



Effect of Organic Ligands on The Growth and Chemical Composition of Corn and The Release of Elements in a Soil Treated With Rubber Ash

F. Yadegari¹, M. Hamidpour^{*id}, A. Tajabadi Pour^{id} and P. Abbaszadeh-Dahaji^{id}

(Received: 5 December 2023; Accepted: 11 March 2024)

Abstract

One of the most important factors limiting the growth and yield of plants is the zinc deficiency. Considering the importance of recycling rubber tires and the possibility of using them in agriculture, the present study aims to investigate the effect of organic ligands on the availability of Zn in rubber ash-treated soils. The present research was carried out in factorial form in a completely randomized design with three replications under greenhouse conditions. The treatments included four levels of rubber ash (0, 0.25, 0.5 and 1 %w/w) and three levels of organic ligands (control, citric acid and EDTA with a concentration of 1.5 mmol kg⁻¹ soil). The results showed that the application of organic ligands in soils treated with rubber ash could not affect the vegetative traits of corn plants, while the concentration of Zn in the aerial organs and plant roots increased with the application of organic ligands in pots treated with rubber ash. The highest concentration of Zn was observed at the level of 1 %w/w rubber ash and with the use of EDTA ligand. In addition, the concentration of Zn extractable by DTPA in the soil increased significantly with the use of rubber ash treatment. The results also showed that the treatment of rubber ash, ligand and their interactive effects did not affect the concentration of Cd and Pb in plants. The results of this research showed that the tire rubber particles could provide zinc required by the plant in a short period of time. Of course, it is necessary to study the effects of gases produced during rubber ash production on human health and the environment.

Keywords: EDTA, Citric acid, Micronutrients, Slow-release fertilizers.

Background and Objective: Zinc deficiency has become a warning factor in many agricultural soils around the world, including Iran. In order to maximize the productivity of plants, it is imperative to ameliorate the issue of Zn deficiency (Nasirzadeh et al., 2023). Today, in addition to chemical fertilizers, the use of soil amendments such as municipal waste ash, animal and plant fertilizers, and biodegradable polymers has been considered. Tire rubber is rich in Zn and may be used as an effective and safe fertilizer source for supplying this nutrient with no risk of heavy metals contamination (Moghaddasi et al., 2015). It is reported that ground tire rubber and rubber ash are efficient amendments for increasing bioavailable Zn in calcareous soils (Nasirzadeh et al., 2023). The aim of the present study was to investigate the effect of tire rubber ash and organic ligands application on the bioavailability of Zn in a calcareous soil and uptake of this element by corn.

1- Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan.

* Corresponding author, Email: m.hamidpour@vru.ac.ir

Methods: The experiment was performed as factorial in a completely randomized design with three replications. Factors included tire rubber ash at four levels (0, 0.25, 0.5 and 1 %w/w) and organic ligand at three levels (control, citric acid and EDTA at concentrations of 1.5 mmol kg⁻¹). Before planting, soil samples (0–30 cm) from an agricultural field were collected, air-dried, and crushed to pass a 2-mm sieve. Samples of tire rubber debris were obtained from the Rubber Industry of Barez Tire in Iran. Rubber ash was produced by ashing ground tire rubber in a furnace at 550 °C for 12 h. Rubber ash was added to the pots at four levels (0, 0.25, 0.5 and 1 %w/w). The germinated corn seeds were planted in each pot, and each pot was irrigated with distilled water. After 7 weeks, seedlings were cut at the soil surface and the roots were washed free of soil. The concentrations of Zn, Fe, Pb and Cd in the shoot and root of corn plant and in the soil were measured by an atomic absorption spectrometry. Growth traits measured in this experiment include stem diameter and height, leaf area, shoot and root dry weights, and fluorescence chlorophyll.

Results: The results showed that the Zn concentration in the tire rubber ash samples was about 5%. The application of rubber ash did not significantly affect the growth traits (stem diameter and height, leaf area, shoot and root dry weights, and fluorescence chlorophyll). With increasing rubber ash levels, shoot and root Zn concentrations increased by 4- and 10-folds as compared to control, respectively. Furthermore, the application of EDTA ligand to the rubber ash treated-soil resulted in 8- and 72-fold increases in the shoot and root Zn concentrations as compared to the control, respectively. Additionally, adding rubber ash alone to soil and co-applying EDTA ligand and rubber ash increased bioavailable concentration of Zn by 132- and 161-folds, respectively, as compared to the control. At the highest level of rubber ash (i.e., 1 %w/w), with the application of EDTA ligand, the concentration of DTPA-extractable Fe in the soil increased by 33% compared to the treatment without ligand. The concentrations of Pb and Cd in the shoots and roots in all treatments was below the detection limit of atomic absorption spectrometry. Besides, single addition of rubber ash to soil and co-application of EDTA ligand and rubber ash increased the bioavailable concentration of Zn by 132- and 161-folds as compared to the control, respectively.

Conclusions: Results of this study showed that the use of rubber ash can increase the bioavailability of soil Zn and meet the plants need for zinc. Of course, it is necessary to study the effects of gases produced during rubber ash production on human health and the environment.

References:

1. Moghaddasi, S., Khoshgoftarmanesh, A.H., Karimzadeh, F., Chaney, R., 2015. Fate and effect of tire rubber ash nano-particles (RANPs) in cucumber. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 115, 137–143.
2. Nasirzadeh, A., Hamidpour, M., Abbaszadeh-Dahaji, P., Akhgar, A., Kariman, K., 2023. Zinc-solubilizing *Pseudomonas* strains improve zinc nutrition of maize plants grown in sand amended with tire waste powder. *J. Plant Nutr.* 46(14), 3450–3468, <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2206424>.

تأثیر لیگاندهای آلی بر رشد و ترکیب شیمیایی ذرت و آزادسازی عناصر در یک خاک تیمار شده با خاکستر لاستیک

فاطمه یادگاری^۱، محسن حمیدپور^{*}، احمد تاج آبادی پور و پیمان عباسزاده دهجی

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱)

چکیده

یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان کمبود روی است. با توجه به اهمیت بازیافت لاستیک‌های فرسوده و امکان استفاده از آن‌ها در کشاورزی، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر کاربرد خاکستر لاستیک و لیگاندهای آلی بر فراهمی عنصر روی در خاک و جذب آن توسط گیاه ذرت انجام شد. این پژوهش به صورت فاکتوریل با دو عامل خاکستر لاستیک در چهار سطح (۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی) و لیگاندهای آلی (شاهد، اسید سیتریک و EDTA با غلظت ۱/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه انجام شد. نتایج نشان داد کاربرد لیگاندهای آلی در خاک‌های تیمار شده با خاکستر لاستیک، نتوانست بر صفات رویشی گیاه ذرت تأثیرگذار باشد این در حالی است که غلظت روی شاخساره و ریشه گیاه با کاربرد لیگاندهای آلی در گلدان‌های تیمار شده با خاکستر لاستیک افزایش یافت. با کاربرد اسید سیتریک در تیمارهای دارای ۱ درصد وزنی خاکستر لاستیک افزایش سه برابری در غلظت روی شاخساره در مقایسه با شاهد (بدون تیمار) مشاهده شد. همچنین مقدار روی قابل عصاره‌گیری با DTPA در خاک با کاربرد سطوح ۰/۵ و ۱ درصد وزنی خاکستر لاستیک به ترتیب ۹۵ و ۱۷۵ برابر نسبت به سطح صفر خاکستر افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که به دلیل مقادیر اندک سرب و کادمیوم در لاستیک، غلظت کادمیوم شاخساره و ریشه گیاه در همه تیمارها کم‌تر از حد تشخیص دستگاه جذب اتمی بود و از طرف دیگر اثر اصلی تیمار خاکستر لاستیک، لیگاند و همچنین اثر برهمکنش آن‌ها بر غلظت سرب گیاه معنی‌داری نبود. یافته‌های این پژوهش نشان داد که ذرات لاستیک تأیر توانست در کوتاه‌مدت روی مورد نیاز گیاه را تأمین کنند. البته ضروری است آثار تولید خاکستر لاستیک بر سلامت انسان و محیط زیست بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: اسید سیتریک، کودهای کندرها، EDTA، عناصر کم‌مصرف.

مقدمه

(Kashian and Fathivand, 2007). pH و کربنات کلسیم زیاد

و ماده آلی کم از عواملی هستند که باعث کاهش فراهمی عناصر کم‌مصرف در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شوند

یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان در خاک‌های مناطق خشک کمبود عناصر کم‌مصرف است

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.hamidpour@vru.ac.ir

در خاک‌های کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند (Moghaddasi et al., 2015).

کاربرد اسیدهای آلی و آمینوکلات‌ها نیز به دلیل افزایش توانایی در تشکیل کمپلکس‌های محلول با فلزات نقش مهمی در فراهمی عناصر کم‌مصرف دارد (Drazic et al., 2006). کلات‌کننده‌های طبیعی (مانند اسید سیتریک) و مصنوعی (مانند EDTA) ترکیبات آلی محلولی هستند که قادرند با فلزاتی مانند آهن، روی، مس و منگنز تشکیل کمپلکس داده و باعث افزایش حلالیت، تحرک و جذب عناصر توسط گیاه شوند (Dessureault-Rompere et al., 2008). EDTA دارای قدرت کلات‌کنندگی قوی با فلزات بوده و به شدت بر گونه‌بندی شیمیایی عناصر و همچنین تحرک، حلالیت و فراهمی زیستی آن‌ها در فاز محلول خاک تأثیر می‌گذارد (Shahid et al., 2012). اما کلات EDTA نسبت به اسیدهای آلی تجزیه‌پذیری زیستی کمی داشته و ممکن است در درازمدت به صورت پایدار در محیط زیست باقی بماند و آثار نامطلوبی بر ریزجانداران و گیاهان داشته باشد و یا حتی منجر به انتقال فلزات سنگین به آب‌های زیرزمینی شود (Jez and Lestan, 2016; Wen et al., 2009). نتایج یک پژوهش نشان داد ۱۹ ماه پس از کاربرد این کلات در خاک، غلظت آن در منطقه ریشه گیاه قابل اندازه‌گیری بود (Bloem et al., 2016). یکی از مزایای اسید سیتریک در مقایسه با EDTA تأثیر مثبت آن بر رشد گیاهان است. اسید سیتریک یک اسید آلی طبیعی با تخریب‌پذیری زیستی زیاد (نیمه‌عمر حدود هشت روز) است (Sinhal et al., 2010). اما با توجه به این‌که کاربرد کلات‌های مصنوعی دارای هزینه زیادی است، از این‌رو با شرایط ذکر شده نیاز است که منبع مفید و کم-هزینه دیگری از روی به عنوان اصلاح‌کننده و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک به کار گرفته شود (Nasirzadeh et al., 2023).

تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه کاربرد لاستیک تایر و خاکستر حاصل از آن بر رشد گیاهان انجام شده است (Taheri et al., 2016; Nasirzadeh et al., 2023). اما پژوهش‌های اندکی در مورد اثر اسیدهای آلی بر آزادسازی روی از خاکستر لاستیک

(Karimi et al., 2019). کمبود روی در تعداد زیادی از خاک‌های کشاورزی دنیا از جمله ایران به یک عامل هشداردهنده تبدیل شده است. بر این اساس بخش عمده از خاک‌های ایران به دلیل آهکی بودن، روی قابل دسترس کمی دارند (Afyuni et al., 2007) و توزیع روی در خاک‌های آهکی به pH خاک، نوع کانی‌ها، و کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول خاک وابسته است (Saffari et al., 2009).

به منظور افزایش فراهمی روی در خاک‌های آهکی و رفع کمبود روی در گیاهان، علاوه بر سولفات روی از کلات‌های مصنوعی (Zn-EDTA و Zn-DTPA) نیز استفاده می‌شود (Alloway, 2008). امروزه، علاوه بر کودهای شیمیایی، استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک از جمله خاکستر پسماندهای شهری، انواع پلیمرهای نفتی و زیست‌تخریب‌پذیر، کودهای حیوانی و گیاهی، بقایای گیاهان زراعی و زغال‌های زیستی برای اصلاح ویژگی‌های خاک و بهبود فراهمی عناصر غذایی در خاک، مورد توجه قرار گرفته‌اند (Karimi et al., 2019).

لاستیک تایر معمولاً دارای یک تا پنج درصد وزنی روی است. از اکسید روی برای افزایش پایداری لاستیک در حین فرایند تولید لاستیک استفاده می‌شود (Liu et al., 2018). در این راستا استفاده از لاستیک تایر و خاکستر حاصل از آن به عنوان کود روی برای گیاهان مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Taheri et al., 2016; Nasirzadeh et al., 2023). بازیافت لاستیک تایر و استفاده از آن به عنوان یک منبع مؤثر و ایمن در تأمین روی مورد نیاز گیاه، منجر به احیای این پسماند، کاهش هزینه‌ها و حفظ محیط زیست می‌شود.

قیمت مناسب، وجود همزمان چند عنصر ضروری برای گیاه، سازگاری با شرایط خاک‌های کشور و کارایی مناسب زیست‌محیطی از مزایای کودهای تولیدشده با استفاده از لاستیک‌های فرسوده در مقایسه با سایر کودهای موجود در بازار است (Khoshgoftarmanesh and Sanaei Ostovar, 2010). لاستیک تایر و خاکستر حاصل از آن مقدار اندکی کادمیوم دارند و می‌توانند به عنوان بارورکننده‌های (کود) روی مؤثر و خالص

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی
Table 1. Physical and chemical properties of the studied soil

بافت	واکنش	رسانایی الکتریکی (EC _e)	گنجایش تبادل کاتیونی (CEC)	کربنات کلسیم معادل (CCE)	فسفر	روی	آهن	مس	منگنز	سرب	کادمیوم
Texture	pH	Electrical conductivity (EC _e)	Cation exchange capacity (CEC)	Calcium carbonate equivalent (CCE)	P	Zn	Fe	Cu	Mn	Pb	Cd
		(dS m ⁻¹)	(cmol _c kg ⁻¹)	(%)	Available concentration (mg kg ⁻¹)						
Sandy loam	7.30	4.20	8.50	25	15.6	0.7	1.1	0.9	1.08	0.3	0.01

و همچنین نقش این مواد در تأمین روی برای گیاه وجود دارد. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر کاربرد اسیدهای آلی بر آزادسازی و فراهمی عنصر روی در خاک‌های متأثر از خاکستر لاستیک، تحت کشت گیاه ذرت بود.

مواد و روش‌ها

به منظور انجام این پژوهش، نمونه خاک از یکی از مناطق کشاورزی شهرستان رفسنجان که از نظر غلظت روی قابل دسترس در سطح پایینی بود (با موقعیت ۳۰ درجه و ۳۱ دقیقه شمالی، ۵۰ درجه و ۱ دقیقه شرقی) انتخاب شد و نمونه برداری خاک از لایه صفر تا ۳۰ سانتی متری انجام شد. پس از هوا-خشک نمودن نمونه خاک تهیه شده و عبور آن از الک دو میلی متری، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن شامل pH در گل اشباع خاک توسط الکتروود شیشه‌ای، رسانایی الکتریکی (EC) عصاره گل اشباع با دستگاه رسانایی سنج، بافت خاک به روش هیدرومتری، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک، گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) به روش جانشینی کاتیون‌ها با استات سدیم، غلظت عناصر کم مصرف (روی، آهن، مس و منگنز) و غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم استخراج شده به وسیله DTPA با استفاده از دستگاه جذب اتمی (GBC Savant AA) بر اساس روش‌های استاندارد اندازه گیری شد (Estefan et al., 2012). (جدول ۱). در این پژوهش لاستیک تایر از تولیدات کارخانه بارز انتخاب شده و پس از جداسازی قسمت سیمی درون آن،

قطعات کوچک تر لاستیک به ذرات ریزتر پودری تبدیل شده و بخشی از آن در کوره الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت به خاکستر تبدیل شد. به منظور تعیین غلظت عناصر در خاکستر، ابتدا نیم گرم از نمونه خاکستر لاستیک با دو تکرار توزین شده و درون لوله‌های هضم ریخته شد. سپس ۱۴ میلی لیتر اسید (مخلوط اسید سولفوریک ۹۸ درصد و اسید نیتریک ۷۰ درصد با نسبت ۳:۱) به نمونه‌ها افزوده شده و به مدت دو ساعت در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس درون دستگاه هضم مایکروویو (مدل Microsynth ساخت شرکت Milestone) قرار داده شد تا هضم انجام شود. در نهایت غلظت عناصر روی، آهن، مس، منگنز، سرب و کادمیوم در عصاره توسط دستگاه جذب اتمی (GBC Savant AA) اندازه گیری شد (جدول ۲).

آزمون گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط کشت گلدانی ذرت انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل چهار سطح خاکستر لاستیک (۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی) و سه سطح لیگاند آلی (شاهد، EDTA و اسید سیتریک) بود. ابتدا تیمار خاکستر لاستیک بر حسب مقدار تعیین شده (۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی) به طور کامل با خاک مخلوط شده و به تیمارهای مربوطه در هر گلدان افزوده شد. پس از آماده سازی گلدان‌ها (۳۶ گلدان دو کیلو گرمی) در هر گلدان ۵ عدد بذر ذرت رقم سینگل کراس در عمق سه سانتی متری خاک کشت شد. پس از جوانه زنی بذر ها و در مرحله چهار برگه شدن گیاه، بوته‌های اضافی حذف شده و

جدول ۲. نتایج تجزیه عناصر خاکستر لاستیک تایر

Table 2. Results of analysis of tire rubber ash elements

عناصر Elements						غلظت Concentration
کادمیوم Cd	سرب Pb	منگنز Mn	مس Cu	آهن Fe	روی Zn	
100	1000	26400	16300	1800	52000	کل (میلی گرم بر کیلوگرم) Total (mg kg ⁻¹)

درجه سلسیوس به مدت سه ساعت گرما داده شد تا نمونه‌ها به خاکستر تبدیل شوند. سپس ۵ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک دو نرمال به هر نمونه افزوده شد تا به صورت محلول درآیند و در پایان حجم نمونه‌ها با آب مقطر به ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در عصاره به دست آمده غلظت عناصر روی، آهن، سرب و کادمیوم به وسیله دستگاه جذب اتمی (GBC Savant AA) اندازه‌گیری شد. همچنین پس از برداشت گیاهان از خاک تمامی گلدها نمونه‌برداری شد. غلظت عناصر روی، آهن، سرب و کادمیوم قابل استخراج با DTPA در خاک توسط دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی (GBC Savant AA) اندازه‌گیری شد.

نتایج حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. همچنین رسم نمودار با استفاده از Excel انجام شد.

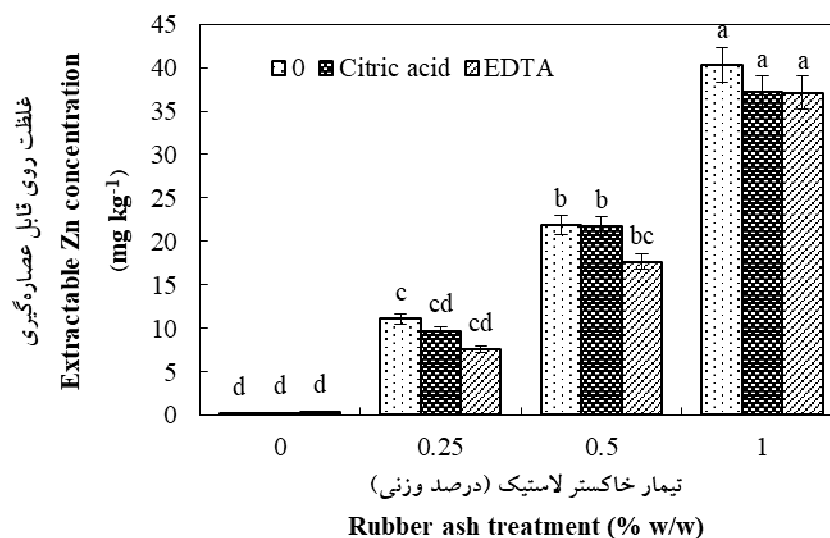
نتایج و بحث

روی قابل عصاره‌گیری با DTPA

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهمکنش بین تیمار خاکستر لاستیک و لیگاند بر غلظت روی قابل عصاره‌گیری با DTPA تأثیر معنی‌داری داشت (جدول تجزیه واریانس نشان داده نشده است). نتایج مقایسه میانگین نشان داد (شکل ۱)، در حضور و عدم حضور لیگاند، با افزایش سطوح خاکستر لاستیک، غلظت روی قابل استخراج با DTPA در خاک افزایش یافت. به عنوان مثال، در تیمار بدون لیگاند، غلظت روی از ۰/۲۳

در هر گلدان سه بوته نگهداری شد. تیمار لیگاندهای آلی اسید سیتریک و EDTA (با غلظت ۱/۵ میلی‌مول در کیلوگرم خاک) چهار هفته پس از کشت به صورت محلول همراه با آب آبیاری به گلدان‌ها افزوده شد. همچنین در طول دوره رشد، محلول غذایی دارای نیتروژن از منبع اوره (به مقدار ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) استفاده شد و در نهایت پس از گذشت ۵۰ روز از کشت گیاهان برداشت شدند. ویژگی‌های رویشی اندازه‌گیری شده در این آزمایش شامل قطر، ارتفاع ساقه، کلروفیل فلورسانس، سطح برگ، وزن خشک شاخساره و ریشه بود. قطر ساقه در ناحیه طوقه با استفاده از کولیس دیجیتال و ارتفاع ساقه با خط‌کش مدرج اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری کلروفیل برگ از دستگاه Cholorophyll Fluorimeter مدل PEA, UK (Hansatech LTD Pocket LAM; Leaf Area Meter-) استفاده شد. برگ از دستگاه سنجش سطح برگ (202, USA) استفاده شد.

در پایان دوره رشد، بوته‌ها از یک سانتی‌متری سطح خاک قطع شده، شاخساره و ریشه از هم تفکیک شدند و پس از شست‌وشو با آب معمولی، آب مقطر و هوا-خشک شدن، به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس درون آون قرار داده شدند. سپس وزن خشک ریشه و شاخساره اندازه‌گیری شده و نمونه‌های خشک شده آسیاب شدند. اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی در شاخساره و ریشه‌های گیاه به روش خاکسترگیری خشک صورت گرفت. بدین منظور نیم گرم نمونه آسیاب شده شاخساره و ریشه ابتدا در کوره با دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس به مدت نیم ساعت و سپس در دمای ۵۵۰



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهمکنش خاکستر لاستیک و لیگاندهای آلی بر مقدار روی قابل عصاره‌گیری با DTPA در خاک؛ ستون‌های با حروف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند (آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد).

Fig. 1. Mean comparison of the interactive effect of rubber ash and organic ligand on the DTPA extractable Zn content in soil; The bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

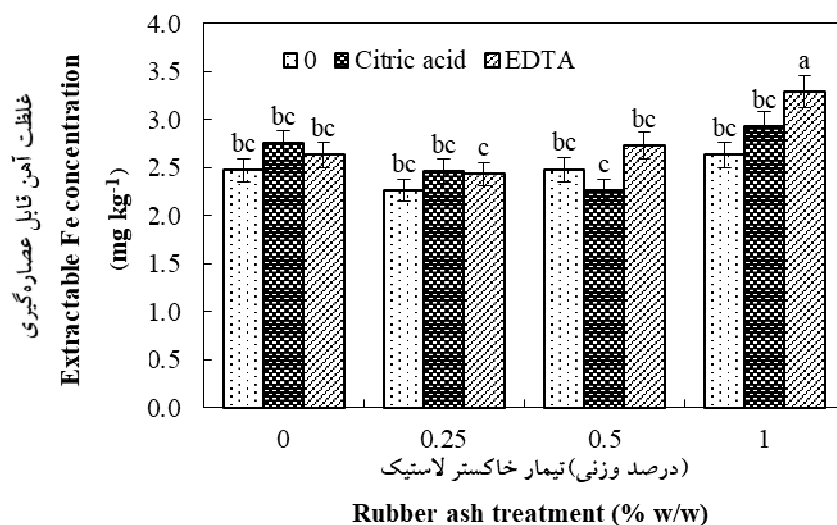
کم‌تر از ۱/۰ میلی‌متر به خاک، سرعت آزادسازی روی از لاستیک بسیار آهسته و کند بود. به‌گونه‌ای که پس از یک سال تنها ۱۰ تا ۴۰ درصد از روی موجود در لاستیک به محلول خاک افزوده شد (Smolders and Degryse, 2002). در پژوهش دیگری گزارش شده است که غلظت عناصر روی، آهن، مس و منگنز در محلول خاک با افزایش غلظت اسید سیتریک افزایش یافت (Yong-Liang et al., 2002).

غلظت آهن قابل عصاره‌گیری با DTPA

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهمکنش بین تیمار خاکستر لاستیک و لیگاند بر غلظت آهن قابل دسترس تأثیر معنی‌داری داشت (جدول تجزیه واریانس نشان داده نشده است). نتایج مقایسه میانگین نشان داد (شکل ۲)، در بالاترین سطح خاکستر لاستیک (سطح ۱ درصد وزنی)، با کاربرد لیگاند EDTA غلظت آهن قابل جذب خاک ۳۳ درصد نسبت به سطح بدون لیگاند افزایش یافت. ولی با کاربرد لیگاندها در سایر سطوح خاکستر لاستیک تفاوت معنی‌داری در غلظت آهن قابل دسترس خاک نسبت به سطح صفر خاکستر مشاهده نشد.

میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در تیمار شاهد به ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک با کاربرد یک درصد وزنی خاکستر لاستیک افزایش یافت. همچنین در تمامی سطوح خاکستر لاستیک، کاربرد اسید سیتریک و EDTA اثر معنی‌داری بر غلظت روی قابل استخراج با DTPA نداشت. وجود مقادیر زیاد روی (حدود ۵ درصد) در ترکیب خاکستر موجب افزایش آزادسازی روی از خاکستر و در نتیجه افزایش روی قابل دسترس خاک شده است.

در چندین پژوهش که از ذرات لاستیک تأیر در خاک‌های آهکی و دچار کمبود روی استفاده شده است، ذرات لاستیک به عنوان یک منبع مناسب از کود روی معرفی شده و گزارش شده غلظت روی قابل دسترس در خاک‌های تیمار شده با لاستیک تأیر به‌تدریج افزایش می‌یابد (Taheri et al., 2016; Nasirzadeh et al., 2023). از طرف دیگر با توجه به از بین رفتن ترکیبات آلی و باقی‌ماندن ترکیبات معدنی در طی فرآیند تولید خاکستر از پودر لاستیک، خاکستر دارای درصد بیشتری از روی و آهن نسبت به پودر لاستیک بود (Taheri et al., 2016). براساس نتایج یک پژوهش، با افزودن ذرات لاستیک تأیر با قطر



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهمکنش خاکستر لاستیک و لیگاند آلی بر مقدار آهن قابل عصاره‌گیری با DTPA در خاک؛ ستون‌های با حروف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند (آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد).

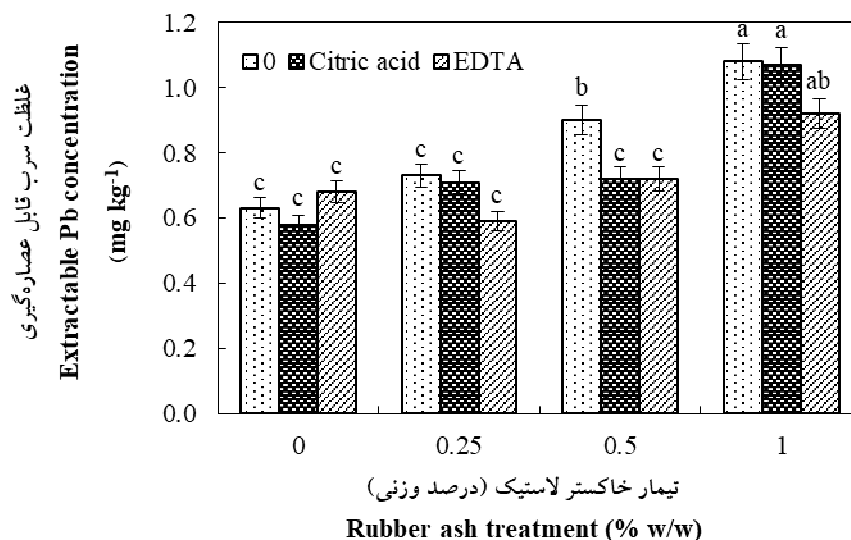
Fig. 2. Mean comparison of interactive effect of rubber ash and organic ligand on the DTPA extractable Fe content in soil; The bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

است که با نتایج سایر پژوهش‌گران همخوانی دارد (Moghaddasi et al., 2015). در پژوهشی دیگر بیان شد که کاربرد ذرات خردشده لاستیک‌های فرسوده موجب کاهش میزان آهن قابل دسترس در خاک گردید که علت این یافته می‌تواند به دلیل افزایش ذرات خردشده لاستیک تأیر به خاک و اثر رقابتی روی با آهن مربوط باشد (Bidaki et al., 2012).

غلظت سرب و کادمیوم قابل عصاره‌گیری با DTPA

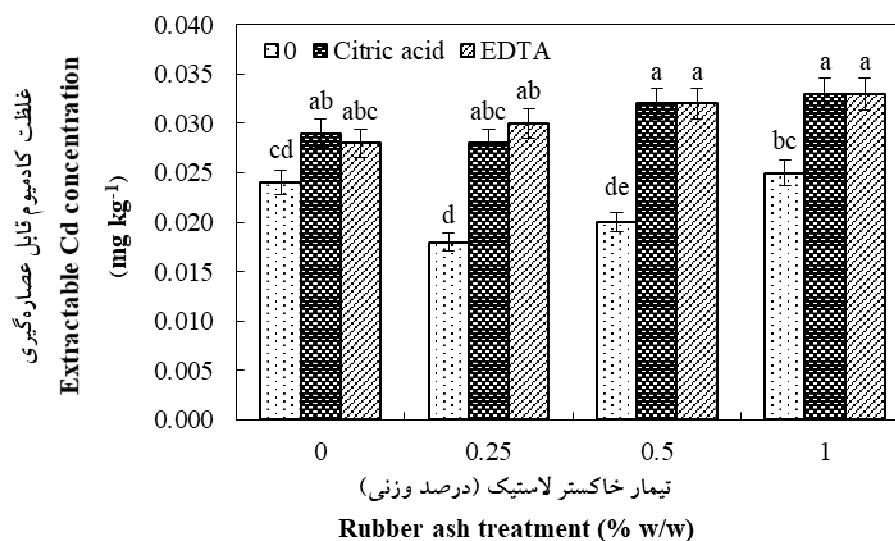
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهمکنش بین تیمار خاکستر لاستیک و لیگاند بر غلظت سرب و کادمیوم قابل دسترس تأثیر معنی‌داری داشت (جدول تجزیه واریانس نشان داده نشده است). براساس نتایج مقایسه میانگین (شکل ۳)، در تیمار بدون لیگاند (شاهد) با کاربرد سطح ۵٪ و ۱ درصد وزنی خاکستر لاستیک غلظت سرب قابل دسترس خاک نسبت به سطح بدون خاکستر به ترتیب ۴۳ و ۷۱ درصد افزایش یافت. هم چنین در تیمار اسید سیتریک و EDTA، بیش‌ترین غلظت سرب قابل دسترس خاک در سطح ۱ درصد وزنی خاکستر لاستیک مشاهده شد، که در مقایسه با شاهد به ترتیب ۷۰ و ۴۶

بر خلاف نتایج پژوهش حاضر، در یک پژوهش گزارش شد مقدار آهن قابل دسترس خاک در کشت آفتابگردان و ذرت با کاربرد پودر لاستیک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (Zeinali Behzadan, 2011). به‌نظر می‌رسد لیگاند EDTA با کلاته‌کردن آهن و افزایش آزادسازی آهن از خاک و خاکستر لاستیک، آهن قابل دسترس خاک را افزایش داده است. گزارش شده است که کاربرد عناصر کم‌مصرف همراه با کلات‌کننده‌ها سبب ایجاد اختلاف معنی‌داری در غلظت آهن قابل دسترس خاک شد. به گونه‌ای که کاربرد کلات اسید سیتریک موجب افزایش معنی‌دار آهن قابل دسترس در خاک گردید (Madrid et al., 2003). درحالی‌که نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داد با افزایش غلظت روی و منگنز، غلظت سایر عناصر کم‌مصرف از جمله آهن در خاک کاهش یافت. یکی از عوامل کاهش آهن قابل دسترس در خاک pH زیاد است زیرا فراهمی آهن در خاک به عوامل مختلفی مانند pH خاک، ماده آلی و واکنش‌های اکسایش و کاهش بستگی دارد (Malakouti Khoshgoftarmanesh, 2008; et al., 2006). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که غلظت آهن در خاکستر لاستیک بسیار کم‌تر از غلظت روی موجود در آن



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهمکنش خاکستر لاستیک و لیگاندهای آلی بر مقدار سرب قابل عصاره‌گیری با DTPA در خاک؛ ستون‌های با حروف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند (آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد).

Fig. 3. Mean comparison of interactive effect of rubber ash and organic ligand on the DTPA extractable Pb content in soil; The bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر برهمکنش خاکستر لاستیک و لیگاندهای آلی بر مقدار کادمیوم قابل عصاره‌گیری با DTPA در خاک؛ ستون‌های با حروف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند (آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد).

Fig. 4. Mean comparison of interactive effect of rubber ash and organic ligand on the DTPA extractable Cd content in soil; The bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

EDTA، غلظت کادمیوم قابل دسترس خاک را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. به‌عنوان مثال در تیمار ۱ درصد وزنی خاکستر، کاربرد لیگاند اسید سیتریک و EDTA در مقایسه با شاهد، غلظت کادمیوم قابل دسترس خاک ۳۸ درصد افزایش یافت.

درصد افزایش نشان دادند. در سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نسبت به شاهد (بدون تیمار) مشاهده نشد. در مورد کادمیوم، نتایج مقایسه میانگین نشان داد (شکل ۴)، در همه سطوح خاکستر لاستیک، کاربرد لیگاند اسید سیتریک و

تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول تجزیه واریانس نشان داده نشده است).

غلظت روی شاخساره و ریشه

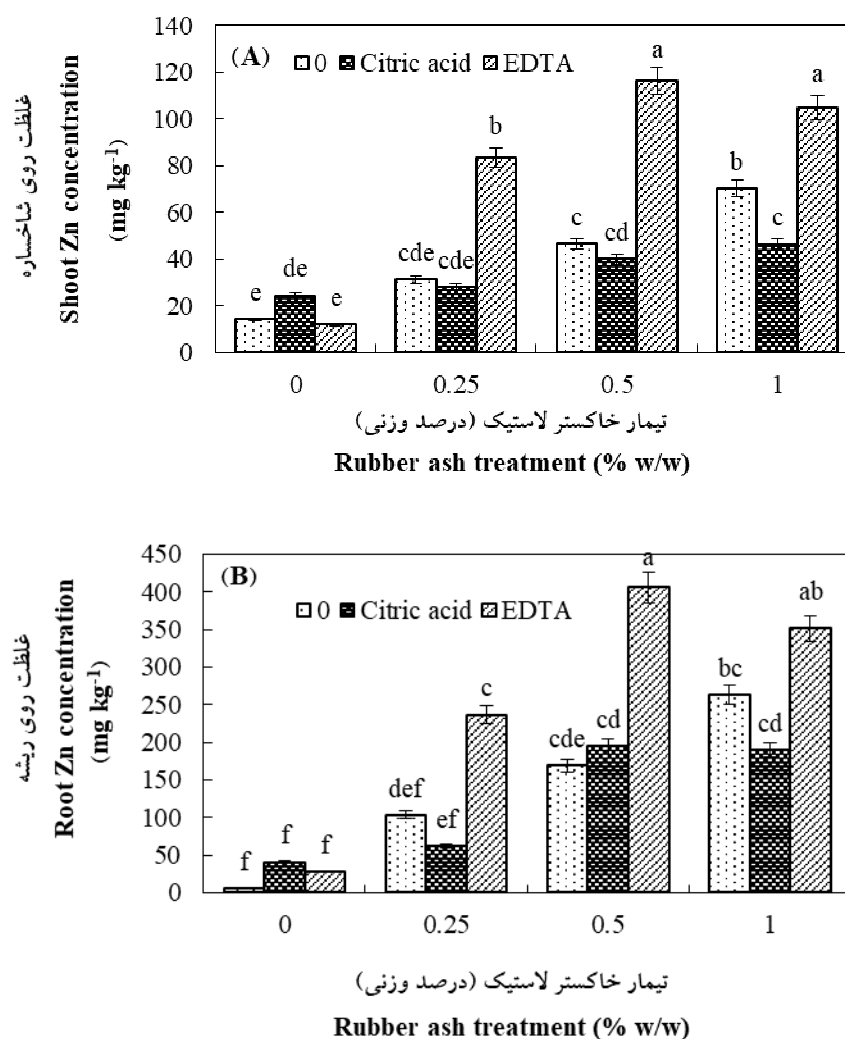
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش بین تیمار خاکستر لاستیک و لیگاند بر غلظت روی شاخساره و ریشه تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول تجزیه واریانس نشان داده نشده است). نتایج اثر برهمکنش خاکستر لاستیک و لیگاندهای آلی نشان داد (شکل ۵-A)، در تیمار بدون لیگاند (شاهد) کاربرد تمام سطوح خاکستر لاستیک غلظت روی شاخساره را افزایش داد، به گونه‌ای که با کاربرد سطوح ۵/۰ و ۱ درصد وزنی خاکستر لاستیک، غلظت روی شاخساره به ترتیب پنج و سه برابر نسبت به سطح صفر خاکستر افزایش یافت. هم‌چنین با کاربرد کلات اسید سیتریک با غلظت ۱/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک در تیمارهای دارای ۱ درصد وزنی خاکستر لاستیک افزایش سه برابری در غلظت روی شاخساره در مقایسه با شاهد (بدون تیمار) مشاهده شد. از طرف دیگر کاربرد کلات EDTA با غلظت مذکور در تیمار ۵/۰ درصد وزنی خاکستر لاستیک، غلظت روی شاخساره را به‌طور معنی‌داری نسبت به سطح بدون تیمار به میزان هشت برابر افزایش داد. بررسی نتایج غلظت روی ریشه نشان داد (شکل ۵-B)، در تیمار بدون لیگاند، کاربرد تمام سطوح خاکستر لاستیک منجر به افزایش معنی‌دار غلظت روی ریشه شد. به‌طوری‌که در بالاترین سطح خاکستر، غلظت روی ریشه نسبت به سطح صفر خاکستر ۴۷ برابر افزایش نشان داد. از طرف دیگر کاربرد هر دو کلات اسید سیتریک و EDTA با غلظت ۱/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک در تیمار خاکستر لاستیک (سطح ۵/۰ درصد وزنی)، به ترتیب منجر به افزایش ۳۵ و ۷۲ برابری غلظت روی ریشه نسبت به شاهد (بدون تیمار) شد.

غلظت روی در اکثر گیاهان در دامنه ۲۵ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک برگ متغیر است. کمبود روی با توجه به نوع گیاه در غلظت‌های کمتر از ۱۰ تا ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم

براساس پژوهش‌ها، ذرات لاستیک تأیر علاوه بر تأمین روی موردنیاز گیاه، یک ماده اصلاح‌کننده ارزشمند برای اصلاح خاک‌های با خطر کادمیوم زیاد و نسبت کادمیوم به روی زیاد می‌باشند (Chaney, 2007). به دلیل ویژگی‌های شیمیایی مشابه کادمیوم و روی این فرضیه وجود دارد عناصری که دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مشابهی هستند، به صورت برهم‌کنش منفی عمل کنند (Aravind et al., 2005). براساس پژوهش‌های انجام‌شده، اسید سیتریک در غلظت‌های کم (۳ و ۵ میلی‌مول در کیلوگرم خاک) نمی‌تواند غلظت سرب قابل دسترس خاک را افزایش دهد اما در غلظت‌های زیاد (۱۰ و ۴۰ میلی‌مول در کیلوگرم خاک) اثر قابل توجهی بر غلظت سرب محلول در خاک دارد (Fine et al., 2014). اکثر پژوهش‌ها نشان داده است که اسید سیتریک در مقایسه با EDTA به دلیل ثابت پایداری کمی که با سرب دارد می‌تواند کارایی کم‌تری در افزایش حلالیت سرب در خاک داشته باشد (Wu et al., 2003). در پژوهشی مشاهده شد که EDTA برای تشکیل کمپلکس با فلزات اختصاصی عمل نمی‌کند و با سایر کاتیون‌های حاضر در خاک واکنش تشکیل می‌دهد و از این راه می‌تواند بر ویژگی‌های شیمیایی خاک (مانند تغییر در وضعیت عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف) تأثیرگذار باشد (Zhang, 1993). زمانی که EDTA به خاک افزوده می‌شود به دلیل قدرت کمپلکس‌کنندگی زیاد آن با سرب، تشکیل کمپلکس‌های سرب با EDTA تعادل رسوب و جذب را به سمت افزایش حلالیت سرب در خاک تغییر می‌دهد (Wu et al., 2003). بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، EDTA می‌تواند سرب را از بخش‌های مختلف خاک به‌ویژه اکسیدهای آهن، منگنز و مواد آلی خاک آزاد کند (Udovic et al., 2006).

صفات رویشی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش بین تیمار خاکستر لاستیک و لیگاند بر صفات رویشی گیاه ذرت (وزن خشک شاخساره و ریشه، سطح برگ، کلروفیل فلورسانس و قطر ساقه)

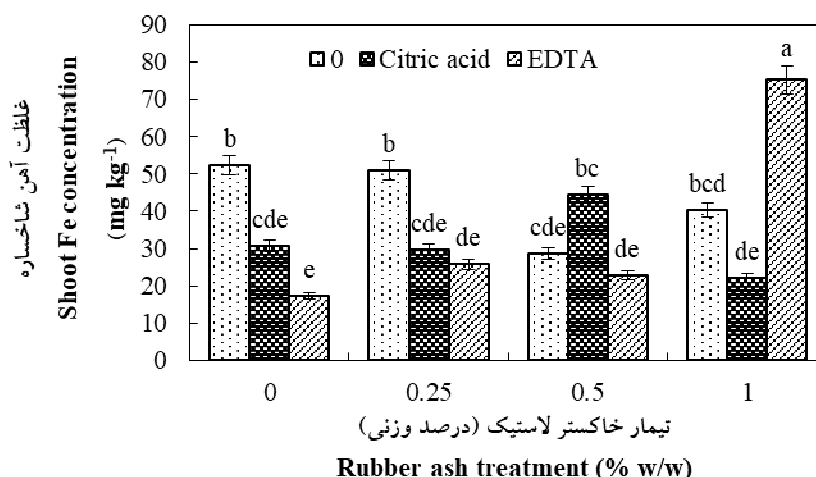


شکل ۵. مقایسه میانگین اثر برهمکنش خاکستر لاستیک و لیگاندهای آلی بر غلظت روی شاخساره (A) و ریشه (B)؛ ستون‌های با حروف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند (آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد).

Fig. 5. Mean comparison of interactive effect of rubber ash and organic ligand on the root (B) and shoot (A) Zn concentrations; The bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

لاستیک تأیر به خاک تغییری در غلظت روی گیاه آفتابگردان ایجاد نکرد اما باعث افزایش غلظت روی در گیاه ذرت شد (Khoshgoftarmansh et al., 2012). یکی از عوامل مؤثر بر فراهمی فلزات برای گیاه، تحرک فلزات در خاک است و در مواردی از برخی تیمارهای شیمیایی برای غلبه بر این مشکل استفاده می‌شود (Fazal et al., 2010). پژوهش‌های زیادی در ارتباط با افزایش فراهمی فلزات با افزودن کلات‌کننده‌هایی مانند EDTA، EDDS و اسید سیتریک انجام شده است. این کلات‌کننده‌ها دارای میل ترکیبی زیادی با فلزات بوده، و از این

وزن خشک برگ و سمیت آن در غلظت‌های بیش‌تر از ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک برگ رخ می‌دهد (Havlin et al., 2017). در اغلب گیاهان رشدیافته در تیمارهای دارای لاستیک تأیر، بیش از ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی در بافت گیاهی مشاهده شده است (Nasirzadeh et al., 2023; Khoshgoftarmansh et al., 2012). بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده کاربرد خاکستر لاستیک می‌تواند به‌عنوان یک منبع مفید روی رشد گیاه ذرت را به‌طور مؤثری افزایش دهد (Nasirzadeh et al., 2023). پژوهشگران گزارش کردند افزودن



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر برهمکنش خاکستر لاستیک و لیگاند آلی بر غلظت آهن شاخساره؛ ستون‌های با حروف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند (آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد).

Fig. 6. Mean comparison of interactive effect of rubber ash and organic ligand on the shoot Fe concentration; The bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

لیگاند به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. ولی در بالاترین سطح خاکستر لاستیک، کاربرد لیگاند EDTA منجر به افزایش ۴۴ درصدی غلظت آهن شاخساره در مقایسه با تیمار بدون لیگاند شد. گزارش شده است برخی از عناصر کم‌مصرف مانند روی و آهن در جذب و انتقال به قسمت‌های مختلف گیاه با یکدیگر رقابت دارند به‌طوری‌که غلظت زیاد روی مانع از جذب و انتقال آهن در گیاه می‌شود (Neue et al., 1998). هم‌چنین افزایش روی از منبع ضایعات لاستیک می‌تواند موجب کاهش غلظت آهن در گیاه شود و از طرفی آهن، جذب و سمیت احتمالی روی در گیاه را کاهش می‌دهد (Nasirzadeh et al., 2023). گزارش شده است که عناصر غذایی از جمله روی، آهن و منگنز احتمالاً در فرآیندهای انتقال از ریشه به شاخساره با یکدیگر رقابت می‌کنند (Hamzhepour et al., 2010). علاوه‌بر آن، زمانی‌که EDTA به خاک افزوده می‌شود بخش بزرگی از فلز کل حل شده و در دسترس گیاه قرار می‌گیرد. اگرچه EDTA توانایی کلاته‌نمودن و افزایش فراهمی آهن را دارد، ولی با توجه به غلظت زیاد روی خاک، مصرف EDTA جذب روی را بیش‌تر افزایش داده که منجر به ایجاد رقابت و موجب کاهش جذب آهن می‌شود (Tandy et al., 2006).

رو برای افزایش انحلال، بهبود، جذب و انتقال آن‌ها به آوندها و به‌طور کلی جابه‌جایی آن‌ها از ریشه به شاخساره گیاه استفاده می‌شوند (January et al., 2008).

گزارش شده است که کاربرد EDTA تا غلظت ۱/۵ میلی مول بر کیلوگرم خاک منجر به افزایش جذب روی در شاخساره ذرت شد. هم‌چنین کاربرد اسید سیتریک با غلظت ۰/۷۵ میلی مول بر کیلوگرم خاک در گیاه ذرت موجب افزایش معنی‌دار جذب روی شاخساره در مقایسه با شرایط بدون کاربرد آن شد (Taheripur et al., 2016).

غلظت آهن شاخساره

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهمکنش بین تیمار خاکستر لاستیک و لیگاند بر غلظت آهن شاخساره تأثیر معنی‌داری داشت (جدول تجزیه واریانس نشان داده نشده است). براساس نتایج مقایسه میانگین، در تیمار بدون لیگاند (شاهد)، افزایش سطوح خاکستر لاستیک (شکل ۶)، اثر معنی‌داری بر غلظت آهن شاخساره گیاه نداشت. با کاربرد هر دو نوع لیگاند در سطوح صفر و ۰/۲۵ درصد وزنی خاکستر لاستیک، غلظت آهن شاخساره گیاه در مقایسه با تیمار بدون

غلظت سرب و کادمیوم شاخساره و ریشه

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد به دلیل مقادیر اندک سرب و کادمیوم در بقایای لاستیک، غلظت کادمیوم شاخساره و ریشه گیاه در همه تیمارها کم تر از حد تشخیص دستگاه جذب اتمی بود و از طرف دیگر تیمار خاکستر لاستیک، لیگاند و هم‌چنین برهمکنش آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر غلظت سرب گیاه نداشتند. این نتایج با یافته‌های سایر پژوهشگران نیز همخوانی دارد (Nasirzadeh et al., 2023).

تشکر و سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت مالی دانشگاه ولی عصر رفسنجان برای انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌نوع تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کاربرد خاکستر لاستیک، روی قابل دسترس خاک را به‌طور معنی‌داری افزایش داده است. استفاده از اسیدهای آلی علاوه بر تسریع در آزادسازی عنصر روی از این ضایعات، بر غلظت روی در گیاه نیز اثرگذار بوده است. به‌گونه‌ای که کاربرد لیگاند EDTA موجب افزایش غلظت روی شاخساره و ریشه گیاه ذرت در سطح ۵/۰ تا ۱۰٪

منابع مورد استفاده

1. Afyuni, M., Khoshgoftarmanesh, A.H., Dorostkar, V., Moshiri, R., 2007. Zinc and cadmium content in fertilizers commonly used in Iran. International Conference of Zinc Crops, May 24–28, Istanbul, Turkey.
2. Alloway, B.J., 2008. Zinc in soil and crop nutrition. Second ed. International Zinc Association (IZA), Brussels, Belgium and International Fertilizer Association (IFA), Paris, France.
3. Aravind, P., Narasimha, M., Prasad, V., 2005. Cadmium-Zinc interactions in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: Adaptive Ecophysiology, Biochemistry and Molecular Toxicology. Brazilian J. Plant Physiol. 17(1), 3–20. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100002>.
4. Bidaki, M.Y., Hajabbasi, M.A., Khoshgoftarmanesh, A.H., Eshghizadeh, H.R., 2012. Effect of waste tire rubber particles on some chemical properties of a calcareous soil. J. Sci. Technol. Agric. Nat. Resour. (J. Water Soil Sci.) 16(59), 101–115. (In Persian with English abstract)
5. Bloem, E., Haneklaus, S., Haensch, R., Schnug, E., 2016. EDTA application on agricultural soils affects microelement uptake of plants. Sci. Total Environ. 577. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.153>
6. Brummer, G.W., Gerth, J., Tiller, K.G., 1988. Reaction kinetics of the adsorption and desorption of nickel, zinc and cadmium by goethite. I. Adsorption and diffusion of metals. Eur. J. Soil Sci. 39(1), 37–52.
7. Cataldo, O.A., Garland, T.R., Wildung, R.E., 1983. Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants. Plant Physiol. 73(3), 844–848.
8. Chaney, R.L., 2007. Effect of ground rubber vs. ZnSO₄ on spinach accumulation of Cd from Cd-mineralized California soil. Abstract, Proceedings of the Water Environment Federation, April 16–18, WEFTECH, Denver, Colorado. P. 993.
9. Dessureault-Rompere, J., Nowack, B., Schulin, R., Tercier-Waeber, M.L., Luster, J., 2008. Metal solubility and speciation in the rhizosphere of *Lupinus albus* cluster roots. Environ. Sci. Technol. 42, 7146–7151.
10. Drazic, G., Mihailovic, N., Lojic, M., 2006. Cadmium concentration in *Medicago sativa* seedlings treated with salicylic acid. Plant Biol. Plant. 50(2), 239–244.
11. Estefan, G., Sommer, R., Ryan, J., 2013. Methods of Soil, Plant and Water Analysis: A Manual for The West Asia

and North Africa Region: ICARDA. Beirut, Lebanon.

12. Fazal, H., Asghari, B., Fuller, M.P., 2010. The improved phytoextraction of lead (Pb) and the growth of maize (*Zea mays* L.): The role of plant growth regulators (GA3 and IAA) and EDTA alone and in combinations. *Chemosphere* 80(4), 457–462. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.04.020>
13. Fine, P., Paresh, R., Beriozkin, A., Hass, A., 2014. Chelate-enhanced heavy metal uptake by Eucalyptus trees under controlled deficit irrigation. *Sci. Total Environ.* 493, 995–1005. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.085>.
14. Grant, A., Bailey, L.D., 1997. Effects of phosphorus and zinc fertilizer management on cadmium accumulation in flaxseed. *J. Sci. Food Agri.* 73(3), 307–314.
15. Grant, C.A., Clarke, J.M., Duguid, S., Chaney, R.L., 2008. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Sci. Total Environ.* 390, 301–310.
16. Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D., 2017. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 8th Edition, Pearson, Chennai Dehli, India.
17. Hamzehpour, N., Malakouti, M.J., Majidi, A., 2010. Zinc, iron and manganese interactions in various organs of wheat. *J. Soil Res.* 24(1):1–8. (In Persian with English abstract)
18. January, M.C., Cutright, T.J., Keulen H.V., Wei, R., 2008. Hydroponic phytoremediation of Cd, Cr, Ni, As, and Fe: can *Helianthus annuus* hyperaccumulate multiple heavy metals? *Chemosphere* 70(3), 531–537.
19. Jez, E., Lestan, D., 2016. EDTA retention and emissions from remediated soil. *Chemosphere* 151, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.088>.
20. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., Enayatizamir, N., 2019. Chemical fractions and availability of Zn in a calcareous soil in response to biochar amendments. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 19, 851–864.
21. Kashian, S., Fathivand, A.A., 2015. Estimated daily intake of Fe, Cu, Ca and Zn through common cereals in Tehran, Iran. *Food Chem.* 176, 193–196. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.021>.
22. Khoshgoftarmanesh A.H., 2008. *Evaluation of Plant Nutritional Status and Optimal Fertilizer Management*. Second ed. Isfahan University of Technology Publishing Center. (In Persian)
23. Khoshgoftarmanesh, A.H., Sanaei Ostovar, A., 2010. Effect of treated polymeric industrial by-products zinc availability on corn characteristics in a calcareous soil. *J. Sci. Technol. Agric. Nat. Resour. (J. Water Soil Sci.)* 13, 91–104. (In Persian with English abstract)
24. Khoshgoftarmanesh, A.H., Behzadan, H.Z., Sanaei Ostovar, A., Chaney, R.L., 2012. Bacterial inoculation speeds zinc release from ground tire rubber used as Zn fertilizer for corn and sunflower in a calcareous soil. *Plant Soil* 361, 71–81.
25. Liu, X., Wang, J., Gheni, A., ElGawady, A.A., 2018. Reduced zinc leaching from scrap tire during pavement applications. *Waste Manag.* 81, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.045>
26. Madrid, F., Liphadzi, M.S., Kirkham, M.B., 2003. Heavy metal displacement in chelate-irrigated soil during phytoremediation. *J. Hydrol.* 272, 107–119.
27. Malakouti, M.J., Keshavarz, P., Karimian, N.A., 2008. *A Comprehensive Approach Towards Identification of Nutrients Deficiencies and Optimal Fertilization for Sustainable Agriculture*, 7th ed. Tarbiat Modares University Press, Tehran.
28. Moghaddasi, S., Khoshgoftarmanesh, A.H., Karimzadeh, F., Chaney, R., 2015. Fate and effect of tire rubber ash nano-particles (RANPs) in cucumber. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 115, 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.02.020>.
29. Nasirzadeh, A., Hamidpour, M., Abbaszadeh-Dahaji, P., Akhgar, A., Kariman, K., 2023. Zinc-solubilizing *Pseudomonas* strains improve zinc nutrition of maize plants grown in sand amended with tire waste powder. *J. Plant Nutr.* 46(14), 3450–3468, <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2206424>.
30. Neue, H.U., Quijano, C., Senadhira, D., Setter, T., 1998. Strategies for dealing with micronutrient disorders and salinity in lowland rice system. *Field Crops Res.* 50, 139–155.
31. Saffari, M., Yasrebi, J., Karimian, N., Shan, X.Q., 2009. Evaluation of three sequential extraction methods for fractionation of zinc in calcareous and acidic soils. *Res. J. Biol. Sci.* 4(7), 848–857.
32. Shahid, M., Pinelli, E., Dumat, C., 2012. Review of Pb availability and toxicity to plants in relation with metal speciation; role of synthetic and natural organic ligands. *J. Hazard. Mater.* 219, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.060>
33. Sinhal, V.K., Srivastava, A., Singh, V.P., 2010. EDTA and citric acid mediated phytoextraction of Zn, Cu, Pb and Cd through marigold (*Tagetes erecta*). *J. Environ. Biol.* 31(3), 255–259.
34. Smolders, E., Degryse, F., 2002. Fate and effect of zinc from tire debris in soil. *Environ. Sci. Technol.* 36(17), 3706–3710.
35. Taheri S., Khoshgoftarmanesh A.H., Shariatmadari H., 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 Soil* 341, 89–97. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0624-7>.
36. Taheripur, A., Kiani, Sh., Hosseinpour, A., 2016. Effect of EDTA and citric acid on phytoextraction of copper and

- zinc from a naturally contaminated soil by maize (*Zea mays* L.) cultivars. J. Water Soil 29(6), 1493–1505. (In Persian with English abstract)
37. Tandy, S., Schulin, R., Nowack, B., 2006. Uptake of metals during chelant-assisted phytoextraction with EDDS related to the solubilized metal concentration. Environ. Sci. Technol., 40(8), 2753–2758.
38. Udovic, M., Lestan, D., 2009. Pb, Zn and Cd mobility, availability and fractionation in aged soil remediated by EDTA leaching. Chemosphere 74(10), 1367–1373. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.013>
39. Wen, J., Stacey, S.P., McLaughlin, M.J., Kirby, J.K., 2009. Biodegradation of rhamnolipid, EDTA and citric acid in cadmium and zinc contaminated soils. Soil Biol. Biochem. 41(10), 2214–2221.
40. Wu, L.H., Luo, Y.M., Christie, P., Wong, M.H., 2003. Effects of EDTA and low molecular weight organic acids on soil solution properties of a heavy metal polluted soil. Chemosphere 50(6), 819–822.
41. Yong-Liang, C., Yu-Qiang, G., Shi-Jie, H., Chun-Jing, Z., Yu-Mei, Z., Guo-Ling, C., 2002. Effect of root derived organic acids on the activation of nutrients in the rhizosphere soil. J. For. Res., 13(2), 115–118.
42. Zeinali Behzadan, H., 2011. Microbial Degradation of Tire Rubber Wastes in Soil and Its Effect on Heavy Metals Uptake by Corn and Sunflower. MSc Thesis of Soil Science, Isfahan University of Technology, Iran.
43. Zhang, F.S. 1993. Effect of Cu deficiency on Zn uptake rate of wheat plants. Acta-Pedol. Sin. 235, 129–134.
44. Zhang, T., Wei, H., Yang, X.H., Xia, B., Liu, J.M., Su, C.Y., Qiu, R.L., 2014. Influence of the selective EDTA derivative phenyldiaminetetraacetic acid on the speciation and extraction of heavy metals from a contaminated soil. Chemosphere 109, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.02.039>.