

بررسی تجمع و جذب فلزات سنگین توسط کاهو در یک خاک تیمار شده با ضایعات معدنی کارخانجات سرب و روی

زهرا رجبی^۱، پریسا علمداری^{۱*} و احمد گلچین^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹)

چکیده

صنایع تولید کننده سرب و روی از لحاظ زیست محیطی یکی از صنایع پُرخطر شناخته شده اند. در این پژوهش، ۱۵ نمونه پسماند (کیک) از کارخانه سرب و روی زنجان جمع آوری شده و براساس نوع و غلظت فلزات سنگین، شش نمونه برای افزودن به خاک انتخاب شدند. در خاک های تیمار شده با کیک های مختلف، گیاه کاهو کشت شد. پس از برداشت گیاه، شاخص های رویشی گیاه، غلظت فلزات سنگین در ریشه و برگ گیاه و همچنین غلظت قابل جذب فلزات سنگین در خاک تحت کشت اندازه گیری شد. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد، به گونه ای که شش نوع کیک در سه سطح (۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد) در سه تکرار و با سه نمونه شاهد (بدون افزودن کیک) مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان آلودگی در غلظت کل فلزات سنگین به ترتیب مربوط به کادمیم (۱۶۸۳۳۳ میلی گرم بر کیلوگرم)، روی (۱۰۰۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، آهن (۹۱۶۶۶ میلی گرم بر کیلوگرم)، منگنز (۲۵۵۶۶ میلی گرم بر کیلوگرم)، سرب (۱۳۴۸۳ میلی گرم بر کیلوگرم) و نیکل (۷۹۶۶ میلی گرم بر کیلوگرم) و در غلظت های قابل جذب مربوط به منگنز (۲۱۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، روی (۱۶۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، کادمیم (۴۵۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، سرب (۲۳۷۱ میلی گرم بر کیلوگرم)، نیکل (۱۹۴ میلی گرم بر کیلوگرم) و آهن (۱۱/۲ میلی گرم بر کیلوگرم) بود. غلظت قابل جذب فلزات سنگین خاک های تیمار شده با کیک ها بر اثر جذب توسط گیاه کاهو در خاک کاهش یافت.

کلمات کلیدی: پسماند کارخانجات ذوب سرب و روی، فلزات سنگین، کیک، قابلیت جذب

مقدمه

این گیاه برای مطالعه حاضر انتخاب شد.

گلچین و شفیع (۳) مقدار قابل جذب برخی فلزات سنگین را در یک کیلومتری کارخانه سرب و روی به شرح زیر گزارش کرده اند: روی، مس، سرب، منگنز، آهن و کادمیم به ترتیب: ۱۷/۴، ۲/۹، ۳۰، ۵/۴، ۴/۸ و ۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم.

پژوهش های متعدد نشان داده که کاهو قادر است مقدار زیادی از فلزات سنگین مانند سرب و کادمیم را بدون کاهش محصول و یا نشان دادن آثار مسمومیت جذب کند (۳۲). با توجه به این موضوع و همچنین نقش مهم کاهو در رژیم غذایی مردم ایران،

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: p_alamdari@znu.ac.ir

اهمیت بیشتری نسبت به محتوای کل فلز، در قابلیت زیست‌فراهمی فلز سنگین دارند. دهیری و همکاران (۱۴) عنوان کردند که کادمیم باعث کاهش معنی‌داری در وزن خشک اندام هوایی اسفناج شد. میزان این کاهش در خاک شنی ۶۷٪ و در خاک لوم رسی ۳۴٪ بود. ادھیکاری و همکاران (۷) گزارش کردند که در برنج، با افزایش کادمیم به محلول غذایی، مقدار عملکرد و کلروفیل برگ‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش جذب کادمیم به وسیله برنج باعث کاهش جذب عناصر مفید می‌شود. عادل‌أغلو (۸) گزارش کرد که مصرف روی در گیاهان گندم، جو، ذرت و یولاف، غلظت کادمیم را کاهش داده است. این نتایج نشان می‌دهد که در خاک‌های با کمبود روی، کادمیم در گیاه تجمع می‌یابد. اما حضور روی در خاک مانع این تجمع می‌شود. همچنین، پودار و همکاران (۲۳) بر طبق آزمایشی که روی گیاه اسفناج انجام دادند گزارش کردند که سلامتی انسان با مصرف گیاهان رشد یافته در خاک‌های آلوده به هنگامی که روی در خاک وجود دارد کمتر به خطر می‌افتد.

پژوهش‌های اندکی در زمینه بررسی زیست‌فراهمی فلزات سنگین موجود در پسماندهای معدنی این صنایع در سطح کشور انجام شده است. در این پژوهش، بررسی زیست‌فراهمی عناصر سنگین از پسماند کارخانه سرب و روی زنجان مشخص می‌سازد که رها ساختن آنها در محیط‌زیست به چه میزان از لحاظ گیاه‌جذبی و ورود فلزات سنگین به چرخه غذایی انسان خطرناک است و کدام فلز سنگین خطر بیشتری برای سلامتی انسان ایجاد می‌کند. لذا، اهداف این پژوهش عبارتند از (۱) تعیین غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاه کاهوی پرورش یافته در خاک‌های تیمار شده با ضایعات معدنی کارخانجات سرب و روی زنجان و (۲) بررسی ارتباط بین غلظت‌های کل و قابل جذب فلزات سنگین خاک با غلظت و مقدار جذب شده آنها توسط گیاه کاهو. استفاده از پسماند طبیعی کارخانه سرب و روی زنجان برای آلوده کردن خاک‌ها و بررسی گیاه‌فراهمی از کیک‌ها نوآوری پژوهش حاضر است.

پسماندهای صنایع سرب و روی حاوی مقادیر بسیار زیاد کادمیم، سرب، نیکل و آرسنیک هستند و اگر این پسماندها در آب‌های سطحی رها شوند در سطح وسیعی از منطقه پخش شده و اگر مکان دفع این پسماندها سرپوشیده نباشد، با خشک شدن و تشکیل غبار، امکان پخش این آلودگی‌ها وجود دارد. گردوغبار متصاعد شده از دودکش‌ها و فرونشست این گردوغبار در منطقه نیز از روش‌های دیگر آلوده شدن محیط‌زیست است. با دفع غیراصولی پسماندهای تولید شده در سطح منطقه، منابع خاک به فلزات سنگین آلوده می‌شود (۵).

عناصر سنگین، از آلاینده‌های خطرناک محیطی برای سلامتی بشر و محیط‌زیست محسوب می‌شوند. این عناصر می‌توانند بر کیفیت خاک‌های کشاورزی اثرگذار بوده و از طریق جذب توسط گیاهان و ورود به چرخه غذایی بشر سبب بروز مشکلاتی برای سلامتی انسان شوند (۱۷).

ورود فلزات سنگین به زنجیره غذایی پیامدهای نامطلوبی را برای سلامتی انسان به دنبال دارد (۲۱). نیمه‌عمر این عناصر در بدن بسیار طولانی است و در بافت‌های زنده برای مدت طولانی باقی می‌ماند (۱۲).

روی و سرب عناصری هستند که بیشترین مقدار فلزات سنگین در ترکیبات پسماند شهری را به خود اختصاص داده‌اند (۲۸). شرفابی و شهبازی (۲) در پژوهشی، اثر غلظت و زمان را بر زیست‌فراهمی کادمیم و سرب افزوده شده به یک خاک اسیدی و سه خاک قلیایی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تغییرات زیست‌فراهمی کادمیم و سرب در ابتدا شدید بود و سپس کند می‌شد. سومار و همکاران (۲۹)، مشاهده کردند که میزان روی محلول در آب در بستر حاوی زغال‌سنگ نارس نسبت به کمپوست پسماندهای زیستی بیشتر بود. این درحالی بود که محتوای کل روی در زغال‌سنگ نارس (۱۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نسبت به کمپوست (۴۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کمتر بود. علت این موضوع به کم بودن pH در بستر زغال‌سنگ نارس (pH=۵/۵) نسبت به کمپوست (pH=۷/۲) نسبت داده شد. بنابراین، به نظر می‌رسد که ویژگی‌ها شیمیایی بقایای آلی

جدول ۱. غلظت‌های کل و قابل جذب فلزات مختلف در شش نوع کیک مورد بررسی

لیچ	منگنز	لیچ معمولی	منگنز پرعیار	نیکل	لیچ پرعیار	نوع کیک
						نوع فلز
۱۵۴۸۳	۱۱۵۰۰	۹۱۶۶۶	۱۵۶۳۳	۱۰۷۰	۲۲۲۸۳	آهن کل
۱۱	۶/۴۹	۹/۵	۵/۴۲	۲/۳۸	۸/۷۶	آهن قابل جذب
۱۶۶	۲۴۹۳۳	۲۰۳	۲۵۵۶۶	۶۸۶	۵۷۸	منگنز کل
۴/۰۵	۴۶۰	۳/۴	۲۱۴۰۰	۱۲/۴۶	۳۵/۶	منگنز قابل جذب
۳۳۶۶	۶۶	۸۹۱۶	۳۵۳۳	۶۰۰	۱۳۴۸	سرب کل
۴۳	۸/۱۶	۲۳۷۱	۸/۲۲	۴/۸۸	۴۱	سرب قابل جذب
۲۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۸۲۵۰۰	۱۰۰۰۰	۴۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	روی کل
۵۰۰	۹۷۰۰	۱۶۰	۲۱۰۰	۱۶۴۰۰	۸۱۰۰	روی قابل جذب
۱۰۶	۳۰۱	۱۱۹۱	۶۵۵	۱۶۸۳۳۳	۴۱۱	کادمیم کل
۳۹/۸	۲۸۰	۴۰	۲۰۲	۴۵۲۰	۱۴۴	کادمیم قابل جذب
۴۶	۲۱۱	۱۱۶	۱۱۴	۷۹۶۶	۱۱۴	نیکل کل
۵/۳	۱۰	۵/۴۳	۹/۲۹	۱۹۴	۴۲/۱	نیکل قابل جذب

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری کیک‌ها و نمونه‌برداری از خاک‌ها

تعداد ۱۵ نمونه پسماند (کیک) از کارخانه سرب و روی جاده بیجار - زنجان جمع‌آوری شده و براساس نوع و غلظت فلزات سنگین موجود در آنها (جدول ۱) شش نمونه برای افزودن به خاک‌ها انتخاب شدند. کیک‌ها پس از جمع‌آوری، هوا-خشک شده، برای تجزیه‌های شیمیایی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و غلظت کل و قابل جذب فلزات سنگین آنها اندازه‌گیری شد. با توجه به نوع کیک و فلزات سنگین موجود در آنها، مقادیر لازم از کیک‌های مختلف توزین و به خاک غیرآلوده زراعی با بافت لوم شنی که از خاک سطحی دانشگاه زنجان تهیه شده بود، افزوده شد. به طوری که غلظت کیک افزوده شده ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزن خاک شد. خاک، ابتدا هوا-خشک شد و سپس برای تجزیه‌های شیمیایی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. موارد اندازه‌گیری شده در خاک، بدون افزودن پسماند، با عنوان گروه شاهد در نظر گرفته شد.

کشت در گلخانه

در خاک‌های تیمار شده با کیک‌های مختلف، گیاه کاهو در گلخانه گروه خاک‌شناسی دانشگاه زنجان کشت شد. کاهوی مورد استفاده در این پژوهش کاهوی آیسبرگ بود که در محیط گلخانه و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و در شرایط کاملاً یکسان با دوره ۵۰ روزه مورد کشت قرار گرفت.

وزن خاک‌های تیمار شده در هر گلدان ۴ کیلوگرم بوده و در هر گلدان دو نشاء کاهو کشت شد. در پایان فصل رشد، پس از برداشت گیاه، شاخص‌های رشد گیاه و غلظت فلزات سنگین در ریشه و برگ اندازه‌گیری شد. وزن تازه و خشک ریشه، وزن تازه و خشک بخش هوایی، تعداد برگ در گلدان، طول بزرگ‌ترین برگ، شاخص کلروفیل برگ و متوسط سطح برگ با استفاده از اسکن کامپیوتری برگ و نرم‌افزار محاسبه مساحت سطح برگ اندازه‌گیری شدند.

اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در آزمایشگاه

برای اندازه‌گیری غلظت کل فلزات سنگین (کادمیم، آهن،

جدول ۲. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

EC (dS/m)	pH	ظرفیت زراعی (%)	کربن آلی (%)	کربنات کلسیم (%)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت خاک
۰/۴۵۰	۷/۷	۱۷/۵	۰/۴۲	۱۲/۵	۱۶	۲۱	۶۳	لوم شنی

باشد. این مطلب همسو با یافته‌های همفیل (۱۵) است که عنوان کرد مقدار کل یک عنصر در خاک ضرورتاً یک شاخص واقعی از مقدار قابل جذب آن برای گیاه نیست. وقوع سمیت فلزات برای گیاهان و ریزجانداران‌های خاک یا مقادیر زیاد انتقال آنها به زنجیره غذایی، به زیست‌فراهمی فلز مرتبط است. جزء زیست‌فراهم یک فلز مقداری از آن فلز است که ممکن است به‌وسیله گیاهان یا جانداران خاک جذب شود. مقدار کل فلز مرکب از اجزایی است که حلالیت و قابلیت استفاده متفاوتی دارند. زیست‌فراهمی فلز به رفتار شیمیایی فلز، ویژگی‌های خاک و ویژگی‌های اختصاصی گیرنده‌ها (جانداران و گیاهان) بستگی دارد. ژلیازکف و وارمن (۳۴) نیز دریافتند که افزایش غلظت عناصر در بافت‌های گیاهی، متناسب با غلظت کل فلزات خاک تیمار شده با کمپوست حاوی فلزات نبود.

اثر تیمارهای مورد مطالعه بر مقدار فلزات در ریشه و برگ

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت فلزات در ریشه و برگ نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری از لحاظ غلظت کادمیم، آهن، منگنز، نیکل، سرب و روی در ریشه و برگ در بین تیمارها وجود دارد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت کادمیم نشان داد که بیشترین غلظت کادمیم ریشه (۲۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در تیمار ۱٪ کیک نیکل و کمترین غلظت کادمیم ریشه (۲۱/۱۱۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در تیمار شاهد وجود دارد (جدول ۴). در میان فلزات سنگین، کادمیم به‌راحتی به‌وسیله ریشه گیاهان جذب می‌شود و سمیت آن برای گیاه تا ۲۰ برابر سایر فلزات سنگین است. الکساندر و همکاران (۹) و همچنین خداوردی لو و همایی (۱) در آزمایش‌های خود

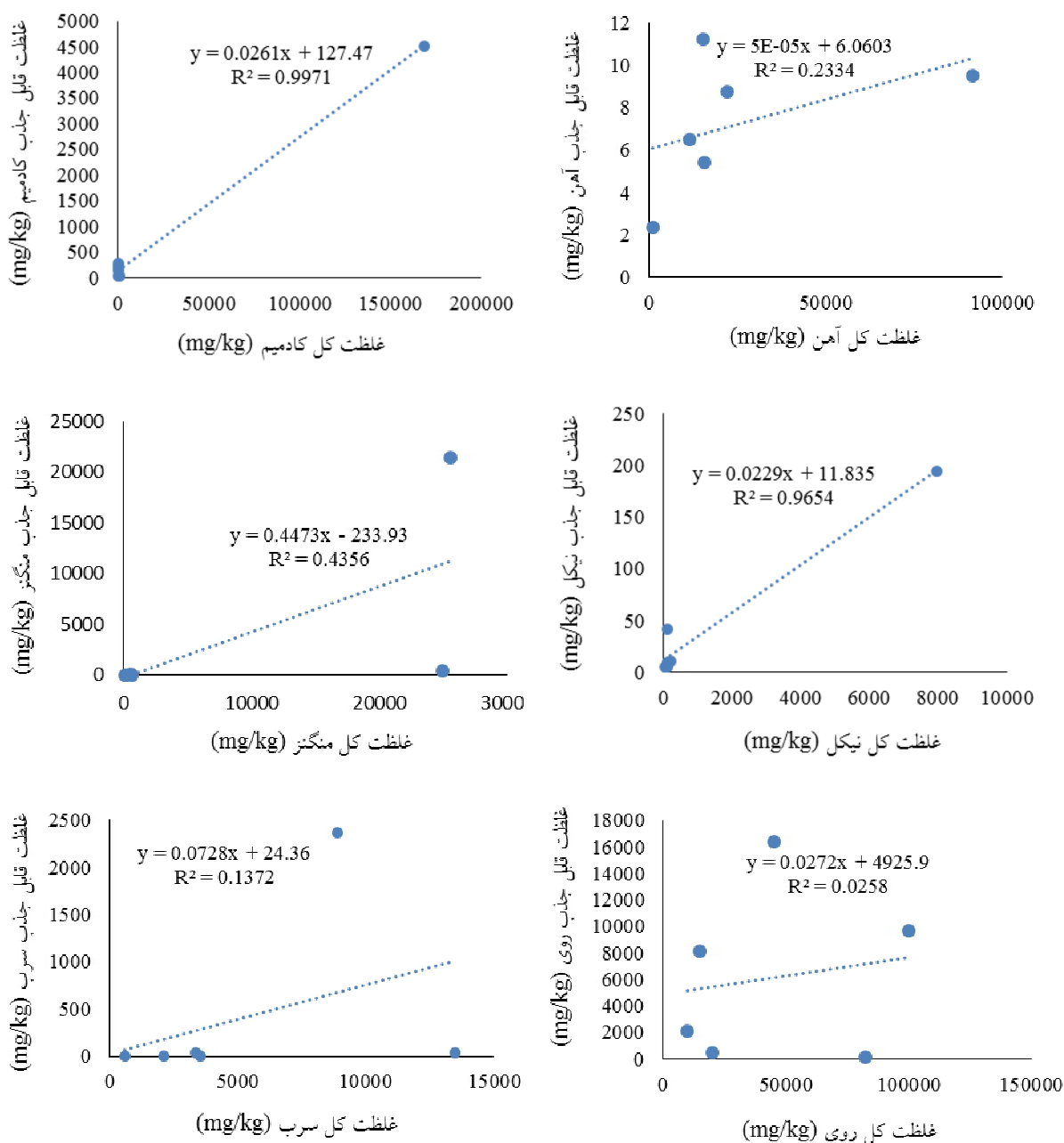
منگنز، نیکل، سرب و روی) در خاک و کیک‌ها از روش هضم تر با اسید (۱۱) و برای اندازه‌گیری غلظت قابل جذب فلزات سنگین از روش عصاره‌گیر با DTPA استفاده شد (۳۰). اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاه با روش هضم مرطوب (۲۲) انجام شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. به‌گونه‌ای که شش نوع کیک در سه سطح (۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد) در سه تکرار و با سه نمونه شاهد (بدون افزودن کیک) مورد آزمایش قرار گرفتند. تعداد تیمارهای آزمایش ۱۹ عدد که با لحاظ کردن تعداد تکرارها در مجموع ۵۷ واحد آزمایشی یا گلدان حاوی ۴ کیلوگرم خاک بود. برای تجزیه داده‌ها از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد و مقایسه میانگین تیمارهای مورد مطالعه با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال خطای ۱٪ انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش، پیش از اعمال تیمارها، در جدول (۲) نشان داده شده است. در این آزمایش، رابطه خطی با ضرایب تبیین متفاوتی میان غلظت کل و غلظت قابل جذب فلزات سنگین گوناگون در پسماندها مشاهده شد (شکل ۱). از بین فلزات بررسی شده، بیشترین ضریب تبیین بین غلظت کل و غلظت قابل جذب مربوط به کادمیم و نیکل به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۶ بود. این نتیجه مشخص می‌کند که نمونه‌ای که غلظت کل زیادی از فلز را دارد حتماً نمی‌تواند غلظت زیاد قابل جذب همان فلز را هم داشته



شکل ۱. روابط خطی بین غلظت کل و غلظت قابل جذب عناصر مورد مطالعه در پسماندها

میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۱٪ کیک نیکل و کمترین غلظت آن (۲۲/۲۲۲۱ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار شاهد مشاهده شد (جدول ۴). بیشترین غلظت نیکل و سرب ریشه به ترتیب در تیمار ۱٪ کیک نیکل و تیمار ۱٪ کیک لیچ و کمترین غلظت نیکل و سرب ریشه به ترتیب در تیمار شاهد مشاهده شد

به این نتیجه رسیدند که سبزی‌های برگی مانند کاهو قادر به استخراج مقادیر قابل توجهی از سرب و کادمیم هستند. بیشترین غلظت آهن ریشه در تیمار ۱٪ کیک لیچ معمولی و کمترین غلظت آهن ریشه در تیمار ۲۵٪ درصد کیک نیکل مشاهده شد (جدول ۴). بیشینه غلظت روی در ریشه (۱۰۳

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر مقادیر فلزات مختلف در ریشه و برگ

میانگین مربعات غلظت فلزات مختلف در ریشه						منابع تغییرات	درجه آزادی
روی	سرب	نیکل	منگنز	آهن	کادمیم		
۱۴۹۷**	۲۰۱۶**	۱۵۳۹**	۱۲۶۲**	۱۱۸۹**	۸۴۰۳**	۱۸	تیمارها
۷/۳۵۸	۳۰/۷۹۷	۲۷/۲۴۰	۳۱۴	۱۷/۵۴۲	۵/۸۴۷	۳۸	خطا
میانگین مربعات غلظت فلزات مختلف در برگ						منابع تغییرات	درجه آزادی
روی	سرب	نیکل	منگنز	آهن	کادمیم		
۱۱۹۰**	۱۲۲۶**	۳۲۰۴**	۷۱۴**	۴۴۱۰**	۱۰۱۲۴**	۱۸	تیمارها
۵۹/۹۳۷	۱۹/۱۹۹	۲۹/۹۶۸	۱۸۷	۵۴/۱۳۸	۲۳/۵۸۵	۳۸	خطا

** بیان‌گر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ است.

رشد گیاه کاهو نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ از لحاظ مقدار وزن تازه و خشک ریشه، وزن تازه و خشک برگ، تعداد برگ در بوته، طول بزرگ‌ترین برگ، متوسط سطح برگ در گلدان و شاخص کلروفیل برگ در بین تیمارها وجود دارد (جدول ۶).

بیشترین مقدار وزن تازه و خشک ریشه (۱۴/۶۳ و ۲/۸۳ گرم) به ترتیب در گلدان با تیمار ۰/۲۵ درصد کیک لیچ معمولی و کمترین مقدار وزن تازه و خشک ریشه (۳/۸۴ و ۰/۶۷ گرم) در تیمار ۱٪ کیک نیکل مشاهده شد (جدول ۷). قهرمانی پیرسلامی و همکاران (۴) در یک آزمایش گلخانه‌ای، اثر کادمیم و روی را بر رشد و ترکیب شیمیایی گیاه کاهو در یک خاک لوم آهکی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که مصرف روی، برخلاف کادمیم، به‌طور معنی‌داری وزن خشک و تر کاهو را افزایش داد. کاربرد روی به‌طور معنی‌داری غلظت کادمیم، فسفر، منگنز، نیتروژن، آهن و کلسیم اندام هوایی را کاهش داد و غلظت و جذب کل روی، مس و سدیم را افزایش داد. افزایش سطوح کادمیم باعث کاهش وزن تازه و خشک، جذب کل مس، آهن، نیتروژن، منگنز، منیزیم، پتاسیم و سدیم در اندام هوایی شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده و اثر کادمیم و روی بر وزن خشک و غلظت روی اندام‌های هوایی گیاه مشاهده شد که کاربرد روی توانست سبب کاهش اثر مضر کادمیم بر رشد گیاه کاهو شود.

کاهش رشد ریشه و بخش هوایی تحت تنش سرب می‌تواند

(جدول ۴). همچنین، مطابق این جدول، بیشترین غلظت منگنز ریشه (۸۷/۲۱۸۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۱٪ کیک منگنز پُرعیار و کمترین غلظت آن (۸/۸۸۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۰/۲۵ درصد کیک نیکل مشاهده شد.

نتایج مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت کادمیم برگ نشان داد که بیشترین غلظت کادمیم برگ (۲۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۱٪ کیک نیکل و کمترین غلظت کادمیم برگ (۲۲/۷۷۶۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار شاهد است (جدول ۵). این نتایج با یافته‌های کاپرمن و کاریرو (۲۰) همخوانی دارد که اعلام کردند در میان فلزات سنگین، کادمیم به‌راحتی به‌وسیله ریشه گیاهان جذب می‌شود و سمیت آن برای گیاه تا ۲۰ برابر سایر فلزات سنگین است.

بیشینه غلظت آهن و منگنز برگ در تیمار ۱٪ کیک منگنز و کمترین غلظت آنها به ترتیب در تیمار شاهد و تیمار ۰/۲۵ درصد کیک لیچ معمولی مشاهده شد (جدول ۵). مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیشترین غلظت نیکل و سرب برگ به ترتیب در تیمارهای ۱٪ کیک نیکل و ۱٪ کیک لیچ و کمترین غلظت آنها به ترتیب در تیمارهای شاهد و ۰/۲۵ درصد کیک منگنز پُرعیار است، بیشینه غلظت روی برگ در تیمار ۱٪ کیک نیکل و حداقل آن در تیمار شاهد مشاهده شد (جدول ۵).

تأثیر تیمارهای مختلف بر شاخص‌های رشد گیاه کاهو

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر شاخص‌های

جدول ۴. تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر غلظت عناصر در ریشه (میلی گرم بر کیلوگرم)

نوع سطح	کیک لیچ پرعیار	کیک نیکل	کیک منگنز پرعیار	کیک لیچ معمولی	کیک منگنز	کیک لیچ	شاهد
کادمیم							
۰							۲۱/۱۱۰۳ ^k
۰/۲۵	۲۳/۸۱۷۹ ^{ijk}	۱۱۰ ^c	۲۳/۸۱۷۹ ^{ijk}	۲۳/۳۳۲۴ ^{jk}	۲۴/۴۴۳۵ ^{ijk}	۲۱/۶۶۵۸ ^k	
۰/۵۰	۲۸/۳۳۲۲ ^{ghi}	۱۲۴ ^b	۲۶/۶۶۵۶ ^{hji}	۲۴/۹۹۹ ^{ijk}	۲۹/۹۹۸۸ ^{fgh}	۲۴/۹۹۹ ^{ijk}	
۱	۳۶/۱۰۹۷ ^e	۲۳۲ ^a	۳۴/۴۴۳۱ ^e	۳۳/۸۱۷۵ ^{ef}	۴۷/۲۲۰۳ ^d	۳۲/۲۲۰۹ ^{ef}	
آهن							
۰							
۰/۲۵	۳۰/۵۵۴۳ ^g	۲۳/۸۱۷۹ ^g	۲۴/۹۹۹ ^g	۴۳/۸۱۷۱ ^f	۲۶/۱۱۰۱ ^g	۳۷/۷۷۶۳ ^f	۲۶/۶۶۵۶ ^g
۰/۵۰	۶۱/۱۰۸۷ ^{cd}	۴۴/۴۴۲۷ ^{ef}	۴۴/۹۹۸۲ ^{ef}	۶۸/۳۳۰۶ ^{bc}	۵۹/۹۹۷۶ ^d	۶۱/۱۰۸۷ ^{cd}	۶۱/۱۰۸۷ ^{cd}
۱	۷۸/۳۳۰۲ ^a	۵۱/۶۶۴۶ ^e	۶۶/۶۶۴ ^{cd}	۸۴/۴۴۱۱ ^a	۶۹/۹۹۷۲ ^b	۷۸/۳۳۰۲ ^a	۷۸/۳۳۰۲ ^a
روی							
۰							
۰/۲۵	۳۱/۱۱۰۷ ^f	۴۶/۱۱۰۱ ^e	۲۳/۸۸۸۷ ^g	۲۴/۹۹۹۸ ^g	۳۴/۹۹۹۴ ^f	۲۳/۳۳۳۲ ^g	۲۲/۲۲۲۱ ^g
۰/۵۰	۴۶/۱۱۰۱ ^e	۶۶/۱۰۹۳ ^d	۳۲/۲۲۱۷ ^f	۳۲/۲۲۱۷ ^f	۴۶/۶۶۵۶ ^e	۲۵/۵۵۵۳ ^g	۲۵/۵۵۵۳ ^g
۱	۷۲/۷۷۵۷ ^c	۱۰۳ ^a	۴۲/۲۲۱۳ ^e	۴۴/۴۴۳۵ ^e	۸۱/۶۶۴۲ ^b	۳۳/۳۳۲۸ ^f	۳۳/۳۳۲۸ ^f
نیکل							
۰							
۰/۲۵	۱۹/۴۴۳۷ ^{hi}	۳۱/۶۶۵۴ ^{fg}	۲۳/۳۳۲۴ ^{gh}	۳۰/۵۵۴۳ ^{fg}	۸/۸۸۸۵ ^j	۱۲/۲۲۱۷ ^{ij}	۶/۶۶۶۴ ^j
۰/۵۰	۳۱/۱۰۹۹ ^{fg}	۵۸/۸۸۶۵ ^b	۴۱/۱۰۹۵ ^{de}	۴۶/۶۶۴۸ ^{cd}	۲۲/۲۲۱۳ ^{gh}	۲۴/۴۴۳۵ ^{gh}	۲۴/۴۴۳۵ ^{gh}
۱	۵۱/۶۶۴۶ ^{bc}	۸۰/۵۵۲۳ ^a	۷۶/۱۰۸۱ ^a	۷۷/۷۷۴۷ ^a	۳۶/۶۶۵۲ ^{ef}	۴۵/۵۵۳۷ ^{cde}	۴۵/۵۵۳۷ ^{cde}
سرب							
۰							
۰/۲۵	۶۹/۹۹۷۲ ^j	۷۴/۹۹۷ ^j	۸۶/۱۰۷۷ ⁱ	۸۶/۶۶۳۲ ⁱ	۹۴/۹۹۶۲ ^{hi}	۹۸/۸۸۴۹ ^{fgh}	۵۳/۸۸۶۷ ^k
۰/۵۰	۸۴/۹۹۶۶ ⁱ	۸۹/۴۴۰۹ ^{hi}	۱۰۲ ^{efg}	۱۰۸ ^{def}	۱۱۱ ^{cde}	۱۱۲ ^{cde}	۱۱۲ ^{cde}
۱	۱۱۱ ^{cde}	۱۱۲ ^{cde}	۱۱۶ ^{cde}	۱۱۹ ^{bcd}	۱۲۲ ^b	۱۷۷ ^a	۱۷۷ ^a
منگنز							
۰							
۰/۲۵	۱۳/۸۸۸۳ ^{de}	۸/۸۸۸۵ ^e	۲۹/۹۹۸۸ ^{bcd}	۱۰/۵۵۵۱ ^{de}	۲۲/۷۷۶۹ ^{cde}	۱۲/۲۲۱۷ ^{de}	۲۳/۸۸۷۹ ^{cde}
۰/۵۰	۲۲/۷۷۶۹ ^{cde}	۱۳/۳۳۲۸ ^{de}	۵۱/۱۰۹۱ ^{bc}	۱۵/۵۵۴۹ ^{de}	۴۱/۵۵۴۹ ^{bcd}	۱۷/۷۷۷۱ ^{cde}	۱۷/۷۷۷۱ ^{cde}
۱	۴۵/۵۵۳۷ ^{bcd}	۱۹/۴۴۳۷ ^{cde}	۸۷/۲۱۸۷ ^a	۲۳/۳۳۲۴ ^{cde}	۶۲/۲۱۹۷ ^{ab}	۴۱/۱۰۹۵ ^{bcd}	۴۱/۱۰۹۵ ^{bcd}

حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۱٪ است.

(۱۳) و برهمکنش فلزات سنگین با گروه‌های سولفیدریل غشای سلول‌ها و غیرفعال کردن آنها (۱۹) باشد. سینها و همکاران (۲۶)

به دلیل تجمع زیاد سرب در ریشه، لیگنینی شدن دیواره سلولی تحت تأثیر فلز سنگین، تأثیر مستقیم فلز سنگین بر هسته سلولی

جدول ۵. تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر غلظت عناصر در برگ (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

شاهد	کیک لیچ	کیک منگنز	کیک لیچ معمولی	کیک منگنز پریبار	کیک نیکل	کیک لیچ پریبار	نوع سطح
کادمیوم							
۲۲/۷۷۶۹ ^h							۰
	۲۴/۴۴۳۵ ^{gh}	۳۲/۷۷۶۵ ^{efg}	۲۵/۵۵۴۵ ^{gh}	۲۷/۲۲۱۱ ^{gh}	۱۰۲ ^c	۲۸/۳۳۲۲ ^{fgh}	۰/۲۵
	۲۷/۲۲۱۱ ^{gh}	۳۷/۲۲۰۷ ^{ef}	۲۹/۴۴۳۳ ^{fgh}	۲۹/۴۴۳۳ ^{fgh}	۱۸۲ ^b	۳۳/۳۳۲ ^{efg}	۰/۵۰
	۳۱/۶۶۵۴ ^{efgh}	۶۶/۱۰۸۵ ^d	۳۲/۷۷۶۵ ^{efg}	۳۲/۷۷۶۵ ^e	۲۳۵ ^a	۳۸/۸۸۷۳ ^e	۱
آهن							
۲۶/۶۶۵۶ ^h							۰
	۸۷/۷۷۴۳ ^{ef}	۹۷/۷۷۳۹ ^{de}	۵۹/۹۹۷۶ ^g	۳۷/۷۷۶۳ ^h	۲۹/۴۴۳۳ ^h	۵۹/۹۹۷۶ ^g	۰/۲۵
	۱۰۸ ^{cd}	۱۰۹ ^{cd}	۹۸/۳۲۹۴ ^{de}	۶۶/۱۰۸۵ ^g	۵۶/۱۰۸۹ ^g	۷۸/۳۳۰۲ ^f	۰/۵۰
	۱۵۳ ^a	۱۶۱ ^a	۱۲۹ ^b	۷۹/۹۹۶۸ ^f	۷۹/۴۴۱۳ ^f	۱۱۸ ^{bc}	۱
روی							
۳۱/۱۱۰۷ ⁱ							۰
	۳۶/۶۶۶ ^{hi}	۵۱/۱۰۹۹ ^{efgh}	۴۲/۷۷۶۹ ^{fghi}	۳۸/۸۸۸۱ ^{ghi}	۵۷/۲۲۰۷ ^{def}	۴۹/۹۹۸۸ ^{efgh}	۰/۲۵
	۴۶/۱۱۰۱ ^{efgh}	۵۹/۴۴۲۹ ^{de}	۴۷/۷۷۶۷ ^{efgh}	۴۶/۶۶۵۶ ^{efgh}	۸۲/۲۱۹۷ ^b	۵۳/۳۳۲ ^{efg}	۰/۵۰
	۴۹/۹۹۸۸ ^{efgh}	۷۶/۶۶۴۴ ^{bc}	۵۷/۲۲۰۷ ^{def}	۴۹/۹۹۸۸ ^{efgh}	۱۱۹ ^a	۶۷/۷۷۵۹ ^{cd}	۱
نیکل							
۸/۳۳۳ ⁱ							۰
	۲۴/۴۴۳۵ ^k	۱۳/۸۸۸۳ ⁱ	۵۷/۷۷۵۵ ^{gh}	۵۲/۷۷۵۷ ^{hi}	۶۱/۱۰۸۷ ^{gh}	۲۷/۲۲۱۱ ^k	۰/۲۵
	۴۲/۷۷۶۱ ^j	۴۱/۱۰۹۵ ^j	۷۸/۳۳۰۲ ^e	۷۱/۶۶۳۸ ^{ef}	۱۰۱ ^{bc}	۶۶/۱۰۸۵ ^{fgh}	۰/۵۰
	۵۲/۷۷۵۷ ^{hi}	۴۷/۷۷۵۹ ^{ij}	۱۰۶ ^b	۹۴/۴۴۰۷ ^{cd}	۱۲۹ ^a	۸۸/۸۸۵۳ ^d	۱
سرب							
۵۴/۹۹۷۸ ^{hi}							۰
	۶۸/۸۸۶۱ ^{ef}	۴۷/۲۲۰۳ ^{jk}	۴۴/۹۹۸۲ ^{jk}	۳۹/۴۴۲۹ ^k	۴۲/۲۲۰۵ ^k	۴۳/۸۸۷۱ ^k	۰/۲۵
	۷۹/۹۹۶۸ ^{cd}	۷۵/۵۵۲۵ ^{de}	۶۲/۷۷۵۳ ^{fgh}	۵۲/۲۲۰۱ ^{ij}	۵۹/۴۴۲۱ ^{ghi}	۶۱/۱۰۸۷ ^{fgh}	۰/۵۰
	۱۱۱ ^a	۹۲/۲۱۸۵ ^b	۸۹/۴۴۰۹ ^b	۶۵/۵۵۲۹ ^{fg}	۸۶/۱۰۷۷ ^{bc}	۸۷/۲۱۸۷ ^{bc}	۱
منگنز							
۳۱/۱۰۹۹ ^{def}							۰
	۳۰/۵۵۴۳ ^{ef}	۴۳/۳۳۱۶ ^{bcdef}	۲۵/۵۵۴۵ ^f	۴۰/۵۵۳۹ ^{cdef}	۲۷/۷۷۶۷ ^{ef}	۳۷/۷۷۶۳ ^f	۰/۲۵
	۴۶/۶۶۴۸ ^{bcdef}	۶۱/۱۰۸۷ ^{abc}	۳۷/۷۷۶۳ ^{cdef}	۵۸/۳۳۱ ^{abc}	۴۱/۱۰۹۵ ^{cdef}	۵۳/۸۸۶۷ ^{cdef}	۰/۵۰
	۵۷/۷۷۵۵ ^{abcd}	۷۶/۶۶۳۶ ^a	۳۹/۴۴۲۹ ^{cdef}	۷۵/۵۵۲۵ ^a	۴۶/۶۶۴۸ ^{bcdef}	۶۷/۷۷۵۱ ^{cdef}	۱

حروف متفاوت بیان‌گر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۱٪ است.

زیست‌توده ریشه و ساقه و محتوای کلروفیل برگ‌های گیاه کنگرفرنگی را با افزایش غلظت سرب در محلول غذایی گزارش

گزارش کردند که با افزایش سطح سرب در خاک، عملکرد و اندازه سر کلم کاهش یافت. کریمی و همکاران (۱۸) کاهش

جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر شاخص‌های رشد و میزان کلروفیل گیاه کاهو

		میانگین مربعات					درجه		منابع تغییرات	
		برگ			ریشه					
شاخص	متوسط سطح کلروفیل	طول بزرگ‌ترین برگ	تعداد برگ در گلدان	وزن خشک تازه	وزن تازه	وزن خشک تازه	وزن تازه	آزادی		
		برگ		گرم در گلدان						
تیمارها	۲۵۹**	۵۹/۵۸۳**	۲۲/۸۴۷**	۱۶۹*	۴۵/۵۱۰**	۳۳۸۴**	۱/۰۲۳**	۲۲/۹۹۶**	۱۸	
خطا	۰/۰۰۵	۰/۰۱۷	۰/۲۰۳	۰/۹۶۵	۲/۱۳۴	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۲۱	۳۸	

** بیان‌گر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ است.

جدول ۷. تأثیر سطوح مختلف کیک بر وزن تازه و خشک ریشه و برگ (گرم در گلدان)

نوع سطح	کیک لیچ پرعیار	کیک نیکل	کیک منگنز پرعیار	کیک لیچ معمولی	کیک منگنز	کیک لیچ	شاهد
وزن تازه ریشه							
۰							۱۱/۴ ^f
۰/۲۵	۱۱/۴۹ ^f	۹/۳۳ ⁱ	۱۲/۶۷ ^d	۱۴/۶۳ ^a	۱۲/۱۸ ^d	۱۴/۰۵ ^b	
۰/۵۰	۱۱/۱۴ ^g	۵/۳۷ ^l	۱۱/۹۶ ^e	۱۳/۳۱ ^c	۱۱/۶۵ ^f	۱۲/۶۵ ^d	
۱	۸/۷۳ ^k	۳/۸۴ ^m	۱۰/۷۱ ^h	۱۳/۳۱ ^c	۹/۰۳ ^j	۱۲/۱۹ ^e	
وزن خشک ریشه							
۰							۱/۹۸ ^g
۰/۲۵	۲/۴۱ ^b	۱/۴۹ ^h	۲/۴۸ ^b	۲/۸۳ ^a	۲/۴۱ ^b	۲/۸ ^a	
۰/۵۰	۱/۹۵ ^{ef}	۰/۷۹ ⁱ	۲/۱۸ ^d	۲/۳۷ ^{bc}	۲/۰۷ ^{de}	۲/۲ ^{cd}	
۱	۱/۳۷ ^h	۰/۶۷ ⁱ	۱/۹۸ ^e	۲/۱۱ ^{de}	۱/۷۹ ^{fe}	۲/۰۹ ^{de}	
وزن تازه برگ							
۰							۸۹/۱ ⁱ
۰/۲۵	۸۴/۲۷ ^k	۲۱/۳۲ ^o	۱۱۰ ^a	۱۰۶ ^b	۹۵/۰۸ ^g	۱۰۶ ^b	
۰/۵۰	۸۰/۰۵ ^l	۷/۲۴ ^p	۱۰۶ ^b	۱۰۶ ^b	۹۴/۳۴ ^h	۱۰۶ ^b	
۱	۷۴/۸۴ ⁿ	۴/۴۴ ^q	۱۰۵ ^e	۹۶/۲۶ ^f	۷۷/۶۲ ^m	۸۷/۱۳ ^j	
وزن خشک برگ							
۰							۱۰/۵۸ ^{cd}
۰/۲۵	۱۱/۳۳ ^{abcd}	۳/۸۱ ^{ef}	۱۳/۹۱ ^a	۱۳/۵۴ ^{ab}	۱۲/۲۷ ^{bc}	۱۳/۴۶ ^{ab}	
۰/۵۰	۱۰/۳۲ ^{cd}	۱/۷۶ ^f	۱۲/۵۶ ^{abc}	۱۲/۱۱ ^{abc}	۱۰/۷۵ ^{bcd}	۱۱/۹۵ ^{abc}	
۱	۸/۶۷ ^d	۱/۳۶ ^f	۱۲/۴۵ ^{abc}	۱۰/۹۴ ^{bcd}	۱۰/۱۴ ^{bcd}	۱۰/۶۲ ^{cd}	

حروف متفاوت بیان‌گر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۱٪ است.

کننده مواد غذایی، تغییر در ساختار غشاء سلولی و کاهش جذب و محتوای آب می‌شود که این امر بر فرایندهای فیزیولوژیک مانند تعرق، تنفس و فتوسنتز اثر گذاشته و در نهایت موجب کاهش رشد قسمت‌های مختلف گیاه و از جمله کاهش زیست‌توده و سطح برگ می‌شود.

نتایج مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بر طول بزرگ‌ترین برگ و سطح برگ کاهو (جدول ۸) نشان داد که بزرگ‌ترین طول برگ کاهو (۱۵ سانتی‌متر) و بیشترین سطح برگ کاهو (۲۰/۶۶ سانتی‌متر مربع) در تیمار ۰/۲۵ درصد کیک منگنز پرعیار و کمترین طول برگ کاهو (۳/۴۸ سانتی‌متر) و نیز کمترین سطح برگ کاهو در گلدان (۳/۳ سانتی‌متر مربع) در تیمار ۱٪ کیک نیکل مشاهده شد. این نتیجه با یافته‌های آزیودو و همکاران (۱۰) و زنگین و مونزور‌اُغلو (۳۳) که بیان کردند کاربرد کادمیم سبب کاهش رشد، تعداد و اندازه برگ‌ها و مقدار کلروفیل برگ و همچنین ایجاد کلروز و نکروز در برگ‌های گیاه آفتابگردان شده هماهنگی دارد.

بیشترین مقدار شاخص کلروفیل برگ (۳۶/۶۵) در تیمار ۰/۲۵ درصد کیک منگنز پرعیار و کمترین مقدار شاخص کلروفیل برگ (۶/۸۳) در تیمار ۱٪ کیک نیکل مشاهده شد (جدول ۸)، که با یافته‌های ادھیکاری و همکاران (۷) که گزارش کردند در برنج، به‌طور کلی، با افزودن کادمیم به محلول غذایی، مقدار عملکرد و کلروفیل برگ‌ها کاهش یافت، همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

در بررسی شش نوع کیک کارخانجات سرب و روی مشخص شد که بیشترین میزان آلودگی در غلظت کل فلزات سنگین مورد بررسی به‌ترتیب مربوط به کادمیم، روی، آهن، منگنز، سرب و نیکل بوده و در غلظت‌های قابل جذب فلزات سنگین بررسی شده بیشترین آلودگی به‌ترتیب مربوط به منگنز، روی، کادمیم، سرب، نیکل و آهن بود. نتایج نشان داد که غلظت‌های قابل جذب فلزات سنگین خاک لزوماً رابطه‌ای با غلظت‌های کل فلزات سنگین خاک نداشتند. غلظت قابل جذب فلزات سنگین

کرده‌اند. پژوهش‌های انجام شده روی گونه‌های گیاهی مختلف نشان داده که کادمیم یک عنصر سمی قوی و بازدارنده رشد است (۲۷). این عنصر مانع سنتز کلروفیل‌ها (۱۰) و پایداری و به‌هم پیوستن پروتئین‌های آنها می‌شود (۱۶) و به این وسیله انباشت مجموعه‌های لیپوپروتئین-رنگدانه (Pigment-lipoprotein)، به ویژه در فتوسیستم یک، کاهش می‌یابد (۲۵). اهدافی که سمی بودن کادمیم عمدتاً به آنها آسیب می‌رساند فتوسیستم دو و فازهای آنزیمی فتوسنتز، ۵- بیفسفات کربوکسیلاز/اکسیژناز (5-biphosphate carboxylase/oxygenase)، به‌ویژه ریبولوز-۱ (Ribulose-1) است. کادمیم علاوه بر کاهش فعالیت آنزیمی، در تثبیت گاز کربنیک و سیستم‌های دفاع آنتی‌اکسیدان‌ها (۳۱) و زنجیره انتقال الکترون (۲۴) نقش مخرب دارد.

بیشترین مقدار وزن تازه و خشک برگ کاهو (۱۱۰ و ۱۳/۹۱ گرم) در تیمار ۰/۲۵ درصد کیک منگنز پرعیار و کمترین مقدار وزن تازه و خشک برگ کاهو (۴/۴۴ و ۱/۳۶ گرم) در تیمار ۱٪ کیک نیکل مشاهده شد (جدول ۷) که با یافته‌های قهرمانی پیرسلامی و همکاران (۴) که نشان دادند افزایش سطوح کادمیم باعث کاهش وزن تازه و خشک در اندام‌های هوایی کاهو می‌شود، هماهنگی دارد. در همین راستا، هوشمندفر و همکاران (۶) که بیان کردند افزایش مقادیر قابل جذب سرب و روی خاک سبب کاهش عملکرد گلرنگ و ایجاد سمیت شد. دهیری و همکاران (۱۴) نشان دادند که کادمیم باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام‌های هوایی اسفناج شد. ادھیکاری و همکاران (۷) نیز گزارش کردند که بین عملکرد ماده خشک اندام‌های هوایی و کادمیم خاک همبستگی منفی وجود دارد.

بیشترین تعداد برگ کاهو در گلدان (۵۰ عدد) در تیمار ۰/۲۵ درصد کیک منگنز پرعیار و کمترین تعداد برگ کاهو در گلدان (۲۱ عدد) در تیمار ۱٪ کیک نیکل مشاهده شد (جدول ۸). شارما و دویی (۲۵) بیان کردند که تنش فلزات سنگین از جمله عوامل محدودکننده رشد ریشه است. عدم توسعه و گسترش مناسب سیستم ریشه‌ای باعث کاهش سطوح جذب

جدول ۸. تأثیر سطوح مختلف کیک بر شاخص‌های رشدی برگ

نوع سطح	کیک لیچ پرعیار	کیک نیکل	کیک منگنز پرعیار	کیک لیچ معمولی	کیک منگنز	کیک لیچ	شاهد
تعداد برگ							
۰	۴۱ ^{efg}						
۰/۲۵	۳۹ ^{hi}	۳۴ ^k	۵۰ ^a	۴۹ ^{ab}	۴۲ ^{ef}	۴۸ ^{bc}	
۰/۵۰	۳۸ ^{ij}	۲۵ ⁱ	۴۷ ^c	۴۷ ^c	۴۱ ^{fg}	۴۵ ^d	
۱	۳۷ ⁱ	۲۱ ^m	۴۳ ^e	۴۰ ^{gh}	۳۹ ^{hi}	۴۰ ^{gh}	
طول برگ (سانتی‌متر)							
۰	۱۳/۵ ^{de}						
۰/۲۵	۱۳ ^{ef}	۱۰ ^h	۱۵ ^a	۱۴/۱۶ ^{bcd}	۱۳/۵ ^{de}	۱۳/۶۶ ^{de}	
۰/۵۰	۱۲/۵ ^{fg}	۷/۸ ⁱ	۱۴/۸۳ ^{ab}	۱۳/۸۳ ^{cde}	۱۳/۳۳ ^{de}	۱۳/۶ ^{de}	
۱	۱۲ ^g	۳/۴ ^l	۱۴/۶ ^{abc}	۱۳/۵ ^{de}	۱۲/۵ ^{fg}	۱۳/۱۴ ^{ef}	
سطح برگ (سانتی متر مربع)							
۰	۱۱/۱۴ ^e						
۰/۲۵	۸/۵۵ ^{ij}	۴/۵۲ ⁱ	۲۰/۶۶ ^a	۱۲/۵۹ ^c	۱۰/۸۹ ^f	۱۱/۷۶ ^d	
۰/۵۰	۸/۴۳ ^j	۳/۸۹ ^m	۱۹/۴۹ ^b	۱۰/۲۲ ^g	۹/۱ ^h	۹/۱۱ ^h	
۱	۶/۹۹ ^k	۳/۳ ⁿ	۱۱/۸۸ ^d	۸/۹۳ ^h	۷/۱۱ ^k	۸/۶۸ ⁱ	
شاخص کلروفیل برگ							
۰	۳۶/۳ ^a						
۰/۲۵	۳۳/۵ ^g	۱۲/۷ ^m	۳۶/۶۵ ^a	۳۵/۷۹ ^b	۳۵/۰۱ ^c	۳۵/۰۹ ^c	
۰/۵۰	۳۰/۸۱ ⁿ	۹/۰۶ ⁿ	۳۴/۸۱ ^d	۳۴/۲۳ ^e	۳۳/۵۶ ^g	۳۳/۷۴ ^f	
۱	۲۷/۹۲ ⁱ	۶/۸۳ ^o	۳۳/۵۷ ^g	۳۳/۲ ^h	۳۰/۳۳ ^k	۳۱/۸۲ ⁱ	

حروف متفاوت بیان‌گر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۱٪ است.

مشخص شد که عناصر کادمیم و نیکل باعث کاهش شاخص‌های رشد گیاه کاهو ولی عناصر منگنز، روی و آهن باعث افزایش آنها شدند.

خاک‌های تیمار شده با کیک‌ها بر اثر جذب توسط گیاه کاهو و واکنش با اجزاء خاک کاهش یافته و غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاه کاهو با افزایش میزان مصرف ضایعات معدنی در خاک افزایش یافت. در بررسی شاخص‌های رشد گیاه کاهو

منابع مورد استفاده

۱. خداوردی لو، ح. و م. همایی. ۱۳۸۶. مدل‌سازی پالایش سبز خاک‌های آلوده به سرب و کادمیم. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۴۲: ۴۲۶-۴۱۷.
۲. شرفبافی، ش. و ک. شهبازی. ۱۳۹۳. اثر غلظت کادمیم و سرب اضافه شده بر زیست‌فراهمی آنها در خاک‌های مختلف.

پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) ۲۸: ۱۰۰-۸۷

۳. گلچین، ا. و س. شفیع. ۱۳۸۵. بررسی تأثیر کارخانجات سرب و روی زنجان بر آلودگی محصولات زراعی و باغی به فلزات سنگین. همایش خاک، محیط‌زیست و توسعه پایدار، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.
۴. قهرمانی پیرسلامی، ش.، م. محمد نیا، ع. موسوی و آ. قیصری. ۱۳۹۱. اثر کادمیم و روی بر رشد و ترکیب شیمیایی گیاه کاهو در خاک آلوده. سومین همایش ملی مقابله با بیابان‌زایی و توسعه پایدار تالاب‌های کویری ایران، اراک.
۵. زالی، ز. و م. زالی. ۱۳۹۳. مروری بر آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از کارخانجات سرب و روی حومه شهر زنجان. دومین همایش منطقه‌ای تغییر اقلیم و گرمایش زمین، پژوهشکده تغییر اقلیم و گرمایش زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
۶. هوشمند فر، ع.، د. ارادتمند اصلی و م. م. طهرانی. ۱۳۸۷. اثر مقادیر مختلف سرب و روی بر جذب آنها به وسیله گلرنگ. دهمین کنگره علوم زراعت و اصلاح نباتات، تهران.
7. Adhikari, T., T.O. Elisha, Y. Libal and M. Shenker. 2006. Effect of cadmium and iron on rice (*Oryza sativa* L.) plant in chelator-buffered nutrient solution. *J. Plant Nutr.* 29: 1919–1940.
8. Adiloglu, A. 2002. The effect of zinc application on uptake of cadmium in some cereal species. *Arch. Agron. Soil Sci.* 48: 553–556.
9. Alexander, P.D., B.L. Alloway and A.M. Dourado. 2006. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables. *Environ. Pollut.* 144: 736–745.
10. Azevedo, H.C., L. Gomes, J. Pinto, S.F. Loureiro and C. Santos. 2005. Cadmium effects on sunflower growth and photosynthesis. *J. Plant Nutr.* 28: 2211–2220.
11. Carter, M.R. 1993. *Soil Sampling and Method of Analysis*. CSSS, Lewis Publishers.
12. Chen, C., B. Zheng, X. Jiang, Z. Zhao, Y. Zhan, F. Yi and J. Ren. 2013. Spatial distribution and pollution assessment of mercury in sediments of Lake Taihu, China. *J. Environ. Sci.* 25(2): 316–325.
13. Daud, M.K., M.T. Variath, S. Ali, U. Najeeb, M. Jamil, Y. Hayat, M. Dawood, M.I. Khan, M. Zaffar, S.A. Cheema, X.H. Tong and S. Zhu. 2009. Cadmium-induced ultramorphological and physiological changes in leaves of two transgenic cotton cultivars and their wild relatives. *J. Hazard Mater.* 168: 614–625.
14. Dehiri, G. S., M. S. Brar and S. S. Malhi. 2007. Influence of phosphorus application on growth and cadmium uptake of spinach in two cadmium contaminated soils. *J. Plant Nutr.* 170: 495–499.
15. Hemphill, D.D. 1972. Availability of trace element to plants with respect to soil-plant interaction. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* Vol. 199.
16. Horvath, G., M. Droppa, A. Oravec, V.I. Raskin and J.B. Marder. 1996. Formation of the photosynthetic apparatus during greening of cadmium poisoned barley leaves. *Plantar.* 199: 238–244.
17. Kabata-Pendias, A. and H. Pendias. 1992. *Trace Elements in Soils and Plants*. Second edition, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
18. Karimi, N., M. Khanahmadi and B. Moradi. 2013. The effects of lead on some physiological parameters of artichoke. *IJPP* 20(1): 49–62.
19. Khudsar, T., M. Uzzafar, W.Y. Soh and M. Iqbal. 2000. Morphological and anatomical variations of *Cajanus cajan* (*Linn. Huth*) raised in cadmium-rich soil. *J. Plant Biol.* 43: 149–157.
20. Kuperman, R.G. and M.M. Carreiro. 1997. Soil heavy metal concentrations, microbial biomass and enzyme activities in a contaminated grassland ecosystem. *Soil Biol. Biochem.* 29(2): 179–190.
21. Martins, R.J., R. Pardo and R.A. Boaventura. 2004. Cadmium (II) and zinc (II) adsorption by the aquatic moss *Fontinalis antipyretica*: Effect of temperature, pH and water hardness. *Water Res.* 38(3): 693–699.
22. Mico, C., L. Recatala, M. Peris and J. Sanchez. 2006. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere* 65(5): 863–872.
23. Podar, D., M.H. Ramsey and M.J. Hutchings. 2004. Effect of cadmium, zinc and substrate heterogeneity on yield shoot metal concentration and metal uptake by *Brassica Junicea*: Implication for human health risk assessment and phytoremediation. *New Phytol.* 163: 313–324.
24. Sandalio, L.M., H.C. Dalurzo, M. Gomes, M. Romero-Puertas and L. Del Rio. 2001. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *J. Exp. Bot.* 52: 2115–2126.
25. Sharma, P. and R.S.H. Dubey. 2005. Lead toxicity in plants. *Plant Physiol.* 17: 35–52.
26. Sinha, P., B. Dube, P. Srivastava and C. Chatterjee. 2006. Alteration in uptake and translocation of essential

- nutrients in cabbage by excess lead. *Chemosphere* 65(4): 651–656.
27. Smiri, M., A. Chaoui and E. El Ferjani. 2009. Respiratory metabolism in the embryonic axis of germinating pea seed exposed to cadmium. *Plant Physiol.* 166(3): 259–269.
28. Smith, S.R. 2009. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environ. Int.* 35(1): 142–156.
29. Soumaré, M., F.M.G. Tack and M.G. Verloo. 2003. Characterisation of Malian and Belgian solid waste composts with respect to fertility and suitability for land application. *Waste Manage.* 23: 517–522.
30. Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai and M.E. Sumner. 1996. *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, SSSA, Madison, WI.
31. Udit, G., K. Rajneesh Agnihotri, K. Ravinder and S. Rajendra. 2013. Effects of heavy metal Cd on some physiological and biochemical parameters of barley (*Hordeum vulgare*). *IJACS* 5(22): 2743–2751.
32. Wubishet Gezahegan, W., A. Srinivasulu, B. Aruna, S. Banerjee, M. Sudarshan, P.V. Lakshmi Narayana and A.D.P. Rao. 2017. Study of heavy metals accumulation in leafy vegetables of Ethiopia. *J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol.* 11(5): 57–68.
33. Zengin, F.K. and O. Munzuroglu. 2006. Toxic effect of cadmium (Cd⁺⁺) on metabolism of sunflower (*Heliantus annus* L.) seedlings. *Acta Agr. Scand.* 56: 224–229.
34. Zheljzkov, V.D. and P.R. Warman. 2004. Phytoavailability and fractionation of copper, manganese and zinc in soil following application of two composts to four crops. *Environ. Pollut.* 131: 187–195.

Evaluation of Uptake and Accumulation of Heavy Metals by Lettuce in Soil Treated with Inorganic Wastes of Lead and Zinc Factories

Z. Rajabi¹, P. Alamdari^{1*} and A. Golchin¹

(Received: 24 June 2018 ; Accepted: 9 January 2019)

Abstract

The lead-zinc industries are known to be one of the high-risk industries in terms of the environmental issues. In this research, 15 samples of waste (cake) from Zanjan Lead and Zinc Factory were collected and six samples were selected for adding to soil according to type and concentration of heavy metals. Then, lettuce was planted in soil samples treated with different cakes. After harvesting the plants, the plant growth indices, concentration of heavy metals in plant roots and leaves, and available concentration of heavy metals in the cultivated soil were measured. This research was carried out as a completely randomized design, in which, six types of cakes were tested at three levels (0.25, 0.5 and 1%) with three replicates and three control samples (without adding the cakes). Results indicated that the highest amount of pollution for total concentration of heavy metals was related to Cd (168333 mg/kg), Zn (100000 mg/kg), Fe (91666 mg/kg), Mn (25566 mg/kg) Pb (13483 mg/kg) and Ni (7966 mg/kg), and for available concentration of heavy metals was related to Mn (21400 mg/kg), Zn (16400 mg/kg), Cd (4520 mg/kg), Pb (2371 mg/kg), Ni (194 mg/kg) and Fe (11.2 mg/kg). Available concentration of heavy metals in soils treated with cakes was reduced by uptake of these metals by lettuce.

Keywords: Zinc and lead factories' wastes, Heavy metals, Cake, Availability.

1. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Zanjan Univ., Zanjan, Iran.

* Corresponding Author, Email: p_alamdari@znu.ac.ir