحت شرایط گلخانه استاندارد دارای دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۷۰ درصد کاشته شدند. پس از دو هفته دانهال‌ها در هر گلدان به یک گیاه تنک شدند. آبیاری گلدان‌ها هر سه یا چهار روز یکبار به‌طوریکه آب از ته گلدان‌ها خارج نشود، انجام شد. در حدود ۶۰ روز پس از کشت، گیاهان برداشت و به آزمایشگاه منتقل شدند. ریشه‌ها از ساقه تفکیک شده با آب‌مقطر دو بار تقطیر شسته شده سپس طول ساقه، تعداد برگ، وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی اندازه‌گیری شد و مواد گیاهی حاصل جهت بررسی میزان غلظت سرب و کادمیوم مورد تجزیه قرار گرفتند. نمونه‌های ساقه و ریشه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت در آون قرار گرفته و پس از توزین به‌وسیله آسیاب جهت تجزیه شیمیایی خرد شدند. به‌منظور محاسبه مقدار کادمیوم قابل استخراج ۲۵ گرم از هر نمونه خاک مقدار ۵۰ میلی‌لیتر عصاره‌گیر DTPA-TEA اضافه گردید و pH توسط اسید هیدروکلریک بر عدد ۷/۳ ثابت تنظیم شد. نمونه‌ها به‌مدت دو ساعت توسط دستگاه همزن هم‌زده شده و سپس به‌کمک دستگاه سانتریفیوژ مواد جامد موجود در آن ته‌نشین شد. نمونه‌ها به کمک کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف و عصاره حاصل با آب‌مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. غلظت کادمیوم در عصاره‌های استخراج‌شده به کمک دستگاه جذب اتمی پرکین المرمدل ۲۰۳۰ تعیین شد (Lindsay and Norvell, 1978). به‌منظور تعیین غلظت کادمیوم در ریشه و ساقه آفتابگردان زینتی یک گرم از نمونه‌های آسیاب‌شده و به‌مدت پنج تا شش ساعت در کوره تا زمان خاکسترشدن قرار گرفت. پس از این مرحله به نمونه‌ها مقدار ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک دو نرمال اضافه کرده و به‌مدت یک ساعت روی هیتر با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس نمونه‌ها از کاغذ صافی شماره ۴۲ عبورداده شده و با آب‌مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. غلظت کادمیوم نمونه‌ها را با دستگاه جذب اتمی پرکلین المر تعیین گردید. (Lindsay and Norvell, 1978). یک گرم از خاک هوا خشک و الک شده با نسبت ۹ میلی‌لیتر HCl، ۳ میلی‌لیتر HNO_3 و ۳ میلی‌لیتر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

$HClO_4$ مخلوط شده و در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۶ ساعت در دستگاه هضم‌کننده قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها پس از رسیدن به حجم ۲۵ میلی‌لیتر جهت اندازه‌گیری غلظت سرب موجود در نمونه‌های گیاه و خاک توسط دستگاه جذب اتمی خوانده شدند. هضم نمونه‌های گیاه که شامل ریشه، ساقه و برگ بود توسط روش هضم تر صورت گرفت و مقدار سرب موجود در اندام‌های مختلف توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) به روش Dhindsa و همکاران (۱۹۸۱) اندازه‌گیری شد که بر پایه اثر بازدارندگی این آنزیم با احیای نوری نیتروبلوتترازولیوم (NBT) است. به‌منظور خواندن فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۴۲۰ نانومتر تنظیم شد.

تجزیه داده‌های حاصل از این پژوهش با نرم‌افزار SAS (نسخه ۹,۱) صورت گرفت. آزمون چند دامنه‌ای دانکن (DMRT) برای مقایسه میانگین و تعیین معنی‌دار بودن تفاوت آماری در تیمارها در سطح احتمال پنج درصد استفاده گردید. برای رسم نمودار از نرم‌افزار EXCEL استفاده شد.

آزمایش اول- اثر غلظت های مختلف سرب و کادمیوم در مرحله جوانه‌زنی آفتابگردان زینتی: تجزیه واریانس اثر غلظت‌های مختلف فلزات سرب و کادمیوم بر صفات طول ساقه‌چه، طول ریشه‌چه، نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه، شاخص میزان جوانه‌زنی، متوسط ارزش جوانه‌زنی، شاخص بنیه بذر و شاخص تحمل بذر معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین تأثیر غلظت‌های مختلف سرب و کادمیوم بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر آفتابگردان زینتی نشان داد که افزایش غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم سبب کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی بذر آفتابگردان زینتی گردید. با افزایش غلظت کادمیوم در محیط، میانگین سرعت جوانه‌زنی تغییر معنی‌داری نسبت به شاهد نداشت، ولی میزان جوانه‌زنی کاهش پیدا کرد. در حضور غلظت بالای سرب، سرعت و میزان جوانه‌زنی در مقایسه با شاهد کاهش یافت. بیشترین میانگین سرعت جوانه‌زنی بذور (۱۱/۶ تعداد بذر در روز) و میزان جوانه‌زنی (۳۱/۳ تعداد بذر در روز) در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سرب حاصل شد که تفاوت معنی‌داری با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر این فلز سنگین و شاهد نداشت. بیشترین میزان شاخص بنیه بذر در شاهد و کمترین میزان شاخص بنیه بذر در هر سه غلظت کادمیوم و بالاترین غلظت سرب یعنی ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بدست آمد. بیشترین میزان شاخص تحمل بذور (۱۱۱۰/۵) در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر سرب و بیشترین نسبت طول ریشه به ساقه (۰/۸۳ سانتی‌متر) در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم مشاهده شد. در مورد دو صفت طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه بیشترین مقادیر در شاهد نسبت به غلظت‌های مختلف کادمیوم و سرب مشاهده شد و با افزایش غلظت عناصر سمی، طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه نسبت به شاهد به‌شدت کاهش یافت (جدول ۳).

رشد یکی از بهترین شاخص‌ها برای ارزیابی پاسخ گیاه به تنش‌های محیطی است. نتایج این آزمایش در رابطه با کاهش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه تحت تأثیر فلزات سنگین سرب و کادمیوم با نتایج Peralta و همکاران (۲۰۰۱) مبنی بر کاهش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گیاه یونجه در حضور غلظت‌های عناصر کادمیوم و نیکل همخوانی دارد. یکی از دلایل کاهش طول ساقه‌چه در شرایط تنش کادمیوم، کاهش یا عدم انتقال مواد غذایی از لپه‌ها به جنین است. علاوه بر این کاهش جذب آب توسط بذر در شرایط تنش سبب کاهش ترشح هورمون‌ها و فعالیت آنزیم‌ها و درنتیجه اختلال در رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه گیاهچه می‌شود (Chaoui and Ferjani, 2005). عناصری مانند کادمیوم از طریق تأثیر بر پمپ‌های پروتونی و اختلال در آن‌ها سبب کاهش رشد ناشی از کاهش تقسیم سلولی و طویل‌شدن سلول می‌شوند (Liu *et al.*, 2004). مسمومیت فلزی ممکن است از طریق نمک‌های مختلف که موجب پاسخ‌های مختلف اندامک‌ها می‌شوند ایجاد شوند (Montvydiene *et al.*, 2008). Groppa و همکاران (۲۰۰۸) نیز بیان کردند که در گیاه آفتابگردان رشد ریشه در غلظت زیاد کادمیوم کم یا متوقف می‌شود. نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه یکی از شاخص‌های واکنش دانهال‌ها نسبت به تنش فلزات

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر غلظت‌های مختلف فلزات بر شاخص‌های جوانه‌زنی دانهال آفتابگردان‌زینتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		طول برگ‌های لپه‌ای	عرض برگ‌های لپه‌ای	مساحت برگ-های لپه‌ای	طول ساقه‌چه	طول ریشه‌چه	طول ریشه چه/ساقه‌چه
تیمار	۶	۵/۹ ns	۱/۶ ns	۲۳۹ ns	۴/۴ **	۱/۲ **	۰/۰۵ **
خطا	۱۴	۲/۹	۱/۲	۹۷	۰/۴	۰/۱	۰/۰۱
ضریب تغییرات (٪)		۲۱	۲۴	۲۵	۲۷	۲۱	۱۱

****، * و ns: به‌ترتیب، معنی‌دار در سطح ۰/۰۱، در سطح ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری**

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر غلظت‌های مختلف فلزات بر شاخص‌های جوانه‌زنی دانهال آفتابگردان‌زینتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		شاخص میزان جوانه‌زنی	میانگین جوانه زنی روزانه	درصد جوانه زنی نهایی	میانگین زمان جوانه‌زنی	متوسط ارزش جوانه‌زنی	شاخص بنیه بذر	شاخص تحمل
تیمار	۶	۱۲۳ **	۹۹۲ ns	۷۰۷ ns	۰/۰۸ ns	۱۰/۸*	۵۹۷**	۱۴۰*
خطا	۱۴	۲۰	۳۹۲	۲۵۸	۰/۰۳	۳/۲	۵۱	۳۹
ضریب تغییرات (٪)		۱۹	۳	۲۰	۳/۷	۱۹	۲۵	۳۰

****، * و ns: به‌ترتیب، معنی‌دار در سطح ۰/۰۱، در سطح ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری**

جدول ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش غلظت‌های مختلف فلزات کادمیوم و سرب بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر در آفتابگردان زینتی

نوع فلز	تیمار (mg/L)	میانگین سرعت جوانه‌زنی (تعداد بذر در روز)	میزان جوانه‌زنی (درصد)	بنیه بذر	شاخص تحمل	طول ریشه‌چه	طول ساقه‌چه	نسبت طول ریشه/ ساقه
						(cm)		
شاهد		۱۰/۸a	۲۹/۲a	۲۷۱۱/۹a	۱۰۰/۰b	۹/۳a	۲۰/۲a	۰/۵۱ab
کادمیوم	۵۰	۸/۴ab	۱۹/۴bc	۳۲۴/۷c	۵۰۰/۸ab	۱/۹c	۱/۸c	۰/۱۳b
	۱۰۰	۷/۲b	۱۸/۷bc	۲۷۲/۸c	۴۵۱/۵b	۲/۰c	۱/۷c	۰/۱۲b
	۲۰۰	۸/۲ab	۲۰/۲bc	۳۴۳/۲c	۴۱۹/۹b	۲/۲c	۲/۷c	۰/۸۳a
سرب	۵۰	۱۱/۱a	۲۷/۰ab	۱۱۸۴/۵bc	۱۱۱۰/۵a	۱/۸c	۱۰/۵b	۰/۱۶b
	۱۰۰	۱۱/۶ a	۳۱/۳a	۱۵۸۷/۷b	۲۲۰/۳b	۵/۵۶۷b	۱۰/۹۱۷b	۰/۴۹ab
	۲۰۰	۷/۱b	۱۳/۸c	۴۰۳/۸c	۶۲۷/۴ab	۱/۷۳۷c	۴/۲۴bc	۰/۴b

در هر ستون میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند.

سنگین است. افزایش این نسبت در غلظت‌های کم نشان‌دهنده افزایش رشد طولی ریشه‌چه نسبت به رشد طولی ساقه‌چه است. به این معنی که در غلظت‌های کم کادمیوم (۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) اثر سمیت و بازدارندگی بر ریشه وجود ندارد، بلکه ممکن است سبب تحریک رشد نیز شود. برعکس در غلظت‌های بیشتر (۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) اثر بازدارندگی بر رشد ریشه‌چه دارد. کاهش نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه گیاهانی مانند گندم، جو و برنج (Mahmood *et al.*, 2007)، چمن

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

(Taghizadeh and Solgi, 2017)، آفتابگردان (غفاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ عالیوند و همکاران، ۱۳۹۱)، در حضور فلزات سنگین سرب، کادمیوم، نیکل، و غیره گزارش شده است که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد. وجود فلزات سنگین در محیط جوانه‌زنی به‌دلیل نفوذ سریع به داخل بذر همراه با آب از طریق تأثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیکی مهم از جمله تنفس و ممانعت از تقسیم سلول‌ها، سبب اختلال در رشد گیاه‌چه می‌شود (Marquez Garsia *et al*., 2013). شاخص بنیه بذر معیاری از قدرت بذر هستند که بیشتربودن آن نشان‌دهنده توانایی بیشتر بذر برای جوانه‌زنی و رشد بعدی است (Abdul Baki and Anderson, 1973). امینی و بلوچی (۱۳۹۴) در بررسی تأثیر برخی فلزات سنگین بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر لوبیا چینی دریافتند که افزایش غلظت کادمیوم و سرب سبب اختلال در رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه و نیز کاهش میزان بنیه بذر گردید. در این پژوهش مشخص شد که افزایش غلظت کادمیوم و سرب سبب کاهش میزان شاخص بنیه بذر آفتابگردان زینتی شد. این نتایج با یافته‌های Sfaxi Bousbih و همکاران (۲۰۱۰) در رابطه با اثر فلز کادمیوم بر گیاه لوبیا که بیان داشتند سرعت جوانه‌زنی بذر تحت تأثیر این فلز تا حدود ۴۲ درصد کاهش یافت، مطابقت دارد. با اینکه بیشترین شاخص تحمل در تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر سرب حاصل گردید، اما تفاوت میان شاهد و تیمارهای دارای فلز سنگین از نظر آماری معنی‌دار نبود. آنچه که از نتایج ما مشخص است این‌که ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر فلزات سنگین کادمیوم و سرب به‌عنوان غلظت بهینه است و با اینکه افزایش غلظت فلزات سبب کاهش شاخص تحمل و یا سایر صفات شود ولی در مقایسه با شاهد معنی‌دار نبوده یا اثر بسیار کمی داشته است. می‌توان گفت که افزایش غلظت فلزات تا حدی نبوده که به‌عنوان تنش محسوب گردد و گیاه را به مقابله با شرایط تنش وادارد.

آزمایش دوم- اثر ورمی کمپوست در پالایش سرب و کادمیوم در آفتابگردان زینتی، اثر تیمارها بر صفات رشدی گیاه: نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده ورمی‌کپوست بر هر دو صفت تعداد برگ و ساقه گیاه آفتابگردان در سطح یک درصد معنی‌دار بود. اثر ساده کادمیوم و اثر ساده سرب بر صفت تعداد ساقه در سطح پنج درصد معنی‌دار شد و بر صفات طول ساقه تأثیر معنی‌داری نداشت. همچنین تأثیر متقابل دوگانه سرب و کادمیوم و تأثیر متقابل سه‌گانه ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر هر دو صفت تعداد برگ و طول ساقه معنی‌دار گردید. تأثیر متقابل دوگانه ورمی‌کمپوست با سرب و کادمیوم بر هیچ‌کدام از صفات معنی‌دار نشد (جدول ۴).

مقایسه میانگین تأثیر کاربرد غلظت‌های مختلف ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر گیاه آفتابگردان زینتی نشان داد که افزایش غلظت ورمی‌کمپوست سبب افزایش تعداد برگ شد. با عدم‌کاربرد ورمی‌کمپوست در بستر کشت، حضور غلظت‌های سرب و کادمیوم به‌ویژه فلز سرب تعداد برگ کاهش یافت. غلظت ۲ درصد ورمی‌کمپوست نسبت به ۱ درصد حتی در حضور فلزات تولید برگ بیشتری را در آفتابگردان زینتی سبب شد. درصورت عدم‌کاربرد ورمی‌کمپوست در بستر کشت، با افزایش سرب تعداد برگ نسبت به سایر تیمارها کاهش یافت. کمترین تعداد برگ در تیمارهای ورمی‌کمپوست ۲ درصد، ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سرب و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و ورمی‌کمپوست ۱ درصد، ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سرب و ۱۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد. در همه غلظت‌های فلزات، کاربرد ورمی‌کمپوست در بستر کشت آفتابگردان زینتی سبب افزایش طول ساقه شد و کمترین طول ساقه را در تیمارهایی که ورمی‌کمپوست صفر بود، مشاهده شد. افزایش طول ساقه در ورمی‌کمپوست ۲ درصد نسبت به ۱ درصد بیشتر بود. کمترین طول ساقه در تیمارهای ورمی‌کمپوست صفر درصد، ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سرب و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و ورمی‌کمپوست ۱ درصد، ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سرب و ۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد. به‌طورکلی بیشترین تعداد برگ و طول ساقه در تیمارهای ورمی‌کمپوست ۱ درصد، عدم‌حضور سرب و کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و ورمی‌کمپوست ۱ درصد، سرب ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر و عدم‌حضور کادمیوم و ورمی‌کمپوست ۲

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر تعداد برگ و طول ساقه در آفتابگردان زینتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		تعداد برگ	طول ساقه
ورمی‌کمپوست	۲	۶۷/۸۶ **	۸۷/۰۴ **
سرب	۲	۲۱/۳۳ *	۶/۷۳ ns
کادمیوم	۳	۲۰/۷۷ *	۲/۳۷ ns
ورمی‌کمپوست × سرب	۴	۹/۶۱ ns	۹/۱۷ ns
ورمی‌کمپوست × کادمیوم	۶	۷/۸۸ ns	۱۱/۸۱ ns
سرب × کادمیوم	۶	۱۳/۵۴ *	۱۷/۵۶**
ورمی‌کمپوست × سرب× کادمیوم	۱۲	۱۹/۸**	۱۱/۹*
خطا	۷۲	۶/۰۷	۵/۳۲
ضریب تغییرات (٪)		۲۳/۴۱	۱۶/۲۱

: در سطح یک درصد معنی‌دار، *: در سطح پنج درصد معنی‌دار و ns: عدم معنی‌داری در سطح آماری یک درصد و پنج درصد.

جدول ۵- اثر تیمارهای مختلف ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر تعداد و برگ و طول ساقه در آفتابگردان زینتی

ورمی‌کمپوست (٪)	سرب (mg/kg)	کادمیوم (mg/kg)	تعداد برگ	طول ساقه (cm)
۰	۰	۰	۱۰ abcdef	۱۳/۳۷ cdefghi
۰	۰	۵	۱۰/۳۳ abc	۱۲/۷۳ defghi
۰	۰	۱۰	۸/۶۷ cdef	۱۱/۸ fghi
۰	۰	۱۵	۷/۳۳ ef	۱۲/۹۷ defghi
۰	۴۰۰	۰	۹/۳۳ bcdef	۱۱/۴۳ ghi
۰	۴۰۰	۵	۱۰/۶۷ abcdef	۱۲/۷۳ defghi
۰	۴۰۰	۱۰	۸/۶۷ cdef	۱۲/۱۶ efghi
۰	۴۰۰	۱۵	۱۰ abcdef	۱۴/۲۳ bcdefghi
۰	۶۰۰	۰	۸ def	۱۳/۴۳ cdefghi
۰	۶۰۰	۵	۸d ef	۱۲/۱۶ efghi
۰	۶۰۰	۱۰	۸d ef	۱۰/۸۳ hi
۰	۶۰۰	۱۵	۸/۳۳ def	۱۲/۷۳ defghi
۱	۰	۰	۸d ef	۱۲/۹ defghi
۱	۰	۵	۱۴/۶۷ a	۱۶/۵ abcde
۱	۰	۱۰	۱۴ ab	۱۸/۴ ab
۱	۰	۱۵	۱۳/۳۳ abc	۱۶/۴۶ abcde
۱	۴۰۰	۰	۹/۳۳ bcdef	۱۲/۸۶ defghi
۱	۴۰۰	۵	۱۰ abcdef	۱۰/۸ i
۱	۴۰۰	۱۰	۱۲/۳۳ abcd	۱۷/۶۶ abc

در هر ستون میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

ادامه جدول ۵-

ورمی‌کمپوست (٪)	سرب (mg/kg)	کادمیوم (mg/kg)	تعداد برگ	طول ساقه (cm)
۱	۴۰۰	۱۵	۱۰/۶۷^{abcdef}	۱۳/۶^{cdefghi}
۱	۶۰۰	۰	۱۴/۶۷^{a}	۱۷/۶۶^{abc}
۱	۶۰۰	۵	۱۴^{ab}	۱۴/۷۳^{bcdefghi}
۱	۶۰۰	۱۰	۷/۳۳^{ef}	۱۱/۶۶^{fghi}
۱	۶۰۰	۱۵	۶/۶۷^{f}	۱۱/۴^{ghi}
۲	۰	۰	۱۲^{abcde}	۱۵/۴۶^{abcdefgh}
۲	۰	۵	۱۴/۶۷^{a}	۱۹/۵۳^{a}
۲	۰	۱۰	۸/۶۷^{cdef}	۱۲/۸۳^{defghi}
۲	۰	۱۵	۱۰^{abcdef}	۱۳/۲۳^{cdefghi}
۲	۴۰۰	۰	۱۳/۳۳^{abc}	۱۷^{abcd}
۲	۴۰۰	۵	۱۳/۳۳^{abc}	۱۶/۲۳^{abcdef}
۲	۴۰۰	۱۰	۱۲^{abcde}	۱۶/۱۶^{abcdef}
۲	۴۰۰	۱۵	۱۲^{abcde}	۱۵/۶۶^{abcdefg}
۲	۶۰۰	۰	۱۱/۳۳^{abcdef}	۱۵/۹۳^{abcdefg}
۲	۶۰۰	۵	۹/۳۳^{bcdef}	۱۵/۳^{abcdefghi}
۲	۶۰۰	۱۰	۶/۶۷^{f}	۱۳/۷^{cdefghi}
۲	۶۰۰	۱۵	۱۳/۳۳^{abc}	۱۶/۲۶^{abcdef}

در هر ستون میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند.

درصد، عدم‌حضور سرب و کادمیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد (جدول ۵).

کود ورمی‌کمپوست دارای هومیک، فولویک و دیگر اسیدهای آلی است که توسط میکروارگانیسم‌ها تولید شده و می‌تواند سبب تحریک رشد گیاهان شود (Hosseinzadeh *et al.*, 2016). مشاهده شده که ورمی‌کمپوست منجر به تولید موادی شبیه اکسین در گیاهان شده (Muscolo *et al.*, 1999). با توجه به این‌که اسیدآمینه تریپتوفان پیش‌ماده سنتز هورمون اکسین است، وجود عنصر روی در ساختمان این اسیدآمینه ضروری است (Amiri *et al.*, 2017). ورمی‌کمپوست غنی از عناصر ضروری از جمله روی است، بنابراین این می‌تواند با تأثیر بر ساخت هورمون‌ها به‌ویژه اکسین سبب افزایش رشد و متعاقب آن ارتفاع گیاه شود. در مطالعه روی برخی گیاهان از قبیل تربچه، گل همیشه‌بهار، کلم و گوجه‌فرنگی نیز گزارش شده است که سطوح مختلف ورمی‌کمپوست منجر به افزایش رشد و ارتفاع گیاهان شده است (Archana *et al.*, 2009; Warman and AngLopez, 2010) که با این نتایج این پژوهش مطابقت داشت. ورمی‌کمپوست با بهبود ویژگی‌های فیزیکی بستر کشت، افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها و افزایش ظرفیت نگه‌داری آب تحت تنش اکسیداتیو منجر به افزایش معنی‌دار صفاتی مانند ارتفاع بوته، سطح و تعداد برگ در گوجه‌فرنگی شد (Bender Ozenc, 2006). محققان علت افزایش سطح و تعداد برگ در صورت استفاده از ورمی‌کمپوست را به افزایش جمعیت میکروبی در ورمی‌کمپوست نسبت دادند (Arancon *et al.*, 2004). در این آزمایش نیز ممکن است افزایش تعداد برگ به همین دلیل اتفاق افتاده باشد.

درصورت کاربرد ورمی‌کمپوست در بستر کشت، حضور فلزات سمی کادمیوم و سرب چندان سبب سمیت و کاهش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

جدول ۶- تجزیه واریانس تأثیر ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر میزان سرب در خاک، ریشه و ساقه گیاه آفتابگردان زینتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		سرب خاک	سرب ساقه	سرب ریشه
ورمی‌کمپوست	۲	۲۶۶/۹۱ **	۶۹۸/۵۸ **	۵۴۳/۱۱ **
سرب	۲	۲۶۷۴۹/۵۵ **	۱۱۱۰۷/۹۱ **	۵۸۷۳۶/۲۵ **
کادمیوم	۳	۱۶۱/۱۵ **	۱۰۴/۴۵ **	۳۰۰/۸۵ **
ورمی‌کمپوست × سرب	۴	۶۸/۲۳ **	۲۲۲/۲۸ **	۱۴۵/۷۹ **
ورمی‌کمپوست × کادمیوم	۶	۱/۳۴ **	۱/۹۳ **	۲/۳۲ **
سرب × کادمیوم	۶	۴۰/۵۸ **	۲۶/۵۲ **	۷۸/۹۶ **
ورمی‌کمپوست × سرب × کادمیوم	۱۲	۱/۰۱**	۱/۳۶**	۲/۸**
خطا	۷۲	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۳۰
ضریب تغییرات (٪)		۱/۲۳	۲/۲۷	۱/۱۸

: در سطح یک درصد معنی‌دار، *: در سطح پنج درصد معنی‌دار

رشد آفتابگردان زینتی نشد، دلیل این امر می‌تواند باشد. وجود مواد آلی در بستر کشت گیاهان سبب افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف خاک و گیاه می‌شود و رشد گیاه را افزایش می‌دهد. گزارش شده مواد آلی توانایی جذب آلاینده‌ها را دارد، به‌همین دلیل بستر دارای مواد آلی مانع دسترسی گیاه به فلزات شده و از سمیت آن‌ها جلوگیری می‌کند (Chockalingam and Subramanian, 2006). ورمی‌کمپوست به‌دلیل بالابودن مقدار مواد آلی، قادر است برای مدت زمان طولانی آلاینده‌ها را در خود نگهداری کند (Seelsaen *et al.*, 2006). ورمی‌کمپوست با فلزات سنگین پیوند برقرار می‌کند و باعث کلات‌شدن فلزات می‌شود (Jurries, 2004). گروه های عامل کربوکسیل و فنلی، نقش مهمی در جذب سطحی سرب توسط ورمی‌کمپوست دارند (Carrasquero-Duran and Flores, 2009). در این ارتباط نتایج مشابهی توسط دیگران بر سایر گیاهان گزارش شده است (تقی‌زاده و صادقی، ۱۳۹۶؛ Molaei *et al.*, 2016).

اثر تیمارها بر سرب انباشت‌شده در گیاه و خاک: تجزیه واریانس اثر ورمی‌کمپوست،

اثر ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر میزان تجمع سرب و کادمیوم بر میزان تجمع سرب در خاک و اندام‌های این گیاه زینتی در جدول ۶ نشان داده شده است. تمامی اثرات ساده و چندگانه ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم برصفات انباشتگی سرب در خاک و گیاه معنی‌دار بود.

نتایج برهمکنش سه‌گانه ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم نشان داد در تیمارهایی که غلظت سرب صفر بود، غلظت این فلز نیز در بخش خاک، اندام هوایی و ریشه نیز صفر بود. با افزایش غلظت سرب در تیمارهای اعمال‌شده به بستر کشت افزایش سرب تجمع‌یافته در خاک، اندام هوایی و ریشه در همه غلظت‌های ورمی‌کمپوست مشاهده شد. با افزایش غلظت کادمیوم در طی تیمارهای مختلف، تجمع سرب در خاک، اندام هوایی و ریشه آفتابگردان زینتی نیز افزایش یافت. بیشترین میزان تجمع سرب ابتدا در ریشه، سپس بخش خاک و در نهایت در اندام هوایی مشاهده شد. بیشترین میزان تجمع سرب در خاک (۵۹/۶۳ میلی‌گرم در لیتر)، سرب تجمع‌یافته اندام هوایی (۳۹/۷ میلی‌گرم در لیتر) و سرب تجمع‌یافته ریشه (۸۶/۳۳ میلی‌گرم در لیتر) در تیمار عدم‌کاربرد ورمی‌کمپوست، ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سرب و ۱۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد (جدول ۷).

اثر تیمارها بر کادمیوم انباشت‌شده در گیاه و خاک: تجزیه واریانس کادمیوم در خاک و اندام‌های این گیاه زینتی در جدول ۸ نشان داده شده است. تمامی اثرات ساده و چندگانه

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

جدول ۷- اثر غلظت‌های مختلف ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر میزان سرب خاک، ریشه و اندام هوایی آفتابگردان زینتی

ورمی‌کمپوست (٪)	سرب (mg/kg)	کادمیوم (mg/kg)	خاک (mg/kg)	اندام هوایی (mg/kg)	ریشه (mg/kg)
۰	۰	۰	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۰	۰	۵	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۰	۰	۱۰	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۰	۰	۱۵	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۰	۴۰۰	۰	۴۴/۱j	۳۰/۱۳hi	۶۶/۰۶k
۰	۴۰۰	۵	۴۷/۶۳g	۳۲/۳g	۶۹/۲۶hi
۰	۴۰۰	۱۰	۴۹/۸e	۳۴/۴۶e	۷۲/۳۳g
۰	۴۰۰	۱۵	۵۳/۳۶c	۳۷/۰۳c	۷۶/۳۶e
۰	۶۰۰	۰	۴۸/۸۳f	۳۴/۷e	۷۳/۹۳f
۰	۶۰۰	۵	۵۱/۱d	۳۶/۴۶c	۷۷/۹d
۰	۶۰۰	۱۰	۵۴/۱b	۳۹/۲۶ab	۸۳/۲۳b
۰	۶۰۰	۱۵	۵۹/۶۳a	۳۹/۷a	۸۶/۳۳a
۱	۰	۰	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۱	۰	۵	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۱	۰	۱۰	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۱	۰	۱۵	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۱	۴۰۰	۰	۴۱/۶۳m	۲۷/۴۳j	۶۰/۸۶m
۱	۴۰۰	۵	۴۳/۳k	۲۹/۷hi	۶۳/۱۶l
۱	۴۰۰	۱۰	۴۶/۶۶h	۳۳/۵۳f	۶۷/۸۳j
۱	۴۰۰	۱۵	۴۹/۰۳f	۳۴/۴e	۶۸/۳۳ij
۱	۶۰۰	۰	۴۵/۳۶i	۳۰/۴۶h	۶۸/۷۳ij
۱	۶۰۰	۵	۴۸/۵۳f	۳۲/۵۳g	۶۹/۸۳h
۱	۶۰۰	۱۰	۵۰/۳۶e	۳۵/۵۳d	۷۳/۷۳f
۱	۶۰۰	۱۵	۵۳/۲۳c	۳۸/۵۳b	۸۰/۹c
۲	۰	۰	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۲	۰	۵	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۲	۰	۱۰	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۲	۰	۱۵	۰/۰q	۰/۰o	۰/۰p
۲	۴۰۰	۰	۳۷/۵۳p	۲۱/۴۳m	۵۴/۸۳o
۲	۴۰۰	۵	۳۹/۴۶o	۲۳/۰۶l	۵۸/۹۶n
۲	۴۰۰	۱۰	۴۲/۵۶l	۲۴/۵k	۶۳/۱l
۲	۴۰۰	۱۵	۴۵/۴۶i	۲۹/۴i	۶۷/۷۶j
۲	۶۰۰	۰	۴۰/۳۳n	۱۸/۴n	۶۰/۸m
۲	۶۰۰	۵	۴۳/۵۳jk	۲۰/۷۳m	۶۴l
۲	۶۰۰	۱۰	۴۵/۹i	۲۱/۵m	۶۸/۷ij
۲	۶۰۰	۱۵	۴۸/۴۶f	۲۴/۵k	۷۴/۲۶f

در هر ستون میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

جدول ۸- تجزیه واریانس تأثیر ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر میزان کادمیوم در خاک، ریشه و ساقه گیاه آفتابگردان زینتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		کادمیوم خاک	کادمیوم ساقه	کادمیوم ریشه
ورمی‌کمپوست	۲	۱۰/۴۱ **	۹/۴۴ **	۳۰/۲۰ **
سرب	۲	۱۰/۴۹ **	۹/۲۴ **	۲۶/۸۵ **
کادمیوم	۳	۲۴۳/۰۶ **	۱۴۲/۶۰ **	۸۸۵/۴۴ **
ورمی‌کمپوست × سرب	۴	۰/۰۳ *	۰/۰۵ **	۰/۰۲ *
ورمی‌کمپوست × کادمیوم	۶	۱/۲۵ **	۱/۱۶ **	۴/۴۲ **
سرب × کادمیوم	۶	۱/۴۱ **	۱/۰۸ **	۳/۹۹ **
ورمی‌کمپوست × سرب × کادمیوم	۱۲	۰/۰۵ **	۰/۰۸ **	۰/۰۵ **
خطا	۷۲	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۰۰۹
ضریب تغییرات (٪)		۲/۷۹	۴/۵۰	۱/۴۱

****: در سطح یک درصد معنی‌دار ،*: در سطح پنج درصد معنی‌دار**

ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم برصفات انباشتگی کادمیوم در خاک و گیاه معنی‌دار بود.

میزان تجمع‌یافته کادمیوم در بخش‌های مختلف خاک، اندام هوایی و ریشه، رویه‌ای مشابه تجمع سرب را در اثر تیمارهی مختلف نشان داد. به‌گونه‌ای‌که نتایج برهمکنش سه‌گانه نشان داد در تیمارهایی که غلظت سرب کادمیوم بود، غلظت این فلز نیز در بخش خاک، اندام هوایی و ریشه نیز صفر بود. با افزایش غلظت سرب در تیمارهای اعمال‌شده به بستر کشت افزایش کادمیوم تجمع‌یافته در خاک، اندام هوایی و ریشه در همه غلظت‌های ورمی‌کمپوست مشاهده شد. با افزایش غلظت کادمیوم در طی تیمارهای مختلف، تجمع سرب در خاک، اندام هوایی و ریشه آفتابگردان زینتی نیز افزایش یافت. بیشترین میزان تجمع کادمیوم ابتدا در ریشه، سپس بخش خاک و در نهایت در اندام هوایی مشاهده شد. بیشترین میزان تجمع کادمیوم خاک (۷/۶ میلی‌گرم در لیتر)، سرب تجمع‌یافته اندام هوایی (۷/۲ میلی‌گرم در لیتر) و سرب تجمع‌یافته ریشه (۱۵/۴۳ میلی‌گرم در لیتر) در تیمار عدم‌کاربرد ورمی‌کمپوست، ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سرب و ۱۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم مشاهده شد (جدول ۹).

تجمع فلزات سنگین در بین گونه‌های گیاهی بسیار متفاوت است و جذب این عناصر توسط یک گیاه نوع گونه گیاه و کیفیت خاک بستگی دارد (Chunilall *et al*., 2005). عوامل زیادی تجمع و قابلیت دسترسی زیستی فلز در ارتباط با شرایط خاک و آب و هوایی، ژنوتیپ گیاه و مدیریت زراعی از جمله: فرآیندهای انتقال فعال/ غیرفعال، تجزیه و توسعه، نوع سیستم ریشه گیاه و واکنش گیاهان به عناصر در رابطه با چرخه فصلی را کنترل می‌کنند (Kabata-Pendias and Pendias, 1984). ساختار رسوبات نیز به‌دلیل تأثیر بر جذب فلزات توسط گیاهان بسیار مهم در نظر گرفته شده است. ذرات رس نیز در دسترس بودن فلزات نقش مهمی دارند. حلالیت فلز در خاک به‌طور عمده توسط pH، میزان تبادل کاتیون‌های فلزی، محتوای کربن آلی و وضعیت سیستم اکسیداسیون کنترل می‌شود (Ghosh and Singh, 2005). نتایج این آزمایش اشاره دارد که میزان تجمع (انباشت) سرب و کادمیوم در خاک، ریشه و ساقه گیاه با افزایش غلظت فلزات سنگین به‌کار برده‌شده (سرب و کادمیوم) در آفتابگردان زینتی افزایش یافت، به‌طوریکه در بیشترین غلظت‌ها (۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم) بیشترین تجمع این عناصر در خاک، ساقه و ریشه گیاه مشاهده شد. در مطالعه‌ای گیاه کیسه چوپان (*Thlaspi arvense*) به‌عنوان یک گونه بیش انباشتگر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

جدول ۹- اثر غلظت‌های مختلف ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر میزان کادمیوم تجمع‌یافته خاک، ریشه و اندام هوایی آفتابگردان زینتی

ورمی‌کمپوست (٪)	سرب (mg/kg)	کادمیوم (mg/kg)	خاک (mg/kg)	اندام هوایی (mg/kg)	ریشه (mg/kg)
۰	۰	۰	۰/۰^{r}	۰/۰^{n}	۰/۰^{v}
۰	۰	۵	۲/۱^{o}	۱/۸۶^{k}	۵/۲^{r}
۰	۰	۱۰	۵/۵^{g}	۳/۱۶^{i}	۸/۶۳^{k}
۰	۰	۱۵	۶/۳۶^{d}	۵/۱۳^{e}	۱۳/۰۶^{d}
۰	۴۰۰	۰	۰/۰^{r}	۰/۰^{n}	۰/۰^{v}
۰	۴۰۰	۵	۲/۷^{m}	۲/۴^{j}	۶/۰۶^{p}
۰	۴۰۰	۱۰	۶/۸^{c}	۳/۷۶^{h}	۱۰/۲^{i}
۰	۴۰۰	۱۵	۷/۱^{b}	۶/۱^{c}	۱۴/۶^{b}
۰	۶۰۰	۰	۰/۰^{r}	۰/۰^{n}	۰/۰^{v}
۰	۶۰۰	۵	۳/۳۳^{l}	۳/۳^{i}	۶/۸۳^{o}
۰	۶۰۰	۱۰	۷/۲۶^{b}	۴/۱۳^{g}	۱۱/۴۳^{f}
۰	۶۰۰	۱۵	۷/۶^{a}	۷/۲^{a}	۱۵/۴۳^{a}
۱	۰	۰	۰/۰^{r}	۰/۰^{n}	۰/۰^{v}
۱	۰	۵	۱/۵^{p}	۱/۱۳^{l}	۴/۴^{s}
۱	۰	۱۰	۵^{i}	۲/۵^{j}	۷/۸^{m}
۱	۰	۱۵	۵/۲۶^{h}	۳/۰۵^{i}	۱۲^{e}
۱	۴۰۰	۰	۰/۰^{r}	۰/۰^{n}	۰/۰^{v}
۱	۴۰۰	۵	۲/۱۳^{o}	۱/۹۳^{k}	۵/۱۳^{r}
۱	۴۰۰	۱۰	۶/۱۶^{e}	۳/۲^{i}	۹/۴۶^{j}
۱	۴۰۰	۱۵	۵/۲^{h}	۵/۵۶^{d}	۱۳/۸۶^{c}
۱	۶۰۰	۰	۰/۰^{r}	۰/۰^{n}	۰/۰^{v}
۱	۶۰۰	۵	۲/۵۳^{n}	۲/۳۶^{j}	۵/۷۶^{q}
۱	۶۰۰	۱۰	۶/۳۶^{d}	۳/۸^{h}	۱۰/۵^{h}
۱	۶۰۰	۱۵	۷/۱۳^{b}	۶/۴۶^{b}	۱۴/۵۳^{b}
۲	۰	۰	۰/۰^{r}	۰/۰^{n}	۰/۰^{v}
۲	۰	۵	۱/۱۶^{q}	۰/۶^{m}	۳/۰۶^{u}
۲	۰	۱۰	۴/۱۳^{k}	۱/۸۳^{k}	۵/۱۳^{r}
۲	۰	۱۵	۴/۴۳^{j}	۴/۲^{g}	۱۱/۱۶^{g}
۲	۴۰۰	۰	۰/۰^{r}	۰/۰^{n}	۰/۰^{v}
۲	۴۰۰	۵	۱/۳۶^{p}	۱/۱^{l}	۳/۵۳^{t}
۲	۴۰۰	۱۰	۵/۲^{h}	۲/۳۶^{j}	۷/۳۶^{n}
۲	۴۰۰	۱۵	۵/۵^{g}	۴/۴^{f}	۱۲/۹۶^{d}
۲	۶۰۰	۰	۰/۰^{r}	۰/۰^{n}	۰/۰^{v}
۲	۶۰۰	۵	۲/۰۳^{o}	۲^{k}	۴/۳۶^{s}
۲	۶۰۰	۱۰	۵/۸۶^{f}	۳/۱۳^{i}	۸/۳۳^{l}
۲	۶۰۰	۱۵	۶/۱۶^{e}	۵/۲^{e}	۱۳/۸^{c}

در هر ستون میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن ندارند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

جدول ۱۰- تجزیه واریانس تأثیر ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر فعالیت آنزیم‌های سوپراکسیداز و کاتالاز و تنفس میکروبی در گیاه آفتابگردان زینتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		سوپراکسیداز	کاتالاز	تنفس میکروبی
ورمی‌کمپوست	۲	۲/۶۴ **	۲/۲۸ **	۱۰/۱۴ **
سرب	۲	۱/۶۸ **	۳/۰۷ **	۳۴/۹۸ **
کادمیوم	۳	۸/۷۴ **	۱۲/۱۸ **	۲۰۵/۵۰ **
ورمی‌کمپوست × سرب	۴	۰/۰۴ **	۰/۰۶ **	۰/۱۹ **
ورمی‌کمپوست × کادمیوم	۶	۰/۴۶ **	۰/۲۴ **	۲/۰۰ **
سرب × کادمیوم	۶	۰/۲۳ **	۰/۲۷ **	۲/۷۸ **
ورمی‌کمپوست × سرب × کادمیوم	۱۲	۰/۰۳**	۰/۰۲**	۰/۰۳**
خطا	۷۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۶
ضریب تغییرات (٪)		۲/۳۸	۰/۷۸	۱/۴۹

****: در سطح یک درصد معنی‌دار، *: در سطح پنج درصد معنی‌دار**

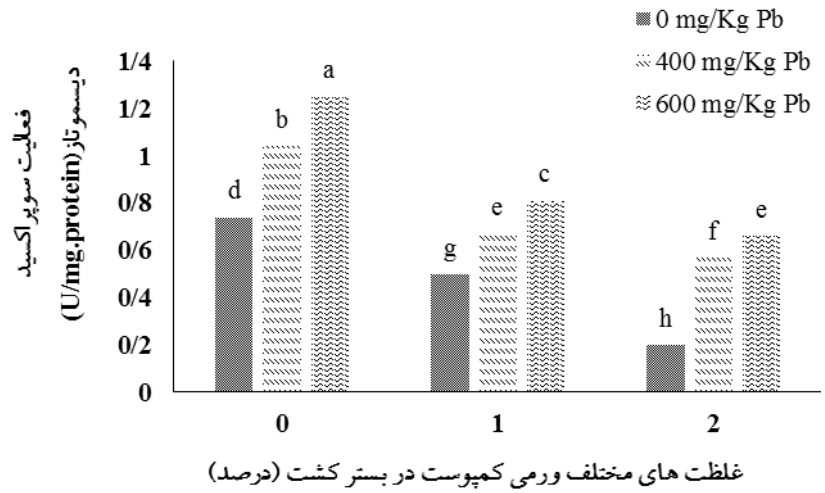
روی و کادمیوم شناخته شد و مشخص شد که این گونه می‌تواند مقدار ۱۴۵۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی، ۵۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۳۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب را در اندام‌های هوایی خود تجمع دهد (Mikus *et al.*, 2005). مطالعات فیزیولوژیکی روی گیاه کیسه چوپان نشان داد که سیستم‌های جذب چندگانه در ریشه جهت جذب کادمیوم و روی وجود دارد (Verbruggen *et al.*, 2009). گزارش شده است که گیاه کلزا توانایی تجمع کادمیوم و روی را به‌دلیل سازوکارهای بیوشیمیایی و ژنتیکی درگیر در انتقال یون‌ها از دیواره غشای سلولی ریشه دارا است (Rossi *et al.*, 2002). افزایش تجمع کادمیوم و سرب در ریشه و ساقه گیاه آفتابگردان زینتی با افزایش غلظت این فلزها نیز ممکن است تحت تأثیر چنین سازوکارهایی باشد. مطالعات انجام‌شده توسط Indoria و Poonia (۲۰۰۶) نشان داد که مقدار تجمع فلزات سنگین روی و سرب در یک‌سری گونه‌های روغنی کشت داده‌شده در خاک‌های آلوده نسبت به گیاهان کشت داده‌شده در خاک‌های غیرآلوده بیشتر بود.

اثر تیمارها بر فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی گیاه: تجزیه واریانس اثر ورمی‌کمپوست، سرب و کادمیوم بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی و تنفس میکروبی آفتابگردان زینتی در جدول ۱۰ نشان داده شده است. میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به‌گونه‌ای معنی‌دار هم تحت تأثیر میزان آلودگی خاک توسط فلزات و هم کاربرد ورمی‌کمپوست در بستر کشت آفتابگردان زینتی قرار گرفت. با افزایش غلظت فلزات سنگین در بستر کشت، فعالیت این آنزیم نیز افزایش یافت. در عین حال حضور ورمی‌کمپوست در بستر کشت این گیاه زینتی سبب کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نسبت به عدم کاربرد آن شد. بیشترین فعالیت این آنزیم آنتی‌اکسیدانی در حضور فلز سرب در غلظت ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب در خاک و عدم‌کاربرد ورمی‌کمپوست و کمترین میزان فعالیت آنزیم در عدم‌حضور سرب و ۲ درصد ورمی‌کمپوست در خاک مشاهده شد (شکل ۱). حضور فلز کادمیوم در خاک بیشتر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را نسبت به سرب تحت تأثیر قرار داد، به‌گونه‌ای‌که در بیشترین غلظت کادمیوم در خاک (۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) نسبت به عدم‌کاربرد این فلز در خاک، در همه سطوح ورمی‌کمپوست ۱۱ الی ۱۸ برابر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزایش یافت (شکل ۲).

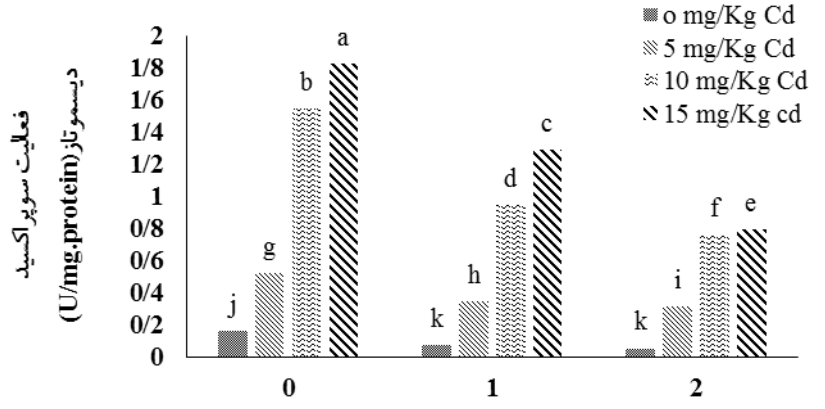
گیاهان سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی پیچیده‌ای را در برابر تنش‌های غیرزنده مانند تنش فلزات سنگین توسعه داده‌اند. افزایش در ظرفیت آنزیم‌های مهارکننده گونه‌های فعال اکسیژن

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل ورمی‌کمپوست و سرب بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل ورمی‌کمپوست و کادمیوم بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

(ROS) تحت تنش سرب و روی در گیاهان تیمارشده با این فلزات سنگین مشاهده شده است. فعالیت زیاد آنزیم سوپراکسید دیسموتاز ممکن است درنتیجه اثرات مستقیم یون‌های فلزی و اثر غیرمستقیم از طریق افزایش در سطوح رادیکال‌های سوپراکسید و نیز سنتز آنزیم پروتئین جدید باشد (Verma and Dubey, 2003). فعالیت سوپراکسید دیسموتاز به‌طور مستقیم مقدار ROS را تنظیم می‌کند و به‌عنوان اولین خط دفاعی عمل کرده و رادیکال‌های سوپر اکسید را به H_2O_2 تبدیل می‌کند (Halliwell, 2006). در این پژوهش افزایش غلظت دو فلز سنگین سرب و کادمیوم سبب افزایش در فعالیت این آنزیم آنتی‌اکسیدانی شد و بیش‌ترین میزان فعالیت در غلظت‌های زیاد این دو فلز سنگین مشاهده شد. در این پژوهش افزایش غلظت سرب و کادمیوم در سطح صفر تن در هکتار ورمی‌کمپوست سبب افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز شد، ولی با افزایش سطح این ماده آلی از میزان فعالیت این آنزیم‌ها کاسته شد. به‌گونه‌ای مشابه فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز در لپه‌ها، هیپوکوتیل‌ها و ریشه‌چه‌های *Luffa cyindrica* به‌طور معنی‌داری با افزایش غلظت سرب افزایش یافت (Jiang *et al*., 2010). ایران‌بخش و همکاران (۱۳۸۹) نشان دادند که میزان فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز در گیاه سویا *Glycine max* L. تحت تیمار کلرید روی و کلرید سرب در همه غلظت‌های استفاده‌شده افزایش معنی‌داری داشته است. همچنین افزایش معنی‌دار این دو آنزیم در تیمار چغندرقند (Naderi *et al*., 2013) و کلزا

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

(رنجبر و همکاران، ۱۳۹۰) با سرب گزارش شده است که با نتایج این آزمایش همسو است.

در این مطالعه کاربرد ورمی‌کمپوست سبب کاهش میزان انباشت سرب و کادمیوم در خاک، ریشه و ساقه آفتابگردان زینتی شد. زیادبودن مواد آلی در خاک باعث تثبیت‌شدن فلزات سنگین به‌صورت شکل‌گیری کمپلکس آلی فلزی در خاک و در نهایت کاهش حرکت‌پذیری فلزات از خاک می‌شوند (Foley, 2002). Chen و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که در اثر کاربرد کمپوست مواد زاید شهری در خاک، مقداری از فلزات مس و روی از خاک نشت یافتند، به‌طوریکه از کل مس و روی موجود در کمپوست کمتر از چهار درصد مس و بیش از ۵۸ درصد روی نشت یافت. همچنین این محققین بیان کردند افزودن کمپوست به خاک میزان هدایت الکتریکی خاک را تا حدی افزایش و ارتباط مستقیم بین هدایت الکتریکی و فلزات سنگین در شیرابه نشت‌یافته از خاک دریافت‌کننده وجود دارد.

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر آلودگی محیط‌زیست توسط عناصری مانند سرب و کادمیوم بسیار افزایش یافته است. در مجموع این پژوهش نشان داد که سرب و کادمیوم به گیاه اجازه جوانه‌زدن را می‌دهد، اما افزایش غلظت این فلزات سنگین سبب اختلال در نمو گیاهچه که منجر به کاهش رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه و نیز کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی مانند شاخص بنیه بذر، شاخص میزان جوانه‌زنی می‌شود. اثرات سمیت فلز کادمیوم در مرحله جوانه‌زنی آفتابگردان نسبت به سرب بسیار شدیدتر بود ولی با این وجود باز هم گیاه قادر به رشدونمو در خاک‌های نسبتا آلوده است. حضور فلزات سرب و کادمیوم در بستر آفتابگردان زینتی سبب فعال‌شدن سازوکار آنتی‌اکسیدانی این گیاه زینتی شده است و با افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز سبب مقاومت به تنش اکسیداتیو شد. همچنین در این مطالعه مشخص شد که ورمی‌کمپوست می‌تواند اثرات مخرب افزایش غلظت فلزات کادمیوم و سرب را تا حدودی بهبود دهد و سبب کاهش میزان این فلزات در خاک، ریشه و ساقه گیاه آفتابگردان زینتی گردد و این گیاه زینتی را می‌توان به‌عنوان پالایشگر مناطق آلوده به سرب و کادمیوم معرفی کرد.

منابع

امینی، ف. و بلوچی، ح. (۱۳۹۶) تأثیر فلزات سنگین و ترکیبات مختلف بستر کاشت بر آنزیم‌های پاداکساینده و عملکرد لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Sadri.). مجله زیست‌شناسی ایران ۳۰: ۱۰۵-۹۵.

ایران‌بخش، ع.، مجد، ا. و نقوی، ف. (۱۳۸۹) بررسی تأثیر کلرید روی و کلرید سرب بر جوانه‌زنی و رشد دانه‌رست‌های سویا (*Glycin max* L.). فصلنامه پژوهش‌های علوم گیاهی ۲۰: ۷۳-۶۳.

تقی‌زاده، م. و صادقی، ا. (۱۳۹۶) بررسی میزان مقاومت و پالایندگی کلم زینتی به فلزهای سنگین در فرآیند مراحل رشد. مجله علوم باغبانی ایران ۴۸: ۹۶۳-۹۵۳.

رنجبر، م.، لاری یزدی، ح. و برومند جزی، ش. (۱۳۹۰) تأثیر سالیسیلیک اسید بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوای قند و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاه کلزا تحت تنش سرب. مجله زیست‌شناسی گیاهی ۳: ۵۲-۳۰.

عالیوند. ر.، محمدزاده. آ.، توکل افشاری، ر. و چائی‌چی، م. ر. (۱۳۹۱) جوانه‌زنی و رشد گیاهچه آفتابگردان تحت تنش فلزات سنگین کادمیوم و نیکل. دومین همایش ملی علوم و تکنولوژی بذر، مشهد.

عبدوسی، س. (۱۳۹۷) اثرات کادمیوم و ورمی‌کمپوست بر برخی پارامترهای رشدی گیاه اسفناج (*Spinacea oleracea* L.). تغذیه گیاهان باغبانی. ۱: ۳۶-۲۵.

غفاری، م.، محمدزاده، آ. و جاهدی، سعید. (۱۳۹۳) جوانه‌زنی و رشد گیاهچه آفتابگردان تحت تنش فلزات سنگین کادمیوم و نیکل. سیزدهمین همایش علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران و سومین همایش علوم و تکنولوژی بذر ایران، کرج.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

قربانی، م.، کریمیان، ن. ع.، و زارعی، م. (۱۳۹۶) تأثیر کود آلی مایع بر رشد و جذب عناصر پرمصرف و کادمیم توسط اسفناج (*Spinacea oleracea* L.) در یک خاک آلوده به کادمیم. نشریه پژوهش‌های حفاظت از آب و خاک ۲۴

Abdul Baki, A. A. and Anderson, J. D. (1973) Vigor determination in soybean seed by multiple criteria. Journal of Crop Science 13: 630-633.

Abedin, M. J. and Meharg, A. A. (2002) Relative toxicity of arsenite and arsenate on germination and early seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.). Plant and Soil 243: 57-66.

Adriano, D. C. (2001) Trace Elements in Terrestrial Environments; Biochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. Springer-Verlag, New York.

Almansouri, M., Kinet, J. M. and Lutts, S. (2001) Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). Plant and Soil 231: 243-254.

Amiri, H., Ismaili, A. and Hosseinzadeh, S. R. (2017) Influence of vermicompost fertilizer and water deficit stress on morpho-physiological features of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. karaj). Compost Science and Utilization 25: 152-165.

Arancon, N., Edwards, C., Bierman, P., Welch, C. and Metzger, J. D. (2004) Influence of vermicompost on field strawberries. Bioresource Technology 93: 145-153.

Archana, P. P., Theodore, J. K. R., Ngyuen, V. H., Stephen, T. T. and Kristen, A. K. (2009) Vermicompost extracts influence growth, mineral nutrients, phytonutrients and antioxidant activity in pak choi (*Brassica rapa* cv. Bonsai) grown under vermicompost and chemical fertilizer. Journal of Science, Food and Agriculture 89: 2383-2392.

Bender Ozenc, D. (2006) Effects of composted hazelnut husk on growth of tomato plants. Compost Science and Utilization 14: 271-275.

Carrasquero-Duran, A. and Flores, L. (2009) Evaluation of lead (II) immobilization by a vermicompost using adsorption isotherms and IR spectroscopy. Bioresource Technology 100: 1691-1694.

Chaoui, A. and Ferjani, M. H. (2005) Effects of cadmium and copper on antioxidant capacities, lignification and auxin degradation in leaves of pea (*Pisum sativum* L.) seedling. Compes Rendus Biologies 328: 23-31.

Chen, G., Zeng, G., Du, C., Huang, D., Tang, L., Wang, L. and Shen, G. (2010) Transfer of heavy metals from compost to red soil and groundwater under simulated rainfall conditions. Journal of Hazardous Materials 181: 211-216.

Chockalingam, E. and Subramanian, S. (2006) Studies on removal of metal ions and sulphate reduction using rice husk and *Desulfotomaculum nigrificans* with reference to remediation of acid mine drainage. Chemosphere 62: 699-708.

Chunilall, V., Kindness, A. and Jonnalagadda, S. B. (2005) Heavy metal uptake by two edible Amaranthus herbs grown on soils contaminated with Lead, Mercury, Cadmium and Nickel. Journal of Environmental Science and Health 40: 375-384.

Dhindsa, R. S., Plumb-Dhindsa, P. and Throne, T. A. (1981) Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. Journal of Experimental Botany 32: 93-101.

Foley, B. (2002) Paper mill residuals and compost effects on soil carbon and physical properties. Journal of Environmental Quality 31: 2086-2095.

Ghani, A. (2010) "Toxic effects of heavy metals on plant growth and metal accumulation in maize (*Zea mays* L.)." Iranian Journal of Toxicology 3: 325-334.

Ghosh, M. and Singh, S. P. (2005) A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. Applied Ecology and Environmental Research 3: 1-18.

Groppa, M. D., Zawoznik, M. S., Tomaro, M. L. and Benavides, M. P. (2008) Inhibition of root growth and polyamine metabolism in sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings under cadmium and copper stress. Biological Trace Element Research 126: 246-256.

Halliwell, B. (2006) Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. Plant Physiology 141: 312-322.

Hamidi, A. I. D. I. N., Roodi, D., Asgari, V. and Hajilooi, S. (2009) Study on applicability of controlled deterioration vigour test for evaluation of seed vigour and field performance relationship of three oil-seed rape (*Brassica napus* L.) cultivars. Seed and Plant 24.

Hasan, S. A., Fariduddin, Q., Ali, B., Hayat, S. and Ahmad, A. (2009) Cadmium: Toxicity and tolerance in plants. Journal of Environmental Biology 30: 165-174.

Hosseinzadeh, S. R., Amiri, H. and Ismaili, A. (2016) Effect of vermicompost fertilizer on photosynthetic characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. Photosynthetica 54: 87-92.

Indoria, A. K. and Poonia, S. R. (2006) Phytoextractability of lead from soil by some oilseed crops as affected by sewage sludge and farmyard manure. Archives of Agronomy and Soil Science 52: 667-677.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

Jarrah, M., Ghasemi-Fasaei, R., Ronaghi, A., Zarei, M. and Mayel, S. (2019) Enhanced Ni phytoextraction by effectiveness of chemical and biological amendments in sunflower plant grown in Ni-polluted soils. Chemistry and Ecology 35: 732-745.

Jiang, N., Luo, X., Zeng, J., Yang, Z. R., Zheng, L. and Wang, S. T. (2010) Lead toxicity induced growth and antioxidant responses in *Luffa cylindrica* seedlings. International Journal of Agriculture and Biology 12: 205-210.

Jieng-feng, P., Yong-hui, S., Peng,Y., Xiao-yu, C. and Guang-lei, Q. (2009) Remediation of heavy metal contaminated sediment. Journal of Hazardous Materials 161: 633-640.

Jurries, D. P. E. (2004) Environmental protection and enhancement with compost. Department of Environmental Quality Northwest Region, Oregon State University, USA.

Kabata-Pendias, A. (2001) Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton.

Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (1984) Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, FL7 CRC Press.

Khosravi, F. (2010) The effect of different doses of potassium on phytoremediation of soil contaminated with cadmium. Journal of Agriculture 90: 57-64.

Lasat, M. M. (2002) Phytoextraction of toxic metals – A review of biological mechanisms. Journal of Environmental Quality 31: 109-120.

Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. (1978) Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal 42: 421-28.

Liu, D., Jiang, W. and Gao, X. (2004) Effects of cadmium on root growth, cell division and nucleoli in root tips of garlic. Biologia Plantarum 47: 79-83.

Mahmood, T., Islam, K. R. and Muhammad, S. (2007) Toxic effects of heavy metals on early growth and tolerance of cereal crops. Pakistan Journal of Botany 39: 451-462.

Marquez Garsia, B., Marquez, C., Sanjose, I., Nieva, F. J. J., Rodriguez Rubio, P. and Munoz-Rodriguez, A. F. (2013) The effects of heavy metals on germination and seedling characteristics in two halophyte species in Mediterranean marshes. Marine Pollution Bulletin 70: 119-124.

Mikus, K. V., Drobne, D. and Regvar, M. (2005) Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonisation of pennycress *Thlaspi praecox* Wulf. (Brassicaceae) from the vicinity of a lead mine and smelter in Slovenia. Environmental Pollution 133: 233-242.

Molaei, S., Shirani, H., Hamidpour, M., Shekofteh, H. and Besalatpour, A. A. (2016) Effect of vermicompost, pistachio kernel and shrimp shell on some growth parameters and availability of Cd, Pb and Zn in corn in a polluted soil. JWSS - Isfahan University of Technology 19: 113-124.

Montvydiene, D., Marciulioniene, D., Kazlauskiene, N., Ratkelyte, E., Luksiene, B., Tautkus, S. and Padarauskas, A. (2008) Toxic impact of different salts of metals on organisms. 7th International Conference on Environmental Engineering 231-238.

Moslehi, A., Feizian, M., Higueras, P. and Eisvand, H. R. (2019) Assessment of EDDS and vermicompost for the phytoextraction of Cd and Pb by sunflower (*Helianthus annuus* L.). International Journal of Phytoremediation 21: 191-199.

Motesharezadeh, B., Savaghebi-Firoozabadi, G. R., Mirseyed Hosseini, H. and Alikhani, H. A. (2010) Study of the enhanced phytoextraction of cadmium in a calcareous soil. International Journal of Environmental Research 4: 525-532.

Muscolo, A., Bovalo, F., Gionfriddo, F. and Nardi, F. (1999) Earthworm humic matter produces auxin-like effects on *Daucus carota* cell growth and nitrate metabolism. Soil Biology and Biochemistry 31: 1303-1311.

Naderi, N., Mirzamasoumzadeh, B. and Aghaei, A. (2013) Effects of different levels of lead (Pb) on physiological characteristics of sugar beet. International Journal of Agriculture and Crop Science 5: 1154-1157.

Peralta, J. R., Gardea-Torresdey, J. L., Tiemann, K. J., Gomez, E., Arteaga, S., Rascon, E. and Parsons, J. G. (2001) Uptake and effects of five heavy metals on seed germination and plant Growth in alfalfa (*Medicago sativa* L.). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 66: 727-734.

Rossi, G., Figlilolia, A., Sosciarelli, S. and Pennelli, B. (2002) Capability of Brassica napus to accumulate Cadmium, Zinc and Copper from soil. Acta Biotechnolgica 22: 133-140.

Sadat Piroz, P. and Manochehri, K. H. (2010) Study of phytoremediation of chromium by sunflower. In 1st National Conference on Phytoremediation, International Centre for Science and High Technology and Environmental Sciences. Kerman, Iran.

Sarhadi, S., Riahi, A. and Shabazi, A. (2010) Effects of lead on some morphological and physiological traits of sunflower seedlings. In 1st National Conference on Phytoremediation, International Centre for Science and High Technology and Environmental Sciences. Kerman, Iran.

Seelsaen, N., McLaughlan, R., Moore, S. and Stuetz, R. (2006) Influence of compost characteristics on heavy metals sorption from synthetic storm water. Journal Urban Drainage Modelling and Water Sensitive Urban Design 55: 219-226.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

Sfaxi Bousbih, A., Chaoui, A. and El Ferjani, E. (2010) Cadmium impairs mineral and carbohydrate mobilization during the germination of bean seeds. Ecotoxicology and Environmental Safety 73: 1123-1129.

Taghizadeh, M. and Solgi, E. (2017) Impact of heavy metal stress on in vitro seed germination and seedling growth indices of two turfgrass species. Journal of Rangeland Science 7: 220-231.

Tlustos, P., Szakova, J., Hruby, J., Hartman, I., Najmanova, J., Nedelnik, J., Pavlikova, D. and Batysta, M. (2006) Removal of As, Cd, Pb, and Zn from contaminated soil by high biomass producing plants. Plant Soil Environment 52: 413-423.

Valentovi_ova, K., Haluskova, L., Huttova, J., Mistrik, I. and Tamas, L. (2010) Effect of cadmium on diaphorase activity and nitric oxide production in barley root tips. Journal of Plant Physiology 167: 10-14.

Van Herwijnen, R., Al-Tabbaa, A., Hutchings, T. R., Moffat, A. J., Ouki, S. K. and Ohns, M. L. (2007) The impact of waste compost-based soil amendments on the leaching behavior of a heavy metal contaminated soil. Environmental Engineering Science 24: 897-904.

Verbruggen, N., Hermans, C. and Schat, H. (2009) Molecular mechanisms of metal hypraccumulation in plant. New Phytologist 181: 759-779.

Verma, S. and Dubey, R. S. (2003) Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. Plant Science 164: 645-655.

Warman, P. R. and AngLopez, M. J. (2010) Vermicompost derived from different feedstocks as a plant growth medium. Bioresource Technology 101: 4479-4483.

Yang, X. E., Feng, Y., He, Z. and Stoffella, P. J. (2005) Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 18:339-353.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]

Effect of lead and cadmium on germination stage and application of vermicompost in concomitant pollution control by ornamental sunflower (*Helianthus annuus* "Sungold")

Fatemeh Mojdehi[1], Mina Taghizadeh[2*], Amir Hossein Baghaie[3], Mahdi Changizi[4] and Shahab Khaghani[4]

[1] Department of Horticultural Science, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
[2] Department of Horticultural Engineering, Faculty of Agriculture and Environmental science, Arak University, Arak, Iran.
[3] Department of Soil Science, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
[4] Department of Agronomy and Plant Breeding, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
(Received: 12/06/2020, Accepted: 23/10/2021)

Abstract

One of the methods of remediation and cleaning of soils contaminated with heavy metals is the use of organic compounds such as vermicompost to purify and stabilize the contamination. In this study, the effect of vermicompost on the uptake of heavy metals including lead and cadmium by ornamental sunflower and the effect of these metals on germination and plant establishment characteristics were investigated. This study was carried out in two experiments of germination and greenhouse in 1397-98 in Islamic Azad University, Arak Branch in a factorial way in a completely randomized design. In the first experiment, concentrations of 50, 100 and 200 mg / l of lead nitrate and cadmium chloride were used and then germination indices were evaluated. In the second experiment, concentrations of 0, 5, 10 and 15 mg/kg of lead metal, concentrations of 0, 400 and 600 mg/kg of cadmium and three levels of 0, %1 and %2 of vermicompost to the ability of uptaking heavy metals were used by ornamental sunflowers. The results of the first experiment showed that increasing the concentrations of heavy metals lead and cadmium reduced the length of root, shoot and germination indicators such as seed vigor index, germination rate index and average germination rate. The results of the second experiment showed that vegetative growth of ornamental sunflower was not affected by increasing the concentration of lead and cadmium in the soil, but the content of lead and cadmium in the soil, lead and cadmium in the roots and lead and cadmium in the stem increased. The study indicated that *H. annuus* "Sungold" plant showed tolerance to lead and cadmium contamination and we recommend its ability for the remediation of lead and cadmium contaminated soils. Also, the activity of the enzyme superoxide dismutase increased as the concentration of heavy metals in the culture medium increased. Vermicompost implementation was able to partially improve the negative effects of these heavy metals. With increasing the concentration of heavy metals, the activity of superoxide dismutase increased by 30-50% compared to the control. Vermicompost reduced the amount of these metals in the soil, roots and stems of the ornamental sunflower plant, and this ornamental plant can be introduced as a purifier of lead and cadmium contaminated areas.

Keywords: Antioxidant, Stress, Germination, Heavy metals, Ornaemntal plant, Vermicompost

Corresponding author, Email: m-taghizadeh@araku.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2025-01-13]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1]