تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۸، شمارهٔ ۴، آذر و دی ۱۳۹۶ (ص ۷۸۰-۷۷۱) DOI: 10.22059/ijswr.2017.214232.667525

اثر ورمی‌کمپوست غنی‌شده با سرباره آهن بر غلظت این عنصر در گیاه ذرت در خاکی آلوده به کادمیوم

سارا باقری[۱]، امیرحسین بقائی[۲*]، سید مهدی نبئی[۳]

۱.دانش‌آموخته گروه خاکشناسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک

۲. استادیار گروه خاکشناسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک

۳. مربی گروه باغبانی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۶/۲ – تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹- تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۰/۲۲)

چکیده

این تحقیق با هدف بررسی اثر ورمی‌کمپوست غنی‌شده با سرباره آهن بر تغییر قابلیت دسترسی آهن در یک خاک آلوده به کادمیوم انجام گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل کاربرد ۰، ۱۵ و ۳۰ مگاگرم در هکتار ورمی‌کمپوست غنی‌شده با ۰ و ۵ درصد وزنی آهن خالص از سرباره فولاد مبارکه اصفهان در خاکی با مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم و همراه با رشد گیاه ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) بوده است. افزایش کاربرد ورمی‌کمپوست غنی‌شده با سرباره از ۰ به ۱۵ و ۳۰ مگاگرم در هکتار در خاک آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک به ترتیب باعث افزایش ۱۳ و ۲۲ برابری در مقدار آهن قابل عصاره گیری با DTPA شد. مشابه این نتیجه، غلظت آهن شاخساره گیاه نیز بعد از ۶۰ روز از شروع آزمایش، به ترتیب ۴/۱۷ و ۱۴/۴ برابر افزایش یافت. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که کاربرد ورمی‌کمپوست غنی‌شده با ٪۵ آهن خالص احتمالاً توانسته است با تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک از قبیل پی اچ و گنجایش تبادل کاتیونی خاک، باعث افزایش قابلیت دسترسی آهن در خاک و گیاه شود، هرچند که نقش ورمی‌کمپوست در کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک و گیاه و به دنبال آن افزایش قابلیت دسترسی آهن در گیاه ذرت نبایستی نادیده گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: کادمیوم، سرباره آهن، ورمی‌کمپوست غنی‌شده، آهن

مقدمه

آهن اولین عنصر کم‌مصرف می‌باشد که ضرورت آن برای ادامه حیات گیاهان مشخص شده است. از آنجا که شکل‌گیری کلروفیل بدون حضور آهن ممکن نیست، بنابراین گیاهان، کمبود یا غیرفعال شدن آهن را با رنگ‌پریدگی و زردی (کلروزه شدن) برگ‌ای خود نشان می‌دهند. چون آهن در گیاه عنصری غیر پویا (کم‌تحرک) می‌باشد، کلروز آهن ابتدا روی برگ‌ها و شاخه‌های جوان ظاهر می‌شود. در مراحل اولیه، فضای مابین رگبرگ‌ها شروع به زرد شدن می‌کند و در مراحل پیشرفته رشد سرشاخه‌ها متوقف می‌شود. برگ‌های جوان در کمبود شدید ممکن است کاملاً بی‌رنگ شده و در نهایت ریزش یابند و یا اینکه کل برگ سفید و کوچک شود و لکه‌های نکروزه ای روی آن به وجود آید (Martínez-Cuenca, *et al.*, 2013). کاهش در رشد سرشاخه‌ها در گیاهان مبتلا به کمبود آهن، به علت تشکیل نشدن کلروفیل در برگ‌ها در اثر کمبود آهن و کاهش میزان فتوسنتز گیاه می‌باشد، همچنین مشخص شده است که در شرایط کاهش آهن قابل‌جذب خاک برای گیاه، رشد ریشه‌های اصلی کم شده و تعداد ریشه‌های جانبی به مقدار زیادی کاهش می‌یابد (Sánchez-Rodríguez, *et al.*, 2013).

کلروز آهن می‌تواند به دلیل غیرفعال شدن آهن و کم شدن فرم فعال آهن نسبت به غلظت کل آن و عدم شرکت آن در متابولیسم گیاه باشد. این حالت معمولاً در گیاهان رشد یافته در خاک‌های آهکی و دارای بیکربنات بالا در خاک و آب آبیاری ایجاد می‌گردد (Tagliavini and Rombolà, 2001). مهم‌ترین عامل ایجاد کمبود آهن پی اچ بالای خاک است که خود در اثر وجود کربنات کلسیم در خاک ایجاد می‌شود. اکثر خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ازلحاظ مقدار کربنات کلسیم غنی هستند و به همین دلیل کمبود آهن نیز غالباً در همین نواحی مشاهده می‌شود (Díaz, *et al.*, 2010).

امروزه برطرف کردن کمبود آهن به دلیل نقش و اهمیت حیاتی آن در زندگی گیاهان از اهمیت خاصی برخوردار است. ازجمله ترکیباتی که به این منظور استفاده می‌شود می‌توان به نمک‌های معدنی آهن (He, *et al.*, 2013)، املاح اسیدزا (Heidari, *et al.*, 2011)، ضایعات و تولیدات جانبی صنایع

*نویسنده مسئول : a-baghaie@iau-arak.ac.ir

(Wang and Cai, 2006) و کلات‌های آهن (Hasegawa, *et al.*, 2011) اشاره کرد. از بین ترکیبات مختلف به‌کاررفته، ترکیبات معدنی آهن به دلیلی حلالیت کم تأثیر چندانی در قابلیت دسترسی آهن خصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی کشور نداشته است ولی استفاده از کلات‌های مصنوعی آهن به‌عنوان روش مؤثری در درمان کمبود آهن شناخته شده است (Martínez-Cuenca, *et al.*, 2013). این مواد از ترکیب یک عامل کلات کننده با فلز تشکیل می‌شود. اصولاً پایداری فلز با کلات اغلب تعیین‌کننده قابلیت استفاده کلات به‌عنوان حامل فلز می‌باشد. با این وجود استفاده از این روش در بسیاری مواقع مقرون‌به‌صرفه نمی‌باشد. از ترکیبات دیگر مورداستفاده می‌توان به محصولات جانبی و ضایعات فرآیندهای صنعتی (Abbaspour, *et al.*, 2004) اشاره کرد که حاوی مقدار زیادی آهن می‌باشند، هرچند که شرایط فیزیکوشیمیایی خاک تا حدود زیادی می‌تواند قابلیت دسترسی عناصر ریزمغذی ازجمله آهن را تحت تأثیر قرار دهد.

کودهای آلی علاوه بر بهبود شرایط فیزیکی- شیمیایی خاک با تأمین اغلب عناصر ضروری، باعث افزایش عملکرد گیاهان می‌شوند (Iqbal, *et al.*, 2015)، هرچند که در بعضی مواقع این کودهای آلی فقیر از آهن می‌باشند (Melali and Shariatmadari, 2008). مواد آلی یکی از مهم‌ترین ترکیباتی هستند که با توجه به اثرات مفید و مؤثر آن‌ها در تغذیه گیاهی و بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی می‌توان از آن‌ها برای افزایش پایدار محصول و اصلاح خصوصیات نامطلوب خاک‌ها استفاده کرد (Sharifi and Renella, 2015)، هرچند که در بسیاری مواقع استفاده از این نوع کودهای آلی می‌تواند خطر ورود فلزات سنگین یا بیماری‌ها را به خاک افزایش دهد (Hei, *et al.*, 2016). همچنین با پیشرفت صنعت و تکنولوژی، آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین خصوصاً در شهرهای صنعتی مدام رو به افزایش است که با توجه به اثر برهمکنش فلزات سنگین و سایر عناصر غذایی مدیریت تغذیه عناصر غذایی ازجمله آهن می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد.

فرایند کمپوست شدن با استفاده از کرم‌های خاکی کمپوست کننده، برای تهیه ورمی‌کمپوست، به‌عنوان یک فناوری آسان و یک فرایند حامی طبیعت برای به دست آوردن کودهای آلی از مواد زائد، بسیار موردتوجه قرار گرفته است و در بسیاری مواقع غنی‌سازی این ترکیبات توانسته است نقش مؤثری در افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی در خاک و گیاه داشته باشد، هرچند که در این میان نقش برهمکنش عناصر نبایستی نادیده گرفته شود.

وجود ویژگی‌های آب و هوای نسبتاً خشک و نیمه‌خشک در منطقه مرکزی کشور (شهرستان اراک) ازجمله کمبود مواد آلی، پی اچ نسبتاً بالای خاکه‌ای منطقه و آلوده بودن خاک‌ها به فلزات سنگین ازجمله کادمیوم (Solgi, *et al.*, 2012)، قابلیت دسترسی عناصر ریزمغذی را تا حدود زیادی تحت تأثیر قرار داده است. با توجه به حجم زیاد ضایعات آلی ازجمله کود دامی، زباله شهری، لجن فاضلاب، بقایای گیاهی و تولید مقادیر فراوان ضایعات آلی حاوی آهن معدنی ازجمله ضایعات کارخانجات آهن و فولاد در کشور، پتانسیل مناسبی برای تولید کودهای آلی غنی‌سازی شده از آهن وجود دارد. به نظر می‌رسد استفاده از این ترکیبات نقش مؤثری در تغذیه آهن در گیاه و افزایش کیفیت کودهای آلی جهت بهبود حاصلخیزی خاک ایفا کند. غنی‌سازی کودهای آلی توسط ترکیبات معدنی از قبیل سرباره و لجن کنورتور به‌احتمال زیاد می‌تواند باعث کلاته شدن و افزایش حلالیت آهن در اثر واکنش با مواد آلی شود (Melali and Shariatmadari, 2008)، هرچند که ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک از قبیل اثر برهمکنش عناصر (Alidadi Khaliliha, *et al.*, 2016) می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت تغذیه‌ای عناصر ریزمغذی در خاک داشته باشد. با توجه به اثر احتمالی برهمکنش فلزات سنگین با عناصر ریزمغذی (Rezvani, *et al.*, 2012; Alidadi Khaliliha, *et al.*, 2016)، این تحقیق با هدف بررسی نقش غنی‌سازی ورمی‌کمپوست با سرباره شرکت فولاد مبارکه اصفهان در جهت مدیریت تغذیه آهن برای گیاه ذرت در یک خاک آلوده به کادمیوم در شرایط گلخانه صورت پذیرفت.

مواد و روش

این پژوهش به‌صورت یک آزمایش گلدانی با هدف بررسی اثر غنی‌سازی ورمی‌کمپوست با سرباره آهن بر تغییر قابلیت دسترسی آهن در یک خاک آلوده به کادمیوم در گلخانه‌ای در شهرک مهاجران واقع در بیست و پنج کیلومتری شهر اراک انجام پذیرفت. طرح آزمایشی موردنظر به‌صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل کاربرد ورمی‌کمپوست در سه سطح ۰ (V_0)، ۱۵ (V_{15}) و ۳۰ (V_{30}) مگاگرم در هکتار (Rahimi and Hashemi, 2016) به ترتیب معادل ۰، ۵/۵ و ۱۱ گرم ورمی‌کمپوست بر کیلوگرم خاک و کاربرد سرباره آهن به میزان ۰ (S_0) و ۵ (S_5) درصد وزنی به‌صورت آهن خالص از ترکیب سرباره فولادسازی (Melali and Shariatmadari, 2008) و آلودگی خاک به فلز سنگین کادمیوم از منبع نیترات کادمیوم در

سطوح ۰(Cd_0)، ۵ (Cd_5)، ۱۰ (Cd_{10}) و ۱۵ (Cd_{15}) میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک (Rezakhani, *et al.*, 2013; Mansouri, *et al.*, 2016) می‌باشد. جهت بررسی نقش غنی‌سازی ورمی‌کمپوست با سرباره آهن بر افزایش قابلیت دسترسی آهن در خاک و گیاه ذرت، خاکی با چهارده درصد کربنات کلسیم معادل و کربن آلی نسبتاً پائین از روستای پاکل واقع در ۳۰ کیلومتر اراک برداشت شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورداستفاده و همچنین ویژگی‌های ورمی‌کمپوست مورداستفاده به ترتیب در جدول شماره (۱ و ۲) ذکر شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک مورداستفاده در این پژوهش

پی اچ	قابلیت هدایت الکتریکی	کربن آلی	بافت خاک	کربنات کلسیم معادل خاک	سرب کل	کادمیوم کل	آهن کل	گنجایش تبادل کاتیونی
	($dS\ m^{-1}$)	(%)		Equilibrium(%)	($mg\ kg^{-1}$)	($mg\ kg^{-1}$)	($mg\ kg^{-1}$)	($cmol\ (+)kg^{-1}\ soil$)
۷/۲	۱/۰	۰/۱۸	Loam	۱۴	۳	۲	۳	۱۱/۹

جدول ۲. ویژگی‌های ورمی‌کمپوست مورداستفاده در این پژوهش

پی اچ	قابلیت هدایت الکتریکی	درصد کربن آلی	نیتروژن کل	آهن کل	آهن قابل‌جذب	سرب کل	کادمیوم کل
---	$dS\ m^{-1}$	%	%	($mg\ kg^{-1}$)	($mg\ kg^{-1}$)	($mg\ kg^{-1}$)	($mg\ kg^{-1}$)
۷/۳	۱۲/۸	۳/۳۳	۱/۵	۲۱۸۱	۷۷	۲	۱

نتایج تجزیه شیمیایی سرباره که به‌وسیله آزمایشگاه مرکزی شرکت فولاد مبارکه انجام شده است (جدول ۳) نشان می‌دهد که بیشتر از ۵۸/۲ درصد ترکیب این سرباره را اکسید آهن از نوع Fe_2O_3 و ۲۵ درصد این ترکیب را اکسید آهن دو ظرفیتی تشکیل داده است و عناصر کلسیم و سیلیسیم در درجه بعدی قرار دارد، هرچند که کیفیت سرباره به نوع کوره و تکنولوژی به‌کاربرده شده بستگی دارد و ترکیب شیمیایی آن در کارخانجات مختلف متفاوت است (Abbaspour, *et al.*, 2004). با توجه به درصد بالای آهن موجود در این ترکیب، غنی‌سازی ورمی‌کمپوست احتمالاً می‌تواند قابلیت دسترسی آهن در گیاه ذرت را تحت تأثیر قرار دهد که در ادامه به آن اشاره شده است.

جدول ۳. ویژگی‌های شیمیایی سرباره فولاد مبارکه مورداستفاده

عنصر	مقدار ($mg\ kg^{-1}$)	عنصر	مقدار ($mg\ kg^{-1}$)
Fe_2O_3	۵۸/۲	MnO	۲
FeO	۲۵	ZnO	۰/۰۵
CaO	۱۱	V_2O_5	۰/۲
SiO_2	۲/۱	S	۰/۲
MgO	۰/۱	Na_2O	۰/۱
Al_2O_3	۰/۲	K_2O	۰/۵
P_2O_5	۰/۳۵		

ورمی‌کمپوست با مقادیر فوق‌الذکر با سرباره آهن غنی‌شده و به مدت سه ماه در دمای اتاق (۲۵ ºC) به حالت خود رها شد (Melali and Shariatmadari, 2008)، از سویی دیگر، خاک مورداستفاده با روش اسپری در مقادیر فوق‌الذکر به فلز کادمیوم آلوده شد. جهت رسیدن به تعادل نسبی، نمونه خاک‌های آلوده‌شده به کادمیوم نیز مدت یک ماه به حالت خود رها شد (Motesharezadeh and SavaghebI, 2011). سپس ورمی‌کمپوست غنی‌شده در مقادیر ۰، ۱۵ و ۳۰ مگاگرم در هکتار به خاک آلوده به کادمیوم اضافه شده و خاک تیمار شده به مدت یک ماه داخل گلدان پلاستیکی ۵ کیلوگرمی به حال خود رها شد و در این مدت جهت به تعادل رسیدن مرتباً خاک تیمار شده تا حد رسیدن به ظرفیت زراعی مزرعه مرتباً تر و خشک شد (Melali and Shariatmadari, 2008). سپس داخل هر گلدان ۱۰ عدد بذر کاشته شده و بعد از استقرار گیاهان، شمار بوته‌ها به چهار عدد تنک گردید. به‌منظور نزدیک کردن به شرایط واقعی مزرعه سعی شد دمای گلخانه تقریباً متناسب با دمای رشد گیاه ذرت در طی فصل رشد گیاه در محیط مزرعه تنظیم گردد. سعی شد در دوران رشد جهت کنترل حشرات و بیماری‌ها از هیچ‌گونه سمی استفاده نگردد و تنها از طریق نصب کارت‌های زرد چسبنده در بالای سر گلدان‌ها از بروز آفاتی نظیر شته‌ها، مگس سفید و ... جلوگیری شد. همچنین برای جلوگیری و کنترل بیماری‌ها رطوبت محیط گلخانه تا حد ممکن پائین نگه داشته شد. در طول دوره رشد گیاه، عملیات آبیاری و وجین علف هرز ۳ تا ۴ روز یک‌بار به‌طور یکنواخت انجام شد. هر هفته یک‌بار نیز گلدان‌ها کاملاً جابجا شده تا تمامی گلدان‌ها در شرایط محیطی یکسان (نور و گرما) قرار گیرد.

برداشت بوته‌های گیاه ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) ۶۰ روز بعد از کاشت (Najafi, *et al.*, 2013) و هم‌زمان با مرحله ۶

تا ۷ برگی انجام شد. پس از برداشت، نمونه‌های گیاهی ابتدا با آب معمولی و سپس با آب دو بار تقطیرشده شسته شدند. ریشه و اندام هوایی از محل طوقه جدا، کاملاً شستشو داده شده و هرکدام جداگانه وزن و به داخل پاکت کاغذی منتقل گردید. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس در خشک‌کن قرار داده شد، سپس نمونه‌ها توسط آسیاب برقی به پودر تبدیل شده و در ظروف پلاستیکی نگه‌داری شد. نمونه‌ها در دمای ۴۸۰ درجه سلسیوس خاکستر و غلظت فلزات سنگین بعد از عصاره گیری نمونه‌های با اسیدکلریدریک دو نرمال با استفاده از دستگاه جذب اتمی پرکین المر مدل ۳۰۳۰ اندازه‌گیری شد (Lee, *et al.*, 2015). همچنین میزان کادمیوم کل موجود در نمونه خاک (Allen, *et al.*, 1986) و عناصر سنگین موجود در ورمی‌کمپوست (Westerman) توسط دستگاه جذب اتمی تعیین شد.

هم‌زمان با برداشت گیاه، از خاک گلدان‌های تحت کشت گیاه ذرت جهت تعیین ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک نمونه‌برداری شد. نمونه‌های خاک، پس از هواخشک شدن و کوبیدن، از الک ۲ میلی‌متری گذرانده و جهت تجزیه موردنظر به آزمایشگاه منتقل شدند. جهت اندازه‌گیری مقدار کربن آلی در نمونه خاک یا ورمی‌کمپوست از روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996) و گنجایش تبادل کاتیونی خاک به روش کلرید باریم اندازه‌گیری شد (Rhoades, 1982). بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986) اندازه‌گیری شد برای اندازه‌گیری pH و EC ورمی‌کمپوست از نسبت ۱:۵ کود به آب و در مورد نمونه خاک از عصاره اشباع خاک استفاده شده است (Saadat and Barani Motlagh, 2013). مقدار کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراسیون اسید اضافی با سود (Nelson, 1982) تعیین شد. مقدار نیتروژن ورمی‌کمپوست به روش کجلدال (Bremner) اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS 9.1 انجام گرفت و مقایسه‌های میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار MSTATC انجام و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شد، ضمناً برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده مدل رگرسیون برازش داده شده است.

نتایج و بحث

اثر باقیمانده تیمارهای مورد آزمایش

نتایج جدول (۴) حاکی از معنی‌دار بودن اثر ساده کاربرد ورمی‌کمپوست بر پی اچ خاک می‌باشد. کاربرد ۱۵ مگاگرم در هکتار ورمی‌کمپوست به خاک باعث افزایش معنی‌دار ۰/۴ واحدی در پی اچ خاک نسبت به خاک فاقد کاربرد ورمی-کمپوست شد، هرچند که اختلاف معنی‌داری بین کاربرد ۱۵ و ۳۰ مگاگرم در هکتار مشاهده نشد (شکل ۱). با توجه به بالا بودن قدرت بافری خاک مقادیر زیادی از کود آلی و مدت‌زمان طولانی لازم است تا تغییرات قابل‌توجهی در پی اچ خاک مشاهده گردد (Karami, *et al.*, 2009). لازم به ذکر است که اثر برهمکنش تیمارهای ورمی‌کمپوست، سرباره آهن و سرب بر پی اچ خاک معنی‌دار نشد (جدول ۴).

اضافه کردن کود آلی در بسیاری مواقع با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باعث افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی در خاک می‌شود، ولی از سویی دیگر افزایش پی اچ خاک در خاکه‌ای آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک احتمالاً تا حدودی می‌تواند مانع این قابلیت دسترسی عناصر غذایی ازجمله آهن به‌وسیله گیاه شود (Jokar and Ronaghi, 2015)، لذا غنی‌سازی کود آلی در بسیاری مواقع احتمالاً می‌تواند عامل مهمی در جهت افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی خاک شود.

Melali and Shariatmadari (2008) در تحقیقی به این نتیجه رسیدند که غنی‌سازی کود دامی باعث افزایش آهن قابل‌استخراج با DTPA و به عبارت دیگر جذب بیشتر آن توسط گیاه ذرت شده است، هرچند که در این تحقیق کاشت گیاه در یک خاک غیر آلوده مورد بررسی قرار گرفته است. اثر ساده کاربرد ۱۵ و ۳۰ مگاگرم ورمی‌کمپوست به ترتیب باعث افزایش گنجایش تبادل کاتیونی خاک از ۱۱/۹ در خاک فاقد کاربرد ورمی‌کمپوست به ۱۳/۸ و ۱۵/۷ سانتی مول بار بر کیلوگرم خاک شد (شکل ۱). مواد آلی نقش بسزایی بر تأمین مواد آلی، اثر بر افزایش غلظت عناصر ریزمغذی، افزایش گنجایش تبادل کاتیونی و اصلاح ساختمان خاک دارد (Das, *et al.*, 2016). استفاده از پسماندهای آلی علاوه بر تعدیل زیان‌های ناشی از کمبود ماده آلی خاک، سبب کاهش مصرف کودهای شیمیایی می‌گردد. قابل‌ذکر است که اثر ساده کاربرد ۱۵ و ۳۰ مگا گرم در هکتار ورمی‌کمپوست به ترتیب باعث ۰/۴ و ۰/۸ درصد در افزایش کربن آلی خاک شد.

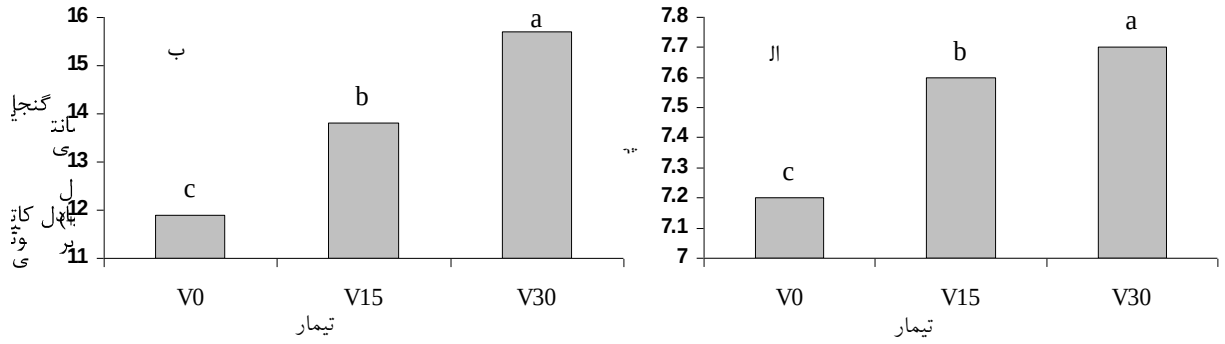
اثر برهم‌کنش تیمارهای آزمایش بر مقدار آهن قابل عصاره گیری با DTPA

نتایج جدول (۴) حاکی از معنی‌دار بودن اثر برهمکنش کاربرد ورمی‌کمپوست، سرباره آهن و نیترات کادمیوم بر مقدار آهن قابل عصاره گیری با DTPA می‌باشد. بیش‌ترین میزان آهن قابل عصاره گیری با DTPA در تیمار ۳۰ مگاگرم در هکتار

ورمی‌کمپوست غنی‌شده با سرباره آهن در خاک غیرآلوده به کادمیوم ($V_{30}S_5Cd_0$) و کمترین آن در خاک فاقد کاربرد ورمی‌کمپوست و آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک است. ($V_0S_0Cd_{15}$) مشاهده شد (جدول ۵).

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر ورمی کمپوست، سرباره آهن و کادمیوم بر ویژگی‌های شیمیایی خاک و غلظت آهن در خاک و گیاه

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		پی اچ	کربن آلی	گنجایش تبادل کاتیونی	مقدار آهن قابل عصاره‌گیری با DTPA	غلظت آهن ریشه ذرت	غلظت آهن شاخساره ذرت
بلوک	۳	۰/۰۳۵۳ ns	۰/۰۰۳۰ ns	۰/۰۰۳۸ ns	۱/۰۰۵۰ **	۲۵۴/۲۰۱ **	۳۳/۵۵۲۶ **
کود	۳	۱/۸۰۰۶ **	۳/۸۴۱۷ **	۸۲/۲۵۱۵ **	۲۳۲۴/۳۳۶۲ **	۷۴۲۰۰۱/۳۳۶ **	۴۳۶۰۷/۴۶۴۳ **
سرباره	۲	۰/۰۷۲۲ ns	۰/۰۰۰۹ ns	۰/۰۱۴۴ ns	۸۲۵۳۹/۸۴۵۰ *	۵۰۴۶۲۴۰/۹۰۹ **	۳۶۳۳۷/۵۸۶۸ **
کادمیوم	۱	۰/۰۸۴۰۲ ns	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۰۰۱۵ ns	۱۵۴۵/۰۳۸۷۰ **	۹۱۳۶۴/۲۴۲ **	۵۳۵۷/۷۳۴۵ **
سرباره × کود	۲	۰/۰۹۲۸ ns	۰/۰۰۱۰ ns	۰/۰۱۳۶ ns	۱۲/۶۶۱۲ **	۹۶۲۴۵/۹۶۳ **	۱۰۱۳۶/۹۳۰۱ *
کود × کادمیوم	۶	۰/۰۹۷۶ ns	۰/۰۰۱۶ ns	۰/۰۰۳۲ ns	۴۱/۴۴۶۶ **	۲۴۰۲/۱۱۸ **	۶۰۷/۰۱۵۴ **
سرباره × کادمیوم	۳	۰/۱۱۴۵ ns	۰/۰۰۰۵ ns	۰/۰۰۴۱ ns	۲۹۵/۵۰۵۳ **	۲۱۷۷۳/۷۸۹ **	۸۸۳/۹۹۹۴ **
سرباره × کادمیوم × کود	۶	۰/۰۹۷۸ ns	۰/۰۰۱۵ ns	۰/۰۰۱۹ ns	۶/۵۰۴۹ **	۲۳۸۵/۴۷۸ **	۳۸۴/۵۸۶۰ **
خطا	۴۶	۰/۰۴۷۸	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۷	۰/۶۱۱۸	۲۵/۸۳۴	۲/۷۴۱۰
ضریب تغییرات	---	۱/۳	۱/۱	۲/۴	۳/۶	۴/۲	۳/۸



ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

شکل ۱. اثر ساده کاربرد ورمی‌کمپوست بر پ- هاش (الف) و گنجایش تبادل کاتیونی خاک (ب) خاک، V_0، V_{15} و V_{30} به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۱۵ و ۳۰ مگا گرم در هکتار ورمی‌کمپوست می‌باشد.

جدول ۵. اثر کاربرد ورمی‌کمپوست، سرباره آهن و کادمیوم بر مقدار آهن قابل عصاره گیری با DTPA

تیمار	V_0S_0	V_0S_5	$V_{15}S_0$	$V_{15}S_5$	$V_{30}S_0$	$V_{30}S_5$
Cd_0	۶/۰^{q}*	۸۳/۲^{f}	۲۳/۱^{n}	۹۸/۲^{c}	۳۴/۶^{l}	۱۱۵/۰^{a}
Cd_5	۲/۰^{r}	۷۸/۴^{g}	۱۸/۰^{o}	۹۰/۹^{d}	۲۸/۰^{m}	۱۰۲/۰^{b}
Cd_{10}	۱/۰^{r}	۶۵/۸^{j}	۱۳/۴^{p}	۷۶/۰^{h}	۲۲/۴^{n}	۸۷/۱^{e}
Cd_{15}	۰/۵^{r}	۵۶/۱^{k}	۴/۳^{q}	۶۸/۳^{i}	۱۶/۶^{o}	۷۶/۰^{h}

V_0، V_{15} و V_{30} به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۱۵ و ۳۰ مگا گرم در هکتار ورمی‌کمپوست، Cd_0، Cd_5، Cd_{10} و Cd15 به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، S_0 و S_5 کاربرد مقادیر ۰ و ۵ درصد وزنی آهن خالص از ترکیب سرباره آهن می‌باشد. * اعدادی که در هر ستون یا ردیف دارای حروف مشابه آماری می‌باشند ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند،

نتایج جدول (۵) حاکی از آن است که آلودگی خاک به فلز کادمیوم توانسته است تأثیر معنی‌داری در کاهش قابلیت دسترسی آهن در خاک داشته باشد، به نحوی که کاربرد ۱۵ و ۳۰ مگاگرم در هکتار ورمی‌کمپوست و غنی‌شده با ۵ درصد وزنی آهن خالص از ترکیب سرباره آهن فولادسازی در خاک آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک نسبت به تیمار

مشابه آن در خاک غیر آلوده به کادمیوم به ترتیب باعث کاهش ۳۰ و ۳۹ واحدی در مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA شده است. همچنین کاربرد ۱۵مگاگرم در هکتار ورمی‌کمپوست غنی‌شده و فاقد سرباره آهن در خاک آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک ($V_{15}S_0Cd_{10}$) نسبت به تیمار مشابه در خاک غیر آلوده به کادمیوم ($V_{15}S_0Cd_0$) به میزان ۱/۷ برابری کاهش در مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA شده است که این امر احتمالاً نشان‌دهنده اثر آنتاگونیستی بین کادمیوم وآهن قابل‌جذب می‌باشد (Karami and Ronaghi, 2016) و می‌تواند مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA جهت تأمین نیاز گیاه، گیاه را تحت تاثیر قرار دهد. Sharma, *et al.* (2003) در تحقیقی گزارش کردند که کاربرد کود آهن با افزایش مقدار آهن قابل‌دسترس خاک، توانسته است موجب کاهش پیوند فلز سنگین با عوامل کلاته کننده (عوامل کلاته کننده که در انتقال آهن در گیاه نقش دارند در شرایط کمبود آهن با فلز سنگین پیوند برقرار می‌کنند) و درنتیجه مقدار فلز سنگین کمتری جذب گیاه می‌شود.

از سویی دیگر نتایج این تحقیق حاکی از آن است که کاربرد کود آهن از منبع شیمیایی و آلی توانسته است نقش به سزایی در افزایش قابلیت دسترسی آهن در خاک آلوده به کادمیوم داشته باشد، به نحوی که کاربرد ۵ درصد وزنی آهن خالص از ترکیب سرباره آهن فولادسازی در خاک فاقد کاربرد ورمی‌کمپوست و آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم باعث افزایش ۷۷ واحدی در مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA شد که با در نظر گرفتن نقش مستقیم آهن در ساختار کلروفیل گیاه می‌تواند نقش مؤثری در رشد گیاه داشته باشد. Tafvizi and Motesharezadeh (2014) در تحقیقی گزارش کردند که کاربرد آهن از جذب فلز سنگین توسط گیاه جلوگیری و موجب کاهش اثرات آن در گیاه می‌شود.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد کاربرد منبع آلی آهن نیز تأثیر به سزایی در افزایش آهن قابل‌دسترس خاک داشته است، به نحوی که کاربرد ۱۵ و ۳۰ مگا گرم در هکتار ورمی‌کمپوست غنی‌شده با ۵ درصد وزنی آهن خالص از ترکیب سرباره آهن فولادسازی در خاک آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک نیز به ترتیب باعث افزایش ۱۲/۲ و ۲۰ واحدی در مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA شد. همچنین کاربرد تیمارهای مذکور در خاک آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم نیز به ترتیب باعث افزایش ۱۰/۲ و ۲۱/۳ واحدی در مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA شد که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش کاربرد ورمی‌کمپوست در افزایش مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA دانست. از سویی دیگر کاربرد ورمی‌کمپوست احتمالاً می‌تواند با افزایش ویژگی‌های جذبی خاک نظیر افزایش گنجایش تبادل کاتیونی خاک (شکل ۱) باعث کاهش قابلیت دسترسی فلزات سنگین و درنتیجه باعث افزایش مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA شود. Sharifi *et al.*, (2010) در تحقیقی اثر کاربرد کود گاوی و لجن فاضلاب را بر غلظت کادمیم قابل‌دسترس در خاک مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بخش معدنی و آلی موجود در این ترکیبات نقش مهمی در کاهش قابلیت دسترسی کادمیم دارد. همچنین Molaei *et al.*, (2016) در تحقیقی گزارش کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست اثر معنی‌داری بر کاهش غلظت کادمیوم شاخساره ذرت داشته است.

همچنین نتایج جدول (۶) حاکی از معنی‌دار بودن مدل برازش داده‌شده بین تیمارهای به کار برده شده در این تحقیق و مقدار آهن قابل عصاره گیری با DTPA می‌باشد، قابل‌ذکر است که ۹۸ درصد تغییرات مقدار آهن قابل عصاره گیری با DTPA را می‌توان بر اساس تیمارهای به کار برده شده در این تحقیق بر اساس مدل ذیل می‌توان توجیه کرد:

$$Y_z = 11.46 + 0.69\ V_i + 13.54\ S_k - 1.43\ Cd_j \quad R^2 = 0.98$$

که در این تحقیق V_i، S_k و Cd_j به ترتیب شامل سطوح ورمی‌کمپوست، سرباره و کادمیوم به کار برده شده در این تحقیق و Y_z نشان‌دهنده مقدار آهن قابل عصاره گیری با DTPA می‌باشد.

جدول ۶. تجزیه رگرسیون اثر کاربرد ورمی‌کمپوست، سرباره و کادمیوم بر صفات موردراندازه‌گیری در این تحقیق

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		مقدار آهن قابل عصاره گیری با DTPA	غلظت آهن ریشه ذرت	غلظت آهن شاخساره ذرت
رگرسیون	۳	۳۰۸۰۴**	۲۲۵۰۱۴۰**	۴۶۳۳۹**
خطا	۶۸	۱۸/۲۵	۵۰۳۱/۶۶	۴۳۶/۴۱

** معنی‌دار بودن در سطح احتمال یک درصد می‌باشد.

غلظت آهن ریشه و شاخساره ذرت

جدول (۴) حاکی از معنی‌دار بودن اثر برهمکنش کاربرد ورمی-کمپوست، سرباره آهن و نیترات کادمیوم بر غلظت آهن در ریشه گیاه می‌باشد. بیشترین مقدار غلظت آهن در ریشه ذرت در تیمار خاک تیمار شده با تیمار ۳۰ مگاگرم در هکتار ورمی‌کمپوست غنی‌شده با سرباره آهن در خاک غیر آلوده به کادمیوم (V30S5Cd0) و کمترین آن در خاک فاقد کاربرد ورمی‌کمپوست و آلوده به ۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک (V0S0Cd5) مشاهده شد (جدول ۷). قابل‌ذکر است که غلظت آهن ریشه در تیمارهای فاقد کاربرد کود و سرباره در خاک‌های آلوده به ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم قابل‌اندازه‌گیری به‌وسیله دستگاه جذب اتمی نبود.

جدول ۷. اثر کاربرد ورمی‌کمپوست، سرباره آهن و کادمیوم بر غلظت آهن ریشه ذرت

تیمار	V_0S_0	V_0S_5	$V_{15}S_0$	$V_{15}S_5$	$V_{30}S_0$	$V_{30}S_5$
Cd_0	۵۰/۴^{q}*	۵۱۱/۴^{h}	۲۱۱/۰^{m}	۹۱۸/۱^{b}	۳۰۵/۰^{k}	۱۰۰۰/۰^{a}
Cd_5	۳۰/۴^{r}	۴۴۲/۰^{i}	۱۸۱/۰^{n}	۷۱۲/۰^{e}	۲۵۱/۶^{l}	۹۲۵/۳^{b}
Cd_{10}	ND**	۳۸۹/۰^{j}	۱۶۴/۳^{o}	۶۶۴/۰^{f}	۲۱۷/۲^{m}	۸۳۱/۱^{c}
Cd_{15}	ND	۳۱۲/۰^{k}	۱۲۲/۳^{p}	۵۸۸/۶^{g}	۱۸۹/۰^{n}	۷۸۲/۳^{d}

V_0، V_{15} و V_{30} به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۱۵ و ۳۰ مگا گرم در هکتار ورمی‌کمپوست، Cd_0، Cd_5، Cd_{10} و Cd15 به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، S_0 و S_5 کاربرد مقادیر ۰ و ۵ درصد وزنی آهن خالص از ترکیب سرباره آهن می‌باشد. * اعدادی که در هر ستون یا ردیف دارای حروف مشابه آماری می‌باشند ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارندND : قابل‌اندازه‌گیری به‌وسیله دستگاه جذب اتمی نبود.**

کاربرد ۱۵ و ۳۰ مگا گرم در هکتار ورمی‌کمپوست غنی‌شده با ۵ درصد آهن خالص از منبع سرباره آهن در خاک آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک به ترتیب باعث افزایش ۱/۸ و ۲/۵ برابری در غلظت آهن ریشه گیاه شد. همچنین کاربرد تیمارهای مذکور در خاک آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم نیز به ترتیب باعث افزایش ۱/۷ و ۲/۱ برابری در غلظت آهن ریشه گیاه شد که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش کاربرد ورمی‌کمپوست در افزایش مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA و به دنبال آن جذب بیشتر آهن توسط ریشه گیاه ذرت دانست. از سویی دیگر کاربرد ورمی‌کمپوست احتمالاً توانسته است با افزایش ویژگی‌های جذبی خاک باعث کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک (Molaei, *et al*., 2016) و درنتیجه افزایش قابلیت دسترسی آهن در خاک و درنتیجه جذب بیشتر آهن توسط ریشه گیاه شود.

همچنین نتایج این پژوهش حاکی از آن است که افزایش آلودگی به کادمیوم نقش مؤثری در کاهش غلظت آهن ریشه گیاه داشته است، به صورتی که کاربرد ۱۵ و ۳۰ مگا گرم در هکتار ورمی‌کمپوست غنی‌شده با ۵ درصد وزنی آهن خالص از ترکیب سرباره آهن فولادسازی در خاک آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک نسبت به تیمار مشابه در خاک آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم به ترتیب باعث کاهش معنی‌دار ۷۶ و ۴۸/۹ واحدی در غلظت آهن ریشه گیاه ذرت شده است که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش اثر آنتاگونیستی کادمیوم و آهن در کاهش غلظت کادمیوم ریشه گیاه دانست. نتایج مشابه مشاهده در مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA نیز تأکیدی بر این ادعا است. Alidadi Khaliliha *et al*., (2016) در تحقیقی اثر برهم‌کنش آهن و کادمیوم بر رشد و جذب آن‌ها در شاهی را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که فلزات سنگین قابلیت دسترسی و جذب آهن در آپوپلاست ریشه، جذب به درون سلول‌های ریشه، انتقال به ساقه و جذب و تحلیل در برگ‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ورمی‌کمپوست، بیشترین تمایل جذب سطحی را در بین فلزات سنگین نسبت به کادمیوم دارد. کمپلکس شدن عناصر سنگین توسط گروه‌های عامل مواد آلی و واکنش فلزات سنگین با ترکیبات معدنی موجود در ورمی-کمپوست، در کاهش جذب آن توسط گیاه مؤثر است (Molaei, *et al*., 2016).

بیشترین مقدار آهن شاخساره گیاه هم‌زمان با کاربرد ۳۰ مگا گرم در هکتار ورمی‌کمپوست غنی‌شده با ۵ درصد وزنی آهن خالص از ترکیب سرباره آهن فولادسازی در خاک غیر آلوده به فلز سنگین (V30S5Cd0) مشاهده شد، این در حالی است که کمترین مقدار آهن شاخساره گیاه در خاک آلوده به ۵ میلی‌گرم کادمیوم و فاقد کاربرد ورمی‌کمپوست و سرباره آهن (V0S0Cd5) مشاهده شد. قابل‌ذکر است که مقدار آهن شاخساره گیاه در تیمارهای فاقد کاربرد کود و سرباره در خاک‌های آلوده به ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم قابل‌اندازه‌گیری به‌وسیله دستگاه جذب اتمی نبود (جدول ۷). نتایج مشابهی در مورد غلظت آهن ریشه گیاه تأکیدی بر این ادعا است.

نتایج جدول (۶) حاکی از معنی‌دار بودن مدل برازش

داده‌شده بین تیمارهای به‌کاربرده شده در این تحقیق و مقدار آهن ریشه گیاه ذرت می‌باشد، قابل‌ذکر است که ۹۵ درصد تغییرات مقدار آهن قابل عصاره گیری با DTPA را می‌توان بر اساس تیمارهای به‌کاربرده شده در این تحقیق بر اساس مدل ذیل می‌توان توجیه کرد:

$Y_z= 52.66+11.52\ V_i+105.89\ S_k - 10.93\ Cd_j \quad R^2=0.95$

که در این تحقیق V_i، S_k و Cd_j به ترتیب شامل سطوح ورمی‌کمپوست، سرباره و کادمیوم به‌کاربرده شده در این تحقیق و Y_z مقدار آهن ریشه گیاه ذرت می‌باشد.

کاربرد ۱۵ و ۳۰ مگا گرم در هکتار ورمی‌کمپوست در خاک آلوده به ۵ میلی‌گرم کادمیوم به ترتیب باعث افزایش ۶/۷ و ۷/۳ برابری در میزان آهن شاخساره گیاه شد (جدول ۸) که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش کاربرد ورمی‌کمپوست در افزایش مقدار آهن قابل عصاره گیری به‌وسیله DTPA و به دنبال آن جذب بیشتر آهن توسط ریشه و درنهایت شاخساره گیاه دانست، هرچند که نقش کاربرد ورمی‌کمپوست در افزایش ویژگی‌های جذبی خاک و به دنبال آن کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک و درنتیجه افزایش قابلیت دسترسی آهن در خاک نبایستی نادیده گرفته شود. نتایج تحقیق Malekzadeh *et al.*, (2012) در مورد اثر برهمکنش کادمیوم با عناصر غذایی می‌تواند تأکیدی بر این ادعا باشد.

غنی‌سازی ورمی‌کمپوست نیز نقش مؤثری در افزایش غلظت آهن شاخساره گیاه داشت، به نحوی که غنی‌سازی ۱۵ و ۳۰ مگاگرم در هکتار ورمی‌کمپوست با ۵ درصد وزنی آهن خالص از ترکیب سرباره آهن در خاک آلوده به ۵ میلی‌گرم کادمیوم به ترتیب باعث افزایش ۲/۲ و ۲/۶ برابری در میزان آهن شاخساره گیاه شد که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش اثر رقابتی آهن و کادمیوم در قابلیت دسترسی آهن در خاک و به دنبال آن جذب آهن توسط ریشه و شاخساره گیاه دانست که این می‌تواند نکته مثبتی در مدیریت تغذیه عناصر غذایی گیاه در خاک‌های آلوده به شمار آید. از سویی دیگر کاربرد ورمی‌کمپوست احتمالاً توانسته است با افزایش ویژگی‌های جذبی خاک و کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک (داده‌ها نشان داده نشده است)، باعث افزایش قابلیت دسترسی آهن در خاک و به دنبال آن جذب آهن بیشتر توسط ریشه و شاخساره گیاه شود.

جدول ۸. اثر کاربرد ورمی‌کمپوست، سرباره آهن و کادمیوم بر غلظت آهن شاخساره ذرت

تیمار	V_0S_0	V_0S_5	$V_{15}S_0$	$V_{15}S_5$	$V_{30}S_0$	$V_{30}S_5$
Cd_0	۸/۰^{m*}	۳۱/۰^{j}	۵۴/۱^{g}	۱۲۱/۷^{d}	۶۷/۰^{f}	۱۶۲/۱^{a}
Cd_5	۵/۰^{n}	۱۶/۲^{l}	۴۱/۰^{h}	۹۲/۳^{e}	۵۴/۰^{g}	۱۴۴/۳^{b}
Cd_{10}	ND**	۹/۱^{m}	۳۲/۶^{j}	۳۸/۰^{i}	۴۲/۱^{h}	۱۳۱/۱^{c}
Cd_{15}	ND	۳/۰^{n}	۲۶/۴^{k}	۳۱/۴^{j}	۳۲/۰^{j}	۱۲۱/۰^{d}

V_0، V_{15} و V_{30} به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۱۵ و ۳۰ مگا گرم در هکتار ورمی‌کمپوست، Cd_0، Cd_5، Cd_{10} و Cd15 به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، S_0 و S_5 کاربرد مقادیر ۰ و ۵ درصد وزنی آهن خالص از ترکیب سرباره آهن می‌باشد. * اعدادی که در هر ستون یا ردیف دارای حروف مشابه آماری می‌باشند ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند،ND : قابل‌اندازه‌گیری به‌وسیله دستگاه جذب اتمی نبود.**

افزایش آلودگی خاک نیز کاهش معنی‌داری را در غلظت آهن شاخساره گیاه نشان داد، به نحوی که هم‌زمان با افزایش آلودگی خاک از ۵ به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، مقدار آهن شاخساره گیاه ذرت هم‌زمان با کاربرد ۱۵ و ۳۰ مگاگرم در هکتار ورمی‌کمپوست غنی‌شده با ۵ درصد وزنی آهن خالص از ترکیب سرباره آهن به ترتیب ۲/۴ و ۱/۲ برابر کاهش یافت. نتایج مشابهی در خاک فاقد کاربرد ورمی‌کمپوست نیز مشاهده شد، به نحوی که با افزایش آلودگی خاک از ۰ به ۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، مقدار آهن شاخساره گیاه ذرت به ترتیب ۱/۶ و ۱/۹ برابر کاهش یافت. Karami and Ronaghi (2016) نیز آلودگی خاک به کادمیوم را عامل مؤثری در کاهش جذب آهن توسط گیاه یونجه دانستند.

نتایج جدول (۶) حاکی از معنی‌دار بودن مدل برازش داده‌شده بین تیمارهای به‌کاربرده شده در این تحقیق و مقدار آهن شاخساره گیاه ذرت می‌باشد، قابل‌ذکر است که ۸۲ درصد تغییرات مقدار آهن شاخساره گیاه ذرت را می‌توان بر اساس تیمارهای به‌کاربرده شده در این تحقیق بر اساس مدل ذیل می‌توان توجیه کرد:

$Y_z= 7.37+2.83\ V_i+8.98\ S_k - 2.63\ Cd_j \quad R^2=0.82$

که در این تحقیق V_i، S_k و Cd_j به ترتیب شامل سطوح ورمی‌کمپوست، سرباره و کادمیوم به‌کاربرده شده در این تحقیق و Y_z مقدار آهن شاخساره گیاه ذرت می‌باشد

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که کاربرد ۱۵ و ۳۰ مگاگرم در هکتار ورمی‌کمپوست احتمالاً می‌تواند نقش مؤثری در افزایش قابلیت دسترسی آهن در خاک و گیاه ذرت در خاک آلوده به کادمیوم داشته باشد و در این میان کاربرد نقش سرباره آهن در غنی‌سازی ورمی‌کمپوست در جهت افزایش قابلیت دسترسی آهن توسط گیاه ذرت بسیار مؤثر بوده است، هرچند که اثر برهم‌کنش کادمیوم و آهن عامل مؤثری در میزان آهن قابل‌دسترس گیاه ذرت بوده است، به نحوی که نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش آلودگی خاک به کادمیوم باعث کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک شده است. افزایش ویژگی‌های جذبی خاک از قبیل گنجایش تبادل کاتیونی درنتیجه کاربرد ورمی‌کمپوست خاک، احتمالاً از یک‌سو توانسته است باعث کاهش قابلیت دسترسی فلز سنگین در خاک و با توجه به اثرات برهمکنش آهن با کادمیوم، قابلیت دسترسی آهن در خاک افزایش یابد. نتایج کلی این تحقیق حاکی از آن است که کاربرد ۳۰ مگاگرم در هکتار ورمی‌کمپوست غنی‌شده با سرباره آهن بالاترین راندمان قابلیت دسترسی آهن در خاک آلوده به کادمیوم را داشته است. هرچند که نقش میزان آلودگی خاک در این میان نبایستی نادیده گرفته شود. قابل‌ذکر است که نوع منبع آلودگی خاک نیز می‌تواند تأثیر به‌سزایی در تغییر غلظت آهن در گیاه داشته باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق توصیه می‌شود نتایج این مطالعه در محیط مزرعه نیز مورد بررسی قرار گرفته و نقش غنی‌سازی ورمی‌کمپوست با سرباره آهن بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

REFERENCES

Abbaspour, A., Kalbasi, M. and Shariatmadari, H. (2004). Effect of steel converter sludge as iron fertilizer and soil amendment in some calcareous soils. *Journal of plant nutrition*, 27, 377-394.

Alidadi Khaliliha, M., Dordipour, E. and Barani Motlagh, M. (2016). Interactive effect of iron and lead on growth and their uptake in Cress (*Lepidium sativum* L.). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5, 41-59 (InFarsi).

Allen, S. E., Grimshaw, H. M. and Rowland, A. P. (1986). Chemical analysis. In. *Methods in Plant Ecology*. P. D. Moore and Chapman, S. B. Oxford, London, Blackwell Scientific Publication**:** 285-344.

Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-total. In D. L. Sparks (eds.) Methods of Soil Analysis. Part 3 , 3rd Ed., American Society of Agronomy., Madison. WI

Das, A., Patel, D. P., Lal, R., Kumar, M., G.I, R., Layek, J., Buragohain, J., Ngachan, S. V., Ghosh, P. K., Choudhury, B. U., Mohapatra, K. P. and Shivakumar, B. G. (2016). Impact of fodder grasses and organic amendments on productivity and soil and crop quality in a subtropical region of eastern Himalayas, India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216, 274-282.

Díaz, I., Barrón, V., Del Campillo, M. and Torrent, J. (2010). Testing the ability of vivianite to prevent iron deficiency in pot-grown grapevine. *Scientia horticulturae*, 123, 464-468.

Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In *Methods of Soil Analysis*. A. Klute. Madison, WI, American Society of Agronomy**:** 383-409.

Hasegawa, H., Rahman, M. A., Saitou, K., Kobayashi, M. and Okumura, C. (2011). Influence of chelating ligands on bioavailability and mobility of iron in plant growth media and their effect on radish growth. *Environmental and Experimental Botany*, 71, 345-351.

He, W., Shohag, M. J. I., Wei, Y., Feng., Y. and Yang, X. (2013). Iron concentration, bioavailability, and nutritional quality of polished rice affected by different forms of foliar iron fertilizer. *Food Chemistry*, 141, 4122-4126.

Hei, L., Jin, P., Zhu, X., Ye, W. and Yang, Y. (2016). Characteristics of Speciation of Heavy Metals in Municipal Sewage Sludge of Guangzhou as Fertilizer. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 232-240.

Heidari, M., Galavi, M. and Hassani, M. (2011). Effect of sulfur and iron fertilizers on yield, yield components and nutrient uptake in sesame (*Sesamum indicum* L.) under water stress. *African Journal of Biotechnology*, 10, 8816-8822.

Iqbal, H., Garcia-Perez, M. and Flury, M. (2015). Effect of biochar on leaching of organic carbon, nitrogen, and phosphorus from compost in bioretention systems. *Science of the Total Environment*, 521, 37-45.

Jokar, L. and Ronaghi, A. (2015). Effect of foliar application of different Fe levels and sources on growth and concentration of some nutrients in sorghum. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 6, 163-174 (In Farsi).

Karami, M., Afyuni, M., Rezaee Nejad, Y. and Khosh Goftarmanesh, A. (2009). Cumulative and residual effects of sewage sludge on zinc and copper concentration in soil and wheat. *Journal of Water and Soil Science.*, 12, 639-654 (In Farsi).

Karami, S. and Ronaghi, A. (2016). Interaction Effects of Cadmium and Wheat or Alfalfa Residues on Corn Yield and Nutrients Uptake. *Iranian Journal of Soil Research*, 30, 13-23.

Lee, P.-K., Choi, B.-Y. and Kang, M.J. (2015). Assessment of mobility and bio-availability of heavy metals in dry depositions of Asian dust and

implications for environmental risk. *Chemosphere*, 119, 1411-1421.

Malekzadeh, E., Alikhani, H., Savaghebi-Firoozabadi, G. and Zarei, M. (2012). Bioremediation of cadmium-contaminated soil through cultivation of maize inoculated with plant growth–promoting rhizobacteria. *Bioremediation Journal*, 16, 204-211.

Mansouri, T., Golchin, A. and Fereidooni, J. (2016). The Effects of EDTA and H2SO4 on Phyto-extraction of Pb from contaminated Soils by Radish. *J. Water Soil* 30, 194-209 (In Farsi).

Martínez-Cuenca, M.-R., Forner-Giner, M. Á., Iglesias, D. J., Primo-Millo, E. and Legaz, F. (2013). Strategy I responses to Fe-deficiency of two Citrus rootstocks differing in their tolerance to iron chlorosis. *Scientia Horticulturae*, 153, 56-63.

Martínez-Cuenca, M.-R., Forner-Giner, M. Á., Iglesias, D. J., Primo-Millo, E. and Legaz, F. (2013). Strategy I responses to Fe-deficiency of two Citrus rootstocks differing in their tolerance to iron chlorosis. *Scientia Horticulturae*, 153, 56-63.

Melali, A. R. and Shariatmadari, H. (2008). Application of Steel Making Slag and Converter Sludge in Farm Manure Enrichment for Corn Nutrition in Greenhouse Conditions. *Journal of Water and Soil Science*, 11, 505-513 (In Farsi).

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. *journal of Water and Soil Science*, 19, 113-124 (In Farsi).

Motesharezadeh, B. and SavaghebI, G., R (2011). Study of sunflower plant response to cadmium and lead toxicity by usage of PGPR in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 25, 1069-1079 (In Farsi).

Najafi, N., Sarhanghzadeh, E. and Oustan, S. (2013). Effects of NaCl salinity and soil waterlogging on the concentrations of some micronutrients in corn, single cross 704. *Water and Soil Science*, 23, 205-225 (In Farsi).

Nelson, D. W. and Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis. Part*, 3, 961-1010.

Nelson, R. E. (1982). Carbonate and gypsum. In. *Methods of Soil Analysis*. A. L. Page, Miller, R. H. and Rahimi, M. M. and Hashemi, A. (2016). Yield and Yield Components of Vetch (Vigna radiata) as Affected by the Use of Vermicompost and Phosphate Bio-fertilizer. *Scientific Journal Management System*, 10, 529-540 (In Farsi).

Rezakhani, L., Golchin, A. and Samavat, S. (2013). Effect of different rates of Cd on growth and chemical composition of spinach. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 7, 1136-1140.

Rezvani, M., Zaefarian, F. and Gholizadeh, A. (2012). Lead and nutrients uptake by aeluropus littoralis under different levels of lead in soil. *Water and Soil Science*, 22, 73-86 (In Farsi).

Rhoades, J. D. (1982.). Cation exchange capacity. In. *Methods of Soil Analysis*. A. L. Page, Miller, R. H. and Keeney, D. R. Madison, Wisconsin, USA, American Society of Agronomy**:** 149-157.

Saadat, K. and Barani Motlagh, M. (2013). Influence of Iranian natural zeolites, clinoptilolite on uptake of lead and cadmium in applied sewage sludge by Maize (*Zea mays.* L.). *Journal of Water and Soil Conservation*, 20, 123-143 (In Farsi).

Sánchez-Rodríguez, A., Canasveras, J., del Campillo, M., Barrón, V. and Torrent, J. (2013). Iron chlorosis in field grown olive as affected by phosphorus fertilization. *European journal of agronomy*, 51, 101-107.

Sharifi, M., Afyuni, M. and Khoshgoftarmanesh, A. H. (2010). Effects of sewage sludge, animal manure, compost and cadmium chloride on cadmium accumulation in corn and alfalfa. *Journal of Residuals Science and Technology*, 7, 219-225.

Sharifi, Z. and Renella, G. (2015). Assessment of a particle size fractionation as a technology for reducing heavy metal, salinity and impurities from compost produced by municipal solid waste. *Waste Management*, 38, 95-101.

Sharma, A., Johri, B., Sharma, A. and Glick, B. (2003). Plant growth-promoting bacterium Pseudomonas sp. strain GRP 3 influences iron acquisition in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilzeck). *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 887-894.

Solgi, E., Esmaili-Sari, A., Riyahi-Bakhtiari, A. and Hadipour, M. (2012). Soil contamination of metals in the three industrial estates, Arak, Iran. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 88, 634-638.

Tafvizi, M. and Motesharezadeh, B. (2014). Effects of Lead on Iron, Manganese, and Zinc Concentrations in Different Varieties of Maize (Zea mays). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45, 1853-1865.

Tagliavini, M. and Rombolà, A. D. (2001). Iron deficiency and chlorosis in orchard and vineyard ecosystems. *European Journal of Agronomy*, 15, 71-92.

Wang, X. and Cai, Q.-S. (2006). Steel Slag as an Iron Fertilizer for Corn Growth and Soil Improvement in a Pot Experiment1. *Pedosphere*, 16, 519-524.

Westerman , R. L. (Ed.). 1990. Soil testing and plant analysis. SSSA, No. 3, Madison,Wisconsin, USA.