

## گیاه‌پالایی کادمیم به‌وسیله ذرت تحت تأثیر کاربرد بقایای آلی (گندم و یونجه) در یک خاک آهکی

شهرزاد کرمی<sup>۱\*</sup>، عبدالمجید رونقی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۴

۱- دانشجوی دکتری، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

۲- استاد بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sh.k624@gmail.com

### چکیده

گیاه‌پالایی یکی از روش‌های پالایش فلزات سنگین خاک از جمله کادمیم می‌باشد که نسبت به سایر روش‌های موجود ارزان‌تر است. از آنجا که این روش زمان بر بوده و دارای کارایی پایینی است، روش‌هایی برای افزایش کارایی گیاه‌پالایی پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها، افزودن بقایای آلی به خاک‌ها می‌باشد. آزمایشی گلخانه‌ای به‌منظور بررسی اثر کاربرد بقایای گندم و یونجه بر گیاه‌پالایی ذرت در یک خاک آهکی آلوده شده به کادمیم انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل  $2 \times 3 \times 3$  در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. فاکتورها شامل دو نوع بقایای آلی (گندم و یونجه)، در سه سطح (صفر، ۱، و ۲ درصد وزنی) و سه سطح کادمیم (۵، ۱۵، و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و در سه تکرار بود. نتایج نشان داد که افزایش سطوح کادمیم کاربردی، سبب افزایش غلظت کادمیم در خاک و در اندام هوایی ذرت شد، اما وزن خشک و فاکتور انباشت زیستی کادمیم را کاهش داد. افزایش سطوح بقایای گندم و یونجه، سبب افزایش غلظت کادمیم اندام هوایی ذرت و فاکتور انباشت زیستی کادمیم شد. غلظت کادمیم اندام هوایی ذرت و فاکتور انباشت زیستی کادمیم در تیمار بقایای گندم نسبت به تیمار بقایای یونجه بیشتر بود. هرچند میانگین وزن خشک ذرت در خاک تیمار شده با بقایای یونجه به‌طور معنی‌داری نسبت به بقایای گندم بیشتر بود. اثر کاربرد بقایای گندم یا یونجه بر میزان جذب کادمیم به‌وسیله ذرت مشابه بود. کارایی گیاه‌پالایی ذرت در سطوح پایینی کادمیم بیشتر از سطوح بالایی بود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی کادمیم، بقایای گندم، بقایای یونجه، فاکتور انباشت زیستی (BAF)، گیاه‌پالایی

## Cadmium Phytoremediation by Corn as Affected by Organic Residues (Wheat and Alfalfa) application in a Calcareous Soil

S Karami<sup>1\*</sup>, AM Ronaghi<sup>2</sup>

Received: 03 March 2016 Accepted: 14 March 2017

1- Ph.D. Student, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Iran

2- Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Iran

\*Corresponding Author, E-mail: sh.k624@gmail.com

### Abstract

Phytoremediation is a technique for removal of heavy metals including cadmium (Cd) from soils; which is less expensive compared to other methods. Due to the fact that this method is time consuming with low efficiency, hence, other methods are proposed to increase the efficiency of phytoremediation. One method is the application of organic residues to the soils. A greenhouse experiment was conducted to study the effects of the application of wheat or alfalfa residues on phytoremediation of Cd-contaminated calcareous soil by corn. The experiment was a factorial 2×3×3 arranged in a completely randomized design. Treatments consisted of the two types of the organic residues (wheat and alfalfa) in three levels (0, 1, and 2% by weight) and three levels of Cd application (5, 15, and 25 mg kg<sup>-1</sup>) with three replications. Results indicated that increasing the Cd levels, significantly increased the Cd concentration in soil and in the corn shoots, but decreased the dry weight of the corn and bio-accumulation factor (BAF) of Cd. Increasing the levels of wheat and alfalfa residues significantly increased the Cd concentration in the corn shoots and BAF. Addition of the wheat residues resulted in a higher Cd concentration in the corn aerial parts and BAF compared to those with addition of the alfalfa. However, the corn mean shoot dry weight was significantly higher in the soil amended with the alfalfa residues compared to those amended with the wheat residues. Influences of the wheat or alfalfa residues addition on the Cd uptake by corn were similar. Phytoremediation efficiency of the corn at low Cd levels was higher than that at high rates of the applied Cd.

**Keywords:** Alfalfa residues, Bio-accumulation factor (BAF), Cd-contamination, Phytoremediation, Wheat residues

### مقدمه

روش‌ها شامل کاهش pH خاک، افزایش پتانسیل ریداکس (Eh)، استفاده از مواد کی‌لیت کننده و غیره می‌باشند (کرمی و شمس‌الدین ۲۰۱۰). عوامل مختلفی از قبیل pH، Eh، ظرفیت تبادل کاتیونی، نوع گیاه، و کود مورد استفاده در انتقال و تجمع کادمیم در سیستم خاک و گیاه موثر است (پرابیای و همکاران ۲۰۰۹). احتمالاً مکانیسم اصلی پیوند کادمیم، به علت دو ظرفیتی بودن آن، جذب سطحی الکترواستاتیکی در سطوح جذبی است. جذب سطحی به‌وسیله ماده آلی به شدت از تحرک فلزات می‌کاهد. هر چند ماده آلی اثر دوگانه ای دارد بدین معنی که از سویی می‌تواند با کمپلکس کردن عناصر سبب نگهداری و کاهش

از میان روش‌های موجود برای پالایش فلزات سنگین، روش‌های زیستی مانند گیاه‌پالایی، مقرون به صرفه‌تر بوده و خسارت کمتری را متوجه محیط زیست می‌کنند (تانگاو و همکاران ۲۰۱۱). انقلاب صنعتی و وضعیت فلزات سنگین سمی مشکلات بزرگی را برای محیط زیست ایجاد کرده و سبب آلودگی زمین‌های کشاورزی شده است (لی یانگ و همکاران ۲۰۰۵). به‌طور کلی گیاه‌پالایی یک روش نسبتاً کند و با کارایی پایین است. بنابراین روش‌هایی برای افزایش کارایی گیاه‌پالایی پیشنهاد شده است (تانگاو و همکاران ۲۰۱۱). این

توانایی گیاه‌پالایی ذرت (به‌ویژه اندام هوایی) و غلظت کادمیم خاک پس از برداشت گیاه است، چرا که کادمیم انباشته شده در ریشه‌های ذرت هر چند به‌صورت موقت سبب پالایش خاک می‌گردد اما پس از پوسیده شدن ریشه و تجزیه آن در خاک، عملاً کادمیم به خاک باز می‌گردد. ژانگ و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که ذرت می‌تواند حدود ۰/۷ درصد از کادمیم کل خاک را جذب کند. عزیزیان و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان دادند که ذرت به دلیل داشتن زیست‌توده بالا می‌تواند در گیاه‌پالایی کادمیم مؤثر باشد. مطالعات مختلف انجام شده نشان دادند که میزان انباشت کادمیم در اندام‌های مختلف ذرت متفاوت است. عباسی‌زاده (۱۳۸۶) نشان داد که کمپوست زباله شهری سبب افزایش جذب فلزات سنگین در گیاه ذرت شد، به‌گونه‌ای که تجمع فلزات در دانه‌ها کمتر از ریشه و ساقه بود. لذا در پژوهش حاضر به بررسی ذرت علوفه‌ای (مرحله رویشی و نه زایشی) پرداخته شد.

#### مواد و روش‌ها

آزمایش در سال ۱۳۹۳ و در گلخانه تحقیقاتی بخش علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز (منطقه باجگاه با طول جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی، عرض جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی، و ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا) انجام شد. مقدار کافی خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی متری سری کوی اساتید دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز جمع‌آوری و پس از خشک کردن در هوا از الک ۲ میلی متر عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل بافت خاک به روش هیدرومتر (گی و باوئر ۱۹۸۶)، ماده آلی به روش اکسایش با اسید کرومیک و سپس تیترا کردن با فرو آمونیوم سولفات (نلسون و سامرز ۱۹۹۶)، pH خاک در گل اشباع با استفاده از pH متر (توماس ۱۹۹۶)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC<sub>e</sub>) با دستگاه هدایت سنج الکتریکی (رودز ۱۹۹۶)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) به روش جاننشینی کاتیون‌ها با سدیم، شستشو با الکل و جایگزینی سدیم با آمونیوم (چاپمن ۱۹۶۵) و اندازه‌گیری پتاسیم قابل استخراج با

فراهمی آن‌ها در خاک شود و از سوی دیگر بر اثر تجزیه و تولید مواد اسیدی سبب افزایش عناصر در محلول خاک شود. لذا اثر افزودن هر نوع ماده آلی بر روند گیاه‌پالایی می‌تواند بسته به نوع بقایای افزوده شده (آبرئو و همکاران ۲۰۱۲)، سرعت تجزیه آن، نوع خاک، نوع گیاه و در نهایت نوع فلز سنگین متفاوت باشد. در خاک‌های اسیدی آلوده به فلزات سنگین که سمیت برای گیاه ایجاد می‌شود، آهک دهی و کاربرد مواد آلی برای کاهش سمیت فلز و کاهش فراهمی آن برای گیاه و بهبود رشد گیاه پیشنهاد می‌گردد (آدریانو و همکاران ۲۰۰۴، پارک و همکاران ۲۰۱۱). در pH های قلیایی انتقال فلزات سنگین از خاک به بافت‌های گیاهی بسیار کم است و کاهش pH (به‌صورت موقت و طی تجزیه مواد آلی) تحرک و پویایی این فلزات را در خاک افزایش می‌دهد (اسمیت ۲۰۰۹). تغییرات اندک در میزان ماده آلی خاک می‌تواند تأثیر زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی (مانند ظرفیت جذب سطحی عناصر، نگهداری آب و ساختار خاک) و شیمیایی (مانند ظرفیت تبادل کاتیونی، کالیته شدن فلزات و دیگر یون‌ها) داشته باشد (اسچپر، ۲۰۰۳). ماده آلی همچنین می‌تواند سبب تعدیل اثرات pH، بهبود ویژگی‌های زیستی خاک (افزایش جمعیت میکروبی خاک) و افزایش فراهمی عناصر گردد (اسچپر ۲۰۰۳، صفاری‌انارکی و همکاران ۱۳۹۳) و از این طریق بر رشد گیاه تأثیر مثبت داشته باشد. افزایش رشد گیاه و افزایش زیست‌توده گیاهی بر جذب و در نتیجه پالایش فلز سنگین تأثیر مثبت دارد. کارایی گیاهان برای گیاه‌پالایی با فاکتور انباشت زیستی مشخص می‌شود که یک عامل مهم در گیاه‌پالایی است و جذب آلودگی‌ها، تحرک و ذخیره آن‌ها در اندام هوایی گیاه را مشخص می‌کند (مارچیول و همکاران ۲۰۰۴). مقدار فاکتور انباشت زیستی بزرگتر از ۱ نشان می‌دهد که گیاه توانایی خوبی برای جذب آلودگی خاک یا از بستر آلوده و تجمع آن در اندام هوایی خود دارد (معادله ۱).

$$[1] \quad \text{غلظت کادمیم در اندام هوایی} = \frac{\text{غلظت کادمیم در اندام هوایی}}{\text{غلظت کادمیم در خاک}} = \text{فاکتور انباشت زیستی کادمیم}$$

هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی اثر کاربرد بقایای گندم یا یونجه بر فاکتور انباشت زیستی کادمیم و

منوکلسیم فسفات (۲۰ میلی‌گرم P در کیلوگرم خاک)، نیتروژن از منبع اوره (۲۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و در سه قسط مساوی)، روی از منبع سولفات روی (۱۰ میلی‌گرم Zn در کیلوگرم خاک)، آهن از منبع سکوسترین آهن (۵ میلی‌گرم Fe در کیلوگرم خاک)، و مس از منبع سولفات مس (۲/۵ میلی‌گرم Cu در کیلوگرم خاک) به خاک پلاستیک‌ها افزوده شد. کادمیم از منبع سولفات کادمیم در سه سطح (۵، ۱۵، و ۲۵ میلی‌گرم Cd در کیلوگرم خاک) به خاک‌ها اعمال گردید و پس از خشک شدن بخوبی مخلوط و به گلدان انتقال داده شد.

استات آمونیوم به روش شعله سنجی، فسفر قابل استفاده با عصاره‌گیر بیکربنات سدیم ۰/۵ مولار در ۸/۵ pH= (اولسن و همکاران ۱۹۵۴)، نیتروژن کل به روش میکروکلدال (برمنر ۱۹۹۶)، و عناصر کم‌مصرف با عصاره‌گیری با دی اتیلن تری آمین پنتا استیک اسید (DTPA) (لیندزی و نورول ۱۹۷۸) و قرائت به‌وسیله دستگاه جذب اتمی (شیمادزو مدل AA-670) اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

سپس سه کیلوگرم از خاک الک شده در پلاستیک ریخته شد و با توجه به نتایج آزمون خاک، فسفر از منبع

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش.

Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	K	P	N	CEC	OM	OC	pH	EC <sub>e</sub>	FC	بافت خاک	رس	شن
(mg kg <sup>-1</sup> )							(%)	(cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	(%)	(%)		(dS m <sup>-1</sup> )			(%)	(%)
۰/۲	۱/۵	۰/۴	۱۱/۵	۳/۵	۶۲۰	۱۸	۰/۰۶	۱۵	۱/۳	۰/۷۵	۷/۷	۰/۳۵	۱۸	Clay loam	۲۸	۴۲

کلریدریک ۲ نرمال حل و صاف کرده و با آب مقطر گرم شسته و به حجم رسانده شد و غلظت کادمیم به‌وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری پتاسیم بقایا به روش شعله سنجی، فسفر قابل استفاده با روش زرد و عصاره‌گیر آمونیوم مولیبدات و آمونیوم وانادیت (چاپمن و پرت ۱۹۶۱)، نیتروژن کل به روش میکروکلدال (برمنر ۱۹۹۶)، و عناصر کم مصرف و کادمیم به‌وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (لیندزی و نورول ۱۹۷۸). برخی از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده بقایا در جدول ۲ آورده شده است. پس از برداشت، از خاک گلدان‌ها برای تعیین غلظت کادمیم با روش عصاره‌گیری با DTPA (لیندزی و نورول ۱۹۷۸) نمونه برداری شد. مقایسه میانگین داده‌ها به‌وسیله نرم‌افزار SAS و با استفاده از آزمون دانکن تجزیه و تحلیل شد.

### نتایج و بحث

#### وزن خشک اندام هوایی نرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که اثرات اصلی نوع بقایا و سطح آن‌ها و برهمکنش این دو عامل تأثیر معناداری در سطح یک درصد بر وزن خشک اندام هوایی گیاه دارد (جدول ۳). مقایسه میانگین وزن خشک اندام هوایی نرت در خاک تیمار شده با بقایای

بقایای آلی آسیاب و از الک ۱ میلی متر عبور داده شد. تیمارهای بقایای آلی (بقایای گندم و یونجه) در سه سطح (۰، ۱، و ۲ درصد وزنی ماده آلی) به هر گلدان افزوده شد. میزان رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه (FC) که ۱۸ درصد وزنی بود، نگهداری شد. این کار با وزن کردن روزانه گلدان‌ها و افزودن آب مقطر به مقدار لازم انجام شد. سپس در هر گلدان ۶ عدد بذر نرت (رقم HIDO) کاشته و پس از دو هفته تعداد گیاهان به سه عدد در هر گلدان تقلیل داده شد. میانگین درجه حرارت روز و شب در گلخانه به ترتیب ۳۴ و ۱۴ درجه سلسیوس و میانگین شدت نور ۱۲۰۰۰ لوکس بود. پس از ۸ هفته گیاهان از انتهای ساقه کمی بالاتر از سطح خاک جدا شده و پس از شستشو با آب مقطر، در پاکت‌های کاغذی قرار داده و در آون در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت خشک و وزن خشک آنها اندازه‌گیری شد (جدول ۴). اندام هوایی نیز به‌وسیله آسیاب برقی پودر شد. برای اندازه‌گیری غلظت عناصر در اندام هوایی، از روش خشک سوزانی استفاده شد به این ترتیب که یک گرم پودر گیاه را در بوتله چینی ریخته و به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس در کوره خاکستر شد. پس از سرد شدن، هر گرم خاکستر موجود را در ۵ میلی‌لیتر اسید

گندم یا یونجه نشان می‌دهد که میانگین وزن خشک اندام هوایی ذرت با افزایش سطوح کادمیم کاربردی روند کاهشی داشت هر چند از نظر آماری معنادار نبود (جدول ۴).

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های بقایای گندم و یونجه.

Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	K	P	C/N	C		بقایا
								(%)		
(mg kg <sup>-1</sup> )										
۰/۸	۱/۳	۱۳	۱۶	۱۱۴	۵۰۰	۵۰۰	۱۲/۹	۱۵/۵	۱/۲	یونجه
۰/۳	۰/۵	۱۰	۱۵	۴۲	۲۷۰۰	۶۶۲	۷۷/۵	۶۲	۰/۸	گندم

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر نوع بقایا، سطح بقایا و کادمیم بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده.

BAF	کادمیم خاک	کادمیم گیاه		وزن خشک	درجه آزادی	منابع تغییرات
		جذب	غلظت			
۰/۰۵ <sup>ns</sup>	۰/۳۳ <sup>ns</sup>	۶/۰۵ <sup>ns</sup>	۴/۰*	۲۵/۳**	۱	نوع بقایا
۱/۰۷**	۲/۵۵ <sup>ns</sup>	۲۵۹۸**	۱۵/۹**	۱۳/۵**	۲	سطح بقایا
۲/۶۲**	۲۲۷**	۱۲۱۴۷**	۸۱/۲**	۳/۴۶ <sup>ns</sup>	۲	کادمیم
۰/۲۷**	۰/۴۴ <sup>ns</sup>	۴۲/۸ <sup>ns</sup>	۲/۵۶*	۲۳/۳**	۲	نوع بقایا × سطح بقایا
۰/۰۱ <sup>ns</sup>	۰/۶۲ <sup>ns</sup>	۲۸۷ <sup>ns</sup>	۳/۸۸**	۰/۱۴ <sup>ns</sup>	۲	نوع بقایا × کادمیم
۰/۴۳**	۲/۱۹*	۲۲۲ <sup>ns</sup>	۱/۴۴ <sup>ns</sup>	۱/۱۵ <sup>ns</sup>	۴	سطح بقایا × کادمیم
۰/۰۹*	۰/۳۸ <sup>ns</sup>	۹۹/۷ <sup>ns</sup>	۰/۹۷ <sup>ns</sup>	۰/۳۹ <sup>ns</sup>	۴	نوع بقایا × سطح بقایا × کادمیم
۰/۰۲۴	۰/۸	۱۱۹	۰/۶۲	۱/۱	۳۷	خطا
...	...	...	...	...	۵۴	کل

\* و \*\* به ترتیب در سطح ۵ و ۱ درصد معنی‌دار است و ns به لحاظ آماری معنی‌دار نمی‌باشد.

جدول ۴- اثر نوع و سطوح بقایای آلی، و سطوح کادمیم بر وزن خشک اندام هوایی ذرت (گرم در گلدان).

میانگین	سطوح کادمیم (mg kg <sup>-1</sup> )			سطوح بقایا (%)
	۲۵	۱۵	شاهد	
گندم				
۱۳/۷ A	۱۲/۹ a	۱۳/۸ a	۱۴/۵ a *	۰
۱۳/۸ A	۱۳/۵ a	۱۳/۸ a	۱۴/۱ a	۱
۱۰/۳ B	۹/۹۰ b	۱۰/۳ b	۱۰/۷ b	۲
۱۲/۶ B	۱۲/۱ C	۱۲/۶ C	۱۳/۱ BC	میانگین
یونجه				
۱۳/۷ A	۱۲/۹ a	۱۳/۸ a	۱۴/۵ a	۰
۱۳/۹ A	۱۴/۵ a	۱۳/۴ a	۱۳/۸ a	۱
۱۴/۳ A	۱۳/۶ a	۱۳/۳ a	۱۴/۹ a	۲
۱۳/۹ A	۱۳/۷ AB	۱۳/۸ AB	۱۴/۴ A	میانگین

\* اعدادی که در هر ردیف یا ستون دارای یک حرف مشترک کوچک یا بزرگ هستند از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد با آزمون دانکن معنی‌دار نمی‌باشند.

کاربرد بقایای یونجه می‌تواند به دلیل تجزیه سریع تر بقایای یونجه با توجه به نسبت کربن به نیتروژن کمتر آن (۱۲/۹) نسبت به بقایای گندم (۷۷/۵) باشد (جدول ۲) که سبب افزایش قابلیت دسترسی عناصر در مدت زمان کمتری نسبت به بقایای گندم می‌شود.

#### غلظت و جذب کادمیم به وسیله اندام هوایی ذرت

اثرات اصلی کلیه تیمارها (نوع بقایا در سطح ۵ درصد و سطوح بقایا و کادمیم در سطح یک درصد) و اثرات متقابل دو گانه نوع و سطح بقایا (در سطح ۵ درصد) و نوع بقایا و سطح کادمیم (در سطح ۱ درصد) بر غلظت کادمیم اندام هوایی ذرت معنادار بود (جدول ۳). داده‌های جدول ۵ نشان می‌دهد که در خاک تیمار شده با بقایای گندم، با کاربرد کادمیم به میزان ۱۵ و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، میانگین غلظت کادمیم اندام هوایی ذرت به ترتیب به میزان ۹۸/۸ و ۲۰۵ درصد نسبت به تیمار شاهد (سطح ۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) افزایش معنی‌داری یافت که امری بدیهی و قابل انتظار بود.

بناویدز و همکاران (۲۰۰۵) اظهار داشتند که کاهش رشد گیاهان در معرض کادمیم احتمالاً به دلیل مهار فعالیت‌های متابولیکی مهم نظیر تنش اکسیداتیو، فتوسنتز و تنفس می‌باشد. افزایش مقدار بقایای کاربردی در سطح ۲ درصد (بقایای گندم) سبب کاهش معنی‌دار میانگین وزن خشک ذرت شد و در بقایای یونجه معنادار نبود. کاربرد بقایا در برخی شرایط و به دلایلی همچون کاهش تهویه خاک و سرد و مرطوب شدن آن و کاهش قابلیت دسترسی عناصر غذایی برای گیاه، موجب کاهش عملکرد گیاه می‌گردد اما این افت محصول بصورت موقتی می‌باشد و در طولانی مدت می‌تواند با افزایش درصد کربن آلی خاک، سبب افزایش عملکرد شود (علیجانی و همکاران، ۱۳۹۰). موداریسنا و سیاهان (۲۰۱۴) با کاربرد مواد آلی برای افزایش کارایی گیاه‌پالایی جیوه به وسیله گیاهان محلی نشان دادند که کاربرد ۰/۶۵ درصد کربن آلی، سبب افزایش وزن خشک گیاهان نسبت به تیمارهای شاهد شد. به طور کلی میانگین وزن خشک ذرت در خاک تیمار شده با بقایای یونجه به طور معنی‌داری (۱۰/۳ درصد) نسبت به بقایای گندم بیشتر بوده است (جدول ۴). این افزایش در رشد گیاه با

جدول ۵- اثر نوع و سطوح بقایای آلی، و سطوح کادمیم بر غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت (میکروگرم در گرم اندام هوایی).

میانگین	سطوح کادمیم ( $\text{mg kg}^{-1}$ )		شاهد	سطوح بقایا (%)
	۲۵	۱۵		
	گندم			
۳/۶۲ D	۵/۲۲ bcd	۴/۰۰ def	۱/۶۸ h *	۰
۵/۳۸ AB	۸/۱۷ a	۵/۴۸ bcd	۲/۴۸ gh	۱
۵/۹۶ A	۹/۳۲ a	۵/۳۰ bcd	۳/۲۷ efg	۲
۴/۹۹ A	۷/۵۷ A	۴/۹۳ C	۲/۴۸ D	میانگین
	یونجه			
۳/۶۲ D	۵/۲۲ bcd	۴/۰۰ def	۱/۶۸ h	۰
۵/۱۵ BC	۶/۳۰ b	۵/۹۰ bc	۳/۲۵ efg	۱
۴/۵۵ C	۶/۳۵ b	۴/۵۵ cde	۲/۷۷ fgh	۲
۴/۴۴ B	۵/۹۵ B	۴/۸۲ C	۲/۵۷ D	میانگین

\* اعدادی که در هر ردیف یا ستون دارای یک حرف مشترک کوچک یا بزرگ هستند از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد با آزمون دانکن معنی‌دار نمی‌باشند.

و ۶۴/۲ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد بقایا) افزایش معنی‌داری یافت. در خاک تیمار شده با بقایای

با افزودن سطوح ۱ و ۲ درصد بقایای گندم، میانگین غلظت کادمیم اندام هوایی به ترتیب به میزان ۴۸/۲

اثرات اصلی سطوح بقایا و کادمیم (در سطح یک درصد) بر جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت معنادار بود (جدول ۳). در خاک تیمار شده با بقایای گندم، با کاربرد کادمیم به میزان ۱۵ و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، میانگین جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت به‌ترتیب به‌میزان ۹۴/۶ و ۱۸۷ درصد نسبت به تیمار شاهد (سطح ۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) افزایش معنی‌داری یافت که امری بدیهی است (جدول ۶). با افزودن سطوح ۱ و ۲ درصد بقایای گندم، میانگین جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت به‌ترتیب به‌میزان ۵۱/۱ و ۲۳/۳ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد بقایای گندم یا یونجه) افزایش معنی‌داری یافت. در خاک تیمار شده با بقایای یونجه، با افزایش سطوح کادمیم کاربردی، میانگین جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت به‌ترتیب به‌میزان ۷۹/۶ و ۱۲۱ درصد نسبت به تیمار شاهد (۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) افزایش معنی‌داری یافت. با افزودن سطوح ۱ و ۲ درصد بقایای یونجه، میانگین جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت به‌ترتیب به‌میزان ۴۷ و ۳۱/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد بقایا) افزایش معنی‌داری یافت. اثر افزودن هر دو نوع بقایای آلی بر جذب کادمیم مشابه بوده و با افزایش سطح بقایا، جذب کادمیم نیز افزایش یافت که این می‌تواند به دلیل تشکیل کمپلکس ماده آلی- کادمیم و افزایش فراهمی آن و در نتیجه افزایش استخراج گیاهی باشد. نتایج این پژوهش با نتایج فرزنانگان و همکاران (۱۳۸۵) مطابقت دارد. چرم و علیزاده (۱۳۸۸) اثرات کمپوست و بقایای نیشکر و EDTA را در کشت کلزا جهت پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم، سرب و نیکل بررسی کردند. آنان نشان دادند که کاربرد کمپوست و EDTA به‌طور معنی‌داری سبب افزایش غلظت کادمیم شد. آنان همچنین گزارش کردند که تیمارهای کمپوست دارای شاخص جذب بالاتری بودند که دلیل آن را بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک دانستند.

یونجه نیز با کاربرد کادمیم به میزان ۱۵ و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، میانگین غلظت کادمیم اندام هوایی ذرت به‌ترتیب به‌میزان ۸۷/۵ و ۱۳۱ درصد نسبت به تیمار شاهد (۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) افزایش معنی‌دار یافت. با افزودن سطوح ۱ و ۲ درصد بقایای یونجه، میانگین غلظت کادمیم اندام هوایی ذرت به‌ترتیب به‌میزان ۴۱/۹ و ۲۵/۳ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد بقایای گندم یا یونجه) افزایش معنی‌داری یافت. افزایش غلظت کادمیم در اندام هوایی با کاربرد سطوح مختلف بقایای گندم و یونجه می‌تواند به دلیل افزایش قابلیت فراهمی این عنصر در خاک باشد. آلماس و همکاران (۲۰۰۰) گزارش کردند که افزودن مواد آلی سبب افزایش قابلیت انحلال کادمیم خاک به‌وسیله تشکیل کمپلکس فلز- ماده آلی می‌گردد. فرزنانگان و همکاران (۱۳۸۵) نیز بیان کردند که بکارگیری اصلاح‌کننده‌های آلی در خاک سبب تغییر در حلالیت فلزات سنگین و تجمع بعدی شان در گیاه می‌گردد. مقایسه کلی اثر کاربرد بقایای گندم و یونجه نشان داد که میانگین غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت کشت شده در خاک تیمار شده با بقایای یونجه نسبت به خاک تیمار شده با بقایای گندم به‌طور معنی‌داری کمتر بود (۱۱ درصد) که عکس نتایج مربوط به عملکرد وزن خشک ذرت است (جدول ۴). بنابراین ممکن است علاوه بر دلایل ذکر شده در خصوص تجزیه سریع تر بقایای یونجه، بالاتر بودن میانگین غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت در خاک تیمار شده با بقایای گندم نیز سبب کاهش میانگین وزن خشک ذرت در این تیمار نسبت به تیمار بقایای یونجه شده باشد. بیشترین میانگین غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت (۹/۳۲ میکروگرم در گرم اندام هوایی) مربوط به خاک تیمار شده با ۲ درصد بقایای گندم و سطح ۲۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و کمترین غلظت کادمیم (۱/۶۸ میکروگرم در گرم اندام هوایی) مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۵).

جدول ۶- اثر نوع و سطوح بقایای آلی، و سطوح کادمیم بر جذب کادمیم به وسیله اندام هوایی ذرت (میکروگرم در گلدان).

میانگین	سطوح کادمیم (mg kg <sup>-1</sup> )		شاهد	سطوح بقایا (%)
	۲۵	۱۵		
		گندم		
۴۸/۸ C	۶۷/۳ cde	۵۴/۹ ef	۲۴/۴ g*	۰
۷۳/۸ A	۱۱۱ a	۷۵/۴ bcd	۳۵/۲ fg	۱
۶۰/۲ B	۹۲/۴ b	۵۳/۵ ef	۳۴/۸ fg	۲
۶۱/۰ A	۹۰/۲ A	۶۱/۲ B	۳۱/۴ C	میانگین
		یونجه		
۴۸/۸ C	۶۷/۳ cde	۵۴/۹ ef	۲۴/۴ g	۰
۷۱/۸ A	۹۱/۶ b	۷۸/۷ bcd	۴۵/۱ f	۱
۶۴/۳ AB	۸۶/۲ bc	۶۵/۴ de	۴۱/۳ fg	۲
۶۱/۶ A	۸۱/۷ A	۶۶/۳ B	۳۶/۹ C	میانگین

\* اعدادی که در هر ردیف یا ستون دارای یک حرف مشترک کوچک یا بزرگ هستند از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد با آزمون دانکن معنی دار نمی باشند.

در بقایای مختلف باید بررسی کردند. فرزندگان و همکاران (۱۳۸۵) بیان کردند که با توجه به تنوع آلودگی‌ها، نوع خاک‌ها و عوامل مؤثر بر کارایی گیاه‌پالایی نتایج مطالعات در این زمینه می‌تواند بسیار متفاوت باشد.

#### غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت ذرت

اثر اصلی کادمیم (در سطح یک درصد) و اثر متقابل آن با سطوح مختلف بقایا (در سطح ۵ درصد) بر غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت ذرت معنادار بود (جدول ۳). داده‌های جدول ۷ نشان می‌دهد که در خاک تیمار شده با بقایای گندم، با کاربرد سطوح مختلف کادمیم، میانگین غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت ذرت به ترتیب به میزان ۲۴۰ و ۴۲۹ درصد نسبت به تیمار شاهد (۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) افزایش معنی‌داری یافت که امری طبیعی و قابل انتظار است. ملک‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که با افزایش سطح کادمیم، غلظت کادمیم قابل جذب خاک، غلظت و مقدار جذب کادمیم اندام هوایی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک تیمار شده با بقایای یونجه نیز، با کاربرد کادمیم به میزان ۱۵ و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، میانگین غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت ذرت به ترتیب به میزان ۲۱۵ و ۳۶۲ درصد نسبت به تیمار شاهد (۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) افزایش معنی‌داری یافت. افزایش سطوح بقایای گندم یا یونجه تفاوت

قربانی (۱۳۸۹) نشان داد غلظت کادمیم در گیاه با افزایش سطح ورمی کمپوست افزایش معنی‌داری پیدا کرد و کودهای زیستی سبب افزایش جذب کادمیم به‌وسیله اسفناج شدند که با نتایج به دست آمده برای ذرت در این آزمایش تطابق دارد. مقایسه کلی اثر کاربرد بقایای گندم و یونجه نشان داد که به‌طور کلی نوع بقایای افزوده شده به خاک اثر معنی‌داری بر میانگین جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت نداشت (جدول ۶). بیشترین مقدار جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت (۱۱۱ میکروگرم در گلدان) مربوط به خاک تیمار شده با ۱ درصد بقایای گندم و سطح ۲۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و کمترین میزان جذب (۲۴/۴ میکروگرم در گلدان) مربوط به خاک بدون کاربرد بقایای گندم یا یونجه و سطح ۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک (شاهد) بود بنابراین تیمارهای افزوده شده به خاک در افزایش جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت مؤثر بوده است. با توجه به داده‌های جدول ۵ کاربرد سطح یک درصد بقایای گندم یا یونجه سبب افزایش بیشتر میانگین جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی نسبت به کاربرد سطح ۲ درصد بقایای گندم یا یونجه شده است (جدول ۶) که لزوم بررسی اثر افزودن میزان های مختلف بقایا بر جذب کادمیم و کارایی گیاه‌پالایی را نشان می‌دهد. به عبارتی ممکن است کاربرد سطوح بالاتر بقایای آلی اثرات متفاوتی بر جذب عناصر سنگین به‌وسیله گیاه بر جای گذارد و مقدار بهینه کاربرد



با وجود معنادار نبودن اثر اصلی نوع بقایا، و با توجه به اثرات سه‌گانه موجود در متن جدول ۷ می‌توان مشاهده کرد که در خاک تیمار شده با بقایای یونجه کادمیم کمتری در خاک پس از برداشت نسبت به تیمار بقایای گندم وجود دارد و به‌جز در سطح شاهد کادمیم (سطح ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، بقایای یونجه مقادیر کمتری کادمیم قابل استخراج با DTPA در خاک باقی گذاشته‌اند. این نشان می‌دهد که اثر افزودن بقایا، در سطوح مختلف آلودگی نیز ممکن است متفاوت باشد. نتایج نشان می‌دهد که در سطوح پایین آلودگی کادمیم، بقایای گندم و در سطوح بالای کادمیم بقایای یونجه اثرات بهتری بر کاهش آلودگی خاک داشته‌اند.

معنی‌داری در میانگین غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت ذرت نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد بقایای یونجه) ایجاد نکردند (جدول ۷). مقایسه کلی اثر کاربرد بقایای گندم و یونجه نشان داد که به‌طورکلی نوع بقایای افزوده شده به خاک اثر معنی‌داری بر میانگین غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت ذرت نداشت (جدول ۷). بیشترین غلظت کادمیم در خاک (۱۰/۰ میکروگرم در گرم خاک) مربوط به خاک تیمار شده با ۲ درصد بقایای گندم و سطح ۲۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و کمترین غلظت کادمیم در خاک (۱/۵۰ میکروگرم در گرم خاک) مربوط به خاک تیمار شده با ۱ درصد بقایای گندم و سطح ۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک (شاهد) بود (جدول ۷).

جدول ۷- اثر نوع و سطوح بقایای آلی، و سطوح کادمیم بر غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت ذرت (میکروگرم در گرم خاک).

میانگین	سطوح کادمیم (mg kg <sup>-1</sup> )			سطوح بقایا (%)
	۲۵	۱۵	شاهد	
		گندم		
۵/۲۰ A	۸/۲۱ b	۵/۳۷ d	۲/۰۱ e *	۰
۵/۶۷ A	۹/۲۵ ab	۶/۲۶ cd	۱/۵۰ e	۱
۵/۹۱ A	۱۰/۰ a	۶/۰۱ d	۱/۶۸ e	۲
۵/۵۹ A	۹/۱۶ A	۵/۸۸ B	۱/۷۳ C	میانگین
		یونجه		
۵/۲۰ A	۸/۲۱ b	۵/۳۸ d	۲/۰۱ e	۰
۵/۱۵ A	۷/۶۷ bc	۶/۲۴ cd	۱/۵۵ e	۱
۵/۹۵ A	۹/۸۸ a	۵/۹۵ d	۲/۰۳ e	۲
۵/۴۳ A	۸/۵۹ A	۵/۸۶ B	۱/۸۶ C	میانگین

\* اعدادی که در هر ردیف یا ستون دارای یک حرف مشترک کوچک یا بزرگ هستند از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد با آزمون دانکن معنی‌دار نمی‌باشند.

سطوح کادمیم کاربردی، سبب کاهش معنی‌دار میانگین فاکتور انباشت زیستی کادمیم در اندام هوایی ذرت به‌ترتیب به‌میزان ۴۳/۲ و ۴۳/۹ درصد نسبت به تیمار شاهد (سطح ۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) شد (جدول ۸) که می‌تواند به دلیل کاهش زیست‌توده گیاه باشد.

#### فاکتور انباشت زیستی (BAF) کادمیم

اثرات سه‌تایی تیمارها بر فاکتور انباشت زیستی کادمیم در سطح ۵ درصد معنادار بود (جدول ۳). همچنین اثرات اصلی سطوح بقایا و کادمیم و اثرات دوتایی نوع و سطح بقایا و سطوح بقایا و کادمیم (در سطح یک درصد) معنادار بودند. در خاک تیمار شده با بقایای گندم، افزایش

جدول ۸- اثر نوع و سطوح بقایای آلی، و سطوح کادمیم بر فاکتور انباشت زیستی (BAF) کادمیم.

میانگین	سطوح کادمیم (mg kg <sup>-1</sup> )		شاهد	سطوح بقایا (%)
	۲۵	۱۵		
	گندم			
۰/۷۴ C	۰/۶۵ d	۰/۷۵ d	۰/۸۳ d *	۰
۱/۱۴ A	۰/۸۹ d	۰/۸۸ d	۱/۶۶ b	۱
۱/۲۶ A	۰/۹۵ d	۰/۸۹ d	۱/۹۵ a	۲
۱/۰۴ A	۰/۸۳ B	۰/۸۴ B	۱/۴۸ A	میانگین
	یونجه			
۰/۷۴ C	۰/۶۵ d	۰/۷۵ d	۰/۸۳ d	۰
۱/۲۹ A	۰/۸۲ d	۰/۹۴ d	۲/۱۰ a	۱
۰/۹۳ B	۰/۶۵ d	۰/۷۷ d	۱/۳۷ c	۲
۰/۹۹ A	۰/۷۰ B	۰/۸۲ B	۱/۴۳ A	میانگین

\* اعدادی که در هر ردیف یا ستون دارای یک حرف مشترک کوچک یا بزرگ هستند از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد با آزمون دانکن معنی‌دار نمی‌باشند.

یونجه نشان داد که به‌طور کلی نوع بقایای افزوده شده اثر معنی‌داری بر میانگین فاکتور انباشت زیستی کادمیم در اندام هوایی نرت نداشت و اثر هر دو بقایا مشابه بود (جدول ۸). مقایسه اثرات سه‌گانه نشان می‌دهد که کاربرد بقایای آلی در سطح شاهد (سطح ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک کادمیم) نسبت به سطوح بالاتر کادمیم مؤثرتر بوده و با افزایش سطح بقایا افزایش معنی‌داری نشان داده است (متن جدول ۸). در اینجا می‌توان به وضوح اثر سطوح مختلف آلودگی و سطوح مختلف بقایا بر کارایی گیاه‌پالایی را مشاهده نمود. به عبارتی کاربرد بقایا در سطوح کم آلودگی کادمیم و به میزان ۲ درصد وزنی برای بقایای گندم و ۱ درصد وزنی برای بقایای یونجه بهترین تأثیر را بر افزایش کارایی گیاه‌پالایی داشت. بیشترین مقدار فاکتور انباشت زیستی کادمیم (۲/۱۰) مربوط به خاک تیمار شده با ۱ درصد بقایای یونجه و سطح ۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک (شاهد) بود. کمترین مقدار فاکتور انباشت زیستی (۰/۶۵) مربوط به سطح ۲۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و بدون کاربرد بقایا (شاهد) بود (جدول ۸). با توجه به نتایج پژوهش عزیزیان و همکاران (۲۰۱۱) مقدار فاکتور انباشت زیستی نرت کمتر از واحد بود و پتانسیل گیاه‌پالایی آن برای پالایش کادمیم کم بود. رابینسون و همکاران (۲۰۰۰) با افزایش کادمیم خاک، یک کاهش کلی

با افزودن سطوح ۱ و ۲ درصد بقایای گندم، میانگین فاکتور انباشت زیستی کادمیم در اندام هوایی نرت به‌ترتیب به‌میزان ۵۴ و ۷۰ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد بقایای گندم) افزایش معنی‌داری یافت. در خاک تیمار شده با بقایای یونجه، با کاربرد کادمیم به میزان ۱۵ و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، میانگین فاکتور انباشت زیستی کادمیم در اندام هوایی نرت به‌ترتیب به‌میزان ۴۲/۶ و ۵۱ درصد نسبت به تیمار شاهد (سطح ۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) کاهش معنی‌داری یافت. با افزودن سطوح ۱ و ۲ درصد بقایای یونجه، میانگین فاکتور انباشت زیستی کادمیم در اندام هوایی نرت به‌ترتیب به‌میزان ۴۲/۶ و ۲۵/۷ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد بقایای یونجه) افزایش معنی‌داری یافت. بنابراین کاربرد هر دو نوع بقایا سبب افزایش کارایی گیاه‌پالایی نرت نسبت به شرایط بدون افزودن بقایای آلی شده است. بقایای گندم و یونجه می‌توانند با بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و افزایش جمعیت میکروبی خاک و فراهم کردن عناصر مورد نیاز گیاه طی فرآیند تجزیه سبب افزایش کارایی نرت برای گیاه‌پالایی کادمیم شوند. نتایج این پژوهش با نتایج صفاری‌انارکی و همکاران (۱۳۹۳) و فرزنانگان و همکاران (۱۳۸۵) مبنی بر تأثیر افزودن اصلاح‌گرهای آلی بر کارایی گیاه‌پالایی همخوانی دارد. مقایسه بقایای گندم و

یافت (جدول ۹). افزایش سطوح بقایای گندم سبب کاهش وزن خشک شد اما میانگین غلظت کادمیم در اندام هوایی ذرت و فاکتور انباشت زیستی کادمیم افزایش یافت (جدول ۹). با افزایش سطوح بقایای یونجه، غلظت و جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت افزایش یافت. با افزایش سطوح کادمیم کاربردی در خاک تیمار شده با بقایای یونجه، میانگین غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت و غلظت و جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت افزایش اما فاکتور انباشت زیستی کادمیم کاهش یافت.

را در مقدار فاکتور انباشت زیستی گونه‌های جنگلی مشاهده کردند. فرزندگان و همکاران (۱۳۸۵) بیان کردند که کاربرد مواد آلی سبب افزایش کارایی گیاه‌پالایی می‌گردد که در بخش‌های قبل بصورت مفصل به بیان دلایل این افزایش پرداخته شد.

#### نتایج رگرسیون خطی

با افزایش سطوح کادمیم کاربردی در خاک تیمار شده با بقایای گندم، میانگین غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت گیاه و غلظت و جذب کادمیم در اندام هوایی ذرت افزایش اما فاکتور انباشت زیستی کادمیم کاهش

جدول ۹- نتایج رگرسیون خطی بین سطوح کادمیم و سطوح بقایای افزوده شده به خاک و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده.

ویژگی	معادله	R <sup>2</sup>
بقایای گندم		
وزن خشک	$14/335 - 1/724 (\%PR)$	۰/۵۴ **
غلظت کادمیم در اندام هوایی گیاه	$0/01 + 0/254 Cd + 1/164 (\%PR)$	۰/۸۵ **
جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی گیاه	$16/889 + 2/94 Cd$	۰/۷۰ **
غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت	$0/016 + 0/372 Cd$	۰/۹۱ **
فاکتور انباشت زیستی کادمیم	$1/281 - 0/033 Cd + 0/258 (\%PR)$	۰/۵۵ **
بقایای یونجه		
غلظت کادمیم در اندام هوایی گیاه	$1/444 + 0/169 Cd + 0/461 (\%PR)$	۰/۷۲ **
جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی گیاه	$20/376 + 2/238 Cd + 7/705 (\%PR)$	۰/۷۰ **
غلظت کادمیم در خاک پس از برداشت	$0/391 + 0/336 Cd$	۰/۸۸ **
فاکتور انباشت زیستی کادمیم	$1/533 - 0/036 Cd$	۰/۴۰ **

\* و \*\* به ترتیب در سطح پنج و یک درصد معنی‌دار است. Cd سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم خاک) (۵، ۱۵، ۲۵) و PR، سطوح بقایای گندم یا یونجه افزوده شده به خاک (درصد وزنی) (۰، ۱، ۲ و ۲ درصد وزنی) است.

#### نتیجه‌گیری کلی

به‌طورکلی اثر کاربرد بقایای گندم و یونجه بر میزان جذب کادمیم به‌وسیله ذرت مشابه بود. با توجه به اثر دوگانه مواد آلی بر عناصر و افزایش غلظت و جذب کادمیم به‌وسیله اندام هوایی ذرت در خاک‌های تیمار شده با بقایا، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن بقایای گندم یا یونجه سبب افزایش فراهمی کادمیم در خاک و گیاه و در نتیجه افزایش کارایی گیاه‌پالایی به‌وسیله ذرت (فاکتور انباشت زیستی کادمیم) شده است. افزایش سطوح کادمیم کاربردی، سبب افزایش غلظت کادمیم در خاک و در اندام هوایی ذرت شد، اما فاکتور انباشت زیستی کادمیم را

افزودن بقایای گندم سبب افزایش معنی‌دار فاکتور انباشت زیستی کادمیم و کارایی گیاه‌پالایی شد اما در خاک‌های تیمار شده با بقایای یونجه، تنها سطوح کادمیم کاربردی بر فاکتور انباشت زیستی اثر داشت (جدول ۹). این نتایج برتری افزودن بقایای گندم نسبت به بقایای یونجه را نشان می‌دهد. در بخش‌های گذشته به لزوم توجه به سطح آلودگی کادمیم و مقدار مصرف بقایا سخن به میان آمد. لازم به ذکر است که کاربرد بقایای یونجه به مقدار کمتر (۱ درصد وزنی) نسبت به گندم (۲ درصد وزنی) نیز می‌تواند در نوبه خود مؤثر واقع گردد.

اندام هوایی ذرت شد و نسبت به بقایای یونجه برتری داشت. نوع آلودگی و میزان آن و نوع بقایا و میزان کاربرد آن‌ها، می‌توانند بر کارایی گیاه‌پالایی تأثیرگذار باشند. کاربرد بقایا در سطوح کم آلودگی کادمیم و به‌میزان ۲ درصد وزنی برای بقایای گندم و ۱ درصد وزنی برای بقایای یونجه بهترین تأثیر را بر افزایش کارایی گیاه‌پالایی ذرت داشت.

کاهش داد. با افزودن بقایای گندم یا یونجه در سطوح پایین کادمیم، کارایی گیاه‌پالایی ذرت نسبت به سطوح بالای کادمیم بیشتر بود. روند کاهش میانگین وزن خشک اندام هوایی ذرت با افزایش سطوح کادمیم کاربردی، معنی‌دار نبود و این را می‌توان به عنوان یک مزیت برای گیاه‌پالایی به‌وسیله ذرت در نظر گرفت. بقایای گندم سبب افزایش غلظت کادمیم و فاکتور انباشت زیستی آن در

#### منابع مورد استفاده

- Abbasi zadeh A, 2007. Effect of sewage sludge and compost on nutrient requirements of plant, corn yield and soil contamination on heavy metals, Master's thesis, Isfahan University of Technology (In Persian).
- Abreu CA, Coscione AR, Moreno Pires A and Paz-Ferreiro J, 2012. Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments. *Journal of Geochemical Exploration* 123: 3-7.
- Adriano DC, Wenzel WW, Vangrosveld J and Nolam NS, 2004. Role of assisted natural remediation in environmental clean-up. *Geoderma* 122: 121-142.
- Alijani Kh, Bahrani MJ and Kazemeini SA, 2011. Effects of tillage methods and rates of corn residues on wheat growth, yield and yield components. *Iranian Journal of Field Crops Research* 9(3): 486-493.
- Almas AR, Mc Bride MB and Sing BR, 2000. Solubility and Lability of Cadmium and Zinc in Two Soils Treated With Organic Matter. *Soil Science* 165(3): 250-259.
- Azizian A, Amin S, Noshadi M, Maftoun M and Emam Y, 2011. Phytoremediation potential of corn and oat for increased levels of soil cadmium under different irrigation intervals. *Iran Agricultural Research* 30: 47-60.
- Benavides MP, Gallego SM and Tomaro ML, 2005. Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17: 21-34.
- Bremner JM, 1996. Nitrogen total. Pp. 1085-1122. In: Sparks DL, Page AL, Helmke PA and Loeppert RH (ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 3- Chemical Methods*. 3rd ed. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
- Chapman HD, 1965. Cation exchange capacity. Pp. 891- 904. In: Black CA (ed.). *Methods of Soil Analysis, part 2- Chemical and Microbiological Properties, Number 9 in series Agronomy*. American Society of Agronomy. Inc., Madison, WI.
- Chapman HD and Pratt DF, 1961. *Methods of Analysis for Soils, Plants, and Waters*. University of California Deviation of Agricultural Science.
- Chorom M and Alizadeh A, 2009. Comparison of synthetic chelates and compost at enhancing phytoextraction of Cd, Ni and Pb from contaminated soil under canola cultivation. *Journal of Water and Soil* 23(2): 20-29.
- Farzanegan Z, Mir Seyed Hoseini H and Savaghebi Gh, 2007. Effect of using organic and inorganic amendments on increasing the absorption capacity of heavy metals in the soil for phytoremediation. First Conference of Environmental Engineering, February 19 and 20, University of Tehran, Tehran.
- Gee GW and Bauder JW, 1986. Particle size analysis, hydrometer method. Pp. 383- 411. In: Sparks DL, Page AL, Helmke PA and Loeppert RH (ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 3- Chemical Methods*. 3rd ed. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
- Ghorbani M and Karimian NA, 2016. Effect of vermiwash on growth, cadmium and microelements concentration of spinach in a loamy cadmium contaminated soil. *Applied Soil Research* 4(1): 91-102.

- Karami A and Shamsuddin ZH, 2010. Phytoremediation of heavy metals with several efficiency enhancer methods. *African Journal of Biotechnology* 9: 3689–3698.
- Li Yang Z, Jainjum Ch and Haiyan Ch, 2005. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead- Zinc mining are in Yunnan, China. *Environment International Journal* 31: 755-762.
- Lindsay WL and Norvell WA, 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*. 42: 421-428.
- Malekzadeh E, Alikhani HA, Savaghebi Firoozabadi GR and Zarei M, 2012. Bioremediation of cadmium-contaminated soil through cultivation of maize inoculated with plant growth-promoting rhizobacteria. *Bioremediation Journal* 16(4): 204-211.
- Marchiol L, Sacco P, Assolari S and Zebri G, 2004. Reclamation of polluted soil: phytoremediation potential of crop-related Brassica species. *Water, Air and Soil Pollution* 158: 345-356.
- Muddarisna1N and Siahaan BC, 2014. Application of organic matter to enhance phytoremediation of mercury contaminated soils using local plant species: a case study on small-scale gold mining locations in Banyuwangi of East Java. *Journal of Degraded and Mining Lands Management* 2(1): 251-258.
- Nelson DW and Sommers LE, 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 961-1010. In: Sparks DL, Page AL, Helmke PA and Loeppert RH (ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 3- Chemical Methods*. 3rd ed. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
- Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS and Dean LA, 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circ* 939: 1-18.
- Park JH, Lamb D, Paneerselvam P, Choppala G, Bolan N and Chung J, 2011. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials* 185: 549–574.
- Prabpai S, Charerntanyarak L, Siri B, Moore MR and Noller N, 2009. Effects of residues from municipal solid waste landfill on corn yield and heavy metal content. *Journal of Waste Management* 29: 2316-2320.
- Robinson BH, Mills TM, Petit D, Fung LE, Green SR and Clothier BE, 2000. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: implication for phytoremediation. *Plant and Soil* 227: 301-306.
- Rhoades JD, 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. Pp. 417-436. In: Sparks DL, Page AL, Helmke PA and Loeppert RH (ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 3- Chemical Methods*. 3rd ed. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
- Safari Anaraki N, Bostani AA and Qmidi H, 2014. Effect of amounts and times of replication of municipal solid waste compost on concentration of Pb, Ni and Cd in soil and maize plant (*Zea mays* L.). *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 4(3): 269-285.
- Scheper T, 2003. Organic matter. Pp. 57-58. In: *Advances in biochemical engineering/biotechnology*, Springer.
- Smith, R. 2009. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International* 35: 142-156.
- Tangahu BV, Sheikh Abdullah SR, Basri H, Idris M, Anuar N and Mukhlisin M, 2011. A review on heavy metals (as, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering* 2011: 1-31.
- Thomas GW, 1996. Soil pH and soil acidity. Pp. 475- 490. In: Sparks DL, Page AL, Helmke PA and Loeppert RH (ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 3- Chemical Methods*. 3rd ed. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
- Zhang H, Dang Z, Zheng LC and Yi XY, 2009. Remediation of soil co-contaminated with pyrene and cadmium by growing maize (*Zea mays* L.). China. *International Journal of Environmental Science and Technology* 6(2): 249-258.