University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 16, No. 2, pp. 433-445 (Summer 2023)

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4733.2060

Original article

Study of the effect of different concentrations of cadmium on vegetative traits and the rate of accumulation of this metal in mixed and monoculture of maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.)

F. Zaefarian[1*], M. Sadegh[2], R. Hasanpour[3]

1. Associate Professor, Department of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2. M.Sc of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
3. PhD of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received 6 October 2021; Accepted 3 April 2022

Extended abstract

Introduction

Cadmium (Cd) is the most mobile heavy element in the soil. This element in plants has a negative effect on the main function of the plant such as photosynthesis, cell proliferation, and water uptake by plant roots. Resistance adaptation of some plants allows them to store high concentrations of heavy metals in their tissues without symptoms of poisoning, which eliminates them and revitalizes the environment. Corn (*Zea mays* L.) is able to continuously extract metals from contaminated soils by transferring them from roots to shoots. Corn was also a promising crop for phytoremediation due to its extensive root system, high biomass, and compatibility with cadmium soils. Also, legumes such as soybeans (*Glycine max* L.) can accumulate heavy metals in their tissue, and their interaction with B. japonicum is an important aspect influencing the behavior of soybeans under heavy metal stress. Mixed culture is a common cropping method that increases biomass. The use of this method in plants intended for plant extraction is of great importance because in contaminated soils it affects the uptake of heavy elements by plants. Therefore, due to the importance of soil contamination with heavy elements, this study was designed to investigate the effect of mono and mixed corn and soybean culture on cadmium contaminated soil.

Materials and methods

This experiment was performed in the greenhouse of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University as a factorial in a completely randomized design with four replications. The first factor of cadmium concentrations was 0, 50, 100, 150 and 200 mg kg-1. The second factor was corn and soybean cultivation ratios (maize in pure cultivation, soybean in pure cultivation, corn in mixed cultivation and soybean in mixed cultivation with a ratio of 50: 50). The seeds were planted in 5 kg pots. The density was four plants in the pot was considered. Two months after sowing, the plants were harvested. Pre-harvest measurement traits included plant height and stem diameter and post-harvest measurement traits included shoot dry weight, root dry weight, cadmium concentration of shoot and root, and cadmium concentration in soil.

* Corresponding author: Faezeh Zaefarian; E-Mail: fa_zaefarian@yahoo.com

© 2023, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

The results showed that the concentration of cadmium in maize shoots in both mono-culture and mixed culture systems was higher than soybean and mixed cultivation, especially at high levels, increased the concentration of cadmium in maize and soybean shoots. Also, with increasing the levels of heavy metal, the concentrations of cadmium in the roots increased linearly in all culture systems. Maize had more ability to uptake and concentrate metals in its roots than soybeans, and mixed cultivation of maize and soybeans increased the concentration of cadmium in the roots of maize and soybeans. In this experiment. The highest concentrations of root cadmium in mixed maize and soybean crops were recorded 105.97 and 60.46 mg kg-1, respectively.

Conclusion

Dry weight of maize and soybeans was lower in mixed than pure cultivation, which seems to be the main cause of the higher uptake of cadmium in plant organs under mixed culture conditions. In general, the ability of maize to phytoextraction is higher than soybeans due to its higher biomass.

***Keywords*:** Dry weight, Heavy metals, Root, Shoot

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد شانزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۲

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4733.2060

مقاله پژوهشی

مطالعه تأثیر غلظت‌های مختلف کادمیم بر صفات رویشی و میزان تجمع این فلز تحت کشت خالص و مخلوط ذرت (*Zea mays* L.) و سویا (*Glycine max* L.)

فائزه زعفریان[1*]، مریم صادق[2]، رقیه حسن‌پور[3]

۱. دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲ کارشناسی‌ارشد زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۳ دکتری زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
شاخساره
ریشه
فلزات سنگین
وزن خشک

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۰۱/۱۴

تاریخ انتشار:
تابستان ۱۴۰۲

۱۶(۲): ۴۳۳-۴۴۵

چکیده

به‌منظور ارزیابی اثر کادمیم بر برخی از صفات ذرت (*Zea mays* L.) و سویا (*Glycine max* L.) در کشت خالص و مخلوط، آزمایشی در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. فاکتور اول غلظت‌های کادمیم شامل ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بود. فاکتور دوم نسبت‌های کشت ذرت و سویا (ذرت در کشت خالص، سویا در کشت خالص، ذرت در کشت مخلوط و سویا در کشت مخلوط) بود. بذرها در گلدان‌های پنج کیلوگرمی کشت شدند و تراکم چهار بوته در گلدان در نظر گرفته شد و دو ماه پس از کشت بذر، بوته‌ها برداشت شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که غلظت کادمیم شاخساره ذرت در هر دو سیستم کشت مخلوط و منفرد بیشتر از سویا بود و کشت مخلوط به‌ویژه در سطوح بالا باعث افزایش غلظت کادمیم در شاخساره ذرت و سویا شد. همچنین با افزایش غلظت کادمیم در خاک، غلظت این عنصر در ریشه به‌طور خطی در تمامی سیستم‌های کشت افزایش یافت. ذرت نسبت به سویا در جذب و انباشت کادمیم در ریشه توانایی بیشتری داشت. همچنین کشت مخلوط ذرت و سویا باعث افزایش غلظت کادمیم در ریشه این گیاهان شد. به‌طوری‌که بیشترین غلظت کادمیم ریشه در کشت مخلوط برای گیاهان ذرت و سویا به‌ترتیب ۱۰۵/۹۷ و ۶۰/۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک ثبت شد. وزن خشک ذرت و سویا در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص کمتر بود که به‌نظر می‌رسد جذب بیشتر کادمیم در اندام‌های این گیاهان عامل اصلی این موضوع باشد.

مقدمه

کادمیم (Cd) متحرک‌ترین و سمی‌ترین عنصر سنگین در خاک محسوب می‌شود (Teng et al., 2020). این عنصر در گیاهان بر فرآیندهای اصلی گیاه نظیر فتوسنتز، جذب مواد مغذی، تعادل آب، فعالیت‌های بسیاری از آنزیم‌ها و ایجاد تنش اکسیداتیو اثر منفی دارد و در نتیجه باعث کاهش رشد گیاهان شود (Chen et al., 2020). در همین راستا بی‌ریا و همکاران (Biria et al., 2017) گزارش کردند که افزایش کاربرد کادمیم، میزان کلروفیل، سطح برگ، ارتفاع گیاه و وزن خشک ریشه و اندام هوایی ذرت را به‌صورت معنی‌داری کاهش داد.

سازگاری مقاومتی برخی از گیاهان امکان ذخیره غلظت‌های بالایی از فلزات سنگین را در بافت‌های خود بدون بروز علایم مسمومیت داشته که موجب حذف آن‌ها و احیاء دوباره محیط زیست می‌شوند (Tashakori Fard et al., 2017). بر اساس توانایی جذب فلزات سنگین و حساسیت به آلودگی زیاد فلزات، ماته-گاسپر و آنتون (Máthé-Gáspár and Anton, 2005) ذرت را به‌عنوان یک جمع‌کننده و یک

* نگارنده پاسخگو: فائزه زعفریان. پست الکترونیک: fa_zaefarian@yahoo.com

گیاه مقاوم در برابر فلز به‌خصوص برای کادمیم و روی گروه‌بندی کرده‌اند. ذرت قادر به استخراج گیاهی مداوم فلزات از خاک‌های آلوده با انتقال آن‌ها از ریشه به شاخساره می‌باشد. همچنین ذرت یک محصول امیدوارکننده برای گیاه‌پالایی به‌دلیل سیستم ریشه گسترده، زیست توده بالا و سازگاری آن در خاک‌هایی با کادمیم است (Nascimento and Xing, 2006). طبق گزارش بوجینوا و همکاران (Bojinova et al., 1994)، حبوباتی نظیر سویا می‌توانند فلزات سنگین را در بافت خود تجمع دهند و اثر متقابل آن با *B. japonicum* یک جنبه مهم تأثیرگذار بر رفتار سویا تحت تنش فلزات سنگین است.

کشت مخلوط یک روش زراعی رایج است که با هدف بهبود کارایی استفاده از منابع و پایداری عملکرد، باعث افزایش زیست توده می‌شود (Lizarazo et al., 2020). استفاده از این روش در گیاهانی که جهت استخراج گیاهی مد نظر گرفته می‌شوند، از اهمیت بالایی برخوردار است (Konkolewska et al., 2020) زیرا در خاک‌های آلوده بر جذب عناصر سنگین توسط گیاهان اثر می‌گذارد (Hassanpour et al., 2014). بقائی و مهان‌پور (Baghaie and Mahanpoor, 2018) گزارش کردند استفاده از کشت مخلوط به‌عنوان یکی از روش‌های طبیعی پالایش خاک می‌تواند به افزایش راندمان گیاه‌پالایی کمک کند. شونگ و همکاران (Xiong et al., 2018) گزارش کردند کرچک (*Ricinus communis* L.) باعث افزایش جذب کادمیم و روی در کشت مخلوط با یونجه (*Medicago sativa*) تحت تنش روی و کادمیم شد. از این‌رو، مطالعه اثر فلزات سنگین بر گیاهان از سویی و همچنین استفاده از گیاهان در فناوری پاکسازی خاک‌های آلوده از سوی دیگر، به‌منظور تضمین سلامت انسان ضروری به‌نظر می‌رسد. بنابراین، با توجه به اهمیت موضوع آلودگی خاک با عناصر سنگین این پـژوهش با هدف بررسی اثر کشت خالص و مخلوط ذرت و سویا بر میزان کاهش یا افزایش تنش کادمیم در خاک طراحی شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش جهت بررسی توانایی پاکسازی خاک‌های آلوده به کادمیم توسط کشت خالص و مخلوط ذرت و سویا در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، در سال ۱۳۹۹ در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. برای این منظور آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی (CRD) در ۴ تکرار اجرا گردید. فاکتور اول غلظت‌های کادمیم شامل ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بود که با استفاده از نمک نیترات کادمیم ۹۹٪ (MERCK) ایجاد شد و فاکتور دوم نسبت‌های کشت ذرت و سویا (ذرت در کشت خالص، سویا در کشت خالص، ذرت در کشت مخلوط و سویا در کشت مخلوط) بود. برای هر گلدان مقدار پنج کیلوگرم خاک از مزرعه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در نظر گرفته شد و بعد از هوا خشک شدن خاک، کادمیم به گلدان‌های مورد نظر اضافه شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، اسیدیته خاک در گل اشباع با pH متر (Mclean, 1982)، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع با ECمتر (Rhoades, 1982)، ماده آلی به روش اکسایش تر (Walkley and Black, 1934)، درصد نیتروژن کل به روش کجلدال (Bremner, 1970)، فسفر قابل جذب خاک با دستگاه اسپکتروفتومتر (Olsen et al., 1954)، پتاسیم قابل جذب خاک به روش استات آمونیوم با دستگاه فلیم فتومتر (Gee and Bauder, 1986) و کادمیم قابل جذب خاک با استفاده از محلول عصاره‌گیری DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) اندازه‌گیری شد.

جدول ۱. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1. Some of the physical properties and chemical soil

بافت خاک	Cd	Pb	K	P	کربن آلی (%)	نیتروژن	EC	اسیدیته
Soil texture	Available		قابل جذب		Organic carbon	N		pH
	---------mg kg^{-1}---------				----------%---------		dS m^{-1}	
سیلتی-رسی Silty-Clay	0.032	0.67	221.16	9.5	2.1	0.25	0.52	7.42

خاک‌های آلوده در گلدان‌های پنج کیلوگرمی به‌مدت یک ماه (چهار مرتبه) مرطوب و خشک شدند تا وضعیت شیمیایی آن تثبیت و به شرایط طبیعی نزدیک شوند (Shanbleh and Kharabsheh, 1996). تفاوت در نیترات تیمارهای آلوده و شاهد نیز از طریق کود اوره محاسبه و اعمال شد.

پس از آماده‌سازی خاک کشت در تاریخ ۲۷ خرداد انجام شد. تراکم گیاه ذرت و سویا در کشت منفرد چهار بوته و در کشت مخلوط ذرت و سویا از هر گیاه دو بوته در نظر گرفته شد. در ابتدا درون هر گلدان جمعا هشت بذر کشت شد پس از استقرار بوته گلدان‌ها تنک شدند و تراکم در هر گلدان چهار بوته در نظر گرفته شد. بوته‌ها در گلخانه‌ای با نور طبیعی و دمای ۲۰:۳۰ درجه سلسیوس روز: شب رطوبت نسبی ۸۰ تا ۹۰ درصد رشد نمودند. در طول دوره رشد برای آبیاری گلدان‌ها، زمانی که گیاه نیاز به آب داشت؛ رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه (۳۱/۱ درصد) بـه روش توزین از طریق زیرگلدانی صورت گرفت. دو ماه پس از کشت بذور بوته‌ها برداشت شدند. پس از برداشت شاخساره (قبل از شروع مرحله گلدهی)، ریشه‌ها از گلدان خارج شدند و با آب شستشو شدند. نمونه‌های شاخساره و ریشه‌های گیاهان جهت اندازه‌گیری برخی از صفات به آزمایشگاه انتقال یافتند. صفات اندازه‌گیری قبل از برداشت گیاه شامل ارتفاع بوته و قطر ساقه، و صفات اندازه‌گیری بعد از برداشت گیاه نیز شامل، وزن خشک شاخساره، وزن خشک ریشه، غلظت کادمیم شاخساره و ریشه و میزان کادمیم قابل جذب خاک بود. برای اندازه‌گیری ارتفاع بوته و قطر ساقه به‌ترتیب از خط‌کش مدرج و کولیس دیجیتالی استفاده شد. جهت تعیین وزن خشک شاخساره و ریشه، نمونه‌ها به‌مدت ۷۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس در آون قرار داده شد؛ و وزن خشک کل شاخساره و ریشه با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم تعیین گردید. غلظت کادمیم در گیاه به روش ودیزجونیور و همکاران (Woodis Jr et al., 1977) و غلظت قابل جذب فلز کادمیم در نمونه‌های خاک با استفاده از روش لیندسی و نورول (Lindsay and Norvell, 1978) اندازه‌گیری شد. علاوه بر صفات مذکور مقدار جذب در شاخساره (Aravind and Prasad, 2005) از طریق رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\text{مقدار جذب در شاخساره } (mg\ pot^{-1}) = \text{غلظت فلز در شاخساره } (mg\ g^{-1}) \times \text{وزن خشک شاخساره در گلدان } (g\ pot^{-1}) \quad [۱]$$

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹,۱ صورت گرفت. تجزیه واریانس حاصله از آزمایشات در قالب طرح پایه کاملا تصادفی به‌صورت فاکتوریل انجام شد و مقایسه میانگین با آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. برای توصیف هر یک از پارامترها از معادلات خطی (رابطه ۲) و دوتکه‌ای (رابطه ۳) زیر استفاده شد (Bakhshandeh et al., 2012).

$$y = b_1x + a \quad [۲]$$

$$y = b_1x + a \quad if \quad x \le x_0 \quad [۳]$$
$$y = (b_1x_0) + b_2(x-x_0) \quad if \quad x > x_0$$

که در آن y مقدار پیش‌بینی شده برای صفات مورد نظر، a مقدار ثابت در غلظت صفر کادمیم در خاک، x0 نقطه چرخش بین دو فاز معادله و b_1 و b_2 شیب تغییرات صفات (کاهشی یا افزایشی) به‌ترتیب در فاز یک و دو معادله هستند.

نتایج و بحث

صفات رویشی ذرت و سویا

باتوجه به جدول تجزیه واریانس اثر کادمیم و نسبت‌های کشت بر وزن خشک شاخساره، وزن خشک ریشه، ارتفاع بوته و قطر ساقه ذرت و سویا نشان داد که اثرات ساده کادمیم و نسبت‌های کشت و همچنین اثر دوگانه کادمیم و نسبت‌های کشت بر تمامی صفات مذکور در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

نتایج تجزیه رگرسیونی اثر سطوح مختلف کادمیم خاک بر وزن خشک شاخساره (شکل ۱- الف، جدول ۳) نشان می‌دهد وزن خشک شاخساره ذرت و سویا در هر دو سیستم کشت خالص و مخلوط در برابر غلظت کادمیم خاک با روند خطی کاهش یافت و بوته‌های ذرت و سویا در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص وزن خشک کمتری داشتند. وزن خشک شاخساره ذرت در بالاترین سطح کادمیم نسبت به شاهد (عدم مصرف کادمیم) در کشت خالص و مخلوط به‌ترتیب ۲۹/۴۲ و ۳۰/۹۰ درصد کاهش نشان داد (شکل ۱- الف، جدول ۳). درحالی‌که وزن خشک شاخساره سویا در بالاترین سطح کادمیم نسبت به شاهد در کشت خالص و مخلوط به‌ترتیب ۳۷/۳۵ و ۳۷/۴۱ درصد کاهش نشان داد؛ به‌عبارتی اثر منفی کادمیم بر وزن خشک سویا بیشتر از ذرت بود (شکل ۱- الف، جدول ۳). شکل ۱- ب نشان می‌دهد روند

وزن خشک ریشه ذرت و سویا در سیستم کشت خالص و مخلوط، مشابه وزن خشک شاخساره به‌صورت خطی کاهش یافت. مقدار کاهش وزن خشک ریشه در بالاترین سطح کادمیم نسبت به شاهد (سطح صفر تیمار کادمیم) در کشت خالص و مخلوط ذرت به‌ترتیب ۴۲/۲۱ و ۴۰/۷۷ درصد و در کشت خالص و مخلوط سویا به‌ترتیب ۴۵/۹۶ و ۳۷/۹۴ درصد بود (شکل ۱- ب، جدول ۳).

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات رویشی ذرت و سویا

Table 2. Analysis of variance (mean squares) for the effect of experimental treatments on vegetative traits and chlorophyll index of corn and soybeans.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	ارتفاع Height	قطر ساقه Stem diameter
کادمیم Cd	4	280.35**	92.11**	4900.66**	10.25**
نسبت‌های کاشت Planting ratios(Pr)	3	143.85**	60.62**	4606.99**	63.29**
Cd× Pr	12	1.22**	1.93**	390.20**	1.52**
خطای آزمایش Error	60	0.39	0.35	24.05	0.097
ضریب تغییرات (٪) C.V.(%)	-	2.12	4.58	6.85	5.68

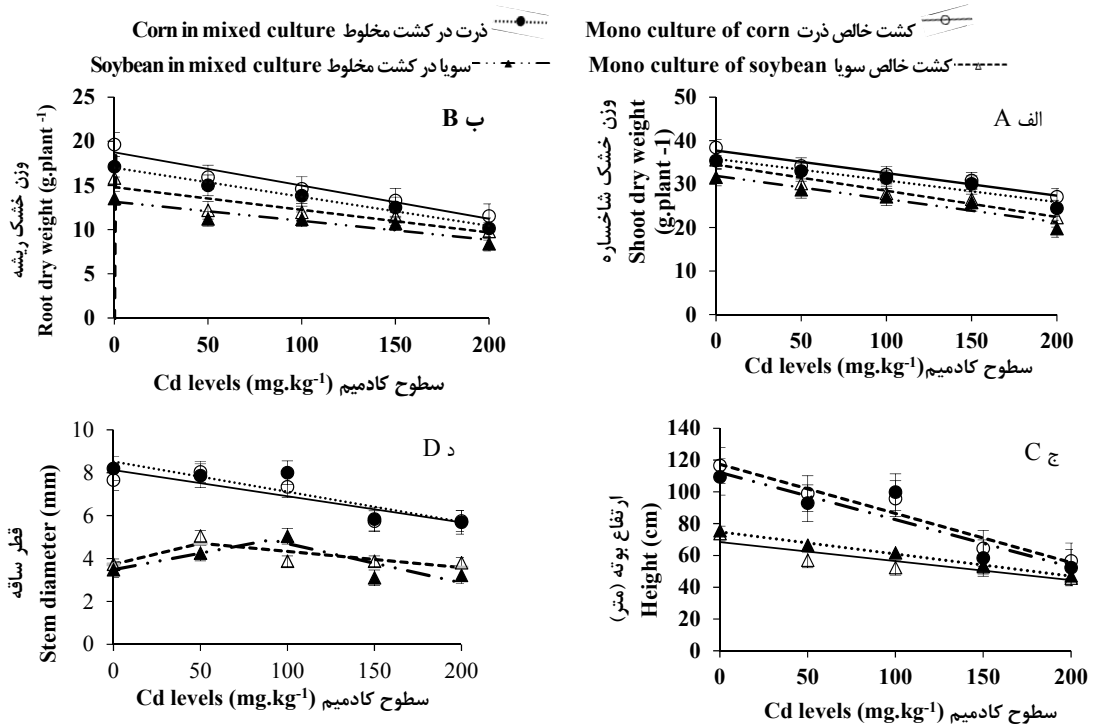
**: معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

**, significant at 1% probability levels

کاهش وزن خشک اندام‌های گیاهی در معرض کادمیم با نتایج دوبریکووا و همکاران (Dobrikova et al., 2020) در گیاه مریم‌گلی (*Salvia sclarea* L.) مطابقت دارد. کاهش وزن خشک ذرت و سویا در کشت مخلوط نسبت به خالص احتمالا به خاطر وجود رقابت این گیاهان در برداشت آب و مواد غذایی از بستر کشت مشترک بوده است. لی و همکاران (Li et al., 2009) نیز کاهش وزن خشک ذرت به‌عنوان گیاه اصلی را در کشت مخلوط آن با تعدادی از گیاهان لگوم و غیرلگوم گزارش کردند. علائم عمومی ناشی از جذب مقادیر اضافی کادمیم در گیاه را می‌توان کاهش عملکرد گیاه، کاهش یا توقف رشد ریشه به‌دلیل تأثیر مستقیم بر تقسیم سلول‌ها در منطقه مریستمی، چوب پنبه‌ای شدن، تداخل جذب و انتقال طبیعی عناصر غذایی، کاهش میزان کلروفیل و اختلال در فعالیت‌های آنزیمی به‌ویژه آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز برشمرد (Rohani et al., 2012). طی پژوهشی دیگر محققین اظهار داشتند که وزن خشک اندام هوایی کاهو (*Lactuca sativa*) تحت تأثیر مصرف کادمیم به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (Rohani et al., 2012) که این کاهش به‌دلیل اثرات منفی کادمیم بر مکانیسم تولید انرژی در میتوکندری و کلروپلاست است (Agha Abbasi et al., 2013).

اثر سطوح مختلف کادمیم خاک بر ارتفاع بوته نشان می‌دهد ارتفاع بوته با افزایش سطح کادمیم در کشت خالص و مخلوط ذرت و سویا به‌صورت خطی کاهش یافت (شکل ۱- ج، جدول ۳). در کشت مخلوط کاهش ارتفاع بوته در بالاترین سطح تیمار کادمیم نسبت به شاهد (سطح صفر کادمیم) در ذرت ۵۲/۲۳ درصد و در سویا ۳۷/۶۹ درصد بود. همچنین نتایج آزمایش حاضر نشان داد قطر ساقه ذرت در برابر افزایش کادمیم در کشت خالص و مخلوط با روند خطی و به‌ترتیب با شیب ۰/۰۱۲۲- و ۰/۰۱۴- واحد کاهش یافت (شکل ۱- د، جدول ۳). در نتایج آزمایش شفیق و همکاران (Shafiq et al., 2019) نیز مشاهده شد که ارتفاع بوته گیاه ذرت (*Zea mays* L.) با کاربرد کادمیم کاهش یافت.

درحالی‌که قطر ساقه سویا در کشت خالص با افزایش غلظت کادمیم خاک از صفر تا ۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک ابتدا با شیب ۰/۰۱۹۶ واحد افزایش یافت؛ سپس از ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم با شیب ۰/۰۰۷۵- واحد کاهش یافت. در کشت مخلوط قطر ساقه سویا با افزایش



شکل ۱. اثرات متقابل کادمیم و نسبت‌های کاشت بر روند تغییرات وزن خشک شاخساره (الف)، وزن خشک ریشه (ب)، ارتفاع (ج) و قطر ساقه (د) ذرت و سویا

Fig. 1. Effect of cadmium and planting ratios on changes in shoot dry weight (a), root dry weight (b), height (c) and stem diameter (d) of corn and soybean.

جدول ۳. معادله مناسب توصیف‌کننده اثر کادمیم و نسبت‌های کاشت بر صفات رویشی ذرت و سویا

Table 3. Appropriate equation describing the effect of cadmium and planting ratios on vegetative traits and chlorophyll index of corn and soybean

نام صفت Traits name	کشت خالص ذرت Mono culture of corn	ذرت در کشت مخلوط Corn in mixed culture	کشت خالص سویا Mono culture of soybean	سویا در کشت مخلوط Soybean in mixed culture
وزن خشک شاخساره Shoot dry weight	y = -0.0519x + 37.71 R^2 = 0.97 p=0.0026 CV=2.70	y = -0.0496x + 35.81 R^2 = 0.92 p=0.0102 CV=4.40	y = -0.0604x + 34.52 R^2 = 0.95 p=0.0045 CV=4.32	y = -0.0532x + 31.89 R^2 = 0.92 p=0.0100 CV=5.42
وزن خشک ریشه Root dry weight	0.037x + 18.77-y = R^2 = 0.95 p=0.0050 CV=5.33	0.0329x + 17.01-y = R^2 = 0.98 p=0.0008 CV=2.71	y = -0.0256x + 14.81 R^2 = 0.83 p=0.0300 CV=8.48	y = -0.0215x + 13.15 R^2 = 0.87 p=0.0206 CV=6.90
ارتفاع Height	y = -0.3093x + 117.38 R^2 = 0.94 p=0.0057 CV=7.92	y = -0.2974x + 112.29 R^2= 0.84 p=0.0281 CV=14.27	y =-0.1200x + 68.37 R^2 = 0.81 p=0.0364 CV=9.31	y =-0.1392x + 74.87 R^2 = 0.99 p=0.0002 CV=1.65
قطر ساقه Stem diameter	y = -0.0122x +8.13 R^2 = 0.79 p=0.0004 CV=8.33	y = -0.014x +8.53 R^2 =0.80 p=0.0004 CV=8.94	y = 0.0196x + 3.73 if x≤ 50 y =-0.0075x +4.71 if x> 50 R^2 = 0.69 p=0.0833 CV=7.31	y = 0.0154x + 3.48 if x≤ 90.45 y =-0.0183x +4.87 if x> 90.45 R^2 = 0.74 p=0.0619 CV=10.88

غلظت کادمیم خاک از صفر تا ۹۰/۴۵ میلی‌گرم در کیلوگرم ابتدا با شیب ۰/۰۱۵۴ واحد افزایش یافت، سپس در ادامه با شیب ۰/۰۱۸۳- واحد کاهش یافت (شکل ۱- د، جدول ۳). در مجموع در کشت خالص سویا، افزایش سطوح کادمیم تا سطح ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیم نسبت به عدم مصرف کادمیم باعث افزایش ۱/۸۸ درصدی قطر ساقه سویا شد؛ اما در کشت مخلوط قطر ساقه سویا حدود ۷/۷۶ درصد کاهش یافت (شکل ۱- د، جدول ۳). عناصر سنگینی که به گیاه انتقال داده می‌شوند، به‌علت اختلال در سوخت و ساز سلولی بخش هوایی، ارتفاع گیاه را کاهش می‌دهند (Shanker et al., 2005) که با نتایج این تحقیق همسو می‌باشد. همچنین نتایج مطالعه‌ای نشان داد که ارتفاع بوته، قطر ساقه و همچنین وزن خشک شاخساره پیرگیاه نقره‌ای (*Senecio cineraria*) تحت غلظت‌های متفاوت کادمیم (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) کاهش یافت (El-Shanhorey and El-Sayed et al., 2017).

غلظت کادمیم در اندام‌های گیاه و خاک

نتایج جدول تجزیه واریانس ۴ نشان می‌دهد که اثرات ساده تیمار کادمیم و نسبت‌های کاشت و برهمکنش متقابل اثر کادمیم و نسبت‌های کاشت در غلظت کادمیم در شاخساره، غلظت کادمیم در ریشه و غلظت کادمیم قابل جذب در خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴).

جدول ۴. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای آزمایشی بر میزان کادمیم در اندام‌های گیاه، خاک و شاخص‌های گیاه‌پالایی

Table 4. Analysis of variance (mean squares) for the effect of experimental treatments on cadmium content in plant organs, soil and phytoremediation index

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	غلظت کادمیم در شاخساره Cd concentration in shoot	غلظت کادمیم در ریشه Cd concentration in root	غلظت کادمیم در خاک Cd concentration in soil	جذب کادمیم در شاخساره Cd uptake in shoot
کادمیم Cd	4	261.82**	14166.17**	25592.89**	0.20**
نسبت‌های کاشت Planting ratios (Pr)	3	34.04**	9467.06**	734.63**	0.04**
Cd× Pr	12	11.29**	570.52**	50.54**	0.009**
خطای آزمایش Error	60	0.16	3.72	4.91	0.0001
C.V.(%)	-	8.05	4.47	4.59	8.22

**: معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

**, significant at 1% probability levels

نتایج رگرسیونی برهمکنش اثر تیمار کادمیم و نسبت‌های کاشت نشان می‌دهد که غلظت کادمیم در شاخساره ذرت و سویا در خالص و مخلوط به‌صورت غیرخطی و دوتکه‌ای با افزایش سطوح تیمار تغییر یافت (شکل ۲- الف، جدول ۵). با توجه به شکل ۲- الف بوته‌های ذرت نسبت به سویا توانایی بالاتری در جذب کادمیم در شاخساره داشتند و میزان غلظت کادمیم شاخساره بوته‌های سویا و ذرت کشت شده در کشت مخلوط بیشتر از کشت خالص‌شان بود. همچنین شکل ۲- الف نشان می‌دهد در کشت مخلوط با افزایش سطوح تیمار کادمیم از غلظت صفر کادمیم تا حدود ۱۶۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک، میزان غلظت کادمیم در شاخساره ذرت و سویا در مقایسه با کشت خالص‌شان با شیب (حدود ۰/۰۸۷) بیشتری افزایش یافت (شکل ۲- الف، جدول ۵). در مجموع در کشت مخلوط، افزایش غلظت کادمیم در شاخساره ذرت و سویا در بالاترین غلظت کادمیم مورد بررسی (۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) نسبت شاهد به‌ترتیب ۱۸۳/۸۴ و ۶۰۸/۳۳ درصد بود.

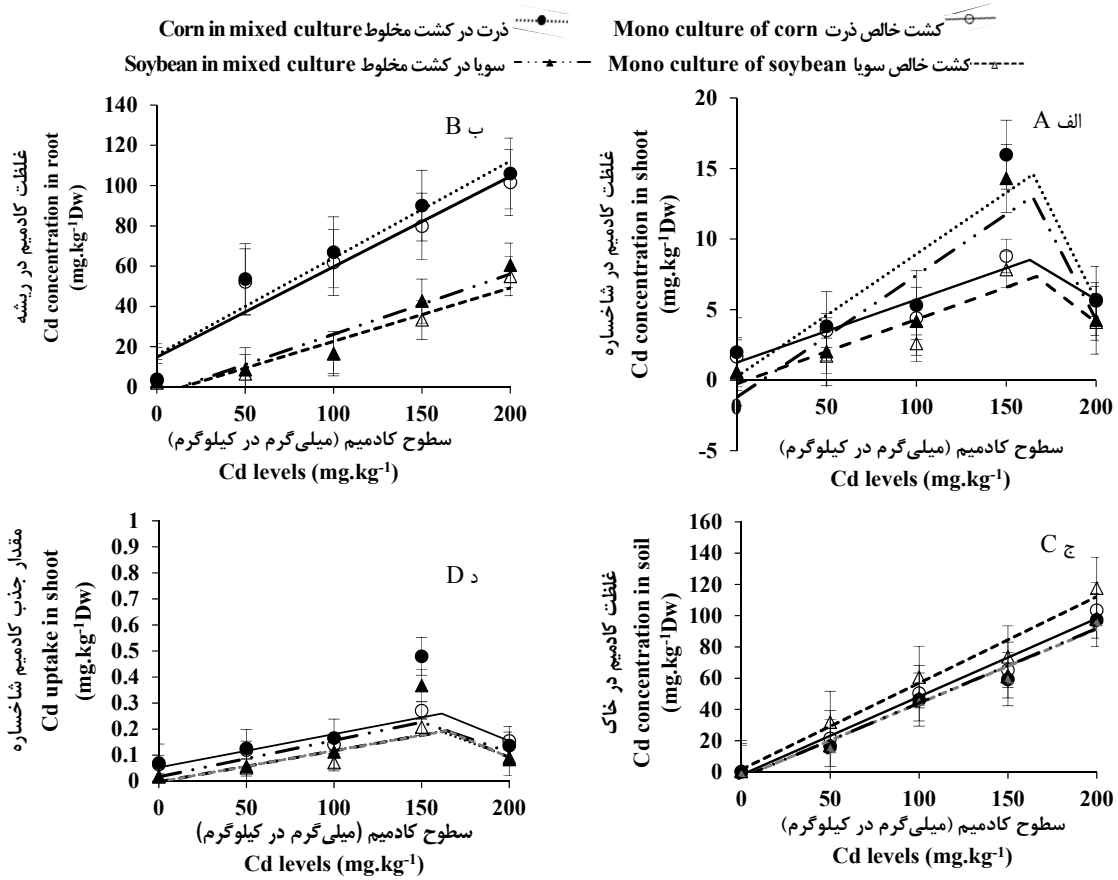
با افزایش سطوح تیمار کادمیم، غلظت کادمیم ریشه ذرت در کشت خالص و مخلوط و غلظت کادمیم ریشه سویا در کشت خالص و مخلوط به‌صورت خطی به‌ترتیب با شیب ۰/۴۴۸۹، ۰/۴۸۱۵، ۰/۲۶۵۵ و ۰/۲۹۹۳ واحد افزایش یافت (شکل ۲- ب، جدول ۵). به‌طوری‌که مقدار افزایش غلظت کادمیم ریشه در ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک نسبت به شاهد (عدم مصرف کادمیم) در ریشه ذرت در کشت خالص و مخلوط و ریشه سویا در کشت خالص و مخلوط به‌ترتیب ۳۱۲۳/۸۱۰، ۸۴/ ۲۶۶، ۲۶۳۳/۸۳ و ۲۱۶۴/۴۲

درصد بود (شکل ۲-ب، جدول ۵). در پژوهش حاضر بیشترین غلظت کادمیم ریشه در کشت مخلوط ذرت و سویا به ترتیب ۱۰۵/۹۷ و ۶۰/۴۶ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم ماده خشک ثبت شد. شکل ۲- ج نشان می‌دهد اثر سطوح کادمیم بر مقدار غلظت کادمیم قابل جذب خاک در کشت خالص ذرت و سویا و همچنین در کشت مخلوطشان نیز به‌صورت خطی افزایش یافت. در تمامی سطوح تیمار کادمیم، غلظت کادمیم قابل جذب در خاکی که تحت کشت خالص سویا بودند؛ بیشتر از سایر سیستم‌های کشت بود. به عبارتی بیشترین غلظت کادمیم قابل استفاده در خاک (۱۱۷/۶۳ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) به کشت خالص سویا در تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک اختصاص یافت (شکل ۲-ج). در همین راستا در مطالعه‌ای مشاهده شد با افزایش غلظت کادمیم در خاک غلظت کادمیم در شاخساره دو واریته فلفل آنوم (*Capsicum annuum* L. cvs. 'Demre' and 'AT58') افزایش یافت (Barut, 2019).

در این آزمایش با توجه به نمودارهای غلظت کادمیم قابل جذب خاک (شکل ۲-ج، جدول ۵)، ریشه‌های سویا نسبت به ذرت تأثیری بیشتری در زیست فراهمی عناصر سنگین کادمیم نشان دادند. احتمالاً افزایش زیست فراهمی عناصر سنگین در تیمار سویا نسبت به ذرت مربوط به ترشحات بیشتر ریشه سویا باشد. در پژوهش حاضر، غلظت کادمیم قابل جذب در کشت خالص بیشتر از کشت مخلوط بود. در حضور گیاه، تنفس ریشه و میکروارگانیسم‌ها فشار جزئی گاز CO_2 در خاک افزایش یافته و با انحلال آن در محلول خاک pH خاک کاهش پیدا می‌کند (Puschenreiter et al., 2005). تبرته فراهانی و همکاران (Tabreteh Farahani et al., 2017) نیز در تحقیقی نشان دادند حلالیت سرب در خاک با کاهش pH خاک افزایش می‌یابد. لی و همکاران (Li et al., 2009) بیان کردند که رشد گیاهان لگومینوز باعث افزایش غلظت نیترات در خاک و در پی آن افزایش تحرک فلزات سنگین گردید. به عبارتی تغییر میزان عناصر قابل دسترس خاک همزمان با تغییر سیستم کشت گیاه می‌تواند حاکی از نقش ترشحات ریشه گیاه در تغییر قابلیت دسترسی عناصر سنگین خاک باشد (Baghaie and Mahanpoor, 2018). در واقع کاشت همزمان محصولات ممکن است بر استخراج فیتوفلزات از خاک تأثیر بگذارد؛ زیرا همزیستی گونه‌های مختلف گیاهی ممکن است میکروارگانیسم‌های ریزوسفر، فعالیت آنزیم‌های خاک و ریزمحیط زیست را تغییر دهد و بنابراین می‌تواند فراهمی زیستی فلزات را در خاک ریزوسفر تحت تأثیر قرار دهد (Khan, 2005; Yang et al., 2009). آزمایشات نشان داده است که برخی از گونه‌های گیاهی می‌توانند به شدت یون H^+ صادر کرده و یا اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم را به خاک منتقل کنند، که می‌تواند با تأثیر بر فعالیت میکروبی تحرک فلزات را افزایش دهد (Chiang et al., 2006; Duarte et al., 2007). علاوه‌براین، H^+ می‌تواند جایگزین کاتیون‌ها شود و کاتیون‌های فلزی را با دسترس‌پذیری بیشتری برخوردار سازد (Marques et al., 2009).

مقدار جذب کادمیم در شاخساره: با توجه به جدول تجزیه واریانس ۴، اثر ساده غلظت کادمیم خاک و نسبت‌های کاشت در مقدار جذب کادمیم در شاخساره ذرت و سویا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. همچنین برهمکنش اثر کادمیم و نوع کشت نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). مقدار جذب کادمیم در شاخساره ذرت و سویا هم در کشت خالص و هم در کشت مخلوط در برابر افزایش غلظت کادمیم خاک روند غیرخطی و دوتکه‌ای داشت (شکل ۲- د، جدول ۵). با توجه به نتایج تجزیه رگرسیون، مقدار جذب کادمیم در شاخساره ذرت در بالاترین سطح کادمیم (۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) نسبت به شاهد (عدم مصرف کادمیم) در کشت خالص و مخلوط به‌ترتیب ۱۴۲/۱۸ و ۹۵/۷۱ درصد افزایش یافت و مقدار جذب کادمیم در شاخساره سویا در بالاترین سطح کادمیم نسبت به شاهد در کشت خالص و مخلوط به‌ترتیب ۴۳۶/۴۷ و ۳۴۲/۱۰ درصد افزایش یافت (شکل ۲- د).

جذب کادمیم در اندام‌های گیاهی ذرت و سویا در کشت مخلوط، بیشتر از کشت خالص بود (شکل ۲- د). بنابراین کاهش وزن خشک ذرت و سویا در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص به‌دلیل جذب بیشتر عناصر سنگین در اندام‌های گیاهی در شرایط کشت مخلوط می‌باشد. در گزارش دیگری آمده است، توانایی گیاهان در تجمع فلزات سنگین به‌طور معمول به‌عنوان مقدار متوسط عناصر سنگین در گرم ماده خشک بیان می‌شود؛ لذا تولید زیاد زیست توده خشک در هر هکتار برای اصلاح خاک بسیار مهم است (Neugschwandtner et al., 2008). با توجه به نتایج،



شکل ۲. اثرات متقابل کادمیم و نسبت‌های کاشت بر روند تغییرات میزان جذب کادمیم در شاخساره (الف)، جذب کادمیم در ریشه (ب)، غلظت کادمیم در خاک (ج) و مقدار جذب کادمیم در شاخساره (د).

Fig. 2. Effect of cadmium and planting ratios on the trend of changes in cadmium concentrations in shoot (a), cadmium concentrations in root (b) and soil cadmium concentrations (c) in corn, soybeans and cadmium uptake in shoot (d).

جدول ۵. معادله مناسب توصیف‌کننده اثر کادمیم و نسبت‌های کاشت بر غلظت کادمیم در اندام‌های گیاه و خاک

Table 5. Appropriate equation describing the effect of cadmium and planting ratios on concentration of cadmium in plant and soil

نام صفت Traits name	کشت خالص ذرت Mono culture of corn	ذرت در کشت مخلوط Corn in mixed culture	کشت خالص سویا Mono culture of soybean	سویا در کشت مخلوط Soybean in mixed culture
کادمیم در شاخساره Cadmium in shoot	y = 0.0446x + 1.25 if x≤163.1 y =-0.0763x +8.52 if x> 163.1 p=0.0122 R² = 0.91 CV=18.5	y = 0.087x + 0.249 if x≤ 164.9 y =-0.255x + 14.59 if x>164.9 R² = 080 p=0.0408 CV=38.68	y = 0.0456x -0.249 if x≤166.8 y =-0.0983x + 7.36 if x>166.8 R² = 0.84 p=0.0294 CV=35.844	y = 0.0865x -1.214 if x≤164.5 y=-0.2466x + 13.01 if x>164.5 R² = 0.81 p=0.0361 CV=47.68
کادمیم در ریشه Cadmium in root	y = 0.4489x + 14.81 R² = 0.93 p=0.0080 CV=18.79	y = 0.4815x + 15.91 R² = 0.94 p=0.0066 CV=17.60	y = 0.2655x - 3.90 R² = 0.93 p=0.0071 CV=28.06	y = 0.2993x - 3.78 R² = 0.93 p=0.0077 CV=28.25
کادمیم در خاک Cadmium in soil	y = 0.5005x -1.89 p=0.0009 R² = 1 CV=12.21	y = 0.4742x -3.49 R² = 0.98 p=0.0016 CV=15.39	y = 0.5526x +1.64 R² = 0.98 p=0.0014 CV=13.22	y = 0.4773x -3.58 R² = 0.98 p=0.0012 CV=14.21
مقدار جذب کادمیم در شاخساره Cadmium uptake in shoot	y = 0.0013x + 0.53 if x≤ 161.6 y =-0.0027x +0.26 if x> 161.6 R² = 0.89 p=0.0148 CV=17.84	y = 0.0012x -0.002 if x≤ 161 y =-0.0025x +0.19 if x> 161 R²= 0.80 p=0.0292 CV=38.15	y = 0.0012x -0.002 if x≤ 161 y =-0.0025x +0.43 if x> 161 R² = 0.84 p=0.0292 CV=35.04	y = 0.0014x +0.017 x≤ 150 if y =-0.0023x +0.23 if x> 150 R² = 0.81 p=0.0377 CV=32.96

توانایی ذرت در استخراج گیاهی به‌دلیل زیست توده بالاتر از سویا بیشتر می‌باشد؛ ولی با کشت مخلوط دو گیاه می‌توان باعث کاهش میزان تنش کادمیم خاک شد. به‌طورکلی می‌توان گفت الگوی کشت گیاه یکی از عوامل مهم بر جذب عناصر سنگین می‌باشد و کشت مخلوط می‌تواند نقش موثری در افزایش راندمان جذب داشته باشد (Baghaie and Mahanpoor, 2018).

نتیجه‌گیری نهایی

ذرت نسبت به سویا غلظت کادمیم بیشتری را در اندام‌های خود ذخیره کرد. تنش ایجاد شده به وسیله کادمیم باعث کاهش رشد رویشی و تجمع کادمیم در شاخساره و ریشه ذرت و سویا شد. اما هر کدام از این گیاهان در کشت مخلوط در مواجهه با تنش کادمیم توانایی رشد بالاتری نشان دادند. از سویی دیگر در کشت مخلوط ذرت و سویا جذب فلز کادمیم در اندام‌های گیاهی نسبت به کشت خالص بیشتر بود. لذا می‌توان از کشت مخلوط جهت کاهش تنش کادمیم خاک بهره جست.

قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از همکاری‌های معاونت پژوهشی و فن‌آوری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در اجرای این پروژه تحقیقاتی با کد مصوب ۰۱-۱۳۹۹-۰۱ به‌واسطه حمایت‌های مالی اعلام می‌دارند.

منابع

Agha Abbasi, K., Bibak, H., Qutbzadeh, S., 2013. Investigation of the effects of cadmium on morphological parameters and physiology of rapeseed seedlings. First National Conference on Bioremediation, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran. [In Persian].

Aravind, P., Prasad, M.N.V., 2005. Cadmium-zinc interaction in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: adaptive echophysiology, biochemistry and molecular toxicology. Brazilian Journal of Plant Physiology. 17, 3-20.

Baghaie, A.H., Mahanpoor, K., 2018. Lead phyto-remediation by corn (Maxima CV.) and white clover in mono culture and mixed culture system in a Pb polluted soil. Iranian Journal of Health and Environment. 11, 75-84. [In Persian with English summary].

Bakhshandeh, E., Soltani, A., Zeinali, E., Kallate-Arabi, M., 2012. Prediction of plant height by allometric relationships in field-grown wheat. Cereal Research Communications. 40(3), 413-422.

Barut, H., 2019. Cadmium-induced changes in growth and micronutrient composition of two pepper cultivars. Applied Ecology and Environmental Research. 17, 2249-2256.

Biria, M., Moezzi, A.A., AmeriKhah, H., 2017. Effect of Sugercan bagasses biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soil. Water and Soil. 31, 609-626. [In Persian].

Bojinova, P., Georgiev, B., Krasteva, V., Chuldjian, H., Stanislavova, L., 1994. Investigation about the heavy metal pollution in soils and agricultural crops in the region of nonferrous metal works 'D. Blagoev'. Soil Science, Agrochemistry and Ecology. 4, 32-40.

Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agronomy Journal. 54, 464-465.

Bremner, J.M., 1970. Nitrogen total, regular kjeldahl method. in methods of soil analysis, part 2: chemical and microbiological properties. (2nd ed.) Agronomy. 9, 610-616.

Chen, J., Wang, X., Zhang, W., Zhang, S., Zhao, F.J., 2020 Protein phosphatase 2A alleviates cadmium toxicity by modulating ethylene production in Arabidopsis thaliana. Plant and Cell Physiology. 43, 1008-1022.

Chiang, P.N., Wang, M.K., Chiu, C.Y., Chou, S.Y., 2006. Effects of cadmium amendments on low-molecular-weight organic acid exudates in rhizosphere soils of tobacco and sunflower. Environmental Toxicology. 21, 479-488.

Dobrikova, A.G., Apostolova, E.L., Hanc, A., Yotsova, E., Borisova, P., Sperdouli, I., Adamakis, I.D.S., Moustakas M., 2021. Cadmium toxicity in *Salvia sclarea* L.: an integrative response of element uptake, oxidative stress markers, leaf structure and

photosynthesis. Frontiers in Plant Science. 209, 111851-111863.

Duarte, B., Delgado, M., Cacador, I., 2007. The role of citric acid in cadmium and nickel uptake and translocation, in Halimione portulacoides. Chemosphere. 69, 836-840.

El-Shanhorey, N.A., El-Sayed, S.G., 2017 The use of Senecio cineraria plants sprayed with citric acid for cadmium pollution phytoremediation. Alexandria Science Exchange Journal. 38, 343-355.

Gee G.W., Bauder., J.W., 1986. Particle-size analysis. in: Klute A. (eds), methods of soil analysis, part 1 - physical and mineralogical methods. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. American Society of Agronomy, Madison. 383-411.

Hassanpour, A., Zahedi, M., Khoshgoftarmanesh, A.H., 2014. Effects of companion crops (bean, soybean and mungbean) on uptake of cadmium from soil by corn and sunflower as the main crops. Journal of Water and Soil Science. 18, 227-242. [In Persian with English summary].

Khan, A.G., 2005. Role of soil microbes in the rhizosphere of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 18, 355-364.

Konkolewska, A., Piechalak, A., Ciszewska, L., Antos-Krzemińska, N., Skrzypczak, T., Hanć, A., Sitko, K., Małkowski, E., Barałkiewicz, D., Małecka, A., 2020. Combined use of companion planting and PGPR for the assisted phytoextraction of trace metals (Zn, Pb, Cd). Environmental Science and Pollution Research. 27, 3809-13825.

Li, N.Y., Li, Z.A., Zhuang, P., Zou, B., 2009. Cadmium uptake from soil by maize with intercrops. Water, Air, and Soil Pollution. 199, 45-56.

Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of America Journal. 42, 421-428.

Lizarazo, C.I., Tuulos, A., Jokela, V., Mäkelä, P.S.A., 2020. Sustainable Mixed Cropping Systems for the Boreal-Nemoral Region. 4, 1-15.

Marques, A., Rangel, A., Castro, P.M.L., 2009. Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 39, 622-654.

Máthé-Gáspár, G., Anton, A., 2005. Phytoremediation study: Factors influencing heavy metal uptake of plants. Acta Biologica Szegediensis. 49, 69-70

Mclean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement in methods of soil analysis, part 2: chemical and microbial properties. (2nd ed.) Agronomy. 9.

Nascimento, C.W.A., Xing, B., 2006. Phytoextraction: A review on enhanced metal availability and plant accumulation. Scientia Agricola. 63, 299-311.

Neugschwandtner, R.W., Tlustos, P., Komarek, M., Szakova, J., 2008. Phytoextraction of Pb and Cd from a contaminated agricultural soil using different EDTA application regimes: laboratory versus field scale measures of efficiency. Geoderma. 144, 446-453.

Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular. Government. Printing Office, Washington D.C. 939, 1-19

Puschenreiter, M., Schnepf, A., Millan, I.M., Fitz, W.J., Horak, O., Klepp, J., Schrefl, T., Lombi, E., Wenzel, W.W., 2005. Changes of Ni biogeochemistry in the rhizosphere of the hyperaccumulator Thlaspi goesingense. Plant and Soil. 271, 205-218.

Rhoades, J.D., 1982. Cation exchange capacity. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., (eds.), Methods of soil analysis, chemical and mineralogical properties, Madison, Wisc:ASA, SSSA.

Rohani, S.KH., Samavat, S., Maez Ardalan, M., 2012. Evolution of effectiveness of zeolite for cadmium absorption and dry matter in lettuce plant. Iranian Journal of Agronomy and Plant Breeding. 8, 61-69. [In Persian with English summary].

Shafiq, S., Adeel, M., Raza, H., Iqbal, R., Ahmad, Z., Naeem, M., Sheraz, M., Ahmed, U., Azmi, U.R., 2019. Effects of foliar application of selenium in maize (*Zea mays* L.) under cadmium toxicity. Biological Forum-An International Journal. 11, 27-37.

Shanbleh, A., Kharabsheh, A., 1996. Stabilization of Cd, Ni and Pb in soil using natural zeolite. Journal of Hazardous Material. 45, 207-217.

Shanker, A.K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., Avudainayagam, S., 2005. Chromium toxicity in plants. Environment International. 31, 739-753.

Tabreteh Farahani, N., Baqaei, A.M., Polous, A., 2017. Effect of enriched cow manure with converter sludge on Fe bio-availability in a lead polluted soil. Journal of Water and Soil Conservation. 24, 205-220. [In Persian with English summary].

Tashakori Fard, E., Taghavi Ghasemkheyli, F., Pirdashti, H., Tajick Ghanbary, M.A., Bahmanyar, M.A., 2017. Symbiotic effect of Trichoderma atroviride on growth characteristics and yield of two cultivars of rapeseed (*Brassica napus* L.) in a contaminated soil treated with copper nitrate. Iranian Journal of Field Crops Research. 15, 74-86. [In Persian with English summary].

Teng, D., Mao, K., Ali, W., Xu, G., Huang, G., Niazi, N.K., Feng, X., Zhang, H., 2020. Describing the toxicity and sources and the remediation technologies for mercury contaminated soil. Royal Society of Chemistry. 10m, 23221-23232.

Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science. 37, 29-38.

Woodis, J.T.C., Hunter, G.B., Johnson, F.J., 1977. Statistical studies of matrix effects on the determination of cadmium and lead in fertilizer and material and plant tissue by flame atomic absorption spectrophotometry. Analytical Chemistry Acta. 90, 127-136.

Xiong, P.P., He, C.Q., Oh, K., Chen, X., Liang, X., Liu, X., Cheng, X., Wu, C.L., Shi, Z.C., 2018. Medicago sativa L. enhances the phytoextraction of cadmium and zinc by Ricinus communis L. on contaminated land in situ. Ecological Engineering. 116, 61-66.

Yang, J., Kloepper, J.W., Ryu, C.M., 2009. Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. Trends in Plant Science. 14, 1-4.