بررسی واکنش عدس به آلودگی کادمیوم ناشی از کمپوست زباله شهری و نمک کادمیوم

محمدرضا اصغری‌پور* و بنفشه رحمانیان کوشکی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۱۲)

چکیده

هدف از این مطالعه ارزیابی قابلیت جذب کادمیوم توسط عدس پس از افزودن کمپوست فضولات دامی بود. در این مطالعه گلخانه‌ای دو رقم عدس (زیبا و محلی زابل) در خاک‌هایی با سطوح مختلف کادمیوم از منبع کمپوست کاشته شده و با گیاهانی که در خاک‌های تیمار شده با مقادیر یکسان کلرید کادمیوم یا ترکیبی از آنها کاشته شده بودند مقایسه شدند. سمیت کادمیوم برای گیاهان از طریق بررسی رشد و تجمع کادمیوم در بافت‌ها، همچنین جذب عناصر پرمصرف تعیین گردید. افزودن کادمیوم به‌طور معنی‌داری رشد، وزن و مقدار آب گیاه را کاهش داد. سمیت کادمیوم از طریق کمپوست کمتر از همان مقدار کادمیوم بود که به شکل نمک فلزی محلول به خاک اضافه شده بود. نتایج نشان داد گیاهان مقادیر زیادی کادمیوم در بافت‌هایشان تجمع دادند. همچنین غالب کادمیوم جذب شده در ریشه حفظ شد و ریشه‌ها غلظت کادمیوم بیشتری نسبت به شاخساره داشتند. سمیت کادمیوم برای گیاهان در رقم زیبا به‌طور معنی‌داری نسبت به رقم محلی بیشتر بود. افزودن کادمیوم به خاک به‌خصوص به شکل نمک فلزی غلظت عناصر در شاخساره را کاهش داد و سبب تجمع بیشتر عناصر در ریشه شد. به‌طورکلی نتایج این آزمایش نشان داد که منبع و مقدار کادمیوم عوامل مهمی در ارزیابی قابلیت جذب کادمیوم توسط گیاهان است.

کلمات کلیدی: زباله، فلزات سنگین، عناصر غذایی، کشت گلدانی

۱. گروه زراعت دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل

*: مسئول مکاتبات، پست اکترونیکی: m_asgharipour@uoz.ac.ir

مقدمه

تحت شرایط طبیعی به‌ندرت مقادیر فلز سنگین کادمیوم در خاک به‌حدی که برای گیاهان ایجاد سمیت نماید مشاهده می‌شود، اما استفاده گسترده از لجن فاضلاب، زباله‌های شهری و فضولات دامی در مزارع در سال‌های اخیر، آلودگی کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها با فلزات سنگین و فعالیت‌های معدنکاوی سبب افزایش آلودگی خاک‌ها با این عنصر سمی شده است (۴). تحرک بالای کادمیوم در سیستم خاک-گیاه به آن اجازه می‌دهد تا به آسانی در مقادیر بالا به‌وسیله گیاه جذب شده و به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در فرایندهای فیزیولوژیکی مانند تنفس، فتوسنتز، تعرق، طویل شدن سلول، روابط آب گیاه، تغذیه معدنی، متابولیسم نیتروژن و کربوهیدرات‌ها اختلال ایجاد کرده و منجر به رشد ضعیف و تولید اندک بیوماس توسط گیاه شود (۳۰).

مطالعات گسترده‌ای در سرتاسر دنیا در خصوص راهکارهای تخفیف تأثیرات فلز سنگین کادمیوم بر روی گیاهان اجرا شده است. این راهکارها عموماً شامل غرقاب مدیریت شده مزرعه (۳۱)، معرفی ژنوتیپ‌های مقاوم در برابر کادمیوم (۲)، تعویض خاک (۲۶)، بالا بردن pH خاک به‌وسیله افزودن آهک، سیلیکات یا فسفات (۲۶)، شستشوی شیمیایی خاک مزارع برنج (۱۷) و گیاه پالایی (۱۸) می‌شوند. اما این تکنیک‌ها همگی پرهزینه بوده و ممکن است ضایعات سمی تولید نمایند. به تازگی استفاده از مواد آلی نظیر ضایعات کارخانه‌های صنایع غذایی و انواع کمپوست در تخفیف سمیت کادمیوم مؤثر گزارش شده‌اند (۱۱). در این ارتباط سود و همکاران (۲۹) استفاده از ضایعات کشاورزی را به‌عنوان جاذب‌های زیستی برای جذب کارآمد فلزات سنگین با هزینه پایین پیشنهاد کردند، زیرا گروه‌های مواد آلی (از قبیل استامیدها، آمیدها، الکل‌ها، کربونیل‌ها، فنل‌ها، آمین‌ها، سولفیدریل‌ها) موجود در ضایعات از طریق واکنش‌های شیمیایی تمایل به جذب یون‌های فلزات سنگین به شکل کمپلکس‌های فلزی یا کلات دارند. سینگ و همکاران (۲۷) موفق به جذب ۹۸ درصد از یون‌های سرب موجود در عصاره آبکی در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر با استفاده از ماده کم‌ارزش کاه و کلش ذرت شدند. پریرا و آرودا (۲۳) با آزمایش خود تمایل زیاد ورمی‌کمپوست به‌عنوان یک جاذب طبیعی یون‌های کادمیوم با جذب حداکثر ۳۸/۶ میلی‌گرم در گرم ورمی کمپوست را نشان دادند. نتایج مشابهی توسط ارسلان و پیهلوان (۳) گزارش شد زمانی‌که از اسید هیومیک تولیدشده از مواد لیگنینی برای حذف Cr^{3+} از محلول آبی استفاده کردند. کاهش قابل توجهی در غلظت کادمیوم و دیگر فلزات سنگین محلول خاک به‌وسیله کولو و همکاران (۷) در خاک‌هایی با مواد آلی هوموسی شده بالا احتمالاً به‌دلیل شکل‌گیری کمپلکس‌های آلی غیرمحلول مشاهده شد.

با این حال، اطلاعات اندکی در مورد اثرات استفاده از کمپوست فضولات دامی در فراهمی کادمیوم در خاک برای گیاه وجود دارد. به‌دلیل استفاده گسترده از افزودنی‌ها به خوراک دام، کمپوست فضولات دامی به‌عنوان یکی از منابع عمده کادمیوم در مزارع محسوب می‌شود (۲۶). منبع عمده کادمیوم در فضولات دامی سنگ فسفات است که برای تأمین فسفر معدنی برای حیوانات به رژیم غذایی دام‌ها استفاده می‌شود (۵). لی و همکاران (۱۴) در یک آزمایش گلدانی نشان دادند که فراهمی کادمیوم برای گیاهان در خاک‌هایی که کمپوست کود دامی با کادمیوم بالا اضافه شده بود نسبت به خاک‌هایی که نمک کادمیوم محلول در همان مقدار کادمیوم اضافه شده بود کمتر بود. گونه‌های گیاهی تا حد زیادی در جذب و انتقال کادمیوم درون گیاه متفاوتند. همچنین تنوع درون گونه‌ای در غلظت کادمیوم در سویا، گندم، ذرت، آفتابگردان، سیب‌زمینی و برنج مشاهده شده است (۸، ۹، ۱۵، ۳۲، ۳۳، ۳۵).

گردآوری اطلاعات درخصوص میزان سمیت کادمیوم فضولات دامی و مقایسه سمیت آن با نمک کادمیوم برای طراحی برنامه‌های کاربرد این کود با حداقل تأثیر بر کیفیت گیاه ضروری است. بنابراین در این مطالعه اثرات سمی کادمیوم از منبع زباله شهری و نمک کادمیوم محلول با استفاده از عدس به‌عنوان یک محصول نمونه بررسی شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در زمستان ۱۳۸۹ و بهار ۱۳۹۰ و در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زابل (عرض جغرافیایی ۶۱ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۴۵۰ متر از سطح دریا) اجرا شد. اقلیم محل اجرای آزمایش گرم و خشک بود و متوسط بارندگی و درجه حرارت متوسط سالیانه آن ۶۳ میلی‌متر و ۲۳°C گزارش شده است. خاک مورد استفاده در آزمایش از ۱۰ سانتی‌متر فوقانی جمع‌آوری گردید و یک خاک لوم شنی [۱۹٪ رس (<۲μm)، ۲۱٪ سیلت (۲ تا ۲۰ μm)، ۴۱٪ شن ریز (۲۰ تا ۲۰۰ μm) و ۱۹٪ شن درشت (۲۰۰ تا ۲۰۰۰ μm)] با pH معادل ۷/۸، دارای ۰/۱۱٪ مواد آلی، ppm ۲/۹ نیتروژن- نیتراتی ($N\text{-}NO_3$)، ppm ۲/۲ فسفر و ppm ۱۵۶ پتاسیم بود. کمپوست کود گاوی مورد استفاده در این مطالعه در مزرعه سد سیستان دانشگاه زابل تهیه شد. جدول ۱ برخی از خصوصیات فیزیک- شیمیایی کمپوست مورد استفاده را نشان می‌دهد.

آزمایش مورد استفاده فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار بود. فاکتور اول دو رقم عدس (*Lens culinaris* Medik) زیبا و محلی زابل و فاکتور دوم هفت تیمار اختلاط خاک گلدان با کادمیوم [افزودن مقدار ۶/۴ میلی‌گرم کادمیوم از منبع نمک $CdSO_4$ (S_1) یا کمپوست (C_1)، افزودن مقدار ۱۲/۸ میلی‌گرم کادمیوم از منبع نمک $CdSO_4$ (S_2) یا کمپوست (C_2)، افزودن مقدار ۳/۲ میلی‌گرم کادمیوم از منبع نمک $CdSO_4$ و ۳/۲ میلی‌گرم کادمیوم از منبع کمپوست (S_1C_1)، افزودن مقدار ۶/۴ میلی‌گرم کادمیوم از منبع نمک $CdSO_4$ و ۶/۴ میلی‌گرم کادمیوم از منبع کمپوست (S_2C_2) و خاک تیمار نشده به‌عنوان شاهد] بود. رقم محلی، توده بومی زابل و از ارقام میکروسپرم عدس بود که کشت آن در منطقه سیستان متداول است. مقادیر کمپوست اضافه شده به خاک براساس مقدار اندازه‌گیری شده کادمیوم در نمونه‌های کمپوست برای تیمارهای C_1، C_1S_1،C_2 و C_2S_2 به‌ترتیب معادل مخلوط کردن ۸۷/۱۱، ۱۷۴/۲۲، ۴۳/۵۵ و ۸۷/۱۱ گرم کمپوست در کیلوگرم خاک بود. مقادیر مختلف کمپوست و محلول‌های حاوی نمک کادمیوم پیش از پرکردن گلدان‌ها با خاک مخلوط شدند. تمام گلدان‌ها به میزان ۲۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در کیلوگرم خاک (به شکل اوره) و ۱۰۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک (به شکل سوپرفسفات) دریافت کردند. میزان رطوبت گلدان‌ها با آبیاری روزانه در حدود ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نگه داشته شد.

آزمایش گلدانی در ۲۰ بهمن‌ماه ۱۳۸۹ آغاز و در ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۰ پایان یافت. درجه حرارت حداقل و حداکثر گلخانه ۱۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد بود. گلدان‌های پلاستیکی با ۲۰ سانتی‌متر قطر و ۱۷ سانتی‌متر ارتفاع با ۱/۸ دسی‌مترمکعب از هر محیط رشد پر شدند و یک هفته پس از پر کردن گلدان‌ها ۵ عدد بذر از هر رقم (توده محلی زابل رقم زیبا) در هر گلدان کاشته شد و پس از جوانه‌زنی تعداد بوته‌ها در هر گلدان به ۳ عدد رسیدند و باقیمانده گیاهان از خاک خارج شدند. در طول آزمایش کنترل علف‌های هرز با دست انجام شد و آفت و بیماری خاصی مشاهده نشد. در پایان دوره رشد و در آغاز دوره گل‌دهی بوته‌ها برداشت شد. خصوصیات مورفولوژیکی مانند تعداد برگ در بوته، تعداد شاخه فرعی در بوته، ارتفاع بوته، قطر ساقه اصلی، طول ریشه و وزن تر بوته اندازه‌گیری شد. سپس بوته‌های برداشت شده به اندام‌های هوایی و ریشه تقسیم شدند و در ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و توزین گردیدند.

برای اندازه‌گیری عناصر غذایی و فلز سنگین کادمیوم نمونه‌های خشک و آسیاب شده گیاهی با استفاده از روش هضم خشک عصاره‌گیری گردید (۲۲). غلظت عناصر پرمصرف کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg) و فلز سنگین کادمیوم (Cd) در عصاره حاصل با دستگاه جذب اتمی (مدل Shimadzu AA-670) در طیف خاص هر عنصر اندازه‌گیری شد. نیتروژن کل (N) با استفاده از دستگاه کجلدال، فسفر کل (P) گیاه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل WAP)، و پتاسیم (K) با دستگاه فلایم فتومتر (مدل JENWAY-PFP7) اندازه‌گیری شد. در

جدول ۱. خصوصیات فیزیک وشیمیایی کمپوست کود دامی مورد استفاده در این مطالعه

	pH	EC	OC**	TN*	C/N	P	K	Na	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cd	Cr	Co
		dSm	(g Kg)			(mg Kg)											
کمپوست	۷/۵	۸/۰	۵۸/۳	۲/۶۷	۲۱/۸	۲۸/۹	۲/۷	۲/۵	۵۷/۲	۲۱/۲	۱۷/۶	۱۹/۵	۹/۱	۴/۸	۷/۴	۴/۲	۱/۱

* Total N
** Organic C

جدول ۲. اثر رقم و اختلاط کادمیوم از منبع کمپوست یا نمک کادمیوم بر پارامترهای رشد رویشی گیاه، عملکرد و محتوای آب بافت‌ها گیاه عدس

رقم عدس		ارتفاع بوته (cm)	تعداد برگ در بوته	تعداد شاخه فرعی در بوته	قطر ساقه (cm)	طول ریشه اصلی (cm)	وزن تازه گیاه (گرم در گلدان)	وزن خشک گیاه (گرم در گلدان)	محتوای آب بافت‌ها (٪)
توده محلی		۳۹/۱^{b}	۵۵/۹^{b}	۷/۸^{b}	۴/۲^{b}	۱۲/۸^{a}	۸/۰^{b}	۱۷/۸^{b}	۰/۴۵^{a}
زیبا		۴۲/۴^{a}	۵۸/۶^{a}	۸/۷^{a}	۴/۹^{a}	۱۳/۲^{a}	۸/۹^{a}	۱۹/۳^{a}	۰/۴۶^{a}
تیمار اختلاط کادمیوم با خاک									
نمک محلول کادمیوم	۶/۴ میلی‌گرم	۳۳/۲^{e}	۴۹/۵^{d}	۵/۵^{d}	۴/۲^{d}	۹/۷^{d}	۶/۲^{d}	۱۷/۱^{c}	۰/۳۶^{e}
	۱۲/۸ میلی‌گرم	۳۱/۷^{f}	۴۲/۸^{e}	۴/۵^{e}	۴/۰^{d}	۸/۵^{e}	۵/۷^{d}	۱۶/۰^{d}	۰/۳۶^{e}
کمپوست	۶/۴ میلی‌گرم	۴۶/۷^{a}	۶۵/۶۶^{a}	۱۱/۶۶^{a}	۵/۲^{a}	۱۶/۲^{a}	۱۰/۱^{b}	۱۹/۶^{a}	۰/۵۲^{b}
	۱۲/۸ میلی‌گرم	۴۵/۲^{b}	۶۱/۸^{b}	۱۰/۰^{b}	۴/۹^{b}	۱۵/۹^{a}	۱۱/۱^{a}	۲۰/۲^{a}	۰/۵۵^{a}
نمک + کمپوست	۶/۴ میلی‌گرم	۴۱/۵^{c}	۵۷/۳^{c}	۷/۷^{c}	۴/۳^{c}	۱۲/۷^{b}	۸/۴^{c}	۱۸/۴^{b}	۰/۴۶^{c}
	۱۲/۸ میلی‌گرم	۴۰/۰^{d}	۵۶/۵^{c}	۷/۲^{c}	۴/۲^{c}	۱۱/۲^{c}	۷/۷^{c}	۱۸/۹^{b}	۰/۴۱^{d}
شاهد (خاک تیمار نشده)		۴۶/۰^{a}	۶۴/۰^{b}	۱۱/۵^{a}	۵/۱^{a}	۱۶/۴^{a}	۹/۹^{b}	۱۹/۷^{a}	۰/۵۰^{b}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند (P <۰/۰۵).

پایان، تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست آمده با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری MSTAT-C و SAS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

نتایج

رشد رویشی

نتایج پارامترهای بررسی شده رشد رویشی گیاه (ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد برگ در بوته، تعداد شاخه فرعی در بوته، طول ریشه اصلی و وزن تازه و خشک گیاه) تحت تأثیر رقم و اختلاط خاک گلدان با کادمیوم از منبع کمپوست و یا نمک کادمیوم در جدول ۲ ارائه شده است.

تمام پارامترهای رشدی گیاه (به‌استثنای طول ریشه اصلی) میان دو رقم اصلاح شده زیبا و محلی زابل به‌طور معنی‌دار متفاوت بود، و رقم اصلاح شده بوته‌های بزرگتری (ارتفاع بوته ۴۲/۴ سانتی‌متر، قطر ساقه ۴/۹ میلی‌متر، تعداد برگ در بوته ۵۸/۶، تعداد شاخه فرعی در بوته ۸/۷) را در مقایسه با توده محلی زابل تولید کرد. رقم زیبا دارای ۸٪ ارتفاع بوته بیشتر، ۱۷٪ قطر ساقه بیشتر، ۵٪ تعداد برگ در بوته و ۱۲٪ تعداد شاخه جانبی در بوته بیشتر در مقایسه با رقم محلی زابل بود (جدول ۲).

کاهش معنی‌داری در غالب پارامترهای رشدی گیاه تنها با افزایش مقدار کادمیوم از منبع نمک کادمیوم مشاهده شد و کادمیوم از منبع کمپوست تأثیری بر این خصوصیات نداشت به‌طوری که در میان تیمارهای اختلاط خاک گلدان با کادمیوم کمترین رشد در گیاهان کاشته شده در گلدان‌هایی که خاک آنها با مقدار ۱۲/۸ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک از منبع نمک کادمیوم تیمار شده بودند، مشاهده شد.

در این بررسی اثر متقابل معنی‌داری بین رقم عدس کاشته شده و اختلاط خاک گلدان با کادمیوم از منبع نمک کادمیوم و کمپوست بر روی پارامترهای رشدی مشاهده شد (نتایج نشان داده نشده است)، به‌طوری‌که بوته‌های رقم محلی زمانی‌که در مقادیر بالای اختلاط کادمیوم با خاک گلدان کاشته شده بودند رشد بیشتری نسبت به‌بوته‌های رقم اصلاح شده زیبا داشتند (جدول ۲).

وزن تازه و وزن خشک گیاهان به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر رقم قرار گرفتند. وزن تازه و وزن خشک برای بوته‌های رقم اصلاح شده زیبا به‌ترتیب ۱۱٪ و ۸٪ بیشتر از بوته‌های توده محلی زابل بود. اختلاط خاک گلدان با مقادیر مختلف کادمیوم از منبع نمک کادمیوم و کمپوست وزن تازه و وزن خشک گیاهان را به‌ترتیب ۷۴٪ و ۲۳٪ در مقایسه با شاهد (بوته‌های کاشته شده در خاک آمیخته نشده با کادمیوم) کاهش داد. اثر متقابل معنی‌داری بین رقم و تیمارهای اختلاط کادمیوم با خاک گلدان بر روی وزن تازه و وزن خشک مشاهده‌شد. بوته‌های رقم زیبا و کاشت در خاک آمیخته نشده با کادمیوم و بوته‌های توده محلی زابل و اختلاط با ۱۲/۸ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک از منبع نمک کادمیوم به‌ترتیب بیشترین و کمترین وزن تازه و وزن خشک گیاهان را دارا بودند.

غلظت و توزیع عناصر غذایی در گیاهان

میانگین غلظت عناصر غذایی پرمصرف در شاخساره و ریشه گیاه تحت تأثیر رقم و اختلاط خاک گلدان با کادمیوم در جدول۳ ارائه شده است.

غلظت‌های غالب عناصر غذایی پرمصرف (N، P، K، Ca، Mg) در شاخساره و ریشه گیاهان بین دو رقم زیبا و محلی زابل تفاوت معنی‌داری نداشت. اما غلظت همه این عناصر غذایی در شاخساره و ریشه گیاهان تیمار شده با نمک کادمیوم و ترکیبی از نمک کادمیوم و کمپوست نسبت به شاهد کاهش یافت. آهنگ این کاهش در شاخساره نسبت به ریشه گیاهان شدت بیشتری داشت. در بین عناصر غذایی منیزیوم بیشترین کاهش (۸۵٪ برای شاخساره و ۴۲٪ برای ریشه) را داشت و پس از آن نیتروژن (۷۸٪ برای شاخساره و ۴۶٪ برای ریشه)، کلسیم (۴۰٪ برای شاخساره و ۱۳٪ برای ریشه)، فسفر (۳۷٪ برای شاخساره و ۴٪ برای ریشه) و پتاسیم (۱۰٪ برای شاخساره و ۱۷٪ برای ریشه) قرار داشتند.

جدول ۳. اثر رقم و اختلاط کادمیوم از منبع کمپوست یا نمک کادمیوم بر غلظت عناصر پرمصرف و فلز سنگین کادمیوم گیاه عدس

تیمار		N		P		K		Ca		Mg		Cd	
رقم عدس		ریشه	شاخساره	ریشه	شاخساره	ریشه	شاخساره	ریشه	شاخساره	ریشه	شاخساره	ریشه	شاخساره
توده محلی		۳۲/۵^{a}	۴۰/۸^{a}	۹/۵^{a}	۱۷/۴^{a}	۲۶/۴^{a}	۳۷/۰^{a}	۳۸/۸^{a}	۴۶/۸^{a}	۳۱/۸^{a}	۳۴/۴^{a}	۱۴/۴^{a}	۳/۹^{b}
زیبا		۳۰/۹^{b}	۴۱/۴^{a}	۱۰/۱^{a}	۱۸/۴^{a}	۲۵/۸^{a}	۳۶/۹^{a}	۳۷/۷^{a}	۴۷/۲^{a}	۳۰/۷^{a}	۳۳/۹^{b}	۱۲/۸^{b}	۴/۷^{a}
تیمار اختلاط کادمیوم با خاک													
نمک محلول	۶/۴ میلی‌گرم	۲۶/۹^{d}	۳۰/۵^{e}	۹/۰^{c}	۱۲/۹^{f}	۲۴/۳^{c}	۳۴/۳^{c}	۳۷/۵^{b}	۳۶/۴^{d}	۲۵/۴^{c}	۲۲/۸^{c}	۱۶/۸^{c}	۵/۳^{d}
کادمیوم	۱۲/۸ میلی‌گرم	۲۴/۶^{e}	۲۷/۷^{f}	۹/۵^{c}	۱۴/۵^{e}	۲۳/۱^{c}	۳۴/۱^{c}	۳۶/۵^{b}	۳۹/۴^{c}	۲۶/۰^{c}	۲۳/۹^{c}	۲۷/۶^{a}	۸/۷^{a}
کمپوست کود	۶/۴ میلی‌گرم	۳۸/۵^{b}	۵۵/۳^{b}	۱۱/۳^{a}	۲۱/۹^{b}	۲۹/۰^{a}	۴۰/۵^{a}	۳۸/۵^{a}	۵۶/۸^{a}	۴۰/۶^{a}	۴۷/۸^{a}	۳/۶^{e}	۲/۰^{e}
دامی	۱۲/۸ میلی‌گرم	۴۱/۱^{a}	۵۸/۷^{a}	۱۰/۴^{b}	۲۳/۲^{a}	۲۷/۸^{b}	۳۹/۲^{a}	۳۷/۰^{b}	۵۶/۲^{a}	۳۸/۵^{b}	۴۵/۷^{a}	۷/۱^{d}	۲/۷^{e}
نمک +	۶/۴ میلی‌گرم	۲۸/۲^{d}	۳۷/۴^{d}	۹/۱^{c}	۱۶/۸^{d}	۲۶/۱^{bc}	۳۶/۸^{b}	۳۹/۴^{a}	۴۱/۴^{b}	۲۵/۹^{c}	۲۸/۶^{b}	۱۹/۲^{b}	۶/۱^{c}
کمپوست	۱۲/۸ میلی‌گرم	۲۷/۰^{d}	۲۸/۸^{f}	۹/۴^{c}	۱۶/۰^{d}	۲۵/۰^{c}	۳۶/۰^{b}	۳۷/۶^{b}	۴۳/۵^{b}	۲۴/۶^{c}	۲۶/۰^{b}	۲۶/۶^{a}	۷/۳^{b}
شاهد (خاک تیمار نشده)		۳۵/۸^{c}	۴۹/۴^{c}	۹/۹^{bc}	۱۹/۹^{c}	۲۷/۱^{bc}	۳۷/۶^{b}	۴۱/۲^{a}	۵۵/۱^{a}	۳۶/۹^{b}	۴۴/۲^{a}	۰/۱^{f}	۰/۱^{f}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($P<0/05$).

اثر متقابل معنی‌داری بین رقم و اختلاط خاک گلدان با مقادیر مختلف کادمیوم بر روی عناصر غذایی پرمصرف به استثنای پتاسیم مشاهده نشد. در خصوص عنصر پتاسیم اختلاط خاک با کادمیوم عنصر پتاسیم را در رقم محلی بیش از رقم اصلاح شده زیبا کاهش داد.

غلظت و توزیع کادمیوم در گیاهان

میانگین غلظت کادمیوم در شاخساره و ریشه گیاه تحت تأثیر رقم و مقادیر مختلف اختلاط کادمیوم با خاک در جدول ۳ ارائه شده است. عمده کادمیم جذب شده در گیاه بدون توجه به رقم و تیمار در ریشه گیاهان تجمع پیدا کرد. غلظت کادمیوم در شاخساره و ریشه گیاهان در دو رقم اصلاح شده زیبا و محلی زابل به‌طور معنی‌داری متفاوت بود، به‌طوری که غلظت کادمیوم شاخساره در رقم اصلاح شده زیبا و غلظت کادمیوم ریشه در رقم محلی بیشتر بود. غلظت کادمیوم در گیاهان با افزایش مقدار اختلاط کادمیوم از هر دو منبع کمپوست و نمک کادمیوم با محیط رشد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین غلظت کادمیوم در گیاهان کاشته شده در خاک تیمار شده با مقادیر ۱۲/۸ و ۶/۴ میلی‌گرم کادمیوم مشاهده شد و پس از آن تیمار ترکیب کمپوست و نمک، کمپوست و شاهد قرار داشتند.

در این بررسی اثر متقابل معنی‌داری بین رقم عدس کاشته شده و اختلاط خاک گلدان با کادمیوم از منبع نمک کادمیوم و کمپوست بر روی غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه گیاهان مشاهده شد، به‌طوری که در مقادیر بالای کادمیوم در محیط رشد تفاوت بین دو رقم آشکارتر شد.

بحث

استفاده از کمپوست کود دامی می‌تواند خطر تجمع کادمیوم در خاک را به دلیل محتوای کادمیوم بالای فضولات دامی ایجاد کند (۲۶). اوریهارا و همکاران (۲۱) مقدار فلزات سنگین را در طیف وسیعی از انواع کمپوست دامی بررسی کردند و پی بردند انواع کمپوست حاوی مقادیر اندکی کادمیوم، ارسنیک، جیوه و سرب است که می‌تواند برای محیط زیست آلودگی ایجاد کند. این آزمایش با هدف بررسی اثرات سمی کادمیوم از منبع زباله شهری و نمک کادمیوم محلول اجرا شد. در این بررسی از دو رقم اصلاح شده زیبا و توده محلی زابل استفاده شد، که به لحاظ خصوصیات رشدی با هم متفاوت بودند. براساس نتایج این آزمایش افزودن مقادیر مختلف کادمیوم به شکل نمک کادمیوم برای گیاهان از طریق کاهش رشد شاخساره و ریشه ایجاد سمیت شدید کرد. این کاهش رشد در گیاهان در معرض فلزات سنگین غالباً از اثرات مستقیم (سمیت فلزات سنگین انباشته شده در بافت‌های گیاه) و یا از اثرات غیرمستقیم (محدودیت دستیابی به موادمعدنی و آب) ناشی می‌شود (۳۱). در همین حال کاربرد کادمیوم به شکل کمپوست در مقایسه با نمک محلول ایجاد سمیت بسیار کمتری نمود. کمتربودن سمیت کادمیوم کمپوست اضافه شده به خاک نسبت به همان مقدار کادمیوم به شکل نمک فلزی به خصوص در رقم زیبا نشان از خطر پتانسیل کمتر کادمیوم موجود در کمپوست، نسبت به نمک کادمیوم برای انتقال در زنجیره‌های غذایی دارد. این نتایج مشابه سایر مطالعاتی است که در آنها عنصر به‌کار رفته به شکل نمک در گیاهان ساده‌تر نسبت به مقدار معادل در لجن فاضلاب، گرد و غبار دودکش، یا خاکستر ضایعات ماکیان بیشتر تجمع می‌یابد (۱۴). براون و چانی (۶) گزارش کردند مقدار کادمیوم بسیار کمتری به‌وسیله کاهو رشد داده شده در خاکی که برای ۱۰ سال مداوم در آن کودهای دامی به‌کار رفته بود نسبت به گیاهان رشد یافته درخاکی با مقادیر یکسان کادمیوم اما از منبع نمک کادمیوم تیمار شده بودند، جذب می‌شود. نتایج مشابهی به‌وسیله کوکیر (۱۳) و همکاران گزارش شده که در آن کاربرد کود دامی برای ۲۴ سال محتوای کادمیوم را در ساقه گیاهان کاهو کاشته شده در آن به میزان ناچیزی نسبت به خاک شاهد افزایش داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که آزاد شدن کادمیوم از کمپوست کود که حاوی مقادیر زیادی کربن آلی و ترکیبات غیرآلی است ناچیز است. بنابراین کمپوست می‌تواند به‌عنوان اصلاح کننده خاک بدون خطر تجمع کادمیوم در گیاه به‌کار رود.

در مقاله مروری نگارش یافته توسط کیرخام (۱۲) تعدادی مطالعه مرور شده است که در آن ذکر شده افزایش pH مقدار جذب کادمیوم در گیاهان را کاهش می‌دهد. در این مطالعه مقدار pH خاک در تیمار خاک با بیشترین مقدار کمپوست به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد بالاتر بود، اما مقدار pH خاک تیمار شده با سایر مقادیر کمپوست و یا کاربرد کمپوست به‌همراه نمک کادمیوم به‌طور معنی‌داری با شاهد تفاوت نداشت (اطلاعات نشان داده نشده است). این نشان می‌دهد که عواملی دیگر به‌غیر از pH برای توضیح تغییرات در فراهمی کادمیوم برای گیاهان در تیمارهای مختلف وجود دارد. گزارشات پیشین نشان داد که کاهش فراهمی کادمیوم در خاک برای گیاهان با افزودن مواد آلی عمدتاً ناشی از افزایش CEC خاک است (۱۲). هی و سینگ (۱۰) همچنین گزارش کردند که محتوای کادمیوم گیاه همبستگی منفی و معنی‌داری با افزایش CEC خاک دارد. اما در مطالعه ما افزایش معنی‌دار CEC تنها در تیمار افزودن بیشترین مقدار کمپوست به خاک مشاهده شد (اطلاعات نشان داده نشده است).

کمپوست کود دامی حاومی مقادیر زیادی مواد هوموسی است. کادمیوم می‌تواند با مواد آلی نامحلول نظیر مولکول‌های بزرگ هیومین پیوندهایی تشکیل دهد، بنابراین ظرفیت خاک برای جذب کادمیوم را افزایش دهد (۲۵). موادی هوموسی دارای تعدادی از ترکیبات نظیر COOH، OH فنولی، OH اینولیک، OH الکلی، کوئینن، هیدروکسی کوئینن، لاکتون و اتر می‌باشند (۲۸). ژیا و رایسون (۳۴) گزارش کردند که اتصال یون کادمیوم به مواد آلی مختلف سمیت این عنصر برای گیاهان را کاهش می‌دهد.

تفاوت قابل توجهی در تجمع کادمیوم در بافت‌های گیاه و حساسیت خصوصیات رشدی گیاه بین دو ژنوتیپ در محیط‌های کشت وجود داشت، و رقم محلی زابل نسبت به حضور کادمیوم در محیط رشدی مقاومت بیشتری نشان داد. تنوع ژنوتیپی در توزیع کادمیوم ممکن است مربوط به تفاوت‌های ساختاری یا فیزیولوژیک موجود در شاخساره یا ریشه، و توزیع کادمیوم در داخل گیاه باشد. نیشیزونو و همکاران (۱۹) نشان دادند، طول ریشه، سطح ریشه یا CEC ریشه می‌تواند در توزیع کادمیوم مهم باشد. واکنش ارقام به کادمیوم می‌تواند در ارزیابی تحمل این ارقام به تنش استفاده شود. توده بومی عدس زابل سال‌ها است به‌وسیله کشاورزان محلی مورد کشت و کار قرار می‌گیرد و قادر به مقابله با دوره‌های طولانی خشکسالی با سطوح شوری بالا است. مکانیزم‌های مقاومت به خشکی و شوری در این رقم به‌طور غیرمستقیم ممکن است به تحمل گیاه در مقابل کادمیوم کمک کند، زیرا سطوح بالای فلزات سنگین عامل القای تنش آب ثانویه در گیاهان هستند (۲۶).

در این مطالعه به‌طور کلی غلظت کادمیوم در ریشه بیشتر از شاخساره بود، یعنی به‌طور متوسط بیش از ۷۰ درصد کادمیوم گیاه در ریشه تجمع یافت (جدول ۱). تجمع بیشتری از عناصر سمی در ریشه نسبت به شاخساره، به‌طور معمول در سورگم (۱)، لوبیا (۲۰)، کلزا، خیار (۲۴) و گوجه‌فرنگی (۲۲) گزارش شده است. کمتربودن مقدار کادمیوم در شاخساره نسبت به ریشه می‌تواند به‌دلیل تثبیت کادمیوم در درون سلول‌ها به‌وسیله تشکیل کمپلکس‌هایی با اسیدهای آلی نظیر مالاتندواگزالات، انتقال کادمیوم به درون واکوئل‌ها، انسداد کادمیوم توسط سلول‌های اپیدرمی، تثبیت کادمیوم در دیواره‌های سلولی، و یا نتیجه اتصال کادمیوم با ترکیبات آلی موجود در ریشه باشد (۲۴). باقی‌ماندن فلزات سنگین در ریشه به‌خصوص در مورد گیاهان زراعی مطلوب است، زیرا این بخش‌ها معمولاً به‌عنوان غذا یا خوراک دام مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، در نتیجه سمیت فلزات سنگین برای حیوانات و انسان کاهش می‌یابد (۳۵).

کادمیوم ممکن‌است با تأثیر بر نفوذپذیری غشاء پلاسمالما در جذب عناصر غذایی تداخل ایجاد کند، اما مطالعات کمی به‌منظور تعیین اثر کادمیوم در جذب عناصر گیاهی انجام شده است و نتایج مطالعات که تاکنون ارائه شده کاملاً در تناقض است. در معرض قرار دادن کادمیوم سبب کاهش مقدار آب در شاخساره می‌شود و این احتمالاً بر جذب و انتقال عناصر غذایی

تأثیرگذار است. همچنین پیشنهاد شده است که کادمیوم از جذب عناصر غذایی ضروری ممانعت به‌عمل آورده و کمبود عناصر غذایی را القا می‌کند (۱۶). کادمیوم با کاتیون‌های دو ظرفیتی دیگر نظیر کلسیم و منیزیوم رقابت می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود کادمیوم مقدار این عناصر در بافت‌های گیاه را کاهش دهد، این می‌تواند نتیجه رقابت مستقیم بین کادمیوم و این عناصر باشد. در این مطالعه غلظت اغلب عناصر غذایی به‌شدت در شاخساره گیاهان تیمار شده با کادمیوم کاهش‌یافت. همچنین در این مطالعه ما پی بردیم اثر کادمیوم بر غلظت عناصر در بافت‌های گیاه با بخش گیاه، عنصر و رقم تغییر می‌کند. افزودن کادمیوم از انتقال نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منگنز به شاخساره ممانعت کرد و سبب باقی‌ماندن بیشتر این عناصر در ریشه شد. این تغییرات در توزیع عناصر بین ریشه و شاخساره می‌تواند به تغییرات در سیستم آوندی گیاه مربوط باشد، که بر انتقال عناصر تأثیر می‌گذارد، همان‌گونه که در لوبیا و گوجه‌فرنگی تیمار شده با کادمیوم مشاهده شد (۲۲).

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که عدس قادر به جذب مقادیر زیادی کادمیوم در بافت‌هایش (عمدتاً در ریشه) است، و از این گیاه می‌توان به‌عنوان گیاه جاذب کادمیوم در خاک‌های آلوده استفاده کرد، با این حال تجمع کادمیوم در بافت‌ها سبب کاهش شدید رشد در گیاه می‌شود. ریشه گیاه عدس به‌عنوان سدی در مقابل جذب و انتقال فلزات سنگین به اندام‌های هوایی عمل می‌کند. قابلیت جذب کادمیوم در خاک‌هایی که کادمیوم به شکل کمپوست اضافه شده بود نسبت به خاک‌هایی که نمک کادمیوم به خاک اضافه شده بود، کمتر بود. این پدیده می‌تواند به ظرفیت بالای مواد آلی موجود در کمپوست برای جذب کادمیوم نسبت داده شود. منبع و مقدار کادمیوم خاک، خصوصیات خاک و اندام گیاه عوامل با اهمیت در ارزیابی قابلیت جذب و سمیت کادمیوم برای گیاه عدس می‌باشند. یافته‌های این مطالعه برای ارزیابی پیامدهای کاربرد فضولات دامی مفید است.

منابع مورد استفاده

1. Abo-Kassem, E. M., A. Sharaf and Y. A. H. Mohamed. 1997. Effect of different cadmium concentration on growth, photosynthesis and ion relation of wheat. Egypt. J. Physiol. Sci. 21: 41-51.
2. Arao, T. and N. Ae. 2003. Genotypic variations in cadmium concentration of rice grain. Soil Sci. Plant Nutr. 49: 473-479.
3. Arslan, G. and E. Pehlivan. 2008. Uptake of Cr^{3+} from aqueous solution by lignite-based humic acids. Bioresource Technol. 99: 7597-7605.
4. Asgharipour, M. R., M. Khatamipour and M. Razavi. 2011. Phytotoxicity of Cd on seed germination, early growth, proline and carbohydrate content in two wheat verities. Adv. Environ. Biol. 5: 559-565.
5. Bolan, N. S., D. C. Adriano and S. Mahimairaja. 2004. Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by products. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 4: 291-338.
6. Brown S. L. and R. L. Chaney. 1998. The phytoavailability of cadmium to lettuce in longterm biosolids-amended soils. J. Environ. Qual. 27: 1071-1078.
7. Covelo, E. F., M. L. Andrade and F. A. Vega. 2004. Heavy metal adsorption by humic humbrisols: selectivity sequences and competitive sorption kinetics. J. Colloid Interf. Sci. 280: 1-8.
8. Eriksson, J. 1990. A field study on factors influencing Cd levels in soils and in grain of oats and winter wheat. Water Air Soil Poll. 53: 69-81.
9. Florijin, P. J. and M. L. van Beusichenm. 1993. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred line. Plant Soil. 150: 25-32.
10. He, Q. B. and B. R. Singh. 1993. Effect of organic matter on the distribution, extractability and uptake of cadmium in soils. Eur. J. Soil Sci. 44: 641-650.
11. Karaca, A. 2004. Effect of organic wastes on the extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in soil. Geoderma 122: 297-303.
12. Kirkham, M. B. 2006. Cadmium in plants on polluted soils: effects of soil factors, hyper accumulation, and amendments. Geoderma 137: 19-32.
13. Kukier, U., R. L. Chaney, J. A. Ryan, W. L. Daniels, R. H. Dowdy and T. C. Granato. 2010. Phytoavailability of

cadmium in long-term biosolids-amended soils. J. Environ. Qual. 39: 519-530.
14. Li, S., R. Liu, M. Wang, X. Wang, H. Shan and H. Wang. 2006. Phytoavailability of cadmium to cherry-red radish in soils applied composted chicken or pig manure. Geoderma 136: 260-271.
15. Li, Y. M., R. L. Chaney and A. Schneiter. 1997. Screening for low grain cadmium phenotypes in sunflower, durum wheat and flax. Euphytica 94: 23-30.
16. Liu, J. G., J. S. Liang, K.Q. Li, Z. J. Zhang, B. Y. Yu, X. L. Lu, J. C. Yang and Q. S. Zhu. 2003. Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress. Chemosphere 52: 1467-1473.
17. Makino, T., T. Kamiya, H. Takano, T. Itou, N. Sekiya, K. Sasaki, Y. Maejima and K. Sugahara. 2007. Remediation of cadmium-contaminated paddy soils by washing with calcium chloride: verification of on-site washing. Environ. Pollut. 147: 112-119.
18. Murakami, M., F. Nakagawa, N. Ae, M. Ito and T. Arao. 2009. Phytoextraction by rice capable of accumulating Cd at high levels: Reduction of Cd content of rice grain. Environ. Sci. Technol. 43: 5878-5883.
19. Nishizono, H., H. Ichikawa, S. Suziki and F. Ishii. 1987. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense*. Plant Soil 101, 15-20.
20. Obata, H. and M. Umebayashi. 1997. Effects of cadmium on mineral nutrient concentrations in plants differing in tolerance for cadmium. J. Plant Nutr. 20: 97-105.
21. Orihara, K., K. Kamiyama and S. Fujiwara. 2002. Characteristics of the heavy metal content in animal waste compost, Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr. 73: 403-409. (In Japanese, with English summary).
22. Ouariti, O., H. Gouia and M. H. Ghorbal. 1997. Responses of bean and tomato plants to cadmium: growth, mineral nutrition, and nitrate reduction. Plant Physiol. Bioch. 35: 347-354.
23. Pereira, M. G. and M. A. Z. Arruda. 2003. Vermicompost as a natural adsorbent material. Characterization and potentialities for cadmium adsorption. J. Brazil Chem. Soc. 14: 39-47.
24. Pettersson, O. 1976. Heavy metal ion uptake by plants from nutrient solutions with metal ion, plant species and growth period variations. Plant Soil 45: 445-459.
25. Pinto, A. P., A. M. Motab, A. de Varennesc and F. C. Pinto. 2004. Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. Sci. Total Environ. 326: 239-247.
26. Sato, A., H. Takeda, W. Oyanagi, E. Nishihara and M. Murakami. 2010. Reduction of cadmium uptake in spinach by soil amendment with animal waste compost. J. Hazard. Mater. 181: 298-304.
27. Singh, K. K., M. Talat, and S. H. Hasan. 2006. Removal of lead from aqueous solutions by agricultural waste maize bran. Bioresource Technol. 97: 2124-2130.
28. Stevenson, F. J. 1994. Reactive functional groups. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions, 2nd ed. 212–234. John Wiley & Sons, New York.
29. Sud, D., G. Mahajan and M.P. Kaur. 2008. Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions – A review. Bioresource Technol. 99: 6017-6027.
30. Sun, Q., X. R. Wang, S.M. Ding and X. F. Yuan. 2005. Effects of exogenous organic chelators on phytochelatins production and its relationship with cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) under cadmium stress. Chemosphere 60: 22-31.
31. Takijima, Y., F. Katsumi and S. Koizumi. 1973. Cadmium contamination of soils and rice plants caused by zinc mining: III. Effects of water management and applied organic wastes on the control of Cd uptake by plants. Soil Sci. Plant Nutr. 19: 183-193.
32. Wang, K. R. and H. Q. Gong. 1996. Comparative studies on the difference of the uptake and redistribution of environmental Cd by two rice genotypes. AGRO-Environ. Protection 15: 145-149.
33. Wenzel, W. W., W. E. H. Blum, A. Brandstetter, F. Jockwer, A. Koechl and M. Oberforster. 1996. Effects of soil properties and cultivar on cadmium accumulation in wheat grain. Z. Pflanzenern Bodenk 159: 609-614.
34. Xia, H. and G. D. Rayson. 2002. Cadmium NMR spectrometry of Cd^{2+} binding sites on algae and higher plant tissues. Adv. Environ. Res. 7: 157-167.
35. Zhang, G., M. Fukami and H. Sekimoto. 2000. Genotypic difference in effects of cadmium on growth and nutrition compositions in wheat. J. Plant Nutrition 23: 1337-1350.