

## اثر کمپوست زباله شهری غنی شده با خاکستر لاستیک بر غلظت روی در گیاه سورگوم در خاک آلوده به کادمیوم (مطالعه موردی: کمپوست زباله شهری اراک)

امیرحسین بقائی

استادیار، گروه خاکشناسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۸/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۹/۵)

### چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر کمپوست زباله شهری اراک، غنی شده با خاکستر لاستیک بر تغییر قابلیت دسترسی روی در یک خاک آلوده به کادمیوم انجام گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل کاربرد ۰، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک غنی شده با ۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار خاکستر لاستیک در خاکی با مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم و گیاه مورد نظر سورگوم (رقم کیمیا) بوده است. افزایش کاربرد کمپوست زباله شهری اراک از ۰ به ۱۵ تن در هکتار در خاک آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک باعث افزایش ۸۰ درصدی در مقدار روی قابل عصاره گیری با DTPA شد. مشابه این نتیجه، بعد از ۶۰ روز از شروع آزمایش در غلظت روی در شاخساره گیاه حاصل شد که ۶۰ درصد افزایش یافت. کاربرد خاکستر لاستیک نیز نقش مؤثری در افزایش قابلیت دسترسی روی داشت، به نحوی که غنی‌سازی ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری با خاکستر لاستیک در خاک آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم به ترتیب باعث افزایش ۲۲ و ۲۶ درصدی در غلظت روی قابل دسترس خاک شد، این در حالی است که غلظت روی در شاخساره گیاه نیز به ترتیب ۱۳ و ۲۰ درصد افزایش یافت. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که بیشترین غلظت روی در شاخساره گیاه همزمان با کاربرد ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک غنی شده با خاکستر لاستیک در خاک غیر آلوده به فلز کادمیوم بوده است، هر چند که در این میان نقش نوع گیاه و ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه در تغییر قابلیت دسترسی روی توسط گیاه نبایستی نادیده گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: روی، خاکستر لاستیک، کمپوست زباله شهری اراک، رقم کیمیا

### مقدمه

کمبود روی (Zn) یکی از اصلی‌ترین مشکلات تغذیه‌ای انسان‌ها است. این کمبود در سطح جهان، بیشتر در مناطقی مشاهده می‌شود که زندگی مردم به غلات به عنوان غذای اصلی وابسته است (Gupta and Gupta, 2014). کمبود روی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشورمان رو به افزایش است (Kashian and Fathivand, 2015). تخمین زده می‌شود که حدود یک سوم جمعیت جهان در معرض کمبود روی قرار دارند و هر ساله ۸۰۰۰۰۰ مرگ در جهان به کمبود روی نسبت داده می‌شود. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، کمبود روی در رتبه پنجم از بین ۱۰ فاکتور خطرناک در کشورهای در حال توسعه قرار دارد. در مقیاس جهانی و با در نظر گرفتن کشورهای در حال توسعه و کشورهای توسعه یافته، کمبود روی در رتبه یازدهم از بیست فاکتور خطرناک قرار می‌گیرد (Khoshgoftarmanesh, et al., 2005).

در اراضی زیر کشت غلات، کمبود عناصر غذایی کم مصرف، به ویژه روی، گسترش جهانی دارد. استفاده از کودهای آلی با تأمین عناصر ریزمغذی گیاه توانسته است تا حدودی بر عملکرد اغلب محصولات زراعی تأثیر به‌سزایی داشته باشد. با وجود اینکه سالانه مقدار زیادی از این عناصر کم مصرف توسط گیاه از خاک برداشته می‌شود ولی به تأمین مجدد آنها در خاک توجه کمی شده است. مقدار قابل جذب روی در اغلب خاک‌ها به ویژه خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل pH زیاد، مقدار زیاد آهک و کمبود ماده آلی خاک، در حد کمی قرار دارد (Aghili, et al., 2014). از سوی دیگر کودهای آلی علاوه بر بهبود شرایط فیزیکی- شیمیایی خاک با تأمین اغلب عناصر ضروری، باعث افزایش عملکرد گیاهان می‌شوند (Iqbal, et al., 2015)، هر چند که در بعضی مواقع این کودهای آلی فقیر از عناصر کم مصرف 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 خاک‌ها، برای افزایش پایداری محصول و

اصلاح ویژگی‌های نامطلوب خاک‌ها می‌توانند مؤثر باشند (Sharifi and Renella, 2015)، اما بسیاری مواقع، به دلیل وجود برخی محدودیت‌های زراعی، محیطی و اقتصادی، به کارگیری کود به تنهایی، راه حل مؤثری برای برطرف کردن کمبود عناصر غذایی از جمله روی نمی‌باشد. برخی از این محدودیت‌ها شامل پائین بودن قابلیت استفاده روی در نتیجه خشک شدن خاک سطحی، محدودیت‌های موجود در خاک زیر سطحی، برهم کنش عوامل بیماری‌زا، آلودگی محیط‌زیست، تخریب ساختمان خاک، برهم خوردن تعادل عناصر غذایی هستند. از سویی دیگر، با پیشرفت صنعت و تکنولوژی، آلودگی خاکها به فلزات سنگین خصوصاً در شهرهای صنعتی رو به افزایش است (Houshyar and Baghaei, 2017) که با توجه به برهمکنش فلزات سنگین و سایر عناصر غذایی مدیریت تغذیه عناصر غذایی از جمله روی می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد. بنابراین غنی‌سازی کودهای آلی (Melali and Shariatmadari, 2008) احتمالاً می‌تواند گامی مؤثر در جهت افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی از جمله روی در خاک باشد.

کمبود مواد آلی در خاک‌های مناطق مرکزی کشور (از جمله شهرستان اراک)، از یک سو و تولید انبوه مواد زائد و مشکلات زیست‌محیطی به دست آمده از سوی دیگر، ایجاب می‌کند که این مواد به نحو مطلوب و آگاهانه به عنوان کود آلی در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند (Norouzi, et al., 2015). از سویی دیگر، pH نسبتاً بالای خاکهای منطقه قابلیت دسترسی عناصر ریزمغذی از جمله روی را تا حدود زیادی تحت تأثیر قرار داده است. آلوده بودن خاکها به فلزات سنگین از جمله کادمیوم (Solgi, et al., 2012) نیز می‌تواند بر قابلیت دسترسی روی به دلیل اثر رقابتی این عناصر تأثیرگذار باشد. با توجه به اینکه لاستیک‌های فرسوده ماشین حاوی مقدار نسبتاً بالایی از فلز روی می‌باشند (تایر خودروهای سبک و سنگین به ترتیب تقریباً حاوی ۱/۲ و ۲/۱ درصد اکسید روی هستند، Bidaki, et al., 2012)، غنی‌سازی کودهای آلی از قبیل کمپوست زباله شهری اراک (با آلودگی نسبتاً پائین به فلزات سنگین) با خاکستر لاستیک احتمالاً می‌تواند پتانسیل مناسبی برای تولید کودهای آلی غنی‌سازی شده از روی باشد. بنابراین می‌توان با اتخاذ روشی مناسب از تایرهای فرسوده به عنوان منبع روی سود جست و همچنین از عواقب مضر ناشی از تجمع تایرها در محیط‌زیست جلوگیری به عمل آورد (Taheri, et al., 2011). قابل ذکر است که میزان آزادسازی روی توسط ذرات خرد شده لاستیک به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک وابستگی زیادی دارد (Rahimi, et al., 2015).

امروزه استفاده از خاکستر ذرات لاستیک در خاک‌های آهکی به عنوان یک کود مناسب روی می‌تواند کاربردهای بسیار خوبی داشته باشد (Bidaki, et al., 2012). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داده است که استفاده از خاکستر و ذرات خرد شده لاستیک‌های فرسوده سبب کاهش موضعی pH و در دسترس قرارگرفتن فسفر، آهن و روی شده است (Rahimi, et al., 2015). با توجه به مطالب ذکر شده در مورد نقش کاربرد خاکستر لاستیک در افزایش قابلیت دسترسی روی در خاک (Bidaki, et al., 2012)، به نظر می‌رسد استفاده از این ترکیبات نقش مؤثری در افزایش قابلیت دسترسی روی در گیاه و افزایش کیفیت کودهای آلی جهت بهبود حاصلخیزی خاک ایفا کند. غنی‌سازی کودهای آلی توسط ترکیبات معدنی به احتمال زیاد می‌تواند باعث کلاته شدن و افزایش حلالیت عناصر غذایی در اثر واکنش با مواد آلی شود (Melali and Shariatmadari, 2008). هر چند 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 اینکه سورگوم (رقم کیمیا) به عنوان گونه مناسب و مقاوم به آب و هوای نسبتاً خشک امروزه در مناطق مرکزی کشور توصیه می‌شود، با در نظر گرفتن آلودگی خاک‌های استان مرکزی به فلز کادمیوم (Baghaei, 2017) و اثر احتمالی برهمکنش فلزات سنگین با عناصر ریزمغذی (Rezvani, et al., 2012; Alidadi Khaliliha, et al., 2016)، این پژوهش با هدف بررسی نقش غنی‌سازی کمپوست زباله شهری اراک با خاکستر لاستیک در جهت مدیریت تغذیه روی برای گیاه سورگوم در یک خاک آلوده به کادمیوم در شرایط گلخانه صورت پذیرفت.

### مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت یک آزمایش گلدانی با هدف بررسی اثر غنی‌سازی کمپوست زباله شهری اراک با خاکستر لاستیک بر تغییر قابلیت دسترسی روی در یک خاک آلوده به کادمیوم در گلخانه‌های پژوهشی در شهرک مهاجران واقع در بیست‌وپنج کیلومتری شهر اراک انجام شد. طرح آزمایشی مورد نظر به صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی به تعداد ۷۲ گلدان شامل کاربرد کمپوست زباله شهری اراک در سه سطح صفر ( $V_0$ )، ۱۵ ( $V_{15}$ ) و ۳۰ ( $V_{30}$ ) تن در هکتار (Rahimi and Hashemi, 2016) و کاربرد خاکستر لاستیک به میزان صفر و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار (Rahimi, et al., 2015) و آلودگی خاک

کمپوست زباله شهری اراک و همچنین غلظت عناصر سنگین موجود در خاکستر لاستیک مورد استفاده به ترتیب در جدول (۱)، (۲) و (۳) ذکر شده است. قابل ذکر است که لاستیک مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه یزد تایر تهیه، خرد، در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد در کوره سوزانده و به خاکستر تبدیل شده است. غلظت فلزات سنگین موجود در خاکستر لاستیک (جدول ۳) به وسیله XRF<sup>۱</sup> تعیین گردید (Taheri, et al., 2011).

1- X-ray fluorescence

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش

pH	قابلیت هدایت الکتریکی (dS m <sup>-1</sup> )	کربن آلی (%)	بافت خاک	کربنات کلسیم معادل خاک Equilibrium (%)	کادمیوم کل (mg kg <sup>-1</sup> )	روی کل (mg kg <sup>-1</sup> )	گنجایش تبادل کاتیونی (cmol (+)kg <sup>-1</sup> soil)
۷/۱	۰/۷	۰/۱۲	Silt Loam	۱۲	۰/۶	۳	۱۱/۳

جدول ۲. ویژگی‌های کمپوست زباله شهری اراک مورد استفاده در این پژوهش

pH	قابلیت هدایت الکتریکی (dS m <sup>-1</sup> )	کربن آلی (%)	نیترژن کل (%)	روی کل (mg kg <sup>-1</sup> )	سرب کل (mg kg <sup>-1</sup> )	کادمیوم کل (mg kg <sup>-1</sup> )
---	۳/۴	۲/۲۵	۱/۴	۱۳۳	۱	۰/۵

جدول ۳. غلظت عناصر سنگین موجود در خاکستر لاستیک مورد استفاده در این پژوهش بر اساس میلی‌گرم بر کیلوگرم

عنصر	سرب	آهن	روی	کادمیوم
غلظت	۲/۴	۸۰/۳	۱۱۴۰۰	۰/۸

تنک گردید. در طول دوره رشد گیاه، عملیات آبیاری با آب مقطر و وجین علف هرز ۳ تا ۴ روز یکبار به‌طور یکنواخت انجام شد. لازم به ذکر است که در طول مدت آبیاری گلدان‌ها سعی شده است که هیچ آبی از گلدان خارج نگردد. هشت هفته بعد از کاشت برداشت بوته‌ها انجام شد (Farzanegan, et al., 2013). پس از برداشت، نمونه‌های گیاهی ابتدا با آب معمولی و سپس با آب دو بار تقطیر شده شسته شدند. ریشه و اندام هوایی از محل طوقه جدا، کاملاً شستشو داده شده و هر کدام جداگانه وزن و به داخل پاکت کاغذی منتقل گردید. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۱ درجه سلسیوس در خشک‌کن قرار داده شد، سپس نمونه‌ها توسط آسیاب برقی به پودر تبدیل شده و در ظروف پلاستیکی نگهداری شد. غلظت روی موجود در ریشه و شاخساره گیاه به روش اسید نیتریک ۱۳ نرمال اندازه‌گیری شد (Aghili, et al., 2014).

غلظت روی قابل دسترس موجود در خاک به روش DTPA و با استفاده از دستگاه جذب اتمی پریکین المر مدل

به فلز سنگین کادمیوم در سطوح صفر (Cd<sub>0</sub>)، ۵ (Cd<sub>5</sub>)، ۱۰ (Cd<sub>10</sub>) و ۱۵ (Cd<sub>15</sub>) میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک از منبع نیترات کادمیوم (Rezakhani et al., 2013; Mansouri, et al., 2016) بود. لازم به ذکر است که میزان خاکستر لاستیک بر اساس میزان سولفات روی توصیه شده (۴۰ کیلوگرم در هکتار) (Rahimi, et al., 2015) و با در نظر گرفتن میزان روی موجود در خاکستر لاستیک (۱/۱۴ درصد) محاسبه شده است. برای انجام این پژوهش، خاکی با ۱۲ درصد کربنات کلسیم معادل و کربن آلی نسبتاً کم از روستای پاکل واقع در ۳۰ کیلومتری اراک برداشت شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک،

کمپوست زباله شهری اراک با خاکستر لاستیک (۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) غنی شده و به مدت سه ماه در دمای اتاق (۲۱°C) به حالت خود رها شد (Melali and Shariatmadari, 2008) و در این مدت جهت به تعادل رسیدن، نمونه‌ها مرتباً تر و خشک شدند. از سویی دیگر، خاک مورد استفاده با روش اسپری در مقادیر فوق‌الذکر به فلز کادمیوم آلوده شد. برای رسیدن به تعادل نسبی، نمونه خاک‌های آلوده شده به کادمیوم نیز مدت یک ماه به حالت خود رها شد (Motesharezadeh and Savaghebi, 2011). سپس کمپوست زباله شهری غنی شده در مقادیر صفر، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار به خاک آلوده به کادمیوم اضافه شده و خاک تیمار شده به مدت یک ماه داخل گلدان پلاستیکی پنج کیلوگرمی به حال خود رها شد و در این مدت برای به تعادل رسیدن عناصر غذایی موجود در خاک، نمونه‌های تیمار شده تا حد رسیدن به ظرفیت زراعی مرتباً تر و خشک شد (Melali and Shariatmadari, 2008). سپس داخل هر گلدان ۱۰ عدد بذر گیاه سورگوم (رقم کیمیا) کاشته شده و بعد از استقرار گیاهان، شمار بوته‌ها به پنج عدد

1982) تعیین شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS 9.1 انجام گرفت و مقایسه‌های میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۱ درصد با استفاده از نرم‌افزار MSTATC انجام و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم گردید. ضمناً برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده مدل رگرسیون برازش داده شده است.

### نتایج و بحث

#### اثر کاربرد تیمارهای مورد آزمایش بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

نتایج جدول (۴) حاکی از معنی‌دار بودن اثر ساده کاربرد کمپوست زباله شهری اراک بر pH خاک می‌باشد. کاربرد ۱۵ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک به خاک باعث افزایش معنی‌دار ۰/۳ واحدی در pH خاک شد، هر چند که اختلاف معنی‌داری بین کاربرد ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک مشاهده نشد (شکل ۱-الف). با توجه به بالا بودن قدرت بافری خاک، مقادیر زیادی از کود آلی و مدت زمان طولانی لازم است تا تغییرات قابل توجه‌ای در pH خاک مشاهده گردد (Baghaie, et al., 2011). لازم به ذکر است که اثر برهمکنش تیمارهای کمپوست زباله شهری، خاکستر لاستیک و کادمیوم بر pH خاک معنی‌دار نشد (جدول ۴).

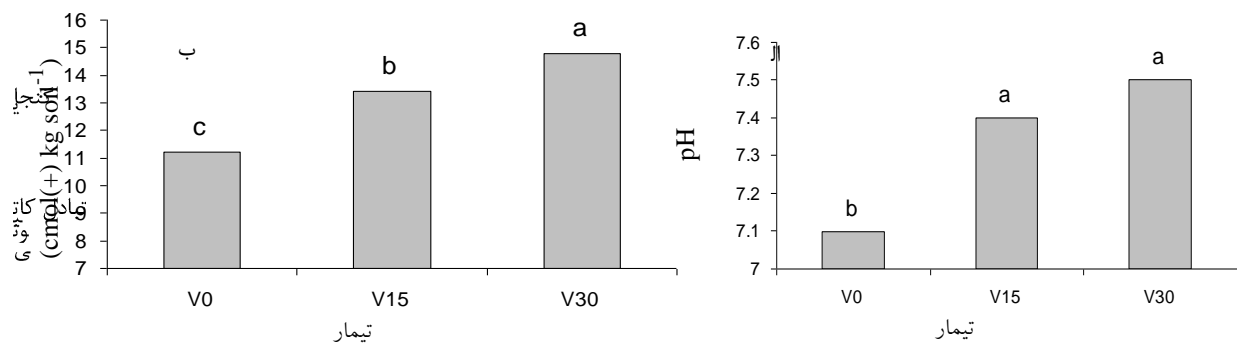
۳۰۳۰ اندازه‌گیری شد (Lindsay and Norvell, 1978). همچنین میزان روی و کادمیوم کل موجود در نمونه خاک (Allen, et al., 1986) و کادمیوم، سرب و روی کل موجود در کمپوست زباله شهری اراک با روش هضم با اسید فلوتوریک و تیزاب سلطانی (اسید نیتریک و اسید کلریدریک با نسبت ۱ به ۳) تعیین شد (Saadat and Barani Motlagh, 2013). برای اندازه‌گیری pH و EC کمپوست زباله شهری اراک 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 نیتروژن کمپوست زباله شهری اراک به روش کج‌لدال (Bremner, 1996) اندازه‌گیری شد.

همزمان با برداشت گیاه از خاک گلدان‌های تحت کشت گیاه سورگوم برای تعیین ویژگی‌های شیمیایی خاک (از قبیل pH، گنجایش تبادل کاتیونی خاک و کربن آلی و مقدار روی قابل دسترس خاک) نمونه‌برداری شد. نمونه‌های خاک، پس از هواخشک شدن و کوبیدن، از الک دو میلی‌متری گذرانده و به آزمایشگاه منتقل شدند. برای اندازه‌گیری مقدار کربن آلی در نمونه خاک یا کمپوست زباله شهری اراک از روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996) استفاده شد. گنجایش تبادل کاتیونی خاک به روش کلرید باریم اندازه‌گیری شد (Rhoades, 1982). بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986) و مقدار کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراسیون اسید اضافی با سود (Nelson,

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر کمپوست، خاکستر لاستیک و کادمیوم بر ویژگی‌های شیمیایی خاک و غلظت روی در خاک و گیاه

عملکرد	غلظت روی شاخساره	میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییر	
		مقدار روی قابل عصاره‌گیری با DTPA	گنجایش تبادل کاتیونی	کربن آلی			
۰/۰۰۳ <sup>ns</sup>	۳۴/۱۱۲۳ <sup>**</sup>	۱۲۳/۴۵۱۸ <sup>**</sup>	۳/۰۰۴۳ <sup>**</sup>	۰/۰۰۵۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۴۵ <sup>ns</sup>	۳	بلوک
۲/۴۰۱۵ <sup>**</sup>	۴۳۲۷/۵۴۳۶ <sup>**</sup>	۴۵۶۷۷/۲۳۶۴ <sup>**</sup>	۲۴۵۶/۴۳۶۲ <sup>*</sup>	۷۷/۴۵۳۳ <sup>**</sup>	۴/۶۳۳۳ <sup>**</sup>	۲	کود
۱/۰۵۶۰ <sup>*</sup>	۴۳۶۶۵/۱۲۳۴ <sup>**</sup>	۱۲۴۲۳۴/۴۴۴۵ <sup>**</sup>	۶۵۷۸۹/۸۵۱۲ <sup>*</sup>	۰/۰۲۳۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰۶ <sup>ns</sup>	۱	خاکستر
۲/۲۵۶۵ <sup>**</sup>	۱۰۱۳/۵۴۳۲ <sup>**</sup>	۹۲۳۴۵/۱۱۱۲ <sup>*</sup>	۱۲۴۳/۰۳۶۶ <sup>**</sup>	۰/۰۰۱۹ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰۵ <sup>ns</sup>	۳	کادمیوم
۰/۰۰۷۳ <sup>*</sup>	۱۱۲۳/۷۶۰۱ <sup>*</sup>	۸۷۲۳۱/۸۷۱۲ <sup>*</sup>	۳۴/۵۴۶۷ <sup>*</sup>	۰/۰۱۵۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۱۸ <sup>ns</sup>	۲	خاکستر × کود
۰/۰۶۸۵ <sup>**</sup>	۶۵۴/۰۱۳۳ <sup>*</sup>	۳۲۱۴/۱۱۲۳ <sup>**</sup>	۲۳/۴۴۵۶ <sup>**</sup>	۰/۰۰۴۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۲۳ <sup>ns</sup>	۶	کود × کادمیوم
۰/۰۰۵۹ <sup>**</sup>	۸۷۶/۸۷۶۵ <sup>**</sup>	۲۰۱۱۲/۶۷۵ <sup>**</sup>	۲۹۱/۰۱۳۱ <sup>**</sup>	۰/۰۰۶۵ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰۸ <sup>ns</sup>	۳	خاکستر × کادمیوم
۰/۰۱۳۱ <sup>**</sup>	۵۴۳/۵۴۳۲ <sup>**</sup>	۳۲۵۴/۴۳۲۴ <sup>**</sup>	۱۲۳/۰۴۵۰ <sup>**</sup>	۰/۰۰۵۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۵۴ <sup>ns</sup>	۶	خاکستر × کادمیوم × کود
۰/۰۰۳۹	۳/۶۵۱۰	۳۲/۷۶۵۴	۰/۴۵۶۷	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۰۳	۴۶	خطا
۲/۱۴۱۲	۴/۳۰۱۲	۳/۴۲۱۳	۱/۴۳۱۱	۴/۶۵۴۳	۲/۳۳۴۵	---	ضریب تغییرات

ns، \* و \*\* به ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۱ درصد



شکل ۱. اثر ساده کاربرد کمپوست زباله شهری اراک بر pH (الف) و گنجایش تبادل کاتیونی خاک (ب)، V<sub>0</sub>، V<sub>15</sub> و V<sub>30</sub> به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک می‌باشد.

هر چند کاربرد کمپوست زباله شهری تا حدودی باعث افزایش pH خاک نسبت به خاک فاقد کاربرد کود شده و احتمالاً این مسئله می‌تواند بر کاهش قابلیت دسترسی فلزات سنگین در خاک تأثیرگذار باشد ( Lindsay and Norvell, 1978)، لیکن این افزایش ممکن است باعث کاهش قابلیت دسترسی عناصر غذایی کم مصرف از قبیل روی نیز شود (Jokar and Ronaghi, 2015). بنابراین بایستی به دنبال راهکاری بود تا بتوان قابلیت دسترسی روی در خاک را افزایش داد. با توجه به اینکه کاربرد خاکستر لاستیک تأثیر معنی‌داری بر pH نداشته و از سویی دیگر به عنوان یک منبع غنی از روی به حساب می‌آید، غنی‌سازی کود آلی با این ترکیب می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش غلظت روی باشد که در ادامه به آن اشاره شده است. اثر ساده کاربرد ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک به ترتیب باعث افزایش گنجایش تبادل کاتیونی خاک از ۱۱/۲ (در خاک فاقد کاربرد کمپوست) به ۱۳/۴ و ۱۴/۸ سانتی‌مول بار

بر کیلوگرم خاک شد (شکل ۱-ب). همچنین اثر ساده کاربرد ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک به ترتیب باعث افزایش کربن آلی خاک به میزان ۰/۴ و ۰/۸ درصد شد.

اثر برهمکنش تیمارهای آزمایش بر مقدار روی قابل عصاره‌گیری با DTPA

نتایج جدول (۴) حاکی از معنی‌دار بودن اثر برهمکنش کاربرد کمپوست زباله شهری اراک، خاکستر لاستیک و کادمیوم بر مقدار روی قابل عصاره‌گیری با DTPA می‌باشد. بیشترین میزان روی قابل عصاره‌گیری با DTPA در تیمار ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک غنی‌شده با خاکستر لاستیک در خاک غیر آلوده به کادمیوم (V<sub>30</sub>S<sub>1</sub>Cd<sub>0</sub>) و کمترین آن در خاک فاقد کاربرد کمپوست زباله شهری اراک و آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک (V<sub>0</sub>S<sub>0</sub>Cd<sub>15</sub>) مشاهده شد (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میانگین مقدار روی قابل عصاره‌گیری با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمارهای مختلف

تیمار	V <sub>0</sub> S <sub>0</sub>	V <sub>0</sub> S <sub>1</sub>	V <sub>15</sub> S <sub>0</sub>	V <sub>15</sub> S <sub>1</sub>	V <sub>30</sub> S <sub>0</sub>	V <sub>30</sub> S <sub>1</sub>
Cd <sub>0</sub>	۰/۳۱ <sup>de</sup>	۰/۴۲ <sup>c</sup>	۰/۴۳ <sup>c</sup>	۰/۵۲ <sup>b</sup>	۰/۵۴ <sup>b</sup>	۰/۶۵ <sup>a</sup>
Cd <sub>5</sub>	۰/۲۴ <sup>gh</sup>	۰/۳۳ <sup>d</sup>	۰/۳۱ <sup>de</sup>	۰/۴۱ <sup>c</sup>	۰/۴۳ <sup>c</sup>	۰/۵۱ <sup>b</sup>
Cd <sub>10</sub>	۰/۱۵ <sup>ij</sup>	۰/۲۳ <sup>h</sup>	۰/۲۷ <sup>fg</sup>	۰/۳۳ <sup>d</sup>	۰/۳۴ <sup>d</sup>	۰/۴۳ <sup>c</sup>
Cd <sub>15</sub>	۰/۰۹ <sup>k</sup>	۰/۱۳ <sup>j</sup>	۰/۱۸ <sup>i</sup>	۰/۲۶ <sup>fgh</sup>	۰/۲۹ <sup>ef</sup>	۰/۳۴ <sup>d</sup>

V<sub>0</sub>، V<sub>15</sub> و V<sub>30</sub> به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک، Cd<sub>0</sub>، Cd<sub>5</sub>، Cd<sub>10</sub> و Cd<sub>15</sub> به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، S<sub>0</sub> و S<sub>1</sub> به ترتیب کاربرد ۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار خاکستر لاستیک می‌باشد. اعدادی که در هر ستون یا ردیف دارای حروف مشابه آماری می‌باشند از نظر آماری اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند.

نسبت به تیمار مشابه آن در خاک غیر آلوده به کادمیوم به ترتیب باعث کاهش ۲۲ و ۳۵ درصدی در مقدار روی قابل عصاره‌گیری به وسیله DTPA شده است. همچنین کاربرد ۱۵

نتایج جدول (۵) حاکی از آن است که کاربرد ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری غنی‌شده با خاکستر لاستیک در خاک آلوده به ۵ و ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک

کیلوگرم خاک نیز توانسته است باعث افزایش ۱۴/۷ درصدی در مقدار روی قابل عصاره گیری به وسیله DTPA شود که دلیل احتمالی آن را می توان به نقش خاکستر لاستیک در افزایش مقدار روی قابل عصاره گیری به وسیله DTPA دانست. کاربرد کمپوست زباله شهری اراک نیز تأثیر معنی داری در مقدار روی قابل دسترس خاک داشت، به نحوی که کاربرد ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک (فاقد خاکستر لاستیک) در خاک آلوده به ۱۵ میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک توانسته است باعث افزایش ۶۸/۹ درصدی در مقدار روی قابل عصاره گیری با DTPA نسبت به خاک شاهد شود. نتایج مشابهی در مورد کاربرد همین میزان کود در خاک آلوده به ۵ و ۱۰ میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک مشاهده شد که دلیل احتمالی آن را می توان به نقش کاربرد کمپوست زباله شهری در افزایش روی قابل عصاره گیری با DTPA دانست. (Sharifi et al. (2010 در پژوهشی به نقش کاربرد کمپوست زباله شهری در افزایش مقدار روی خاک اشاره کرده و به این نتیجه رسیدند که افزایش مقدار آهن و روی قابل جذب خاک در اثر کاربرد کودهای آلی را می توان به وجود مقدار قابل ملاحظه این فلزات در کودهای آلی نسبت داد.

نتایج جدول (۶) حاکی از معنی دار بودن مدل برازش داده شده بین تیمارهای به کار برده شده در این پژوهش و مقدار روی قابل عصاره گیری با DTPA می باشد،

تن در هکتار کمپوست زباله شهری غنی شده و غنی نشده در خاک آلوده به ۱۰ میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک نسبت به تیمار مشابه در خاک غیر آلوده به کادمیوم نیز نتایج مشابهی را در پی داشت. نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از آن بود که با افزایش آلودگی خاک، مقدار روی قابل عصاره گیری با DTPA کاهش یافته است که دلیل احتمالی آن را می توان به اثر منفی فلزات سنگین بر فعالیت موجودات زنده خاک (Wyszowska and Wyszowski, 2002) و در نتیجه کاهش قابلیت دسترسی عناصر غذایی از جمله روی نسبت داد. در بین عناصر کم مصرف، روی از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا این فلز یکی از عناصر غذایی ضروری است که در بسیاری از فرآیندهای زیستی نظیر فتوسنتز، فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانت، تشکیل پروتئین ها، فعالیت هورمونی و غیره نقش دارد (Zhao, et al., 2005).

کاربرد کود روی از منبع شیمیایی و آلی نیز توانسته است نقش به سزایی در افزایش قابلیت دسترسی روی در خاک آلوده به کادمیوم داشته باشد، به نحوی که کاربرد خاکستر لاستیک در خاک فاقد کاربرد کمپوست زباله شهری اراک و آلوده به ۱۰ میلی گرم کادمیوم باعث افزایش ۵۳ درصدی در مقدار روی قابل عصاره گیری به وسیله DTPA شد. کاربرد منبع آلی روی نیز تأثیر به سزایی در افزایش روی قابل دسترس خاک داشته است، به نحوی که غنی سازی ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری با خاکستر لاستیک در خاک آلوده به ۱۵ میلی گرم کادمیوم در

جدول ۶. جدول تجزیه واریانس رگرسیون اثر کاربرد رومی کمپوست، خاکستر لاستیک و کادمیوم بر صفات مورد اندازه گیری در این تحقیق

میانگین مربعات		مقدار روی قابل عصاره گیری با DTPA	درجه آزادی	منابع تغییر
غلظت روی در شاخساره سورگوم	غلظت روی در ریشه سورگوم			
**۴۱۴/۸۳	۱۲۹۹/۷۹**	**۰/۴۳۳۱۴	۳	رگرسیون
۱/۱۹	۷/۱۶	۰/۰۰۰۵	۶۸	خطا

\*\* معنی دار بودن در سطح احتمال یک درصد می باشد.

نیترا کادمیوم بر غلظت روی در ریشه گیاه معنی دار بود (جدول ۴). بیشترین مقدار غلظت روی در ریشه سورگوم در خاک تیمار شده با ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک غنی شده با خاکستر لاستیک در خاک غیر آلوده به کادمیوم ( $V_{30}S_1Cd_0$ ) و کمترین آن در خاک فاقد کاربرد کمپوست زباله شهری اراک و آلوده به ۱۵ میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک ( $V_0S_0Cd_{15}$ ) مشاهده شد (جدول ۷). کاربرد ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک غنی شده با خاکستر لاستیک در خاک آلوده به ۱۰ و ۱۵ میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک به ترتیب باعث افزایش ۳۶/۳ و ۴۶/۶ درصدی در غلظت روی

قابل ذکر است که ۹۷ درصد تغییرات مقدار روی قابل عصاره گیری با DTPA را می توان بر اساس تیمارهای به کار برده شده در این پژوهش بر اساس مدل ذیل توجیه کرد:

$$R^2=0.97 \quad Y_z=0.32 + 0.006 M_i + 0.0004 T_k - 0.01 Cd_j$$

که در این پژوهش  $M_i$ ،  $T_k$  و  $Cd_j$  به ترتیب شامل سطوح کمپوست زباله شهری اراک، کاربرد خاکستر لاستیک و کادمیوم به کار برده شده در این پژوهش و  $Y_z$  نشان دهنده مقدار روی قابل عصاره گیری با DTPA می باشد.

#### غلظت روی و عملکرد گیاه

اثر برهمکنش کاربرد کمپوست زباله شهری، خاکستر لاستیک و

ریشه گیاه شد که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش کاربرد کمپوست زباله شهری اراک در افزایش مقدار روی قابل عصاره- گیری به وسیله DTPA و به دنبال آن جذب بیشتر روی توسط ریشه گیاه سورگوم دانست.

جدول ۷. اثر کاربرد کمپوست زباله شهری، خاکستر لاستیک و کادمیوم بر غلظت روی ریشه و شاخساره سورگوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

تیما	$V_0S_0$	$V_0S_1$	$V_{15}S_0$	$V_{15}S_1$	$V_{30}S_0$	$V_{30}S_1$	شاخساره ریشه	شاخساره ریشه	شاخساره ریشه	شاخساره ریشه
Cd <sub>0</sub>	۳۰/۱ <sup>۱</sup>	۱۴/۱ <sup>۱</sup>	۳۵/۵ <sup>۱</sup>	۱۷/۸ <sup>۱</sup>	۴۰/۷ <sup>۱</sup>	۱۸/۲ <sup>۱</sup>	۴۴/۳ <sup>۱</sup>	۲۱/۳ <sup>۱</sup>	۴۵/۴ <sup>۱</sup>	۲۴/۲ <sup>۱</sup>
Cd <sub>5</sub>	۲۷/۲ <sup>۱</sup>	۱۱/۷ <sup>۱</sup>	۳۱/۳ <sup>۱</sup>	۱۳/۳ <sup>۱</sup>	۳۸/۱ <sup>۱</sup>	۱۶/۱ <sup>۱</sup>	۴۲/۴ <sup>۱</sup>	۱۸/۳ <sup>۱</sup>	۴۱/۳ <sup>۱</sup>	۲۰/۴ <sup>۱</sup>
Cd <sub>۱۰</sub>	۲۳/۸ <sup>۱</sup>	۹/۲ <sup>۱</sup>	۲۶/۴ <sup>۱</sup>	۱۰/۸ <sup>۱</sup>	۳۳/۱ <sup>۱</sup>	۱۴/۳ <sup>۱</sup>	۳۷/۳ <sup>۱</sup>	۱۶/۱ <sup>۱</sup>	۳۲/۳ <sup>۱</sup>	۱۸/۲ <sup>۱</sup>
Cd <sub>۱۵</sub>	۱۷/۳ <sup>۱</sup>	۷/۱ <sup>۱</sup>	۲۲/۱ <sup>۱</sup>	۸/۲ <sup>۱</sup>	۳۰/۵ <sup>۱</sup>	۱۲/۱ <sup>۱</sup>	۳۲/۲ <sup>۱</sup>	۱۴/۸ <sup>۱</sup>	۲۷/۸ <sup>۱</sup>	۱۴/۱ <sup>۱</sup>

$V_0, V_{15}, V_{30}$  به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۱۵، ۳۰ و ۱۵ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک، Cd<sub>0</sub>، Cd<sub>5</sub>، Cd<sub>10</sub> و Cd<sub>15</sub> به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، S<sub>0</sub> و S<sub>1</sub> به ترتیب کاربرد ۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار خاکستر می‌باشد. \* اعدادی که در هر پارامتر دارای حروف مشابه آماری می‌باشند از نظر آماری اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند.

درصد تغییرات مقدار روی موجود در ریشه گیاه سورگوم را می‌توان بر اساس تیمارهای به کار برده شده در این پژوهش بر اساس مدل ذیل می‌توان توجیه کرد:

$$Y_z = 33.25 + 0.39 V_i + 0.01 S_k - 0.92 Cd_j \quad R^2 = 0.88$$

که در این پژوهش  $V_i, S_k, Cd_j$  به ترتیب شامل سطوح ورمی کمپوست، خاکستر لاستیک و کادمیوم به کار برده شده در این پژوهش و  $Y_z$  مقدار روی در ریشه گیاه سورگوم می‌باشد.

بیشترین غلظت روی در شاخساره گیاه همزمان با کاربرد ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک غنی شده با خاکستر لاستیک در خاک غیر آلوده به فلز سنگین ( $V_{30}S_1Cd_0$ ) مشاهده شد، این در حالی است که کمترین غلظت روی در شاخساره گیاه در خاک آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، فاقد کاربرد کمپوست زباله شهری اراک و خاکستر لاستیک ( $V_0S_0Cd_{15}$ ) مشاهده شد (جدول ۷). نتایج مشابه در مورد عملکرد و غلظت روی در شاخساره گیاه باعث شده که کاربرد کمپوست زباله و خاکستر لاستیک نقش مهمی در افزایش جذب روی در شاخساره گیاه داشته باشند (جدول ۸). کاربرد ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک در خاک فاقد کاربرد کادمیوم به ترتیب باعث افزایش ۲۹ و ۵۳ درصدی در میزان روی در شاخساره گیاه شد (جدول ۷) که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش کاربرد کمپوست زباله شهری اراک در افزایش مقدار روی قابل عصاره گیری به وسیله DTPA و به دنبال آن جذب بیشتر روی توسط ریشه و در نهایت شاخساره گیاه دانست. غنی‌سازی کمپوست زباله شهری اراک نیز نقش مؤثری در افزایش غلظت روی در شاخساره گیاه داشت، به نحوی که غنی‌سازی ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک با خاکستر لاستیک در خاک آلوده به ۵ میلی‌گرم کادمیوم به ترتیب باعث افزایش ۱۲ و ۱۰/۲ درصدی

افزایش آلودگی خاک نقش مؤثری در تغییر غلظت روی در ریشه گیاه داشته است، به صورتی که کاربرد ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک غنی شده با خاکستر لاستیک در خاک آلوده به ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک نسبت به تیمار مشابه در خاک آلوده به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم باعث کاهش معنی‌دار ۱۳/۳ درصدی در غلظت روی ریشه گیاه سورگوم شده است که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش اثر آنتاگونیستی کادمیوم و روی در کاهش غلظت کادمیوم ریشه گیاه دانست. (Alidadi Khaliliiha et al., 2016) در تحقیقی اثر برهم‌کنش روی و کادمیوم را بر رشد و جذب آن‌ها در گیاه مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که فلزات سنگین قابلیت دسترسی و جذب عناصر غذایی در آپوپلاست ریشه، جذب به درون سلول‌های ریشه و انتقال به ساقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. (Sadeghi et al., 2017) در پژوهشی به بررسی اثر آنتاگونیستی کادمیم و روی بر رشد و ترکیب شیمیایی کلزا در یک خاک لومی شنی پرداخته و چنین گزارش کردند که افزایش سطح کادمیم در هر سطح کاربرد روی باعث کاهش مقدار روی در گیاه شده است. قابل ذکر است که نتایج بسیاری پژوهش‌ها حاکی از اثر آنتاگونیستی روی و کادمیوم داخل گیاه می‌باشد که دلیل احتمالی آن را به سیستم انتقال مشترکی در غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه در انتقال روی و کادمیوم نسبت داده‌اند (Hart, et al., 2002; Nan, et al., 2002). نتایج این پژوهش (جدول ۵) نیز حاکی از آن بود که در کلیه تیمارها با افزایش آلودگی خاک به فلز کادمیوم، غلظت روی قابل عصاره‌گیری با DTPA کاهش یافته است.

نتایج جدول (۶) حاکی از معنی‌دار بودن مدل برازش داده شده بین تیمارهای به کار برده شده در این پژوهش و مقدار روی در ریشه گیاه سورگوم می‌باشد، قابل ذکر است که ۸۸

Akoumianaki-Ioannidou, et al. (2015). نیز گزارش کردند که کاربرد روی در کلیه سطوح کادمیوم، باعث کاهش میزان دسترسی کادمیوم در گیاه و افزایش مقدار جذب روی در گیاه شده است.

در میزان روی شاخساره گیاه شد که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش کاربرد خاکستر لاستیک در افزایش قابلیت دسترسی روی در خاک و به دنبال آن جذب روی بیشتر توسط ریشه و شاخساره گیاه دانست که این می‌تواند نکته مثبتی در مدیریت تغذیه عناصر غذایی گیاه در خاکهای آلوده به شمار آید.

جدول ۸. اثر کمپوست زباله شهری، خاکستر لاستیک و کادمیوم بر جذب روی (میکروگرم در گلدان) و عملکرد گیاه سورگوم (گرم در گلدان)

تیما	V <sub>0</sub> S <sub>0</sub>	V <sub>0</sub> S <sub>1</sub>	V <sub>15</sub> S <sub>0</sub>	V <sub>15</sub> S <sub>1</sub>	V <sub>30</sub> S <sub>0</sub>	V <sub>30</sub> S <sub>1</sub>
	عملکرد	جذب	عملکرد	جذب	عملکرد	جذب
Cd <sub>0</sub>	۴/۵ <sup>ef</sup>	۶۴/۶ <sup>f</sup>	۴/۸ <sup>c</sup>	۸۵/۷ <sup>d</sup>	۴/۷ <sup>c</sup>	۸۷/۱ <sup>d</sup>
Cd <sub>5</sub>	۴/۳ <sup>hi</sup>	۵۰/۵ <sup>g</sup>	۴/۵ <sup>ef</sup>	۶۰/۶ <sup>f</sup>	۴/۸ <sup>c</sup>	۷۳/۷ <sup>e</sup>
Cd <sub>10</sub>	۴/۰ <sup>j</sup>	۳۶/۹ <sup>i</sup>	۴/۳ <sup>i</sup>	۴۵/۷ <sup>h</sup>	۴/۴ <sup>fg</sup>	۶۳/۶ <sup>f</sup>
Cd <sub>15</sub>	۳/۴ <sup>l</sup>	۲۴/۲ <sup>k</sup>	۳/۸ <sup>k</sup>	۳۱/۲ <sup>j</sup>	۴/۳ <sup>hi</sup>	۵۱/۴ <sup>g</sup>

V<sub>0</sub>, V<sub>15</sub>, V<sub>30</sub> به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک، Cd<sub>0</sub>, Cd<sub>5</sub>, Cd<sub>10</sub> و Cd<sub>15</sub> به ترتیب شامل کاربرد مقادیر ۰، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، S<sub>0</sub> و S<sub>1</sub> به ترتیب کاربرد ۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار خاکستر می‌باشد. \* اعدادی که در هر پارامتر دارای حروف مشابه آماری می‌باشند از نظر آماری اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند.

ورمی کمپوست، خاکستر لاستیک و کادمیوم به کاربرد شده در این پژوهش و Y<sub>z</sub> مقدار روی در شاخساره گیاه سورگوم می‌باشد

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که کاربرد ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک توانسته است نقش مؤثری در افزایش قابلیت دسترسی روی در خاک و گیاه سورگوم در خاک آلوده به کادمیوم داشته باشد و در این میان غنی‌سازی کمپوست زباله شهری اراک با خاکستر لاستیک نیز توانسته است نقش مؤثری در جهت افزایش قابلیت دسترسی روی توسط گیاه داشته باشد، به نحوی که کاربرد ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری اراک غنی‌شده با خاکستر لاستیک بالاترین راندمان قابلیت دسترسی روی در خاک آلوده به کادمیوم را داشته است. نقش آلودگی خاک در این میان نبایستی نادیده گرفته شود، چرا که افزایش آلودگی خاک به فلز کادمیوم باعث کاهش قابلیت دسترسی روی در ریشه و شاخساره گیاه شده است. با وجود پژوهش‌هایی که در مورد اثر آنتاگونیستی روی و کادمیوم داخل گیاه صورت گرفته است، ولی نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که با افزایش آلودگی خاک به فلز کادمیوم، مقدار روی قابل عصاره‌گیری با DTPA در کلیه تیمارها کاهش یافته است که دلیل احتمالی آن را به نقش کادمیوم در کاهش فعالیت زنده موجودات زنده و در نتیجه کاهش قابلیت دسترسی عناصر غذایی دانست. قابل ذکر است که نوع منبع آلودگی خاک نیز می‌تواند تأثیر بسزایی در تغییر غلظت روی در گیاه داشته باشد.

افزایش آلودگی خاک نیز کاهش معنی‌داری را در غلظت روی در شاخساره گیاه نشان داد، به نحوی که با افزایش آلودگی خاک از ۵ به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، مقدار روی در شاخساره گیاه سورگوم در تیمارهای ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست زباله شهری غنی‌شده با خاکستر لاستیک به ترتیب ۱۰ و ۱۲ درصد کاهش یافت. نتایج مشابهی در خاک فاقد کاربرد کمپوست زباله شهری اراک و خاکستر لاستیک نیز مشاهده شد، به نحوی که با افزایش آلودگی خاک از ۰ به ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، مقدار روی در شاخساره گیاه سورگوم ۳۴/۷ درصد کاهش یافت که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش اثر رقابتی کادمیوم و روی در جذب فلز روی دانست. Sadeghi et al. (2017) در پژوهشی گزارش کردند که افزایش سطح کادمیوم در هر سطح کاربرد روی باعث کاهش غلظت روی در بخش‌های هوایی گیاه شده و دلیل آن را اثر آنتاگونیستی این دو عنصر دانستند. آنها همچنین گزارش کردند که روی با جلوگیری از انتقال کادمیوم از طریق آوندهای آبکش، می‌تواند توزیع کادمیوم در گیاه را تحت تأثیر قرار دهد.

نتایج جدول (۶) حاکی از معنی‌دار بودن مدل برازش داده شده بین تیمارهای به کار برده شده در این پژوهش و مقدار روی در شاخساره گیاه سورگوم می‌باشد، قابل ذکر است که ۹۳ درصد تغییرات مقدار روی در شاخساره گیاه سورگوم را می‌توان بر اساس تیمارهای به کار برده شده در این پژوهش بر اساس مدل ذیل توجیه کرد:

$$Y_z = 14.93 + 0.21 M_i + 0.01 T_k - 0.53 Cd_j \quad R^2 = 0.93$$

که در این پژوهش M<sub>i</sub>، T<sub>k</sub> و Cd<sub>j</sub> به ترتیب شامل سطوح



نقش غنی‌سازی کمپوست زباله شهری با خاکستر لاستیک بر صفات زراعی گیاه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش توصیه می‌شود نتایج این مطالعه در محیط مزرعه نیز مورد بررسی قرار گرفته و

## REFERENCES

- Aghili, F., Gamper, H. A., Eikenberg, J., Khoshgoftarmanesh, A. H., Afyuni, M., Schulin, R., Jansa, J. and Frossard, E. (2014). Green manure addition to soil increases grain zinc concentration in bread wheat. *PloS one*, 9, 1-15.
- Akoumianaki-Ioannidou, A, Kalliopi, P., Pantelis, B. and Moustakas, N. (2015). The effects of Cd and Zn interactions on the concentration of Cd and Zn in sweet bush basil (*Ocimum basilicum* L.) and peppermint (*Mentha piperita* L.). *Fresenius Environ Bull*, 24, 77-83.
- 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 (In Farsi).
- 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.
- Baghaie A. (2017). Effect of municipal waste compost and zeolite on reduction of cadmium availability in a loamy soil (A case study: Arak municipal waste compost). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 6: 103-117 (In Farsi).
- Baghaie, A., Khoshgoftarmanesh, A. H., Afyuni, M. and Schulin, R. (2011). The role of organic and inorganic fractions of cow manure and biosolids on lead sorption. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57, 11-18.
- Bidaki, S. M. Y., Hajabbasi, M. A., Khoshgoftarmanesh, A. H. and Eshghizadeh, H. R. (2012). Effect of Waste Tire Rubber Particles on Some Chemical Properties of a Calcareous Soil. *Journal of Water and Soil Science*, 16, 101-115.
- Bremner, J. M. 1996. Nitrogen-total. In D. L. Sparks (eds.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3, 3<sup>rd</sup> Ed., American Society of Agronomy., Madison, WI.
- Farzanegan, Z., Savaghebi, G. H. and Hosseiny, H. M. S. (2013). Study of the Effects of Sulfur and Citric acid Amendment on Phytoextraction of Cd and Pb from Contaminated Soil. *Journal of Water and Soil*, 25, 736-745.
- 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.
- Gupta, U. C. and Gupta, S. C. (2014). Sources and Deficiency Diseases of Mineral Nutrients in Human Health and Nutrition: A Review. *Pedosphere*, 24, 13-38.
- Hart, J. J., Welch, R. M., Norvell, W. A. and Kochian, L. V. (2002). Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings. *Physiologia Plantarum*, 116, 73-78.
- Houshyar, P. and Baghaei, A.H. (2017). Effectiveness of DTPA Chelate on Cd Availability in Soils Treated with Sewage Sludge. *Journal of Water and Wastewater*, 28, 103-111 (In Farsi).
- 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).
- Kashian, S. and Fathivand, A. A. (2015). Estimated daily intake of Fe, Cu, Ca and Zn through common cereals in Tehran, Iran. *Food Chemistry*, 176, 193-196.
- Khoshgoftarmanesh, A., Shariatmadari, H., Karimian, N., Kalbasi, M. and Khajehpour, M. (2005). Zinc efficiency of wheat cultivars grown on a saline calcareous soil. *Journal of plant nutrition*, 27, 1953-1962.
- Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of American Journal*, 42, 421-428.
- Mansouri, T., Golchin, A. and Fereidooni, J. (2016). The Effects of EDTA and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on Phytoextraction of Pb from contaminated Soils by Radish. *Journal of Water and Soil* 30, 194-209 (In Farsi).
- 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).
- 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).
- Nan, Z., Li, J., Zhang, J. and Cheng, G. (2002). Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions. *Science of The Total Environment*, 285, 187-195.
- 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 Keeney, D. R. Madison, Wisconsin, USA, American Society of Agronomy: 181-197.

- Norouzi, M., Khoshgoftarmanesh, A. H. and Afyuni, M. (2015). Influence of Some Organic Fertilizers on Chemical Forms of Zinc in Soil Solid Phase in Relation to Zinc Uptake in Wheat. *Journal of Water and Soil Science*, 18, 81-90.
- 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).
- Rahimi, S., Afyuni, M., Khoshgoftarmanesh, A. H. and Norouzi, M. (2015). Assessment of Soil Quality Index with Zinc Fertilizer and its Concentration Wheat Grain. *Journal of Water and Soil Science*, 19, 47-57.
- 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 litoralis* 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).
- Sadeghi, S., Oustan, S., Najafi, N., Valizadeh, M. and Monirifar, H. (2017). Interaction Effects of Zinc and Cadmium on Growth and Chemical Composition of Canola (*Brassica napus* cv. Hyola) in a Loamy Sand Soil. *Water and Soil Science*, 26, 237-254.
- 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.
- 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.
- Taheri, S., Khoshgoftarmanesh, A. H., Shariatmadari, H. and Chaney, R. L. (2011). Kinetics of zinc release from ground tire rubber and rubber ash in a calcareous soil as alternatives to Zn fertilizers. *Plant and soil*, 341, 89-97.
- Wyszkowska, J. and Wyszkowski, M. (2002). Effect of cadmium and magnesium on microbiological activity in soil. *Polish Journal of Environmental Studies*, 11, 585-592.
- Zhao, Z.-Q., Zhu, Y.-G., Kneer, R. and Smith, S. (2005). Effect of zinc on cadmium toxicity-induced oxidative stress in winter wheat seedlings. *Journal of plant nutrition*, 28, 1947-1959.